



**FORMATO DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TESIS Y TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN,  
PARA OPTAR GRADOS ACADÉMICOS Y TÍTULOS PROFESIONALES EN EL  
REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL - UNASAM**

Conforme al Reglamento del Repositorio Nacional de Trabajos de Investigación – RENATI.  
Resolución del Consejo Directivo de SUNEDU N° 033-2016-SUNEDU/CD

**1. Datos del Autor:**

Apellidos y Nombres: Vargas Rimac Jimmy Alex

Código de alumno: 092.0904.306

Teléfono: 920898272

Correo electrónico: [jimmy192017@gmail.com](mailto:jimmy192017@gmail.com)

DNI o Extranjería: 46581148

**2. Modalidad de trabajo de investigación:**

Trabajo de investigación

Trabajo académico

Trabajo de suficiencia profesional

Tesis

**3. Título profesional o grado académico:**

Bachiller

Título

Segunda especialidad

Licenciado

Magister

Doctor

**4. Título del trabajo de investigación:**

CORRELACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA CORTANTE CON LA DENSIDAD Y CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO, UTILIZANDO EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO

**5. Facultad de:** Ingeniería Civil

**6. Escuela, Carrera o Programa:** Ingeniería Civil

**7. Asesor:**

Apellidos y Nombres: Milla Vergara Elio Alejandro

Teléfono: 944931238

Correo electrónico: [emillav@hotmail.com](mailto:emillav@hotmail.com)

DNI o Extranjería: 316662191

A través de este medio autorizo a la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, publicar el trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Institucional Digital, Repositorio Nacional Digital de Acceso Libre (ALICIA) y el Registro Nacional de Trabajos de Investigación (RENATI).

Asimismo, por la presente dejo constancia que los documentos entregados a la UNASAM, versión impresa y digital, son las versiones finales del trabajo sustentado y aprobado por el jurado y son de autoría del suscrito en estricto respeto de la legislación en materia de propiedad intelectual.

Firma: .....

D.N.I.: 46581148

30 / 10 / 2020

FECHA:

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
“SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO”  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**TESIS**

**“CORRELACIÓN DE LOS PARÁMETROS  
DE RESISTENCIA CORTANTE CON LA  
DENSIDAD Y CONTENIDO DE HUMEDAD  
DEL SUELO, UTILIZANDO EL ENSAYO DE  
CORTE DIRECTO”**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER:  
VARGAS RIMAC, JIMY ALEX**

**ASESOR:  
DR. ING. ELIO ALEJANDRO MILLA VERGARA**

**HUARAZ – ANCASH - PERÚ  
2019**

## **DEDICATORIA**

A mis queridos padres Lucila Rimac Bañez y Jovino Pablo Vargas Ramírez, quienes me enseñaron desde pequeño a luchar y alcanzar mis objetivos. ¡Los amo!

A mis queridos hermanos Anabel Vargas Rimac, Jaime Vargas Rimac, Norma Vargas Rimac, Nilton Vargas Rimac y Mirtha Vargas Rimac, por ser unas personas excepcionales quienes me han brindado su apoyo incondicional y su gran ejemplo.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por haberme dado la fuerza necesaria para no desfallecer y hoy culminar esta etapa.

También agradezco a la empresa EMV Laboratorio y Construcciones E.I.R.L. por permitirme realizar la ejecución de los ensayos propuestos en esta investigación de grado y por también generar en mí la necesidad de investigación en el tema. Igualmente, al Dr. Ing. Elio Alejandro Milla Vergara, tutor y guía en esta tesis por su apoyo y direccionamiento incondicional.

Finalmente extiendo mi agradecimiento a mis compañeros de trabajo EMV Laboratorios y construcción E.I.R.L, con quienes compartí dudas y conocimientos.

## INDICE

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
INDICE	4
RESUMEN	12
INTRODUCCION	14
CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION	15
1.1. SITUACION PROBLEMÁTICA	15
1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA	16
1.3. JUSTIFICACION	16
1.4. HIPOTESIS Y VARIABLES	17
1.4.1. HIPOTESIS	17
1.4.2. VARIABLES	17
1.5. DEFINICION DE TERMINOS.	18
1.6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION	23
1.6.1. GENERAL	23
1.6.2. ESPECIFICOS	23
1.7. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION	23
CAPITULO II. BASES TEORICA	27
2.1. VARIABLE INDEPENDIENTE: PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE	27
2.1.1. TEORÍA DE LA RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE, TEORÍA DE COULOMB – TERZAGHI	27
2.1.2. PRUEBA DE CORTE DIRECTO	33
2.2. VARIABLES DEPENDIENTES: PESO VOLUMETRICO Y CONTENIDO DE HUMEDAD	36
2.2.1. DISTRIBUCIÓN GRANULOMETRICA	36
2.2.2. EFECTO DE LA HUMEDAD	36
2.2.3. TAMAÑO DE LA MUESTRA	36
2.2.4. TIPO DE ENSAYO	37
2.2.5. TEORÍA DE TERZAGHI PARA LA CONSOLIDACIÓN VERTICAL	37
2.3. TEORÍA DE REGRESIÓN Y CORRELACIÓN	43
2.3.1. TEORÍA DE REGRESIÓN Y CORRELACIÓN SIMPLE	43
2.3.2. TEORÍA DE REGRESIÓN LINEAL MULTIPLE	51
CAPITULO III. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN	55
	4

3.1.	PERSPECTIVA METODOLOGIA Y TIPO DE INVESTIGACIÓN	55
3.2.	LIMITES DE LA INVESTIGACIÓN	55
3.3.	CONTEXTO Y UNIDAD DE ANALISIS: POBLACIÓN Y MUESTRA	55
3.4.	METODOS Y RECURSOS EMPLEADOS	56
3.4.1.	PROCEDIMIENTO DE RECOLECCION	56
3.4.2.	ANALISIS DE LOS DATOS	57
3.4.2.1.	NTP 339.171: MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS.	57
3.4.2.1.1.	DETERMINACIÓN DEL ANGULO DE FRICCIÓN Y COHESION PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 0.00%	60
3.4.2.1.2.	DETERMINACIÓN DEL ANGULO DE FRICCIÓN Y COHESION PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 5.00%	62
3.4.2.1.3.	DETERMINACIÓN DEL ANGULO DE FRICCIÓN Y COHESION PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 10.00%	63
3.4.2.1.4.	DETERMINACIÓN DEL ANGULO DE FRICCIÓN Y COHESION PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 15.00%	65
3.4.2.1.5.	DETERMINACIÓN DEL ANGULO DE FRICCIÓN Y COHESION PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 19.05%	67
3.4.2.2.	NTP 339.134: MÉTODO PARA LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS CON PROPÓSITOS DE INGENIERÍA (SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS, SUCS)	68
3.4.2.3.	NTP 339.128: MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANALISIS GRANULOMÉTRICO	69
3.4.2.4.	NTP 339.089: OBTENCIÓN EN LABORATORIO DE MUESTRAS REPRESENTATIVAS (CUARTEO)	70
3.4.2.5.	NTP 339.129: MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL LÍMITE LIQUIDO LÍMITE PLASTICO, E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS	71
3.4.2.6.	NTP 339.127: MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO	73
3.4.2.7.	NTP 339.139: DETERMINACIÓN DEL PESO VOLUMÉTRICO DE SUELO COHESIVO	74
3.4.2.8.	NTP 339.151: MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS DE UN SUELO	75
CAPITULO IV.	RESULTADOS Y DISCUSION	77

4.1.	CORRELACIÓN DE LOS PARAMETROS DE RESISTENCIA CORTANTE CON LA DENSIDAD DEL SUELO.	77
4.1.1.	CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS ANGULO DE FRICCIÓN ( $\phi$ ) (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 0.00 %)	77
4.1.2.	CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS COHESIÓN (C), (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 0.00 %)	82
4.1.3.	CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS ANGULO DE FRICCIÓN ( $\phi$ ) (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 5.00 %)	87
4.1.4.	CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS COHESIÓN (C), (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 5.00 %)	92
4.1.5.	CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS ANGULO DE FRICCIÓN ( $\phi$ ) (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 10.00 %)	97
4.1.6.	CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS COHESIÓN (C), (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 10.00 %)	102
4.1.7.	CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS ANGULO DE FRICCIÓN ( $\phi$ ) (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 15.00 %)	107
4.1.8.	CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS COHESIÓN (C), (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 15.00 %)	112
4.1.9.	CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS ANGULO DE FRICCIÓN ( $\phi$ ) (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 19.05 %)	117
4.1.10.	CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS COHESIÓN (C), (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 19.05 %)	122
4.2.	CORRELACIÓN DE LOS PARAMETROS DE RESISTENCIA CORTANTE CON EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO.	127
4.2.1.	CORRELACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN ( $\phi$ ) VS EL CONTENIDO DE HUMEDAD (CH), (PARA UN PESO UNITARIO DE 1.6 gr/cm <sup>3</sup> )	127
4.2.2.	CORRELACIÓN DE LA COHESIÓN (C) VS EL CONTENIDO DE HUMEDAD (CH), (PARA UN PESO UNITARIO DE 1.6 gr/cm <sup>3</sup> )	132
4.2.3.	CORRELACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN ( $\phi$ ) VS EL CONTENIDO DE HUMEDAD (CH), (PARA UN PESO UNITARIO DE 1.7 gr/cm <sup>3</sup> )	138
4.2.4.	CORRELACIÓN DE LA COHESIÓN (C) VS EL CONTENIDO DE HUMEDAD (CH), (PARA UN PESO UNITARIO DE 1.7 gr/cm <sup>3</sup> )	144
4.2.5.	CORRELACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN ( $\phi$ ) VS EL CONTENIDO DE HUMEDAD (CH), (PARA UN PESO UNITARIO DE 1.8 gr/cm <sup>3</sup> )	150

4.2.6.	CORRELACIÓN DE LA COHESIÓN (C) VS EL CONTENIDO DE HUMEDAD (CH), (PARA UN PESO UNITARIO DE 1.8 gr/cm <sup>3</sup> )	156
4.3.	GRAFICA TIEMPO CON DESPLAZAMIENTO NORMAL.	161
4.4.	CORRELACIÓN LINEAL MÚLTIPLE DE LOS PARAMETROS DE RESISTENCIA CORTANTE CON LA DENSIDAD Y CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO.	162
4.5.	CONTRASTACION DE HIPOTESIS	165
	CONCLUSIONES	166
	RECOMENDACIONES	167
	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA	168
	ANEXOS	
	ANEXO A: MEMORIA DE CÁLCULOS	
	ANEXO B: ENSAYOS ESTANDAR DE LABORATORIO	
	ANEXO C: ENSAYOS ESPECIALES DE LABORATORIO	
	ANEXO D: CALIBRACIÓN DEL EQUIPO DE CORTE DIRECTO	
	ANEXO E: PANEL FOTOGRÁFICO	

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1: Variables independientes</i> .....	17
<i>Tabla 2: Variables dependientes</i> .....	18
<i>Tabla 3: Masa mínima para ensayo de humedad con respecto al tamaño máximo de partícula de la muestra</i> .....	22
<i>Tabla 4: Angulo de fricción y cohesión para un contenido de humedad de 0.00%</i> .....	58
<i>Tabla 5: Angulo de fricción y cohesión para un contenido de humedad de 5.00%</i> .....	58
<i>Tabla 6: Angulo de fricción y cohesión para un contenido de humedad de 10.00%</i> .....	58
<i>Tabla 7: Angulo de fricción y cohesión para un contenido de humedad de 15.00%</i> .....	59
<i>Tabla 8: Angulo de fricción y cohesión para un contenido de humedad de 19.05%</i> .....	59
<i>Tabla 9: Clasificación de suelos</i> .....	69
<i>Tabla 10: Análisis granulométrico por tamizado</i> .....	69
<i>Tabla 11: Determinación del límite líquido</i> .....	72
<i>Tabla 12: Determinación del límite plástico</i> .....	72
<i>Tabla 13: Índice de plasticidad</i> .....	72
<i>Tabla 14: Contenido de humedad de un suelo</i> .....	73
<i>Tabla 15: Peso volumétrico de un suelo mediante el método de medición lineal</i> .....	74
<i>Tabla 16: Peso volumétrico de un suelo mediante el método de inmersión en agua</i> .....	75
<i>Tabla 17: Peso específico relativo de las partículas sólidas de un suelo</i> .....	76
<i>Tabla 18: Distribución de datos para el análisis de regresión lineal múltiple para determinar el ángulo de fricción interna con respecto al contenido de humedad y peso unitario</i> .....	163
<i>Tabla 19: Ecuación de correlación y parámetros estadísticos</i> .....	163
<i>Tabla 20: Distribución de datos para el análisis de regresión lineal múltiple para determinar la cohesión con respecto al contenido de humedad y peso unitario</i> .....	164
<i>Tabla 21: Ecuación de correlación y parámetros estadísticos</i> .....	164

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Deslizamiento de un cuerpo sólido – ángulo de rozamiento .....	19
Figura 2. Diagrama de fricción .....	28
Figura 3. Diagrama de falla, por esfuerzo cortante en plano de deslizamiento .....	29
Figura 4. Gráfico que expresa el corte máximo .....	31
Figura 5. Curva Intrínseca.....	32
Figura 6. Diagrama del arreglo para la prueba de corte directo. ....	34
Figura 7. Equipo para la prueba de corte directo .....	35
Figura 8. Esquema del depósito de suelo.....	38
Figura 9. Elemento diferencial de suelo.....	39
Figura 10. Relaciones $\epsilon$ vs. $\sigma'$ y $e$ vs. $\sigma'$ .....	41
Figura 11. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.3 gr/cm <sup>3</sup> . ....	60
Figura 12. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.4 gr/cm <sup>3</sup> . ....	60
Figura 13. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.5 gr/cm <sup>3</sup> . ....	61
Figura 14. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.6 gr/cm <sup>3</sup> . ....	61
Figura 15. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.7 gr/cm <sup>3</sup> . ....	61
Figura 16. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.4 gr/cm <sup>3</sup> . ....	62
Figura 17. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.5 gr/cm <sup>3</sup> . ....	62
Figura 18. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.6 gr/cm <sup>3</sup> . ....	62
Figura 19. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.7 gr/cm <sup>3</sup> . ....	63
Figura 20. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.8 gr/cm <sup>3</sup> . ....	63
Figura 21. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.6 gr/cm <sup>3</sup> . ....	63
Figura 22. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.7 gr/cm <sup>3</sup> . ....	64
Figura 23. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.8 gr/cm <sup>3</sup> . ....	64
Figura 24. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.9 gr/cm <sup>3</sup> . ....	64
Figura 25. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 2.0 gr/cm <sup>3</sup> . ....	65
Figura 26. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.5 gr/cm <sup>3</sup> . ....	65
Figura 27. Esfuerzo normal versus Esfuerzo tangencial para un PU = 1.6 gr/cm <sup>3</sup> . ....	65
Figura 28. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.7 gr/cm <sup>3</sup> . ....	66
Figura 29. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.8 gr/cm <sup>3</sup> . ....	66
Figura 30. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.9 gr/cm <sup>3</sup> . ....	66
Figura 31. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.7 gr/cm <sup>3</sup> . ....	67
Figura 32. <i>Esfuerzo</i> normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.8 gr/cm <sup>3</sup> . ....	67
Figura 33. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.9 gr/cm <sup>3</sup> . ....	67
Figura 34. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 2.0 gr/cm <sup>3</sup> . ....	68
Figura 35. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 2.1 gr/cm <sup>3</sup> . ....	68
Figura 36. Análisis granulométrico por tamizado.....	70
Figura 37. Obtención en laboratorio de muestras representativas (Cuarteo) .....	71
Figura 38. Límite líquido y límite plástico e índice de plasticidad. ....	72

Figura 39. Contenido de humedad del suelo.....	73
Figura 40. Método de medición lineal.....	74
Figura 41. Método de la inmersión en agua.....	75
Figura 42. Método de ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas sólidas de un suelo.....	76
Figura 43. Cuando $\beta_1 = 0$ ; $\phi(\text{estimado}) = 9.177+0\text{PU}$ .....	79
Figura 44. Cuando $\beta_0 = 0$ ; $\phi(\text{estimado}) = 0+14.15\text{PU}$ .....	79
Figura 45. Grafica $\phi$ vs PU.....	80
Figura 46. Cuando $\beta_1 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = -0.306 + 0\text{PU}$ .....	84
Figura 47. Cuando $\beta_0 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = 0+0.26\text{PU}$ .....	84
Figura 48. Grafica C vs PU.....	85
Figura 49. Cuando $\beta_1 = 0$ ; $\phi(\text{estimado}) = 13.296 + 0\text{PU}$ .....	89
Figura 50. Cuando $\beta_0 = 0$ ; $\phi(\text{estimado}) = 0 + 12\text{PU}$ .....	89
Figura 51. Grafica $\phi$ vs PU.....	90
Figura 52. Cuando $\beta_1 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = -0.530 + 0\text{PU}$ .....	94
Figura 53. Cuando $\beta_0 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = 0+0.36\text{PU}$ .....	94
Figura 54. Grafica C vs PU.....	95
Figura 55. Cuando $\beta_1 = 0$ ; $\phi(\text{estimado}) = 31.154 + 0\text{PU}$ .....	99
Figura 56. Cuando $\beta_0 = 0$ ; $\phi(\text{estimado}) = 0 + 1.78\text{PU}$ .....	99
Figura 57. Grafica $\phi$ vs PU.....	100
Figura 58. Cuando $\beta_1 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = -1.148 + 0\text{PU}$ .....	104
Figura 59. Cuando $\beta_0 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = 0+0.71\text{PU}$ .....	104
Figura 60. Grafica C vs PU.....	105
Figura 61. Cuando $\beta_1 = 0$ ; $\phi(\text{estimado}) = 26.452 + 0\text{PU}$ .....	109
Figura 62. Cuando $\beta_0 = 0$ ; $\phi(\text{estimado}) = 0 + 5.36\text{PU}$ .....	109
Figura 63. Grafica $\phi$ vs PU.....	110
Figura 64. Cuando $\beta_1 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = -0.315 + 0\text{PU}$ .....	114
Figura 65. Cuando $\beta_0 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = 0+0.21\text{PU}$ .....	114
Figura 66. Grafica C vs PU.....	115
Figura 67. Cuando $\beta_1 = 0$ ; $\phi(\text{estimado}) = 17.142 + 0\text{PU}$ .....	119
Figura 68. Cuando $\beta_0 = 0$ ; $\phi(\text{estimado}) = 0 + 9.12\text{PU}$ .....	119
Figura 69. Grafica $\phi$ vs PU.....	120
Figura 70. Cuando $\beta_1 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = -0.125 + 0\text{PU}$ .....	124
Figura 71. Cuando $\beta_0 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = 0+0.13\text{PU}$ .....	124
Figura 72. Grafica C vs PU.....	125
Figura 73. Cuando $\beta_1 = 0$ ; $\phi(\text{estimado}) = 31.693 + 0\text{CH}$ .....	129
Figura 74. Cuando $\beta_0 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = 0+0.225\text{CH}$ .....	129
Figura 75. Grafica $\phi$ vs CH.....	130
Figura 76. Cuando $\beta_1 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = 0.084 + 0\text{CH}$ .....	134
Figura 77. Cuando $\beta_0 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = 0-0.0062\text{CH}$ .....	134

Figura 78. Grafica C vs CH.....	135
Figura 79. Grafica C vs CH correlación cuadrática. ....	137
Figura 80. Cuando $\beta_1 = 0$ ; $\phi(\text{estimado}) = 33.594 + 0CH$ .....	140
Figura 81. Cuando $\beta_0 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = 0+0.021CH$ .....	140
Figura 82. Grafica $\phi$ vs CH. ....	141
Figura 83. Grafica C vs CH correlación cubica.....	143
Figura 84. Cuando $\beta_1 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = 0.1077 + 0CH$ .....	146
Figura 85. Cuando $\beta_0 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = 0 - 0.00344CH$ .....	146
Figura 86. Grafica C vs CH. ....	147
Figura 87. Grafica C vs CH correlación cuadrática. ....	149
Figura 88. Cuando $\beta_1 = 0$ ; $\phi(\text{estimado}) = 35.718 + 0CH$ .....	152
Figura 89. Cuando $\beta_0 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = 0 - 0.1014CH$ .....	152
Figura 90. Grafica $\phi$ vs CH. ....	153
Figura 91. Grafica C vs CH correlación cubica.....	155
Figura 92. Cuando $\beta_1 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = 0.168 + 0CH$ .....	158
Figura 93. Cuando $\beta_0 = 0$ ; $C(\text{estimado}) = 0 - 0.006CH$ .....	158
Figura 94. Grafica C vs CH. ....	159
Figura 95. Tiempo Vs. Desplazamiento para el $PU= 1.9 \text{ gr/cm}^3$ y $CH= 10.00\%$ . ....	161
Figura 96. Asentamiento total Vs. Carga normal para $PU= 1.9 \text{ gr/cm}^3$ y $CH= 10.00\%$ . ....	162

## **RESUMEN**

En este trabajo de investigación, se determinó la correlación que existe entre los parámetros de resistencia cortante con las variables de densidad y contenido de humedad del suelo, utilizando el ensayo de corte directo en laboratorio.

En la evaluación realizada, se ha considerado una muestra de suelo de la ciudad de Huaraz del tipo Arena arcillosa con grava (SC), con una cantidad aproximada de 20 kg de material a una profundidad de 2.00 m a 3.10 m.

La obtención de la estimación de los parámetros de resistencia al corte consistió en someter 75 especímenes en el ensayo de corte directo, agrupados en 5 diferentes estados de contenidos de humedad, a las cuales se le vario en 5 diferentes densidades por cada 3 especímenes.

Con los resultados de los ensayos de corte directo se logró obtener cuatro correlaciones: ángulo de fricción versus densidad, cohesión versus densidad, ángulo de fricción versus contenido de humedad y cohesión versus contenido de humedad; y estimaciones de dos correlaciones lineales múltiples: del ángulo de fricción interna con respecto a la densidad y contenido de humedad, cohesión con respecto a la densidad y contenido de humedad.

Con la correlación ángulo de fricción versus la densidad versus el contenido de humedad se podrá determinar el ángulo de fricción en un suelo en específico que puede haber cambiado en el tiempo con respecto al grado de compactación y contenido de humedad, mientras que para el caso de la cohesión no se podrá determinar con las dos variables juntas que son la densidad y el contenido de humedad.

### **PALABRAS CLAVES:**

Angulo de fricción, cohesión, contenido de humedad, densidad.

## **ABSTRACT**

In this research, the correlation between the parameters of shear resistance with the variables of density and moisture content of the soil was determined, using the direct laboratory cut test.

In the evaluation carried out, a sample of soil from the city of Huaraz of the clay-like sand with gravel (SC) type was considered, with an approximate quantity of 20 kg of material at a depth of 2.00 m to 3.10 m.

Obtaining the estimation of the parameters of resistance to the cut consisted of submitting 75 specimens in the direct cutting test, grouped into 5 different states of moisture content, which was varied in 5 different densities for every 3 specimens.

With the results of the direct cutting tests, four friction angle versus density, cohesion versus density, friction angle versus moisture content, cohesion versus moisture content correlations were obtained, the linear correlation was not located.

With the friction angle correlation versus density versus moisture content, the angle of friction in a specific soil that may have changed over time with respect to the degree of compaction and moisture content can be determined, while in the case of Cohesion cannot be determined with the two variables together which are density and moisture content.

### **KEYWORDS:**

Friction angle, cohesion, moisture content, density.

## INTRODUCCION

Todos los materiales, al estar expuestos a cambios constantes en las condiciones de densidad y contenido de humedad, que pueden o no ser dependientes del tiempo, experimentan variación en los valores de los parámetros de resistencia al corte el cual es determinado en el ensayo de corte directo en laboratorio.

Estos parámetros de resistencia al corte de un suelo dependerán, no solo del tipo de suelo y su estado de consistencia, sino también de la forma en que es cargado, de su ubicación estratigráfica, etc. Es necesario estudiar estas características del suelo, debido a que en general estos generan diferentes ángulos de fricción y cohesión a la hora de realizar el ensayo.

En el ensayo de corte directo se puede evaluar, la forma en que es cargada un suelo, ya que este ensayo consiste básicamente en someter tres muestras de suelo de sección cuadrada de 6x6cm y 2 cm de espesor, confinada lateralmente, dentro de una caja metálica, cada muestra bajo una diferente carga normal y a un esfuerzo tangencial, para determinar el efecto sobre el desplazamiento y las propiedades resistentes.

Sin embargo, nosotros evaluaremos un solo tipo de suelo, pero con diferentes estados de consistencia, esto quiere decir que haremos variar la composición de la masa del suelo, que está compuesta por la fase sólida que forma un esqueleto granular y los vacíos que la misma encierra, los cuales algunos pueden estar llenos de gas/aire y otros de líquido/agua. Además, donde se considera que tanto la masa sólida como el agua son incompresibles.

Para lograr obtener varios estados de consistencia, se sometieron las muestras a diferentes grados de compactación haciendo variar las fases de los suelos, estos grados de compactación se realizaron según las densidades ya establecidas para cada contenido de humedad.

## **CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION**

### **1.1. SITUACION PROBLEMÁTICA**

Los parámetros de resistencia cortante de un terreno son indispensables en cualquier construcción u obra de ingeniería civil, los cuales son obtenidos a partir de ensayos de corte directo en laboratorio.

El ensayo de corte directo es el más antiguo de los ensayos de la Mecánica de Suelos y, todavía hoy, se continúa utilizando, debido a su sencillez de ejecución. Sin embargo, para poder realizar esta prueba se requiere que las muestras sean de excelente calidad, lo más representativa de la situación real en el campo; deben ser tomadas lo más cercanamente posibles, como las condiciones del ensayo incluyendo el esfuerzo normal y la humedad ambiental son seleccionadas para que representen las condiciones de campo que vienen siendo investigadas (NTP 339.171).

Estos ensayos de laboratorio son realizados en todos los materiales de suelos, como suelos inalterados, remodelados o compactados. Hay sin embargo un inconveniente a la hora de hacer la prueba de corte directo que es, el estado en que se traen las muestra, muestras que no son representativas a las condiciones de campo por diferentes motivos, como la forma de transportar las muestras y no tener cuidado

a la hora de proteger adecuadamente las muestras que hacen modificar el contenido de humedad o el grado de compactación en la que se encuentran, también la muestra no puede ser representativa cuando el tiempo de muestreo ya haya cambiado el cual hace que el contenido de humedad y el grado de compactación cambien.

Debido a la incertidumbre que se tiene en el estado que se encuentra el espécimen a evaluar, la presente investigación busca determinar los parámetros de resistencia cortante haciendo variar tanto la densidad como el contenido de humedad del espécimen para así obtener una ecuación que nos permita relacionar el Angulo de fricción interna ( $\phi$ ) y la cohesión ( $c$ ) con tan solo conocer la densidad de campo y el contenido de humedad del espécimen al momento de la ejecución.

Esta investigación también permitió conocer las relaciones que se debe de cumplir al finalizar el ensayo de corte directo, como es el caso de la linealidad que debe de existir entre el asentamiento total final versus carga normal de los tres especímenes a ensayar, como también la linealidad que debe de existir entre el contenido de humedad final versus carga normal de los tres especímenes.

## **1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA**

¿Cuál es la correlación entre los parámetros de la resistencia cortante con la densidad y el contenido de humedad de un suelo en específico?

## **1.3. JUSTIFICACION**

La resistencia al corte es imprescindible para la determinación de la capacidad de carga en bases y fundaciones de estructuras como muros de contención, estabilidad de taludes, diques de tierra quienes se verán afectados por el empuje que generan las diferentes capas de suelo o cimentaciones en edificación que se verán afectados

inmediatamente después de la construcción, esto debido a que el terreno es presionado por carga externa de la edificación.

De lo anterior, se desprende la importancia del tipo de investigación que se va realizar, investigación en la cual es posible determinar los parámetros de resistencia al corte con tan solo conocer la densidad de campo y el contenido de humedad en la que se encuentra el espécimen, esto contribuirá a la evaluación de los valores de resistencia cortante en el preciso momento de realizar el muestreo del suelo, para así efectuar diseños técnicos y económicos que representen una alternativa ingenieril.

## 1.4. HIPOTESIS Y VARIABLES

### 1.4.1. HIPOTESIS

Existe una correlación lineal entre los parámetros de resistencia cortante con la densidad y contenido de humedad del suelo.

### 1.4.2. VARIABLES

*Tabla 1: Variables independientes.*

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
<b>VARIABLE INDEPENDIENTE:</b> Parámetros de resistencia al corte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Angulo de fricción interna</li> <li>• Cohesión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método de ensayo normalizado para el ensayo de corte directo de suelos bajo condiciones consolidadas no drenadas (NTP 339.171).</li> <li>• Método para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de suelos, SUCS) (NTP 339.134).</li> <li>• Fuerza normal.</li> <li>• Tensión de corte (<math>\tau</math>).</li> <li>• Método de ensayo normalizado para el ensayo de corte directo de suelos bajo condiciones consolidadas no drenadas (NTP 339.171).</li> <li>• Método para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de suelos, SUCS) (NTP 339.134).</li> <li>• Fuerza normal.</li> <li>• Tensión de corte (<math>\tau</math>).</li> <li>• Deformación (<math>\epsilon</math>).</li> </ul>

Tabla 2: Variables dependientes.

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
<b>VARIABLE DEPENDIENTE 01:</b> densidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peso entre volumen de la muestra a investigar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método de ensayo estándar para la densidad y el peso unitario del suelo in-situ mediante el método del cono de arena (NTP 339.143).</li> <li>• Determinación del peso volumétrico de suelos cohesivos (NTP 339.139).</li> </ul>
<b>VARIABLE DEPENDIENTE 02:</b> Contenido de humedad.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de agua.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo (NTP 339.127).</li> </ul>

## 1.5. DEFINICION DE TERMINOS.

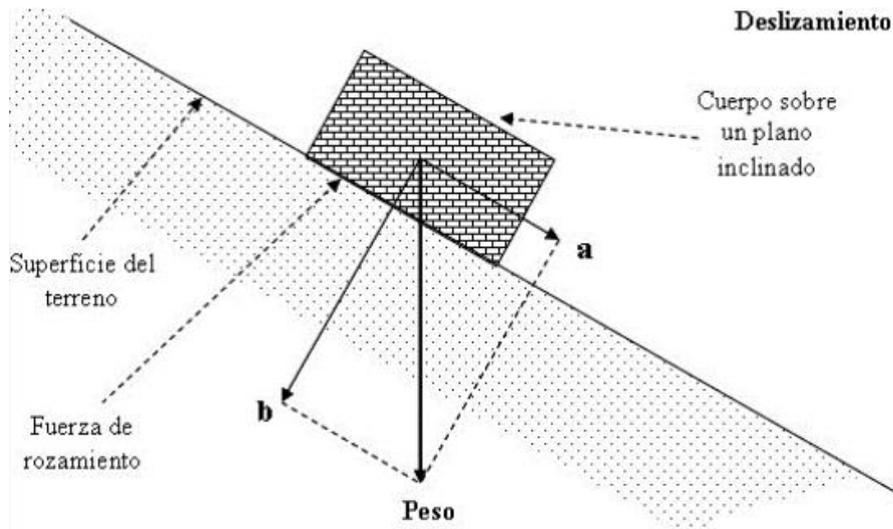
### Ángulo de fricción:

El ángulo de fricción interna “es la representación matemática del coeficiente de rozamiento”. (Suárez Díaz, 1998, pág. 81).

De acuerdo con Bilz (Citado por Suárez Díaz, 1998), el ángulo de fricción depende de varios factores, de los cuales cuentan entre los más importantes los que se enumeran a continuación:

1. El tamaño de los agregados.
2. La forma de los agregados.
3. La distribución de los tamaños de granos.
4. La densidad.

Joan Franchi, realiza una explicación amplia, didáctica e interesante del ángulo de rozamiento interno, por medio de una ilustración (Figura 1) que ejemplifica el rozamiento sobre un plano de inclinación variable de un sólido de geometría regular. Veamos:



**Figura 1. Deslizamiento de un cuerpo sólido – ángulo de rozamiento.**  
Fuente: Franchi, 2014

Para Franchi, este ejemplo contribuye al significado del ángulo de rozamiento, pues permite visualizar un plano (inclinado) con inclinación variable – igual al plano de rotura – sobre el cual se dispone un sólido – de geometría regular – partiendo de la horizontal, se incrementa progresivamente el ángulo del plano inclinado hasta que el sólido inicia el deslizamiento: “El vector peso puede ser descompuesto en dos vectores en relación al plano:  $a$  (paralelo al plano, y correspondiente a la fuerza tangencial) y  $b$  (perpendicular al mismo, correspondiente a la fuerza normal). Si  $a$  supera a la fuerza de rozamiento ( $b \cdot \operatorname{tg} \varphi$ ), el cuerpo iniciará el deslizamiento pendiente abajo cuando la inclinación del plano sea  $i = \varphi$ ” (Franchi, 2014).

De forma que este ejemplo basado en la teoría general de sólidos puede extenderse a los suelos considerando que el rozamiento entre granos aislados corresponde al ángulo  $\varphi$ . “No obstante, la movilización de los granos a pequeña escala no depende solo de su rozamiento mutuo, si no de la traslación necesaria entre las partículas para posibilitar el movimiento relativo de dos masas de suelo que deslizan una respecto a la otra, separadas por una superficie de rotura (debido a lo cual el rozamiento interno del suelo es superior al rozamiento entre partículas)”.

Concluye el autor afirmando que, en el valor del rozamiento interno del suelo, constituye un elemento fundamental la forma en que las partículas se encuentran dispuestas unas con otras, por cuanto más compactada sea la forma de las partículas y más denso sea el suelo, mayor será su rozamiento interno, y por consiguiente su resistencia al corte.

**Cohesión:**

“La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo” (Suárez Díaz, 1999, pag.82). En el escenario de la mecánica de suelos, la cohesión es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación, mientras que en el terreno de la física el mismo termino se utiliza para representar la tensión. Por consiguiente, la cohesión se puede definir como la adherencia entre las partículas del suelo debido a la atracción entre ellas en virtud de las fuerzas moleculares internas (Campos Rivera, Gómez Castro y Torres Flórez, 2006, pág. 39).

El concepto de cohesión se encuentra estrechamente ligado a la permeabilidad de los suelos y al estado energético del agua. En este sentido, es preciso tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

Las fuerzas básicas responsables de la retención y movimiento del agua en el suelo, se define como cohesión y adhesión. La fuerza de cohesión es la atracción entre moléculas de agua, mientras la adhesión es la atracción de las moléculas con la superficie sólidas. La fuerza de adhesión hace que algunas moléculas de agua estén rígidamente unidas a las partículas de suelo y se llama agua absorbida; en cambio las moléculas unidas por fuerzas de cohesión sobre superficie de los granos de suelo pueden ser fácilmente removidas. Las fuerzas de cohesión y adhesión juntas regulan el movimiento de agua. En suelos arcillosos la adhesión y cohesión ejercen sus fuerzas

sobre sus propiedades de plasticidad. (Campos Rivera, Gómez Castro y Torres Flórez, 2006, pág. 39)

La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en la mecánica de suelos. La cohesión en la mecánica de suelos, es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación entre las partículas, mientras que, en la física, este término se utiliza para representar la resistencia a la tensión (Lambe y Whitman, 1984, p. 82).

**Densidad del suelo:**

Se considera el peso del suelo más agua por unidad de volumen. Depende del peso de los elementos sólidos, de la porosidad y el grado de saturación del suelo.

La obtención de la densidad en campo para la presente investigación, se ha realizado a través de método de cono de arena, lo cual está basado en la NTP 339.143. Después de realizado la calibración necesaria, se procede al ensayo de campo: la densidad aparente es una propiedad aplicada en materiales porosos como suelos, polvo y solidos granulares entre otros, los cuales forman cuerpos heterogéneos con intersticios de aire u otra sustancia normalmente más ligera. Se puede definir como la masa de muchas partículas de material dividido por el total de volumen que ocupan, incluyendo los espacios entre partículas. De forma que la densidad del material poroso si se compactase (Lambe y Whitman 1984, p. 42).

**Contenido de humedad:** Volumen de agua de un material determinado bajo ciertas condiciones y expresado como porcentaje de la masa del elemento húmedo, es decir, la masa original incluyendo la sustancia seca y cualquier humedad presente (Lambe y Whitman, 1984, p.41).

*Tabla 3: Masa mínima para ensayo de humedad con respecto al tamaño máximo de partícula de la muestra.*

<b>Máximo tamaño de partícula (pasa el 100%)</b>	<b>Tamaño de malla estándar</b>	<b>Masa recomendada de espécimen húmedo reportados <math>\neq</math> 0.1%</b>	<b>Masa mínima de ensayo para CH reportados <math>\neq</math> 1%</b>
2 mm o menos	2.00 mm	20 gr	20 gr
4.75 mm	4.76 mm	100 gr	20 gr
9.5 mm	9.52 mm	500 gr	50 gr
19.0 mm	19.1 mm	2.50 kg	250 gr
37.5 mm	38.1 mm	10 kg	1 kg
75.0 mm	72.2 mm	50 kg	5kg

**Granulometría:** El conocimiento de la composición granulométrica de un suelo grueso sirve para discernir sobre la influencia que puede tener en la densidad del material compactado. El análisis granulométrico se refiere a la determinación de la cantidad en porciento de los diversos tamaños de las partículas que constituyen el suelo. Para el conocimiento de la composición granulométrica de un determinado suelo existen diferentes procedimientos. Para clasificar por tamaño las partículas gruesas el procedimiento más expedito es el del tamizado. Sin embargo, al aumenta la finura de los granos el tamizado se hace cada vez más difícil, teniendo entonces que recurrir a procedimientos por sedimentación. Conociendo la composición granulométrica del material, se le representa gráficamente para formar la llamada curva granulométrica del mismo (Villalaz, 1990, p. 57)

**Limite líquido (LL):** contenido de humedad con el cual el suelo deja de ser líquido y pasa a plástico (Lambe y Whitman, 1984, p.45).

**Limite plástico (LP):** Contenido de humedad con el cual el suelo deja de ser plástico y se convierte en semiplástico (Lambe y Whitman, 1984, p.45).

**Índice de plasticidad (IP):** Es el intervalo de humedad en el estado plástico. Se determina por la diferencia entre LL y LP (Lambe y Whitman, 1984, p.45).

## **1.6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION**

### **1.6.1. GENERAL**

- ✓ Obtener la correlación de los parámetros de resistencia cortante con la densidad y contenido de humedad del suelo.

### **1.6.2. ESPECIFICOS**

- ✓ Obtener la correlación lineal múltiple de los parámetros de resistencia cortante con la densidad y contenido de humedad del suelo.
- ✓ Obtener la gráfica tiempo con desplazamiento normal.

## **1.7. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION**

Para el presente estudio se tomaron como referencia las siguientes investigaciones:

De Barcia, González, Sulbaran, Ucar (2014) establecen que:

La relación entre el ángulo de fricción interna  $\phi$ , la densidad relativa  $D_r$  (índice de densidad  $I_d$ ) y la relación de vacíos ( $e$ ) en suelos granulares. Los datos obtenidos de la investigación provienen de suelos de origen sedimentario aluvial y arcilloso correspondientes a la meseta de Mérida-Venezuela, donde se realizaron calicatas en diferentes puntos del área urbana. En la primera etapa se realiza el estudio experimental de cada una de las muestras, teniendo en cuenta la densidad natural del sitio, las propiedades índices del suelo, caracterización del mismo y ensayos como corte directo, densidad relativa y compacidad. Se analizan los resultados obtenidos de estudios experimental, relacionándolos gráficamente entre los parámetros obtenidos para observar la similitud con expresiones obtenidas por otros autores como Meyerhof (1956), Cauquot (1969) y

Giraudet (citado por Coset J y Sanglerat G, 1975) entre otros. A través de esta se encontró una gran similitud en las ecuaciones aquí obtenidas con los datos experimentales al aplicar el método de los mínimos cuadrados. Cabe destacar que los referidos investigadores realizaron su trabajo con arenas, mientras que en este estudio las muestras son suelos granulares gravosos con un % de finos mayor del 5%. Adicionalmente, se encontraron dos nuevas expresiones que relacionan los parámetros del objetivo principal con las expresiones de masa y volúmenes de la mecánica de suelos. Las ecuaciones obtenidas en esta investigación se sometieron a un análisis estadístico a través del programa de simulación Crystal Ball, con la finalidad de obtener los parámetros más sensibles. Por otro lado, se llevó a cabo una comparación entre la densidad máxima seca obtenida con el ensayo de compactación y la densidad máxima seca obtenida en la mesa vibradora, resultando que el máximo peso unitario seco al compararlo por vibración es aproximadamente un 80% respecto al Próctor modificado.

Zamora C.J., Cristancho F. (2008) indican que:

Dada su importancia en varios campos de investigación, la clasificación, retención y movimiento del agua en el suelo ha llamado la atención de muchos investigadores durante el último siglo. En este trabajo se investiga el efecto de la humedad sobre las propiedades físicas del suelo tales como la densidad o la conductividad hidráulica. Además, se exploran algunos métodos para la medición indirecta de humedad. Como resultado de las mediciones de humedad se encontró que las sondas de resistencia eléctrica tienen un tiempo de respuesta grande (días) y la respuesta de la sonda de neutrones en arenas es una función cuadrática con el contenido de humedad del suelo.

Shuan Lucas (2011) señalan que:

La presencia de arenas especiales en el Perú en las cuales se han registrado problemas de colapso, licuación, cementación y otros, es

una evidencia de la influencia que tiene la matriz que las engloba y que condiciona su comportamiento.

Para la investigación de estos materiales es necesario la ejecución de ensayos in situ y de laboratorio empleando equipos gigantes para el ensayo de especímenes con su granulometría real; en nuestro medio son escasos los equipos con tales características.

Considerando la limitación para el ensayo de las gravas con su granulometría completa, en el presente trabajo se desarrolla una investigación consistente en el ensayo de una grava pobremente gradada de granulometría reducida a las fracciones comprendidas entre los tamices N° 4 y 1/4" factible de ensayar en laboratorio.

A la grava se le adiciono porcentajes variables de matriz para llenar progresivamente los vacíos y analizar la influencia en sus parámetros de resistencia al corte como consecuencia de la presencia de la matriz. Para estos fines se desarrolló una serie de ensayos de corte directo en la mezcla de grava y matriz. Para obtener los parámetros  $C$  y  $\phi$  en condiciones drenadas, las matrices utilizadas fueron arenas y suelos finos.

A medida que se incrementa la matriz en la grava, se produce una reducción en la relación de vacíos y consecuentemente el aumento del peso unitario seco. En la investigación se establece que el efecto es una reducción paulatina del ángulo de fricción interna relacionada al porcentaje de matriz empleado y un aumento de la cohesión, infiriendo propiedades de los suelos finos.

INDECI – PNUD (1994) indican que:

Las Ciudades principales del Departamento de Ancash, Huaraz y Chimbote, inician estudios amplios e integrales ante los peligros naturales, en especial en sus características geomorfológicas y físicas de suelos, a partir del catastrófico terremoto ocurrido el 31 de mayo de

1970, que afectó el norte del País, en que se incluye la zona del presente estudio: La Ciudad de Huaraz.

Esta situación de desastres determinó la urgencia de rehabilitar, reconstruir y desarrollar la zona afectada por el sismo, estableciendo el gobierno peruano la Comisión para la Reconstrucción y Rehabilitación de la Zona Afectada por el sismo (CRYRZA), institución que durante el período 1970-1972, realizó estudios técnicos detallados en el ámbito de la Ciudad de Huaraz sobre el campo de geología, geofísica, mecánica de suelos, microtrepidaciones y evaluación de daños, información valiosa que requería la implementación del nuevo Plan Regulador que elaboró la firma Bustamante, Williams & Asociados bajo encargo de la Comisión de Reconstrucción (CRYRZA), dentro del proceso de reconstrucción de la Ciudad de Huaraz.

La actual situación referente al conocimiento de los peligros físicos que amenazan las áreas urbanas y de expansión urbanística de la Ciudad de Huaraz, específicamente los distritos de Restauración e Independencia, indica que se tiene información aislada en diversos puntos y que coincide con aquellas zonas para las cuales se desarrolló un Estudio de Mecánica de Suelos o un Estudio específico de Peligros por variadas razones para una obra importante y de características particulares; sin embargo, para aquellas zonas en las cuales se tiene un uso exclusivamente residencial y con posibilidad de expansión urbanística al futuro aún no se cuenta con una información racional zonificada que permita su aplicación práctica en la Planificación urbana adecuada de los distritos de interés.

## **CAPITULO II. BASES TEORICA**

### **2.1. VARIABLE INDEPENDIENTE: PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE**

#### **2.1.1. TEORÍA DE LA RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE, TEORÍA DE COULOMB – TERZAGHI**

Se define a la resistencia al corte, o resistencia al esfuerzo cortante de un suelo como el valor máximo, o límite, de la resistencia al corte que se puede inducir dentro de su masa antes de que ceda. El valor límite del esfuerzo cortante está influido tanto por la magnitud como por la velocidad de deformación, así como por la historia de esfuerzos del suelo.

La resistencia al corte del suelo no puede considerarse como un parámetro único y constante, ya que depende de su naturaleza, estructura, enlace, nivel de deformación, etc. Así como muy especialmente de su estado tensional y de la presión del fluido que rellena sus poros (Gonzáles de Vallejo, 2004, p. 74).

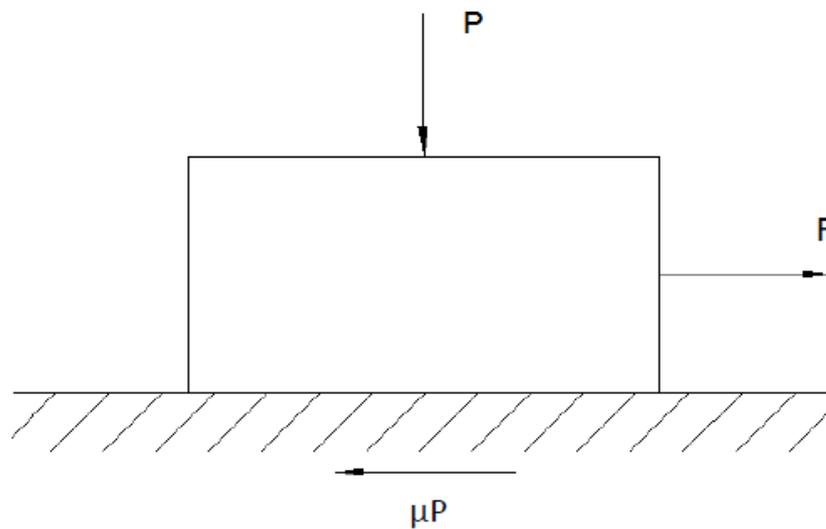
González Villalaz, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Otero, C. (2004)

Indican:

Que Coulomb fue el primero que trató de explicar el origen de la resistencia al corte de los suelos. En 1776 observó que, si el empuje que produce un suelo contra un muro de contención produce un ligero movimiento del muro, en el suelo que está retenido se forma un plano

de deslizamiento esencialmente recto. Basó su teoría en dos conceptos:

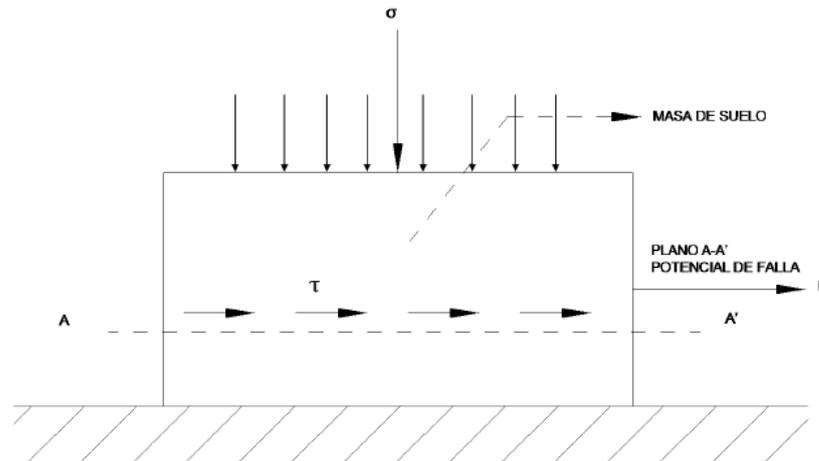
- Fricción entre partículas: La resistencia al corte del suelo basado en principios elementales de la física. En la Figura 2 se observa que la fuerza  $F$  produce un desplazamiento, que es contrarrestado por la fuerza  $\mu P$ . La fuerza  $\mu P$  es la representación de roce entre ambas superficies y es directamente proporcional a la fuerza  $P$ , ya que  $\mu P$  es una constante de roce, diferente para cada superficie.



**Figura 2. Diagrama de fricción**

Fuente: González Villalaz, Ferrer, Ortuño & Otero (2004)

- Los suelos fallan por esfuerzos cortantes a lo largo de planos de deslizamientos y regidos por el mecanismo de la fricción mencionada anteriormente, por lo menos en cierto tipo de suelos. En la Figura 3 generaremos este plano como A-A', pero a la vez transformaremos las fuerzas actuantes en esfuerzos al dividir las por el área sobre la cual actúan, obteniéndose  $\sigma$  para  $P$  y generándose un esfuerzo interno  $\tau$  producto de la fuerza  $F$ .



**Figura 3. Diagrama de falla, por esfuerzo cortante en plano de deslizamiento**  
 Fuente: González Villalaz, Ferrer, Ortuño, Otero (2004)

Coulomb postuló que la máxima resistencia al corte,  $\tau$ , en el plano de falla está dada por:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan\Phi \quad (1)$$

Dónde:  $\sigma$  es el esfuerzo normal total en el plano de falla

$\Phi$  es el ángulo de fricción del suelo

$c$  es la cohesión del suelo

Esta es una relación empírica y basada en los conceptos anteriores nombrados, con la inclusión de un término de cohesión  $c$  para incluir la cohesión propia del suelo arcilloso.

Esta ecuación no produjo los resultados esperados, ya que el comportamiento del suelo no concordaba con lo que Coulomb planteaba en su modelo matemático. Esto se debía principalmente a que los suelos no están compuestos en un cien por ciento de materia sólida, también están conformados por agua, la cual aporta, en cierto grado, resistencia temporal a la masa de suelo. Fue Terzaghi quien añadió a la fórmula de Coulomb este concepto, el cual fue llamado “principio de

esfuerzo efectivo”, que matemáticamente se representa mediante la ecuación:

$$\sigma = \sigma' + \mu \quad (2)$$

Dónde:  $\mu$ : presión intersticial, o presión de poros.

$\sigma'$ : esfuerzo efectivo

Se hizo evidente entonces que, dado que el agua no puede soportar esfuerzo cortante, la resistencia al corte de un suelo debe ser únicamente el resultado de la fricción entre las partículas que lo componen, y su magnitud depende únicamente de la magnitud de los esfuerzos efectivos que soportan estas. Por tanto, cuando más grande sea el esfuerzo efectivo normal a un plano de falla potencial, mayor será la resistencia al corte en dicho plano.

Entonces, si se expresa la ecuación de Coulomb en términos de esfuerzo efectivo, se tiene:

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan\phi \quad (3)$$

En la cual los parámetros  $c'$  y  $\phi'$  son propiedades de la estructura del suelo, denominadas cohesión efectiva y ángulo de fricción efectiva, respectivamente. Esta ecuación es válida para suelos cohesivos. Para suelos granulares, como no existe cohesión, la ecuación se simplifica a:

$$\tau = \sigma' \cdot \tan\phi \quad (4)$$

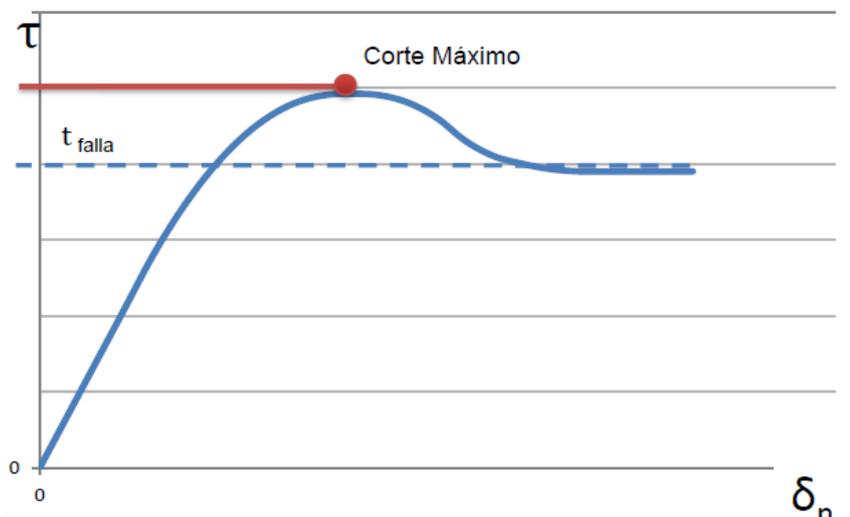
En vista que la resistencia al corte es netamente producto de los esfuerzos efectivos que se generan en la masa de suelo, es correcto realizar los análisis en términos de esfuerzo efectivo, aunque en ciertas circunstancias es válido analizar los problemas de ingeniería bajo la perspectiva de esfuerzos totales. Por tanto, la ley de Coulomb posee dos componentes

fácilmente identificables que colaboran a la resistencia al corte de suelos:

- Fricción ( $\tan\phi$ ), que principalmente es el aporte de la trabazón entre partículas y el roce entre ellas cuando están sometidos a esfuerzos normales.
- Cohesión ( $c$ ), que se debe a fuerzas internas electroquímicas que mantienen unidas a las partículas en una masa.

Como en la ecuación  $\tau_f = c' + \sigma'_n \cdot \tan\phi$  existe dos cantidades desconocidas ( $c'$  y  $\phi$ ), se requiere por lo menos un par de datos correspondientes al esfuerzo normal y al corte de falla para resolver el sistema de ecuación.

Si se grafica la tensión de corte ( $\tau$ ) en función de la deformación horizontal ( $\delta$ ) en el plano de esta tensión de corte para un suelo denso en condición drenada, se obtiene el grafico de la Figura 4.

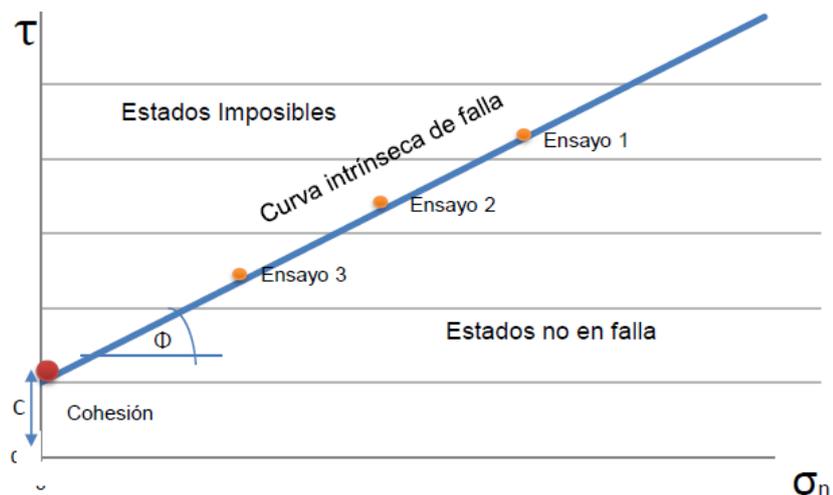


**Figura 4. Gráfico que expresa el corte máximo**  
Fuente: González Villalaz, Ferrer, Ortuño & Otero (2004)

De la curva presente en la Figura 4, se aprecia un valor máximo del corte aplicado correspondiente al instante en que las partículas en este suelo denso se “sueltan”, por lo tanto,

disminuye el roce interno entre ellas, y a su vez disminuye la resistencia al corte de este suelo hasta alcanzar la falla con un valor de esfuerzo de corte " $\tau_{falla}$ ".

Los valores de resistencia al corte se suelen obtener realizando como mínimo un ensayo de tres probetas idénticas de un mismo suelo aplicando distintas presiones normales, los datos son llevados a un gráfico en función de la tensión normal ( $\sigma_n$ ). Se obtiene así una recta llamada recta intrínseca, en la cual el ángulo de formado por esta con el eje de las abscisas es llamado ángulo ( $\phi$ ) (ángulo de fricción interno del suelo) y la ordenada hasta el origen es el valor  $c$  (cohesión del suelo). El grafico generado es similar al expuesto en la Figura 5.



**Figura 5. Curva Intrínseca**

Fuente: González Villalaz, Ferrer, Ortuño & Otero (2004)

El área bajo la curva representa distintas combinaciones de  $\tau$  y  $\sigma_n$  en las cuales el suelo no falla, la curva intrínseca representa las combinaciones de  $\tau$  y  $\sigma_n$  que producen la falla del suelo, y el área sobre esta recta son los estados de esfuerzo imposible de alcanzar ya que el suelo falla antes de llegar a ellos.

Esta resistencia al corte, medida por medio de este ensayo depende de la cohesión ( $c$ ) del suelo y de su fricción interna, donde la cohesión es la atracción entre las partículas originales

por las fuerzas moleculares y las películas de agua (por lo tanto variara según su humedad) y la fricción interna es la resistencia al deslizamiento causado por el roce entre la granulometría, formada de las partículas y de la velocidad del ensayo y de la permeabilidad de los suelos, pues uno de los parámetros determinados es la presión intersticial del agua (presión de poros), la cual está ligada directamente a las condiciones del ensayo.

La desventaja de este ensayo es que como se determina el plano de falla a priori, no es posible conocer los esfuerzos en otros planos, salvo a que sean ensayados.

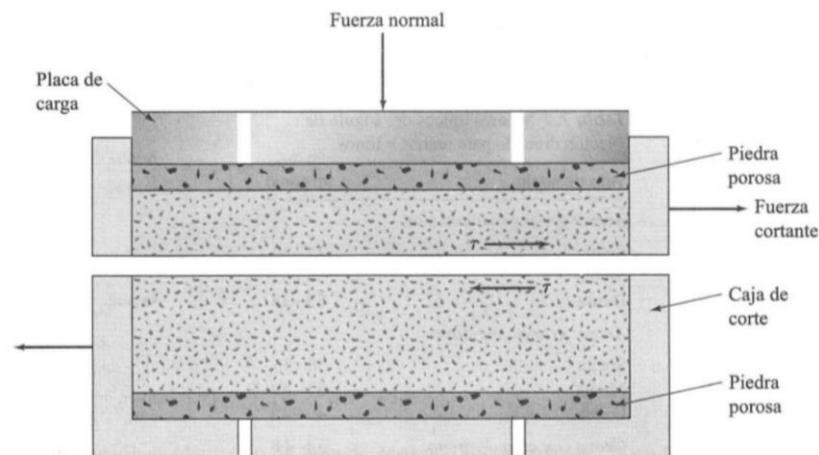
### **2.1.2. PRUEBA DE CORTE DIRECTO**

Braja M. Das (2001) indican que:

La prueba de corte directo es más antigua y simple. Un diagrama del aparato para la prueba de corte directo se muestra en la Figura 6. El equipo consiste en una caja de corte metálico en la que se coloca el espécimen. Las muestras pueden ser cuadradas o circulares. El tamaño de los especímenes generalmente usados es aproximado de 20 a 25 cm<sup>2</sup> transversalmente de 25 a 30 mm de altura. La caja está cortada horizontalmente en dos partes. La fuerza normal sobre el espécimen se aplica desde la parte superior de la caja de corte. El esfuerzo normal sobre los especímenes debe ser tan grande como 1000 kN/m<sup>2</sup>. La fuerza cortante es aplicada moviendo una mitad de la caja respecto de la otra para generar la falla en el espécimen de suelo.

Dependiendo del equipo, la prueba de corte puede ser controlada por el esfuerzo o por la deformación unitaria. En las pruebas controladas por el esfuerzo, la fuerza cortante es aplicada en incrementos iguales hasta que el espécimen falla,

lo cual tiene lugar a lo largo del plano de separación de la caja de corte. Después de la aplicación de cada incremento de carga, el desplazamiento cortante de la mitad superior de la caja se mide por medio de un micrómetro horizontal. El cambio en la altura del espécimen (y por tanto el cambio de su volumen) durante la prueba se obtiene a partir de las lecturas del micrómetro que mide el movimiento vertical de la placa superior de carga.

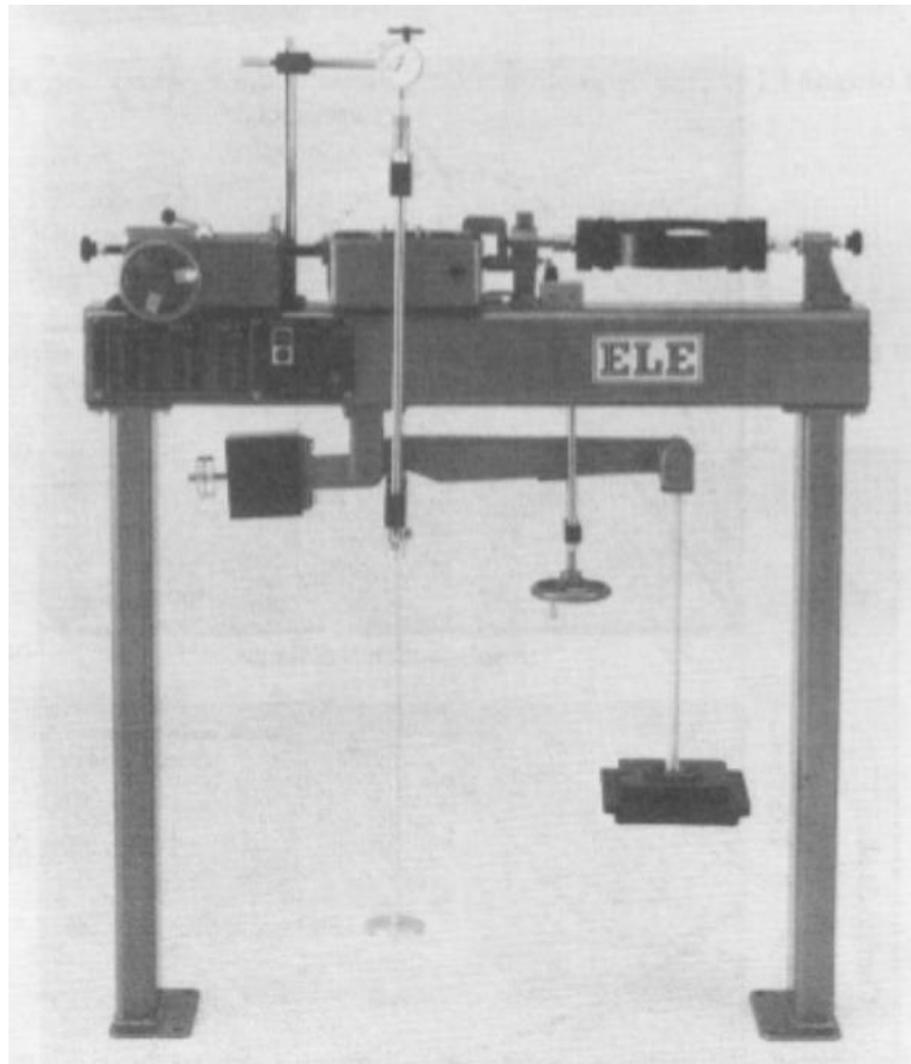


**Figura 6. Diagrama del arreglo para la prueba de corte directo.**  
Fuente: Braja M. Das (2001)

En pruebas controladas por la deformación unitaria se aplica una razón constante de desplazamiento cortante a una mitad de la caja por medio de un motor que actúa a través de engranes. La tasa constante de desplazamiento cortante se mide con un micrómetro horizontal. La fuerza cortante resistente del suelo correspondiente a cualquier desplazamiento cortante se mide por medio de un anillo de ensayo horizontal o con una celda de carga. El cambio de volumen durante la prueba se obtiene de manera similar a las pruebas controladas por el esfuerzo. La Figura 7 es una fotografía del equipo de prueba de corte directo controlado por la deformación unitaria.

La ventaja de las pruebas por deformación unitaria controlada es que, en el caso de arena densa se observa y grafica la

resistencia cortante pico (es decir, en la falla) así como resistencias cortantes menores (es decir, en un punto después de la falla llamado resistencia ultima). En las pruebas por esfuerzo controlado, solo la resistencia cortante pico se observa y gráfica. Note que la resistencia cortante pico en las pruebas controladas por el esfuerzo solo es aproximado, debido a que la falla ocurre a un nivel de esfuerzo situado entre el incremento de carga de pre falla y el incremento de falla. No obstante, las pruebas de esfuerzo controlado probablemente simulan mejor las situaciones reales de campo que las pruebas controladas por la deformación controlada (Braja M. Das, 2001).



**Figura 7. Equipo para la prueba de corte directo**  
Fuente: Braja M. Das (2001)

## **2.2. VARIABLES DEPENDIENTES: PESO VOLUMETRICO Y CONTENIDO DE HUMEDAD**

### **2.2.1. DISTRIBUCIÓN GRANULOMETRICA**

En los suelos bien gradados, las partículas más pequeñas llenan los espacios entre las partículas más grandes y esto permite una mayor resistencia al cortante. Si el suelo se encuentra bien gradado, el ángulo de fricción es mayor que para el mismo tipo de suelo en estado mal gradado o uniforme, del mismo tamaño y forma de partículas (Duncan y Wright, 2005).

### **2.2.2. EFECTO DE LA HUMEDAD**

Adicionalmente, en los suelos residuales es común encontrar suelos parcialmente saturados, debido a que tienen alta porosidad y alta permeabilidad; allí pueden ocurrir cambios muy grandes de humedad entre las épocas seca y de lluvia. La resistencia al cortante en términos de esfuerzos totales es influenciada en forma muy importante por el contenido de agua (Foss 1977, O'Rourke y Crespo 1988).

El efecto de la humedad es solamente de uno o dos grados con respecto al ángulo de fricción interna (Lambe y Whitman 1969, Holtz y Kovac 1981).

### **2.2.3. TAMAÑO DE LA MUESTRA**

Los resultados de la resistencia al cortante de los suelos granulares también es afectado por el tamaño de la muestra en los ensayos. El diámetro de la muestra para los ensayos de corte directo, debe ser al menos de 6 veces el tamaño de la partícula más grande de suelo, a fin de evitar resultados erróneos (Duncan y Wright, 2005)

#### 2.2.4. TIPO DE ENSAYO

La resistencia también es afectada por el tipo de ensayo que se utilice para obtener los parámetros en el laboratorio. Becker y otros (1972), encontraron que el valor del ángulo de fricción era mayor de  $1^\circ$  a  $6^\circ$  cuando se utilizaban ensayos de corte directo, que en los ensayos triaxiales drenados (Ladd, 1977).

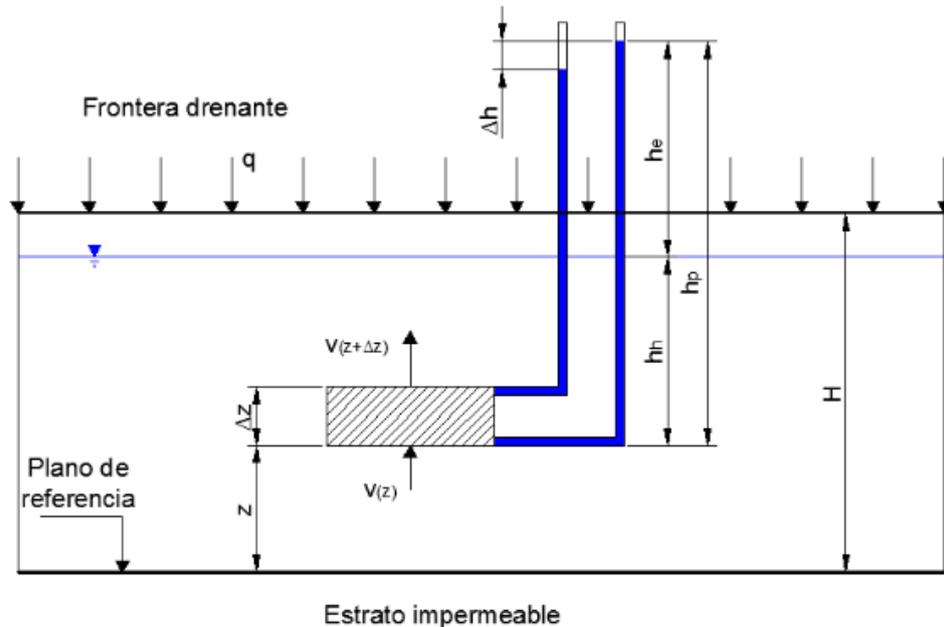
#### 2.2.5. TEORÍA DE TERZAGHI PARA LA CONSOLIDACIÓN VERTICAL

Silvia Angelone (2002) señala:

Considerándose un depósito de suelo homogéneo, saturado, de longitud lateral infinita y sometida a una carga uniforme ( $q$ ) aplicada en toda el área superficial. El suelo reposa sobre una base impermeable (esta puede ser roca sana u otro suelo cuya permeabilidad sea muy baja en comparación al suelo a analizar, por ejemplo,  $K_{\text{suelo}} > 100 K_{\text{estrato impermeable}}$ ) y puede drenar libremente por su cara superior, como se indica en la Figura 8, donde:

- $h_p$ : es la altura piezométrica
- $z$ : es la posición respecto a un plano de referencia
- $h_n$ : es la carga hidráulica
- $h_c$ : es el exceso de presión neutra debido a la carga  $q$
- $H$ : es el espesor del estrato

La disipación del exceso de presión intersticial en cualquier punto sólo se producirá mediante el flujo del agua intersticial en sentido vertical ascendente hacia la superficie, ya que el gradiente hidráulico únicamente se presenta en dirección vertical. Como resultado se producirán deformaciones en la dirección vertical.

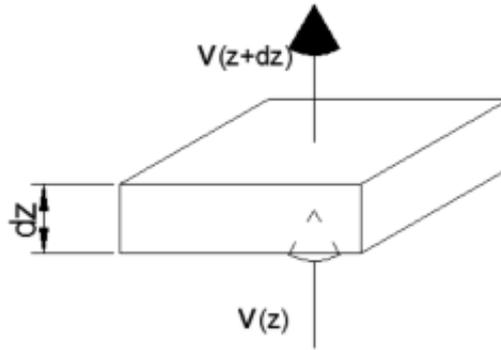


**Figura 8. Esquema del depósito de suelo**  
Fuente: Silvia Angelone (2002)

La consolidación es un problema de flujo de agua no establecido de un medio poroso, esto se refiere a que, si se analiza el flujo de agua en la totalidad del estrato, esta solo sale de él, ya que no ingresa ningún caudal. Esta situación no debe confundirse con la de un elemento de altura diferencial dentro del estrato, en el cual si hay un flujo establecido de agua.

Considerando el flujo en el elemento diferencial ubicado a  $z$  del plano de referencia (Figura 9), donde:

- $V_z$  es la velocidad vertical del flujo que entra en el elemento
- $V_{(z+dz)}$  es la velocidad vertical del flujo que sale del elemento



**Figura 9. Elemento diferencial de suelo**  
 Fuente: Silvia Angelone (2002)

Si se aplica el teorema de Taylor, se tiene

$$v_{(z+dz)} = V_z + \frac{dv_z}{dz} dz + \frac{1}{2!} \frac{d^2v_z}{dz^2} dz^2 + \dots \quad (5)$$

Puesto que  $dz$  se toma muy pequeño, puede suponerse que los términos de segundo orden y de orden superior son insignificantes y entonces resulta que:

$$v_{(z+dz)} = V_z + \frac{dv_z}{dz} dz \quad (6)$$

A partir del principio de continuidad se establece que:

Cantidad de flujo que sale del elemento por unidad de tiempo	-	Cantidad de flujo que entra en el elemento por unidad de tiempo	=	Velocidad de cambio de volumen del elemento
--	---	---	---	---

Entonces a partir de que el caudal es velocidad por área y reemplazando resultados:

$$\left[ v_z + \frac{dv_z}{dz} \right] A - v_z A = - \frac{dV}{dt} \quad (7)$$

Donde  $A$  es el área plana del elemento perpendicular al plano de estudio y  $V$  es el volumen. Por tanto, se  $V = A \times dz$ , de la ecuación (7) resulta:

$$V \frac{dv_z}{dz} = - \frac{dV}{dt} \quad (8)$$

Si se supone que las partículas de suelo y el agua intersticial son incompresibles, entonces la velocidad de cambio de volumen del elemento  $dV/dt$  es igual a la velocidad de cambio de volumen de vacíos  $dV_v/dt$ .

$$V \frac{dv_z}{dz} = - \frac{dV_v}{dt} \quad (9)$$

Entonces si  $e=V_v/V_s$  y  $V_v = eV_s$  (recordar que  $V_s$  es constante en el tiempo ya que las partículas de sólidos son incompresibles y que  $V = V_s + V_v$ ), se plantea el problema como una variación de la relación de vacíos  $e$  en el tiempo,  $de/dt$ , reemplazando en la ecuación (9) queda:

$$V \frac{dv_z}{dz} = -V_s \frac{de}{dt} \quad (10)$$

$$\frac{dv_z}{dz} = - \frac{1}{1+e} \frac{de}{dt} \quad (11)$$

A partir de la ecuación de Darcy ( $v=ki$ ;  $i=h/z$ ) se obtiene para flujo vertical del agua intersticial a través del elemento

$$v_z = -k_z \frac{dh}{dz} \quad (12)$$

Siendo

$$h = z + h_h + h_e \quad (13)$$

Reemplazando (12) en (11), se obtiene

$$\frac{d}{dz} \left( k_z \frac{dh}{dz} \right) = \frac{1}{1+e} \frac{de}{dt} \quad (14)$$

$$k_z \frac{d^2 v_z}{dz^2} = \frac{1}{1+e} \frac{de}{dt} \quad (15)$$

Suponiendo que, ni el nivel freático ni la posición del elemento varían durante el proceso de consolidación ( $z + h_h = \text{cte}$ ), y lo único que varía es la altura del agua correspondiente al exceso de presión neutra  $h_e$ , de la ecuación (13) se obtiene

$$\frac{d^2 h}{dz^2} = \frac{d^2 h_e}{dz^2} \quad (16)$$

Y por lo tanto el exceso de presión intersticial  $u_e$  en el elemento es

$$u_e = \rho_w g h_e \quad (17)$$

Se obtiene, reemplazando en la ecuación (16)

$$\frac{d^2 h}{dz^2} = \frac{1}{\rho_w g} \frac{d^2 h_e}{dz^2} \quad (18)$$

Reemplazando en la ecuación (15) y redondeando

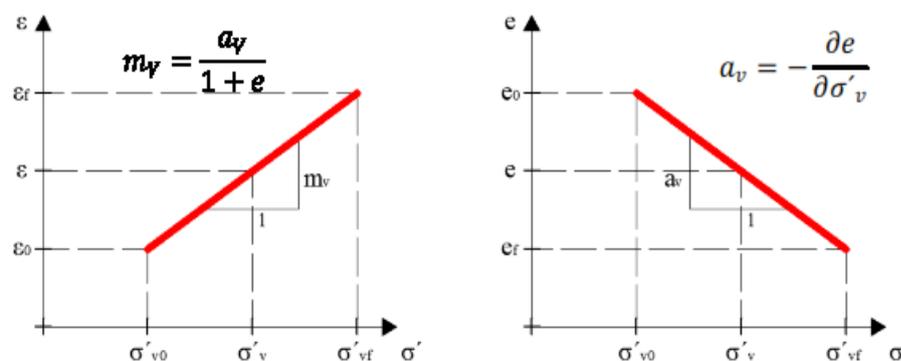
$$\frac{de}{dt} = \frac{k(1+e)}{\rho_w g} \frac{d^2 u_e}{dz^2} \quad (19)$$

Se obtiene una ecuación con dos incógnitas  $u_e$  y  $e$ . Para plantear el problema completamente se necesita una ecuación adicional que relacione el exceso de presión intersticial y la relación de vacíos. Esta se obtiene al considerar el comportamiento del suelo bajo esfuerzo vertical – deformación. **Terzaghi tomó este comportamiento como lineal para un incremento de carga en particular  $d\sigma'_v$**  (Figura 10). Puesto que el cambio de deformación es proporcional al cambio de relación de vacíos, esto también implica la existencia de la relación  $e - \sigma'_v$  (Figura 9). La pendiente de la recta  $e - \sigma'_v$  se designa con  $a_v$  y se denomina coeficiente de compresibilidad y se define como:

$$a_v = - \frac{de}{d\sigma'_v} \quad (20)$$

Donde  $\sigma'_v$  es la presión vertical efectiva en el elemento.

Se tiene entonces



**Figura 10. Relaciones  $\varepsilon$  vs.  $\sigma'_v$  y  $e$  vs.  $\sigma'_v$**   
Fuente: Silvia Angelone (2002)

La presión total resulta

$$\sigma_v = \sigma'_v + u \quad (21)$$

La presión neutra puede subdividirse en una presión hidrostática y un exceso de presión neutra, producida por un incremento en la carga aplicada al suelo como:

$$u = u_h + u_e \quad (22)$$

Así, la presión total resulta, reemplazando en (3.17)

$$\sigma_v = \sigma'_v + u_h + u_e \quad (23)$$

Derivando la ecuación (23) con respecto del tiempo, como la presión total se mantiene constante en el tiempo, obtenemos:

$$\frac{d\sigma'_v}{dt} + \frac{du_e}{dt} = 0 \quad (24)$$

Llegando así a

$$\frac{d\sigma'_v}{dt} = - \frac{du_e}{dt} \quad (25)$$

Esta expresión demuestra lo ya visto en la analogía de Terzaghi, a medida que disminuya le presión neutra en exceso se da un incremento en la presión efectiva, o sea se transfiere la presión desde el agua intersticial hacia las partículas de suelo.

Además,

$$\frac{de}{dt} = \frac{de}{d\sigma'_v} \frac{d\sigma'_v}{dt} \quad (26)$$

Reemplazando las ecuaciones (20) y (25) en la ecuación (26), se obtiene:

$$\frac{de}{dt} = a_v \frac{du_e}{dt} \quad (27)$$

Si se sustituye en la ecuación (19)

$$\frac{du_e}{dt} = \frac{k_z(1+e)}{\rho_w g a_v} \quad (28)$$

O bien se puede expresar la **ecuación de comportamiento de la consolidación unidimensional** (para una z y una t determinada), como:

$$\frac{du_e}{dt} = c_v \frac{d^2u_e}{dz^2} \quad (29)$$

Donde:

$c_v = \frac{k_z(1+e)}{\rho_w g a_v}$  es el coeficiente de consolidación vertical

$m_v = \frac{a_v}{1+e}$  es el coeficiente de compresibilidad volumétrica y pendiente de la recta  $\epsilon - \sigma'$ , como se aprecia en la Figura 10.

## 2.3. TEORÍA DE REGRESIÓN Y CORRELACIÓN

### 2.3.1. TEORÍA DE REGRESIÓN Y CORRELACIÓN SIMPLE

Martin López señala:

Que uno de los objetivos de toda ciencia es encontrar relaciones entre los hechos que estudia. Estas relaciones se traducen en expresiones matemáticas. Así si observamos varias veces el tiempo que tarda un móvil en recorrer una distancia y su velocidad (supuesto que se desplaza con velocidad uniforme), los valores observados están claramente relacionados y esa relación puede expresarse matemáticamente como  $v=s/t$  ( $v \cdot t = s$ ).

No obstante, existen otras variables como inflación y tipo de interés, oferta y demanda, ahorro y renta, etc., entre las que no cabe duda de que existe una relación, pero no existe una función matemática que verifique rigurosamente.

Pues bien, en el primero de los casos (tiempo y velocidad) diremos que existe una **dependencia funcional**, y en el segundo (inflación y tipo de interés) una **dependencia estática**.

La diferencia es que en la primera la relación entre las variables es estricta y perfecta, y en la segunda el modelo matemático al que lleguemos deberá aproximar la relación entre variables razonablemente, por lo que deberemos determinar su forma y contrastar su “bondad”.

Las dependencias de tipo estadístico, son muy frecuentes en economía, y en general en todas las ciencias sociales.

A las técnicas estadísticas utilizadas para determinar modelos o expresiones que relacionen el comportamiento de varias variables se les denomina **técnicas de regresión**.

Previamente a la aplicación de técnicas de regresión, se requiere un análisis teórico, que relacione las variables objeto de estudio, que de consistencia al análisis estadístico:

Este análisis es necesario porque es posible distinguir distintos tipos de dependencia entre variables:

- *Al Azar*: a la vista de la información disponible se plantea una relación absurda entre variables.
- *Una tercera variable influye sobre las dos variables consideradas*: cuando dos variables se ponen en dependencia, se supone que una explicara el comportamiento de la otra, pero es posible que exista una tercera variable, que actúe como motor de esa relación.

- *Una variable influye en la otra:* así por ejemplo el gasto en carne de una familia vendrá determinado (aunque no de modo exclusivo) por el número de miembros de la unidad familiar.

A la variable que se quiere predecir se le denomina **dependiente o endógena** y a la variable a partir de la cual queremos hacer la predicción, se le llama **independiente, exógena o explicativa**.

Una de las aplicaciones más interesantes de la regresión en economía es la de predecir, esto es, conociendo el valor de una de las variables, estimar el valor que presentara otra variable relacionada con la primera.

#### **Método de los mínimos cuadrados y las ecuaciones normales:**

Hacer regresión, consiste en ajustar lo mejor posible una función a una serie de valores observados, gráficamente equivale a encontrar una curva (recta) que, aunque no pase por todos los puntos de la nube, al menos este lo más próximo posible a ellos. Supongamos que para poder predecir “Y” en base al conocimiento de “X”, se ha ajustado una función que exprese de la mejor forma posible el comportamiento de “Y” en función de “X” ( $Y = f(X)$ ).

Pues bien, utilizando la mencionada función, pronosticaremos que si  $X = x_i$  entonces la variable Y tendría un **valor esperado**  $\hat{y}_i = f(x_i)$ . Este valor posiblemente no coincidirá con el que realmente ha presentado la variable Y,  $y_i$ , de manera que en dicha predicción se habrá cometido un error;

$$e_i = y_i - \hat{y}_i$$

Esta diferencia se denomina residuo, y nos da una medida del error cometido en el ajuste para cada punto del diagrama de dispersión.

Un criterio para obtener un buen ajuste que evite que se compensen residuos de signo positivo con residuos de signo negativo y que sea

manejable (algebraicamente), sería minimizar la suma de los cuadrados de los residuos, es decir hacer mínima la suma:

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2$$

Este criterio de minimizar la suma de cuadrados es el conocido como

### **criterio de mínimos cuadrados.**

Se puede observar que el desarrollo anterior consiste en la búsqueda de un procedimiento para medir la distancia de un conjunto finito de puntos a una curva.

Las funciones que se ajustan con más frecuencia y sus ecuaciones generales, son:

Recta:	$Y=ax+b$
Parábola:	$Y=a+bx+cx^2$
Polinomio de grado n:	$Y=a+bx+cx^2+dx^3+\dots+zx^n$
Hipérbola equilátera:	$Y=a+b/x$
Función potencial:	$Y=ax^b$
Función exponencial:	$Y=ab^x$
Curva logística:	$Y=a/(1+be^{-cx})$
Exponencial modificada:	$Y=a+be^{cx}$

Si la función es una recta, la regresión se denomina lineal.

### **Regresión lineal: recta de regresión (mínimos cuadrados).**

Vamos a encontrar entre todas las rectas, cuya ecuación general es:  $y=a+bx$ , cual es la que según el método de mínimos cuadrados mejor se ajusta a los datos observados para una variable bidimensional (x,y).

Conociendo el valor “ $x_i$ ” de la variable “ $x$ ”, el valor esperado de “ $y$ ” será:  
 $y_i = a + bx_i$ .

El método de mínimos cuadrados, en el caso de la recta, trata de encontrar los coeficientes  $a$  y  $b$  que hagan mínima la expresión:

$$S(a, b) = \sum (y_i - a - bx_i)^2$$

Para que exista un mínimo en el punto  $(a_0, b_0)$  la condición necesaria, es que se anule las derivadas parciales de primer orden en dicho punto, es decir:

$$\frac{\delta S(a_0, b_0)}{\delta a} = -2 \sum (y_i - a - bx_i) = 0 \quad (30)$$

$$\frac{\delta S(a_0, b_0)}{\delta b} = -2 \sum (y_i - a - bx_i)x_i = 0 \quad (31)$$

A las dos ecuaciones anteriores (30) y (32), se les denomina **ecuaciones normales de la recta**, y la solución del sistema que forman (sistema 2 ecuaciones con dos incógnitas) será un punto  $(a_0, b_0)$  donde  $S(a, b)$  se hace mínima.

Este sistema también lo podemos escribir como:

$$\sum y_i = na + b \sum x_i$$

$$\sum y_i x_i = a \sum x_i + b \sum x_i^2$$

Vamos a despejar los valores de  $a$  y  $b$  solución del sistema.

Para ello dividimos las dos ecuaciones por  $n$  y nos encontramos con:

$$\begin{cases} \bar{y} = a + b\bar{x} \\ a_{11} = a\bar{x} + ba_{x2} \end{cases}$$

Despejando “ $a$ ” de la primera ecuación:

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

Y sustituyendo en la segunda ecuación:

$$a_{11} = (\bar{y} - b\bar{x})\bar{x} + ba_{x2} = \bar{y}\bar{x} - b\bar{x}^2 + ba_{x2} = \bar{y}\bar{x} + b(a_{x2} - \bar{x}^2) = \bar{y}\bar{x} + bS_x^2$$

Si ahora despejamos “b” en esta expresión, tenemos;

$$b = \frac{a_{11} - \bar{y}\bar{x}}{S_x^2} = \frac{S_{xy}}{S_x^2}$$

Pues bien, si sustituimos los valores a y b que hemos calculado en la ecuación general de la recta ( $y = a + bx$ ), obtenemos;

$$y = \left( \bar{y} - \frac{S_{xy}}{S_x^2} \bar{x} \right) + \frac{S_{xy}}{S_x^2} x$$

Que podemos expresar como;

$$y - \bar{y} = \frac{S_{xy}}{S_x^2} (x - \bar{x})$$

A la expresión dentro del rectángulo se le llama recta de regresión de y/x.

De modo análogo podríamos haber obtenido la recta de regresión de x/y llegando a una expresión de la forma;

$$x - \bar{x} = \frac{S_{xy}}{S_y^2} (y - \bar{y})$$

De las ecuaciones de las dos rectas de regresión se deduce que ambas pasan por el punto  $(\bar{x}, \bar{y})$ , pudiendo dar dos alternativas: que coincidan (sus pendientes deberán ser iguales) o que se corten solo en dicho punto.

### **Propiedades de las rectas de regresión.**

**Propiedad 1:** la suma de los residuos  $e_i$  vale 0 (y por tanto se media también), esto es:

$$\sum e_i = 0$$

Demostración:

$$\sum e_i = \sum (y_i - a - bx_i) = \sum y_i - \sum a - b \sum x_i = \sum y_i - na - b \sum x_i = 0$$

Ya que a y b son solución de la primera ecuación del sistema.

**Propiedad 2.** Si la dependencia existente entre las dos variables es funcional, las dos rectas de regresión son coincidentes.

**Propiedad 3.** La covarianza de las variables “y” y “e” vale 0.

$$S_{ey} = 0$$

$S_{ey} = a_{11} - a_{01}a_{01}$ , y sabemos por la propiedad 1 que  $a_{10} = 0$ , entonces bastara demostrar que  $a_{11} = 0$  (sin demostración).

### **Regresión no lineal.**

Aunque la regresión lineal, tiene aplicación en muchos problemas, en algunos casos, la relación que liga las variables exige la utilización de ajuste no lineales. No obstante, incluso en estas últimas situaciones, por su sencillez, suele aplicarse la regresión lineal aprovechando el que casi toda función (curva) puede aproximarse por una recta en un pequeño dominio.

### **El coeficiente de determinación correlación.**

La regresión nos permite ajustar una nube de puntos a una recta (ajuste lineal) o curva (ajuste no lineal), lo que equivale a conocer la forma en la que se relacionan las variables. De otra manera, la regresión determina la mejor de las rectas o curvas establece una relación entre dos variables, pero el hecho de que sea la mejor posible, no quiere decir que sea “buena” (puede ocurrir que los errores que estemos cometiendo sean elevadas), ya que es posible que exista otra función matemática que modelice mejor la relación entre las variables.

Por tanto, tan importante será conocer la forma en que se relacionan las variables (de eso se ocupa la regresión), como conocer el grado de asociación/dependencia de dichas variables (de esto se ocupa la correlación), y encontrar alguna medida o coeficiente que nos mida el grado de bondad o de representatividad de la relación que hemos establecido mediante técnicas de regresión.

### **Valores del coeficiente de determinación.**

El coeficiente de determinación toma valores entre 0 y 1;  $0 \leq R^2 \leq 1$

- Toma el valor “0” cuando la regresión no explica nada de la variable de los valores observados y por tanto el ajuste obtenido no modeliza adecuadamente (ni siquiera mínimamente) la relación entre variables.

$$R^2 = \frac{S_{\hat{y}}^2}{S_y^2} = 0 \rightarrow S_{\hat{y}}^2 = 0 \leftrightarrow S_y^2 = S_e^2$$

- Toma el valor de “1” cuando el ajuste efectuado recoge toda la variabilidad de la variable original, y por tanto el ajuste es perfecto.

$$R^2 = \frac{S_{\hat{y}}^2}{S_y^2} = 1 \rightarrow S_{\hat{y}}^2 = S_y^2 \leftrightarrow S_e^2 = 0$$

- Para valores entre “0” y “1”, el ajuste es tanto mejor cuanto más se aproxima a 1 el coeficiente de determinación. Los ajustes se consideran razonables cuando  $R^2 \geq 0.75$ .

### **Predicción.**

Como ya indicamos, la predicción es una de las aplicaciones más importantes de la regresión. La predicción consiste en determinar (a

partir del modelo ajustado), el valor de la variable dependiente para un valor dado de la variable independiente.

Cuando la estimación/predicción se hace para un valor de la variable independiente dentro del rango de nuestras observaciones se denomina **interpolación** y si se hace para un valor de la variable fuera del rango se denomina **extrapolación**.

Para la interpolación la fiabilidad de los valores pronosticados será tanto mayor cuando mejor sea el ajuste (cuando mayor sea  $R^2$ ), en el supuesto, claro está, de que exista relación/asociación entre las variables.

Cuando hacemos predicciones para valores de la variable muy alejada del rango de variación de la variable independiente, se corre el riesgo de que el modelo ajuste no sea válido para dichos valores en la medida dada por  $R^2$ .

### **2.3.2. TEORÍA DE REGRESIÓN LINEAL MULTIPLE**

F.J. Barón López, F. Téllez Montiel, *señalan que:*

Utilizamos regresión múltiple cuando estudiamos la posible relación entre varias variables independientes (predicción o explicativas) y otra variable dependiente (criterio, explicada, respuesta).

#### **Aplicaciones de la regresión múltiple.**

Es cierto que la regresión múltiple se utiliza para la predicción de respuestas a partir de variables explicativas. Pero no es está realmente la aplicación que se le suele dar en investigación. Los usos que con mayor frecuencia encontramos en las publicaciones son los siguientes:

- **Identificación de variables explicativas.** Nos ayuda a crear un modelo donde se seleccionen las variables que puedan

influir en la respuesta, descartando aquella que no aporte información.

- **Detección de interacciones.** Entre variables independientes que afectan a la variable respuesta. Un ejemplo de interacción clásica es el de estudiar la respuesta de un paciente al alcohol y a un barbitúrico, y observar que cuando se ingieren ambos, el efecto es mucho mayor del esperado como suma de los dos.
- **Identificación de variables confusas.** Es un problema difícil el de su detección, pero de interés en investigación no experimental, ya que el investigador frecuentemente no tiene control sobre las variables independientes.

### **Requisitos y limitaciones.**

Hay ciertos requerimientos necesarios para poder utilizar la técnica de regresión múltiple:

- **Linealidad.** Se supone que la variable respuesta depende linealmente de las variables explicativas. Si la respuesta no aparenta ser lineal, debemos introducir en el modelo componentes no lineales (como incluir transformaciones no lineales de las variables independientes en el modelo). Otro tipo de respuesta no lineal es la interacción. Para ello se ha de incluir en el modelo términos de interacción, que equivalen a introducir nuevas variables explicativas que en realidad son el producto de dos o más de las independientes.
- **Normalidad y equidistribución de los residuos.** Se llaman residuos las diferencias entre los valores calculados por el modelo y los realmente observados en la variable dependiente. Para tener un buen modelo de regresión no es suficiente con que los residuos sean pequeños. La validez del modelo requiere que los mismos se distribuyan de modo normal y con la misma

dispersión para cada combinación de valores de las variables independientes.

Por supuesto, esta condición en la práctica es inverificable, puesto que para cada combinación de variables independientes tendremos normalmente ninguna o una respuesta. Lo que se suele hacer es examinar una serie de gráficos de residuos que nos hagan sospechar. Por ejemplo, si los residuos aumentan al aumentar la respuesta, o vemos que aparecen tendencias, ... Es decir, hay una serie de reglas heurísticas que nos ayudan a decidir si aceptar o no el modelo de regresión, pero no están basados en contrastes de hipótesis como hemos usado hasta ahora. Es la experiencia del investigador observando residuos la que le decide a usarlo o no.

- **Numero de variable independiente.** Podemos estar tentados en incluir en el modelo cualquier cosa que tengamos en una base de datos, con la esperanza de que cuando más variables incluyamos, más posibilidades hay de que “suene la flauta”. Si nos aborda esta tentación, hemos de recordar que corremos el riesgo de cometer error de tipo I. Otra razón es que, si esperamos ajustar unas pocas observaciones usando muchas variables, muy probablemente consigamos una aproximación muy artificial., y además muy sensible a los valores observados. La inclusión de una nueva observación puede cambiar completamente el valor de los coeficientes del modelo. Esto se traducirá al realizar el contraste como justo todo lo contrario de lo que deseábamos: ¡Todas las variables independientes del modelo serán consideradas no significativas! Una regla que se suele recomendar es la de incluir al menos 20 observaciones por cada variable independiente que estimemos a priori interesantes en el modelo. Números inferiores nos llevarán posiblemente a no poder obtener conclusiones y errores de tipo II.

- **Colinealidad.** Si dos variables independientes están estrechamente relacionadas (consumo de refrescos y temperatura ambiente, por ejemplo) y ambas son incluidas en un modelo, muy posiblemente ninguna de las dos sea considerada significativa, aunque si hubiésemos incluido sólo una de ellas, sí. Hay diferentes técnicas para detectar la colinealidad pero que requiere profundizar en documentos mas sofisticados. Aquí vamos a indicar una técnica muy simple: examinar los coeficientes del modelo para ver si se vuelve inestables al introducir una nueva variable. Si es así posiblemente hay colinealidad entre la nueva variable y las anteriores.
- **Observaciones anómalas.** Está muy relacionado con la cuestión de los residuos, pero merece destacarlo aparte. Debemos poner especial cuidado en identificarlas (y descartarlas si procede), pues tiene gran influencia en el resultado. A veces, son sólo errores en la entrada de datos, pero de gran consecuencia en el análisis.

## **CAPITULO III. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **3.1. PERSPECTIVA METODOLOGIA Y TIPO DE INVESTIGACIÓN**

El enfoque de investigación es tipo Cuantitativo, porque busca recolectar datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías.

El tipo de investigación que se adapta al presente trabajo es el correlacional ya que explica la relación que existe entre los parámetros de corte directo con la densidad y contenido de humedad para luego ser cuantificada.

### **3.2. LIMITES DE LA INVESTIGACIÓN**

Esta investigación se limita a la evaluación de los parámetros de resistencia al corte con diferentes densidades y contenidos de humedad para un material en específico.

### **3.3. CONTEXTO Y UNIDAD DE ANALISIS: POBLACIÓN Y MUESTRA**

La población está constituida por muestras SC (Arena arcillosa con grava), para el caso de esta investigación se tomó la muestra del proyecto de la construcción de vivienda y comercio del Jr. San Martin

entre Teófilo Castilla – Huaraz – Ancash, y por la naturaleza del problema la muestra ha sido seleccionada de manera No Probabilístico intencional por lo que se muestreo un aproximado de 15kg.

El diseño de la toma de muestra se efectúa tomando encuesta la densidad de campo y el contenido de humedad natural de campo, para luego estimar los parámetros de cohesión y fricción realizando ensayos de corte directo en el laboratorio, que consistieron en medir la resistencia al corte de 75 especímenes, agrupados en 5 diferentes estados de contenidos de humedad, a las cuales se le sometió a 5 diferentes densidades por cada 3 especímenes C.H<sub>1</sub>{D<sub>11</sub>(E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, E<sub>3</sub>), D<sub>21</sub>(E<sub>4</sub>, E<sub>5</sub>, E<sub>6</sub>), D<sub>31</sub>(E<sub>7</sub>, E<sub>8</sub>, E<sub>9</sub>), D<sub>41</sub>(E<sub>10</sub>, E<sub>11</sub>, E<sub>12</sub>), D<sub>51</sub>(E<sub>13</sub>, E<sub>14</sub>, E<sub>15</sub>)}, C.H<sub>2</sub>{D<sub>12</sub>(E<sub>16</sub>, E<sub>17</sub>, E<sub>18</sub>), D<sub>22</sub>(E<sub>19</sub>, E<sub>20</sub>, E<sub>21</sub>), D<sub>32</sub>(E<sub>22</sub>, E<sub>23</sub>, E<sub>24</sub>), D<sub>42</sub>(E<sub>25</sub>, E<sub>26</sub>, E<sub>27</sub>), D<sub>52</sub>(E<sub>28</sub>, E<sub>29</sub>, E<sub>30</sub>)}, C.H<sub>3</sub>{D<sub>13</sub>(E<sub>31</sub>, E<sub>32</sub>, E<sub>33</sub>), D<sub>23</sub>(E<sub>34</sub>, E<sub>35</sub>, E<sub>36</sub>), D<sub>33</sub>(E<sub>37</sub>, E<sub>38</sub>, E<sub>39</sub>), D<sub>43</sub>(E<sub>40</sub>, E<sub>41</sub>, E<sub>42</sub>), D<sub>53</sub>(E<sub>43</sub>, E<sub>44</sub>, E<sub>45</sub>)}, C.H<sub>4</sub>{D<sub>14</sub>(E<sub>46</sub>, E<sub>47</sub>, E<sub>48</sub>), D<sub>24</sub>(E<sub>49</sub>, E<sub>50</sub>, E<sub>51</sub>), D<sub>34</sub>(E<sub>52</sub>, E<sub>53</sub>, E<sub>54</sub>), D<sub>44</sub>(E<sub>55</sub>, E<sub>56</sub>, E<sub>57</sub>), D<sub>54</sub>(E<sub>58</sub>, E<sub>59</sub>, E<sub>60</sub>)}, C.H<sub>5</sub>{D<sub>15</sub>(E<sub>61</sub>, E<sub>62</sub>, E<sub>63</sub>), D<sub>25</sub>(E<sub>64</sub>, E<sub>65</sub>, E<sub>66</sub>), D<sub>35</sub>(E<sub>67</sub>, E<sub>68</sub>, E<sub>69</sub>), D<sub>45</sub>(E<sub>70</sub>, E<sub>71</sub>, E<sub>72</sub>), D<sub>56</sub>(E<sub>73</sub>, E<sub>74</sub>, E<sub>75</sub>)}, realizándose en total 75 ensayos de corte directo en laboratorio.

### **3.4. METODOS Y RECURSOS EMPLEADOS**

#### **3.4.1. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCION**

La recolección de datos se realizó en el laboratorio de mecánica de suelos, ensayos de materiales, concreto y pavimentos EMV LABORATORIOS Y CONSTRUCCIÓN EIRL mediante el método de ensayo estándar para el ensayo de corte directo de suelos bajo condiciones consolidadas no drenadas tomando en cuenta la variación de densidad y contenido de humedad, para luego estimar los parámetros de cohesión y fricción, distribuidos según muestra la Tabla 4.

Tabla 4: Distribución de las 75 muestras tomadas para el ensayo de corte directo

Contenido de humedad (%)	Peso Unitario (gr/cm3)	Espécimen (Carga Kg)	Contenido de humedad (%)	Peso Unitario (gr/cm3)	Espécimen (Carga Kg)	Contenido de humedad (%)	Peso Unitario (gr/cm3)	Espécimen (Carga Kg)
C.H <sub>1</sub> = 0.00 %	D <sub>11</sub> = 1.3	E <sub>1</sub> (0.5)	C.H <sub>2</sub> = 5.00 %	D <sub>12</sub> = 1.4	E <sub>16</sub> (0.5)	C.H <sub>3</sub> = 10.0 0 %	D <sub>13</sub> = 1.6	E <sub>31</sub> (0.5)
		E <sub>2</sub> (1.0)			E <sub>17</sub> (1.0)			E <sub>32</sub> (1.0)
		E <sub>3</sub> (2.0)			E <sub>18</sub> (2.0)			E <sub>33</sub> (2.0)
	D <sub>21</sub> = 1.4	E <sub>4</sub> (0.5)		D <sub>22</sub> = 1.5	E <sub>19</sub> (0.5)		D <sub>23</sub> = 1.7	E <sub>34</sub> (0.5)
		E <sub>5</sub> (1.0)			E <sub>20</sub> (1.0)			E <sub>35</sub> (1.0)
		E <sub>6</sub> (2.0)			E <sub>21</sub> (2.0)			E <sub>36</sub> (2.0)
	D <sub>31</sub> = 1.5	E <sub>7</sub> (0.)		D <sub>32</sub> = 1.6	E <sub>22</sub> (0.)		D <sub>33</sub> = 1.8	E <sub>37</sub> (0.)
		E <sub>8</sub> (1.0)			E <sub>23</sub> (1.0)			E <sub>38</sub> (1.0)
		E <sub>9</sub> (2.0)			E <sub>24</sub> (2.0)			E <sub>39</sub> (2.0)
	D <sub>41</sub> = 1.6	E <sub>10</sub> (0.5)		D <sub>42</sub> = 1.7	E <sub>25</sub> (0.5)		D <sub>43</sub> = 1.9	E <sub>40</sub> (0.5)
		E <sub>11</sub> (1.0)			E <sub>26</sub> (1.0)			E <sub>41</sub> (1.0)
		E <sub>12</sub> (2.0)			E <sub>27</sub> (2.0)			E <sub>42</sub> (2.0)
	D <sub>51</sub> = 1.7	E <sub>13</sub> (0.5)		D <sub>52</sub> = 1.8	E <sub>28</sub> (0.5)		D <sub>53</sub> = 2.0	E <sub>43</sub> (0.5)
		E <sub>14</sub> (1.0)			E <sub>29</sub> (1.0)			E <sub>44</sub> (1.0)
		E <sub>15</sub> (2.0)			E <sub>30</sub> (2.0)			E <sub>45</sub> (2.0)
Contenido de humedad (%)	Peso Unitario (gr/cm3)	Espécimen (Carga Kg)	Contenido de humedad (%)	Peso Unitario (gr/cm3)	Espécimen (Carga Kg)			
C.H <sub>4</sub> = 15.00 %	D <sub>14</sub> = 1.5	E <sub>46</sub> (0.5)	C.H.N <sub>5</sub> = 19.05 %	D <sub>15</sub> = 1.7	E <sub>61</sub> (0.5)			
		E <sub>47</sub> (1.0)			E <sub>62</sub> (1.0)			
		E <sub>48</sub> (2.0)			E <sub>63</sub> (2.0)			
	D <sub>24</sub> = 1.6	E <sub>49</sub> (0.5)		D <sub>25</sub> = 1.8	E <sub>64</sub> (0.5)			
		E <sub>50</sub> (1.0)			E <sub>65</sub> (1.0)			
		E <sub>51</sub> (2.0)			E <sub>66</sub> (2.0)			
	D <sub>34</sub> = 1.7	E <sub>52</sub> (0.)		D <sub>35</sub> = 1.9	E <sub>67</sub> (0.)			
		E <sub>53</sub> (1.0)			E <sub>68</sub> (1.0)			
		E <sub>54</sub> (2.0)			E <sub>69</sub> (2.0)			
	D <sub>44</sub> = 1.8	E <sub>55</sub> (0.5)		D <sub>45</sub> = 2.0	E <sub>70</sub> (0.5)			
		E <sub>56</sub> (1.0)			E <sub>71</sub> (1.0)			
		E <sub>57</sub> (2.0)			E <sub>72</sub> (2.0)			
	D <sub>54</sub> = 1.9	E <sub>58</sub> (0.5)		D <sub>55</sub> = 2.1	E <sub>73</sub> (0.5)			
		E <sub>59</sub> (1.0)			E <sub>74</sub> (1.0)			
		E <sub>60</sub> (2.0)			E <sub>75</sub> (2.0)			

### 3.4.2. ANALISIS DE LOS DATOS

#### 3.4.2.1. NTP 339.171: MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS.

Este método de ensayo consiste en colocar el espécimen de suelo en el dispositivo de corte directo, aplicando un esfuerzo normal predeterminado, humedecer o drenar (o ambos) al espécimen de ensayo, consolidar la muestra bajo el esfuerzo normal, sacar los

seguros de los marcos que sujetan el espécimen, y desplazar un marco horizontal con respecto al otro a una velocidad constante de deformación por corte y medir la fuerza cortante y el desplazamiento horizontal mientras que la muestra es cortada, también registrar las lecturas de deformación normal versus el tiempo transcurrido, graficar el desplazamiento normal versus el tiempo en minutos.

Para la investigación, se han obtenido cinco muestras alteradas para cada contenido de humedad que nosotros ya determinamos al igual que el peso unitario, para luego determinar los parámetros de resistencia cortante para cada ensayo, resultados que se muestran en la Tabla 5, Tabla 6, Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9.

*Tabla 5: Angulo de fricción y cohesión para un contenido de humedad de 0.00%*

Peso unitario gr/cm <sup>3</sup>	C (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tan $\phi$	$\phi$
1.3	0.0302	0.5189	27.43
1.4	0.0568	0.5585	29.18
1.5	0.0848	0.5872	30.42
1.6	0.1155	0.6192	31.77
1.7	0.1337	0.6547	33.21

*Tabla 6: Angulo de fricción y cohesión para un contenido de humedad de 5.00%*

Peso unitario gr/cm <sup>3</sup>	C (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tan $\phi$	$\phi$
1.4	0.0000	0.5760	29.94
1.5	0.0000	0.6112	31.43
1.6	0.0120	0.6416	32.68
1.7	0.0792	0.6631	33.55
1.8	0.1393	0.6971	34.88

*Tabla 7: Angulo de fricción y cohesión para un contenido de humedad de 10.00%*

Peso unitario gr/cm <sup>3</sup>	C (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tan $\phi$	$\phi$
1.6	0.0000	0.6739	33.98
1.7	0.0512	0.6783	34.15
1.8	0.1239	0.6855	34.43
1.9	0.1980	0.6891	34.57
2.0	0.2763	0.6915	34.66

*Tabla 8: Angulo de fricción y cohesión para un contenido de humedad de 15.00%*

Peso unitario gr/cm <sup>3</sup>	C (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tan $\phi$	$\phi$
1.5	0.0000	0.6883	34.54
1.6	0.0176	0.7023	35.08
1.7	0.0414	0.7123	35.46
1.8	0.0708	0.7255	35.96
1.9	0.0805	0.7474	36.78

*Tabla 9: Angulo de fricción y cohesión para un contenido de humedad de 19.05%*

Peso unitario gr/cm <sup>3</sup>	C (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tan $\phi$	$\phi$
1.7	0.0721	0.6404	32.63
1.8	0.0833	0.6651	33.63
1.9	0.1015	0.6839	34.37
2.0	0.1085	0.7115	35.43
2.1	0.1239	0.7342	36.29

Para un mejor procedimiento en la realización de los ensayos de corte directo se izó el control de los parámetros de humedad y deformación última del suelo con respecto a las cargas normales aplicadas a las muestras, verificando que estas se comporten de forma lineal, tal como fue sustentada en la **TEORÍA DE TERZAGHI PARA LA CONSOLIDACIÓN VERTICAL**, por lo cual se presenta en cada uno de los resultados gráficas que nos permitirá tener una mejor confiabilidad en los valores que resulten de cada ensayo de corte directo, gráficas a presentar son:

- Tiempo vs Desplazamiento Normal tanto antes de realizar el corte como al instante de realizarlo.
- Asentamiento total vs Carga, donde el asentamiento total fue tomada de los datos de la gráfica de Tiempo vs Desplazamiento Normal.
- Contenido de humedad vs Carga, donde las humedades fueron tomadas después de finalizar cada ensayo de corte directo, teniendo cuidado en tomar las muestras para luego introducirlo al horno.

La muestra usada corresponde a un suelo Arena arcillosa con grava clasificado como SC, que para nuestros ensayos realizados se encuentra entre el rango de 27 a 37 grados, el cual corresponde al rango que indica la tabla 7.1 del libro de Braja M. Das.

Existe una diferencia de 5.78 grados en el cálculo del ángulo de fricción interna para un mismo contenido de humedad, pero diferente peso unitario, esto para un contenido de humedad 0.00%, y peso unitario de 1.3 gr/cm y 1.7 gr/cm<sup>3</sup> que resulta un ángulo de fricción interna de 27.43 y 33.21 grados respectivamente.

### 3.4.2.1.1. DETERMINACIÓN DEL ANGULO DE FRICCIÓN Y COHESION PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 0.00%

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 1.3 gr/cm<sup>3</sup>:**

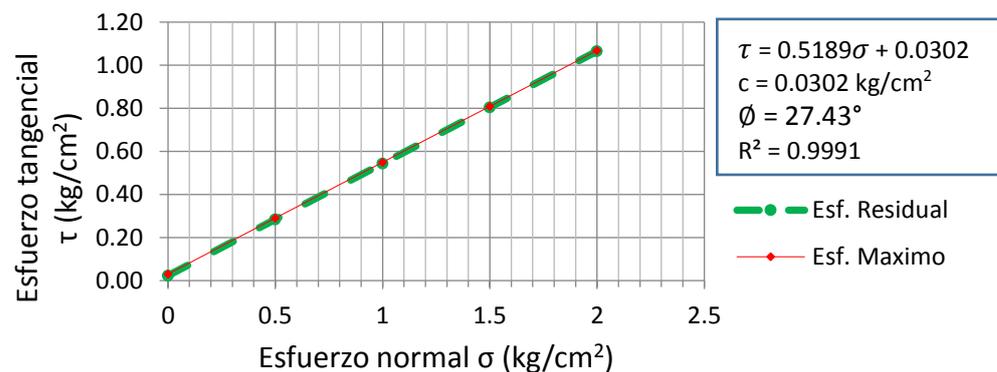


Figura 11. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.3 gr/cm<sup>3</sup>.

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 1.4 gr/cm<sup>3</sup>:**

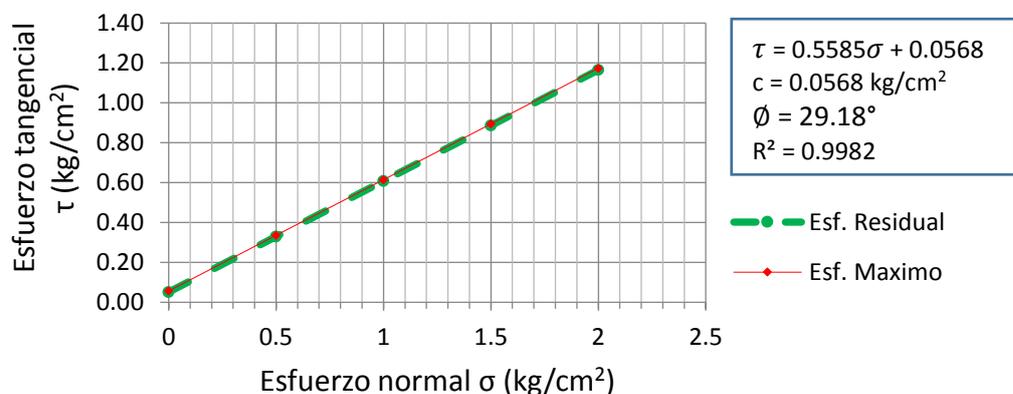


Figura 12. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.4 gr/cm<sup>3</sup>.

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 1.5 gr/cm<sup>3</sup>:**

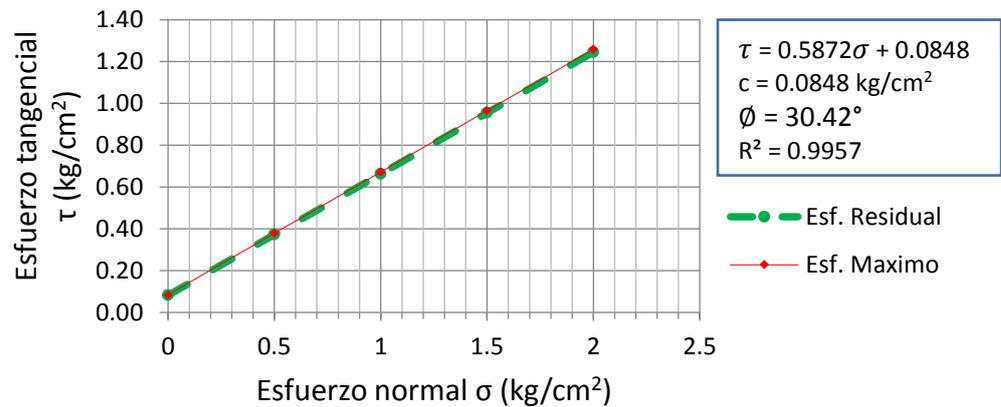


Figura 13. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.5 gr/cm<sup>3</sup>.

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 1.6 gr/cm<sup>3</sup>:**

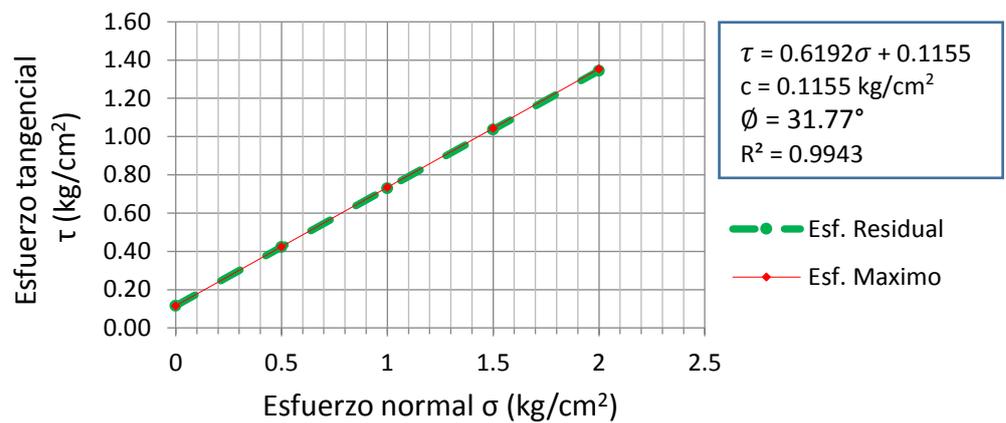


Figura 14. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.6 gr/cm<sup>3</sup>.

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 1.7 gr/cm<sup>3</sup>:**

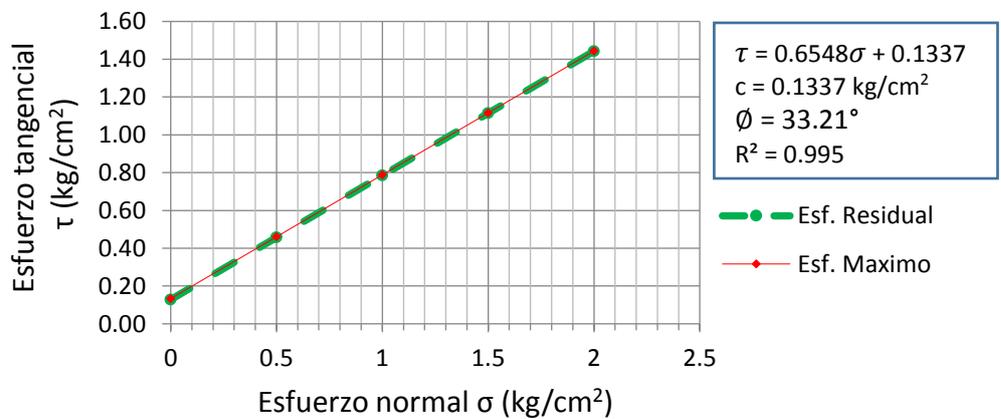
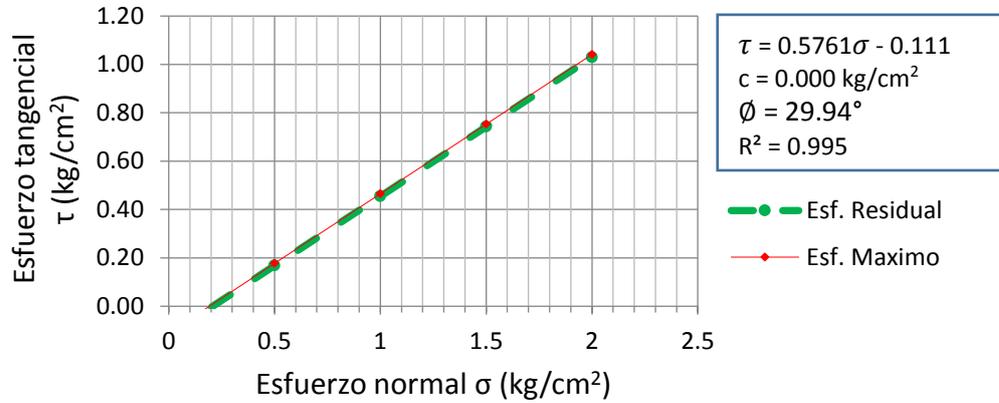


Figura 15. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.7 gr/cm<sup>3</sup>.

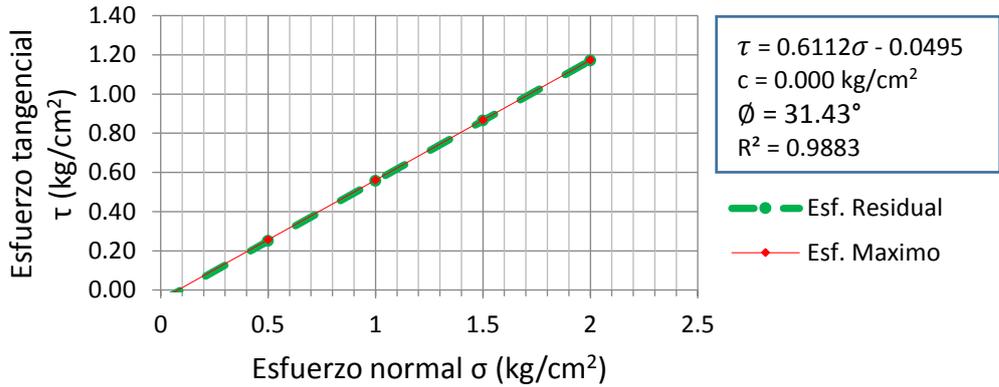
**3.4.2.1.2. DETERMINACIÓN DEL ANGULO DE FRICCIÓN Y COHESION PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 5.00%**

**• PARA UN PESO UNITARIO DE 1.4 gr/cm3:**



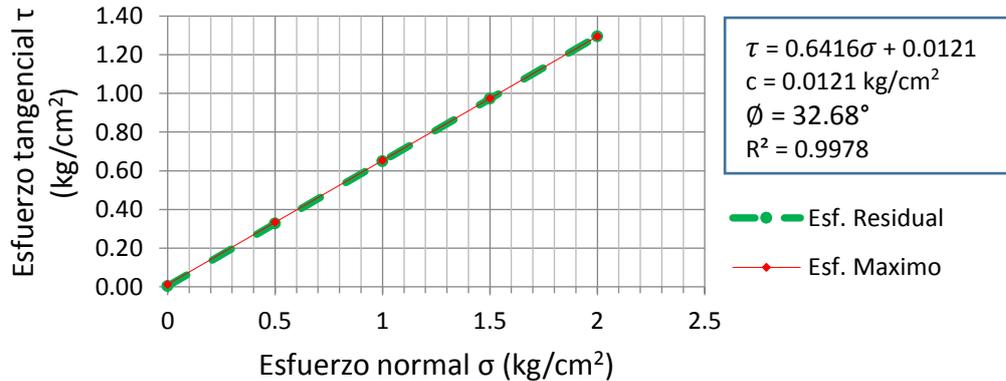
*Figura 16. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.4 gr/cm3.*

**• PARA UN PESO UNITARIO DE 1.5 gr/cm3:**



*Figura 17. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.5 gr/cm3.*

**• PARA UN PESO UNITARIO DE 1.6 gr/cm3:**



*Figura 18. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.6 gr/cm3.*

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 1.7 gr/cm3:**

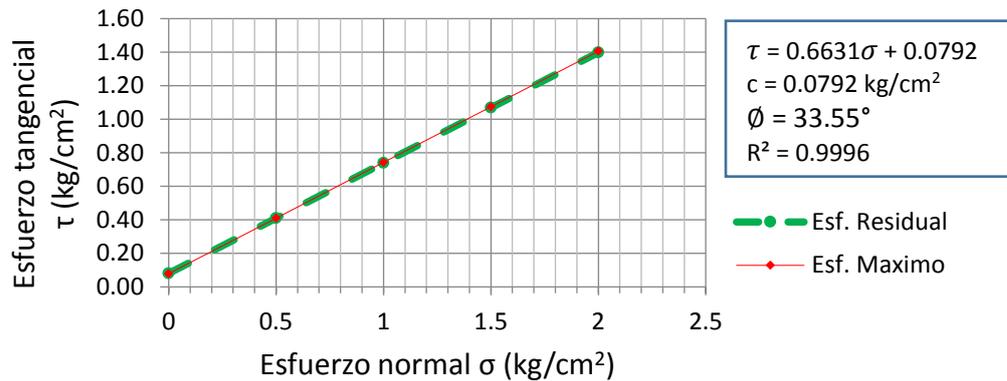


Figura 19. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.7 gr/cm3.

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 1.8 gr/cm3:**

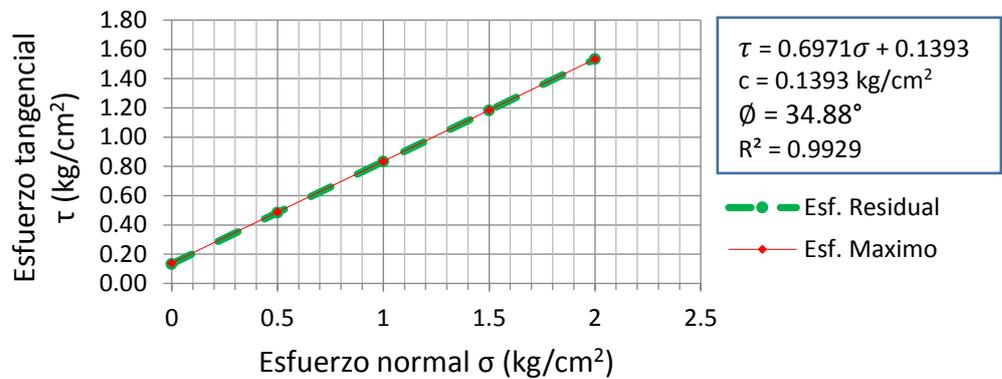


Figura 20. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.8 gr/cm3.

### 3.4.2.1.3. DETERMINACIÓN DEL ANGULO DE FRICCIÓN Y COHESION PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 10.00%

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 1.6 gr/cm3:**

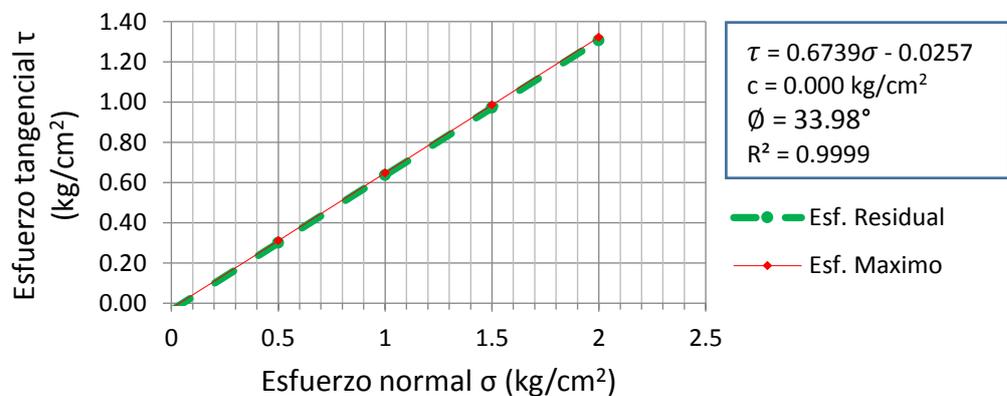


Figura 21. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.6 gr/cm3.

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 1.7 gr/cm<sup>3</sup>:**

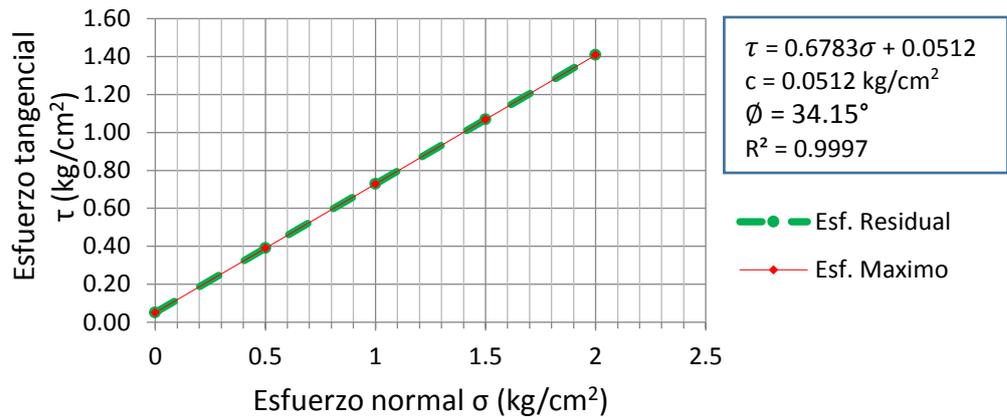


Figura 22. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.7 gr/cm<sup>3</sup>.

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 1.8 gr/cm<sup>3</sup>:**

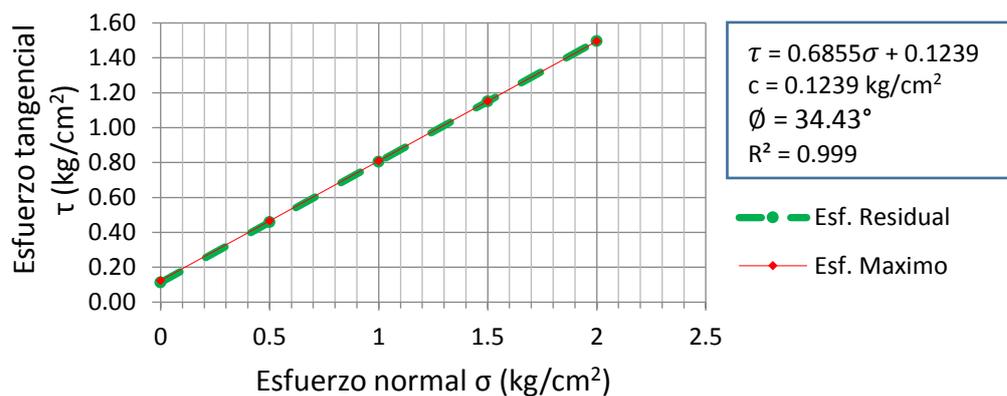


Figura 23. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.8 gr/cm<sup>3</sup>.

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 1.9 gr/cm<sup>3</sup>:**

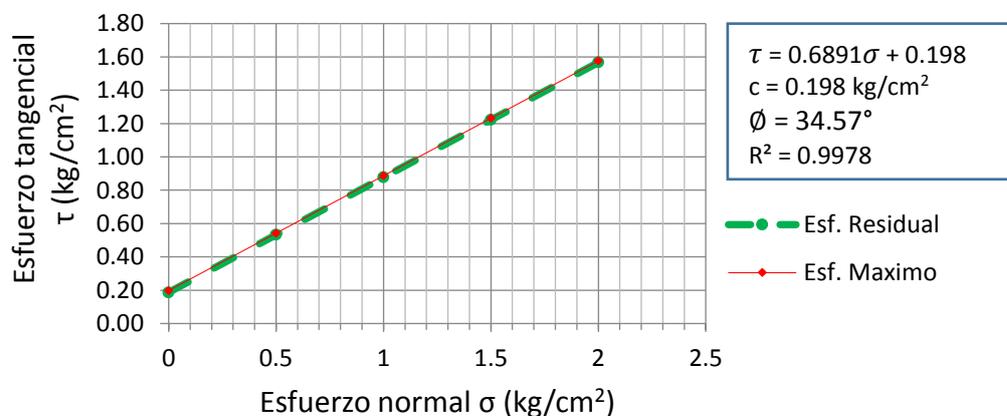


Figura 24. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.9 gr/cm<sup>3</sup>.

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 2.0 gr/cm3:**

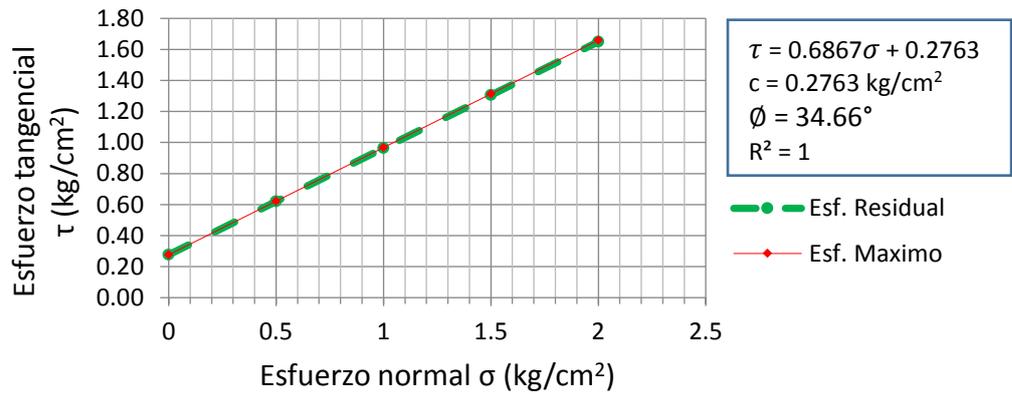


Figura 25. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 2.0 gr/cm3.

### 3.4.2.1.4. DETERMINACIÓN DEL ANGULO DE FRICCIÓN Y COHESION PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 15.00%

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 1.5 gr/cm3:**

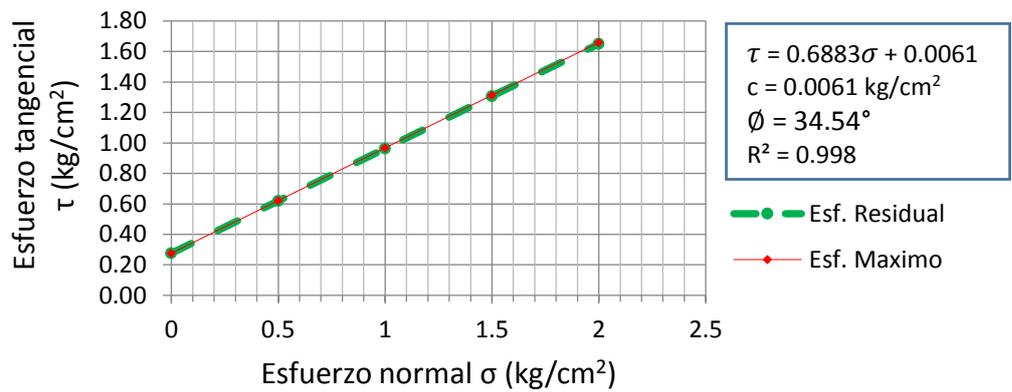


Figura 26. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.5 gr/cm3.

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 1.6 gr/cm3:**

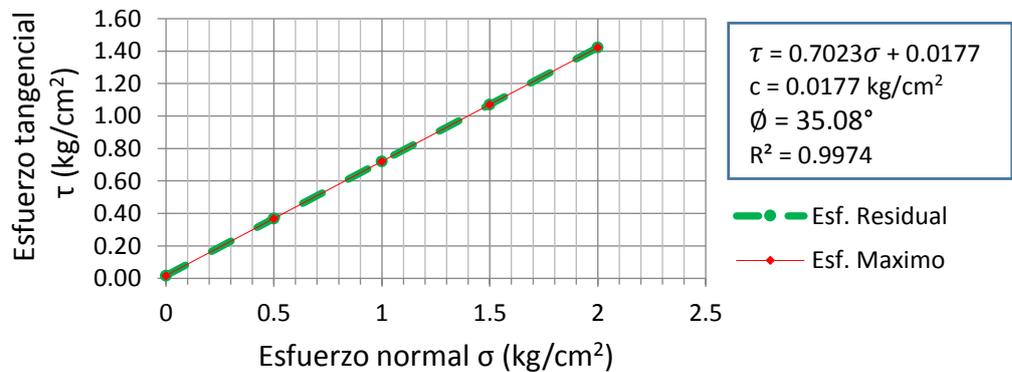
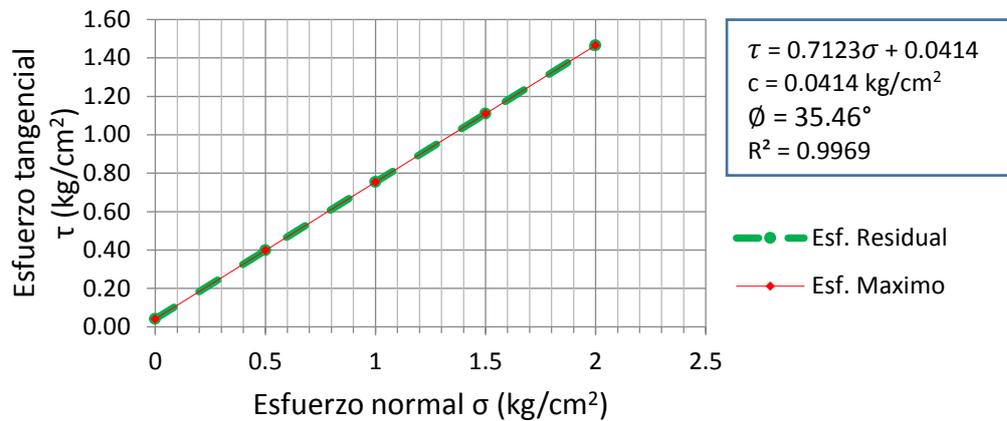


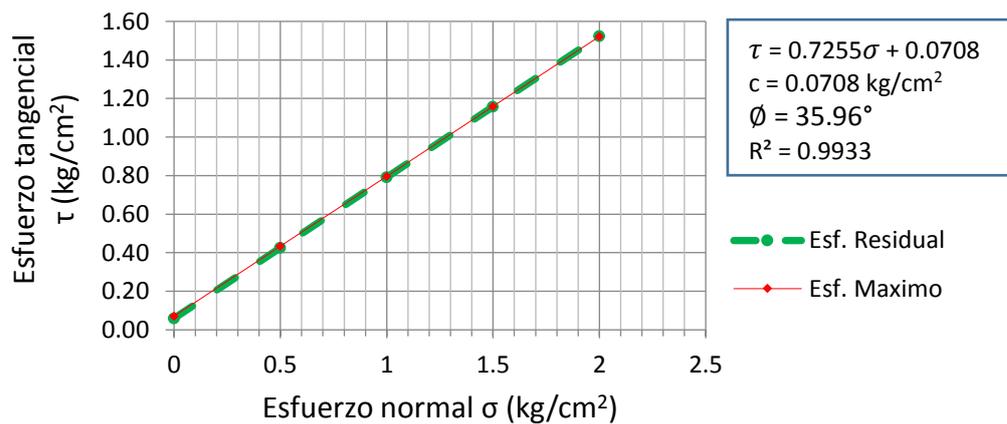
Figura 27. Esfuerzo normal versus Esfuerzo tangencial para un PU = 1.6 gr/cm3.

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 1.7 gr/cm3:**



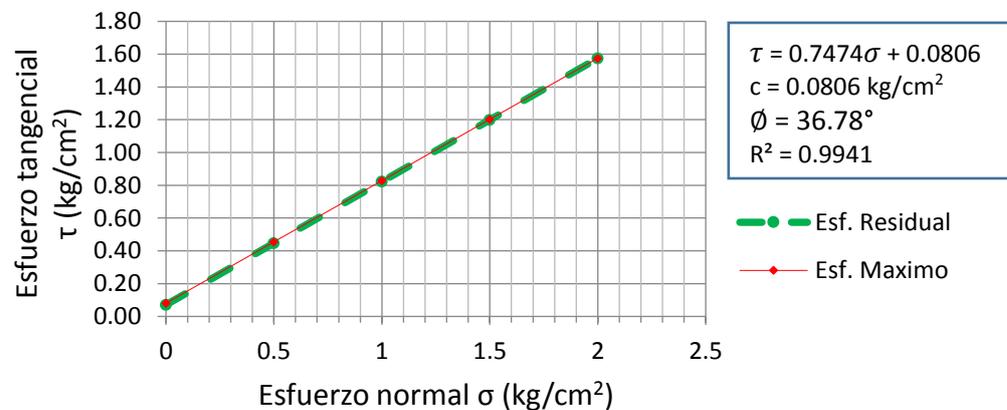
*Figura 28. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.7 gr/cm3.*

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 1.8 gr/cm3:**



*Figura 29. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.8 gr/cm3.*

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 1.9 gr/cm3:**



*Figura 30. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.9 gr/cm3.*

### 3.4.2.1.5. DETERMINACIÓN DEL ANGULO DE FRICCIÓN Y COHESION PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 19.05%

- PARA UN PESO UNITARIO DE 1.7 gr/cm<sup>3</sup>:

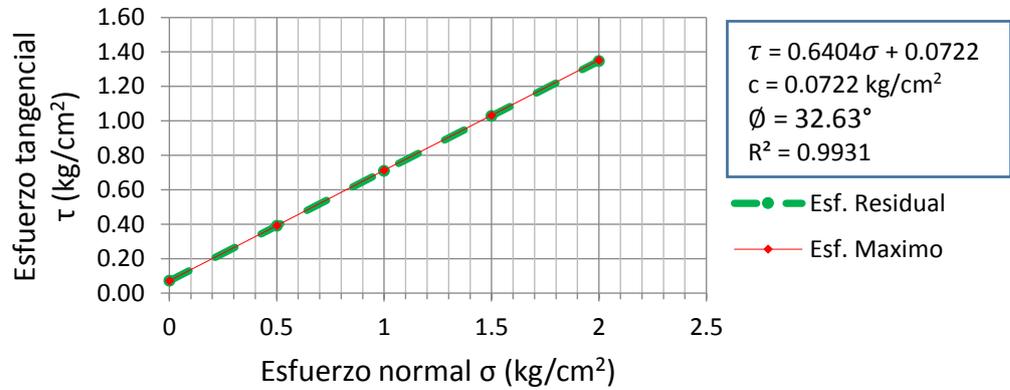


Figura 31. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.7 gr/cm<sup>3</sup>.

- PARA UN PESO UNITARIO DE 1.8 gr/cm<sup>3</sup>:

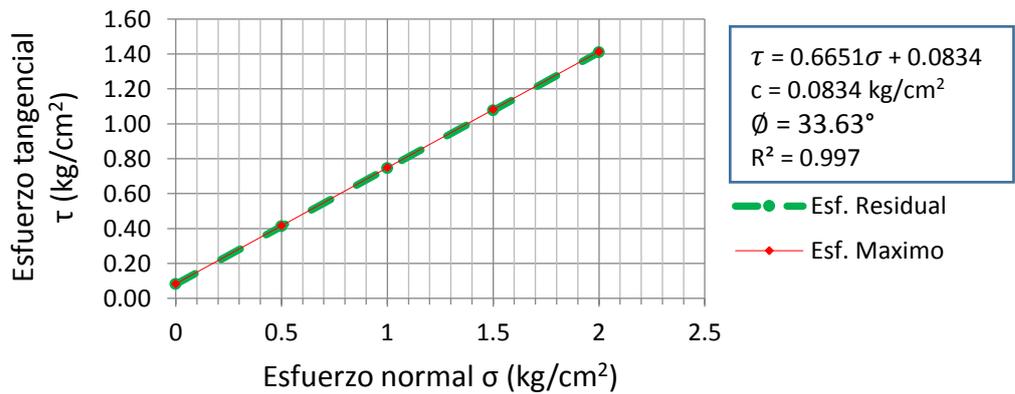


Figura 32. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.8 gr/cm<sup>3</sup>.

- PARA UN PESO UNITARIO DE 1.9 gr/cm<sup>3</sup>:

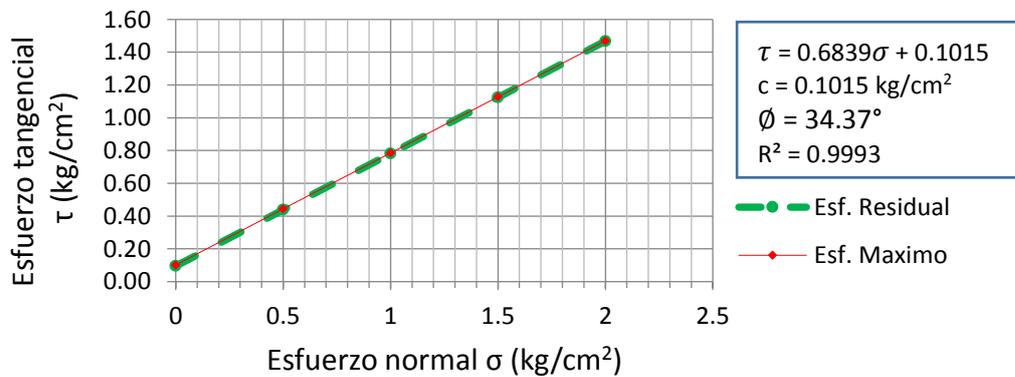
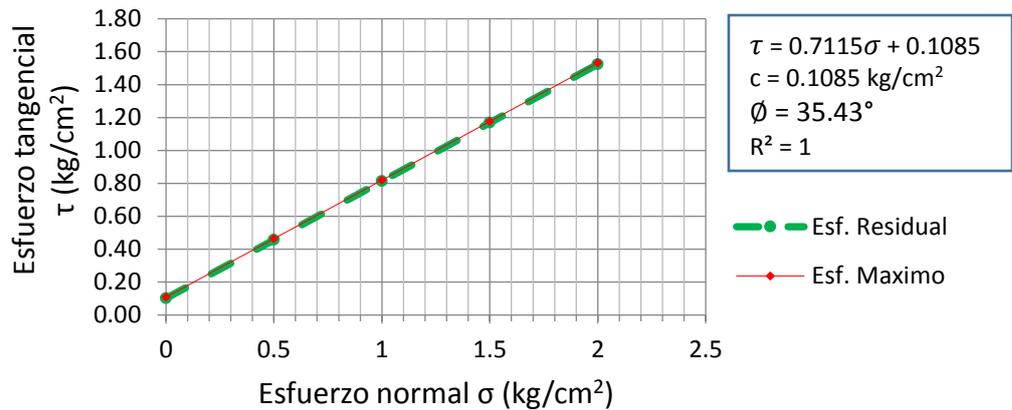


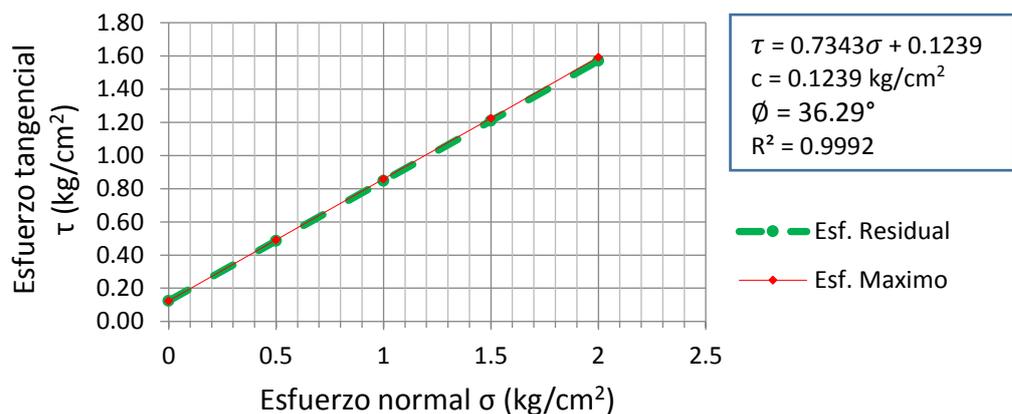
Figura 33. Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 1.9 gr/cm<sup>3</sup>.

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 2.0 gr/cm3:**



**Figura 34.** Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 2.0 gr/cm3.

- **PARA UN PESO UNITARIO DE 2.1 gr/cm3:**



**Figura 35.** Esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial para un PU = 2.1 gr/cm3.

### 3.4.2.2. NTP 339.134: MÉTODO PARA LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS CON PROPÓSITOS DE INGENIERÍA (SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS, SUCS)

Este método de ensayo describe un sistema para la clasificación de suelos minerales y orgánicos minerales con propósitos de ingeniería, basado en la determinación en el laboratorio de las características de granulometría, límite líquido e índice de plasticidad, y deberá ser utilizado cuando se requiere una clasificación precisa.

Suelos (SUCS). Las propiedades índices de los suelos ensayados se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10: Clasificación de suelos

Calicata	Profundidad (m)	Muestra	Granulometría			Límites de consistencia		Humedad (%)	Clasific. SUCS
			Gravas (%)	Arenas (%)	Finos (%)	LL (%)	IP (%)		
C-2	2.00 - 3.10	mab-1	15.60	44.22	40.17	25	10	19.05	SC

### 3.4.2.3. NTP 339.128: MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANALISIS GRANULOMÉTRICO

Consiste en la determinación cuantitativa de la distribución de tamaño de partículas de los suelos. La clasificación de las partículas mayores que 75  $\mu\text{m}$  (retenido en el tamiz N° 200) se efectúa por tamizado, en tanto que la determinación de las partículas menores que 75  $\mu\text{m}$  se realiza mediante un proceso de sedimentación basada en la ley de Stokes utilizando un densímetro adecuado, El análisis granulométrico se resume en la Tabla 11 y Figura 36.

Tabla 11: Análisis granulométrico por tamizado

Masa Inicial Seca (gr)	=	2268.90	% que pasa N° 200 =	40.17	
Masa Lavada y Seca (gr)	=	1445.00	M. Retenido 3"(gr) =	0.00	
			Tamaño Máximo :	3"	
Abertura de Tamices		Retenido en cada Tamiz		PORCENTAJE ACUMULADO	
ASTM E11	mm	Masa (gr)	%	Retenido	Que pasa
3"	75.000	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.500	231.70	10.21	10.21	89.79
3/4"	19.000	55.80	2.46	12.67	87.33
3/8"	9.500	21.50	0.95	13.62	86.38
# 4	4.750	45.00	1.98	15.60	84.40
# 8	2.360	46.90	2.07	17.67	82.33
# 16	1.180	90.30	3.98	21.65	78.35
# 30	0.600	169.00	7.45	29.10	70.90
# 50	0.300	162.20	7.15	36.25	63.75
# 100	0.150	268.40	11.83	48.08	51.92
# 200	0.075	266.60	11.75	59.83	40.17
< 200	Fondo	87.60	3.86	63.69	36.31

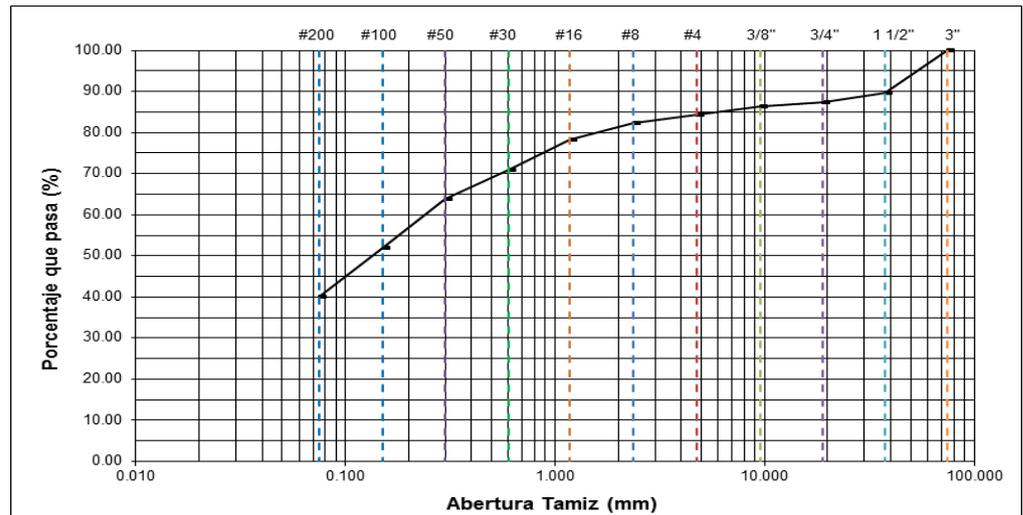


Figura 36. Análisis granulométrico por tamizado

#### 3.4.2.4. NTP 339.089: OBTENCIÓN EN LABORATORIO DE MUESTRAS REPRESENTATIVAS (CUARTEO)

Se extendió una lona para cubrir un área aproximada de 2m x 2m, se colocó la muestra sobre la superficie evitando cualquier pérdida del material. Se mesclo bien el material hasta formar una pila en forma de cono, repitiendo esta operación cuatro veces. Cada palada tomada de la base se deposita en la parte superior del cono, de modo que el material caiga uniformemente por los lados del mismo.

Cuidadosamente aplastamos y extendemos la pila cónica hasta darle una base circular, espesor y diámetro uniforme, presionando hacia abajo con la cuchara de la pala, de tal manera que cada cuarto del sector contenga el material original. El diámetro a lograr debe ser aproximadamente cuatro u ocho veces el espesor.

Se procede luego a dividir diametralmente el material en cuatro partes iguales, de las cuales se separan dos cuartos diagonalmente opuestos, incluyendo todo el material fino. Los dos cuartos restantes se mezclaron sucesivamente y se repitió la operación hasta obtener la cantidad de muestra requerida ver Figura 37.



*Figura 37. Obtención en laboratorio de muestras representativas (Cuarteo)*

### **3.4.2.5. NTP 339.129: MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO LÍMITE PLÁSTICO, E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS**

A la muestra una vez removida, se le separo cualquier material retenido en el tamiz 425  $\mu\text{m}$ . (N° 40). El límite líquido se determinó realizando pruebas en las cuales se esparció una porción de la muestra en una copa de bronce, dividida en dos por un ranurador, y luego permitiendo que fluya debido a los impactos causados por las repetidas caídas de la copa en un dispositivo mecánico estándar. Se realizaron tres pruebas sobre un rango de contenidos de humedad y luego se graficó y calculo la información sobre un rango de contenidos de humedad para establecer una relación a partir de la cual se determine el límite líquido, ver Tabla 12 y para el ensayo ver Figura 38.

Mientras que el límite plástico se determinó presionando y enrollando alternamente a un hilo de 3,2 mm. De diámetro (1/4 pulg), una porción pequeña de suelo plástico hasta que su contenido de humedad se reduzca hasta el punto en que el hilo se quiebre y no pueda ser más presionado y reenrollado. El contenido de humedad del suelo en este punto se reporta como el límite plástico ver Tabla 13, Para el ensayo ver Figura 38.

El índice de plasticidad se calcula como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico ver Tabla 14.

*Tabla 12: Determinación del límite líquido.*

Nº de golpes	14	24	36
P.Suelo Húmedo+Rec.	25.07	22.75	25.48
P.Suelo Seco+Rec.	21.91	20.08	22.53
Peso del Recipiente	7.74	7.52	7.68
Peso Suelo Seco	14.17	12.56	14.85
Peso del Agua	3.16	2.67	2.95
C. de Humedad %	22.30	21.26	19.87

*Tabla 13: Determinación del límite plástico.*

P.Suelo Húmedo+Rec.	35.71	35.70
P.Suelo Seco+Rec.	34.65	34.60
Peso del Recipiente	28.35	28.03
Peso Suelo Seco	6.30	6.57
Peso del Agua	1.06	1.10
C. de Humedad %	16.83	16.74

*Tabla 14: Índice de plasticidad.*

Límite Líquido =	<b>21</b>
Límite Plástico =	<b>17</b>
Índice Plasticidad =	<b>4</b>



*Figura 38. Límite líquido y límite plástico e índice de plasticidad.*

### 3.4.2.6. NTP 339.127: MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO

Se determinó el peso de agua eliminada, secando el suelo húmedo hasta un peso constante en el horno controlado a 110 °C más o menos 5 °C. El peso del suelo que permanece del secado en horno es usado como el peso de las partículas sólidas. La pérdida de peso debido al secado es considerada como peso del agua, ver Figura 39 y Tabla 15.

Tabla 15: Contenido de humedad de un suelo.

DESCRIPCION		M - 1	M - 2
Peso Suelo Húmedo + Contenedor	$M_{cws}$	244.29	248.96
Peso Suelo Seco + Contenedor	$M_{cs}$	208.71	212.67
Peso Contenedor	$M_c$	21.99	22.15
Peso Suelo Seco ( $M_w = M_{cws} - M_{cs}$ )	$M_w$	186.72	190.52
Peso del Agua ( $M_s = M_{cws} - M_c$ )	$M_s$	35.58	36.29
Contenido de Humedad ( $w = M_w / M_s$ )	$w$	19.06	19.05

<b>Humedad Promedio (%)</b>	<b>19.05</b>
-----------------------------	--------------



Figura 39. Contenido de humedad del suelo.

### 3.4.2.7. NTP 339.139: DETERMINACIÓN DEL PESO VOLUMÉTRICO DE SUELO COHESIVO

Para el caso de nuestra muestra se realizaron tanto el método de medición lineal y el método de la inmersión en agua, debido a que la muestra permitió realizar estos dos métodos.

En el método de medición lineal se preparó un espécimen moldeándolo de la forma adecuada a las mediciones del corte directo, con un molde de las dimensiones de 2x6x6 de volumen, ver Figura 40 y Tabla 16.



Figura 40. Método de medición lineal

Tabla 16: Peso volumétrico de un suelo mediante el método de medición lineal.

DESCRIPCIÓN				M1	M2
Dimensiones del molde:					
	Ancho	cm	(A)	6	6
	Largo	cm	(L)	6	6
	Espesor	cm	(E)	2	2
	Volumen (AxLxE)	cm <sup>3</sup>	(V)	72	72
Peso suelo + molde		gr	(Mcs)	136.8	136.5
Densidad de masa de suelo		gr/cm <sup>3</sup>	γ	1.90	1.90
<b>Densidad de masa de suelo</b>		<b>gr/cm<sup>3</sup></b>	<b>γ</b>	<b>1.90</b>	

El método de la inmersión en agua consistió en someter la muestra en cera o parafina fundida, cubriéndolo completamente de manera que llene todos los vacíos de aire superficiales. Una vez encerrado lo colocamos al bastidor desde la estructura de soporte a la plataforma de

la balanza donde medimos la masa aparente mientras este suspendida en agua, ver Figura 41 y Tabla 17.



Figura 41. Método de la inmersión en agua.

Tabla 17: Peso volumétrico de un suelo mediante el método de inmersión en agua.

Muestra de Ensayo				1	2
Tipo de Frasco Utilizado				Cilindro Graduado	Cilindro Graduado
Temperatura del agua		°C		16.7	16.7
Masa húmeda de la muestra	gr	(A)		138.94	245.42
Masa de la muestra con parafina	gr	(B)		142.11	249.16
Volumen de agua desplazada	cm <sup>3</sup>	(C)		76.87	133.00
Volumen de parafina (D=(C-A)/γ <sub>par</sub> )	cm <sup>3</sup>	(D)		3.73	4.40
Volumen del suelo (E=C-D)	cm <sup>3</sup>	(E)		73.14	128.60
Densidad de Masa del suelo (γ) (B/E)		gr/cm <sup>3</sup>		1.90	1.91
<b>Densidad de Masa del suelo</b>	<b>gr/cm<sup>3</sup></b>	<b>γ</b>		<b>1.90</b>	
γ Parafina=	0.85	gr/cm <sup>3</sup>	(Peso específico de la parafina)		

### 3.4.2.8. NTP 339.151: MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS DE UN SUELO

Para este ensayo se tomó la muestra de suelo seca al horno, para luego colocar la muestra en el picnómetro evitando producir pérdidas, en el caso de haber determinado su masa. Se llenó hasta la mitad de su capacidad con agua destilada el frasco volumétrico para luego

someter el contenido a un ciclo de giro durante 10 minutos, a fin de ayudar a la eliminación de aire. Una vez reducido el aire incorporado se hace la lectura de peso del picnómetro con el contenido del suelo hasta el ras demarca del picnómetro ver Figura 42 y Tabla 18.



**Figura 42. Método de ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas sólidas de un suelo.**

**Tabla 18: Peso específico relativo de las partículas sólidas de un suelo.**

Muestra de Ensayo			M-1	M-2
Porción de muestra de ensayo			Pasa Malla # 4	Pasa Malla # 4
Tipo de Frasco Utilizado			Picnómetro 500 ml	Picnómetro 500 ml
Masa picnómetro+ agua	gr	(M <sub>a</sub> )	673.30	705.50
Masa picnómetro+ agua + suelo		(M <sub>b</sub> )	753.00	785.50
Masa muestra seco al horno + recip.	gr	(A)	129.00	129.00
Masa recipiente	gr	(B)	0.00	0.00
Masa muestra de suelo seco al horno (M <sub>0</sub> = A-B)	gr	(M <sub>0</sub> )	129.00	129.00
Peso Específico Relativo de Sólidos (Gs = M <sub>0</sub> /(M <sub>0</sub> +(M <sub>a</sub> -M <sub>b</sub> )))			2.62	2.63
<b>Peso Específico Relativo de Sólidos (Gs) (B/E)</b>			<b>2.62</b>	

## CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.1. CORRELACIÓN DE LOS PARAMETROS DE RESISTENCIA CORTANTE CON LA DENSIDAD DEL SUELO.

#### 4.1.1. CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS ANGULO DE FRICCIÓN ( $\phi$ ) (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 0.00 %)

Tabla 19: Análisis de regresión lineal simple para determinar el ángulo de fricción interna con respecto al peso unitario.

CLASE	PU (X)	$\phi$ (Y)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y
1	1.3	27.43	1.69	752.40	35.659
2	1.4	29.18	1.96	851.47	40.852
3	1.5	30.42	2.25	925.38	45.63
4	1.6	31.77	2.56	1009.33	50.832
5	1.7	33.21	2.89	1102.90	56.457
$\Sigma$ SUMA	7.5	152.01	11.35	4641.49	229.43

De las ecuaciones mostradas y con los valores de la Tabla 19 con  $n = 5$ , se tiene:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$



$$\bar{Y} = 30.40$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$



$$\bar{X} = 1.5$$

Medida del grado en el cual dos variables están relacionadas linealmente, de las ecuaciones y Tabla 19 se determina:

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{YY} = 20.08$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XY} = 1.41$$

Valor esperado de los estimadores, determinados por las ecuaciones:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 14.15$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{X} \quad \Rightarrow \quad \beta_0 = 9.177$$

Tabla 20: Estimación del error y de la “Y (Estimado)”

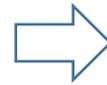
CLASE	PU (X)	$\phi$ (Y)	$\phi$ (Estimado)	Estimado del Error	Cuadrado del Error
1	1.3	27.43	27.572	-0.142	0.020164
2	1.4	29.18	28.987	0.193	0.037249
3	1.5	30.42	30.402	0.018	0.000324
4	1.6	31.77	31.817	-0.047	0.002209
5	1.7	33.21	33.232	-0.022	0.000484
$\Sigma$ SUMA	7.5	152.01		$SC_E =$	0.06043

$$\phi(\text{estimado}) = \beta_0 + \beta_1 PU$$

$$\Rightarrow \quad \phi(\text{estimado}) = 14.15PU + 9.177$$

De la Tabla 20 se determina el cuadrado medio del error  $SC_E$  que es la suma de todos los cuadrados estimados de error  $SC_E = 0.06043$ , Donde:

$$\frac{SC_E}{n-2} = CM_E$$



$$CM_E = 0.02014$$

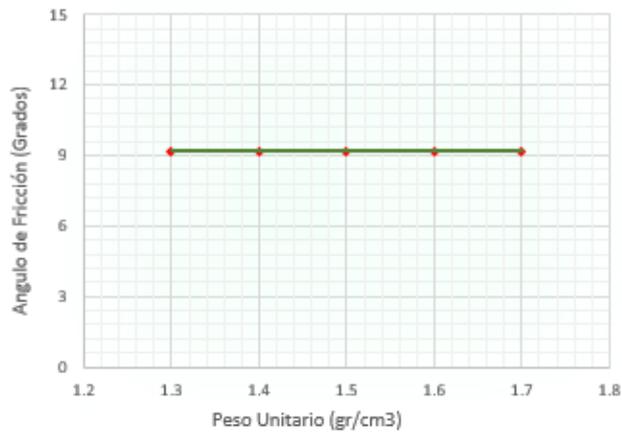
### Formulación de las hipótesis:

Es necesario evaluar que tan bien el modelo explica la relación entre PU (X) y  $\phi$  (Y).

La hipótesis de mayor interés plantea que la pendiente ( $\beta_1$ ) es significativamente diferente de cero.

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_A : \beta_1 \neq 0$$



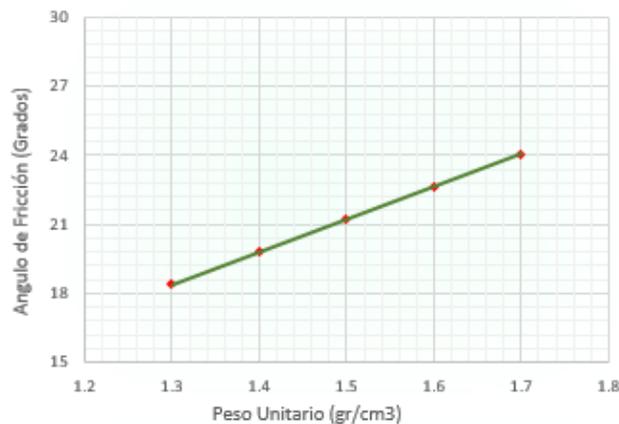
PU (X)	$\phi$ (Estimado)
1.3	9.177
1.4	9.177
1.5	9.177
1.6	9.177
1.7	9.177

Figura 43. Cuando  $\beta_1 = 0$ ;  $\phi(\text{estimado}) = 9.177 + 0PU$

Con respecto al parámetro  $\beta_0$  (Intersección al eje y):

$$H_0 : \beta_0 = 0$$

$$H_A : \beta_0 \neq 0$$



PU (X)	$\phi$ (Estimado)
1.3	18.395
1.4	19.81
1.5	21.225
1.6	22.64
1.7	24.055

Figura 44. Cuando  $\beta_0 = 0$ ;  $\phi(\text{estimado}) = 0 + 14.15PU$

Análisis de regresión para  $n = 5$  :

$$S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = 20.08$$

$$S_{XY} = 1.41$$

$$CM_E = 0.02014$$

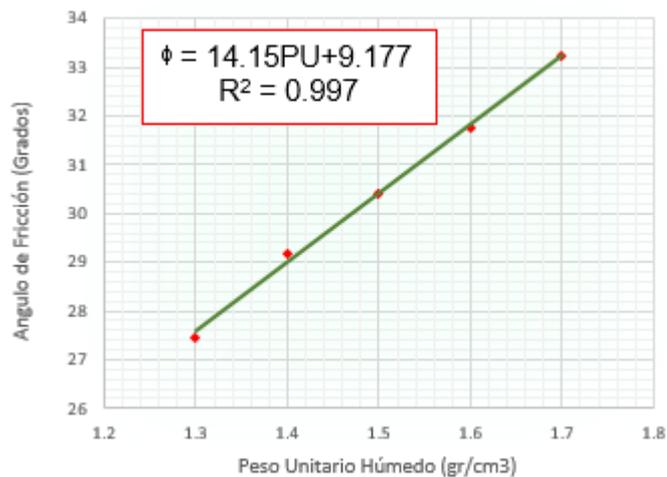
$$\bar{X} = 1.5$$

$$\bar{Y} = 30.40$$

$$\beta_0 = 9.177$$

$$\beta_1 = 14.15$$

Resultando la figura siguiente:



**Figura 45. Grafica  $\phi$  vs PU.**

Estadística de prueba para  $\beta_1$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_1}{\sqrt{CM_E/S_{XX}}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 31.53$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

Entonces  $31.53 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $31.53 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

Estadística de prueba para  $\beta_0$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0}{\sqrt{CM_E \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{XX}} \right)}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 13.57$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$13.57 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $13.57 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

### Análisis de varianza

$SC_R$  es la suma de cuadrados de la regresión y mide la varianza explicada por la recta de regresión.

$$SC_R = \beta_1 S_{XY} \quad \Rightarrow \quad SC_R = 20.022$$

$$CM_R = SC_R / 1 \quad \Rightarrow \quad CM_R = 20.022$$

$$CM_E = SC_E / (n - 2) \quad \Rightarrow \quad CM_E = 0.0201$$

### Formulación de la hipótesis:

Para  $\alpha = 5\% = 0.05$ , y

$$H_0 : \beta_0 = 0$$

$$H_A : \beta_0 \neq 0$$

Estadística de prueba:

$$F_0 = \frac{SC_R / 1}{SC_E / (n - 2)} = \frac{CM_R}{CM_E} \quad \Rightarrow \quad F_0 = 993.99$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $F_0 > F_{(\alpha,1,n-2)}$  , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$993.99 > F(0.05, 1, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $F(0.05, 1, 3) = 10.13$

**Entonces como:  $993.99 > 10.13$  el modelo de regresión es significativo.**

Hemos rechazado las hipótesis nulas en ambos análisis (de regresión y de varianza) concluyendo que la ecuación de regresión:

$$\phi = 14.15PU + 9.177$$

Es significativo por lo tanto podemos afirmar que nuestro modelo es importante para predecir el ángulo de fricción interna con respecto al peso unitario.

#### 4.1.2. CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS COHESIÓN (C), (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 0.00 %)

Tabla 21: Análisis de regresión lineal simple para determinar la cohesión con respecto al peso unitario.

CLASE	PU (X)	C (Y)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y
1	1.3	0.03	1.69	0.001	0.039
2	1.4	0.06	1.96	0.004	0.084
3	1.5	0.08	2.25	0.006	0.12
4	1.6	0.12	2.56	0.014	0.192
5	1.7	0.13	2.89	0.017	0.221
$\Sigma$ SUMA	7.5	0.42	11.35	0.04	0.656

De las ecuaciones mostradas y con los valores de la Tabla 21 con  $n = 5$ , se tiene:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$



$$\bar{Y} = 0.084$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{X} = 1.5$$

Medida del grado en el cual dos variables están relacionadas linealmente, de las ecuaciones y Tabla 21 se determina:

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{YY} = 0.007$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XY} = 0.026$$

Valor esperado de los estimadores, determinados por las ecuaciones:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 0.26$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{X} \quad \Rightarrow \quad \beta_0 = -0.306$$

Tabla 22: Estimación del error y de la "Y (Estimado)"

CLASE	PU (X)	C (Y)	C (Estimado)	Estimado del Error	Cuadrado del Error
1	1.3	0.03	0.032	-0.002	4E-06
2	1.4	0.06	0.058	0.002	4E-06
3	1.5	0.08	0.084	-0.004	1.6E-05
4	1.6	0.12	0.11	0.01	1E-04
5	1.7	0.13	0.136	-0.006	3.6E-05
Σ SUMA	7.5	0.42		SC <sub>E</sub> =	0.00016

$$C(\text{estimado}) = \beta_0 + \beta_1 PU$$

$$\Rightarrow C(\text{estimado}) = 0.26PU - 0.306$$

De la Tabla 22 se determina el cuadrado medio del error  $SC_E$  que es la suma de todos los cuadrados estimados de error  $SC_E = 0.00016$ , Donde:

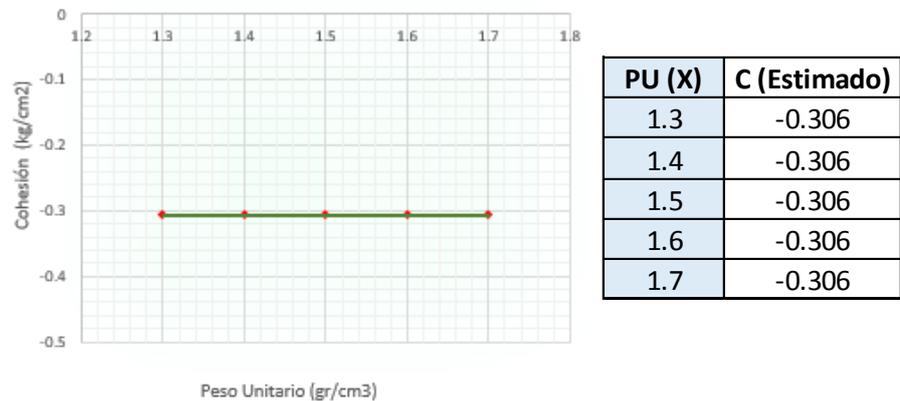
**Formulación de las hipótesis:**

Es necesario evaluar que tan bien el modelo explica la relación entre PU (X) y C (Y).

La hipótesis de mayor interés plantea que la pendiente ( $\beta_1$ ) es significativamente diferente de cero.

$H_0 : \beta_1 = 0$

$H_A : \beta_1 \neq 0$

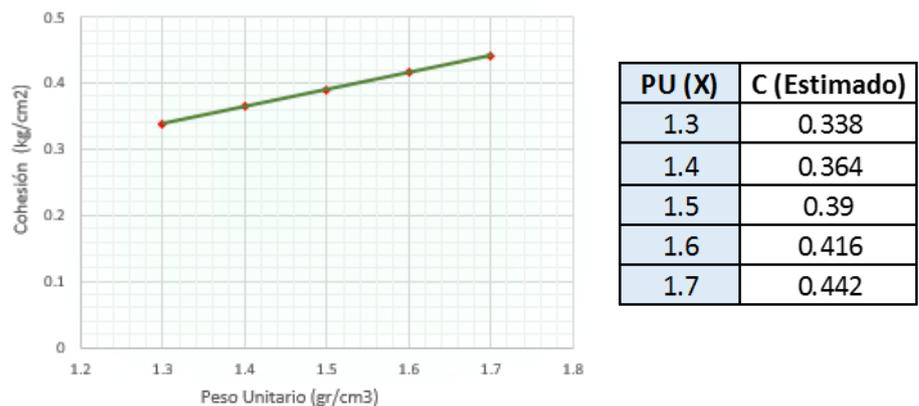


**Figura 46. Cuando  $\beta_1 = 0$ ;  $C(\text{estimado}) = -0.306 + 0PU$**

Con respecto al parámetro  $\beta_0$  (Intersección al eje y):

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$



**Figura 47. Cuando  $\beta_0 = 0$ ;  $C(\text{estimado}) = 0+0.26PU$**

Análisis de regresión para  $n = 5$  :

$$S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = 0.007$$

$$S_{XY} = 0.026$$

$$CM_E = 0.0000533$$

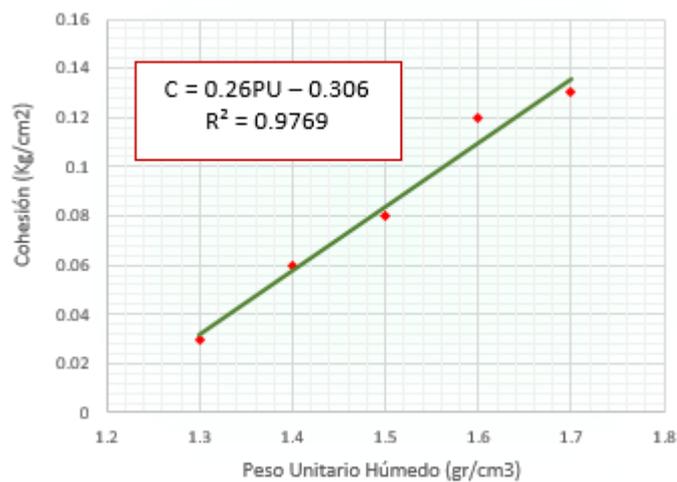
$$\bar{X} = 1.5$$

$$\bar{Y} = 0.084$$

$$\beta_0 = -0.306$$

$$\beta_1 = 0.26$$

Resultando la figura siguiente:



**Figura 48. Grafica C vs PU.**

Estadística de prueba para  $\beta_1$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_1}{\sqrt{CM_E/S_{XX}}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 11.258$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

Entonces  $11.26 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $11.258 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

Estadística de prueba para  $\beta_0$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0}{\sqrt{CM\varepsilon\left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{XX}}\right)}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = -8.794$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$8.794 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $8.794 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

### Análisis de varianza

$SC_R$  es la suma de cuadrados de la regresión y mide la varianza explicada por la recta de regresión.

$$SC_R = \beta_1 S_{XY} \quad \Rightarrow \quad SC_R = 0.007$$

$$CM_R = SC_R / 1 \quad \Rightarrow \quad CM_R = 0.007$$

$$CM_E = SC_E / (n - 2) \quad \Rightarrow \quad CM_E = 0.0000533$$

### Formulación de la hipótesis:

Para  $\alpha = 5\% = 0.05$ , y

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$

Estadística de prueba:

$$F_0 = \frac{SC_R / 1}{SC_E / (n - 2)} = \frac{CM_R}{CM_E} \quad \Rightarrow \quad F_0 = 126.75$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $F_0 > F_{(\alpha,1,n-2)}$  , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$126.75 > F(0.05, 1, 3)$  de la Tabla de valor estadístico “t” se tiene  $F(0.05, 1, 3) = 10.13$

**Entonces:  $126.75 > 10.13$  el modelo de regresión es significativo.**

Hemos rechazado las hipótesis nulas en ambos análisis (de regresión y de varianza) concluyendo que la ecuación de regresión:

$$C = 0.26PU - 0.306$$

Es significativo por lo tanto podemos afirmar que nuestro modelo es importante para predecir la cohesión con respecto al peso unitario.

#### 4.1.3. CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS ANGULO DE FRICCIÓN ( $\phi$ ) (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 5.00 %)

Tabla 23: Análisis de regresión lineal simple para determinar el ángulo de fricción interna con respecto al peso unitario.

CLASE	PU (X)	$\phi$ (Y)	$X^2$	$Y^2$	$X*Y$
1	1.4	29.94	1.96	896.40	41.916
2	1.5	31.43	2.25	987.84	47.145
3	1.6	32.68	2.56	1067.98	52.288
4	1.7	33.55	2.89	1125.60	57.035
5	1.8	34.88	3.24	1216.61	62.784
$\Sigma$ SUMA	8	162.48	12.9	5294.45	261.168

De las ecuaciones mostradas y con los valores de la Tabla 23 con  $n = 5$ , se tiene:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$



$$\bar{Y} = 32.50$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{X} = 1.6$$

Medida del grado en el cual dos variables están relacionadas linealmente, de las ecuaciones y Tabla 23 se determina:

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{YY} = 14.50$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XY} = 1.20$$

Valor esperado de los estimadores, determinados por las ecuaciones:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 12.000$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{X} \quad \Rightarrow \quad \beta_0 = 13.296$$

Tabla 24: Estimación del error y de la "Y (Estimado)"

CLASE	PU (X)	$\phi$ (Y)	$\phi$ (Estimado)	Estimado del Error	Cuadrado del Error
1	1.4	29.94	30.096	-0.156	0.024336
2	1.5	31.43	31.296	0.134	0.017956
3	1.6	32.68	32.496	0.184	0.033856
4	1.7	33.55	33.696	-0.146	0.021316
5	1.8	34.88	34.896	-0.016	0.000256
$\Sigma$ SUMA	8	162.48		$SC_E =$	0.09772

$$\phi(\text{estimado}) = \beta_0 + \beta_1 PU$$

$$\Rightarrow \quad \phi(\text{estimado}) = 12PU + 13.296$$

De la Tabla 24 se determina el cuadrado medio del error  $SC_E$  que es la suma de todos los cuadrados estimados de error  $SC_E = 0.09772$ , Donde:

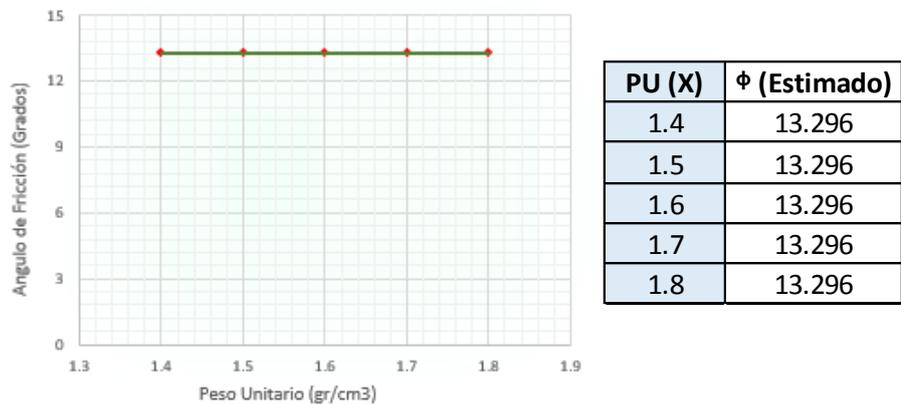
**Formulación de las hipótesis:**

Es necesario evaluar que tan bien el modelo explica la relación entre PU (X) y  $\phi$  (Y).

La hipótesis de mayor interés plantea que la pendiente ( $\beta_1$ ) es significativamente diferente de cero.

$H_0 : \beta_1 = 0$

$H_A : \beta_1 \neq 0$

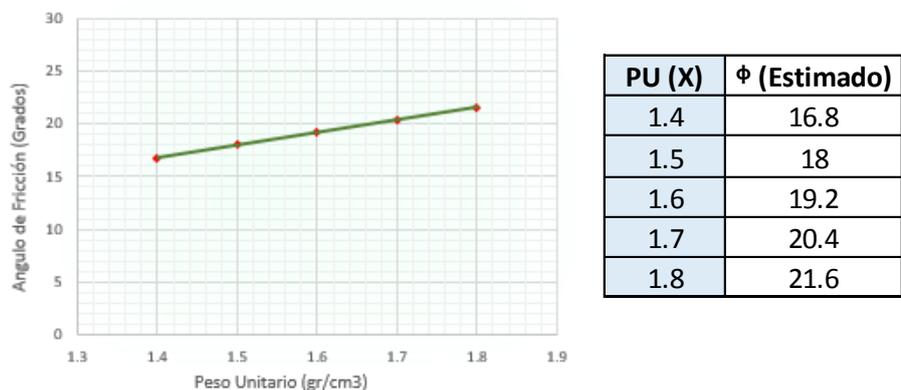


**Figura 49. Cuando  $\beta_1 = 0$ ;  $\phi(\text{estimado}) = 13.296 + 0PU$**

Con respecto al parámetro  $\beta_0$  (Intersección al eje y):

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$



**Figura 50. Cuando  $\beta_0 = 0$ ;  $\phi(\text{estimado}) = 0 + 12PU$**

Análisis de regresión para  $n = 5$  :

$$S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = 14.50$$

$$S_{XY} = 1.20$$

$$CM_E = 0.0325$$

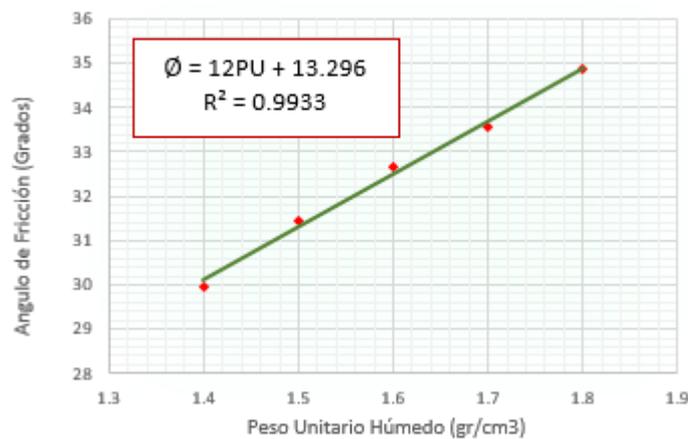
$$\bar{X} = 1.6$$

$$\bar{Y} = 32.50$$

$$\beta_0 = 13.296$$

$$\beta_1 = 12.00$$

Resultando la figura siguiente:



**Figura 51. Grafica  $\phi$  vs PU.**

Estadística de prueba para  $\beta_1$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\hat{\beta}_1}{\sqrt{CM_E/S_{XX}}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 21.03$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

Entonces  $21.03 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $21.03 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

Estadística de prueba para  $\beta_0$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0}{\sqrt{CM_E \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{XX}} \right)}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 14.50$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$14.50 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $14.50 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

### Análisis de varianza

$SC_R$  es la suma de cuadrados de la regresión y mide la varianza explicada por la recta de regresión.

$$SC_R = \beta_1 S_{XY} \quad \Rightarrow \quad SC_R = 14.40$$

$$CM_R = SC_R / 1 \quad \Rightarrow \quad CM_R = 14.40$$

$$CM_E = SC_E / (n - 2) \quad \Rightarrow \quad CM_E = 0.033$$

### Formulación de la hipótesis:

Para  $\alpha = 5\% = 0.05$ , y

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$

Estadística de prueba:

$$F_0 = \frac{SC_R / 1}{SC_E / (n - 2)} = \frac{CM_R}{CM_E} \quad \Rightarrow \quad F_0 = 442.08$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $F_0 > F_{(\alpha,1,n-2)}$  , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$442.08 > F(0.05, 1, 3)$  de la Tabla de valor estadístico “t” se tiene  $F(0.05, 1, 3) = 10.13$

**Entonces como:  $442.08 > 10.13$  el modelo de regresión es significativo.**

Hemos rechazado las hipótesis nulas en ambos análisis (de regresión y de varianza) concluyendo que la ecuación de regresión:

$$\phi = 12PU + 13.296$$

Es significativo por lo tanto podemos afirmar que nuestro modelo es importante para predecir el ángulo de fricción interna con respecto al peso unitario.

#### 4.1.4. CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS COHESIÓN (C), (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 5.00 %)

Tabla 25: Análisis de regresión lineal simple para determinar la cohesión con respecto al peso unitario.

CLASE	PU (X)	C (Y)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y
1	1.4	0	1.96	0.000	0
2	1.5	0	2.25	0.000	0
3	1.6	0.01	2.56	0.000	0.016
4	1.7	0.08	2.89	0.006	0.136
5	1.8	0.14	3.24	0.020	0.252
$\Sigma$ SUMA	8	0.23	12.9	0.03	0.404

De las ecuaciones mostradas y con los valores de la Tabla 25 con  $n = 5$ , se tiene:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$



$$\bar{Y} = 0.046$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{X} = 1.6$$

Medida del grado en el cual dos variables están relacionadas linealmente, de las ecuaciones y Tabla 25 se determina:

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{YY} = 0.016$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XY} = 0.036$$

Valor esperado de los estimadores, determinados por las ecuaciones:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 0.36$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{X} \quad \Rightarrow \quad \beta_0 = -0.530$$

Tabla 26: Estimación del error y de la "Y (Estimado)"

CLASE	PU (X)	C (Y)	C (Estimado)	Estimado del Error	Cuadrado del Error
1	1.4	0	-0.026	0.026	0.000676
2	1.5	0	0.01	-0.01	1E-04
3	1.6	0.01	0.046	-0.036	0.001296
4	1.7	0.08	0.082	-0.002	4E-06
5	1.8	0.14	0.118	0.022	0.000484
$\Sigma$ SUMA	8	0.23		$SC_E =$	0.00256

$$C(\text{estimado}) = \beta_0 + \beta_1 PU$$

$$\Rightarrow C(\text{estimado}) = 0.36PU - 0.530$$

De la Tabla 26 se determina el cuadrado medio del error  $SC_E$  que es la suma de todos los cuadrados estimados de error  $SC_E = 0.00256$ .

**Formulación de las hipótesis:**

Es necesario evaluar que tan bien el modelo explica la relación entre PU (X) y C (Y).

La hipótesis de mayor interés plantea que la pendiente ( $\beta_1$ ) es significativamente diferente de cero.

$H_0 : \beta_1 = 0$

$H_A : \beta_1 \neq 0$



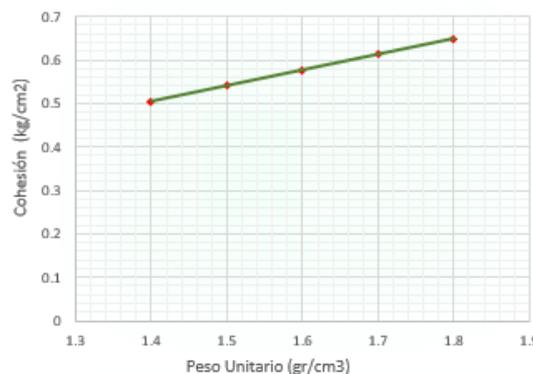
PU (X)	C (Estimado)
1.4	-0.530
1.5	-0.530
1.6	-0.530
1.7	-0.530
1.8	-0.530

**Figura 52. Cuando  $\beta_1 = 0$ ;  $C(\text{estimado}) = -0.530 + 0PU$**

Con respecto al parámetro  $\beta_0$  (Intersección al eje y):

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$



PU (X)	C (Estimado)
1.4	0.504
1.5	0.54
1.6	0.576
1.7	0.612
1.8	0.648

**Figura 53. Cuando  $\beta_0 = 0$ ;  $C(\text{estimado}) = 0+0.36PU$**

Análisis de regresión para  $n = 5$  :

$$S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = 0.016$$

$$S_{XY} = 0.036$$

$$CM_E = 0.0008533$$

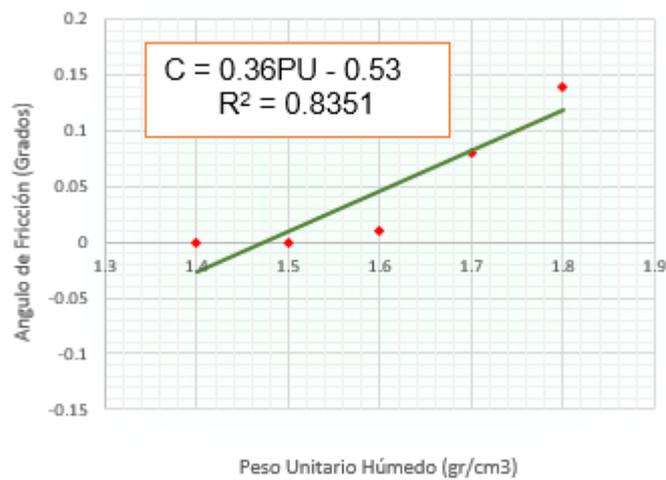
$$\bar{X} = 1.6$$

$$\bar{Y} = 0.046$$

$$\beta_0 = -0.530$$

$$\beta_1 = 0.360$$

Resultando la figura siguiente:



**Figura 54. Grafica C vs PU.**

Estadística de prueba para  $\beta_1$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_1}{\sqrt{CM_E/S_{XX}}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 3.897$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

Entonces  $3.897 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $3.897 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

Estadística de prueba para  $\beta_0$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0}{\sqrt{CM_E \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{XX}} \right)}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = -3.572$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$3.572 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $3.572 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

### Análisis de varianza

$SC_R$  es la suma de cuadrados de la regresión y mide la varianza explicada por la recta de regresión.

$$SC_R = \beta_1 S_{XY} \quad \Rightarrow \quad SC_R = 0.013$$

$$CM_R = SC_R / 1 \quad \Rightarrow \quad CM_R = 0.013$$

$$CM_E = SC_E / (n - 2) \quad \Rightarrow \quad CM_E = 0.0008533$$

### Formulación de la hipótesis:

Para  $\alpha = 5\% = 0.05$ , y

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$

Estadística de prueba:

$$F_0 = \frac{SC_R / 1}{SC_E / (n - 2)} = \frac{CM_R}{CM_E} \quad \Rightarrow \quad F_0 = 15.19$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $F_0 > F_{(\alpha,1,n-2)}$  , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$15.19 > F(0.05, 1, 3)$  de la Tabla de valor estadístico “t” se tiene  $F(0.05, 1, 3) = 10.13$

**Entonces como:  $15.19 > 10.13$  el modelo de regresión es significativo.**

Hemos rechazado las hipótesis nulas en ambos análisis (de regresión y de varianza) concluyendo que la ecuación de regresión:

$$C = 0.36PU - 0.530$$

Es significativo por lo tanto podemos afirmar que nuestro modelo es importante para predecir la cohesión con respecto al peso unitario.

#### 4.1.5. CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS ANGULO DE FRICCIÓN ( $\phi$ ) (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 10.00 %)

Tabla 27: Análisis de regresión lineal simple para determinar el ángulo de fricción interna con respecto al peso unitario.

CLASE	PU (X)	$\phi$ (Y)	$X^2$	$Y^2$	$X*Y$
1	1.6	33.98	2.56	1154.64	54.368
2	1.7	34.15	2.89	1166.22	58.055
3	1.8	34.43	3.24	1185.42	61.974
4	1.9	34.57	3.61	1195.08	65.683
5	2	34.66	4	1201.32	69.32
$\Sigma$ SUMA	9	171.79	16.3	5902.69	309.4

De las ecuaciones mostradas y con los valores de la Tabla 27 con  $n = 5$ , se tiene:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$



$$\bar{Y} = 34.36$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{X} = 1.8$$

Medida del grado en el cual dos variables están relacionadas linealmente, de las ecuaciones y Tabla 27 se determina:

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{YY} = 0.330$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XY} = 0.180$$

Valor esperado de los estimadores, determinados por las ecuaciones:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 1.780$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{X} \quad \Rightarrow \quad \beta_0 = 31.154$$

Tabla 28: Estimación del error y de la "Y (Estimado)"

CLASE	PU (X)	$\phi$ (Y)	$\phi$ (Estimado)	Estimado del Error	Cuadrado del Error
1	1.6	33.98	34.002	-0.022	0.000484
2	1.7	34.15	34.18	-0.03	0.0009
3	1.8	34.43	34.358	0.072	0.005184
4	1.9	34.57	34.536	0.034	0.001156
5	2	34.66	34.714	-0.054	0.002916
$\Sigma$ SUMA	9	171.79		$SC_E =$	0.01064

$$\phi(\text{estimado}) = \beta_0 + \beta_1 PU$$

$$\Rightarrow \quad \phi(\text{estimado}) = 1.78PU + 31.154$$

De la Tabla 28 se determina el cuadrado medio del error  $SC_E$  que es la suma de todos los cuadrados estimados de error  $SC_E = 0.01064$ , Donde:

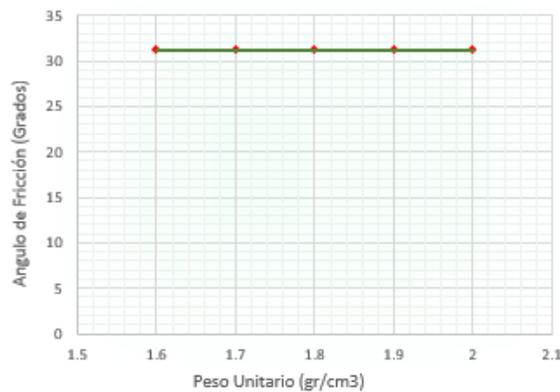
**Formulación de las hipótesis:**

Es necesario evaluar que tan bien el modelo explica la relación entre PU (X) y  $\phi$  (Y).

La hipótesis de mayor interés plantea que la pendiente ( $\beta_1$ ) es significativamente diferente de cero.

$H_0 : \beta_1 = 0$

$H_A : \beta_1 \neq 0$



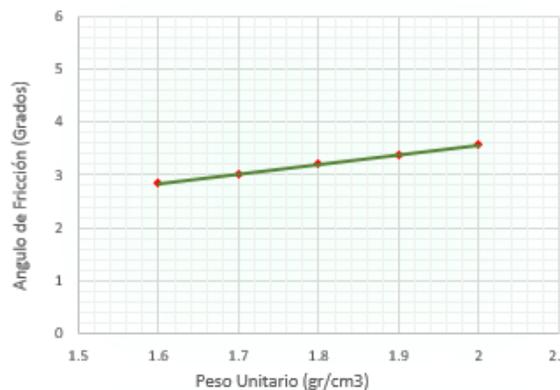
PU (X)	$\phi$ (Estimado)
1.6	31.154
1.7	31.154
1.8	31.154
1.9	31.154
2.0	31.154

**Figura 55. Cuando  $\beta_1 = 0$ ;  $\phi(\text{estimado}) = 31.154 + 0PU$**

Con respecto al parámetro  $\beta_0$  (Intersección al eje y):

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$



PU (X)	$\phi$ (Estimado)
1.6	2.848
1.7	3.026
1.8	3.204
1.9	3.382
2.0	3.56

**Figura 56. Cuando  $\beta_0 = 0$ ;  $\phi(\text{estimado}) = 0 + 1.78PU$**

Análisis de regresión para  $n = 5$  :

$$S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = 0.33$$

$$S_{XY} = 0.18$$

$$CM_E = 0.00355$$

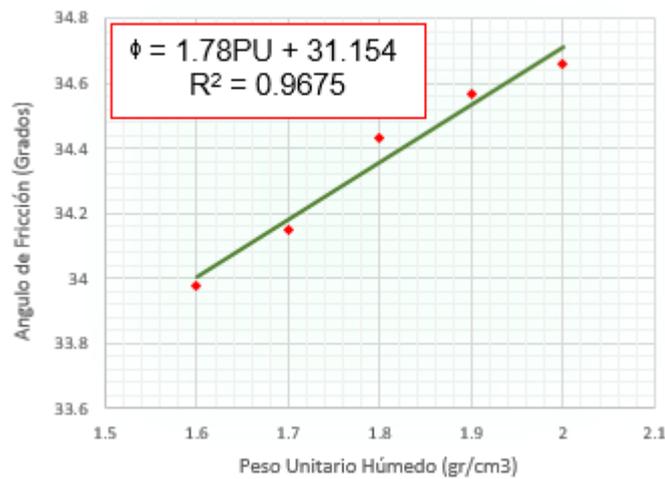
$$\bar{X} = 1.8$$

$$\bar{Y} = 34.36$$

$$\beta_0 = 31.154$$

$$\beta_1 = 1.78$$

Resultando la figura siguiente:



**Figura 57. Grafica  $\phi$  vs PU.**

Estadística de prueba para  $\beta_1$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_1}{\sqrt{CM_E/S_{XX}}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 9.45$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

Entonces  $9.45 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $9.45 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

Estadística de prueba para  $\beta_0$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0}{\sqrt{CM_E \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{XX}} \right)}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 91.62$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$91.62 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $91.62 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

### Análisis de varianza

$SC_R$  es la suma de cuadrados de la regresión y mide la varianza explicada por la recta de regresión.

$$SC_R = \beta_1 S_{XY} \quad \Rightarrow \quad SC_R = 0.317$$

$$CM_R = SC_R / 1 \quad \Rightarrow \quad CM_R = 0.317$$

$$CM_E = SC_E / (n - 2) \quad \Rightarrow \quad CM_E = 0.004$$

### Formulación de la hipótesis:

Para  $\alpha = 5\% = 0.05$ , y

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$

Estadística de prueba:

$$F_0 = \frac{SC_R / 1}{SC_E / (n - 2)} = \frac{CM_R}{CM_E} \quad \Rightarrow \quad F_0 = 89.33$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $F_0 > F_{(\alpha,1,n-2)}$  , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$89.33 > F(0.05, 1, 3)$  de la Tabla de valor estadístico “t” se tiene  $F(0.05, 1, 3) = 10.13$

**Entonces como:  $89.33 > 10.13$  el modelo de regresión es significativo.**

Hemos rechazado las hipótesis nulas en ambos análisis (de regresión y de varianza) concluyendo que la ecuación de regresión:

$$\phi = 1.78PU + 31.154$$

Es significativo por lo tanto podemos afirmar que nuestro modelo es importante para predecir el ángulo de fricción interna con respecto al peso unitario.

#### 4.1.6. CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS COHESIÓN (C), (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 10.00 %)

Tabla 29: Análisis de regresión lineal simple para determinar la cohesión con respecto al peso unitario.

CLASE	PU (X)	C (Y)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y
1	1.6	0.00	2.56	0.000	0
2	1.7	0.05	2.89	0.003	0.085
3	1.8	0.12	3.24	0.014	0.216
4	1.9	0.2	3.61	0.040	0.38
5	2.0	0.28	4	0.078	0.56
$\Sigma$ SUMA	9	0.65	16.3	0.14	1.241

De las ecuaciones mostradas y con los valores de la Tabla 29 con  $n = 5$ , se tiene:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$



$$\bar{Y} = 0.130$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{X} = 1.8$$

Medida del grado en el cual dos variables están relacionadas linealmente, de las ecuaciones y Tabla 29 se determina:

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{YY} = 0.051$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XY} = 0.071$$

Valor esperado de los estimadores, determinados por las ecuaciones:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 0.710$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{X} \quad \Rightarrow \quad \beta_0 = -1.148$$

Tabla 30: Estimación del error y de la "Y (Estimado)"

CLASE	PU (X)	C (Y)	C (Estimado)	Estimado del Error	Cuadrado del Error
1	1.6	0	-0.012	0.012	0.000144
2	1.7	0.05	0.059	-0.009	8.1E-05
3	1.8	0.12	0.13	-0.01	1E-04
4	1.9	0.2	0.201	-0.001	1E-06
5	2.0	0.28	0.272	0.008	6.4E-05
$\Sigma$ SUMA	9	0.65		$SC_E =$	0.00039

$$C(\text{estimado}) = \beta_0 + \beta_1 PU$$

$$\Rightarrow C(\text{estimado}) = 0.71PU - 1.148$$

De la Tabla 30 se determina el cuadrado medio del error  $SC_E$  que es la suma de todos los cuadrados estimados de error  $SC_E = 0.00039$ .

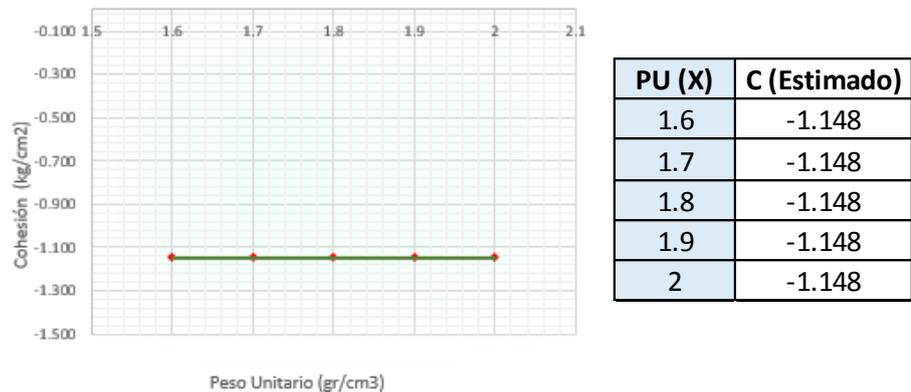
**Formulación de las hipótesis:**

Es necesario evaluar que tan bien el modelo explica la relación entre PU (X) y C (Y).

La hipótesis de mayor interés plantea que la pendiente ( $\beta_1$ ) es significativamente diferente de cero.

$H_0 : \beta_1 = 0$

$H_A : \beta_1 \neq 0$

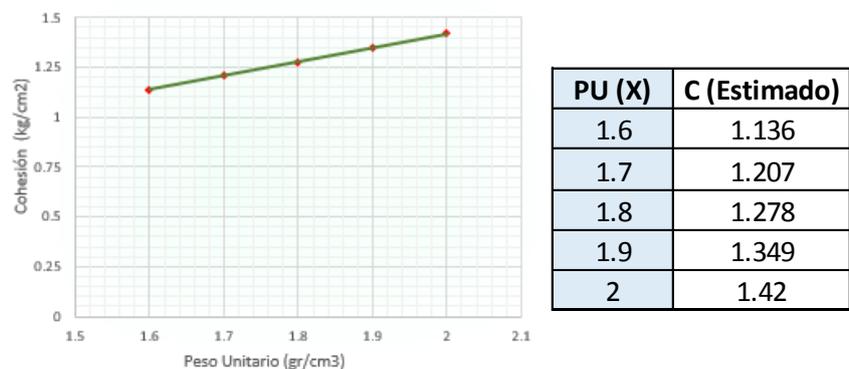


**Figura 58. Cuando  $\beta_1 = 0$ ;  $C(\text{estimado}) = -1.148 + 0PU$**

Con respecto al parámetro  $\beta_0$  (Intersección al eje y):

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$



**Figura 59. Cuando  $\beta_0 = 0$ ;  $C(\text{estimado}) = 0+0.71PU$**

Análisis de regresión para  $n = 5$  :

$$S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = 0.051$$

$$S_{XY} = 0.071$$

$$CM_E = 0.00013$$

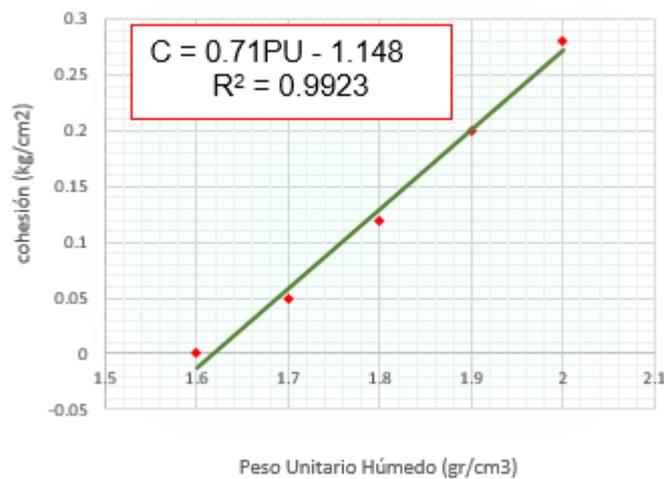
$$\bar{X} = 1.8$$

$$\bar{Y} = 0.130$$

$$\beta_0 = -1.148$$

$$\beta_1 = 0.710$$

Resultando la figura siguiente:



**Figura 60. Grafica C vs PU.**

Estadística de prueba para  $\beta_1$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\hat{\beta}_1}{\sqrt{CM_E/S_{XX}}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 19.692$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

Entonces  $19.692 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $19.692 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

Estadística de prueba para  $\beta_0$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0}{\sqrt{CM_E \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{XX}} \right)}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = -17.634$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$17.634 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $17.634 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

### Análisis de varianza

$SC_R$  es la suma de cuadrados de la regresión y mide la varianza explicada por la recta de regresión.

$$SC_R = \beta_1 S_{XY} \quad \Rightarrow \quad SC_R = 0.050$$

$$CM_R = SC_R / 1 \quad \Rightarrow \quad CM_R = 0.050$$

$$CM_E = SC_E / (n - 2) \quad \Rightarrow \quad CM_E = 0.00013$$

### Formulación de la hipótesis:

Para  $\alpha = 5\% = 0.05$ , y

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$

Estadística de prueba:

$$F_0 = \frac{SC_R / 1}{SC_E / (n - 2)} = \frac{CM_R}{CM_E} \quad \Rightarrow \quad F_0 = 387.77$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $F_0 > F_{(\alpha,1,n-2)}$  , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$387.77 > F(0.05, 1, 3)$  de la Tabla de valor estadístico “t” se tiene  $F(0.05, 1, 3) = 10.13$

**Entonces como:  $387.77 > 10.13$  el modelo de regresión es significativo.**

Hemos rechazado las hipótesis nulas en ambos análisis (de regresión y de varianza) concluyendo que la ecuación de regresión:

$$C = 0.71PU - 1.148$$

Es significativo por lo tanto podemos afirmar que nuestro modelo es importante para predecir la cohesión con respecto al peso unitario.

#### 4.1.7. CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS ANGULO DE FRICCIÓN ( $\phi$ ) (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 15.00 %)

Tabla 31: Análisis de regresión lineal simple para determinar el ángulo de fricción interna con respecto al peso unitario.

CLASE	PU (X)	$\phi$ (Y)	$X^2$	$Y^2$	$X*Y$
1	1.5	34.54	2.25	1193.01	51.81
2	1.6	35.08	2.56	1230.61	56.128
3	1.7	35.46	2.89	1257.41	60.282
4	1.8	35.96	3.24	1293.12	64.728
5	1.9	36.78	3.61	1352.77	69.882
$\Sigma$ SUMA	8.5	177.82	14.55	6326.92	302.83

De las ecuaciones mostradas y con los valores de la Tabla 31 con  $n = 5$ , se tiene:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$



$$\bar{Y} = 35.56$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{X} = 1.7$$

Medida del grado en el cual dos variables están relacionadas linealmente, de las ecuaciones y Tabla 31 se determina:

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{YY} = 2.93$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XY} = 0.540$$

Valor esperado de los estimadores, determinados por las ecuaciones:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 5.360$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{X} \quad \Rightarrow \quad \beta_0 = 26.452$$

Tabla 32: Estimación del error y de la "Y (Estimado)"

CLASE	PU (X)	$\phi$ (Y)	$\phi$ (Estimado)	Estimado del Error	Cuadrado del Error
1	1.5	34.54	34.492	0.048	0.002304
2	1.6	35.08	35.028	0.052	0.002704
3	1.7	35.46	35.564	-0.104	0.010816
4	1.8	35.96	36.1	-0.14	0.0196
5	1.9	36.78	36.636	0.144	0.020736
$\Sigma$ SUMA	8.5	177.82		$SC_E =$	0.05616

$$\phi(\text{estimado}) = \beta_0 + \beta_1 PU$$

$$\Rightarrow \quad \phi(\text{estimado}) = 5.36PU + 26.452$$

De la Tabla 32 se determina el cuadrado medio del error  $SC_E$  que es la suma de todos los cuadrados estimados de error  $SC_E = 0.05616$ , Donde:

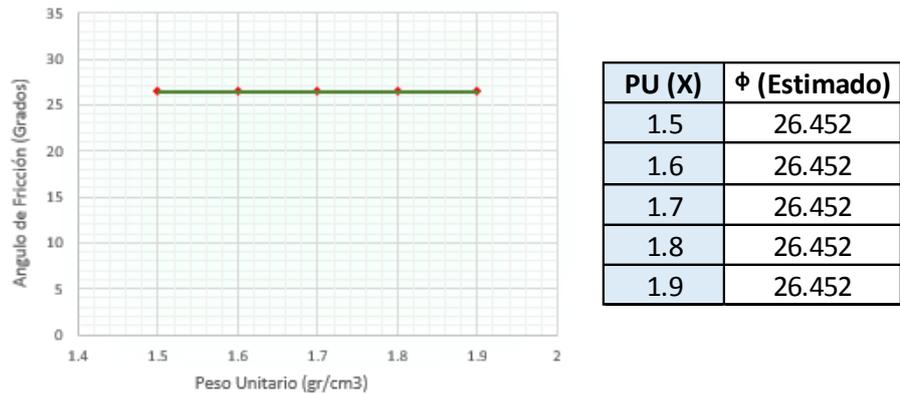
**Formulación de las hipótesis:**

Es necesario evaluar que tan bien el modelo explica la relación entre PU (X) y  $\phi$  (Y).

La hipótesis de mayor interés plantea que la pendiente ( $\beta_1$ ) es significativamente diferente de cero.

$H_0 : \beta_1 = 0$

$H_A : \beta_1 \neq 0$

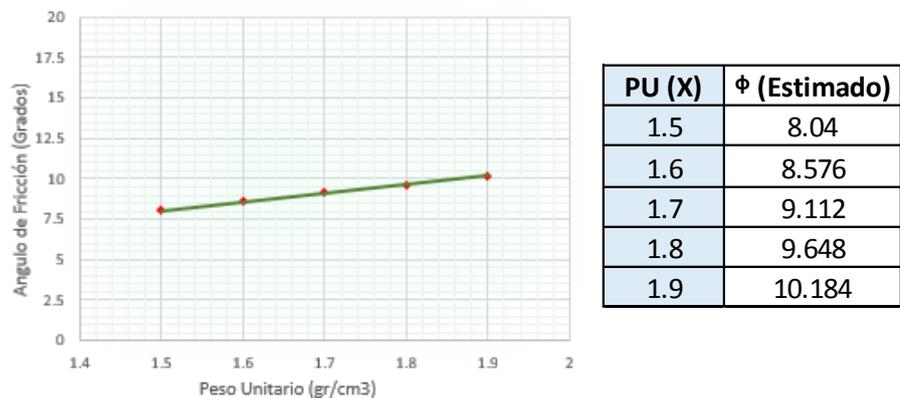


**Figura 61. Cuando  $\beta_1 = 0$ ;  $\phi(\text{estimado}) = 26.452 + 0PU$**

Con respecto al parámetro  $\beta_0$  (Intersección al eje y):

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$



**Figura 62. Cuando  $\beta_0 = 0$ ;  $\phi(\text{estimado}) = 0 + 5.36PU$**

Análisis de regresión para  $n = 5$  :

$$S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = 2.93$$

$$S_{XY} = 0.54$$

$$CM_E = 0.01872$$

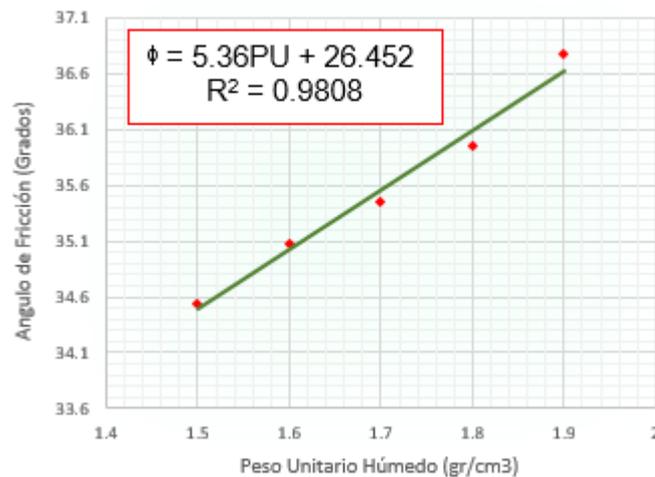
$$\bar{X} = 1.7$$

$$\bar{Y} = 35.56$$

$$\beta_0 = 26.452$$

$$\beta_1 = 5.36$$

Resultando la figura siguiente:



**Figura 63. Grafica  $\phi$  vs PU.**

Estadística de prueba para  $\beta_1$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_1}{\sqrt{CM_E/S_{XX}}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 12.39$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

Entonces  $12.39 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $12.39 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

Estadística de prueba para  $\beta_0$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0}{\sqrt{CM\varepsilon\left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{XX}}\right)}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 35.84$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$35.84 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $35.84 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

### Análisis de varianza

$SC_R$  es la suma de cuadrados de la regresión y mide la varianza explicada por la recta de regresión.

$$SC_R = \beta_1 S_{XY} \quad \Rightarrow \quad SC_R = 2.873$$

$$CM_R = SC_R / 1 \quad \Rightarrow \quad CM_R = 2.873$$

$$CM_E = SC_E / (n - 2) \quad \Rightarrow \quad CM_E = 0.019$$

### Formulación de la hipótesis:

Para  $\alpha = 5\% = 0.05$ , y

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$

Estadística de prueba:

$$F_0 = \frac{SC_R / 1}{SC_E / (n - 2)} = \frac{CM_R}{CM_E} \quad \Rightarrow \quad F_0 = 153.47$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $F_0 > F_{(\alpha,1,n-2)}$  , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$153.47 > F(0.05, 1, 3)$  de la Tabla de valor estadístico “t” se tiene  $F(0.05, 1, 3) = 10.13$

**Entonces como:  $153.47 > 10.13$  el modelo de regresión es significativo.**

Hemos rechazado las hipótesis nulas en ambos análisis (de regresión y de varianza) concluyendo que la ecuación de regresión:

$$\phi = 5.36PU + 26.452$$

Es significativo por lo tanto podemos afirmar que nuestro modelo es importante para predecir el ángulo de fricción interna con respecto al peso unitario.

#### 4.1.8. CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS COHESIÓN (C), (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 15.00 %)

Tabla 33: Análisis de regresión lineal simple para determinar la cohesión con respecto al peso unitario.

CLASE	PU (X)	C (Y)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y
1	1.5	0.00	2.25	0.000	0
2	1.6	0.02	2.56	0.000	0.032
3	1.7	0.04	2.89	0.002	0.068
4	1.8	0.07	3.24	0.005	0.126
5	1.9	0.08	3.61	0.006	0.152
$\Sigma$ SUMA	8.5	0.21	14.55	0.01	0.378

De las ecuaciones mostradas y con los valores de la Tabla 33 con  $n = 5$ , se tiene:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$



$$\bar{Y} = 0.042$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{X} = 1.7$$

Medida del grado en el cual dos variables están relacionadas linealmente, de las ecuaciones y Tabla 33 se determina:

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{YY} = 0.004$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XY} = 0.021$$

Valor esperado de los estimadores, determinados por las ecuaciones:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 0.210$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{X} \quad \Rightarrow \quad \beta_0 = -0.315$$

Tabla 34: Estimación del error y de la "Y (Estimado)"

CLASE	PU (X)	C (Y)	C (Estimado)	Estimado del Error	Cuadrado del Error
1	1.5	0	6.66134E-16	-6.6613E-16	4.43734E-31
2	1.6	0.02	0.021	-0.001	1E-06
3	1.7	0.04	0.042	-0.002	4E-06
4	1.8	0.07	0.063	0.007	4.9E-05
5	1.9	0.08	0.084	-0.004	1.6E-05
Σ SUMA	8.5	0.21		SC <sub>E</sub> =	7E-05

$$C(\text{estimado}) = \beta_0 + \beta_1 PU$$

$$\Rightarrow C(\text{estimado}) = 0.21PU - 0.315$$

De la Tabla 34 se determina el cuadrado medio del error  $SC_E$  que es la suma de todos los cuadrados estimados de error  $SC_E = 0.00007$ .

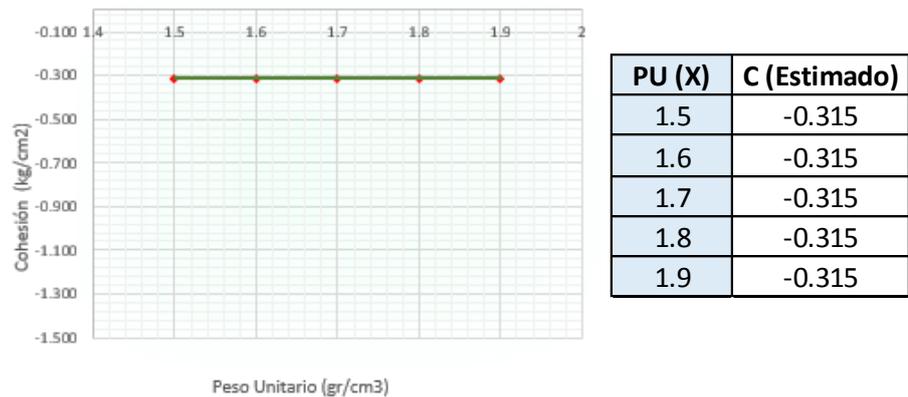
**Formulación de las hipótesis:**

Es necesario evaluar que tan bien el modelo explica la relación entre PU (X) y C (Y).

La hipótesis de mayor interés plantea que la pendiente ( $\beta_1$ ) es significativamente diferente de cero.

$H_0 : \beta_1 = 0$

$H_A : \beta_1 \neq 0$

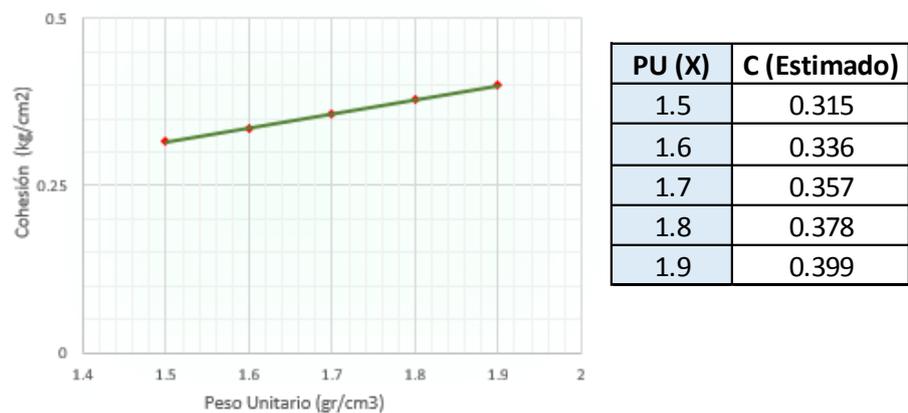


**Figura 64. Cuando  $\beta_1 = 0$ ;  $C(estimado) = -0.315 + 0PU$**

Con respecto al parámetro  $\beta_0$  (Intersección al eje y):

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$



**Figura 65. Cuando  $\beta_0 = 0$ ;  $C(estimado) = 0+0.21PU$**

Análisis de regresión para  $n = 5$  :

$$S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = 0.004$$

$$S_{XY} = 0.021$$

$$CM_E = 0.0000233$$

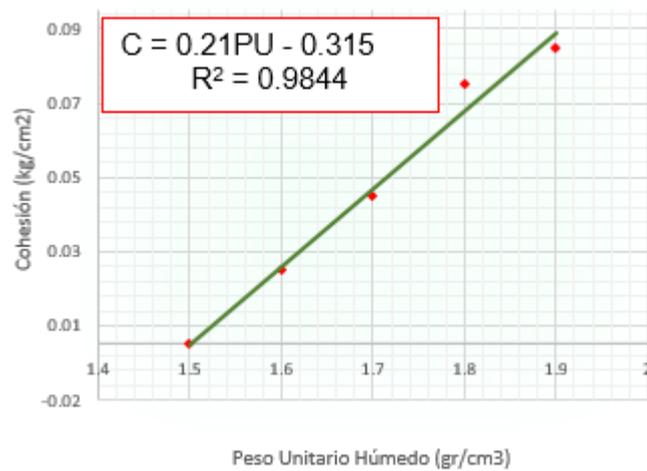
$$\bar{X} = 1.7$$

$$\bar{Y} = 0.042$$

$$\beta_0 = -0.315$$

$$\beta_1 = 0.21$$

Resultando la figura siguiente:



**Figura 66. Grafica C vs PU.**

Estadística de prueba para  $\beta_1$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_1}{\sqrt{CM_E/S_{XX}}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 13.748$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

Entonces  $13.748 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico “t” se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $13.748 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

Estadística de prueba para  $\beta_0$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0}{\sqrt{CM_E \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{XX}} \right)}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = -12.089$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$12.089 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $12.089 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

### Análisis de varianza

$SC_R$  es la suma de cuadrados de la regresión y mide la varianza explicada por la recta de regresión.

$$SC_R = \beta_1 S_{XY} \quad \Rightarrow \quad SC_R = 0.004$$

$$CM_R = SC_R / 1 \quad \Rightarrow \quad CM_R = 0.004$$

$$CM_E = SC_E / (n - 2) \quad \Rightarrow \quad CM_E = 0.0000233$$

### Formulación de la hipótesis:

Para  $\alpha = 5\% = 0.05$ , y

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$

Estadística de prueba:

$$F_0 = \frac{SC_R / 1}{SC_E / (n - 2)} = \frac{CM_R}{CM_E} \quad \Rightarrow \quad F_0 = 189.00$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $F_0 > F_{(\alpha,1,n-2)}$  , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$189.00 > F(0.05, 1, 3)$  de la Tabla de valor estadístico “t” se tiene  $F(0.05, 1, 3) = 10.13$

**Entonces como:  $189.00 > 10.13$  el modelo de regresión es significativo.**

Hemos rechazado las hipótesis nulas en ambos análisis (de regresión y de varianza) concluyendo que la ecuación de regresión:

$$C = 0.21PU - 0.315$$

Es significativo por lo tanto podemos afirmar que nuestro modelo es importante para predecir la cohesión con respecto al peso unitario.

#### 4.1.9. CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS ANGULO DE FRICCIÓN ( $\phi$ ) (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 19.05 %)

Tabla 35: Análisis de regresión lineal simple para determinar el ángulo de fricción interna con respecto al peso unitario.

CLASE	PU (X)	$\phi$ (Y)	$X^2$	$Y^2$	$X*Y$
1	1.7	32.63	2.89	1064.72	55.471
2	1.8	33.63	3.24	1130.98	60.534
3	1.9	34.37	3.61	1181.30	65.303
4	2.0	35.43	4.00	1255.28	70.86
5	2.1	36.29	4.41	1316.96	76.209
$\Sigma$ SUMA	9.5	172.35	18.15	5949.24	328.377

De las ecuaciones mostradas y con los valores de la Tabla 35 con  $n = 5$ , se tiene:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$



$$\bar{Y} = 34.47$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{X} = 1.9$$

Medida del grado en el cual dos variables están relacionadas linealmente, de las ecuaciones y Tabla 35 se determina:

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{YY} = 8.34$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XY} = 0.91$$

Valor esperado de los estimadores, determinados por las ecuaciones:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 9.12$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{X} \quad \Rightarrow \quad \beta_0 = 17.142$$

Tabla 36: Estimación del error y de la "Y (Estimado)"

CLASE	PU (X)	$\phi$ (Y)	$\phi$ (Estimado)	Estimado del Error	Cuadrado del Error
1	1.7	32.63	32.646	-0.016	0.000256
2	1.8	33.63	33.558	0.072	0.005184
3	1.9	34.37	34.47	-0.1	0.01
4	2	35.43	35.382	0.048	0.002304
5	2.1	36.29	36.294	-0.004	1.6E-05
$\Sigma$ SUMA	9.5	172.35		$SC_E =$	0.01776

$$\phi(\text{estimado}) = \beta_0 + \beta_1 PU$$

$$\Rightarrow \quad \phi(\text{estimado}) = 9.12PU + 17.142$$

De la Tabla 36 se determina el cuadrado medio del error  $SC_E$  que es la suma de todos los cuadrados estimados de error  $SC_E = 0.01776$ , Donde:

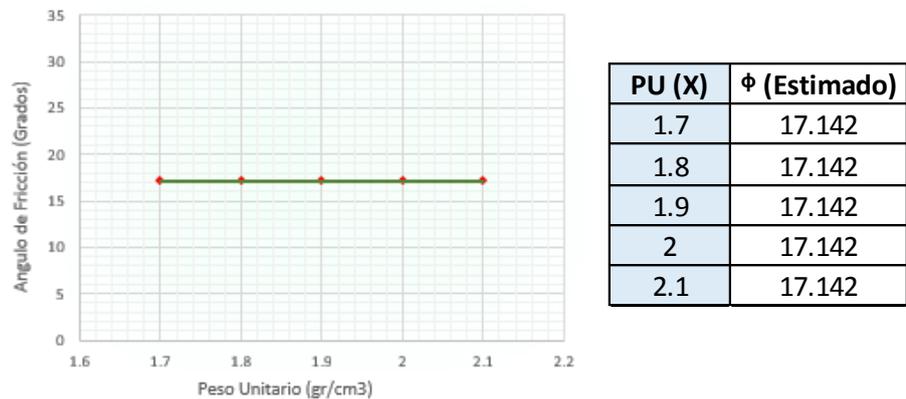
**Formulación de las hipótesis:**

Es necesario evaluar que tan bien el modelo explica la relación entre PU (X) y  $\phi$  (Y).

La hipótesis de mayor interés plantea que la pendiente ( $\beta_1$ ) es significativamente diferente de cero.

$H_0 : \beta_1 = 0$

$H_A : \beta_1 \neq 0$

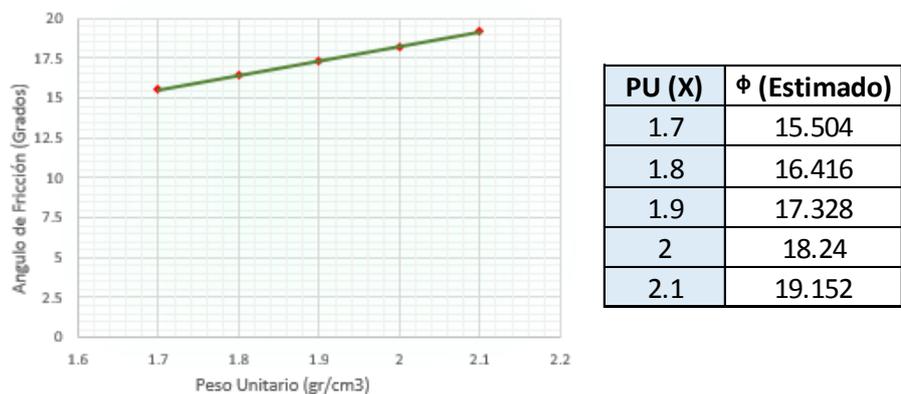


**Figura 67. Cuando  $\beta_1 = 0$ ;  $\phi(\text{estimado}) = 17.142 + 0PU$**

Con respecto al parámetro  $\beta_0$  (Intersección al eje y):

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$



**Figura 68. Cuando  $\beta_0 = 0$ ;  $\phi(\text{estimado}) = 0 + 9.12PU$**

Análisis de regresión para  $n = 5$  :

$$S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = 8.34$$

$$S_{XY} = 0.91$$

$$CM_E = 0.00592$$

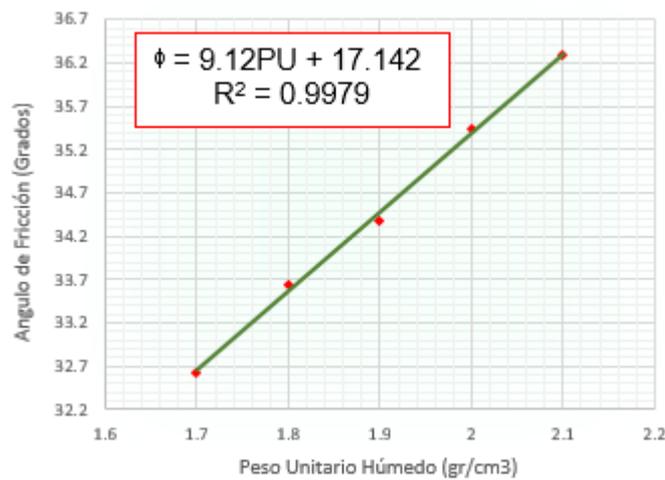
$$\bar{X} = 1.9$$

$$\bar{Y} = 34.47$$

$$\beta_0 = 17.142$$

$$\beta_1 = 9.12$$

Resultando la figura siguiente:



**Figura 69. Grafica  $\phi$  vs PU.**

Estadística de prueba para  $\beta_1$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\hat{\beta}_1}{\sqrt{CM_E/S_{XX}}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 37.48$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

Entonces  $37.48 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $37.48 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

Estadística de prueba para  $\beta_0$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0}{\sqrt{CM_E \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{XX}} \right)}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 36.98$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$36.98 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $36.98 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

### Análisis de varianza

$SC_R$  es la suma de cuadrados de la regresión y mide la varianza explicada por la recta de regresión.

$$SC_R = \beta_1 S_{XY} \quad \Rightarrow \quad SC_R = 8.317$$

$$CM_R = SC_R / 1 \quad \Rightarrow \quad CM_R = 8.317$$

$$CM_E = SC_E / (n - 2) \quad \Rightarrow \quad CM_E = 0.006$$

### Formulación de la hipótesis:

Para  $\alpha = 5\% = 0.05$ , y

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$

Estadística de prueba:

$$F_0 = \frac{SC_R / 1}{SC_E / (n - 2)} = \frac{CM_R}{CM_E} \quad \Rightarrow \quad F_0 = 1404.97$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $F_0 > F_{(\alpha,1,n-2)}$  , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$1404.97 > F(0.05, 1, 3)$  de la Tabla de valor estadístico “t” se tiene  $F(0.05, 1, 3) = 10.13$

**Entonces como:  $1404.97 > 10.13$  el modelo de regresión es significativo.**

Hemos rechazado las hipótesis nulas en ambos análisis (de regresión y de varianza) concluyendo que la ecuación de regresión:

$$\phi = 9.12PU + 17.142$$

Es significativo por lo tanto podemos afirmar que nuestro modelo es importante para predecir el ángulo de fricción interna con respecto al peso unitario.

#### 4.1.10. CORRELACIÓN DEL PESO UNITARIO (PU) VS COHESIÓN (C), (PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 19.05 %)

Tabla 37: Análisis de regresión lineal simple para determinar la cohesión con respecto al peso unitario.

CLASE	PU (X)	C (Y)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y
1	1.7	0.07	2.89	0.005	0.119
2	1.8	0.08	3.24	0.006	0.144
3	1.9	0.1	3.61	0.010	0.19
4	2	0.11	4	0.012	0.22
5	2.1	0.12	4.41	0.014	0.252
$\Sigma$ SUMA	9.5	0.48	18.15	0.05	0.925

De las ecuaciones mostradas y con los valores de la Tabla 37 con  $n = 5$ , se tiene:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$



$$\bar{Y} = 0.096$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{X} = 1.9$$

Medida del grado en el cual dos variables están relacionadas linealmente, de las ecuaciones y Tabla 37 se determina:

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{YY} = 0.002$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XY} = 0.013$$

Valor esperado de los estimadores, determinados por las ecuaciones:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 0.13$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{X} \quad \Rightarrow \quad \beta_0 = -0.151$$

Tabla 38: Estimación del error y de la "Y (Estimado)"

CLASE	PU (X)	C (Y)	C (Estimado)	Estimado del Error	Cuadrado del Error
1	1.7	0.07	0.07	8.0491E-16	6.47883E-31
2	1.8	0.08	0.083	-0.003	9E-06
3	1.9	0.1	0.096	0.004	0.000016
4	2	0.11	0.109	0.001	1E-06
5	2.1	0.12	0.122	-0.002	4E-06
Σ SUMA	9.5	0.48		SC <sub>E</sub> =	3E-05

$$C(\text{estimado}) = \beta_0 + \beta_1 PU$$

$$\Rightarrow C(\text{estimado}) = 0.13PU - 0.151$$

De la Tabla 38 se determina el cuadrado medio del error  $SC_E$  que es la suma de todos los cuadrados estimados de error  $SC_E = 0.00003$ .

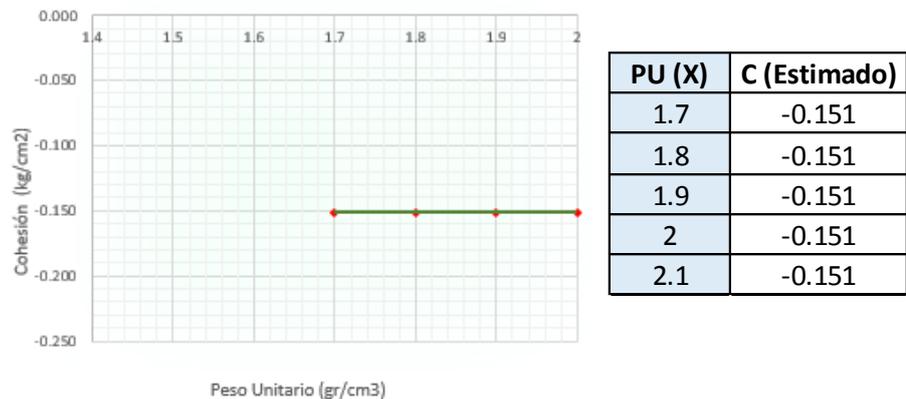
**Formulación de las hipótesis:**

Es necesario evaluar que tan bien el modelo explica la relación entre PU (X) y C (Y).

La hipótesis de mayor interés plantea que la pendiente ( $\beta_1$ ) es significativamente diferente de cero.

$H_0 : \beta_1 = 0$

$H_A : \beta_1 \neq 0$

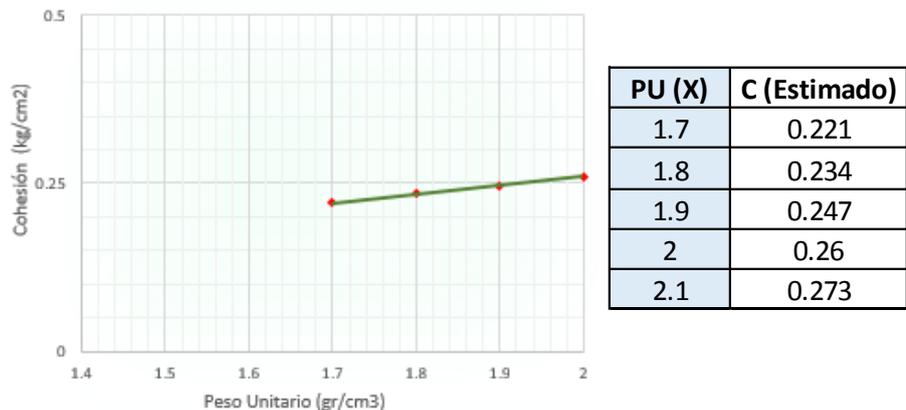


**Figura 70. Cuando  $\beta_1 = 0$ ;  $C(estimado) = -0.151 + 0PU$**

Con respecto al parámetro  $\beta_0$  (Intersección al eje y):

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$



**Figura 71. Cuando  $\beta_0 = 0$ ;  $C(estimado) = 0+0.13PU$**

Análisis de regresión para  $n = 5$  :

$$S_{XX} = 0.10$$

$$S_{YY} = 0.002$$

$$S_{XY} = 0.013$$

$$CM_E = 0.00001$$

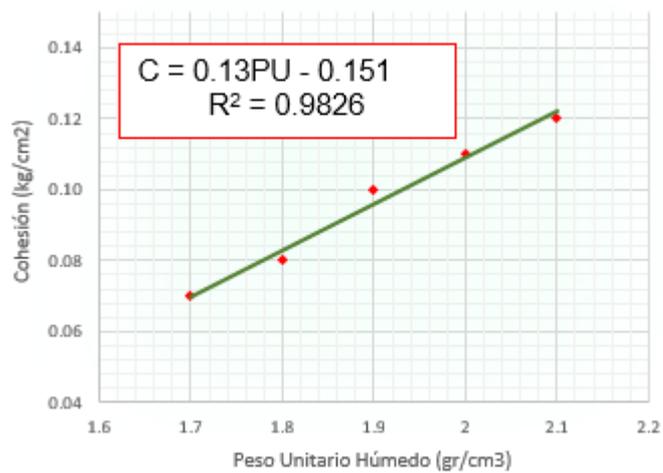
$$\bar{X} = 1.9$$

$$\bar{Y} = 0.096$$

$$\beta_0 = -0.151$$

$$\beta_1 = 0.13$$

Resultando la figura siguiente:



**Figura 72. Grafica C vs PU.**

Estadística de prueba para  $\beta_1$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_1}{\sqrt{CM_E/S_{XX}}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 13.00$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

Entonces  $13.00 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $13.00 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

Estadística de prueba para  $\beta_0$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0}{\sqrt{CM_E \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{XX}} \right)}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = -7.925$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$7.925 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $7.925 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

### Análisis de varianza

$SC_R$  es la suma de cuadrados de la regresión y mide la varianza explicada por la recta de regresión.

$$SC_R = \beta_1 S_{XY} \quad \Rightarrow \quad SC_R = 0.002$$

$$CM_R = SC_R / 1 \quad \Rightarrow \quad CM_R = 0.002$$

$$CM_E = SC_E / (n - 2) \quad \Rightarrow \quad CM_E = 0.00001$$

### Formulación de la hipótesis:

Para  $\alpha = 5\% = 0.05$ , y

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$

Estadística de prueba:

$$F_0 = \frac{SC_R / 1}{SC_E / (n - 2)} = \frac{CM_R}{CM_E} \quad \Rightarrow \quad F_0 = 169.00$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $F_0 > F_{(\alpha,1,n-2)}$  , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$169.00 > F(0.05, 1, 3)$  de la Tabla de valor estadístico “t” se tiene  $F(0.05, 1, 3) = 10.13$

**Entonces como:  $169.00 > 10.13$  el modelo de regresión es significativo.**

Hemos rechazado las hipótesis nulas en ambos análisis (de regresión y de varianza) concluyendo que la ecuación de regresión:

$$C = 0.13PU - 0.151$$

Es significativo por lo tanto podemos afirmar que nuestro modelo es importante para predecir la cohesión con respecto al peso unitario.

## 4.2. CORRELACIÓN DE LOS PARAMETROS DE RESISTENCIA CORTANTE CON EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO.

### 4.2.1. CORRELACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN ( $\phi$ ) VS EL CONTENIDO DE HUMEDAD (CH), (PARA UN PESO UNITARIO DE 1.6 gr/cm<sup>3</sup>)

*Tabla 39: Análisis de regresión lineal simple para determinar el ángulo de fricción con respecto al contenido de humedad.*

CLASE	CH (X)	$\phi$ (Y)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y
1	0	31.77	0	1009.33	0
2	5	32.68	25	1067.98	163.4
3	10	33.98	100	1154.64	339.8
4	15.0	35.08	225.00	1230.61	526.2
$\Sigma$ SUMA	30	133.51	350	4462.56	1029.4

De las ecuaciones mostradas y con los valores de la Tabla 39 con  $n = 4$ , se tiene:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{Y} = 33.38$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{X} = 7.5$$

Medida del grado en el cual dos variables están relacionadas linealmente, de las ecuaciones y Tabla 39 se determina:

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XX} = 125.0$$

$$S_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{YY} = 6.332$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XY} = 28.075$$

Valor esperado de los estimadores, determinados por las ecuaciones:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 0.225$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{X} \quad \Rightarrow \quad \beta_0 = 31.693$$

Tabla 40: Estimación del error y de la "Y (Estimado)"

CLASE	CH (X)	$\phi$ (Y)	$\phi$ (Estimado)	Estimado del Error	Cuadrado del Error
1	0	31.77	31.693	0.077	0.005929
2	5	32.68	32.816	-0.136	0.018496
3	10	33.98	33.939	0.041	0.001681
4	15	35.08	35.062	0.018	0.000324
$\Sigma$ SUMA	30	133.51		$SC_E =$	0.02643

$$\phi(\text{estimado}) = \beta_0 + \beta_1 CH$$

$$\Rightarrow \phi(\text{estimado}) = 0.225CH + 31.693$$

De la Tabla 40 se determina el cuadrado medio del error  $SC_E$  que es la suma de todos los cuadrados estimados de error  $SC_E = 0.02643$ .

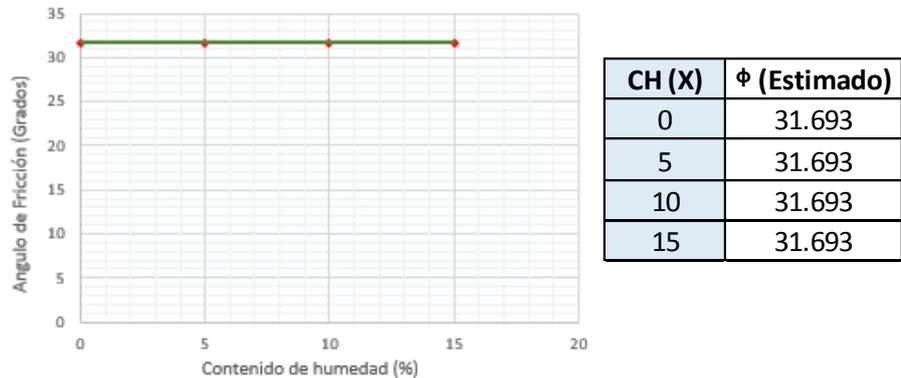
**Formulación de las hipótesis:**

Es necesario evaluar que tan bien el modelo explica la relación entre CH (X) y  $\phi$  (Y).

La hipótesis de mayor interés plantea que la pendiente ( $\beta_1$ ) es significativamente diferente de cero.

$H_0 : \beta_1 = 0$

$H_A : \beta_1 \neq 0$

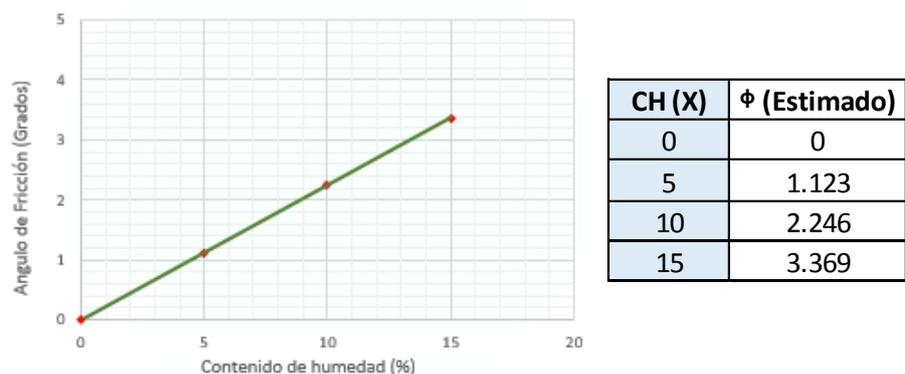


**Figura 73. Cuando  $\beta_1 = 0$ ;  $\phi(\text{estimado}) = 31.693 + 0CH$**

Con respecto al parámetro  $\beta_0$  (Intersección al eje y):

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$



**Figura 74. Cuando  $\beta_0 = 0$ ;  $C(\text{estimado}) = 0+0.225CH$**

Análisis de regresión para  $n = 4$  :

$$S_{XX} = 125$$

$$S_{YY} = 6.332$$

$$S_{XY} = 28.075$$

$$CM_E = 0.013215$$

$$\bar{X} = 7.5$$

$$\bar{Y} = 33.3775$$

$$\beta_0 = 31.693$$

$$\beta_1 = 0.225$$

Resultando la figura siguiente:



**Figura 75. Grafica  $\phi$  vs CH.**

Estadística de prueba para  $\beta_1$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_1}{\sqrt{CM_E/S_{XX}}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 21.84$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 4$ :

Entonces  $21.84 > t(0.025, 2)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 2) = 4.303$ .

**Entonces como:  $21.84 > 4.303$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

Estadística de prueba para  $\beta_0$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0}{\sqrt{CM_E \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{XX}} \right)}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 329.52$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 4$ :

$329.52 > t(0.025, 2)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 2) = 4.303$ .

**Entonces como:  $329.52 > 4.303$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

### Análisis de varianza

$SC_R$  es la suma de cuadrados de la regresión y mide la varianza explicada por la recta de regresión.

$$SC_R = \beta_1 S_{XY} \quad \Rightarrow \quad SC_R = 6.306$$

$$CM_R = SC_R / 1 \quad \Rightarrow \quad CM_R = 6.306$$

$$CM_E = SC_E / (n - 2) \quad \Rightarrow \quad CM_E = 0.01321$$

### Formulación de la hipótesis:

Para  $\alpha = 5\% = 0.05$ , y  $n = 4$ :

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$

Estadística de prueba:

$$F_0 = \frac{SC_R / 1}{SC_E / (n - 2)} = \frac{CM_R}{CM_E} \quad \Rightarrow \quad F_0 = 477.16$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $F_0 > F_{(\alpha,1,n-2)}$  , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 4$ :

$477.16 > F(0.05, 1, 2)$  de la Tabla de valor estadístico “t” se tiene  $F(0.05, 1, 2) = 18.51$

**Entonces como:  $477.16 > 18.51$  el modelo de regresión es significativo.**

Hemos rechazado las hipótesis nulas en ambos análisis (de regresión y de varianza) concluyendo que la ecuación de regresión:

$$\phi = 0.225CH + 31.693$$

Es significativo por lo tanto podemos afirmar que nuestro modelo es importante para predecir la cohesión con respecto al contenido de humedad.

#### 4.2.2. CORRELACIÓN DE LA COHESIÓN (C) VS EL CONTENIDO DE HUMEDAD (CH), (PARA UN PESO UNITARIO DE 1.6 gr/cm<sup>3</sup>)

Tabla 41: Análisis de regresión lineal simple para determinar la cohesión con respecto al contenido de humedad.

CLASE	CH (X)	C (Y)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y
1	0	0.12	0	0.01	0.00
2	5	0.01	25	0.00	0.05
3	10	0.00	100	0.00	0.00
4	15	0.02	225.00	0.00	0.30
$\Sigma$ SUMA	30	0.15	350	0.01	0.35

De las ecuaciones mostradas y con los valores de la Tabla 41 con  $n = 4$ , se tiene:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$



$$\bar{Y} = 0.0375$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{X} = 7.5$$

Medida del grado en el cual dos variables están relacionadas linealmente, de las ecuaciones y Tabla 41 se determina:

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XX} = 125.0$$

$$S_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{YY} = 0.00928$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XY} = -0.775$$

Valor esperado de los estimadores, determinados por las ecuaciones:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = -0.0062$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{X} \quad \Rightarrow \quad \beta_0 = 0.084$$

Tabla 42: Estimación del error y de la "Y (Estimado)"

CLASE	CH (X)	C (Y)	C (Estimado)	Estimado del Error	Cuadrado del Error
1	0	0.12	0.084	0.036	0.001296
2	5	0.01	0.053	-0.043	0.001849
3	10	0	0.022	-0.022	0.000484
4	15	0.02	-0.009	0.029	0.000841
$\Sigma$ SUMA	30	0.15		$SC_E =$	0.00447

$$C(\text{estimado}) = \beta_0 + \beta_1 CH$$

$$\Rightarrow C(\text{estimado}) = -0.0062CH + 0.084$$

De la Tabla 42 se determina el cuadrado medio del error  $SC_E$  que es la suma de todos los cuadrados estimados de error  $SC_E = 0.00447$ .

**Formulación de las hipótesis:**

Es necesario evaluar que tan bien el modelo explica la relación entre CH (X) y C (Y).

La hipótesis de mayor interés plantea que la pendiente ( $\beta_1$ ) es significativamente diferente de cero.

$H_0 : \beta_1 = 0$

$H_A : \beta_1 \neq 0$



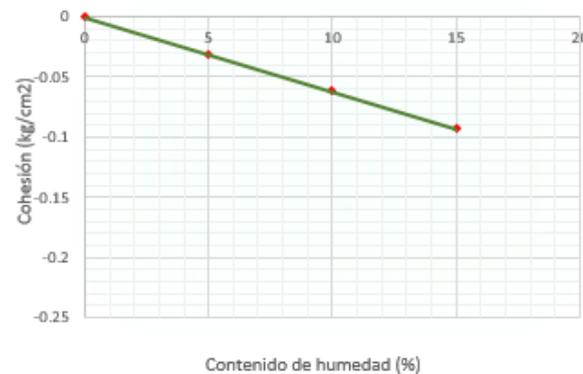
CH (X)	C (Estimado)
0	0.084
5	0.084
10	0.084
15	0.084

**Figura 76. Cuando  $\beta_1 = 0$ ;  $C(\text{estimado}) = 0.084 + 0CH$**

Con respecto al parámetro  $\beta_0$  (Intersección al eje y):

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$



CH (X)	C (Estimado)
0	0
5	-0.031
10	-0.062
15	-0.093

**Figura 77. Cuando  $\beta_0 = 0$ ;  $C(\text{estimado}) = 0 - 0.0062CH$**

Análisis de regresión para  $n = 4$  :

$$S_{XX} = 125$$

$$S_{YY} = 0.009275$$

$$S_{XY} = -0.775$$

$$CM_E = 0.002235$$

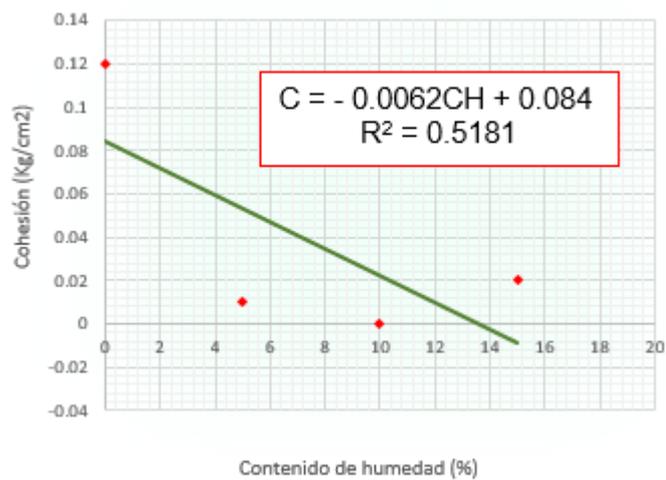
$$\bar{X} = 7.5$$

$$\bar{Y} = 0.0375$$

$$\beta_0 = 0.084$$

$$\beta_1 = -0.0062$$

Resultando la figura siguiente:



**Figura 78. Grafica C vs CH.**

Estadística de prueba para  $\beta_1$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_1}{\sqrt{CM_E/S_{XX}}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = -1.47$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 4$ :

Entonces  $1.47 > t(0.025, 2)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 2) = 4.303$ .

**Entonces como:  $1.47 < 4.303$  No se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

Estadística de prueba para  $\beta_0$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0}{\sqrt{CM_E \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{XX}} \right)}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 2.12$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 4$ :

$2.12 > t(0.025, 2)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 2) = 4.303$ .

**Entonces como:  $2.12 < 4.303$  No se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

### Análisis de varianza

$SC_R$  es la suma de cuadrados de la regresión y mide la varianza explicada por la recta de regresión.

$$SC_R = \beta_1 S_{XY} \quad \Rightarrow \quad SC_R = 0.005$$

$$CM_R = SC_R / 1 \quad \Rightarrow \quad CM_R = 0.005$$

$$CM_E = SC_E / (n - 2) \quad \Rightarrow \quad CM_E = 0.00224$$

### Formulación de la hipótesis:

Para  $\alpha = 5\% = 0.05$ , y  $n = 4$ :

$$H_0 : \beta_0 = 0$$

$$H_A : \beta_0 \neq 0$$

Estadística de prueba:

$$F_0 = \frac{SC_R / 1}{SC_E / (n - 2)} = \frac{CM_R}{CM_E} \quad \Rightarrow \quad F_0 = 2.15$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $F_0 > F_{(\alpha,1,n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 4$ :

$2.15 > F(0.05, 1, 2)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $F(0.05, 1, 2) = 18.51$

**Entonces como:  $2.15 < 18.51$  el modelo de regresión No es significativo.**

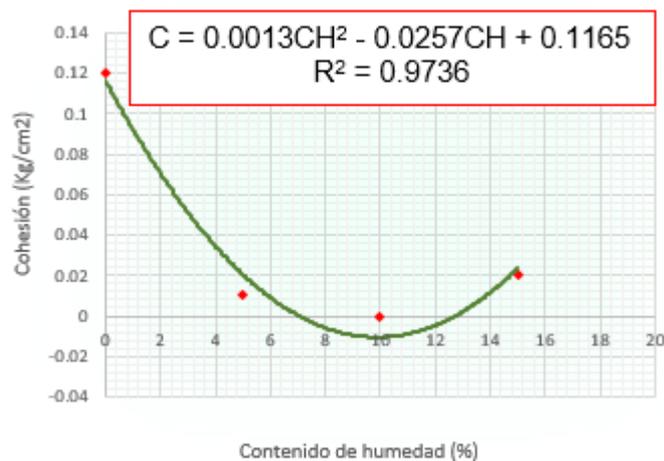
No se han rechazado las hipótesis nulas en ambos análisis (de regresión y de varianza) concluyendo que la ecuación de regresión:

$$C = -0.0062CH + 0.084$$

No es significativo por lo tanto podemos afirmar que nuestro modelo no es importante para predecir la cohesión con respecto al contenido de humedad.

Sin embargo, se puede concluir que esta correlación de Contenido de Humedad vs cohesión para un Peso Unitario de 1.6 gr/cm<sup>3</sup>, presenta una correlación cuadrática con ecuación:

$C = 0.0013CH^2 - 0.0257CH + 0.1165$  Con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9736$ .



**Figura 79. Grafica C vs CH correlación cuadrática.**

### 4.2.3. CORRELACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN ( $\phi$ ) VS EL CONTENIDO DE HUMEDAD (CH), (PARA UN PESO UNITARIO DE 1.7 gr/cm<sup>3</sup>)

Tabla 43: Análisis de regresión lineal simple para determinar el ángulo de fricción con respecto al contenido de humedad.

CLASE	CH (X)	$\phi$ (Y)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y
1	0.00	33.21	0	1102.90	0
2	5.00	33.55	25	1125.60	167.75
3	10.00	34.15	100	1166.22	341.5
4	15.00	35.46	225.00	1257.41	531.9
5	19.05	32.63	362.9025	1064.72	621.6015
$\Sigma$ SUMA	49.05	169	712.9025	5716.86	1662.7515

De las ecuaciones mostradas y con los valores de la Tabla 43 con  $n = 5$ , se tiene:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{Y} = 33.80$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{X} = 9.81$$

Medida del grado en el cual dos variables están relacionadas linealmente, de las ecuaciones y Tabla 43 se determina:

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XX} = 231.72$$

$$S_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{YY} = 4.658$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XY} = 4.862$$

Valor esperado de los estimadores, determinados por las ecuaciones:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 0.021$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{X} \quad \Rightarrow \quad \beta_0 = 33.594$$

Tabla 44: Estimación del error y de la “ $\phi$  (Estimado)”

CLASE	CH (X)	$\phi$ (Y)	$\phi$ (Estimado)	Estimado del Error	Cuadrado del Error
1	0.00	33.21	33.59418737	-0.38418737	0.147599933
2	5.00	33.55	33.69908677	-0.14908677	0.022226866
3	10.00	34.15	33.80398618	0.34601382	0.119725565
4	15.00	35.46	33.90888558	1.55111442	2.405955935
5	19.05	32.63	33.9938541	-1.3638541	1.860098009
$\Sigma$ SUMA	49.05	169		$SC_E =$	4.555606308

$$\phi(\text{estimado}) = \beta_0 + \beta_1 CH$$

$$\Rightarrow \phi(\text{estimado}) = 0.021CH + 33.594$$

De la Tabla 44 se determina el cuadrado medio del error  $SC_E$  que es la suma de todos los cuadrados estimados de error  $SC_E = 4.5556$ .

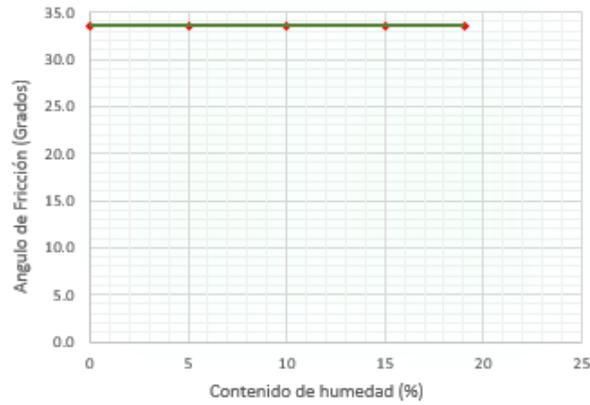
### Formulación de las hipótesis:

Es necesario evaluar que tan bien el modelo explica la relación entre CH (X) y  $\phi$  (Y).

La hipótesis de mayor interés plantea que la pendiente ( $\beta_1$ ) es significativamente diferente de cero.

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_A : \beta_1 \neq 0$$



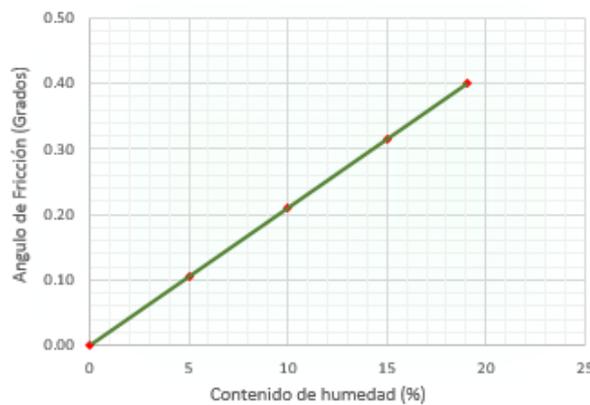
CH (X)	$\phi$ (Estimado)
0.00	33.594
5.00	33.594
10.00	33.594
15.00	33.594
19.05	33.594

Figura 80. Cuando  $\beta_1 = 0$ ;  $\phi(\text{estimado}) = 33.594 + 0CH$

Con respecto al parámetro  $\beta_0$  (Intersección al eje y):

$$H_0 : \beta_0 = 0$$

$$H_A : \beta_0 \neq 0$$



CH (X)	$\phi$ (Estimado)
0.00	0.000
5.00	0.105
10.00	0.210
15.00	0.315
19.05	0.400

Figura 81. Cuando  $\beta_0 = 0$ ;  $C(\text{estimado}) = 0 + 0.021CH$

Análisis de regresión para  $n = 5$  :

$$S_{XX} = 231.72$$

$$S_{YY} = 4.658$$

$$S_{XY} = 4.862$$

$$CM_E = 1.518535$$

$$\bar{X} = 9.81$$

$$\bar{Y} = 33.80$$

$$\beta_0 = 33.594$$

$$\beta_1 = 0.021$$

Resultando la figura siguiente:

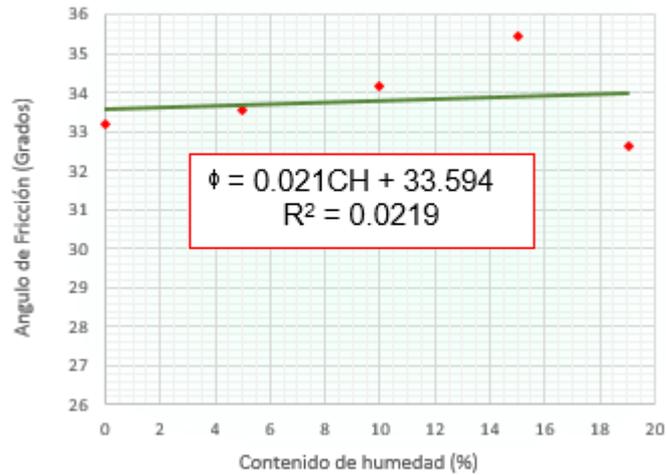


Figura 82. Grafica  $\phi$  vs CH.

Estadística de prueba para  $\beta_1$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_1}{\sqrt{CM\varepsilon/S_{XX}}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 0.259$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

Entonces  $0.259 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $0.259 < 3.182$  No se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

Estadística de prueba para  $\beta_0$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0}{\sqrt{CM\varepsilon(\frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{XX}})}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 34.754$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$34.754 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $34.754 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

### Análisis de varianza

$SC_R$  es la suma de cuadrados de la regresión y mide la varianza explicada por la recta de regresión.

$$SC_R = \beta_1 S_{XY}$$



$$SC_R = 0.102$$

$$CM_R = SC_R/1$$



$$CM_R = 0.102$$

$$CM_E = SC_E/(n - 2)$$



$$CM_E = 1.519$$

### Formulación de la hipótesis:

Para  $\alpha = 5\% = 0.05$ , y  $n = 5$ :

$$H_0 : \beta_0 = 0$$

$$H_A : \beta_0 \neq 0$$

Estadística de prueba:

$$F_0 = \frac{SCR/1}{SCR/(n-2)} = \frac{CMR}{CME}$$



$$F_0 = 0.0672$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $F_0 > F_{(\alpha, 1, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$0.0672 > F(0.05, 1, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $F(0.05, 1, 3) = 10.13$

**Entonces como:  $0.0672 < 10.13$  el modelo de regresión No es significativo.**

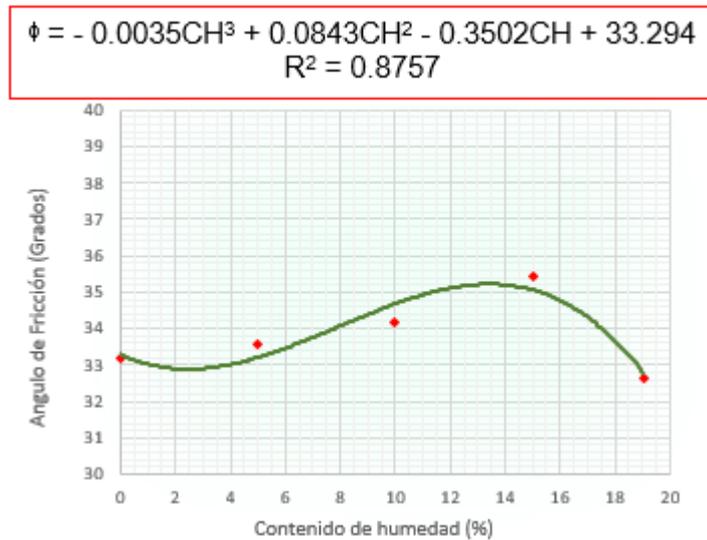
No se han rechazado las hipótesis nulas en ambos análisis (de regresión y de varianza) concluyendo que la ecuación de regresión:

$$\phi = 0.021CH + 33.594$$

No es significativo por lo tanto podemos afirmar que nuestro modelo no es importante para predecir el ángulo de fricción con respecto al contenido de humedad.

Sin embargo, se puede concluir que esta correlación de Contenido de Humedad vs cohesión para un Peso Unitario de 1.7 gr/cm<sup>3</sup>, presenta una correlación cubica con ecuación:

$C = 0.0013CH^2 - 0.0257CH + 0.1165$  Con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9736$ .



**Figura 83. Grafica C vs CH correlación cubica.**

#### 4.2.4. CORRELACIÓN DE LA COHESIÓN (C) VS EL CONTENIDO DE HUMEDAD (CH), (PARA UN PESO UNITARIO DE 1.7 gr/cm<sup>3</sup>)

Tabla 45: Análisis de regresión lineal simple para determinar la cohesión con respecto al contenido de humedad.

CLASE	CH (X)	C (Y)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y
1	0.00	0.13	0	0.017	0
2	5.00	0.08	25	0.006	0.4
3	10.00	0.05	100	0.003	0.5
4	15.00	0.04	225	0.002	0.6
5	19.05	0.07	362.9025	0.005	1.3335
Σ SUMA	49.05	0.37	712.9025	0.03	2.8335

De las ecuaciones mostradas y con los valores de la Tabla 45 con  $n = 5$ , se tiene:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{Y} = 0.074$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{X} = 9.81$$

Medida del grado en el cual dos variables están relacionadas linealmente, de las ecuaciones y Tabla 45 se determina:

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XX} = 231.72$$

$$S_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{YY} = 0.0049$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XY} = -0.796$$

Valor esperado de los estimadores, determinados por las ecuaciones:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}}$$

$$\Rightarrow \beta_1 = -0.00344$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{X}$$

$$\Rightarrow \beta_0 = 0.108$$

Tabla 46: Estimación del error y de la “Y (Estimado)”

CLASE	CH (X)	C (Y)	C (Estimado)	Estimado del Error	Cuadrado del Error
1	0	0.13	0.107707296	0.0222927	0.000496965
2	5	0.08	0.090527227	-0.01052723	0.000110822
3	10	0.05	0.073347157	-0.02334716	0.00054509
4	15	0.04	0.056167088	-0.01616709	0.000261375
5	19.1	0.07	0.042251232	0.02774877	0.000769994
$\Sigma$ SUMA	49.05	0.37		$SC_E =$	0.002184246

$$C(\text{estimado}) = \beta_0 + \beta_1 CH$$

$$\Rightarrow C(\text{estimado}) = -0.00344CH + 0.108$$

De la Tabla 46 se determina el cuadrado medio del error  $SC_E$  que es la suma de todos los cuadrados estimados de error  $SC_E = 0.002184$ .

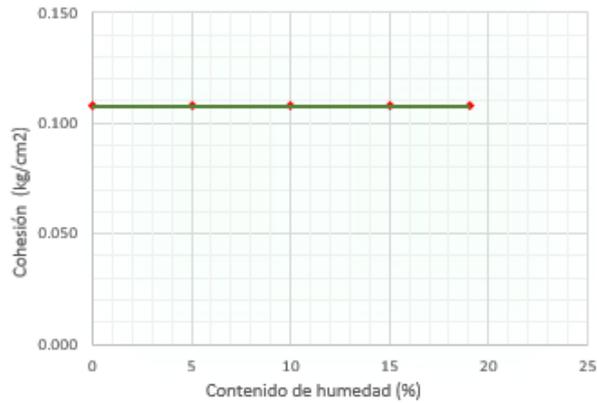
### Formulación de las hipótesis:

Es necesario evaluar que tan bien el modelo explica la relación entre CH (X) y C (Y).

La hipótesis de mayor interés plantea que la pendiente ( $\beta_1$ ) es significativamente diferente de cero.

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_A : \beta_1 \neq 0$$



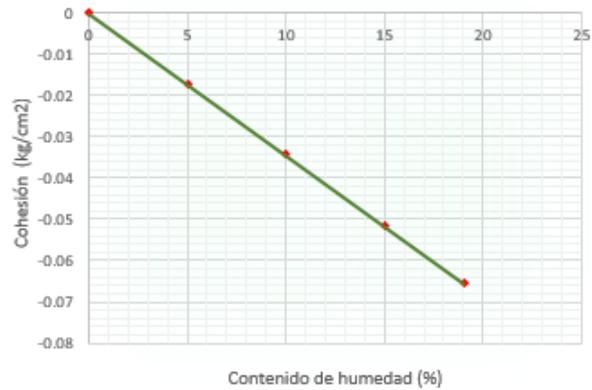
CH (X)	C (Estimado)
0	0.1077
5	0.1077
10	0.1077
15	0.1077
19.05	0.1077

**Figura 84. Cuando  $\beta_1 = 0$ ;  $C(\text{estimado}) = 0.1077 + 0CH$**

Con respecto al parámetro  $\beta_0$  (Intersección al eje y):

$H_0 : \beta_0 = 0$

$H_A : \beta_0 \neq 0$



CH (X)	C (Estimado)
0	0
5	-0.017180069
10	-0.034360138
15	-0.051540208
19.05	-0.065456064

**Figura 85. Cuando  $\beta_0 = 0$ ;  $C(\text{estimado}) = 0 - 0.00344CH$**

Análisis de regresión para  $n = 5$  :

$S_{XX} = 231.722$

$S_{YY} = 0.0049$

$S_{XY} = -0.796$

$CM_E = 0.000728$

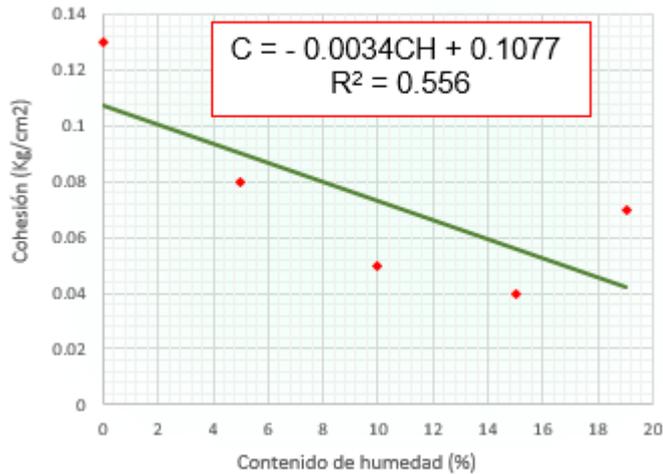
$\bar{X} = 9.81$

$\bar{Y} = 0.074$

$\beta_0 = 0.1077$

$\beta_1 = -0.00344$

Resultando la figura siguiente:



**Figura 86. Grafica C vs CH.**

Estadística de prueba para  $\beta_1$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_1}{\sqrt{CM\varepsilon/S_{XX}}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = -1.938$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

Entonces  $1.938 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $1.938 < 3.182$  No se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

Estadística de prueba para  $\beta_0$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0}{\sqrt{CM\varepsilon\left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{XX}}\right)}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 5.089$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

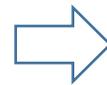
$5.089 > t(0.025, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 3) = 3.182$ .

**Entonces como:  $5.089 > 3.182$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

### **Análisis de varianza**

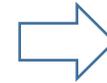
$SC_R$  es la suma de cuadrados de la regresión y mide la varianza explicada por la recta de regresión.

$$SC_R = \beta_1 S_{XY}$$



$$SC_R = 0.003$$

$$CM_R = SC_R/1$$



$$CM_R = 0.003$$

$$CM_E = SC_E/(n - 2)$$



$$CM_E = 0.0007281$$

### **Formulación de la hipótesis:**

Para  $\alpha = 5\% = 0.05$ , y  $n = 5$ :

$$H_0 : \beta_0 = 0$$

$$H_A : \beta_0 \neq 0$$

Estadística de prueba:

$$F_0 = \frac{SC_R/1}{SC_E/(n-2)} = \frac{CM_R}{CME}$$



$$F_0 = 3.76$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $F_0 > F_{(\alpha, 1, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 5$ :

$3.76 > F(0.05, 1, 3)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $F(0.05, 1, 3) = 10.13$

**Entonces como:  $3.76 < 10.13$  el modelo de regresión no es significativo.**

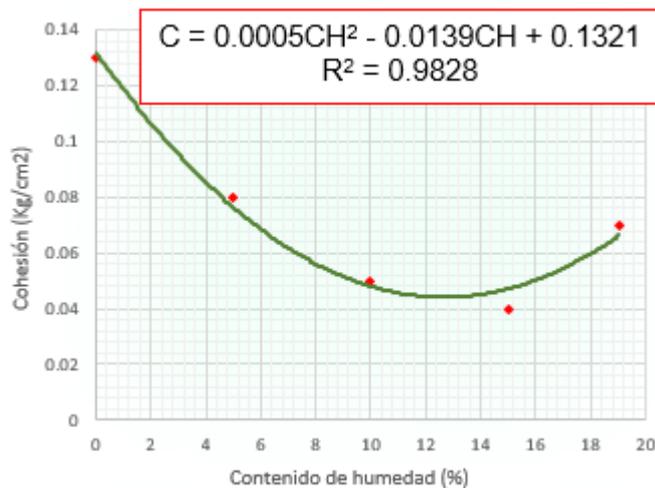
No se han rechazado las hipótesis nulas en ambos análisis (de regresión y de varianza) concluyendo que la ecuación de regresión:

$$C = -0.00344CH + 0.1077$$

No es significativo por lo tanto podemos afirmar que nuestro modelo no es importante para predecir la cohesión con respecto al contenido de humedad.

Sin embargo, se puede concluir que esta correlación de Contenido de Humedad vs cohesión para un Peso Unitario de 1.7 gr/cm<sup>3</sup>, presenta una correlación cuadrática con ecuación:

$C = 0.0005CH^2 - 0.0139CH + 0.1321$  Con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9828$ , valor que permite aceptar la correlación como cuadrática.



**Figura 87. Grafica C vs CH correlación cuadrática.**

#### 4.2.5. CORRELACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN ( $\phi$ ) VS EL CONTENIDO DE HUMEDAD (CH), (PARA UN PESO UNITARIO DE 1.8 gr/cm<sup>3</sup>)

Tabla 47: Análisis de regresión lineal simple para determinar el ángulo de fricción con respecto al contenido de humedad.

CLASE	CH (X)	$\phi$ (Y)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y
1	5.00	34.88	25	1216.61	174.4
2	10.00	34.43	100	1185.42	344.3
3	15.00	35.96	225.00	1293.12	539.4
4	19.05	32.63	362.9025	1064.72	621.6015
$\Sigma$ SUMA	49.05	137.9	712.9025	4759.88	1679.7015

De las ecuaciones mostradas y con los valores de la Tabla 47 con  $n = 4$ , se tiene:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{Y} = 34.48$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{X} = 12.263$$

Medida del grado en el cual dos variables están relacionadas linealmente, de las ecuaciones y Tabla 47 se determina:

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XX} = 111.43$$

$$S_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{YY} = 5.775$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XY} = -11.297$$

Valor esperado de los estimadores, determinados por las ecuaciones:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = -0.1014$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{X} \quad \Rightarrow \quad \beta_0 = 35.718$$

Tabla 48: Estimación del error y de la “ $\phi$  (Estimado)”

CLASE	CH (X)	$\phi$ (Y)	$\phi$ (Estimado)	Estimado del Error	Cuadrado del Error
1	5.00	34.88	35.21132396	-0.33132396	0.109775568
2	10.00	34.43	34.70438836	-0.27438836	0.075288972
3	15.00	35.96	34.19745276	1.76254724	3.106572781
4	19.05	32.63	33.78683492	-1.15683492	1.338267032
$\Sigma$ SUMA	49.05	137.9		$SC_E =$	4.629904353

$$\phi(\text{estimado}) = \beta_0 + \beta_1 CH$$

$$\Rightarrow \phi(\text{estimado}) = -0.101CH + 35.718$$

De la Tabla 48 se determina el cuadrado medio del error  $SC_E$  que es la suma de todos los cuadrados estimados de error  $SC_E = 4.6299$ .

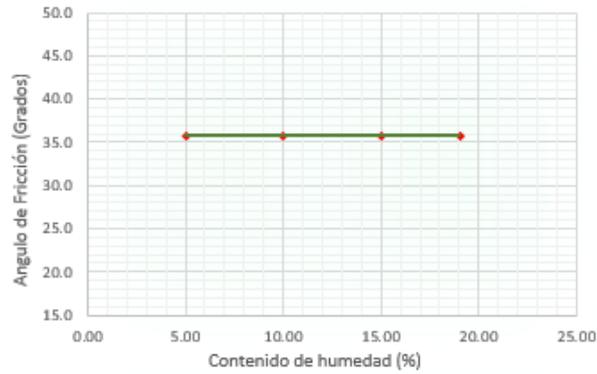
### Formulación de las hipótesis:

Es necesario evaluar que tan bien el modelo explica la relación entre CH (X) y  $\phi$  (Y).

La hipótesis de mayor interés plantea que la pendiente ( $\beta_1$ ) es significativamente diferente de cero.

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_A : \beta_1 \neq 0$$



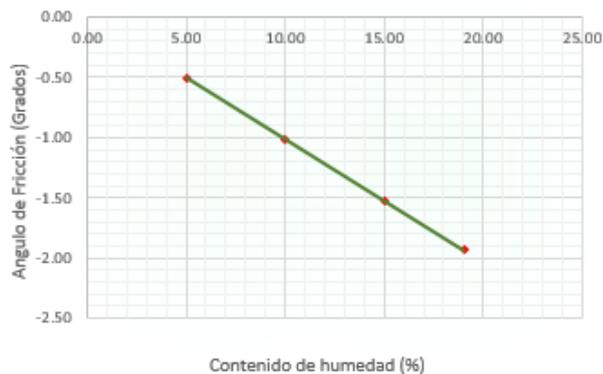
CH (X)	$\phi$ (Estimado)
5.00	35.718
10.00	35.718
15.00	35.718
19.05	35.718

Figura 88. Cuando  $\beta_1 = 0$ ;  $\phi(\text{estimado}) = 35.718 + 0CH$

Con respecto al parámetro  $\beta_0$  (Intersección al eje y):

$$H_0 : \beta_0 = 0$$

$$H_A : \beta_0 \neq 0$$



CH (X)	$\phi$ (Estimado)
5.00	-0.507
10.00	-1.014
15.00	-1.521
19.05	-1.931

Figura 89. Cuando  $\beta_0 = 0$ ;  $C(\text{estimado}) = 0 - 0.1014CH$

Análisis de regresión para  $n = 4$  :

$$S_{XX} = 111.43$$

$$S_{YY} = 5.775$$

$$S_{XY} = -11.297$$

$$CM_E = 2.31495$$

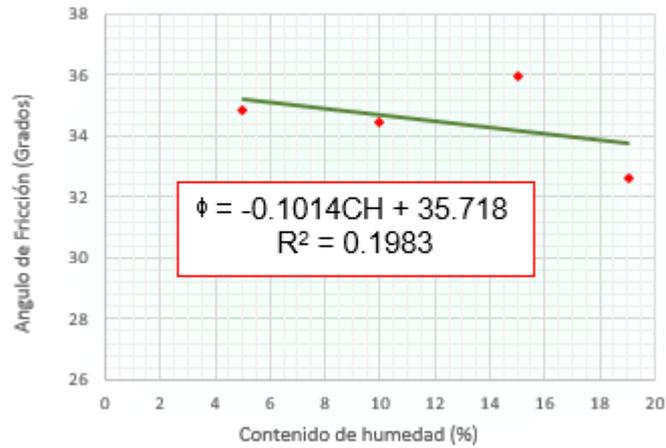
$$\bar{X} = 12.263$$

$$\bar{Y} = 34.48$$

$$\beta_0 = 35.718$$

$$\beta_1 = -0.1014$$

Resultando la figura siguiente:



**Figura 90. Grafica  $\phi$  vs CH.**

Estadística de prueba para  $\beta_1$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_1}{\sqrt{CM\varepsilon/S_{XX}}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = -0.703$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 4$ :

Entonces  $0.703 > t(0.025, 2)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 2) = 4.303$ .

**Entonces como:  $0.703 < 4.303$  No se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

Estadística de prueba para  $\beta_0$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0}{\sqrt{CM\varepsilon(\frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{XX}})}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 18.562$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 4$ :

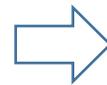
$18.562 > t(0.025, 2)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 2) = 4.303$ .

**Entonces como:  $18.56 > 4.303$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

### **Análisis de varianza**

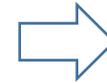
$SC_R$  es la suma de cuadrados de la regresión y mide la varianza explicada por la recta de regresión.

$$SC_R = \beta_1 S_{XY}$$



$$SC_R = 1.145$$

$$CM_R = SC_R/1$$



$$CM_R = 1.145$$

$$CM_E = SC_E/(n - 2)$$



$$CM_E = 2.315$$

### **Formulación de la hipótesis:**

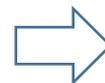
Para  $\alpha = 5\% = 0.05$ , y  $n = 4$ :

$$H_0 : \beta_0 = 0$$

$$H_A : \beta_0 \neq 0$$

Estadística de prueba:

$$F_0 = \frac{SCR/1}{SCR/(n-2)} = \frac{CMR}{CME}$$



$$F_0 = 0.4948$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $F_0 > F_{(\alpha, 1, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 4$ :

$0.0672 > F(0.05, 1, 2)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $F(0.05, 1, 2) = 18.51$

**Entonces como:  $0.0672 < 18.51$  el modelo de regresión No es significativo.**

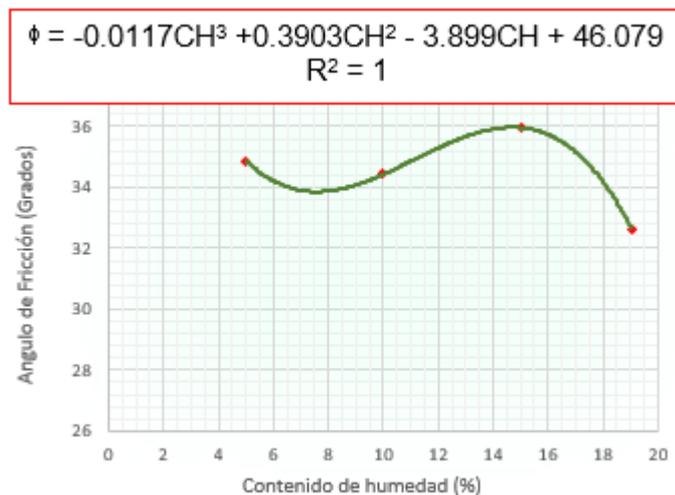
No se han rechazado las hipótesis nulas en ambos análisis (de regresión y de varianza) concluyendo que la ecuación de regresión:

$$\phi = -0.101CH + 35.718$$

No es significativo por lo tanto podemos afirmar que nuestro modelo no es importante para predecir el ángulo de fricción con respecto al contenido de humedad.

Sin embargo, se puede concluir que esta correlación de Contenido de Humedad vs cohesión para un Peso Unitario de 1.8 gr/cm<sup>3</sup>, presenta una correlación cubica con ecuación:

$C = -0.0117CH^3 + 0.3903CH^2 - 3.8992CH + 46.079$  Con un coeficiente de determinación  $R^2 = 1$ .



**Figura 91. Grafica C vs CH correlación cubica.**

#### 4.2.6. CORRELACIÓN DE LA COHESIÓN (C) VS EL CONTENIDO DE HUMEDAD (CH), (PARA UN PESO UNITARIO DE 1.8 gr/cm<sup>3</sup>)

Tabla 49: Análisis de regresión lineal simple para determinar la cohesión con respecto al contenido de humedad.

CLASE	CH (X)	φ (Y)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y
1	5.00	0.14	25	0.02	0.7
2	10.00	0.12	100	0.01	1.2
3	15.00	0.07	225.00	0.00	1.05
4	19.05	0.07	362.9025	0.00	1.3335
Σ SUMA	49.05	0.4	712.9025	0.04	4.2835

De las ecuaciones mostradas y con los valores de la Tabla 49 con  $n = 4$ , se tiene:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{Y} = 0.10$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \Rightarrow \quad \bar{X} = 12.263$$

Medida del grado en el cual dos variables están relacionadas linealmente, de las ecuaciones y Tabla 49 se determina:

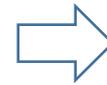
$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XX} = 111.43$$

$$S_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{YY} = 0.004$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n} \right] \quad \Rightarrow \quad S_{XY} = -0.622$$

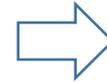
Valor esperado de los estimadores, determinados por las ecuaciones:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}}$$



$$\beta_1 = -0.006$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{X}$$

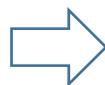


$$\beta_0 = 0.168$$

Tabla 50: Estimación del error y de la “Y (Estimado)”

CLASE	CH (X)	ϕ (Y)	ϕ (Estimado)	Estimado del Error	Cuadrado del Error
1	5.00	0.14	0.140507676	-0.00050768	2.57735E-07
2	10.00	0.12	0.112619431	0.00738057	5.44728E-05
3	15.00	0.07	0.084731186	-0.01473119	0.000217008
4	19.05	0.07	0.062141707	0.00785829	6.17528E-05
Σ SUMA	49.05	0.4		SC <sub>E</sub> =	0.000333491

$$C(\text{estimado}) = \beta_0 + \beta_1 CH$$



$$C(\text{estimado}) = -0.006CH + 0.168$$

De la Tabla 50 se determina el cuadrado medio del error SC<sub>E</sub> que es la suma de todos los cuadrados estimados de error SC<sub>E</sub> = 0.0003335.

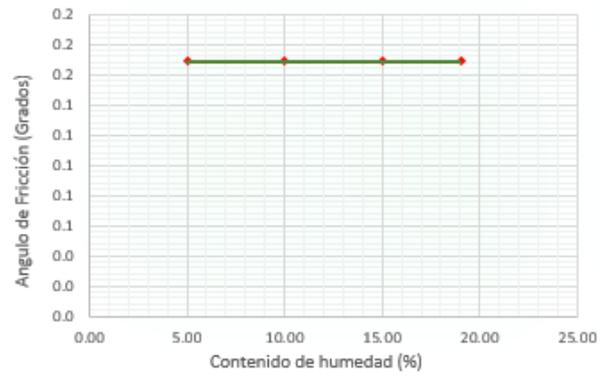
### Formulación de las hipótesis:

Es necesario evaluar que tan bien el modelo explica la relación entre CH (X) y C (Y).

La hipótesis de mayor interés plantea que la pendiente (β<sub>1</sub>) es significativamente diferente de cero.

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_A : \beta_1 \neq 0$$



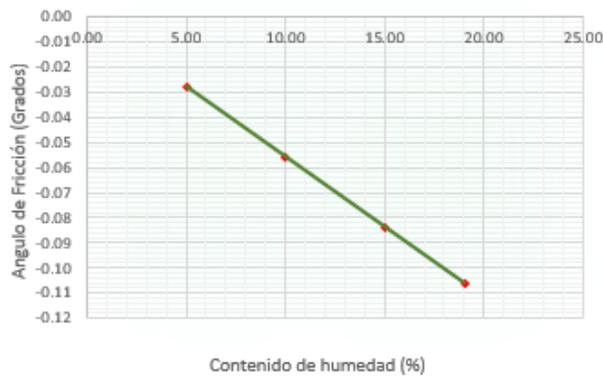
CH (X)	$\phi$ (Estimado)
5.00	0.168
10.00	0.168
15.00	0.168
19.05	0.168

**Figura 92. Cuando  $\beta_1 = 0$ ;  $C(\text{estimado}) = 0.168 + 0CH$**

Con respecto al parámetro  $\beta_0$  (Intersección al eje y):

$$H_0 : \beta_0 = 0$$

$$H_A : \beta_0 \neq 0$$



CH (X)	$\phi$ (Estimado)
5.00	-0.028
10.00	-0.056
15.00	-0.084
19.05	-0.106

**Figura 93. Cuando  $\beta_0 = 0$ ;  $C(\text{estimado}) = 0 - 0.006CH$**

Análisis de regresión para  $n = 4$  :

$$S_{XX} = 111.43$$

$$S_{YY} = 0.0038$$

$$S_{XY} = -0.622$$

$$CM_E = 0.0001667$$

$$\bar{X} = 12.263$$

$$\bar{Y} = 0.1000$$

$$\beta_0 = 0.168$$

$$\beta_1 = -0.0056$$

Resultando la figura siguiente:

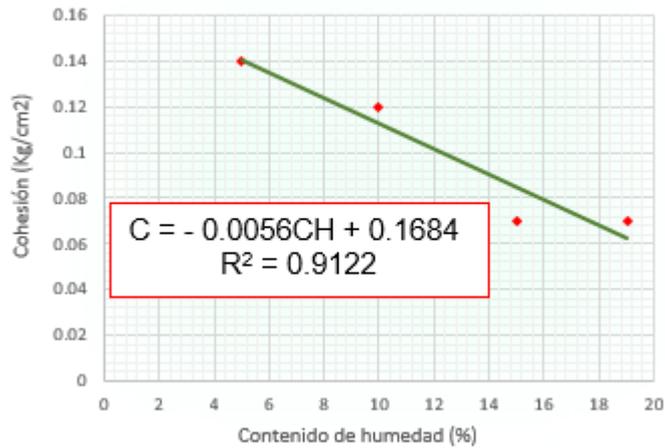


Figura 94. Grafica C vs CH.

Estadística de prueba para  $\beta_1$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_1}{\sqrt{CM\varepsilon/S_{XX}}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = -4.560$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 4$ :

Entonces  $4.560 > t(0.025, 2)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 2) = 4.303$ .

**Entonces como:  $4.560 > 4.303$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

Estadística de prueba para  $\beta_0$ , de la ecuación tenemos:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0}{\sqrt{CM\varepsilon(\frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{XX}})}} \quad \Rightarrow \quad t_0 = 10.311$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $|t_0| > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 4$ :

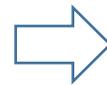
$10.311 > t(0.025, 2)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $t(0.025, 2) = 4.303$ .

**Entonces como:  $10.311 > 4.303$  se rechaza la  $H_0$  para este parámetro.**

### Análisis de varianza

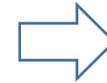
$SC_R$  es la suma de cuadrados de la regresión y mide la varianza explicada por la recta de regresión.

$$SC_R = \beta_1 S_{XY}$$



$$SC_R = 0.003$$

$$CM_R = SC_R/1$$



$$CM_R = 0.003$$

$$CM_E = SC_E/(n - 2)$$



$$CM_E = 0.000167$$

### Formulación de la hipótesis:

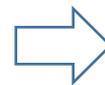
Para  $\alpha = 5\% = 0.05$ , y  $n = 4$ :

$$H_0 : \beta_0 = 0$$

$$H_A : \beta_0 \neq 0$$

Estadística de prueba:

$$F_0 = \frac{SCR/1}{SCR/(n-2)} = \frac{CMR}{CME}$$



$$F_0 = 20.7892$$

La  $H_0$  se rechaza si:  $F_0 > F_{(\alpha, 1, n-2)}$ , para  $\alpha = 5\% = 0.05$ ,  $n = 4$ :

$20.7892 > F(0.05, 1, 2)$  de la Tabla de valor estadístico "t" se tiene  $F(0.05, 1, 2) = 18.51$

**Entonces como:  $20.7892 < 18.51$  el modelo de regresión es significativo.**

Se han rechazado las hipótesis nulas en ambos análisis (de regresión y de varianza) concluyendo que la ecuación de regresión:

$$C = -0.006CH + 0.168$$

Es significativo por lo tanto podemos afirmar que nuestro modelo no es importante para predecir la cohesión con respecto al contenido de humedad.

### 4.3. GRAFICA TIEMPO CON DESPLAZAMIENTO NORMAL.

Al aplicar la carga normal deseada o incrementos de carga al espécimen y comenzar a registrar las lecturas de deformación normal versus el tiempo transcurrido. Se determinará la gráfica tiempo versus desplazamiento normal, mostrándonos si se expande o se comprime la muestra, podemos ver las gráficas en el Anexo A: Memoria de Cálculos.

Donde podemos determinar la expansión o comparación al final del ensayo, para esto también se muestra una gráfica desplazamiento final de la muestra con carga a que fueron expuestas 0.5 Kg, 1.0 Kg y 2.0 Kg, gráfica que tiene que cumplir en la linealidad, ver ejemplo de la Figura 52 y Figura 53.

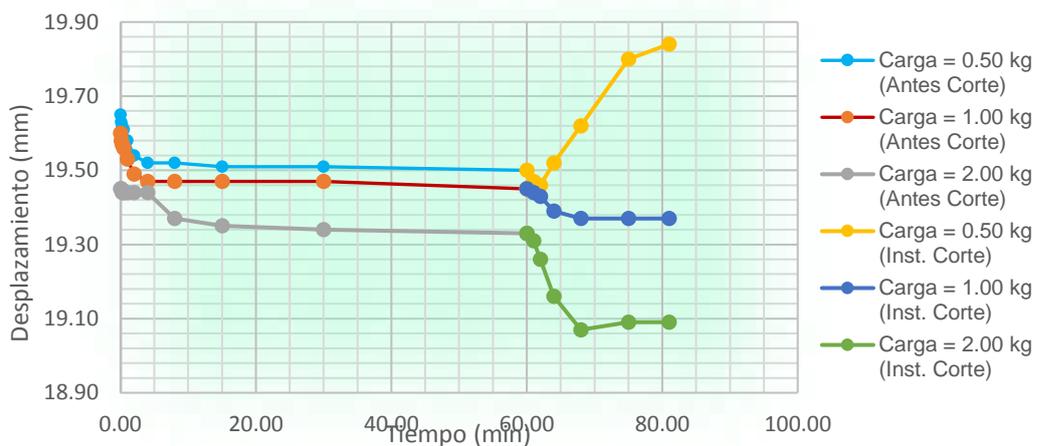
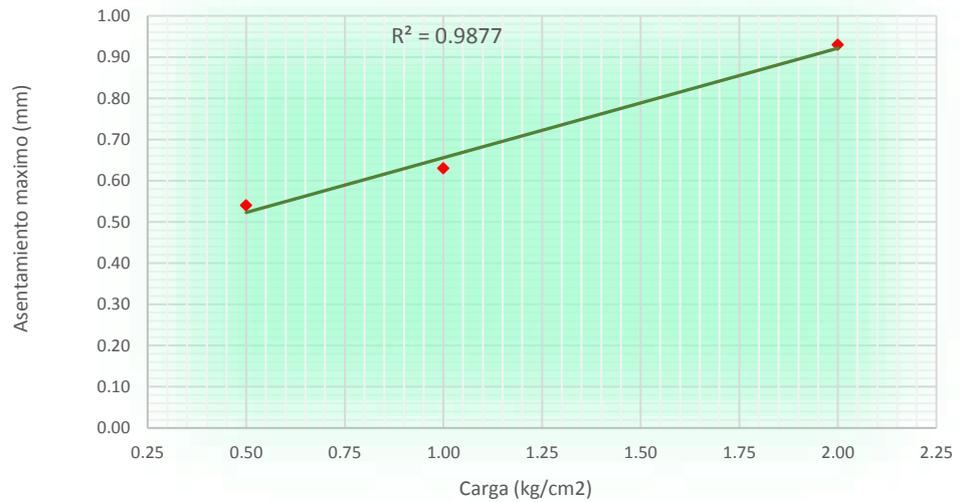


Figura 95. Tiempo Vs. Desplazamiento para el PU= 1.9 gr/cm<sup>3</sup> y CH= 10.00%.



**Figura 96. Asentamiento total Vs. Carga normal para PU= 1.9 gr/cm<sup>3</sup> y CH= 10.00%.**

#### **4.4. CORRELACIÓN LINEAL MÚLTIPLE DE LOS PARAMETROS DE RESISTENCIA CORTANTE CON LA DENSIDAD Y CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO.**

En este caso no se podrá realizar una regresión lineal múltiple porque no cumple con los requisitos necesarios para poder realizar esta técnica, debido a que la variable respuesta para nuestro caso la cohesión no depende linealmente de las variables explicativas que son la densidad o peso unitario y el contenido de humedad del suelo.

Sin embargo, en las Tablas 51 y 53, se presenta la distribución de los datos con respecto al ángulo de fricción y cohesión para poder estimar una correlación lineal múltiple evaluada mediante el análisis de regresión múltiple con Microsoft Excel 2013 mostradas en las Tablas 52 y 54. La base de datos fue de 25 muestras.

Tabla 51: Distribución de datos para el análisis de regresión lineal múltiple para determinar el ángulo de fricción interna con respecto al contenido de humedad y peso unitario.

CLASE	C.H. (X1)	P.U. (X2)	φ (Y)	X1^2	X2^2	X1*X2	X1*Y	X2*Y
1	0	1.3	27.43	0	1.69	0	0	35.659
2	0	1.4	29.18	0	1.96	0	0	40.852
3	0	1.5	30.42	0	2.25	0	0	45.63
4	0	1.6	31.77	0	2.56	0	0	50.832
5	0	1.7	33.21	0	2.89	0	0	56.457
6	5	1.4	29.94	25	1.96	7	149.7	41.916
7	5	1.5	31.43	25	2.25	7.5	157.15	47.145
8	5	1.6	32.68	25	2.56	8	163.4	52.288
9	5	1.7	33.55	25	2.89	8.5	167.75	57.035
10	5	1.8	34.88	25	3.24	9	174.4	62.784
11	10	1.6	33.98	100	2.56	16	339.8	54.368
12	10	1.7	34.15	100	2.89	17	341.5	58.055
13	10	1.8	34.43	100	3.24	18	344.3	61.974
14	10	1.9	34.57	100	3.61	19	345.7	65.683
15	10	2	34.66	100	4	20	346.6	69.32
16	15	1.5	34.54	225	2.25	22.5	518.1	51.81
17	15	1.6	35.08	225	2.56	24	526.2	56.128
18	15	1.7	35.46	225	2.89	25.5	531.9	60.282
19	15	1.8	35.96	225	3.24	27	539.4	64.728
20	15	1.9	36.78	225	3.61	28.5	551.7	69.882
21	19.05	1.7	32.63	362.9025	2.89	32.385	621.6015	55.471
22	19.05	1.8	33.63	362.9025	3.24	34.29	640.6515	60.534
23	19.05	1.9	34.37	362.9025	3.61	36.195	654.7485	65.303
24	19.05	2	35.43	362.9025	4	38.1	674.9415	70.86
25	19.05	2.1	36.29	362.9025	4.41	40.005	691.3245	76.209
SUMA	245.25	42.5	836.45	3564.5125	73.25	438.475	8480.8675	1431.205

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum X_1 & \sum X_2 \\ \sum X_1 & \sum X_1^2 & \sum X_1 X_2 \\ \sum X_2 & \sum X_1 X_2 & \sum X_2^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum Y \\ \sum X_1 Y \\ \sum X_2 Y \end{bmatrix}$$

Utilizando las ecuaciones antes mostradas y el programa Microsoft Excel los parámetros estadísticos obtenidos son:

Tabla 52: Ecuación de correlación y parámetros estadísticos.

Modelo	Ecuación de correlación	R	R <sup>2</sup>
Modelo 1: CH, PU, φ	Φ = 0.10972xCH + 6.87545xPU + 20.69334	0.8529	0.728

Tabla 53: Distribución de datos para el análisis de regresión lineal múltiple para determinar la cohesión con respecto al contenido de humedad y peso unitario.

CLASE	C.H. (X1)	P.U. (X2)	C (Y)	X1^2	X2^2	X1*X2	X1*Y	X2*Y
1	0	1.3	0.0302	0	1.69	0	0	0.03926
2	0	1.4	0.0568	0	1.96	0	0	0.07952
3	0	1.5	0.0848	0	2.25	0	0	0.1272
4	0	1.6	0.1155	0	2.56	0	0	0.1848
5	0	1.7	0.1337	0	2.89	0	0	0.22729
6	5	1.4	0.0000	25	1.96	7	0	0
7	5	1.5	0.0000	25	2.25	7.5	0	0
8	5	1.6	0.0121	25	2.56	8	0.0605	0.01936
9	5	1.7	0.0792	25	2.89	8.5	0.396	0.13464
10	5	1.8	0.1393	25	3.24	9	0.6965	0.25074
11	10	1.6	0.0000	100	2.56	16	0	0
12	10	1.7	0.0512	100	2.89	17	0.512	0.08704
13	10	1.8	0.1239	100	3.24	18	1.239	0.22302
14	10	1.9	0.1980	100	3.61	19	1.98	0.3762
15	10	2	0.2763	100	4	20	2.763	0.5526
16	15	1.5	0.0061	225	2.25	22.5	0.0915	0.00915
17	15	1.6	0.0177	225	2.56	24	0.2655	0.02832
18	15	1.7	0.0414	225	2.89	25.5	0.621	0.07038
19	15	1.8	0.0708	225	3.24	27	1.062	0.12744
20	15	1.9	0.0806	225	3.61	28.5	1.209	0.15314
21	19.05	1.7	0.0722	362.9025	2.89	32.385	1.37541	0.12274
22	19.05	1.8	0.0834	362.9025	3.24	34.29	1.58877	0.15012
23	19.05	1.9	0.1015	362.9025	3.61	36.195	1.933575	0.19285
24	19.05	2	0.1085	362.9025	4	38.1	2.066925	0.217
25	19.05	2.1	0.1239	362.9025	4.41	40.005	2.360295	0.26019
SUMA	245.25	42.5	2.0071	3564.5125	73.25	438.475	20.220975	3.633

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum X_1 & \sum X_2 \\ \sum X_1 & \sum X_1^2 & \sum X_1 X_2 \\ \sum X_2 & \sum X_1 X_2 & \sum X_2^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum Y \\ \sum X_1 Y \\ \sum X_2 Y \end{bmatrix}$$

Utilizando las ecuaciones antes mostradas y el programa Microsoft Excel los parámetros estadísticos obtenidos son:

Tabla 54: Ecuación de correlación y parámetros estadísticos.

Modelo	Ecuación de correlación	R	R <sup>2</sup>
Modelo 2: CH, PU, C	C = - 0.00609xCH + 0.35223xPU - 0.45874	0.8472	0.718

#### **4.5. CONTRASTACION DE HIPOTESIS**

Se contrasta que los parámetros de resistencia cortante tanto el ángulo de fricción y la cohesión están relacionados con la densidad o peso unitario con una correlación lineal. Esto permite que la hipótesis esta correctamente validado en las gráficas que relacionan la densidad versus cohesión y la densidad versus el ángulo de fricción.

Mientras que para la correlación de contenido de humedad vs los parámetros de resistencia cortante no es válida, debido a que las correlaciones obtenidas fueron cuadráticas y cubicas.

## CONCLUSIONES

Para una Arena Arcillosa con Grava (SC) existe una correlación lineal entre los parámetros de resistencia cortante y la densidad, sin embargo, esto ocurrirá para un determinado contenido de humedad del suelo. Mientras que con respecto a la relación que existe entre los parámetros de resistencia cortante y el contenido de humedad estas tienen una correlación cuadrática y/o Cubica, esto para una determinada densidad. Con estas correlaciones se podrá obtener los parámetros de resistencia al corte para el tipo de suelo en estudio, pudiendo determinar un ángulo de fricción y cohesión en el momento de la ejecución conociendo la variación de densidad y contenido de humedad que pudo haber sufrido el material.

Debido a que solo existe la correlación lineal entre los parámetros de resistencia cortante con la densidad, y no con el contenido de humedad del suelo el cual es una correlación cuadrática y/o cubica, no se pudo obtener la correlación lineal múltiple, sin embargo se pudo estimar una correlación lineal múltiple el cual resulto para nuestro tipo de suelo las siguientes ecuaciones: para el ángulo de fricción interna resulto  $\Phi = 0.10972 \times CH + 6.87545 \times PU + 20.69334$  con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.728$  y para la cohesión resulto  $C = -0.00609 \times CH + 0.35223 \times PU - 0.45874$  con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.718$ .

Se genero la gráfica que relaciona el tiempo con el desplazamiento normal, con ello se pudo concluir que el desplazamiento en todo momento posee una relación lineal de acuerdo a la carga normal que lo sometamos y esto se puede observar en las lecturas finales de deformación que posee una relación lineal ver ANEXO A: Memoria de Cálculos, con esto también se puede concluir que es necesario la verificación de esta relación lineal al momento de realizar el ensayo de corte directo ya que nos ayuda saber si el ensayo se está realizando con toda normalidad.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar los ensayos de corte directo en un equipo de corte directo a gran escala, ya que esto permitirá tener un amplio rango a la hora de hacer variar nuestras variables dependientes.

De acuerdo con esta investigación sería recomendable realizar los ensayos de corte directo con diferentes pesos unitarios para cada tipo de suelo, esto porque la ecuación lineal es diferente para cada tipo de suelo a ensayar, para ya luego determinar los parámetros de corte directo de acuerdo con la densidad real en que se encuentra el suelo a la hora de construir.

## REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

Becker, E., Chan C.K. y Sedd H.B. (1972). "Strength and Deformation Chacaracterísticas of Rockfill Materials in plane Strain and Triaxial Compression Test". Report TE-72-3, office of Research Services, University of California, Berkeley C.A.

Braja M. Das (2001), "*Fundamentos de Ingeniería Geotecnia*"

Carmona Álvarez y Ruge Cárdenas (2015), "*Análisis de las correlaciones existentes del ángulo de fricción efectivo para suelos del piedemonte oriental de Bogotá usando ensayos in situ*" Artículo de Investigación. *Revista del Instituto Tecnológico Metropolitano Medellín Colombia*.

Crespo Villalaz, C. (1990) "Mecánica de Suelos y Cimentaciones. 4° Edición. Ed Limusa.

Datta, M., Gulhati, S.K., Rao, G.V. (1982) "Engineering Behaviour of carbonate soils of India and some observations on classification of such soils". In Geotechnical properties, Behaviour, and performance of calcareous soils, Special Technical Publication 777, ASTM, Philadelphia, Pa., pp. 113-140.

De Barcia, E., González, G., Sulbaran, Y., Ucar, N. R. (2014). "Determinación del parámetro de resistencia, ángulo de fricción Interna ( $\phi$ ) y su relación con los parámetros densidad relativa ( $D_r$ ) y la relación de vacíos ( $e$ ) en suelos granulares". *Revista Ciencia e Ingeniería*, Vol. 35, pp. 135-146.

Duncan J.M., Wright S.G. (2005). "Soil Strength and Slope Stability". John Wiley and Sons.Inc. Hoboken. New Jersey p. 297.

Ferrer M., Gózales, V. L., Ortuño L., Oteo C. (2002). "Ingeniería Geológica"

Foss, I. (1977) "Red soil from Kenya as a foundation material". In Proc., Eighth international conference on soil mechanics and foundation engineering, Moscow, vol.2, pp. 73-80.

F.J. Barón López, F. Téllez Montiel, "*Apuntes de Bioestadística*"

González Villalaz, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Otero, C. (2004), "*Ingeniería Geológica*"

INDECI – PNUD (1994) *Proyecto INDECI – PNUD PER / 02 / 051 CIUDADES SOSTENIBLES.*

INDECOPI. (2006), *Norma Técnica Peruana NTP 339.171.* Lima, Perú.  
Editorial INDECOPI.

INDECOPI. (2002), *Norma Técnica Peruana NTP 339.134.* Lima, Perú.  
Editorial INDECOPI.

INDECOPI. (2002), *Norma Técnica Peruana NTP 339.128.* Lima, Perú.  
Editorial INDECOPI.

INDECOPI. (2002), *Norma Técnica Peruana NTP 339.089.* Lima, Perú.  
Editorial INDECOPI.

INDECOPI. (1998), *Norma Técnica Peruana NTP 339.129.* Lima, Perú.  
Editorial INDECOPI.

INDECOPI. (2002), *Norma Técnica Peruana NTP 339.127.* Lima, Perú.  
Editorial INDECOPI.

INDECOPI. (1999), *Norma Técnica Peruana NTP 339.139.* Lima, Perú.  
Editorial INDECOPI.

INDECOPI. (2001), *Norma Técnica Peruana NTP 339.151*. Lima, Perú.  
Editorial INDECOPI.

Ladd, C.C., Foott R., Ishihara K., Schloseer F., Poulos H.G., (1977),  
“Stress Deformation and strength characteristics”. In Proc., Ninth  
international conference on soil mechanics and foundation  
engineering, Tokyo, Vol. 2, pp. 421-494.

Lambe T.W., Whitman R.V, (1969) “Soil mechanics”. John Wiley & Sons,  
New York, p. 553

Lambe T.W., Whitman R.V, (1984) “Mecánica de Suelos”

Martin López, “Introducción a la estadística económica y empresarial”  
Ed.Thomson

Silvia Angelone (2002), “*Consolidación de Suelos*”

Shuan Lucas (2011), “Investigación de la matriz de las gravas del Perú  
modelo grava de Ventanilla” Tesis de Investigación. *Investigación de  
la facultad de ingeniería civil de postgrado, Universidad Nacional de  
Ingeniería.*

Zamora C.J., Cristancho F. (2008), “La Humedad en las Propiedades  
Físicas del suelo” Artículo de Investigación. *Revista del  
Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia.*

*Anexo A: MEMORIA DE CALCULOS*

**MEMORIA DE CALCULOS PARA UNA DENSIDAD DE 1.3 gr/cm<sup>3</sup> Y  
CONTENIDO DE HUMEDAD DE 0.00%**

Proyecto : Correlacion para determinar los parametros de resistencia al cortante  
haciendo variar la densidad y humedad de la muestra  
Solicitado : Vargas Rimac Jimy Alex C-2 mab-1  
Lugar : Jr. San Martin entre Teofilo Castillo - Huaraz Profundidad : 1.40 - 3.00 m.

**Usando datos de Ensayo de Corte Directo**

**Características del Suelo**

1 de 3

**Estrato de Apoyo**

**Arena arcillosa con grava**

**SC**

Angulo de Fricción Interna : 27.4 Grados = 0.4787  
Cohesión : 0.03 Kg/cm<sup>2</sup> 0.30 Ton/m<sup>2</sup>  
Peso Unit. del suelo encima de Df :  $\gamma_1 = 1.30$  Ton/m<sup>3</sup>  
Peso Unit. del suelo debajo de Df :  $\gamma_2 = 0.30$  Ton/m<sup>3</sup>  
Espesor del estrato : E = 5.00 m.  
Profundidad de Nivel Freatico : NF = -. m.

**Características de la Edificación**

Carga de Servicio de la Estructura :  $Q_{ser} = 16.00$  Ton  
Carga Muerta + Carga Viva + Sismo :  $Q_{mvs} = 16.50$  Ton  
Carga Horizontal : H = 0.00 Ton  
Angulo de Inclinación de la carga :  $\theta = 0.00$  grados  
Distorsión Angular :  $\alpha = 1/150$   
Luces entre Columnas : L = 5.00 m  
Asentamiento tolerable calculado :  $\delta_C = 3.33$  cm  
Asentamiento tolerable asumido :  $\delta = 2.50$  cm

**PARAMETROS DE SUELO**

Relación D/B = 1.285714 <= 5 |||||OK!!!!!!  
Esfuerzo Geostático efectivo  $\sigma = 0.960$  Ton/m<sup>2</sup>

**CAPACIDAD DE CARGA POR CORTE**

**SEGÚN TERZAGHI (1943)**

Considerar Falla por corte Local (S/N)? = **S**  
 $\phi_{corr} = 19.08$  Grados 0.3331 Radianes  
 $c' = 0.02$  Kg/cm<sup>2</sup>  
 $\phi' = 0.33$  Radianes  
 $c' = 0.02$  Kg/cm<sup>2</sup> 0.20 Ton/m<sup>2</sup>  
Factores de capacidad de Carga  
 $K_{\phi\gamma} = 25.4231$  a = 2.13  
 $N_c = 16.65$   
 $N_q = 6.76$   
 $N_{\gamma} = 4.75$

### CAPACIDAD DE CARGA POR CORTE

Tipo de Cimentación : Cuadrada = 1  
 Rectangular = 2  
 Corrida = 3  
 Losa de Cimentación = 4

Tipo de Cimentación : 1 **Cuadrada**

Profundidad de desplante Df : 2.0 m.  $\gamma$  a nivel de desplante 1.30

q = 2.60 Ton/m<sup>2</sup>

Ancho B (m)	Largo L (m)	Sc	Sy	qult (Kg/cm <sup>2</sup> )	q adm (Kg/cm <sup>2</sup> )
1.50	1.50	1.30	1.30	2.80	0.93
2.00	2.00	1.30	1.30	3.00	1.00
2.50	2.50	1.30	1.30	3.20	1.07
3.00	3.00	1.30	1.30	3.40	1.13

Tipo de Cimentación : 1 **Cuadrada**

Profundidad de desplante Df : 1.8 m.  $\gamma$  a nivel de desplante 1.30

q = 2.34 Ton/m<sup>2</sup>

Ancho B (m)	Largo L (m)	Sc	Sy	qult (Kg/cm <sup>2</sup> )	q adm (Kg/cm <sup>2</sup> )
1.70	1.70	1.30	1.30	2.70	0.90
1.40	1.40	1.30	1.30	2.58	0.86
2.50	2.50	1.30	1.30	3.02	1.01
3.00	3.00	1.30	1.30	3.22	1.07

**Factor de seguridad por corte FS = 3.00**

**Por tanto para las condiciones de carga, elegimos las siguientes características:**

Ancho de cimentación : B' = 1.40 m.  
 Longitud de cimentación : L' = 1.40 m.  
 Profundidad de Desplante : Df = 1.80 m.  
 Carga aplicada para corte :  $q_{apl-corte} = 0.82 \text{ Kg/cm}^2$   
 Carga aplicada para asentamiento :  $q_{apl-asent} = 0.84 \text{ Kg/cm}^2$  8.42  
 Capacidad de carga por corte :  $2.58 \text{ Kg/cm}^2 = 0.25 \text{ Mpa}$   
 Y el Factor de Seguridad por Corte es de: 3.16  
 Capacidad Admisible por corte =  $0.86 \text{ Kg/cm}^2 = 0.08 \text{ Mpa}$

## CALCULO DE ASENTAMIENTOS

DATOS:

3 de 3

Módulo de Poisson  $\mu = 0.2$   
Módulo de elasticidad  $E_s = 904 \text{ Tn/m}^2$  (del ensayo de corte directo)

Factor de forma  
 $m (L/B) = 1.00$   
 $I_f$  (esquina cim.flexible) = 0.56  
 $I_p$ (centro cim. rigida =  $2 \times I_f \times 80\%$ ) = 0.898  
 $I_f = 0.898$

**Asentamiento Total probable  $S_i = 1.12 \text{ cm}$**

**Asentamiento Diferencial probable  $S_d = 0.84 \text{ cm}$**

Asentamiento admisible  $d = 2.50 \text{ cm}$

Factor de corrección  $k = 2.23$

### **CAPACIDAD ADMISIBLE POR ASENTAMIENTO:**

La capacidad admisible por asentamiento es:

$$q_{\text{adm} \times \text{asent}} = 1.88 \text{ Kg/cm}^2 = 0.18 \text{ Mpa}$$

## CALCULO DE LA PRESIÓN ADMISIBLE

$$q_{\text{adm}} = 0.86 \text{ kg/cm}^2 = 0.08 \text{ Mpa}$$
$$\delta_{\text{Total}} = 1.12 \text{ cm}$$
$$\delta_{\text{Diferencial}} = 0.84 \text{ cm}$$

\* Parámetros y valores válidos solamente para las condiciones descritas.

**MEMORIA DE CALCULOS PARA UNA DENSIDAD DE 1.7 gr/cm<sup>3</sup> Y  
CONTENIDO DE HUMEDAD DE 0.00%**

Proyecto : Correlacion para determinar los parametros de resistencia al cortante  
haciendo variar la densidad y humedad de la muestra  
Solicitado : Vargas Rimac Jimy Alex C-2 mab-1  
Lugar : Jr. San Martin entre Teofilo Castillo - Huaraz Profundidad : 1.40 - 3.00 m.

**Usando datos de Ensayo de Corte Directo**

**Características del Suelo**

1 de 3

**Estrato de Apoyo**

**Grava arcillosa con arena**

**SC**

Angulo de Fricción Interna	:	33.2 Grados =	0.5797
Cohesión	:	0.13 Kg/cm <sup>2</sup>	1.34 Ton/m <sup>2</sup>
Peso Unit. del suelo encima de Df	:	$\gamma_1 =$	1.70 Ton/m <sup>3</sup>
Peso Unit. del suelo debajo de Df	:	$\gamma_2 =$	0.70 Ton/m <sup>3</sup>
Espesor del estrato	:	E =	5.00 m.
Profundidad de Nivel Freatico	:	NF =	-. m.

**Características de la Edificación**

Carga de Servicio de la Estructura	:	$Q_{ser} =$	16.00 Ton
Carga Muerta + Carga Viva + Sismo	:	$Q_{mvs} =$	16.50 Ton
Carga Horizontal	:	H =	0.00 Ton
Angulo de Inclinación de la carga	:	$\theta =$	0.00 grados
Distorsión Angular	:	$\alpha =$	1/150
Luces entre Columnas	:	L =	5.00 m
Asentamiento tolerable calculado	:	$\delta C =$	3.33 cm
Asentamiento tolerable asumido	:	$\delta =$	2.50 cm

**PARAMETROS DE SUELO**

Relación	D/B	=	2.25 <=	5	iiiiiiOK!!!!!!
Esfuerzo Geostático efectivo	$\sigma$	=	1.820 Ton/m <sup>2</sup>		

**CAPACIDAD DE CARGA POR CORTE**

**SEGÚN TERZAGHI (1943)**

Considerar Falla por corte Local (S/N)?	=	<b>S</b>	
	$\phi_{corr} =$	23.58 Grados	0.4116 Radianes
	$c' =$	0.09 Kg/cm <sup>2</sup>	
	$\phi' =$	0.41 Radianes	
	$c' =$	0.09 Kg/cm <sup>2</sup>	0.89 Ton/m <sup>2</sup>
Factores de capacidad de Carga	$K\gamma =$	33.2909	a = 2.56
	$N_c =$	22.67	
	$N_q =$	10.89	
	$N_\gamma =$	8.43	

### CAPACIDAD DE CARGA POR CORTE

Tipo de Cimentación : Cuadrada = 1  
 Rectangular = 2  
 Corrida = 3  
 Losa de Cimentación = 4

2 de 3

Tipo de Cimentación : 1 **Cuadrada**

Profundidad de desplante Df : 2.0 m.  $\gamma$  a nivel de desplante 1.70

q = 3.40 Ton/m<sup>2</sup>

Ancho B (m)	Largo L (m)	Sc	Sy	qult (Kg/cm <sup>2</sup> )	q adm (Kg/cm <sup>2</sup> )
1.50	1.50	1.30	1.30	7.73	2.58
2.00	2.00	1.30	1.30	8.19	2.73
2.50	2.50	1.30	1.30	8.66	2.89
3.00	3.00	1.30	1.30	9.13	3.04

Tipo de Cimentación : 1 **Cuadrada**

Profundidad de desplante Df : 1.8 m.  $\gamma$  a nivel de desplante 1.70

q = 3.06 Ton/m<sup>2</sup>

Ancho B (m)	Largo L (m)	Sc	Sy	qult (Kg/cm <sup>2</sup> )	q adm (Kg/cm <sup>2</sup> )
1.70	1.70	1.30	1.30	7.54	2.51
0.80	0.80	1.30	1.30	6.71	2.24
2.50	2.50	1.30	1.30	8.29	2.76
3.00	3.00	1.30	1.30	8.76	2.92

**Factor de seguridad por corte FS = 3.00**

**Por tanto para las condiciones de carga, elegimos las siguientes características:**

Ancho de cimentación : B' = 0.80 m.  
 Longitud de cimentación : L' = 0.80 m.  
 Profundidad de Desplante : Df = 1.80 m.  
 Carga aplicada para corte : q<sub>apl-corte</sub> = 2.50 Kg/cm<sup>2</sup>  
 Carga aplicada para asentamiento : q<sub>apl-asent</sub> = 2.58 Kg/cm<sup>2</sup> 25.78  
 Capacidad de carga por corte : 6.71 Kg/cm<sup>2</sup> = **0.66 Mpa**

Y el Factor de Seguridad por Corte es de: 2.68

Capacidad Admisibles por corte = 2.24 Kg/cm<sup>2</sup> = **0.22 Mpa**

## CALCULO DE ASENTAMIENTOS

DATOS:

3 de 3

Módulo de Poisson  $\mu = 0.2$   
Módulo de elasticidad  $E_s = 1004 \text{ Tn/m}^2$  (del ensayo de corte directo)

Factor de forma  
 $m (L/B) = 1.00$   
 $I_f$  (esquina cim.flexible) = 0.56  
 $I_p$ (centro cim. rigida =  $2 \times I_f \times 80\%$ ) = 0.898  
 $I_f = 0.898$

**Asentamiento Total probable  $S_i = 1.77 \text{ cm}$**

**Asentamiento Diferencial probable  $S_d = 1.33 \text{ cm}$**

Asentamiento admisible  $d = 2.50 \text{ cm}$

Factor de corrección  $k = 1.41$

### **CAPACIDAD ADMISIBLE POR ASENTAMIENTO:**

La capacidad admisible por asentamiento es:

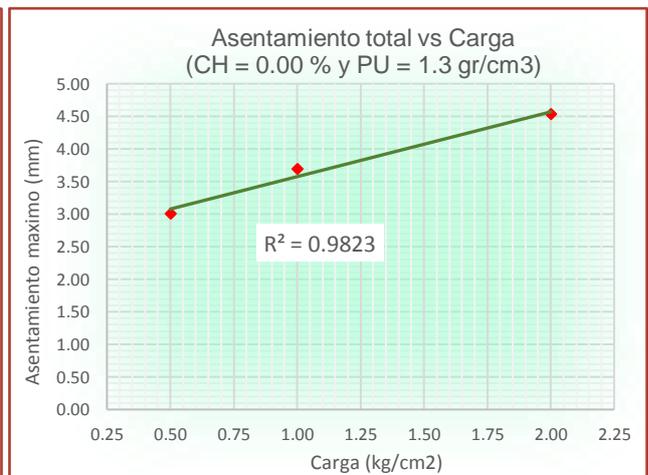
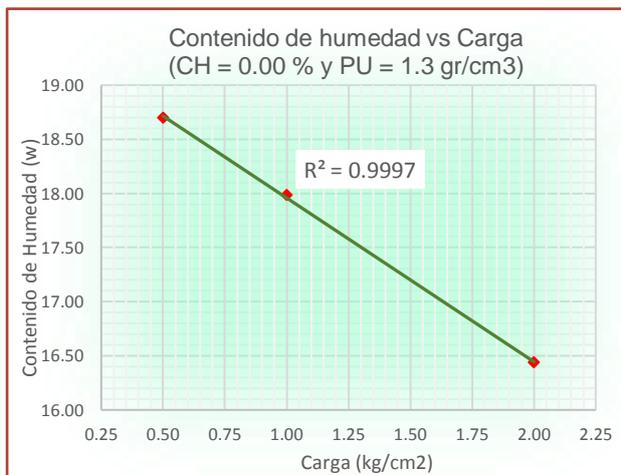
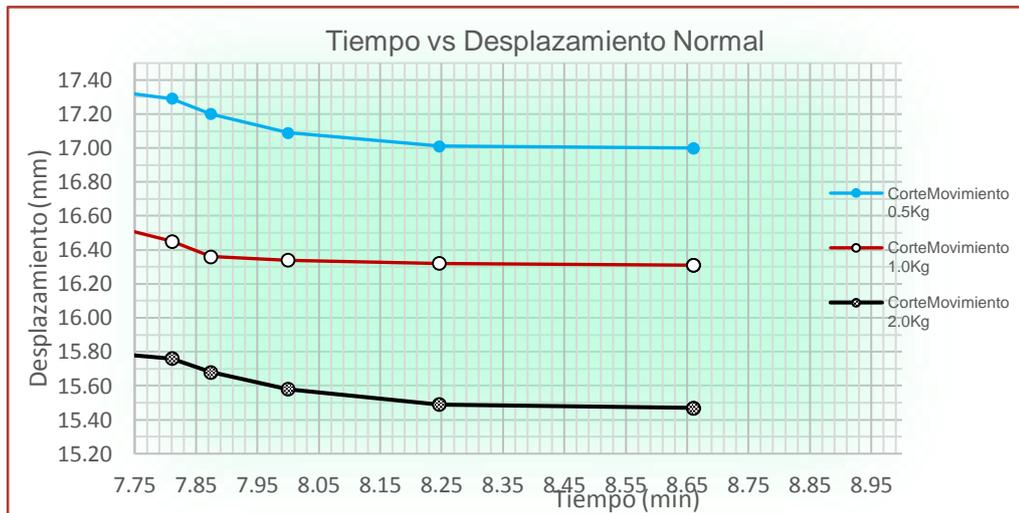
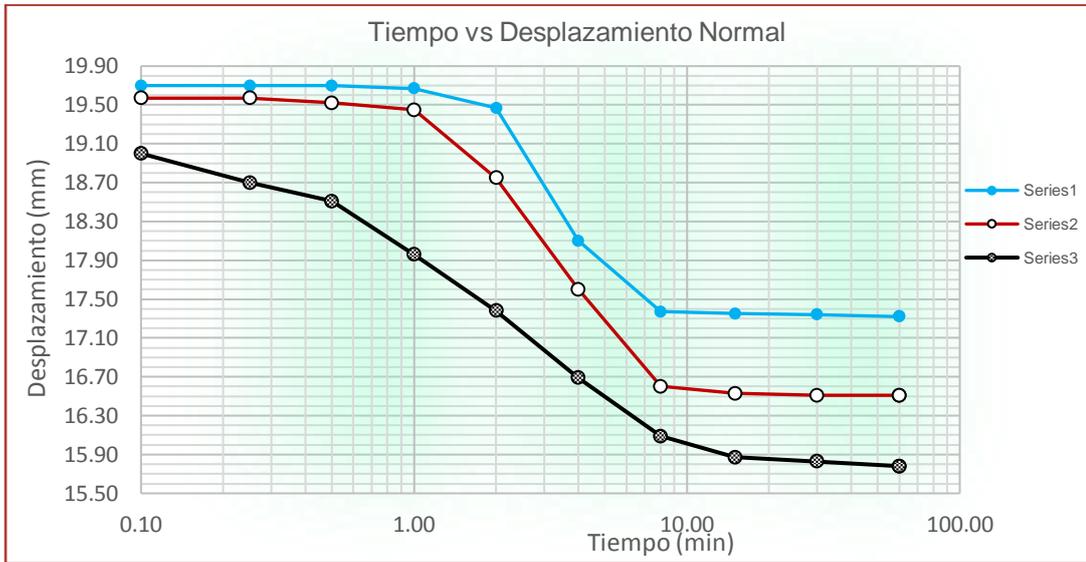
$$q_{\text{adm} \times \text{asent}} = 3.64 \text{ Kg/cm}^2 = 0.36 \text{ Mpa}$$

## CALCULO DE LA PRESIÓN ADMISIBLE

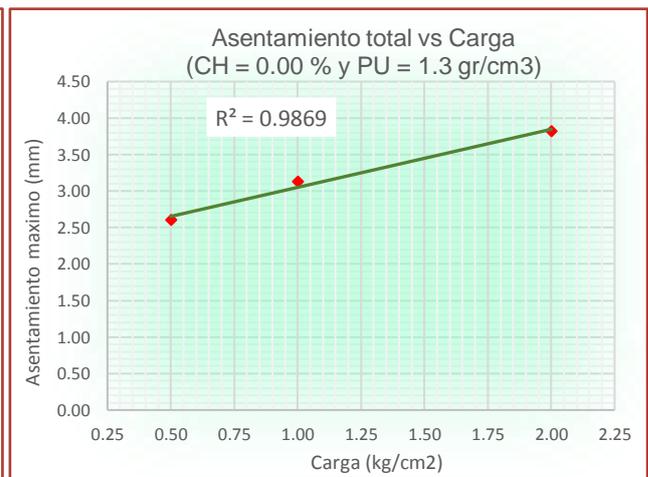
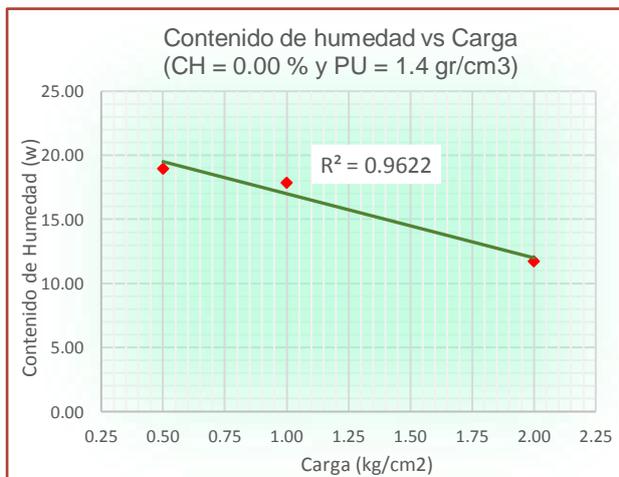
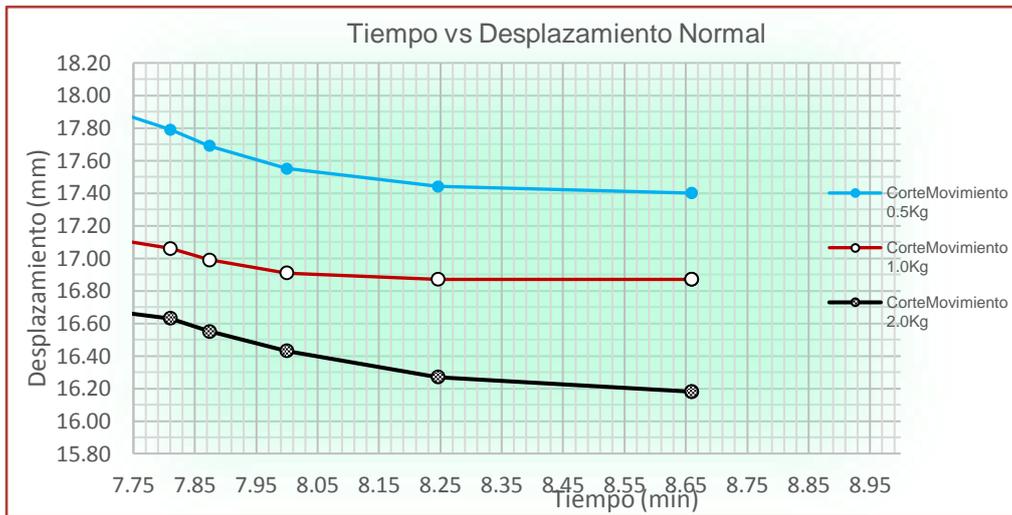
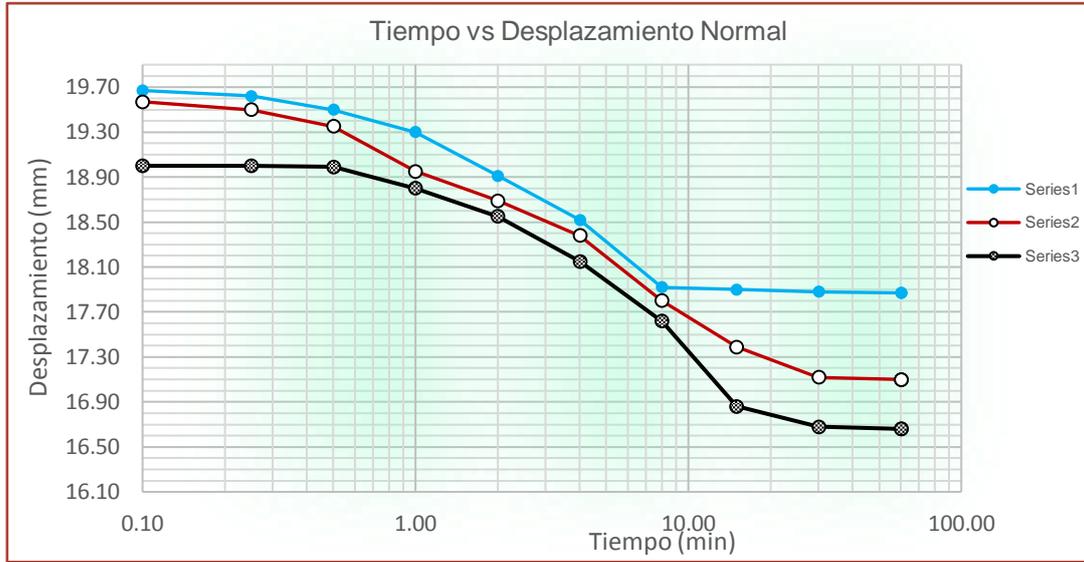
$$q_{\text{adm}} = 2.24 \text{ kg/cm}^2 = 0.22 \text{ Mpa}$$
$$\delta_{\text{Total}} = 1.77 \text{ cm}$$
$$\delta_{\text{Diferencial}} = 1.33 \text{ cm}$$

\* Parámetros y valores válidos solamente para las condiciones descritas.

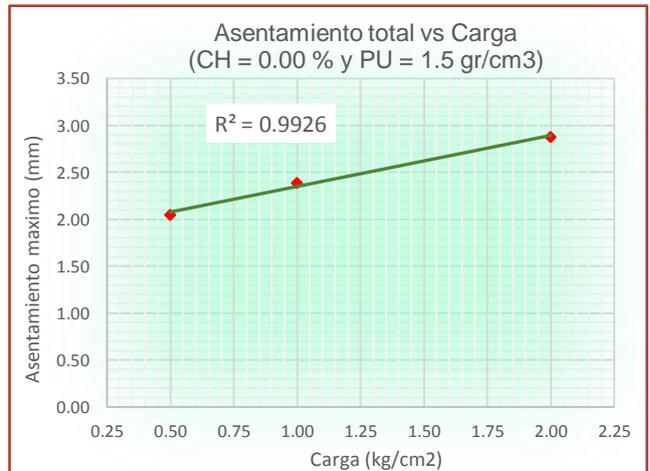
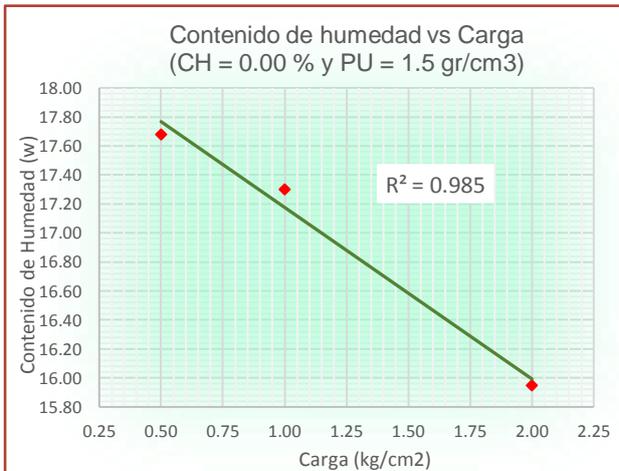
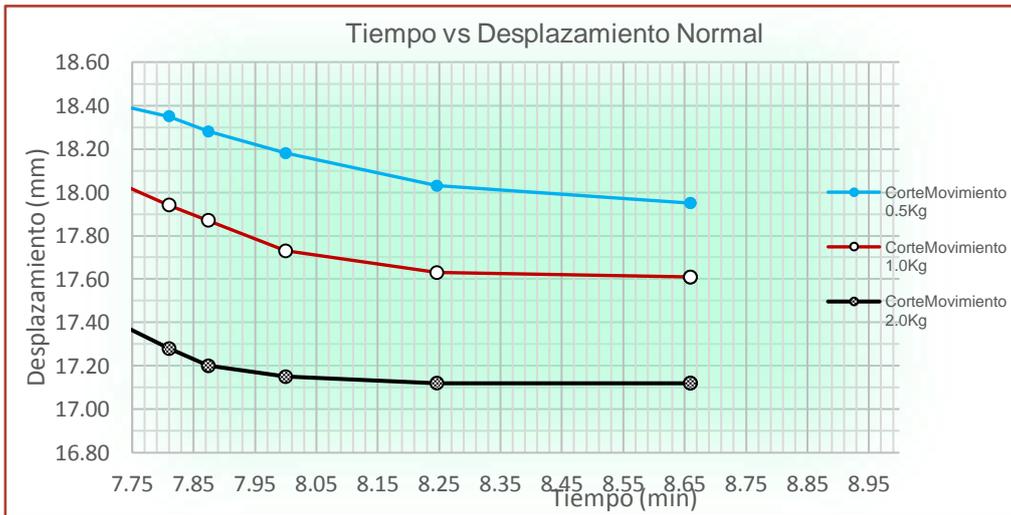
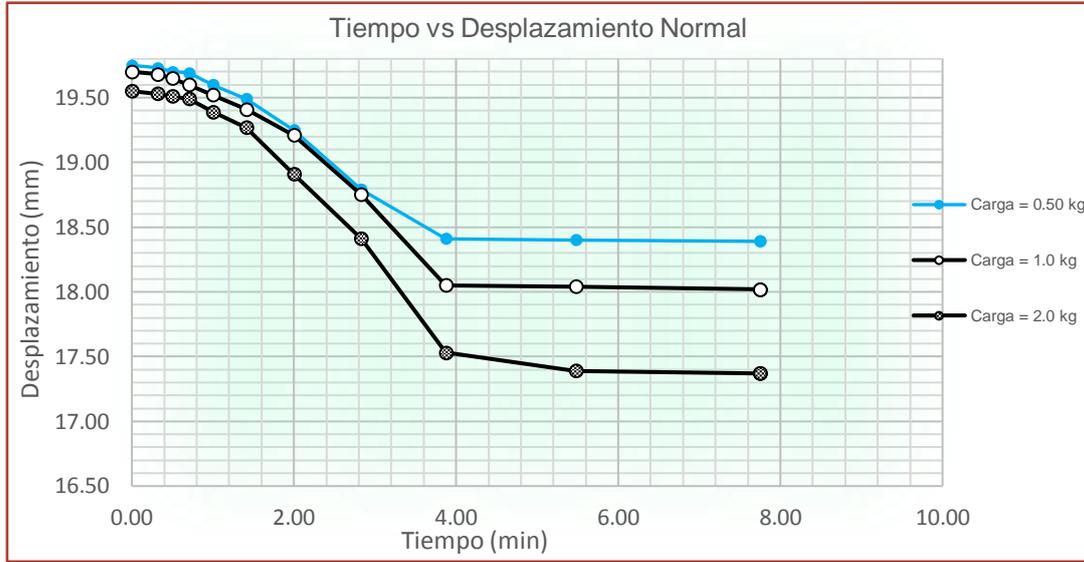
- **GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 0.00% Y P.U = 1.3 gr/cm3):**



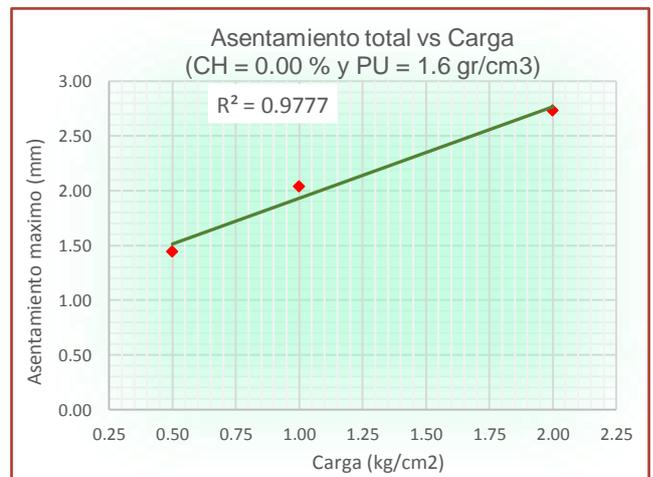
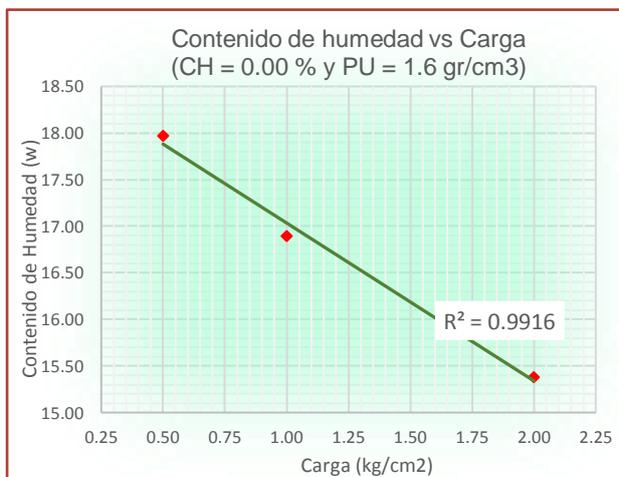
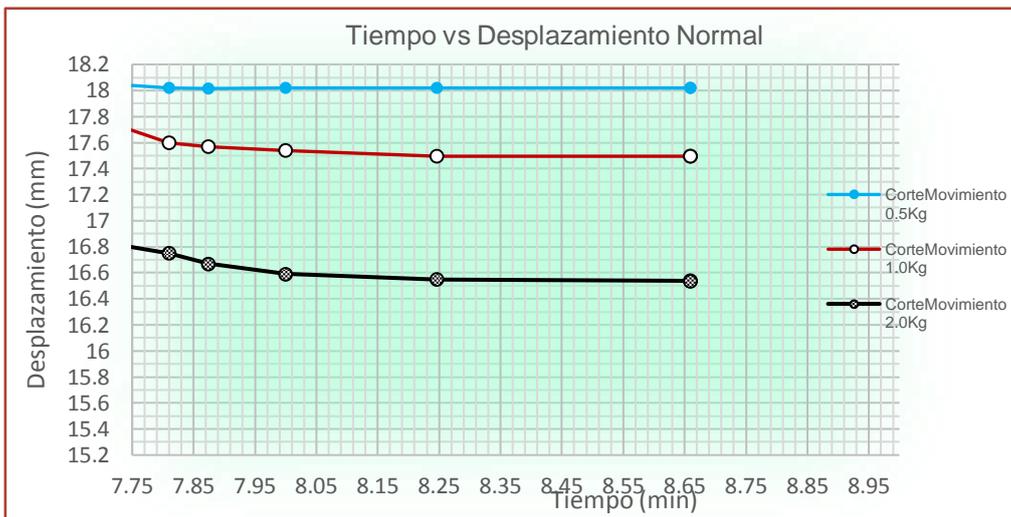
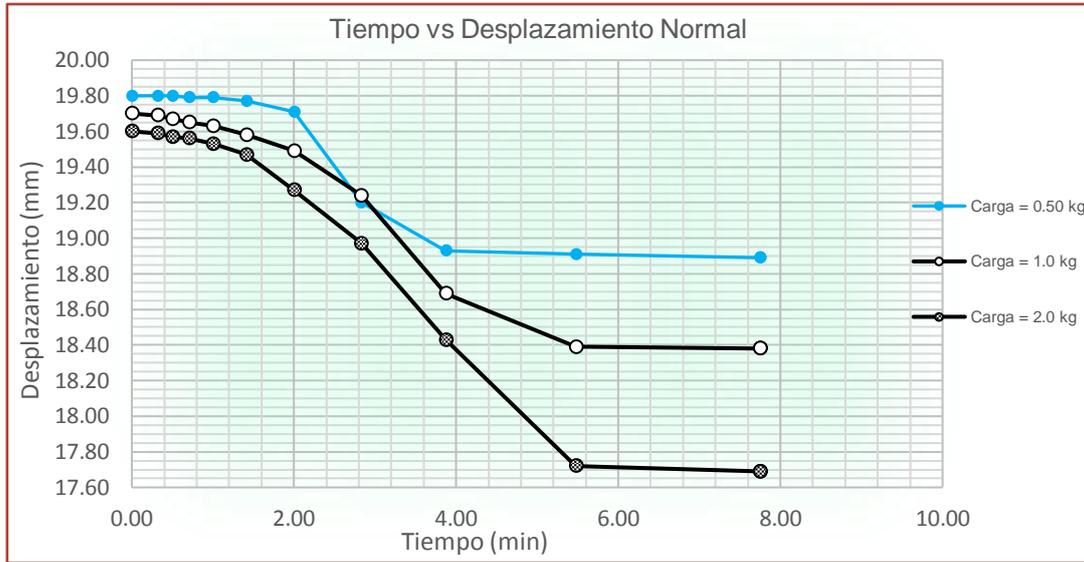
- GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 0.00% Y P.U = 1.4 gr/cm3):**



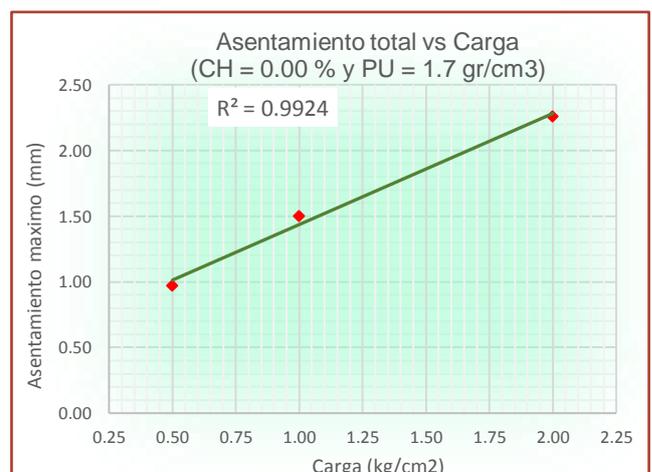
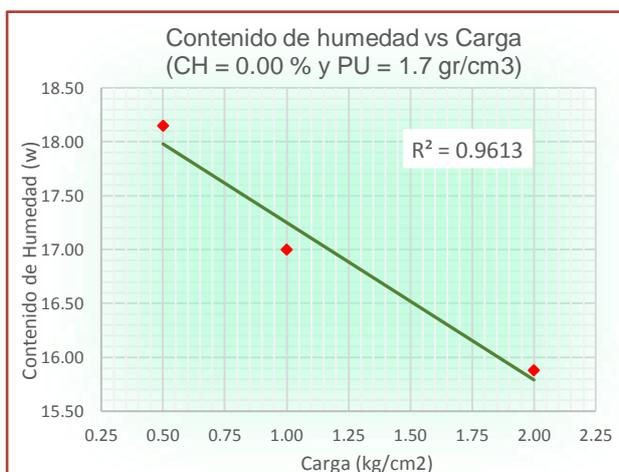
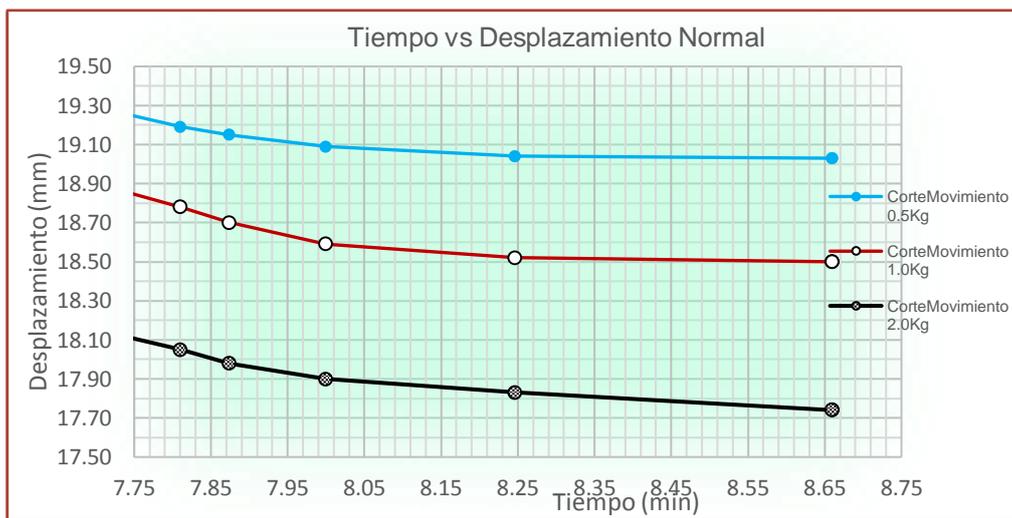
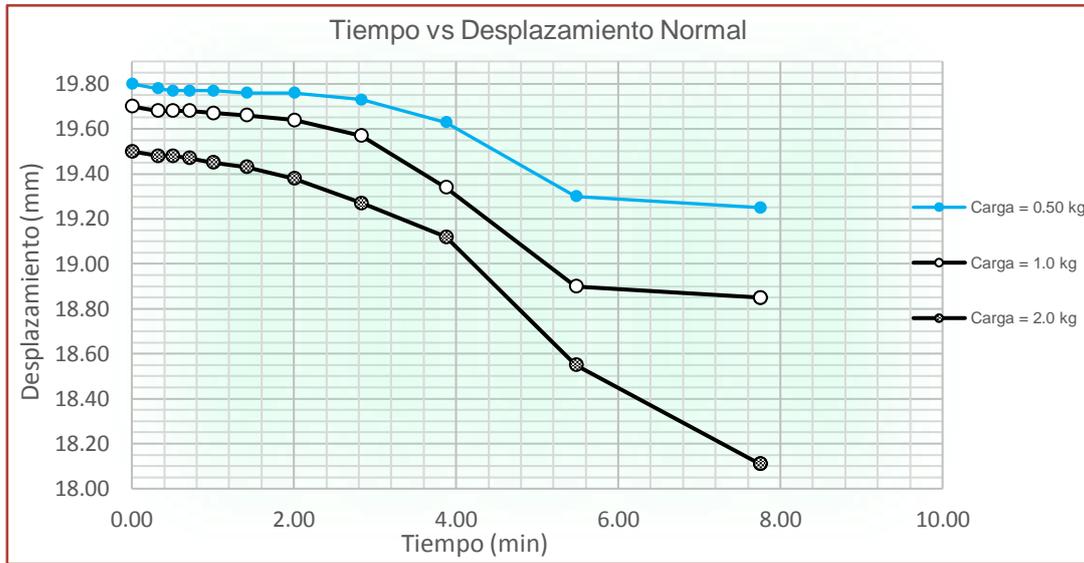
- GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 0.00% Y P.U = 1.5 gr/cm3):**



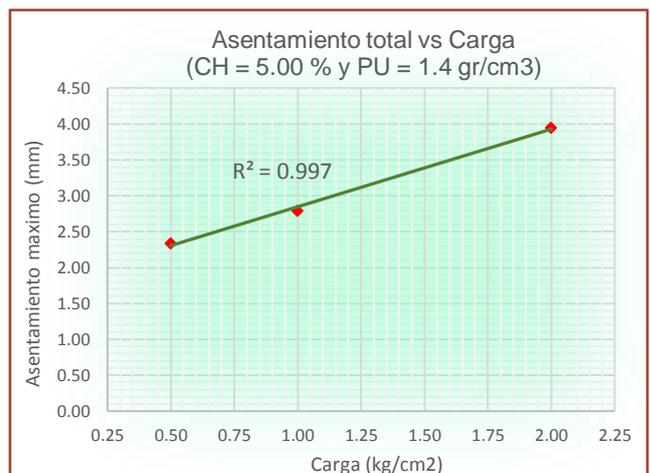
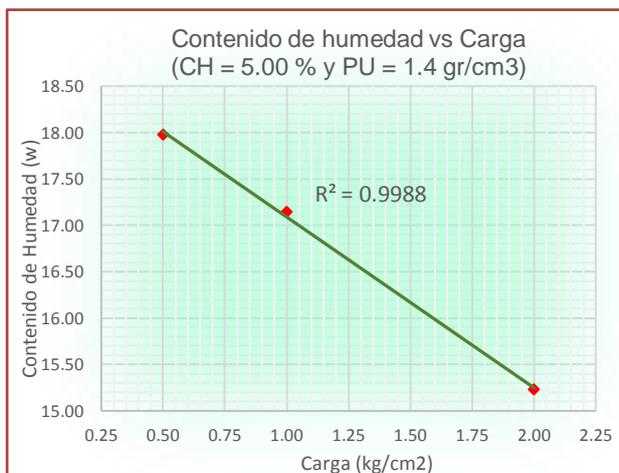
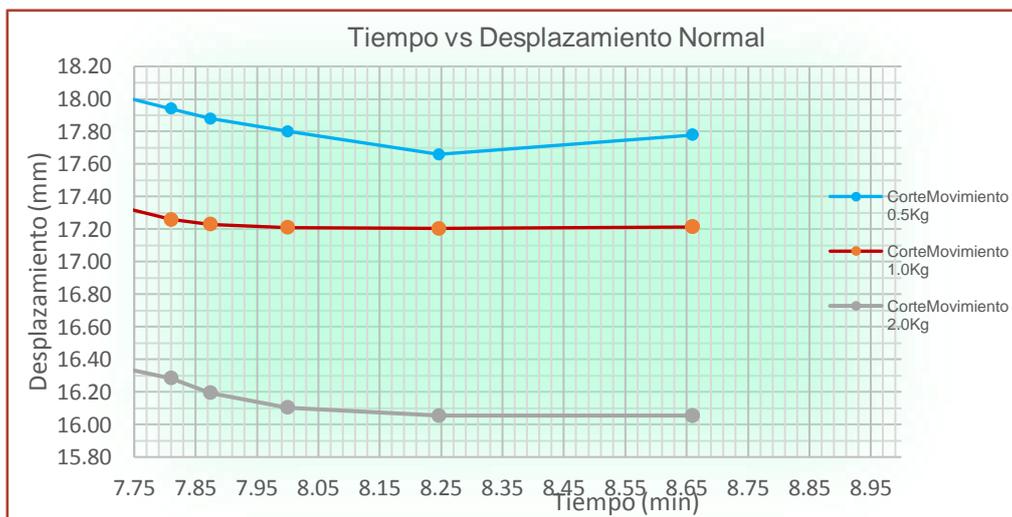
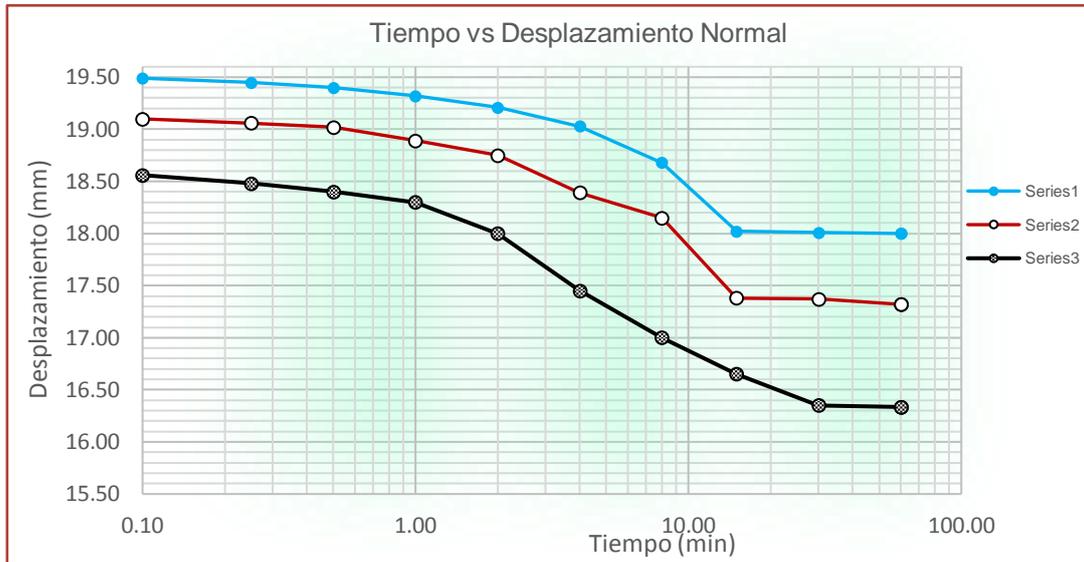
- **GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 0.00% Y P.U = 1.6 gr/cm3):**



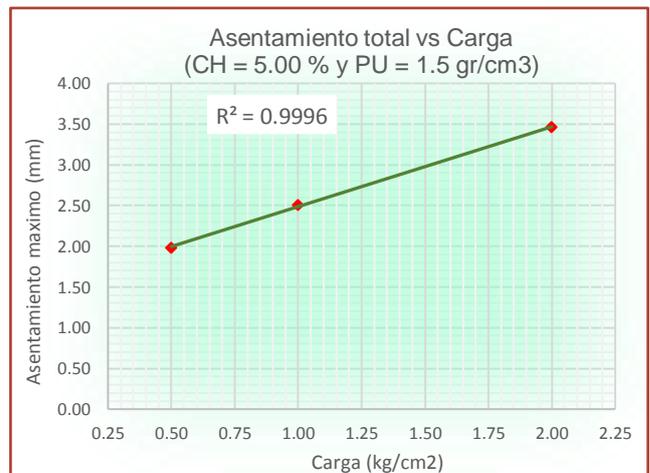
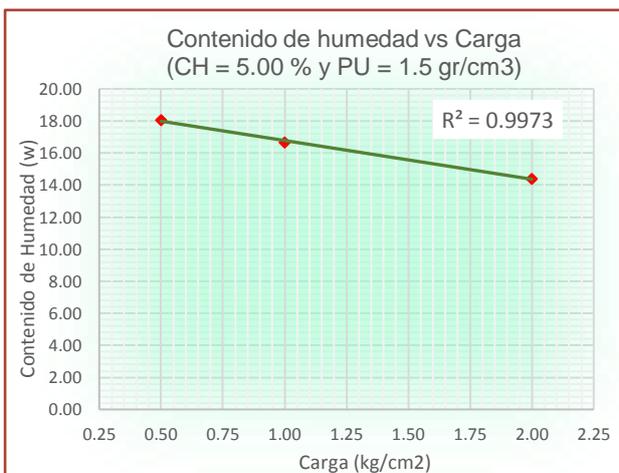
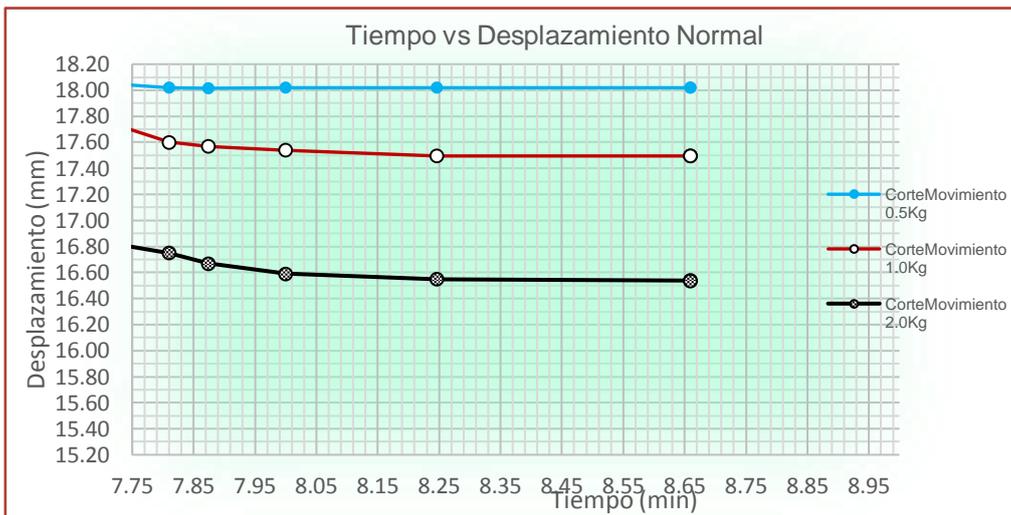
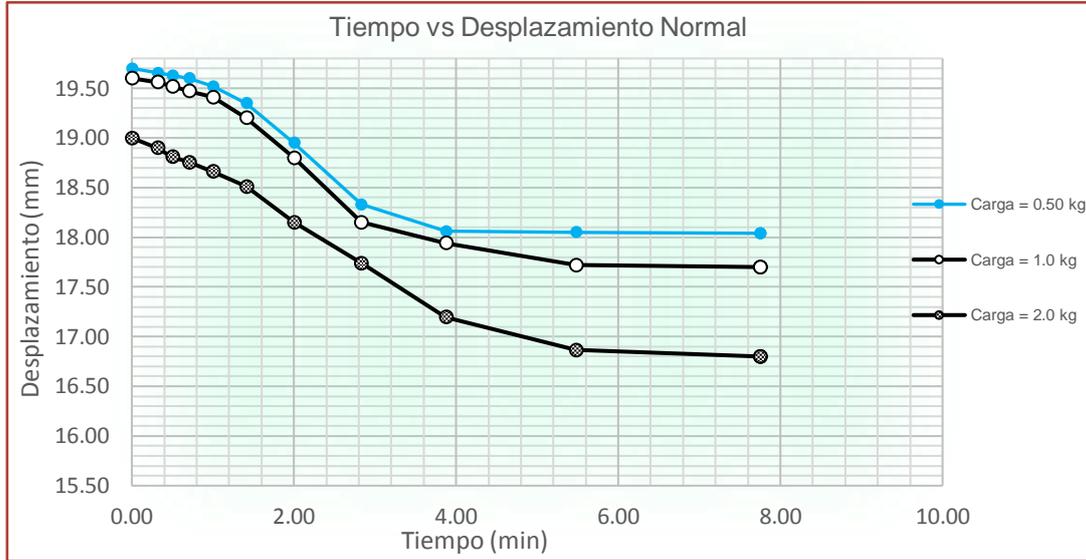
- **GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 0.00% Y P.U = 1.7 gr/cm3):**



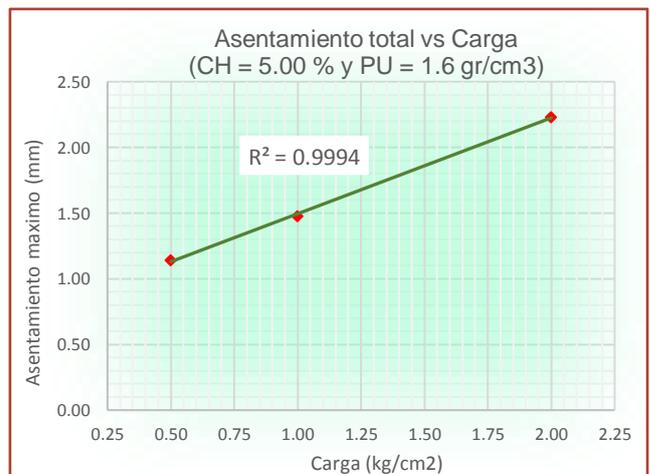
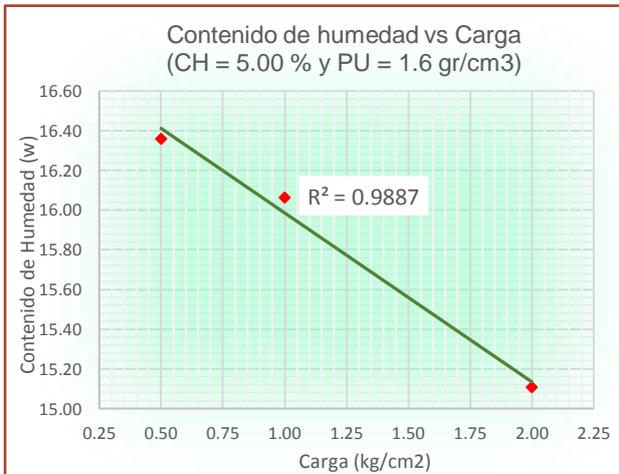
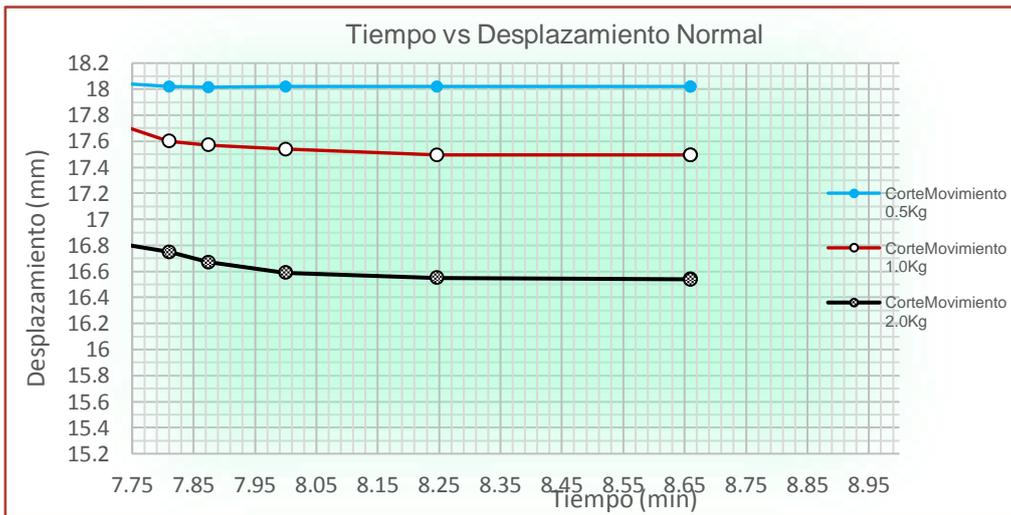
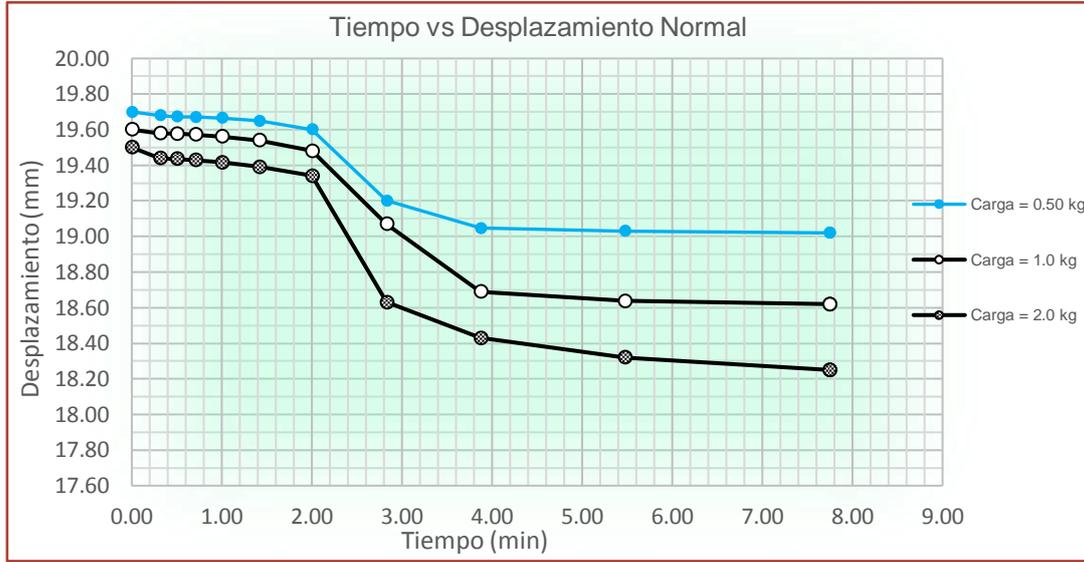
- **GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 5.00% Y P.U = 1.4 gr/cm3):**



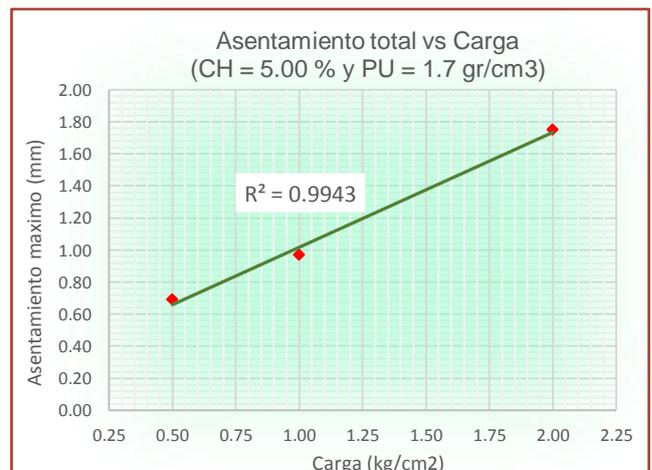
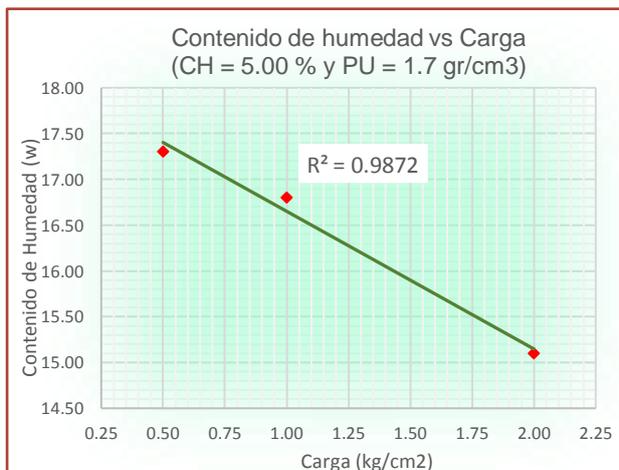
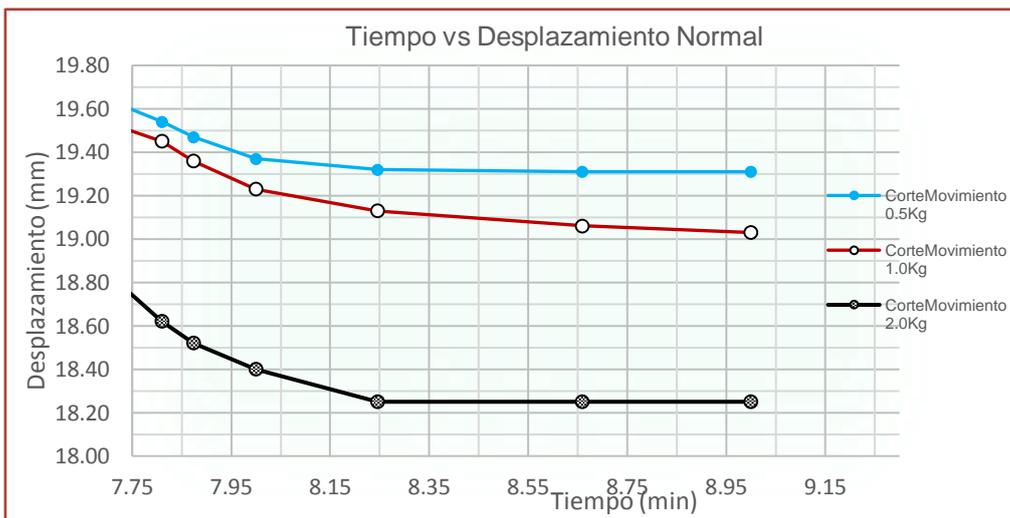
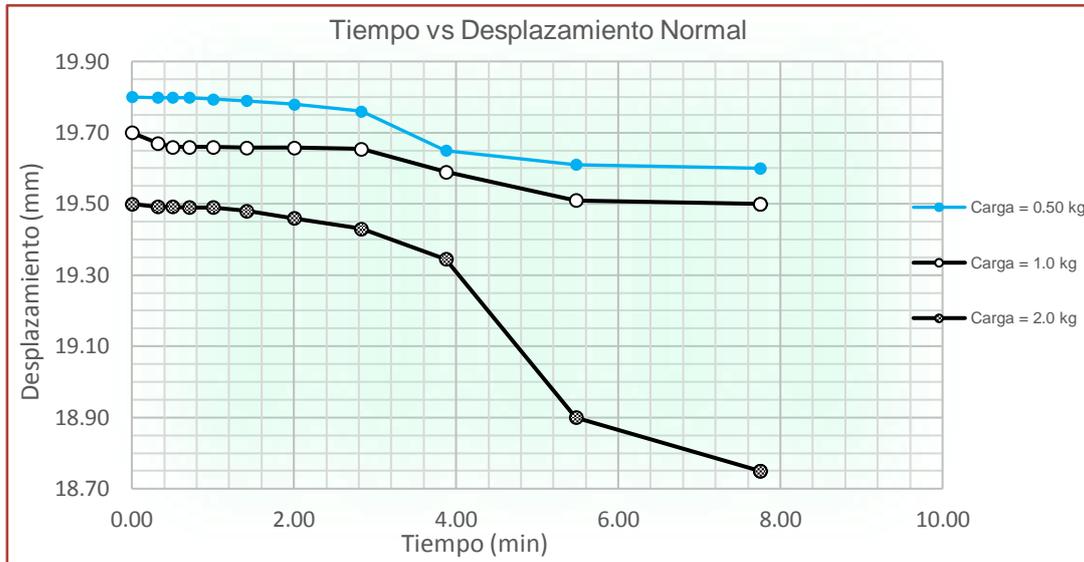
- GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 5.00% Y P.U = 1.5 gr/cm3):**



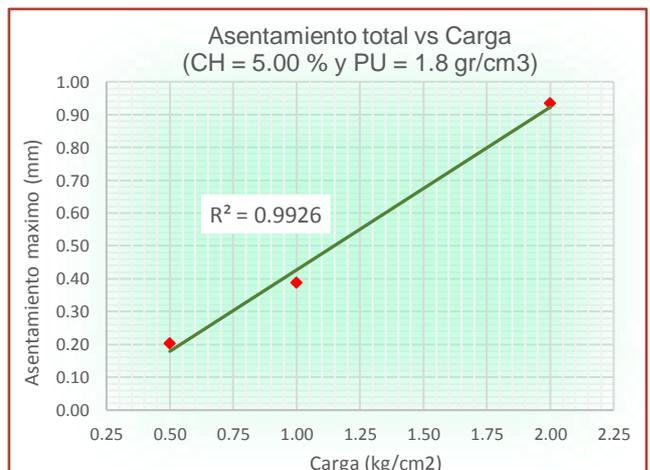
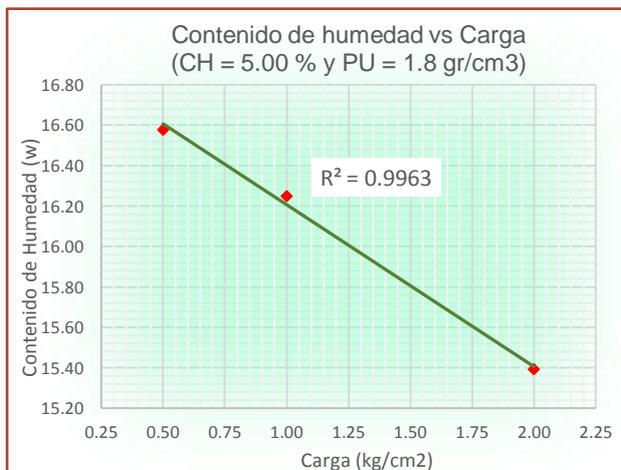
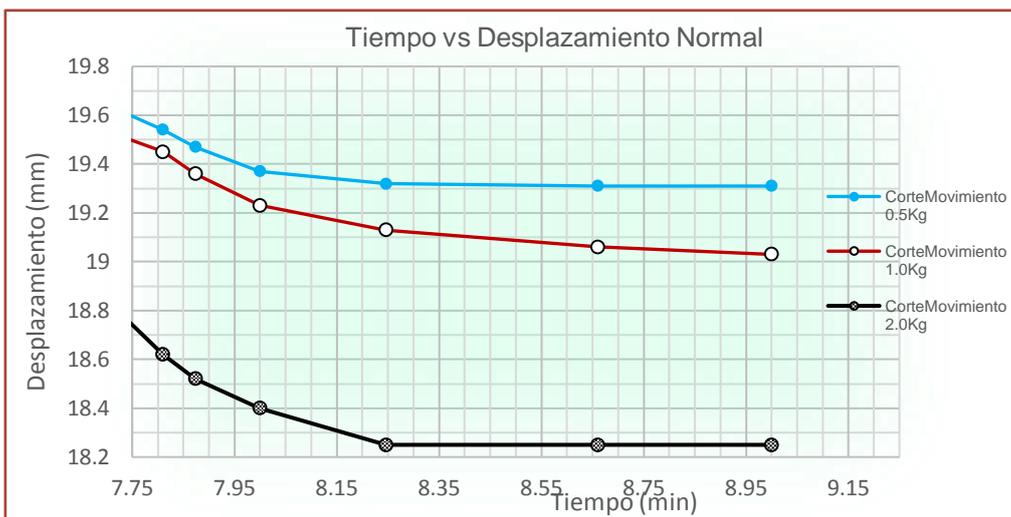
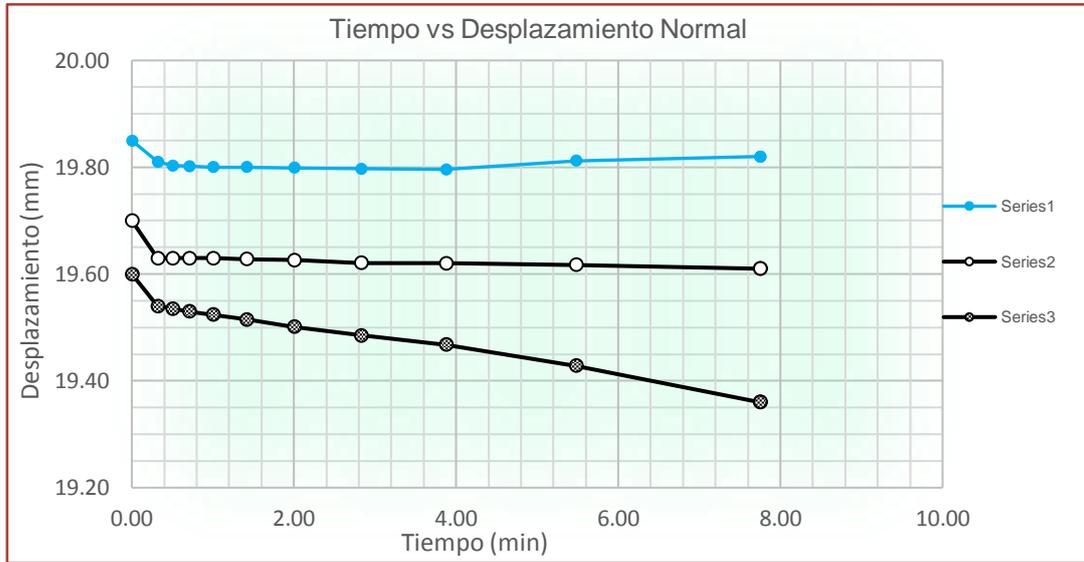
- **GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 5.00% Y P.U = 1.6 gr/cm3):**



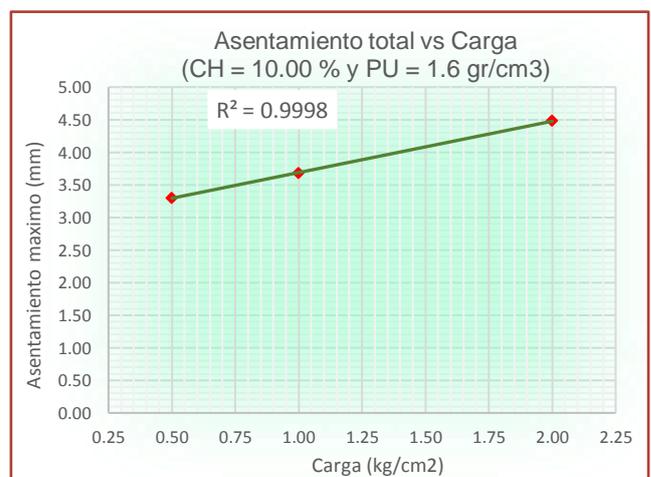
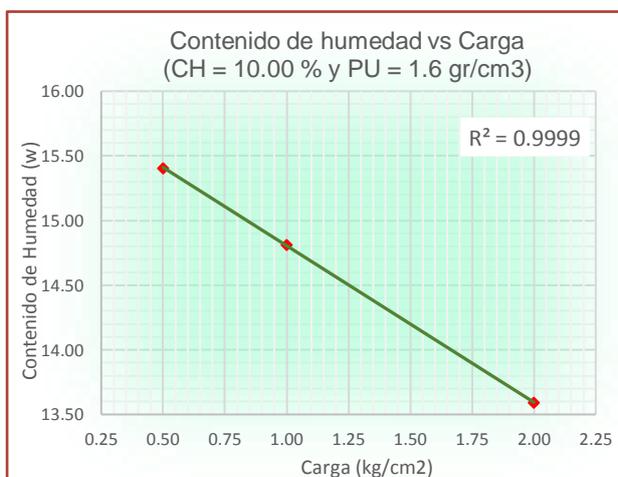
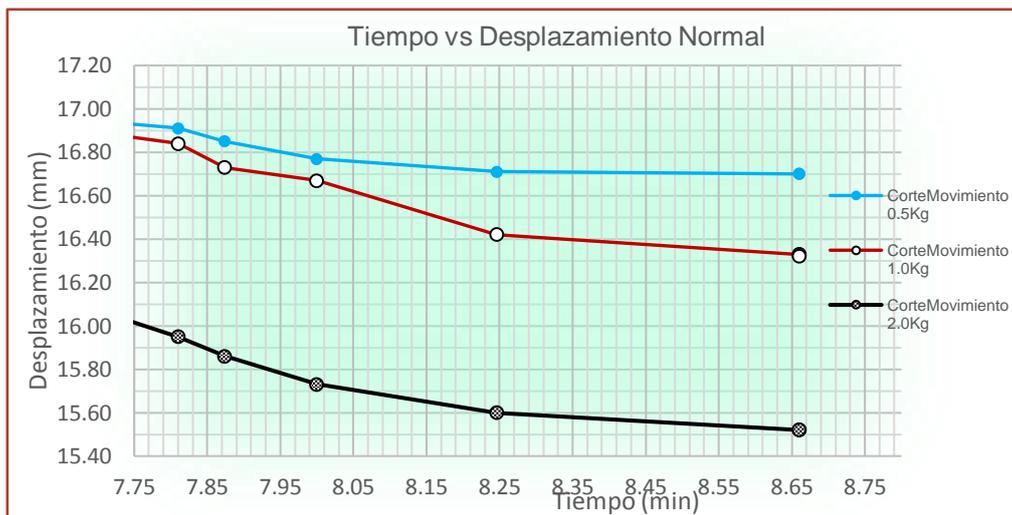
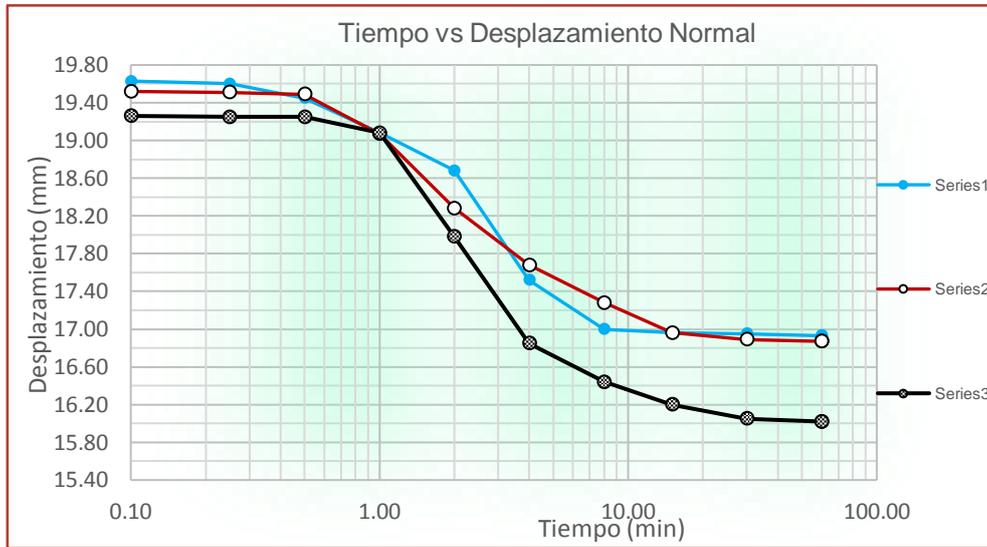
- **GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 5.00% Y P.U = 1.7 gr/cm3):**



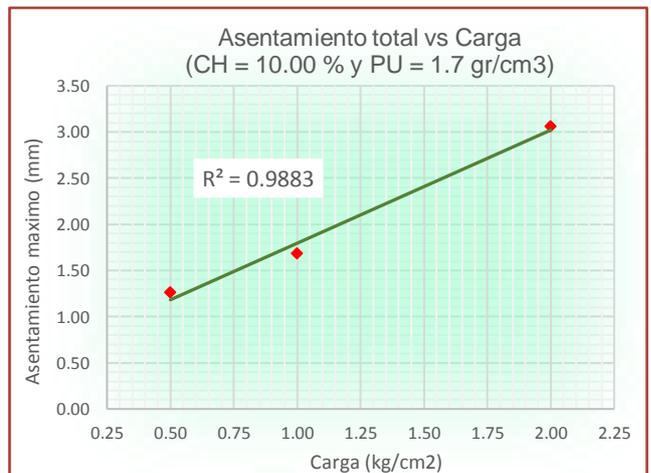
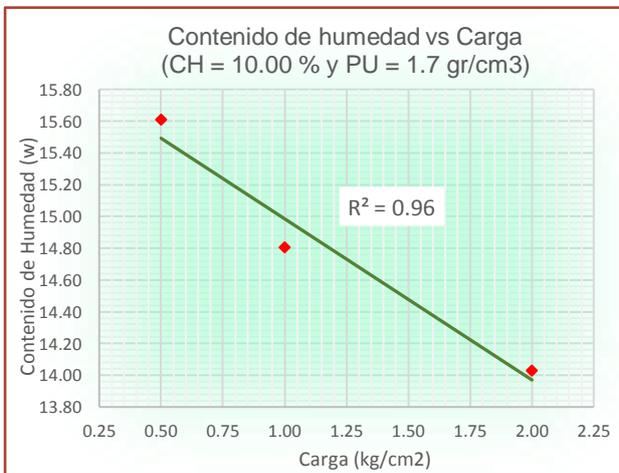
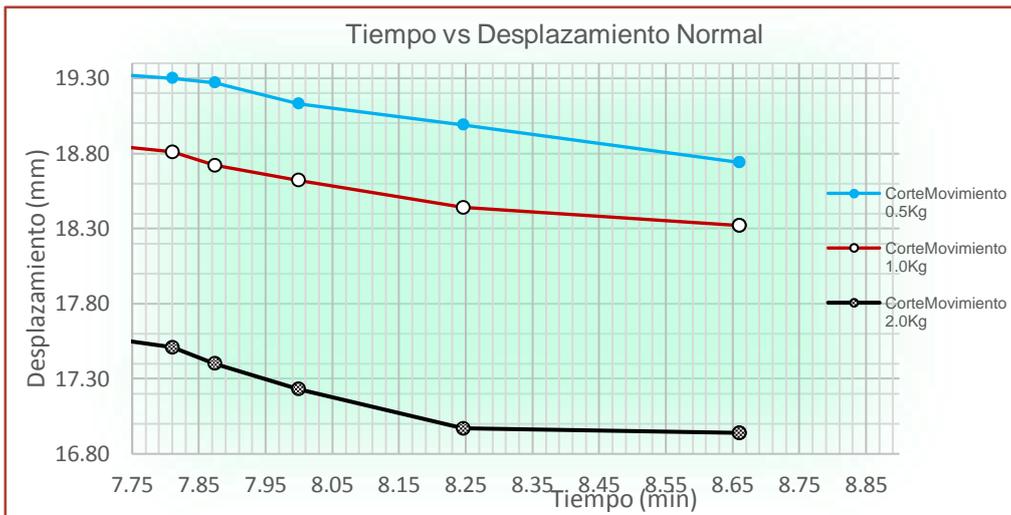
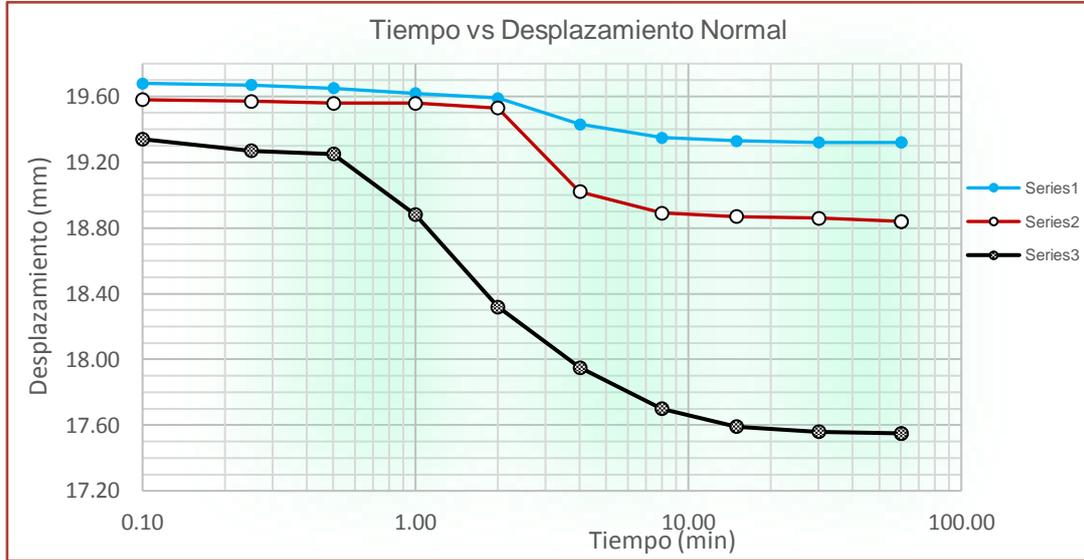
- **GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 5.00% Y P.U = 1.8 gr/cm3):**



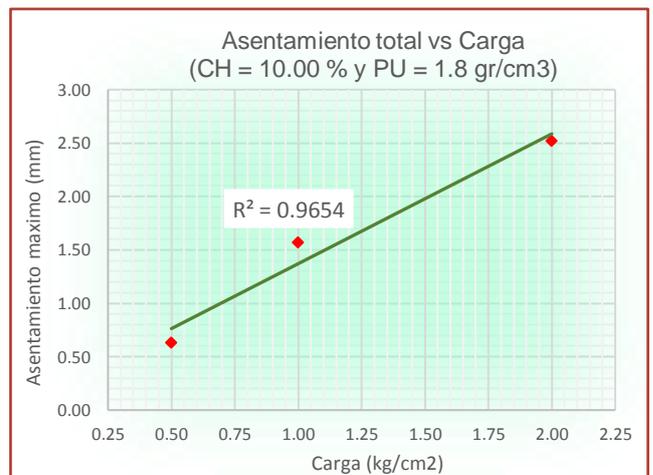
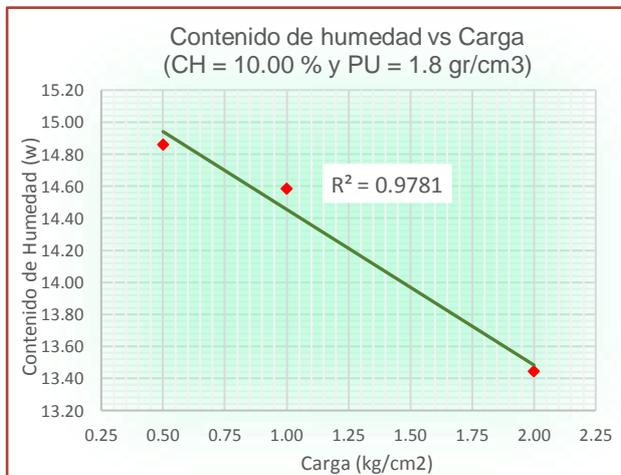
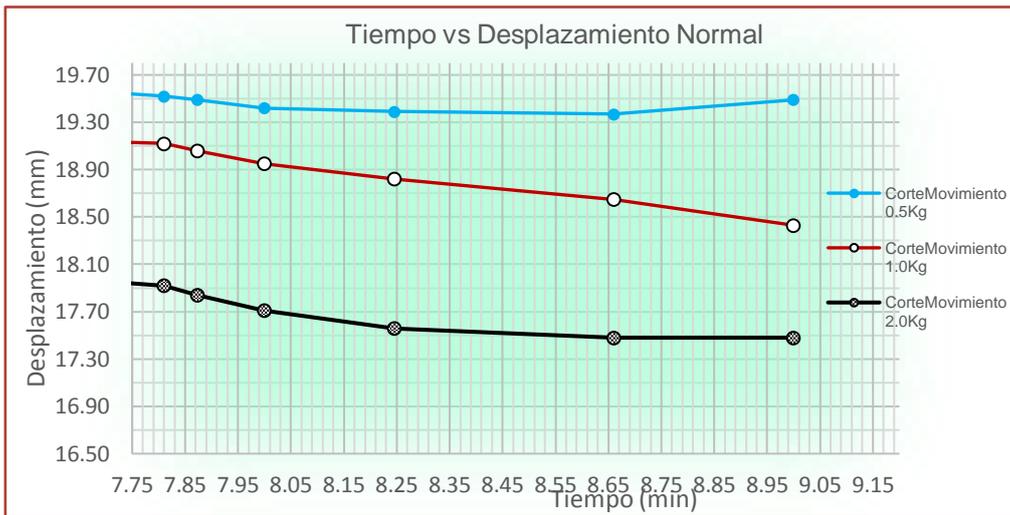
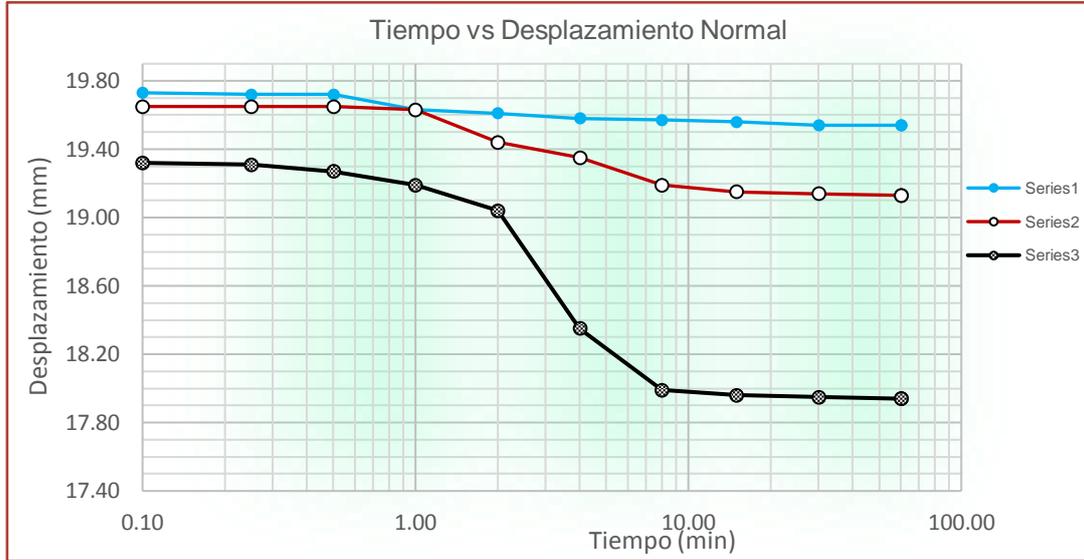
- **GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 10.00% Y P.U = 1.6 gr/cm3):**



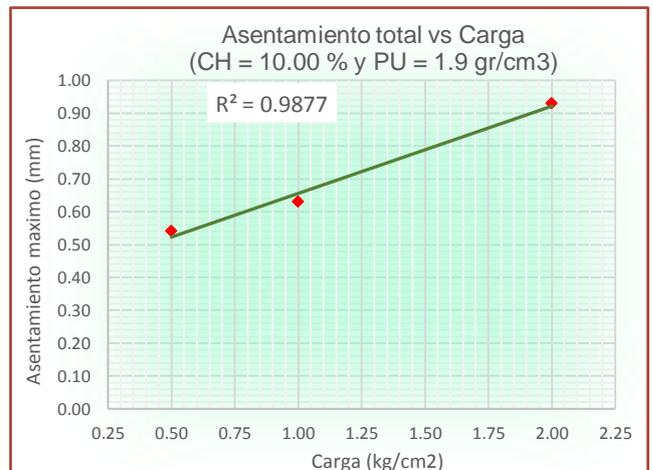
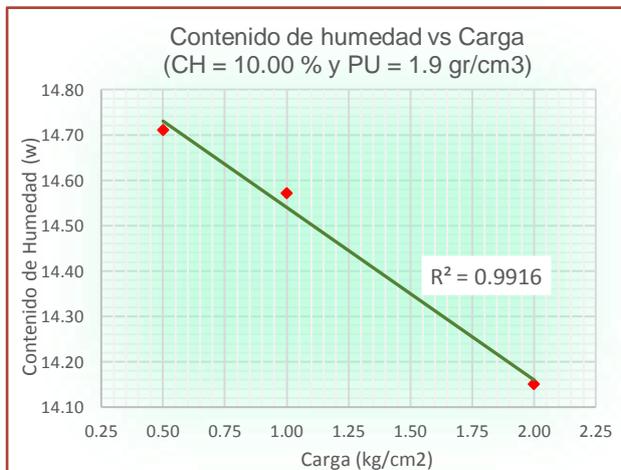
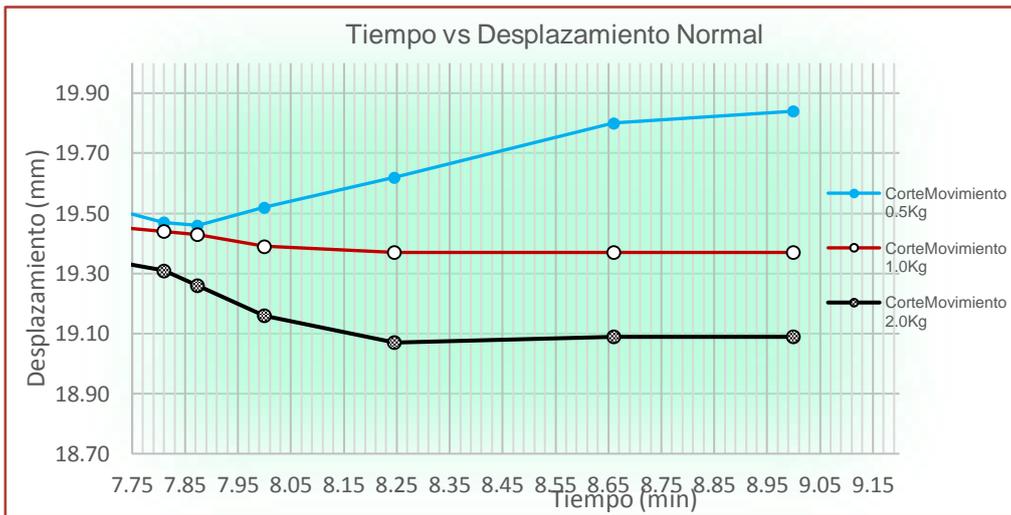
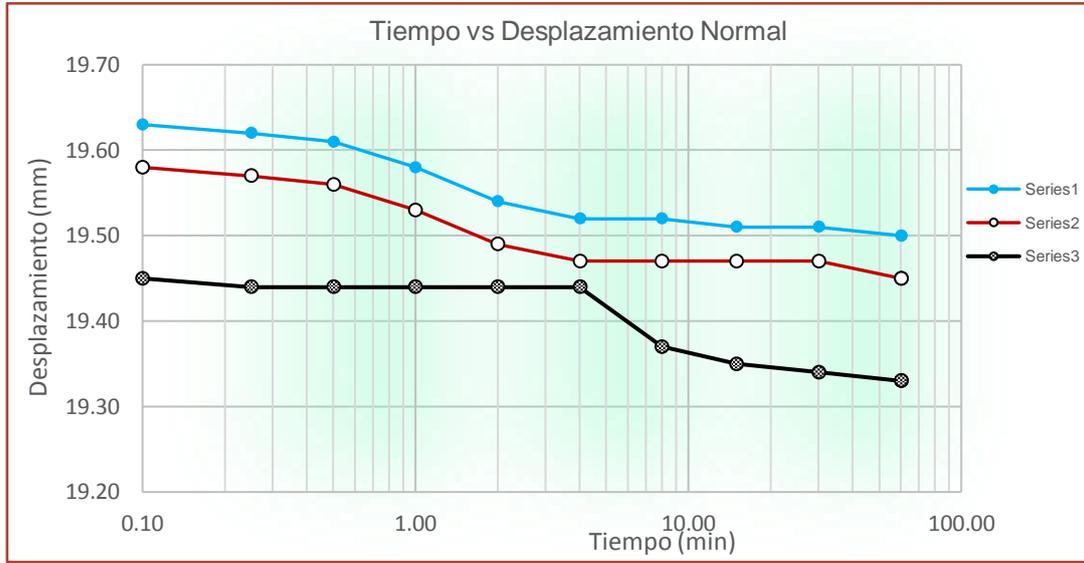
- **GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 10.00% Y P.U = 1.7 gr/cm3):**



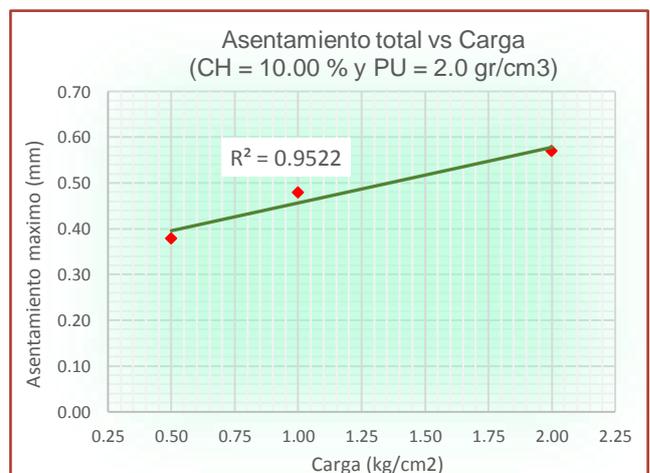
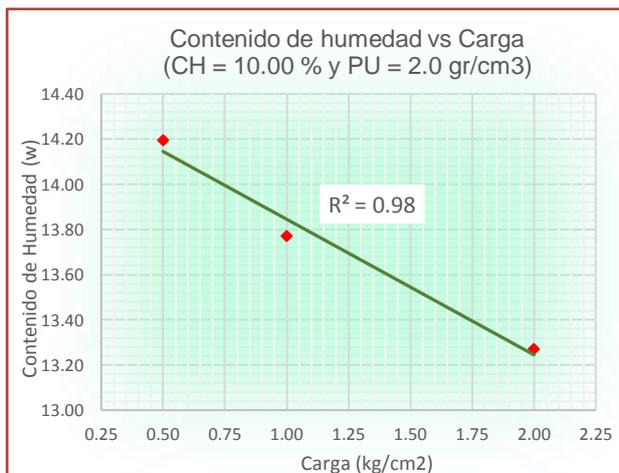
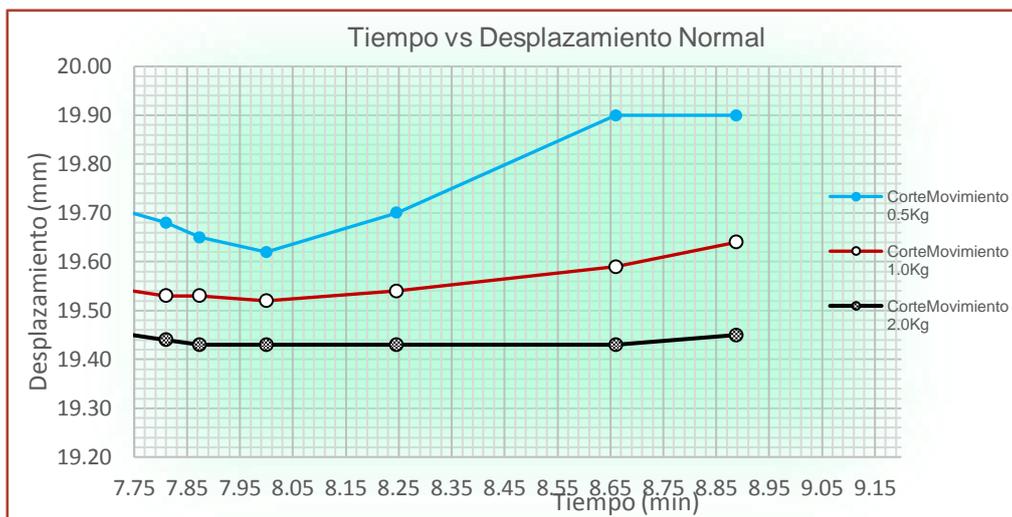
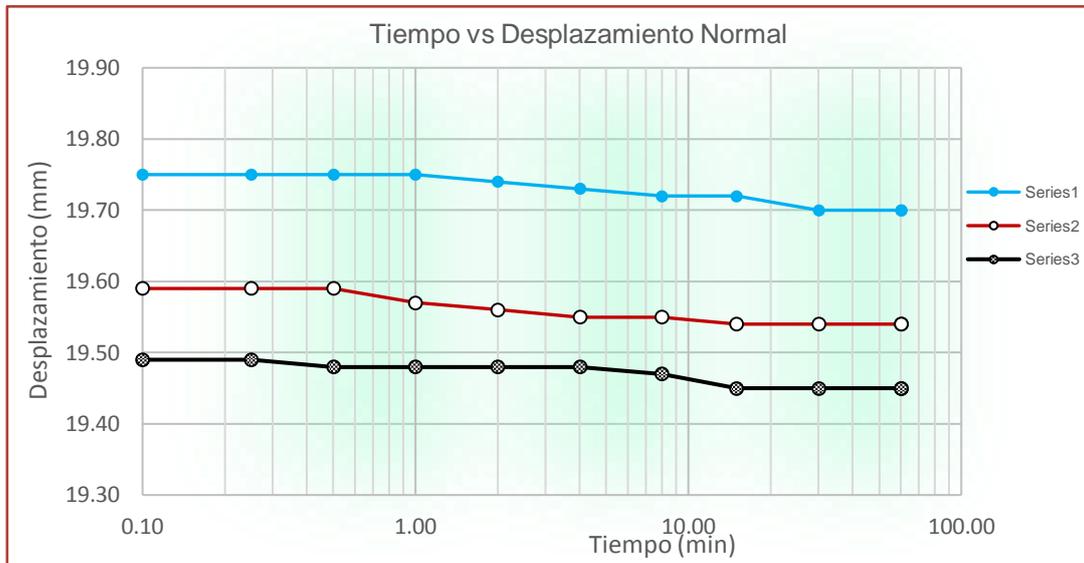
- **GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 10.00% Y P.U = 1.8 gr/cm3):**



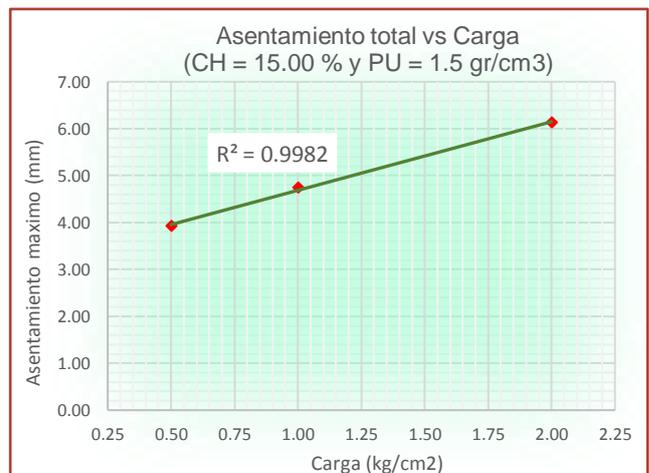
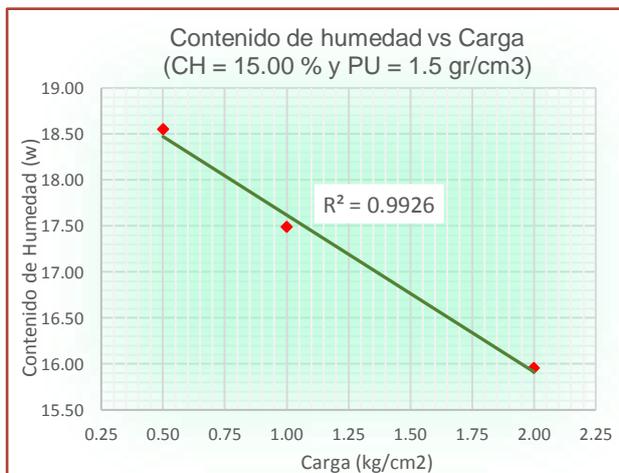
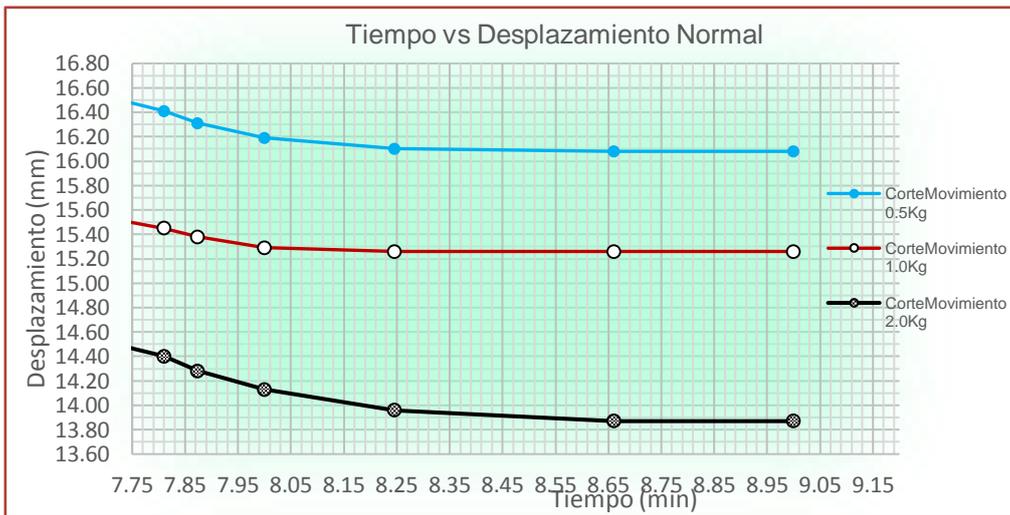
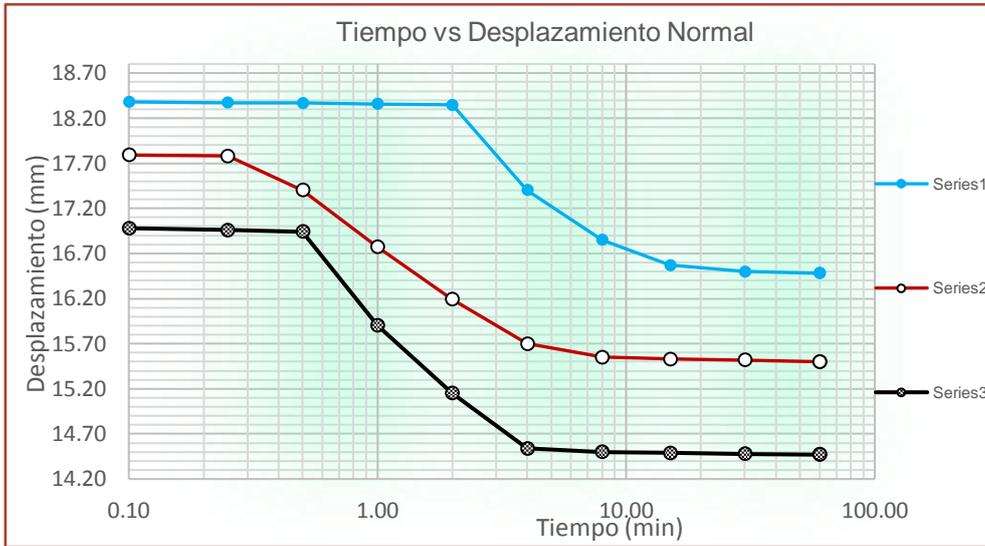
- **GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 10.00% Y P.U = 1.9 gr/cm3):**



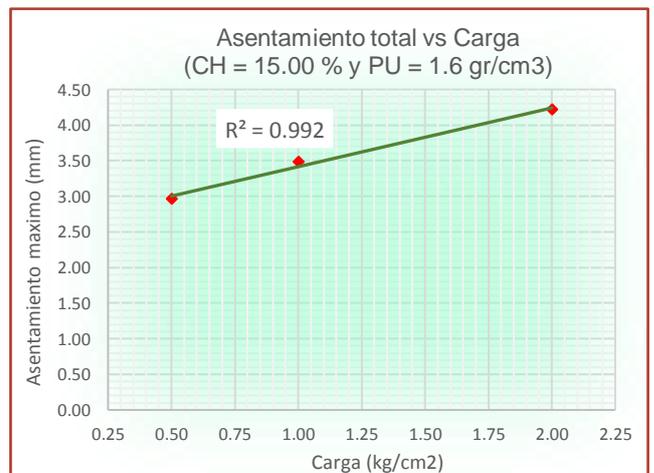
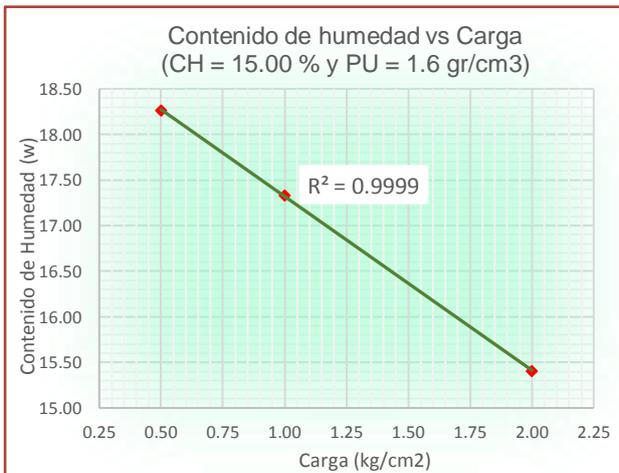
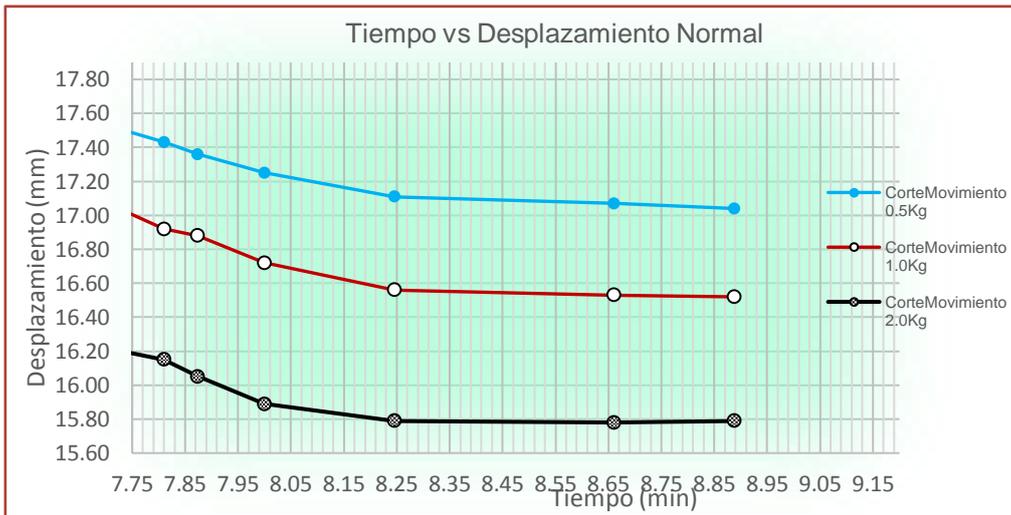
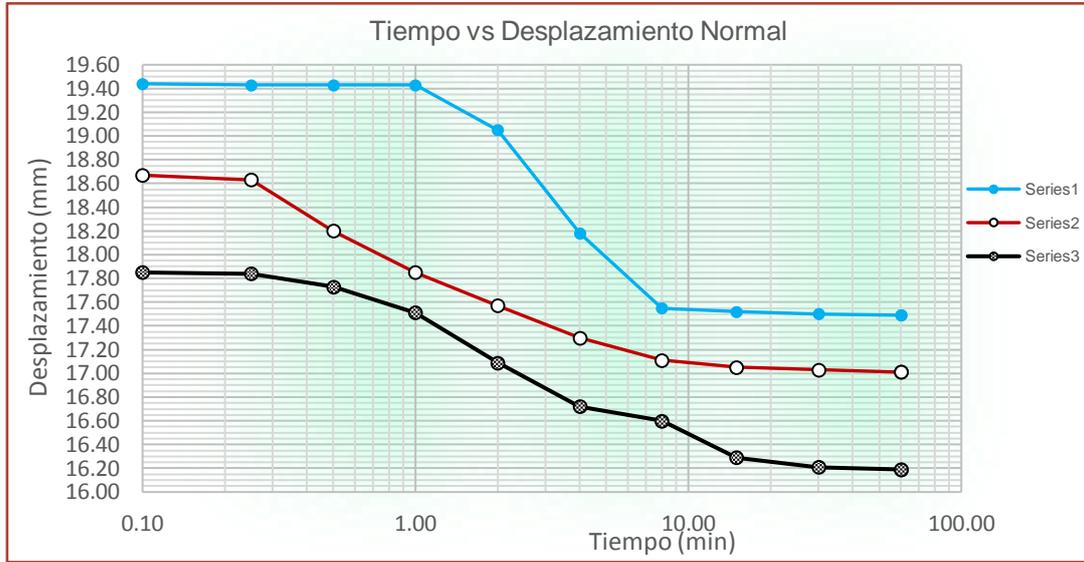
- **GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 10.00% Y P.U = 2.0 gr/cm3):**



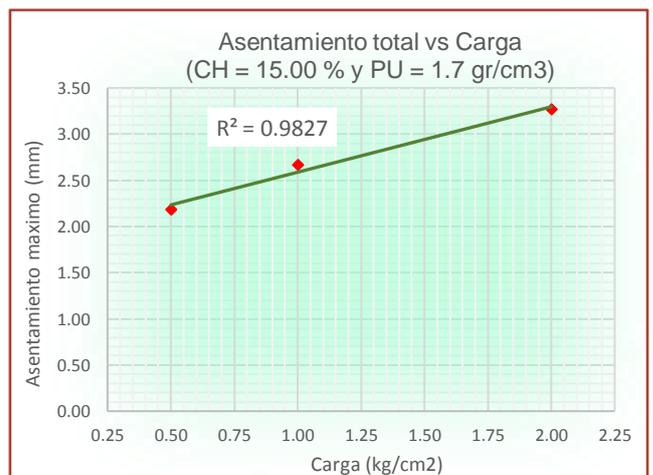
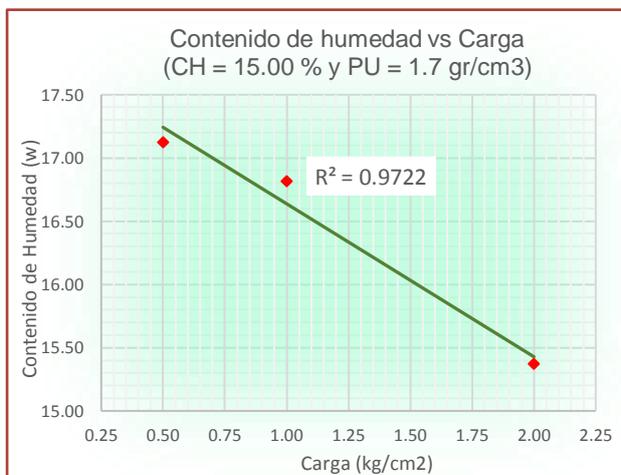
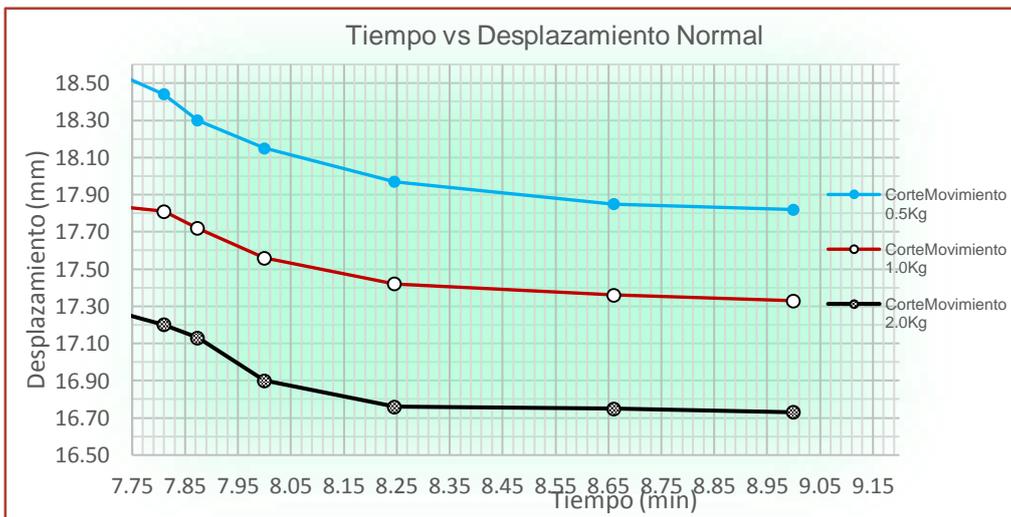
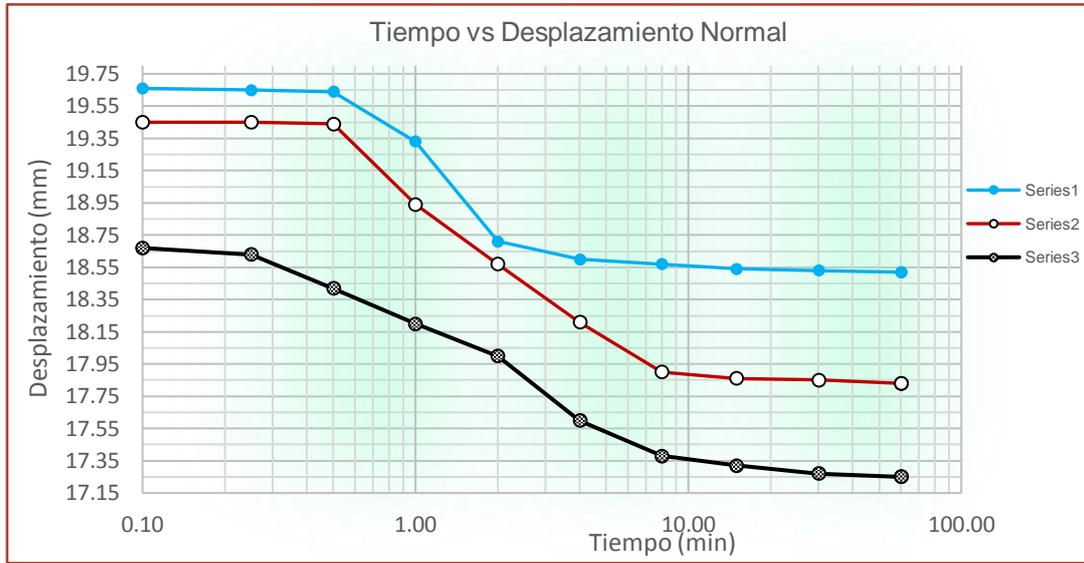
- **GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 15.00% Y P.U = 1.5 gr/cm3):**



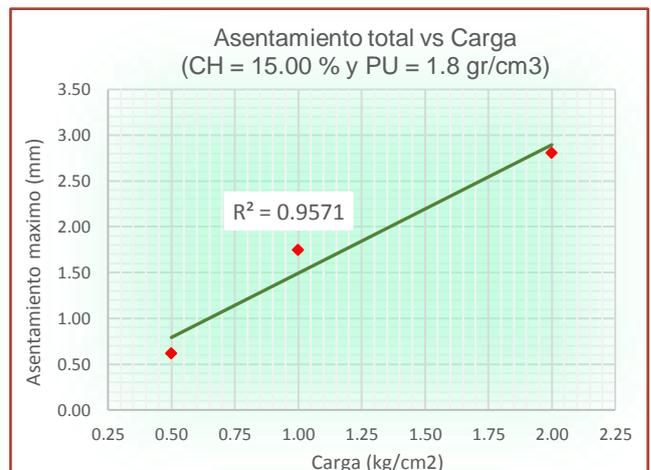
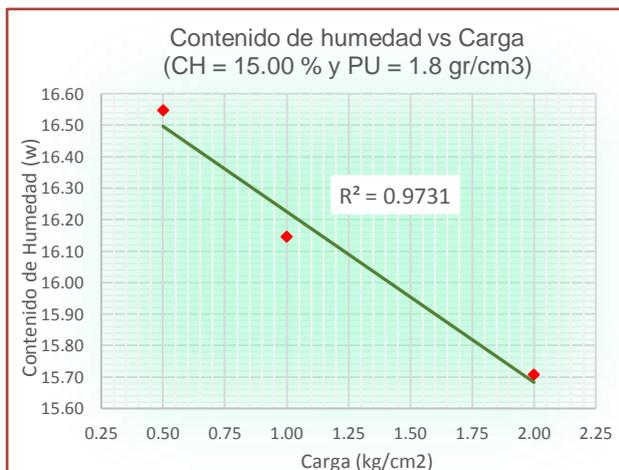
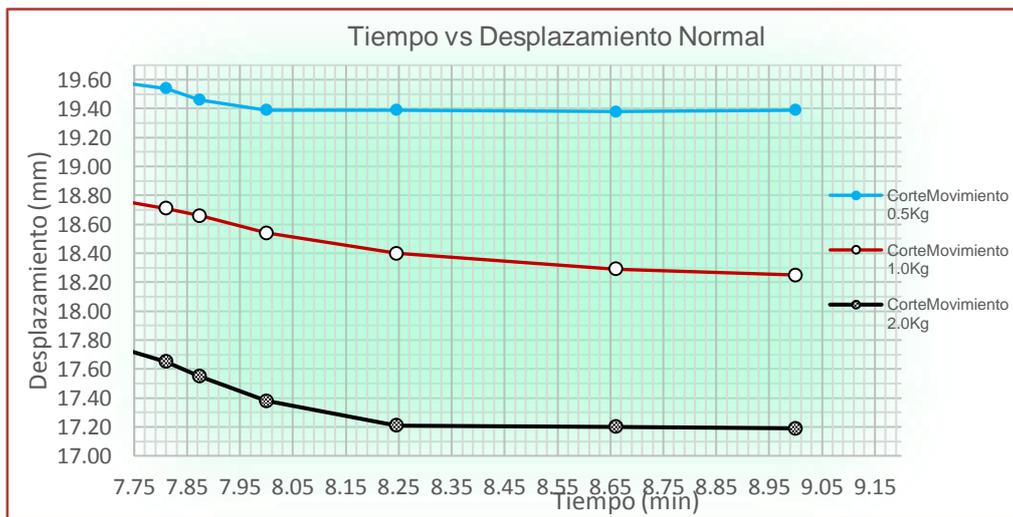
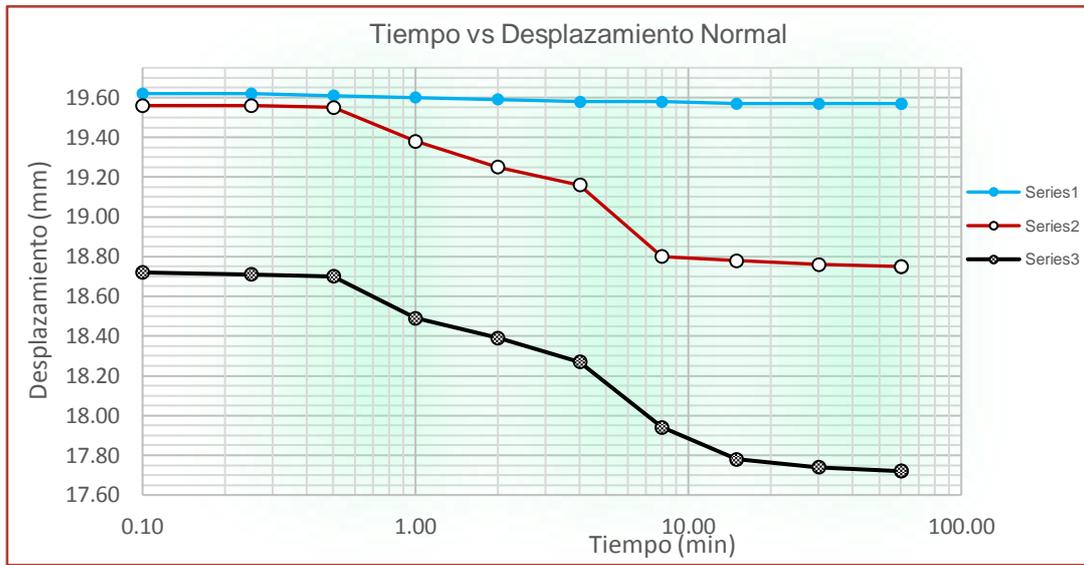
- GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 15.00% Y P.U = 1.6 gr/cm3):**



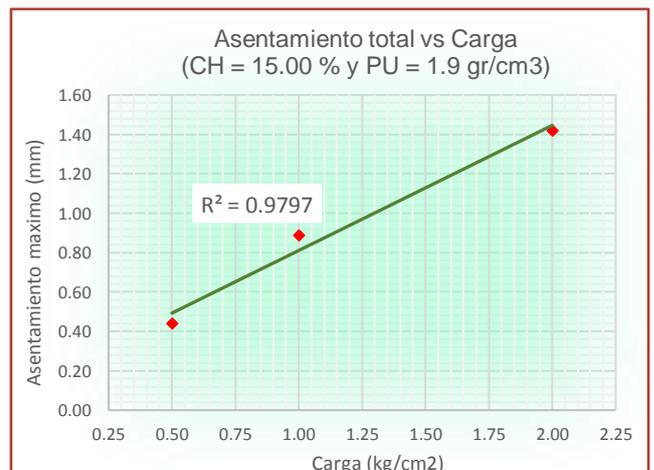
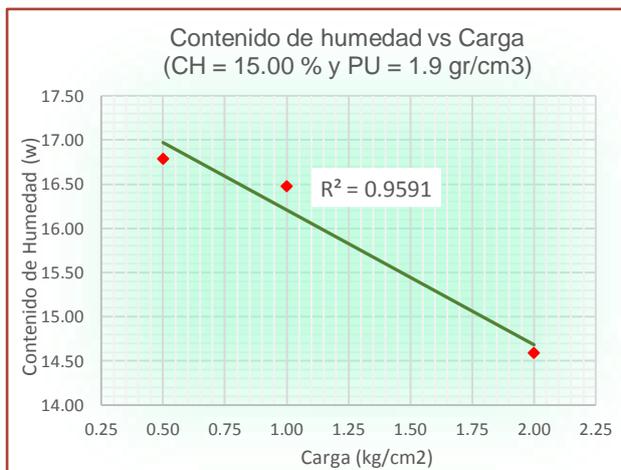
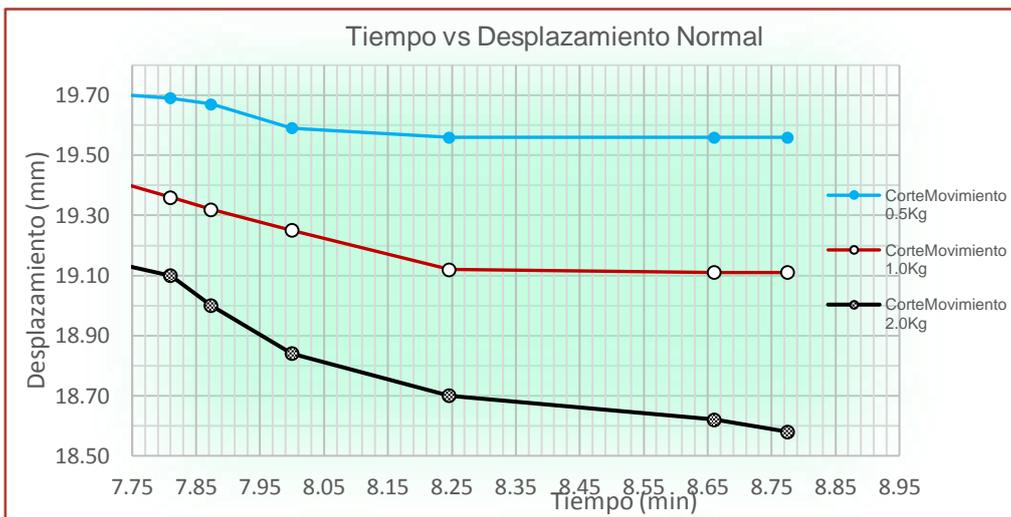
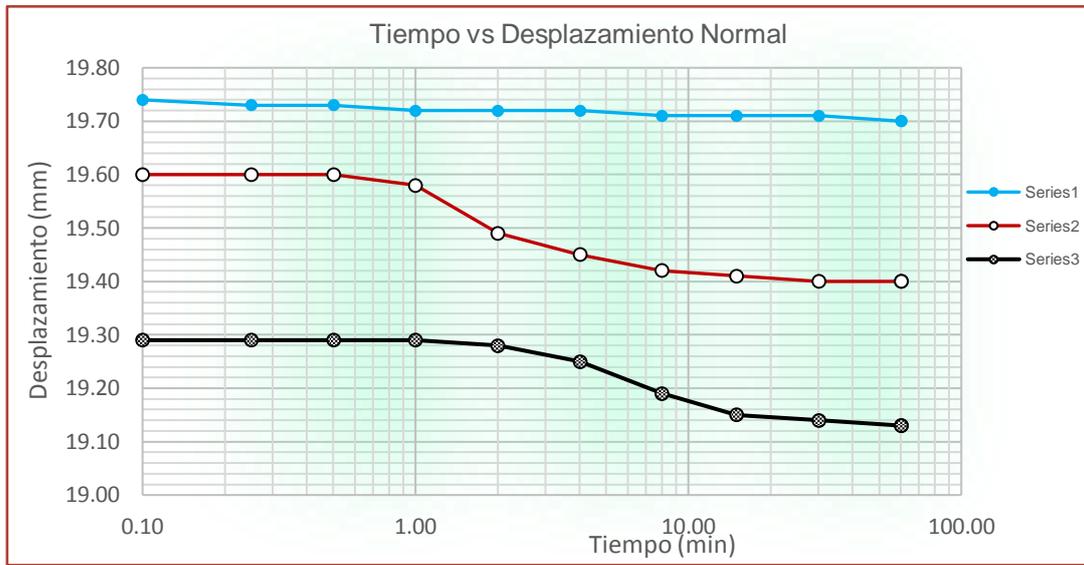
- GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 15.00% Y P.U = 1.7 gr/cm3):**



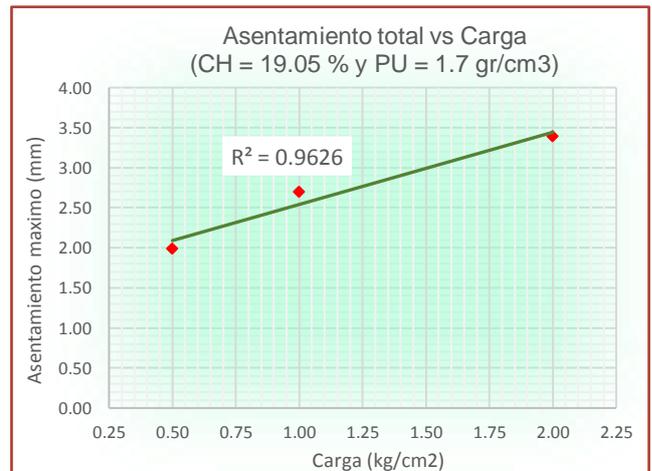
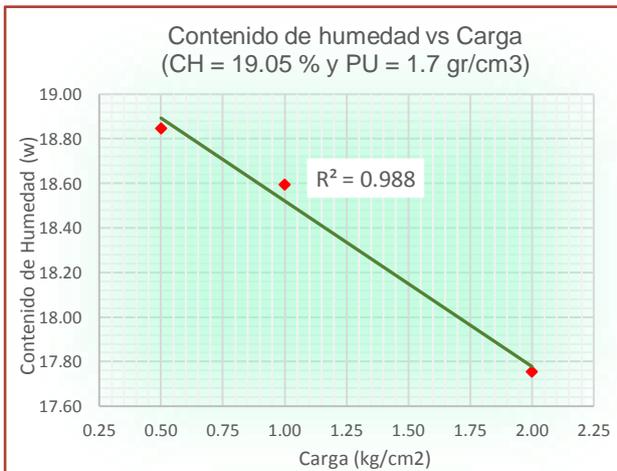
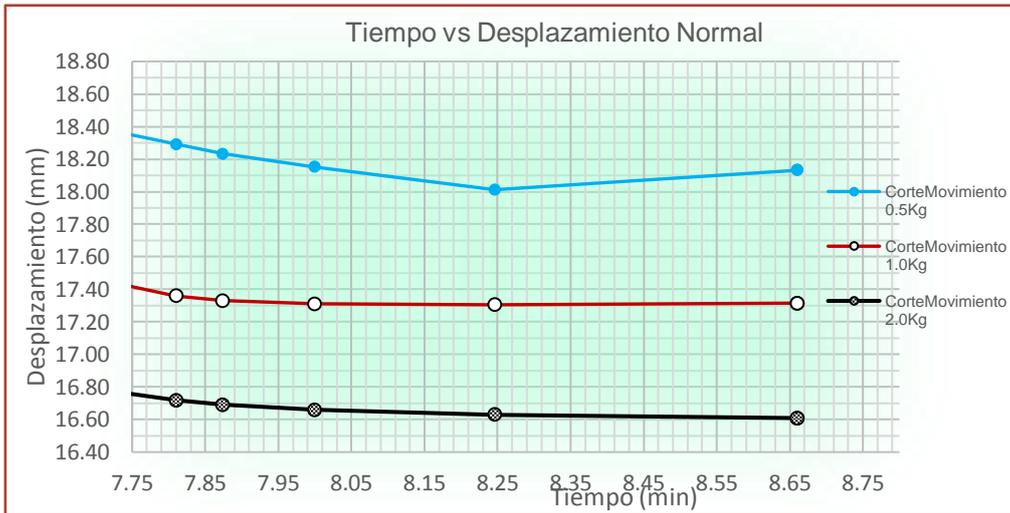
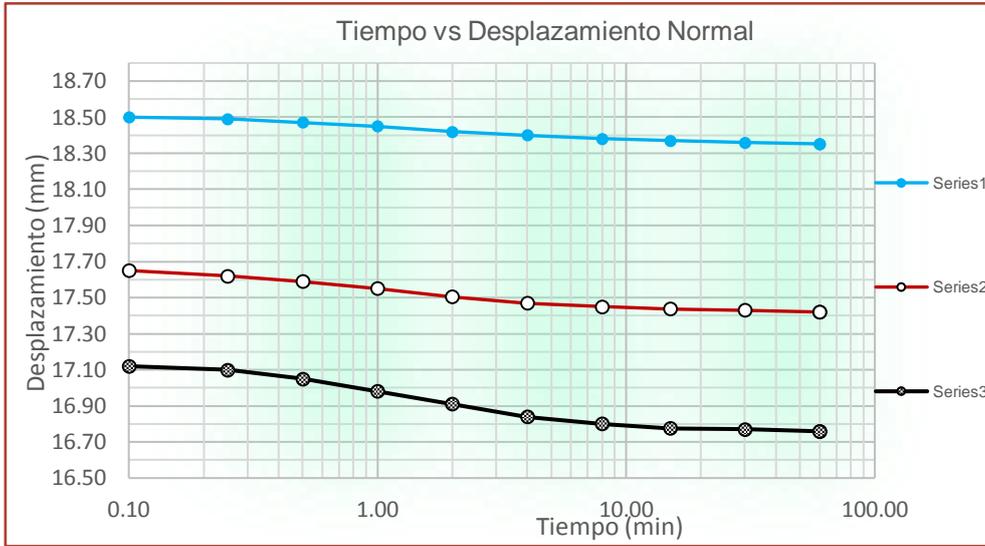
- **GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 15.00% Y P.U = 1.8 gr/cm3):**



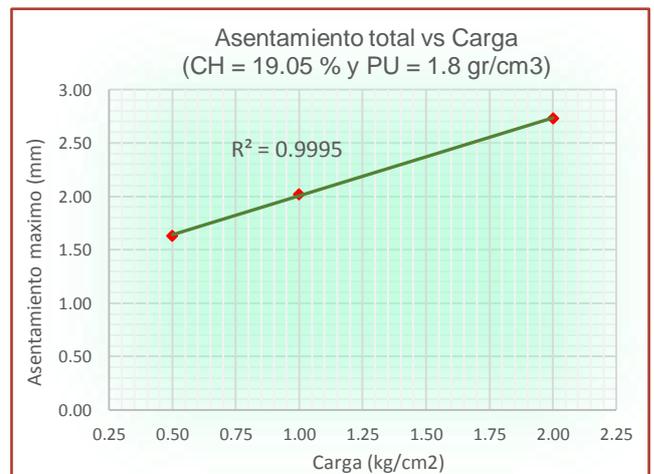
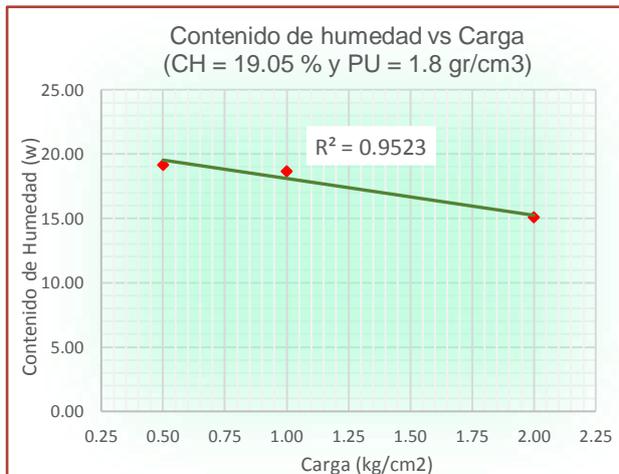
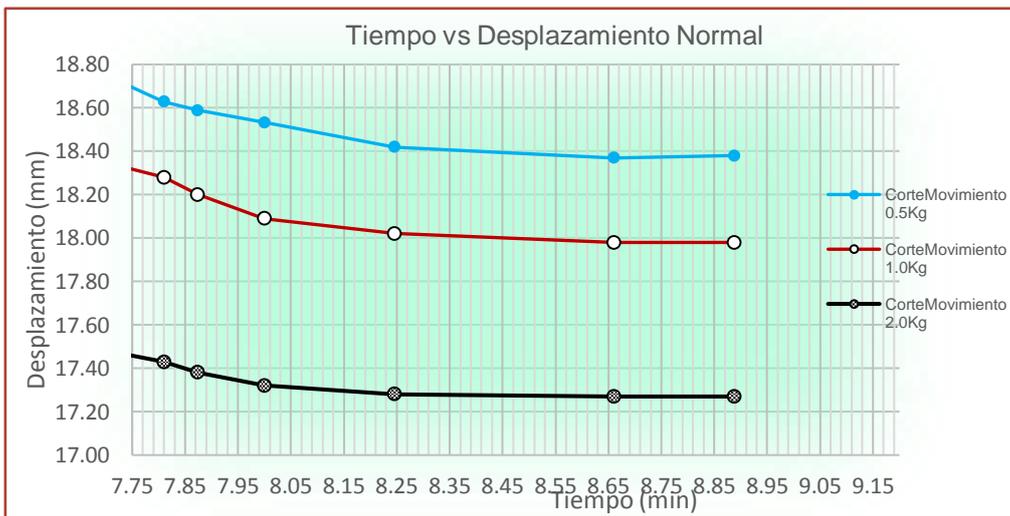
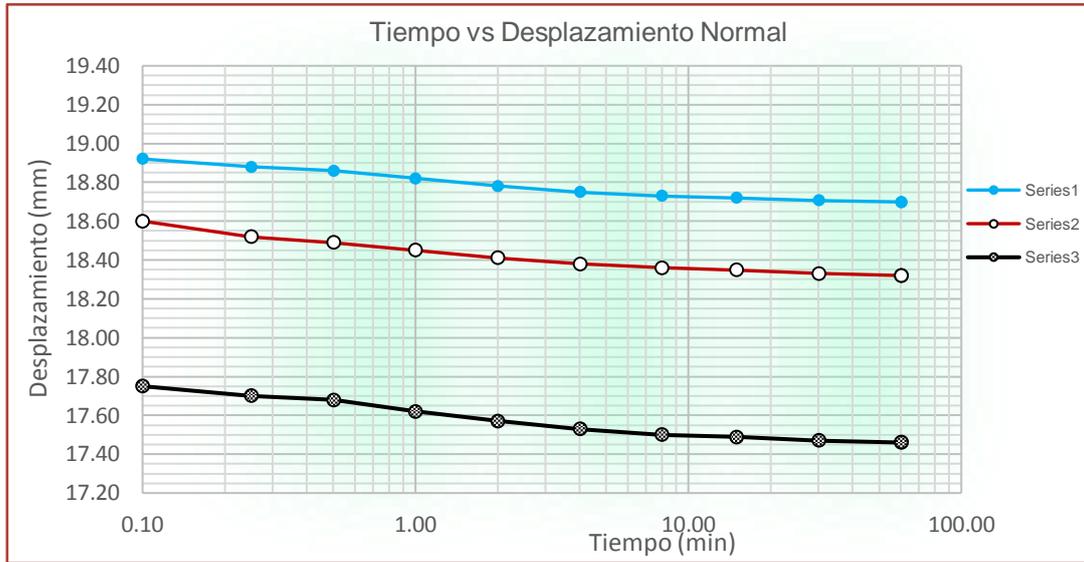
- **GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 15.00% Y P.U = 1.9 gr/cm3):**



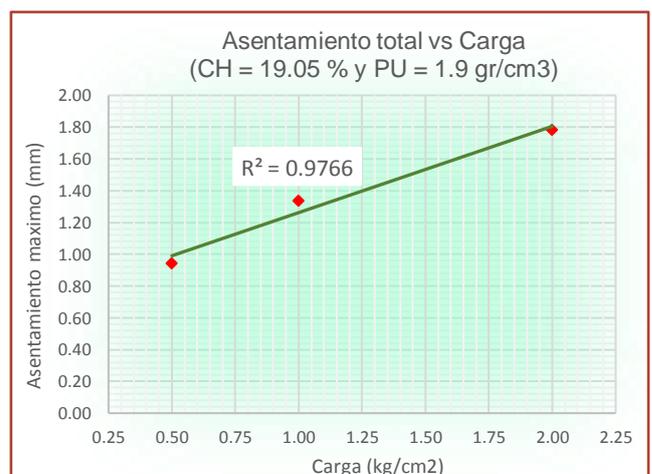
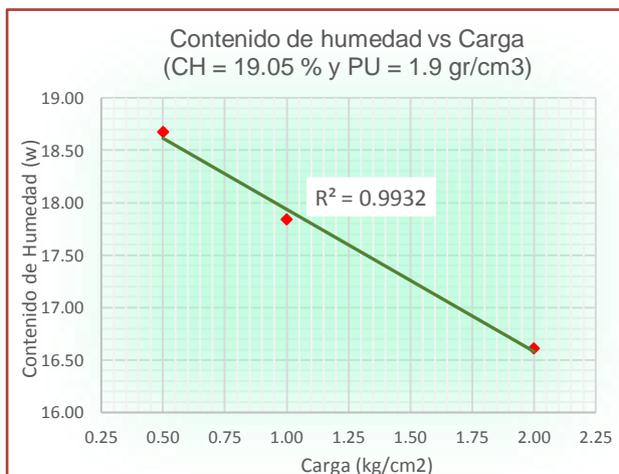
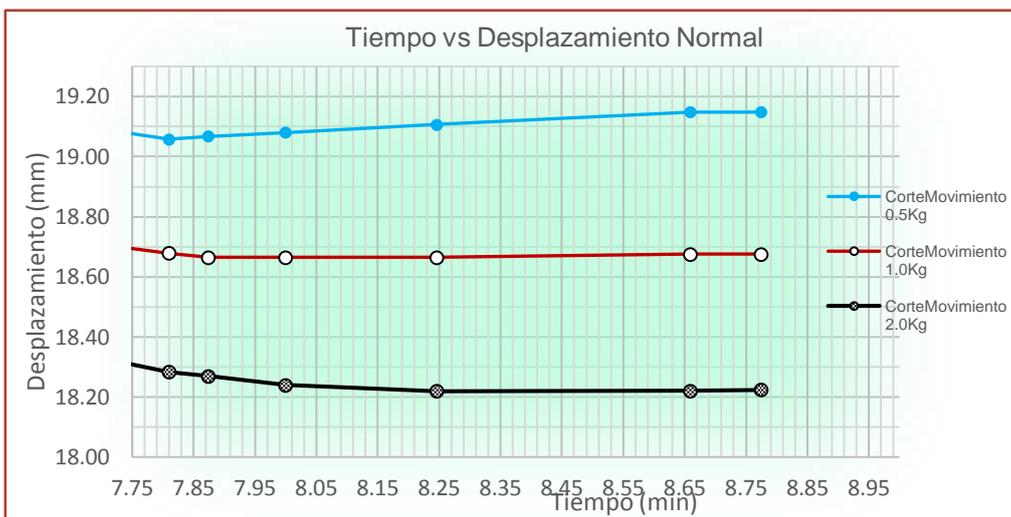
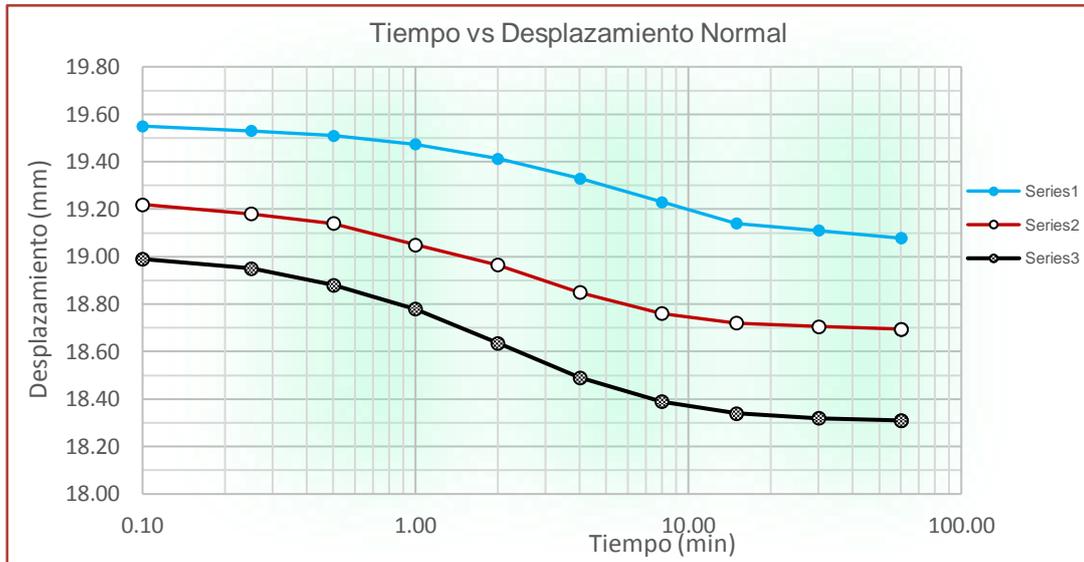
- GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 19.05% Y P.U = 1.7 gr/cm3):**



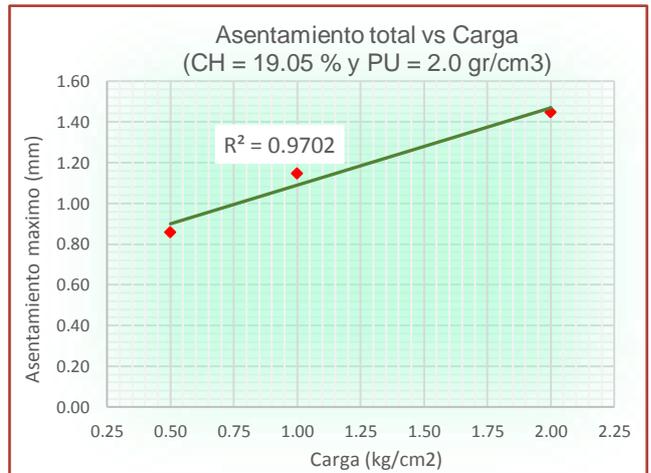
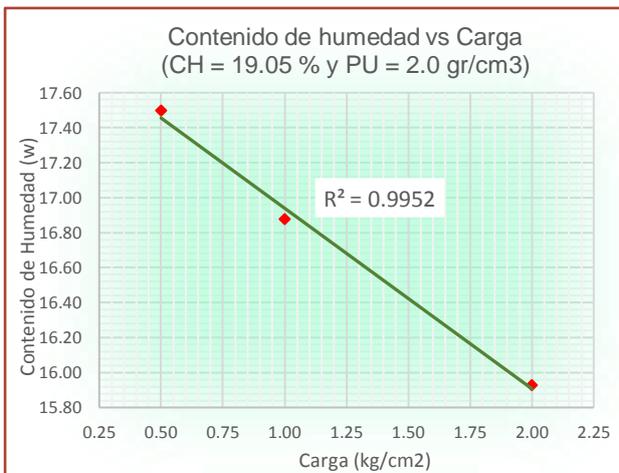
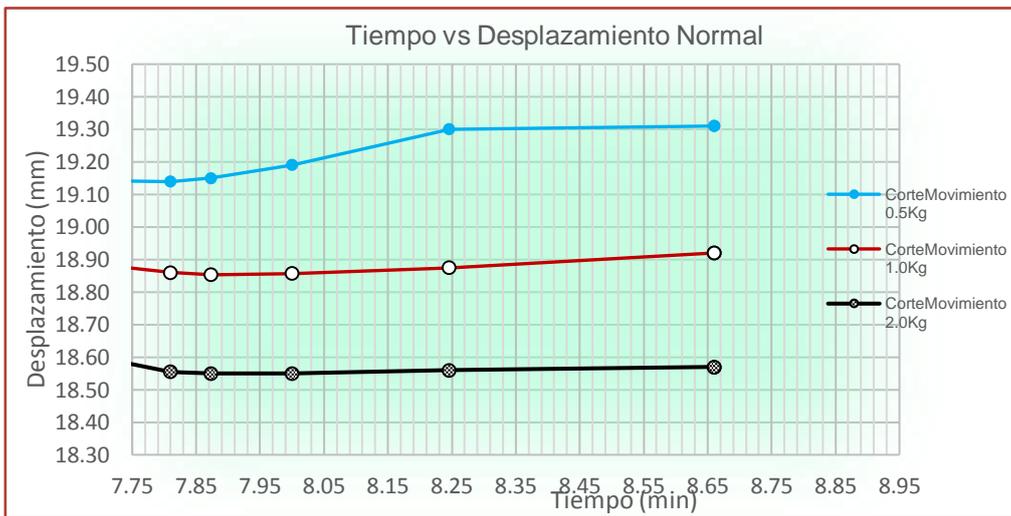
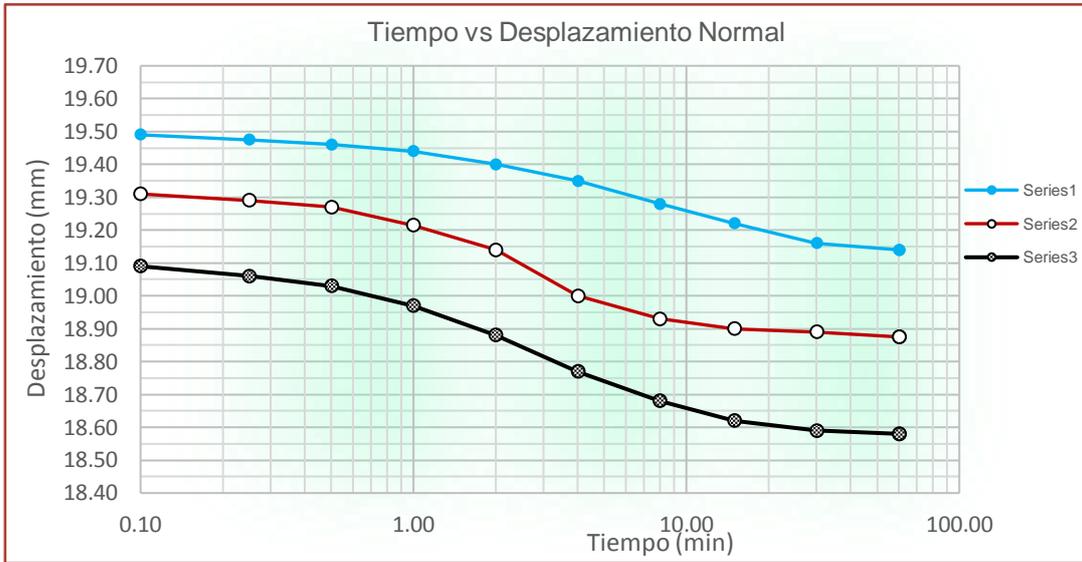
- GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 19.05% Y P.U = 1.8 gr/cm3):**



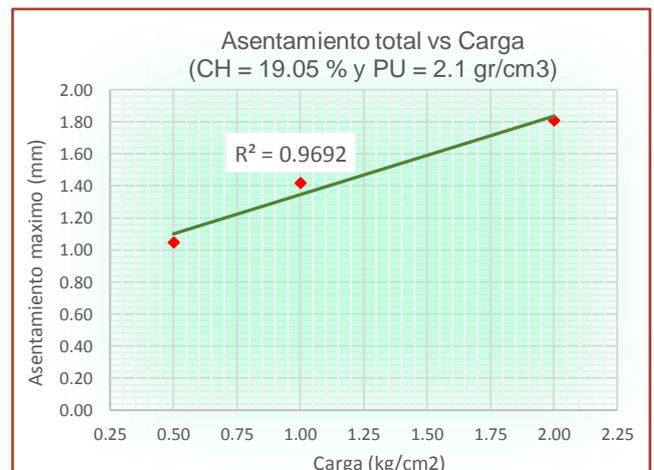
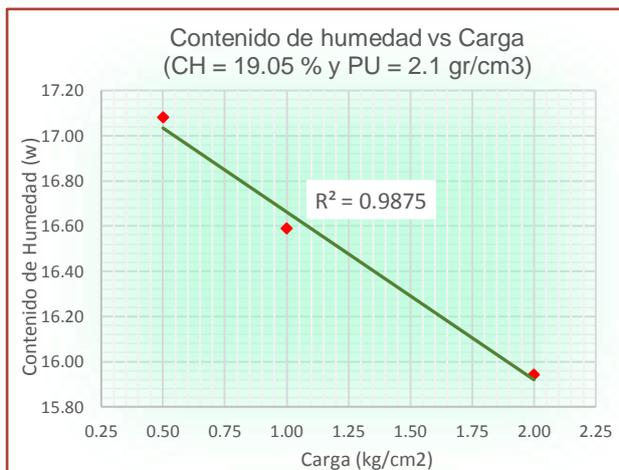
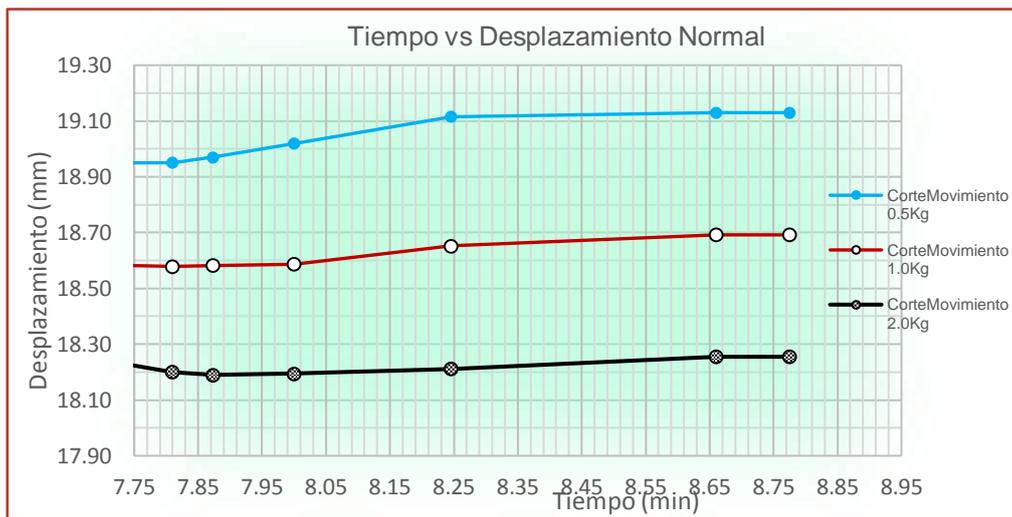
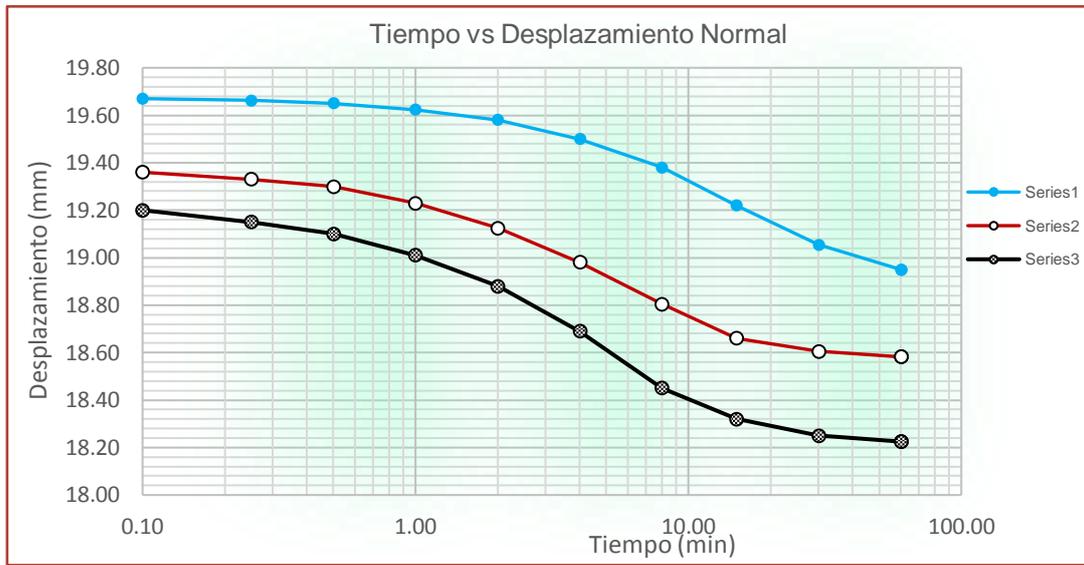
- **GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 19.05% Y P.U = 1.9 gr/cm3):**



- GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 19.05% Y P.U = 2.0 gr/cm3):**



- **GRAFICAS: TIEMPO VS DESPLAZAMIENTO NORMAL, CONTENIDO DE HUMEDAD VS CARGA Y ASENTAMIENTO TOTAL VS CARGA (PARA UN C.H AL 19.05% Y P.U = 2.1 gr/cm3):**

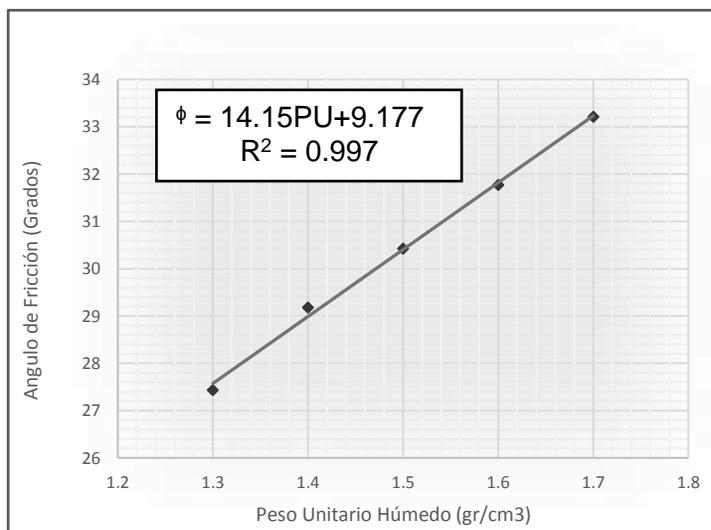


**CORRELACIÓN: DENSIDAD VS ANGULO DE FRICCIÓN, DENSIDAD VS COHESIÓN  
PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD IGUAL A 0.00%  
(TESIS)**

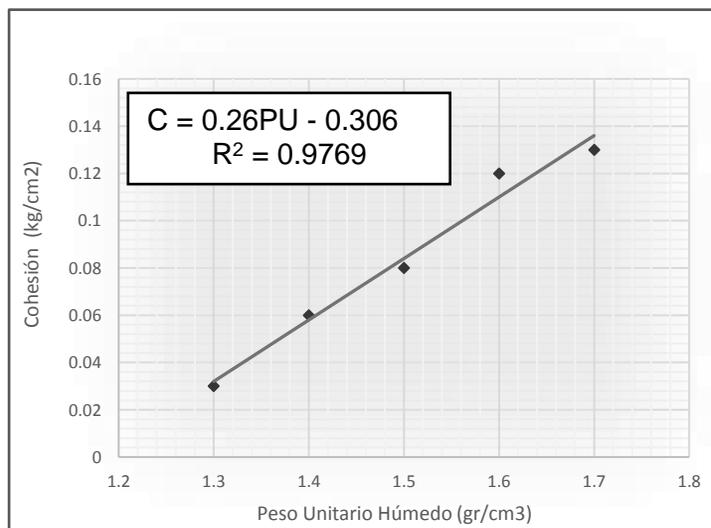
Solicitud N° S-004-2018

Proyecto	: Correlacion para determinar los parametros de resistencia al cortante haciendo variar la densidad y humedad de la muestra	
Solicita	: Vargas Rimac Jimmy Alex	Fecha : Enero 2018
Lugar	: Jr. San Martin entre Teofilo Castillo - Huaraz	Muestreado por : J.V.R
Calicata	: C-2	Muestra: mab-1      Profundidad : 1.40 - 3.00 m.

Peso Unitario húmedo (gr/cm3)	Angulo de Fricción (Grados)
1.3	27.43
1.4	29.18
1.5	30.42
1.6	31.77
1.7	33.21



Peso Unitario húmedo (gr/cm3)	Cohesión (Kg/cm2)
1.3	0.03
1.4	0.06
1.5	0.08
1.6	0.12
1.7	0.13

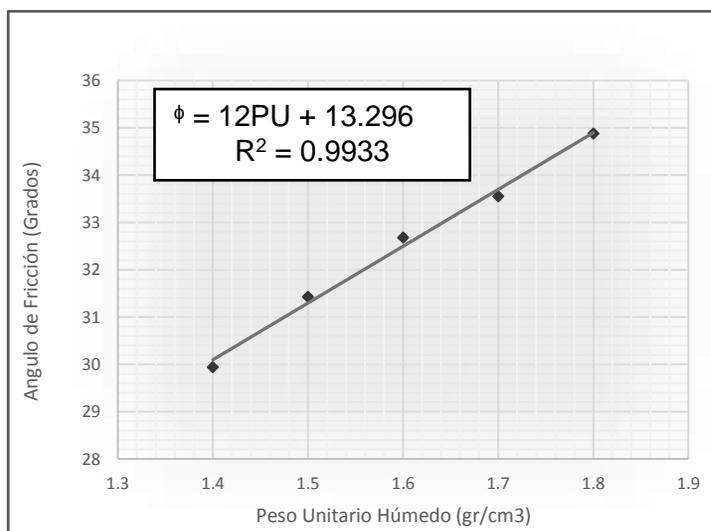


**CORRELACIÓN: DENSIDAD VS ANGULO DE FRICCIÓN, DENSIDAD VS COHESIÓN  
PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD IGUAL A 5.00%  
(TESIS)**

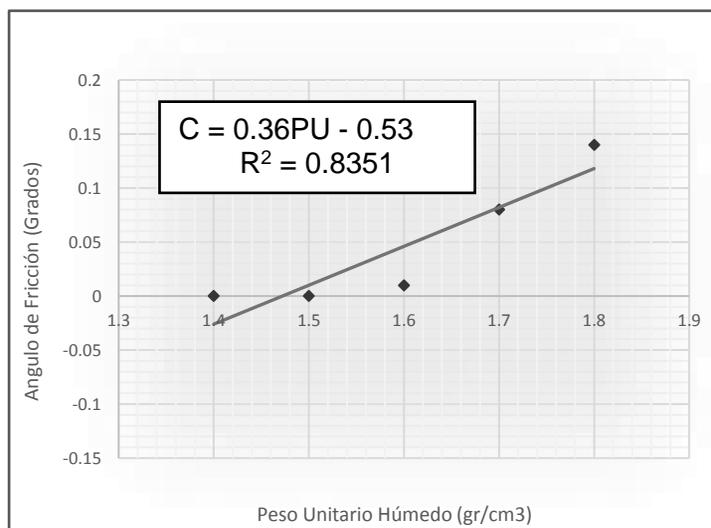
Solicitud N° **S-004-2018**

Proyecto	: Correlacion para determinar los parametros de resistencia al cortante haciendo variar la densidad y humedad de la muestra		
Solicita	: Vargas Rimac Jimmy Alex	Fecha	: Enero 2018
Lugar	: Jr. San Martin entre Teofilo Castillo - Huaraz	Muestreado por	: J.V.R
Calicata	: C-2	Muestra:	mab-1 Profundidad : 1.40 - 3.00 m.

Peso Unitario húmedo (gr/cm3)	Angulo de Fricción (Grados)
1.4	29.94
1.5	31.43
1.6	32.68
1.7	33.55
1.8	34.88



Peso Unitario húmedo (gr/cm3)	Cohesión (Kg/cm2)
1.4	0
1.5	0
1.6	0.01
1.7	0.08
1.8	0.14

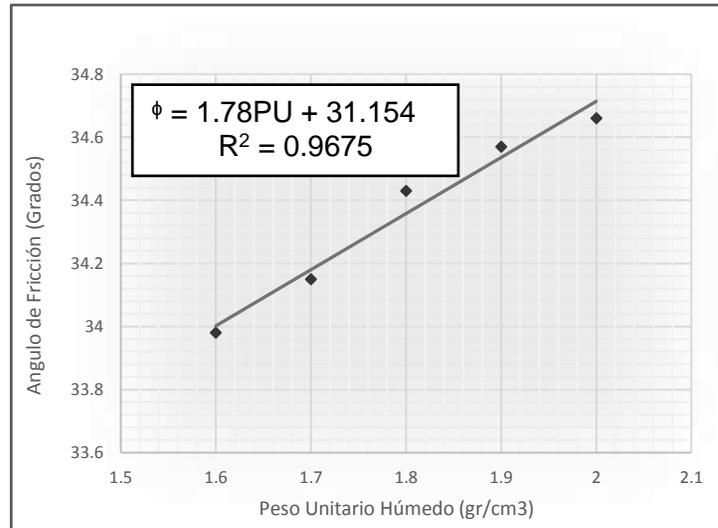


**CORRELACIÓN: DENSIDAD VS ANGULO DE FRICCIÓN, DENSIDAD VS COHESIÓN  
PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD IGUAL A 10.00%  
(TESIS)**

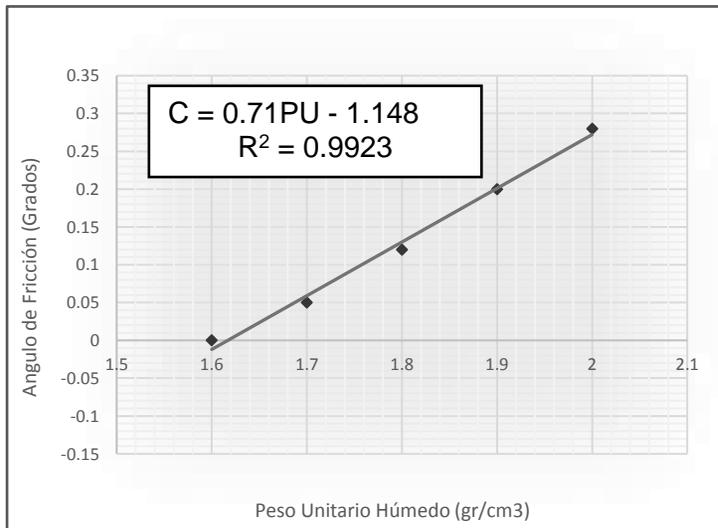
Solicitud N° S-004-2018

Proyecto	: Correlacion para determinar los parametros de resistencia al cortante haciendo variar la densidad y humedad de la muestra		
Solicita	: Vargas Rimac Jimy Alex	Fecha	: Enero 2018
Lugar	: Jr. San Martin entre Teofilo Castillo - Huaraz	Muestreado por	: J.V.R
Calicata	: C-1	Muestra:	mab-1
		Profundidad	: 2.00 - 3.10 m.

Peso Unitario húmedo (gr/cm3)	Angulo de Fricción (Grados)
1.6	33.98
1.7	34.15
1.8	34.43
1.9	34.57
2.0	34.66



Peso Unitario húmedo (gr/cm3)	Cohesión (Kg/cm2)
1.6	0
1.7	0.05
1.8	0.12
1.9	0.20
2.0	0.28

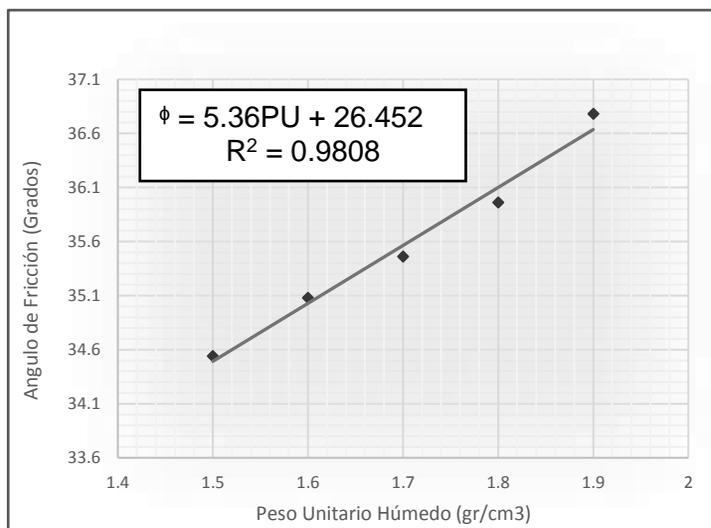


**CORRELACIÓN: DENSIDAD VS ANGULO DE FRICCIÓN, DENSIDAD VS COHESIÓN  
PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD IGUAL A 15.00%  
(TESIS)**

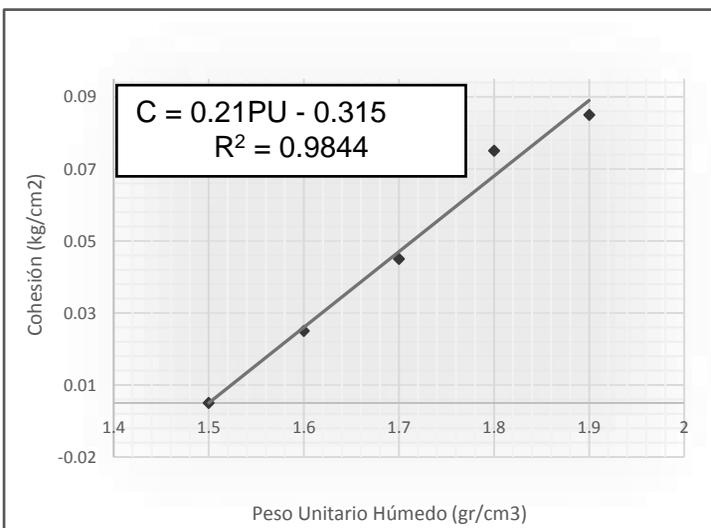
Solicitud N° S-004-2018

Proyecto	: Correlacion para determinar los parametros de resistencia al cortante haciendo variar la densidad y humedad de la muestra	
Solicita	: Vargas Rimac Jimy Alex	Fecha : Enero 2018
Lugar	: Jr. San Martin entre Teofilo Castillo - Huaraz	Muestreado por : J.V.R
Calicata	: C-2	Muestra: mab-1      Profundidad : 1.40 - 3.00 m.

Peso Unitario húmedo (gr/cm3)	Angulo de Fricción (Grados)
1.5	34.54
1.6	35.08
1.7	35.46
1.8	35.96
1.9	36.78



Peso Unitario húmedo (gr/cm3)	Cohesión (Kg/cm2)
1.5	0.00
1.6	0.02
1.7	0.04
1.8	0.07
1.9	0.08

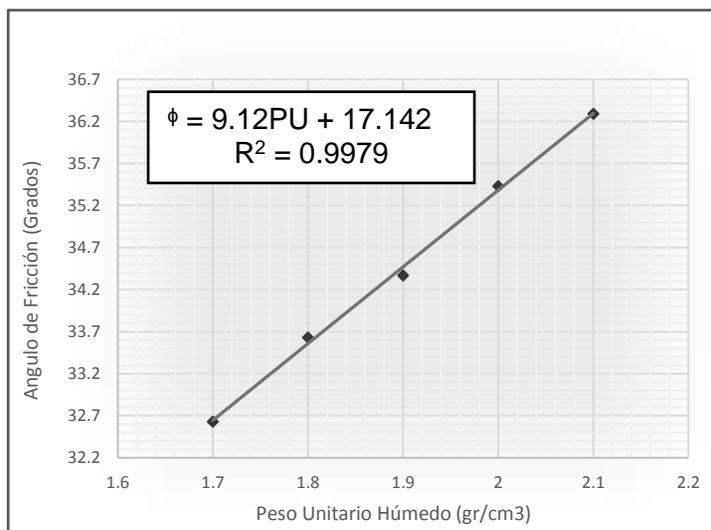


**CORRELACIÓN: DENSIDAD VS ANGULO DE FRICCIÓN, DENSIDAD VS COHESIÓN  
PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD IGUAL A 19.05%  
(TESIS)**

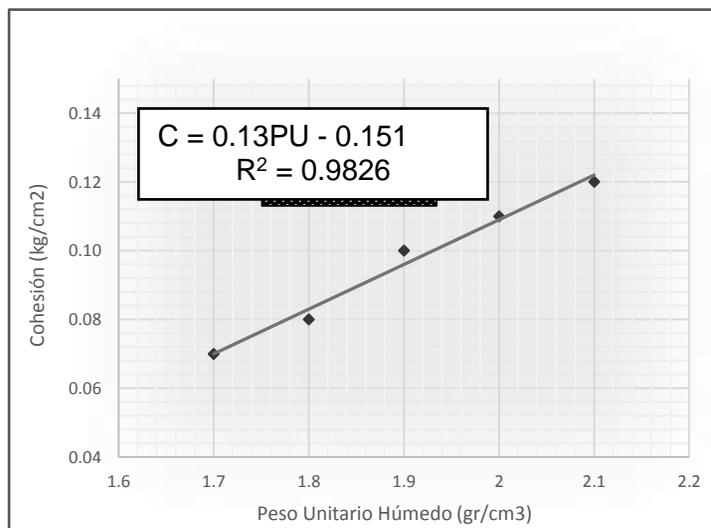
Solicitud N° **S-004-2018**

Proyecto	: Correlacion para determinar los parametros de resistencia al cortante haciendo variar la densidad y humedad de la muestra		
Solicita	: Vargas Rimac Jimy Alex	Fecha	: Enero 2018
Lugar	: Jr. San Martin entre Teofilo Castillo - Huaraz	Muestreado por	: J.V.R
Calicata	: C-2	Muestra:	mab-1 Profundidad : 1.40 - 3.00 m.

Peso Unitario húmedo (gr/cm3)	Angulo de Fricción (Grados)
1.7	32.63
1.8	33.63
1.9	34.37
2.0	35.43
2.1	36.29



Peso Unitario húmedo (gr/cm3)	Cohesión (Kg/cm2)
1.7	0.07
1.8	0.08
1.9	0.10
2.0	0.11
2.1	0.12

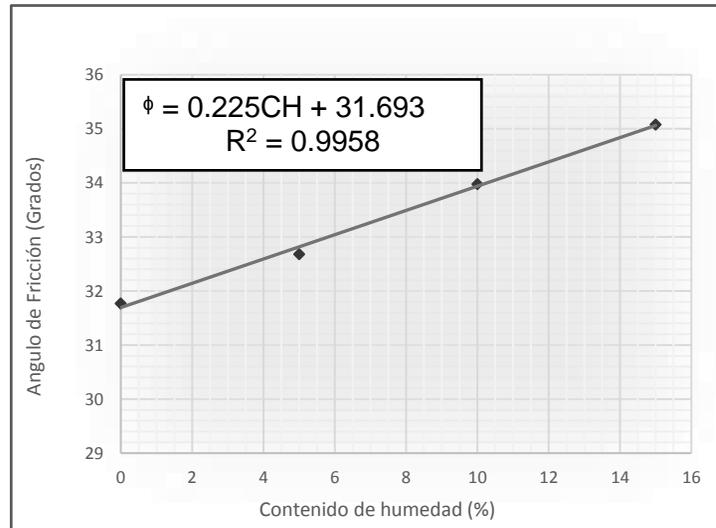


**CORRELACIÓN: ANGULO DE FRICCIÓN VS CONTENIDO DE HUMEDAD, COHESIÓN VS  
CONTENIDO DE HUMEDAD PARA UN PESO UNITARIO DE 1.6 gr/cm<sup>3</sup>  
(TESIS)**

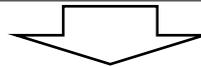
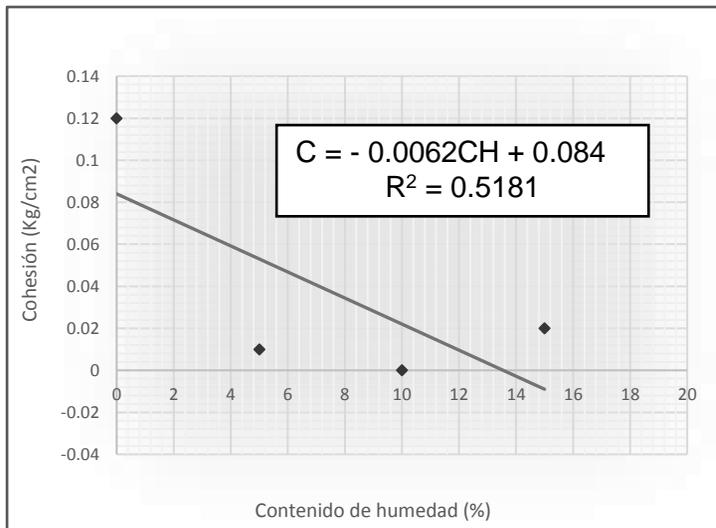
Solicitud N° S-004-2018

Proyecto	: Correlacion para determinar los parametros de resistencia al cortante haciendo variar la densidad y humedad de la muestra		
Solicita	: Vargas Rimac Jimmy Alex	Fecha	: Enero 2018
Lugar	: Jr. San Martin entre Teofilo Castillo - Huaraz	Muestreado por	: J.V.R
Calicata	: C-1	Muestra:	mab-1 Profundidad : 2.00 - 3.10 m.

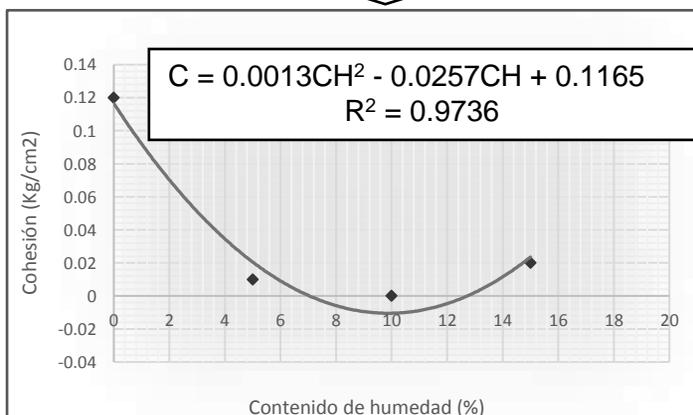
Contenido de Humedad (%)	Angulo de Fricción (Grados)
0	31.77
5	32.68
10	33.98
15	35.08



Contenido de Humedad (%)	Cohesión (Kg/cm <sup>2</sup> )
0	0.12
5	0.01
10	0.00
15	0.02



Contenido de Humedad (%)	Cohesión (Kg/cm <sup>2</sup> )
0	0.12
5	0.01
10	0.00
15	0.02

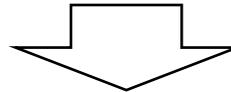
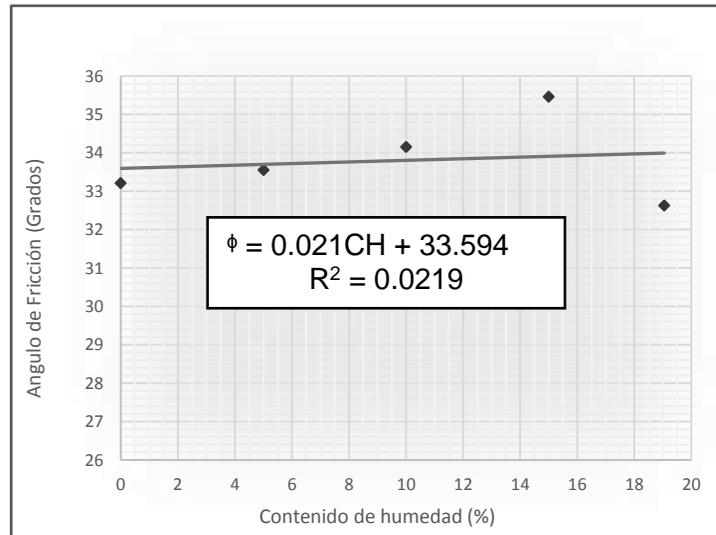


**CORRELACIÓN: ANGULO DE FRICCIÓN VS CONTENIDO DE HUMEDAD, COHESIÓN VS  
CONTENIDO DE HUMEDAD PARA UN PESO UNITARIO DE 1.7 gr/cm3  
(TESIS)**

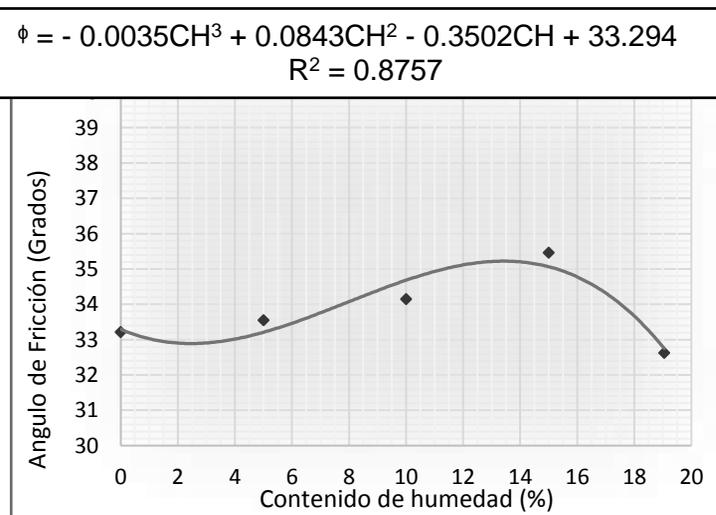
Solicitud N° S-004-2018

Proyecto	: Correlacion para determinar los parametros de resistencia al cortante haciendo variar la densidad y humedad de la muestra		
Solicita	: Vargas Rimac Jimmy Alex	Fecha	: Enero 2018
Lugar	: Jr. San Martin entre Teofilo Castillo - Huaraz	Muestreado por	: J.V.R
Calicata	: C-1	Muestra:	mab-1 Profundidad : 2.00 - 3.10 m.

Contenido de Humedad (%)	Angulo de Fricción (Grados)
0	33.21
5	33.55
10	34.15
15	35.46
19.05	32.63



Contenido de Humedad (%)	Angulo de Fricción (Grados)
0	33.21
5	33.55
10	34.15
15	35.46
19.05	32.63

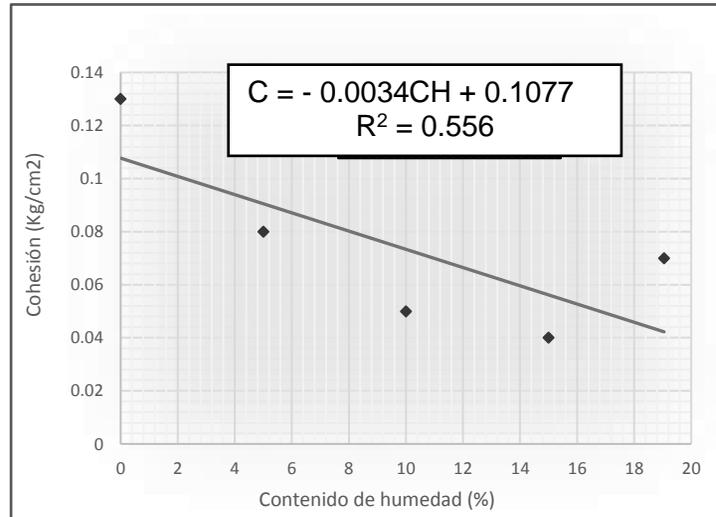


**CORRELACIÓN: ANGULO DE FRICCIÓN VS CONTENIDO DE HUMEDAD, COHESIÓN VS  
CONTENIDO DE HUMEDAD PARA UN PESO UNITARIO DE 1.7 gr/cm3  
(TESIS)**

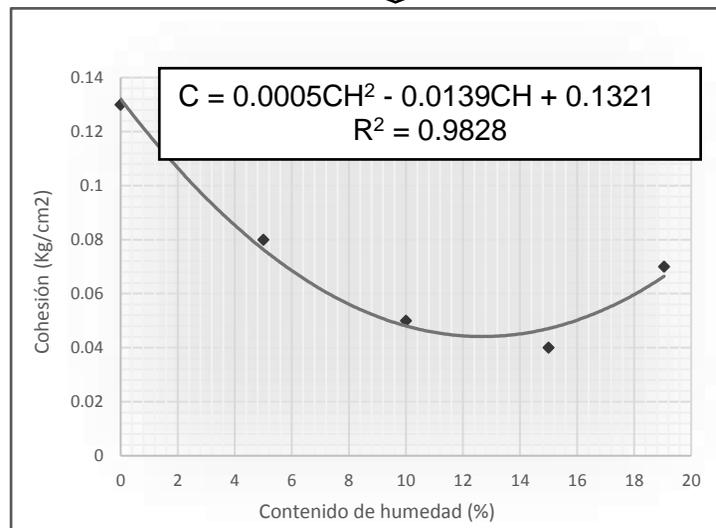
Solicitud N° S-004-2018

Proyecto	: Correlacion para determinar los parametros de resistencia al cortante haciendo variar la densidad y humedad de la muestra		
Solicita	: Vargas Rimac Jimmy Alex	Fecha	: Enero 2018
Lugar	: Jr. San Martin entre Teofilo Castillo - Huaraz	Muestreado por	: J.V.R
Calicata	: C-1	Muestra:	mab-1 Profundidad : 2.00 - 3.10 m.

Contenido de Humedad (%)	Cohesión (Kg/cm2)
0	0.13
5	0.08
10	0.05
15	0.04
19.05	0.07



Contenido de Humedad (%)	Cohesión (Kg/cm2)
0	0.13
5	0.08
10	0.05
15	0.04
19.05	0.07

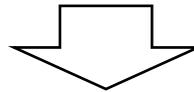
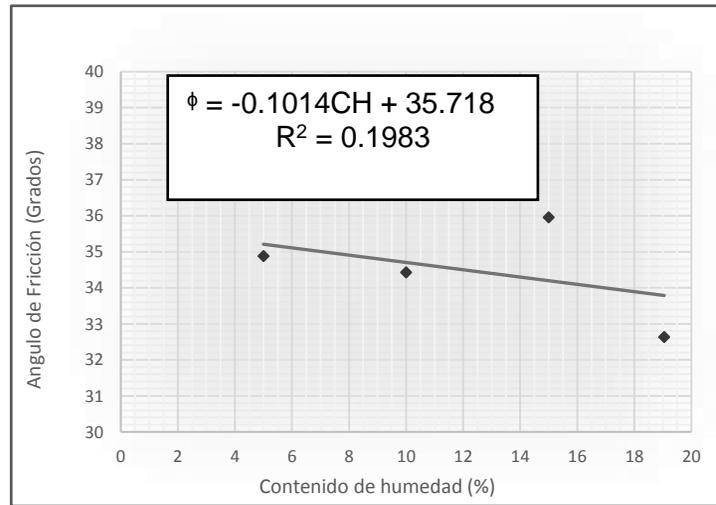


**CORRELACIÓN: ANGULO DE FRICCIÓN VS CONTENIDO DE HUMEDAD, COHESIÓN VS  
CONTENIDO DE HUMEDAD PARA UN PESO UNITARIO DE 1.8 gr/cm<sup>3</sup>  
(TESIS)**

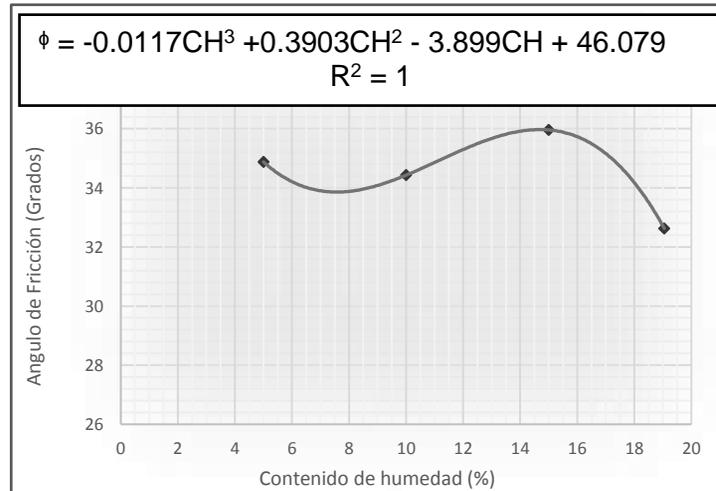
Solicitud N° S-004-2018

Proyecto	: Correlacion para determinar los parametros de resistencia al cortante haciendo variar la densidad y humedad de la muestra		
Solicita	: Vargas Rimac Jimmy Alex	Fecha	: Enero 2018
Lugar	: Jr. San Martin entre Teofilo Castillo - Huaraz	Muestreado por	: J.V.R
Calicata	: C-1	Muestra:	mab-1 Profundidad : 2.00 - 3.10 m.

Contenido de Humedad (%)	Angulo de Fricción (Grados)
5	34.88
10	34.43
15	35.96
19.05	32.63



Contenido de Humedad (%)	Angulo de Fricción (Grados)
5	34.88
10	34.43
15	35.96
19.05	32.63

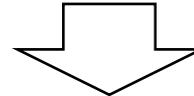
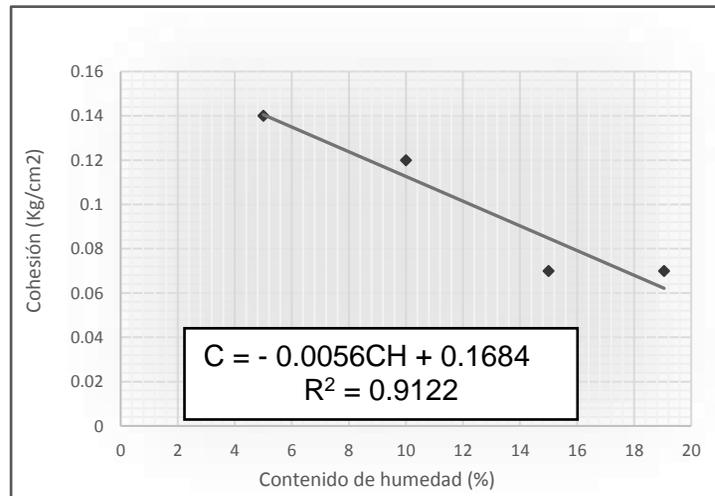


**CORRELACIÓN: ANGULO DE FRICCIÓN VS CONTENIDO DE HUMEDAD, COHESIÓN VS  
CONTENIDO DE HUMEDAD PARA UN PESO UNITARIO DE 1.8 gr/cm3  
(TESIS)**

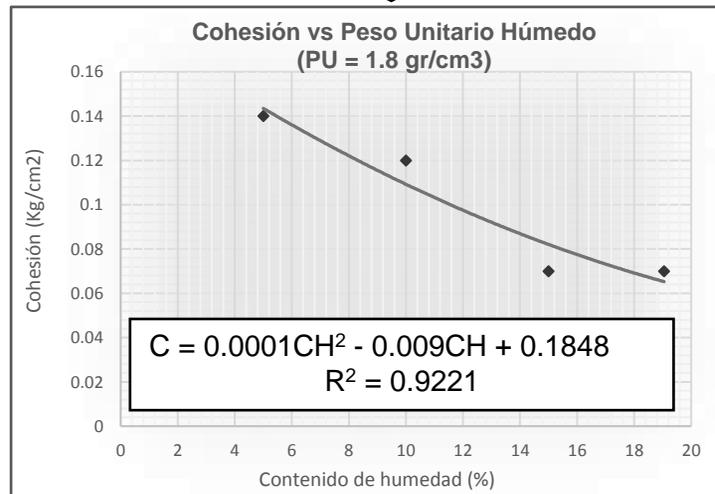
Solicitud N° S-004-2018

Proyecto	: Correlacion para determinar los parametros de resistencia al cortante haciendo variar la densidad y humedad de la muestra		
Solicita	: Vargas Rimac Jimmy Alex	Fecha	: Enero 2018
Lugar	: Jr. San Martin entre Teofilo Castillo - Huaraz	Muestreado por	: J.V.R
Calicata	: C-1	Muestra:	mab-1 Profundidad : 2.00 - 3.10 m.

Contenido de Humedad (%)	Cohesión (Kg/cm2)
5	0.14
10	0.12
15	0.07
19.05	0.07



Contenido de Humedad (%)	Cohesión (Kg/cm2)
5	0.14
10	0.12
15	0.07
19.05	0.07



*Anexo B: ENSAYOS ESTANDAR DE  
LABORATORIO*

*Anexo C: ENSAYOS ESPECIALES DE  
LABORATORIO*

*Anexo D: CALIBRACIÓN DEL EQUIPO  
DE CORTE DIRECTO*

**CERTIFICADO DE CALIBRACION  
009-18 CD**

**SOLICITANTE : EMV LABORATORIOS Y CONSTRUCCIONES EIRL**  
**ATENCION : EMV LABORATORIOS Y CONSTRUCCIONES EIRL**  
**TITULO : Calibración de Sistema Digital de Corte Directo**

**Pantalla**

**Marca : MCC**

**Modelo : SAFIR**

**Serie : 13086**

**Celda de Carga**

**Marca : KELI**

**Serie : 5E71235**

**Capacidad 500 Kgr**

**FECHA : Huachipa, 18 de Agosto del 2018**

ORION LABORATORIOS E.I.R.L.



Ing. Luis Taboada Palacios  
INFE DE LABORATORIO  
CIP: 56551

**INFORMACION DEL EQUIPO**

**1.- GENERALIDADES**

A solicitud de EMV LABORATORIOS Y CONSTRUCCION E.I.R.L., se procedió a calibrar el Sistema Digital en la ciudad de Huaraz. La calibración se realizó el 18 de Agosto del 2018.

**2.- DEL SISTEMA A CALIBRAR**

**Celda de Carga KELI**

Serie : 5E71235

Capacidad : 500 Kgr

**Dial Desplazamiento Horizontal**

Serie : JMB 081

Rango : 0.01 mm

**Dial Desplazamiento vertical**

Serie : JUS 646

Rango : 0.01 mm

**Pantalla**

Marca : MCC

Modelo : Safir

Serie : 13086

ORION LABORATORIOS E.I.R.L.  
*Ing. Luis Taboada Palacios*  
JEFE DE LABORATORIO  
CIP. 56531

**3.- DEL SISTEMA DE CALIBRACIÓN**

<b>Dispositivo</b> :	<b>Celda de Carga</b>	Dispositivo :	Dial Digital
Fabricante :	AEP TRANSDUCER	Fabricante :	Mitutoyo (Japón).
Tipo :	C2S- 10T	Modelo :	1D – C112M
Serie N° :	205775	Serie N° :	08150
Carga Nominal :	10 TN	Incertidumbre :	0.001 mm.
Modalidad :	Compresión		
<b>Indicador</b> :	<b>Digital AEP Transducer</b>		
Modelo :	MP10.		
N° Serie :	6181-2006-06		

Calibración realizado en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica. – Expediente ..: INF-LE 117-18B.

**4.- PROCEDIMIENTO**

El procedimiento toma como referencia a la norma ASTM E4-07 y la Norma NTP ISO/IEC 17025, Se aplicaron tres series de carga al Anillo mediante la misma prensa. En cada serie se registraron las lecturas de las cargas.

**5.- RESULTADOS**

En la Tabla N° 1 se muestran las tres series de carga y la serie promedio correspondiente. En el Gráfico N°1 se muestra la curva de regresión y la ecuación de ajuste correspondientes a la presente calibración.

CERTIFICADO DE CALIBRACION 009-18 CD  
**TABLA N° 1**

**CALIBRACION DE SISTEMA DIGITAL**  
**Celda de Carga Cap 500 Kgr**

Sistema Digital "A" KG	SERIES DE VERIFICACION (KG)				PROMEDIO CORREGIDO "B" KG	ERROR Ep %	RPTBLD Rp %
	SERIE (1)	SERIE (2)	ERROR (1) %	ERROR (2) %			
50	50	50	0.20	0.40	50.15	0.30	0.14
100	100	100	0.20	0.10	100.15	0.15	0.07
150	150	150	0.27	0.13	150.30	0.20	0.09
200	200	200	0.00	0.20	200.20	0.10	0.14
250	250	250	0.16	0.08	250.30	0.12	0.06
300	301	301	0.33	0.33	301.00	0.33	0.00
350	351	350	0.14	0.11	350.45	0.13	0.02
400	402	401	0.50	0.25	401.50	0.38	0.18

ORION LABORATORIOS E.I.R.L.  
  
 Ing. Luis Taboada Pajalacos  
 JEFE DE LABORATORIO  
 CIP. 55551

Coefficiente Correlación:  $R^2 = 1$

Ecuación de ajuste:  $y = 1.0031x - 0.1982$

Donde:

X : Lectura de la pantalla  
 Y : fuerza promedio (KG)

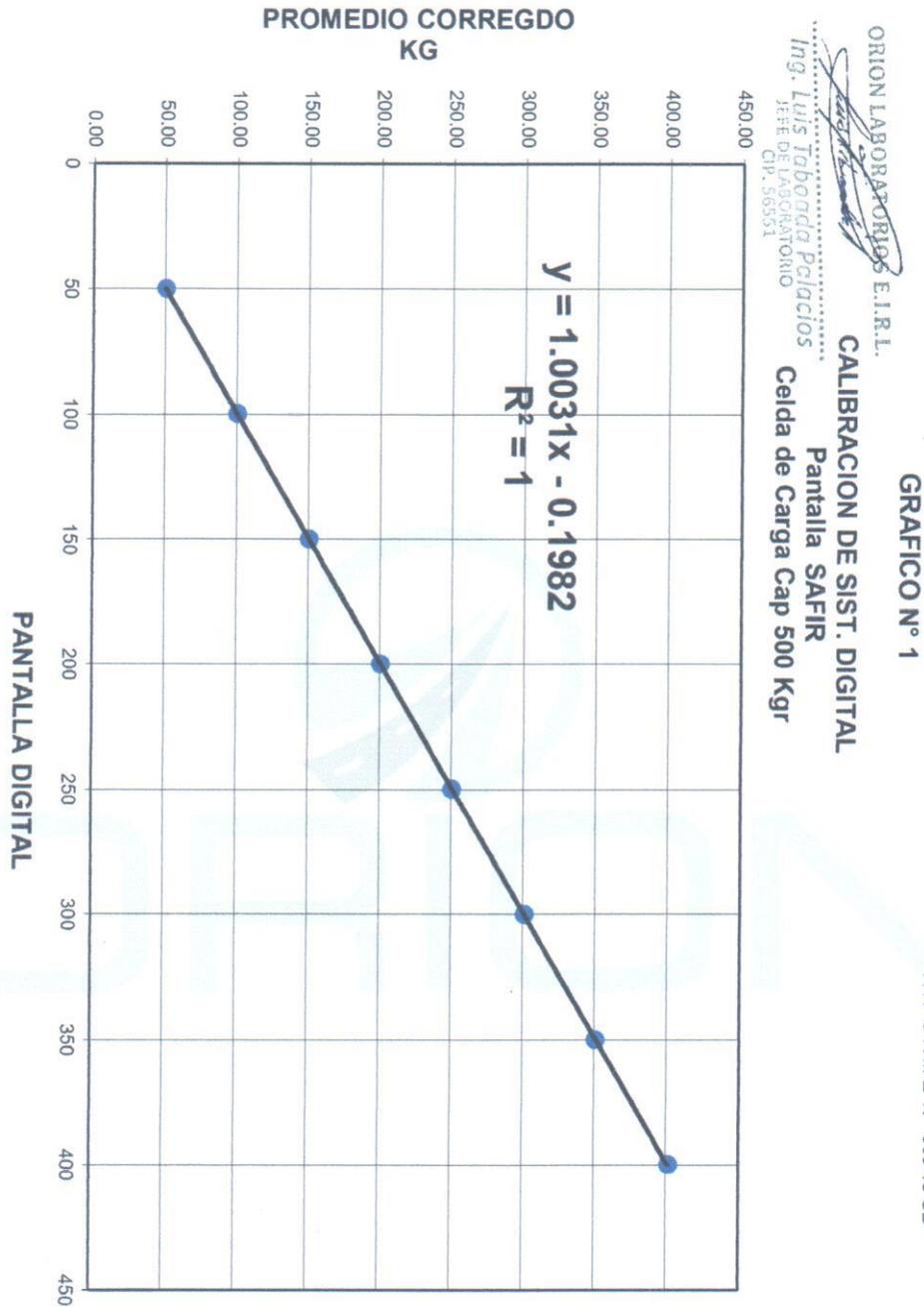


GRAFICO N° 1

INFORME N° 009-18 CD

ORION LABORATORIOS E.I.R.L.  
  
**Ing. Luis Taboada Palacios**  
 JEFE DE LABORATORIO  
 CIP. 565531  
**CALIBRACION DE SIST. DIGITAL**  
**Pantalla SAFIR**  
**Celda de Carga Cap 500 Kgr**

CERTIFICADO DE CALIBRACION 009-18 CD

## CALIBRACION DE DIAL HORIZONTAL

Mitutoyo, Modelo 2050S

N° Serie JMB 081 Sensibilidad 0.01mm

DIAL COMPARADOR DIVIS. MM	LECTURA DEL PATRON MM			SERIE PROMEDIO MM
	SERIE ( 1 )	SERIE ( 2 )	SERIE ( 3 )	
0.5	0.501	0.500	0.502	0.501
1	1.002	1.001	1.003	1.002
1.5	1.500	1.502	1.501	1.501
2	2.000	2.004	2.002	2.002
2.5	2.504	2.501	2.500	2.502
3	3.007	3.004	3.000	3.004
3.5	3.502	3.500	3.504	3.502
4	4.001	4.002	4.000	4.001
4.5	4.500	4.506	4.500	4.502
5	5.001	5.010	4.998	5.003
5.5	5.502	5.509	5.500	5.504
6	6.002	6.000	6.001	6.001
6.5	6.504	6.501	6.500	6.502
7	7.006	7.002	7.000	7.003
7.5	7.508	7.500	7.502	7.503
8	8.002	8.004	8.001	8.002
8.5	8.504	8.501	8.500	8.502
9	9.004	9.002	9.001	9.002
9.5	9.507	9.501	9.500	9.503
10	10.006	10.002	10.001	10.003

coeficiente de correlación:

$$R^2 = 1$$

Recta de ajuste:

$$y = 1.000x + 0.001$$

Donde:

X : Lectura del dial ( mm )

Y : Promedio de lectura Patrón mm

ORION LABORATORIOS E.I.R.L.  
  
 Ing. Luis Taboada Palacios  
 JEFE DE LABORATORIO  
 CIP. 36554

CERTIFICADO DE CALIBRACION 009-18 CD

## CALIBRACION DE DIAL VERTICAL

Mitutoyo, Modelo 2046S

N° Serie JUS 646 Sensibilidad 0.01mm

DIAL COMPARADOR DIVIS. MM	LECTURA DEL PATRON MM			SERIE PROMEDIO MM
	SERIE ( 1 )	SERIE ( 2 )	SERIE ( 3 )	
0.5	0.502	0.500	0.501	0.501
1	1.000	1.002	1.000	1.001
1.5	1.504	1.501	1.503	1.503
2	2.001	2.000	2.004	2.002
2.5	2.503	2.502	2.500	2.502
3	3.002	3.000	3.004	3.002
3.5	3.508	3.504	3.502	3.505
4	4.009	4.002	4.006	4.006
4.5	4.503	4.500	4.502	4.502
5	5.001	5.000	5.000	5.000
5.5	5.503	5.501	5.502	5.502
6	6.001	6.000	6.000	6.000
6.5	6.500	6.503	6.500	6.501
7	7.006	7.004	7.002	7.004
7.5	7.501	7.500	7.504	7.502
8	8.000	8.000	8.000	8.000
8.5	8.501	8.502	8.504	8.502
9	9.007	9.004	9.002	9.004
9.5	9.500	9.502	9.506	9.503
10	10.001	10.003	10.002	10.002

coeficiente de correlación:

$$R^2 = 1$$

Recta de ajuste:

$$y = 1.000x + 0.002$$

Donde:

X : Lectura del dial ( mm )

Y :Promedio de lectura Patrón mm

ORION LABORATORIOS E.I.R.L.

*Luis Taboada Pclacios*  
Ing. Luis Taboada Pclacios  
JEFE DE LABORATORIO  
CIP. 56551

*Anexo E: PANEL FOTOGRÁFICO*



Fotografía 1: Equipo de corte directo de EMV Labotarorios y construcciones E.I.R.L



Fotografía 2: Se muestra la calibración del equipo de corte directo con la empresa ORION.



Fotografía 3: Se muestra la cantidad de suelo que se compactara para lograra el peso unitario para la cual se realizara el ensayo.



Fotografía 4: Se muestra la compactación de la muestra.



Fotografía 5 y 6: Muestran los controles que se toman para tener un espesor de 2cm para así no haya cambios en el peso unitario.





Fotografía 7: Se somete a la muestra a saturación para luego hacer las lecturas de deformación normal que dependera del grado de filtración y de la carga a la cual se somete la muestra.



Fotografía 8 y 9: Se toma la humedad final con la cual a terminado la muestra, para determinar la grafica humedad con carga normal.

