

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**PÉRDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN
CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)**

**TESIS DE INVESTIGACIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR:
Bach. en Ing. Civil Joel Apolinar Cruz Quintanilla**

CUSCO - PERÚ

2015

**PÉRDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON
PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)**

**BACHILLER EN INGENIERÍA CIVIL JOEL APOLINAR CRUZ
QUINTANILLA**

CÓDIGO DE MATRICULA: 070556-J

Presentado a la escuela profesional de Ingeniería Civil en
cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título profesional
de:

INGENIERO CIVIL

de la

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO**

JURADO:

PRESIDENTE:

M.Sc. Ing. MARTIN WASHINGTON ESQUIVEL ZAMORA

INTEGRANTES:

M.Sc. Ing. CARLOS FERNÁNDEZ BACA VIDAL

Ing. JOSÉ FELIPE AZPILCUETA CARBONELL

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi familia, en la cual nací, crecí, me eduque, aprendí lo importante del esfuerzo y la perseverancia, de no dejar los sueños a un lado, de no dejar las cosas a medias, de no rendirse, aunque todos estén en tu contra, de asumir las consecuencias de tus actos y sobretodo vivir en los valores del respeto y la honradez. A mi familia, mamá Angélica, papá Apolinar, hermanos Andy y Abel, y hermanas Mabel y Ángela.

AGRADECIMIENTOS

A mi señor Dios, que me permite seguir vivo para poder continuar creciendo e investigando.

A mis jurados de tesis, que fueron más que asesores, fueron un apoyo y una guía en el momento que más los necesitaba, M.Sc. Ing. Carlos Fernández Baca Vidal, muchas gracias por compartir sus conocimientos y experiencias conmigo, Mgt. Ing. Ignacio Fructuoso Solís Quispe, muchas gracias por brindarme su apoyo desinteresado, Ing. José Felipe Azpilcueta Carbonell, muchas gracias por advertirme de la complejidad del tema.

Al Ing. M.Sc. José Rafael Menéndez, le agradezco su apoyo desinteresado, que me permitió definir el verdadero objetivo de esta tesis.

Al Ing. Abel Aucca Bárcena, que desconociendo de que se trataba, financio esta tesis, muchas gracias.

Al Prof. José Olintho De la torre Cruz, le expreso mi gratitud por dejarme usar los equipos de su facultad, que permitieron la toma de datos.

A la Dr. Aida Zapata de Camino y al personal que labora en el laboratorio de mecánica de suelos y materiales de la UNSAAC, les agradezco por darme las facilidades para poder realizar las pruebas.

A Paola Pamela, muchas gracias por los ánimos de seguir adelante.

A mis colaboradores, mis amigos, que siempre que necesite ayuda estuvieron ahí para apoyarme: A Nilton, Brian, Elmer y Javier gracias por dejarme entrar en su proyecto y acompañarme con su fuerza en las distintas pruebas de campo y laboratorio. A Henry y Edwin, gracias por dejarme entrar en su proyecto y ayudarme a realizar las pruebas. A Juan y Elizabeth, gracias por dejarme entrar a su proyecto, apoyarme en las pruebas y compartir su información conmigo, pese que están muy ocupados. A Mayra, Franco, Joel Quispe, gracias por su ayuda, aunque fuera solo por un momento.

Y a todos mis amigos y personas que de forma directa e indirecta me apoyaron para lograr terminar esta tesis.

PRESENTACIÓN

La presente tesis de investigación trata sobre la interpretación teórica de la auscultación con penetrómetro dinámico ligero de punta cónica o también conocido como “DPL” por sus iniciales en inglés (Dynamic Probing Light), basándose principalmente en formulaciones matemáticas de conservación de energía y pruebas de laboratorio, de donde se resalta la pérdida de energía y su influencia en la reacción del suelo.

Se decide realizar esta investigación al observar la realidad actual de los ensayos de penetración dinámica en la ciudad del Cusco, que son ampliamente usados, con interpretaciones diversas, distintas configuraciones y muchas veces sin respaldo de otros ensayos de laboratorio.

Se escoge el DPL como guía para realizar la investigación porque está definido en la norma técnica peruana, tanto en sus dimensiones como en el procedimiento de su aplicación, aunque para poder apreciar de mejor manera el fenómeno se varían algunos procedimientos, entre los más resaltantes está la altura de caída.

Aunque existan muchos factores que definan los resultados que se obtienen de la aplicación de estos ensayos, la pérdida de energía es la que se desarrolla en esta tesis por ser la más relevante, ya que no solo depende del tipo de suelo con el que se choca, sino también de la configuración del equipo que se use y su forma de aplicación, parámetros que si se pueden controlar.

En el desarrollo de esta tesis se podrá observar detalles interesantes de los penetrómetros dinámicos, así como la obtención de sus parámetros de pérdida de energía, con lo que se podrá entender la correlación que existe entre estos.

No se está intentando justificar el uso actual de estos ensayos en estudios de suelos como una técnica confiable, sino el de mostrar su uso e interpretación adecuado que permita definir bien su rango de aplicación.

EL AUTOR

RESUMEN

El ensayo DPL, muy conocido y usado por su fácil aplicación en suelo donde otros ensayos de campo no son aplicables y el muestreo inalterado no es factible, es usado en la ciudad del Cusco en casi todos los estudios de mecánica de suelos, pero la norma técnica peruana no es muy explícita respecto a este ensayo, lo que origina la aparición de diversos equipos para su ejecución, a esto se suma que la interpretación que se le da es bastante simple y no considera las variaciones notorias entre equipos, causando dispersión y desconfianza en los resultados. Esta realidad es la que motiva a realizar esta investigación con el objetivo de definir y determinar los parámetros de pérdida de energía de este ensayo, siendo probablemente el desconocimiento de estos la causa de esta problemática.

Para la ejecución de esta tesis, se toma como base la fórmula general de hincada dinámica o fórmula de Hyler, la que describe tres tipos de factores de pérdida de energía, para lo cual, se usa un sensor de movimiento para determinar la fricción de la maza con la guía, se mide el rebote de la maza para determinar el tipo de choque entre la maza y el yunque, y se aplica el ensayo con diferentes alturas de caída para determinar la altura mínima de caída que engloba las deformaciones elásticas del suelo y del equipo.

Usando los fundamentos de la mecánica clásica y complementándolos con los criterios modernos de interpretación y calibración de los penetrómetros dinámicos, se llega a la conclusión de que existen tres grupos de parámetros de pérdida de energía; respecto a la caída de la maza, que para el equipo usado es prácticamente despreciable, respecto a la transmisión de la energía mecánica de la maza a la punta, que está relacionada con la longitud del varillaje y la forma del yunque con una incidencia del 15%, y respecto a las deformaciones elásticas que no son registradas durante la toma de datos tradicional del ensayo, con una incidencia variable que se hace más notoria cuando el suelo es más resistente a la penetración.

CONTENIDO

PRESENTACIÓN	v
RESUMEN.....	vi
CONTENIDO	vii
LISTA DE TABLAS.....	xi
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xix
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3. HIPÓTESIS	4
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.6. LIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	8
2.1.1. BREVE RESEÑA HISTÓRICA DEL PENETRÓMETRO	8
2.1.2. RESUMEN DE LAS CONCEPCIONES TEÓRICAS.....	10
2.1.3. ANTECEDENTES MÁS RELEVANTES.....	13
2.2. SUPUESTOS	22
2.2.1. RESPECTO AL SUELO	22
2.2.2. RESPECTO AL ENSAYO DEL DPL	22
2.3. BASE TEÓRICA.....	23
2.3.1. ENERGÍA BÁSICA Y ESPECÍFICA	23
2.3.2. AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO	24
2.3.3. PARÁMETROS DEL SUELO	27
2.3.4. PARÁMETROS DE LA CAÍDA DE LA MAZA	31
2.3.5. PARÁMETROS DEL CHOQUE DE LA MAZA CON EL YUNQUE	35

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)

2.3.6. PARÁMETROS DE LAS DEFORMACIONES EQUIPO-SUELO	37
2.3.7. PARÁMETROS DE PERDIDA DE ENERGÍA EN LA FORMULA GENERAL DE HINCA	39
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	45
3.1. TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN.....	46
3.2. VARIABLES.....	46
3.2.1. VARIABLES INDEPENDIENTES.....	46
3.2.2. VARIABLES DEPENDIENTES	47
3.2.3. RELACIÓN ENTRE VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES	47
3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN - MATRIZ DE CONSISTENCIA	48
3.4. EQUIPOS	49
3.4.1. EQUIPOS PARA LA MEDICIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DE LA MAZA	49
3.4.2. PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA (DPL)	49
3.4.3. OTROS EQUIPOS USADOS	50
3.5. MÉTODOS	51
3.5.1. MEDICIÓN DE LA PERDIDA DE ENERGÍA POR CAÍDA DE LA MAZA	51
3.5.2. ENSAYO DPL EN CONDICIONES DE LABORATORIO.....	53
3.5.3. PRUEBAS DE CAMPO	56
3.6. TAMAÑO DE MUESTRAS	57
3.6.1. RESPECTO A LOS PARÁMETROS DE CAÍDA DE LA MAZA	57
3.6.2. RESPECTO A LOS PARÁMETROS RELACIONADOS CON EL SUELO	58
3.7. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	60
3.7.1. CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LA PERDIDA DE ENERGÍA POR CAÍDA DE LA MAZA	60
3.7.2. CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO	67
3.7.3. CÁLCULO Y ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE RESTITUCIÓN.....	67
3.7.4. CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LA ALTURA MÍNIMA DE CAÍDA.....	68
CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	70
4.1. SOBRE LA PERDIDA DE ENERGÍA POR LA CAÍDA DE LA MAZA	71
4.1.1. CAÍDA LIBRE DE LA MAZA.....	71
4.1.2. FRICCIÓN DE LA GUÍA EN CAÍDA PERPENDICULAR AL SUELO	71

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)

4.1.3. VARIACIÓN DE LA ALTURA DE CAÍDA	72
4.1.4. INCLINACIÓN DEL VARILLAJE	73
4.1.5. CUANTIFICACIÓN DE LA PÉRDIDA DE ENERGÍA POR CAÍDA DE LA MAZA... 73	
4.2. SOBRE LA PRUEBA EN LABORATORIO EN SUELO COMPACTADO	74
4.2.1. SOBRE EL COEFICIENTE DE RESTITUCIÓN.....	74
4.2.2. SOBRE LA ALTURA MÍNIMA DE CAÍDA	79
4.3. INTERPRETACIÓN TEÓRICA DEL ENSAYO DPL SEGÚN LOS CRITERIOS PROPUESTOS POR ODEBRECHT ET AL. (2005)	83
4.3.1. DESCRIPCIÓN Y COMPATIBILIZACIÓN DEL MODELO CON LA PRUEBA PL 183	
4.3.2. OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES DEL MODELO	94
4.3.3. EVALUACIÓN DE LA INCIDENCIA DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE ENERGÍA EN LA REACCIÓN DINÁMICA DEL SUELO.....	97
4.4. SOBRE LAS PRUEBAS EN CAMPO.....	111
4.4.1. PRUEBA PC 1	112
4.4.2. PRUEBA PC 2.....	113
4.4.3. PRUEBA PC 3.....	116
4.4.4. PRUEBA PC 4.....	119
4.4.5. PRUEBA PC 5.....	122
4.4.6. PRUEBA PC 6.....	124
4.4.7. PRUEBA PC 7.....	127
4.5. VERIFICACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE VARIABLES.....	129
4.6. OBSERVACIONES RELEVANTES	132
4.6.1. RELACIÓN ENTRE LA ALTURA DE CAÍDA MÍNIMA Y EL REBOTE	132
4.6.2. RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA DINÁMICA DEL SUELO Y LA COMPACIDAD RELATIVA.....	134
4.6.3. COMPARACIÓN CON LOS ANTECEDENTES.....	135
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	137
5.1. CONCLUSIONES.....	138
5.2. RECOMENDACIONES	139
TRABAJOS CITADOS	141
BIBLIOGRAFÍA.....	145
ANEXOS.....	146

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)

ANEXO A	DEDUCCIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LOS NÚMEROS DE GOLPES DE DOS PENETRÓMETROS.....	147
ANEXO B	SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS	148
ANEXO C	DEDUCCIÓN DE LA FORMULA GENERAL DE HINCA	150
ANEXO D	EQUIPOS PARA LA MEDICIÓN DEL MOVIMIENTO	153
ANEXO E	DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL EQUIPO DPL	155
ANEXO F	PRUEBAS PRELIMINARES	160
F.1.	RECONOCIMIENTO DE LA MAZA POR EL SENSOR DE MOVIMIENTO.....	160
F.2.	PRUEBAS PREVIAS DE ENSAYO DPL CON DIFERENTES ALTURAS Y CONTROL DEL REBOTE DE LA MAZA	163
ANEXO G	REGRESIÓN CUADRÁTICA PARA CAÍDA DE CUERPOS.....	171
ANEXO H	PRUEBAS PARA LA MEDICIÓN DE LA PÉRDIDA DE ENERGÍA POR CAÍDA DE LA MAZA	172
H.1.	DATOS DE LAS PRUEBAS	172
H.2.	PANEL FOTOGRÁFICO DE LA MEDICIÓN DE LA PERDIDA DE ENERGÍA POR CAÍDA DE LA MAZA	177
ANEXO I	PRUEBAS EN EL POZO DE PRUEBAS DEL SPT – SUELO COMPACTADO	180
I.1.	PROPIEDADES DEL SUELO DEL POZO DE PRUEBAS DEL SPT	180
I.2.	REGISTRO DE LOS DATOS DE LA PRUEBA EN LABORATORIO	186
I.3.	REGISTRO DE LAS DENSIDADES NATURALES.....	188
I.4.	PANEL FOTOGRÁFICO DE LA MEDICIÓN DEL REBOTE Y VALOR H0 EN LABORATORIO.....	189
I.5.	CERTIFICADO DE USO DE LABORATORIO	195
ANEXO J	DATOS DE ENSAYO DE CAMPO.....	196
J.1.	PRUEBA PC 1.....	196
J.2.	PRUEBA PC 2.....	197
J.3.	PRUEBA PC 3.....	199
J.4.	PRUEBA PC 4.....	200
J.5.	PRUEBA PC 5.....	202
J.6.	PRUEBA PC 6.....	203
J.7.	PRUEBA PC 7.....	205
J.8.	PANEL FOTOGRÁFICO DE ENSAYOS EN CAMPO	206

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Descripción cualitativa de depósitos de suelo granular	28
Tabla 2: Identificación en Terreno de la Compacidad Relativa.....	30
Tabla 3: Dimensiones y pesos del equipo DPL usado	49
Tabla 4: Pruebas para medir la fricción de la maza con la guía	57
Tabla 5: Pruebas para medir la variación de la altura de caída.....	58
Tabla 6: Pruebas de campo.....	59
Tabla 7: Valores de k_c para cada altura de caída	71
Tabla 8: Valores de k_H para distintos operadores	72
Tabla 9: Valores del coeficiente de restitución según la altura de caída en PL 1	74
Tabla 10: Resumen de los datos de la prueba PL 1.....	77
Tabla 11: Valores de A y H_0 en PL 1	79
Tabla 12: Energía básica para prueba PL 1	98
Tabla 13: Esfuerzo de la punta según la formula holandesa para PL 1.....	100
Tabla 14: Esfuerzo de la punta según el modelo propuesto para PL 1	102
Tabla 15: Comparación entre valores de esfuerzo de la punta para PL 1	104
Tabla 16: Comparación entre valores de resistencia dinámica del suelo para PL 1 ..	107
Tabla 17: Incidencia de la pérdida de energía en resistencia dinámica del suelo para PL 1	109
Tabla 18: Numero de golpes por cada 10 cm de la prueba PC 1	112
Tabla 19: Numero de golpes por cada 10 cm de la prueba PC 2	113
Tabla 20: Rebotes de la maza en la prueba PC 2.....	114
Tabla 21: Valores de A y H_0 en la prueba PC 2.....	115
Tabla 22: Numero de golpes por cada 10 cm de la prueba PC 3	116
Tabla 23: Rebotes de la maza en la prueba PC 3.....	117
Tabla 24: Valores de A y H_0 en la prueba PC 3.....	118
Tabla 25: Numero de golpes por cada 10 cm de la prueba PC 4	119

Tabla 26: Rebotes de la maza en la prueba PC 4.....	120
Tabla 27: Valores de A y H_0 en la prueba PC 4.....	121
Tabla 28: Numero de golpes por cada 10 cm de la prueba PC 5.....	122
Tabla 29: Valores de A y H_0 en la prueba PC 5.....	123
Tabla 30: Numero de golpes por cada 10 cm de la prueba PC 6.....	124
Tabla 31: Rebotes de la maza en la prueba PC 6.....	125
Tabla 32: Valores de A y H_0 en la prueba PC 6.....	126
Tabla 33: Numero de golpes por cada 10 cm de la prueba PC 7.....	127
Tabla 34: Valores de A y H_0 en la prueba PC 7.....	128
Tabla 35: Relación entre compacidad relativa y resistencia dinámica de la punta	134

TABLAS DE ANEXOS

Tabla E.1: Masa de las varillas usadas.....	158
Tabla F.1: Lugares de pruebas previas.....	163
Tabla F.2: Datos de la prueba PP1.....	164
Tabla F.3: Datos de la prueba PP2.....	165
Tabla F.4: Datos de la prueba PP3 calicata 1.....	168
Tabla F.5: Datos de la prueba PP3 calicata 2.....	168
Tabla H.1: Aceleraciones de caída libre de la maza.....	172
Tabla H.2: Posiciones y velocidades del choque para $H=60$ cm.....	172
Tabla H.3: Posiciones y velocidades del choque para $H=50$ cm.....	173
Tabla H.4: Posiciones y velocidades del choque para $H=40$ cm.....	174
Tabla H.5: Datos de la prueba PVH 1.....	174
Tabla H.6: Posiciones y velocidad del choque con varilla inclinada a 108.8%.....	175
Tabla H.7: Datos de la prueba PVH 2.....	175
Tabla H.8: Datos de la prueba PVH 3.....	175
Tabla H.9: Datos de la prueba PVH 4.....	176

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO
DINÁMICO LIGERO (DPL)

Tabla I.1: Datos del ensayo DPL en laboratorio PL 1.....	187
Tabla I.2: Contenido de humedad del pozo compactado	188
Tabla I.3: Compacidades relativas.....	188
Tabla J.1: Datos de la prueba PC 1	196
Tabla J.2: Datos de la prueba PC 2	198
Tabla J.3: Datos de la prueba PC 3	199
Tabla J.4: Datos de la prueba PC 4	201
Tabla J.5: Datos de la prueba PC 5 - 1° parte.....	202
Tabla J.6: Datos de la prueba PC 5 - 2° parte.....	203
Tabla J.7: Datos de la prueba PC 6	204
Tabla J.8: Datos de la prueba PC 7	205

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Líneas de ruptura bajo un penetrómetro, según l'Herminier.....	10
Figura 2: Comparación de los ensayos de penetración estático y dinámico.....	12
Figura 3: Abaco que da la resistencia unitaria del terreno en base a un penetrómetro pesado según la fórmula de Hiley.....	14
Figura 4: Abaco que da la fuerza portante de un pilote según la fórmula de Hiley.....	14
Figura 5: Promedio de la eficiencia de transferencia, <i>et</i> (%), contra la longitud del varillaje (pies y metros).....	16
Figura 6: Factor de corrección para considerar la longitud del varillaje.....	16
Figura 7: Pisón de 0.622 kN utilizado comúnmente en Argentina para ejecutar el ensayo de SPT.....	18
Figura 8: Punta del Penetrómetros DPL.....	25
Figura 9: Partes del equipo DPL.....	25
Figura 10: Diagrama de cuerpo libre de la maza.....	32
Figura 11: Desplazamiento en plano inclinado.....	34
Figura 12: Impacto central de dos partículas.....	35
Figura 13: Deformación proporcional a la fuerza.....	37
Figura 14: Relación entre la resistencia de hinca y la penetración.....	38
Figura 15: Esquema de ensayo DPL.....	41
Figura 16: Estimación gráfica del rechazo elástico.....	43
Figura 17: Equipos de Laboratorio y muestreo.....	50
Figura 18: Esquema de toma de datos con el sensor de movimiento.....	52
Figura 19: Esquema de capas compactadas del pozo de prueba del SPT (L.M.S.M.–FIC–UNSAAC).....	54
Figura 20: Ubicación de las pruebas de campo en el mapa de la provincia del Cusco.....	59
Figura 21: Puntos de interés del gráfico Posición vs Tiempo.....	60
Figura 22: Zonas del comportamiento de la maza durante el ensayo DPL.....	61
Figura 23: Curvas de regresión del programa DataStudio (PCLM 1).....	62

Figura 24: Obtención de las posiciones y la velocidad de los gráficos posición vs tiempo y velocidad vs tiempo del programa DataStudio (PFGP 41)	64
Figura 25: Registro de la variación de la altura de caída (PVH 1 ciclos 10 al 15).....	66
Figura 26: Grafico típico de dispersión para halla A y H0 (PL 1 Prof. 0.85 m)	69
Figura 27: Coeficiente de restitución según la profundidad	75
Figura 28: Promedios de los coeficientes de restitución según la altura	76
Figura 29: Variación del rebote según la profundidad	78
Figura 30: Promedio de los rebotes según la altura	78
Figura 31: Relación entre altura de caída y e para $pf=0.25$ m	80
Figura 32: Relación lineal entre altura de caída y e promedio	80
Figura 33: Penetrograma del pozo de pruebas del SPT – prueba PL 1	81
Figura 34: A y H0 respecto a la profundidad	82
Figura 35: Esquema global del ensayo DPL	84
Figura 36: Etapas de análisis del ensayo DPL	84
Figura 37: Modelo simplificado del fenómeno del ensayo DPL	86
Figura 38: Diagrama fuerza deformación del ensayo DPL	87
Figura 39: Descripción grafica de H0	91
Figura 40: Recta que representa la relación entre la energía usada y la deformaciones del sistema	92
Figura 41: Fuerza de compresión a) antes del choque y b) en el instante de máxima deformación	93
Figura 42: Variación de la energía potencial versus penetración permanente para mediciones debajo del yunque del equipo SPT	95
Figura 43: Energía básica para PL 1	99
Figura 44: Esfuerzo de la punta según la formula holandesa para PL 1	101
Figura 45: Esfuerzo de la punta según el modelo propuesto para PL 1	103
Figura 46: Comparación entre valores de esfuerzo de la punta para PL 1	105
Figura 47: Comparación entre valores de resistencia del suelo para PL 1	108

Figura 48: Influencia de la pérdida de energía en la resistencia dinámica del suelo para PL 1	110
Figura 49: Penetrograma de la prueba PC 1	112
Figura 50: Altura de caída vs e a 0.35 m en la prueba PC 1	113
Figura 51: Penetrograma de la prueba PC 2.....	114
Figura 52: Rebotes de la maza en la prueba PC 2.....	115
Figura 53: Penetrograma de la prueba PC 3.....	116
Figura 54: Rebotes de la maza en la prueba PC 3.....	117
Figura 55: Penetrograma de la prueba PC 4.....	120
Figura 56: Rebotes de la maza en la prueba PC 4.....	121
Figura 57: Penetrograma de la prueba PC 5.....	123
Figura 58: Altura de caída vs e para 0.65 m de profundidad en PC 5	124
Figura 59: Penetrograma de la prueba PC 6.....	125
Figura 60: Rebotes de la maza en la prueba PC 6.....	126
Figura 61: Penetrograma de la prueba PC 7.....	128
Figura 62: Comparación del rebote y la altura mínima de caída en PL 1	132
Figura 63: Comparación del rebote y la altura mínima de caída en PC 6.....	133
Figura 64: Relación entre rebote y altura mínima de caída	133
Figura 65: Relación entre Cr y Rd	134
Figura 66: Relación entre R (%) y Rd	135

FIGURAS DE ANEXOS

Figura B.1: Carta de clasificación del sistema SUCS	148
Figura B.2: Carta de plasticidad de los suelos	149
Figura D.1: Sensor de movimiento PS-2103-PASCO - Guía rápida	153
Figura D.2: Xplorer GLX – PASCO - Guía rápida.....	154
Figura E.1: Medición de la masa de la Maza	155
Figura E.2: Medición de la masa de la punta de la sonda	156

Figura E.3: Medición de la masa de la guía	157
Figura E.4: Medición de la masa del yunque más varilla de ensamble	157
Figura E.5: Medición de la masa de las varillas	158
Figura F.1: Prueba preliminar del sensor de movimiento	160
Figura F.2: Datos preliminares - distancia al sensor vs tiempo	161
Figura F.3: Datos preliminares seleccionados - distancia al sensor vs tiempo	161
Figura F.4: Caída parabólica de la maza	162
Figura F.5: Zonas en la gráfica distancia del sensor vs tiempo.....	162
Figura F.6: Perfil estratigráfico del suelo en la prueba PP1.....	163
Figura F.7: Penetrograma de la prueba PP1.....	164
Figura F.8: Penetrograma de la prueba PP2.....	166
Figura F.9: Perfil estratigráfico del suelo en la prueba PP2.....	166
Figura F.10: Relación entre altura de caída y numero de golpes	167
Figura F.11: Penetrograma de la prueba PP3 calicata 1	169
Figura F.12: Penetrograma de la prueba PP3 calicata 2.....	169
Figura F.13: Calicata 1 de la prueba PP3	170
Figura F.14: Calicata 2 de la prueba PP3	170
Figura H.1: Pozo de prueba nivelado.....	177
Figura H.2: Armado del soporte del sensor de movimiento	177
Figura H.3: Medición de la influencia del aire en la caída	178
Figura H.4: Medición de la fricción con la guía.....	178
Figura H.5: Control de la perpendicularidad del ensayo.....	179
Figura H.6: Medición de la Fricción en la guía inclinada	179
Figura I.1: Formato de toma de datos para el ensayo DPL	186
Figura I.2: Cuarteo y lavado de muestras de suelo del pozo de pruebas del SPT....	189
Figura I.3: Limite líquido y granulometría del suelo del pozo de pruebas del SPT....	189
Figura I.4: Peso específico de la muestras del pozo de pruebas del SPT	189
Figura I.5: Densidad Máxima de la muestras del pozo de pruebas del SPT.....	190

Figura I.6: Densidad Mínima de la muestras del pozo de pruebas del SPT	191
Figura I.7: Removido y compactado del pozo de pruebas del SPT	192
Figura I.8: Ensayo DPL con alturas diferentes, medición del rebote y giro en pozo de pruebas del SPT compactado.....	193
Figura I.9: Extracción de muestras para densidad natural del pozo de pruebas del SPT compactado	194
Figura J.1: Ubicación de las pruebas PC 1, PC 2 y PC 3.....	196
Figura J.2: Perfil estratigráfico de la calicata 03 de la prueba PC 1.....	197
Figura J.3: Perfil estratigráfico de la trinchera 05 de la prueba PC 2.....	198
Figura J.4: Perfil estratigráfico de la calicata 02 de la prueba PC 3.....	200
Figura J.5: Ubicación de la prueba PC 4.....	200
Figura J.6: Perfil estratigráfico de la calicata 01 y diagrama número de golpes puntaza – Rpd, de la prueba PC 4	201
Figura J.7: Ubicación de la prueba PC 5.....	202
Figura J.8: Ubicación de las pruebas PC 5 y PC 6.....	203
Figura J.9: Perfil estratigráfico para el muro de contención, de la prueba PC 4	204
Figura J.10: Prueba de campo PC-1 APV Ernesto Gunther Calicata C-3.....	206
Figura J.11: Prueba de campo PC-2 APV Ernesto Gunther Trinchera 05	206
Figura J.12: Prueba de campo PC-3 APV Ernesto Gunther Calicata C-2.....	207
Figura J.13: Prueba de campo PC-4 Los Rosales C-5 Calicata C-1	207
Figura J.14: Prueba de campo PC-5 APV Tres Cruces Calle Huaynacapac –Calicata 2	208
Figura J.15: Prueba de campo PC-6 APV Dignidad Nacional nivel de subrasante...	209
Figura J.16: Prueba de campo PC-7 APV Dignidad Nacional nivel de cimentación .	209

LISTA DE SÍMBOLOS

- a = Aceleración equivalente.
- A = Área de la sección transversal.
- A_1 = Área de la sección transversal de un penetrómetro 1.
- A_2 = Área de la sección transversal de un penetrómetro 2.
- A = Pendiente del grafico altura de caída H contra penetración permanente e .
- b = Factor de simplificación para expresar la formula general de hinca, que considera las pérdidas por la caída de la maza y el tipo de choque o transición y amortiguamiento.
- c = Factor que considera las deformaciones elásticas de la sonda y el suelo.
- c' = Deformación elástica del penetrómetro.
- C_r = Compacidad relativa, usualmente dada como porcentaje.
- $C.V.$ = Coeficiente de variación.
- C = Factor que resume las variaciones en las deformaciones elásticas en el ensayo DPL.
- D_r = Densidad relativa, usualmente dada como porcentaje.
- e = Penetración promedio por golpe o deformación permanente.
- e' = Distancia que se restituye la sonda y el suelo después de cada golpe.
- e_1 = Deformación elástica temporal del suelo y del equipo.
- $e_{máx}$ = Relación de vacíos del suelo en la condición más suelta.
- $e_{mín}$ = Relación de vacíos del suelo en la condición más densa.
- e = Relación de vacíos *in situ* del suelo.
- E = módulo de elasticidad o módulo de Young.
- E_{Yunque} = Energía medida debajo del yunque en el ensayo SPT.
- F = Fuerza actuante.
- F_a = Fuerza por la fricción-empuje del aire.
- F_c = Fuerza de compresión en el equipo DPL.
- F_{fg} = Fuerza por la fricción maza-guía.
- F_i = Fuerza resultante que genera el movimiento en el plano inclinado.
- F_r = Fuerza de fricción en el plano inclinado.
- F_R = Fuerza resultante que mueve la maza.
- g = Aceleración de la gravedad.

- g_0 = Aceleración de la gravedad normalizada internacionalmente, que corresponde a la latitud 45.5° y a 0 m.s.n.m. (9.80665 m/s²).
- G_c = Grado de compactación.
- h_r = Altura de rebote de un cuerpo.
- h_{rp} = Altura de rebote promedio de la maza, en un intervalo de conteo del número de golpes.
- h = Altura de caída de un cuerpo cualquiera.
- H = Altura teórica de caída de la maza o martinete.
- H_0 = Altura mínima de caída de la maza, no produce deformación plástica o permanente en el suelo.
- H_1 = Altura de caída del martinete en un penetrómetro 1.
- H_2 = Altura de caída del martinete en un penetrómetro 2.
- H_p = Altura de caída promedio durante la ejecución del ensayo DPL.
- H_r = Altura real de caída.
- I = Momento de inercia de la sección transversal del varillaje.
- k_1 = Factor de reducción de energía por la caída de la maza.
- k_2 = Factor que relaciona las deformaciones elásticas del penetrómetro con la deformación elástica del suelo-penetrómetro.
- k_3 = Factor de pérdida de energía debida al tipo de choque.
- k_c = Factor de reducción de la gravedad, para obtener la fuerza resultante.
- k_H = Coeficiente que relaciona la altura promedio y la altura teórica, dependiendo del operador.
- K = Constante de proporcionalidad del resorte o del elemento elástico.
- L = Longitud del elemento elástico en la dirección de la fuerza actuante.
- L = Longitud del Varillaje.
- m = Masa de una partícula o cuerpo.
- m_1 = Masa de un cuerpo 1.
- m_2 = Masa de un cuerpo 2.
- m_3 = Masa de un cuerpo 3.
- m_A = Masa de la partícula A.
- m_B = Maza de la partícula B.
- m_M = Maza de la maza o martinete.
- m_p = Maza del cuerpo del penetrómetro (guía, yunque y sonda)..
- M = Peso de la maza o martinete.

- n = Coeficiente de restitución.
- N = fuerza normal o perpendicular al plano inclinado.
- N_{60} = Número de golpes necesarios para penetrar una distancia de 30 cm con el equipo estandarizado SPT, que se corrigen por factores de eficiencia, longitud y diámetro de perforación.
- N = Número de golpes para una penetración Δh .
- N_1 = Número de golpes de un penetrómetro 1.
- N_2 = Número de golpes de un penetrómetro 2.
- N_{10} = Número de golpes por cada 10 cm.
- N_{10}' = Número de golpes por la distancia de conteo Δh (DPL).
- $N_{10-equiv}$ = Número de golpes equivalente para $H= 50$ cm que representa la resistencia promedio de los ensayos DPL aplicados con diferente altura de caída de la maza.
- P = Peso del cuerpo del penetrómetro (guía, yunque y sonda).
- Pf = Profundidad de inspección del ensayo DPL.
- q_c = Termino de la punta estático (Esfuerzo).
- q_d = Termino de la punta dinámico (Esfuerzo).
- Q_0 = Energía básica de penetración, (Energía/Volumen).
- Q_{01} = Energía básica de penetración de un penetrómetro 1.
- Q_{02} = Energía básica de penetración de un penetrómetro 2.
- Q_{0-DPL} = Energía básica del ensayo DPL, (Energía/Volumen).
- Q_{ESP} = Energía específica del ensayo de penetración dinámica por golpe, (Energía/Volumen).
- Q_{ESP1} = Energía específica de un penetrómetro 1.
- Q_{ESP2} = Energía específica de un penetrómetro 2.
- r = Desplazamiento de la fuerza F .
- r_{DPL} = Radio de giro de las varillas del equipo DPL.
- r_{SPT} = Radio de giro de las varillas del equipo SPT.
- R = Compactación relativa.
- R_0 = Compactación relativa inicial o mínima.
- R^2 = Coeficiente de determinación.
- R_d = Resistencia dinámica del suelo (Fuerza).
- S = Desviación estándar
- t = Tiempo.
- t_0 = Instante inicial de la caída de un cuerpo.

- T = Energía cinética de una partícula o cuerpo.
- T' = Energía cinética que llega debajo del yunque.
- T_1 = Energía cinética de una partícula en un punto 1.
- T_2 = Energía cinética de una partícula en un punto 2.
- U = Trabajo de la Fuerza F .
- U_{1-2} = Trabajo de fuerzas externas del punto 1 al 2.
- U_s = Trabajo de fuerzas de reacción del suelo durante el ensayo DPL.
- U_{M+P} = Trabajo máximo del equipo DPL por acción de la gravedad.
- v = Velocidad de desplazamiento de una partícula o cuerpo.
- v_A = Velocidad antes del choque de la partícula A.
- v_B = Velocidad antes del choque de la partícula B.
- v_M = Velocidad antes del choque de la maza o martinete.
- v_P = Velocidad antes del choque del cuerpo del penetrómetro.
- v'_A = Velocidad después del choque de la partícula A.
- v'_B = Velocidad después del choque de la partícula B.
- v'_M = Velocidad después del choque de la maza o martinete.
- v'_P = Velocidad después del choque del cuerpo del penetrómetro.
- V = Volumen.
- V_e = Energía potencia debida a la fuerza elástica.
- V_{e0} = Energía potencia elástica inicial del suelo y del equipo DPL.
- V_{eF} = Energía potencia elástica final del suelo y del equipo DPL.
- V_g = Energía potencia debida a la fuerza de gravedad.
- $w\%$ = Contenido de humedad.
- W = Peso de una partícula o cuerpo ($m. g$).
- W_1 = Peso del martinete de un penetrómetro 1.
- W_2 = Peso del martinete de un penetrómetro 2.
- W_n = Componente normal del peso.
- W_t = Componente tangencia del peso.
- x = Deformación del elemento elástico (energía potencial elástica).
- y = Distancia del nivel de referencia al punto (energía potencia debido a la gravedad).
- Y = Desplazamiento vertical de un cuerpo.
- Y_0 = Posición inicial de un cuerpo antes de iniciar la caída.
- Y_c = Posición de la maza antes de soltarla.
- Y_y = Posición de la maza antes de despegarla del yunque.

α = Factor de transición entre la energía cinética sobre el yunque y debajo del yunque.

γ_d = Peso específico seco (en una relación de vacíos de e).

$\gamma_{d(campo)}$ = Peso específico seco *in situ* (en una relación de vacíos de e).

$\gamma_{d(máx)}$ = Peso específico seco en la condición más densa (en una relación de vacíos de $e_{mín}$).

$\gamma_{d(máx-lab)}$ = Peso específico seco máximo determinado en laboratorio por la prueba de Proctor estándar o Proctor modificado.

$\gamma_{d(mín)}$ = Peso específico seco en la condición más suelta (en una relación de vacíos de $e_{máx}$).

δ = Alargamiento o elongación longitudinal de un elemento.

Δ_0 = Deformación elástica inicial del suelo y el equipo DPL.

Δh = Distancia de conteo.

Δh_1 = Distancia de conteo para un penetrómetro 1.

Δh_2 = Distancia de conteo para un penetrómetro 2.

ΔH_1 = Variación 1 de la altura de caída.

ΔH_2 = Variación 2 de la altura de caída.

Δ_F = Deformación elástica final del suelo y el equipo DPL.

ΔF = Factor de simplificación para representar la variación de la reacción del suelo respecto al peso del equipo DPL.

ΔN_{10-1} = Variación del número de golpes N_{10} causada por un ΔH_1 .

ΔN_{10-2} = Variación del número de golpes N_{10} causada por un ΔH_2 .

ΔT = Variación o pérdida de la energía cinética.

ΔV = Variación en la energía potencial elástica en el ensayo DPL.

ϵ = Deformación unitaria.

η = Factor de amortiguamiento de la energía cinética en el varillaje.

η_1 = Eficiencia del impacto del martillo en el ensayo SPT.

η_3 = Eficiencia energética del ensayo SPT.

θ = Ángulo de inclinación del plano respecto a la horizontal.

μ = Coeficiente de fricción dinámico del plano inclinado.

μ_0 = Coeficiente de fricción de la maza con la guía en caída vertical.

μ_a = Coeficiente de fricción-empuje de la maza con el aire.

σ = Esfuerzo axial.

**CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN
AL PROBLEMA
DE LA
INVESTIGACIÓN**

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, entre las técnicas de investigación de campo más usadas están los ensayos con penetrómetros dinámicos, que son realizados en la mayoría de los estudios de mecánica de suelos a nivel mundial y la ciudad del Cusco no es la excepción.

Uno de éstos es la auscultación con penetrómetro dinámico ligero de punta cónica o también conocido como DPL (*Dynamic Probing Light*) (NTP 339.159, 2001), que es una de las técnicas más económicas y fáciles de usar por su tamaño, robustez, alcance y rápida interpretación; pero sin duda el ensayos de penetración dinámica más conocido es el SPT (*Standard Penetration Test*) (MTC E 119, 2000), que ha sido y es objeto de muchas investigaciones internacionales, obteniéndose de éstas varias relaciones empíricas para aproximar los parámetros de resistencia y deformación del suelo a partir de su número de golpes N_{60} ¹.

El DPL, así como otros equipos similares se crean con la intención de querer hacer más ejecutables los ensayos de penetración, ya que equipos como el SPT, el cono de Peck, los penetrómetros estáticos u otros similares son muy pesados y costosos.

Por mucho tiempo, lo que se ha buscado es correlacionar el número de golpes por la distancia de conteo de los penetrómetros dinámicos con el N_{60} , con la intención de usar las fórmulas desarrolladas para el SPT y así obtener los parámetros del suelo.

Esta correlación se hace generalmente comparando la energía específica² del penetrómetro dinámico y del SPT, obteniendo así un factor de conversión que transforma el número de golpes obtenido con este equipo a N_{60} , por esto, el uso de los penetrómetros dinámicos y en este caso del DPL, se extendió rápidamente y de forma descontrolada, llegando a usarse para los estudios de mecánica de suelos de casi todo tipo de estructura y en muchos casos es el único ensayo que se aplica, lo que resulta en una práctica muy riesgosa e inaceptable por las normas peruanas y la ética profesional.

¹ Número de golpes necesarios para penetrar una distancia de 30 cm con el equipo estandarizado SPT, que se corrigen por factores de eficiencia, longitud y diámetro de perforación (Montañez Tupayachi, 2011).

² La energía de sondeo por unidad de área de la sección por golpe del penetrómetro (ESOPT, 1974, pág. 74).

Aunque el SPT este ampliamente investigado, no ocurre lo mismo con el DPL, así como con la correlación por energía específica, que tiene muchas limitaciones que no se están tomando en cuenta, lo que ocasiona una distorsión en los supuestos parámetros que se obtienen del suelo.

Para poder entender las falencias de la energía específica se tiene que recurrir a una formulación más general como la *fórmula general* (Bolomey Frazer, 1971, pág. 977) de hincas, en la cual se plantea la existencia de factores de pérdida de energía por la caída de la maza, por deformaciones elásticas y por el tipo de choque (Bolomey Frazer, 1971, pág. 978), así como otros parámetros que influyen en la energía final del equipo, pero se ignoran, muchas veces por desconocimiento o falta de investigación.

A pesar de que sea notorio que las dimensiones del equipo DPL, variaciones en la altura de caída, el tipo de choque son diferentes durante el ensayo, solo se toma en cuenta el número de golpes por cada 10 cm, y en muchos estudios de mecánica de suelos se pretende correlacionar este dato con los parámetros de resistencia del suelo.

Por tales motivos, la teoría que supuestamente valida al DPL no está bien estudiada, ya que requiere evaluar varios parámetros como los factores de pérdida de energía, que no se están tomando en cuenta durante el ensayo por ser impracticables y de carácter regional (se deben validar en cada zona) lo que hace desconfiar de los resultados obtenidos, haciendo que este equipo solo sirvan de referencia.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El problema es, la falta de estudio de los parámetros que estén relacionados con las características del suelo y de los equipos, como los factores de pérdida de energía de la fórmula general de hincas, lo que hace desconfiar de los resultados del DPL, así como de los demás penetrómetros dinámicos.

Como el DPL se usa en la ciudad del Cusco sin aplicar estos los factores de pérdida de energía, surge la siguiente pregunta:

¿Tienen el DPL y los suelos diferentes coeficientes de pérdida de energía relacionados a la fórmula general de hincas que influyan en forma significativa en los resultados obtenidos en este ensayo?

1.3. HIPÓTESIS

“El DPL y los suelos donde se aplica tienen distintos coeficientes de pérdida de energía relacionados a la fórmula general de hinca que influyen en forma significativa en los resultados del ensayo”.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Definir y correlacionar los coeficientes de pérdida de energía de la fórmula general de Hinca con el DPL, el tipo de suelo y su compactación, para mejorar la confiabilidad de los resultados.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir y cuantificar la pérdida de energía la caída de la maza del equipo.
- Definir y cuantificar el tipo de choque que se produce entre la maza y el yunque, en distintos tipos de suelos, con compactaciones diferentes y distintas profundidades.
- Definir y cuantificar las deformaciones elásticas que se producen en la interacción suelo-punta, en distintos tipos de suelos, con compactaciones diferentes y distintas profundidades.

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación es necesaria porque la problemática actual de los ensayos de penetración dinámica en el Cusco así lo requiere y para poder mejorar la percepción de los profesionales ante los resultados que se puedan obtener de este ensayo.

Las razones por las que se realiza esta investigación, así como los beneficios que podrá generar, son diversos, los cuales se explican según los distintos puntos de vista de la ingeniería.

Desde el punto de vista práctico; la razón por la cual se estudia el ensayo DPL, es porque, es bastante simple, rápido de aplicar y da bastante información referencial de como es el suelo antes de empezar las excavaciones y los muestreos (Fernandez Baca, 2011) lo que hace de este equipo uno de los más prácticos.

Desde el punto de vista teórico-científico; esta tesis muestra un modelo teórico más general del fenómeno que representa al ensayo DPL, aplicando teorías bien fundamentadas y pruebas en laboratorio, lo que permitirá definir los parámetros necesarios para hallar la resistencia dinámica del suelo (R_d) (Bolomey Frazer, 1971) en forma teórica y con esto obtener una interpretación más real de este ensayo, abriendo las puertas a futuras investigaciones sobre el tema.

Desde el punto de vista metodológico; con los resultados de esta tesis, se pueden plantear mejoras a los procedimientos de cómo se desarrolla este ensayo para garantizar que los resultados representen mejor la realidad del terreno.

Desde el punto de vista económico; estudiar un ensayo tan simple de aplicar como el DPL, nos permite mantener el bajo costo de su aplicación, usarlo con mayor amplitud y confianza como ensayo complementario en los estudios de mecánica de suelos, haciéndolos más accesibles a la población del Cusco.

Es de resaltar que con este ensayo se puede llegar a zonas profundas sin incrementar el costo, obteniendo datos de suelos inaccesibles al muestreo inalterado, lo que con otros procedimientos resultaría más costoso.

Desde el punto de vista tecnológico, con este estudio se abren las puertas a las mejoras en la fabricación de este equipo, la aplicación de elementos electrónicos y programas de cómputo, que pueden ser tomados en cuenta por la normativa que rige este ensayo.

Los beneficiarios de este estudio son claramente los constructores y consultores de ingeniería civil de esta ciudad, que podrán dejar de ver a los penetrómetros dinámicos, en este caso particular al DPL como equipos que sirve para todo y no cuesta mucho, y empezar a verlo como lo que en verdad es, un equipo que da valores estimados de como es el suelo y no reemplaza a los ensayos de laboratorio.

Los usuarios de esta investigación son todos los profesionales geotecnistas que podrán tener datos de este equipo que les servirá para mejorar su aplicación y realizar sus propios estudios dependiendo del tipo de penetrómetro que usen.

Por estas razones tener un equipo de DPL con más estudios permitirá mantener vigente este ensayo, que tiene ventajas en comparación a otras técnicas de investigación de campo.

1.6. LIMITACIÓN DEL PROBLEMA

Para hacer factible esta investigación, solo se estudia el DPL, aunque durante el desarrollo se ponen de ejemplo algunas comparaciones con otros equipos, la información relevante trata de este equipo, buscando generalizarla para sus similares.

Solo se analiza la pérdida de energía en este equipo por parámetros de tipo de choque, fricción y elasticidad de los materiales, pero se trata de comentar otros fenómenos presentes que puedan ser relevantes, tomando como base la fórmula general de Hinca y los principios de la física clásica.

Se resalta que no es propósito de esta tesis hacer una comprobación directa del valor R_d , sino en base a las formulaciones teóricas hacer una estimación de como varia este valor al aplicar el ensayo del DPL.

Aunque es un problema que compete a toda la ciudad del Cusco, los estudios se realizaron en zonas a las que se tuvo acceso consentido, con estudios de suelos ya hechos o por hacer durante el desarrollo de esta investigación.

Para evitar distorsiones por presencia de materiales gravosos, esta investigación se desarrolló en su mayor parte en suelos arenosos, siendo el que más resalta la arena limosa de símbolo SM (clasificación SUCS), también se excluyó los suelos con presencia de agua (sin nivel freático apreciable), ya que no se cuenta con los equipos apropiados para poder cuantificar la incidencia del agua en los ensayos.

Para poder relacionar los parámetros de pérdida de energía con el suelo consideramos la clasificación SUCS y la compacidad relativa natural de estos, para no generar demasiadas variables de análisis.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. BREVE RESEÑA HISTÓRICA DEL PENETRÓMETRO

Sanglerat (1967, pág. 19), en su obra *El Penetrometro y el Reconocimiento de los Suelos*, relata que;

Muy en los principios de la moderna mecánica de los suelos, se llamaba “*cône test*” a un ensayo de laboratorio realizado por medio de un cono con un ángulo en el vértice de 90°, colocado y cargado sobre la muestra puramente cohesiva que se trataba de ensayar.

De este ensayo se obtenía un valor denominado resistencia al cono del cual se podía estimar la cohesión de la muestra (Sanglerat, 1967, pág. 19). Posteriormente;

En 1902 se marcó una etapa decisiva para los sondeos de reconocimiento, fue cuando Charles R. Gow introdujo el método de toma de muestras en seco en lugar del sistema de chorro hidráulico. Gow utilizaba un tubo de una pulgada de diámetro hincado por golpe con una maza de 110 libras (50 kg). En 1922, la Compañía Charles R. Gow pasó a ser un departamento de la Raymond Concrete Pile, donde Linton HART y Gordon A. FLETCHER pusieron a punto, a partir de 1927, un tomamuestras de 2 pulgadas de diámetro, abierto longitudinalmente, que fue conocido más tarde bajo el nombre de Standard Penetration Test (Sanglerat, 1967, pág. 9).

En 1917, los Ferrocarriles del Estado, en Suecia, normalizan un método todavía vigente, que consiste en hacer penetrar una varilla de 19 mm de diámetro con una serie de cargas sucesivas (Sanglerat, 1967, pág. 20). “Según GODSKESEN, parece que el primer penetrómetro de bolsillo... fue puesto a punto en febrero de 1931 por los Ferrocarriles Daneses, en Copenhague” (Sanglerat, 1967, pág. 20) y “Los primeros ensayos realizados con un verdadero penetrómetro datan del período 1932-1937” (Sanglerat, 1967, pág. 21).

En 1946 el laboratorio de Mecánica de Suelos de Delft y Goudsche Machinenfabriek de Gouda pusieron a punto el penetrómetro manual holandés de 2.5 t,... Mas tarde, en 1948 se puso a punto un aparato manual de 10 toneladas... Estos aparatos habían sido utilizados respectivamente desde 1936 y 1935 por el Laboratorio de Mecánica de Suelos de Delft (Sanglerat, 1967, pág. 22).

Esto generó la aparición de diversos tipos de penetrómetros estáticos que permiten medir en forma directa la reacción de la punta y el rozamiento lateral (la penetración se realiza por medio de gatos hidráulicos a velocidades de 20 a 40 cm/min) (Sanglerat, 1967, pág. 22).

Con el mismo principio del *Standard Penetration Test*, se empezaron a desarrollar los Penetrómetros Dinámicos, generalmente usados para identificar las capas de suelos

blandos y duros (Sanglerat, 1967, págs. 15-18), que consistían en “un cabrestante ligero, de una pequeña cabria metálica, de una maza, de un yunque y de varillas de sondeo que se atornillan unas en otras” (Sanglerat, 1967, pág. 15), que generalmente usan una punta cónica.

A principios del año 1970 el Ingeniero Roberto Michelena diseñó un cono (DPT 70) que lo denomina Cono de Peck por la publicación *Foundation Engineering* hecha por Peck, R.; Hanson, W. y Thornburn, T. en 1953 (Olivares & Ramírez, 2012).

Las pruebas de Penetración Dinámica fueron aprobadas por el Comité Técnico de Pruebas de Penetración de Suelos de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, de acuerdo con la Sociedad Sueca de Geotecnia y el Instituto Sueco de Geotecnia (1989) (Atala, 2011, pág. 70).

El 17 de junio del 2001, es oficializado el método de ensayo normalizado para la auscultación con penetrómetro dinámico ligero de punta cónica (DPL) con la Norma Técnica Peruana NTP 339.159:2001 (NTP 339.159, 2001, pág. ii). Pero los ensayos de penetración dinámica no miden directamente la resistencia de la punta, mucho menos la fricción lateral (Sanglerat, 1967, pág. 16), siendo esta su principal limitante.

Con la aparición de sensores de fuerza electrónicos, acelerómetros, celdas de carga y otros, los penetrómetros se empiezan a mejorar, con la intención de obtener más confianza en los datos; como prueba de esto alrededor de 1990 se origina en Francia el penetrómetro ligero PANDA (*Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté*) que hoy en día es muy usado en más de 45 países de todo el mundo (Obras urbanas, 2010, pág. 108).

Estas mejoras también afectaron a la auscultación semi-estática con el cono holandés, variando los manómetros que registraban la presión en la celda hidráulica por traductores de esfuerzo de celdas de carga eléctricas, también se le implementaron sensores para poder medir presión de poros, resistividad, vibración y otros, dando mayor versatilidad al ensayo (Atala, 2011, págs. 98-106).

Hoy en día los penetrómetros se siguen usando en todo el mundo por su capacidad de ingresar a zonas donde otros ensayos no pueden y dar información directa de cada zona de control.

2.1.2. RESUMEN DE LAS CONCEPCIONES TEÓRICAS

Desde sus orígenes (inicios del siglo XX) el penetrómetro ha sido un equipo que ha inquietado a los geotecnistas, los cuales en sus intentos de querer hacer más útil estos ensayos llegaron a desarrollar muchas teorías.

Como se mencionó en el ítem anterior se puede afirmar que existen dos tipos de penetrómetros; los estáticos y los dinámicos, cada uno de estos tiene sus propios fundamentos y características particulares.

Los penetrómetros estáticos son los que más se han estudiado por tener más confianza en la toma de datos por realizar la medición de la resistencia de la punta y la fricción lateral en forma directa.

Como un penetrómetro no es más que un pilote en escala pequeña, grande es la tentación de usar la teoría de capacidad portante de pilotes para interpretar su comportamiento, aunque las investigaciones demostraron lo contrario (Cassan, 1982, pág. 109).

Una de las primeras modificaciones a esta teoría fue planteada por l'Herminier, que plantea todo un sistema de ruptura

del suelo granular y reduce el valor del ángulo de fricción para su interpretación (Cassan, 1982, pág. 110; Sanglerat, 1967, pág. 97), también se hicieron investigaciones posteriores como las del Profesor De Beer, de Bérézantzev (Cassan, 1982, págs. 115-122) y la teoría de Kerisel (Sanglerat, 1967, págs. 110-119), que demostraron la complejidad del fenómeno, pero en general todas estas, buscan

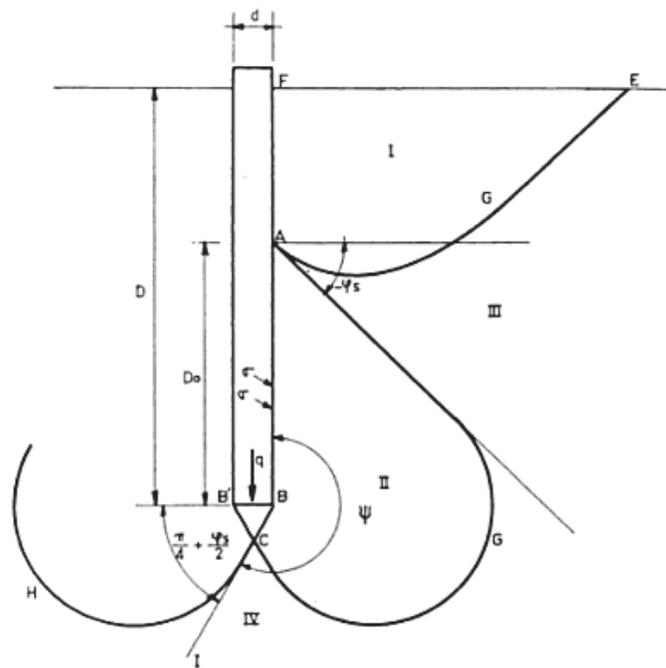


Figura 1: Líneas de ruptura bajo un penetrómetro, según l'Herminier
Fuente: Los Ensayos "In Situ" en la Mecánica del Suelo, Maurice Cassan (1982, pág. 111)

relacionar la resistencia de la punta y la fricción lateral obtenidas de los ensayos de penetración estática, con los parámetros de resistencia del suelo (Cassan, 1982).

En el caso de los penetrómetros dinámicos (que es el caso del DPL), las investigaciones se desarrollaron en torno de obtener en forma indirecta la resistencia de la punta y posteriormente correlacionarla con los parámetros de resistencia del suelo.

En cuanto a la obtención indirecta de la resistencia de la punta, son muchas las fórmulas que se desarrollaron para este fin, a las que se les conoce con el nombre de *fórmulas de hinca dinámica* (Coll Alas, 1972, pág. 225), como ejemplos ponemos la fórmula de Hiley, la formula holandesa, *Engineering news* y la formula de Brix. También se realizaron investigaciones respecto a la eficiencia de la energía mecánica en el ensayo del SPT y correlaciones entre penetrómetros dinámicos.

La interpretación de la resistencia dinámica del suelo es más compleja por ser un fenómeno dinámico, pero es posible que exista una correlación entre los valores del penetrómetro dinámico y estático (Figura 2)¹, siempre y cuando se considere solo una fórmula dinámica para el cálculo de q_d^2 (Cassan, 1982, pág. 444), lo que nos permitiría aprovechar las investigaciones hechas para los penetrómetros estáticos, aunque una mejor interpretación de este fenómeno dinámico está dado por la teoría de colapso de poros (*Pore Collapse Theory*) (Rahim, Prasad, & George, 2004, pág. 1756).

Por la complejidad de la teoría de los penetrómetros, han surgido diferentes correlaciones empíricas que correlacionan los parámetros de resistencia del suelo y el número de golpes de un penetrómetro específico, y el más conocido de estos casos es el SPT (Cassan, 1982, págs. 161-165; Sanglerat, 1967, págs. 144-149; Atala, 2011, págs. 116-133).

¹ El cálculo de q_d se realiza con la formula holandesa.

² q_d es la reacción del suelo a la penetración dinámica en términos de esfuerzo, en la Figura 2 se muestra en MPa y q_c es la reacción del suelo a la penetración estática, pero corresponde solo al área de la punta, en la Figura 2 también se muestra en MPa. 1 Mpa es 10.197 kgf/cm².

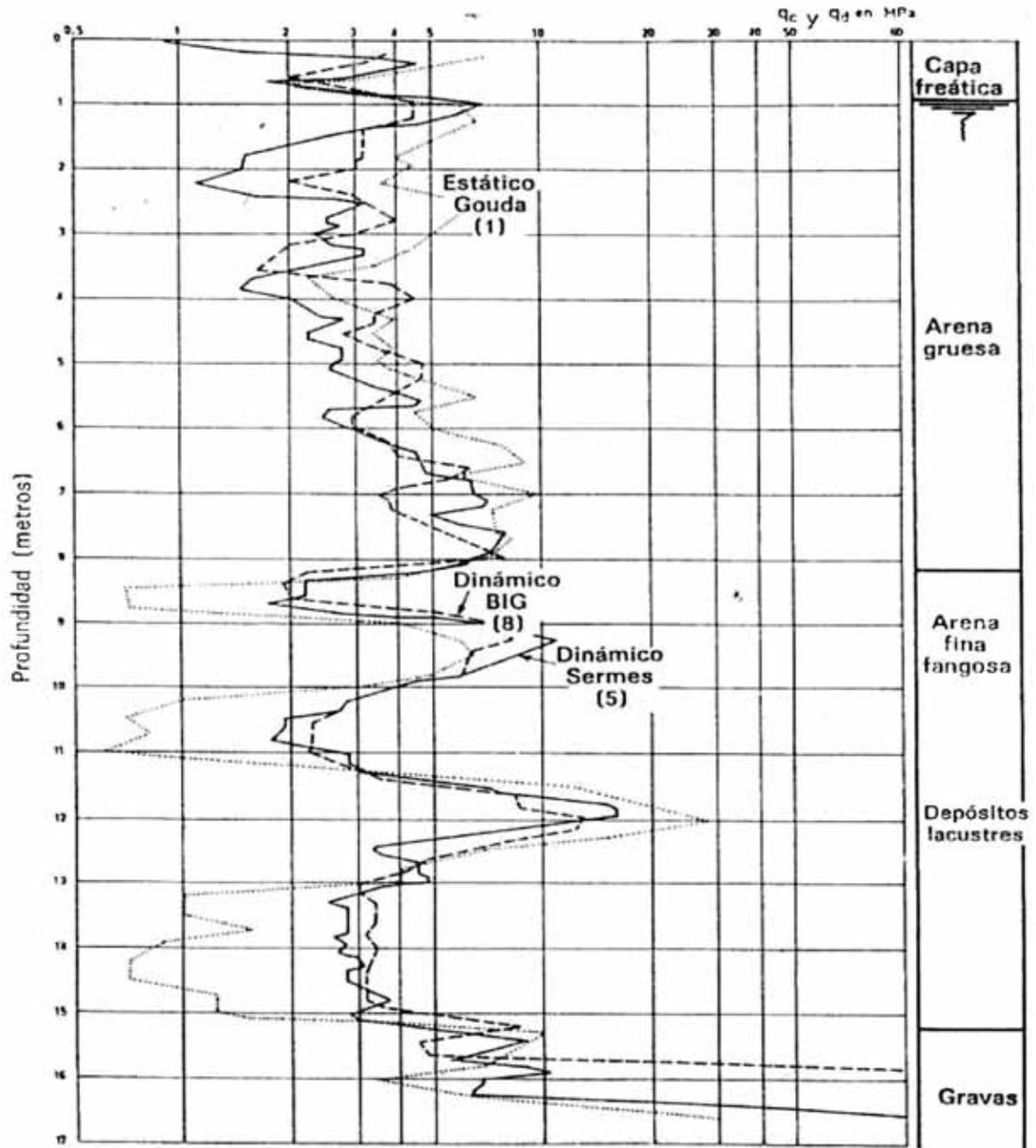


Figura 2: Comparación de los ensayos de penetración estática y dinámica
Fuente: Saint Cyprien Plage citado en Los Ensayos "In Situ" en la Mecánica del Suelo, Maurice Cassan (1982, pág. 457)

2.1.3. ANTECEDENTES MÁS RELEVANTES

PRIMERO

H. Bolomey Frazer – Ingeniero E.P.F.L. – Director Técnico de Geoexperts, S.A (1971), realizo el artículo *Formulas de Hinca Dinámica*, publicado en la Revista de Obras Públicas (España), en el cual se expone las diferentes fórmulas dinámicas que se usan para los ensayos de penetración, fundamentándolas en la energía cinética y las pérdidas que se generan durante el ensayo, afirmando que la principal diferencia de estas fórmulas son los factores de correcciones por pérdida de energía. También menciona que, estas dan valores parecidos de resistencia teórica del terreno para hincas superiores a 2 cm, pero para pequeñas hincas los valores se incrementan rápidamente llegando al infinito, haciendo que la resistencia del terreno dependa de la formula usada y no de su resistencia real, así que en base a un análisis teórico y a diferentes experiencias recomienda el uso de una formula semiempírica con una solución gráfica, llegando a las siguientes conclusiones:

1. La fórmula general o de Hiley $[R_d = (M.H)/(e + c). (1 + n^2.a)/(1 + a); a = P/M]$ permite calcular, a base de la hinca dinámica de un penetrómetro o de un pilote, la resistencia del terreno a la hinca estática de una puntaza cónica o la fuerza portante del pilote. En esta fórmula entra en consideraciones la mayor parte de los datos que influyen sobre la penetración de la pieza golpeada. Basada sobre consideraciones teóricas, contiene factores de corrección cuyos valores se determinan por experiencia. La fórmula de Hiley es, por tanto, una serie teórica, empírica.
2. Si se comprueban los valores de hinca dinámica, calculada con el ábaco [Figura 3] y los valores medidos con el penetrómetro estático, se observa que las primeras son iguales o inferiores a las segundas, y son más correctas. En efecto, la presencia de elementos gruesos en el terreno falsifica el resultado de los penetrómetros estáticos que dan entonces valores demasiado altos. Se recomienda, por tanto, el empleo del penetrómetro dinámico para terrenos que tienen resistencia a la penetración, comprendida entre 10 y 200 Kg/cm²¹.
3. En cuanto a la hinca de pilotes, el ábaco [Figura 4] da, a veces, valores erróneos de la carga de rotura, motivo por el cual el coeficiente de seguridad a emplear varía según el terreno y el tipo de pilote hincado.
4. La carga admisible sobre el terreno no depende solamente de la resistencia del terreno, sino igualmente de las características de la construcción, en particular de las deformaciones admisibles debido a los asientos diferenciales. Para cargas elevadas, construcciones rígidas y cimentación de maquinaria es imprescindible determinar estos asientos mediante ensayos de laboratorio.

¹ 1 kg/cm² = 1 kgf/cm² = 98066.5 N/m², aunque los valores parezcan muy altos al compararlos con la capacidad portante del suelo de cimentación, se debe recordar que la carga aplicada es prácticamente puntual y dinámica, describiendo un mecanismo de falla muy diferente.

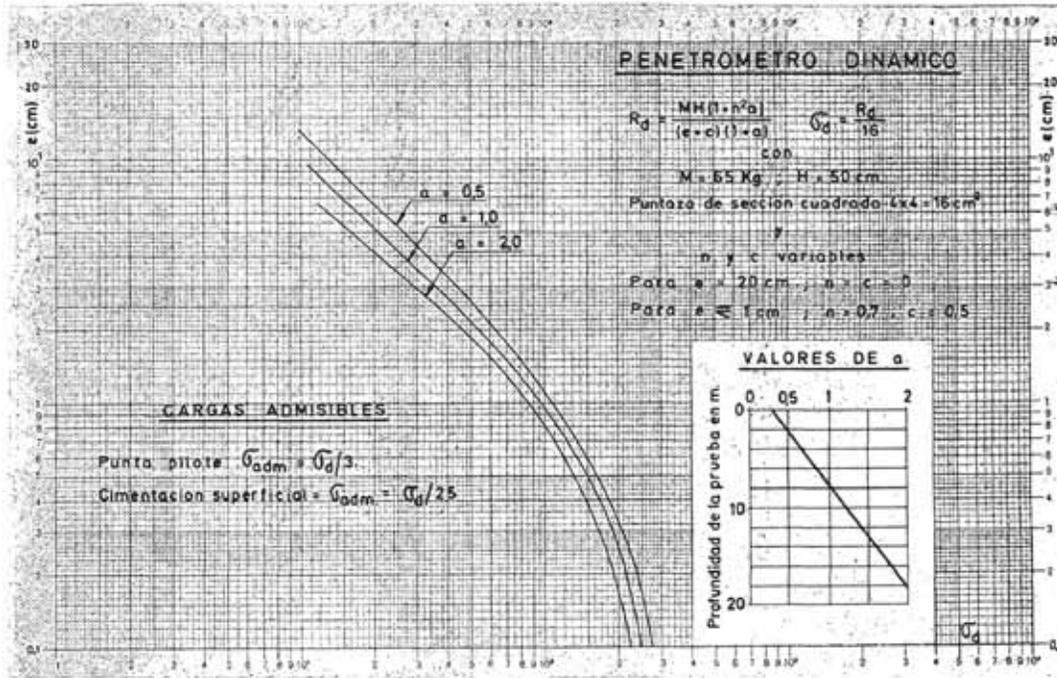


Figura 3: Abaco que da la resistencia unitaria del terreno en base a un penetrómetro pesado según la fórmula de Hiley
 Fuente: Formulas de Hincia Dinámica, H. Bolomey Frazer (1971, pág. 980)

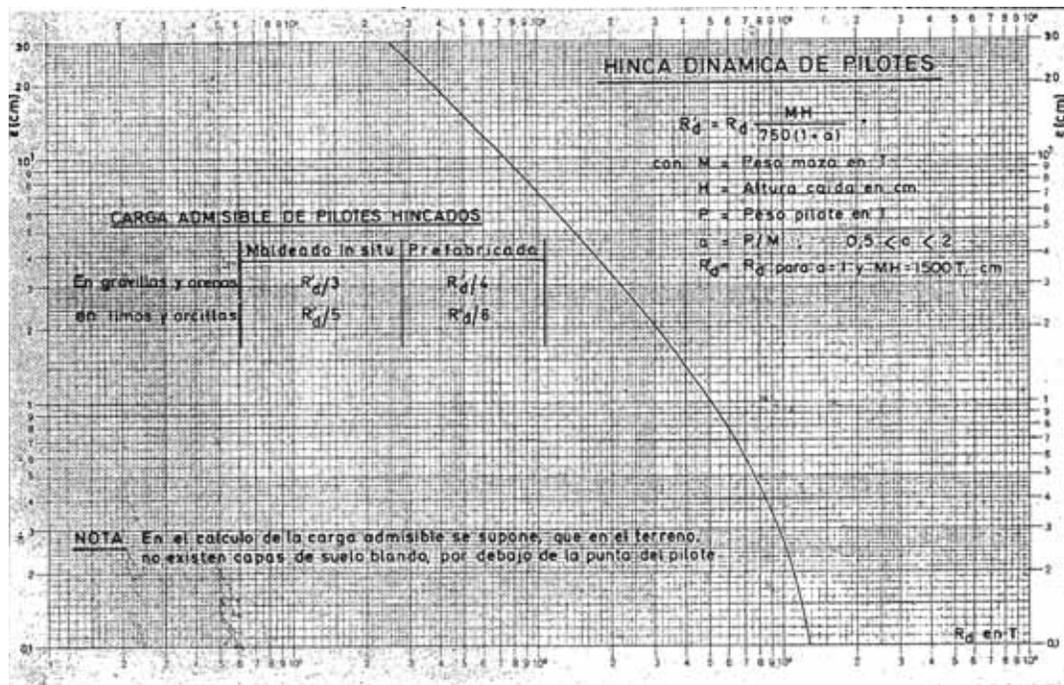


Figura 4: Abaco que da la fuerza portante de un pilote según la fórmula de Hiley
 Fuente: Formulas de Hincia Dinámica, H. Bolomey Frazer (1971, pág. 981)

Este antecedente es importante porque muestra la importancia de un análisis semiempírico para poder describir el fenómeno de la hinca dinámica.

SEGUNDO

C. M. Morgano y R. Liang (1992), realizaron la investigación titulada *Energy Transfer in SPT – Rod Length Effect* (Transferencia de Energía en SPT – Efecto de la Longitud del Varillaje), publicada en la revista *Application of Stress-Wave Theory to Piles*, en la cual se estudia y cuantifica la influencia de la longitud del varillaje en la transferencia de energía en el SPT (USA), usando un acelerómetro colocado debajo del yunque y programas informáticos basados en la ecuación de la onda, en esta investigación llegan a las siguientes conclusiones (texto original en inglés):

1. La curva mostrada en la... [Figura 5] sugiere que la energía transferida es independiente de la longitud del varillaje para longitudes mayores de aproximadamente 50 pies (15,2 m). Sin embargo, para varillajes de longitudes más cortas de 50 pies (15,2 m), la energía transferida al varillaje se reduce. Esta reducción no es lineal y es más predominante con longitudes de varillaje que van desde 10 (3,05 m) a 30 pies (9,15 m).
2. Basándose en los resultados del estudio del análisis de la ecuación de onda y resultados de las pruebas de campo, se concluye que la longitud del varillaje afecta a la energía transferida al varillaje incluso después de considerar todos los impactos posteriores, y que la energía se reduce para longitudes más cortas del varillaje. Debido a que la energía necesaria para conducir el tomamuestras en el suelo se reduce, resulta un aumento del número de golpes de campo debe modificarse para tener en cuenta las eficiencias de transferencia más bajas para diferentes longitudes del varillaje.
3. Utilizando la curva de la... [Figura 5], una relación fue desarrollada por el trazado de la diferencia porcentual en la eficiencia de transferencia (con respecto a la eficiencia de la transferencia de una longitud de la barra de 50 pies (15,2 m)) frente a longitud del varillaje como se muestra en la... [Figura 6]. La curva de la... [Figura 6] indica el factor de modificación a aplicar, requerido para considerar la reducción de la eficiencia de transferencia. El factor de corrección es de 1,0 para las longitudes de barra de más de 50 pies (15,2 m), donde la eficiencia de transferencia se mantiene constante. El valor del campo "N" (N_f) podría entonces ser modificada por el factor de corrección apropiado N_c/N_f , donde N_c es el valor "N" modificado o corregido por longitud del varillaje.
4. En conclusión, en la actualidad los transductores de deformación y acelerómetros disponibles permiten mediciones dinámicas precisas y fiables que pueden ser utilizados para mejorar las evaluaciones de rendimiento del martillo del SPT. En este estudio, se utilizaron estas mediciones dinámicas para desarrollar una relación entre la eficiencia de transferencia y longitud del varillaje en las pruebas SPT. Esta relación resultó en factores de modificación que podrían utilizarse para corregir las medidas del conteo de golpes en campo por longitud del varillaje.

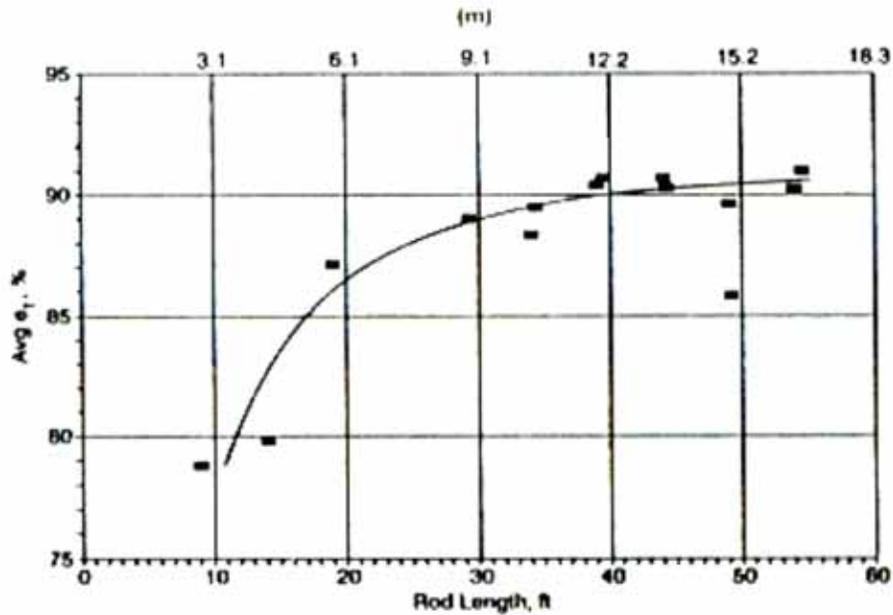


Figura 5: Promedio de la eficiencia de transferencia, e_t (%), contra la longitud del varillaje (pies y metros)

Fuente: *Energy Transfer in SPT – Rod Length Effect*, C. M. Morgano y R. Liang (1992, pág. 126)

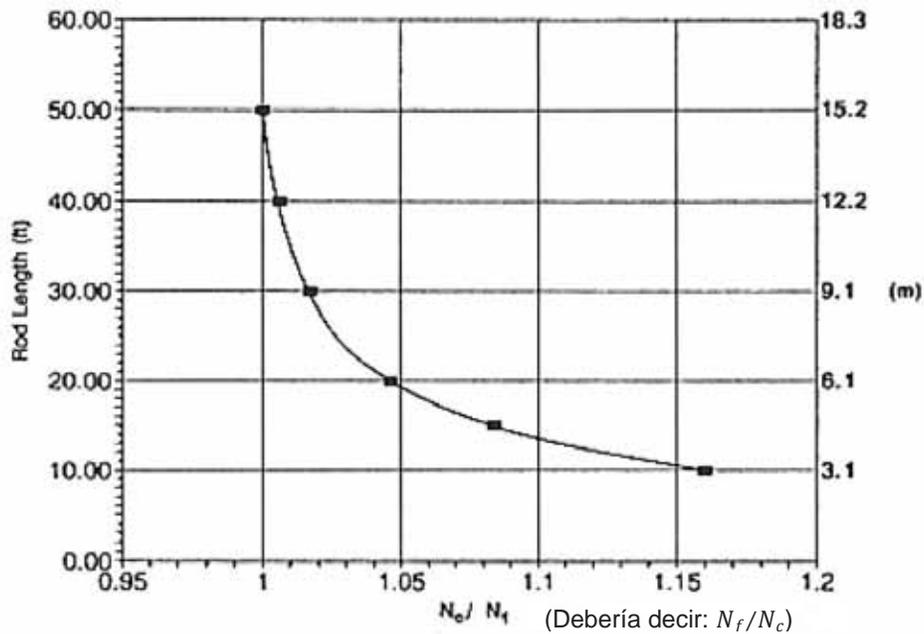


Figura 6: Factor de corrección para considerar la longitud del varillaje

Fuente: *Energy Transfer in SPT – Rod Length Effect*, C. M. Morgano y R. Liang (1992, pág. 126)

Este antecedente demuestra la existencia de una eficiencia en la transferencia de la energía cinética, relacionándola con una característica propia del equipo y no del suelo, aspecto importante a tomar en cuenta en esta investigación.

TERCERO

Edgar Odebrecht; Fernando Schnaid; Marcelo Maia Rocha y George de Paula Bernardes (2005), realizaron la investigación titulada *Energy Efficiency for Standard Penetration Tests* (Eficiencia Energética para las Pruebas de Penetración Estándar), publicada en la revista *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. En esta publicación se expone la investigación realizada en el ensayo SPT (en base a la norma brasilera) que se ejecutó en condiciones controladas en cámaras de calibración y condiciones de campo, con mediciones de energía en dos posiciones (debajo del yunque y encima del muestreador), para la interpretación de los datos se utilizó el enfoque de la teoría de la propagación de la onda, con la intención de definir coeficientes de eficiencia para tener en cuenta la pérdida de energía, en este artículo se llega a las siguientes conclusiones (texto original en inglés):

1. La energía transferida al varillaje y al muestreador debido al impacto del martillo se debe obtener a través de la integración de la ecuación... [$E = \int_0^{\infty} F(t)V(t)dt$], con un límite superior de integración igual a infinito (prácticamente es 1/10 s, pero pueden requerir intervalos más largos de tiempo de integración (1/5 s) en suelos blandos y composición larga de varillas).
2. La energía del muestreador puede ser convenientemente expresada como una función de energía potencial nominal E^* [$W.H = 474 J$], la penetración final del muestreador, y el peso de ambos martillo y varillas. La influencia de la longitud del varillaje produce dos efectos opuestos: las pérdidas de la energía de la onda aumentan con el aumento de longitud del varillaje y en una larga composición de las varillas la ganancia de la energía potencial por el peso del varillaje es significativa y puede compensar parcialmente las pérdidas de energía medidas.
3. La eficiencia se explica por tres coeficientes η_1 , η_2 y η_3 que se deben obtener de la calibración. La eficiencia del martillo η_1 se obtiene de la medición en la parte superior del varillaje. El factor de eficiencia η_2 puede ser asumido como la unidad y el factor de eficiencia de energía η_3 se correlaciona con la longitud de las varillas [$E_{sampler} = \eta_3(\eta_1(0.76 + \Delta\rho)M_h g + \eta_2 \cdot \Delta\rho \cdot M_r g)$].

Este antecedente es de mucha importancia, porque mejora la idea del primer antecedente, plantando coeficientes de corrección por diferentes factores, que pueden ser obtenidos mediante un proceso de calibración, lo que refuerza la necesidad de una solución semiempírica para los penetrómetros dinámicos.

CUARTO

Augusto J. Leoni, Dardo Guaraglia, Alejandro Bielecki y Joaquín Cánchero. (2011), realizaron la investigación titulada *Medición de la Energía Entregada por el Impacto del*

Pisón, en la Ejecución de los Ensayos de S.P.T. que se Ejecutan en la República Argentina, que tuvo como objetivo medir la velocidad de impacto del pistón (matillo) sobre el yunque con tres sistemas de izaje diferentes, para calcular la energía real entregada y compararla con la energía teórica, poniéndose especial atención a la metodología de caída libre del pistón, que difiere con la norma ASTM D 1586, para esto se usó punteros láseres y fototransistores. De esta investigación la conclusión más relevante es:

Es posible asegurar con un margen de error reducido, que la energía entregada en los ensayos de SPT realizados en nuestro país, con el disparador manual indicado en la... [Figura 7], es superior al 90 % de la teórica, antes de impactar sobre la cabeza de golpeo. Esta afirmación está basada en las determinaciones de ésta investigación y en la experiencia de observar la ejecución de este ensayo a muchos operadores de experiencia. Los mismos muy pocas veces dan un golpe de pisón con una altura menor de 76 cm. En la gran mayoría de los ensayos, los valores de H son mayores, ya que el operador espera que aparezca la marca de los 76 cm para accionar el disparador, con lo cuál la altura de caída (H) es siempre superior a su valor teórico.

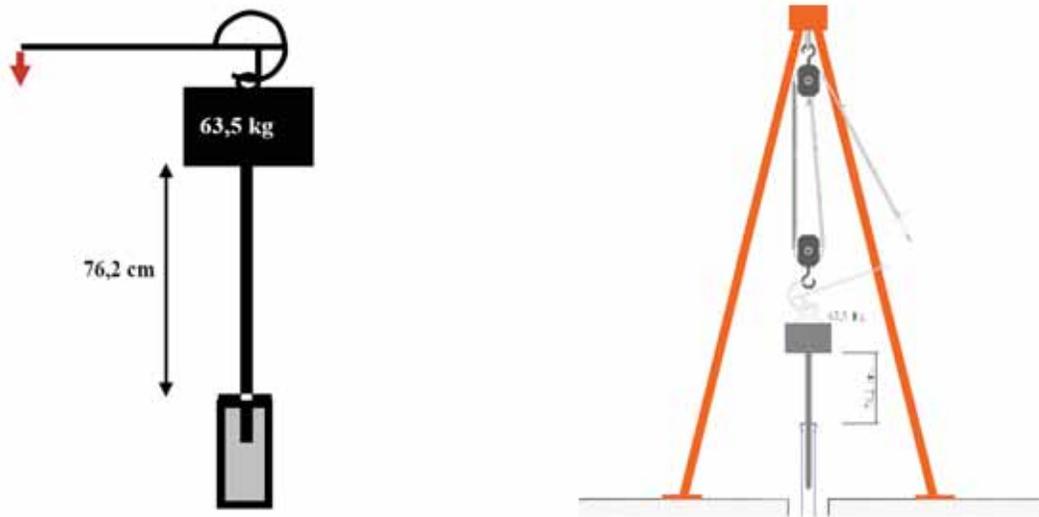


Figura 7: Pisón de 0.622 kN utilizado comúnmente en Argentina para ejecutar el ensayo de SPT

Fuente: *Medición de la Energía Entregada por el Impacto del Pisón, en la Ejecución de los Ensayos de S.P.T. que se Ejecutan en la República Argentina, Augusto J. Leoni, Dardo Guaraglia, Alejandro Bielecki y Joaquín Cánchero (2011), figura 1.*

Este antecedente muestra la pérdida de energía que tiene el sistema antes de que ocurra el fenómeno de transferencia de energía, la cual no se trata en forma específica en los antecedentes antes mencionados, aunque Bolomey Frazer (1971), si la menciona, pero posteriormente la desprecia.

QUINTO

Juliana Azoia Lukiantchuki (2012), presento la tesis titulada *Interpretação de Resultados do Ensaio SPT com Base em Instrumentação Dinâmica*, (Interpretación de Resultados del Ensayo SPT con Base en Instrumentación Dinámica) en cumplimiento parcial de los requisitos para optar el grado académico de Doctor en Ciencias de la escuela de ingeniería de São Carlos de la Universidad de São Paulo, esta investigación tiene como objetivo interpretar los resultados del ensayo SPT a partir de las energías involucradas, logrando determinar la energía que llega al muestreador y así determinar la eficiencia de los equipos SPT, para lo cual se instrumentó la parte superior e inferior de la composición de varillas en diferentes equipos SPT y se compararon los resultados con los métodos teóricos basados en el principio de Hamilton. Las conclusiones de esta tesis son (texto original en portugués):

1. Equipo desarrollado para la determinación de la energía en el ensayo SPT

La determinación de la energía en el ensayo SPT por el método de EFV depende esencialmente de la utilización del acelerómetro adecuado para determinar los signos de velocidad de las partículas. Convencionalmente, los ensayos experimentales son realizados posicionando la instrumentación boca abajo, y determinándose la cantidad de energía disponible en la parte superior de la composición de las varillas. En este trabajo de investigación la instrumentación también se colocó en la parte superior del muestreador, permitiendo determinar la cantidad de energía que es responsable para el ingreso del muestreador en el suelo. Los resultados de las pruebas de campo indicaron que para esto es necesaria una instrumentación específica, una vez que los valores de aceleración registrados en la parte superior del muestreador son mucho más elevados que aquellos valores registrados en la parte superior de la composición de las varillas. Esto ocurre porque el intervalo de tiempo entre la llegada de la primera onda de compresión y su reflejo, en forma de onda de la tracción, es muy corto cuando es comparado con el intervalo de tiempo cuando la instrumentación esta la parte superior de la composición. La superposición del efecto de las ondas aumenta los valores de aceleración y, por consiguiente estas lecturas exceden el rango de uso de estos sensores. Los resultados experimentales de este trabajo indican que los acelerómetros con una gama de utilización próxima a 15000-10000 Hz han permitido la obtención de señales confiables.

El análisis de los registros de los signos de la fuerza y la aceleración indica que el equipo desarrollado en este trabajo de investigación es capaz de determinar correctamente los valores de energía. Los valores de desplazamiento máximo, calculados a partir de las señales de aceleración estaban cerca a los valores de penetración permanente registrados en el campo. Así, las señales de fuerza y aceleración obtenidas de los ensayos de campo, indicaron una alta fiabilidad de los resultados y permitirán el desarrollo de análisis más detallados en relación al proceso de transferencia de energía durante el golpe de martillo.

2. Energía y eficiencia en el ensayo SPT

Los resultados experimentales presentados en este trabajo de investigación permitirán analizar cuantitativamente la variabilidad de los valores de la energía a través del método de EFV. Los ensayos se realizaron con un control estricto de los procedimientos ejecutivos recomendados por la norma brasileña (ABNT, 2001). Sin

embargo, fueron utilizados equipos con diferentes mecanismos de levantamiento y la caída del martillo y cojines con diferentes valores de rigidez.

Los resultados indicaron que la energía en la parte superior de la composición de las barras no mostró una gran variabilidad (3% a 5%) alcanzando un valor promedio de eficiencia de 73%. Estas constataciones indican que a pesar de la utilización de diferentes equipos, de aquellos recomendados por la NBR 6484 (ABNT, 2001), el control del procedimiento ejecutivo permitió la obtención de resultados fiables. De esta forma, la calidad de los resultados de los ensayos y el control de la variabilidad de los resultados dependen de un equipo de ejecución y supervisión calificada.

En relación a los valores de energía determinados en la base de la composición de varillas, la variabilidad de los resultados presentados es más pronunciada (2% a 10%), alcanzando un valor promedio eficiencia de 57%. Esta variabilidad se hace más pronunciada cuando se utiliza el sistema de levantamiento y liberación manual del martillo. Esto es porque este sistema aporta una mayor excentricidad en el golpe que por lo tanto influye en la cantidad de energía que llega a la parte superior del muestreador.

Los análisis presentados indican que la determinación de la eficiencia en la prueba SPT depende fundamentalmente de la exactitud de la energía total impuesta en el sistema, tal como se propone por Odebrecht (2003). Para longitudes de composición de varillas entre 2,95 y 12,95 m se observó que la eficiencia del martillo (η_1) puede ser admitido como un valor constante que es independiente de la composición de la longitud de las varillas. Los resultados experimentales de este trabajo indican valores de 0.751 y 0.569 para la composición de la parte superior y la base de las varillas, respectivamente. Se recomienda que estos valores, principalmente en la base de la composición de varillas se utilicen preferiblemente para suelo donde el valor del índice N_{SPT} es mayor o igual a 5, ya que la variabilidad de los resultados es menor para estos casos.

La eficiencia evaluada para longitudes de composición de varillas entre 2,95 m. y 12.95 m se mostró prácticamente constante e independiente de la longitud de la composición. Las pérdidas de energía para el equipo mecanizado varían linealmente con la longitud de la composición de barras. Sin embargo, esta misma tendencia no fue observada para el equipo convencional.

2.1. Influencia de la compacidad del suelo en la energía transferida.

Los resultados experimentales para cámaras con diferentes condiciones de compacidad indicaron que cuanto menor es la compacidad del suelo mayor es el número de impactos posteriores necesarios para completar la transferencia de energía al sistema. En el caso de la energía en la parte superior de la composición de varillas la compacidad influye sólo en la duración del evento, haciendo que la energía final sea la misma independiente de la condición del suelo.

Sin embargo, la cantidad de energía sobre la base de la composición de varillas se presentó menor para suelos con menor compacidad. Esto es porque en el caso de suelos con baja compacidad son necesarios más ciclos para la transferencia de energía y por lo tanto la disipación de energía durante todo el evento se hace mayor.

Además, se observó que la compacidad del suelo influye en el intervalo de tiempo entre los sucesivos impactos. Cuanto menor sea la compacidad del suelo mayor es la cantidad de onda reflejada y por consiguiente mayor es el intervalo de tiempo entre los sucesivos impactos. Esto es debido a que las ondas reflejadas con gran intensidad aumentan el intervalo de tiempo que el martillo está separado de la cabeza de golpeo. A medida que el suelo penetra en el muestreador se convierten más resistentes esos intervalos de tiempo disminuidos.

3. Resistencia dinámica movilizada durante la penetración del muestreador SPT

La resistencia dinámica movilizada durante la penetración del muestreador en el suelo se determinó experimentalmente a través de los registros de fuerza en la parte superior del muestreador. Los resultados fueron comparados con los métodos teóricos (Aoki et al, 2007; SCHNAID et al, 2009a) desarrollados con base en el Principio de Conservación de la Energía. Los resultados indicaron que ambos métodos proporcionan resultados fiables, ya que utiliza el valor de eficiencia de ensayo SPT determinado en la parte superior del muestreador.

El método propuesto por Aoki et al. (2007) demostró ser muy adecuado para la determinación de la resistencia estática movilizada en un sistema suelo-muestreador. Esto es porque este método depende sólo de índice N_{SPT} y la cantidad de energía en la parte superior del muestreador. Para que su aplicación sea simple, este método se puede incorporar fácilmente en la práctica de proyectos de cimentación.

El propuesto por Schnaid et al. Método (2009a) dio valores de resistencia dinámica del suelo superior a los valores determinados experimentalmente. Esto es porque, para los casos examinados, se observó que la energía calculada por este método dio valores similares a la energía determinada en la parte superior y no la composición de base de las varillas. Así, los resultados se ajustaron por un factor de multiplicación que cuantifica las pérdidas de energía que se producen a lo largo de la composición de varillas. Los resultados fueron muy cercanos a los valores experimentales.

El uso de las ecuaciones teóricas propuestas por Aoki et al, (2007) y Schnaid et al (2009a) proporcionan excelentes resultados cuando se utiliza la cantidad de energía que llega al muestreador. Este hecho demuestra la importancia de la cantidad de energía que llega realmente al muestreador como un parámetro clave para determinar la resistencia del suelo durante la penetración del muestreador.

3.1. Mecanismos de reacción movilizados en el ensayo SPT

La movilización de la resistencia de la punta y la fricción lateral ofrecido por el suelo durante la conducción del muestreador SPT depende de la ocurrencia del casquillo. Esta comprobación se puede incorporar fácilmente en la aplicación práctica del ensayo SPT a través del control de la recuperación de la muestra. Esta información permite la interpretación de la resistencia total ofrecida por el suelo y por lo tanto permite el desarrollo de métodos racionales para la estimación de la capacidad de carga del suelo.

Los resultados experimentales han demostrado que la ocurrencia del casquillo ocurre más frecuentemente en capas de suelo que consiste en limo y arcillas. En el caso de arena arcillosa y suelo arenoso se observó que la probabilidad de ocurrencia del casquillo del suelo es baja. Los valores de par medido en el ensayo SPT permitieron estimar la porción de la fricción lateral externa movilizada durante la penetración del muestreador. Estos resultados indican que para suelos con bajos valores de índice de N_{SPT} , la penetración del muestreador esencialmente moviliza la fuerza de la fricción lateral externo. A medida que los valores índices N_{SPT} aumentan, las porciones de la cara interna resistencia a la fricción y la resistencia del borde están contribuyendo a la resistencia del suelo.

Este antecedente es muy importante, porque muestra todo un resumen de los criterios actuales de la interpretación del ensayo SPT en base a los criterios de eficiencia de energía y los compara con resultados obtenidos de pruebas controladas, y analizan como influye la compacidad del suelo en el proceso de transferencia de energía.

2.2. SUPUESTOS

Como todo modelo teórico en la ingeniería, esta investigación se basa en diferentes suposiciones, que permiten establecer una interpretación teórica consistente y con ello hacer que esta sea factible.

Los supuestos que se consideraron respecto al suelo y al equipo DPL son:

2.2.1. RESPECTO AL SUELO

- **El suelo es homogéneo en la distancia de conteo:** Aunque es sabido que el suelo es un material muy heterogéneo y que sus propiedades mecánicas varían en toda las direcciones, es necesario suponer que es homogéneo en el intervalo de conteo (generalmente 10 cm) para poder asociar los datos y los resultados obtenidos a esta zona (Cassan, 1982, pág. 146; NTP 339.159, 2001, pág. 10).
- **El suelo tiene un comportamiento elasto-plástico durante la penetración:** El comportamiento del suelo durante la penetración debida al golpe del martillo es aproximado por distintas graficas de Resistencia deformación (Cassan, 1982, pág. 148; Lukiantchuki, 2012, págs. 65-66; Aoki & Cintra, 2000, pág. 459), pero se hace muy complicado darle una representación numérica, así que podemos suponer un comportamiento líneal para simplificar los cálculos y poder hacer posible las mediciones con los instrumentos que tenemos (Cassan, 1982, pág. 147).

2.2.2. RESPECTO AL ENSAYO DEL DPL

- **La caída de la maza se puede describir como un M.R.U.V. (Movimiento Rectilíneo Uniformemente Variado):** La caída de la maza se genera en el aire y como en todo fluido el movimiento de una partícula se puede describir como una curva exponencial que tiene una asíntota en una velocidad limite (Alonso & Finn, 1976, págs. 173-176), pero por la magnitud de la altura de caída este fenómeno no se puede apreciar y bastaría una aproximación parabólica para describir el movimiento como uniformemente variado.
- **La mecánica clásica describe el fenómeno:** Aunque en las investigaciones recientes se esté usando el principio de Hamilton y la ecuación de la onda como base para interpretar la eficiencia en el SPT (Aoki & Cintra, 2000), los

instrumentos usados en esta tesis no son los adecuados para estas teorías, así que la formulación con la segunda ley de Newton (Beer, Johnston, & Cornwell, 2013, pág. 622) se adecua más a nuestra realidad.

- **Solo hay deformación elástica en el penetrómetro:** Aunque está claro que con el tiempo se observa en el equipo deformaciones permanentes en sus uniones, durante el proceso de penetración de la sonda se generan principalmente deformaciones elásticas definidas por la teoría de resistencia de materiales (Cassan, 1982, pág. 151; Bolomey Frazer, 1971, pág. 978).

2.3. BASE TEÓRICA

2.3.1. ENERGÍA BÁSICA Y ESPECÍFICA

En las actas del grupo de discusión, Interpretación de los resultados de pruebas dinámicas de penetración (Grupo 5 -. Actas del Simposio Europeo de Pruebas de Penetración, ESOPT Estocolmo, 5 a 7 junio, 1974, Vol 2.1) (*Interpretation of Results of Dynamic Penetration Tests, Group 5 - Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing, ESOPT Stockholm*) conformado por Riskallah; G. Neardi; J. Biarez; K. V. Helenelund & G. G. Meyerhof, en las páginas 74 y 75 se muestra la fórmula de energía básica de sondeo y la relación entre dos penetrómetros dinámicos.

La fórmula de energía básica es (ESOPT, 1974, pág. 74):

$$Q_0 = \frac{W.H.N}{A.\Delta h} \quad (1)$$

Dónde:

Q_0 = Energía básica por unidad de área y distancia de conteo.

W = Peso del martillo.

H = Altura de caída del martillo.

A = Área de la punta.

Δh = Distancia de conteo.

N = Número de golpes para una penetración Δh .

De la ecuación (1) se obtiene la energía específica como característica de cada ensayo de penetración, la cual se puede considerar como la energía entregada al suelo por cada golpe, esto es:

$$Q_{ESP} = \frac{W \cdot H}{A \cdot \Delta h} \quad (2)$$

Usando la ecuación (1) se puede homogeneizar los números de golpes de los diferentes ensayos de penetración en un valor representativo, así mismo se puede establecer la relación entre los golpes de dos penetrómetros, esta relación se muestra en ESOPT (1974, pág. 75) como:

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{W_1 \cdot H_1 \cdot A_2 \cdot \Delta h_2}{W_2 \cdot H_2 \cdot A_1 \cdot \Delta h_1} \quad (3)$$

Pero al revisar los informes de estudios de suelos hechos por el Ing. MSc. Carlos Fernández Baca Vidal (2011, pág. Anexos), se puede deducir que la ecuación (3) se debería escribir como sigue (Ver ANEXO A):

$$k = \frac{N_2}{N_1} = \frac{W_1 \cdot H_1 \cdot A_2 \cdot \Delta h_2}{W_2 \cdot H_2 \cdot A_1 \cdot \Delta h_1} = \frac{Q_{ESP1}}{Q_{ESP2}} \quad (4)$$

Con estas formulaciones se da inicio al uso de la energía mecánica para interpretar los ensayos dinámicos, pero solo se está considerando la energía neta del impacto, así que se debe tener mucha precaución si se desea usarlas.

2.3.2. AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO

2.3.2.1. ACERCA DEL EQUIPO

El equipo DPL descrito en la NTP 339.159 - 2001, "... está compuesto por una sonda, un equipo de medición y un dispositivo de introducción" (pág. 3), estos dos últimos pueden ser manuales o mecánicos, pero los más usado y los que son objeto de esta tesis son los manuales.

"La sonda en una serie de varillas (varillaje) [rectas] con una punta a 90°..." (NTP 339.159, 2001, pág. 3) (Figura 8). La punta puede ser fijar (con una unión hembra de rosca) o descartable (con una unión hembra de embone).

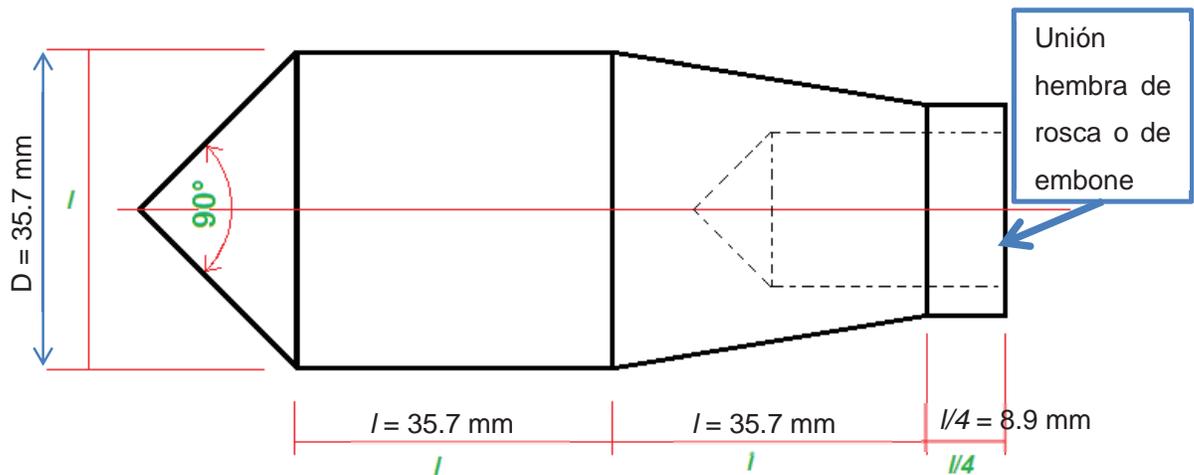


Figura 8: Punta del Penetrómetros DPL

Fuente: Adaptada de NTP 339.159, Método de ensayo normalizado para la auscultación con penetrómetro dinámico ligero de punta cónica (2001, pág. 4)

El equipo de medición manual está compuesto de una regla o marcas designadas en las varillas cada 10 cm y el dispositivo de introducción manual está compuesto por un martinete, una guía y un yunque (Cassan, 1982, pág. 140) que se acopla a la última varilla (Figura 9).

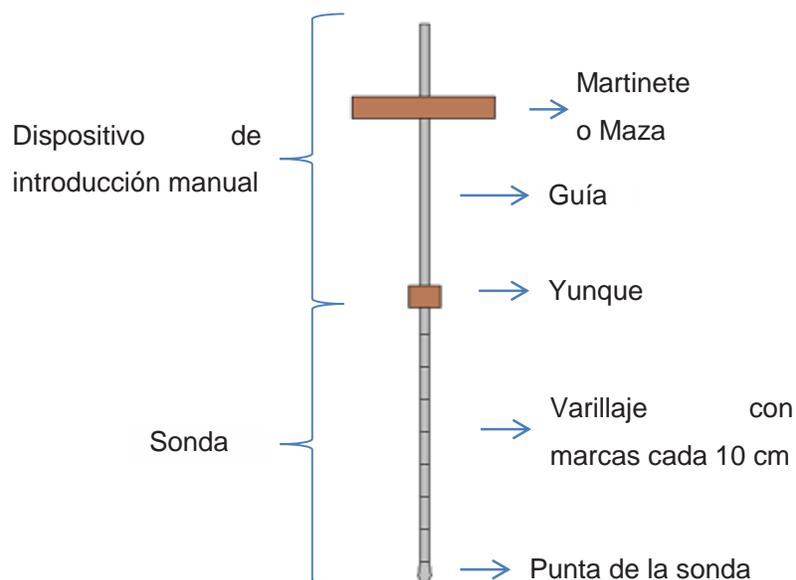


Figura 9: Partes del equipo DPL

Fuente: Elaboración propia

Las dimensiones del equipo están definidas a en la norma NPT 339.159 (2001, pág. 6), las cuales se resumen a continuación:

- Denominación: Penetrómetro Dinámico ligero (*Dynamic Probing light*).
- Abreviatura: DPL
- Sección transversal de la punta: $AC = 10 \text{ cm}^2$.
- Diámetro de la punta: $d = 35.7 \pm 0.3 \text{ mm}$.
- Peso del martinete: $M = 10 \pm 0.1 \text{ kg}$.
- Altura de caída: $H = 0.50 \pm 0.01 \text{ m}$.
- Diámetro de varillas, externo: 22 mm (puede ser variado).
- Diámetro de varillas, interno: 6 mm (puede ser variado).
- Peso máximo del dispositivo de introducción sin el martinete: 6 kg
- Denominación de la medida: N_{10}
- Profundidad máxima para el estudio a partir del punto de inicio: $l = 10 \text{ m}$

2.3.2.2. EJECUCIÓN DE LA AUSCULTACIÓN

“La auscultación... [con DPL] ...consiste en introducir una sonda generalmente de manera perpendicular... empleando un martinete con una altura de caída invariable, registrando el número de golpes para obtener una penetración definida” (NTP 339.159, 2001, pág. 3), para lo cual se siguen los siguientes pasos:

1. Se realiza una inspección a todas las partes del equipo, asegurándose que la punta no tenga un diámetro menor de 34 mm, que las varillas sean rectas y que la desviación axial del varillaje no sea mayor a 1 mm por metro (NTP 339.159, 2001, pág. 8).
2. Se procede a la instalación del equipo, el cual no podrá inclinarse más del 2% durante la ejecución de la auscultación (NTP 339.159, 2001, pág. 9).
3. Se da inicio a la auscultación, teniendo en cuenta la velocidad de ejecución, con una secuencia de 15 a 30 golpes por minuto y en caso de suelos con alta permeabilidad se podrá aumentar hasta 60 golpes por minuto. Para realizar los cambios de varilla no se debe demorar más de dos minutos, caso contrario se debe anotar el tiempo usado como observación (NTP 339.159, 2001, pág. 9).
4. Durante la prueba se debe girar el varillaje cada metro, por lo menos una vuelta y media en sentido horario, se registra la dificultad que representa el giro cualitativamente, esto nos muestra la influencia del rozamiento lateral (NTP 339.159, 2001, pág. 9).

5. Durante la auscultación se registra el número de golpes por cada 10 cm N_{10} , y en caso que los suelos sean muy blandos y la penetración sea mayor a 10 cm se deberá anotar la distancia por golpe. Culminada la auscultación se debe anotar la profundidad alcanzada, el número de varillas y si algún elemento interrumpió la prueba (NTP 339.159, 2001, pág. 10).

2.3.2.3. PARÁMETROS DE LA AUSCULTACIÓN

Para caracterizar el rechazo de un intervalo de conteo se puede usar la expresión (Cassan, 1982, pág. 146):

$$e = \frac{\Delta h}{N_{10}'} \quad \text{ó} \quad e = \frac{10 \text{ cm}}{N_{10}} \quad (5)$$

Dónde:

Δh = Distancia de conteo, generalmente 10 cm.

N_{10}' = Número de golpes por la distancia de conteo.

N_{10} = Número de golpes por cada 10 cm.

e = Distancia promedio por golpe.

Para los casos en que no se pueda contar los golpes en 10 cm se puede obtener un N_{10} equivalente despejándolo de la ecuación (5).

En cuanto al giro la norma NTP 339.159 (2001, pág. 9) nos indica que se define cualitativamente como: fácil, medianamente difícil y difícil de girar, con la intención de considerar el rozamiento lateral que está influyendo en la resistencia del suelo, pero la norma no establece una equivalencia cuantitativa, lo que complica la reducción del número de golpes por fricción lateral.

2.3.3. PARÁMETROS DEL SUELO

2.3.3.1. COMPACIDAD RELATIVA

Según Das (2001, pág. 23), "El término *compacidad relativa* es comúnmente usado para indicar la compacidad o la flojedad *in situ* del suelo granular", y la define con la siguiente expresión:

$$C_r = \frac{e_{m\acute{a}x} - e}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}} \quad (6)$$

Dónde:

C_r = Compacidad relativa, usualmente dada como porcentaje.

e = Relación de vacíos *in situ* del suelo.

$e_{máx}$ = Relación de vacíos del suelo en la condición más suelta.

$e_{mín}$ = Relación de vacíos del suelo en la condición más densa.

La compacidad relativa también se puede expresar como (Das, 2001, pág. 24):

$$C_r = \left[\frac{\gamma_d - \gamma_{d(mín)}}{\gamma_{d(máx)} - \gamma_{d(mín)}} \right] \left[\frac{\gamma_{d(máx)}}{\gamma_d} \right] \quad (7)$$

Dónde:

$\gamma_{d(mín)}$ = Peso específico seco en la condición más suelta (en una relación de vacíos de $e_{máx}$).

γ_d = Peso específico seco *in situ* (en una relación de vacíos de e).

$\gamma_{d(máx)}$ = Peso específico seco en la condición más densa (en una relación de vacíos de $e_{mín}$).

“Los valores de C_r varían de un mínimo de 0 para suelo muy suelto a un máximo de 1 para muy denso. Los ingenieros de suelos describen cualitativamente los depósitos de suelo granular de acuerdo con sus compacidades relativas” (Das, 2001, pág. 23), esto se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1: Descripción cualitativa de depósitos de suelo granular

Compacidad relativa (%)	Descripción de depósitos de suelo
0 – 15	Muy suelto
15 – 50	Suelto
50 – 70	Medio
70 – 85	Denso
85 – 100	Muy denso

Fuente: Braja M. Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica (2001, pág. 23)

Das (2001, pág. 70), también hace una comparación entre la compacidad relativa y la compactación relativa R^1 , expresándolo como:

$$R = \frac{R_0}{1 - C_r(1 - R_0)} \quad (8)$$

Dónde:

$$R_0 = \frac{\gamma_{d(mín)}}{\gamma_{d(máx)}} \quad (9)$$

Y R está definida como:

$$R(\%) = \frac{\gamma_{d(campo)}}{\gamma_{d(máx-lab)}} \times 100 \quad (10)$$

Dónde:

$\gamma_{d(campo)}$ = Peso específico seco *in situ* (en una relación de vacíos de e).

$\gamma_{d(máx-lab)}$ = Peso específico seco máximo determinado en laboratorio por la prueba de Proctor estándar o por la modificada.

Se debe resaltar que la ecuación (8) considera que $\gamma_{d(máx-lab)} = \gamma_{d(máx)}$, lo cual es aproximadamente cierto cuando se usa el ensayo de Proctor modificado (Bowles, Propiedades Geofísicas de los Suelos, 1982, pág. 200).

Según Bowles (1982, págs. 162-163), se puede hacer algunos ensayos sencillos que permitirían estimar C_r^2 , esto se aprecia en la Tabla 2. También resulta útil expresar C_r en función de R , para lo cual se despeja de la ecuación (6), obteniéndose la siguiente expresión:

$$C_r = \frac{R - R_0}{R(1 - R_0)} \quad (11)$$

¹ Juárez Badillo & Rico Rodríguez (1970, pág. 438), definen este valor como el grado de compactación G_c .

² Bowles (1982), denomina a la Compacidad Relativa C_r como Densidad Relativa D_r .

Tabla 2: Identificación en Terreno de la Compacidad Relativa

Condición del suelo	Identificación de terreno
Muy suelto	Fácilmente indentada con el dedo pulgar o el puño
Suelto	Menos fácilmente indentada con el puño, Fácilmente paleada
Medio	Paleada con dificultad
Denso	Requiere de aflojamiento con pico para paleo a mano
Muy denso	Requiere de explosivos o de equipo pesado para aflojar

Fuente: Adaptada de Joseph E Bowles, *Propiedades Geofísicas de los Suelos* (1982, pág. 163),

2.3.3.2. TIPO DE SUELO SEGÚN SUCS (SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS)

Das (2001, pág. 39) indica que, la forma original de este sistema fue propuesto por Casagrande en 1942 para usarse en la construcción de aeropuertos emprendida por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército durante la Segunda Guerra Mundial. En cooperación con la Oficina de Restauración de Estados Unidos, el sistema fue revisado en 1952. Hoy en día, es ampliamente usado por los ingenieros (Prueba D-2487 de la ASTM). El Sistema Unificado de Clasificación... clasifica los suelos en dos amplias categorías:

1. Suelos de grano grueso que son de naturaleza tipo grava y arenosa con menos del 50% pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo G o S. G significa grava o suelo gravoso y S significa arena o suelo arenoso.
2. Los suelos de grano fino con 50% o más pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo M, que significa limo inorgánico, C para arcilla inorgánica u O para limos y arcillas orgánicos. El símbolo Pt se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos.

Otros símbolos son también usados para la clasificación:

- W: bien... [gradado]¹.
- P: mal... [gradado].
- L: baja plasticidad (límite líquido menor que 50).
- H: alta plasticidad (límite líquido mayor que 50).

En el ANEXO B se muestra los parámetros para la clasificación SUCS y los símbolos que se les asigna a los diferentes tipos de suelos, de estos se resaltan a las arenas con presencia de finos, por ser de interés en esta investigación, estos suelos son:

¹ En el texto original dice *graduado*, pero debería decir *gradado*, ya que el término proviene del inglés *graded*, esto puede deberse a un error de traducción.

- **SM:** Arena limosa, mezcla de arena-limo, más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (ANEXO B); o índice de plasticidad menor que 4.
- **SC:** Arena arcillosa, mezcla de arena-arcilla, más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg se grafican arriba de la línea A (ANEXO B); índice de plasticidad mayor que 7.
- **SC-SM:** Arena limo-arcillosa, mezcla de arena-limo-arcilla, más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg caen en el área sombreada marcada CL-ML (ANEXO B).

Das (2001, pág. 42) hace una distinción entre arenas y arenas con gravas, la cual se basa en que porcentaje de grava tiene el suelo, si es menor a 15% será solo arena y si es mayor o igual a 15% será arena con grava.

2.3.4. PARÁMETROS DE LA CAÍDA DE LA MAZA

2.3.4.1. MOVIMIENTO RECTILÍNEO UNIFORMEMENTE VARIADO (M.R.U.V)

Al momento de hacer caer la maza, se describe aproximadamente un movimiento rectilíneo uniformemente variado, este movimiento es generado por la resultante de tres fuerzas que están actuando en la maza: El peso de la maza, la fricción maza-guía y la fricción-empuje con aire (Figura 10), las que se definen como:

$$\text{Peso de la Maza: } W = m \cdot g \quad (12)$$

$$\text{Fricción maza-guía: } F_{f,g} = \mu_0 \cdot W = \mu_0 \cdot m \cdot g \quad (13)$$

$$\text{Fricción-empuje del aire: } F_a = \mu_a \cdot W = \mu_a \cdot m \cdot g \quad (14)$$

Dónde:

m = Masa de la maza.

g = Aceleración de la gravedad.

μ_0 = Coeficiente de fricción de la maza con la guía en caída vertical.

μ_a = Coeficiente de fricción-empuje de la maza con el aire.

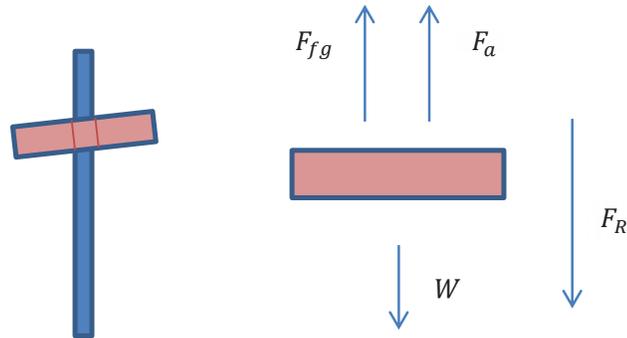


Figura 10: Diagrama de cuerpo libre de la maza
 Fuente: Elaboración propia

El peso es la fuerza de atracción que genera la tierra y está directamente ligada a la aceleración de la gravedad, la fricción con la guía se genera por la inestabilidad de la maza al momento de la caída, ocasionando un pequeño giro, lo que genera una fuerza proporcional al peso, y la fricción-empuje con el aire es una simplificación de un fenómeno muy complejo como es el movimiento de un cuerpo en un fluido, estableciéndose proporcional al peso.

Luego la fuerza resultante que genera el movimiento es:

$$-F_R = F_{fg} + F_a - W = -(1 - \mu_0 - \mu_a) \cdot m \cdot g \Rightarrow F_R = k_c \cdot W \quad (15)$$

Donde k_c , es un factor de reducción de la gravedad para obtener la directamente la fuerza resultante.

Como la fuerza es constante, genera una aceleración constante y por ende un movimiento rectilíneo uniformemente variado, entonces las ecuaciones que describen el movimiento de la caída de la maza para un desplazamiento Y^1 , en un tiempo t y con una velocidad v son:

$$Y = -k_c \cdot g \cdot \frac{t^2}{2} , \quad v = -k_c \cdot g \cdot t \quad \text{ó} \quad v = -\sqrt{-2k_c \cdot g \cdot Y} \quad (16)$$

¹ Se usa la convención de signos para las componente vectoriales: hacia arriba (+), hacia abajo (-), hacia la izquierda (-) y hacia la derecha (+)

2.3.4.2. LA ACELERACIÓN DE LA GRAVEDAD EN EL CUSCO

La aceleración de la gravedad no es la misma en todos los puntos del planeta, hay factores como la forma achatada en los polos y ensanchada en el ecuador, la rotación de la tierra y la altura respecto al nivel del mar que inciden en su valor. “Por convención internacional se considera el valor normalizado de $g_0 = 9.80665 \text{ m/s}^2$ (32.17405 ft/s^2) el cual corresponde a una latitud de 45.5° y 0 m.s.n.m. (sobre el nivel medio del mar)” (MetAs, S.A. de C.V., 2002, pág. 3).

La *Organisation Internationale de Métrologie Légale* (OIML) da una fórmula que permite calcular la aceleración de la gravedad con una precisión del 0.01%. El Cusco se encuentra a $14^\circ 02'$ de latitud sur y $3\ 399 \text{ m.s.n.m.}$, con lo que su aceleración de la gravedad local será de 9.7729 m/s^2 . (Dajes Castro, 2002, págs. 2-3).

2.3.4.3. VARIACIONES DE LA ALTURA DE CAÍDA

Se ha observado hasta el momento que cada operador tiene su forma particular de soltar la maza, un operador experimentado normalmente tiende a hacerlo más rápido, incluso lanzando hacia arriba la maza, mientras que un operador inexperto lo hace con más cuidado, mirando cada instante la ubicación de la línea que indica la altura de caída, lo que resulta en que la altura de caída no sea la misma para cada golpe.

Para poder considerar este aspecto se toma una altura promedio de la cual se soltó la maza por un ciclo de conteo y se divide entre la altura teórica, obteniendo:

$$k_H = \frac{H_p}{H} \quad \text{ó} \quad H_p = k_H \cdot H \quad (17)$$

Dónde:

k_H = Coeficiente que relaciona la altura promedio y la altura teórica, dependiendo del operador.

H_p = Altura de caída promedio durante la ejecución del ensayo DPL.

H = Altura teórica de caída de la maza.

2.3.4.4. INCLINACIONES DEL VARILLAJE

Se debe recordar que la norma técnica peruana que define este ensayo, restringe la inclinación del equipo hasta 2%, el cual es casi imperceptible, lo que quiere decir que a partir de esta inclinación las suposiciones de la fricción con la guía ya no son tan

válidas y es necesario tener presente la teoría de desplazamientos en planos inclinados (Figura 11).

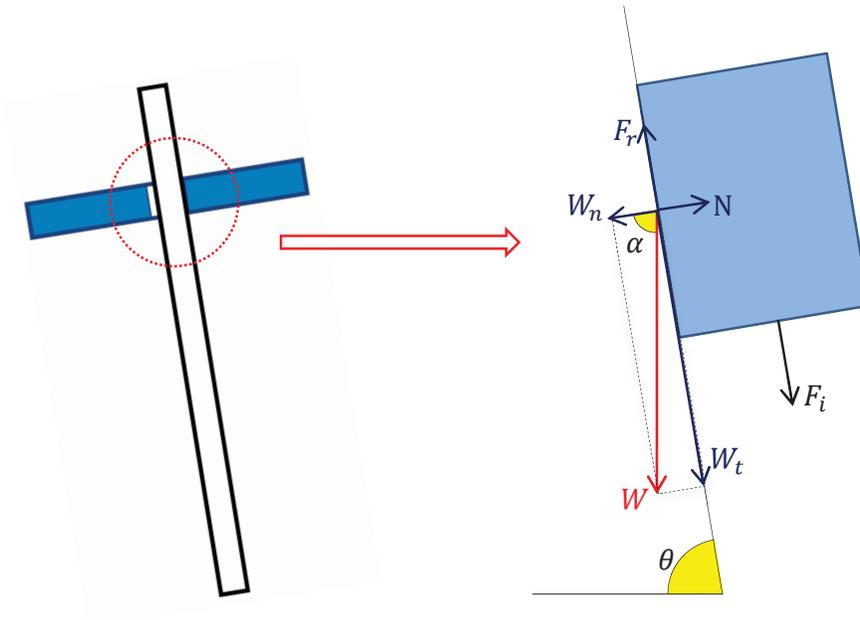


Figura 11: Desplazamiento en plano inclinado
 Fuente: Elaboración propia

$$Fr = \mu \cdot N = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \theta$$

$$N = m \cdot g \cdot \cos \theta ; W_t = m \cdot g \cdot \sin \theta$$

$$F_i = W_t - Fr = (\sin \theta - \mu \cdot \cos \theta) \cdot m \cdot g$$

Pero a esto se tiene que adicionar la fricción y empuje del aire que se usan en la ecuación (15), esto es:

$$F_R = W_t - Fr - F_a = (\sin \theta - \mu \cdot \cos \theta - \mu_a) \cdot m \cdot g = a \cdot m = k_c \cdot W \quad (18)$$

Dónde:

- μ = Coeficiente de fricción dinámico del plano inclinado.
- θ = Ángulo de inclinación del plano.
- a = Aceleración equivalente.

2.3.5. PARÁMETROS DEL CHOQUE DE LA MAZA CON EL YUNQUE

2.3.5.1. IMPACTO CENTRAL DIRECTO DE DOS CUERPOS

Según Beer, Johnston, & Cornwell (2013, pág. 676), un choque entre dos cuerpos que ocurre en un intervalo muy pequeño y durante el cual los dos cuerpos ejercen fuerzas relativamente grandes entre sí recibe el nombre de *impacto*. La normal común a las superficies en contacto durante el impacto se conoce como *línea de impacto*. Si los centros de masa en los dos cuerpos que chocan se ubican sobre esta línea, el impacto es un *impacto central*. [Figura 12].

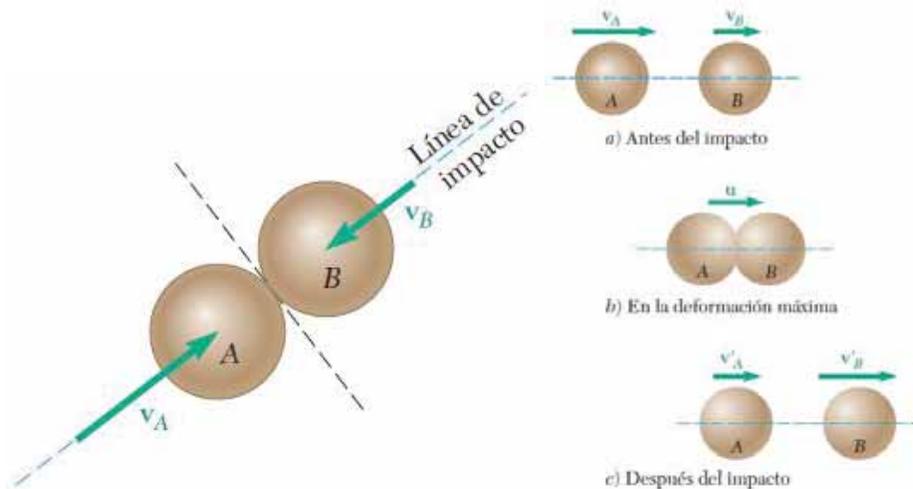


Figura 12: Impacto central de dos partículas

Fuente: Adaptada de Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston y Phillip J. Cornwell, *Mecánica Vectorial para Ingenieros, Vol. II Dinámica* (2013, pág. 677)

Si considerando dos partículas A y B como un solo sistema, se advierte que no hay fuerzas impulsivas externas, entonces se conserva la cantidad de movimiento. Estas partículas tienen masas m_A y m_B , velocidades v_A y v_B antes del choque y velocidades v'_A y v'_B , después del choque, así que tenemos (Beer, Johnston, & Cornwell, 2013, pág. 677):

$$m_A \cdot v_A + m_B \cdot v_B = m_A \cdot v'_A + m_B \cdot v'_B \quad (19)$$

Durante el impacto se generan fuerzas de deformación y restitución, las que son consideradas con el *coeficiente de restitución* n (Beer, Johnston, & Cornwell, 2013, pág. 678):

$$n = \frac{v'_B - v'_A}{v_A - v_B} \quad (20)$$

2.3.5.2. TIPO DE CHOQUES Y CASOS PARTICULARES

Hay tres tipos de choques bien definidos que son:

- **Choque perfectamente plástico o inelástico:** Cuando el coeficiente de restitución es igual a 0 ($n = 0$), no hay periodo de restitución y ambas partículas permanecen juntas después del choque, se genera la máxima pérdida de energía cinética (Beer, Johnston, & Cornwell, 2013, pág. 678), entonces la ecuación (19) se escribe:

$$m_A \cdot v_A + m_B \cdot v_B = (m_A + m_B) \cdot v' \quad (21)$$

- **Choque inelástico:** Cuando el coeficiente de restitución es mayor que 0 y menor que 1 ($0 < n < 1$), es el caso general que más se aproxima a la realidad.
- **Choque perfectamente elástico:** Cuando el coeficiente de restitución es igual a 1 ($n = 1$), no hay pérdida de energía cinética, las fuerza del periodo de deformación y el periodo de restitución son la misma, y se conserva la velocidad relativa antes y después del choque (Beer, Johnston, & Cornwell, 2013, pág. 679), esto es:

$$v_A - v_B = v'_B - v'_A \quad (22)$$

Como caso particular se resalta el choque entre una partícula en movimiento y otra que esta quieta, siendo esta última de masa muy superior a la otra (cuando una pelota rebota en el suelo), las ecuaciones (19) y (20) se reducen a:

$$m_A \cdot v_A = m_A \cdot v'_A + m_B \cdot v'_B$$

$$n = \frac{v'_B - v'_A}{v_A}$$

Si despejamos la velocidad de la de la partícula B después del choque tenemos:

$$v'_B = \frac{m_A \cdot (v_A - v'_A)}{m_B}, \text{ pero } m_B \gg m_A \Rightarrow v'_B \cong 0; \therefore n = -\frac{v'_A}{v_A} \quad (23)$$

Se puede afirmar que el coeficiente de restitución se aprecia en la altura de rebote h_r de una pelota que se suelta de una altura de caída h . Si se considera los efectos de la

ficción con el aire u otras fuerzas que puedan presentarse, usando la ecuación (16) se tiene:

$$n = -\frac{v'_A}{v_A} = -\frac{\sqrt{2\frac{g}{k_c} \cdot h_r}}{-\sqrt{2k_c \cdot g \cdot h}} = \frac{1}{k_c} \cdot \sqrt{\frac{h_r}{h}} \quad (24)$$

2.3.6. PARÁMETROS DE LAS DEFORMACIONES EQUIPO-SUELO

2.3.6.1. LEY DE HOOKE – DEFORMACIÓN AXIAL

La ley de elasticidad de Hooke o ley de Hooke, originalmente formulada para casos del estiramiento longitudinal, establece que el alargamiento unitario ϵ que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada F (Figura 13) o esfuerzo σ (Wikipedia, 2015), esto es:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}; \quad \epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{F}{A \cdot E}; \quad \sigma = \frac{F}{A}$$

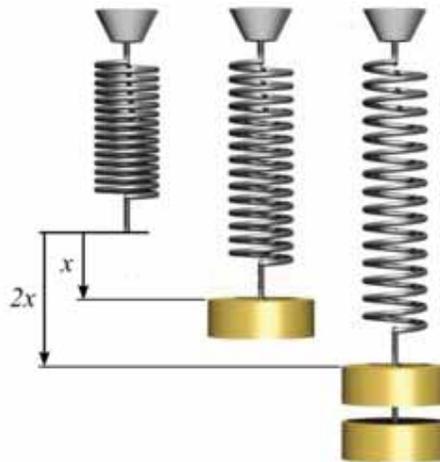


Figura 13: Deformación proporcional a la fuerza

Fuente: Wikipedia, Ley de elasticidad de Hooke (2015)

(https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_elasticidad_de_Hooke, revisado el 04/05/2015)

La forma más común de representar matemáticamente la Ley de Hooke es mediante la ecuación del muelle o resorte, donde se relaciona la fuerza F ejercida en el resorte con la elongación o alargamiento δ delta producido, usando la constante de proporcionalidad K (Wikipedia, 2015):

$$F = -K \cdot \delta; \quad K = \frac{A}{L} E \quad (25)$$

Dónde:

E = Módulo de elasticidad o módulo de Young.

A, L = Área y longitud del elemento en la dirección de la fuerza F .

Esta ley se cumple siempre y cuando se esté haciendo trabajar al material dentro de su rango elástico, siendo $E = 206 \times 10^9 Pa$ ó $E = 2.1 \times 10^6 kgf/cm^2$ (Pytel & Singer, 1994, pág. xxvii) un valor aproximado para el acero.

2.3.6.2. RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA DE HINCA Y LA PENETRACIÓN

Supongamos que sometieramos la punta del penetrómetro a una fuerza estática creciente hasta la penetración, y que descargáramos seguidamente. La curva esfuerzo deformación es... [Figura 14] (Cassan, 1982, pág. 147).

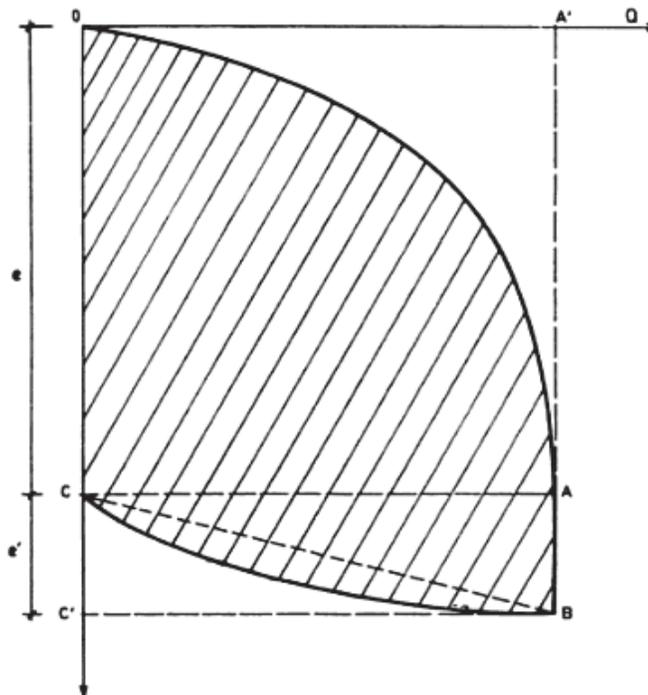


Figura 14: Relación entre la resistencia de hinca y la penetración
Fuente: Maurice Cassan, Los Ensayos "In Situ" en la Mecánica del Suelo (1982, pág. 148)

De la Figura 14 se puede deducir que el penetrómetro ingresa en suelo una distancia $e + e'$ por la acción de un golpe, luego el suelo se restituye una distancia e' (deformación elástica) y queda una deformación permanente e^1 , que es la que se aprecia al ejecutar el ensayo.

2.3.7. PARÁMETROS DE PERDIDA DE ENERGÍA EN LA FORMULA GENERAL DE HINCA

2.3.7.1. PRINCIPIO DEL TRABAJO Y LA ENERGÍA

El trabajo de una fuerza constante paralela a su desplazamiento está definido por (Beer, Johnston, & Cornwell, 2013, pág. 623):

$$U = F \cdot r \quad (26)$$

Dónde:

- U = Trabajo de la Fuerza F .
- F = Fuerza actuante.
- r = Desplazamiento de la fuerza F .

La energía cinética de una partícula se define como (Beer, Johnston, & Cornwell, 2013, pág. 626):

$$T = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (27)$$

Dónde:

- T = Energía cinética de una partícula.
- m = Masa de la partícula.
- v = Velocidad de la partícula.

Y el principio del trabajo y la energía se define como (Beer, Johnston, & Cornwell, 2013, pág. 626):

$$T_1 + U_{1-2} = T_2 \quad (28)$$

¹ e , es la deformación permanente por golpe o penetración promedio por golpe, no se debe confundir con la relación de vacíos indicada en la ecuación (4).

Dónde:

T_1 = Energía cinética de una partícula en un punto 1.

T_2 = Energía cinética de una partícula en un punto 2.

U_{1-2} = Trabajo de fuerzas externas del punto 1 al 2.

Existen fuerzas conservativas como la fuerza de la gravedad y la fuerza elástica, a las cuales se les puede asociar una energía potencial y expresar el trabajo que realizan en función de esta, estos es (Beer, Johnston, & Cornwell, 2013, págs. 643-644):

Fuerza de gravedad:
$$U_{1-2} = (V_g)_1 - (V_g)_2 \quad \text{con } V_g = W \cdot y \quad (29)$$

Fuerza elástica:
$$U_{1-2} = (V_e)_1 - (V_e)_2 \quad \text{con } V_e = \frac{1}{2}K \cdot x^2 \quad \text{ó} \quad V_e = \frac{1}{2}F \cdot x \quad (30)$$

Dónde:

V_g = Energía potencia debida a la fuerza de gravedad.

y = Distancia del nivel de referencia al punto.

W = Peso de la partícula ($m \cdot g$).

V_e = Energía potencia debida a la fuerza elástica.

x = Deformación del elemento elástico.

K = Constante del resorte o del elemento elástico.

U_{1-2} = Trabajo de la fuerza del punto 1 al 2.

Se debe recordar que la conservación de la energía se aplica siempre y cuando solo se presenten fuerzas conservativas, pero si hay fuerzas no conservativas se debe usar el principio del trabajo y la energía.

2.3.7.2. FORMULA GENERAL DE HINCA

Si se considera un penetrómetro (Figura 15) con una maza de peso M y un cuerpo de peso P , levantamos la maza y la dejamos caer de una altura H , la sonda penetrara en el suelo generando una reacción promedio de este, que llamaremos resistencia dinámica del suelo R_d . Para poder saber el valor de R_d se aplica el principio del trabajo y la energía, lo que nos da la fórmula general de hinca.

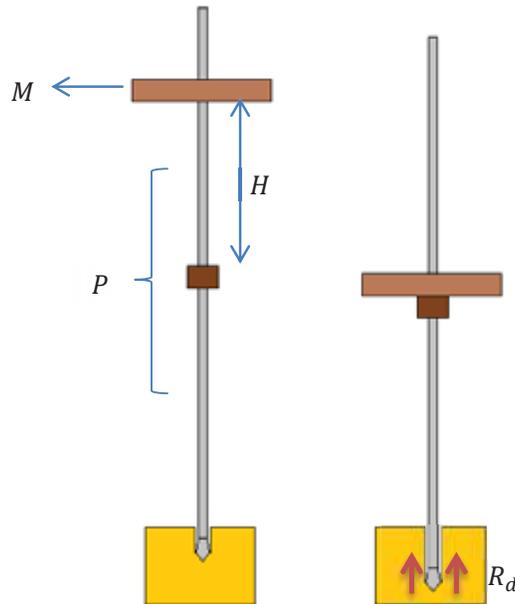


Figura 15: Esquema de ensayo DPL
 Fuente: Elaboración propia

Bolomey (1971, pág. 978) muestra la siguiente formula general de hinca:

$$k_1 \cdot M \cdot H = R_d \cdot e + k_2 \cdot R_d \cdot \frac{c'}{2} + k_3 \frac{P \cdot M \cdot H}{M + P}$$

A esta ecuación, si le adicionamos el trabajo realizado por la gravedad tendríamos:

$$k_1 \cdot M \cdot H + (M + P)e = R_d \cdot e + k_2 \cdot R_d \cdot \frac{c'}{2} + k_3 \frac{P \cdot M \cdot H}{M + P}$$

O también se puede escribir como:

$$k_1 \cdot M \cdot H + (M + P)e = R_d \cdot e + R_d \cdot c + (1 - n^2) \frac{P \cdot M \cdot H}{M + P} \quad (31)$$

Dónde:

- R_d = Resistencia dinámica del suelo.
- k_1 = Factor de reducción de energía por la caída.
- M y P = Peso de la maza y cuerpo del penetrómetro.
- H = Altura de caída de la maza.

k_2 = Factor que relaciona las deformaciones elásticas del penetrómetro con la deformación elástica del suelo-penetrómetro.

c' = Deformación elástica del penetrómetro.

k_3 = Factor de pérdida de energía debida al tipo de choque, $(1 - n^2)$.

e = Deformación permanente o plástica por golpe.

c = Factor que considera las deformaciones elásticas $(k_2 \cdot c' / 2)$.

n = Coeficiente de restitución del choque.

Aunque si se hace una revisión a la demostración de la formula general se puede llegar a esta otra (ANEXO C) que será la que se use.

$$(M + P) \cdot (e + c) + k_1 \cdot M \cdot H = R_d \cdot (e + c) + k_1 \cdot M \cdot H \frac{(1 - n^2) \cdot P}{M + P} \quad (32)$$

Despejando el valor de la resistencia dinámica del suelo tenemos:

$$R_d = k_1 \cdot \frac{M \cdot H}{e + c} \cdot \frac{M + n^2 \cdot P}{M + P} + (M + P) \quad (33)$$

De la ecuación (31) ó (32) se puede obtener otras fórmulas dinámicas (Bolomey Frazer, 1971, pág. 979) de las cuales se resalta la más usada en nuestro medio, la formula holandesa, que no considera el trabajo del equipo, ni las pérdida durante la caída de la maza, desprecia la deformación elástica y asume que el choque es perfectamente inelástico.

$$M \cdot H = R_d \cdot e + M \cdot H \frac{P}{M + P} \quad \text{ó} \quad R_d = \frac{M \cdot H}{e} \cdot \frac{M}{M + P} \quad (34)$$

Por las simplificaciones asumidas la formula holandesa solo es válida para hincas relativamente suave, ya que si el valor de e tiende a cero el valor de R_d seria infinito, lo cual no es cierto (Bolomey Frazer, 1971, pág. 981).

Si se utiliza un artificio para escribir la formula general de hinca (ecuación (33)) como una ecuación de la altura de caída en función de la deformación plástica tenemos (Cassan, 1982, pág. 152):

$$H = \frac{(R_d - (M + P))}{b} \cdot e + \frac{(R_d - (M + P))}{b} \cdot c ; \quad \text{con} \quad b = k_1 \cdot M \frac{M + n^2 \cdot P}{M + P} \quad (35)$$

Esta ecuación es de la forma $H = A \cdot e + H_0$ (Figura 16) (Cassan, 1982, pág. 153), que tiene la ventaja de poder determinarse gráficamente variando la altura de caída, lo que permite ya no depender de la deformación plástica, sino de A .

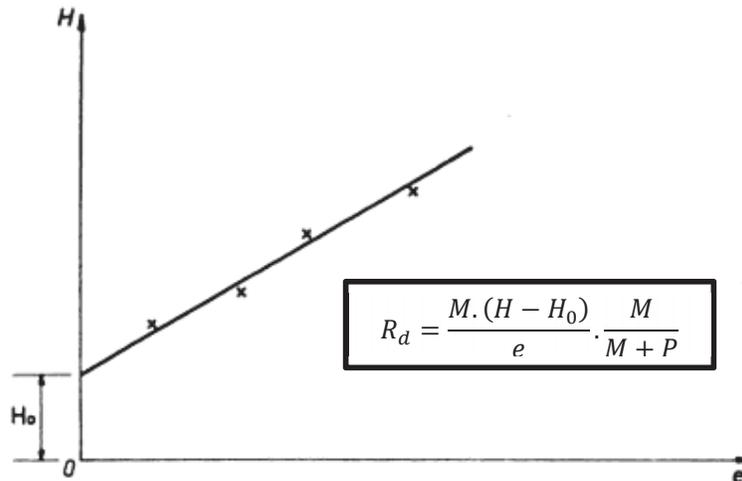


Figura 16: Estimación gráfica del rechazo elástico

Fuente: Adaptado de Maurice Cassan, Los Ensayos "In Situ" en la Mecánica del Suelo (1982, pág. 154)

$$R_d = A \cdot b + M + P \quad \text{ó} \quad R_d = k_1 \cdot M \cdot \frac{M + n^2 \cdot P}{M + P} \cdot A + (M + P) \quad (36)$$

Esto nos indica la existencia de una altura mínima de caída, la cual no produciría una deformación plástica (Bolomey Frazer, 1971, pág. 979), entonces la ecuación general se puede escribir como:

$$R_d = \frac{H - H_0}{e} \cdot b + M + P \quad \text{ó} \quad R_d = k_1 \cdot \frac{M + n^2 \cdot P}{M + P} \cdot M \cdot \frac{H - H_0}{e} + (M + P) \quad (37)$$

Una forma de poder obtener de forma indirecta el valor de c es usando la ecuación (38), que permite saber si este parámetro es despreciable o no.

$$c = \frac{H_0}{A} \quad (38)$$

2.3.7.3. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PERDIDA DE ENERGÍA

En general, en la formula general de hincas se puede apreciar tres parámetros de pérdida de energía, pérdida de energía durante la caída de la maza, pérdida de energía por el tipo de choque y pérdida de energía por las deformaciones elásticas.

La pérdida de energía durante la caída de la maza está asociada al factor k_1 , el cual debe tener en cuenta los parámetros indicados en el ítem 2.3.4, al juntar las ecuaciones (15), (17) y (18) se puede deducir que:

$$k_1 = k_c \cdot k_H \quad (39)$$

La pérdida de energía por el tipo de choque está directamente asociada al coeficiente de restitución, así que es muy importante que se pueda calcular, para lo cual se considera que el único elemento que se mueve durante la ejecución del ensayo es la maza. En base a lo indicado, se puede definir el coeficiente de restitución como una función del cociente de la altura de rebote y la altura de caída (ecuación (24)), esto es:

$$n = \frac{1}{k_c} \cdot \sqrt{\frac{h_r}{k_H \cdot H}} \quad (40)$$

Para la pérdida de energía por las deformaciones elásticas se considera el factor c , que puede ser estimado experimentalmente usando la ecuación (38), pero también se puede usar en forma más directa el parámetro de H_0 , definido como la altura que no genera penetración permanente, para cualquiera de los dos es necesario realizar el ensayo con diferentes alturas de caída como se muestra en la Figura 16.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN

El tipo del diseño de investigación es *Experimental*, porque se realizan experimentos en condiciones controladas y se manejan más de una variable independiente y dependiente.

El nivel o alcance de la investigación es *Explicativa*, porque busca explicar la relación causa efecto entre las variables de estudio.

3.2. VARIABLES

3.2.1. VARIABLES INDEPENDIENTES

Operador : Cualitativa; indica la experiencia del operador encargado de hacer funcionar el dispositivo de introducción manual (llevar y soltar la maza), se consideran dos categorías, con experiencia, al operador que ha ejecutado al menos 3 ensayos DPLs completos, y sin experiencia al operador que por primera vez o aun no realizó 3 ensayos DPLs completos.

H : Altura teórica de caída de la maza; altura de la cual se pretende soltar la maza en caída libre, es la distancia entre la cara superior del yunque y la cara inferior de la maza, se mide en centímetros, y variara de 10 cm a 60 cm con intervalos de 10 cm.

L : Longitud del varillaje; se mide en metros con una precisión de 0.05 m, es la distancia entre la base del yunque y la parte superior de la punta, está en función de cuantas varillas se está usando en el ensayo.

Pf : Profundidad de inspección; se mide en metros con una precisión de 0.01 m, es la distancia de la superficie del terreno hasta la punta de la sonda reducida en 0.05 m.

C_r : Compacidad relativa del suelo; se mide en porcentaje (%) de acuerdo al ítem 2.3.3.1, varía de 0% a 100% y se agrupa de forma cualitativa como: muy suelto, suelto, medio, denso y muy denso.

Tipo de suelo : Cualitativa, según la clasificación SUCS, se determina según el ítem 2.3.3.2, considerando los tipos SM, SC y SC-SM como los de interés.

3.2.2. VARIABLES DEPENDIENTES

k_1 : Factor de reducción de energía por la caída; este valor indica la pérdida de energía que se puede estar dando al momento de la caída de la masa por fenómenos de fricción con la guía, fricción y empuje con el aire y distorsiones de la altura de caída. Es adimensional, se expresa en centésimas con un valor máximo de 1.00, se mide en forma indirecta siguiendo el procedimiento descrito en el ítem 3.5.1.

n : Coeficiente de restitución; este coeficiente nos indica el tipo de choque que se presenta en el contacto de la maza y el yunque, es adimensional variado de 0 a 1, se mide indirectamente, para calcularlo se usa la ecuación (40).

H_0 : Altura mínima de caída; altura de la cual si se dejaría caer la maza no debería generar penetración permanente, se expresa en centímetros, se mide en forma indirecta, para calcularla se realiza en ensayo DPL variando la altura de caída (Figura 8).

3.2.3. RELACIÓN ENTRE VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES

En base al marco teórico y a un análisis lógico, se espera que exista una relación entre el factor de reducción de energía por la caída k_1 , la altura de caída H y el *Operador*, de la forma:

$$k_1 = f(H, \text{Operador})$$

Respecto al coeficiente de restitución n ; no se tiene bien definido de que puede depender, así que se considera a priori que depende de todas las variables independientes, excepto del *Operador* por estar fuera del fenómeno físico, esto es:

$$n = f(H, L, Pf, Cr, \text{Tipo de suelo})$$

Por último, Respecto a la altura mínima de caída H_0 , tampoco se tiene claro de que depende, pero en definitiva no depende del *Operador* ni de la altura de caída H , así que se tiene una relación de la forma:

$$H_0 = f(L, Pf, Cr, \text{Tipo de suelo})$$

3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN - MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	MARCO TEÓRICO	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS
	GENERAL	GENERAL		DEPENDIENTES	DEPENDIENTES	GENERAL	GENERAL
¿Tienen el DPL y los suelos diferentes coeficientes de pérdida de energía relacionados a la fórmula general de hincas que influyen en forma significativa en los resultados obtenidos en este ensayo?	Definir y correlacionar los coeficientes de pérdida de energía de la fórmula general de Hincas con el DPL, el tipo de suelo y su compactación, para mejorar la confiabilidad de los resultados.	El balance energético genera la fórmula general de Hincas, que nos da R_d : $R_d = k_1 \cdot \frac{M + n^2 \cdot P}{M + P} \cdot M \cdot \frac{H - H_0}{e}$	"El DPL y los suelos donde se aplica tienen distintos coeficientes de pérdida de energía relacionados a la fórmula general de hincas que influyen en forma significativa en los resultados del ensayo"	<ul style="list-style-type: none"> k_1: Reducción de energía por caída. n: Coeficiente de restitución. H_0: Altura mínima de caída. 	<ul style="list-style-type: none"> Adimensional, en decimales de 0 a 1. Adimensional, en decimales de 0 a 1. Distancia en cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Tipo de investigación: Experimental. Nivel de investigación: Explicativa. 	Se evaluará el valor de R_d vs los coeficiente de pérdida de energía.
	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS		DEPENDIENTES	DEPENDIENTES	ESPECÍFICO	ESPECÍFICO
	Definir y cuantificar la pérdida de energía por el tipo de caída y forma de la maza del equipo.	La pérdida de energía durante la caída de la maza se asocia a la fricción y variaciones de la altura de caída: $k_1 = k_c \cdot k_H$		<ul style="list-style-type: none"> Operador: destreza del operador. H: Altura de caída de la maza. L: Longitud de la sonda. Pf: Profundidad de inspección Cr: Compactación relativa del suelo. Tipo de suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> Con experiencia, Sin experiencia. Distancia en cm, de 10 a 60. Distancia en m. Distancia en m. Cualitativo, de muy suelto a muy denso. Clasificación SUCS. 	<ul style="list-style-type: none"> Usar un sensor de movimiento y captar las variaciones en la caída para cada altura y operador. 	Se evaluará la incidencia de la variación de H y operador en k_1 .
	Definir y cuantificar el tipo de choque que se produce entre la maza y el yunque, en distintos tipos de suelos, con compactaciones diferentes y distintas profundidades.	El tipo de choque se asocia al coeficiente de restitución: $n = \frac{1}{k_c} \cdot \sqrt{\frac{h_{rp}}{k_H \cdot H}}$		<ul style="list-style-type: none"> Aplicar el ensayo en la misma zona con tres diferentes alturas de caída. Repetir para cada tipo de suelo con compactaciones diferentes. 	Se evaluará la relación que pueda existir entre H, L, Pf, Cr, tipo de suelo contra n.		
Definir y cuantificar las deformaciones elásticas que se producen en la interacción suelo-punta, en distintos tipos de suelos, con compactaciones diferentes y distintas profundidades.	Un artificio permite relacionar la altura de caída de la maza y la distancia penetrada en una recta, para apreciar las deformaciones elásticas: $H = \frac{H_0}{C} e + H_0$	Se evaluará la relación que pueda existir entre L, Pf, Cr, tipo de suelo contra H_0 .					

3.4. EQUIPOS

3.4.1. EQUIPOS PARA LA MEDICIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DE LA MAZA

- **Sensor de movimiento PS-2103 marca PASCO:** Es un equipo que permite medir la posición en metros de un objeto respecto a su centro usando ultrasonido (ANEXO D).
- **Xplorer GLX marca PASCO:** Es un equipo de adquisición de datos, gráficos y análisis, diseñado para estudiantes y educadores de ciencias. El Xplorer GLX admite hasta cuatro sensores PASPORT simultáneamente, además de dos sensores de temperatura y un sensor de tensión conectados directamente a los puertos correspondientes (ANEXO D).
- **Accesorios:** Para la instalación del sensor de movimiento es necesario el uso de varillas de distintos tamaños así como una mordaza de forma triangular.

3.4.2. PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA (DPL)

Para propósitos de esta tesis se usan las características del equipo DPL descritas en el ítem 2.3.1 para el diseño y la fabricación de un equipo a medida.

Las características del equipo fabricado se indican en la Tabla 3 y se detallan en el ANEXO E.

Tabla 3: Dimensiones y pesos del equipo DPL usado

ELEMENTO	DIMENSIÓN		
	DIÁMETRO (cm)	LARGO (cm)	MASA (kg)
Martinete o Maza	20.3 - 15.5	5.0	9.9989
Guía	2.2	75.0	2.300
Yunque	8.0	3.7	1.987
Varilla de ensamble	2.2	15.0	
Varilla típica	2.2	80.0	2.3698
Punta	3.57	9.8	0.5068

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. OTROS EQUIPOS USADOS

Durante el desarrollo de esta tesis fue necesario el uso de diferentes tipos equipos para ensayos en laboratorio y en campo, con el propósito de obtener la clasificación de suelos, densidades máximas, densidades naturales y otros. Estos son (Figura 17):

- Equipo para límite líquido y accesorios.
- Equipo para límite plástico y accesorios.
- Equipo para análisis granulométrico por tamizado.
- Equipos para determinar el contenido de humedad.
- Equipo para realizar el ensayo de proctor .modificado.
- Equipo para realizar ensayo de densidad mínima.
- Equipo SPT y tubo de pared delgada.
- Extractor de muestras de tubo de pared delgada.
- Accesorios para el manipuleo de las piezas del DPL y SPT.

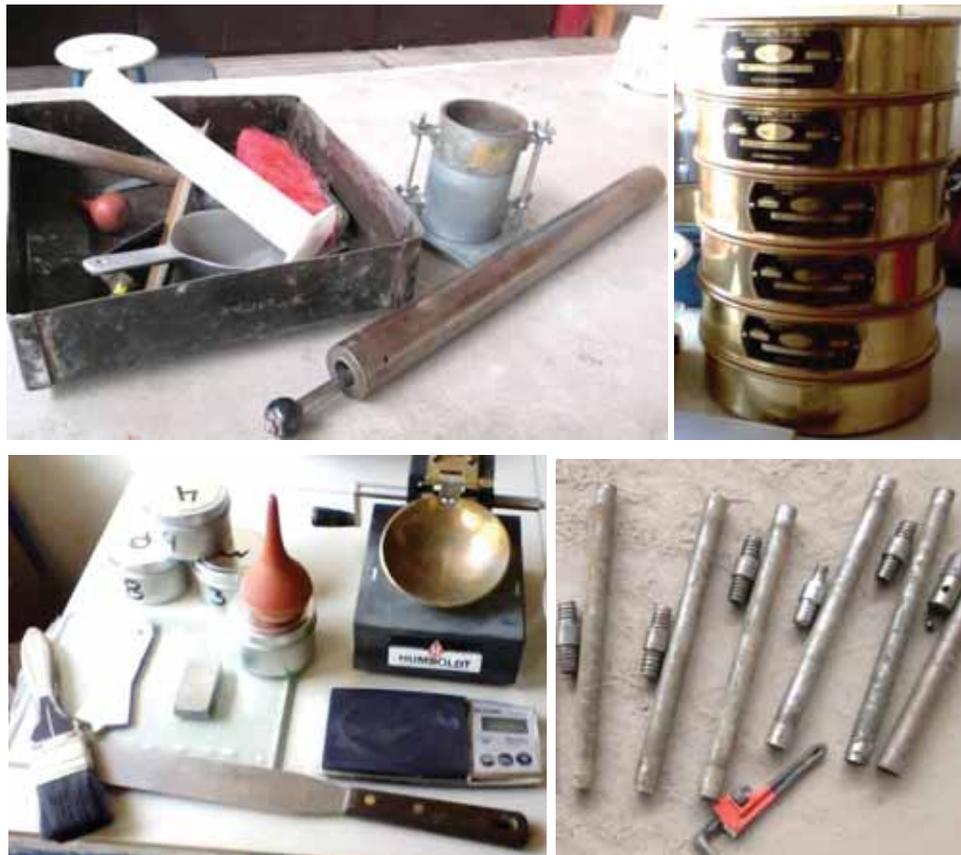


Figura 17: Equipos de Laboratorio y muestreo
Fuente: Elaboración propia

3.5. MÉTODOS

Los métodos usados, tiene en propósito de realizar la toma de datos en condiciones de laboratorio y de campo, siguiendo los lineamientos planteados en el ítem 2.3.2 (ensayo DPL) y con diversas variaciones propuestas por el autor basadas en el marco teórico, necesarias para el cumplir los objetivos planteados. Estos métodos son establecidos mediante pruebas preliminares (ANEXO F) y se detallan a continuación.

3.5.1. MEDICIÓN DE LA PERDIDA DE ENERGÍA POR CAÍDA DE LA MAZA

Este procedimiento es usado para medir el factor de reducción de energía por la caída de la maza k_1 , el cual se realiza en condiciones de laboratorio, en un suelo de prueba (pozo de pruebas del ensayo SPT, L.M.S.M FIC UNSAAC), para lo cual se requiere:

- Equipo DPL
- Herramientas para la manipulación del equipo DPL
- Sensor de movimiento PS-2103.
- Registrador de datos Xplorer GLX.
- Trípode del equipo SPT.
- Tubo metálico de 2.20 m
- Varilla metálica.
- Mordaza triangular.
- Nivel de mano.
- Cuaderno de ocurrencias.
- 02 colaboradores

Se sigue el siguiente procedimiento (H.2 - ANEXO H):

1. Nivelar el pozo de pruebas del SPT, removiendo unos 30 cm de la superficie y compactándolo ligeramente.
2. Fijar el sensor de movimiento al trípode con ayuda del tubo, la mordaza y la varilla a 2.06 m del nivel del pozo de pruebas, constatando que el sensor de movimiento apunte en dirección perpendicular del suelo y configurar el Xplorer GLX para que realice 100 mediciones por segundo.
3. Para saber la incidencia del aires en el ensayo; levantar la maza a la recta del sensor, encender el sensor y dejar caer libremente la maza, luego apagar el sensor y guarda los datos.

4. Para medir la fricción de la maza con la guía; armar el equipo DPL perpendicular al suelo (un colaborador debe sujetar la guía para mantener el equipo en esta posición), ubicando la maza debajo del sensor (Figura 18), encender el sensor e iniciar el proceso de levantar y soltar la maza hasta que la sonda ingrese 80 cm (longitud de una varilla), concluida las repeticiones apagar el sensor y guardar los datos. Repetir el paso para diferentes alturas de caída, aproximadas de 40 cm, 50 cm y 60 cm.
5. Para medir de la variación de la altura; ejecutar el ensayo en forma continua, con 4 diferentes operadores, indicándoles que deben levantar la maza hasta una línea marcada en la guía, a una altura de caída de 0.505 m, realizar las mediciones con el sensor de movimiento. De estos operadores uno es experimentado y el resto realizara el ensayo por primera o segunda vez.
6. Para la medición de la fricción inclinada; armar el equipo con una pendiente de 108.8 % (37 cm/ 34 cm) (Figura H.6) y ubicar el sensor de tal forma que registres los datos en forma perpendicular a la maza. La temperatura promedio en el laboratorio es 20 °C.

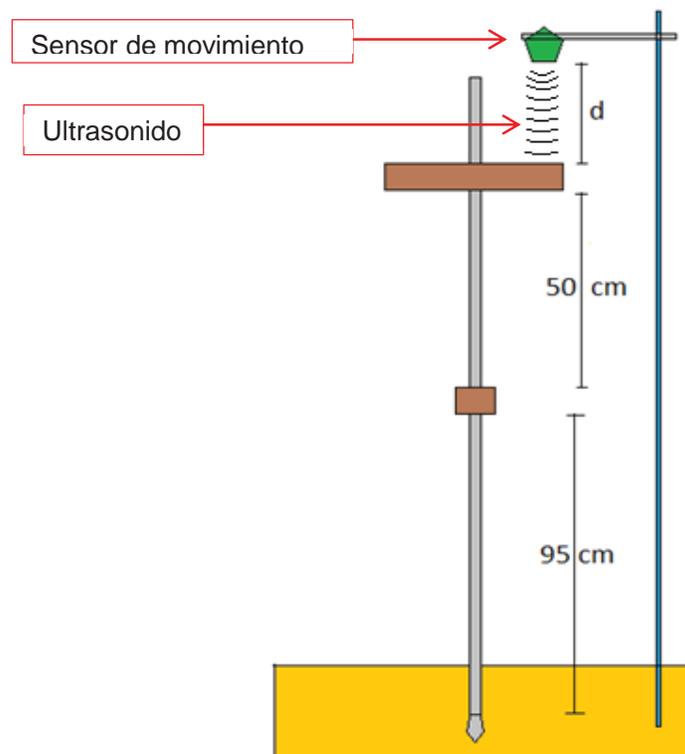


Figura 18: Esquema de toma de datos con el sensor de movimiento
Fuente: Elaboración propia

3.5.2. ENSAYO DPL EN CONDICIONES DE LABORATORIO

Para poder eliminar cualquier factor externo que puedan desvirtuar los datos, la prueba del DPL se realiza en forma controlada en el pozo de pruebas del ensayo SPT del laboratorio de mecánica de suelos y materiales de la facultad de Ingeniería Civil (FIC) de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), en un suelo del mismo tipo, homogéneo horizontalmente, para luego comparar las propiedades del suelo con los resultados del ensayo. Para esto se siguieron las siguientes etapas (I.4 - ANEXO I):

3.5.2.1. PREPARACIÓN DEL POZO DE PRUEBAS

Para esta etapa se requiere:

- Equipo para determinar límite líquido.
- Equipo para determinar límite plástico.
- Equipo para granulometría por tamizado.
- Equipo para determinar peso específico de las partículas sólidas.
- Equipo para determinar la densidad máxima.
- Equipo para determinar la densidad mínima.
- Equipo para determinar el contenido de humedad.
- Posteadoras manuales.
- Pico, pala y balde.
- Pisón de mano, regla de madera y wincha metálica.
- 02 peones.

Para preparar el pozo de pruebas se sigue los siguientes pasos:

1. Tomar una muestra representativa del suelo del pozo de pruebas, reducirla y prepararla para los ensayos según las normas: MTC E 103 – 2000, MTC E 105 – 2000 y MTC E 106 – 2000.
2. Realizar los ensayos de clasificación del suelos; límite líquido, límite plástico, granulometría y contenido de humedad según las normas, MTC E 107 – 2000, MTC E 108 – 2000, MTC E 110 – 2000 y MTC E 111 – 2000.
3. Realizar el ensayo de peso específico de las partículas sólidas según la norma MTC E 113 – 2000.

4. Determinar la densidad máxima compactada con la energía modificada según la norma MTC E 115 – 2000 y la densidad mínima según la norma I.N.V. E – 136 – 07 (Colombia).
5. Remover el suelo del pozo hasta una profundidad de 1.50 m.
6. Nivelar el suelo no removido y compactarlo de tal forma que quede uniforme y permita el relleno y compactado homogéneo de las demás capas.
7. Recomprimir el suelo en capas de aproximadamente 20 cm con pisón manual, hasta que tengan una compactación relativa de medio a denso, verificado esto con los criterios de la Tabla 2 (Figura 19).

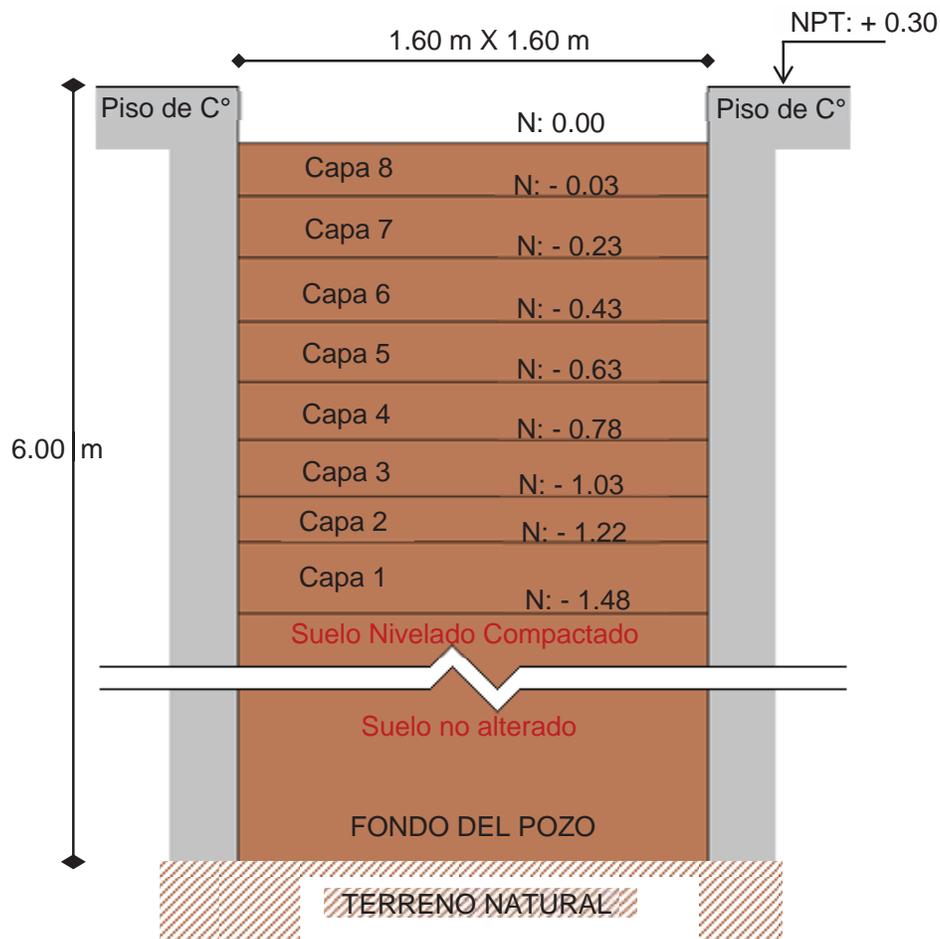


Figura 19: Esquema de capas compactadas del pozo de prueba del SPT (L.M.S.M.–FIC–UNSAAC)
Fuente: Elaboración propia

3.5.2.2. EJECUCIÓN DEL ENSAYO DPL CON DIFERENTES ALTURAS

Para esta etapa se requiere:

- Equipo DPL.
- Herramientas para la manipulación del equipo DPL.
- Cuaderno de ocurrencias.
- Formato de toma de datos.
- 03 Colaboradores.

Para la toma de datos se sigue los siguientes pasos:

1. Distribuir los puntos donde se van a ejecutar los ensayo, distanciados entre si unos 40 cm y distanciados del borde del pozo 40 cm, dejando el medio para la toma de muestras.
2. Armar el equipo y resaltar las marcas para el conteo cada 10 cm, marcar la guía con marcas cada 0.5 cm a partir del yunque hasta los 3 cm para apreciar el rebote y marcar la altura de caída.
3. Ejecutar el ensayo DPL introduciendo primero la punta, luego contabilizar el número de golpes en una cierta distancia de ingreso de la sonda (generalmente 10 cm), anotar esta distancia, anotar el rebote promedio de la maza respecto al yunque en cm con una aproximación de 0.1 cm y la dificultad de girar la varilla en sentido horario.
4. Marcar en el formato de toma de datos el adiconamiento de cada varilla, el formato esta preestablecido para adicionar la primera varia luego de introducir 70 cm, la segunda varia al introducir 80 cm más, la tercera varia al introducir 80 cm más y así sucesivamente (Figura I.1 - ANEXO I).
5. Anotar cualquier eventualidad que pueda descartar algún tramo de los datos.
6. Realizar en ensayo con alturas de caída de 60 cm, 50 cm, 40 cm, 30 cm y 20 cm hasta una profundidad de 2.20 m.

3.5.2.3. MEDICIÓN DE LA DENSIDAD NATURAL

Para esta etapa se requiere:

- Posteadora manual.
- Equipo SPT.
- Tubo de pared delgada Shelby.
- Extractor de muestras de tubo Shelby y canaleta.

- Balanzas, vernier, capsulas para humedad y otros.

Para la toma de datos se sigue los siguientes pasos:

1. Remover en el centro del pozo de pruebas compactado 10 cm de suelo con la posteadora.
2. Armar el equipo SPT con un adaptador para acoplar el tubo shellby.
3. Ejecutar la extracción de muestra inalterada golpeando con el martinete y luego jalando con el motor.
4. Extraer el tubo shellby, pesar y medir la distancia de la muestra.
5. Extraer la muestra sobre la canaleta.
6. Seccionar la muestra, medir y pesar cada fracción.
7. Tomar porciones de suelo de cada fracción para el contenido de humedad.

3.5.3. PRUEBAS DE CAMPO

Con la finalidad de corroborar los datos obtenidos en laboratorio se realiza el ensayo del DPL en distintas zonas del cusco que cuenten o se esté haciendo un estudio de suelos, para esto se requiere:

- Equipo DPL.
- Herramientas para manipulación del equipo DPL.
- Equipo de transporte de cortas distancias para el equipo DPL y accesorios.
- Cuaderno de ocurrencias.
- Formato de toma de datos.
- Información del estudio de suelos de la zona.
- 02 Colaboradores.

Se usa es el siguiente procedimiento:

1. Tomar información general de la zona, ubicación, numero de ensayo, fecha, hora y profundidad inicial
2. Distribuir los puntos donde se van a ejecutar los ensayos, distanciados entre si unos 40 cm en una zona regularmente plana.
3. Armar el equipo y resaltar las marcas para el conteo cada 10 cm, marcar la guía con marcas cada 0.5 cm para ver el rebote y marcar la altura de caída.
4. Ejecutar el ensayo DPL introduciendo primero la punta, luego contabilizando el número de golpes necesarios para ingresar la sonda una cierta distancia

(generalmente 10 cm), anotar esta distancia, anotar el rebote promedio de la maza respecto al yunque en cm con una presión de 0.1 cm y la dificultad de girar la varilla en sentido horario.

5. Marcar en el formato de toma de datos el adiconamiento de cada varilla, el formato esta preestablecido para adicionar la primera varia luego de introducir 70 cm, la segunda varia al introducir 80 cm más, la tercera varia al introducir 80 cm más y así sucesivamente (Figura I.1 - ANEXO I).
6. Anotar cualquier eventualidad que pueda descartar algún tramo de los datos.
7. Realizar en ensayo con alturas de caída diversas según el suelo, buscando estar cerca de la altura H_0 , generalmente se aplican tres altura diferente de caída, múltiplos de 10 cm.
8. Comparar la información obtenida con los datos del estudio de suelos.

3.6. TAMAÑO DE MUESTRAS

3.6.1. RESPECTO A LOS PARÁMETROS DE CAÍDA DE LA MAZA

En vista que, la variable operador (ítem 3.2) solo toma dos valores, se requiere al menos dos individuo con características diferentes.

Para la medición de los parámetros necesarios para calcular el factor de reducción de energía por la caída de la maza k_1 , se realizan los siguientes ensayos:

1. 03 pruebas de caída libre de maza: PCLM 1, PCLM 2 y PCLM 3.
2. 59 pruebas de fricción con la guía perpendicular al suelo (PFGP), para diferentes alturas de caída de la maza (Tabla 4).

Tabla 4: Pruebas para medir la fricción de la maza con la guía

ALTURA	PRUEBAS	CANTIDAD
H=60 cm	PFGP 1 al PFGP 20	20
H=50 cm	PFGP 21 al PFGP 54	34
H=40 cm	PFGP 55 al PFGP 67	13

Fuente: Elaboración propia

3. 04 pruebas de variación de la altura de caída (PVH) con varios ciclos y distintos operadores (Tabla 5).

Tabla 5: Pruebas para medir la variación de la altura de caída

OPERADOR	PRUEBA	CICLOS	CONDICIÓN ¹
Op 1	PVH 1	31	Sin experiencia
Op 2	PVH 2	7	Sin experiencia
Op 3	PVH 3	28	Sin experiencia
Op 4	PVH 4	95	Con experiencia

Fuente: Elaboración propia

4. 04 pruebas de fricción de la maza con la guía inclinada: PFGI 1, PFGI 2, PFGI 3 y PFGI 4.

3.6.2. RESPECTO A LOS PARÁMETROS RELACIONADOS CON EL SUELO

Por ser el suelo una población muy variable y conformada por sub poblaciones bien definidas, pero no ubicadas en una misma zona. Se define como sub población a un tipo de suelo con una compacidad relativa determinada e individuo a un miembro de esta sub población, se propone como mínimo 5 individuos para validar los factores de perdida de energía por tipo de golpe y deformación elástica que le correspondan a esta sub población.

Como se indica en el ítem 3.2 se busca analizar tres tipos de suelos que son; SM, SC y SC-SM, cada uno de estos se puede encontrar con diferente compacidad relativa, que se agrupan en muy suelto, suelto, medio, denso y muy denso, haciendo un total de 15 sub poblaciones posibles a estudiar, lo que nos daría un aproximado de 125 individuos; pero el suelo es un materia muy variable he impredecible, por ello se realizan las siguientes pruebas con la intención de ubicar la mayor cantidad posible de individuos de estudio:

- Una prueba en laboratorio: PL 1.
- 07 pruebas de campo (PC) (Tabla 6 y Figura 20).

¹ La experiencia de un operador se determinada por el número de ensayos de DPL que ha realizado, al ser este ensayo fácil de aprender, el autor considera como requisito mínimo para considerar a un operador con experiencia, que este haya realizado 3 ensayos de DPL completos, es decir haber accionado el dispositivo de introducción durante toda la prueba, en tres diferente puntos.

Tabla 6: Pruebas de campo

N°	DENOMINACIÓN	DIRECCIÓN	CONDICIÓN
PC 1	Proyecto: Mejoramiento de vía	Cusco - APV. Ernesto Gunther - Calicata N°3	Con Estudio
PC 2	Proyecto: Mejoramiento de vía	Cusco - APV. Ernesto Gunther –Trinchera N°5	Con Estudio
PC 3	Proyecto: Mejoramiento de vía	Cusco - APV. Ernesto Gunther - Calicata N°2	Con Estudio
PC 4	Proyecto: Edificio unifamiliar	San Sebastián - Los Rosales C-5 - Calicata N° 1	Con Estudio
PC 5	Proyecto: Mejoramiento de vía	San Sebastián - APV. Tres Cruces - Calle Huaynacapac - Calicata N° 2	Con Estudio
PC 6	Obra: Pavimentación	Santiago - APV. GERALDO RUIS CARO - Calle Pedro Huillca Tecse - Subrasante	Con Estudio
PC 7	Obra: Pavimentación	Santiago - APV. GERALDO RUIS CARO - Calle Pedro Huillca Tecse - Cimentación de terramesh	Con Estudio

Fuente: Elaboración propia



Figura 20: Ubicación de las pruebas de campo en el mapa de la provincia del Cusco

Fuente: Adaptada de Google Maps (2015), <https://www.google.com/maps/@-13.5236088,-71.9493788,14z>; consultado: 18/05/2015

3.7. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.7.1. CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LA PERDIDA DE ENERGÍA POR CAÍDA DE LA MAZA

Para el procesamiento de los datos, es necesario definir algunas posiciones de la maza durante la ejecución del ensayo, para esto se grafica la distancia de la maza al sensor de movimiento contra el tiempo (Figura 21).

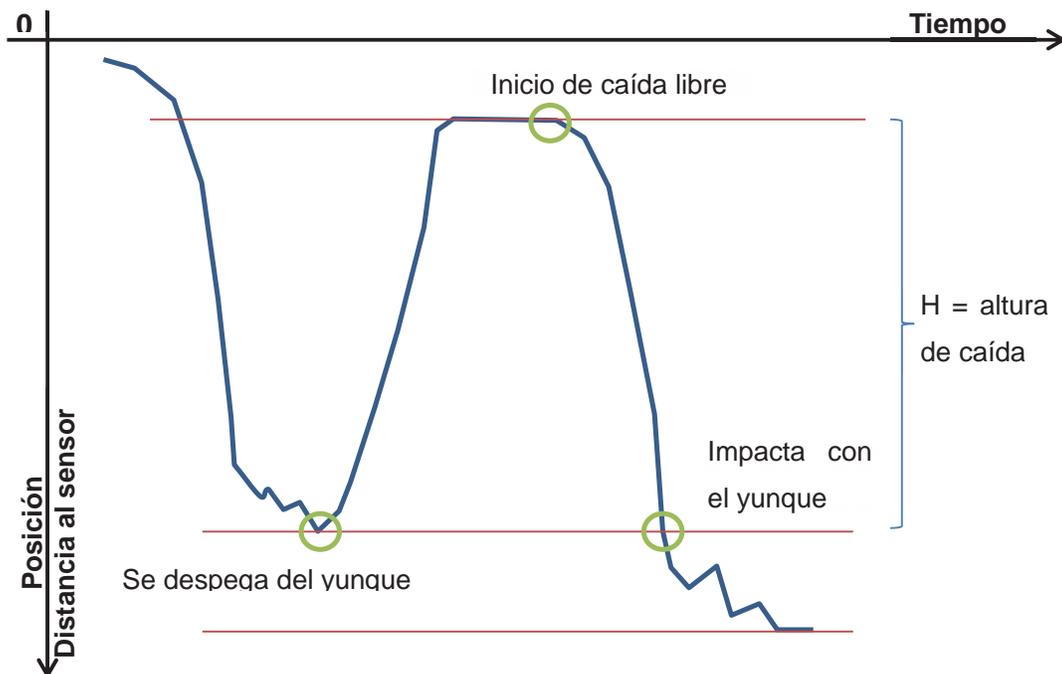


Figura 21: Puntos de interés del gráfico Posición vs Tiempo
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 21 se distinguen tres posiciones de interés, que son: posición de la maza antes de despegarla del yunque, posición de la maza antes de soltarla y posición de la maza en el instante que inicia el impacto con el yunque. Cada posición delimita diferentes zonas del comportamiento de la maza durante el ensayo (Figura 22) y permiten determinar datos importantes como la altura de caída real y la velocidad con la que impacta la maza al yunque, para ubicar estos puntos bastara con observar el grafico y distinguir los cambios de tendencia, es decir, el momento en que la maza deja de bajar y empieza a subir o cuando la maza deja de subir y empieza a bajar; pero el instante en el que la maza impacta el yunque no está bien definido, así que lo

consideraremos como el instante en que la maza vuelve a estar en la posición que se despegó del yunque.

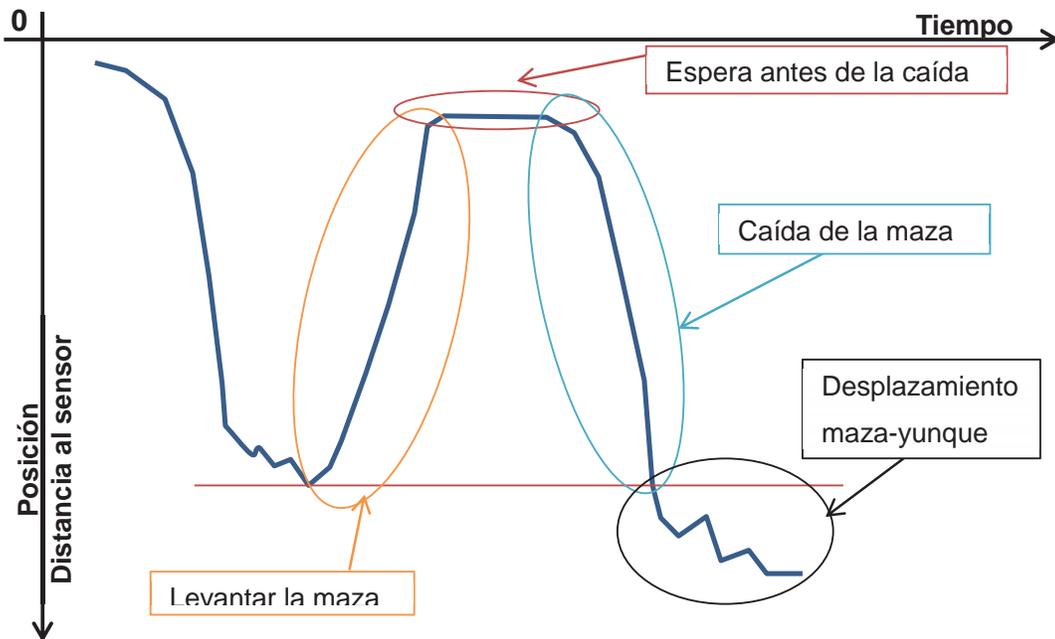


Figura 22: Zonas del comportamiento de la maza durante el ensayo DPL
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 22 se observan las distintas zonas del gráfico posición vs tiempo, las cuales pueden ser tres:

- **Levantamiento de la maza:** En esta zona se aprecia el desplazamiento de la maza de su posición de reposo inicial (se despegó del yunque) a la posición de la cual debe ser soltada, en esta zona también se incluye la espera antes de soltar la maza, que generalmente se nota en operadores inexpertos que se aseguran de soltar la maza de la altura correcta. Esta zona no tiene un comportamiento físico definido, tampoco es de interés para la investigación.
- **Caída de la maza:** Es la zona de mayor interés en esta etapa de la investigación, es donde ocurre la pérdida de energía y está delimitada por la posición de la maza antes de ser soltada y la posición de la maza en el instante que impacta con el yunque, se caracteriza por tener un comportamiento parabólico, similar a la caída de libre.
- **Desplazamiento maza-yunque:** Es la zona en la que se genera la transferencia de energía de la maza a la sonda, tiene un comportamiento muy inestable que depende de muchos factores difíciles de cuantificar, está

delimitada entre la posición de la maza en el instante que toca la maza y la posición de la maza antes de ser levantada por el operador, para luego volver a iniciar el ciclo.

Para procesar los datos obtenidos con el Xplorer GLX, se utiliza el programa DataStudio versión 1.9.8r10 (de prueba), en el cual se puede graficar la posición contra el tiempo, proporciona la curva de regresión cuadrática posición vs tiempo de la cual se puede calcular la primera derivada y obtener la ecuación de la velocidad, pero también se puede usar la ecuación matricial de regresión cuadrática (ANEXO G).

Las mediciones en el laboratorio con el sensor de movimiento fueron de 4 tipos; caída libre de la maza, fricción de la maza con la guía perpendicular al suelo, variaciones de la altura de caída y fricción de la maza con la guía inclinada respecto al piso. Para procesar cada uno de estos, se siguen los siguientes pasos:

3.7.1.1. Caída libre de la maza

El programa DataStudio permite ver el gráfico de velocidad vs tiempo de los datos de cada prueba de caída libre de la maza, de este grafico se obtiene una recta de regresión (Figura 23), siendo la pendiente de esta la aceleración de la caída a , y con este valor podemos calcular la fricción del aire que se indica en la ecuación(14). Para esto se usa a ecuación (41):

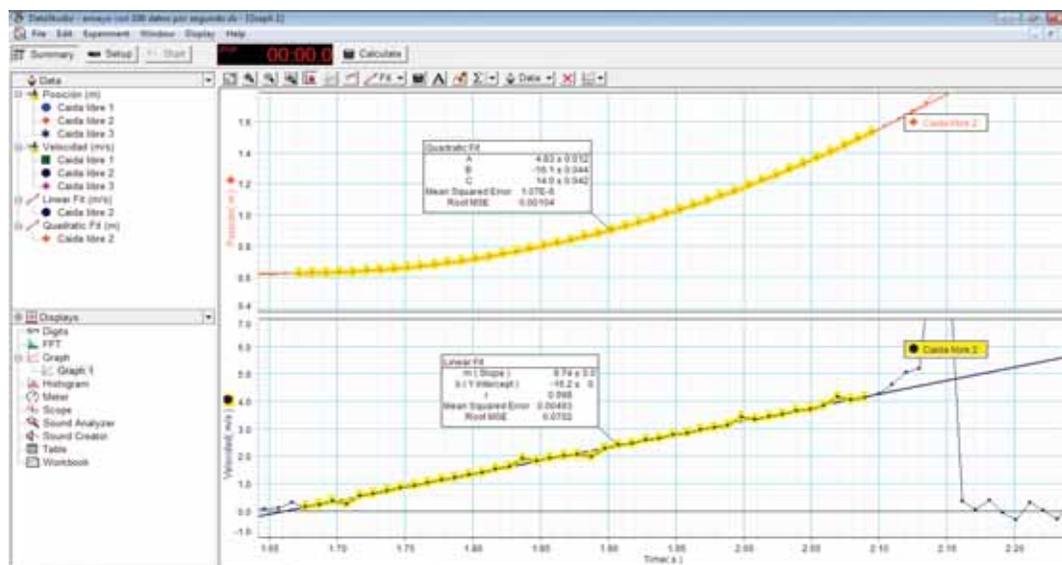


Figura 23: Curvas de regresión del programa DataStudio (PCLM 1)
Fuente: Elaboración propia

$$\mu_a = 1 - \frac{a}{g} \quad (41)$$

El valor de la gravedad a usar es $g = 9.7729 \frac{m}{s^2}$ (gravedad del Cusco, ítem 2.3.4.2).

3.7.1.2. Fricción de la maza con la guía perpendicular al suelo

Se grafican los datos de las pruebas (para medir la fricción de la maza con la guía) en el programa DataStudio, de los gráficos posición vs tiempo, se hallan a simple inspección la posición de la maza antes de ser despegada del yunque y la posición de la maza antes de ser soltada, para calcular la altura real de caída (ecuación (42)).

También se necesita la velocidad con la que la maza llega a impactar el yunque, para lo cual el programa DataStudio tiene herramientas graficas que permiten interactuar con los gráficos de posición vs tiempo y velocidad vs tiempo (Figura 24), el grafico posición vs tiempo fue ilustrado en la Figura 21 y Figura 22, pero el programa DataStudio lo grafica en forma invertida (la posición es un valor positivo). Para calcular esta velocidad, que es el dato que más interesa, se siguen los siguientes pasos:

1. Ubicar en el grafico posición vs tiempo la posición antes de despegar la maza del yunque y la posición de la maza antes de ser soltada.
2. Descartar cualquier punto incoherente que este dentro del gráfico, generalmente causado por la interferencia instantánea del operador entre la maza y el sensor de movimiento, estos puntos se caracterizan por ser picos espontáneos que salen de la continuidad del gráfico.
3. Seleccionar los puntos de la zona de caída de la maza con la herramienta de regresión cuadrática, de tal forma que tengan la mejor aproximación posible a una parábola, se recuerda que no siempre se deben usar la totalidad de los datos de esta zona, ya que el comportamiento como movimiento rectilíneo uniformemente variado se genera una vez que se vence la inercia y que el proceso de soltar la maza no es instantáneo, siendo esta la razón de una leve distorsión inicial en los datos.
4. En forma similar seleccionar los puntos del grafico velocidad vs tiempo, en la zona reciproca de la caída de la maza con la herramienta regresión lineal, se debe escoger los puntos que correspondan a los seleccionados en el paso anterior, si la recta no se aproxima bien a los datos, se pueden omitir algunos, pero en ambos gráficos, recordando que el tramo final de la recta es el más

importante, porque se supone que en esta zona el fenómeno ya se ha estabilizado completamente y permite una mejor aproximación de la velocidad con que está impactando la maza al yunque.

5. Luego proyectar la posición de la maza antes de despegarse del yunque hasta que intersecte la parábola de regresión en la zona de la caída de la maza, del cual se obtiene el instante en el que ocurrió el impacto, luego con este valor se ingresa al gráfico velocidad vs tiempo, y se intersecta la recta de regresión para obtener la velocidad con la que la maza impacta el yunque.

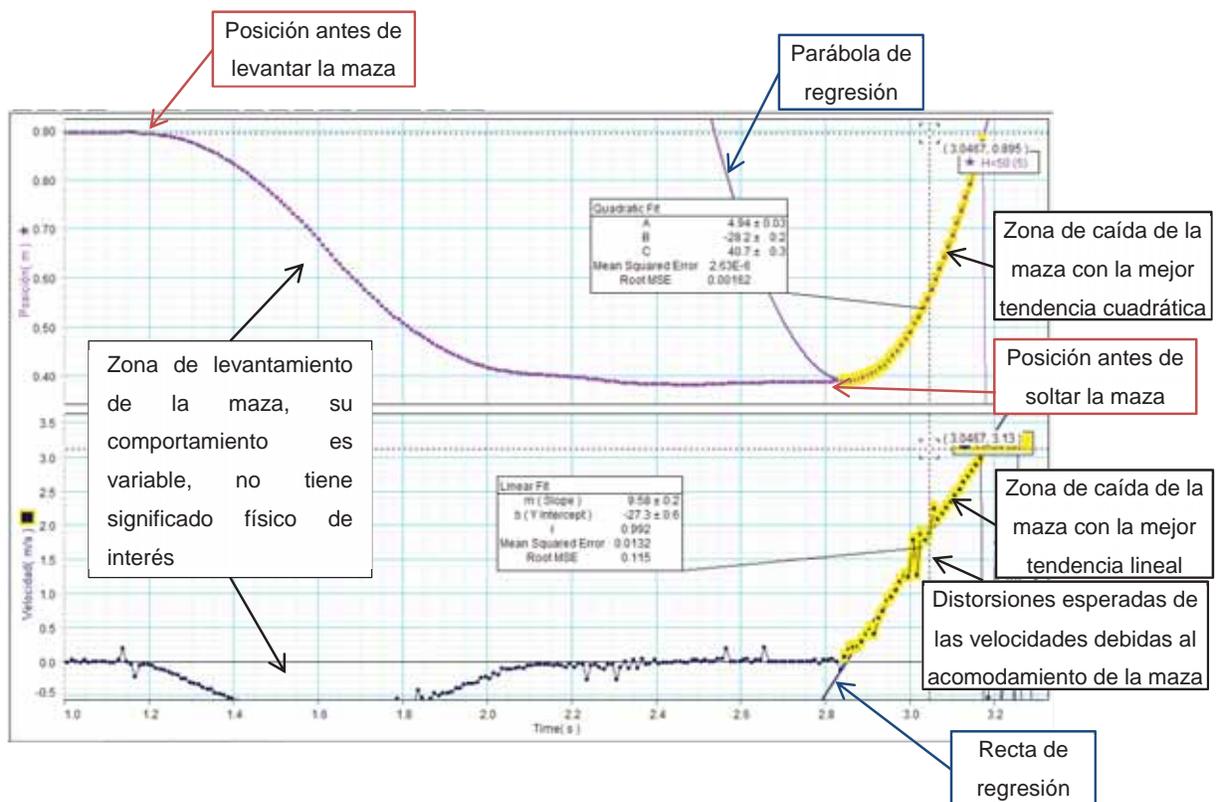


Figura 24: Obtención de las posiciones y la velocidad de los gráficos posición vs tiempo y velocidad vs tiempo del programa DataStudio (PFGP 41)

Fuente: Elaboración propia

Con estos datos se calcula la energía cinética antes del choque, y se obtiene el factor de reducción de la gravedad k_c descrito en el ítem 2.3.4.1 (movimiento rectilíneo uniformemente variado). De la ecuación (16) se deduce:

$$k_c = \frac{v^2}{2g \cdot H_r} \quad ; H_r = Y_y - Y_c \quad (42)$$

Dónde:

H_r = Altura real de caída.

Y_y = Posición de la maza antes de despegarla del yunque.

Y_c = Posición de la maza antes de soltarla.

También se puede obtener el factor de fricción con la guía despejándolo de la ecuación (15):

$$\mu_0 = (1 - k_c - \mu_a) \quad (43)$$

Con esta información se evalúa, si la variación de la altura incide en la pérdida de energía por la caída de la maza, ya que metodología propuesta permite descartar la influencia del operador en estos datos. Para poder cuantificar esta posible influencia, se sigue los siguientes pasos:

1. Calcular el promedio del factor de reducción de la gravedad k_c para cada altura de caída aproximada (40 cm, 50 cm y 60 cm).
2. Elaborar un cuadro comparativo de estos valores.
3. En caso de que sea necesario, usar gráficos, rectas de regresión u otros procedimientos estadísticos para corroborar la tendencia que podría existir.

3.7.1.3. Variación de la altura de caída

En los gráficos posición vs tiempo del programa DataStudio de los datos correspondientes a las pruebas para medir la variación de la altura de caída, se ubican las posiciones de la maza, antes de despegar del yunque y antes de soltarla, de cada ciclo de hincado del ensayo DPL, luego se calcula sus alturas reales de caída (ecuación (42)) y se promedian los correspondientes a toda una secuencia de hincado (Figura 25) realizada por un mismo operador. Con esta altura de caída promedio H_p se calcula el coeficiente de relación entre la altura teórica y la altura promedio k_H usando la ecuación (17) descrita en la sección 2.3.4.3 (variaciones de la altura de caída):

$$k_H = \frac{H_p}{H}$$

Con estos valores, se realiza un cuadro comparativo para buscar alguna relación que pueda existir entre el operador y la variación de la altura de caída de la maza, por la naturaleza del método propuesto, la única variable independiente que está

interviniendo es el *Operador*. De ser necesario se puede usar gráficos, regresiones lineales u otros métodos estadísticos para corroborar la tendencia.

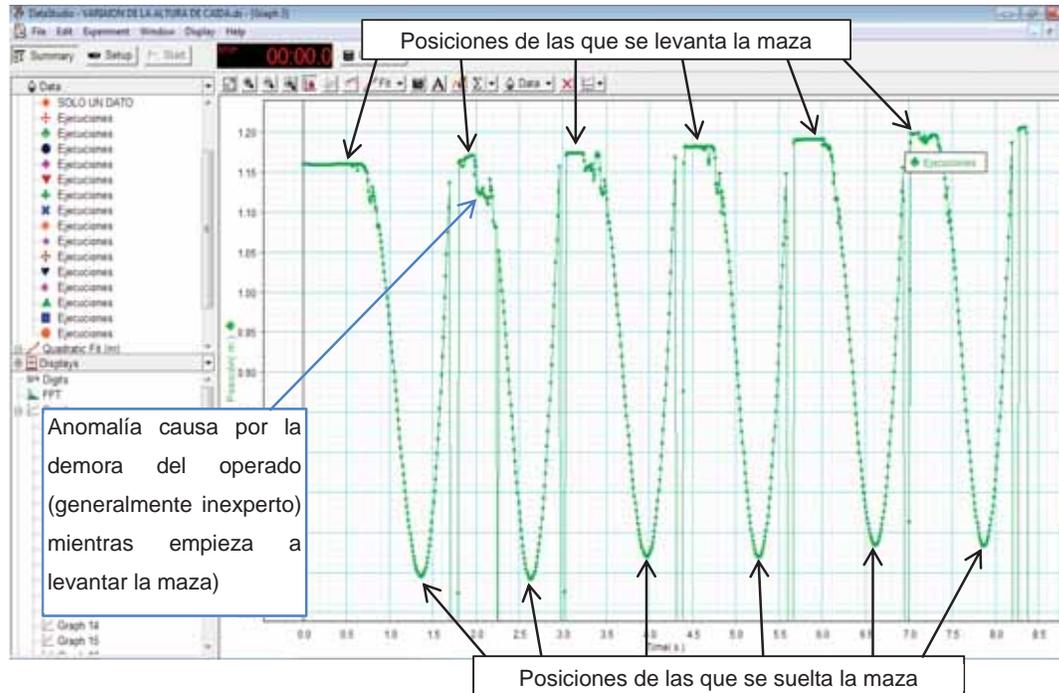


Figura 25: Registro de la variación de la altura de caída (PVH 1 ciclos 10 al 15)
 Fuente: Elaboración propia

3.7.1.4. Fricción de la guía inclinada respecto al suelo

El procedimiento es similar al descrito en el ítem 3.7.1.2 (fricción de la maza con la guía perpendicular al suelo), pero se usa los criterios indicados en el ítem 2.3.4.4 (inclinaciones del varillaje) y las ecuaciones (42) y (44).

$$\mu = \frac{\text{sen } \theta - k_c - \mu_a}{\text{cos } \theta} \quad (44)$$

El factor k_1 se calcula usando la ecuación (39)

$$k_1 = k_c \cdot k_H$$

3.7.2. CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO

Para calcular las propiedades del suelo seguimos los siguientes pasos:

1. Se obtiene el límite líquido, límite plástico y curva granulométrica según las normas MTC E 110 – 2000, MTC E 111 – 2000 y MTC E 107 – 2000 respectivamente.
2. Se clasifica el suelo usando las tablas y cartas de plasticidad (ANEXO B).
3. Se determina la densidad máxima y densidad mínima según las normas MTC E 115 – 2000 y I.N.V. E – 136 – 07 respectivamente.
4. Se definen los rangos de los grupos de compacidades; muy suelto, suelto, medio, denso y muy denso en términos de compactación relativa según lo indicado en el ítem 2.3.3.1.
5. Se calcula el contenido de humedad se cada muestra según la norma MTC E 108 – 2000.
6. Se calculan las densidades naturales secas de las muestras inalteradas usando la ecuación (45), con el peso de la muestra W , el volumen de la muestra V y el contenido de humedad $w\%$:

$$\gamma_d = \frac{W}{V(1 + w\%)} \quad (45)$$

7. Se calcula la compacidad relativa con la ecuación (7)

$$C_r = \left[\frac{\gamma_d - \gamma_{d(\text{mín})}}{\gamma_{d(\text{máx})} - \gamma_{d(\text{mín})}} \right] \left[\frac{\gamma_{d(\text{máx})}}{\gamma_d} \right]$$

8. Para los casos que no se cuente con la densidad mínima se usa la ecuación (10) y se calcula la compacidad relativa con la ecuación (11), suponiendo que el R_0 es el mismo para estos suelos arenosos finos.

$$C_r = \frac{R - R_0}{R(1 - R_0)}$$

3.7.3. CÁLCULO Y ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE RESTITUCIÓN

El coeficiente de restitución n se calcula usando la ecuación (46), que se deduce de la ecuación (40), para lo cual previamente se requiere calcular k_H y k_c para cada altura de caída y diferente operador, los datos necesarios son, el rebote promedio de la

maza cada intervalo de conteo h_{rp} y la altura de caída teórica H (aproximada a 10 cm). Para cada intervalo de conteo del número de golpes del ensayo DPL habrá un valor de n , lo que dice la teoría es que no importa la altura de caída, el coeficiente de restitución se mantiene para un mismo grupo de condiciones, por ende se debería observar que a mayor altura de caída mayor rebote y viceversa.

$$n = \frac{1}{k_c} \cdot \sqrt{\frac{h_{rp}}{k_H \cdot H}} \quad (46)$$

La metodología usada en la prueba de laboratorio, permite analizar la influencia de la altura de caída H , en el coeficiente de restitución n , ya que se puede agrupar los datos para una misma profundidad, una misma longitud de varillaje y un mismo tipo de suelo con una misma compacidad relativa, la intención es verificar que n no varía aunque varíe H , o falsear esta información y poder definir la relación real que existe, para lo cual bastará promediar los valores de n para cada valor de H y realizar un gráfico de dispersión.

En forma similar se analiza los datos de las pruebas de campo, pero con una variante, se debe verificar que el giro es el mismo en la profundidad de análisis, ya que por ser suelos naturales, el estrato podrá variar de propiedades a la misma profundidad.

Para poder evaluar en forma global la influencia de las demás variables en el coeficiente de restitución n , bastara con realizar un gráfico de dispersión, n vs profundidad, incluyendo las demás variables en él. Dependiendo de cómo se comporten los datos, se puede aislar cada variable para un análisis más profundo.

3.7.4. CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LA ALTURA MÍNIMA DE CAÍDA

Para calcular la altura mínima de caída H_0 para cada 10 cm de sondeo, se sigue los siguientes pasos:

1. Primero, calcular el valor de N_{10} , descrito en el ítem 2.3.2.3 (parámetros de la auscultación) que se despeja de la ecuación (5) y graficar el penetrograma correspondiente a la prueba ejecutada para cada altura de caída H .

$$N_{10} = \frac{10 \text{ cm}}{\Delta h} N_{10}'$$

2. Calcular el valor de la penetración promedio por golpe e con la ecuación (5):

$$e = \frac{10 \text{ cm}}{N_{10}}$$

3. Constatar la homogeneidad del estrato con la dificultad del giro, si el estrato sigue siendo el mismo el giro será igual a la misma profundidad sin importar la altura de caída, en los casos que el giro varíe se debe descartar estos datos por tratarse de un estrato discontinuo. También se analizan las observaciones que puedan invalidar a los datos.
4. Se realiza un gráfico de dispersión de la altura de caída teórica vs penetración promedio por e para cada profundidad, la ecuación de regresión línea nos dará el valor de A y de H_0 (Figura 26).

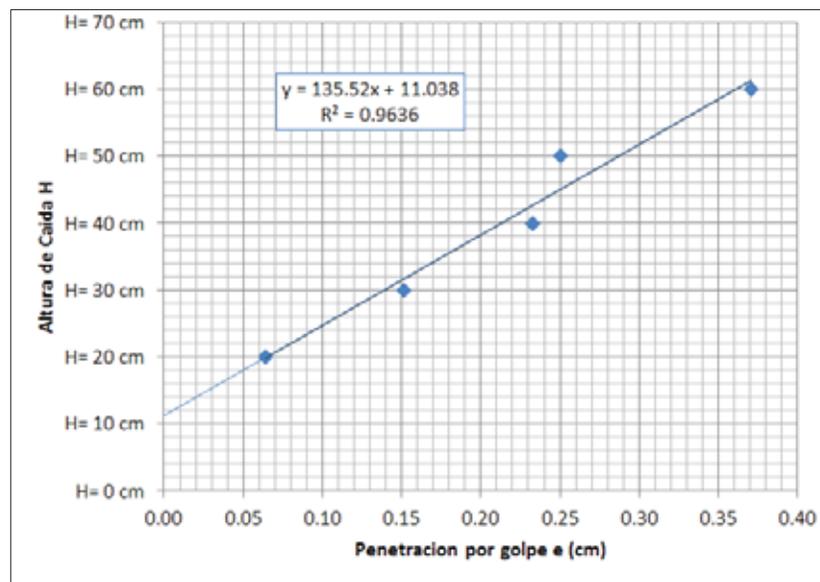


Figura 26: Grafico típico de dispersión para halla A y H_0 (PL 1 Prof. 0.85 m)
Fuente: Elaboración propia

Con estos valores se realizar un gráfico de dispersión de altura mínima de caída H_0 vs profundidad, al cual se puede adicionar los valores de las demás variables independientes, esto sirve para analizar las posibles relaciones que puedan existir, y dependiendo de esto se pueden realizar otros análisis más específicos para cada variable.

**CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN
Y DISCUSIÓN
DE
RESULTADOS**

4.1. SOBRE LA PERDIDA DE ENERGÍA POR LA CAÍDA DE LA MAZA

4.1.1. CAÍDA LIBRE DE LA MAZA

Al observar los datos de la Tabla H.1 podemos ver que dos de los tres valores (9.74 m/s^2 y 9.70 m/s^2) están por debajo de la aceleración del cusco, mientras que uno de estos (10.00 m/s^2) está muy por encima. El promedio de estos tres valores nos da un valor de $9.81 \pm 0.098 \text{ m/s}^2$ que termina estando por encima de $g = 9.7729 \text{ m/s}^2$, esto no quiere decir que la maza se acelere más, sino que el método usado no es el más adecuado para lograr esta medición. Durante la ejecución se pudo observar que la caída de la maza no era estable (se inclinaba levemente durante la caída), probablemente esta sea la causa que genere una aparente mayor aceleración que la real, además el valor de la gravedad está dentro de intervalo que genera el error de la medición, por ello es más prudente descartar la influencia de aire en estas distancias tan cortas, ya que su influencia se podría medir con equipos más precisos, pero probablemente de variaciones en milésimas, entonces se puede afirmar que el coeficiente de fricción-empuje de la maza con el aire es:

$$\mu_a = 0$$

Con lo que se descarta la influencia del aire en la formulación de la pérdida de energía por no ser significativa, aunque la forma de la maza sea como un disco.

4.1.2. FRICCIÓN DE LA GUÍA EN CAÍDA PERPENDICULAR AL SUELO

De los datos mostrados en las Tabla H.2, Tabla H.3 y Tabla H.4 (ANEXO H) se puede obtener el cuadro resumen (Tabla 7) de valores del factor de reducción de la gravedad k_c , para cada altura de caída.

Tabla 7: Valores de k_c para cada altura de caída

ALTURA	k_c	S ¹
H = 60 cm	0.978	0.016
H = 50 cm	0.982	0.016
H = 40 cm	0.973	0.011

Fuente: Elaboración propia

¹ Desviación estándar

Se puede notar que hay una leve disminución del factor k_c con la disminución de la altura, esto probablemente se deba a que la fricción en sí, está conformada por una fuerza estática y una dinámica, entonces siempre hay una pequeña distorsión o acomodo de la maza antes de caer en forma parabólica, claro que también está la velocidad con la que el operador suelta la maza, estos fenómenos se aprecian en los primeros puntos del gráfico de velocidad de la Figura 23 y Figura 24, como un pequeño quiebre en la velocidad antes de comportarse como una recta. Por cuestiones prácticas se puede usar un valor promedio de k_c para los cálculos, ya que las variaciones son relativamente pequeñas, entonces:

$$k_c = 0.978$$

4.1.3. VARIACIÓN DE LA ALTURA DE CAÍDA

En las Tabla H.5, Tabla H.7, Tabla H.8 y Tabla H.9 (ANEXO H) se muestran los datos de los ensayos con diferentes operadores, procesando estos tenemos (Tabla 8).

Tabla 8: Valores de k_H para distintos operadores

PRUEBA	H (m)	H_p (m)	S (m)	k_H	OPERADOR
PVH 1	0.505	0.516	0.009	1.021	Sin experiencia
PVH 2	0.505	0.514	0.013	1.017	Sin experiencia
PVH 3	0.505	0.514	0.010	1.017	Sin experiencia
PVH 4	0.505	0.517	0.010	1.024	Con experiencia

Fuente: Elaboración propia

Se observa que los operadores tienden a levantar la maza un 1 cm más que la línea marcada, y que el coeficiente que relaciona la altura promedio y la altura teórica k_H , es ligeramente menor en los casos que se ejecutó el ensayo con los operadores sin experiencia, esto se debe a que un operador nuevo tiende a hacer el ensayo con más precaución, respetando la marca, pero todo los valores son superiores que la unidad, por lo que se puede afirmar que en la mayoría de los casos los operadores tiende a levantar la maza ligeramente más que la altura de caída prevista. Aunque se podría considerar diferentes valores según el operador, la variación es pequeña, así que se considera un valor promedio, resultando:

$$k_H = 1.020$$

Este resultado es concordante con la investigación hecha por Augusto J. Leoni, Dardo Guaraglia, Alejandro Bielecki & Joaquín Cánchero (2011), donde indica que la altura de caída es siempre superior a la teórica (ítem 2.1.3).

4.1.4. INCLINACIÓN DEL VARILLAJE

Los datos se encuentran en la Tabla H.6 (ANEXO H), con los cuales se calcula el valor del coeficiente de fricción cinético promedio:

$$\mu = 0.188$$

Y esto da un ángulo de reposo de 10.6° respecto a la horizontal, este valor podría ser usado para estimar el valor de k_c para distintas inclinaciones del varillaje, pero es un tema del que no se tocara más, ya que el ensayo DPL está restringido a inclinaciones menores al 2% respecto a la vertical y las fórmulas de hinca no están deducidas para el caso de una hinca en diagonal.

4.1.5. CUANTIFICACIÓN DE LA PÉRDIDA DE ENERGÍA POR CAÍDA DE LA MAZA

Como ya está definido los valores de k_c y k_H ; se puede calcular el factor de reducción de energía por la caída de la maza k_1 , de la siguiente forma:

$$k_1 = k_c \cdot k_H = 0.978 \times 1.020 = 0.997 \cong 1.00$$

Este resultado es bastante curioso, ya que la pérdida de energía por la caída de la maza existe, pero esta se compensa con los excesos que el operador le da a la altura de caída, así que se puede considerar este valor como 1.00.

Cabe recordar que la incidencia del aire es insignificante en la pérdida de energía por caída de la maza, pese a que la forma de la maza es similar a la de un disco, y debería generar mayor resistencia a desplazarse en el aire, pero este fenómeno no pudo ser apreciado, probablemente por la densidad de la maza.

4.2. SOBRE LA PRUEBA EN LABORATORIO EN SUELO COMPACTADO

El suelo del pozo de pruebas del SPT (L.M.S.M. - FIC - UNSAAC) se clasifica como una arena limosa SM (I.1 - ANEXO I) el cual no varía en toda su profundidad, lo que permite omitir la variable *tipo de suelo* es esta prueba.

4.2.1. SOBRE EL COEFICIENTE DE RESTITUCIÓN

Al procesar los datos de la prueba PL 1 (Tabla I.1 y Tabla I.3- ANEXO I) se obtiene:

Tabla 9: Valores del coeficiente de restitución según la altura de caída en PL 1

C_r	Pf (m)	H= 20 cm	H= 30 cm	H= 40 cm	H= 50 cm	H= 60 cm
Denso	0.15	0.237	0.175	0.143	0.091	0.101
Denso	0.25	0.202	0.155	0.143	0.101	0.124
Denso	0.35	0.189	0.155	0.124	0.078	0.117
Denso	0.45	0.124	0.143	0.113	0.091	0.117
Denso	0.55	0.124	0.101	0.051	0.045	0.117
Denso	0.65	0.202	0.165	0.124	0.128	0.131
-	0.75	0.215	0.165	0.152	0.128	0.160
-	0.85	0.202	0.155	0.152	0.143	0.124
Medio	0.95	0.175	0.143	0.113	0.120	0.117
Medio	1.05	0.160	0.155	0.101	0.091	0.117
Medio	1.15	0.101	0.143	0.072	0.064	0.072
Medio	1.25	0.124	0.143	0.101	0.064	0.083
Medio	1.35	0.072	0.058	0.051	0.045	0.058
Medio	1.45	0.101	0.083	0.051	0.045	0.041
Medio	1.55	0.175	0.131	0.113	0.064	0.109
Suelto	1.65	0.101	0.117	0.072	0.045	0.083
Suelto	1.75	0.101	0.083	0.051	0.045	0.058
Suelto	1.85	0.101	0.083	0.051	0.045	0.041
Suelto	1.95	0.101	0.058	0.000	0.045	0.041
Suelto	2.05	0.072	0.058	0.000	0.000	0.041
-	2.15	0.000	0.058	0.000	0.000	0.000
PROMEDIO		0.137	0.120	0.085	0.070	0.088

Fuente: Elaboración propia

Se recuerda que la profundidad de inspección P_f , es la distancia de la superficie del terreno a la punta de la sonda reducida en 0.05 m. Para definir el valor de P_f en esta prueba se suma la profundidad ingresada con la longitud de la punta (aproximadamente 0.10 m) y se le resta 0.05 m para ubicar la posición en el centro del intervalo de conteo. En cuanto al cálculo del coeficiente de restitución n , se explicó en el ítem 3.7.3, pero con un ejemplo será más fácil de entender:

Para una altura de caída H de 50 cm y una profundidad ingresada de 1.20 m, se tiene una altura de rebote promedio h_{rp} de 0.2 cm, en los últimos 10 cm que ingreso la sonda, entonces ($k_c = 0.978$ y $k_H = 1.020$):

$$P_f = 1.20 + 0.10 - 0.05 = 1.25 \text{ m}$$

$$n = \frac{1}{k_c} \cdot \sqrt{\frac{h_{rp}}{k_H \cdot H}} = \frac{1}{0.978} \times \sqrt{\frac{0.2}{1.020 \times 50}} = 0.064$$

Si graficamos los valores de la Tabla 9, se obtiene:

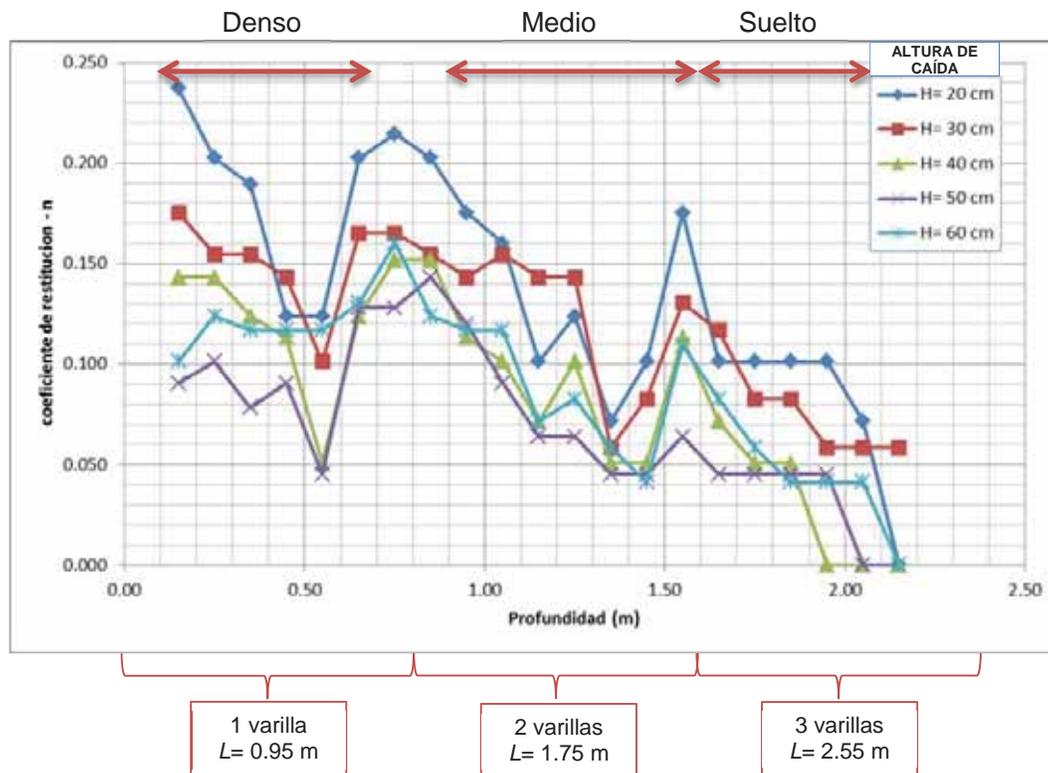


Figura 27: Coeficiente de restitución según la profundidad
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 27 se puede distinguir que el valor del coeficiente de restitución disminuye conforme a la compacidad relativa del suelo, esto nos dice que a menor compacidad relativa del suelo el choque es más plástico, lo que resulta bastante coherente a simple vista. Respecto a la profundidad, se esperaría que por el incremento de presión el suelo, este se haga más rígido, causando un choque más elástico, fenómeno que no se nota, tal vez porque la compacidad relativa es más incidente, por ultimo respecto a la longitud del varillaje, se esperaría que el rebote sea mayor por el incremento de maza de la sonda y por consiguiente apreciar un mayor coeficiente de restitución, pero tampoco se ve, una vez más parece que la compacidad del suelo es más incidente.

Refutando lo anterior, el choque que toma en cuenta la formula general de hinca (ANEXO C), es el que se da entre el yunque y la maza, los cuales son de acero un material elástico asociado a un choque elástico, entonces resulta incoherente que el coeficiente de restitución tienda a la zona inelástica.

Al graficar (Figura 28) los promedios de n para cada altura de caída, se ve que hay una tendencia inversa respecto a la altura, lo que va en contra de la teoría que define al coeficiente de restitución como constante sin importar la altura de caída.

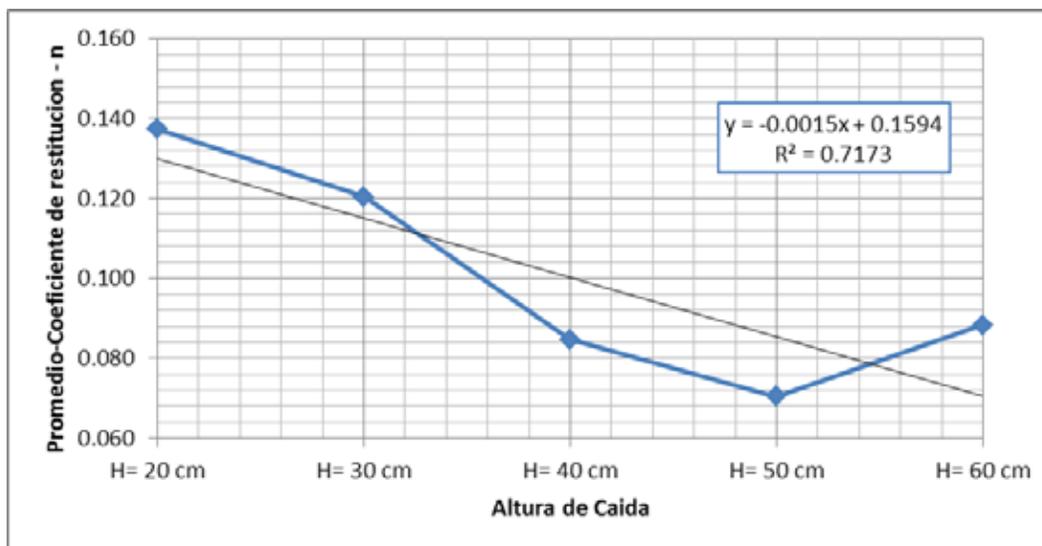


Figura 28: Promedios de los coeficientes de restitución según la altura

Fuente: Elaboración propia

Está claro que hay una inconsistencia en las consideraciones iniciales de cómo se comporta el coeficiente de restitución, así que es prudente evaluar la altura de rebote promedio de la maza, de la cual depende directamente. En la Tabla 10 se muestra un

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)

CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

resumen del número de golpes N_{10} y la altura de rebote promedio h_{rp} , en la cual se aprecia que los rebotes tienden a ser prácticamente el mismo sin importar la altura de caída, un gráfico de dispersión del rebote promedio vs la profundidad ilustra mejor esta tendencia (Figura 29).

Tabla 10: Resumen de los datos de la prueba PL 1

P_f (m)	SUELO	H = 20 cm		H = 30 cm		H = 40 cm		H = 50 cm		H = 60 cm		Prom. h_{rp} (cm)	S (cm)	C.V.
		N_{10}	h_{rp} (cm)											
0.15	Cp 7	38.1	1.1	29.0	0.9	21.0	0.8	15.0	0.4	11.0	0.6	0.76	0.24	32%
0.25	Cp 6	46.3	0.8	32.0	0.7	23.0	0.8	18.0	0.5	14.0	0.9	0.74	0.14	18%
0.35		33.9	0.7	26.0	0.7	21.0	0.5	15.0	0.3	11.8	0.8	0.60	0.18	30%
0.45	Cp 5	30.6	0.3	25.0	0.6	18.0	0.6	16.0	0.4	11.0	0.8	0.54	0.17	32%
0.55		26.0	0.3	23.0	0.3	16.0	0.1	14.0	0.1	10.0	0.8	0.32	0.26	80%
0.65	Cp 4	71.0	0.8	40.0	0.8	31.0	0.6	21.0	0.8	18.9	1.0	0.80	0.13	16%
0.75		116.0	0.9	58.0	0.8	35.0	0.9	32.0	0.8	23.0	1.5	0.98	0.26	27%
0.85	Cp 3	156.0	0.8	66.0	0.7	43.0	0.9	40.0	1.0	27.0	0.9	0.86	0.10	12%
0.95		82.0	0.6	44.8	0.6	33.0	0.5	35.5	0.7	19.1	0.8	0.64	0.10	16%
1.05	Cp 2	66.0	0.5	48.0	0.7	30.0	0.4	23.3	0.4	18.9	0.8	0.56	0.16	29%
1.15		52.0	0.2	35.8	0.6	19.0	0.2	15.0	0.2	14.0	0.3	0.30	0.15	52%
1.25	Cp 1	45.5	0.3	32.0	0.6	23.0	0.4	15.0	0.2	14.0	0.4	0.38	0.13	35%
1.35		28.9	0.1	20.0	0.1	13.0	0.1	11.0	0.1	12.0	0.2	0.12	0.04	33%
1.45		32.0	0.2	18.0	0.2	12.0	0.1	10.5	0.1	11.0	0.1	0.14	0.05	35%
1.55		73.0	0.6	27.0	0.5	27.0	0.5	20.0	0.2	17.0	0.7	0.50	0.17	33%
1.65	No modificado	52.3	0.2	31.0	0.4	23.0	0.2	19.0	0.1	16.0	0.4	0.26	0.12	46%
1.75		34.3	0.2	30.0	0.2	16.0	0.1	13.0	0.1	13.0	0.2	0.16	0.05	31%
1.85		26.0	0.2	21.0	0.2	12.0	0.1	12.0	0.1	10.0	0.1	0.14	0.05	35%
1.95		26.0	0.2	19.0	0.1	9.0	0	11.0	0.1	9.0	0.1	0.10	0.06	63%
2.05		22.5	0.1	17.0	0.1	8.0	0	10.0	0	9.0	0.1	0.06	0.05	82%
2.15		20.0	0	17.0	0.1	9.0	0	8.0	0	7.0	0	0.02	0.04	200%
P. Parcial 1 0.10 – 0.80		51.7	0.70	33.3	0.69	23.6	0.61	18.7	0.47	14.2	0.91	0.68	0.14	21%
P. Parcial 2 0.80 – 1.60		66.9	0.41	36.5	0.50	25.0	0.39	21.3	0.36	16.6	0.53	0.44	0.06	15%
P. Parcial 3 1.60 – 2.20		30.2	0.15	22.5	0.18	12.8	0.07	12.2	0.07	10.7	0.15	0.12	0.05	39%
Promedio Total		51.4	0.43	31.4	0.47	21.0	0.37	17.8	0.31	14.1	0.55	0.43	0.08	19%

Fuente: Elaboración propia

Para ver el tipo de relación que pueda existir entre la altura de caída y la altura de rebote promedio, se realiza un gráfico de dispersión (Figura 30) que no muestra un

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
 CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

comportamiento claro, pero la idea de que la altura de rebote no depende de la altura de caída, empieza a tomar importancia.

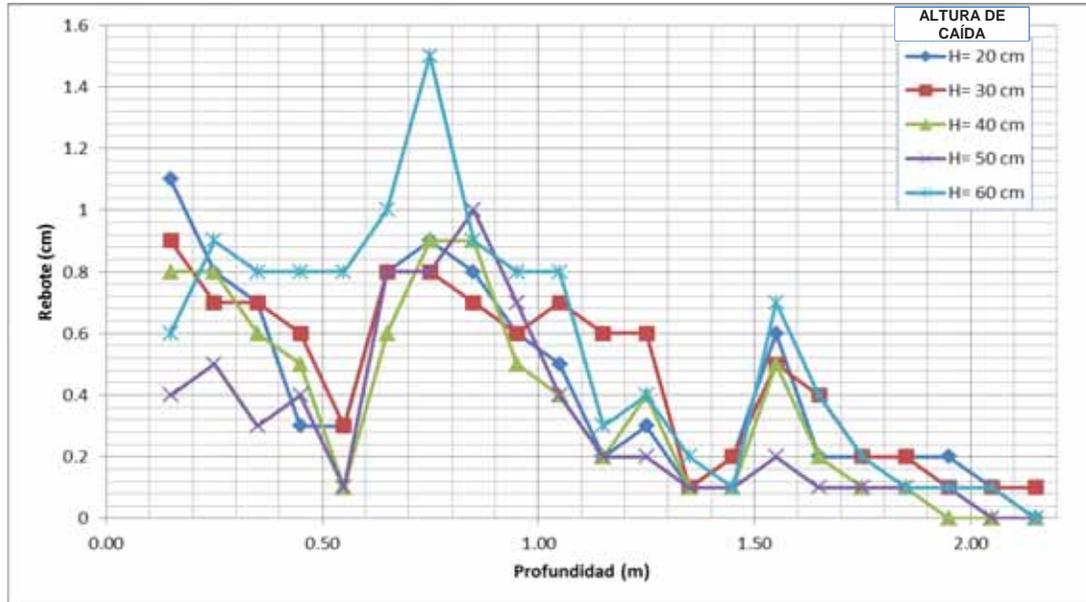


Figura 29: Variación del rebote según la profundidad
 Fuente: Elaboración propia

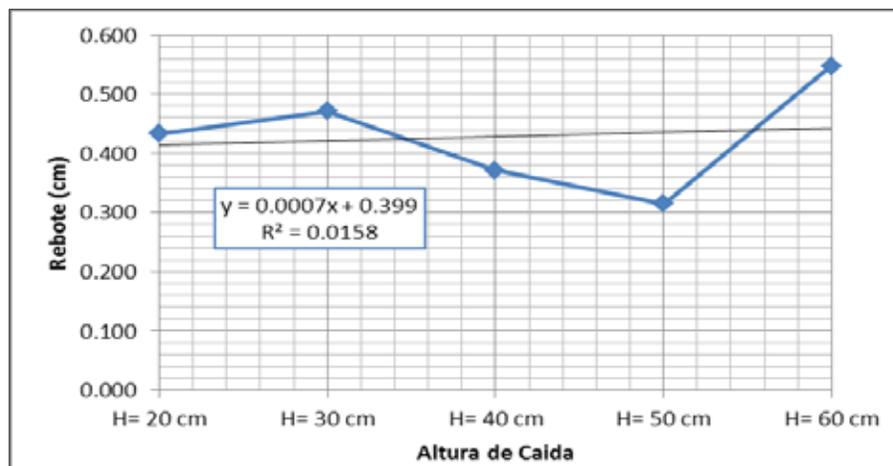


Figura 30: Promedio de los rebotes según la altura
 Fuente: Elaboración propia

Visto todos estos indicadores, podemos afirmar que el factor de pérdida de energía por el tipo de choque está mal aplicado para este caso, pero la demostración de la fórmula de general de hinca resulta bastante coherente (ANEXO C), por lo cual es necesario mostrar un análisis diferentes, que tome en cuenta las consideraciones que omite la fórmula general de hinca, esto se verá en el ítem 4.3.

4.2.2. SOBRE LA ALTURA MÍNIMA DE CAÍDA

De los valores de la Tabla 10, se calcula los valores de la penetración promedio por golpe e , la altura mínima de caída H_0 y la pendiente A de la gráfica altura de caída H vs e para las diferentes profundidades del pozo:

Tabla 11: Valores de A y H_0 en PL 1

Pf (m)	e (cm)					A	H_0 (cm)	R^2	Cr
	H= 20 cm	H= 30 cm	H= 40 cm	H= 50 cm	H= 60 cm				
0.15	0.26	0.34	0.48	0.67	0.91	59.57	8.32	0.96	Denso
0.25	0.22	0.31	0.43	0.56	0.71	80.06	4.25	0.99	Denso
0.35	0.29	0.38	0.48	0.67	0.85	69.97	2.66	0.97	Denso
0.45	0.33	0.40	0.56	0.63	0.91	67.45	2.00	0.94	Denso
0.55	0.38	0.43	0.63	0.71	1.00	62.32	0.63	0.94	Denso
0.65	0.14	0.25	0.32	0.48	0.53	97.96	6.32	0.98	Denso
0.75	0.09	0.17	0.29	0.31	0.43	116.56	9.89	0.98	-
0.85	0.06	0.15	0.23	0.25	0.37	135.52	11.04	0.96	-
0.95	0.12	0.22	0.30	0.28	0.52	98.48	11.36	0.85	Medio
1.05	0.15	0.21	0.33	0.43	0.53	101.51	6.48	0.99	Medio
1.15	0.19	0.28	0.53	0.67	0.71	66.63	8.30	0.95	Medio
1.25	0.22	0.31	0.43	0.67	0.71	71.84	6.26	0.96	Medio
1.35	0.35	0.50	0.77	0.91	0.83	60.82	-0.85	0.84	Medio
1.45	0.31	0.56	0.83	0.95	0.91	53.71	1.71	0.86	Medio
1.55	0.14	0.37	0.37	0.50	0.59	88.87	5.06	0.92	Medio
1.65	0.19	0.32	0.43	0.53	0.63	92.84	1.01	0.99	Suelto
1.75	0.29	0.33	0.63	0.77	0.77	64.66	3.94	0.90	Suelto
1.85	0.38	0.48	0.83	0.83	1.00	57.75	-0.74	0.92	Suelto
1.95	0.38	0.53	1.11	0.91	1.11	40.56	7.21	0.74	Suelto
2.05	0.44	0.59	1.25	1.00	1.11	36.39	8.02	0.64	Suelto
2.15	0.50	0.59	1.11	1.25	1.43	37.31	3.60	0.94	-
Prom.	0.79	0.26	0.37	0.59	0.66				

Fuente: Elaboración propia

Se observa que la relación entre los valores de H y e (la inversa de N_{10}) es lineal (Figura 31) y está respaldada por el coeficiente de determinación R^2 . Si graficamos las alturas de caída vs el promedio de los valores de la penetración por golpe (e) se confirma la existencia de esta relación lineal (Figura 32).

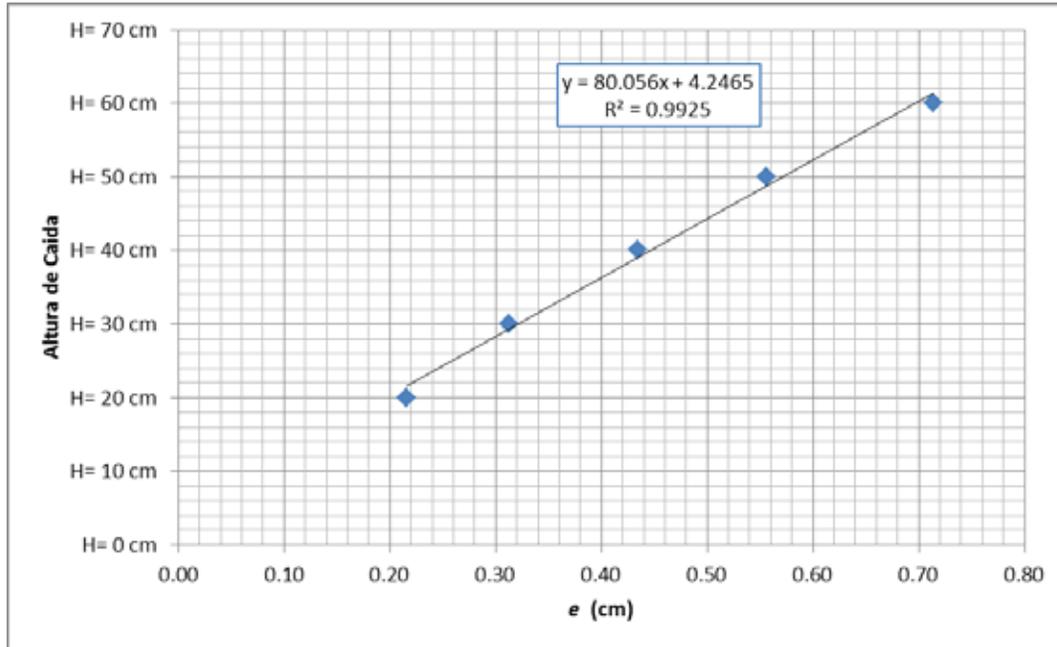


Figura 31: Relación entre altura de caída y e para pf=0.25 m
Fuente: Elaboración propia

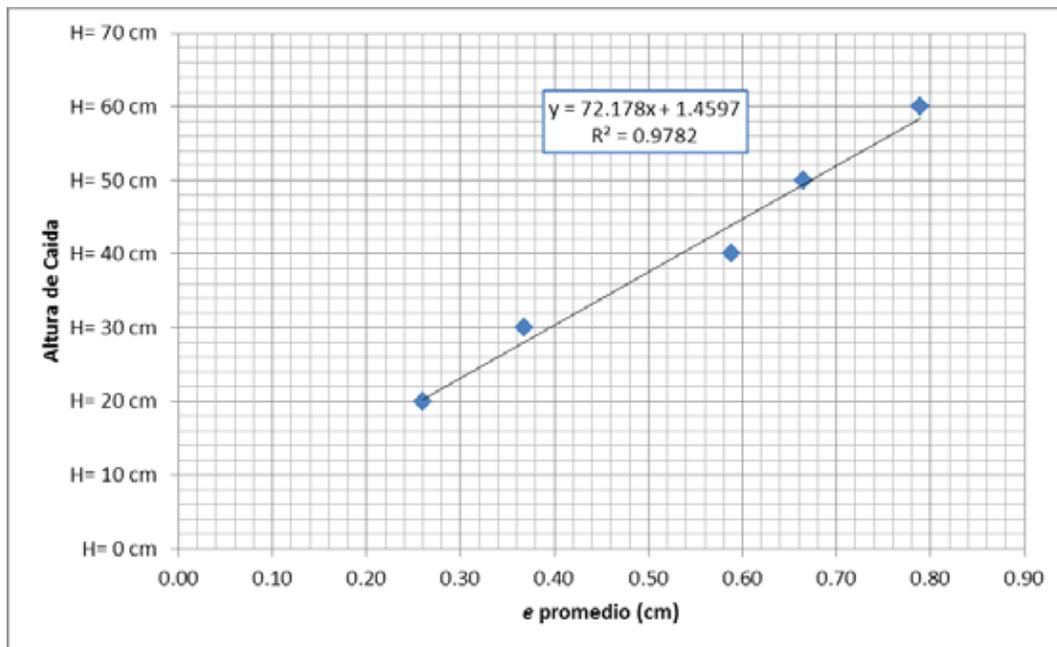


Figura 32: Relación lineal entre altura de caída y e promedio
Fuente: Elaboración propia

Al observar el penetrograma (Figura 33) del pozo elaborado con los valores de la Tabla 10, se nota claramente los cambios en las capas compactadas, así como el incremento del número de golpes al disminuir la altura de caída.

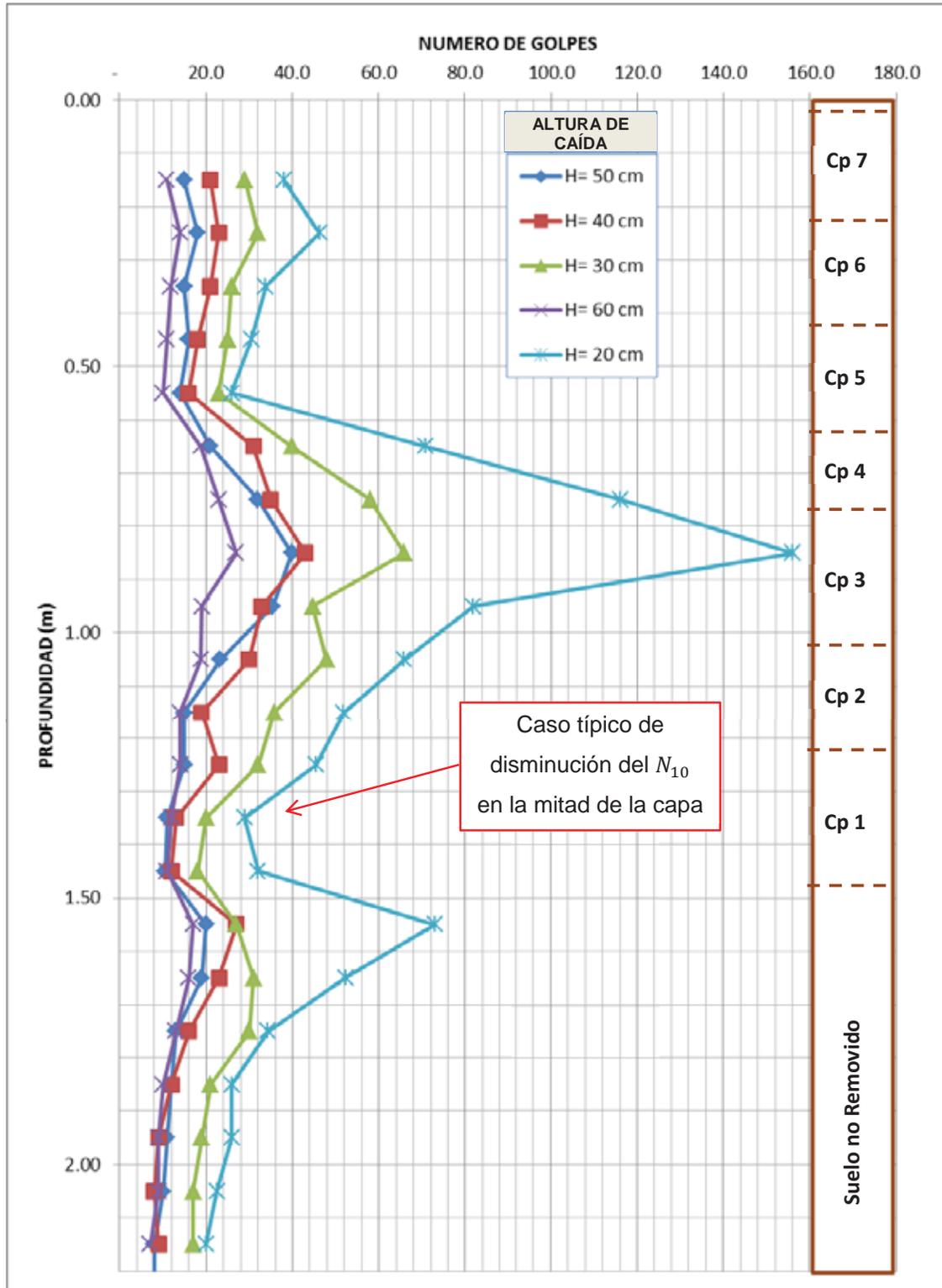


Figura 33: Penetrograma del pozo de pruebas del SPT – prueba PL 1
 Fuente: Elaboración propia

Aunque la intención de la prueba era tener un suelo homogéneo, esto solo se limitó horizontalmente, en cuanto a su distribución vertical, se quiso tener un suelo con compacidades relativas diferentes, pero como no se contaba con un instrumento adecuado para medir esta propiedad durante el compactado del pozo, se indicó al personal de apoyo que compactaran algunas capas más que otras, pero todas aparentaban estar entre medio y denso (Tabla 2). Lo curioso de esta prueba y del penetrograma (Figura 33) está en cómo influye la compactación relativa de una capa en los números de golpes de otra y como la compactación de una misma capa no es homogénea, esto último se nota claramente en la capa 3 y en la capa 1, en la parte superior de la capa hay más número de golpes que en la inferior, claramente el esfuerzo aplicado al momento de compactar las capas se disipa con la profundidad.

Para interpretar H_0 , se grafica los valores de A y H_0 respecto a la profundidad:

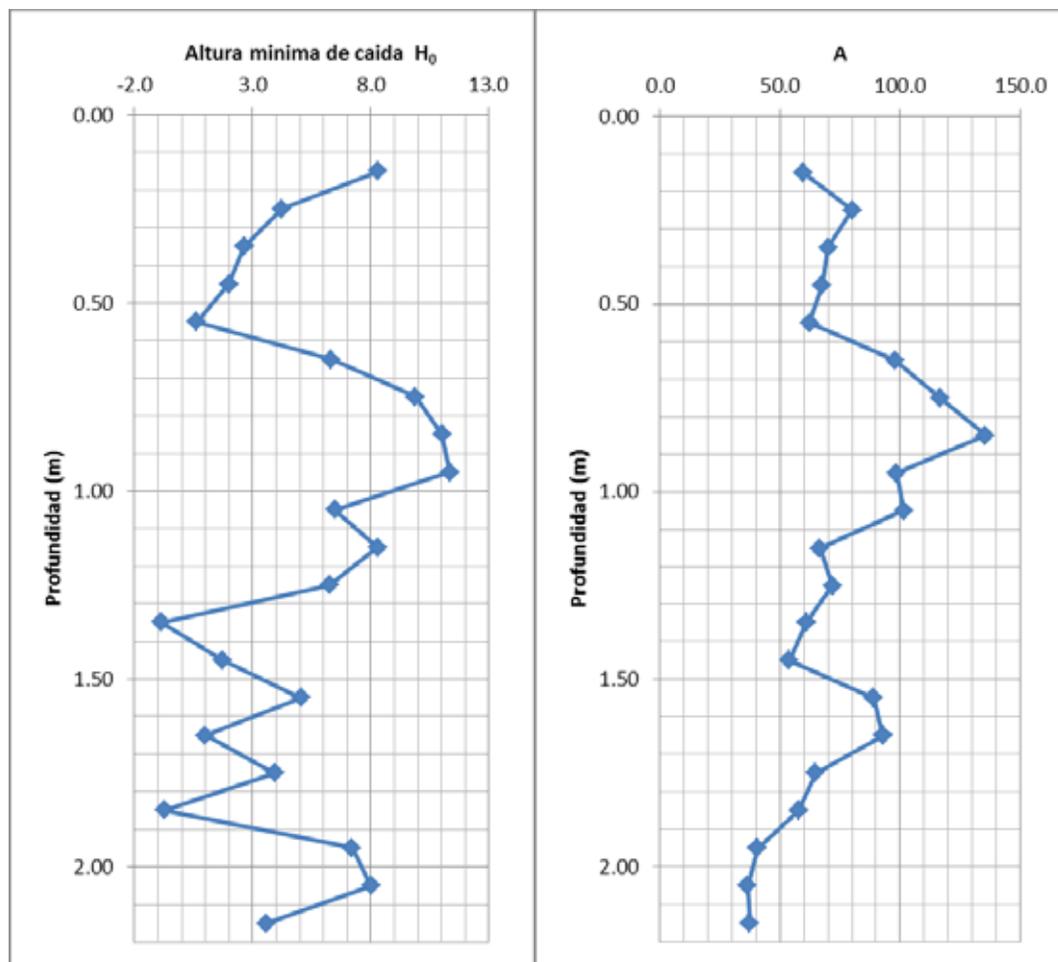


Figura 34: A y H_0 respecto a la profundidad
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 34 no se puede distinguir una tendencia clara del H_0 respecto a la compacidad relativa, en cambio A se comporta en forma similar al penetrograma, pero tampoco está muy bien relacionada con la compacidad relativa. Esta falta de relación se puede deber al tamaño de muestra que se usó para la densidad natural (es muy grande) ya que se requiere ese dato cada 10 cm, mientras que el muestreo se realizó cada 30 cm, además se mostró la compacidad relativa respecto a su descripción cualitativa, que abarca un intervalo amplio en el cual podría estar estas dispersiones.

Si no se considera los dos picos más sobresalientes del gráfico de A , si se puede distinguir una relación directa con la compacidad relativa, esto es suponiendo que al momento del muestreo inalterado no se pudo obtener una buena muestra de estas zonas, pero para el caso de H_0 resulta más complicado. De estos datos se podría afirmar que para valores de A altos podría haber valores de H_0 altos, pero no necesariamente en todos los casos.

Respecto a la profundidad y longitud del varillaje, es muy pronto para afirmar o negar alguna dependencia, ya que similarmente a lo indicado en sobre el coeficiente de restitución, al parecer la compacidad relativa del suelo es el parámetro que incide más en los resultados.

En la Tabla 11 también se observa valores de H_0 negativos a 1.35 m y 1.85 m de profundidad, los cuales ya no se puede explicar con la fórmula general de hinca. Todas estas dificultades observadas en este ítem y el anterior, hacen necesario interpretar los datos respecto a otro punto de vista, para lo cual primero definiremos una interpretación más actual de los ensayos dinámicos.

4.3. INTERPRETACIÓN TEÓRICA DEL ENSAYO DPL SEGÚN LOS CRITERIOS PROPUESTOS POR ODEBRECHT ET AL. (2005)

4.3.1. DESCRIPCIÓN Y COMPATIBILIZACIÓN DEL MODELO CON LA PRUEBA PL 1

Sea el ensayo DPL descrito en la Figura 35, en la cual se puede observar que en el fenómeno interactúan tres elementos bien definidos; la maza, el penetrómetro y la tierra. Este esquema tiene la ventaja de considerar a la tierra como un cuerpo más y no solo como una fuerza de reacción.

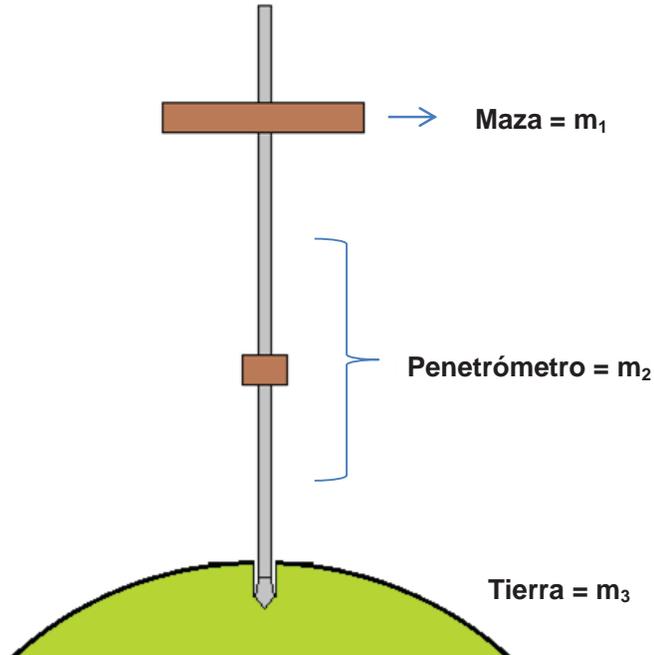


Figura 35: Esquema global del ensayo DPL
Fuente: Elaboración propia

Como es un fenómeno en el que interactúan tres cuerpos ya no se puede pensar en aplicar la teoría del coeficiente de restitución. Las etapas que se deben analizar para poder interpretar el ensayo del DPL se definen como (Figura 36):

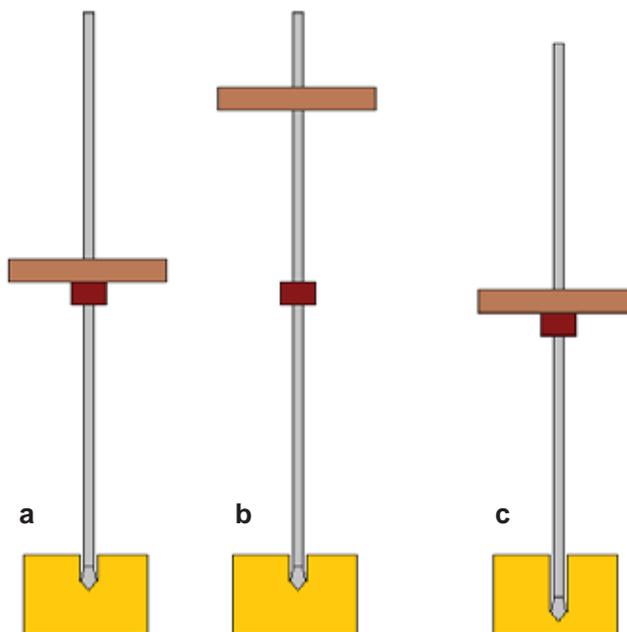


Figura 36: Etapas de análisis del ensayo DPL
Fuente: Elaboración propia

- a. Antes de levantar la maza; El suelo está soportando el peso de todo el equipo (M+P) y tiene una deformación elástica.
- b. Antes de soltar la maza; El suelo y el varillaje están soportando el peso del cuerpo del equipo (P) y tienen una deformación elástica inicial Δ_0 que genera una energía potencia elástica inicial.
- c. Instante de máxima deformación; Una vez que la maza choca con el yunque se inicia el ingreso de la sonda y el suelo empieza a generar una reacción hasta un punto que llega a un máximo de deformación elástica y plástica, en ese momento el suelo está soportando la carga R_d y el sistema equipo-suelo tiene una deformación elástica final Δ_F y una plástica permanente e , se resalta que en ese instante la maza sigue junto al yunque.

Ahora si se recuerda lo visto en el ítem 4.2 (la prueba en laboratorio), quedó pendiente indicar porqué se observa tan poca variación entre los rebotes aunque se le cambie la altura de caída; para poder explicar esto se debe revisar cómo se formula la fórmula de hinca. Considérese el modelo de la Figura 37 como una idealización del ensayo DPL en un ciclo, conformado por un resorte y un pistón que representan al suelo, un resorte unido a un peso P que representa al varillaje y una maza M que cae para impactarlo. Entonces cuando cae la maza y choca al peso P genera una transmisión de energía que empieza a generar una deformación en los dos resortes (la deformación elástica del suelo y del varillaje), una vez que la fuerza acumulada llega a cierto punto, el pisto se empieza a moverse hasta que consume toda la energía del impacto (cuando llega al valor de R_d se produce una etapa plástica), luego la deformación elástica de los resortes se restituye generando que la maza se desprenda del yunque en forma de rebote.

Para ver cómo se comporta este modelo, se divide en tres instantes bien definidos la etapa **c** de la Figura 36:

1. INSTANTE ANTES DEL CHOQUE

En el instante antes de que la maza toque el yunque, la maza tiene una energía cinética igual a la energía potencial antes de la caída reducida por un factor de pérdida de energía:

$$T = k_1 \cdot H \cdot M$$

Esta energía se aplica en la parte superior del yunque.

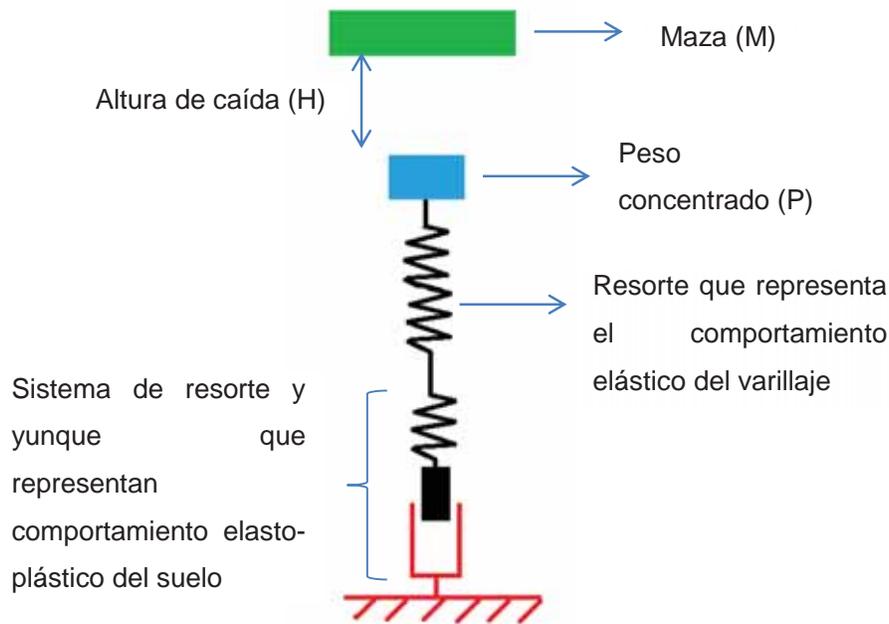


Figura 37: Modelo simplificado del fenómeno del ensayo DPL
 Fuente: Elaboración propia

En este mismo instante los dos resortes ya están soportando el peso concentrado P, que naturalmente generara una deformación elástica inicial, y por ende una energía potencia elástica inicial, esto es:

$$V_{e0} = \frac{P \cdot \Delta_0}{2}$$

2. DURANTE EL CHOQUE

Una vez que la maza toca el yunque, empieza a realizarse una trasferencia de energía, de la maza al yunque y de este hacia la punta de la sonda, pero por la acción de esta trasferencia hay una pérdida de la energía cinética que se divide en dos, la energía que llega justo debajo del yunque y la energía que llega justo encima de la punta de la sonda (Odebrecht, Schnaid, Maia Rocha, & De Paula Bernardes, 2005).

Pero la energía que llega debajo del yunque no puede ser la misma con la que la maza impacta el yunque, entonces de alguna forma se debe representar la transición de estos dos elementos separados que luego se comportan como uno, así que la energía cinética a considerar será:

$$T' = \alpha \cdot T$$

Siendo α un factor de tracción. Ahora que el sistema se comporta como si la maza y el peso concentrado estarían moviéndose juntos, los resortes empezaran a deformarse absorbiendo energía potencial elástica y la gravedad también realizara un trabajo por los desplazamientos que se generen.

Durante el acortamiento de los resortes se genera un amortiguamiento η que causa una pérdida de energía, este amortiguamiento es el que terminara deteniendo el movimiento oscilatorio propio de los resortes.

3. INSTANTE DE MÁXIMA DEFORMACIÓN DEL SUELO

En este instante el varillaje y el suelo acumulan una deformación elástica final, la cual se asocia una energía potencia elástica descrita por el producto de la máxima fuerza en el sistema y la máxima deformación elástica (Figura 38):

$$V_{eF} = \frac{R_d \cdot \Delta_F}{2}$$

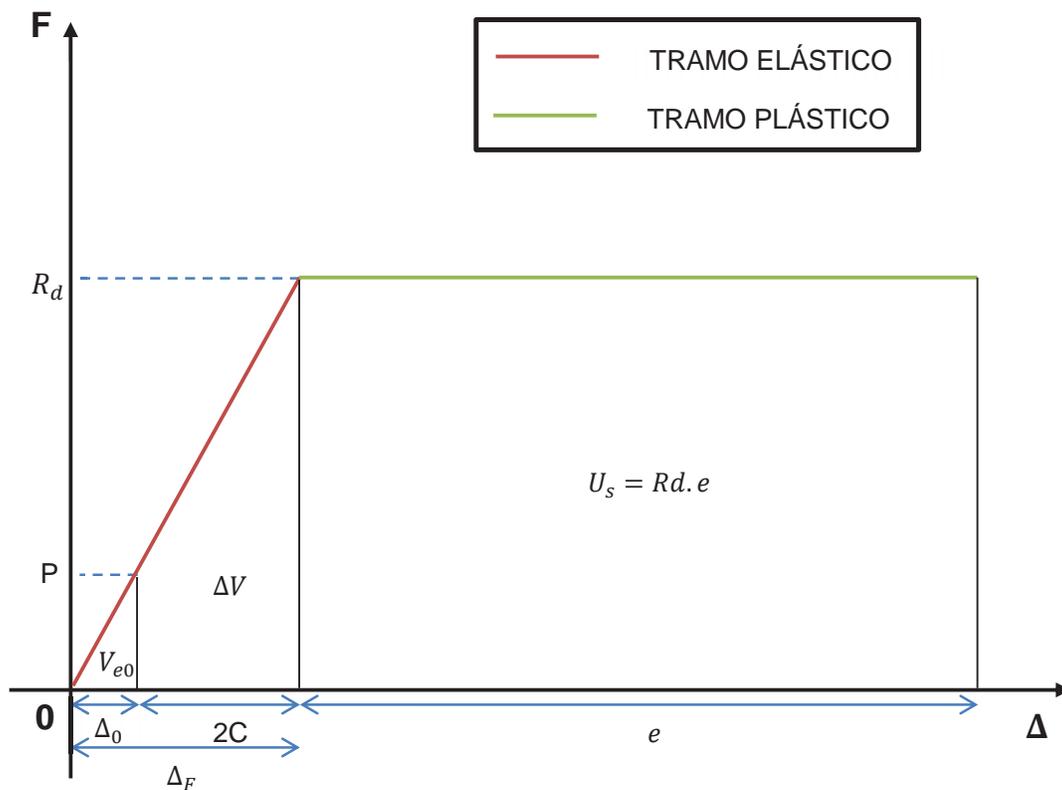


Figura 38: Diagrama fuerza deformación del ensayo DPL
 Fuente: Elaboración propia

Como se definió antes, R_d es la reacción máxima del suelo a la acción del choque en el instante de máxima deformación. También se genera la máxima deformación plástica, esta se puede apreciar después de cada golpe por ser permanente ya que no se restituye como la elástica, generando el siguiente trabajo:

$$U_s = R_d \cdot e$$

En este momento el aporte de la gravedad será máximo y descrito por el producto de los pesos por las deformaciones máximas:

$$U_{M+P} = (M + P) \cdot (\Delta_F - \Delta_0 + e)$$

En este instante de máxima deformación es donde se aplica el principio del trabajo y la energía, para lo cual se compara la energía cinética entregada al varillaje y como esta se transforma en deformaciones hasta volverse cero.

La energía cinética antes del golpe es igual a la energía cinética en el instante de máxima deformación más los trabajos que se hayan realizado, esto es:

$$\eta \cdot (T' + U_{M+P}) + V_{e0} = V_{eF} + U_s$$

El fenómeno en sí ocurre en la punta de la sonda, y la energía $T' + U_{M+P}$ recorre todo el varillaje, lo que hace que disminuya, esto se representa con un factor de amortiguamiento " η ".

Remplazando todas las ecuaciones en el principio del trabajo y la energía se tiene:

$$\eta \cdot [\alpha \cdot k_1 \cdot H \cdot M + (M + P) \cdot (\Delta_F - \Delta_0 + e)] + \frac{P \cdot \Delta_0}{2} = \frac{R_d \cdot \Delta_F}{2} + R_d \cdot e$$

La Figura 38, que grafica la fuerza actuante en el suelo contra la deformación, da una representación gráfica de este fenómeno y permite visualizar mejor su comportamiento. Como se puede ver, la energía elástica y trabajo plástico de suelo está representada por el área triangular y rectangular del gráfico respectivamente.

Si se considera que:

$$2C = \Delta_F - \Delta_0$$

$$\Delta V = V_{eF} - V_{e0} = \frac{R_d \cdot \Delta_F}{2} - \frac{P \cdot \Delta_0}{2} = C \cdot (R_d + P)$$

Tenemos:

$$\eta \cdot [\alpha \cdot k_1 \cdot H \cdot M + (M + P) \cdot (2C + e)] = C \cdot (R_d + P) + R_d \cdot e \quad (47)$$

En esta última ecuación se observa la energía que causa la penetración igualada con la energía que soporta el suelo, ahora si se supone que tenemos un mismo suelo y se aplica el ensayo solo cambiando la altura de caída, esto causara que haya más energía y el suelo responderá incrementado más el área del grafico fuerza deformación, pero seguirá pasando de su zona elástica a la plástica al llegar a R_d , entones solo se incrementa el trabajo plástico, y la energía potencial elástica siempre será la misma.

Se tiene que tener presente que, el rebote es causado por las deformaciones elásticas del sistema, y si estas son las mismas sin importar la altura de caída, está claro porque en la prueba PL 1 se observa una tendencia a que no varié el rebote al variar la altura de caída (Figura 29).

Ahora se analizara la deformación elástica, está en si no se debería ser tomada en cuenta como un parámetro de perdida de energía, ya que sí se considera en la formulación, pero al momento de hacer le contero de golpes por cada 10 cm se ignora de que existe una deformación elástica ya que solo se observa la plástica, por tal motivo se usa una metodología diferente para poder observar dicha deformación, se realiza el ensayo DPL variando la altura de caída de la maza.

Para adecuar la ecuación (47) a la metodología usada, se usa el artificio que se mostró en el ítem 2.3.7.2 (formula general de hinca):

$$\eta \cdot [\alpha \cdot k_1 \cdot H \cdot M + (M + P) \cdot (2C + e)] = C \cdot (R_d + P) + R_d \cdot e$$

$$\eta \cdot \alpha \cdot k_1 \cdot H \cdot M + \eta \cdot (M + P) \cdot (2C + e) = C \cdot (R_d + P) + R_d \cdot e$$

$$\eta \cdot \alpha \cdot k_1 \cdot H \cdot M = C \cdot (R_d + P) + R_d \cdot e - \eta \cdot (M + P) \cdot (2C + e)$$

$$\eta \cdot \alpha \cdot k_1 \cdot H \cdot M = (R_d - \eta \cdot (M + P)) \cdot e + C \cdot (R_d + P - 2\eta \cdot (M + P))$$

Si se renombra los siguientes valores como:

$$b = \eta \cdot \alpha \cdot k_1 \cdot M$$

$$\Delta F = R_d - \eta \cdot (M + P)$$

Se tiene:

$$b \cdot H = \Delta F \cdot e + C \cdot (\Delta F + P - \eta \cdot (M + P))$$

$$H = \frac{\Delta F}{b} \cdot e + C \cdot \frac{\Delta F + P - \eta \cdot (M + P)}{b}$$

Se observa que en esta última ecuación es de forma lineal, una recta:

$$H = A \cdot e + H_0 \quad \text{ó} \quad H = A \cdot \frac{10cm}{N_{10}} + H_0$$

Despejando el valor de R_d respecto a, H_0 y A se tiene:

$$R_d = \frac{H - H_0}{e} \cdot b + \eta \cdot (M + P) \quad \text{ó} \quad R_d = \eta \cdot \left(\alpha \cdot k_1 \cdot M \cdot \frac{H - H_0}{e} + M + P \right) \quad (48)$$

$$R_d = A \cdot b + \eta \cdot (M + P) \quad \text{ó} \quad R_d = \eta \cdot (\alpha \cdot k_1 \cdot M \cdot A + M + P) \quad (49)$$

Entonces, si se tendría un mismo suelo y aplicamos el ensayo DPL con distintas alturas de caídas, se podrá observar una proporción directa entre la altura de caída disminuida en un valor H_0 y la distancia penetrada por golpe e , también se puede deducir de esta ecuación la existencia de una altura de caída mínima la cual en teoría no causaría penetración alguna, causando que el número de golpes por cada 10 cm se haga infinito, claro que esto es netamente teórico y en la práctica se observa un incremento muy elevado pero no infinito.

La metodología descrita en esta tesis sigue siendo útil para estimar H_0 , lo que varía es la interpretación. Pero queda la duda si este valor H_0 representa alguna propiedad propia del suelo, así que para dar una explicación más ilustrativa se grafica (Figura 39) la ecuación (48):

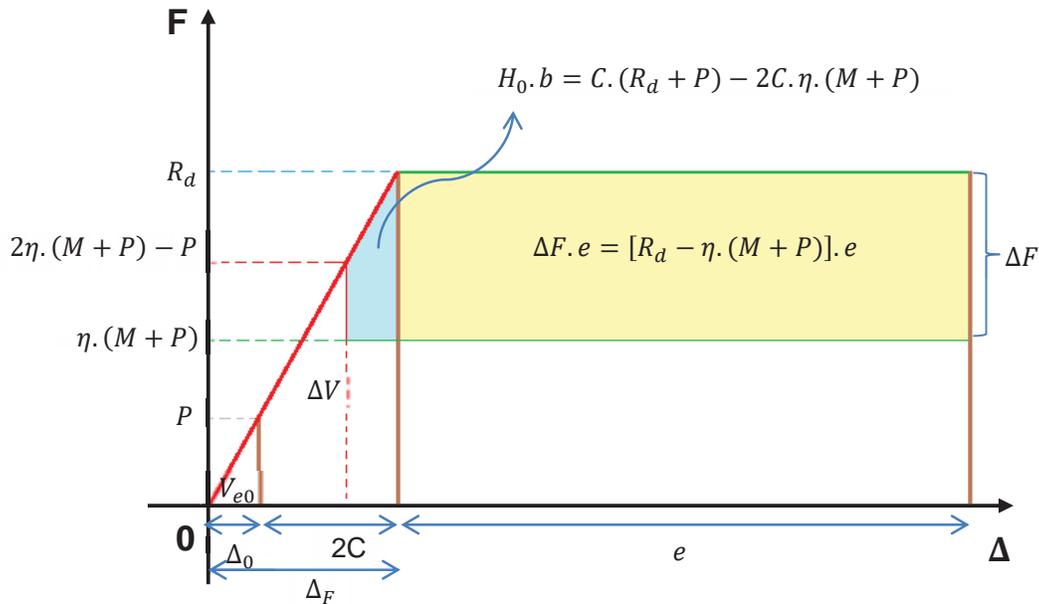


Figura 39: Descripción grafica de H_0
 Fuente: Elaboración propia

En el gráfico Fuerza – Deformación se puede observar una zona celeste que representa a H_0 .

Como es sabido el área debajo de la curva Fuerza – Deformación es la energía que requiere el suelo para deformarse, entonces las áreas sombreadas son una porción de esta energía que podemos visualizar al hacer el ensayo DPL variando la altura de caída. Si se grafica la curva Energía – deformación de estas zonas sombreadas, sumando el área y expresándola respecto a la deformación (Figura 39), dará una curva con un primer tramo parabólico hasta llegar a H_0 y luego será una recta al ingresar en la zona plástica.

Al observar estos gráficos, se puede entender el comportamiento de los posibles valores de H_0 y que se puede hacer con estos, como por ejemplo estimar el módulo de elasticidad del suelo (al restituirse). El tramo recto de la Figura 40, es el que se observa al graficar la altura de caída H vs la distancia penetrada por golpe e , con algunas variaciones como el cambio de coordenadas y la energía dividida entre b .

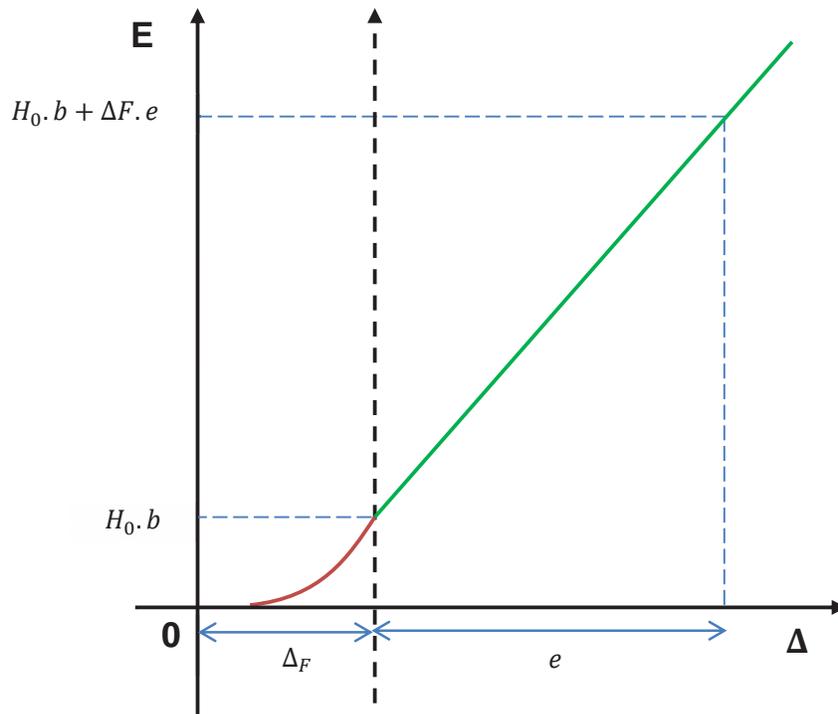


Figura 40: Recta que representa la relación entre la energía usada y la deformaciones del sistema
Fuente: Elaboración propia

Pero el suelo no es un resorte-pistón y el peso del penetrómetro no está concentrado en un solo punto, así que para compatibilizar el modelo con el suelo se debe comparar la Figura 14 y Figura 38, en la primera se distingue claramente que la deformación elástica se genera en el momento de la restitución, mientras que el comportamiento plástico no es lineal, de esto podemos concluir que el tramo elástico de la Figura 38 muestra el comportamiento de expansión del suelo posterior al choque, entonces todos los parámetros que se puedan obtener de este modelo respecto a esta zona, son de un suelo que se está restituyendo y no comprimiendo. Como la zona plástica del modelo (Figura 38) es lineal y constante, el valor de la resistencia dinámica del suelo R_d calculado es ligeramente inferior al real, esto se deduce al comparar las áreas de los gráficos, estas representan a la energía mecánica del fenómeno y debería ser la misma en ambos casos.

En cuanto a la consideración de que el peso del equipo está concentrado en la parte superior, se hace necesario graficar un diagrama de fuerza de compresión en el equipo DPL (Figura 41).

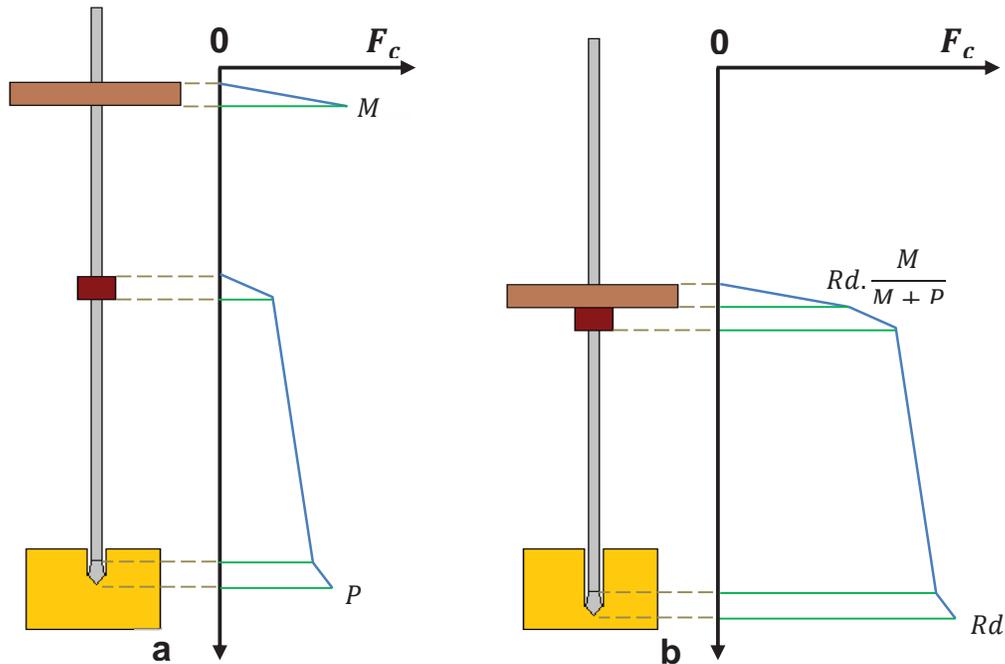


Figura 41: Fuerza de compresión a) antes del choque y b) en el instante de máxima deformación
Fuente: Elaboración propia

Se observa que la fuerza de compresión no es constante, es más está presente incluso en la maza, por ende la deformación elástica del equipo que considera el modelo es una equivalente a la que se presenta en la realidad.

Ahora que quedo claro lo que representa el modelo y los valores que nos podría dar, se puede responder al por qué los valores de H_0 de la prueba PL 1 no resultan muy relacionados al suelo, esto se podría deber a la influencia del contenido de humedad en el módulo de elasticidad del suelo al momento de restituirse, ya que en un suelo con esta cantidad de finos (SM), al perder humedad se rigidiza incrementando su módulo de elasticidad y comportándose más como arena, en cambio al obtener más humedad sus propiedades elásticas cambian.

Otro factor que podría estar distorsionando a H_0 podría ser el hecho que el suelo al ser penetrado se colapsa, adquiriendo más densidad, lo que hace que al momento de restituirse se comporte como un suelo de mayor densidad.

Por estas razones a que tener mucho cuidado antes de querer interpretar el valor H_0 , claro está que para demostrar que la humedad y el acomodado de las partículas del suelo influyen en H_0 se requiere hacer más investigaciones respecto a este tema.

Otro tema pendiente es el por qué H_0 salió negativo en algunos casos de la prueba PL 1, para lo cual se debe interpretar a mayor detalle la Figura 39, en la cual:

$$si; Rd > 2\eta.(M + P) - P \Rightarrow H_0 > 0$$

$$si; Rd = 2\eta.(M + P) - P \Rightarrow H_0 = 0$$

$$si; \eta.(M + P) < Rd < 2\eta.(M + P) - P \Rightarrow H_0 < 0$$

Recuérdese que antes de empezar el proceso de hincado de la sonda, el suelo ya está soportando un peso de $M + P$, así que sino empezó a ingresar por su propio peso, los resultados de Rd serán mayores que $M + P$. Pero para que se cumplan las condiciones limites antes indicadas, el suelo tendría que ser extremadamente débil, que no es el caso de la prueba de laboratorio, así que esos valores negativos obtenidos deben ser causa de las distorsiones en la toma de datos.

4.3.2. OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES DEL MODELO

En las ecuaciones (48) y (49) se aprecian tres factores, el de amortiguamiento η , el de transición α y el ya conocido k_1 , pero la metodología usada no permite calcular los dos primeros; estos factores fueron calculados en distintas investigaciones del ensayo SPT, pero no con el mismo nombre, ni tampoco con el mismo objetivo, así que se adecuarán los resultados de estas investigaciones a nuestro caso particular.

Para determinar el valor de α , se usa las investigaciones de Odebrecht, Schnaid, Maia Rocha, & De Paula Bernardes (2005) y Lukiantchuki (2012), en las cuales, por medio de una instrumentalización en el equipo SPT, calculan la energía que llega justo debajo del yunque y encima del muestreador, al comparar la energía que llega a la parte inferior del yunque con la teórica (energía potencia debido a la gravedad) obtienen un facto de eficiencia de 76.4% y 73% respectivamente, a este factor se le conoce como eficiencia del impacto del martillo η_1 y está definida por la expresión (Odebrecht, Schnaid, Maia Rocha, & De Paula Bernardes, 2005, pág. 1260):

$$\eta_1 = \frac{\int_0^{\infty} F(t).v(t).dt}{(H + e).M} = \frac{E_{Yunque}}{Energia\ potencial\ del\ martillo}$$

El término superior es la energía medida debajo del yunque y se puede deducir que:

$$\eta_1.M.e + \eta_1.M.H = E_{Yunque}$$

Resulta que es una recta, este factor se muestra gráficamente como:

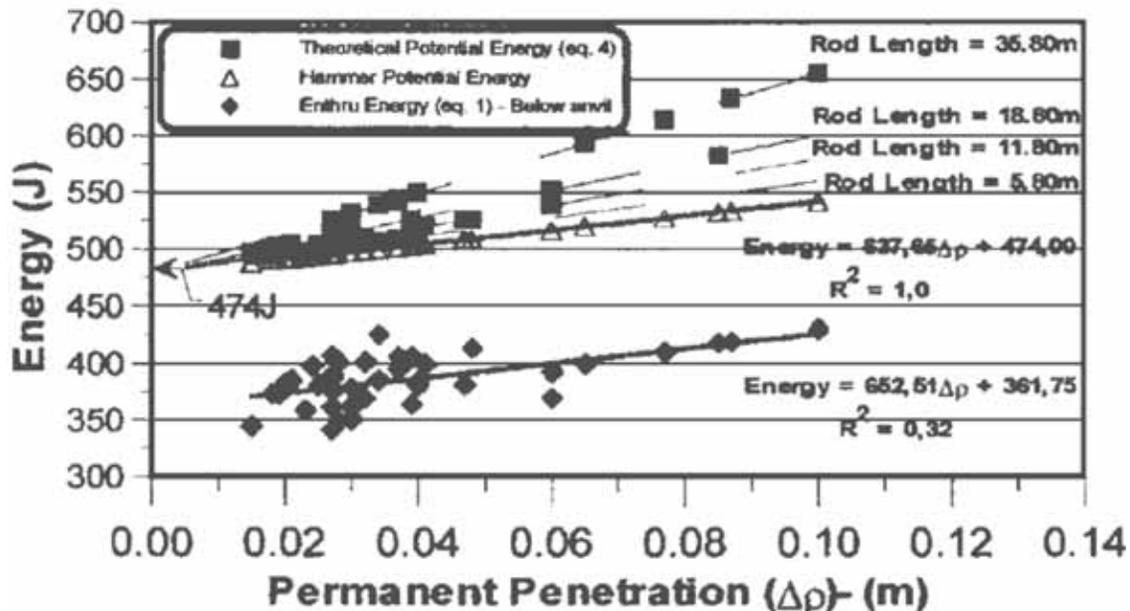


Figura 42: Variación de la energía potencial versus penetración permanente para mediciones debajo del yunque del equipo SPT

Fuente: Odebrecht, Schnaid, Maia Rocha, & De Paula Bernardes, Energy efficiency for standart penetration test (2005, pág. 1260)

Para esta investigación Odebrecht, Schnaid, Maia Rocha, & De Paula Bernardes (2005) usaron un equipo SPT descrito en la norma brasilera NBR 6484 (2001) con las siguientes características: Masa del martinete con guía acoplada de 65 kg, Yunque de 3.72 kg, varillas de 3.23 kg/m y una sección de 4.1 cm² ($D_{ext} = 33,4 \text{ mm} \pm 2,5 \text{ mm}$ y $D_{int} = 24,3 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$). El mecanismo de levantado de la maza fue manual y en caída libre y la gravedad que esa zona es de 9.81 m/s².

Si se reemplaza estos valores se puede observar una inconsistencia en la propuesta del factor η_1 ya que la pendiente de la recta de la energía medida debajo del yunque debería ser menor que la pendiente de la energía teórica del martillo, lo cual no se aprecia en la Figura 42, más al contrario se puede afirmar que son casi paralelas, esto es concordante con la ecuación (47), en la cual se aprecia que los factor k_1 y α solo afectan a la energía potencial del martillo antes del choque, mas no a la energía potencial del martillo durante el choque. En base a esto se puede redefinir el factor propuesto por Odebrecht, et al (2005), como:

$$\eta_1 = \frac{E_{Yunque} - M \cdot e}{M \cdot H}$$

Y sería equivalente a:

$$\eta_1 = \alpha \cdot k_1 \quad (50)$$

Del cociente de los términos independientes las ecuaciones de regresión de la Figura 42 se puede obtener el valor de η_1 para la nueva definición, esto es:

$$\eta_1 = \frac{361.75}{474.00} = 0.763$$

Para determinar el valor de k_1 para el SPT, se recurre a la investigación hecha por Leoni, Guaraglia, Bielecki, & Cánchero (Medición de la Energía Entregada por el Impacto del Pisón, en la Ejecución de los Ensayos de S.P.T. que se Ejecutan en la República Argentina, 2011). En esta se usa una maza similar a la usada por Odebrecht, et al (2005), pero mide la velocidad con la que impacta el martillo al yunque con tres distintos sistemas, siendo el disparador manual el que más se adecua al caso. Se obtiene que el factor de eficiencia para el disparador manual y para una altura de caída de 76 cm es 90% (Leoni, Guaraglia, Bielecki, & Cánchero, 2011, pág. 9), entonces el factor α para el SPT será:

$$\alpha = \frac{\eta_1}{k_1} = \frac{0.763}{0.90} = 0.848$$

Ya que no se cuenta con investigaciones específicas respecto al tema en el DPL, se puede asumir que la pérdida de energía por el cambio de comportamiento de la maza es el mismo tanto para el equipo SPT como para el equipo DPL. Se debe resaltar que este factor dependería directamente de la geometría de la maza y del yunque, así como del material de contacto entre ambos (Lukiantchuki, 2012, pág. 202).

En cuanto al factor de amortiguamiento η ; Odebrecht, et al (2005, pág. 1261) da un factor que prácticamente cumple el mismo propósito, que es la eficiencia energética η_3 y está dado por la siguiente expresión:

$$\eta_3 = 1 - 0.0042\ell$$

Siendo ℓ la longitud del varillaje del SPT en metros, nótese que a mayor longitud hay más pérdida de energía, lo que resulta coherente al asumirlo como factor de amortiguamiento. Esta fórmula está hecha para el equipo SPT, el cual tiene un varillaje

más grueso que el DPL, así que a falta de mayor información se podría considerar un factor de esbeltez para corregir la longitud del varillaje del equipo DPL, entonces el factor de amortiguamiento será:

$$\eta = 1 - 0.0042 \frac{r_{SPT}}{r_{DPL}} \cdot L \quad (51)$$

Dónde:

r_{SPT} = Radio de giro de las varillas del equipo SPT usado en Brasil (10.3 mm).

r_{DPL} = Radio de giro de las varilladle del equipo DPL (5.5 mm).

L = Longitud del varillaje (m).

El radio de giro está definido en función del momento de inercia I y del área A de la sección transversal (Pytel & Singer, 1994, pág. 364):

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (52)$$

Está claro, que para corroborar que esto es cierto u obtener otra expresión para este factor de amortiguamiento se requiere reproducir los ensayos de medición de las energías instrumentado el DPL.

4.3.3. EVALUACIÓN DE LA INCIDENCIA DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE ENERGÍA EN LA REACCIÓN DINÁMICA DEL SUELO

Para asemejar las ecuaciones (34) (formula holandesa) y (48) (modelo propuesto) a la energía básica descrita por la ecuación (1), se divide R_d^1 entre el área de la punta A para obtener el esfuerzo de la punta q_d^2 (Cassan, 1982, pág. 151), esto es:

Energía básica del DPL:

$$Q_{0-DPL} = \frac{M \cdot H}{A \cdot e} = \frac{M \cdot H \cdot N_{10}}{100 \text{ cm}^3} = H \cdot N_{10} \times 0.97729 \frac{N}{\text{cm}^3}$$

¹ La resistencia dinámica del suelo está dada en newton (N), el peso de la maza y del cuerpo del penetrómetro está dado en N, para lo cual se multiplica la maza en kg por la gravedad en Cusco de 9.7729 m/s².

² El esfuerzo de la punta está dado por N/cm² que equivale a 0.10197 kgf/cm².

La fórmula holandesa en términos de la energía básica:

$$q_d = \frac{R_d}{A} = \frac{M \cdot H}{A \cdot e} \cdot \frac{M}{M + P} = Q_{0-DPL} \cdot \frac{M}{M + P}$$

La fórmula del modelo propuesto en términos de la energía básica:

$$q_d = \frac{R_d}{A} = \eta \cdot \left(\alpha \cdot k_1 \cdot \frac{M \cdot H}{A \cdot e} \cdot \frac{H - H_0}{H} + \frac{M + P}{A} \right) = \eta \cdot \left(\alpha \cdot k_1 \cdot Q_{0-DPL} \cdot \frac{H - H_0}{H} + \frac{M + P}{A} \right)$$

Si se calcula la energía básica de la prueba PL 1 para cada altura de caída se tiene:

Tabla 12: Energía básica para prueba PL 1

<i>Pf</i> (m)	Q_{0-DPL} (N.cm/cm ³)				
	H= 20 cm	H= 30 cm	H= 40 cm	H= 50 cm	H= 60 cm
0.15	744.5	850.1	820.8	732.9	644.9
0.25	905.2	938.1	899.0	879.5	820.8
0.35	662.8	762.2	820.8	732.9	692.9
0.45	597.8	732.9	703.6	781.7	644.9
0.55	508.1	674.3	625.4	684.0	586.3
0.65	1387.6	1172.6	1211.7	1026.0	1107.5
0.75	2267.1	1700.3	1368.1	1563.5	1348.5
0.85	3048.8	1934.8	1680.8	1954.4	1583.0
0.95	1602.6	1312.2	1289.9	1732.3	1119.3
1.05	1289.9	1407.1	1172.6	1140.0	1107.5
1.15	1016.3	1049.2	742.7	732.9	820.8
1.25	888.3	938.1	899.0	732.9	820.8
1.35	564.6	586.3	508.1	537.5	703.6
1.45	625.4	527.7	469.0	511.9	644.9
1.55	1426.7	791.5	1055.4	977.2	996.7
1.65	1022.3	908.8	899.0	928.3	938.1
1.75	670.1	879.5	625.4	635.2	762.2
1.85	508.1	615.6	469.0	586.3	586.3
1.95	508.1	557.0	351.8	537.5	527.7
2.05	439.7	498.4	312.7	488.6	527.7
2.15	390.9	498.4	351.8	390.9	410.4

Fuente: Elaboración propia

Graficando estos valores se observa su comportamiento:

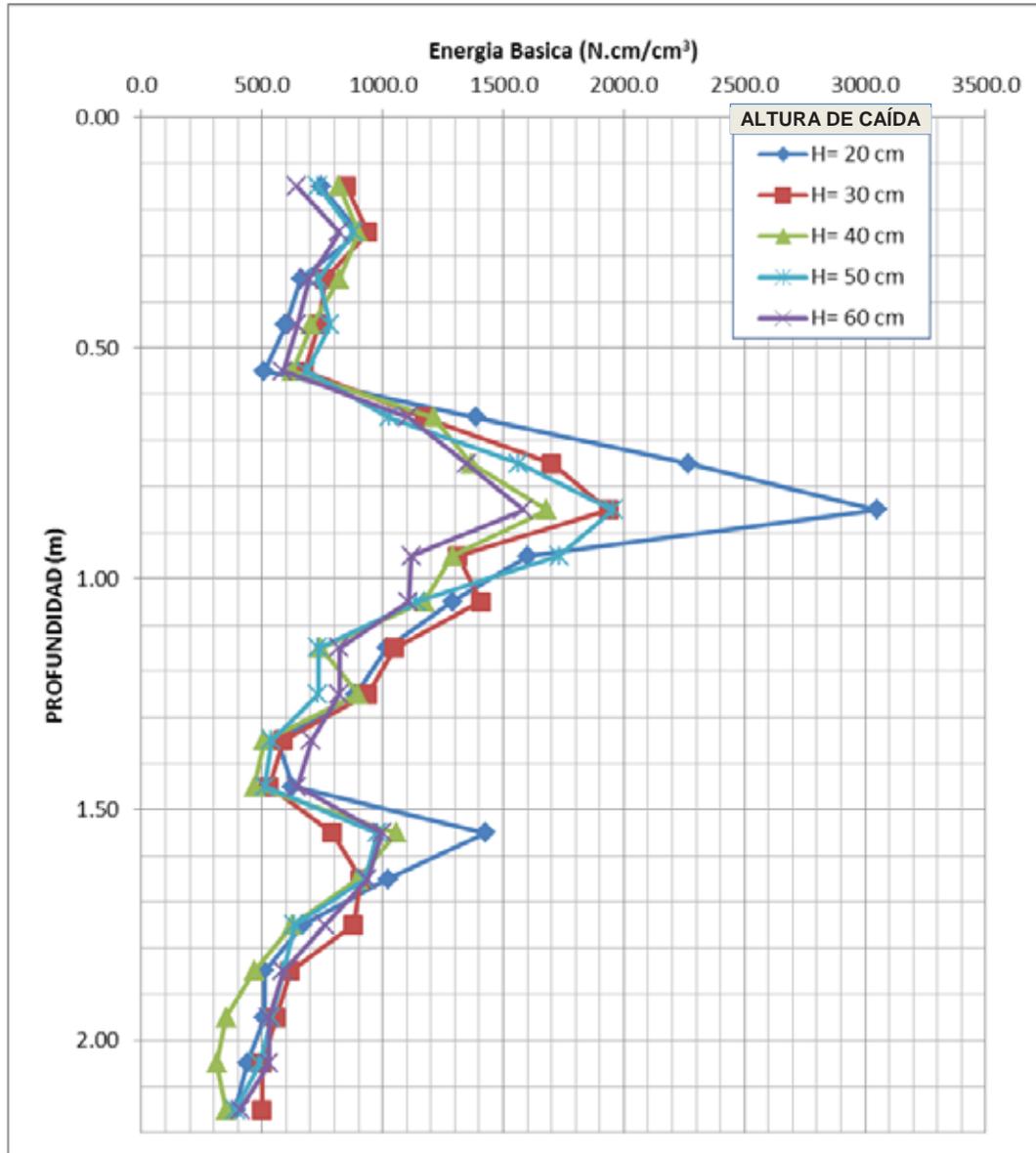


Figura 43: Energía básica para PL 1
Fuente: Elaboración propia

De la Figura 43 se puede deducir que hay una ligera tendencia a incrementar la energía básica cuando disminuye la altura de caída, y esta se hace más notoria cuando el número de golpes es más alto, como se ve en las profundidades de 0.85 m y 1.55 m. Esto indica que se debe tener cuidado si se pretende usar la energía básica para interpretar y correlacionar los ensayos de penetración, ya que para valores muy altos del número de golpes la distorsión se hace más notoria por no tomar en cuenta la deformación elástica del suelo ni del equipo.

Ahora se calcula los valores del esfuerzo de la punta usando la formula holandesa:

Tabla 13: Esfuerzo de la punta según la formula holandesa para PL 1

Pf (m)	$\frac{M}{M+P}$	q_d (N.cm/cm ³ o N/cm ²)				
		H= 20 cm	H= 30 cm	H= 40 cm	H= 50 cm	H= 60 cm
0.15	0.58	434	495	478	427	376
0.25	0.58	527	547	524	512	478
0.35	0.58	386	444	478	427	404
0.45	0.58	348	427	410	455	376
0.55	0.58	296	393	364	399	342
0.65	0.58	808	683	706	598	645
0.75	0.58	1321	991	797	911	786
0.85	0.51	1561	990	860	1000	810
0.95	0.51	820	672	660	887	573
1.05	0.51	660	720	600	584	567
1.15	0.51	520	537	380	375	420
1.25	0.51	455	480	460	375	420
1.35	0.51	289	300	260	275	360
1.45	0.51	320	270	240	262	330
1.55	0.51	730	405	540	500	510
1.65	0.46	467	415	410	424	428
1.75	0.46	306	401	286	290	348
1.85	0.46	232	281	214	268	268
1.95	0.46	232	254	161	245	241
2.05	0.46	201	228	143	223	241
2.15	0.46	178	228	161	178	187

Fuente: Elaboración propia

Graficando los esfuerzos de la punta se tiene un gráfico (Figura 44) muy similar al de la Figura 43, esto se debe a que la formula holandesa solo agrega un factor de reducción de energía $\frac{M}{M+P}$ a la fórmula de la energía básica, este factor va disminuyendo conforme se va incrementando la longitud de la sonda, pero no soluciona en nada la tendencia a incrementar su valor conforme disminuye la altura de caída.

El factor de reducción que usa la fórmula holandesa es muy cuestionado por reducir en gran proporción el esfuerzo de la punta y no dar coherencia con pruebas en suelo homogéneos (Cassan, 1982). Si se hubiera seguido ingresando en el suelo en la prueba PL 1, este factor disminuiría haciéndose más influyente que el número de golpes.

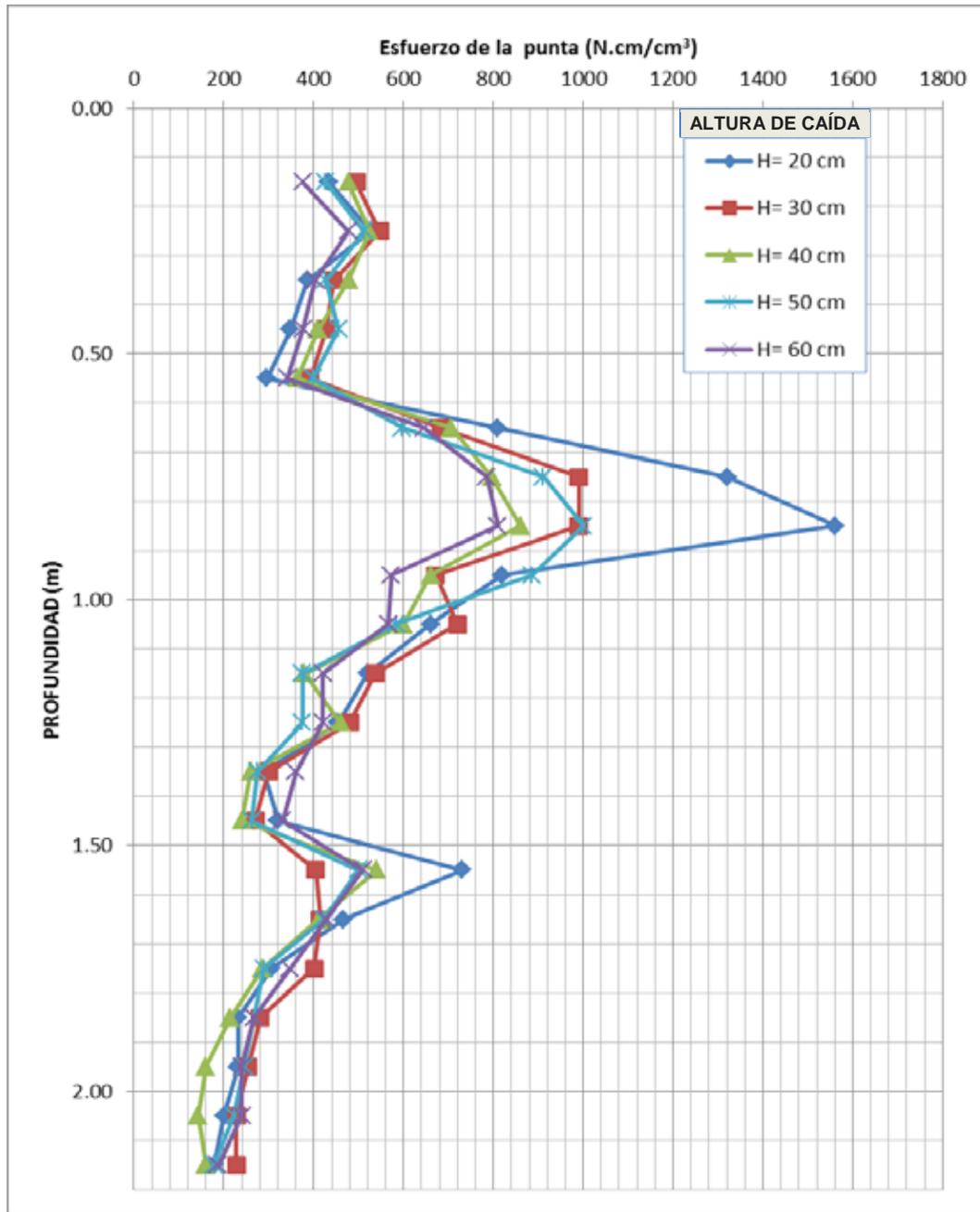


Figura 44: Esfuerzo de la punta según la formula holandesa para PL 1
Fuente: Elaboración propia

Con estos resultados se ve que tanto la energía específica como la fórmula holandesa tiene sus limitaciones para poder interpretar el fenómeno de los penetrómetros dinámicos.

Ahora toca ver cómo se comporta el esfuerzo de la punta con la fórmula del modelo propuesto:

Tabla 14: Esfuerzo de la punta según el modelo propuesto para PL 1

<i>Pf</i> (m)	q_d (N.cm/cm ³ o N/cm ²)				
	H= 20 cm	H= 30 cm	H= 40 cm	H= 50 cm	H= 60 cm
0.15	383	534	564	531	484
0.25	617	694	693	694	659
0.35	500	601	662	601	574
0.45	469	592	579	648	541
0.55	431	572	535	585	505
0.65	816	796	875	771	851
0.75	981	976	883	1072	965
0.85	1161	1042	1037	1292	1099
0.95	598	701	791	1138	778
1.05	748	942	841	849	845
1.15	516	654	511	530	610
1.25	529	640	653	555	634
1.35	511	523	453	476	616
1.45	497	435	394	432	543
1.55	910	569	790	753	782
1.65	828	751	749	777	787
1.75	468	656	489	507	613
1.85	459	545	418	515	514
1.95	291	373	261	403	407
2.05	240	324	229	362	401
2.15	287	385	287	322	342

Fuente: Elaboración propia

Al graficando los resultados (Figura 45), se ve que hay un poco más de desviación en los valores del esfuerzo de la punta que los mostradas en la Figura 43 y Figura 44, lo que a simple vista haría desconfiar de los resultados, pero ya no se nota los picos excesivos lo que evita la distorsión del esfuerzo de la punta cuando se tiene un

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

numero de golpes elevados, además este método nos permite establece un esfuerzo de la punta promedio usando el valor de A , lo que compatibiliza mejor las correlaciones entre penetrómetros.

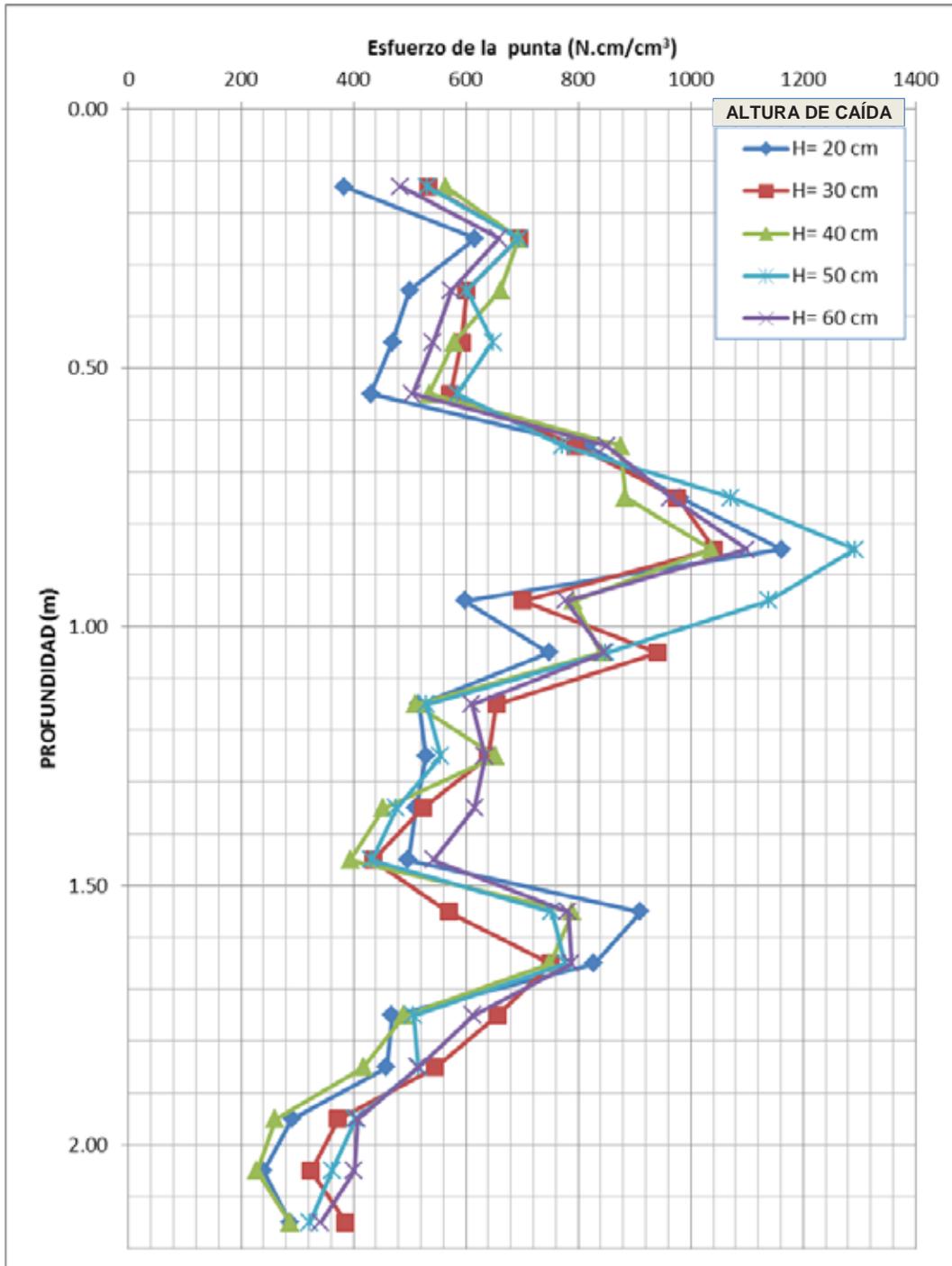


Figura 45: Esfuerzo de la punta según el modelo propuesto para PL 1
Fuente: Elaboración propia

Para evitar anomalías e incoherencias en los cálculos, los valores de H_0 negativos, se consideran iguales a cero.

Para que sea más notoria la diferencia entre las formulas, se usa un número de golpes equivalente para una altura de caída de 50 cm, el cual se obtienen de la recta de regresión para cada profundidad (Tabla 11) y se calcula el esfuerzo de la punta para cada caso (Tabla 15):

Tabla 15: Comparación entre valores de esfuerzo de la punta para PL 1

Pf (m)	$N_{10-equiv}$	e (cm)	q_d (N.cm/cm ³ o N/cm ²)		
			Energía Básica	Fórmula Holandesa	Modelo Propuesto
0.15	14	0.70	698	407	507
0.25	17	0.57	855	498	675
0.35	15	0.68	722	421	592
0.45	14	0.71	687	400	571
0.55	13	0.79	617	359	529
0.65	22	0.45	1096	638	822
0.75	29	0.34	1420	827	975
0.85	35	0.29	1699	870	1126
0.95	25	0.39	1245	637	824
1.05	23	0.43	1140	583	848
1.15	16	0.63	781	400	563
1.25	16	0.61	802	411	606
1.35	12	0.84	584	299	516
1.45	11	0.90	543	278	458
1.55	20	0.51	966	495	745
1.65	19	0.53	926	423	775
1.75	14	0.71	686	313	546
1.85	11	0.88	556	254	490
1.95	9	1.05	463	211	350
2.05	9	1.15	424	193	316
2.15	8	1.24	393	179	324

Fuente: Elaboración propia

Graficando estos valores, se tiene:

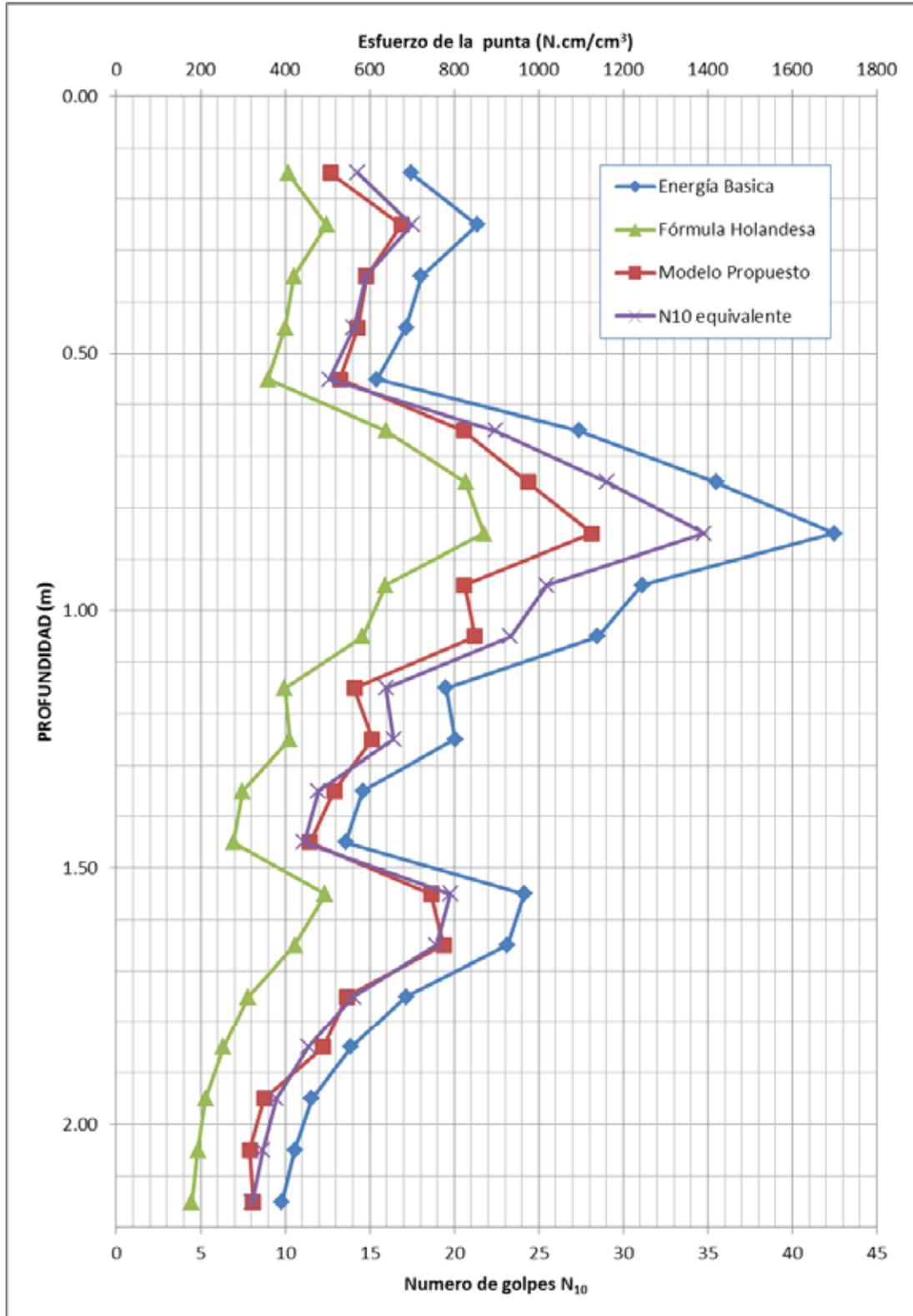


Figura 46: Comparación entre valores de esfuerzo de la punta para PL 1
 Fuente: Elaboración propia

En la Figura 46 se nota claramente como incide el uso de una formulación al momento de querer interpretar los datos del ensayo DPL, para una mejor apreciación de los resultados, se le añade a la figura el penetrograma a una escala adecuada para poder compararlo con el modelo propuesto. Tanto la energía básica como la formula holandesa tienden a dar valores directamente relacionados con el número de golpes en cambio el modelo propuesto solo sigue esta tendencia en algunos tramos y reduce el valor en las zonas donde el número de golpes es muy alto.

En cuanto a los resultados, se puede afirmar que la formula holandesa subestima los valores de la resistencia de la punta y la energía básica los sobrestima, en cambio el modelo propuesto da resultados intermedios que podrían ser mejor interpretados para entender el comportamiento del suelo a la hinca dinámica.

Pero hay un problema general respecto al rango de valores que se muestran en la Tabla 15, si se observa detenidamente, el esfuerzo de la punta va desde 179 N.cm/cm³ (18.2 kgf/cm²) a 1699 N.cm/cm³ (173.2 kgf/cm²), lo que fácilmente podría confundirse con la capacidad portante del suelo, lo cual sería un error garrafal. Para hacer los resultados más propios del ensayo DPL, es más prudente expresarlos en términos de la resistencia dinámica del suelo R_d , para luego darle una interpretación más adecuada. La razón de esto, es principalmente que el suelo no solo está resistiendo al esfuerzo de la punta, sino también a un esfuerzo de fricción lateral, además por ser un fenómeno dinámico las resistencias tienen que ser interpretadas como tales, así que las fórmulas de capacidad portante no se aplican. La interpretación de la resistencia dinámica del suelo es tratada por diversos autores, que solucionan el problema de diversas formas que va desde aplicar un factor de seguridad bastante elevado (Bolomey Frazer, 1971, pág. 980) hasta interpretar el fenómeno con un sustento más teórico como es la teoría del colapso de poros (Rahim, Prasad, & George, 2004).

La norma NTP 339.159 (2001), da una forma de estimar cualitativamente la influencia de la fricción lateral en la resistencia dinámica del suelo, pero tiene dos dificultades, que no está definió las equivalencias cuantitativas y la medición no se realiza en el instante del golpe sino posterior a él.

Expresando los resultados de la Tabla 15 en términos de la resistencia dinámica del suelo se tiene:

Tabla 16: Comparación entre valores de resistencia dinámica del suelo para PL 1

<i>Pf</i> (m)	$N_{10-equiv}$	<i>e</i> (cm)	R_d (N)		
			Energía Básica	Fórmula Holandesa	Modelo Propuesto
0.15	14	0.70	6983	4068	5066
0.25	17	0.57	8549	4981	6751
0.35	15	0.68	7221	4207	5921
0.45	14	0.71	6866	4000	5714
0.55	13	0.79	6168	3593	5292
0.65	22	0.45	10958	6384	8224
0.75	29	0.34	14198	8272	9753
0.85	35	0.29	16995	8700	11264
0.95	25	0.39	12451	6374	8236
1.05	23	0.43	11396	5834	8484
1.15	16	0.63	7807	3996	5634
1.25	16	0.61	8025	4108	6060
1.35	12	0.84	5845	2992	5159
1.45	11	0.90	5434	2782	4577
1.55	20	0.51	9661	4946	7452
1.65	19	0.53	9259	4227	7749
1.75	14	0.71	6859	3131	5460
1.85	11	0.88	5561	2539	4899
1.95	9	1.05	4631	2114	3504
2.05	9	1.15	4236	1934	3165
2.15	8	1.24	3929	1794	3240

Fuente: Elaboración propia

Para evaluar la incidencia de los factores de pérdida de energía en la resistencia dinámica del suelo, se usa la ecuación (48) y se aplica los factores de pérdida de energía uno por uno, se compara con un caso hipotético en el que no exista ninguna pérdida y la altura de caída mínima H_0 sea igual a cero, y con el caso en que se apliquen todos los factores (Tabla 17).

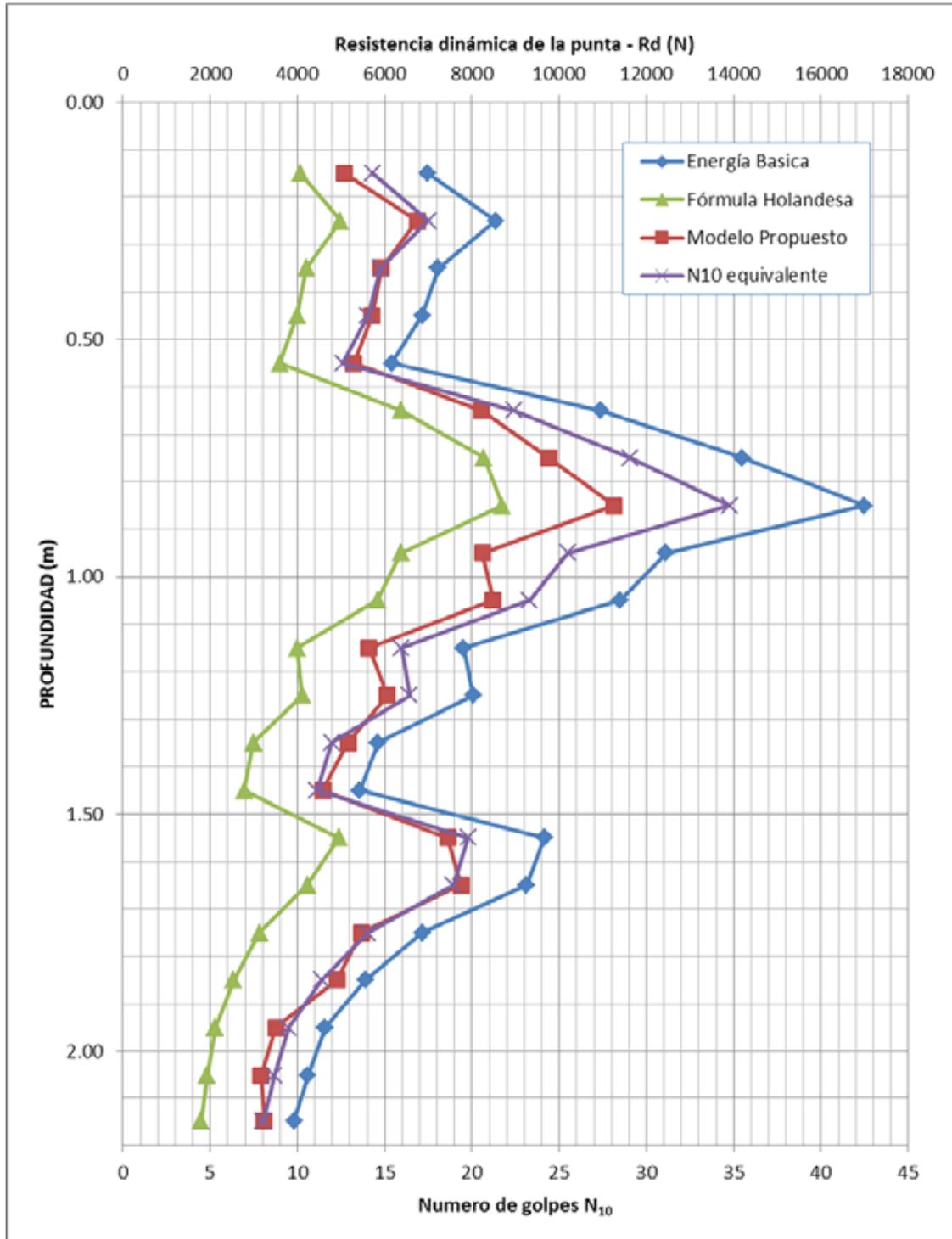


Figura 47: Comparación entre valores de resistencia del suelo para PL 1
 Fuente: Elaboración propia

Tabla 17: Incidencia de la pérdida de energía en resistencia dinámica del suelo para PL 1

Pf (m)	η	$\frac{H - H_0}{H}$	R_d (N)				
			Modelo Propuesto	Modelo Sin pérdidas	Solo H_0	Solo α	Solo η
0.15	0.993	0.83	5066	7000	5838	5938	6947
0.25	0.993	0.92	6751	8566	7840	7267	8502
0.35	0.993	0.95	5921	7238	6855	6141	7184
0.45	0.993	0.96	5714	6884	6608	5840	6832
0.55	0.993	0.99	5292	6185	6107	5247	6139
0.65	0.993	0.87	8224	10975	9590	9309	10893
0.75	0.993	0.80	9753	14216	11407	12057	14109
0.85	0.986	0.78	11264	17014	13263	14431	16780
0.95	0.986	0.77	8236	12471	9642	10578	12299
1.05	0.986	0.87	8484	11415	9939	9683	11258
1.15	0.986	0.83	5634	7826	6531	6639	7718
1.25	0.986	0.87	6060	8044	7040	6825	7934
1.35	0.986	1.00	5159	5864	5864	4976	5783
1.45	0.986	0.97	4577	5453	5268	4627	5378
1.55	0.986	0.90	7452	9681	8704	8212	9548
1.65	0.980	0.98	7749	9281	9094	7874	9095
1.75	0.980	0.92	5460	6881	6340	5838	6743
1.85	0.980	1.00	4899	5583	5583	4737	5471
1.95	0.980	0.86	3504	4653	3986	3949	4560
2.05	0.980	0.84	3165	4257	3578	3614	4172
2.15	0.980	0.93	3240	3951	3668	3354	3872

Fuente: Elaboración propia

No se considera el factor k_1 porque para este caso no incide en los resultados y el factor α se asume constante con un valor de 0.848 (ítem 4.3.2).

En la Figura 48 se puede ver como inciden estos factores, reduciendo de distintas formas la resistencia dinámica del suelo. La incidencia del factor de amortiguamiento casi no se distingue, en motivo principal es la poca profundidad del ensayo, ya que por su relación directa con la longitud se espera que sea considerable una vez que la longitud sea mayor de 4 metros.

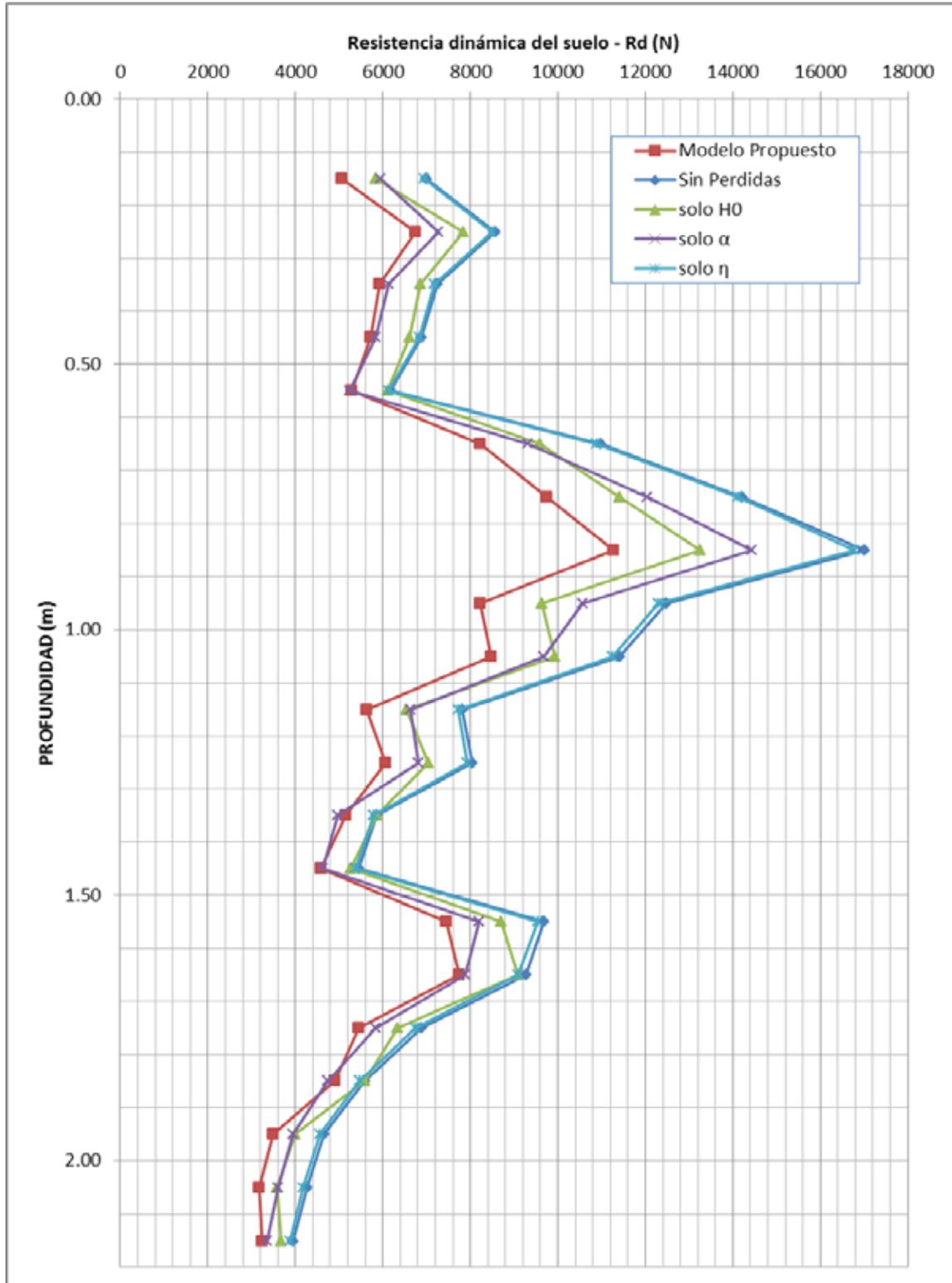


Figura 48: Influencia de la pérdida de energía en la resistencia dinámica del suelo para PL 1
Fuente: Elaboración propia

En cuanto al factor de transición α , se aprecia que su incidencia muy notable, ya que se aplica directamente al término de la ecuación (48) con mayor importancia en este fenómeno y prácticamente le quita un 15% de su energía.

Respecto a cómo incide la altura de caída mínima H_0 , esta se manifiesta como un factor de la forma $(H - H_0)/H$, y por el hecho de que H_0 no es constante, ni tiene una relación establecida con la profundidad, varía para cada tramo, pero en la Figura 48 se observa que tiene mayor influencia en los tramos con mayor resistencia, es decir en los tramos donde el número de golpes es mayor, de esto se puede deducir que, cuando el número de golpes de un ensayo de penetración se haga más amplio, no significa que la resistencia del suelo se esté transformando de la misma forma, sino que es momento de tomar en cuenta la deformación elástica como parámetro de reducción.

En las profundidades de 1.35 m y 1.85 m de la Tabla 17 el factor de reducción por la altura mínima de caída es 1, pero en la Tabla 11 los valores de H_0 son negativos para estas profundidades, lo cual solo se presentaría si la resistencia dinámica del suelo es menor que $2\eta \cdot (M + P) - P$, lo cual no sucede en ningún caso de los valores mostrados en la Tabla 16.

4.4. SOBRE LAS PRUEBAS EN CAMPO

Ahora toca analizar los resultados de las distintas pruebas de campo, los cuales son evaluados según los criterios mostrados en el ítem 4.3, en este ítem se descartó la influencia del coeficiente de restitución y se da una fórmula más acorde con el fenómeno, también se resaltó la tendencia que el rebote no dependa de la altura de caída de la maza una vez que se supere la altura mínima y se descartó la existencia de la altura de caída mínima negativa, ya que es muy poco probable encontrar un suelo con una resistencia dinámica tan baja.

Dado que en el ítem 4.3 se observaron nuevos fenómenos, lo que se busca al realizar estas pruebas, es verificar que estos también se puedan observar en suelos naturales, que se pueda calcular la altura mínima H_0 y observar cómo se comporta el rebote.

Los datos de estas diferentes pruebas de campo se encuentran en el ANEXO J, y estas pruebas son:

4.4.1. PRUEBA PC 1

Se tiene el penetrograma de esta prueba (ítem J.1):

Tabla 18: Numero de golpes por cada 10 cm de la prueba PC 1

P_f (m)	N_{10}		
	H= 50 cm	H= 60 cm	H= 30 cm
0.15	35.0	19.0	37.0
0.25	34.0	24.0	44.0
0.35	27.0	21.0	73.0
0.45	30.0	41.0	44.0
0.55	41.0	-	100.0
0.65	24.0	-	-
0.75	14.0	-	-

Fuente: Elaboración propia

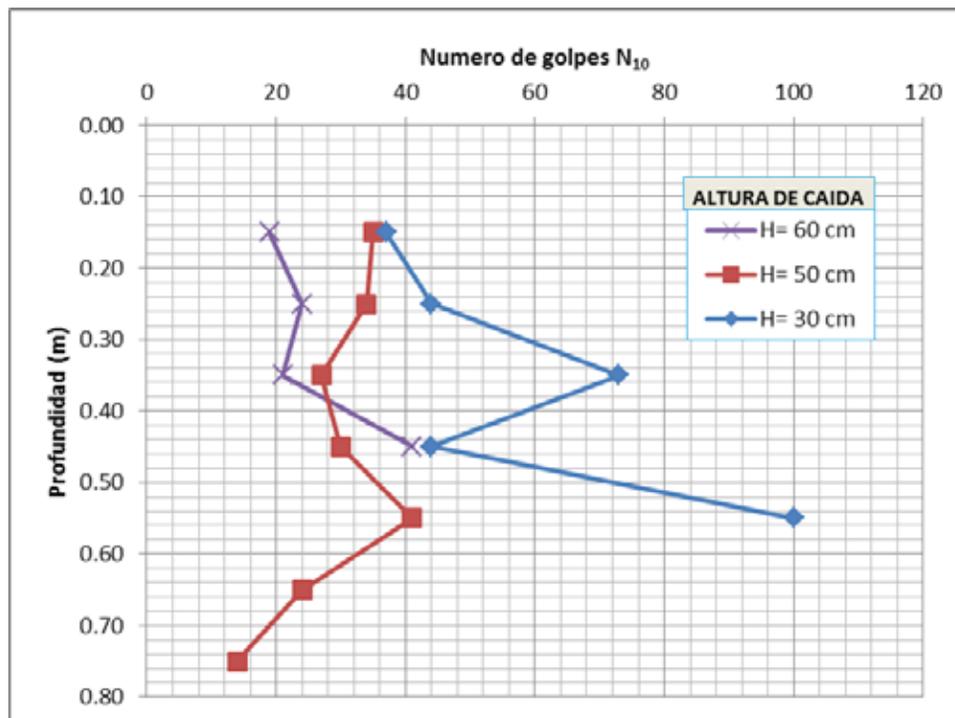


Figura 49: Penetrograma de la prueba PC 1

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 49 se observa una distorsión total del suelo, esto se debe a que esta prueba se realizó en un relleno de suelo arenoso (SP), con grava de tamaño máximo 3" que impidieron el paso, lo que reafirma que los rellenos no controlados son muy

variable en todos sus sentidos. En esta prueba, a 0.35 m de profundidad el giro es el mismo y el rebote prácticamente es el mismo para cada altura de caída (Rebote promedio =0.43 cm), lo que podría significar que el suelo en esta profundidad es el mismo. Realizando la gráfica de las alturas de caída versus la penetración permanente para esta profundidad se tiene:

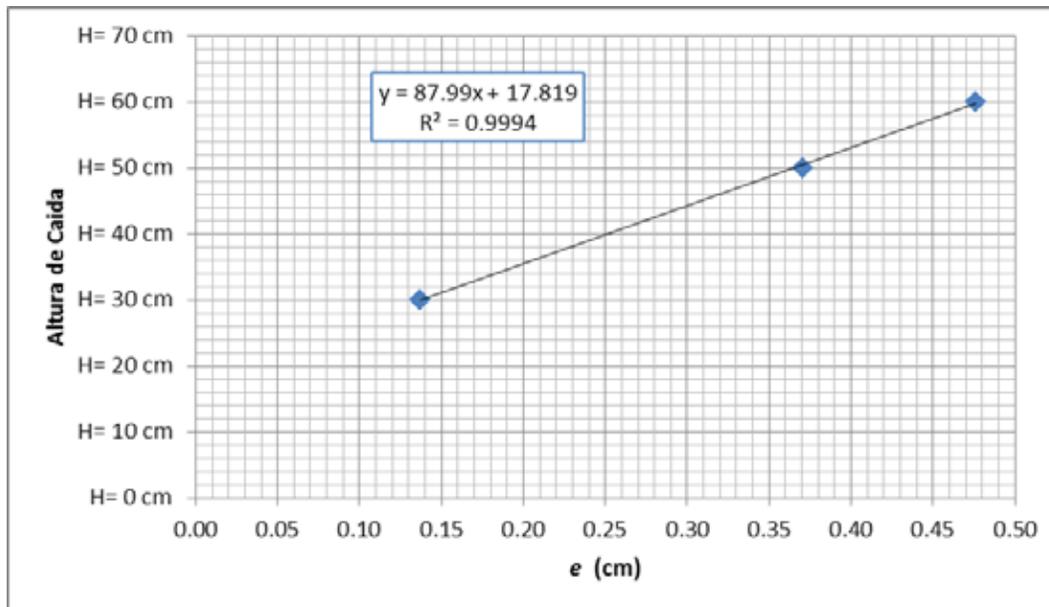


Figura 50: Altura de caída vs e a 0.35 m en la prueba PC 1
Fuente: Elaboración propia

4.4.2. PRUEBA PC 2

El penetrograma de esta prueba es:

Tabla 19: Numero de golpes por cada 10 cm de la prueba PC 2

P_f (m)	N_{10}		
	H= 60 cm	H= 50 cm	H= 30 cm
0.15	22.0	25.0	68.0
0.25	32.0	46.0	85.0
0.35	27.0	36.0	71.0
0.45	22.0	26.0	70.0
0.55	23.0	27.0	52.0
0.65	17.0	18.0	41.0
0.75	27.8	21.0	38.0

Fuente: Elaboración propia

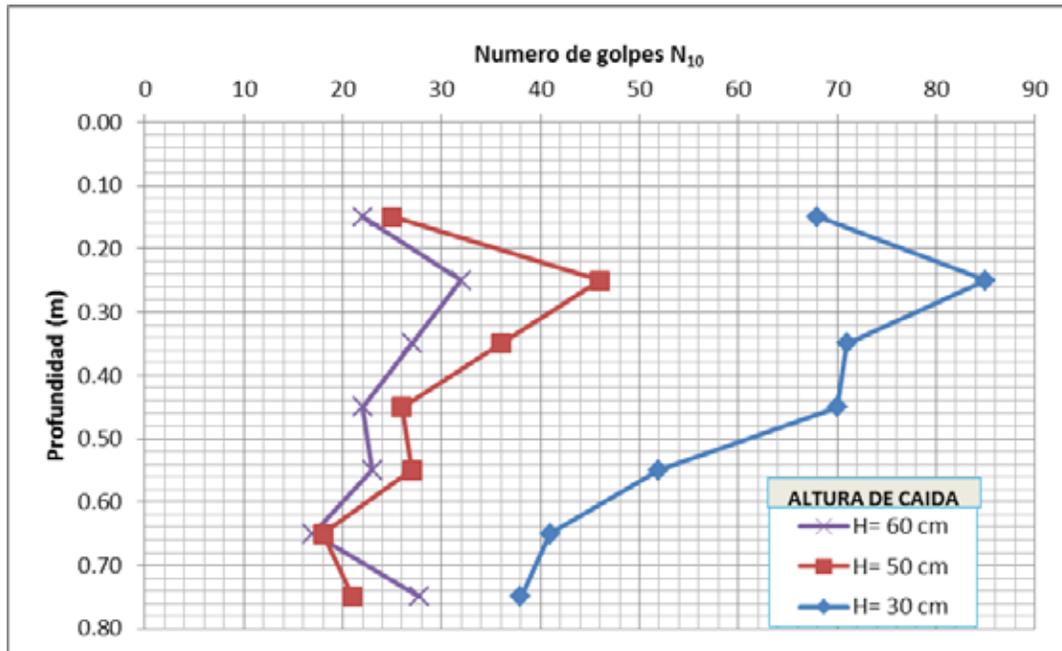


Figura 51: Penetrograma de la prueba PC 2
 Fuente: Elaboración propia

En esta prueba (ítem J.2) el giro es el mismo en todos los caso, lo que da más confianza en la homogeneidad del estrato, el estudio de suelos muestra que la prueba se realiza en dos estrados, uno de limo orgánico (OL) y el otro de una arena pobremente gradada (SP) con gravas de 2" de tamaño máximo.

En cuanto al rebote, se puede notar una ligera tendencia a que sea el mismo para cada profundidad, pero tiene mucha dispersión, así que es probable que el método empleado para la medición no sea muy preciso.

Tabla 20: Rebotes de la maza en la prueba PC 2

<i>Pf</i> (m)	<i>h_{rp}</i> (cm)		
	H= 60 cm	H= 50 cm	H= 30 cm
0.15	0.5	0.4	0.5
0.25	0.5	1.0	0.5
0.35	0.6	0.2	1.0
0.45	0.4	0.5	0.8
0.55	0.4	0.5	0.5
0.65	0.0	0.0	0.5
0.75	1.0	0.3	0.2

Fuente: Elaboración propia

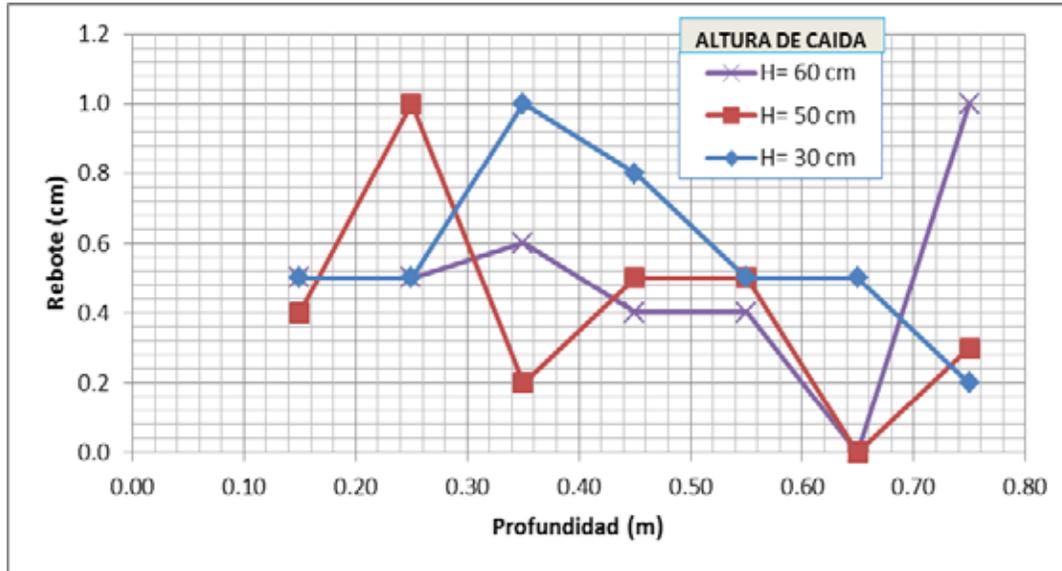


Figura 52: Rebotes de la maza en la prueba PC 2
 Fuente: Elaboración propia

La tendencia lineal de la altura de caída (Tabla 21) y la distancia penetrada por golpe se sigue manteniendo, aunque tal vez las alturas de caída usadas no fueron las más apropiadas, ya que en el penetrograma se nota que los datos de las alturas H=50 y H=60 están ligeramente juntos.

Tabla 21: Valores de A y H_0 en la prueba PC 2

Pf (m)	e (cm)			A	H_0 (cm)	R^2
	H= 60 cm	H= 50 cm	H= 30 cm			
0.15	0.455	0.400	0.147	91.8	16.0	0.973
0.25	0.313	0.217	0.118	154.3	13.4	0.969
0.35	0.370	0.278	0.141	131.9	12.0	0.994
0.45	0.455	0.385	0.143	92.7	16.3	0.986
0.55	0.435	0.370	0.192	121.3	6.3	0.995
0.65	0.588	0.556	0.244	77.9	10.6	0.940
0.75	0.360	0.476	0.263	88.0	14.4	0.377

Fuente: Elaboración propia

4.4.3. PRUEBA PC 3

Los resultados de la prueba son:

Tabla 22: Numero de golpes por cada 10 cm de la prueba PC 3

Pf (m)	N_{10}		
	H= 50 cm	H= 40 cm	H= 20 cm
0.15	11.0	15.0	23.0
0.25	7.0	11.0	17.0
0.35	8.2	15.0	24.0
0.45	8.9	15.0	30.0
0.55	11.0	15.0	34.0
0.65	11.0	17.0	34.0
0.75	13.0	17.0	34.0
0.85	15.0	17.0	37.0
0.95	13.0	15.0	34.0
1.05	12.7	16.0	46.0
1.15	20.0	22.0	84.0
1.25	24.0	42.0	-

Fuente: Elaboración propia

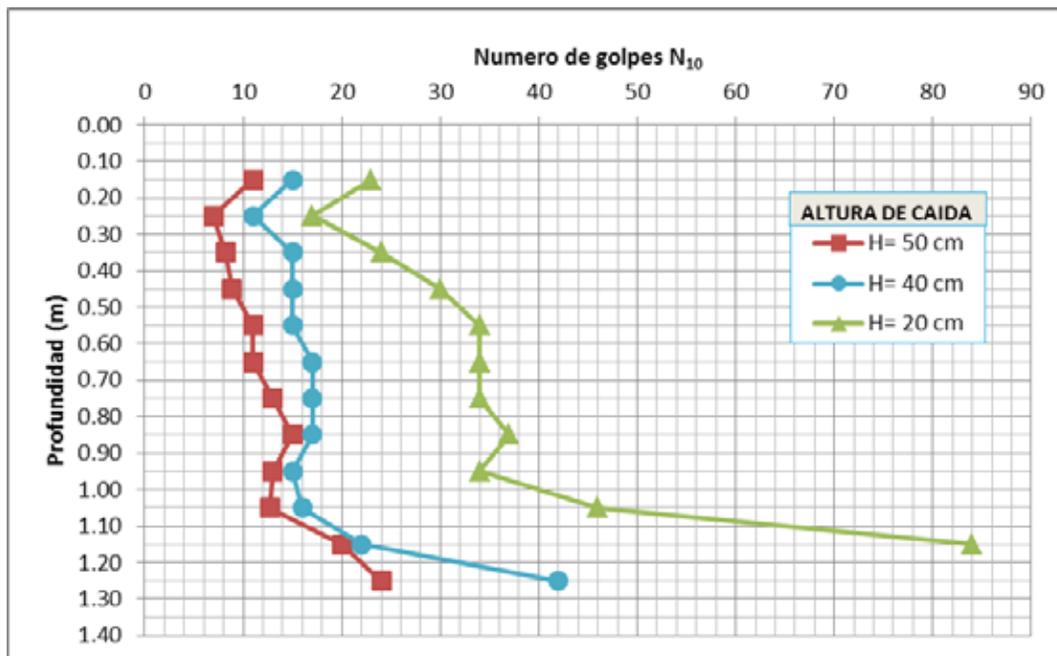


Figura 53: Penetrograma de la prueba PC 3

Fuente: Elaboración propia

En los datos (ítem J.3) se observa que hasta los 95 cm de profundidad, el suelo tiene el mismo giro, entonces los rebotes de esta zona son:

Tabla 23: Rebotes de la maza en la prueba PC 3

P_f (m)	h_{rp} (cm)		
	H= 50 cm	H= 40 cm	H= 20 cm
0.15	0.2	0.2	0.1
0.25	0.1	0.1	0.1
0.35	0.1	0.1	0.1
0.45	0.1	0.1	0.2
0.55	0.1	0.1	0.2
0.65	0.1	0.1	0.3
0.75	0.1	0.1	0.2
0.85	0.1	0.1	0.2
0.95	0.1	0.1	0.1

Fuente: Elaboración propia

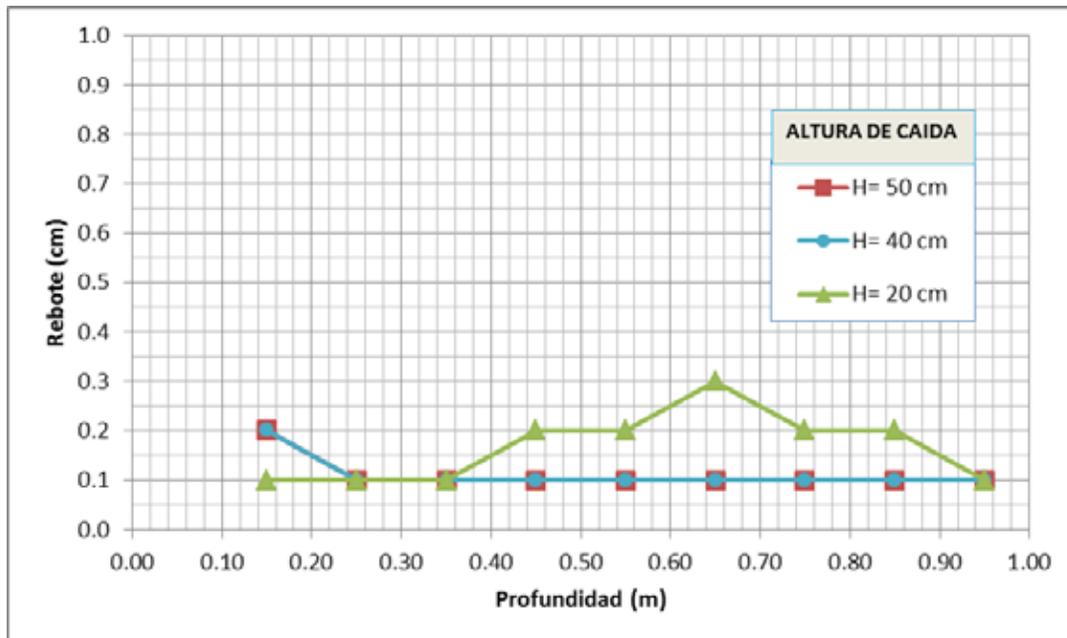


Figura 54: Rebotes de la maza en la prueba PC 3

Fuente: Elaboración propia

Se observa que el rebote es casi el mismo para todos los caso, pero su magnitud es pequeña, lo que causa que no se pueda apreciar bien, causando en algunos tramos distorsiones.

Las tendencias lineal se presenta en todos los casos, pero a 0.15 m de profundidad se muestra un valor de la altura de caída mínima negativo, para lo cual es preferible asumir que vale cero, con este cambio la pendiente de la recta será 55.4 y el factor de determinación de 0.944.

El suelo es una arena limosa (SM) sin presencia de grava, por lo que tiene un buen comportamiento al aplicar el ensayo, pero al parecer, al ingresar en el segundo estrato se empieza a perder la homogeneidad horizontal.

Tabla 24: Valores de A y H_0 en la prueba PC 3

Pf (m)	e (cm)			A	H_0 (cm)	R^2
	H= 50 cm	H= 40 cm	H= 20 cm			
0.15	0.909	0.667	0.435	63.1	-5.6	0.959
0.25	1.429	0.909	0.588	34.1	3.4	0.898
0.35	1.222	0.667	0.417	34.0	10.5	0.844
0.45	1.125	0.667	0.333	36.9	10.5	0.923
0.55	0.909	0.667	0.294	49.2	6.0	0.995
0.65	0.909	0.588	0.294	48.5	7.7	0.954
0.75	0.769	0.588	0.294	63.6	1.6	0.997
0.85	0.667	0.588	0.270	72.0	0.1	0.979
0.95	0.769	0.667	0.294	60.6	1.7	0.984

Fuente: Elaboración propia

4.4.4. PRUEBA PC 4

Los resultados de esta prueba son:

Tabla 25: Numero de golpes por cada 10 cm de la prueba PC 4

<i>Pf</i> (m)	<i>N</i> ₁₀		
	H= 50 cm	H= 30 cm	H= 10 cm
0.15	18.0	36.0	-
0.25	32.0	73.0	-
0.35	15.0	60.0	-
0.45	10.0	36.0	-
0.55	7.0	-	44.0
0.65	7.0	-	42.0
0.75	6.0	-	35.0
0.85	7.0	-	-
0.95	9.0	-	-
1.05	5.0	-	-
1.15	4.5	-	-
1.25	5.6	-	-
1.35	8.0	-	-
1.45	10.0	-	-
1.55	10.0	-	-

Fuente: Elaboración propia

Aunque el material es considerado relleno, se ve un comportamiento uniforme hasta una profundidad de 0.75 cm, con un mismo tipo de giro, incluso se puede ver que en muchos tramos el rebote es el mismo (Tabla 26).

Como en esta prueba solo se hizo dos penetraciones, una de estas fue con una altura de caída de 50 cm y la otra con dos alturas diferentes, primero con H=30 cm y luego con H=10 cm en la profundidad que se observó una disminución considerable del número de golpes con H=50cm.

Por el procedimiento usado no se puede afirmar una tendencia línea como en los demás casos, pero sí que hay una un incremento notable del número de golpes con la disminución de la altura de caída.

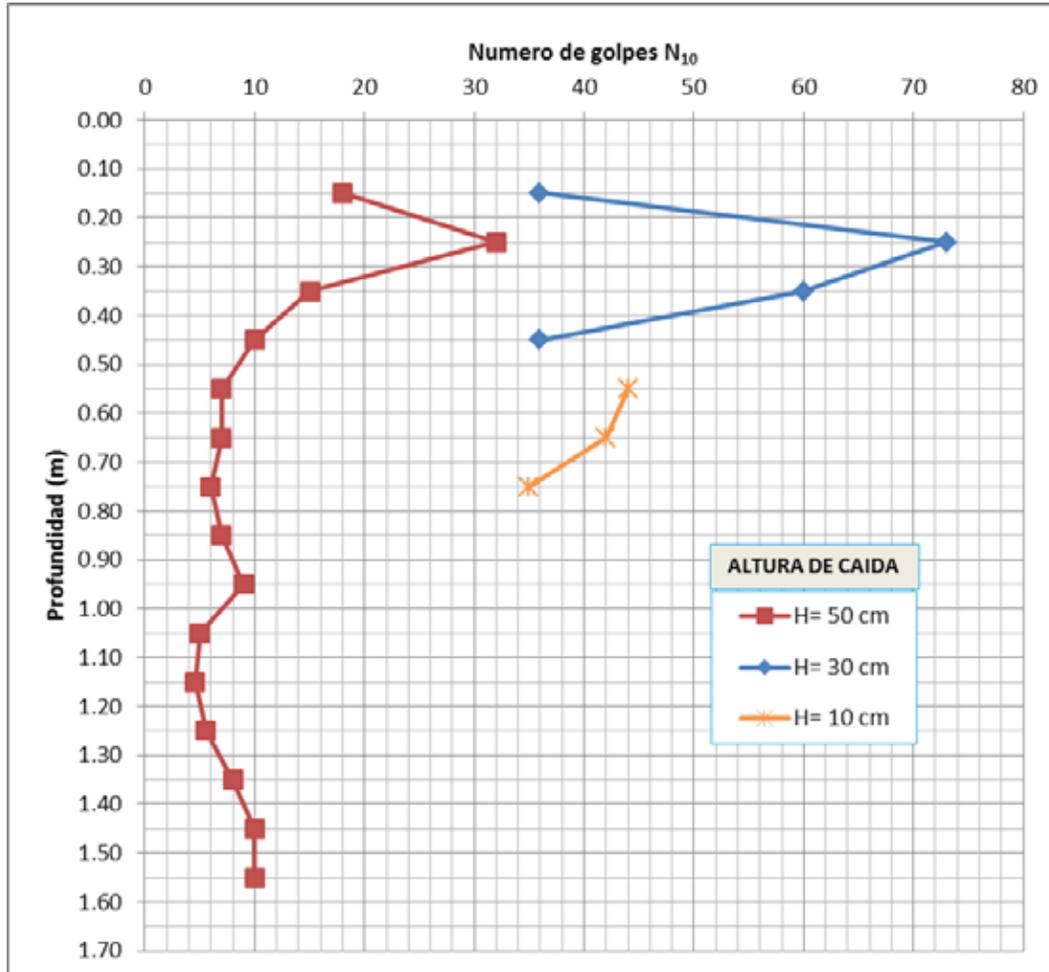


Figura 55: Penetrograma de la prueba PC 4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26: Rebotes de la maza en la prueba PC 4

P_f (m)	h_{rp} (cm)		
	H= 50 cm	H= 30 cm	H= 10 cm
0.15	0.5	0.5	-
0.25	0.1	0.1	-
0.35	0.5	1.3	-
0.45	0.3	0.1	-
0.55	0.1	-	0.1
0.65	0.1	-	0.1
0.75	0.1	-	0.1

Fuente: Elaboración propia

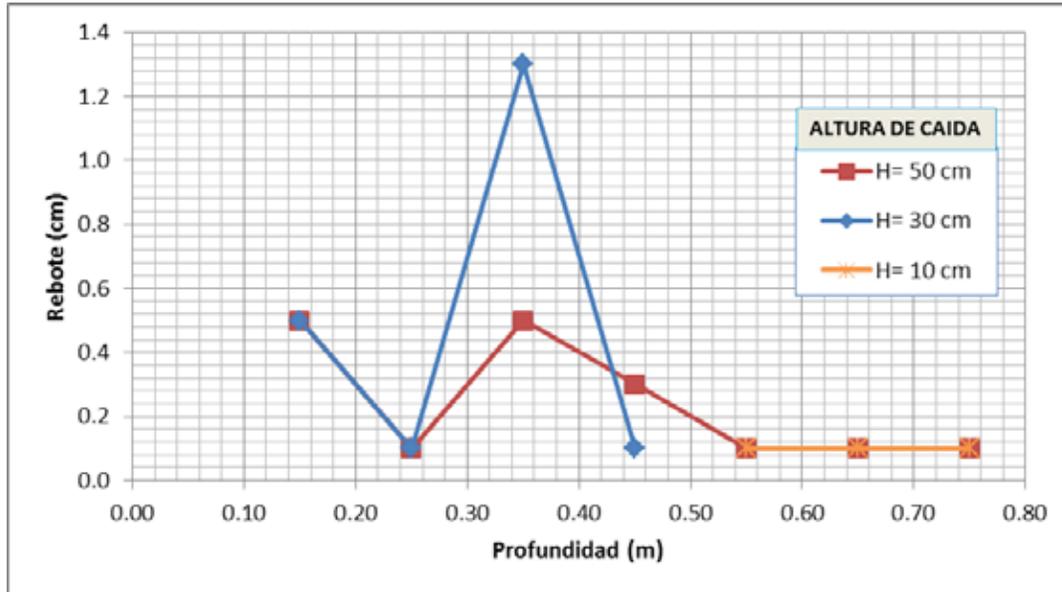


Figura 56: Rebotos de la maza en la prueba PC 4

Fuente: Elaboración propia

Para estimar la altura mínima de caída, se considera que los dos datos que se tiene para cada penetración forman una recta perfecta, lo que se muestra en la Tabla 27

Esta variante nos permitió ver que incluso con 10 cm de altura de caída podemos ingresar en un suelo y poder observar rebote.

Tabla 27: Valores de A y H_0 en la prueba PC 4

Pf (m)	e (cm)			A	H_0 (cm)	R^2
	H= 50 cm	H= 30 cm	H= 10 cm			
0.15	0.556	0.278	-	72.0	10.0	1.000
0.25	0.313	0.137	-	114.0	14.4	1.000
0.35	0.667	0.167	-	40.0	23.3	1.000
0.45	1.000	0.278	-	27.7	22.3	1.000
0.55	1.429	-	0.227	33.3	2.4	1.000
0.65	1.429	-	0.238	33.6	2.0	1.000
0.75	1.667	-	0.286	29.0	1.7	1.000

Fuente: Elaboración propia

4.4.5. PRUEBA PC 5

Los resultados de esta prueba son:

Tabla 28: Numero de golpes por cada 10 cm de la prueba PC 5

<i>Pf</i> (m)	<i>N</i> ₁₀				
	H= 50 cm	H= 60 cm	H= 40 cm	H= 30 cm	H= 10 cm
0.15	67.0	35.0	40.0	-	-
0.25	61.0	18.0	33.0	-	-
0.35	47.0	25.0	15.0	-	-
0.45	18.0	27.0	16.0	-	-
0.55	14.0	13.0	-	-	72.0
0.65	9.0	-	-	14.0	40.0
0.75	5.0	-	-	14.0	21.0
0.85	6.0	-	-	14.0	25.0
0.95	7.0	-	-	20.0	35.0
1.05	8.0	-	-	20.0	33.0
1.15	8.0	-	-	23.0	35.0
1.25	9.0	-	-	26.0	43.0
1.35	9.0	-	-	24.0	52.0
1.45	7.0	-	-	19.0	46.0
1.55	6.0	-	-	15.0	24.0

Fuente: Elaboración propia

En la prueba se ejecuta el ensayo con 5 alturas de caída diferentes en tres puntos, uno con una altura H=50 cm y los otros dos con alturas diferentes según avanza la auscultación.

El penetrograma (Figura 57) muestra que en los primeros 0.60 m, el suelo está muy distorsionado, esto se debe a que esta zona corresponde a una capa de base con material de préstamo, y al parecer fue colocado en forma no controlada.

Al observar los datos de campo (ítem J.5) a partir de los 0.60 m de profundidad, se observa que el giro no es estable en los diferentes puntos del estrato de arena fina, lo que hace desconfiar de la información obtenida. Tampoco se puede observar la tendencia de homogeneidad del rebote y las tendencias lineales no son muy buenas (Tabla 29), aunque para una profundidad de 0.65 m, la tendencia lineal si se cumple,

así como el rebote (rebote 0 cm) y el giro es el mismo, pero da una altura mínima de caída negativa, la cual se asume como cero.

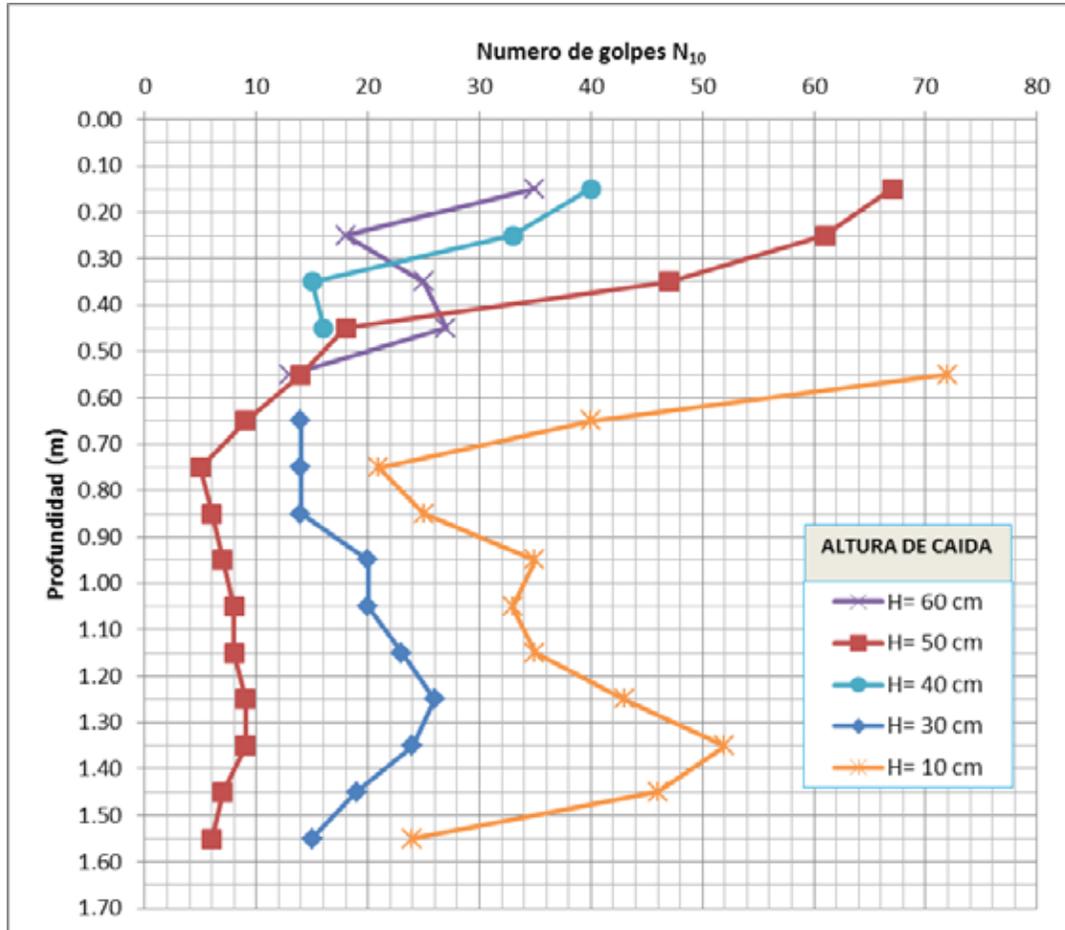


Figura 57: Penetrograma de la prueba PC 5
Fuente: Elaboración propia

Tabla 29: Valores de A y H_0 en la prueba PC 5

P_f (m)	e (cm)			A	H_0 (cm)	R^2
	H= 50 cm	H= 30 cm	H= 10 cm			
0.65	1.111	0.714	0.250	46.4	-2.1	0.998
0.75	2.000	0.714	0.476	22.7	5.9	0.864
0.85	1.667	0.714	0.400	29.1	3.0	0.922
0.95	1.429	0.500	0.286	31.0	7.1	0.885
1.55	1.667	0.667	0.417	28.6	3.8	0.893

Fuente: Elaboración propia

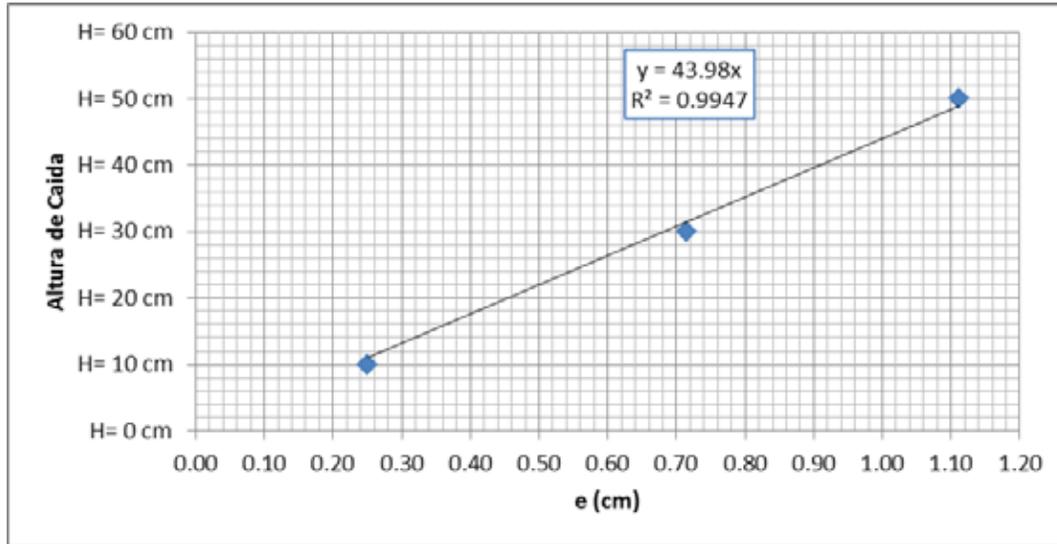


Figura 58: Altura de caída vs e para 0.65 m de profundidad en PC 5
Fuente: Elaboración propia

4.4.6. PRUEBA PC 6

Los resultados de esta prueba son:

Tabla 30: Numero de golpes por cada 10 cm de la prueba PC 6

P_f (m)	N_{10}		
	H= 50 cm	H= 30 cm	H= 10 cm
0.15	23.0	53.0	270.0
0.25	22.0	35.0	190.0
0.35	15.0	25.0	99.0
0.45	10.0	18.0	78.0
0.55	9.0	18.0	55.0
0.65	8.0	16.0	43.0
0.75	7.3	13.0	39.0
0.85	7.8	12.0	38.0
0.95	8.0	11.0	34.0
1.05	9.0	13.0	33.0

Fuente: Elaboración propia

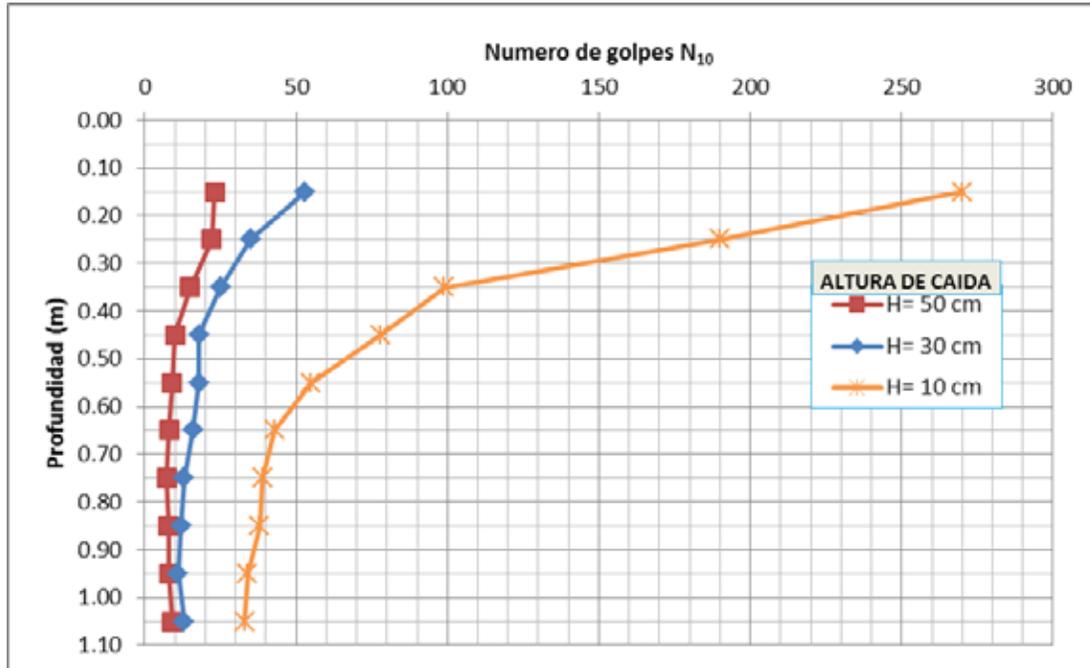


Figura 59: Penetrograma de la prueba PC 6
 Fuente: Elaboración propia

Aunque el estudio de suelos indica que este tramo es un relleno orgánico, la tendencia a incrementar el número de golpes es bastante notoria, en cuanto al giro se observa una buena homogeneidad, excepto en los 0.35 m de profundidad (ítem J.6). En el campo se pudo observar que este suelo es una arena limosa (SM).

Tabla 31: Rebotes de la maza en la prueba PC 6

P_f (m)	h_{rp} (cm)		
	H= 50 cm	H= 30 cm	H= 10 cm
0.15	0.8	0.7	0.5
0.25	0.5	0.5	0.3
0.35	0.5	0.3	0.3
0.45	0.35	0.3	0.3
0.55	0.0	0.0	0.3
0.65	0.0	0.0	0.5
0.75	0.0	0.0	0.1
0.85	0.0	0.0	0.1
0.95	0.0	0.0	0.0
1.05	0.0	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia

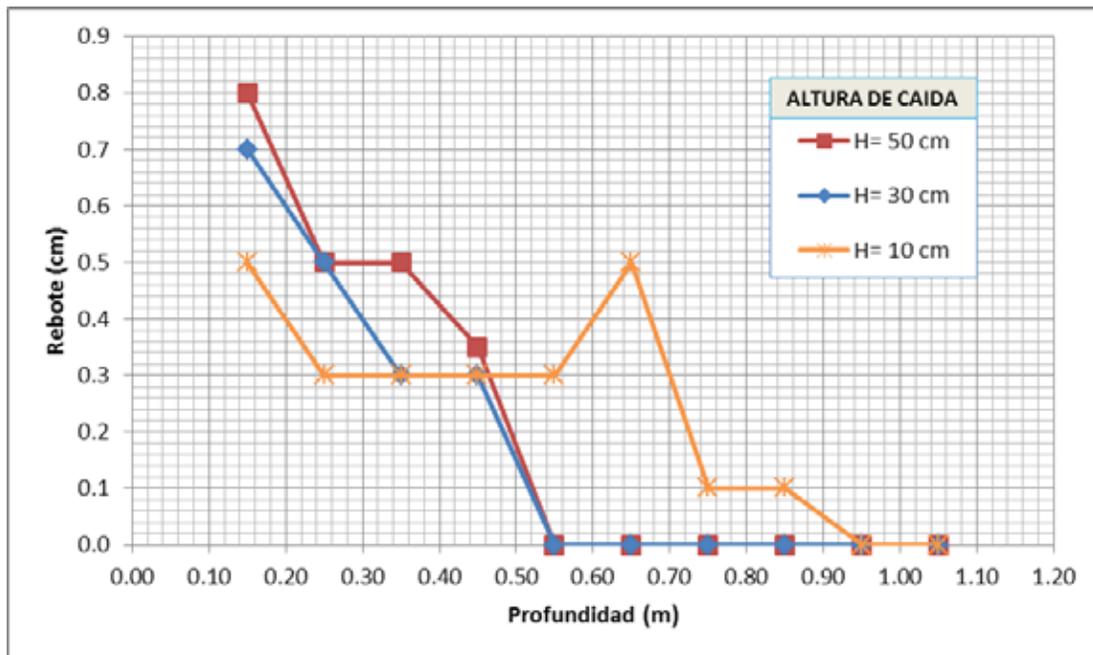


Figura 60: Rebotes de la maza en la prueba PC 6
Fuente: Elaboración propia

En cuanto al rebote se puede apreciar una tendencia a repetirse y disminuir con la profundidad.

Tabla 32: Valores de A y H_0 en la prueba PC 6

Pf (m)	e (cm)			A	H_0 (cm)	R^2
	H= 50 cm	H= 30 cm	H= 10 cm			
0.15	0.435	0.189	0.037	98.7	8.3	0.982
0.25	0.455	0.286	0.053	98.7	3.9	0.992
0.35	0.667	0.400	0.101	70.6	2.5	0.999
0.45	1.000	0.556	0.128	45.9	4.3	1.000
0.55	1.111	0.556	0.182	42.5	3.8	0.987
0.65	1.250	0.625	0.233	38.6	2.9	0.983
0.75	1.375	0.769	0.256	35.7	1.5	0.998
0.85	1.286	0.833	0.263	38.9	-0.9	0.996
0.95	1.250	0.909	0.294	40.7	-3.3	0.973
1.05	1.111	0.769	0.303	49.1	-5.7	0.992

Fuente: Elaboración propia

En este caso se observa una buena tendencia lineal entre los datos. Es de resaltar un fenómeno que se aprecia en el primer tramo de conteo, la altura de caída $H=10$ cm está muy cercana a la altura de caída mínima, lo que causa un incremento elevado en el número de golpes, a esto surge una duda, ¿Qué pasaría si la altura de caída coincide o es menor que la altura mínima? Aunque por definición esto no podría suceder y del ser el caso el número del golpes se haría infinito, en la practica la penetración permanente siempre va a existir, pero una vez que estemos por debajo de la altura mínima, lo más probable es que el rebote la no se repita, y empezará a disminuir con la altura, esto se debe a que el comportamiento del suelo no es 100 % elasto- plástico (Figura 14), el módulo de deformación no es el mismo al momento de deformarse que al momento de restituirse, por tal motivo se podría cambiar la definición de la altura de caída como la altura necesaria para que se obtenga un numero de golpes determinado, como podría ser para este caso $N_{10}=250$.

4.4.7. PRUEBA PC 7

Esta prueba (ítem J.7) se realiza en el mismo sector de la prueba PC 6, pero se aprovechó el movimiento de tierras para la cimentación de un terramesh que llega hasta el estrato arcilloso, es una arcilla de alta plasticidad (CH), pero en la superficie se nota la presencia de un lente de arena fina que no se indica en el estudio de suelos.

En el penetrograma (Figura 61) se puede distinguir claramente una tendencia a incrementar el número de golpes con la disminución de la altura de caída de la maza y una apariencia de homogeneidad del estrato.

Tabla 33: Numero de golpes por cada 10 cm de la prueba PC 7

<i>Pf</i> (m)	N_{10}		
	H= 50 cm	H= 30 cm	H= 10 cm
0.15	8.0	12.0	44.0
0.25	8.0	13.0	43.0
0.35	8.0	16.0	46.0
0.45	9.0	16.0	50.0
0.55	9.0	17.0	53.3
0.65	10.0	19.0	57.0
0.75	12.0	20.0	64.0

Fuente: Elaboración propia

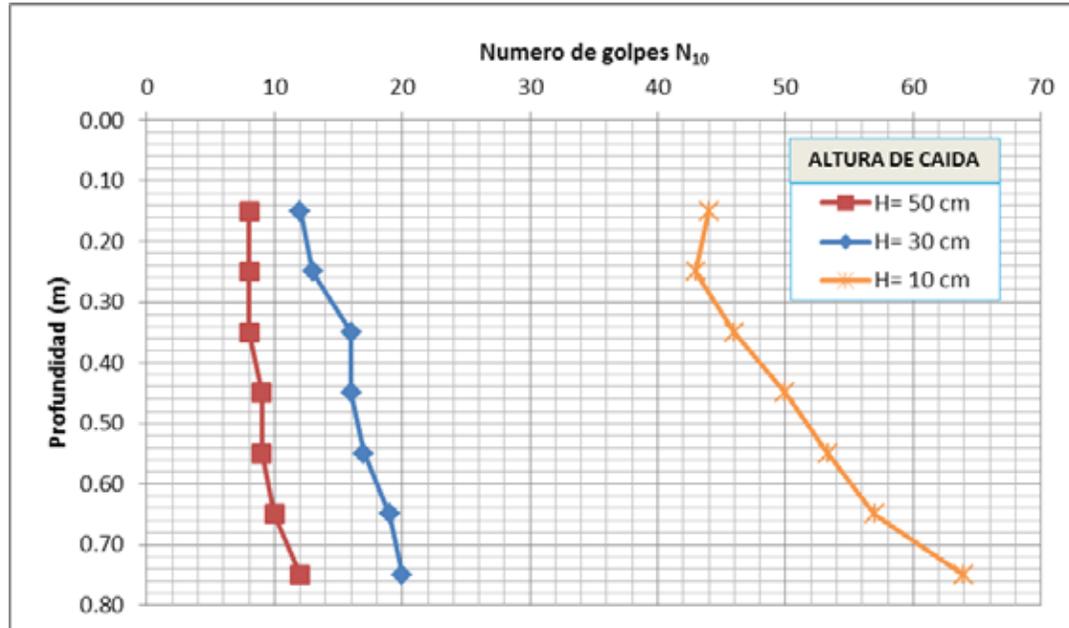


Figura 61: Penetrograma de la prueba PC 7

Fuente: Elaboración propia

Al observar el tipo de giro, vemos que no es homogéneo, y como era de esperarse en una arcilla, este se hace cada vez más dificultoso, llegando incluso a no girar. El rebote es prácticamente nulo en todos los casos, excepto a una profundidad de 0.75 m en el cual sube a 0.3 cm.

Se puede apreciar una buena tendencia lineal entre los valores de la altura de caída y la penetración permanente (Tabla 34).

Tabla 34: Valores de A y H_0 en la prueba PC 7

P_f (m)	e (cm)			A	H_0 (cm)	R^2
	H= 50 cm	H= 30 cm	H= 10 cm			
0.15	1.250	0.833	0.227	38.7	0.2	0.989
0.25	1.250	0.769	0.233	39.3	0.5	0.999
0.35	1.250	0.625	0.217	38.2	3.4	0.985
0.45	1.111	0.625	0.200	43.8	1.7	0.999
0.55	1.111	0.588	0.188	43.1	2.9	0.994
0.65	1.000	0.526	0.175	48.2	2.7	0.993
0.75	0.833	0.500	0.156	59.1	0.7	1.000

Fuente: Elaboración propia

4.5. VERIFICACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE VARIABLES

En el ítem 3.2.3 (relación entre variables dependientes e independientes) se planteó que podrían existir diferentes relaciones entre las variables, las cuales se trataron de corroborar en esta tesis, ahora toca ratificar o descartar la existencia de estas.

El factor de reducción de la energía por la caída, fue propuesto de la forma:

$$k_1 = f(H, \text{Operador})$$

En el marco teórico se definió k_1 como el producto de dos coeficientes independientes (ecuación (39)), cada uno asociado a una de las variables independientes ($k_c = f(H)$ y $k_H = f(\text{Operador})$):

$$k_1 = k_c \cdot k_H$$

En las pruebas de laboratorio (ítem 4.1) se descarta que las variaciones en los valores de las variables independientes, altura de caída H y Operador , influyan significativamente en los valores medidos de k_c (factor de reducción de la gravedad) y k_H (relación entre la altura promedio y la altura teórica), así que se puede afirmar que k_1 es un valor propio del dispositivo de introducción manual del equipo DPL, condicionado a que sea accionado por una persona, entonces para el equipo DPL:

$$k_c = \text{constante}; k_H = \text{constante} \Rightarrow k_1 = \text{constante}$$

Se recuerda que k_c engloba fenómenos físicos como la fricción de la guía con la maza y la fricción-empuje de la maza con el aire, de los cuales depende directamente, entonces es una constante por el hecho que las condiciones físicas se repiten una y otra vez, y su valor muestra la incidencia de estos fenómenos en la pérdida de energía. En el ítem 4.1.1 (caída libre de la maza) se descarta que el aire influya en forma significativa en el ensayo, por lo tanto k_c representa prácticamente la fricción entre la guía y la maza.

El factor k_H , muestra cuanto se aleja el promedio de la altura de caída real respecto de la que se pretendía levantar, así que al decir que es constante, se deduce que todos los operadores tiene a cometer un error similar o asimilan rápidamente el procedimiento para el ensayo, es decir, no requieren mucha práctica para accionar el dispositivo de introducción manual.

Respecto al coeficiente de restitución n , este se propuso de la siguiente forma:

$$n = f(H, L, Pf, Cr, Tipo\ de\ suelo)$$

En el marco teórico (ítem 2.3.5.2e ítem 3.7.3) se definió como:

$$n = -\frac{v'_M}{v_M} = \frac{1}{k_c} \cdot \sqrt{\frac{h_{rp}}{k_H \cdot H}}$$

De la ecuación anterior se puede afirmar que n , es inversamente proporcional a \sqrt{H} y directamente proporcional a $\sqrt{h_{rp}}$, pero la formula general de hincas asume que n es una constante para ciertas condiciones de la hincas del penetrómetro (terrenos blandos $n=0$, terrenos resistentes $n=0.4$, hincas difíciles $n=0.7$) (Bolomey Frazer, 1971, pág. 979), por lo cual se esperaba ver una relación directa entre la altura de caída H y la altura de rebote promedio h_{rp} , ya que se ha afirmado que se puede considerar a k_c y k_H como constantes, por lo cual, h_{rp} sería de la forma:

$$h_{rp} = f(H, L, Pf, Cr, Tipo\ de\ suelo)$$

En el ítem 4.2.1 (sobre el coeficiente de restitución) se mostró que para un mismo *Tipo de suelo*, con una misma compacidad relativa Cr , a una misma profundidad Pf y con una misma longitud de sonda L , los valores obtenidos de n no son constantes para diferentes valores de H y los valores de h_{rp} no están variando considerablemente al variar H , esto último se verificó en las distintas pruebas de campo. También se observó que h_{rp} variaba en función a las propiedades del suelo (compacidad relativa, tipo, humedad, etc), pero no se pudo descartar o confirmar si dependía de las características del ensayo (profundidad, longitud de sonda), así que las relaciones de estas variables quedan como:

$$n = f(H, h_{rp})$$

$$h_{rp} = f(L, Pf, Suelo^1)$$

No se continúa la formulación de una expresión exacta que pueda describir a n en función de las variables independientes, porque en el ítem 4.3 (interpretación teoría del ensayo DPL) se descartó que este parámetro intervenga en el cálculo de la

¹ La variable *Suelo*, engloba las propiedades del suelo que influyen para que varíe el rebote.

resistencia dinámica de la punta R_d , además h_{rp} es la manifestación de las deformaciones elásticas del ensayo, las cuales ya se están interpretando con la altura mínima de caída H_0 , es decir H_0 y n representan el mismo parámetro pero en distintas etapas del fenómeno, el primero en el momento de máxima deformación y el segundo una vez que el choque a concluido.

Por último, respecto a la altura mínima de caída, esta se propuso de la siguiente forma:

$$H_0 = f(L, Pf, Cr, Tipo\ de\ suelo)$$

En el marco teórico, se definió a H_0 como la constante de la recta de regresión del grafico de dispersión de la altura de caída H y la penetración permanente e , este parámetro en si solo representaba una simplificación la formula general de hincia para sustituir la deformación elástica del penetrómetro y del suelo.

En el ítem 4.2.2 (sobre la altura mínima de caída) se observó que este parámetro se comportaba en una forma poco predecible, que guarda relación con la compacidad del suelo, pero no en todos los casos. Los resultados no permiten afirmar o negar si depende de la longitud de la sonda y la profundidad.

En el ítem 4.3 (interpretación teoría del ensayo DPL), se logra plantear una interpretación teórica de lo que es H_0 , en donde se muestra que H_0 depende tanto de las propiedades del suelo como de las condiciones del equipo, y que representa una porción de la energía potencial acumulada en las deformaciones elásticas del suelo y el equipo DPL que llegan a restituirse. Este fenómeno es el mismo que causa el rebote la maza (h_{rp}), por lo que H_0 tendrá que ser de la forma:

$$H_0 = f(L, Pf, Suelo)$$

Este parámetro es muy variable, pero también muy incidente en los cálculos de R_d , así que la mejor opción es calcularlo en cada ensayo. Lo que se observó en todas las pruebas, es que para un estrato de suelo homogéneo horizontalmente, el cálculo de H_0 tuvo un coeficiente de determinación bastante bueno, lo que confirma la confiabilidad del método usado.

4.6. OBSERVACIONES RELEVANTES

4.6.1. RELACIÓN ENTRE LA ALTURA DE CAÍDA MÍNIMA Y EL REBOTE

Ya que se descartó la influencia del tipo de choque en el fenómeno del DPL, queda un registro amplio de los rebotes de la maza, si se quiere saber por qué revota la maza, a que observar bien la Figura 39, de lo cual se llega a la conclusión que es debido a la existencia de la altura mínima de caída, ya que la deformación elástica que se recupera al momento de restituirse genera que la maza se eleve de nuevo.

Si se compara los rebotes de la prueba de laboratorio y sus alturas mínimas de caída en un gráfico de dispersión a una escala adecuada, se tiene (Figura 62):

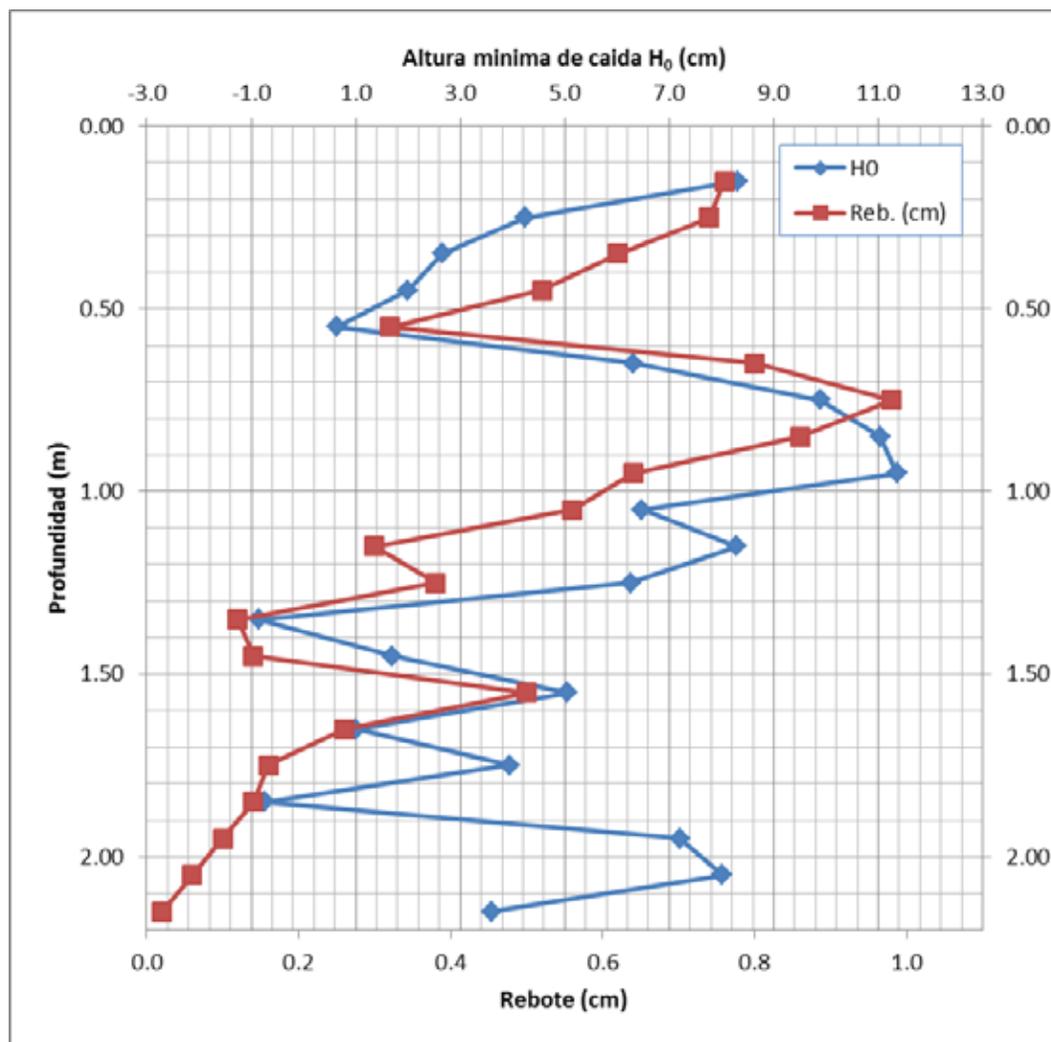


Figura 62: Comparación del rebote y la altura mínima de caída en PL 1
Fuente: Elaboración propia

Al menos hasta los 1.85 m de profundidad se observa una relación casi directa, pero se distorsiona a mayor profundidad, lo más probable es que este desfase se deba a la falta de precisión y falta de homogeneidad del suelo de esta zona (no se removió).

Otro ejemplo de esta relación es la prueba de campo PC 6 (Figura 63):

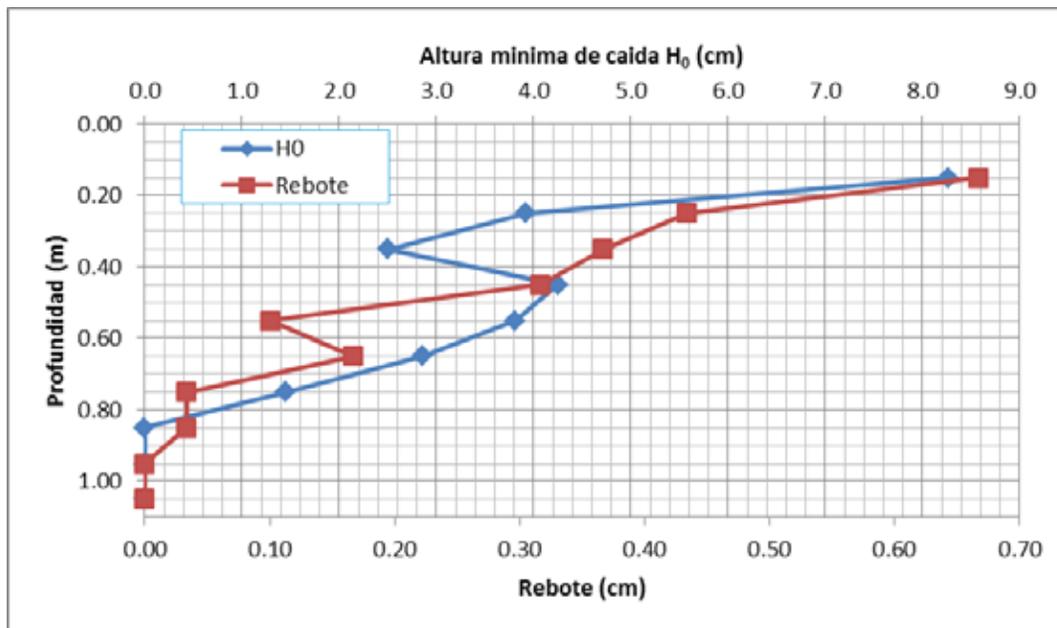


Figura 63: Comparación del rebote y la altura mínima de caída en PC 6
Fuente: Elaboración propia

Si se hace una regresión lineal de estos dos casos se tiene:

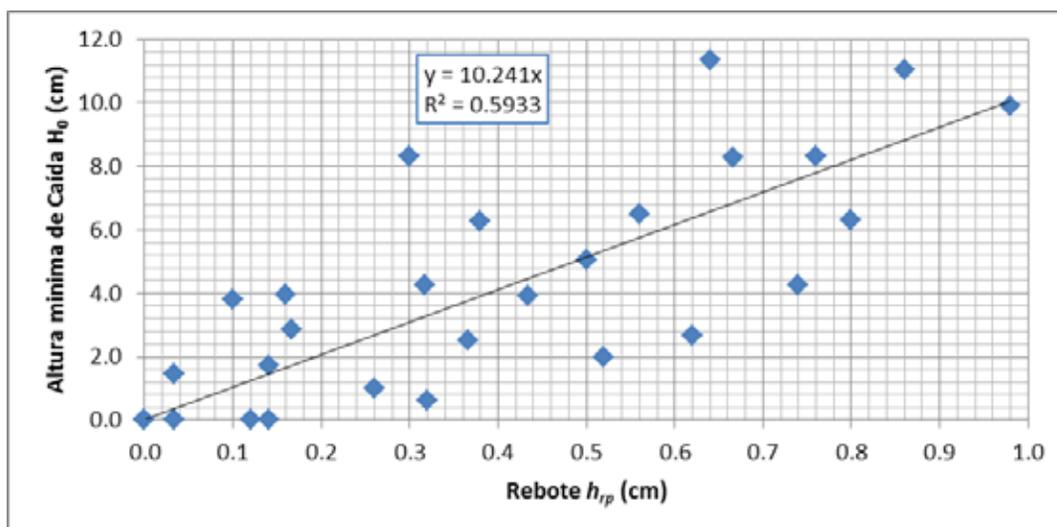


Figura 64: Relación entre rebote y altura mínima de caída
Fuente: Elaboración propia

Aunque la relación no sea tan buena, la tendencia está clara y se puede afirmar que el rebote es una función de la altura mínima de caída, así que se puede usar el rebote para estimar H_0 multiplicándolo por un factor de 10.2, pero se debe recordar que esta comparación se realiza en un suelo tipo SM. En las demás prueba se nota un comportamiento similar que el mostrado en la Figura 62, pero la relación es aún más dispersa, todo esto se debe seguramente a la poca presión de la medición del rebote, pero no se descarta que pueda deberse al tipo de suelo.

4.6.2. RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA DINÁMICA DEL SUELO Y LA COMPACIDAD RELATIVA

En el único caso que se pudo estimar de alguna forma la compacidad relativa es en la prueba de laboratorio PL 1, de la cual muchas de estas mediciones no son muy confiables por la alteración de la muestra tomada, así que tomando algunos promedios entre los datos de mayor confianza se tiene:

Tabla 35: Relación entre compacidad relativa y resistencia dinámica de la punta

PROFUNDIDAD (m)	C_r	R (%)	R_d promedio
0.93 a 1.25	57.7%	80%	7103
1.58 a 1.80	42.3%	75%	6887
1.80 a 2.08	32.7%	72%	3856

Fuente: Elaboración propia

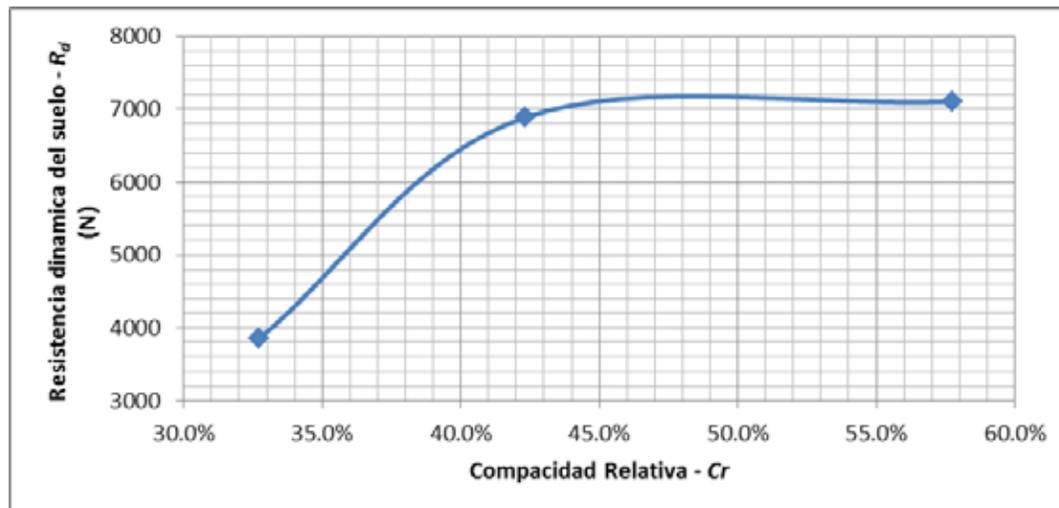


Figura 65: Relación entre C_r y R_d

Fuente: Elaboración propia

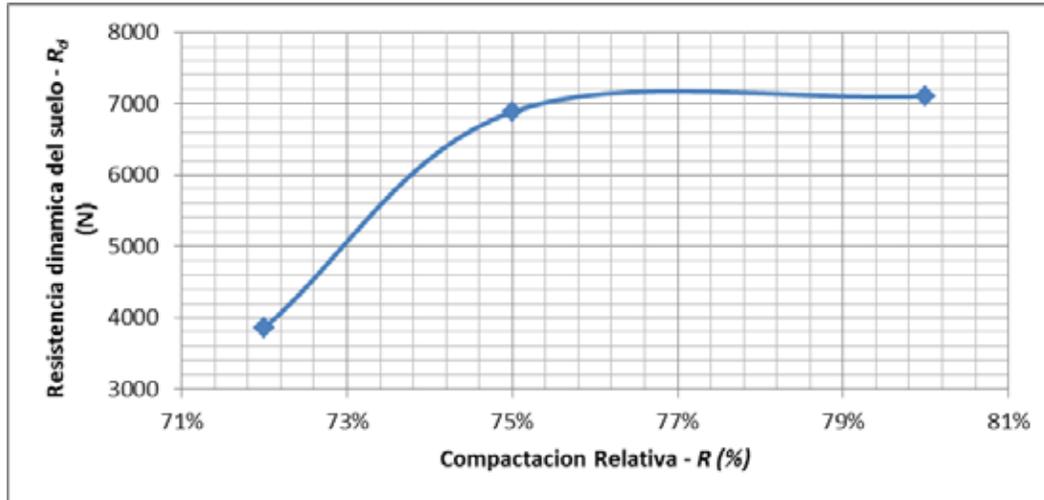


Figura 66: Relación entre R (%) y R_d
Fuente: Elaboración propia

Se observa un comportamiento similar entre la Figura 65 y Figura 66, es decir que al comparar la resistencia dinámica del suelo con la compactación relativa o con compactación relativa se podrá obtener una misma interpretación, que es a mayor compactación relativa mayor resistencia dinámica del suelo, además esto tiende a ser asintótico, es decir que para mayores compactaciones relativas el incremento de la resistencia dinámica del suelo será menor y tenderá a ser un valor máximo propio de un suelo determinado.

4.6.3. COMPARACIÓN CON LOS ANTECEDENTES

En el primer antecedente, H. Bolomey Frazer (1971) concluye con la resolución de la fórmula general de hinca en base de ábacos que ya consideran valores fijos para el coeficiente de restitución n y la deformación elástica c , y los asume en base a su experiencia para representar la realidad, caso similar a esta tesis, que en base a la experiencia se reformula la fórmula general de hinca para aproximarla mejor a la realidad. Una modificación resaltante fue la eliminación del coeficiente de restitución n , que curiosamente en los antecedentes segundo, tercero y quinto ya no es considerado.

En el segundo antecedente, C. M. Morgano y R. Liang (1992) afirman que la energía entregada al varillaje es dependiente de la longitud del varillaje, afirmación que no es respaldada por el antecedente tercero, en el cual Edgar Odebrecht; Fernando Schnaid; Marcelo Maia Rocha y George de Paula Bernardes (2005) indican que la eficiencia de

la energía entregada al varillaje en constante y representada por el factor η_1 , y esta idea es respaldada por el antecedente quinto, en donde Juliana Azoia Lukiantchuki (2012) verifica y obtiene un valor de 73%, por lo cual se decide asumir en esta tesis un criterio similar con el factor de transición α , pero con la variante que solo afecta a la energía entregada por el martillo y no afecta al trabajo realizado por la gravedad durante la hinca, ya que se considera que de esta manera se representa mejor el fenómeno.

En el antecedente tercero, Edgar Odebrecht; et al (2005), propone un factor de eficiencia relacionada con la longitud del varillaje, pero es exclusivo para el ensayo SPT, en esta tesis se usa el mismo factor pero aplicado al DPL, como no se contaba de la mediciones directas del parámetro, se presume una corrección por la esbeltez del varillaje, propuesta que deberá ser verificado en una investigación con mayor instrumentación.

En el antecedente cuarto, Augusto J. Leoni, Dardo Guaraglia, Alejandro Bielecki y Joaquín Cánchero (2011) muestran que hay una eficiencia debido a la caída del martinete del SPT del 90% en caída libre, esta difiere a la que se midió en esta tesis que fue del 98%, esto posiblemente se debe a que el martinete del equipo SPT usado tiene un pistón guía, que de alguna forma frena la caída. También en este antecedente se afirma que el operador tiende a levantar el martinete más que la posición predefinida, lo que coincide con los resultados de esta tesis.

Y en el antecedente quinto, Juliana Azoia Lukiantchuki (2012) indica que para número de golpes del SPT menores a 5 hay distorsiones mayores en los coeficientes calculados, lo que seguramente se debe a que aplican mucha energía para penetrar en un suelo débil, a diferencia del modelo planteado en esta tesis, en el que se puede variar la altura de caída H y ampliar la precisión de la toma de datos, siempre y cuando se considere también a H_0 .

**CAPÍTULO V: CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES**

5.1. CONCLUSIONES

1. Los coeficientes de pérdida de energía se agrupan en tres grupos por su correlación con los distintos componentes del ensayo DPL, esto son; los que dependen de la interacción equipo-operador: k_1 , los que dependen netamente de los componentes del equipo DPL: α y η , y los que dependen de la interacción equipo-suelo: H_0 .
2. La pérdida de energía por la caída de la maza, expresada por k_1 (factor de reducción de la energía por la caída de la maza) se define como el producto de k_c (factor de reducción de la gravedad por la fricción de la guía con la maza) y k_H (relación entre la altura promedio y la altura teórica), $k_1 = k_c \cdot k_H$, siendo k_c y k_H prácticamente constantes, y de efecto contrario, para el equipo DPL $k_c = 0.978$ y $k_H = 1.020$, entonces se puede admitir que $k_1 = 1.00$, e independiente de la altura de caída de la maza y de la experiencia del operador.
3. El tipo de choque, cuantificado por el coeficiente de restitución n , es un parámetro que engloba todo el fenómeno de deformación y restitución del ensayo DPL, el cual no interviene en el cálculo de la resistencia dinámica de la punta R_d , los valores que puede asumir son diversos (el máximo apreciado en la prueba de laboratorio es de 0.237) y depende de las propiedades del suelo, profundidad y características del ensayo (altura de caída, longitud de la sonda), lo que lo hace un parámetro muy variable.
4. El vacío numérico que deja la exclusión del coeficiente de restitución n , es cubierto por la inclusión de dos nuevos parámetros, que son adaptados al ensayo DPL a partir de los criterios propuestos por Odebrecht, et al (2005), sobre la interpretación dinámica del ensayo SPT, estos parámetros son; el factor de transición α que toma en cuenta la transición de la energía de la maza al yunque y el factor de amortiguamiento η que toma en cuenta la disminución de la energía que se transporta por el varillaje hasta la punta de la sonda.
5. Las deformaciones elásticas que se producen en el ensayo DPL son englobadas por la altura mínima de caída H_0 , la cual se puede calcular aplicando el ensayo DPL en el mismo suelo con diferentes alturas de caída (separación mínima de 40 cm entre cada auscultación). H_0 se define como la altura mínima de caída de la maza, a partir de la cual se observara la penetración permanente de la sonda, también representa la porción de la

energía potencial restituida que se puede observar, este parámetro tiende a ser mayor cuando se mide en suelos resistentes (máximo observado de 23.3 cm), depende de las propiedades del suelo y características del equipo DPL.

6. La altura mínima de caída H_0 , podría ser estimada a partir de la altura de rebote promedio de la maza h_{rp} . h_{rp} sirve para calcular el coeficiente de restitución n , se origina por la energía elástica acumulada en el sistema y esta energía es representada por H_0 , por lo que se puede admitir $h_{rp} = f(H_0)$, entonces se podría estimar H_0 si se conociera h_{rp} y la inversa de la función que las relaciona.
7. Finalmente en respuesta a la hipótesis planteada, se confirma la existencia de los parámetros de pérdida de energía, siendo los factores respecto a equipo DPL estudiado: k_1 (pérdida de energía por la caída de la maza) el que menos incide, α (Factor de transición) el que más incide en la resistencia dinámica en forma permanente y la reduce en 15 %, η (factor de amortiguamiento) es planteado por Odebrecht, et al (2005) y se adecua para el equipo DPL, influyendo en la resistencia dinámica del suelo directamente proporcional con la longitud del varillaje pero su incidencia no es muy notoria (2% en 2 m) a menos que la longitud sea muy grande y por último tenemos la altura mínima de caída H_0 , que es el único parámetro de los usados en la formulación que está directamente relacionado con el suelo, siendo más incidente cuando la deformación plástica disminuye, es decir cuando el número de golpes se eleva (puede reducir hasta un 23 %).

5.2. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda repetir esta investigación con distintos tipos de suelo en laboratorio y el uso de acelerómetros y sensores de fuerza que permitan establecer todos los factores de pérdida de energía propios del equipo (α y η).
2. Aunque no era un tema de interés de esta tesis, el tipo de giro del equipo DPL en el suelo resultó ser de gran ayuda, pero no está delimitada por rangos numéricos de fuerza, así que se recomienda investigar la incidencia del tipo de giro en la resistencia dinámica del suelo a la penetración para poder interpretar mejor el esfuerzo de la punta.

3. Se recomienda investigar sobre el rebote de la maza, con la intención de predecir las deformaciones elásticas del suelo y ya no aplicar el parámetro H_0 , y a su vez proponer una mejor técnica para su medición.
4. Se recomienda estudiar más a fondo el parámetro de la altura mínima de caída por ser el único que el fabricante del equipo no puede predecir y su relación con el rebote u otro indicio como el sonido del golpe para evitar hacer más de una auscultación por punto de investigación.
5. Se recomienda investigar la relación entre la resistencia dinámica de la punta R_d , las propiedades del suelo y su profundidad pf .
6. Se recomienda usar la resistencia dinámica de la punta R_d como indicador para interpretar el penetrograma, en vez del número de golpes N_{10} .

TRABAJOS CITADOS

- Abarca Ancori, A. (2014). *Estudio de mecánica de suelos para cimentación - proyecto: "Edificación Vivienda"*. Cusco: Geotest.
- Alonso, M., & Finn, E. (1976). *Física* (Vol. I: Mecánica). (C. Hernandez, & V. Latorre, Trads.) Lima, Perú: Fondo Educativo Interamericano, S. A.
- Aoki, N., & Cintra, J. C. (2000). The application of energy conservation Hamilton's principle to the determination of energy efficiency in SPT tests. (Niyama, & Beim, Edits.) *Application of Stress-Wave Theory to Piles*, 457-460.
- Atala, C. A. (2011). *Estudio Experimental Sobre Correlaciones en Suelos Granulares Finos (Arenas) Compactados, Usando Equipos de Penetración*. Universidad Nacional de Ingeniería, Post-Grado de la Facultad de Ingeniería Civil. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Beer, F. P., Johnston, E. R., & Cornwell, P. j. (2013). *Mecánica Vectorial para Ingenieros* (Décima ed., Vol. II: Dinámica). (G. Nagore Cázares, & J. Murrieta Murrieta, Trads.) México, D. F., México: McGRAW-HILL/ Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Bolomey Frazer, H. (Diciembre de 1971). Fórmulas de hinca dinámica. *Revista de Obras Públicas*, I(3080), 977-990.
- Bowles, J. E. (1980). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. (A. Arrieta G., Trad.) Bogotá, Colombia: Editorial McGRAW-HILL Latinoamericana, S. A.
- Bowles, J. E. (1982). *Propiedades Geofísicas de los Suelos*. (E. Retamal, & H. Cosme, Trads.) Bogotá, Colombia: Editorial McGRAW-HILL Latinoamericana, S. A.
- Cassan, M. (1982). *Los Ensayos "In Situ" en la Mecánica del Suelo* (1° ed., Vol. 1). (M. Pallares Velarde, Trad.) Barcelona, España: Editores técnicos asociados, S.A.
- Coll Alas, M. (1972). Comentario al artículo "Fórmulas de hinca dinámica", de H. Bolomey Frazer (publicado en la Revista de Obras Públicas de diciembre de 1971). *Revista de Obras Públicas*, 225-227.

Dajes Castro, J. (2002). *Errores en las balanzas debido a la aceleración de la gravedad*. Lima: Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectua (INDECOPI).

Das, B. M. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. (J. De la Cera, Trad.) México D. F., México: Thomson Editores, S.A.

Encalada, J. H., & Huamanguillas Paravecino, E. N. (2014). *Mejoramiento de la transitabilidad vehicular y peatonal de la APV Ernesto Gunter*. Proyecto de CIPRO, Cusco.

ESOPT. (1974). Interpretation of Results of Dynamic Penetration Tests. *Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing. 2.1*, págs. 73-79. Stockholm: National Swedish Building Research.

Fernandez Baca, C. (2011). *Estudio de mecánica de suelos para cimentación-Proyecto: Condominio Residencial Teja Wasi*. Cusco.

Gomez Aller, S. (2014). *Estudio de suelos para la cimentación del muro de contención de los APVS. Geraldo Ruis Caro del distrito de Santiago Provincia del Cusco*. Municipalidad distrital de Santiago, Cusco.

Google Maps. (2015). *Google Maps*. Recuperado el 18 de 05 de 2015, de <https://www.google.com/maps/@-13.5236088,-71.9493788,14z>

Juarez Badillo, E., & Rico Rodriguez, A. (1970). *Mecánica de Suelos* (Vol. I). México D. F., México.

Leoni, A., Guaraglia, D., Bielecki, A., & Cánchero, J. (Setiembre de 2011). Medición de la Energía Entregada por el Impacto del Pisón, en la Ejecución de los Ensayos de S.P.T. que se Ejecutan en la República Argentina.

Lukiantchuki, J. (2012). *Interpretação de resultados do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica*. Universidad de São Paulo, Escuela de Ingeniería de São Carlos. São Carlos: Universidad de São Paulo.

MetAs, S.A. de C.V. (Mayo de 2002). Aceleración de la Gravedad. *La Guía MetAs*, 1-8.

Montañez Tupayachi, A. (Junio de 2011). Asignatura de Mecanica de Suelos Aplicada a Cimentaciones, Carrera profesional de Ing. Civil, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Cusco, Cusco, Perú.

Morgano, C. M., & Liang, R. (1992). Energy Transfer in SPT – Rod Length Effect. (F. Barends, Ed.) *Application of Stress-Wave Theory to Piles*, 121-127.

MTC E 119. (2000). Ensayo de Penetración S.T.P. *Manual de Ensayo de Materiales (EM 2000)*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

NTP 339.159. (17 de Junio de 2001). Método de ensayo normalizado para la auscultación con penetrómetro dinámico ligero de punta cónica. *Norma Técnica Peruana NTP 339.159, 1*. (C. d. Comerciales, Ed.) Lima, Lima, Perú: INDECOPI.

Obras urbanas, O. T. (Octubre de 2010). El penetrómetro dinámico de energía variable PANDA2. Presentación y aplicaciones en obra civil y urbana. *Obras urbanas*(23), 108-110.

Odebrecht, E., Schnaid, F., Maia Rocha, M., & De Paula Bernardes, G. (Octubre de 2005). Energy Efficiency for Standard Penetration Tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1252-1263.

Olivares, S. E., & Ramírez, L. G. (2012). *Tesis: Ajuste de la correlación de los resultados de las auscultaciones por cono de Peck con los resultados del ensayo de Penetración Estándar*. FACULTAD DE INGENIERIA, CARRERA DE INGENIERIA CIVIL. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

PASCO. (15 de 11 de 2004). *Productos MatchGraph! USB Kit: PASCO*. Recuperado el 21 de 05 de 2015, de sitio web de PASCO: http://www.pasco.com/file_downloads/product_manuals/languages/Spanish/PASPORT-Motion-Sensor-Manual-PS-2103_spa.pdf

PASCO. (17 de 12 de 2009). *Productos Xplorer GLX: PASCO*. Recuperado el 21 de 05 de 2015, de sitio web de PASCO: http://www.pasco.com/file_downloads/product_manuals/Xplorer-GLX-Manual-3-PS-2002.pdf

Pytel, A., & Singer, F. L. (1994). *Resistencia de materiales* (Cuarta ed.). México D. F., México: Harla, S. A.

Rahim, A., Prasad, S., & George, K. (2004). Dynamic Cone Penetration Resistance of Soils - Theory and Evaluation. *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, 1755-1766.

Sanglerat, G. (1967). *El Penetrometro y el Reconocimiento de los Suelos*. (G. De Navacerrada, Trad.) Madrid, España: Servicio de Publicaciones - Ministerio de Obras Publicas.

Wikipedia. (8 de Abril de 2015). *Ley de elasticidad de Hooke: Wikipedia*. Recuperado el 4 de Mayo de 2015, de Sitio web de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_elasticidad_de_Hooke

BIBLIOGRAFÍA

- American Psychological Association. (2010). *Manual de Publicaciones de la American Psychological Association* (Tercera ed.). (S. Viveros Fuentes, Ed., & M. Guerra Frías, Trad.) México, D.F., México: El Manual Moderno, S.A. de C.V.
- Rojas C., M. (2006). *Manual de Redacción Científica*. Lima, Lima, Perú.
- Cachay Montoya, M. (2009). *Manual para la elaboración de Proyecto e Informe Final de Tesis*. Chimbote, Perú: Universidad César Vallejo.
- Oseda Gago, D., & Marroquín Peña, R. (06 de 02 de 2013). *Programa de titulación 2013: Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle*. Recuperado el 27 de 04 de 2015, de Sitio web de la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle: <http://www.une.edu.pe/Titulacion/2013/exposicion/SESSION-1-EL%20MARCO%20TEORICO%20SEGUN%20EL%20ESTILO%20APA.pdf>
- Avila Baray, H. L. (2006). *Introducción a la Metodología de la investigación*. Cuauhtemoc, Chihuahua, México.
- Baptista Lucio, P., Fernández Collado, C., & Hernández Sampieri, R. (2010). *Metodología de la Investigación* (Quinta ed.). (M. Á. Toledo Castellanos, Ed.) México, D.F., México: McGRAW-HILL / Interamericana Editores, S.A. DE C.V.

ANEXOS

ANEXO A DEDUCCIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LOS NÚMEROS DE GOLPES DE DOS PENETRÓMETROS

Se parte de la premisa que cada penetrómetro debe generar la misma energía para poder ingresar en un mismo suelo a una misma profundidad, es decir que la energía básica debería ser la misma para diferentes ensayos de penetración dinámica.

Sea Q_{01} y Q_{02} las energías básicas obtenidas de ensayos con un penetrómetro 1 y un penetrómetro 2 respectivamente en un mismo suelo, entonces:

$$Q_{01} = \frac{W_1 \cdot H_1 \cdot N_1}{A_1 \cdot \Delta h_1} \quad \text{y} \quad Q_{02} = \frac{W_2 \cdot H_2 \cdot N_2}{A_2 \cdot \Delta h_2}$$

$$Q_{01} = Q_{02}; \quad \text{entonces:} \quad \frac{W_1 \cdot H_1 \cdot N_1}{A_1 \cdot \Delta h_1} = \frac{W_2 \cdot H_2 \cdot N_2}{A_2 \cdot \Delta h_2}$$

$$\text{Luego:} \quad \frac{W_1 \cdot H_1 \cdot A_2 \cdot \Delta h_2}{W_2 \cdot H_2 \cdot A_1 \cdot \Delta h_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$$

Lo que implica que se puede realizar un ensayo de penetración con un penetrómetro conocido 1, obtener un número de golpes representado por N_1 y luego, con el valor k , transformarlo a un N_2 de un equipo más estándar, para su interpretación; aunque se debe recordar que lo antes mencionado es muy discutible y cuestionable por no existir un buen respaldo para usar la energía básica.

También la energía básica se puede escribir como:

$$Q_0 = Q_{ESP} \times N; \quad \text{con} \quad Q_{ESP} = \frac{W \cdot H}{A \cdot \Delta h}; \quad \text{energía específica por golpe} - \text{kg.cm/cm}^3$$

$$\text{Luego:} \quad k = \frac{Q_{ESP1}}{Q_{ESP2}} = \frac{N_2}{N_1}$$

Lo que permite asociar una energía específica a cada equipo de penetración dinámica (Fernandez Baca, 2011, pág. 12). Cabe resaltar que existe una relación inversamente proporcional entre la energía específica de un equipo y los números de golpes que arroje el ensayo, es decir, si en un mismo suelo se aplica el ensayo con un equipo de energía específica alta, se obtendrá menos golpes que si se usa un equipo de energía específica baja, y si se usa un equipo de energía específica baja, se obtendrá más golpes que si se usa uno de energía específica alta.

ANEXO B SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Divisiones mayores	Símbolo de grupo	Nombres típicos	Criterios de clasificación para suelos granulares			
Suelos de grano grueso (más del 50% del material es mayor en tamaño que el tamiz No. 200)	Gravas (Más de la mitad de la fracción gruesa es mayor que el tamiz No. 4)	GW	Gravas bien gradadas, mezclas gravosas, pocos o ningún fino	$C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_c = 1 < D_{30}^2/D_{10} \times D_{60} < 3$		
		GP	Gravas pobremente gradadas, mezclas grava-arena, pocos o ningún fino	No cumplir todos los requisitos de gradación para GW		
		GM	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo	Límites de Atterberg por debajo de la línea A ó $I_p < 4$	A los materiales sobre la línea A con $4 < I_p < 7$ se considera de frontera y se les asigna doble símbolo	
		GC		Límites de Atterberg por encima de la línea A ó $I_p > 7$		
	Arenas (Más del 50% de la fracción gruesa es menor que el tamiz No. 4)	Arenas limpias (pocos o ningún fino)	SW	Arenas bien gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino	$C_u = D_{60}/D_{10} > 6$ $C_c = 1 < D_{30}^2/D_{10} \times D_{60} < 3$	
			SP	Arenas pobremente gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino	No cumplir todos los requisitos de gradación para SW	
		Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)	SM	Arenas limosas, mezclas arena-limo	Límites de Atterberg por debajo de la línea A ó $I_p < 4$	Si el material está en la zona sombreada con $4 \leq I_p \leq 7$ se considera de frontera y se le asigna doble símbolo
			SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla	Límites de Atterberg por encima de la línea A ó $I_p > 7$	
	Suelos de grano fino (más del 50% del material pasa el tamiz No. 200)	Limos y arcillas (límite líquido $W_L < 50$)	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas, o limos arcillosos con poca plasticidad.	<ol style="list-style-type: none"> Determinar el porcentaje de arenas y gravas de la curva de granulometría. Dependiendo del porcentaje de fino (fracción menor que el tamiz No. 200) los suelos gruesos se clasifican como sigue: Menos del 5% — GW, GP, SW, SP Más del 12% — GM, GC, SM, SC de 5 a 12% — Casos de frontera que requieren doble símbolo 	
			CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras.		
OL			Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad			
Limo y arcillas (límite líquido $W_L > 50$)		MH	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos, <u>suelos elásticos</u>			
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas			
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos			
Suelos altamente orgánicos		Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos			

Figura B.1: Carta de clasificación del sistema SUCS

Fuente: Joseph E. Bowles, Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil (1980, pág. 74)

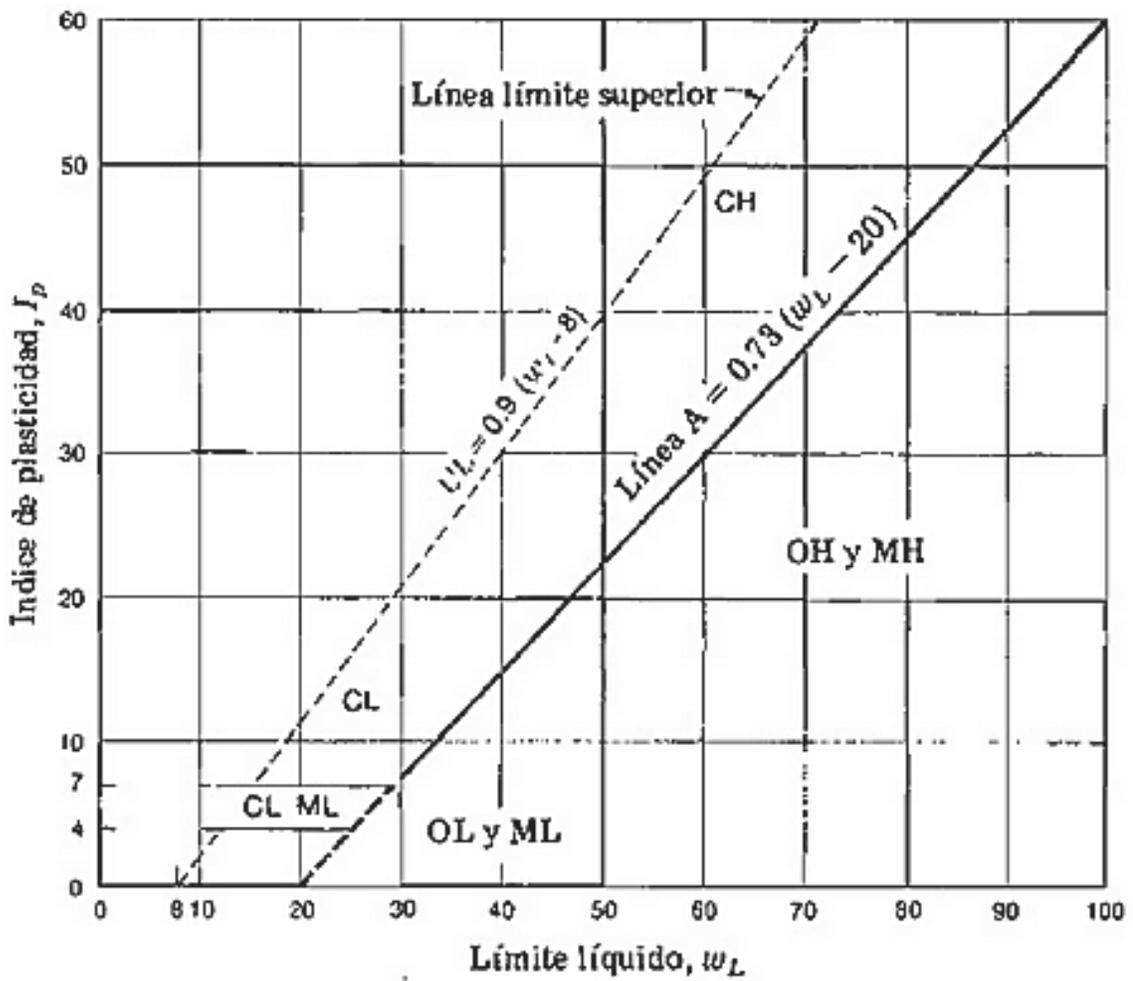


Figura B.2: Carta de plasticidad de los suelos

Fuente: Joseph E. Bowles, Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil (1980, pág. 75)

ANEXO C DEDUCCIÓN DE LA FORMULA GENERAL DE HINCA

Según Bolomey (1971, pág. 977), la hincada de los penetrómetros corresponde a la transformación de la energía cinética en trabajo, esto es:

$$\text{Trabajo de hincada} + \text{Energía cinética} = \text{Trabajo de deformaciones} + \text{Pérdidas} \quad (*)$$

Esto también se puede escribir como:

$$U_{M+P} + T = U_s + \Delta T \quad (*)$$

Para resolver esta ecuación, primero se define la energía cinética instantes antes de que ocurra el choque. Como el único elemento del equipo que tiene velocidad es la maza, la energía cinética es:

$$T = \frac{1}{2} m_M \cdot v_M^2$$

Pero no es posible obtener la velocidad, así que se puede expresar la energía cinética en función de la energía potencial de la maza antes de ser soltada, multiplicada por un factor que considere las posibles reducciones por la acción de otras fuerzas externas durante la caída, esto es:

$$T = k_1 \cdot V_g = k_1 \cdot M \cdot H \quad (i)$$

Bolomey (1971, pág. 978) también indica, que la pérdida de energía cinética ΔT , está directamente asociada al choque entre la maza de peso M y el resto del penetrómetro de peso P , entonces como este choque es un impacto central, se aplica la conservación de la cantidad de movimiento y ecuación (19):

$$m_M \cdot v_M + m_P \cdot v_P = m_M \cdot v'_M + m_P \cdot v'_P$$

Dónde:

m_M y m_P = Masas de la maza y del resto del penetrómetro.

v_M y v_P = Velocidades de la maza y del resto del penetrómetro antes del choque.

v'_M y v'_P = Velocidades de la maza y del resto del penetrómetro después del choque.

Pero el cuerpo del penetrómetro está quieto antes del choque, por ende su velocidad antes del choque es cero, entonces:

$$m_M \cdot v_M = m_M \cdot v'_M + m_P \cdot v'_P \quad (**)$$

Ahora aplicando la ecuación (20) (coeficiente de restitución) se tiene:

$$n = \frac{v'_P - v'_M}{v_M}$$

Luego:

$$n \cdot v_M = v'_P - v'_M \quad (***)$$

Al resolver el sistema de ecuaciones conformado por (**) y (***), se tiene:

$$v'_M = \frac{m_M - n \cdot m_P}{m_M + m_P} v_M \quad y \quad v'_P = (1 + n) \frac{m_M}{m_M + m_P} v_M \quad (***)$$

Según Cassan (1982, pág. 149), la pérdida de energía cinética está dada por:

$$\Delta T = \frac{1}{2} (m_M \cdot v_M^2 + m_P \cdot v_P^2) - \frac{1}{2} (m_M \cdot v'_M{}^2 + m_P \cdot v'_P{}^2)$$

Reemplazando las ecuaciones (****) en la ecuación anterior se obtiene:

$$\Delta T = \frac{1}{2} m_M \cdot v_M^2 \frac{(1 - n^2) \cdot m_P}{m_M + m_P} \quad \text{ó} \quad \Delta T = T \frac{(1 - n^2) \cdot P}{M + P} \quad (ii)$$

Ahora se analiza el trabajo realizado por las deformaciones (en los ítems 2.3.6.1 y 2.3.6.2 se explicó que por cada golpe existe una deformación permanente del suelo y, deformaciones elásticas del suelo y del equipo) considerando a la resistencia dinámica del terreno como la que desacelera al penetrómetro y realiza el trabajo siguiente (Bolomey Frazer, 1971, pág. 977; Cassan, 1982, pág. 147):

$$U_s = \frac{1}{2} R_d \cdot e_1 + R_d \cdot e \quad \text{ó} \quad U_s = R_d \cdot (e + c) \quad (iii)$$

Dónde:

R_d = Resistencia dinámica del suelo.

e_1 = Deformación elástica temporal del suelo y del equipo.

e = Deformación permanente o plástica por golpe.

c = Factor de corrección (Bolomey Frazer, 1971, pág. 978) que considéralas deformaciones elásticas del suelo y equipo $c = 1/2 e_1$.

Por último se analiza el trabajo realizado por la hinca, que en si es el trabajo realizado por la fuerza de gravedad por la distancia penetrada, esto es (Bolomey Frazer, 1971, pág. 978):

$$U_{M+P} = (M + P).e$$

Pero también se debería considerar el trabajo de la gravedad por la deformación elástica, aunque se debe recordar que no se tiene bien definido el centro de masa, por lo cual se considera el valor de c en vez de e_1 (para obtener una resistencia dinámica ligeramente menor de la que se obtendría en el otro caso).

$$U_{M+P} = (M + P).(e + c) \quad (iv)$$

Remplazando (i), (ii), (iii) y (iv) en (*) se tiene:

$$(M + P).(e + c) + k_1.M.H = R_d.(e + c) + k_1.M.H \frac{(1 - n^2).P}{M + P}$$

Esta sería la formula general de hinca dinámica.

ANEXO D EQUIPOS PARA LA MEDICIÓN DEL MOVIMIENTO



Sensor de movimiento PS-2103

Indicador LED del blanco
Llave de alcance
Ménsula de montaje

Movimiento - Guía rápida

El sensor de movimiento PS-2103 usa ultrasonido para medir la posición en metros.

Equipo adicional necesario

- Dispositivo PASPORT de enlace (enlace USB, Explorer, etc.)
- Software EZscreen o DataStudio (versión 1.5 ó mayor)
- Accesorio correspondiente para montar el sensor-base circular o Accesorio adaptador de carro (ME-6743)

Preparación del equipo

- Conectar el dispositivo PASPORT de enlace a un puerto USB de la computadora o a un distribuidor USB.
- Conectar el enchufe del sensor al dispositivo PASPORT de enlace.
- El programa arrancará solo al enchufar el sensor. Elegir un punto de entrada en la pantalla PASPORTAL:
 - Una actividad en la ventana Workbook,
 - EZscreen, o
 - DataStudio.



Especificaciones del sensor

Alcance del sensor:	0.15 a 8 metros
Exactitud:	±2% típica
Resolución:	± 0.001 m
Tasa de muestreo máxima:	50 mps
Tasa de muestreo nominal:	10 mps
Distancia mínima:	15 cm – lecturas falsas si se pone más cerca
Posición de la llave de alcance:	Actividades de corto alcance
Posición de personas:	Actividades de largo alcance
Indicador LED apagado:	No se detectó el blanco. Realignar blanco y volver a probar, o usar una placa plana reflectora como blanco para mejorar la detección.
Reflexiones de superficie:	Inclinar el sensor hasta 5–10 grados para evitar las reflexiones de la superficie de una mesa o de la caja del sensor.



800-772-8700 • 916-786-3800 • techsupp@pasco.com • www.pasco.com

012-07258C-es

Figura D.1: Sensor de movimiento PS-2103-PASCO - Guía rápida

Fuente: PASCO, PASPORT Motion Sensor Manual (PS-2103)_spa,

http://www.pasco.com/file_downloads/product_manuals/languages/Spanish/PASPORT-Motion-Sensor-Manual-PS-2103_spa.pdf; (2004, pág. 1)



Figura D.2: Xplorer GLX – PASCO - Guía rápida

Fuente: PASCO, Xplorer GLX Quick Start Instructions,
http://www.pasco.com/file_downloads/product_manuals/Xplorer-GLX-Manual-3-PS-2002.pdf;
(2009, pág. 2)

ANEXO E DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL EQUIPO DPL

El equipo DPL es diseñado con las indicaciones de la norma NTP 339.159 (2001), pero esta norma no es tan rigurosa en las dimensiones de todas las piezas que conforman el equipo, lo que permite darle dimensiones que faciliten la toma de datos y una adecuada ergonomía durante el trabajo.

De acuerdo a lo indicado se diseñan las piezas que conforman el equipo DPL (Plano P-01, pág. 154) como sigue:

- **MAZA:** (Figura E.1) En la norma indica que debe pesar 10 ± 0.1 kg, pero no da mayor detalle acerca de la forma que debe tener, por tal motivo se adopta una maza de forma cilíndrica (disco) con un orificio en el medio de diámetro (24 mm) ligeramente mayor que el diámetro de la guía (22 mm), con dos desniveles, que permite levantarla con comodidad. Es fabricada de una plancha de acero de 2", la cual es llevada al técnico especialista en el torneado de elementos cilíndricos en metal, previamente se define las dimensiones de tal forma que pueda pesar aproximada 10 kg, se usa como referencia la densidad del acero de 7.85 gr/cm^3 . La forma asumida permite que sea fácilmente reconocida por el sensor de movimiento.



Figura E.1: Medición de la masa de la Maza
Fuente: Elaboración propia

- **PUNTA DE LA SONDA:** (Figura E.2) En la norma se indica todas las dimensiones que debe tener esta pieza, por ser la que interactúa directamente con el suelo, por tal motivo el dimensionamiento y la fabricación se hizo con mucho cuidado. Esta punta cuenta con una rosca hembra de $\frac{1}{2}$ " para ser acoplada a las varillas.



Figura E.2: Medición de la masa de la punta de la sonda
Fuente: Elaboración propia

- **GUÍA:** (Figura E.3) La norma no da mayor detalle de la forma y el peso de este elemento, pero por propósitos de esta tesis se le da una longitud mayor al caso crítico, que es cuando la maza se levanta a 60 cm del yunque con un diámetro igual al de las varillas. Se deja un tramo libre en la parte superior para que el operador pueda sostener la guía y mantener su perpendicularidad. La guía se acopla al yunque por medio de una rosca macho de $\frac{7}{8}$ " (diámetro de la guía) y se le colocan marcas espaciadas cada 10 cm que limitan la altura a levantar la maza para realizar el ensayo, estas marcas están a 5 mm de la altura propuesta con el propósito de ser resaltadas y no ser superada durante el ensayo.



Figura E.3: Medición de la masa de la guía
Fuente: Elaboración propia

- **YUNQUE Y VARILLA DE ENSAMBLE:** (Figura E.4) La norma indica que el peso máximo del yunque y la guía debe ser 6 kg, pero tampoco da mayor detalle de cómo debe ser el yunque. Para propósitos de esta tesis se hace fabricar un yunque en forma cilíndrica, al cual se le hace acoplar en forma permanente por medio de roscas y soldadura flexible una varilla de 15 cm con una rosca macho para ser acoplada al varillaje, el yunque cuenta con una rosca hembra que permite que se le acople la guía. En la Tabla 3 se puede observar que el peso de este elemento y la guía no superan lo indicado por la norma.



Figura E.4: Medición de la masa del yunque más varilla de ensamble
Fuente: Elaboración propia

- **VARILLA TÍPICA:** (Figura E.5) La norma indica que este elemento es un tubo de 22 mm de diámetro exterior y 6 mm de diámetro interior, pero también indica que no necesariamente se debe cumplir con esta indicación, así que por razones de material se usa una varilla sólida de 7/8" de diámetro. Esta varilla es de 80 cm de largo con marcas cada 10 cm y con dos roscas, hembra y macho para poder ser acopladas entre sí. La longitud de la varilla se escoge principalmente para evitar que en la condición más crítica la marca para levantar la maza no esté muy elevada para una persona promedio. De la masa de las 6 varillas se tomó un promedio para usarlo en los cálculos:

Tabla E.1: Masa de las varillas usadas

Varilla 1	Varilla 2	Varilla 3	Varilla 4	Varilla 5	Varilla 6	Varilla Típica
2.375 kg	2.365 kg	2.358 kg	2.376 kg	2.375 kg	2.370 kg	2.3698 kg

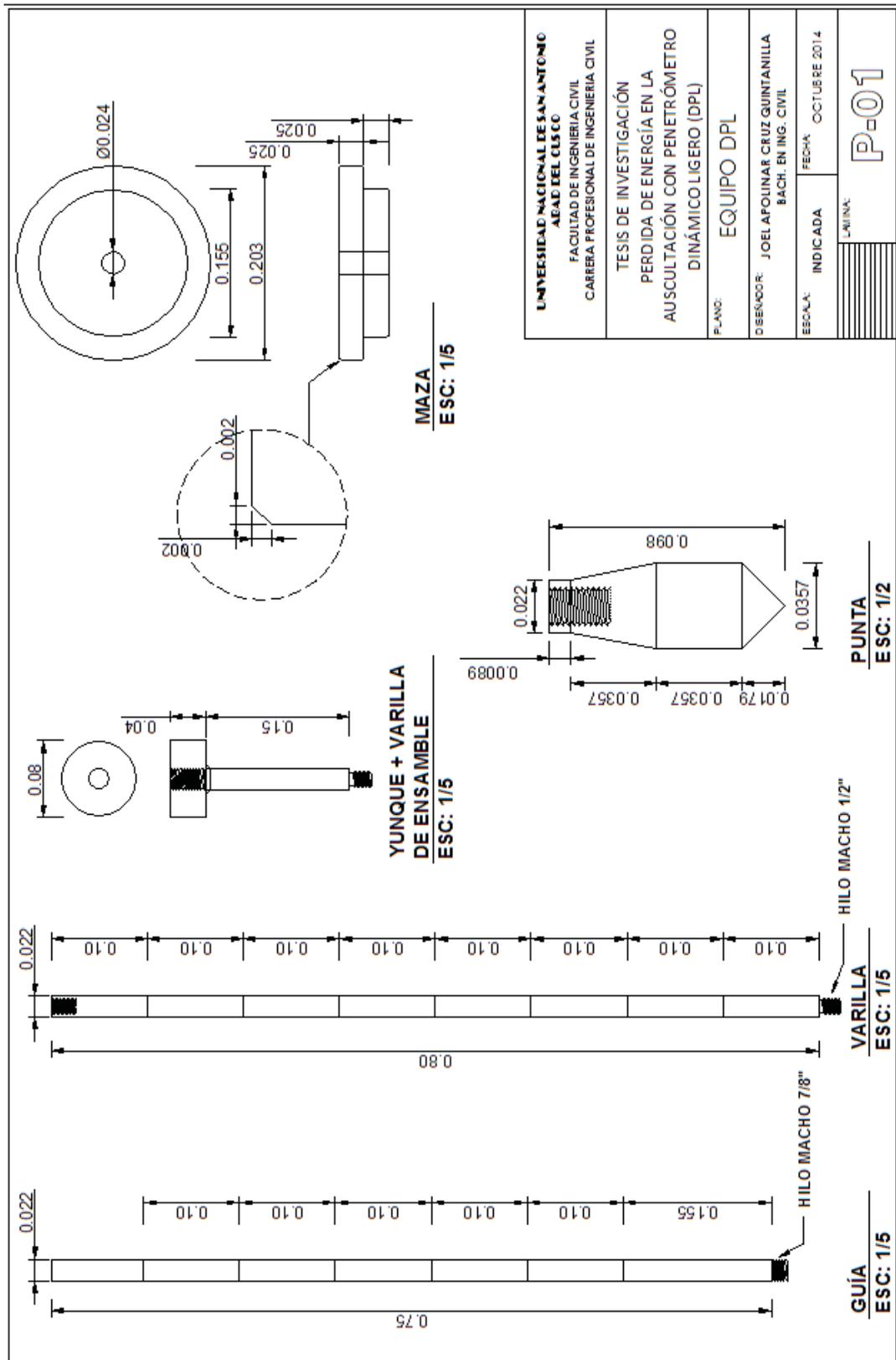
Fuente: Elaboración propia



Figura E.5: Medición de la masa de las varillas

Fuente: Elaboración propia

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
ANEXOS



ANEXO F PRUEBAS PRELIMINARES

Se realizan con el objetivo de obtener información suficiente para la elaboración de los procedimientos a seguir en la toma de datos; estas pruebas son:

F.1. RECONOCIMIENTO DE LA MAZA POR EL SENSOR DE MOVIMIENTO

Esta prueba se realiza para estar seguros que el sensor de movimiento reconoce adecuadamente a la maza durante la caída (Figura F.1) y los datos sean trabajables. Esta prueba se realizó en el segundo patio del pabellón C, se hace la toma de datos y se procesan con el programa DataStudio de acceso libre, que se puede descargar en la página <http://www.pasco.com/>.



Figura F.1: Prueba preliminar del sensor de movimiento
Fuente: Elaboración propia

En la Figura F.2 se puede apreciar los datos, que son una serie de puntos conformados por la distancia del centro del sensor a la maza vs el tiempo en el que se encuentra en esa posición. Se distingue picos que sobresalen de la gráfica continua, esto se debe a que el sensor detecta alguna parte del operador, si se eliminan estos

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
ANEXOS

picos con mucho criterio se distingue un movimiento cíclico de levantar y soltar la maza (Figura F.3).

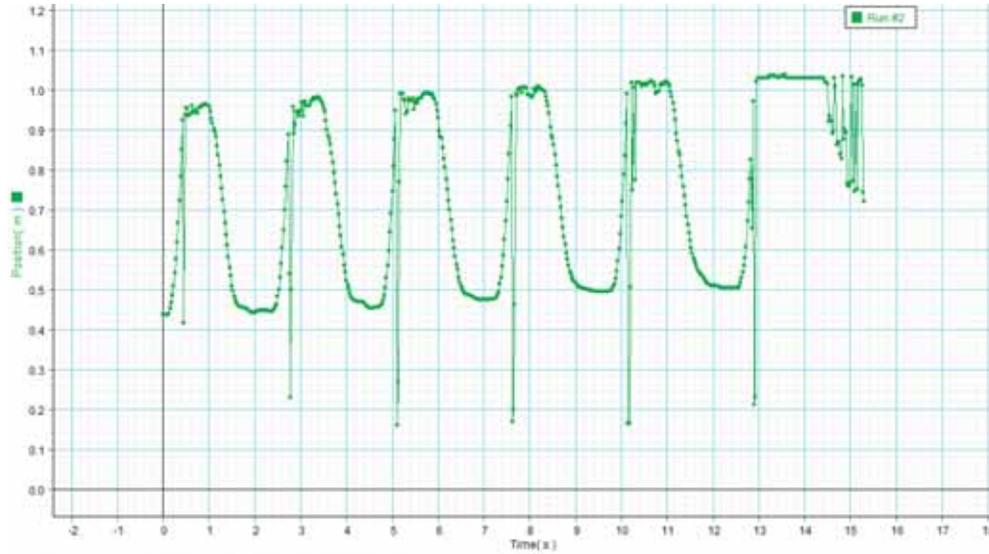


Figura F.2: Datos preliminares - distancia al sensor vs tiempo
Fuente: Elaboración propia

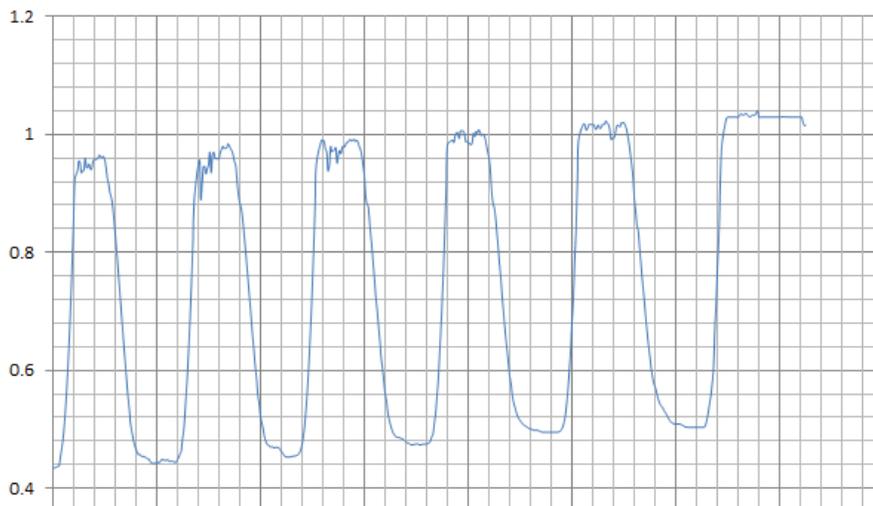


Figura F.3: Datos preliminares seleccionados - distancia al sensor vs tiempo
Fuente: Elaboración propia

Si se analiza uno de estos ciclos podremos observar distintas zonas y en especial una que se aproxima bastante a una parábola (Figura F.4), que es la caída de la maza, esta observación nos confirma que se puede hacer uso de los criterios indicados en el ítem 2.3.4 (parámetros de la caída de la maza). Las zonas que se pueden apreciar son

cuatro que se repiten durante todo el ensayo: a) levantar la maza, b) espera antes de la caída, c) caída de la maza y d) desplazamiento maza-yunque (Figura F.5).

Una estimación rápida permite deducir que si hay pérdida de energía cinética durante la caída, pero debemos realizar los ensayos en condiciones de laboratorio para confirmarlo y relacionarlo a la experiencia del operador.

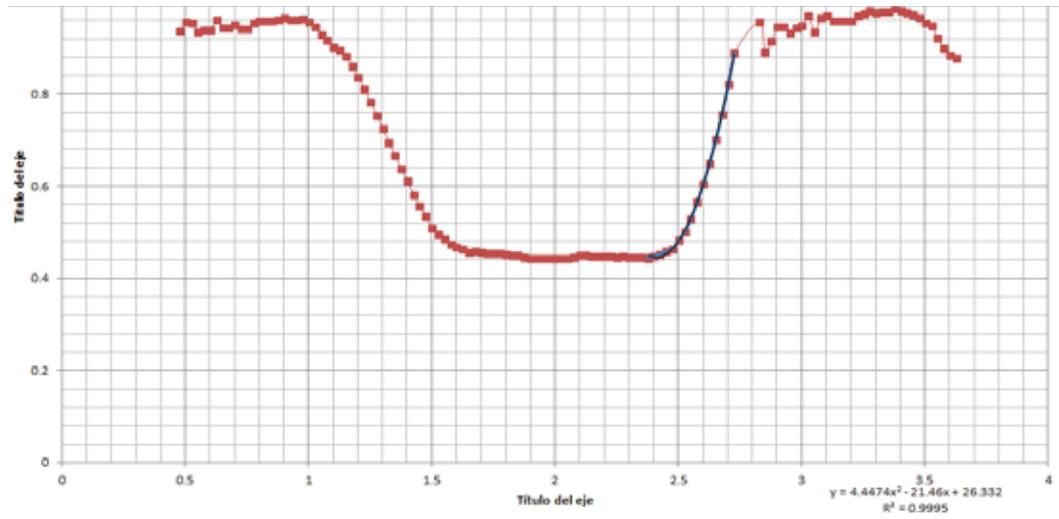


Figura F.4: Caída parabólica de la maza
Fuente: Elaboración propia

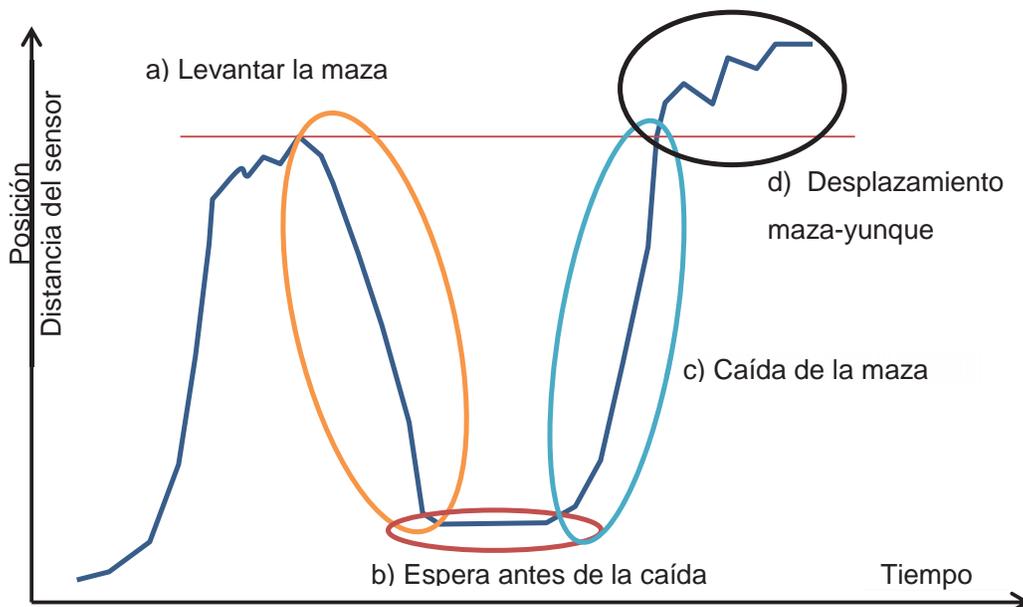


Figura F.5: Zonas en la gráfica distancia del sensor vs tiempo
Fuente: Elaboración propia

F.2. PRUEBAS PREVIAS DE ENSAYO DPL CON DIFERENTES ALTURAS Y CONTROL DEL REBOTE DE LA MAZA

Como la variación de la altura de caída de la maza y el control del rebote son aspectos que no están contemplados en la norma, y la bibliografía no da mayor detalle de cómo realizar estas variantes, se hacen tres pruebas en suelos con diferentes características. Las zonas escogidas contaban con estudios de suelos en proceso de ejecución, un requisito importante para poder hacer viable esta tesis.

Tabla F.1: Lugares de pruebas previas

N°	DENOMINACIÓN	DIRECCIÓN	CONDICIÓN
PP1	Proyecto: Edificio multifamiliar	Av. Humberto Vidal Unda, Urb. Magisterial II Etapa - Cusco	Con Estudio
PP2	Proyecto: Edificio multifamiliar	AV. Collasuyo No. 896 - Fracción 2 - Cusco	Con Estudio
PP3	Obra: Edificio multifamiliar	Oswaldo Baca, Urb. Magisterial II Etapa - G-7 - Cusco	Sin estudio

Fuente: Elaboración propia

En la prueba PP1 se utilizó el ensayo DPL en el fondo de una calicata de 1.25 m, se usaron dos alturas de caída, 40 cm y 50 cm espaciadas a unos 50 cm, se empieza a contabilizar el número de golpes una vez que la punta este completamente dentro del suelo, los datos obtenidos se muestran en la Tabla F.2 y el perfil estratigráfico de este pozo en la Figura F.6.

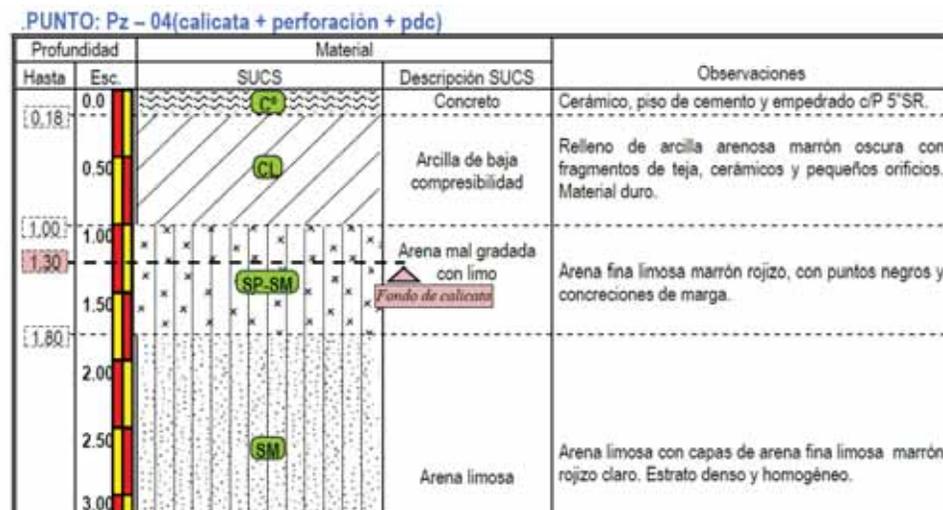


Figura F.6: Perfil estratigráfico del suelo en la prueba PP1

Fuente: Estudio de mecánica de suelos para cimentación – Edificio multifamiliar Ing. MSc. Carlos Fernández Baca Vidal - 2012

Tabla F.2: Datos de la prueba PP1

Δh (cm)	PROFUNDIDAD (m)		N_{10}		NUMERO DE VARILLAS
	DE:	A:	H = 50 cm	H = 40 cm	
10	1.35	1.45	11	16	1
10	1.45	1.55	9	13	1
10	1.55	1.65	8	8	1
10	1.65	1.75	17	11	1
10	1.75	1.85	36	40	1
10	1.85	1.95	34	41	1
10	1.95	2.05	29	35	1
10	2.05	2.15	25	37	2
10	2.15	2.25	22	36	2
10	2.25	2.35	17	33	2
10	2.35	2.45	18	28	2
10	2.45	2.55	17	23	2
10	2.55	2.65	17	25	2
10	2.65	2.75	16	22	2
10	2.75	2.85	16	20	2

Fuente: Elaboración propia

Al graficar los datos (Figura E.1), se observa que hay una tendencia, el número de golpes se reduce inversamente proporcional a la altura de caída, lo que resulta muy coherente en relación a la ecuación (4), y esta tendencia es más clara en el estrato de arena limosa SM.

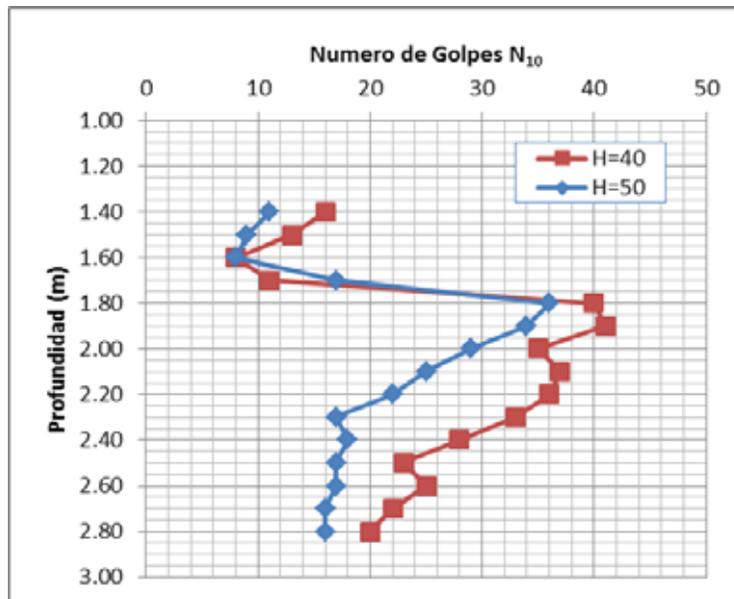


Figura F.7: Penetrograma de la prueba PP1

Fuente: Elaboración propia

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
ANEXOS

La prueba PP2 se realiza con una punta del DPL-5 (área de 5 cm² y 7 cm de largo), pero ahora se ejecutan tres pruebas con alturas de 40 cm, 50 cm y 60 cm, se decide hacer el contero de golpes cada 10 cm, pero en los casos que no se pudiera, se contó el número de golpes por la distancia penetrada. La prueba se realizó en la zona donde se realizaría una calicata, igual que la prueba PP1 se inicia el conteo de golpes una vez que ingrese toda la punta. Los datos se muestran en la Tabla F.3:

Tabla F.3: Datos de la prueba PP2

PROFUNDIDAD (m)		H = 40 cm		H = 50 cm		H = 60 cm		NUMERO DE VARILLAS
DE:	A:	Δh cm	N_{10}'	Δh cm	N_{10}'	Δh cm	N_{10}'	
0.07	0.17	10	19	10	15	10	9	1
0.17	0.27	10	15	10	17	10	16	1
0.27	0.37	11	11	10	10	10	15	1
0.37	0.47	9	10	10	8	10	9	1
0.47	0.57	10	9	10	7	11	8	1
0.57	0.67	9	7	11	7	9	5	1
0.67	0.77	11	5	9	4	10	5	1
0.77	0.87	11	7	10	4	10	4	2
0.87	0.97	10	6	10	4	10	4	2
0.97	1.07	10	5	10	6	10	4	2
1.07	1.17	9	4	11	5	10	4	2
1.17	1.27	10	4	9	4	11	4	2
1.27	1.37	10	5	10	4	8	3	2
1.37	1.47	11	6	10	4	11	5	2
1.47	1.57	9	4	10	4	10	4	2
1.57	1.67	10.5	6	10	4	9	3	3
1.67	1.77	9.5	5	10	3	10	3	3
1.77	1.87	10	5	10	4	12	4	3
1.87	1.97	10	4	11	3	9	3	3
1.97	2.07	10	5	9	3	9	3	3
2.07	2.17	10	5	9	4	11	4	3
2.17	2.27	11	7	11	6	11	4	3
2.27	2.37	10	5	10	4	9	3	3
2.37	2.47	9	5	10	4	10	4	4
2.47	2.57	10	7	9	4	10	6	4
2.57	2.67	10	14	11	10	10	11	4
2.67	2.77	10	18	10	16	10	15	4
2.77	2.87	10	19	10	17	10	17	4
2.87	2.97	10	22	10	20	10	17	4
2.97	3.07	10	30	10	24	10	21	4
3.07	3.17	10	35	10	23	10	19	4

Fuente: Elaboración propia

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
ANEXOS

Para procesar estos datos y hacerlos compatibles con lo indicado en la norma usamos la ecuación (5) y graficamos el penetrograma como (Figura F.8):

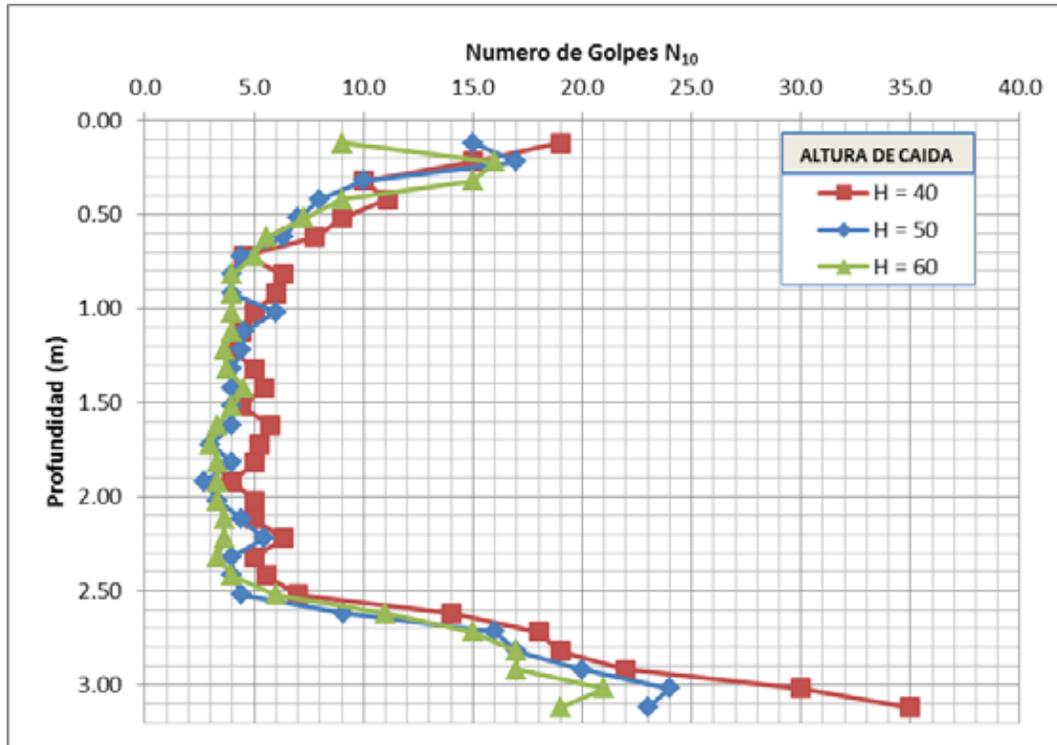


Figura F.8: Penetrograma de la prueba PP2
Fuente: Elaboración propia

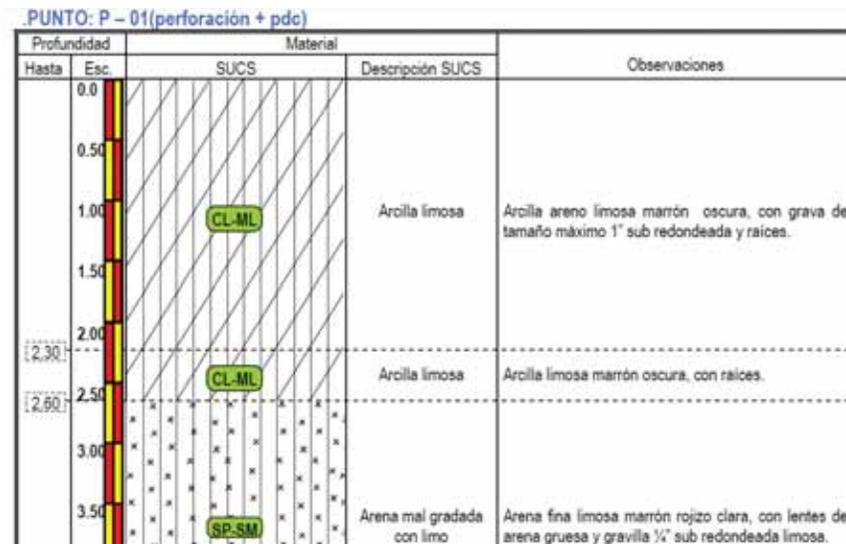


Figura F.9: Perfil estratigráfico del suelo en la prueba PP2
Fuente: Estudio de mecánica de suelos para cimentación – Edificio multifamiliar Ing. MSc. Carlos Fernández Baca Vidal - 2012

Al observar las Figura F.8 y Figura F.9 se puede ver que la relación inversa entre H y N_{10} es más notoria en la zona del suelo arenoso, pero por alguna razón en el estrato arcilloso los valores se mezclan. Una explicación de lo que podría estar pasando se ve en la parte final del penetrograma, del cual se nota claramente incrementos desiguales del N_{10} para incrementos iguales de H .

Para entender mejor este fenómeno se realiza un esquema (Figura F.10) similar al que se muestra en la Figura 16 (estimación gráfica del rechazo elástico) pero con H en función de N_{10} :

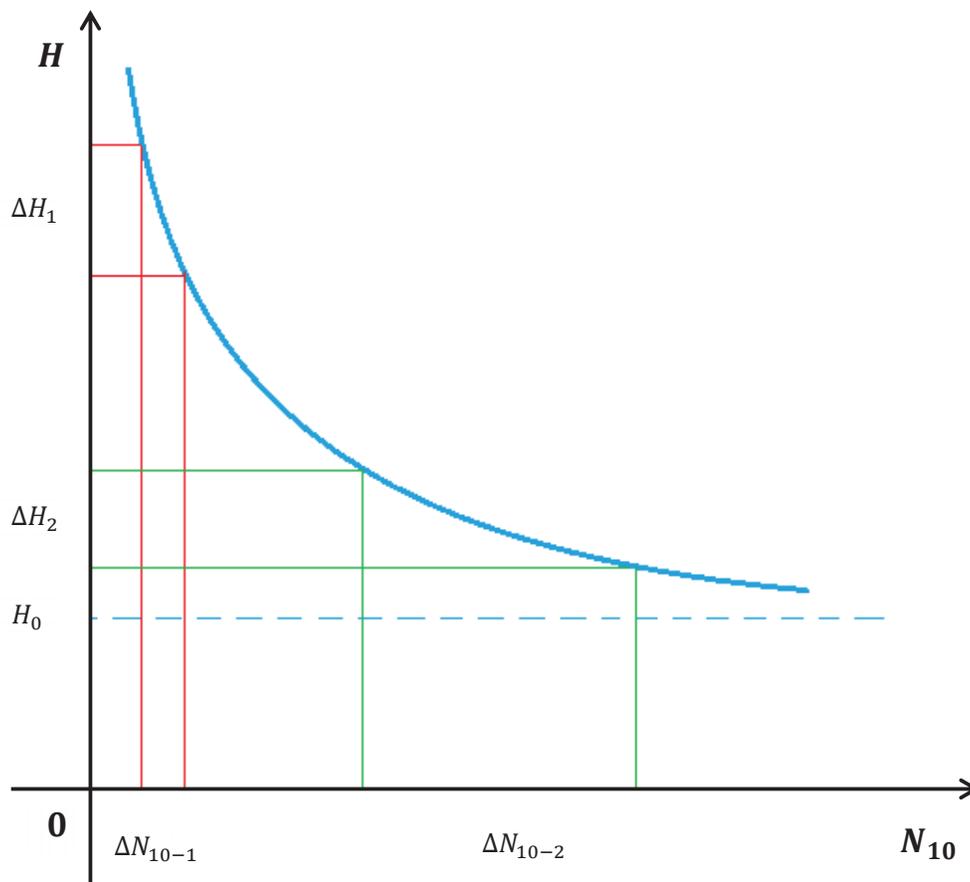


Figura F.10: Relación entre altura de caída y número de golpes
Fuente: Elaboración propia

De la Figura F.10 se puede interpretar que, cuando la altura de caída está más alejada del valor H_0 , los incrementos de N_{10} serán más pequeños, mientras que si la altura de caída se acerca a H_0 , los números de golpes se incrementarán más y más. De esto se puede concluir que, se debe escoger adecuadamente las alturas de caída para la toma de datos, para no generar distorsiones que darían falsos resultados.

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
ANEXOS

Para ratificar esta tendencia se realiza una tercera prueba PP3 con la punta del DPL, pero esta vez se controla el rebote en cm y el giro (F=fácil, MD=medianamente difícil, D=difícil y NG=no gira) como lo indica la norma, se usa un formato de toma de datos adecuado para este caso (Figura I.1).

Los datos obtenidos son (Tabla F.4 y Tabla F.5):

Tabla F.4: Datos de la prueba PP3 calicata 1

Prof. ingre.	H = 60 cm				H = 50 cm				H = 40 cm				DIAGRAMA DEL SUELO	DESCRIPCIÓN
	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro		
0.10	3	0	10	F	5	0	10	F	7	0	10	F		
0.20	3	0	10	F	5	0	10	F	7	0	10	MD	M1-0.35	Suelo seco limoso
0.30	4	0	10	F	6	0	10	F	7	0	10	F	Inalt.	arcilloso con algunas piedras.
0.40	6	0.2	10	F	11	0.2	10	MD	13	0	10	MD		
0.50	15	0.2	10	MD	16	0.2	10	MD	21	0.2	10	D	-0.50	Color marrón rojizo
0.60	8	0	11	F	11	0.2	11	MD	13	0	10	MD	cambio de color de suelo	
0.70	5	0	10	F	6	0	10	MD	5	0	10	F		

Fuente: Elaboración propia

Tabla F.5: Datos de la prueba PP3 calicata 2

Prof. ingre.	H = 60 cm				H = 50 cm				H = 40 cm				DIAGRAMA DEL SUELO	DESCRIPCIÓN
	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro		
0.10	4	0	10	F	4	0	10	F	5	0	10	F		
0.20	3	0	11	F	3	0	12	F	4	0	10	F		
0.30	2	0	10	F	2	0	10	F	4	0	12	F		
0.40	2	0	12	F	2	0	8	F	3	0	10	F	-0.6	
0.50	2	0	10	F	2	0	11	F	5	0	12	F	M-1	
0.60	1	0	7	F	2	0	9	F	3	0	7	F	muestra alterada	
0.70	2	0	11	F	2	0	10	F	2	0	10	F		
0.80	14	0	9	D	2	0	13	F	2	0	8	F		
0.90	11	0	10	NG	1	0	7	F	3	0	12	F		

Fuente: Elaboración propia

Al observar los datos se nota que el giro no varía, y tampoco tendría porque hacerlo, estas dos calicatas estaban en un relleno no controlado de suelo limoso-arcilloso, respecto al rebote se nota que en la mayoría de los casos no se presentó, probablemente porque el suelo es relativamente blando, pero si observamos los penetrogramas (Figura F.11 y Figura F.12) la relación inversa de la altura con el número de golpes se mantiene, pero se distorsiona en ciertas zonas al parecer porque

el suelo no es homogéneo. Las muestras inalteradas que se extrajeron por el método del tallado (Figura F.13), se desmoronaron con la simple manipulación lo que impide obtener la densidad de campo.

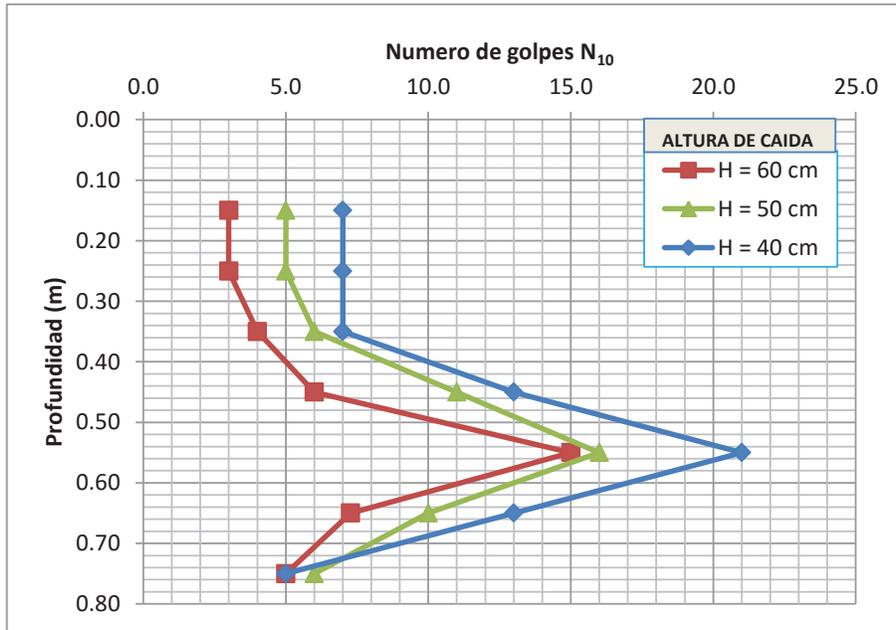


Figura F.11: Penetrograma de la prueba PP3 calicata 1
Fuente: Elaboración propia

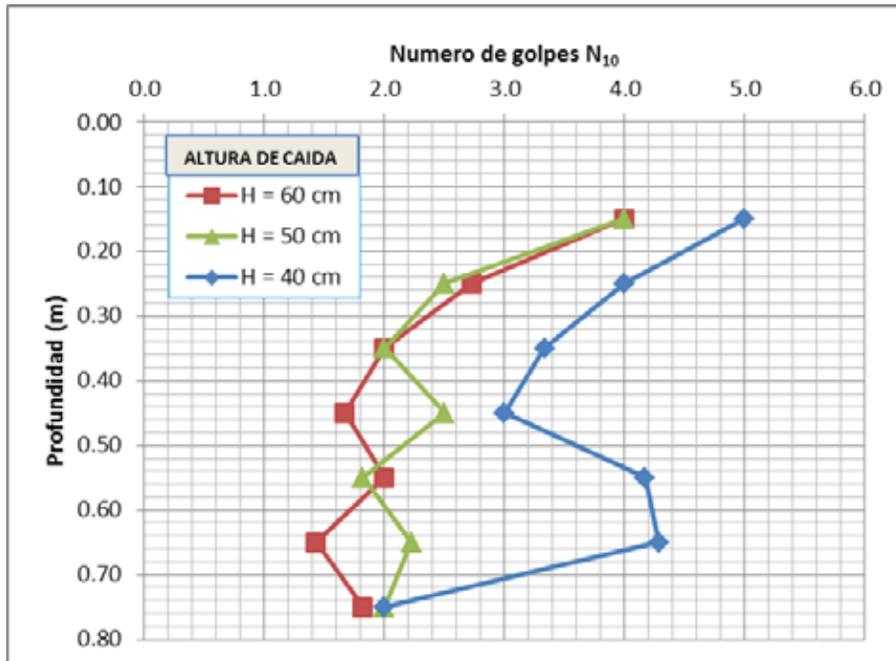


Figura F.12: Penetrograma de la prueba PP3 calicata 2
Fuente: Elaboración propia



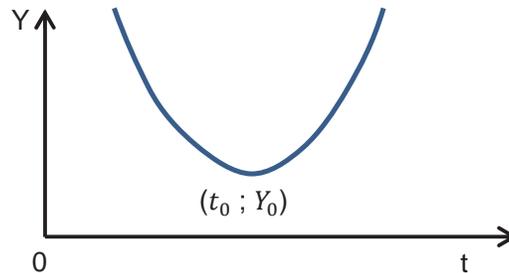
Figura F.13: Calicata 1 de la prueba PP3
Fuente: Elaboración propia



Figura F.14: Calicata 2 de la prueba PP3
Fuente: Elaboración propia

ANEXO G REGRESIÓN CUADRÁTICA PARA CAÍDA DE CUERPOS

En los casos que no se conozca el punto en el cual un cuerpo empieza a caer, ni el instante que inicia el movimiento, se puede usar un modelo de regresión cuadrática para determinar estos valores. Si se tiene una parábola de la cual no se conoce su vértice, su ecuación general será:



$$(Y - Y_0) = \frac{a}{2}(t - t_0)^2$$

Despejando la posición en función del tiempo se tiene:

$$Y = \frac{a}{2}t^2 - a \cdot t_0 \cdot t + \left(\frac{a}{2}t_0^2 + Y_0\right)$$

Esta es una ecuación de la forma:

$$Y = A \cdot t^2 + B \cdot t + C$$

Ahora, si se cuenta con una serie de datos N , que se aproximen a una parábola, se puede determinar las constantes con la siguiente ecuación matricial de regresión:

$$\begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N & \Sigma t & \Sigma t^2 \\ \Sigma t & \Sigma t^2 & \Sigma t^3 \\ \Sigma t^2 & \Sigma t^3 & \Sigma t^4 \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} \Sigma Y \\ \Sigma tY \\ \Sigma t^2Y \end{pmatrix}$$

Luego, se puede definir los parámetros iniciales de la parábola como:

$$a = 2A; t_0 = -\frac{B}{a}; Y_0 = C - \frac{a}{2}t_0^2$$

Y la velocidad será:

$$\frac{dY}{dt} = v = 2A \cdot t + B \quad \text{ó} \quad v = a \cdot t - a \cdot t_0 \quad \text{ó} \quad v = \sqrt{2a(Y - Y_0)} \quad Y_0 = C - \frac{B^2}{4A}$$

ANEXO H PRUEBAS PARA LA MEDICIÓN DE LA PÉRDIDA DE ENERGÍA POR CAÍDA DE LA MAZA

H.1. DATOS DE LAS PRUEBAS

Tabla H.1: Aceleraciones de caída libre de la maza

PRUEBA	ACELERACIÓN (m/s ²)	ERROR (+/-)
PCLM 1	9.74	0.000
PCLM 2	9.70	0.200
PCLM 3	10.00	0.093

Fuente: Elaboración propia

Tabla H.2: Posiciones y velocidades del choque para H=60 cm

PRUEBA	Y_y (m)	Y_c (m)	v (m/s ²)	H_r (m)	k_c
PFGP 1	1.413	0.792	3.38	0.621	0.941
PFGP 2	1.464	0.858	3.39	0.606	0.970
PFGP 3	1.476	0.871	3.44	0.605	1.001
PFGP 4	1.494	0.885	3.45	0.609	1.000
PFGP 5	1.507	0.901	3.42	0.606	0.987
PFGP 6	1.523	0.903	3.47	0.620	0.994
PFGP 7	1.126	0.503	3.41	0.623	0.955
PFGP 8	1.133	0.524	3.41	0.609	0.977
PFGP 9	1.141	0.535	3.41	0.606	0.982
PFGP 10	1.148	0.534	3.47	0.614	1.003
PFGP 11	1.156	0.526	3.44	0.630	0.961
PFGP 12	1.170	0.559	3.41	0.611	0.974
PFGP 13	1.186	0.567	3.42	0.619	0.967
PFGP 14	1.200	0.592	3.40	0.608	0.973
PFGP 15	1.207	0.588	3.41	0.619	0.961
PFGP 16	1.214	0.600	3.45	0.614	0.992
PFGP 17	1.220	0.611	3.44	0.609	0.994
PFGP 18	1.229	0.617	3.42	0.612	0.978
PFGP 19	1.236	0.627	3.41	0.609	0.977
PFGP 20	1.244	0.635	3.42	0.609	0.983

Fuente: Elaboración propia

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO
LIGERO (DPL)
ANEXOS

Tabla H.3: Posiciones y velocidades del choque para H=50 cm

PRUEBA	Y_y (m)	Y_c (m)	v (m/s ²)	H_r (m)	k_c
PFGP 21	1.085	0.591	3.11	0.494	1.002
PFGP 22	1.105	0.599	3.09	0.506	0.965
PFGP 23	1.111	0.610	3.11	0.501	0.988
PFGP 24	1.294	0.794	3.11	0.500	0.990
PFGP 25	1.336	0.828	3.14	0.508	0.993
PFGP 26	1.381	0.874	3.13	0.507	0.989
PFGP 27	1.401	0.892	3.15	0.509	0.997
PFGP 28	1.404	0.903	3.13	0.501	1.000
PFGP 29	1.422	0.913	3.11	0.509	0.972
PFGP 30	1.476	0.966	3.16	0.510	1.002
PFGP 31	1.497	0.988	3.08	0.509	0.954
PFGP 32	1.499	1.000	3.11	0.499	0.992
PFGP 33	1.271	0.771	3.13	0.500	1.002
PFGP 34	1.296	0.792	3.12	0.504	0.988
PFGP 35	1.316	0.800	3.12	0.516	0.965
PFGP 36	1.333	0.827	3.06	0.506	0.947
PFGP 37	1.353	0.845	3.11	0.508	0.974
PFGP 38	1.370	0.861	3.14	0.509	0.991
PFGP 39	1.387	0.879	3.08	0.508	0.955
PFGP 40	1.402	0.878	3.10	0.524	0.938
PFGP 41	0.895	0.388	3.10	0.507	0.970
PFGP 42	0.957	0.448	3.13	0.509	0.985
PFGP 43	0.965	0.458	3.11	0.507	0.976
PFGP 44	0.970	0.468	3.13	0.502	0.998
PFGP 45	0.973	0.473	3.09	0.500	0.977
PFGP 46	1.041	0.531	3.13	0.510	0.983
PFGP 47	1.047	0.538	3.14	0.509	0.991
PFGP 48	1.054	0.542	3.12	0.512	0.973
PFGP 49	1.060	0.544	3.14	0.516	0.978
PFGP 50	1.067	0.562	3.12	0.505	0.986
PFGP 51	1.070	0.566	3.13	0.504	0.994
PFGP 52	1.079	0.574	3.11	0.505	0.980
PFGP 53	1.085	0.579	3.13	0.506	0.991
PFGP 54	1.091	0.585	3.14	0.506	0.997

Fuente: Elaboración propia

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
ANEXOS

Tabla H.4: Posiciones y velocidades del choque para H=40 cm

PRUEBA	Y_y (m)	Y_c (m)	v (m/s ²)	H_r (m)	k_c
PFGP 55	0.775	0.368	2.79	0.407	0.978
PFGP 56	0.783	0.374	2.81	0.409	0.988
PFGP 57	0.790	0.382	2.77	0.408	0.962
PFGP 58	0.795	0.391	2.75	0.404	0.958
PFGP 59	0.802	0.393	2.81	0.409	0.988
PFGP 60	0.809	0.402	2.77	0.407	0.965
PFGP 61	0.816	0.409	2.78	0.407	0.971
PFGP 62	0.823	0.416	2.77	0.407	0.965
PFGP 63	0.831	0.426	2.77	0.405	0.969
PFGP 64	0.838	0.432	2.81	0.406	0.995
PFGP 65	0.846	0.440	2.78	0.406	0.974
PFGP 66	0.853	0.449	2.76	0.404	0.965
PFGP 67	0.854	0.456	2.75	0.398	0.972

Fuente: Elaboración propia

Tabla H.5: Datos de la prueba PVH 1

Ciclo	Y_y (m)	Y_c (m)	H_r (m)	Ciclo	Y_y (m)	Y_c (m)	H_r (m)
1	0.906	0.399	0.507	17	1.328	0.800	0.528
2	0.921	0.411	0.510	18	1.322	0.793	0.529
3	0.950	0.444	0.506	19	1.343	0.823	0.520
4	0.975	0.466	0.509	20	1.363	0.835	0.528
5	0.983	0.470	0.513	21	1.371	0.851	0.520
6	0.991	0.480	0.511	22	1.374	0.865	0.509
7	0.999	0.490	0.509	23	1.382	0.867	0.515
8	1.007	0.497	0.510	24	1.389	0.858	0.531
9	1.029	0.524	0.505	25	1.396	0.864	0.532
10	1.159	0.644	0.515	26	1.403	0.890	0.513
11	1.170	0.641	0.529	27	1.411	0.904	0.507
12	1.174	0.669	0.505	28	1.417	0.905	0.512
13	1.181	0.668	0.513	29	1.425	0.910	0.515
14	1.190	0.684	0.506	30	1.440	0.911	0.529
15	1.198	0.683	0.515	31	1.447	0.920	0.527
16	1.323	0.811	0.512	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
ANEXOS

Tabla H.6: Posiciones y velocidad del choque con varilla inclinada a 108.8%

PRUEBA	Y_y (m)	Y_c (m)	v (m/s ²)	H_r (m)	k_c	μ
PFGI 1	0.777	0.270	2.47	0.507	0.616	0.178
PFGI 2	0.787	0.280	2.46	0.507	0.611	0.186
PFGI 3	0.773	0.266	2.45	0.507	0.606	0.193
PFGI 4	0.773	0.266	2.45	0.507	0.606	0.193

Fuente: Elaboración propia

Tabla H.7: Datos de la prueba PVH 2

Ciclo	Y_y (m)	Y_c (m)	H_r (m)
1	1.452	0.943	0.509
2	1.460	0.920	0.540
3	1.466	0.965	0.501
4	1.478	0.973	0.505
5	1.487	0.968	0.519
6	1.495	0.982	0.513
7	1.503	0.995	0.508

Fuente: Elaboración propia

Tabla H.8: Datos de la prueba PVH 3

Ciclo	Y_y (m)	Y_c (m)	H_r (m)	Ciclo	Y_y (m)	Y_c (m)	H_r (m)
1	1.517	1.008	0.509	15	1.651	1.122	0.529
2	1.526	1.019	0.507	16	1.660	1.153	0.507
3	1.536	1.038	0.498	17	1.670	1.169	0.501
4	1.545	1.034	0.511	18	1.681	1.178	0.503
5	1.554	1.040	0.514	19	1.693	1.160	0.533
6	1.562	1.049	0.513	20	1.708	1.203	0.505
7	1.571	1.063	0.508	21	1.717	1.203	0.514
8	1.581	1.068	0.513	22	0.929	0.418	0.511
9	1.590	1.073	0.517	23	0.939	0.434	0.505
10	1.599	1.082	0.517	24	0.953	0.429	0.524
11	1.608	1.102	0.506	25	0.964	0.453	0.511
12	1.618	1.104	0.514	26	1.036	0.505	0.531
13	1.631	1.121	0.510	27	1.046	0.532	0.514
14	1.638	1.115	0.523	28	1.081	0.542	0.539

Fuente: Elaboración propia

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO
LIGERO (DPL)
ANEXOS

Tabla H.9: Datos de la prueba PVH 4

Ciclo	Y_y (m)	Y_c (m)	H_r (m)	Ciclo	Y_y (m)	Y_c (m)	H_r (m)	Ciclo	Y_y (m)	Y_c (m)	H_r (m)
1	1.093	0.581	0.512	33	0.888	0.361	0.527	65	1.431	0.914	0.517
2	1.128	0.599	0.529	34	0.896	0.382	0.514	66	1.448	0.916	0.532
3	1.138	0.628	0.510	35	0.912	0.405	0.507	67	1.481	0.957	0.524
4	1.150	0.614	0.536	36	0.920	0.395	0.525	68	1.496	0.985	0.511
5	1.163	0.652	0.511	37	0.929	0.404	0.525	69	1.544	1.030	0.514
6	1.187	0.673	0.514	38	0.937	0.423	0.514	70	1.558	1.035	0.523
7	1.199	0.685	0.514	39	0.946	0.439	0.507	71	0.889	0.380	0.509
8	1.210	0.690	0.520	40	0.955	0.435	0.520	72	0.902	0.392	0.510
9	1.221	0.715	0.506	41	0.964	0.454	0.510	73	0.920	0.411	0.509
10	1.233	0.705	0.528	42	0.973	0.451	0.522	74	0.935	0.428	0.507
11	1.244	0.721	0.523	43	0.982	0.469	0.513	75	0.950	0.436	0.514
12	1.256	0.746	0.510	44	0.991	0.492	0.499	76	0.962	0.439	0.523
13	1.267	0.761	0.506	45	1.000	0.484	0.516	77	0.976	0.460	0.516
14	1.280	0.763	0.517	46	1.010	0.487	0.523	78	0.992	0.476	0.516
15	1.291	0.779	0.512	47	1.086	0.588	0.498	79	1.005	0.492	0.513
16	1.316	0.787	0.529	48	1.100	0.599	0.501	80	1.019	0.499	0.520
17	1.329	0.809	0.520	49	1.118	0.607	0.511	81	1.034	0.522	0.512
18	1.343	0.821	0.522	50	1.125	0.621	0.504	82	1.048	0.535	0.513
19	1.369	0.842	0.527	51	1.141	0.639	0.502	83	1.062	0.537	0.525
20	1.384	0.871	0.513	52	1.156	0.654	0.502	84	1.120	0.594	0.526
21	1.397	0.882	0.515	53	1.170	0.648	0.522	85	1.137	0.618	0.519
22	1.425	0.897	0.528	54	1.182	0.681	0.501	86	1.154	0.647	0.507
23	1.469	0.929	0.540	55	1.195	0.681	0.514	87	1.173	0.648	0.525
24	1.515	0.988	0.527	56	1.207	0.684	0.523	88	1.235	0.711	0.524
25	0.774	0.247	0.527	57	1.219	0.709	0.510	89	1.258	0.716	0.542
26	0.785	0.266	0.519	58	1.231	0.713	0.518	90	1.283	0.755	0.528
27	0.796	0.287	0.509	59	1.242	0.731	0.511	91	1.310	0.792	0.518
28	0.807	0.288	0.519	60	1.265	0.744	0.521	92	1.337	0.818	0.519
29	0.815	0.286	0.529	61	1.277	0.741	0.536	93	1.367	0.863	0.504
30	0.824	0.306	0.518	62	1.292	0.787	0.505	94	1.397	0.873	0.524
31	0.870	0.357	0.513	63	1.333	0.791	0.542	95	1.427	0.931	0.496
32	0.880	0.358	0.522	64	1.403	0.884	0.519	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

H.2. PANEL FOTOGRÁFICO DE LA MEDICIÓN DE LA PERDIDA DE ENERGÍA POR CAÍDA DE LA MAZA



Figura H.1: Pozo de prueba nivelado
Fuente: Elaboración propia



Figura H.2: Armado del soporte del sensor de movimiento
Fuente: Elaboración propia



Figura H.3: Medición de la influencia del aire en la caída
Fuente: Elaboración propia



Figura H.4: Medición de la fricción con la guía
Fuente: Elaboración propia



Figura H.5: Control de la perpendicularidad del ensayo
Fuente: Elaboración propia



Figura H.6: Medición de la Fricción en la guía inclinada
Fuente: Elaboración propia

ANEXO I PRUEBAS EN EL POZO DE PRUEBAS DEL SPT – SUELO COMPACTADO

I.1. PROPIEDADES DEL SUELO DEL POZO DE PRUEBAS DEL SPT

LIMITES DE ATTERBERT								
							INFORME N°	002
TESIS : PERDIDA DE ENERGÍA EL AUSCULTACIÓN CON DPL UBICACIÓN : POZO DE PRUEBAS DE ENSAYO SPT LAB. MEC. SUELOS FIC - UNSAAC POZO : 01 MUESTRA N° 001 PROFUNDIDAD: 0.80 m ANALISTA : J. A. C. Q. DESCRIPCIÓN : ARENA LIMOSA MARRÓN ROJIZO OSCURO CON ALGUNAS GRAVILLAS FECHA: 09/03/2014								
N°	Capsula N°	Numero de Golpes	Peso Capsula	Peso Capsula + Suelo Húmedo	Peso Capsula + Suelo Seco	Peso Agua	Peso Suelo Seco	Contenido de Humedad
			gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	%
LIMITE LIQUIDO (LL) MTC E 110								
1	3	30	31.20	50.70	47.30	3.40	16.10	21%
2	5	26	31.20	52.90	49.10	3.80	17.90	21%
3	11	25	31.50	58.30	53.60	4.70	22.10	21%
4	9	17	31.50	55.70	51.20	4.50	19.70	23%
LIMITE PLÁSTICO (LP) MTC E 111								
1	12		31.40	37.20	36.20	1.00	4.80	20.8%
2	4		31.30	41.00	39.40	1.60	8.10	19.8%
3	10		31.60	36.90	36.00	0.90	4.40	20.5%
HUMEDAD NATURAL (W%) MTC E 108								
1	4		31.20	129.90	123.00	6.90	91.80	7.5%

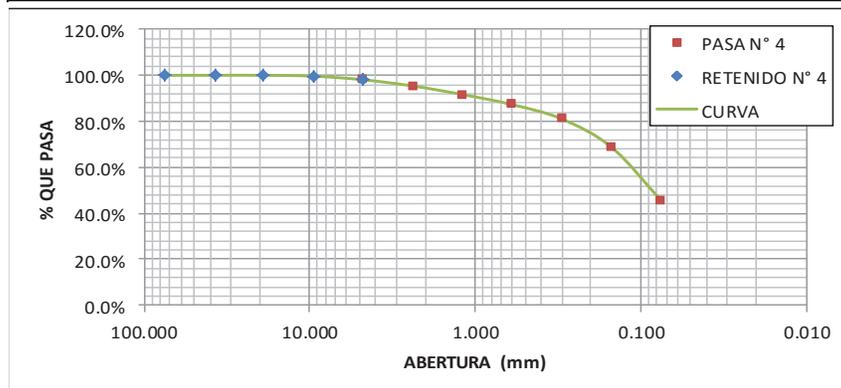
Gráfico de Límite Líquido

RESULTADOS:	W%: 07.5%	LL: 21%	LP: 20%	Ip: 01%
OBSERVACIONES:				
SUELO DIFÍCIL DE MANIPULAR PARA LIMITE PLÁSTICO				

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
ANEXOS

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - MTC E 107

TESIS : PERDIDA DE ENERGÍA EL AUSCULTACIÓN CON DPL			INFORME N° 001				
UBICACIÓN : POZO DE PRUEBAS DE ENSAYO SPT LAB. MEC. SUELOS FIC - UNSAAC							
POZO	1	MUESTRA N°	1	PROFUNDIDAD: 0.80	ANALISTA : J. A. C. Q.		
DESCRIPCIÓN : ARENA LIMOSA MARRÓN ROJIZO OSCURO CON ALGUNAS GRAVILLAS				FECHA:	08/03/2014		
MUESTRA NETA SIN CORRECCIÓN POR HUMEC		3537.0 gr			RETENIDO N° 4	PASA N° 4	
FRACCIÓN	RETENIDA N°4	PASA N°4	SUMA	CAPSULA N°	4		
PESO HÚMEDO	106.0 gr	3431.0 gr	3537.0 gr	P. CAPSULA	83.1 gr	31.2 gr	
CORREGIDO	106.0 gr	3431.0 gr	3537.0 gr	C + S HÚMEDO	189.0 gr	129.9 gr	
W%	7.1%	7.5%		C + S SECO	182.0 gr	123.0 gr	
PESO SECO	99.0 gr	3191.1 gr	3290.1 gr	AGUA	7.0 gr	6.9 gr	
PORCENTAJE	3.01%	96.99%		SUELO SECO	98.9 gr	91.8 gr	
% REAL	1.96%	98.04%		W%	7.1%	7.5%	
COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICO DEL MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA N° 4							
MUESTRA HÚMEDA SIN LAVAR:			176.6 gr	MUESTRA SECA LAVADA:			132.3 gr
MALLA	ABERTURA mm	RETENIDO gr.	CORREGIDO gr.	% RETENIDO %	% ACUMULADO %	% QUE PASA %	% REAL %
3"	75.00	0.0	0.0	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%
1-1/2"	37.50	0.0	0.0	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%
3/4"	19.00	0.0	0.0	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%
3/8"	9.50	20.9	20.9	12.7%	12.7%	87.3%	99.6%
N° 4	4.75	86.7	86.6	52.5%	65.1%	34.9%	98.0%
N° 8	2.360	7.5	7.5	4.5%	69.7%	30.3%	95.3%
N° 16	1.180	0.9	0.9	0.5%	70.2%	29.8%	91.6%
N° 30	0.600	0.8	0.8	0.5%	70.7%	29.3%	87.3%
N° 50	0.300	1.7	1.7	1.0%	71.7%	28.3%	81.0%
N° 100	0.150	4.8	4.8	2.9%	74.6%	25.4%	68.7%
N° 200	0.075	9.2	9.2	5.6%	80.2%	19.8%	45.4%
PASA			32.6	19.8%	100.0%	0.0%	
TOTAL		132.5	164.9				
COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICO DEL MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 4							
MUESTRA HÚMEDA SIN LAVAR:			211.8 gr	MUESTRA SECA LAVADA:			105.9 gr
MALLA	ABERTURA mm	RETENIDO gr.	CORREGIDO gr.	% RETENIDO %	% ACUMULADO %	% QUE PASA %	% REAL %
N° 4	4.750	0.0	0.0	0.0%	0.0%	100.0%	98.0%
N° 8	2.360	5.3	5.3	2.7%	2.7%	97.3%	95.3%
N° 16	1.180	7.6	7.6	3.8%	6.5%	93.5%	91.6%
N° 30	0.600	8.7	8.7	4.4%	10.9%	89.1%	87.3%
N° 50	0.300	12.7	12.7	6.4%	17.4%	82.6%	81.0%
N° 100	0.150	24.9	24.8	12.6%	30.0%	70.0%	68.7%
N° 200	0.075	46.9	46.9	23.8%	53.8%	46.2%	45.4%
PASA			91.1	46.2%	100.0%	0.0%	
TOTAL		106.1	197.0				



D10	N.C.
D30	N.C.
D60	0.12
Cu	N.C.
Cc	N.C.

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO
LIGERO (DPL)
ANEXOS

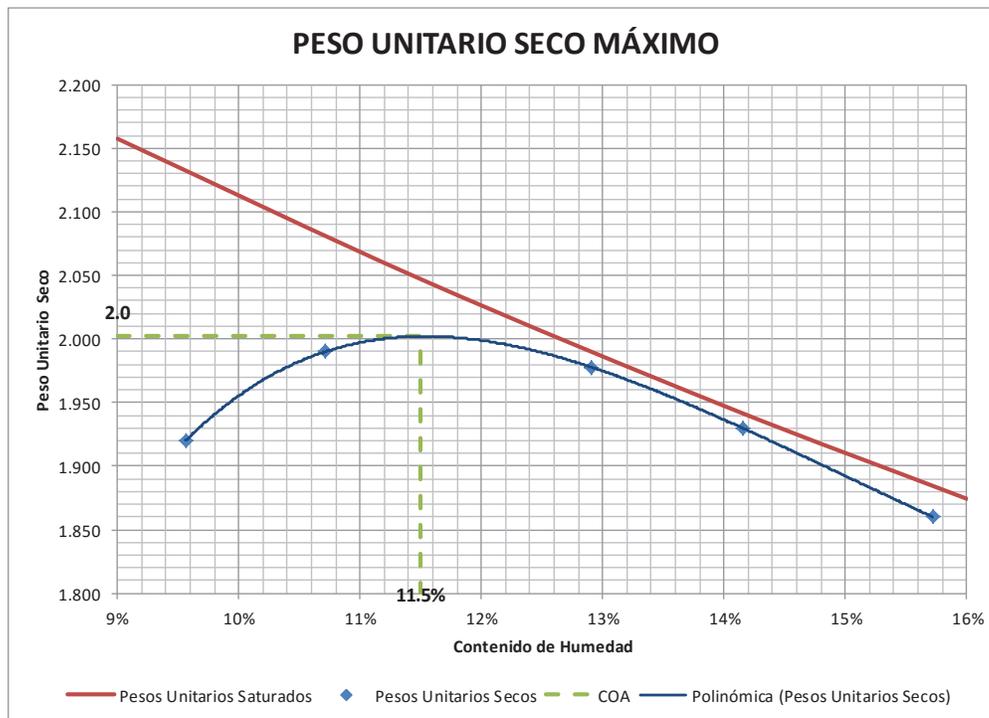
ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS SOLIDOS DEL SUELO

			INFORME N° 003
TESIS	: PERDIDA DE ENERGÍA EL AUSCULTACIÓN CON DPL		
UBICACIÓN	: POZO DE PRUEBAS DE ENSAYO SPT LAB. MEC. SUELOS FIC - UNSAAC		
POZO	1	MUESTRA N°	1
		PROFUNDIDAD:	0.80
DESCRIPCIÓN:	: ARENA LIMOSA MARRÓN ROJIZO OSCURO CON ALGUNAS GRAVIL		ANALISTA: J. A. C. Q.
PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS PARA LA FRACCIÓN QUE PASA EL TAMIZ N° 8 - MTC E 113			
% QUE PASA EL TAMIZ N° 8			95.30%
W ₀ : Peso al aire de la muestra desecada (gr):			372.00
W ₂ : Peso del picnómetro o matraz aforado lleno de agua (gr):			1,258.00
W ₁ : Peso total del picnómetro o matraz aforado con la muestra y lleno de agua (gr):			1,491.00
T: Temperatura a la que se realizo el ensayo (del agua) °C			20.00
k: Factor de corrección basado en el peso especifico del agua a 20 °C			1.0
$G_s = \text{Peso específico de los Sólidos} = \frac{W_0 \times k}{W_0 + W_2 - W_1} = 2.68$			
PESO ESPECIFICO APARENTE PARA LA FRACCIÓN QUE SE RETIENE EN EL TAMIZ N° 8 - MTC E 206			
% RETENIDO EN EL TAMIZ N° 8			4.70%
A: Peso en el aire de la muestra seca (gr):			99.00
B: Peso en el aire de la muestra saturada con superficie seca (gr):			99.90
C: Peso sumergido en agua de la muestra saturada (gr):			63.20
$G_a = \text{Peso específico aparente} = \frac{A}{B - C} = 2.70$			
PESO ESPECIFICO TOTAL DEL SUELO			
$G = \text{Peso específico total} = \frac{100\%}{\frac{\% \text{ Pasante del N° 8}}{G_s} + \frac{\% \text{ Retenido en el N° 8}}{G_a}} = 2.68$			

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
ANEXOS

DENSIDAD MÁXIMA - PROCTOR MODIFICADO - MTC E 115

TESIS	PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON DPL					INFORME N°	004					
UBICACIÓN DEL POZO	: POZO DE PRUEBAS DE ENSAYO SPT LAB. MEC. SUELOS FIC - UNSAAC											
POZO N°	1	MUESTRA N°	1	PROFUNDIDAD:	0.80	TIPO	SM					
DESCRIPCIÓN DEL SUELO	ARENA LIMOSA MARRÓN ROJIZO OSCURO CON ALGUNAS GRAVILLAS					ANALISTA:	J. A. C. Q.					
						FECHA:	20/03/2014					
INFORMACIÓN PREVIA												
GOLPE POR CAPA	25	N° DE CAPAS	5	PESO DEL MARTILLO	4090 gr	ALTURA DE CAÍDA	44 cm					
DIMENSIONES DEL MOLDE	Diámetro	10.145 cm	Altura	11.623 cm	Volumen	939.49 cm ³						
PESO DEL MOLDE	4242 gr	PESO ESPECIFICO DE SOLIDOS	2.68	LL	21%	LP	20%					
DETERMINACIÓN DE LOS PESOS SECOS												
CICLO	1	2	3	4	5	6						
Ww% Deseado	12%	14%	16%	8%	10%							
Ww% Real	12.9%	14.2%	15.7%	9.6%	10.7%							
W Molde + Suelo Húmedo	6340	6312	6268	6214	6310							
W Suelo Húmedo	2098	2070	2026	1972	2068							
Peso Unitario Húmedo	2.23	2.20	2.16	2.10	2.20							
Peso Unitario Seco	1.98	1.93	1.86	1.92	1.99							
DETERMINACIÓN DE LOS CONTENIDOS DE HUMEDAD												
Capsula N°	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2	D-1	D-2	E-1	E-2		
W Capsula	59.89	56.86	58.89	60.66	61.88	61.76	59.68	58.97	59.42	56.72		
W Capsula + Suelo Húmedo	93.60	96.69	107.13	112.42	96.90	103.24	96.06	112.39	96.49	103.26		
W Capsula + Suelo Seco	89.72	92.17	101.20	105.95	92.13	97.62	92.87	107.75	92.90	98.76		
W Agua	3.88	4.52	5.93	6.47	4.77	5.62	3.19	4.64	3.59	4.50		
W Suelo Seco	29.83	35.31	42.31	45.29	30.25	35.86	33.19	48.78	33.48	42.04		
Ww%	13.0%	12.8%	14.0%	14.3%	15.8%	15.7%	9.6%	9.5%	10.7%	10.7%		



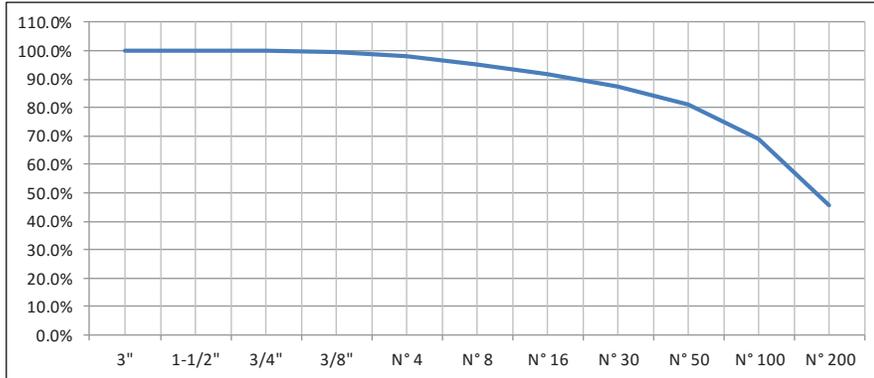
CONTENIDO ÓPTIMO AGUA (COA)	11.5%	PESO UNITARIO SECO MÁXIMO	2.0	RELACIÓN DE VACÍOS	33.7%
-----------------------------	-------	---------------------------	-----	--------------------	-------

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
ANEXOS

CLASIFICACIÓN DEL SUELO - SUCS

TESIS	PERDIDA DE ENERGIA EN LA AUSCULTACION CON DPL	INFORME N°	006
UBICACION DEL POZO	POZO DE PRUEBAS DE ENSAYO SPT LAB. MEC. SUELOS FIC - UNSAAC		
POZO N°	1	MUESTRA N°	1
		PROFUNDIDAD:	0.80
DESCRIPCIÓN DEL SUELO	ARENA LIMOSA MARRÓN ROJIZO OSCURO CON ALGUNAS GRAVILLAS	ANALISTA	J.A.C.Q.
		FECHA	20/03/2014

INFORMACION GRANULOMÉTRICA



MALLA	% QUE PASA
3"	100.0%
1-1/2"	100.0%
3/4"	100.0%
3/8"	99.6%
N° 4	98.0%
N° 8	95.3%
N° 16	91.6%
N° 30	87.3%
N° 50	81.0%
N° 100	68.7%
N° 200	45.4%

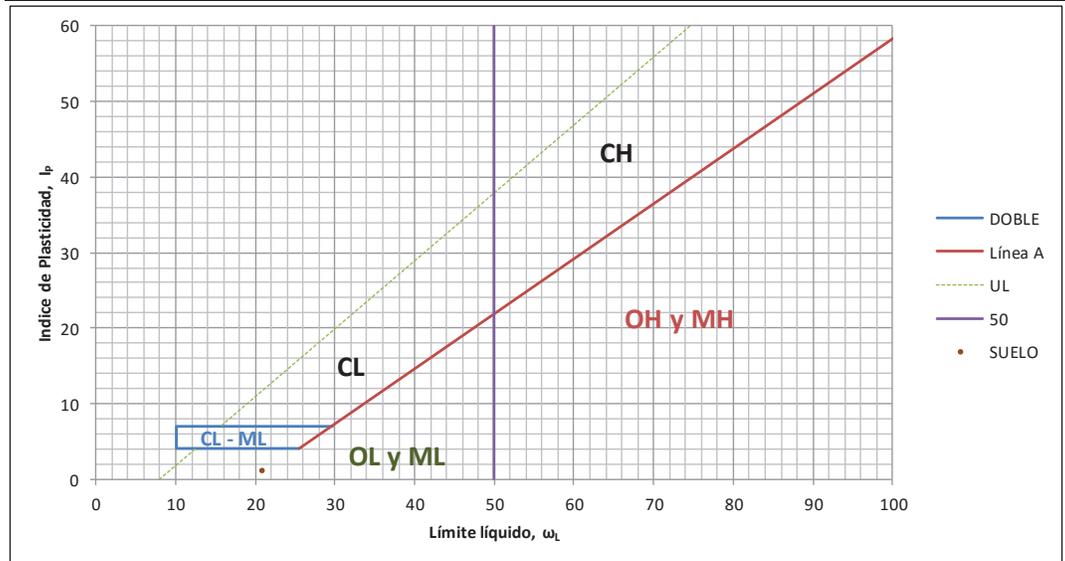
% QUE PASA LA MALLA N° 200: 45.4% % RETENIDO EN LA MALLA N° 4: 2.0% % ENTRE LA MALLA N° 4 Y N° 200: 52.6%

CRITERIOS DE GRADACIÓN D₁₀: N.C. D₃₀: N.C. D₆₀: 0.12 C_u: N.C. C_c: N.C.

N.C. : NO SE PUEDE CALCULAR

CARTA DE PLASTICIDAD

LÍMITE LÍQUIDO: 21% **LÍMITE PLÁSTICO:** 20% **ÍNDICE DE PLASTICIDAD:** 1%



PROCESO DE CLASIFICACIÓN

LA CANTIDAD DE FINOS QUE TIENE EL SUELO ES MENOR DEL 50%, ASI QUE ES UN SUELO DE GRANO GRUESO; EL PORCENTAJE DEL SUELO QUE SE RETIENE EN LA MALLA N° 4 ES MENOR AL 50% DE LA FRACCION GRUESA, ASI QUE ES UNA ARENA; EN LA MUESTRA DE SUELO NO SE APRECIO NINGUN OLOR O MATERIA ORGANICA, EL PORCENTAJE DE FINOS ES MAYOR QUE 12% Y EN LA CARTA DE PLASTICIDAD EL SUELO SE UBICA EN LA ZONA (OL y ML) ASI QUE ES UNA ARENA LIMOSA

TIPO DE SUELO

SM

ARENA LIMOSA

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
ANEXOS

I.2. REGISTRO DE LOS DATOS DE LA PRUEBA EN LABORATORIO

TOMA DE DATOS -TESIS PERDIDA DE ENERGÍA EN AUSCULTACIÓN CON DPL														
FECHA:										HORA DE INICIO y FIN:				
UBICACIÓN:														
NÚMERO DE PRUEBA:										PROFUNDIDAD INICIAL:				
DETALLES DE LA ZONA:														
Prof. ingre.	H = cm				H = cm				H = cm				DIAGRAMA DEL SUELO	DESCRIPCIÓN
	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro		
0.10														
0.20														
0.30														
0.40														
0.50														
0.60														
0.70														
0.80														
0.90														
1.00														
1.10														
1.20														
1.30														
1.40														
1.50														
1.60														
1.70														
1.80														
1.90														
2.00														
2.10														
2.20														
2.30														
2.40														
2.50														
2.60														
2.70														
2.80														
2.90														
3.00														
3.10														
3.20														
3.30														
3.40														
3.50														
3.60														
3.70														
3.80														
3.90														
4.00														

TIPOS DE GIRO: F: Fácil MD: Medianamente Difícil D: Difícil NG: No Gira

Figura I.1: Formato de toma de datos para el ensayo DPL
Fuente: Elaboración propia

Tabla I.1: Datos del ensayo DPL en laboratorio PL 1

Prof. ingre.	H = 30 cm				H = 40 cm				H = 50 cm				H = 60 cm				H = 20 cm				DIAGRAMA DEL SUELO	DESCRIPCIÓN
	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro		
0.10	29	0.9	10	F	21	0.8	10	F	15	0.4	10	F	11	0.6	10	F	40	1.1	10.5	F	Cp 7	SM
0.20	32	0.7	10	F	23	0.8	10	F	18	0.5	10	F	14	0.9	10	F	44	0.8	9.5	F	Cp 6	SM
0.30	26	0.7	10	F	21	0.5	10	F	15	0.3	10	F	13	0.8	11	F	39	0.7	11.5	F		
0.40	25	0.6	10	F	18	0.6	10	F	16	0.4	10	F	11	0.8	10	F	26	0.3	8.5	F	Cp 5	SM
0.50	23	0.3	10	F	16	0.1	10	F	14	0.1	10	F	10	0.8	10	F	26	0.3	10	F	Cp 4	SM
0.60	40	0.8	10	F	31	0.6	10	F	21	0.8	10	F	17	1.0	9	F	71	0.8	10	F		
0.70	58	0.8	10	F	35	0.9	10	F	32	0.8	10	F	23	1.5	10	F	116	0.9	10	F	Cp 3	SM
0.80	66	0.7	10	F	43	0.9	10	F	40	1.0	10	F	27	0.9	10	F	156	0.8	10	F		
0.90	47	0.6	10.5	F	33	0.5	10	F	39	0.7	11	F	21	0.8	11	F	82	0.6	10	F	Cp 2	SM
1.00	48	0.7	10	F	30	0.4	10	F	21	0.4	9	F	17	0.8	9	F	66	0.5	10	F		
1.10	34	0.6	9.5	F	19	0.2	10	F	15	0.2	10	F	14	0.3	10	F	52	0.2	10	F	Cp 1	SM
1.20	32	0.6	10	F	23	0.4	10	F	15	0.2	10	F	14	0.4	10	F	50	0.3	11	F		
1.30	20	0.1	10	F	13	0.1	10	F	11	0.1	10	F	12	0.2	10	F	26	0.1	9	F	Suelo sin remover ¹	
1.40	18	0.2	10	F	12	0.1	10	F	11	0.1	10.5	F	11	0.1	10	F	32	0.2	10	F		
1.50	27	0.5	10	F	27	0.5	10	F	19	0.2	9.5	F	17	0.7	10	F	73	0.6	10	F	Suelo sin remover ¹	
1.60	31	0.4	10	F	23	0.2	10	F	19	0.1	10	F	16	0.4	10	F	68	0.2	13	F		
1.70	30	0.2	10	F	16	0.1	10	F	13	0.1	10	F	13	0.2	10	F	24	0.2	7	F	Suelo sin remover ¹	
1.80	21	0.2	10	F	12	0.1	10	F	12	0.1	10	F	10	0.1	10	F	26	0.2	10	F		
1.90	19	0.1	10	F	9	0	10	F	11	0.1	10	F	9	0.1	10	F	26	0.2	10	F	Suelo sin remover ¹	
2.00	17	0.1	10	F	8	0	10	F	10	0	10	F	9	0.1	10	F	27	0.1	12	F		
2.10	17	0.1	10	F	9	0	10	F	8	0	10	F	7	0	10	F	17	0	8.5	F	Suelo sin remover ¹	

Fuente: Elaboración propia

¹ El suelo del pozo de pruebas esta con las características de densidad generadas por la última vez que fuera compactado.

I.3. REGISTRO DE LAS DENSIDADES NATURALES

Tabla I.2: Contenido de humedad del pozo compactado

PROF. (m)	CONTENIDO DE HUMEDAD				
	CAPSULA	W capsula	Wcap+suelo	Wcap+s.s.	w%
0.43	E-1	59.4	94.23	91.48	8.6%
0.95	C-1	60.75	188.1	180.57	6.3%
1.01	C-2	64.39	140.24	135.07	7.3%
1.08	C-3	62.64	147.03	139.91	9.2%
1.13	C-4	61.69	162.1	153.79	9.0%
1.17	C-5	58.64	118.26	113.32	9.0%
1.22	C-6	68.99	129.66	124.81	8.7%
1.42	C-6	62.43	119.02	113.57	10.7%
1.63	C-9	59.03	140.79	131.99	12.1%
1.72	E-1	59.49	110.95	105.11	12.8%
1.81	C-8	61.37	101.18	96.93	12.0%
1.86	P-5	60.66	111.29	105.74	12.3%
1.96	B-1	58.97	99.6	95.01	12.7%
2.04	A-2	56.98	131.63	123.37	12.4%

Fuente: Elaboración propia

Tabla I.3: Compacidades relativas

PROFUND. (m)	PESO NATURAL			DIMENSIONES			w%	γ_d (gr/cm ³)	C_r	OBSERV.	
	Tubo Shellby (gr)	T+Wn (gr)	Wn (gr)	L (cm)	D (cm)	V (cm ³)					
0.10 - 0.75	681.91	1808	1126.09	33.0	4.79	594.7	8.6%	1.74	74.5%	Denso	La muestra se comprimió
0.74 - 0.93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	La muestra se desarmó
0.93 - 1.25	681.91	1712	1030.09	32.8	4.79	591.1	8.3%	1.61	57.7%	Medio	-
1.25 - 1.58	681.91	1764	1082.09	33.0	4.79	594.7	10.7%	1.64	62.4%	Medio	La muestra se comprimió
1.58 - 1.80	681.91	1472	790.09	26.0	4.79	468.5	12.3%	1.50	42.3%	Suelto	-
1.80 - 2.08	681.91	1486	804.09	27.5	4.79	495.6	12.5%	1.44	32.7%	Suelto	-

Fuente: Elaboración propia

I.4. PANEL FOTOGRÁFICO DE LA MEDICIÓN DEL REBOTE Y VALOR H_0 EN LABORATORIO



Figura I.2: Cuarteo y lavado de muestras de suelo del pozo de pruebas del SPT
Fuente: Elaboración propia



Figura I.3: Limite líquido y granulometría del suelo del pozo de pruebas del SPT
Fuente: Elaboración propia



Figura I.4: Peso específico de la muestras del pozo de pruebas del SPT
Fuente: Elaboración propia

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO
LIGERO (DPL)
ANEXOS



Figura I.5: Densidad Máxima de la muestras del pozo de pruebas del SPT
Fuente: Elaboración propia

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO
LIGERO (DPL)
ANEXOS



Figura I.6: Densidad Mínima de la muestras del pozo de pruebas del SPT
Fuente: Elaboración propia

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO
LIGERO (DPL)
ANEXOS



Figura I.7: Removido y compactado del pozo de pruebas del SPT
Fuente: Elaboración propia

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
ANEXOS

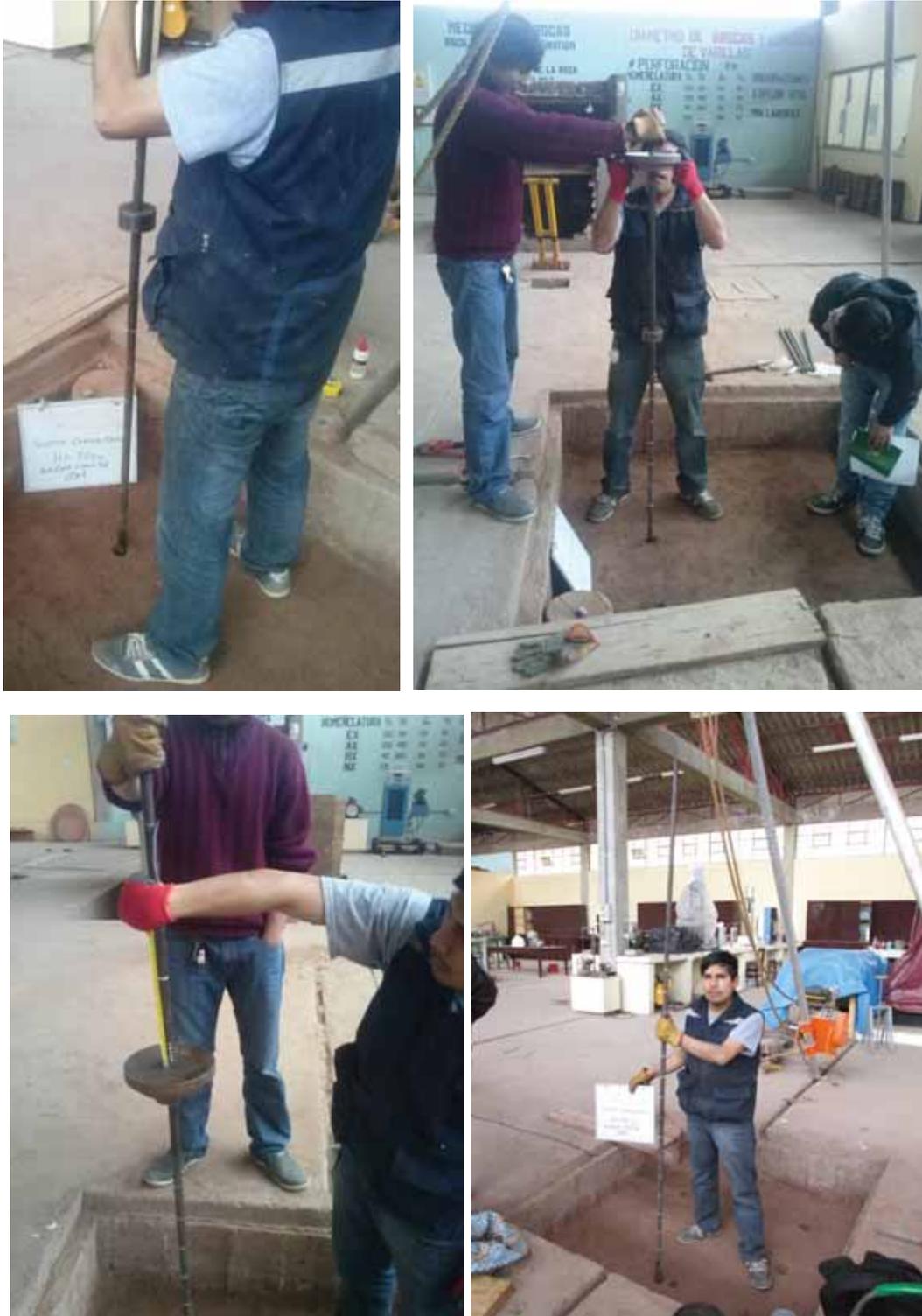


Figura I.8: Ensayo DPL con alturas diferentes, medición del rebote y giro en pozo de pruebas del SPT compactado

Fuente: Elaboración propia

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
ANEXOS

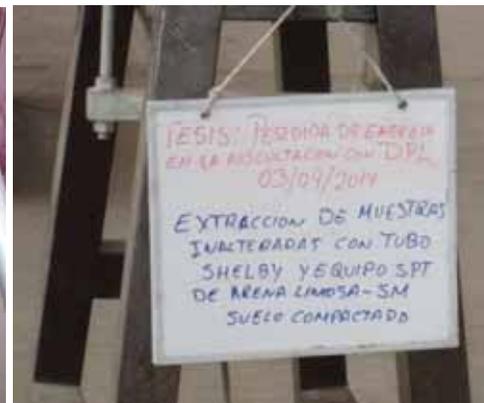


Figura I.9: Extracción de muestras para densidad natural del pozo de pruebas del SPT compactado
Fuente: Elaboración propia

I.5. CERTIFICADO DE USO DE LABORATORIO

CERTIFICADO

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

CERTIFICA:

Que el bachiller en ingeniería civil, **JOEL APOLINAR CRUZ QUINTANILLA**, con código de matrícula 070556-J, realizó en este local los ensayos de laboratorio de mecánica de suelos, las pruebas de medición de la pérdida de energía por fricción de la maza con la guía del equipo DPL y los ensayos DPLs con diferentes alturas de caída de la maza en condiciones controladas, correspondientes a la tesis de investigación intitulada: "PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)", estas pruebas fueron desarrolladas del mes de febrero del 2013 al mes de abril del 2014. Durante su permanencia el interesado demostró destreza y responsabilidad en la ejecución de las pruebas y en la manipulación de los equipos de laboratorio.

Se le expide este documento a solicitud del interesado para los fines que vean por conveniente.

Cusco, Diciembre del 2014

Se tiene la siguiente información del estudio de suelos:

Mejoramiento de la Transitabilidad Vehicular y Peatonal de la A.P.V. Ernesto Gunther – Coop. Viv. Sind. Trab. Cia Cervecera Ltda 244 – Distrito Cusco, Provincia Cusco, Departamento Cusco. (Encalada & Huamanguillas Paravecino, 2014, pág. 164).

Calicata 03:

(SP) Arena mal gradada con grava: 80% de arena fina a gruesa subredondeada; 20% de grava fina a gruesa subredondeada, se fractura y desmorona con golpe de martillo; rastro de finos no plásticos; tamaño máximo, 3"; débil reacción al HCl. En campo: Firme, homogéneo, húmeda y con cementación moderada. Presencia de 0.20m de lastre compactado.

Densidad máxima Seca: 1.89 gr/cm³

Contenido de Humedad: 17%

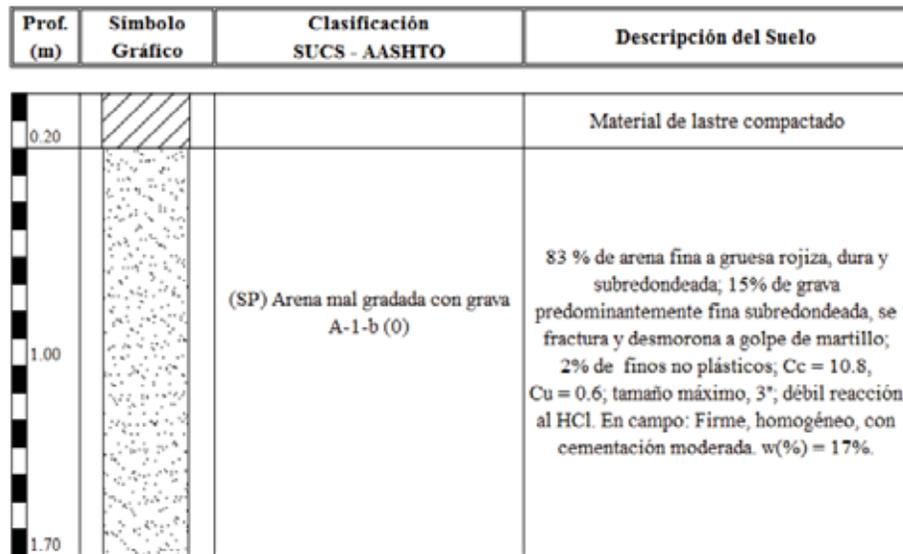


Figura J.2: Perfil estratigráfico de la calicata 03 de la prueba PC 1
Fuente: Encalada J. y Huamanguillas Paravecino E., Mejoramiento de la Transitabilidad Vehicular y Peatonal de la A.P.V. Ernesto Gunther, (2014, pág. 172)

J.2. PRUEBA PC 2

Esta prueba se realiza en un suelo arenoso arcilloso con leve presencia de gravilla, al costado de la trinchera 05 del proyecto de mejoramiento de la vía principal de la APV. Ernesto Gunther del distrito del Cusco (Figura J.1), se ejecuta el ensayo DPL con alturas de caída de 60 cm, 50 cm y 30 cm obteniéndose el siguiente registro:

Tabla J.2: Datos de la prueba PC 2

Prof. ingre.	H = 60 cm				H = 50 cm				H = 30 cm				DIAGRAMA DEL SUELO	DESCRIPCIÓN
	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro		
0.10	22	0.5	10	F	25	0.4	10	F	68	0.5	10	F	OL	Limo Orgánico
0.20	32	0.5	10	F	46	1.0	10	F	85	0.5	10	F		
0.30	27	0.6	10	F	36	0.2	10	F	71	1.0	10	F		
0.40	22	0.4	10	F	26	0.5	10	F	70	0.8	10	F	SP	
0.50	23	0.4	10	F	27	0.5	10	F	52	0.5	10	F		
0.60	17	0	10	F	18	0	10	F	41	0.5	10	F		
0.70	25	1.0	9	F	21	0.3	10	F	38	0.2	10	F		

Fuente: Elaboración propia

Se tiene la siguiente información del estudio de suelos:

Mejoramiento de la Transitabilidad Vehicular y Peatonal de la A.P.V. Ernesto Gunther – Coop. Viv. Sind. Trab. Cia Cervecera Ltda 244 – Distrito Cusco, Provincia Cusco, Departamento Cusco. (Encalada & Huamanguillas Paravecino, 2014, pág. 164).

Trinchera 05:

(SP) Arena mal gradada con grava: 80% de arena rojiza fina a gruesa subredondeada; 20% de grava predominantemente fina subredondeada, se fractura y desmorona con golpe de martillo; rastro de finos no plásticos; tamaño máximo, 2" (50 mm); débil reacción al HCl. En campo: Firme, homogéneo, seca, con cementación moderada y presencia de 0.20m de lastre compactado.

Densidad naturas: 1.71 gr/cm³

Contenido de Humedad: 17%

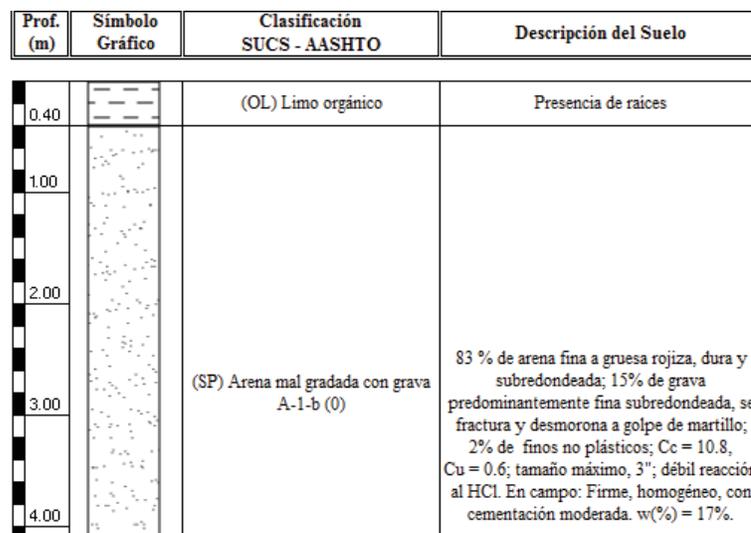


Figura J.3: Perfil estratigráfico de la trinchera 05 de la prueba PC 2

Fuente: Adaptado de Encalada J. y Huamanguillas Paravecino E., Mejoramiento de la Transitabilidad Vehicular y Peatonal de la A.P.V. Ernesto Gunther, (2014, pág. 175)

J.3. PRUEBA PC 3

Esta prueba se realiza, al costado de la calicata 02 del proyecto de mejoramiento de la vía principal de la APV. Ernesto Gunther del distrito del Cusco (Figura J.1), se ejecuta el ensayo con alturas de caída de 50 cm, 40 cm y 20 cm obteniéndose el siguiente registro:

Tabla J.3: Datos de la prueba PC 3

Prof. ingre.	H = 50 cm				H = 40 cm				H = 20 cm				DIAGRAMA DEL SUELO	DESCRIPCIÓN		
	N _{10'}	Reb.	Δh	Giro	N _{10'}	Reb.	Δh	Giro	N _{10'}	Reb.	Δh	Giro				
0.10	11	0.2	10	F	15	0.2	10	F	23	0.1	10	F	Relleno			
0.20	7	0.1	10	F	11	0.1	10	F	17	0.1	10	F				
0.30	9	0.1	11	F	15	0.1	10	F	24	0.1	10	F				
0.40	8	0.1	9	F	15	0.1	10	F	30	0.2	10	F				
0.50	11	0.1	10	F	15	0.1	10	F	34	0.2	10	F			SM	Presencia de raíces
0.60	11	0.1	10	F	17	0.1	10	F	34	0.3	10	F				
0.70	13	0.1	10	F	17	0.1	10	F	34	0.2	10	F				
0.80	15	0.1	10	F	17	0.1	10	F	37	0.2	10	F	SM			
0.90	13	0.1	10	F	15	0.1	10	F	34	0.1	10	F				
1.00	14	0.1	11	F	16	0.1	10	F	46	0.1	10	D				
1.10	18	0.1	9	D	22	0.1	10	F	84	0.5	10	NG				
1.20	24	0.3	10	NG	42	0.4	10	D	-	-	-	-				

Fuente: Elaboración propia

Se tiene la siguiente información del estudio de suelos:

Mejoramiento de la Transitabilidad Vehicular y Peatonal de la A.P.V. Ernesto Gunther – Coop. Viv. Sind. Trab. Cia Cervecera Ltda 244 – Distrito Cusco, Provincia Cusco, Departamento Cusco (Encalada & Huamanguillas Paravecino, 2014, pág. 163).

Calicata 02, Estrato 01:

(SM) *Arena limosa*: 80% de arena fina a gruesa subredondeada; 15% de finos con baja plasticidad, baja resistencia seca, lenta dilatancia, baja tenacidad; 5% de grava fina, se fractura y desmorona con golpe de martillo; tamaño máximo, 1" (25 mm); ninguna reacción al HCl. En campo: Firme, homogéneo, seca, con cementación moderada y presencia de 0.20m de lastre compactado.

Calicata 02, Estrato 02:

(SM) *Arena limosa*: 80% de arena fina a gruesa subredondeada; 20% de finos con baja plasticidad, baja resistencia seca, lenta dilatancia, baja tenacidad; rastros de grava fina; tamaño máximo, 3/8" (9.5 mm); ninguna reacción al HCl. En campo: Firme, homogéneo, húmeda con cementación moderada.

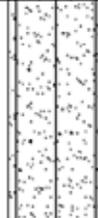
Prof. (m)	Símbolo Gráfico	Clasificación SUCS - AASHTO	Descripción del Suelo
0.20			Material de lastre compactado
0.90		(SM) Arena limosa A-2-4 (0)	79 % de arena fina a gruesa dura y subredondeada; 15 % de limo de baja compresibilidad, LL = 36, IP = 6; 6% de grava fina, se fractura y desmorona a golpe de martillo; tamaño máximo, 1" (25 mm); ninguna reacción al HCl. En campo: Firme, homogéneo, con cementación moderada y presencia de raíces en los 0.50 m iniciales. w(%) = 7 %
1.70		(SM) Arena limosa A-2-4 (0)	78 % de arena fina a gruesa dura y subredondeada; 22 % de limo de baja compresibilidad, LL = 35, IP = 5; rastros de grava fina, tamaño máximo, 3/8" (9.5 mm); ninguna reacción al HCl. En campo: Firme, homogéneo, húmeda, con cementación moderada. w(%) = 27%

Figura J.4: Perfil estratigráfico de la calicata 02 de la prueba PC 3

Fuente: Encalada J. y Huamanguillas Paravecino E., *Mejoramiento de la Transitabilidad Vehicular y Peatonal de la A.P.V. Ernesto Gunther*, (2014, pág. 172)

Densidad Máxima seca estrato 1: 1.85 gr/cm³

Densidad naturas estrato 1: 1.67 gr/cm³

Contenido de Humedad estrato 1 y 2: 7% y 27%

J.4. PRUEBA PC 4

Esta prueba se ejecuta al costado de la calicata 01 del proyecto unifamiliar ubicado en la APV Los Rosales C-5 del distrito de San Sebastián, cerca al conjunto habitacional Hilario Mendivil, el suelo parece tener presencia de piedras, al parecer es un relleno.



Figura J.5: Ubicación de la prueba PC 4

Fuente: Adaptada de Google Maps (2015), <https://www.google.com/maps/@-13.5392397,-71.940447,17z>; consultado: 18/05/2015

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
ANEXOS

Se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla J.4: Datos de la prueba PC 4

Prof. ingre.	H = 50 cm				H = 30 cm				H = 10 cm				DIAGRAMA DEL SUELO	DESCRIPCIÓN
	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro		
0.10	18	0.5	10	MD	36	0.5	10	F	-	-	-	-		
0.20	32	0.1	10	F	73	0.1	10	F	-	-	-	-		
0.30	15	0.5	10	F	60	1.3	10	F	-	-	-	-		
0.40	10	0.3	10	F	36	0.1	10	F	-	-	-	-		
0.50	7	0.1	10	F	-	-	-	-	44	0.1	10	F		Relleno antrópico antiguo de material diverso, color marrón
0.60	7	0.1	10	F	-	-	-	-	42	0.1	10	F		
0.70	6	0.1	10	F	-	-	-	-	35	0.1	10	F		
0.80	7	0	10	F	-	-	-	-	-	-	-	-		
0.90	9	0	10	D	-	-	-	-	-	-	-	-		
1.00	5	0	10	MD	-	-	-	-	-	-	-	-		
1.10	5	0	11	MD	-	-	-	-	-	-	-	-		
1.20	5	0	9	MD	-	-	-	-	-	-	-	-		
1.30	8	0.1	10	D	-	-	-	-	-	-	-	-		
1.40	10	0.1	10	NG	-	-	-	-	-	-	-	-		
1.50	10	0	10	NG	-	-	-	-	-	-	-	-		

Fuente: Elaboración propia

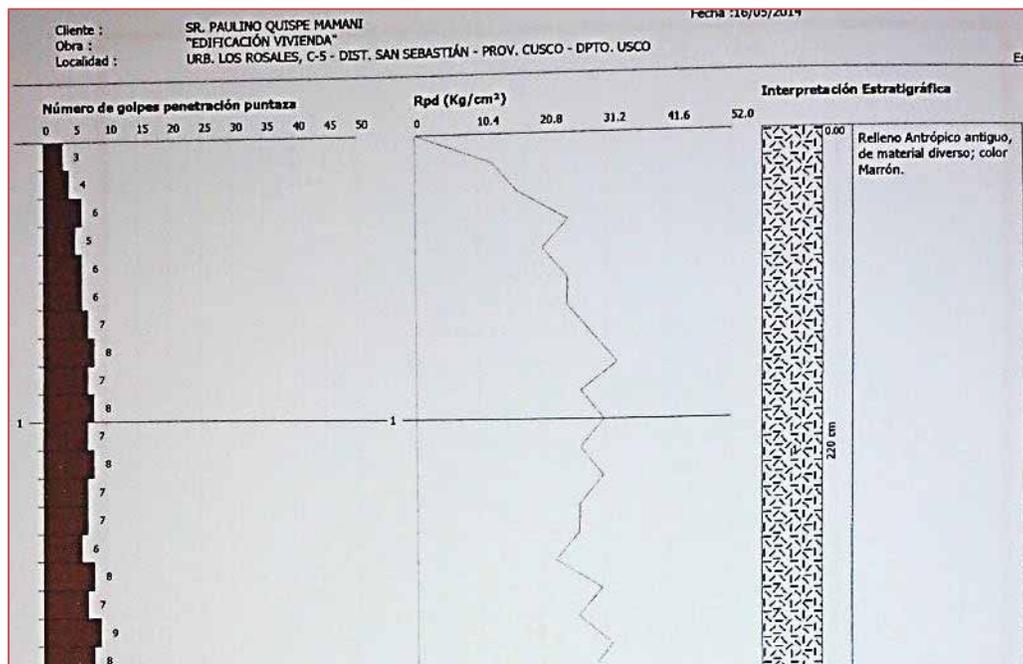


Figura J.6: Perfil estratigráfico de la calicata 01 y diagrama número de golpes puntaza – Rpd, de la prueba PC 4

Fuente: Adaptado de Abelardo Abarca Ancori, Estudio de mecánica de suelos para cimentación proyecto: "Edificación Vivienda", (2014, pág. 29)

J.5. PRUEBA PC 5

Esta prueba se realizó al costado de la calicata 02 del proyecto de mejoramiento de la calle Huaynacapac de la APV Tres Cruces del distrito de San Sebastián.

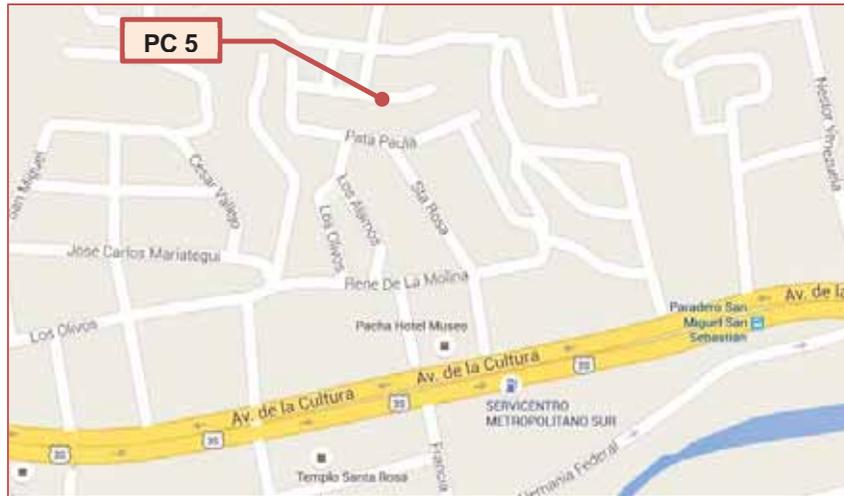


Figura J.7: Ubicación de la prueba PC 5

Fuente: Adaptada de Google Maps (2015), <https://www.google.com/maps/@-13.5312898,-71.9198264,17z>; consultado: 18/05/2015

El suelo de esta zona está conformado por un relleno de material de río colocado por la población (aproximadamente 0.60 m), debajo de este material, hasta aproximadamente 1.70 m es una arena fina, pero también es un relleno, pasada esta profundidad se encuentra un estrato de arena limosa color amarillenta.

Tabla J.5: Datos de la prueba PC 5 - 1° parte

Prof. ingre.	H = 50 cm				H = 60 cm				H = 40 cm				DIAGRAMA DEL SUELO	DESCRIPCIÓN
	N _{10'}	Reb.	Δh	Giro	N _{10'}	Reb.	Δh	Giro	N _{10'}	Reb.	Δh	Giro		
0.10	67	0.5	10	F	35	1.5	10	F	40	1.0	10	F	Relleno de material de río - hormigón	
0.20	61	0.7	10	F	18	0.5	10	F	33	0.5	10	F		
0.30	47	0.3	10	F	25	0.3	10	F	15	0	10	F		
0.40	18	0.2	10	F	27	1.0	10	F	16	0	10	F		
0.50	14	0	10	F	13	0.3	10	F	-	-	-	-		

Fuente: Elaboración propia

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
ANEXOS

Tabla J.6: Datos de la prueba PC 5 - 2° parte

Prof. ingre.	H = 50 cm				H = 30 cm				H = 10 cm				DIAGRAMA DEL SUELO	DESCRIPCIÓN
	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro		
0.50	14	0	10	F	-	-	-	-	72	0	10	MD	Relleno de arena fina, color amarillo oxidado	
0.60	9	0	10	F	14	0	10	F	40	0	10	F		
0.70	5	0	10	F	14	0	10	F	21	0	10	F		
0.80	6	0	10	F	14	0	10	F	25	0	10	F		
0.90	7	0	10	F	20	0	10	F	35	0	10	F		
1.00	8	0	10	F	20	0	10	MD	33	0	10	F		
1.10	8	0	10	F	23	0.5	10	MD	35	0	10	F		
1.20	9	0	10	F	26	0.5	10	F	43	0	10	MD		
1.30	9	0.1	10	F	24	0	10	F	52	0	10	D		
1.40	7	0	10	F	19	0	10	MD	46	0	10	D		
1.50	6	0	10	F	15	0	10	F	24	0	10	F		

Fuente: Elaboración propia

J.6. PRUEBA PC 6

Esta prueba se realiza en la cabeza de un talud vertical de una calle a ser pavimentada, la obra se ubica en la APV. Geraldo Ruis Caro - Calle Pedro Huilca Tecse del distrito de Santiago, provincia y región del Cusco.

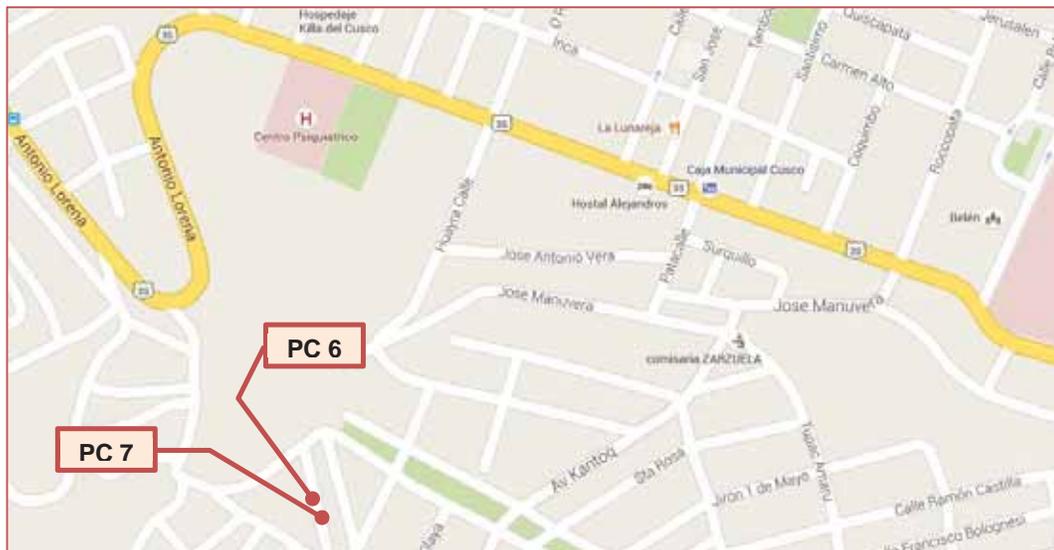


Figura J.8: Ubicación de las pruebas PC 5 y PC 6

Fuente: Adaptada de Google Maps (2015), <https://www.google.com/maps/@-13.5279987,-71.9851113,17z>; consultado: 18/05/2015

Se obtuvo los siguientes datos:

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)
ANEXOS

Tabla J.7: Datos de la prueba PC 6

Prof. ingre.	H = 50 cm				H = 30 cm				H = 10 cm				DIAGRAMA DEL SUELO	DESCRIPCIÓN
	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro		
0.10	23	0.8	10	MD	53	0.7	10	MD	270	0.5	10	MD		
0.20	22	0.5	10	F	35	0.5	10	F	190	0.3	10	F		
0.30	15	0.5	10	F	25	0.3	10	F	99	0.3	10	MD		
0.40	10	0.35	10	F	18	0.3	10	F	78	0.3	10	F		
0.50	9	0	10	F	18	0	10	F	55	0.3	10	F		
0.60	8	0	10	F	16	0	10	F	43	0.5	10	F	SM	Relleno suelto e inestable
0.70	8	0	11	F	13	0	10	F	39	0.1	10	F		
0.80	7	0	9	F	12	0	10	F	38	0.1	10	F		
0.90	8	0	10	F	11	0	10	F	34	0	10	F		
1.00	9	0	10	F	13	0	10	F	33	0	10	F		
1.10	Rechazo Grava				Rechazo Grava				Rechazo Grava					

Fuente: Elaboración propia

Del estudio de mecánica de suelos del muro de contención del proyecto “Mejoramiento de la transitabilidad vehicular y peatonal A.P.V. Geraldo Ruis Caro” del distrito de Santiago, provincia del Cusco que ira en esta zona se tiene:

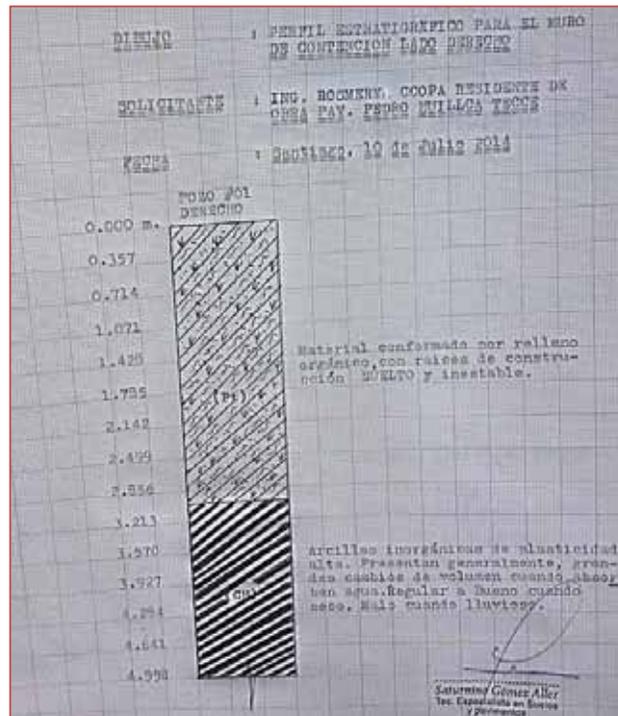


Figura J.9: Perfil estratigráfico para el muro de contención, de la prueba PC 4

Fuente: Adaptado de Saturnino Gomez Aller, Estudio de suelos para la cimentación del muro de contención de la APV Geraldo Ruis Caro, (2014, pág. 6)

J.7. PRUEBA PC 7

Esta prueba se realiza en el nivel de cimentación del terramesh que sostendrá la calle a ser pavimentada, la obra se ubica en la APV. Geraldo Ruis Caro - Calle Pedro Huillca Tecse del distrito de Santiago (Figura J.8). Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla J.8: Datos de la prueba PC 7

Prof. ingre.	H = 50 cm				H = 30 cm				H = 10 cm				DIAGRAMA DEL SUELO	DESCRIPCIÓN
	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro	N ₁₀ '	Reb.	Δh	Giro		
0.10	8	0	10	F	12	0	10	F	44	0	10	F	SM	Marrón rojizo
0.20	8	0	10	F	13	0	10	D	43	0	10	MD		
0.30	8	0	10	D	16	0	10	D	46	0.1	10	D	CH	Arcilla color marrón rojizo
0.40	9	0	10	MD	16	0	10	MD	55	0.1	11	D		
0.50	9	0	10	MD	17	0	10	MD	48	0.1	9	D		
0.60	10	0	10	D	19	0	10	D	57	0.1	10	D		
0.70	12	0.3	10	NG	20	0.3	10	D	64	0.3	10	D		

Fuente: Elaboración propia

El estrato es una arcilla de alta plasticidad (Figura J.9), pero hay una leve capa de arena limosa en la superficie. La arcilla tiene las siguientes propiedades de interés (Gomez Aller, 2014):

Cohesión de la arcilla CH= 0.43 kg/cm²

Densidad máxima seca: 1.92 gr/ cm³

Densidad seca: 1.787 gr/ cm³

J.8. PANEL FOTOGRÁFICO DE ENSAYOS EN CAMPO



Figura J.10: Prueba de campo PC-1 APV Ernesto Gunther Calicata C-3
Fuente: Elaboración propia



Figura J.11: Prueba de campo PC-2 APV Ernesto Gunther Trinchera 05
Fuente: Elaboración propia



Figura J.12: Prueba de campo PC-3 APV Ernesto Gunther Calicata C-2
Fuente: Elaboración propia



Figura J.13: Prueba de campo PC-4 Los Rosales C-5 Calicata C-1
Fuente: Elaboración propia

PERDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO
LIGERO (DPL)
ANEXOS



Figura J.14: Prueba de campo PC-5 APV Tres Cruces Calle Huaynacapac – Calicata 2

Fuente: Elaboración propia



Figura J.15: Prueba de campo PC-6 APV Dignidad Nacional nivel de subrasante
Fuente: Elaboración propia



Figura J.16: Prueba de campo PC-7 APV Dignidad Nacional nivel de cimentación
Fuente: Elaboración propia