

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**MEJORAMIENTO DE SUELO EN ZONA SUSCEPTIBLE A  
LICUACIÓN UTILIZANDO INCLUSIONES, INTERCAMBIO VIAL  
AEROPUERTO CHINCHEROS – CUSCO**

**TESIS**

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

**PRESENTADO POR:**

**Bach. RIOS HIDALGO, ANGEL JOAO**

**Bach. ROJAS VIZARRES, JACQUELINE**

**ASESOR: Mg. TORRES CHUNG, CÉSAR ROBERTO**

**LIMA-PERÚ**

**2020**

## **DEDICATORIA**

A mi padre José Rios por haberme forjado como persona, a mi madre Patricia Hidalgo por estar dispuesta a acompañarme en los momentos difíciles y a mi abuelo Manuel Hidalgo que sin su sacrificio y sus consejos no lo hubiéramos logrado. Gracias por su cariño y apoyo.

Angel Joao Rios Hidalgo

Dedico esta tesis a todas las personas que me dieron sus consejos y me proporcionaron su ayuda incondicional; entre ellas especialmente a mis padres, quienes me han ayudado en toda la trayectoria de mi vida y me enseñaron a nunca rendirme, a seguir mis sueños y no tambalear ante las dificultades que te trae la vida, porque algo mejor te deparara el futuro.

Jacqueline Rojas Vizarres

## **AGRADECIMIENTO**

Al asesor el ing. Cesar Torres Chung, por estar con nosotros en toda la etapa de la tesis, por escucharnos atentamente en lo que queríamos plasmar, por aconsejarnos y brindarnos su confianza. Y a nuestra Alma Mater, la Universidad Ricardo Palma, por ser nuestro segundo hogar y por enriquecernos personal y profesionalmente.

Angel Joao Rios y Jacqueline Rojas

## INDICE

RESUMEN .....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	xix
<b>CAPITULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Formulación y delimitación del problema .....	2
1.2.1. Problema General .....	2
1.2.2. Problemas específicos.....	2
1.3 Importancia y justificación del estudio .....	2
1.3.1 Económica y social .....	2
1.3.2 Metodológica y práctica.....	2
1.4 Delimitación del estudio .....	3
1.5 Objetivos de la Investigación.....	4
1.5.1 Objetivo general .....	4
1.5.2 Objetivos específicos .....	4
<b>CAPITULO II: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
2.1 Marco Histórico .....	5
2.2 Investigaciones relacionadas con el tema .....	6
2.2.1 Investigaciones nacionales.....	6
2.2.2 Investigaciones Internacionales.....	10
2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio .....	13
2.3.1 Mecánica de suelos.....	13
2.3.2 Riesgo Sísmico.....	14
2.3.3 Cimentación Superficial.....	28
2.3.4 Licuación .....	33
2.3.5 Mejoramiento de suelos .....	50

2.3.6 Estudio de las Inclusiones .....	57
2.3.7 Columnas de Grava.....	62
2.3.8 Inclusiones rígidas.....	77
2.3.9 Columnas de Modulo Controlado .....	85
2.3.10 Diseño de plataforma de transferencia de carga .....	92
2.3.11 Columna de Módulo Controlado y Columna de Grava .....	94
2.3.12 Métodos de Elementos Finitos .....	98
2.4 Definiciones de términos básicos .....	99
2.5 Hipótesis.....	101
2.5.1 General.....	101
2.5.2 Específico .....	101
<b>CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>102</b>
3.1 Tipo, método y diseño de la investigación .....	102
3.2 Población de estudio.....	102
3.3 Muestra.....	103
3.4 Relación entre variables.....	103
3.4.1 Variable independiente .....	103
3.4.2 Variable dependiente .....	103
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	103
<b>CAPITULO IV: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>105</b>
4.1 Descripción General del proyecto .....	105
4.1.1 Ubicación.....	105
4.2 Geología .....	106
4.2.1 Geología Local .....	106
4.2.2 Ensayos realizados .....	107
4.3 Aspectos Geodinámicas .....	107
4.3.1 Geodinámica Externa .....	107

4.3.2 Geodinámica Interna .....	108
4.4 Aspectos Geotécnicos .....	108
4.4.1 Estudios de suelos .....	108
4.4.2 Capacidad Portante .....	113
4.5 Peligro sísmico .....	113
4.6 Datos para la evaluación de Columna de Grava y Columna de Módulo Controlado .....	114
<b>CAPITULO V: EVALUACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	116
5.1 Evaluación de los parámetros geotécnicos .....	116
5.2 Evaluación de susceptibilidad de licuación .....	118
5.3 Evaluación de potencial de licuación .....	121
5.4 Evaluación de asentamientos sin mejoramiento .....	129
5.5 Evaluación de mejoramiento de suelos .....	129
5.6 Evaluación de mejoramiento con columnas de agregado .....	132
5.7 Evaluación de mejoramiento con Columnas de Módulo Controlado .....	147
5.8 Evaluación de análisis numérico .....	156
5.9 Propuesta de análisis del efecto de Licuación en Columnas de Módulo Controlado .....	169
5.10 Discusión de resultados .....	170
5.11 Contratación de Hipótesis .....	174
<b>CONCLUSIONES</b> .....	176
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	180
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	180
<b>ANEXOS</b> .....	191

## INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 Factor de seguridad frente ocurrencia de licuación.....	38
Tabla N° 2 Correcciones para SPT .....	48
Tabla N° 3 Eficiencias de martillo de SPT .....	49
Tabla N° 4 Probabilidad de licuación según rangos y efectos.....	50
Tabla N° 5 Secuencia para evaluar proyectos de mejoramientos de suelos .....	51
Tabla N° 6 Resistencia y geometría de Columna de agregado y Columna de Módulo Controlado .....	60
Tabla N° 7 Número de ciclos equivalente y tiempos de duración significativa para terremotos de diferentes magnitudes .....	66
Tabla N° 8 Propiedades de arcillas estimados, terraplén y Columna de Gava.....	74
Tabla N° 9 Propiedades Elasto-plásticas de las arcillas estimados .....	75
Tabla N° 10 Resultados de asentamientos para para distintos contrastes de rigidez, para ángulos de fricción 35 y 45, para 5 diferentes áreas de reemplazo. ....	75
Tabla N° 11 Propiedades físicas y mecánicas de suelo arcilloso (CL).....	76
Tabla N° 12 Consolidación vertical y radial para diferentes cargas.....	77
Tabla N° 13 Tabla para el valor de .....	94
Tabla N° 14 Coordenadas de la ubicación del proyecto .....	105
Tabla N° 15 Ubicación de calicatas .....	108
Tabla N° 16 Resultados de ensayos de laboratorio.....	109
Tabla N° 17 Resultados de ensayos de corte directo .....	109
Tabla N° 18 Resultados de ensayos químicos .....	109
Tabla N° 19 Resumen de líneas de refracción .....	110
Tabla N° 20 Resumen de MASW.....	110
Tabla N° 21 Resultados de perforaciones - Intercambio Vial Aeropuerto. ....	111
Tabla N° 22 Resultados SPT DDH-01 .....	111
Tabla N° 23 Resultados SPT DDH-02 .....	112
Tabla N° 24 Resultados SPT DDH-03 .....	112
Tabla N° 25 Datos generales del suelo del intercambio vial Aeropuerto. ....	113
Tabla N° 26 Resumen de Resultados de las corridas del Programa Risk.....	114
Tabla N° 27: Datos de suelos para evaluación de Columna de Grava .....	114
Tabla N° 28 Factores según Meyerhof, O. ....	116

Tabla N° 29 Factores Metodología de Vesic, A. (1973) .....	116
Tabla N° 30 Factores según ASSHTO LRFD (2014).....	117
Tabla N° 31 Datos requeridos para el criterio de Seed et al. 2003 .....	118
Tabla N° 32 Datos requeridos para el criterio de Bray, D. y Sancio, R.(2006).....	119
Tabla N° 33 Datos requeridos para el criterio de Adaparazi (2010) .....	119
Tabla N° 34 Datos requeridos para el Criterio de Adaparazi (2010).....	120
Tabla N° 35 Resultados de esfuerzos efectivos según DDH-01.....	121
Tabla N° 36 Resultados esfuerzos efectivos según DDH-02 .....	122
Tabla N° 37 Resultados esfuerzos efectivos según DDH-03 .....	122
Tabla N° 38 Correcciones para el ensayo de penetración estándar (SPT) del proyecto .....	123
Tabla N° 39 Resultados de esfuerzo cíclico resistente para una magnitud de sismo de 7.5 (CRR 7.5).....	123
Tabla N° 40 Resultados de esfuerzo cíclico resistente para una magnitud de sismo de 7.5 (CRR 7.5).....	124
Tabla N° 41 Resultados de esfuerzo cíclico resistente para una magnitud de sismo de 7.5 (CRR 7.5).....	124
Tabla N° 42 Resultados de factor de seguridad de licuación según DDH-01 .....	125
Tabla N° 43 Resultados de factor de seguridad de licuación según DDH-02 .....	126
Tabla N° 44 Resultados de factor de seguridad de licuación según DDH-03.....	126
Tabla N° 45 Resultados de probabilidad de licuación para DDH-01 .....	127
Tabla N° 46 Resultados de probabilidad de licuación para DDH-02 .....	128
Tabla N° 47 Resultados de probabilidad de licuación para DDH-03 .....	128
Tabla N° 48 Cálculo de asentamiento sin mejoramiento.....	129
Tabla N° 49 Resistencia y geometría de Columna de Agregado y Columna de Módulo Controlado. ....	130
Tabla N° 50 Secuencia para evaluar proyectos de mejoramientos de suelos .....	130
Tabla N° 51 Evaluación de alternativas de mejoramiento de suelos.....	131
Tabla N° 52 Cálculo de número de ciclos para que inicie licuación .....	133
Tabla N° 53 Número de ciclos equivalente y tiempos de duración significativa para M=7.5.....	134
Tabla N° 54 Resumen y relación $N_{eq}/N_l$ .....	135
Tabla N° 55 Datos y cálculo de $T_{ad}$ .....	135
Tabla N° 56 Distribución geométrica de Columnas de Grava.....	137



Tabla N° 57 Cálculo de razón de módulos transversales.....	137
Tabla N° 58 Mejoramiento con Columna de Grava para DDH-01 según Baez.....	138
Tabla N° 59 Mejoramiento con Columna de Grava para DDH-02 según Baez.....	138
Tabla N° 60 Mejoramiento con Columna de Grava para DDH-03 según Baez.....	139
Tabla N° 61 Factor de seguridad mínimo con Columna de Grava según Baez, J. (1995) .....	139
Tabla N° 62 Factor de seguridad con Columna de Grava según Rayamajhi.....	140
Tabla N° 63 Factor de seguridad con Columna de Grava según Rayamajhi.....	140
Tabla N° 64 Factor de seguridad con Columna de Grava según Rayamajhi.....	141
Tabla N° 65 Resultados de Probabilidad de Licuación para DDH-01 según Rayamajhi (2014).....	141
Tabla N° 66 Resultados de Probabilidad de Licuación para DDH-02 según Rayamajhi (2014).....	142
Tabla N° 67 Resultados De Probabilidad De Licuación Para DDH-03 según Rayamajhi (2014).....	142
Tabla N° 68 Diseño de Pila de Grava - Condición Mejorada por Corte .....	144
Tabla N° 69 Diseño de Pila de Grava - Condición Mejorada por Corte .....	145
Tabla N° 70 Diseño de Pila de Grava - Condición Mejorada por Corte .....	145
Tabla N° 71 Cálculo de Asentamiento en Zona de Mejoramiento con Columnas de Grava.....	147
Tabla N° 72 Cálculo Distribución Geometría de las Columnas de Módulo Controlado .....	148
Tabla N° 73 Cálculo de resistencia a fricción de fuste o capacidad de fuste. ....	149
Tabla N° 74 Resumen de ensayos especiales .....	150
Tabla N° 75 Cálculo de esfuerzo verticales.....	151
Tabla N° 76 Cálculo de capacidad de Columna de Módulo Controlado (CMC) .....	152
Tabla N° 77 Datos considerar para el cálculo de capacidad de la inclusión .....	153
Tabla N° 78 Datos generales método AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2014).....	153
Tabla N° 79 Criterios de diseño para Mejoramiento por Columna de Módulo Controlado. ....	155
Tabla N° 80 Capacidad Admisible de suelo mejorado con Columna de Módulo Controlado .....	155
Tabla N° 81 Cálculo de Razón de Pila – Espaciamiento (Ra).....	169

Tabla N° 82 Resumen de factores de seguridad y probabilidad de licuación.....	170
Tabla N° 83 Resultados de asentamientos para distintos contrastes de rigidez, para ángulos de fricción 35.....	171
Tabla N° 84 Interpolando resultados de asentamiento según Nuñez, F. (2017).....	171
Tabla N° 85 Resumen de factores de seguridad y probabilidad de licuación para suelo mejorado con Columna de Grava. ....	172
Tabla N° 86 Resumen de factores de seguridad y probabilidad de licuación para suelo mejorado con Columna de Grava. ....	172
Tabla N° 87 Resumen de factores de seguridad y probabilidad de licuación para suelo mejorado con Columna de Grava. ....	173

## INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1 Simbología de suelos según la clasificación unificada de suelos (SUCS)	14
Figura N° 2 Mapa Sísmico del Perú para el Periodo 1960 al 2019 .....	20
Figura N° 3 Choque de la placa de Nasca y la placa Sudamericana. ....	21
Figura N° 4 Falla de la capacidad de carga en un suelo bajo una cimentación continua rígida en grava .....	28
Figura N° 5 Áreas de Licuación de suelos En el Perú .....	36
Figura N° 6 Criterio de Seed et Al. (2003) .....	40
Figura N° 7 Criterio a la Susceptibilidad a la Licuación según Bray, J. y Sancio, R. (2006).....	40
Figura N° 8 Ubicación de los Sitios Estudiados en el Cuadro de Clasificación USBR .	41
Figura N° 9 Curvas de CRR ( $m=7.5$ , $\nu=1\text{atm}$ ) vs $(n1)60\text{cs}$ para probabilidades de licuación 15,50 y 85% .....	42
Figura N° 10 Curvas de activación de licuación basadas en SPT .....	43
Figura N° 11 Método de mejoramiento de suelos para diferentes tipos de suelos. ....	52
Figura N° 12 Procedimiento de instalación de Vibrocompactación.....	53
Figura N° 13 Procedimiento de instalación de Columna de Grava .....	54
Figura N° 14 Procedimiento de instalación de Columna de Grava .....	55
Figura N° 15 Procedimiento de instalación de Columna de Grava .....	55
Figura N° 16 Procedimiento de instalación de Compactación dinámica.....	56
Figura N° 17 Procedimiento de instalación de Drenes Sísmicos / Mechas Drenantes...	57
Figura N° 18 Esquema de diseño por celda unitaria.....	58
Figura N° 19 Relaciones de asentamientos de suelo con mejoramiento con Columna de Grava y suelo no mejorado. ....	59
Figura N° 20 Estados límite de modo de falla de terraplenes soportado por columnas.	61
Figura N° 21 Estado de servicio de terraplenes soportado por columnas .....	62
Figura N° 22 Relación de diámetro y separación de Columnas de Grava.....	64
Figura N° 23 Relación de diámetro y separación de Columnas de Grava según la presión de poros deseada. ....	65
Figura N° 24 Número de ciclos equivalentes según la magnitud del sismo.....	66
Figura N° 25 Número de ciclos para inicio de licuación según el esfuerzo cíclico actuante (CSR) y la densidad relativa.....	67
Figura N° 26 Distribución en planta de las inclusiones.....	68

Figura N° 27 Coeficiente según distribución en planta .....	69
Figura N° 28 Factor de aumento del esfuerzo lateral según profundidad .....	72
Figura N° 29 Porcentaje de contribución del esfuerzo de corte de las pilas de agregado según .....	73
Figura N° 30 Distribución del sistema de Inclusiones Rígidas .....	82
Figura N° 31 Funcionamiento de Inclusiones Rígidas .....	83
Figura N° 32 Funcionamiento de Inclusiones Rígidas .....	84
Figura N° 33 Funcionamiento de la Columna de Módulo Controlado.....	86
Figura N° 34 Secuencia constructiva CMC.....	87
Figura N° 35 Distribución de la carga hacia las Inclusiones Rígidas por diferentes métodos.....	89
Figura N° 36 Distribución de cargas de plataforma de transferencia de carga (LTP) a la inclusión ubicación del ángulo de fricción. ....	89
Figura N° 37 Distribución de cargas de método numéricos y analíticos.....	90
Figura N° 38 Esquema de plataforma de transferencia de carga (LTP) e Inclusiones Rígidas .....	92
Figura N° 39 Distribución de cargas en la Plataforma de Transferencia de Carga (LTP) según esquema triangular.....	93
Figura N° 40 Comparación de Columna de Grava y Columna de Módulo Controlado. ....	96
Figura N° 41 Esquema de discretización.....	98
Figura N° 42 Ubicación del Proyecto .....	106
Figura N° 43 Determinación de susceptibilidad de licuación según Seed 2003 .....	118
Figura N° 44 Determinación de susceptibilidad de licuación según Bray & Sancio (2006).....	119
Figura N° 45 Determinación de susceptibilidad de licuación según Adapazari et al 2003. ....	120
Figura N° 46 Determinación de susceptibilidad de licuación según Adapazari et al 2003 .....	121
Figura N° 47 Numero de ciclos para que inicia la licuación según Alba et al 1975 ....	133
Figura N° 48 Cálculo de numero equivalentes según Seed,H & Idris,I (1982).....	134
Figura N° 49 Cálculo de relación a/b según Seed, H y Booker,J (1977).....	136
Figura N° 50 Cálculo del Km según Salgado, J. et al 2007.....	143
Figura N° 51 Cálculo del PCshear según Salgado, J. et al 2007 .....	144

Figura N° 52 Calculando en la tabla de Priebe, J. (1995) el asentamiento del suelo con mejoramiento. ....	146
Figura N° 53 Aplicación del método en suelo estratificado .....	149
Figura N° 54 Cálculo de Método Landa.....	150
Figura N° 55 Método de Meyerhof, O. (1976).....	152
Figura N° 56 Obtención de factores de forma según AASHTO LRFD 2014 .....	154
Figura N° 57 Obtención de los factores de inclinación según AASHTO LRFD 2014	154
Figura N° 58 Construcción de Columnas de Módulo Controlado.....	156
Figura N° 59 Reporte de Materiales ingresados en el Programa Plaxis v20. ....	157
Figura N° 60 Modelamiento de la geometría y asignación de materiales .....	158
Figura N° 61 Resultado del análisis de consolidación en 5 días .....	159
Figura N° 62 Resultado del análisis de consolidación en 30 días. ....	159
Figura N° 63 Resultado del esfuerzo efectivo .....	160
Figura N° 64 Presión Efectiva en el corte A-A .....	161
Figura N° 65 Ingreso de propiedades y modelamiento de las Columnas de Grava y la plataforma de transferencia de carga. ....	162
Figura N° 66 Resultado del análisis de consolidación en 5 días. ....	163
Figura N° 67 Resultado del análisis de consolidación en 30 días .....	163
Figura N° 68 Resultado del esfuerzo efectivo .....	164
Figura N° 69 Presión Efectiva en el corte A-A. ....	164
Figura N° 70 Reporte de materiales ingresados en el programa Plaxis v20 en Columnas de Módulo Controlado. ....	165
Figura N° 71 Modelamiento de la geometría y asignación de materiales .....	166
Figura N° 72 Primera fase duración 5 días. ....	167
Figura N° 73 Segunda fase duración 30 días. ....	167
Figura N° 74 Resultado del esfuerzo efectivo .....	168
Figura N° 75 Presión Efectiva en el corte A-A. ....	168

## INDICE DE ANEXOS

Anexo N° 1: Matriz de consistencia .....	190
Anexo N° 2: Operacionalización de variable independiente .....	191
Anexo N° 3: Campo de aplicación de las principales técnicas de mejora de terreno... ..	192
Anexo N° 4: Flujograma de metodología de diseño.....	193
Anexo N° 5: Flujograma de metodología de diseño.....	194
Anexo N° 6: Flujograma de verificación de diseño.....	195
Anexo N° 7: Esquema de propuesta de Columnas de Grava.....	196
Anexo N° 8: Esquema de propuesta de Columnas de Módulo Controlado.....	197
Anexo N° 9: Presupuesto del proyecto de investigación .....	198
Anexo N° 10: Plano de Geología Local del Intercambio Aeropuerto. ....	199
Anexo N° 11: Plano de Ubicación de calicatas del Intercambio Aeropuerto. ....	200
Anexo N° 12: Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios. ....	201
Anexo N° 13: Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios. ....	202
Anexo N° 14: Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios. ....	203
Anexo N° 15 Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios. ....	204
Anexo N° 16: Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios. ....	205
Anexo N° 17: Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios. ....	206
Anexo N° 18: Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios. ....	207
Anexo N° 19: Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios. ....	208
Anexo N° 20: Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios. ....	209
Anexo N° 21: Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios. ....	210
Anexo N° 22: Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios. ....	211
Anexo N° 23: Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios. ....	212
Anexo N° 24: Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios. ....	213
Anexo N° 25: Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios .....	214
Anexo N° 26: Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios. ....	215
Anexo N° 27: Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios .....	216
Anexo N° 28 Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios. ....	217
Anexo N° 29: Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios. ....	218

Anexo N° 30: Informe de Perforación. DDH-01 .....	219
Anexo N° 31: Informe de Perforación DDH-01 .....	220
Anexo N° 32: Informe de Perforación DDH-02 .....	221
Anexo N° 33: Informe de Perforación DDH-02 .....	222
Anexo N° 34: Informe de Perforación DDH-02 .....	223
Anexo N° 35: Informe de Perforación DDH-03 .....	224
Anexo N° 36: Informe de Perforación DDH-03 .....	225
Anexo N° 37: % Recuperación Perforación DDH-01 .....	226
Anexo N° 38: % Recuperación Perforación DDH-02 .....	227
Anexo N° 39: % Recuperación Perforación DDH-03 .....	228
Anexo N° 40: Control de cajas Perforación.....	229
Anexo N° 41: Perfil de suelos de las Perforaciones. ....	230
Anexo N° 42: Ensayos Especiales de la perforación DDH-01 .....	231
Anexo N° 43: Ensayos Especiales de la perforación DDH-02 .....	232
Anexo N° 44: Ensayos Especiales de la perforación DDH-03 .....	233
Anexo N° 45: Informe de Refracción Sísmica – perfiles LS -17 y LS -18 .....	234
Anexo N° 46: Informe de Refracción Sísmica – perfiles LS -19 .....	235
Anexo N° 47: Informe de Refracción Sísmica – perfiles LS -20 .....	236
Anexo N° 48: Informe de MASW .....	237
Anexo N° 49: Informe de MASW .....	238
Anexo N° 50: Parámetros Dinámicos.....	239
Anexo N° 51: Parámetros Dinámicos.....	240
Anexo N° 52: Informe del Instituto geofísico del Perú de la actividad sísmica ocurrida en el área del Cusco.....	241
Anexo N° 53: Informe del Instituto geofísico del Perú de la actividad sísmica ocurrida en el área del Cusco.....	242
Anexo N° 54: Informe del Instituto geofísico del Perú de la actividad sísmica ocurrida en el área del Cusco.....	243
Anexo N° 55: Informe del Instituto geofísico del Perú de la actividad sísmica ocurrida en el área del Cusco.....	244
Anexo N° 56: Informe del Instituto geofísico del Perú de la actividad sísmica ocurrida en el área del Cusco.....	245
Anexo N° 57: Corridas del Programa Risk.....	246
Anexo N° 58: Corridas del Programa Risk.....	247

Anexo N° 59: Corridas del Programa Risk.....	248
Anexo N° 60: Corridas del Programa Risk.....	249
Anexo N° 61: Corridas del Programa Risk.....	250
Anexo N° 62: Corridas del Programa Risk.....	251
Anexo N° 63: Parámetros de Diseño Geotécnico.....	252
Anexo N° 64: Parámetros de Diseño Estructural.....	253
Anexo N° 65: Memoria de cálculo de la LTP.....	254
Anexo N° 66: Memoria de cálculo de la LTP.....	255
Anexo N° 67: Ficha Técnica de La Geomalla TX-160.....	256
Anexo N° 68: Ficha Técnica de La Geomalla TX-160.....	257



## RESUMEN

En esta tesis se busca analizar el efecto de licuación y los asentamientos sometidos en esta zona con formulación analítica y una modelización de elementos finitos con el fin plantear el mejoramiento del terreno de suelo licuable utilizando inclusiones que reducen los niveles de esfuerzo en el suelo circundante y proporciona un efecto de restricción a la deformación, para llevar a cabo la construcción del intercambio Aeropuerto en Cusco. En los estudios de suelos del proyecto se presentaron mayormente material limoso, arcillo – limoso y arcillas. Luego de realizar los análisis respectivos se optó por proponer una solución adecuada para minimizar los efectos de una posible falla por licuación y a la vez el mejoramiento de la capacidad portante del suelo.

Como parte de la investigación, se realizó un procedimiento de diseño para identificar la ocurrencia de licuación y la probabilidad que esta ocurra siguiendo la metodología de Boulagner, et al. (2014) y la Normativa Técnica de Edificación E.050 Suelos y Cimentaciones. Conocido el problema del suelo se evalúa la viabilidad de los posibles mejoramientos de suelos para mitigar la licuación, posterior a la evaluación de estas se planteó dos soluciones: Columna de Grava y la Columna de Módulo Controlado (CMC), ambas inclusiones con una plataforma de transferencia de carga.

Para las inclusiones planteadas se realizó la verificación de capacidad de carga, potencial de licuación y asentamientos con métodos analíticos y numéricos. Con ello se pudo demostrar que el efecto de licuación se redujo; para la Columna de Grava se obtuvieron efectos favorables en cuanto a los factores de seguridad de licuación obteniendo valores mayores de 1.0 y la probabilidad de que esta ocurre menores del 10%, además de un asentamiento de 1.87 pulgadas, resultados dentro de lo permisible según la normativa peruana; para la Columna de Módulo Controlado, según la metodología de diseño aplicada, se obtuvieron resultados aceptables de esfuerzo cortante de 1098.00 kN/m<sup>2</sup> obteniendo una mejora con respecto al terreno natural sin intervención de 301.90 kN/m<sup>2</sup> y asentamiento de 1.13 pulgadas, dentro de lo permisible. Se expondrán las cualidades de cada sistema, los resultados obtenidos y la discusión de estos. Finalmente, se expondrán las cualidades de cada sistema, los resultados obtenidos y la discusión de estos.

Palabras clave: Mejoramiento de Suelos, Inclusiones, Licuación, Columna de Grava, Columna de Módulo Controlado, asentamiento, método numérico, método analítico.

## ABSTRACT

This thesis seeks to analyze the liquefaction effect and settlements submitted in this area with analytical formulation and finite element modeling in order to propose the improvement of the liquefiable soil terrain using inclusions that reduce the stress levels in the surrounding soil and provides a deformation restriction effect, to carry out the construction of the Airport Interchange in Cusco. In the soil studies of the project, silt, clay - silty material and clays were mainly presented. After performing the selected analyzes, it was decided to propose an adequate solution to minimize the effects of a possible failure due to liquefaction and once the improvement of the bearing capacity of the soil.

As part of the research, a design procedure was carried out to identify the occurrence of liquefaction and the probability of it occurring following the methodology of Boulagner, et al. (2014) and the Technical Building Regulations E.050 Soils and Foundations. Once the soil problem is known, the viability of possible soil improvements is evaluated to mitigate liquefaction, after evaluating these, two solutions were proposed: Gravel Column and Controlled Modulus Column (CMC), both inclusions with a platform of load transfer.

For the proposed inclusions, the verification of load capacity, liquefaction potential and settlements was carried out with analytical and numerical methods. With this it was possible to show that the liquefaction effect was reduced; For the Gravel Column, favorable effects were obtained in terms of the liquefaction safety factors, obtaining values greater than 1.0 and the probability that this occurs less than 10%, in addition to a settlement of 1.87 inches, results within what is permissible according to the Peruvian regulations; For the Controlled Modulus Column, according to the applied design methodology, acceptable results of shear stress of 1098.00 kN / m<sup>2</sup> were obtained, obtaining an improvement with respect to the natural terrain without intervention of 301.90 kN / m<sup>2</sup> and settlement of 1.13 inches, within the permissible. The qualities of each system, the results obtained and the discussion of these will be exposed. Finally, the qualities of each system, the results obtained and the discussion of these will be exposed.

Keywords: Soil Improvement, Inclusions, Liquefaction, gravel Column, Controlled Modulus column, settlement, numerical method, analytical method.

## INTRODUCCIÓN

La licuación de suelos puede afectar la integridad de los proyectos viales en sus principales estructuras como intercambios viales, túneles, muros de suelo reforzados, muros de contención o puentes. Este efecto es inducido por los terremotos en suelos cohesivos y con presencia de nivel freático alto. Las consecuencias del efecto de licuación son catastróficas, las cuales pueden ser hundimientos, asentamientos diferenciales y colapso de la estructura.

En consecuencia y en mérito a lo enunciado, el trabajo de investigación está dividido en seis capítulos, estructurado de la siguiente manera:

En el Capítulo I: Planteamiento y delimitación del problema. – Se inicia con una descripción breve de los estudios del fenómeno de licuación en el Perú a consecuencia de la actividad sísmica. Así mismo, se plantea la formulación del problema, los objetivos de la investigación, la importancia y justificación de la investigación.

En el Capítulo II: Marco teórico. - Primero, se expone el marco histórico de presencia de licuación, el peligro asociado a este y la ocurrencia de este fenómeno en el Perú, también se revisa las investigaciones relacionadas con el tema, tanto nacionales e internacionales, las cuales tratan de la evaluación de licuación y estudios de mejoramiento de suelo como Columnas de Grava e Inclusiones Rígidas.

Continuando con el marco teórico, se presenta la estructura teórica y científica que sustenta el estudio: como alcances de mecánica de suelos, riesgo sísmico, cimentaciones superficiales, licuación, mejoramiento de suelos, estudio de inclusiones, el estudio detallado de Columnas de Grava e Inclusiones Rígidas (Columna de Módulo Controlado) y Métodos de Elementos Finitos.

En el Capítulo III: Marco metodológico. - Se presenta el marco metodológico, el cual describe el tipo, método y diseño de la investigación, la población de estudio, la relación entre variables, técnicas e instrumentos de recolección de datos, y la descripción de procedimientos de análisis para poder cumplir con el objetivo planteado de mejorar un suelo susceptible a licuación, utilizando inclusiones en la zona de estudio “Intercambio Vial Aeropuerto Chinchero – Cusco”, tomando en cuenta las particularidades de esta.

En el Capítulo IV: Desarrollo de la investigación. - Se presentan todos los datos considerados en el proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera

Cusco Chinchero - Urubamba en la Región Cusco Tramo 1 km 14+229.50 al 21+730” (MTC - 2020), desde la descripción general, como ubicación y accesibilidad, parámetros de geología local, ensayos de suelos realizados, y los aspectos geodinámicos. También se recopilaron los datos referentes a las investigaciones geotécnicas directas como calicatas y perforaciones (SPT); investigaciones geotécnicas indirectas como la refracción sísmica y el Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW); resumen de aceleraciones sísmicas, presentados en tablas de resumen para el posterior análisis.

Asimismo, se realizó convenientemente un resumen de parámetros geotécnicos obtenidos del proyecto mencionado e investigaciones referente al tema, para la evaluación de capacidad portante del suelo y estudio de inclusiones (Columnas de Grava y Columnas de Módulo Controlado).

En el Capítulo V: Evaluación de resultados. – En la evaluación de resultados se obtiene la capacidad portante del suelo superficial según autores como Meyerhof, O. (1972), Vesic, A. (1977) y el método AASHTO LRFD (2014) (American Association of State Highway and Transportation Officials), que tiene como finalidad evaluar preliminarmente el proyecto.

Luego se presenta la evaluación de susceptibilidad de licuación analizada por distintos autores como Seed, H. et al. (2003) Bray, J. & Sancio, R. (2006) y Adapazari (2010).

Una vez evaluado la susceptibilidad de licuación, se realiza una evaluación del potencial de licuación, el cual incluye investigaciones de campo más exigentes, el cual determinará la ocurrencia de licuación, para ello se siguió la metodología de Boulagner, R. (2014), quien recopila las investigaciones de varios autores como Seed, H. & Idris, I. (1999), Idris, I. & Boulagner, R. (2003 - 2008), y tomando en cuenta lo indicado en la norma peruana E.050, para el tipo de estructura que estamos tratando, se obtiene los factores de seguridad de licuación adecuados. Conjuntamente a la evaluación preliminar se analiza los asentamientos del suelo sin mejoramiento.

Una vez estando seguros que el suelo presenta riesgo de licuación, se analiza la viabilidad de los posibles tipos de mejoramientos aplicables según el problema, a través de las recomendaciones de la Federal Highway Administration (FHWA, 2017) en su manual de métodos de modificación de suelos del departamento de transporte de Estados Unidos.

Después de haber evaluado las posibles soluciones, mediante una matriz de elección de mejoramientos de suelos se optó por elegir la Columna de Grava y la Columna de Módulo Controlado, teniendo en cuenta que esta investigación tiene la finalidad de evaluar dos metodologías similares, pero con diferente enfoque en la forma de reducir el potencial de licuación.

Para el diseño, primeramente, se evalúa el método de Columnas de Grava teniendo en cuenta el mejoramiento por drenaje y densificación del suelo que esta provee, se usa la metodología de Baez, J. (1995), Rayamajhi, D. (2014) y Green, R. (2008), donde se obtiene los factores de seguridad del potencial de licuación y la probabilidad que esta ocurra, también se evaluó los asentamientos del suelo mejorado con Columnas de Grava.

Posteriormente, se evalúa el método de Columnas de Módulo Controlado teniendo en cuenta la gran densificación que esta provee, para el diseño se tomó en cuenta la capacidad portante que otorga la columna trabajando conjuntamente con la matriz de suelo, para ello se siguió la metodología de Meyerhof, O. (1976) y Coyle & Castellano (1981), y para la evaluación de licuación se propone una metodología deducida de Mohr Coulomb donde evaluamos los esfuerzos cortantes del suelo y del suelo mejorado apoyándonos con métodos numéricos y analíticos.

Finalmente, con todo lo evaluado, se realiza la Discusión de Resultados y Contratación de Hipótesis.

En el Capítulo 6: Conclusiones - Se presenta la evaluación de conclusiones en el cual se discute los datos obtenidos en el capítulo V “Evaluación de Resultados”.

# **CAPITULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA**

## **1.1 Descripción del problema**

El transporte es un medio necesario para el desplazamiento y comunicación de un país, ante esto el gobierno peruano construye nuevas vías de acceso, ya sean carreteras, puentes, caminos, túneles, entre otros, con el fin de aumentar el bienestar de los habitantes en zonas rurales y promover la integración de regiones que permitan un desarrollo social y económico generando oportunidades en todo aspecto.

Perú al ser un país propenso a los sismos y al presentar fallas geológicas, debido a su cercanía con el cinturón de fuego, trae como consecuencia problemas geotécnicos (deslizamiento de taludes, asentamientos diferenciales y licuación de suelos).

El fenómeno de la licuación, según González, L. (2002), provoca el fallo de las cimentaciones, rotura de taludes y deslizamientos, generando pérdidas económicas, afectando así a diferentes obras de infraestructura vial, minería y construcción.

Según Alva, J. (2007), en sus estudios realizados del fenómeno de licuación en el Perú, recopila datos de diferentes investigadores desde el siglo XVI hasta la actualidad, ha podido evidenciar el fenómeno de licuación en suelos de la costa, regiones de montaña y selva del Perú, tras el efecto del sismo. Menciona también que el efecto de licuación en suelos del Perú ocurre por efecto de la actividad sísmica que es causada por la subducción de la Placa de Nazca debajo de la Placa Sudamericana, así como también por actividad de fallas por placas continentales.

Ante esta problemática, se han implementado distintas técnicas de modificación de suelos, entre ellas los métodos de mejoramiento de fundación, aumentando el rendimiento del diseño y/o operaciones de carga. En esta tesis se investigó el fenómeno de licuación y el sistema de mejoramiento de suelos mediante Columnas de Grava y Columnas de Módulo Controlado aplicado al Intercambio Vial Aeropuerto ubicado en el distrito de Chincheros, provincia de Cuzco - Perú, la cual es nuestra muestra de estudio.

Dicha muestra, según los estudios de laboratorio de suelos del proyecto, presenta nivel freático elevado y suelos limo - arcillosos, con lo que se infiere la baja capacidad portante, lo cual aumenta la posibilidad de presentar una falla por licuación.

## 1.2 Formulación y delimitación del problema

### 1.2.1. Problema General

¿Cómo mejorar el suelo en zona susceptible a licuación utilizando inclusiones, Intercambio Vial Aeropuerto, Chincheros-Cusco?

### 1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo evaluar los parámetros geotécnicos para la identificación de zonas susceptibles a licuación?
- ¿Qué normativas y manuales existentes para la elección y el diseño de inclusiones son aplicables para la zona de estudio?
- ¿Cómo el sistema de inclusiones mejora los suelos, minimizando los efectos de una posible falla del suelo por licuación durante un movimiento sísmico utilizando métodos analítico y numérico?
- ¿Cómo analizar los resultados obtenidos de la propuesta de diseño a la zona de estudio?

## 1.3 Importancia y justificación del estudio

### 1.3.1 Económica y social

Cusco consta de 1'205,527 habitantes, según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2017) siendo su principal actividad económica el turismo, por eso el gobierno peruano, para abarcar la gran demanda de turistas cada año, tiene muchos proyectos para esta ciudad, uno de estos es el Proyecto construcción, mejoramiento y rehabilitación de la Carretera Cusco - Chincheros - Urubamba en el tramo 1 km. 14+229.5 al 21+730, del cual esta tesis se enfocará en el Intercambio vial Aeropuerto, además de buscar resolver el problema económico por el deterioro del patrimonio nacional, buscando que la infraestructura proyectada tenga un tiempo de vida útil más prolongado y que sea seguro para todo usuario. Además, con ello se busca reducir las problemáticas sociales que

una infraestructura deteriorada generaría como la pobreza, así como también inestabilidad laboral. La creación de la infraestructura mejoraría la calidad de vida de los habitantes y promovería e impulsaría el desarrollo urbano sostenible.

### 1.3.2 Metodológica y práctica

En esta investigación se busca analizar la probabilidad de licuación y los asentamientos sometidos en esta zona, mediante métodos analíticos y numéricos. Con ello poder plantear el mejoramiento del terreno de suelo utilizando inclusiones, capaces de soportar los niveles de estrés del suelo actuantes y proporcionando un efecto de restricción de la deformación.

Por consiguiente, se formulará un proceso de gestión para la evaluación de mejoramientos de suelos considerando los alcances que tiene la aplicación de cada método.

Con todo ello, se pretende que los alcances de nuestra investigación sean útiles para la elaboración de un futuro manual o que se incluya en la normativa peruana como parte del diseño de mejoramiento de suelos y con ello evitar cualquier tipo de incertidumbre, además servir de guía a futuros consultores. Esto traería una mejora en los procesos en cuanto al estudio e implementación de infraestructuras expuestas a suelos licuables obteniendo una infraestructura menos vulnerable y segura.

### 1.4 Delimitación del estudio

El estudio se delimita técnicamente al análisis de los parámetros geotécnicos obtenidos en campo y laboratorio del Intercambio Vial Aeropuerto. Como complemento se precisa el uso de los diferentes manuales y artículos, que plantean diversas metodologías de diseño para la obtención de la mejor solución. Las metodologías usadas son definidas por diversos autores especializados en el diseño de inclusiones y evaluación de suelos licuables, cuya aplicación consta de la evaluación de los parámetros geotécnicos del proyecto, ya sea por métodos analíticos o numéricos, que tienen la finalidad obtener un diseño fiable y óptimo.

Los métodos de mejoramiento por inclusión contienen procesos definidos por distintas empresas especializadas en el rubro, que servirán de apoyo para la



elaboración de esta investigación. También se considera la gestión que proponga la entidad nacional encargada de aprobar los diseños propuestos. Se precisa el entorno económico que influye la estructura, por lo cual la puesta en marcha deberá ser en el menor tiempo posible y calidad aceptable.

Finalmente, se considera el aspecto tecnológico, debido a la maquinaria y mano de obra especializada que esta conlleva. En el rubro de soluciones geotécnicas en nuestro país son pocas las empresas que proporcionan el servicio de instalación de Columnas de Grava o de Columnas de Módulo Controlado, para lo cual la investigación se delimita a las especificaciones técnicas que estos proporcionen.

## 1.5 Objetivos de la Investigación

### 1.5.1 Objetivo general

- Mejorar el suelo en zona susceptible a licuación utilizando inclusiones, intercambio aeropuerto Chincheros - Cusco.

### 1.5.2 Objetivos específicos

- Evaluar los parámetros geotécnicos para la identificación de zonas susceptibles a licuación.
- Identificar las normativas y manuales existentes para la elección y el diseño de inclusiones son aplicables para nuestra zona de estudio.
- Demostrar que el sistema de inclusiones mejora los suelos, minimizando los efectos de una posible falla del suelo por licuación durante un movimiento sísmico utilizando métodos analítico y numérico.
- Analizar los resultados obtenidos de nuestra propuesta de diseño a nuestra zona de estudio.

## CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Marco Histórico

El interés de comprender la manifestación del sismo, sus efectos relacionados con el comportamiento del suelo e impacto a las creaciones humanas, se remonta desde tiempos remotos. En la antigüedad, a las eventualidades sísmicas se le vinculaba con una explicación mítica, relacionada a un castigo divino. A medida que avanzaba el tiempo, se dejó de lado estas explicaciones y se enfocaron en darle un sentido racional a estos fenómenos sísmicos. Gracias al deseo de comprender como suceden las cosas, muchos autores dieron su aporte en la recopilación de datos tecnológicos. En 1840 con la invención del telégrafo, revolucionando en el ámbito investigativo, se contribuyó en la obtención de datos más eficientes. Los investigadores tenían la necesidad de predecir el acontecimiento sísmico lo más preciso posible, es así que se logra diseñar el mapa de sismicidad mundial, donde se identifica la zona llamada “Cinturón del Fuego del Pacífico” que libera más del 80% de energía desde su interior produciendo sismos y actividad volcánica. Cabe señalar que Perú se encuentra dentro de esta zona altamente sísmica.

Tavera H. (2014) en su artículo sobre evaluación del peligro asociado a los sismos y efectos secundarios en Perú, señala que el proceso que da origen a muchas magnitudes y focos sísmicos en el Perú está asociado a la convergencia y subducción de la placa de Nazca (Oceánica) por debajo de la Sudamericana (Continental). Esta fricción da lugar a tres principales fuentes sismogénicas (Castillo, 1993): La superficie de fricción entre las placas de Nazca y Sudamericana, da lugar a sismos con magnitud 8 a más que según en la escala de Richter clasificada en Cataclismo, causando graves daños importantes a cientos kilómetros a la redonda, como los casos de Arequipa 2001 y Pisco 2007; la presencia de fallas geológicas de diversos tamaños por la deformación de la corteza occidental origina sismos alrededor 6,5 de magnitud en la escala de Richter clasificada Fuerte, causando destrucción de áreas pobladas a 160 kilómetros a la redonda, como los sucesos en San Martín 1990 y 1991; la última fuente se le atribuye a la deformación interna que está debajo de la placa de Nazca a más de 100 kilómetros de profundidad con razón de sismos de 7 grados de magnitud, dando como consecuencia el proceso de licuación en las regiones andinas y sub andinas.

La licuación de los suelos según González, L. (2002), en su libro de Ingeniería Geológica define que este fenómeno se manifiesta en depósitos de suelos jóvenes de arenas limosas, limos arenosos, gravas arenosas en estado saturado. Dichas partículas de suelo son sometidas a fuerzas laterales y se reacomodan compactándose entre ellas, esto genera una excesiva presión intersticial (por falta de drenaje) causando una falla por resistencia al cortante haciendo que el material se comporte como líquido. El suelo al no tener consistencia presenta asentamientos diferenciales, grandes agrietamientos, salida del agua por volcancitos de lodo, causando problemas significativos.

Alva, J. (2019), en su artículo de Actualización de la Ocurrencia del Fenómeno de Licuación de Suelos en el Perú, elabora una recopilación de todos los sismos que hayan causado el fenómeno de licuación y los representa en un mapa de zonas afectadas en el Perú. Conviene señalar a dos sismos ocurridos en Cusco en 1650 y 1950, donde ocurrió el colapso de todas las estructuras del área, la formación de extensas zonas de fisuraciones y fracturas, que durante la actividad sísmica surgieron violentamente chorros de agua que alcanzaron hasta 2 metros de altura y el drástico alzamiento del nivel freático en toda la ciudad. Por este motivo, surge la necesidad de tratar a estos suelos blandos saturados, para que no generen la probabilidad del fenómeno de licuación, se crearon técnicas de construcción para la mejora del terreno de fundación.

## 2.2 Investigaciones relacionadas con el tema

### 2.2.1 Investigaciones nacionales

Puma M. y Rincón, P. (2015) en su tesis “Evaluación del Potencial de Licuación del Material de Relave en la Presa Zona Norte en la Mina Cobriza – Perú” tiene como objetivo identificar los factores que influyen la falla por licuación en el material de relave Zona Norte en la mina Cobriza para evitar problemas en la planta concentradora que se encuentra al pie de la presa. Finalmente se concluye que los resultados demuestran la existencia de un alto potencial de licuación del material de relave en la presa, considerando una aceleración de las fuentes sismogénicas históricas, obteniendo un factor de seguridad de licuación de valor promedio de 1.3. Además, se determina la aceleración mínima necesaria donde iniciaría el proceso de licuación del material de relave.

Beltrán, J. y Días, D. (2018) en su tesis “Análisis de la Capacidad de Carga Admisible de los Suelos de Cimentación del Complejo Arqueológico Chan – Chan Debido al Ascenso del Nivel Freático” tiene como objetivo analizar la variación de capacidad de carga admisible del suelo sobre la carga actuante de la zona como consecuencia de la elevación del nivel freático, con la finalidad de dar algunas soluciones. Concluye que ante un incremento de 0.80 m de profundidad del nivel freático, el suelo soportará una capacidad de carga de  $1.20 \text{ kg/cm}^2$ ; mientras que con el método de equilibrio limite a 0.40 m de profundidad soportará  $1.17 \text{ kg/cm}^2$ . Esta diferencia de  $300 \text{ kg/m}^2$  podría superarse fácilmente con la sobrecarga del suelo lo cual provocaría una falla. Finalmente se recomienda la implementación de un sistema de subdrenaje.

El autor Poves, J. (2017) realizó una investigación experimental de la influencia de las Columnas de Grava en suelos arcillosos, evaluando los asentamientos y la consolidación. Para ello el autor plantea las siguientes consideraciones para el mejoramiento de suelos; como problemática, el aumento de construcciones rurales y urbanas sobre suelos cohesivos con gran cantidad de humedad; como métodos más empleados, la Precarga y las Mechas drenantes, Compactación dinámica, Jet Grouting, Vibroflotación, Vibrosustitución y Vibrodesplazamiento; como criterios para la elección de la solución, el tipo de suelo, el problema a resolver y el tiempo de ejecución de obra; y como objetivos del mejoramiento con Columna de Grava, evitar asentamientos, acelerar la consolidación, aumentar la capacidad portante, evitar el deslizamiento, reducir la posibilidad de licuación y reducir la contracción y expansión de suelos. Una vez decidido el empleo de Columnas de Grava, el autor define los tipos, procedimiento y modelo teórico a seguir. Teniendo en cuenta que el concepto es similar a la Vibroflotación o Vibrocompactación, pero aplicado a suelos cohesivos, desarrollado en cuatro etapas de ejecución: penetración, ensanche de la perforación, aporte de grava y compactación por vibración de esta. También puede existir una diferencia de método de construcción como: vía seca con descarga interior, vía seca rellena desde la superficie y vía húmeda. Para el análisis del modelo teórico se describe el criterio de la celda unitaria, que define un parámetro de razón de sustitución (área de Columna de Grava entre el área tributaria), los cuales sirven como parámetros para definir la consolidación radial. Además, se menciona los análisis

de los siguientes autores: Priebe (1995), Balaam y Booker (1983) y Van Impe de Beer (1983), y la teoría de consolidación unidimensional de Terzaghi. El autor toma como población de estudio los suelos cohesivos tipo CL ubicados en el sector de Palian, Huancayo y como muestra las calicatas extraídas. Finalmente, como conclusión se pudo demostrar que las Columnas de Grava aceleran el proceso de consolidación y ayudan a reducir las deformaciones verticales.

El autor Zamora, J. (2017), evalúa para el tratamiento de suelos blandos los métodos de Precarga, Drenes Verticales y Columnas de Grava, entre los más utilizados, además menciona la estabilización con cal y Compactación Dinámica. En su trabajo enfatiza la aplicación de mejora de suelos blandos, en ejecución de terraplenes con fines de vías de carretera, ferrocarriles y otras obras civiles donde se requieran. Además, el autor recomienda una secuencia para evaluar el diseño de mejoramiento de suelo donde analiza la estabilidad y el tiempo de consolidación; si el tiempo de consolidación es muy elevado se analizará con Drenes Verticales y si este no llegase a ser suficiente se propondría el método de Columnas de Grava. De forma general recomienda que, para los diseños de Drenes Verticales y Columna de Grava, estos se deberán extender lateralmente una distancia igual a un tercio de la altura del terraplén. Siguiendo con las consideraciones de diseño, se calcula el asentamiento usando la teoría de consolidación y de elementos finitos. También se menciona que, en el análisis de suelos blandos el parámetro más importante es la resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ), pues es de interés conocer el análisis de estabilidad a corto plazo, durante y al final de la construcción. Por otro lado, se menciona que se requiere los ensayos de consolidación unidimensional y resistencia al corte para el método de Precarga (método efectivo y económico), no obstante, el proceso demora mucho tiempo. Finalmente, el autor concluye, debido al requerimiento del proyecto y por ser un método que acelera los procesos de consolidación es recomendable utilizar Drenes Verticales, espaciados cada 1.5 a 2.5 m<sup>2</sup> en una malla triangular, se explica que su diseño consiste en lograr un grado de consolidación determinado, o a la inversa, a partir de un grado de consolidación deseado, se halla una separación entre drenes. Para el método de Columnas de Grava, menciona que mejoran la resistencia del suelo, ayudan a disipar presiones intersticiales, y deben tener una distribución triangular espaciado una columna por cada 6 a 8 m<sup>2</sup>.

Espinoza, C. y Torres, C. (2019), en su tesis de “Evaluación Técnica y Económica Para el Mejoramiento de Suelos Finos con Fines de Cimentación, por Medio de Compactación Dinámica e Inclusiones Rígidas”, tuvo como objetivo examinar el mejoramiento de suelos blandos a través de la mejora de terreno sin adiciones en suelos no cohesivos o materiales de relleno (Compactación Dinámica) y mejora del terreno con Inclusiones Rígidas analizado de manera técnica - económica. Las muestras de estudio fueron los ensayos de campo obtenidos en la zona de Sub Lote 5 del terreno rustico San Javier Alto, ubicado a la altura del kilómetro 62 de la Panamericana Sur, Lima - Perú. La investigación fue de tipo descriptivo, debido a que se describieron las técnicas de mejoramiento, y correlacional dado a la relación entre las variables. Concluyó que el suelo en estado natural tenía una capacidad portante  $0.8 \text{ kg/cm}^2$  y un asentamiento de tipo elástico de 6.8 cm. La técnica de Compactación Dinámica tuvo como resultado final un aumento en la capacidad portante de  $2.5 \text{ kg/cm}^2$  y un asentamiento de tipo elástico de 0.6 cm. La capacidad de carga sobre toda la zona, con el método de Inclusiones Rígidas, da un valor de  $6.15 \text{ km/cm}^2$ . Se compara el costo por metro cuadrado de los dos métodos resultando que las Inclusiones Rígidas son más costosas que el método de Compactación Dinámica (la Inclusión Rígida de S/.147.31 contra la Compactación dinámica de S/.50.03). Finalmente se recomienda que es importante comparar los resultados obtenidos del ensayo de penetración estándar (SPT) con los resultados obtenidos por las técnicas de compactación.

Medina, P. (2018) en su tesis “Mejoramiento de Terreno en Suelo Licuable Utilizando Inclusiones Rígidas” tiene como objetivo utilizar el método de las Inclusiones Rígidas para el mejoramiento de la ampliación de los servicios del Centro Integral de Atención al Adulto Mayor (CIAM) en La Punta, Callao - Perú. Las muestras de estudio son todos los ensayos en los laboratorios y los ensayos In – Situ del proyecto y tipo de investigación cualitativa. Finalmente se tiene como conclusión que la investigación se basó en el proceso de construcción describiendo cada etapa de esta. El autor no toma en cuenta el método de diseño, como resolver el problema de licuación, cálculo de asentamiento ni hace referencia algún manual para el diseño. Cabe señalar que, en la normativa peruana aún falta un acápite específico sobre diseño de mejoramiento de suelos con problemas de licuación.

Valdiviezo, K. (2019), en sus tesis del uso de Columna de Grava para el mejoramiento de capacidad portante, se puede comprobar el incremento de esta característica. Se evaluó experimentalmente por prueba de módulo de rigidez, la cual se somete a una carga específica a las Pilas de Grava, y por métodos analíticos para la medición de la capacidad portante, antes y después de implementar el sistema. Con ello se cree que es necesario los ensayos de laboratorio y de campo como: SPT, MASW, corte directo, contenido de humedad y límites de Atterberg para evaluar este tipo de proyectos. Como conclusión se tiene el aumento de capacidad portante de 24.66% a 81.43% en los estribos y pilares de la estructura analizada.

### 2.2.2 Investigaciones Internacionales

Según Amini, R. (2015), en su tesis doctoral “Physical Modelling of Vibro stone Column using recycled aggregates” menciona que existe una variedad de métodos de mejora de la fundación del suelo tales como Drenajes Verticales, Inclusiones Rígidas, Jet Grouting, Compactación Dinámica y técnicas de vibración. La técnica utilizada debe ser seleccionada para cumplir con las necesidades del proyecto, aspectos como la mejora de la capacidad admisible, estabilidad global, reducción de los asentamientos y/o control del agua subterránea. Los métodos de mejoramiento de suelo se dividen en 4 principales categorías: mecánica (transforma el suelo para que varíen las condiciones de carga y estrés), hidráulica (optimizando el drenaje y la filtración del suelo), química (alterando químicamente las características del suelo) y refuerzo (mejorando la compresión y la resistencia a la tracción del suelo desde su estado estructural). En esta investigación el autor se centra en el método de Vibro - Stone Colum (VSC). El rendimiento de las VSC depende de la calidad de los agregados utilizados y el suelo circundante, para ello hace una comparación de la instalación con agregados primarios (granito) y tres reciclados (concreto triturado y ladrillo, agregado de cenizas de fondo de incinerador tipos 1 y 2), con diferentes tipos de ensayos en la instalación.

Según la tesis correspondiente a Gómez, R. (2012), “Inclusiones Rígidas - Análisis comparativo de los Métodos Analíticos y los Métodos Numéricos” tuvo como objetivo la investigación del estado de arte de los métodos analíticos

comparándolos con los métodos numéricos considerando la influencia de la capa de reparto con los asentamientos en la plataforma de transferencia de carga. Se consideró la interacción de suelo y estructura para el cálculo de las deformaciones. La muestra de estudio es la Inclusión Rígida. El resalta la importancia de dos elementos la plataforma de transferencia carga (Load transfer Platform - LTP) y las Inclusiones Rígidas. Para el análisis se usaron las diferentes normativas y recomendaciones internacionales. Finalmente, se concluye que existen diferencias entre los diseños de las Inclusiones Rígidas por métodos analíticos; unos autores se centran en el dimensionamiento de la capa de reparto, ya que es la que transfiere la carga de la estructura a las inclusiones y otros autores priorizan las dimensiones de las inclusiones calculando los asentamientos, con el aumento del módulo de deformación se disminuye el ángulo de transferencia de tensiones. Complementa con la comparación entre los métodos analíticos y los métodos numéricos resultando en el cálculo de asentamientos semejantes; el nivel neutro de las fricciones negativas y positivas del método numérico se encuentra a mayor profundidad que el método analítico también la relación de módulos está directamente relacionada con la transferencia de tensiones.

Según el autor Núñez, S. (2017) en su tesis “Control de Asentamientos en Terraplenes Construidos sobre Suelo Fino por Medio de Métodos de Mejoramiento de Suelos Basados en Vibrosustitución” hace una comparación entre los modelos simplificados para el cálculo de asentamientos realizados por Priebe, H. (1995), que propuso una metodología empleando de ábacos; el modelo de Bachus, R. (1983), que actualmente es la metodología plasmada en el manual de la FHWA (2017); y con el modelamiento numérico realizado mediante el software GeoSlope propuesto por Zhang et. al (2013) (Column Wall Method), que consiste en modelar las Columnas de Grava como muros continuos y plasmarlos en un software de elementos finitos. El autor considera los siguientes criterios para el diseño de las Columnas de Grava, como el diámetro, la rigidez, el área tributaria, la distribución en planta y combinación de propiedades (Columna de Grava + suelo natural). Para la modelación, considera un suelo tipo arcilloso de diferentes consistencias (blanda, media y firme) y propone valores estimados para el peso unitario, peso unitario saturado, índice de vacíos, índice de compresión, módulo de elasticidad, altura del suelo y altura terraplén con la finalidad de



obtener los asentamientos del suelo. Las limitaciones de esta investigación es que solo se usa una separación de pilas de cada 2m, no considera una plataforma de transferencia, solo se considera un estrato único de arcilla (esto haría que se obtengan valores muy críticos) y no se considera un análisis de drenaje.

En la investigación de Pollan, J. (2014) sobre fiabilidad del diseño y construcción de Columnas de Grava, se proporciona alcances del mejoramiento de terreno menciona, además se menciona que existe incertidumbre en la interacción terreno – columna. Se concluye que este parámetro de interacción influye en la fiabilidad de algunos aspectos del proyecto como la estimación de asientos, tiempos de consolidación y capacidad portante.

Martínez, E. (2013) en su tesis “Refuerzo de Suelos Mediante el Uso de Inclusiones de Grava Compactada para Apoyo de Cimentaciones Superficiales Rígidas” tuvo como objetivo exponer el mejoramiento de suelos por Inclusiones de Grava Compactada determinando las bases teóricas, estudio del diseño y construcción. En su análisis se presenta una cimentación reforzada utilizando grava compactada, modelado mediante Modelo de Elementos Finitos (MEF), con el fin de comparar la condición inicial (el subsuelo sin mejoramiento) contra la condición final (con el mejoramiento); cabe resaltar que se tuvo una metodología de investigación tipo cuantitativa. Finalmente, el autor concluyó que, en la zona central de la losa de cimentación, con el Modelo de Elementos Finitos (MEF) se llegó a tener un asentamiento de 6.11 cm y con el método analítico 7.91 cm, también que la repartición de esfuerzos mediante la capa de repartición y las pilas de grava compactada soportaban un 60% de estos. A una profundidad de 0.5 m de las capas de reparto las inclusiones recibían un 80% de estos esfuerzos y los otros 20% el suelo; y a los 3m de profundidad de las capas de reparto, a mitad de donde se encuentra el estrato problemático, las inclusiones recibían un 98% de la carga, no permitiendo que dicho estrato presente deformaciones considerables que pongan en riesgo a la estructura.

Cabezas, M. (2015) en su tesis “Modelación del Comportamiento de Pilotes de Grava en Suelo Tipo Limo, Mediante Análisis de Elementos Finitos” tuvo como objetivo modelar el comportamiento que tienen las Columnas de Grava utilizando el software geotécnico PLAXIS 3D, con una metodología cuantitativa. El autor

concluyó que uno de los factores principales en el modelamiento del sistema es el espaciamiento entre pilotes, ya que a medida que la distancia aumenta disminuye el valor del desplazamiento máximo; también se disminuye el desplazamiento máximo al alargar los pilotes, contrariamente al aumentar el diámetro de los pilotes que aumenta el desplazamiento máximo; en general la solución por el método de pilas de grava reduce los asentamientos a valores mínimos.

Huu Hung Nguyen, (2018) “Effects of Installation Sequence of Concrete Rigid Inclusions by Ground - Displacement Piling Method on Previously Installed Columns” evalúa los efectos de instalación de Columnas de Módulo Controlado con métodos numéricos y experimentales, asimismo estudia la secuencia de instalación y el comportamiento de la inclusión a una edad temprana. Concluye que ha medida se va dando la secuencia de instalación se obtiene resultados de las diferencias en la interacción de suelo columna.

Simon, B. (2017) en su documento “General Report S5 Rigid Inclusions and Stone Columns” nos menciona las características que tienen las técnicas en común como ventajas y desventajas. Se revisa las técnicas existentes para una mayor investigación y concluye con la recopilación de información sobre las técnicas de estos dos diseños (Inclusiones Rígidas y Columnas de Grava) como una vista general de los principales requerimiento y exigencias, resalta que existen varios trabajos donde se proponen datos interesantes, especialmente relacionados con pruebas a escala real que pueden ser de gran utilidad para calibrar los modelos de cálculo actuales.

## 2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio

### 2.3.1 Mecánica de suelos

Para poder alinearnos con la normativa vigente en el Perú, la cual es la Norma Técnica de Edificaciones E.050 correspondiente a Suelos y Cimentaciones (2018) se usará las recomendaciones y clasificación de suelos que esta usa.

Figura N° 1

Simbología de suelos según la clasificación unificada de suelos (SUCS)

DIVISIONES MAYORES		SÍMBOLO		DESCRIPCIÓN
		SUCS	GRÁFICO	
SUELOS GRANULARES	GRAVA Y SUELOS GRAVOSOS	GW		GRAVA GRADUADA BIEN
		GP		GRAVA GRADUADA MAL
		GM		GRAVA LIMOSA
		GC		GRAVA ARCILLOSA
	ARENA Y SUELOS ARENOSOS	SW		ARENA GRADUADA BIEN
		SP		ARENA GRADUADA MAL
		SM		ARENA LIMOSA
		SC		ARENA ARCILLOSA
SUELOS FINOS	LIMOS Y ARCILLAS (LL < 50)	ML		LIMO INORGÁNICO DE BAJA PLASTICIDAD
		CL		ARCILLA INORGÁNICA DE BAJA PLASTICIDAD
		OL		LIMO ORGÁNICO O ARCILLA ORGÁNICA DE BAJA PLASTICIDAD
	LIMOS Y ARCILLAS (LL > 50)	MH		LIMO INORGÁNICO DE ALTA PLASTICIDAD
		CH		ARCILLA INORGÁNICA DE ALTA PLASTICIDAD
		OH		LIMO ORGÁNICO O ARCILLA ORGÁNICA DE ALTA PLASTICIDAD

Nota: Simbología referencial tomada de la Norma Técnica Peruana de Edificaciones E.050 correspondiente a suelos y cimentaciones.

### 2.3.2 Riesgo Sísmico

- Generalidades:

Según Kramer, S. (1996), en muchas áreas del mundo, la amenaza de terremotos y su afectación en las actividades humanas es suficiente para requerir una cuidadosa consideración en el diseño de estructuras e instalaciones. El diseño de estas estructuras debe soportar un cierto nivel de agitación del suelo, y la resistencia al movimiento del suelo se caracteriza por parámetros específicos que resultan ser el problema más difícil e importantes de la ingeniería geotécnica. Para evaluar los peligros sísmicos, para un sitio particular, se deben identificar todas las posibles fuentes de actividad sísmica

y evaluar su potencial para generar futuros movimientos sísmicos fuertes. La identificación de fuentes sísmicas requiere cierto trabajo de detección que deben ser observadas e interpretadas. La disponibilidad de sismógrafos y redes sismográficas modernas ha hecho que la observación e interpretación de los terremotos actuales sea bastante conveniente. La ocurrencia de un gran terremoto ahora está registrada por cientos de sismógrafos en todo el mundo. En cuestión de horas, los sismólogos pueden determinar su magnitud, localizar su ocurrencia, localizar su superficie de ruptura e incluso evaluar los parámetros de la fuente. El hecho que no se hayan registrado instrumentalmente movimientos fuertes en un área en particular no garantiza que no hayan ocurrido en el pasado o que no ocurrirán en el futuro. En ausencia de un registro sísmico instrumental, se deben descubrir otras pistas de actividad sísmica. Estos pueden tomar la forma de evidencia geológica y tectónica, o sismicidad histórica (pre instrumental).

- Evidencia geológica:

La evidencia geológica es el conocimiento por medio de la observación o por estudios de laboratorios de suelo de la zona, ya sea un suelo malo o bueno, si estas presentan fallas, estos indicios vendrían a ser otra fuente de sismo.

Kramer, S. (1996), en su capítulo “Sismic Hard Analysis” menciona que la teoría de la tectónica de placas nos asegura que la ocurrencia de terremotos está escrita en el registro geológico, principalmente en forma de compensaciones o desplazamientos relativos de varias sumas. En algunas partes del mundo, este registro geológico es fácilmente accesible y relativamente fácil de interpretar por el geólogo capacitado. Sin embargo, en otros lugares el registro geológico puede ser muy complejo o puede estar oculto por espesas capas de sedimentos recientes que no han sido desplazados por la actividad sísmica. La identificación de fuentes sísmicas a partir de evidencia geológica es una parte vital, aunque a menudo difícil de realizar un análisis de peligro sísmico.

- Geodinámica:

Pezo, R. (2019) en su tesis “Evaluación de Fenómenos Geoambientales Determinados entre Characta y Hacienda Paican (Camaná), Arequipa” nos

explica que la geodinámica estudia los procesos de formación y degradación de la capa más superficial de la tierra, la corteza terrestre. Estas transformaciones son posibles, ya que existen fuerzas internas y externas que intervienen en los procesos dinámicos de la tierra. La geodinámica externa estudia la acción de los agentes atmosféricos externos, sobre la capa superficial. La geodinámica interna es un proceso que se origina y se desarrolla en el interior de la corteza terrestre y está circunscrito a la actividad tectónica (la misma que consiste en movimientos telúricos) y a la reactivación de fallas estructurales. Este concepto está referido a los procesos endógenos de dinámica cortical originados en los niveles estructurales internos de la tierra y que no dependen de la interacción de los fenómenos atmosféricos.

- Tectónica Andina:

El Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2016) en el expediente “Estudio Definitivo Para el Mejoramiento de la Carretera Huánuco - Conococha, Sector: Huánuco - La Unión - Huallanca Ruta PE - 3N” en su capítulo 3 (Línea Base Socioambiental) menciona que la tectónica andina ha afectado a las rocas del Mesozoico y Cenozoico, ha dado lugar al levantamiento andino y comprende las siguientes fases:

- Fase Peruana, caracterizada por la reactivación de fallas antiguas. Originó cuencas intra – montañosas, que a su vez originaron nuevas depresiones tectónicas dando lugar a la deposición de sedimentos.
- Fase Inca, evento tectónico más importante del Ciclo Andino. Se caracteriza por su naturaleza compresiva cuyos efectos son principalmente fallas regionales reactivadas.
- Fase Quechua, fase de deformación que afecta a rocas del Mesozoico y Cenozoico en la región de la cordillera.

- Tectónica de los Andes Peruanos:

Bazán, O. (2018) en su documento “Tectónica Andina y su Componente Cizallante Alusivo al Norte del Perú” menciona que la Cordillera de los Andes constituye una de las cadenas de montañas más impresionantes del planeta. Los Andes se encuentran situados sobre una zona de convergencia entre las

placas oceánicas Nazca y Cocos las cuales subductan debajo de la placa continental de América del Sur.

Jordán, T. et al (1983) en su artículo “Andean Tectonics Related to Geometry of Subducted Nazca Plate” divide la Cordillera de los Andes en tres segmentos:

- Los Andes Septentrionales; se extiende desde Venezuela (12° N) hasta el Norte del Perú (4° S), este segmento resulta de la interacción de las placas Caribe, Cocos, Nazca y Panamá.
- Los Andes Centrales; se prolongan desde el Norte de Perú (4° latitud S) hasta Argentina (40° latitud S). La estructuración de este segmento resulta de la subducción de la placa oceánica Nazca - Farallón debajo de la Placa Continental Sudamericana. La parte Sur de los Andes Centrales está caracterizada por la presencia del Altiplano, la cual se desarrolla entre las cordilleras Occidental, esta atraviesa los departamentos de Piura, Lambayeque, La Libertad, Cajamarca, Áncash, Lima, Huánuco, Pasco, Junín, Ica, Huancavelica, Ayacucho, Arequipa, Moquegua, Tacna y Puno y la Cordillera Oriental que atraviesa los departamentos de Amazonas, Loreto, San Martín, Huánuco, Ucayali, Pasco, Junín, Cusco, Madre de Dios y Puno.
- Los Andes Meridionales; Se desarrollan entre 40° y 55° de latitud Sur. Este segmento es interpretado como resultado de la subducción de las placas Nazca, Antártica y Scotia debajo de la placa continental.

La tectónica Andina ha afectado a las rocas del mesozoico y cenozoico comprendiendo en él varias etapas de sedimentación y varias fases de deformación, siendo las principales de ellas, tres “fases tectónicas” definidas por Steinmann, G. (1929); Fase Peruana ocurrida en el Cretácico superior, caracterizada por la reactivación de fallas antiguas, que origina cuencas intra – montañosas y nuevas depresiones tectónicas, dando lugar a la deposición de sedimentos; luego la Fase Incaica en el Eoceno – Oligoceno, evento tectónico más importante del Ciclo Andino, se caracteriza por su naturaleza compresiva cuyos efectos son principalmente fallas regionales reactivadas; seguida después por la Fase Quechua (Mioceno), fase de deformación que afecta a rocas del Mesozoico y Cenozoico, en la región de la cordillera.

Alva, J. (1988) señala que los principales rasgos tectónicos de la región occidental de Sudamérica, como son la cordillera de los Andes y la fosa oceánica Perú - Chile, están relacionados con la alta actividad sísmica y otros fenómenos telúricos de la región, como una consecuencia de la interacción de dos placas convergentes, cuyo resultado más saltante es el proceso orogénico contemporáneo constituido por los Andes. La mayor parte de la actividad tectónica en el mundo se concentra a lo largo de los bordes de las placas. El frotamiento mutuo de estas placas es lo que produce los sismos, por lo que la localización de éstos delimitará los bordes de las mismas. El margen continental occidental de Sudamérica, donde la placa de Nazca está siendo subducida por debajo de la placa Sudamericana, es uno de los bordes de placa más extensos en la tierra. También nos menciona que la placa Sudamericana crece de la cadena meso oceánica del Atlántico, avanzando hacia el noroeste con una velocidad de 2 a 3 cm por año y se encuentra con la placa de Nasca en su extremo occidental, constituido por la costa Sudamericana del Pacífico.

Tavera, H. (2014) en su documento “Evaluación del Peligro Asociado a los Sismos y Efectos Secundarios en Perú” señala que el proceso de convergencia y subducción de la placa de Nazca (Oceánica) por debajo de la Sudamericana (Continental) con velocidades promedio del orden de 7 a 8 centímetros por año (DeMets et al, 1980 y Norabuena et al, 1999), se desarrolla en el borde occidental del Perú (ver Figura N°3). Este desarrollo da origen a sismos de diversas magnitudes y focos, ubicados a diferentes profundidades, todos asociados a la geodinámica interna y externa que experimenta la tierra como es la fricción de ambas placas (Oceánica y Continental), a la deformación de la corteza a niveles superficiales y a la deformación interna de la placa Oceánica por debajo de la cordillera. Tavera, H. divide la distribución espacial en tres principales fuentes sísmicas:

El rozamiento constante entre las placas de Nazca y Sudamericana, presente en el borde occidental del Perú (entre la fosa y la línea de costa), da origen a los sismos con mayor intensidad y magnitud ( $M_w > 8,0$ ). Muchos de estos eventos fueron acompañados de tsunamis que incrementaron el daño, principalmente en zonas costeras. Tenemos el caso de Lambayeque en 1960 de 6.8  $M_w$  que después de varias horas de ocurrido el sismo la zona costera

fue afectada por un tsunami, cuya primera ola midió 9 metros de altura produciendo daños severos en el puerto de Eten y Pimentel. Los recientes sismos de Arequipa del 2001 y Pisco 2007, produjeron importantes niveles de sacudimiento del suelo, llegándose a medir aceleraciones del orden de 0.4 g, lo suficiente para producir daños en viviendas frágiles o ubicadas en suelos inestables. Estos sismos produjeron tsunamis con olas de hasta 8 metros que llegaron a la costa en tiempo aproximado de 15 minutos. (Tavera, 2014, p.4)

La segunda fuente, considera la deformación de la corteza Continental con la presencia de fallas geológicas de diversas geometrías y dimensiones. Esta fuente da origen a eventos sísmicos con magnitudes de hasta 6,5 Mw, produciendo daños en áreas reducidas, pero con importantes niveles de sacudimiento del suelo. Eventos recientes son los ocurridos en 1990 y 1991 (6,5 Mw) en la región del Alto Mayo (San Martín), acompañados de deslizamiento e importantes procesos de licuación de suelos. (ver Figura 3) (Tavera, 2014, p.4)

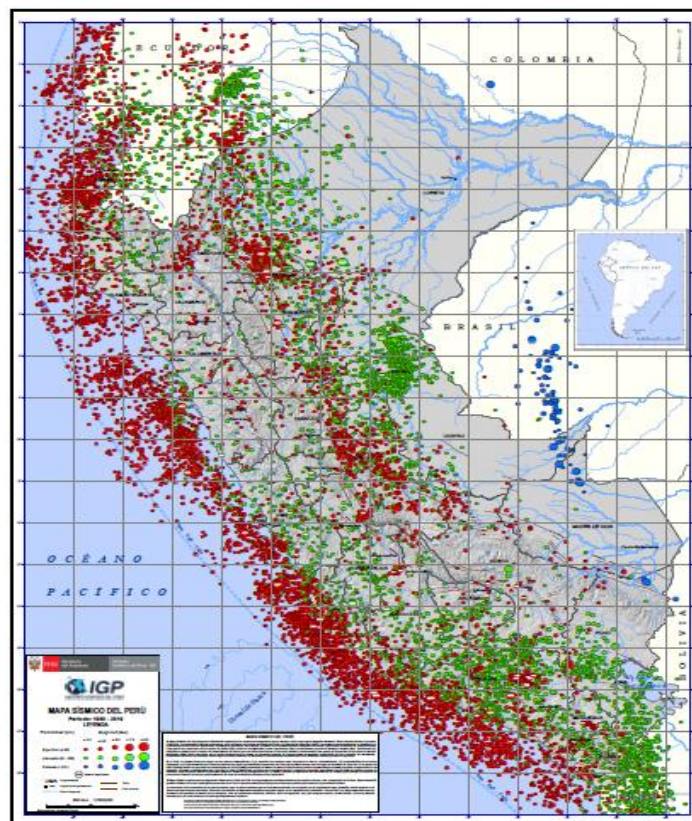
La tercera fuente, agrupa a los sismos que se producen por la deformación interna de la placa de Nazca por debajo de la cordillera de los Andes, a niveles de profundidad del orden de 100 kilómetros a más. Esta fuente da origen a eventos sísmicos con magnitudes hasta de 7,0 Mw y en general, producen procesos de licuación de suelos en valles de las zonas andinas y subandinas. Por ejemplo, el evento ocurrido en el año 2005 (7,0 Mw) en Yurimaguas, Loreto (Tavera, 2014, p.4)



La figura N°2 “Mapa Sísmico del Perú para el Periodo 1960 al 2019” muestra un esquema tectónico para las regiones Norte, Centro y Sur del Perú y que explica la interacción de las principales unidades geodinámicas que participan en la continua deformación del territorio peruano. La colisión de las placas Nazca y Sudamericana produce el levantamiento de la cordillera y la ocurrencia de sismos de variada magnitud en la superficie de acoplamiento sísmico.

Figura N° 2

Mapa Sísmico del Perú para el Periodo 1960 al 2019

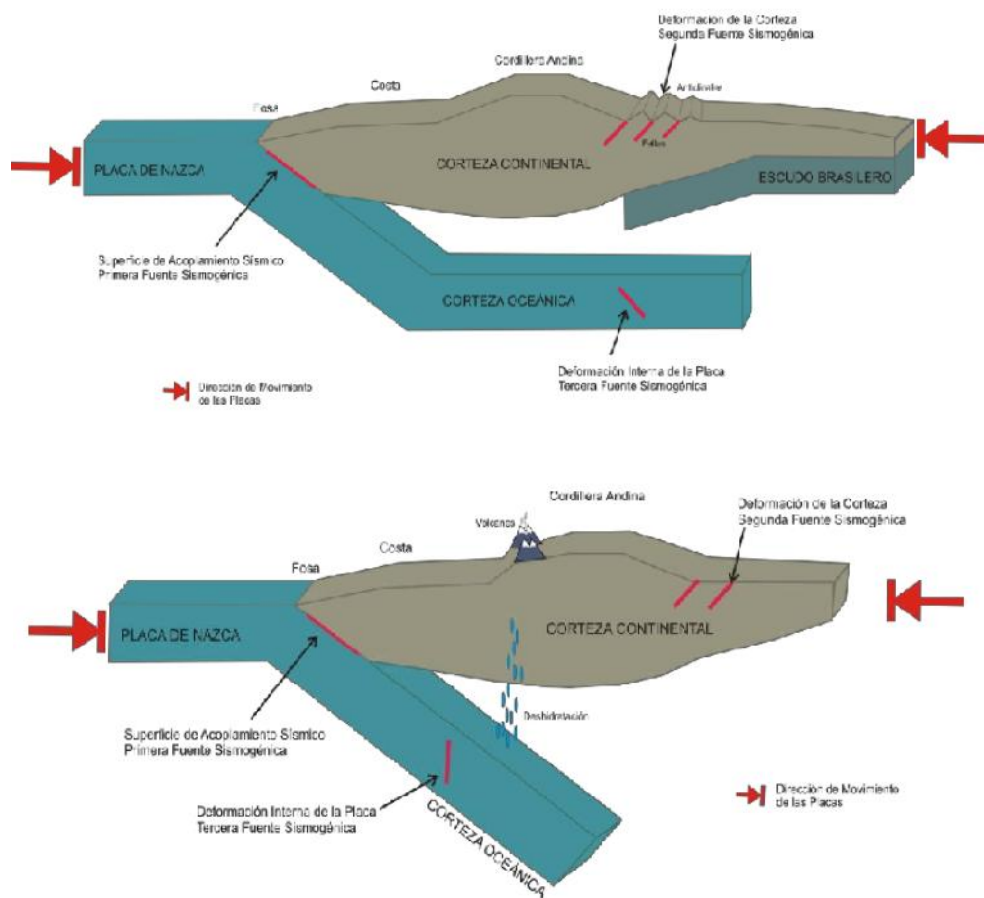


Nota: La magnitud de los sismos se diferencia por el tamaño de los círculos y la profundidad de sus focos por el color de los mismos (Instituto Geofísico del Perú - IGP, 2019).

Cuando se analiza en detalle la distribución espacial de la sismicidad en el Perú (ver Figura N° 2), se debe dar mayor atención a los sismos de foco superficial (círculos rojos), debido a que ellos, por ocurrir cerca de la superficie, representan ser de mayor peligro para las áreas pobladas, en el caso del Perú, toda la zona costera y en el interior del continente, principalmente la zona subandina.

Figura N° 3

Choque de la placa de Nazca y la placa Sudamericana.



Nota: Tomado de Tavera, H. (2014), esquema que muestra la geometría de la subducción y la ubicación de las principales fuentes sísmicas en el Perú.

- Sismicidad:

Para la identificación de las fuentes sísmicas y la caracterización de su actividad, la evaluación del riesgo sísmico, además de los estudios geológicos y tectónicos, se requiere de una información detallada de sismicidad del Proyecto. Esta información, que es obtenida de catálogos de sismos históricos e instrumentales, permite delimitar en forma más precisa la ubicación de las fuentes sísmicas y la estimación de la frecuencia de ocurrencia de sismos en los últimos cientos de años. (CISMID, 2013, p.24)

- Sismos históricos:

Tavera, H. y Bernal, Y. (2014) en su documento de “Evaluación del Peligro Sísmico en el Perú” alude que los registros de sismicidad histórica pueden ayudar a identificar características sísmicas de un determinado lugar. Los registros históricos de los efectos de los movimientos sísmicos pueden confirmar la ocurrencia de eventos sísmicos pasados y estimar la distribución geográfica de sus intensidades.

La recopilación de suficiente información en los registros de sismicidad histórica puede permitir la determinación de intensidades máximas en la zona, estimar el epicentro y la magnitud del sismo. Además, dado que los registros históricos poseen información de la fecha en que ocurrió un sismo, pueden ser utilizados para evaluar la tasa de recurrencia sísmica y la sismicidad de una determinada área.

La fuente básica para conocer la actividad sísmica y lo concerniente a ésta, ocurrida en el área de influencia del Proyecto, es el trabajo de Silgado, E. (1968, 1973, 1978 y 1992), que presenta una recopilación de datos sobre los principales eventos sísmicos ocurridos en el Perú desde el año 1513. En base a esta recopilación, Alva, J. et al, (1984) elaboraron el Mapa de Distribución de Máximas Intensidades Sísmicas Observadas en el Perú, estimadas en la escala Mercalli Modificada.

- Sismicidad instrumental:

En los años 90 se tiene registros aproximadamente de 10 terremotos de magnitud mayor a 7 Mw en algún lugar del mundo cada año. (Kanamori, H ,1988)

Tavera, H. (2011) en su artículo “Estudio de Peligro Sísmico para el Cerro Tamboraque Distrito de San Mateo – Provincia de Huarochiri” menciona que los registros instrumentales de grandes terremotos han estado disponibles desde aproximadamente 1900, aunque muchos de antes de 1960 están incompletos o de calidad desigual. Sin embargo, las grabaciones instrumentales representan la mejor información disponible para la identificación y evaluación de las fuentes de los terremotos. Su limitación más significativa es el corto período de tiempo, en comparación con el período medio de tiempo entre grandes terremotos para el que han estado disponibles.

Nuevamente, la alineación de epicentros o hipocentros ubicados instrumentalmente indica la existencia de fuentes de terremotos. El análisis de las réplicas también puede ayudar a delimitar las zonas de origen del terremoto.

- Estudio sísmico probabilístico:

La probabilidad que un sismo de mayor magnitud pueda ocurrir en una determinada zona, en una cierta cantidad de años y velocidad de onda, se mide en el estudio de Peligro Sismo.

Tavera H. (2011) menciona que la estimación de este peligro puede hacerse probabilísticamente por el método desarrollado por Cornell (1968). En la primera fase del método, evaluamos la actividad sísmica histórica para establecer las fuentes sismogénicas teniendo en cuenta las características tectónicas de la región. La segunda fase, se precisa la recurrencia de las zonas sismogénicas y con la atenuación sísmica se disponen los valores probables de intensidades sísmicas. Estas incertidumbres calculadas a través del tiempo e intervalos de recurrencia de la fuente sísmica serían las amenazas del método propuesto por Alva, J. (1988).

- Fundamentos del análisis del peligro sísmico:

Según Alva, J. (1993) en su artículo “Peligro Sísmico en el Perú” define el peligro sísmico como la probabilidad que en un lugar determinado ocurra un movimiento sísmico de una intensidad igual o mayor que un cierto valor fijado. Seguidamente, menciona que la generación de sismos está relacionada con los mecanismos geotectónicos. El tiempo, intensidad y situación de la ocurrencia de futuros sismos no puede hasta la fecha ser pronosticado en una forma determinística. En consecuencia, la generación de sismos, espacio y tiempo, cae en la categoría general de procesos estocásticos.

Alva, J. (1993) menciona que existen dos modelos estadísticos de los procesos estocástico: Poisson y Markov que pueden simular la ocurrencia de sismos generados en el tiempo. Actualmente el modelo más usado es el de Poisson, aunque algunos investigadores vienen utilizando el modelo de Markov. El modelo de Markov difiere del modelo de Poisson en que las ocurrencias de

eventos nuevos dependen de eventos anteriores, mientras que, en el modelo de Poisson, estas ocurrencias son independientes de los eventos pasados y ha dado resultados adecuados en muchas situaciones.

En el modelo de Poisson se asume las siguientes proposiciones:

- Los sismos son espacialmente independientes.
- Los sismos son temporalmente independientes.
- La probabilidad que dos eventos sísmicos tengan lugar en el mismo sitio y en el mismo instante es cero.

La primera proposición implica que la ocurrencia o no ocurrencia de un evento sísmico en un sitio, no afecta la ocurrencia o no ocurrencia de otro evento sísmico en algún otro lugar. La segunda proposición dice que los eventos sísmicos no tienen memoria en el tiempo. En su forma más general, la Ley de Poisson es expresada de la siguiente manera:

$$P_n(t) = \frac{e^{-\lambda} (\lambda)^n}{n!}$$

Donde:

$P_n(t)$ : es la probabilidad de que haya eventos en un período de tiempo  $t$

$n$  : es el número de eventos

$\lambda$  : es la razón de ocurrencia por unidad de tiempo

La desventaja del modelo de Poisson es que no se ajusta para eventos sísmicos de magnitud baja. Sin embargo, para movimientos grandes este modelo es el correcto. Como en el diseño de ingeniería es de interés primario los movimientos fuertes, el modelo de Poisson es de gran utilidad; por esta razón su uso se ha generalizado en todo el mundo.

La ocurrencia de un evento sísmico es de carácter aleatorio y la Teoría de las Probabilidades es aplicable en el análisis de posibilidad de su ocurrencia. Aplicando esta teoría se puede demostrar que si la ocurrencia de un evento A

depende de la ocurrencia de otros eventos  $E_1, E_2$ , mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos (Alva, 1993, p. 6).

Entonces, de acuerdo al teorema de la probabilidad total, la probabilidad de ocurrencia del evento A este dada por la siguiente expresión:

$$P(A) = \sum_i^n p(A/E_i) \cdot P(E_i)$$

Donde  $P(A/E_i)$  es la probabilidad condicional que el evento A ocurra, dado que  $E_i$  ocurra. La intensidad generalizada (I) de un sismo en el lugar fijado puede considerarse dependiente del tamaño del sismo (la magnitud o intensidad epicentral) y de la distancia al lugar de interés. Si el tamaño del sismo (S) y su localización (R) son considerados como variables aleatorias continuas y definidas por sus funciones de densidad de probabilidad,  $f_S(s)$  y  $f_R(r)$  respectivamente, entonces el peligro sísmico definido por la probabilidad que la intensidad I sea igual o mayor que una intensidad dada (Alva, 1993, p. 6) y está dada por:

$$P(I \geq i) = \iint P[I/(s,r)] f_S(s) f_R(r) d$$

Esta es la expresión que resume la teoría desarrollada por Cornell en 1968, según Alva (1993) para analizar el peligro sísmico. La evaluación de esta integral es efectuada por el programa de cómputo Risk desarrollado por R. McGuire (1976) en el cálculo del peligro sísmico.

- Análisis estadístico de recurrencia:

El Dr. Olarte, J. (2015) en su informe de “Bases Técnicas Para la Estimación de Perdidas con Fines de Seguros de Terremoto” menciona que el catálogo instrumental de sismos tiene información anterior al año 1963 incompleta porque no cuenta con valores de magnitud de ondas de cuerpo ( $m_b$ ) y profundidad focal, por lo cual se decide utilizar la información a partir de 1963 para la realización del análisis estadístico de recurrencia.

La recurrencia de terremotos se determina de acuerdo a la expresión de Richter (1958).

$$\log N = a - b M$$

Donde:

N : Número de sismos de magnitud M o mayor por unidad de tiempo.

a,b : Parámetros que dependen de la región.

La expresión anterior también se puede describir como:

$$N = \Gamma_0 e^{-\beta M}$$

$\Gamma_0$  :  $10^a$  es el número de sismos por unidad de tiempo con  $M > 0$ .

:  $b \times \ln 10$

Los parámetros estadísticos de recurrencia para cada una de las fuentes sismogénicas se han calculado utilizando la magnitud  $M_s$ , definida por  $M = \max(m_b, M_s)$ . Se calculó la siguiente relación entre estas dos magnitudes, a manera de utilizar cualquiera de ellas para homogenizar la muestra de datos.

$$m_b = 3.30 + 0.40M_s$$

- Ley de atenuación:

Existen dos leyes de atenuación de aceleraciones, la primera es la propuesta por Casaverde, L & Vargas, J (1980) en su documento de “Zonificación Sísmica del Perú” donde ha sido empleada para las fuentes asociadas al mecanismo de subducción. Esta ley está basada en los registros de acelerógrafos de las componentes horizontales de diez sismos peruanos registrados en Lima y alrededores.

Es notoria la menor atenuación de los sismos peruanos en comparación con atenuaciones de sismos en otras partes del mundo. Los sismos fueron registrados en acelerógrafos instalados en el local del Instituto Geológico en la plaza Habich, el Instituto Geofísico en la avenida Arequipa, en Zárate, en la casa del Dr. Huaco, en las Gardenias y en la Molina. La ley es:

$$\alpha = 68.7e^{0.8M_s}(R + 25)^{-1.0}$$

Donde:

: es la aceleración en cm/seg<sup>2</sup>

$M_s$  : es la magnitud de las ondas superficiales

$R$  : es la distancia hipocentral en km

Es evidente que existe escasez de datos de registros de aceleración en el Perú. Los datos que se tienen son de la ciudad de Lima.

La segunda ley de atenuación utilizada es la propuesta por McGuire, R. (1974) en su artículo “Seismic structural response Risk Analysis incorporating Peak Response Regresion on Earthquake Magnitude and Distance” para la costa Oeste de los Estados Unidos, que ha sido empleada para las fuentes asociadas a sismos continentales. Esta ley tiene la forma:

Atenuación de Aceleraciones:

$$\alpha = 472 * 10^{0.2 M_s} (R + 25)^{-1.3}$$

Que expresada en forma logarítmica resulta:

$$\text{Lna} = 6.156 + 0.64M_s - 1.30\text{Ln}(R + 25)$$

Donde:

$a$  = es la aceleración en cm/seg<sup>2</sup>

$M_s$  = es la magnitud de las ondas de superficie

$R$  = es la distancia hipocentral en km

- Determinación del peligro sísmico:

Según el CISMID (2013), para la determinación del peligro sísmico se tiene en cuenta el estudio en distintos lugares del área del proyecto que se va a estudiar y la metodología e información disponible en la literatura. El proyecto “Construcción, Mejoramiento y Rehabilitación de la Carretera Cusco Chinchero – Urubamba en la Región Cusco, Tramo 1 (km 14+229.50 al 21+730)” utilizó el programa de cómputo Risk desarrollado por McGuire, R (1976), con datos de la ley de atenuación de aceleraciones de Casaverde y Vargas (1980) para los sismos de subducción y de McGuire, R (1974) para los sismos continentales. También usó las fuentes sismogénicas y parámetros de recurrencia determinados por Castillo (1993).



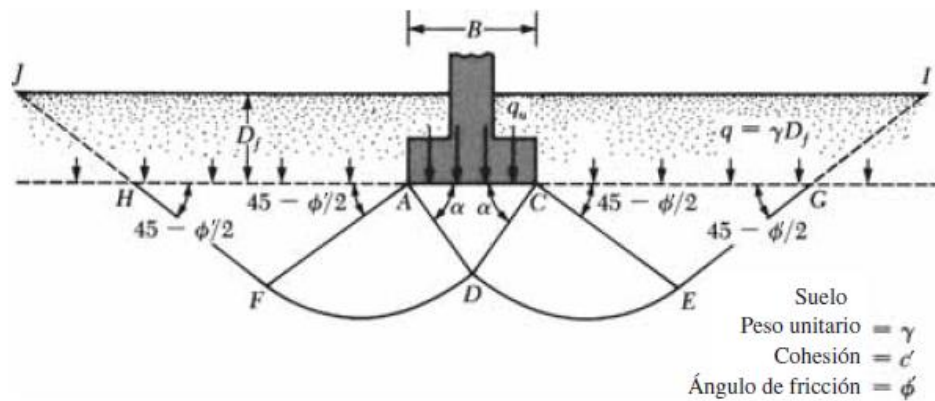
### 2.3.3 Cimentación Superficial

- Capacidad de carga:

Braja, D. (2013), define a la cimentación la base de toda estructura, siendo su labor transmitir la carga al suelo circundante. Para un buen diseño de la cimentación se debe considerar no sobrecargar el suelo, ya que ello puede provocar un asentamiento excesivo o fallar por corte. Es importante saber la capacidad de carga del suelo, para ello se analizará la capacidad última de carga que es la carga máxima que puede soportar el suelo antes que falle. Sobre esto se aplica un factor de seguridad para lograr la capacidad de carga admisible. Para el cálculo de capacidad de carga en cimentaciones se debe tomar como base lo recomendado por Braja, D. (2013) mostrado en la Figura N°4.

Figura N° 4

Falla de la capacidad de carga en un suelo bajo una cimentación continua rígida en grava



Nota: tomado del libro Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja, D. (2013), Pag. 481

Entre los métodos que utilizaremos para hallar la capacidad última de carga y la capacidad de carga admisible tenemos:

- Según Beltrán, J. (2018) de acuerdo a su tesis “Análisis de la Capacidad de Carga Admisible de los Suelos de Cimentación del Complejo Arqueológico Chan - Chan Debido al Ascenso del Nivel Freático” menciona que el método de capacidad de carga de cimentaciones propuesto por Meyerhorf (1963), a través de sus estudios teóricos y

experimentales sobre el estudio de la plasticidad en zapatas superficiales y profundas, le daría resultados para analizar zapatas con cargas inclinadas en mecanismos de falla de suelos. Se debe tener en cuenta para la capacidad de carga los mecanismos del suelo (densidad, esfuerzo cortante y características de deformación). Se analiza diferentes factores como el  $N_y$  que es el factor de capacidad de carga debido al suelo, también están los factores de capacidad de carga  $N_c$  y  $N_q$  por considerar. A diferencia del método de Terzaghi, con este método se debe apreciar la forma del cimiento, la profundidad y la inclinación de las cargas sobre los cimientos con respecto a la carga vertical.

- Según la metodología de Meyerhof, O. (1963) se puede evaluar la ecuación de capacidad de carga última de carga

$$q_u = cN_c S_c d_c i_c + qN_q S_q d_q i_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma S_\gamma d_\gamma i_\gamma$$

Nota: Tomado de la tesis Análisis de la Capacidad de carga admisible, Beltrán, J. (2018)

Donde:

- $c$  : Cohesión del suelo.
- $\gamma$  : Peso específico del suelo.
- $q$  :  $\gamma \cdot D$  .
- $D$  : Profundidad de cimentación.
- $B$  : Ancho de la cimentación.
- $S_c, S_q, S_\gamma$  : Factores de forma.
- $d_c, d_q, d_\gamma$  : Factores de profundidad.
- $i_c, i_q, i_\gamma$  : Factores de inclinación de la carga.
- $N_c, N_q, N_\gamma$  : Factores de capacidad de carga.

- El método de Capacidad Portante de Cimentación Superficial propuesto por Vesic, A. (1973) y el método del AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2004, en el reporte de FHWA-GA-16-1426 Geotechnical LRFD Calculations of Settlement and Bearing Capacity of GDOT Shallow Bridge Foundations and Retaining Walls (2016), se menciona que la carga vertical llega a tener una condición de tensión máxima que se le conoce

como capacidad de carga ligada con la movilización total de la resistencia al corte del suelo latente a lo largo de una superficie de falla prescrita. Al diseño de la resistencia a la carga (LRFD), se le denomina "Estado Límite". Menciona además que a este problema de "Estado Límite" se implementaron varias soluciones a lo largo de los años, como teoremas de plasticidad, equilibrio límite y con más influencia la modelación numérica. Con respecto a las características geotécnicas del lugar, como tensión - deformación del suelo, sobrecarga, condiciones de drenaje del suelo y estratificación del suelo.

Según lo mencionado se tiene la ecuación de capacidad de carga ultima según Vesic, A. (1973)

$$q_u = cN_c F_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma N_{\gamma s} N_{\gamma d} N_{\gamma i} N_{\gamma c}$$

Donde los factores son:

- De capacidad de carga :  $N_q, N_\gamma, N_c$
- De forma :  $F_{qs}, F_{ys}, F_{cs}$
- De profundidad :  $F_{qd}, F_{yd}, F_{cd}$
- De Inclinación :  $F_{qi}, F_{yi}, F_{ci}$
- De incomprensibilidad :  $F_{qc}, F_{yc}, F_{cc}$

- Además, se tiene la metodología de capacidad de carga ultima según la AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2014)

$$q_n = c \cdot N_c + \frac{1}{2} \cdot B \cdot \gamma \cdot N_{\gamma m} \cdot C_{w\gamma} + \gamma \cdot D_f \cdot N_q \cdot C_w$$

Donde cada sumando corresponde a:

- $q_n$  : Capacidad portante ultima
- $c \cdot N_c$  : Termino de cohesión
- $\frac{1}{2} \cdot B \cdot \gamma \cdot N_{\gamma m} \cdot C_{w\gamma}$  : Término del peso
- $\gamma \cdot D_f \cdot N_q \cdot C_w$  : Termino de carga

Y cada termino corresponde a:

- $c$  : Resistencia a cortante
- $D$  : Diámetro de la cimentación circular equivalente

$\gamma$  : Volumen promedio o peso unitario efectivo del suelo

$C_{wq}$  y  $C_w$  : Factores de corrección para tener en cuenta el efecto de flotación del agua subterránea y se pueden definir utilizando condiciones según AASHTO (2014).

Si la profundidad del agua ( $D_w$ ) es igual a 0 entonces los coeficientes  $C_{wq}$  y  $C_w$  tendrán un valor de 0.5; Si  $D_w$  es igual a la profundidad de los cimientos ( $D_f$ ), entonces el coeficiente  $C_{wq}$  tendrá un valor de 1 y  $C_w$  tendrá un valor de 0.5; Finalmente, si  $D_w > 1.5 B + D_f$ , entonces los coeficientes  $C_{wq}$  y  $C_w$  tendrán un valor de 1.

$N$  : Factores de carga en función a la forma de la zapata

donde:

$N_{cm}$  :  $N_c S_c I_c$

$N_m$  :  $N S I$

$N_{qm}$  :  $N_q S_{qi} q d_q$

Específicamente, los términos correspondientes del factor de capacidad de carga son los de cohesión ( $N_c$ ) definidos por Prandtl (1921), peso propio ( $N$ ) definido por Vesic (1975) y sobrecarga o recargo ( $N_q$ ) definido por Reissner (1924).

Con ello se tendría para un ángulo de fricción mayor de cero dado el Análisis de Tensión Efectivo (ESA) para una condición de carga drenada, siendo los factores:

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi$$

$$N_q = \exp(\pi \tan \phi) + \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

- Asentamientos:

Braja, D. (2015), en su libro de Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, describe la consolidación al aumento del esfuerzo causado por la construcción de cimientos u otras cargas que comprimen las capas del suelo. La compresión es causada por la deformación de partículas del suelo, la reorientación de las

partículas del suelo y la expulsión de aire o agua de los espacios vacíos. En general, el asentamiento del suelo causado por las cargas y puede dividirse en dos amplias categorías:

- Asentamiento Primario:

Esta se puede calcular a partir de los datos de laboratorio, obteniendo valores de  $C_c$  y  $C_r$  para finalmente obtener un  $C_{ec}$  donde:

$$C_{ec} = \frac{C_c}{1 + e_0}$$

Además, se debe considerar la ecuación de datos de módulo elástico que están en función de la consolidación:

$$E_m = \frac{\Delta P}{C_\varepsilon \log\left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0}\right)}$$

Cabe destacar que, si no se tuviesen datos de laboratorio de consolidación se pueden hacer el uso de tablas referenciales o usarse el valor del 10% al 30% del “ $G_{max}$ ”, dependiendo del tipo de suelo y así obtener un “ $G_{suelo}$ ”. Con ello se puede usar la expresión  $E_m = 2G(1 + \nu)$  para obtener el módulo de suelo ( $E_m$ )

También se debe considerar, para el caso preconsolidado, para un Coeficiente de Preconsolidación  $OCR > 1$ , donde se tienen las siguientes expresiones:

$$S = \frac{C_r}{(1 + e_0)} H \left[ \log\left(\frac{\sigma'_z}{\sigma_z}\right) \right] + \frac{C_c}{(1 + e_0)} H \left[ \log\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_z}\right) \right]$$

$$P_0 = z(\gamma_s - \gamma_w)$$

$$q = \gamma H$$

Donde:

$Z_c$  : Tensión vertical de consolidación

$Z_0$  : Tensión vertical inicial

$Z_f$  : Tensión vertical final

$S$  : Asiento debido a la consolidación

$C_c$  : Índice de compresión

$e_0$  : Índice de vacíos inicial

$H$  : Altura de suelo consolidable

Para el método del cálculo de asentamiento secundario en suelos cohesivos el Dr. Alva, J. (2007) en su capítulo de “Cimentaciones Superficiales” menciona que el asentamiento secundario se da después de la consolidación primaria y que se asume que existe una relación lineal entre el asentamiento y el logaritmo del tiempo. Con ello se tiene:

Ecuación de Asentamiento Secundario.

$$S_s = C_a \cdot H_c \log \frac{t_2}{t_1}$$

Donde:

$C_{ae}$  : Coeficiente de asentamiento secundario.

$H_c$  : Altura de estrato compresible.

$t_1$  : Momento en que empieza el asentamiento secundario.

$t_2$  : Años de servicio de la estructura.

#### 2.3.4 Licuación

- Descripción del fenómeno de licuación:

Braja, D. (2011), propone ciertos alcances sobre propiedades de suelos para la identificación de suelos licuables. Estas cargas dinámicas traen como consecuencia vibraciones y propagación de ondas a través del suelo. Entre las principales propiedades está la tensión dinámica, deformación y resistencia de los suelos, problemas de presión de tierra dinámica y capacidad de carga dinámica. El autor considera un diseño de cimentaciones poco profundas y problemas relacionados con la licuación del suelo que serán útiles para nuestra tesis

Kramer, S. (1996), en el capítulo de licuación menciona que la característica más frecuente a este fenómeno es la generación de un exceso de presión de poros (suelos saturados) en condiciones de carga sin un drenaje. También alude que para la zona de estudio se considere libre del efecto de licuación, estos no deben ser susceptibles a la licuación, la sobrecarga aplicada a estos suelos debe ser insuficiente para que cause el inicio de este efecto o los propios efectos deben de ser tolerables. Para que haya susceptibilidad a la licuación se

debe tener en cuenta la historia sismográfica, geología, composición de la zona de estudio, además que deben cumplir ciertos criterios de autores que se mencionará en la tesis.

Teniendo en cuenta los datos de nuestro proyecto, al tener un suelo con nivel freático alto, contenido de finos alto del material arcillo - limoso y de baja plasticidad, ante la ocurrencia de un sismo hace que pierda resistencia cíclica cuando la presión de poros iguala a la resistencia efectiva de los suelos de fundación.

Para evaluar el potencial de Licuación se debe tener varias consideraciones presentes como es la inspección de campo y análisis de laboratorio. Existen las condiciones sísmicas, geológicas, geotécnicas para el desarrollo de licuación, también es importante la ubicación del nivel freático y el análisis de peligro sísmico que influye en la zona de estudio. Además, existen varios criterios para definir la susceptibilidad a la licuación basados en la relación del contenido de finos y su límite líquido (Wang, 1979). El termino potencial de licuación se mide como un factor de seguridad (FS) que es igual a la relación cíclica (CRR) entre la relación de estrés cíclico (CRS) se define como:

$$FS = \frac{C}{c} \geq 1.0$$

Si el factor de seguridad del potencial de licuación (FS) es menor que 1.25, entonces se puede decir que el suelo es potencialmente licuable, si en caso este factor de seguridad fuera mayor que 1.25 entonces no es licuable. El valor de 1.25 será sustentado según lo recomendado en el Manual de Suelos y Cimentaciones de la Norma Técnica Peruana E.050 según la estructura a tratar.

Entre los métodos de susceptibilidad de licuación identificados y aplicados en el proyecto son:

- Método simplificado: Se basa en las evaluaciones empíricas de observaciones en campo y de ensayos de laboratorio desarrollados por

Seed, H. et al (2003), Bray, J. y Sancio, R. (2006), Adapazari (2010), A. Rauch, A. (1998)

- Método probabilístico: Este método tiene en consideración la incertidumbre de los efectos que podría ocasionar la licuación en la superficie. Según la metodología de Iwasaki y Tokimatsu plasmada en la Norma Técnica de Edificaciones E.050, esos efectos afectan a suelos granulares finos con presencia de napa freática y algunos suelos cohesivos, bajo efectos sísmicos produciendo licuación, generando pérdida de resistencia al corte del suelo, como consecuencia del aumento de la presión de poros, que se genera con el desplazamiento del agua contenida a los vacíos originada por la vibración del sismo
- Para el potencial de licuación, se siguió la metodología de Boulagner, R. (2014), quien recopila las investigaciones de varios autores como Seed, H. & Idris, I. (1999), Idris, I. & Boulagner, R. (2003 - 2008).

- Historia de la licuación en el Perú:

Según el Dr. Alva, J. & Ortiz, C. (2019) en su artículo de actualización de la ocurrencia del fenómeno de licuación de suelo, describe la ocurrencia de sismo, como por ejemplo el 31 de marzo de 1650, donde se observó disturbios en el nivel freático cerca del pueblo de Oropesa, Cuzco, donde la máxima intensidad de este sismo fue de IX MM (Mercalli Modificada). También se menciona que el 21 de mayo de 1950 ocurrió un terremoto en la ciudad de Cuzco al sureste del pueblo de San Sebastián, presentando fisuras, donde el nivel de la napa freática se levantó después de la actividad sísmica, presentando la máxima intensidad de este sismo de VII MM y su magnitud fue de  $M_s = 6.0$

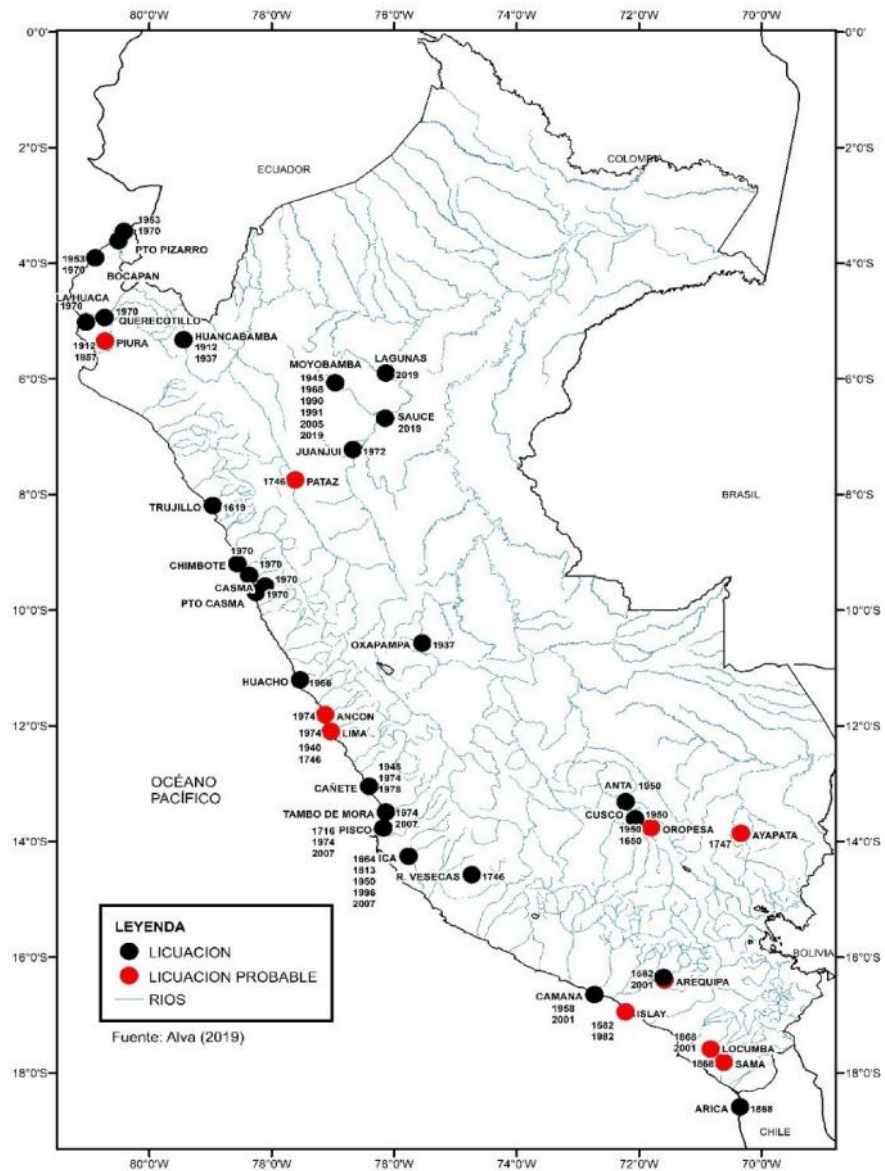
Alva, J. (2019) describe algunas consecuencias ocasionadas por licuación de suelos como asentamiento o inclinaciones, desplazamientos laterales, hundimientos, desprendimientos, deformación por corte, oscilación del terreno, pérdida de capacidad portante en varios casos ocurridos en el Perú.

Además, se recopiló varios casos de licuación, plasmados gráficamente en el mapa del Perú representado en la Figura N°5.



Figura N° 5

Áreas de Licuación de suelos En el Perú



Fuente: Alva, J. (2019)

- Evaluación de riesgo a la licuación:

Principalmente el riesgo de licuación se puede evaluar según la expresión de Mohr Coulomb.

$$\tau_i = c + (\sigma - u) \tan \phi$$

Donde  $i$  es la resistencia inicial al cortante del suelo que depende de la cohesión del suelo, el esfuerzo normal, la presión de poros y el ángulo de fricción.

Cuando la presión de poros aumenta e iguala al esfuerzo normal la expresión tiende a cero, por ende, la resistencia al corte se pierde manifestándose el fenómeno de licuación. El incremento de presión de poros se da con la ocurrencia del sismo considerando la condición que el material del suelo se encuentre saturado.

Con ello en nuestra investigación se plantea dos soluciones para el análisis de licuación con distintos enfoques con el objetivo de limitar la expresión a un valor positivo

Primero, considerando que la Columna de Grava provee al suelo un mejor drenaje, con ello evitando el aumento de la presión de poros obteniendo una disipación de presiones intersticiales a su vez también provee de una densificación parcial del suelo.

Es necesario resaltar, que se debe considerar las fases antes de aplicar la carga y posterior de aplicar la carga, con ello se propondría la siguiente expresión del esfuerzo cortante después de aplicar la carga:

$$\tau_f(\text{Columna de Grava}) = c + (\sigma_n - \mu') \tan$$

En este caso, posterior a aplicarse la carga se pretende que el término de  $\mu'$  no incremente o no incremente tanto, teniendo la expresión  $\sigma_n - \mu' > 0$

Para la Columna de Módulo Controlado, considerando la densificación que provee al suelo se tiene que la carga que resistente aumentará en razón del esfuerzo normal, con ello se propondría la siguiente expresión del esfuerzo cortante después de aplicar la carga:

$$\tau_f(\text{CMC}) = c + (\sigma_n' - \mu) \tan$$

En este caso se pretende que el término de  $\sigma_n$  inicial considerado sea incrementado obteniendo un  $\sigma_n'$  mucho mayor para así poder soportar la presión intersticial manifestada con el efecto del sismo.

Como parte de la propuesta de evaluación del esfuerzo cortante con fines de evaluación de la licuación de suelos, consideramos una presión de poros máxima igual al esfuerzo normal en el estado inicial, un ángulo de fricción y cohesión combinada con la inclusión a usar, quedando la expresión de la siguiente manera:

$$\tau_f(\text{inclusión}) = c' + (\sigma' - \mu') \tan \phi'$$

Y reemplazando  $\mu'$  máxima e igual a  $\sigma'$  se tendría finalmente:

$$\tau_f(\text{inclusión}) = c' + (\sigma' - \sigma') \tan \phi'$$

Por otra parte, se evalúa los ensayos de suelos que identificarán la susceptibilidad de licuación y se evaluará según el criterio de Iwazaki.

Finalmente, se evalúa los ensayos de perforaciones realizados del suelo, y mediante la aplicación de métodos analíticos poder obtener el factor de seguridad para el caso sin mejoramiento y con mejoramiento. Para ello se usaron técnicas descritas como lo indica la Norma Técnica de Edificaciones en la sección de suelos y cimentaciones (E.050, 2018) mostrado en la Tabla N°1.

Tabla N° 1:

Factor de seguridad frente ocurrencia de licuación.

CATEGORIA SEGÚN E.050	FSL mínimo
A	1.25
B	1.15
C	1

Nota 01: Tomado de la Norma Técnica de Edificaciones sección de suelos y cimentaciones E.050 de la Tabla 13A

- Suelos susceptibles a la licuación:

Según el Norma Técnica de edificaciones en la sección de suelos y cimentaciones (E.050) se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones para la evaluación de licuación de suelos:

- Se debe realizar la cantidad investigaciones de campo pertinentes al tipo de infraestructura.
- Para que un suelo licue durante un sismo debe estar constituido por arena fina, arena limosa, arena arcillosa, limo arenoso no plástico o grava empacada en una matriz constituida por alguno de los materiales anteriores y debe encontrarse sumergido.
- Si se encuentran suelos finos cohesivos que cumplan simultáneamente con las siguientes condiciones:
  - Porcentaje de partículas más finas que 0,005 m 15%.
  - Límite líquido (LL) 35.
  - Contenido de humedad (w) > 0,9 LL.
- Estos suelos pueden ser potencialmente licuables, sin embargo, no licuan si se cumple cualquiera de las siguientes condiciones:
  - Si el contenido de arcilla (partículas más finas que 0,005 m) es mayor que 20%, considerar que el suelo no es licuable, a menos que sea extremadamente sensitiva.
  - Si el contenido de humedad de cualquier suelo arcilloso (arcilla, arena arcillosa, limo arcilloso, arcilla arenosa, etc.) es menor que 0,9 LL, considerar que el suelo no es licuable

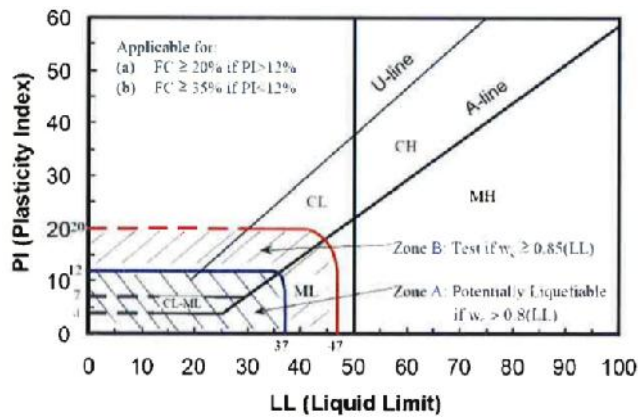
Como se puede observar las condicionales sugeridas por la norma peruana de suelos y cimentaciones, se basan en estudios de suelos superficiales, como son las calicatas, las cuales serán necesario evaluar preliminarmente para poder realizar un ensayo más complejo y exacto.

Según Seed, H. et al. (2003), para la analizar la susceptibilidad de licuación presenta el siguiente criterio donde identifica 3 zonas (A, B y C) que se relacionan con diferentes grados de susceptibilidad. Se define la pérdida significativa de resistencia de rigidez debido al incremento de la presión de poros. El criterio asocia el índice de plasticidad (IP) y el límite líquido (LL) para poder ubicar las zonas mencionadas. Los suelos que caen en la zona A se consideran potencialmente susceptible a licuación, los suelos que caen en la zona B pueden ser susceptibles a licuación y finalmente los que no se trazan en la zona A o B, la zona C, generalmente no se consideran susceptibles a licuación, pero pueden ser sensibles. El criterio es aplicable para: FC 20%,

si  $PI > 12\%$  y  $FC \geq 35\%$ , si  $PI < 12\%$  como se puede observar en la Figura N°6 “Criterio de Seed et Al. (2003)”

Figura N° 6

Criterio de Seed et Al. (2003)

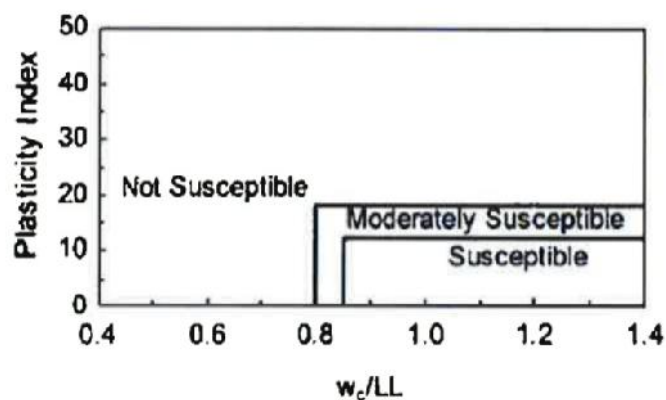


Nota: LL vs. PI, Seed 2003. Fuente (Braja Das, 1990)

Según Bray, J. y Sancio, R. (2006) el método que plantean se aplica para suelos que en su mayoría se tienen unos contenidos de finos mayores al 50%. El autor propone el siguiente esquema mostrado en la figura N°7. La propuesta por el autor los clasifica como susceptible, moderadamente susceptible y no susceptible según el índice de plasticidad y  $w_c/LL$ .

Figura N° 7

Criterio a la Susceptibilidad a la Licuación según Bray, J. y Sancio, R. (2006)

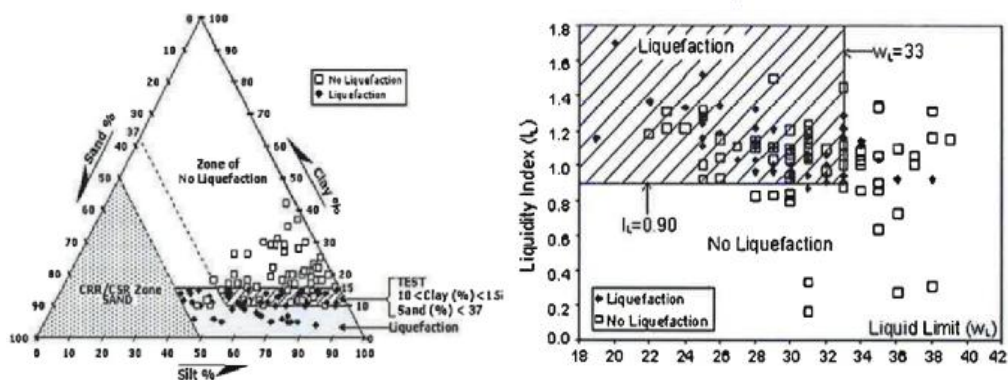


Nota: tomado para evaluación de susceptibilidad según las calicatas del proyecto según Bray, J y Sancio, R. (2006),

Según Adapazari (2010) en su artículo “Liquefaction of Silts: The Adapazari Criteria” propone un criterio complementario basado de un criterio chino, donde se usa los estudios según Önalp, A. et al (2010), mostrados en las Figuras N°8.

Figura N° 8

Ubicación de los Sitios Estudiados en el Cuadro de Clasificación USBR



Nota: tomado del artículo Liquefaction of Silts: The Adapazari Criteria Önalp, A., E. Arel, Sert, S., Özacak, A. (2010)

- Análisis de potencial de licuación:

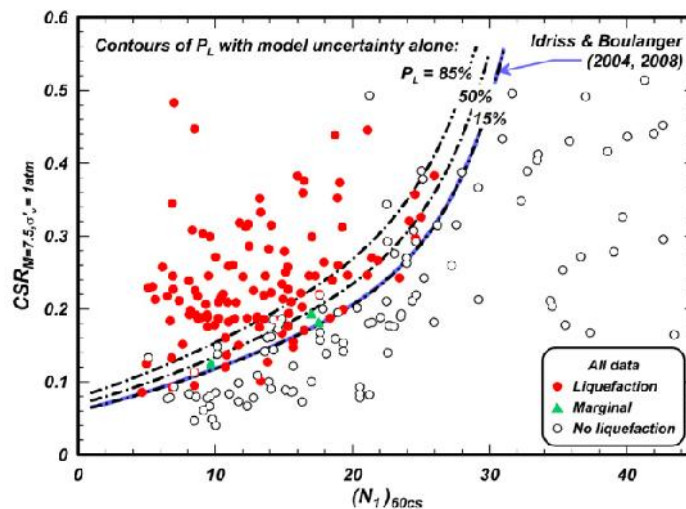
Según la Norma Técnica de Edificaciones en la sección de suelos y cimentaciones E.050 los sondeos deberán ser perforaciones por la técnica de lavado o rotativas y deben llevarse a cabo Ensayos Estándar de Penetración (SPT), según la NTP 339.133 - ASTM D 1586 espaciados cada 1 m. Además, las muestras que se obtengan en el penetrómetro utilizado para el ensayo SPT deberán recuperarse para poder efectuar con ellas ensayos de clasificación en el laboratorio.

Los valores obtenidos se deberán procesar por el método propuesto por Seed e Idris (1983) el cual usa los valores de numero de golpes (N) del Ensayo de Penetración Estándar (SPT) y la aceleración por sismo. Para este punto la normativa de suelos y cimentaciones peruana deja al diseñador libre de elegir la metodología más pertinente, estas metodologías serán descritas y usadas en esta investigación.

Según Boulanger, R. (2012), en su investigación de “Prueba de Penetración Estándar Probabilística Basada en Procedimiento de Activación de Licuación” se pudo obtener curvas para la probabilidad de licuación de 15, 50 y 85 % según lo mostrado en la Figura N°9.

Figura N° 9

Curvas de CRR ( $m=7.5$ ,  $\nu=1atm$ ) vs  $(N_1)_{60cs}$  para probabilidades de licuación 15,50 y 85%



Nota: tomada de Boulanger, R. (2012), Probabilistic SPT

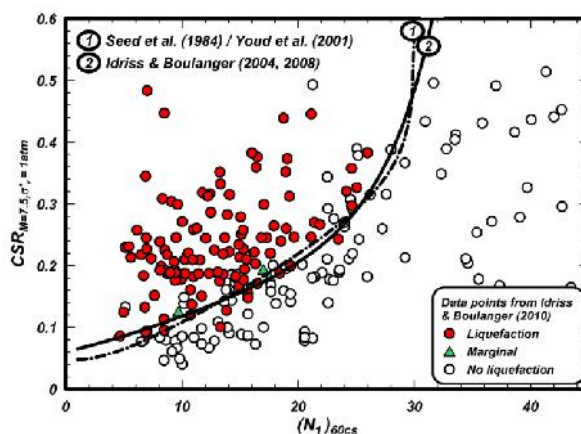
También se debe tener en cuenta para el análisis probabilístico completo del peligro de licuación, considerar las incertidumbres en el peligro sísmico, la caracterización del sitio y el modelo de activación de licuación. La incertidumbre en la licuación en el modelo de activación es mucho menor que la incertidumbre en el peligro sísmico y a menudo también será menor que la incertidumbre en la caracterización del sitio. Por esta razón, el análisis de riesgo sísmico y los esfuerzos de caracterización del sitio son componentes muy importantes de cualquier evaluación probabilística de los peligros de licuación.

Según el procedimiento de activación de licuación basado en SPT según Boulanger, R. & Idriss, I. (2014), describe que la Prueba de Penetración de Cono (CPT) y la Prueba de Penetración Estándar (SPT) son los índices más utilizados para evaluar las características de licuación de suelos. El desarrollo de procedimientos de activación de licuación ha progresado a lo largo de los

años gracias a las investigaciones realizadas. El desarrollo de correlaciones basadas en SPT comenzó en Japón (Kishida, 1966) y progresó hasta el trabajo histórico de Seed et al. (1984, 1985) que estableció el estándar en la práctica de la ingeniería durante más de dos décadas (Youd et al., 2001). Las actualizaciones recientes de SPT basado en procedimientos incluidos por Idriss y Boulanger (2008, 2010) y los procedimientos basados en SPT de Youd et al. (2001), Idriss y Boulanger (2010) son comparado en la Figura N°10.

Figura N° 10

Curvas de activación de licuación basadas en SPT



Nota 01: Ejemplos de curvas de activación de licuación basadas en SPT con una base de datos de historias de casos procesados con el procedimiento de Idriss-Boulanger (2008) (de Idriss y Boulanger 2008)

Nota 02: Curva de Relación de esfuerzo Cíclico (CSR) y Número de golpes SPT corregido  $(N_1)_{60cs}$

También Boulanger, R. e Idriss, I. (2014) realizan una actualización de las tablas presentadas adicionando nuevos casos históricos, donde se tuvo casos donde se manifestó la licuación y en otros no. Entre los factores más importantes a analizar están:

Para un número de SPT corregido  $((N_1)_{60cs})$ , desde 4 hasta 27; un porcentaje de finos (FC), con valores menores de 5%, de 5 a 35% y mayores de 35%; para una magnitud de sismos (M), desde 6.25 hasta mayores de 7.75 y estrés de sobrecarga efectivo  $(\sigma'_{v0})$ , para valores menores de 40 Kpa, entre 40Kpa



hasta 120 Kpa y para mayores de 120 Kpa. En todos los casos se analiza para un CSR menor de 0.6.

- Métodos de potencial de licuación:

Según el procedimiento de activación de licuación basado en SPT según R.W. Boulanger, R. & Idriss, I. (2014), evalúa la relación de Esfuerzo Cíclico (CSR) y Relación de Resistencia Cíclica (CRR). El procedimiento hace referencia a la evaluación del CSR propuesto por Seed e Idriss (1971) que formularon la siguiente ecuación para el cálculo del CSR:

$$CSR = \left( \frac{\tau_{cic}}{\sigma'_{v0}} \right) = 0.65 \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) r_d$$

Donde:

$\tau_{cic}$  : Esfuerzo cortante cíclico inducido por sismo

$\sigma'_{v0}$  : Esfuerzo efectivo vertical

$\sigma_{v0}$  : Esfuerzo total vertical

$g$  : Aceleración de la gravedad

$a_{max}$  : Aceleración horizontal pico en la superficie del terreno originada por el sismo

$r_d$  : Factor de reducción de esfuerzo por profundidad

Es importante señalar, como parte del procedimiento se hace uso del cálculo de esfuerzos totales y efectivos. Este se puede obtener mediante la profundidad, peso específico y la posición de la napa freática. Estos esfuerzos serán calculados en el capítulo V de la presente investigación “Evaluación de Resultados”.

Para el cálculo del factor de reducción por profundidad ( $r_d$ ) según Idriss, I. (1999) en su artículo “Liquefaction - Induced Ground Deformations Evaluation Based on Cone Penetration Tests (CPT)” y usando valores de aceleración de diseño obtenida a partir del análisis de peligro sísmico, se recomienda las siguientes relaciones:

$$rd = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M]$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right)$$

Donde “z” viene a ser la profundidad del terreno en metros y el argumento dentro de la expresión “sin” están en radianes.

Para la evaluación del CRR, según Idriss, I. & Boulagner, R. (2008) se propuso la siguiente formula de CRR:

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1} = \exp\left[\frac{(N_1)_{60}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60}}{126}\right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60}}{25.4}\right)^4 - 2.8\right]$$

Donde:

- $(N_1)_{60cs}$ , es el número de golpes normalizado del SPT para una presión de sobrecarga aproximada de 100 kPa y una relación de energía de martillo o eficiencia del martillo del SPT del 60% corregido por el porcentaje de finos.
- $CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm}$ , la resistencia a la licuación para un sismo de magnitud de 7.5, escala Magnitud Momento y una presión efectiva de 1atm.

Los valores de la expresión de Idriss, I. & Boulagner, R. (2008) se explicará a continuación:

- Para el valor de  $(N_1)_{60}$ , es obtenido a partir de las correcciones que se realizan al número de golpes (N) del SPT en campo, el cual se describe en los subcapítulos siguientes, además de ser corregido por el porcentaje de contenido de finos (CF) en el suelo de la siguiente manera:

$$(N_1)_{60} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60}$$

Donde  $\Delta(N_1)_{60}$  es obtenido de la siguiente manera con relación al porcentaje de Contenido de Finos (FC):

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left(1.63 + \frac{9.7}{FC + 0.01} - \left(\frac{15.7}{FC + 0.01}\right)^2\right)$$

- Luego de haber calculado el esfuerzo cíclico actuante (CSR) y el esfuerzo cíclico resistente (CRR) estos a su vez deben ser corregidos por otros

factores, como la magnitud del sismo. Por lo tanto, el factor de seguridad contra la licuación queda definido de la siguiente manera:

$$FS = \left( \frac{CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1}}{CSR} \right) \cdot MSF$$

Donde:

MSF: Factor de escalamiento por magnitud del sismo.

- Los factores para escalamiento de magnitud (MSF por sus siglas en inglés) fueron creados con el propósito de poder realizar la posterior corrección del esfuerzo cíclico actuante (CSR) directamente o esfuerzo cíclico resistente (CRR) de forma inversa, ya que la obtención de las fórmulas y por ende del CRR es hecha para un sismo de 7.5 en escala Magnitud Momento. La relación usada para el MSF por Idriss, I & Boulanger, R. (2008) fue la siguiente:

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \cdot \left( 8.64 \exp\left(-\frac{M}{4}\right) - 1.325 \right)$$

Donde:

$$MSF_{max} = 1.09 + \left( \frac{(N_1)_6}{31.5} \right)^2$$

- Luego de haber calculado el esfuerzo cíclico actuante (CSR) y el esfuerzo cíclico resistente (CRR), éstos a su vez deben ser corregidos por otros factores, como los esfuerzos por presión de sobrecarga y estado inicial de esfuerzos. Por lo que el factor de seguridad contra la licuación queda definido de la siguiente manera:

$$FS = \left( \frac{CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1}}{CSR} \right) \cdot MSF \cdot K_{\sigma} \cdot K_{\alpha}$$

Donde:

MSF : Factor de escalamiento por magnitud del sismo

K : Corrección por esfuerzo efectivo de confinamiento inicial (Idriss y Boulanger, 2008)

$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \cdot \ln \left( \frac{\sigma'_{v}}{P_a} \right) \leq 1.1$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{(N_1)_{60}}} \leq 0.3$$

El coeficiente  $C_{\sigma}$  se puede limitar a su valor máximo de 0.3 al restringir  $(N_1)_{60} \leq 37$  para su uso en estas expresiones.

El efecto de los esfuerzos de corte estático sostenidas, que pueden expresarse a través de un factor corrección por esfuerzo de corte inicial ( $K_{\alpha}$ ), es generalmente pequeño para condiciones de terreno casi niveladas y se considera como valor igual a 1. Al momento de realizar el ensayo de penetración estándar (SPT) se obtienen valores de números de golpes, los cuales deben ser estandarizados, ya que existen diferentes métodos al momento de ejecutar la caída del martillo, diferentes especificaciones técnicas del equipo usado, entre otros. Todas ellas conllevan a tener un valor estandarizado mundial del SPT, que alcanza un valor del 60% de la energía total de un ensayo SPT estrictamente teórico. Asimismo, para la evaluación de la resistencia del suelo a la licuación, a pesar de las correcciones realizadas por la energía transmitida, es necesario normalizarlo a unas las fórmulas generales para realizar esas correcciones. Se muestran en la tabla N°2 “Correcciones para SPT” propuesto por Robertson, P y Wride, C (1998) para la corrección de estos valores, adicionalmente se presenta la Tabla N°3 “Eficiencias de martillo de SPT” propuesto por Clayton (2001) para el factor de eficiencia de martillo. Con ello la corrección del número de golpes por energía y esfuerzo efectivo queda de la siguiente manera:

$$(N_1)_{60} = N_m C_N C_E C_B C_R C_S$$

Donde:

$N_m$  : Valor estándar de resistencia a la penetración

$C_N$  : Factor para normalizar el  $N_m$  a una referencia común de esfuerzo efectivo

$C_E$  : Corrección por relación de energía del martillo

$C_B$  : Corrección por diámetro de perforación

$C_R$  : Corrección por longitud de la varilla

$C_S$  : Corrección por método de muestreo

- Para la normalización del valor de N del SPT Idriss, I & Boulanger, R. (2003, 2008) propusieron la siguiente relación:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^m \leq 1.7$$

$$m = 0.784 - 0.0768 \cdot \sqrt{(N_1)_6}$$

- Para  $\sigma'_v$  en kg/cm<sup>2</sup>,  $P_a = 1$  kg/cm<sup>2</sup>, esta expresión está limitada para valores  $(N_1)_6 \leq 46$ .

Tabla N° 2

Correcciones para SPT

Factor	Variable del equipo	Término	Corrección
Presión efectiva	-	$C_N$	$(Pa/\sigma'_v)^m$
Presión efectiva	-		CN 1.7
Relación de energía	Martillo dona		0.5-1.0
Relación de energía	Martillo de seguridad	$C_E$	0.7-1.2
Relación de energía	Martillo dona automático		0.8-1.3
Diámetro de perforación	65-115 mm		1
Diámetro de perforación	150 mm	$C_B$	1.05
Diámetro de perforación	200 mm		1.15
Longitud 1	< 3m		0.75
Longitud 2	3-4 m		0.8
Longitud 3	4-6 m	$C_R$	0.85
Longitud 4	6-10 m		0.95
Longitud 5	10-30 m		1
Método de muestreo	Muestreo estándar		1
Método de muestreo	Muestreo sin revestimiento	$C_S$	1.1-1.3

Nota: Tomado de Robertson, P y Wride, C. (1998), Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test

Tabla N° 3

Eficiencias de martillo de SPT

País	Tipo de martillo	Mecanismo de caída de martillo	Eficiencia de martillo Em
Argentina	Dona	Carrete	0.45
Brasil	Pin	Caída a mano	0.72
China	Automático	Desenganche	0.6
Colombia	Dona	Carrete	0.5
Reino Unido	Automático	Desenganche	0.73
EE.UU.	Seguridad	Carrete 2 vueltas	0.55-0.60
Venezuela	Dona	Carrete	0.43

Nota: adaptado de Clayton (1990)

La Tabla N°3 “Eficiencias de martillo de SPT” recuperadas del artículo de Robertson, P. y Wride, C ,1998 “Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test” describe los fenómenos de licuación del suelo, revisa las definiciones adecuadas y proporciona una actualización de los métodos para evaluar la licuación cíclica utilizando la prueba de penetración de cono (CPT), usados como base para el cálculo de potencial de licuación.

- Métodos de Probabilidad de licuación:

Según Iwazaki y Tokimatsu (1982) para el cálculo de Probabilidad se usará la siguiente expresión:

$$P_L = \int_0^2 F(z)W(z) \partial z$$

Donde

F(z) : 1- FL(z), para valores de FL(z) 1.0

F(z) : 0, para valores de FL(z) > 1.0

W(z) : 10 - 0.5z, para z < 20.0 metros

W(z) : 0, para z > 20.0 metros

$FL(z)$  : CRR/CSR a una profundidad  $z$

Una vez evaluado y obtenido el valor de probabilidad de licuación ( $P_L$ ), el autor Iwazaki y Tokimatsu (1982) propone rangos para estos, con los que se puede definir los efectos de licuación presentados en la Tabla N°4.

Tabla N° 4

Probabilidad de licuación según rangos y efectos

Probabilidad de licuación ( $P_L$ )	Efectos
$P_L=0$	Suelos no licuables
$0 < P_L < 5$	No hay efectos de licuación
$5 < P_L < 15$	Probables efectos severos
$15 < P_L < 100$	Efectos severos
$P_L=100$	Suelos altamente licuables

Nota: Fuente Iwazaki y Tokimatsu (1982), recuperado del manual de suelos y cimentaciones E050, 2018

### 2.3.5 Mejoramiento de suelos

- Evaluación de proyectos de mejoramiento de suelos:

Robertson, P y Wride, C. (1998) en su artículo “Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test” describe los fenómenos de licuación del suelo, revisa las definiciones adecuadas y proporciona una actualización de los métodos para evaluar la licuación cíclica utilizando la prueba de penetración de cono (CPT).

Según se describe en el manual de Ground Modification Methods, (2017) la finalidad de hacer una modificación al suelo sería aumentar la resistencia al corte y la resistencia del rodamiento, aumentar la densidad, disminuir la permeabilidad, controlar las deformaciones (asentamiento, levantamiento, distorsiones), mejorar el drenaje, acelerar la consolidación, disminuir las cargas impuestas, proporcionar estabilidad lateral y aumentar la resistencia a la licuación. A su vez, con ello se quiere mejorar la transferencia de cargas de

terraplén a capas subsuperficiales más competentes, utilizar un sistema de cimentación menos costosos, reducir las adquisiciones de derecho de vía, minimizar la perturbación ambiental, reducir el tiempo de construcción y controlar el tráfico mejorado a través de zonas de construcción. Dado a la gran cantidad de parámetros, el manual Ground Modification Methods (2017), sugiere seguir una secuencia establecida para evaluar los proyectos de mejoramiento de suelos. En cuanto a los riesgos que podría presentar una construcción en general, el manual recomienda identificar pendientes inestables, deformaciones verticales y horizontales, la capacidad de soporte, presencia de licuación, hundimientos (vacíos sub superficiales o cambio de tensiones sub superficiales, nivel de agua subterránea y fluctuaciones, suelo químicamente reactivo, suelos contaminados, diferentes condiciones geotécnicas del sitio, condiciones problemáticas del terreno (expansivo, colapsables, orgánico, turba, rellenos, vertederos) e inadecuada investigación geotécnica.

Una vez elegida el método de mejoramiento de suelos, tomando en cuenta lo descrito en la Tabla N°5, se puede proceder a la descripción del sistema, las consideraciones de diseño, la construcción, diseño final, especificaciones de calidad y costos.

Tabla N° 5

Secuencia para evaluar proyectos de mejoramientos de suelos

Paso	Descripción
1	Identificar las malas condiciones potenciales del terreno y la necesidad de modificación del terreno
2	Identificar o establecer requisitos de desempeño
3	Identificar y evaluar las condiciones generales del sitio
4	Evaluar las condiciones del subsuelo
5	Desarrollar una lista corta de geotecnologías aplicables a las condiciones del sitio
6	Considerar las restricciones del proyecto
7	Considerar los riesgos del proyecto



8	Preparar un diseño preliminar
9	Identificar soluciones alternativas (puente, desvío, cimientos profundos, etc.)
10	Evaluar los requisitos, limitaciones y riesgos del proyecto contra los factores que afectan selección de Geotecnología
11	Comparar la lista corta de alternativas de Geotecnología utilizando factores de viabilidad
12	Seleccionar la Geotecnología adecuada

Nota: Tomado de la tabla 1-7: Ground Modification Technology Selection Steps "Ground Modification Methods Volumen I (2017)"

- Generalidades de mejoramiento de suelos:

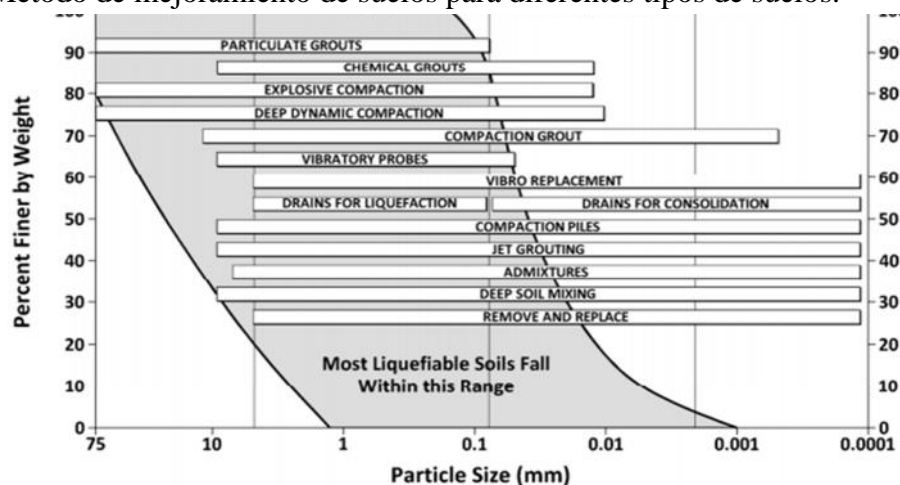
Según la guía de cimentaciones en obra de carretera (2009) usada en España, plantea una tabla considerando los siguientes aspectos: tipo de problema que se pretende resolver, tipo de terreno, condicionantes de la obra (plazo y precio)

Para el diseño se realizó un método de indicadores, según control de calidad que depende del diseñador, comparando los criterios elegidos.

Según la publicación del artículo de Schaefer, V. (2012), el autor realizó una recopilación para un plan de gestión de proyectos de mejoramiento de suelos que categoriza los métodos según función y categoría. La selección del criterio depende del tipo de suelo según lo descrito en la Figura N° 11.

Figura N° 11

Método de mejoramiento de suelos para diferentes tipos de suelos.



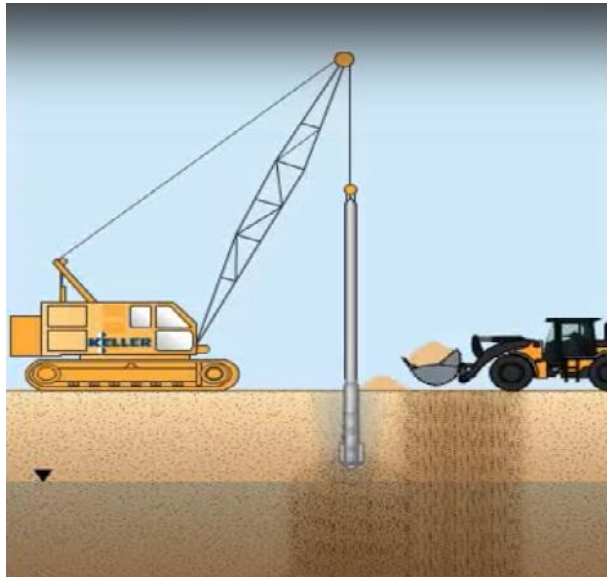
Nota: Tomado de Schaefer, V (2012), Pag. 6, usado para fines de caracterización de suelo y elección de método de mejoramiento de suelo.

Con ello, podemos describir las soluciones que reduzcan el impacto de la licuación teniendo en cuenta que la licuación del terreno es un problema común en zonas sísmicas; se produce debido a un aumento brusco de las presiones intersticiales, las cuales por encima de un determinado valor producen la anulación de las presiones efectivas en las capas de suelo afectadas. Por consiguiente, la eliminación de la resistencia al corte y los asentamientos inducidos provocan daños adicionales.

Según la empresa Keller, la Vibrocompactación es usada como método de mitigación de licuación, densificando el suelo no cohesivo aplicable en suelos granulares con porcentaje de finos entre 10% a 15%.

Figura N° 12

#### Procedimiento de instalación de Vibrocompactación



Nota: fuente Keller (2013)

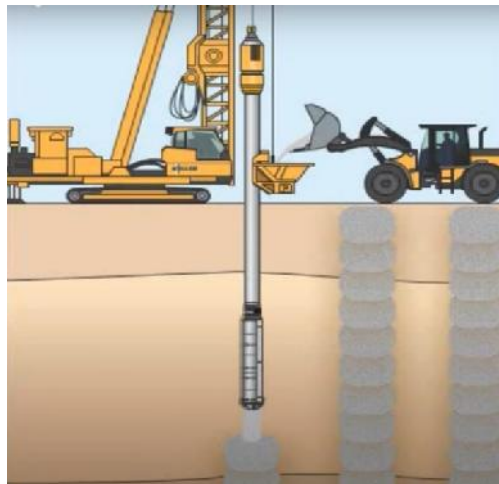
En el caso de Columnas de Gravas, existen varias fuentes sobre empresas y tesis que manifiesta la eficiencia de la solución también conocido como vibro sustitución.

Según la empresa Keller, los usos frecuentes de esta solución son disminución de asientos de cimentación, aumento de la capacidad portante del terreno, aumento de la resistencia al deslizamiento y disminución del riesgo de licuación en zonas sísmicas. Existen varios procedimientos para instalar las Columnas de Grava, entre ellos el más eficiente el procedimiento de ejecución

por vía seca (Dry - method) y con descarga interior (Bottom - Feed). El procedimiento consiste en aportar la grava mediante una pala cargadora hasta una tolva que, una vez cargada de grava, asciende por el mástil guía hasta la cámara de descarga que se encuentra en el extremo superior del conjunto tubo – vibrador. El vibrador se introduce en el terreno únicamente por vibración radial, desplazando lateralmente el suelo y sin extracción de material. Una vez que alcanza la profundidad de diseño, el vibrador se retira en pasadas ascendentes de entre 50 y 100 cm de forma que la grava introducida por la punta inferior del vibrador garantiza la continuidad de las columnas. La grava va ocupando el espacio libre y el vibrador la compacta lateralmente hasta movilizar el empuje pasivo del terreno.

Figura N° 13

Procedimiento de instalación de Columna de Grava



Nota: fuente Keller (2013), Columnas de Grava

Además, la empresa Soletanche Bachy define a las Columnas de Grava un sistema que consiste en la incorporación de material granular en el suelo. El procedimiento de instalación consiste en la introducción del material granular a través de un tubo hincado en el suelo. El método se usa en suelos arcillosos y limosos aumentando la capacidad portante y la permeabilidad del suelo, usado para el tratamiento de suelos licuables.

Figura N° 14

Procedimiento de instalación de Columna de Grava

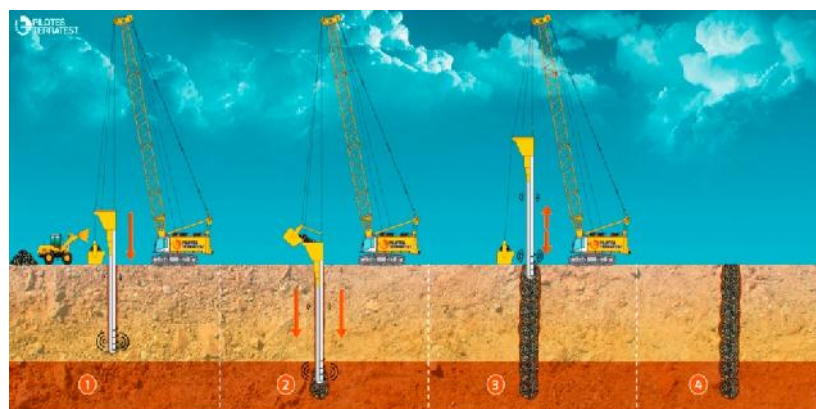


Nota: fuente Soletanche Bachy 2020, Proyecto Cartagena con Columnas de Grava

Según Pilotes Terratest, la Vibrosustitución es una técnica de mejora de suelos mediante vibración profunda. Las Columnas de Grava, también conocidas como Vibrosustitución, es una técnica de mejora de suelos mediante vibración profunda y aporte de gravas al terreno, formando Columnas de Grava compactada que incrementan la capacidad portante global, reducen los asentamientos y mitigan el potencial de licuación. Esta solución se emplea para cimentación de terraplenes de estructuras viales o industriales.

Figura N° 15

Procedimiento de instalación de Columna de Grava



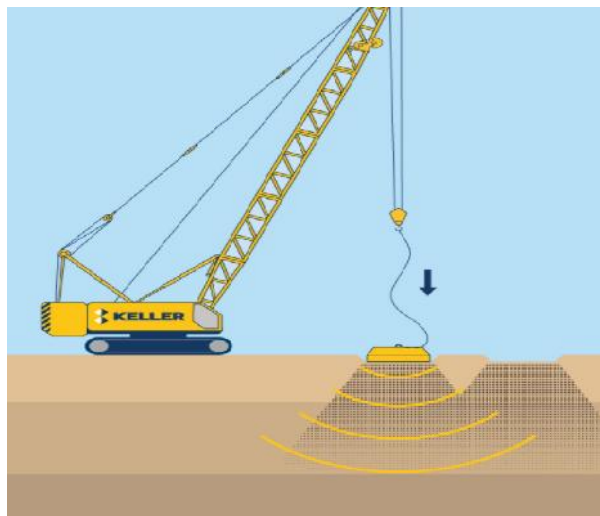
Nota: fuente Terratest 2020, Columnas de Grava

Según la empresa Keller, la Compactación Dinámica es una técnica de mejora del terreno que densifica y aumenta la capacidad portante de rellenos, suelos

granulares y suelos sueltos utilizando la caída libre de un peso. Se menciona como usos frecuentes de aumentar la capacidad portante, disminuir el asentamiento, mitigar la licuación y reducir el potencial de hundimiento. Para el procedimiento constructivo se requiere una grúa capaz de soltar una maza de entre 10 y 30 toneladas, desde una altura de caída libre de entre 10 y 20 metros, realizando impactos repetidos sobre puntos situados sobre una malla.

Figura N° 16

Procedimiento de instalación de Compactación dinámica

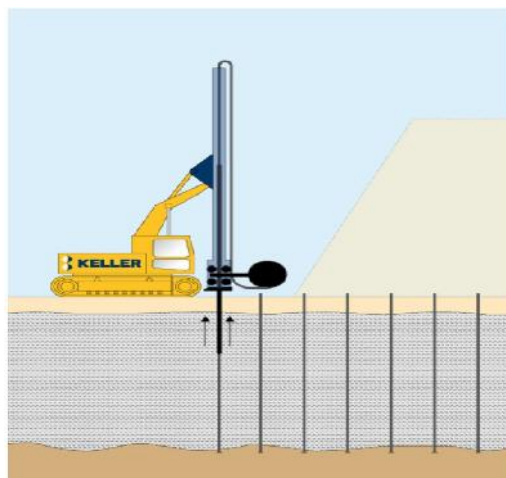


Nota: fuente Keller (2013), Compactación dinámica

Según Keller, Los Drenes Sísmicos o Mechas Drenantes son un método muy eficiente que minimiza los daños producidos por un sismo, como fallas de capacidad portante, asientos generados durante y después del mismo, y el riesgo de licuación. Los drenes consisten en tuberías corrugadas y perforadas envueltas en una tela filtrante especial no tejida de polipropileno, tienen un diámetro de 7 a 10 cm y se ejecutan hasta 30 m de profundidad

Figura N° 17

### Procedimiento de instalación de Drenes Sísmicos / Mechas Drenantes



Nota: fuente Keller (2013), Drenes Sísmicos

#### 2.3.6 Estudio de las Inclusiones

Los métodos de mejoramiento de suelo se han vuelto para la ingeniería geotécnica uno de los pilares de estudio, ya que tienen como objetivo el tratamiento de suelos con mala condición. Estos cambios tienen como finalidad aumentar la resistencia mecánica, reducir la compresibilidad (minimizar los asentos bajo cargas estáticas), reducir el potencial de licuación bajo cargas dinámicas, mejorar la permeabilidad, disminuir el potencial de deterioro y el colapso estructural.

Simon, B. (2017), en su artículo describe que dentro de estos cambios está el control de asentos, a parte de la importancia de la reducción de su magnitud, también es esencial controlar los tiempos de consolidación que marcaran el ritmo de la construcción de la estructura. En los últimos tiempos, se ha avanzado la tecnología en los métodos de mejora del suelo que consiste en la introducción o construcción en los suelos blandos (suelo malo) de elementos verticales que se clasifican en flexibles, semi rígidos y rígidos, que se designan inclusiones. Su crucial aplicación es en suelos blandos siendo necesaria su aplicación permitiendo, a parte de otros mejoramientos, mayor velocidad de consolidación y construcción de estructuras. Esta técnica requiere una capa granular de reparto colocada encima de las inclusiones. Ligado al desarrollo y auge del método se han publicado algunas normativas y recomendaciones en diferentes países de Europa

que consisten en el diseño de las inclusiones y los muchos elementos que la conforman como la capa de repartición y los refuerzos con geosintéticos.

- Propiedades de las inclusiones:

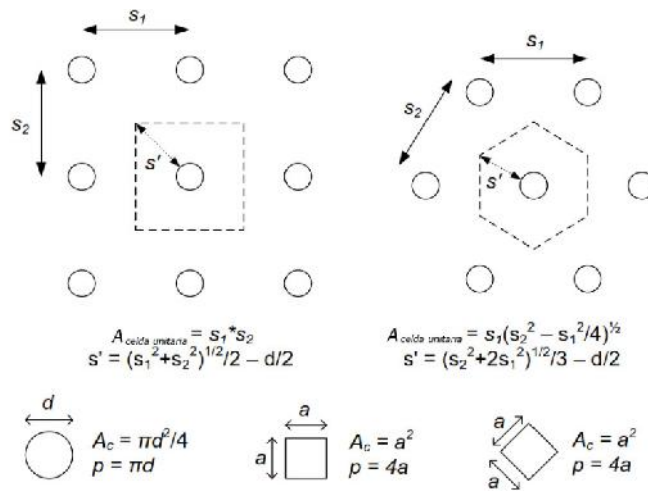
Existe una amplia gama de inclusiones el uso de éstas dependerá de disponibilidad de material y solitud del proyecto.

- Consideraciones para el diseño con inclusiones:

Según la Federal Highway Administration FHWA (2017), en su manual de métodos de modificación de suelos, para estimar el espaciamiento preliminar de la columna, preliminarmente se puede usar una tasa de reemplazo de área de columna entre área total de la celda unitaria valores de 3.5 a 10%, siguiendo el concepto de la celda unitaria. Para el diseño de inclusiones, se debe tener en cuenta las propiedades del suelo y del material con el que se mejorará. Primeramente, se considera el concepto de celda unitaria según la Figura N° 18

Figura N° 18

Esquema de diseño por celda unitaria.



Nota: Esquema de diseño y definición de columna para entradas a altura crítica y método de Terzaghi adaptado

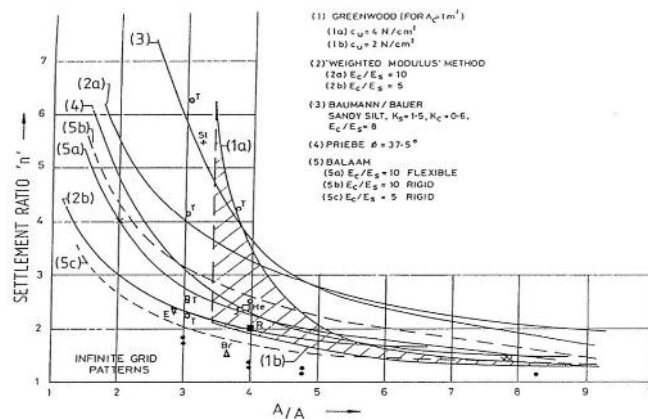
Con ello se ratio de área de reemplazo:

$$\alpha_S = \frac{A_S}{A}$$

Además, se muestra la siguiente tabla la cual permite obtener la relación de asentamientos de suelos sin mejora y suelos con mejoramiento con Columna de Grava recopilando los modelos de varios autores conforme a la Figura N°19

Figura N° 19

Relaciones de asentamientos de suelo con mejoramiento con Columna de Grava y suelo no mejorado.



Nota: Adaptado de la FHWA (2017), Manual de métodos de modificación de suelos.

Para determinar la carga requerida de la columna se debe calcular la carga nominal que depende del diámetro efectivo del área tributaria de la columna, altura del terraplén, sobrecarga viva, sobrecarga muerta y peso unitario del suelo del terraplén según la siguiente expresión:

$$Q_r = \left(\frac{D_c}{2}\right)^2 (\gamma H + q)$$

Donde:

$D_c$  : Diámetro efectivo del área tributaria de la columna

$H$  : Altura del terraplén

$Q$  : Sobrecarga viva y muerta

$\gamma$  : Peso unitario de suelo del terraplén

Con ello, se seleccionará el tipo de columna basado en los requerimientos geotécnicos y cargas, para ello podemos considerar la tabla N°6 “Resistencia y geometría de Columna de agregado y CMC”.



Además, la FHWA (2017), en el manual de métodos de modificación de suelos se describe como método de solución geotécnica a la columna de agregados, donde se considera la Columna de Grava y los Pilares de Agregado Apisonado, y las Columnas de Soporte Para Terraplenes, el cual consiste una gran variedad de tipos de columnas como compresibles y no compresibles diferenciadas según la capacidad permisible, longitud y diámetro.

Tabla N° 6

Resistencia y geometría de Columna de agregado y Columna de Módulo Controlado

Tipos de columna	Capacidad admisible (Kips)		Longitudes típicas (Pies)		Diámetros típicos de la columna (Pulgadas)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Columnas de agregado	25	150	10	30	24	48
Columnas de Módulo Controlado	50	150	20	90	12	24

Nota: Tomado de la tabla 6-1: Possible Column Types del manual "Ground Modification Methods Volumen II" para fines de diseño.

Dichos parámetros serán considerados para el diseño preliminar de las Columnas de Grava o Columnas de Módulo Controlado visto en esta investigación. Además, la FHWA (2017) en su manual de métodos de modificación de suelos contempla el siguiente procedimiento de diseño de inclusiones:

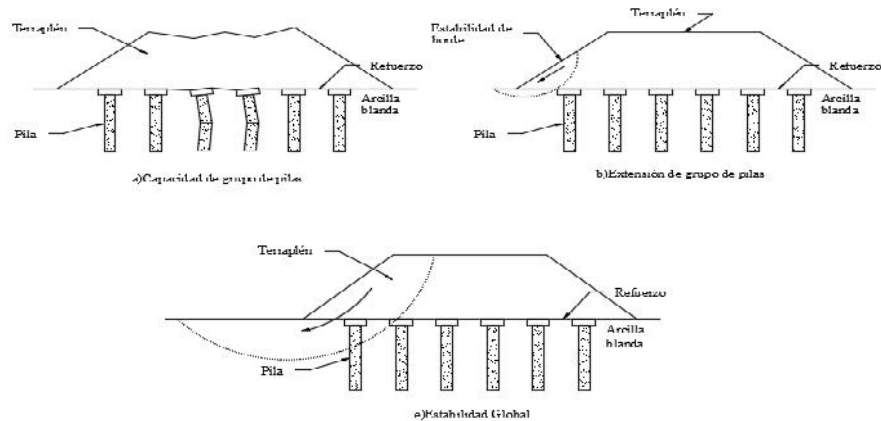
- Determinar la extensión lateral de las columnas, que depende del ángulo de fricción del terraplén y la pendiente.
- Verificar la altura crítica y ajustar el espaciamiento de la columna, la cual se puede determinar empíricamente con la geometría de la columna. Si dicha relación de altura crítica es mayor a la altura a proyectar, se debe usar esta para así evitar el asentamiento diferencial, lo cual conlleva a modificar la geometría de las columnas.

- Determinar si se requiere una plataforma de carga, para esto el diseño de la plataforma de carga debe haber una compatibilidad entre las cargas y el desplazamiento, para ello se usará distintos métodos para el diseño de la plataforma como el método de la viga, la parábola generalizada y de Terzaghi modificado.
- Determinar el asentamiento posterior a la construcción utilizando la plataforma de carga.
- Determinar el refuerzo requerido por el empuje lateral, para el caso se debe calcular el empuje lateral con el coeficiente de presión activo, y demás cargas que produzcan un empuje lateral.
- Determinación de los requisitos generales de refuerzo para la plataforma de carga y el empuje lateral, se debe contrarrestar los esfuerzos obtenidos mediante el uso de refuerzos o el uso de un terraplén, y las cargas verticales mediante el refuerzo de la plataforma de carga.

Además, la FHWA (2017) en su manual de métodos de modificación de suelos en el diseño de las columnas se debe considerar los estados límite de resistencia y el estado de falla de servicio. Los modos de falla del estado límite y servicio se muestran en la Figura N°20 y la Figura N°21

Figura N° 20

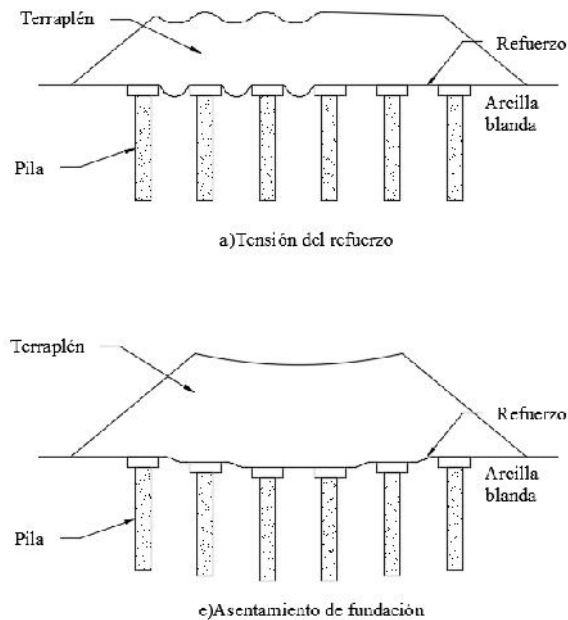
Estados límite de modo de falla de terraplenes soportado por



Nota: Tomado de la Figura 6-8: Limit State Failure Modes, FHWA (2017) "Ground Modification Methods Volumen II"

Figura N° 21

Estado de servicio de terraplenes soportado por columnas



Nota: Tomado de la Figura 6-9: Serviceability State, FHWA (2017) "Ground Modification Methods Volumen II"

Así finalmente, la FHWA (2017) en su manual de métodos de modificación de suelos recomienda revisar la estabilidad global. Esta se analizará mediante la evaluación de equilibrio límite, para ello se podrían usar softwares geotécnicos. Finalmente, se preparará los dibujos de construcción, las especificaciones y el plan de supervisión la construcción.

### 2.3.7 Columnas de Grava

- Definición:

Según lo definido por Terratest, Las Columnas de Grava, también conocidas como Vibrosustitución, son una técnica de mejora de suelos mediante vibración profunda y aporte de gravas al terreno, formando Columnas de Grava compactada que incrementan la capacidad portante global, reducen los asentamientos y mitigan el potencial de licuación sísmica.

Según La empresa Soletanche Bachy, define las Columnas de Grava como un sistema que consiste en la incorporación de material granular en el suelo.

Existen varias técnicas dependiendo del contexto geológico. La metodología más usada es la introducción del material granular a través de un tubo hincado en el suelo, este método se usa en suelos arcillo - limosos aumentando la capacidad portante y la permeabilidad del suelo. Permite igualmente el tratamiento de suelos licuables.

- **Objetivos de la aplicación de Columna de Grava:**

Se pueden conseguir tres efectos favorables para minimizar el efecto de una posible licuación:

- La densificación del suelo conseguirá mayores densidades relativas, relacionándose directamente con un incremento del valor de esfuerzo cíclico resistente (CRR).
- Al rigidizarse el terreno, el bloque tendrá menos tendencia a la deformación cíclica por cizalla y a una menor amplificación de la aceleración sísmica, lo que redundará en una reducción del valor del esfuerzo cíclico actuante (CSR)
- Al existir columnas de una permeabilidad superior a la del terreno natural, el drenaje de las arenas durante el sismo no tendrá que ser exclusivamente vertical, sino que una buena parte de dicho drenaje se producirá transversalmente hacia las columnas. Así, las longitudes de drenaje (que depende del factor de sobrepresiones intersticiales) serán mucho más pequeñas y se evitará la disminución de presiones efectivas en el terreno natural reduciendo las sobrepresiones intersticiales inducidas por el sismo.

- **Diseño de Columnas de Grava:**

Para el diseño de Columnas de Grava se usará el método de Seed, H. y Booker, J. (1976) en su artículo “Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drain Systems”. Los autores desarrollaron un modelo matemático de consolidación radial diferida, cuya solución fue plasmada en ábacos, la cual está en función de tiempo radial ( $T_{ad}$ ). Este es un parámetro adimensional análogo al factor de tiempo vertical que desarrollaron Terzaghi y Frölich para su modelo de consolidación vertical en arcillas.

En los ábacos de Seed, H. y Booker, J. (1976), la expresión de  $T_{ad}$  se tiene que utilizar y emplear en los ábacos mostrados en la figura N°22 “Relación de diámetro y separación de Columnas de Grava”

$$T_a = \frac{k}{\gamma_w} \frac{t_d}{m_{v,s} a^2}$$

a : Radio de la sección transversal de la columna [m]

b : Radio del área tributaria equivalente de cada columna [m]

k : Permeabilidad horizontal del terreno [m/s]

$\gamma_w$  : Peso específico del agua [kN/m]

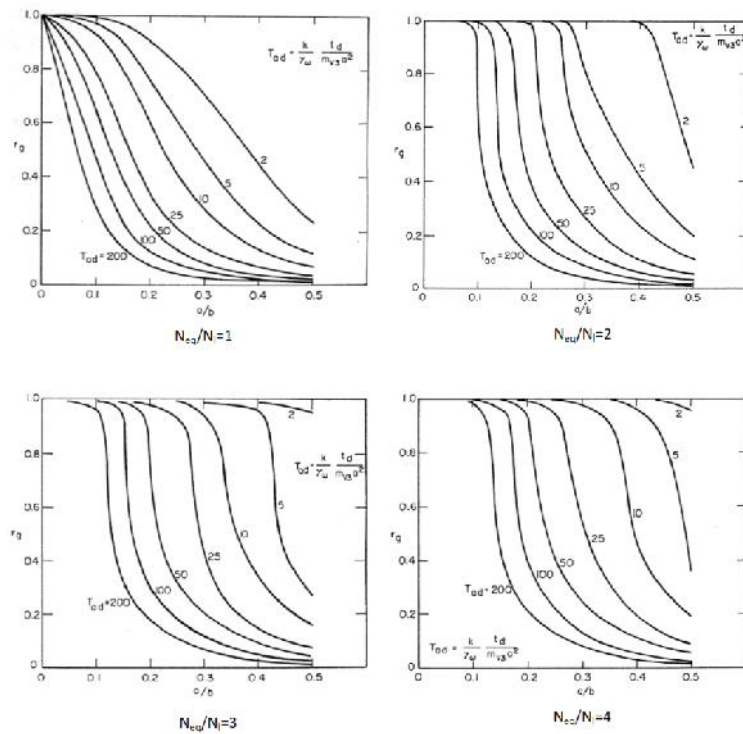
$t_d$  : Duración significativa del sismo (aquella en la que se producen solicitaciones de intensidad suficiente como para producir incremento de presiones intersticiales) [s]

$m_{v,s}$ : Módulo de compresibilidad en [m<sup>2</sup>/kN]

$r_g$  : Razón de sobrepresión intersticial máxima permitida

Figura N° 22

Relación de diámetro y separación de Columnas de Grava

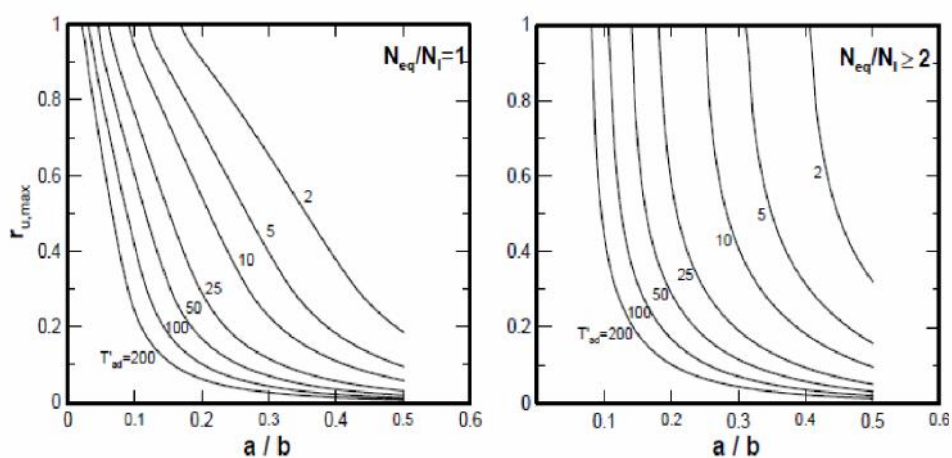


Nota: Relación entre la máxima razón de presión intersticial permitida en del suelo ( $r_g = u_g / 'v_o$ ) y la geometría en planta del tratamiento para diferentes características del terreno y del sismo esperable (Seed y Booker, 1976)

Según Bouckovalas, G. et al. (2009) se propone una metodología de diseño más reciente, considerando el drenaje para la remediación por licuación basándose en el trabajo de Seed H, y Booker, J. (1977), simplificando los ábacos mostrados en la Figura N°23

Figura N° 23

Relación de diámetro y separación de Columnas de Grava según la presión de poros deseada.

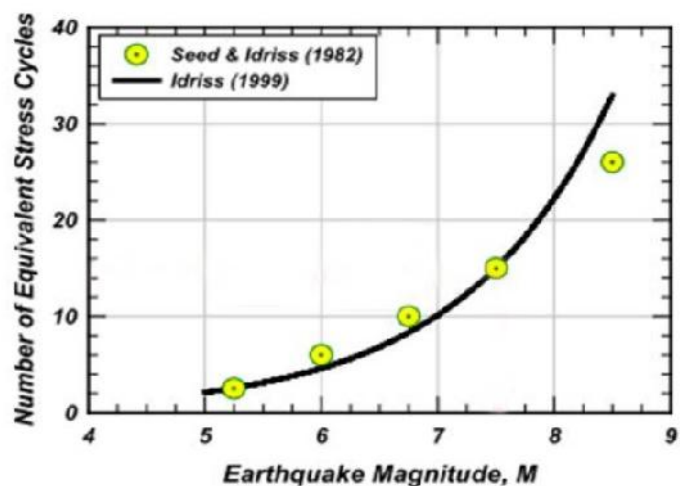


Nota: Propuesta de modificación de los ábacos de Seed y Booker (Fuente: Bouckovalas et al., 2009)

Para poder hacer uso de los ábacos mostrados en la figura N°22 “Relación de diámetro y separación de Columnas de Grava según la presión de poros deseada” es necesario conocer la relación de número de ciclo equivalente  $N_{eq}$  entre el número de ciclos necesarios para que inicia la licuación  $N_l$  ( $N_{eq}/N_l$ ). Para obtener el número de ciclos equivalentes ( $N_{eq}$ ) podemos usar la relación propuesta por en función a la magnitud de sismo mostrado en la figura N°24

Figura N° 24

Número de ciclos equivalentes según la magnitud del sismo



Nota: Curva de estimación del número de ciclos equivalentes  $N_{eq}$  (Fuente: Seed, H. y Idriss, I. 1982 y Idriss, I. 1999)

Estudios más recientes para la obtención de números equivalentes ( $N_{eq}$ ) y tiempo significativo de duración del terremoto ( $t_d$ ) lo propone Selcuk, L. y Kayabali, K. (2015) en su artículo “Evaluation of the Unconfined Compressive Strength of Rocks Using Nail Guns” simplificando el proceso en función de la magnitud del sismo presentado en la siguiente Tabla N°7

Tabla N° 7

Número de ciclos equivalente y tiempos de duración significativa para terremotos de diferentes magnitudes

Magnitud de sismo $M_s$	$N_{eq}$	Duración del sismo en segundos
5.5-6	5	8
6.5	8	14
7	12	20
7.5	20	40
8	30	60

Nota: Número de ciclos equivalente y tiempos de duración significativa para terremotos de diferentes magnitudes (Fuente: Selcuk, L. y Kayabali, K. 2015)

De forma alternativa, Castiglia, M. y Magistris, F. (2018) en su artículo “Prediction of the Number of Equivalent Cycles for Earthquake Motion”

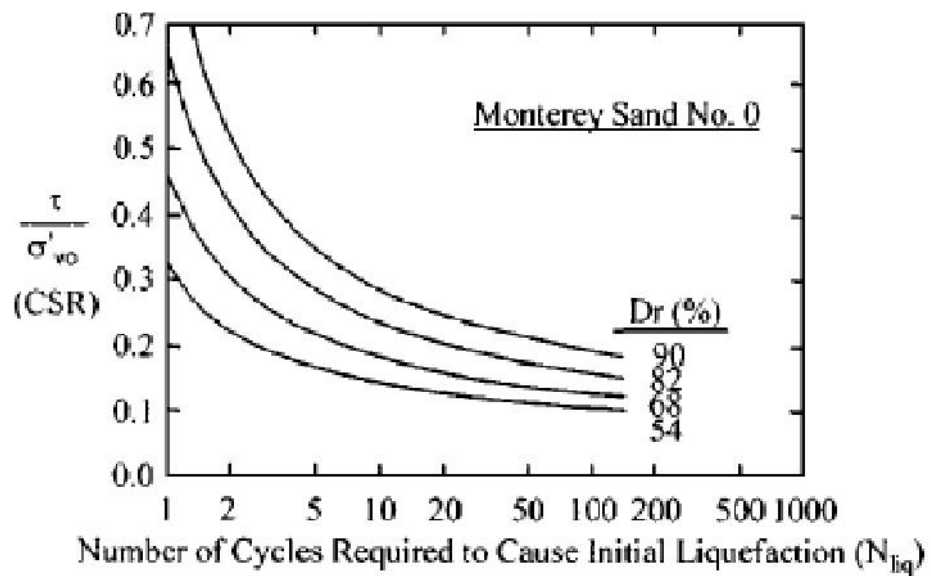
propusieron una relación entre el número de ciclos equivalentes, la magnitud sísmica y el tiempo significativo expresada de la siguiente manera:

$$\ln(N_e) = 0.2792 + 0.9396 \ln(M) + 0.2713 \ln(t_d)$$

Siguiendo con la obtención del factor ( $N_{eq}/N_i$ ), para la poder determinar el número de ciclos necesario para que se inicie la licuación ( $N_i$ ), Alba et al. (1975) realizaron un estudio que ligaba el CSR, la densidad relativa y el número de ciclos necesario en cada caso para que se inicie la licuación mostrado en la Figura N°25

Figura N° 25

Número de ciclos para inicio de licuación según el esfuerzo cíclico actuante (CSR) y la densidad relativa



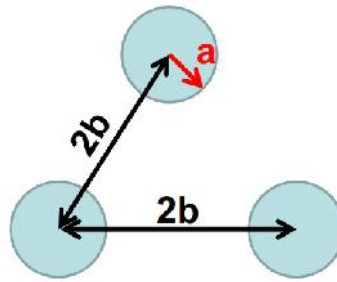
Nota: Número de ciclos necesario para que se inicie la licuación ( $N_i$ ) según Alba et al. (1975)

Así finalmente, se podrá obtener una distribución de mejoramiento de suelos implementando Columnas de Grava, obtenido de la figura Seed H. y Booker, J. (1977) como el diámetro y espaciamiento de centro a centro de estas, según lo representado en la figura N°26



Figura N° 26

Distribución en planta de las inclusiones



Nota: Geometría en planta de distribución de las inclusiones

Una vez conocida la distribución geométrica de las Columnas de Grava, se querrá demostrar cuanto beneficia y en qué medida la implementación de este mejoramiento. Para ello Baez, J. (1995) en su artículo “A Design Model for the Reduction of Soil Liquefaction by Vibro Stone Columns” quien planteó un factor de reducción de la tensión de corte  $K_G$ , desarrollado con la siguiente expresión:

$$K_G = \frac{\tau_s}{\tau} = \frac{1}{R_G(a_s + \frac{1 - a_s}{R_G})}$$
$$R_G = \frac{G_C}{G_S}$$
$$a_s = C\left(\frac{2a}{s}\right)^2$$

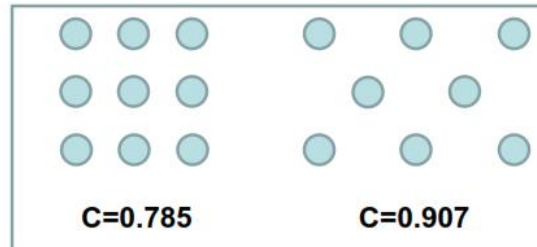
Donde:

- $K_G$  : Factor de reducción de la tensión de corte
- $\tau_s$  : Tensión de corte del suelo en el espacio entre columnas
- $\tau$  : Tensión de corte media en el terreno compuesto (columnas + terreno natural)
- $R_G$  : Razón de módulos transversales
- $K_G$  : Factor de reducción de la tensión de corte
- $G_C$  : Módulo de deformación transversal de la columna
- $G_S$  : Módulo de deformación transversal del terreno
- $a_s$  : Relación de sustitución

C : Coeficiente según distribución en planta obtenido según la figura N°27

Figura N° 27

Coeficiente según distribución en planta



Nota: Coeficientes según geometría en planta

Usando teoría de elasticidad, para el cálculo del módulo de deformación transversal podemos utilizar las siguientes expresiones para las Columnas de Grava:

$$G_C = \frac{E_C}{2(1 + \nu)}$$

Y para el cálculo del módulo de deformación transversal del terreno, podemos utilizar el resultado de velocidad de ondas secundarias del suelo. Sin embargo, al ser un valor de muy baja distorsión, mientras que durante un sismo estas distorsiones serán máximas se recomienda aplicar un coeficiente de reducción de 0.1 a 0.2.

$$G_s = (0.1 \sim 0.2)G_{s,m}$$

$$G_{s,m} = \rho_T V_s^2$$

Para obtener la velocidad de ondas secundarias ( $V_s$ ) a través del terreno se usará técnicas geofísicas como el MASW, además de la densidad natural del terreno ( $\rho$ ) obtenido por laboratorio de suelos. Finalmente, conociendo todos los parámetros a usar se tiene el coeficiente de mejoramiento según Baez, J. (1995) como mejora al esfuerzo cíclico actuante (CSR):

$$CSR_{\text{con tratamiento}} = CSR_{\text{sin tratamiento}} \cdot KG$$

Posteriormente, Rayamajhi, D. et al, (2014) han propuesto correcciones al modelo de Baez, J. (1995), considerando que no siempre se produce una deformación perfectamente compatible entre el terreno y las columnas, por lo que se puede proponer alternativamente el siguiente coeficiente:

$$K_G = \frac{1}{R_G(a_s R_Y + \frac{1 - a_s}{R_G})}$$

$$R_Y = 1.04 R_G^{-0.6} - 0.04$$

Donde R mide el ratio de distorsión transversal de la columna respecto al suelo.

- Diseño de Columnas de Grava por asentamientos:

Similarmente, se propone otra metodología de diseño para pilas de agregado compactado, descrito por Lawton, et al (1994), que se basa en un análisis de asentamiento.

Esta se divide en dos análisis, asentamiento de la zona superior que se calcula usando el método de modulo ponderado que toma en cuenta la rigidez de los elementos, y asentamiento en la zona inferior.

Para el cálculo del asentamiento de la zona superior, Lawton y Fox (1994) y Wissman y Fox (2000), proponen una analogía con el comportamiento de resortes, así las pilas de agregado compactado actuarían como resortes rígidos, mientras la zona respectiva al suelo actuaría como resortes menos rígidos. Así los esfuerzos aplicados a los suelos reforzados se distribuyen de acuerdo a la rigidez relativa entre la pila y el suelo ( $R_s$ ) y la razón de área de reemplazo o área de cobertura de las pilas ( $R_a$ ). La fuerza Q que se aplica a la cimentación se puede expresar como el producto del esfuerzo de contacto promedio (q) y el área de la cimentación (A). Dicha carga es resistida por las pilas de agregado compactado ( $Q_g$ ) y la matriz de suelo ( $Q_m$ ), expresado con la siguiente manera:

$$Q = qA = Q_g + Q_m = q_g A_g + q_m A_m$$

Donde  $q_g$  es el esfuerzo aplicado a las pilas de agregado,  $A_g$  es el área de las pilas de agregado y  $A_m$  el área de la matriz de suelo

El procedimiento tiene la hipótesis que la cimentación es rígida con relación al suelo de apoyo, de modo que el asentamiento de la pila será igual al asentamiento del suelo. El asentamiento de la cimentación ( $s$ ) se puede expresar en términos de la rigidez de la pila de agregado compactado ( $k_g$ ) y la matriz del suelo ( $k_m$ )

$$s = \frac{q_g}{k_g} = \frac{q_m}{k_m}$$

$$q_g = q \frac{R_s}{R_a R_s - R_a + 1}$$

$$R_s = \frac{k_g}{k_m}$$

$$S_u = \frac{q_g}{k_g}$$

Para un análisis completo de los asentamientos para grandes tamaños asociados con edificaciones, terraplenes y otras estructuras en general pueden ser evaluados usando una metodología de modulo elástico compuesto, donde el asentamiento en la zona superior reforzada con columnas de agregado es estimado usando la siguiente expresión según Terzagui et al. (1996)

$$S_u = \frac{qlH_u}{E_{cc}}$$

Donde  $q$  es la presión aplicada promedio,  $l$  es el factor de influencia a profundidades del suelo compresible,  $H_{uz}$  es el espesor del estrato correspondiente a la zona superior y  $E_{comp}$ , es el valor del módulo elástico compuesto dentro de la zona superior reforzada con columnas de agregado.

El módulo elástico compuesto es calculado realizando un promedio ponderado de los valores de modulo elástico de columnas de agregado ( $E_g$ ) y del suelo de matriz ( $E_m$ ) expresado:

$$E_{cc} = E_g R_a + E_m (1 - R_a)$$

Donde  $R_a$  es la razón de reemplazo,  $E_g$  el módulo de elasticidad de las pilas de agregado y  $E_m$  el módulo elástico del suelo matriz. Para el cálculo de asentamiento en la zona inferior no reforzada:

$$s_{l_2} = [c_e H \log\left(\frac{\sigma'_o + \Delta p}{\sigma'_o}\right)]$$

Donde  $C_{er}$  es la razón de recompresión de las arcillas y limos

Por ende, el asentamiento total se calculará por la suma del asentamiento en ambas zonas

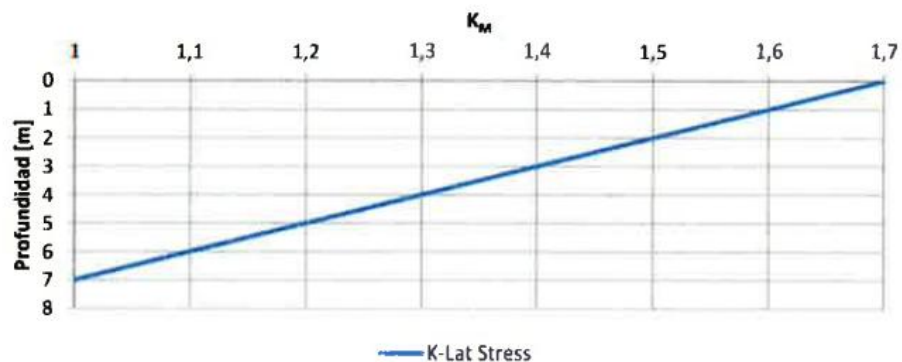
$$s = s_u + s_{l_2}$$

- Diseño de Columnas de Grava por corte:

Por otro lado, Salgado et al. (1997) muestra la relación entre el factor de aumento del esfuerzo cíclico resistente (CRR), debido a la acción de la compactación vertical de las pilas de agregado aumenta la presión lateral sobre la matriz de suelo, se puede obtener un factor de incremento de estrés lateral  $K_M$  en función de la profundidad según la figura N°28

Figura N° 28

Factor de aumento del esfuerzo lateral según profundidad



Nota: Obtenido de Salgado et al. 1997

Por lo que se tiene el modelo:

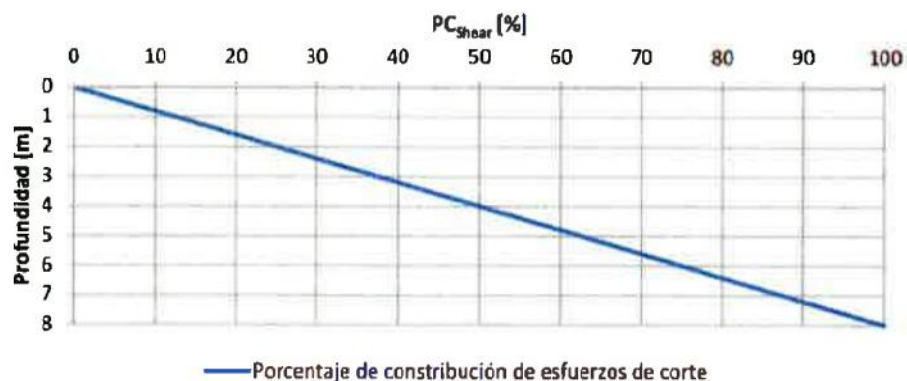
$$CRR' = K_M CRR$$

A ello, Green et al, (2008) expresa que el sistema de mejoramiento al incorporar elementos rígidos en el suelo matriz, estos reducen la magnitud de los esfuerzos de corte en el suelo hasta niveles donde la licuación no se genera.

Este mejoramiento se traduce en una reducción de la relación de esfuerzo cíclico CSR, así se propone un porcentaje de contribución de esfuerzo de corte (PC<sub>shear</sub>) con relación de la profundidad según la Figura N°29

Figura N° 29

Porcentaje de contribución del esfuerzo de corte de las pilas de agregado según profundidad.



Nota: Tomado de Green et al, 2008

Con ello se propone un factor de reducción de esfuerzo de corte  $K_G$  que está en función de porcentaje de contribución de atracción de esfuerzo de corte halla propuesta por Green et al. (2008), los parámetros geométricos y mecánicos respectivos a la solución de mejoramiento propuesto como el área de reemplazo de pilas de agregado, razón de rigideces entre las pilas y suelo matriz expresado como:

$$K_G = \frac{1}{1 - R_a + R_a R_s PC_S}$$

Para que finalmente se obtenga una relación de esfuerzo cíclico considerando la reducción por atracción de esfuerzo de corte

$$CSR' = K_G CSR$$

- Investigaciones realizadas sobre el tema:

Se presentarán datos obtenidos realizados en otras investigaciones sobre Columnas de Grava y Columna de Módulo Controlado.

- Se tiene referencia para la caracterización del material tipo arcilla según su consistencia, en el cuadro propuesto por Núñez, F (2017).
- También el autor menciona la recopilación de parámetros elástico plástico de arcillas según Wood, M. (2003). De esta manera se puede presentar de forma más apropiada el comportamiento no lineal de este tipo de suelos, usado para fines caracterización elástico plásticas de las arcillas.

Según el autor Núñez, F. (2017) en su tesis “Control de asentamientos en terraplenes construidos sobre suelo fino por medio de métodos de mejoramiento de suelos basados en Vibrosustitución” realiza las siguientes estimaciones para el cálculo de Columna de Grava resumido en la Tabla N°8

Tabla N° 8

Propiedades de arcillas estimados, terraplén y Columna de Grava

Material		Arcilla Blanda	Arcilla Media	Arcilla Firme	Columna de Grava	Terraplén
Peso Unitario Saturado	sat	15	16.5	18	20	18
Peso Unitario		5	6.5	8	18	18
Módulo Elástico	E	15000	32500	75000	30000-60000	15000
Altura	H	10	10	10	10	5
Índice de vacíos	eo	10	10	10	10	N/A
Índice de Compresión	Cc	2	1.67	1.5	N/A	N/A
Separación	m.	N/A	N/A	N/A	2	N/A

Nota: Tomada de la investigación de Núñez (2017) pg. 34, usado para fines caracterización de las arcillas, Columnas de Grava y terraplén

- También el autor menciona la recopilación de parámetros elasto plástico de arcillas según Wood, M. (2003). De esta manera se puede presentar de forma más apropiada el comportamiento no lineal de este tipo de suelos,

usado para fines caracterización elasto plásticas de las arcillas resumido en la Tabla N°9

Tabla N° 9

Propiedades Elasto-plásticas de las arcillas estimados

Parámetros		Arcilla Blanda
Razón de sobre consolidación	OCR	1
Razón de Poisson		0.4
Pendiente de la línea de consolidación normal		0.3
Pendiente de la línea de sobre consolidación		0.03
Índice de vacíos inicial	eo	2
Ángulo de fricción interna arcilla	Ø	23

Nota: Tomada de la investigación de Núñez, F. (2017) Pg. 37

Así de esta manera, se obtiene resultados de asentamiento mediante el uso de Columna de Grava según la Tabla N°10

Tabla N° 10

Resultados de asentamientos para para distintos contrastes de rigidez, para ángulos de fricción 35 y 45, para 5 diferentes áreas de reemplazo.

Ar (%)	Separación (m)	d (m)	dw (m)	No mejorado E=15000 Kpa	Mejorado			
					n=2, E=30000 Kpa		n=8, E=120000 Kpa	
					=35°	=45°	=35°	=45°
s (m)	s* (m)	s* (m)	s* (m)	s* (m)				
6	2	0.5	0.11	0.818	0.502	0.4	0.197	0.145
8	2	0.6	0.16	0.818	0.406	0.308	0.135	0.099
11	2	0.7	0.22	0.818	0.327	0.238	0.099	0.073
15	2	0.8	0.29	0.818	0.257	0.181	0.073	0.053
18	2	0.9	0.37	0.818	0.206	0.141	0.057	0.042

Nota: Tomada de la investigación de Núñez, F. (2017) pg55 usado para fines de referencia para la interpretación de resultados, esta tabla representa los asentamientos sin mejorar s y con mejoramiento s\*

- Poves, J. (2017), en su tesis experimental del autor se llegó proponer la siguiente tabla de consolidación radial y vertical usando los siguientes parámetros geotécnicos resumidos en la Tabla N°11



Tabla N° 11

Propiedades físicas y mecánicas de suelo arcilloso (CL)

Descripción	Und	Valor
Contenido de humedad	%	21.27
Limite líquido	%	33.61
Limite plástico	%	18.03
Índice de plasticidad	%	15.58
Peso específico de las partículas solidas		2.63
Angulo de rozamiento efectivo	°	12.22
Cohesión	kg/cm <sup>2</sup>	0.28
Peso específico Húmedo	g/cm <sup>3</sup>	2.04
Peso específico seco	g/cm <sup>3</sup>	1.68
Relación de vacíos		0.57
Presión de pre consolidación	kg/cm <sup>2</sup>	2.2
Coeficiente de expansibilidad		0.02
Coeficiente de compresibilidad		0.17
Módulo de elasticidad	kg/cm <sup>2</sup>	400
Relación de Poisson		0.4

Nota 01: Tabla de propiedades físicas y mecánicas de suelos de la calicata 03, tomada de Poves (2017), usado para fines de referencia para la caracterización del suelo.

Nota 02: Datos para el cálculo de la tabla 05 “consolidación radial para diferentes cargas “

Los datos de la tabla 11 “Propiedades físicas y mecánicas de suelo arcilloso (CL)” fueron realizados en el laboratorio de la Universidad Nacional del Centro del Perú, descrito como ensayo de laboratorio para suelo blando, con ello podemos tener cierta confiabilidad en los datos a estimar, así fueron datos base para el cálculo de la tabla N°12

Tabla N° 12

Consolidación vertical y radial para diferentes cargas

Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	C <sub>v</sub> Promedio	Cr	Cr	Cr
		Promedio N=4	Promedio N=3	Promedio N=2
		(x10 cm <sup>2</sup> /s)		
0	0	0	0	0
0.35	1.8	11.75	8.97	8.51
0.39	3	20.07	16.67	14.13
1.39	4.8	32.12	27.11	24.11
2.78	5.4	39.39	32.54	29.4
5.56	6.4	54.17	42.92	36.97

Nota: Tomada de la investigación de Poves, J. (2017) pg144, usado para fines de referencia para la interpretación de resultados

### 2.3.8 Inclusiones Rígidas

Manica, A. (2013), en su tesis “Comportamiento Dinámico de las Inclusiones Rígidas” menciona que el método de mejoramiento de suelos por Inclusiones Rígidas se utiliza principalmente en sitios donde existen depósitos de suelo blando de alta compresibilidad y baja resistencia. La finalidad principal del sistema es reducir los asentamientos totales y diferenciales, sin incurrir en la necesidad de reforzar la superestructura, o adoptar soluciones tradicionales más costosas (como pilotes de fricción, pilotes de punta, pilas), o que requieran periodos de construcción muy largos (como la precarga).

Un sistema de Inclusiones Rígidas típico, está formado por dos elementos principales; un conjunto de Inclusiones Rígidas verticales, cuya función es transmitir las cargas a materiales más profundos y menos compresibles; y una plataforma de material granular que asegura la transferencia de parte de las cargas estructurales a las inclusiones (Briançon et al., 2004).

Gómez, R. (2012) en “Análisis comparativo de los métodos analíticos y los métodos numéricos” menciona que esta distribución se va a producir mediante la formación de un mecanismo de transferencia en la capa de reparto y por el

rozamiento negativo que se produce debido a la diferencia de asientos entre el suelo blando y la inclusión.

También es necesario conocer cuáles son las principales técnicas de construcción de las Inclusiones Rígidas y en qué ventajas pueden aportar con respecto a otras técnicas de mejora del terreno o ejecución de los pilotes. El método de las Inclusiones Rígidas puede ser aplicable a numerosas obras, siendo la cimentación de grandes terraplenes sobre suelos blandos su aplicación más usual.

Existen en Europa varios documentos de normativa o recomendaciones sobre el dimensionamiento y ejecución de las inclusiones. Algunas de ellas son Británica BS 8006-1 “Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills” (2010), las recomendaciones alemanas “German Recommendations for Geosynthetic” (2011) EBGEO, la normativa francesa “Amélioration des Sols par Inclusions Rigides” ASIRI (2012) y la guía holandesa “Dutch design guideline for piled embankments” (2009).

#### - Historia de las Inclusiones Rígidas:

Las primeras aplicaciones de las Inclusiones Rígidas (RI) datan de finales de la década de 1970, principalmente en terraplenes de carreteras en países escandinavos (Rathmeyer, 1975). Un interés renovado en esta técnica surgió de un estudio sobre la fricción lateral negativa realizado por Combarieu durante ese período de tiempo 1974 – 1988.

Desde entonces, la técnica se ha extendido a otros tipos de construcción con una amplia distribución de carga, como tanques de almacenamiento, depósitos de tratamiento de agua y losas a nivel para instalaciones industriales o comerciales (Simon y Schlosser, 2006). En el último caso, las cargas concentradas de columnas o muros de carga a menudo también están soportadas por una base compuesta por una zapata de hormigón, una cubierta granular y un número limitado de inclusiones a continuación.

La mejora del suelo de Inclusiones Rígidas es ahora una solución de cimentación muy rentable para proyectos de construcción comunes.

Varias aplicaciones históricas marcan su desarrollo e ilustran que este concepto básico se puede aplicar con la misma eficacia a proyectos de construcción complejos.

Los cuatro cajones de gravedad circulares de 90 m de diámetro en el puente Rion-Antirion, diseñados para soportar grandes cargas estáticas y sísmicas, se fundaron en el lecho marino utilizando el concepto de Inclusiones Rígidas (Pecker, 2004). El sitio del puente es una de las áreas más sísmicas de Europa, con un diseño de aceleración máxima del suelo de 0,48 g al nivel del lecho marino. El refuerzo estaba compuesto por tubos de acero impulsados de 2 m de diámetro y de 25 a 30 m de largo y espaciados a 7 m x 7 m. La capa de transferencia de carga de 2 m de espesor fue diseñada para actuar como fusible bajo carga sísmica, limitando la fuerza cortante máxima en la interfaz, disipando energía por deslizamiento y forzando a la cimentación a "fallar" de acuerdo con un comportamiento aceptable de la estructura (es decir, una traslación horizontal).

Las barreras móviles que se están construyendo actualmente para proteger a Venecia de las inundaciones (proyecto MOSE) están compuestas cada una de 7 a 9 cajones de hormigón con longitudes de 40 a 60 m. y anchos de 30 a 50 m. La integridad de las juntas entre cajones impone condiciones severas de asentamientos diferenciales máximos entre cajones adyacentes. El diseño final de la cimentación incorpora un concepto de mejora del suelo RI: pilotes de hormigón hilado de 0,5 m de diámetro y 19 m de largo se introducirán en el subsuelo debajo de cada huella de cajón (Jamiolkowski et al, 2009).

Los cabezales de los pilotes se cubrirán con 1 m de relleno granular compactado y 0,3 m de mortero autonivelante para obtener una superficie de contacto distribuida uniformemente bajo la losa de hormigón de cada cajón. Es de destacar que en la etapa de diseño se utilizó el modelado físico de centrífugas, además del modelado numérico para ambos proyectos (Garnier y Pecker, 1999, Fioravante, 2011).

- Situación actual de las Inclusiones Rígidas:

Como ocurre en muchos campos, la práctica de la construcción se ha desarrollado antes que los métodos de diseño adaptados para este nuevo concepto de cimentación. Se podría hacer una referencia parcial a los estándares de cimentación de pilotes durante el proceso de diseño, aunque los diseñadores reconocen que estos no están del todo adaptados a las columnas

más utilizadas como elementos reductores de asentamiento en lugar de elementos de carga.

La práctica actual varía entre países en los que las aplicaciones de Inclusiones Rígidas se refieren a terraplenes apilados y aquellos en los que su uso se ha extendido para ocurrir bajo elementos estructurales como balsas, losas o incluso zapatas extendidas. Briançon (2002) identificó algunas de estas diferencias: valores más altos para la relación del área de cobertura (10 a 35%) y una capa de transición más gruesa (el espesor mínimo se toma como  $H_{min} = 0.8 (s - a)$ , el espacio libre entre cabezas de inclusión la diagonal de malla) se utilizan generalmente en el diseño de terraplenes apilados, y el refuerzo de geomalla de la plataforma de transferencia de carga (LTP) suele ser seguida a la normativa. Los valores de relación de área más bajos (2 a 10%) se aplican debajo de losas de concreto o balsas, mientras que el espesor de la capa de transferencia de carga se reduce comúnmente a entre 0,4 m y 0,8 m. El LTP rara vez se refuerza debajo de losas de hormigón. La reacción del suelo entre cabezas de inclusión puede ser asumiendo que todas las cargas se transfieren a las inclusiones por cizallamiento (arqueamiento) y efectos de membrana. (BS 8006, 2010)

La reacción del suelo también puede contabilizarse simplemente mediante el uso de un coeficiente de reacción de subrasante (EBGEO, 2010; CUR 226, 2010). La interacción entre el suelo y la columna a menudo se trata como un factor secundario en los modelos de diseño de transferencia de carga, que se centran en lo que sucede por encima de las cabezas de inclusión.

Siguiendo diferentes programas de investigación sobre este tema (NO RECESS, AMGISS, ASIRI), varios países europeos han emitido recomendaciones para el diseño, construcción y control de Inclusiones Rígidas desde 1990. En 2010, tres de esos países (Alemania, Gran Bretaña y Holanda) publicaron directrices nuevas o revisadas para el diseño de terraplenes apilados (EBGEO 2010, BS8006 2010 y CUR226 2010). Francia siguió en 2012 con recomendaciones sobre mejoras de suelos por Inclusión Rígida que cubren tanto terraplenes como cimientos de losas o balsa (ASIRI, 2012).

Con una aceptación más generalizada en el mercado, muchos ingenieros están eligiendo técnicas de mejoramiento del terreno por Inclusiones Rígidas para

proporcionar subrasantes de cimentación adecuadas en sitios que tradicionalmente habrían requerido cimentaciones profundas. Gómez, R. (2012) nos menciona que se debe tener cuidado de que las Inclusiones Rígidas no se consideren simplemente como cimientos de pilotes de baja calidad con reglas de diseño más indulgentes.

- Tipos de Inclusiones Rígidas:

Los elementos de mejora del suelo se instalan mediante una variedad de técnicas. Algunas de estas técnicas incluyen las técnicas habituales de instalación de pilotes (pilotes hincados, perforados con o sin entubado, bajo lechada, sinfín de vuelo continuo, etc.), pero otras se han desarrollado más específicamente para aplicaciones de mejora del suelo, como las Columnas de Módulo Controlado (CMC), Columnas de hormigón vibrante (VCC) y Columnas de mezcla profunda (DMC). Otros desarrollos recientes se describen en TC17, Revisión de procesos de construcción (Chu et al., 2009). Las técnicas de instalación también pueden clasificarse como métodos de desplazamiento (en los que el suelo se desplaza lateralmente y prácticamente no genera desperdicios) o métodos de no desplazamiento (en los que el suelo se reemplaza por material de columna). Las técnicas de no desplazamiento se adaptan bien a la remodelación de zonas industriales abandonadas.

Se debe establecer un requisito de diámetro mínimo, que puede ser de hasta 25 cm mencionadas en las recomendaciones de ASIRI (2012) para inclusiones distintas de los micropilotes, pero no tan bajas como 12 a 15 cm mencionadas en la recomendación alemana DGGT 2002 (Wehr et al., 2012).

Los riesgos de imperfección aumentan con diámetros más pequeños. Mientras tanto, la carga vertical que actúa sobre cualquier inclusión, fuera de lo recomendado, da lugar a momentos de flexión de segundo orden que pueden volverse excesivos con respecto a la resistencia de diseño del material. La prueba de integridad de inclusiones de diámetro pequeño también es más difícil.

Aunque normalmente no están reforzadas (especialmente en presencia de cargas verticales), las inclusiones a veces pueden contener barras de refuerzo

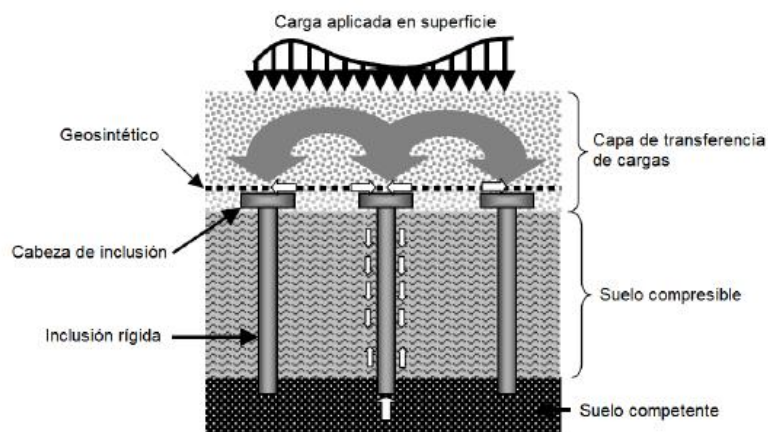
para resistir las eventuales fuerzas cortantes y momentos de flexión resultantes de cargas no verticales o axisimétricas (como debajo de un talud de terraplén). La calidad y el grosor de la plataforma de transferencia de carga influyen fuertemente en la intensidad de las fuerzas y momentos flectores en las inclusiones y, por lo tanto, en el comportamiento de la cimentación, bajo carga sísmica. (Simon B. 2017)

La mayoría de los equipos especializados contienen funciones integradas para el monitoreo electrónico y el registro de los parámetros de instalación para el control de calidad. Los parámetros relacionados con el diámetro de la columna, la continuidad de la columna y el empotramiento de cada columna en la capa de apoyo son los más útiles para el control de calidad.

El principio de funcionamiento de las Inclusiones Rígidas, queda ilustrado en la Figura N° 30. Las Inclusiones Rígidas están dispuestas en el suelo blando formando una malla y apoyadas o no sobre sustrato rígido. Sobre ellas se dispone la capa de reparto de transferencia de cargas. El desarrollo de los mecanismos de cizallamiento en esta capa asegura el reparto desigual de cargas entre las inclusiones y el suelo blando, siendo siempre superior la parte correspondiente a las inclusiones debido a su elevada rigidez. Las características geotécnicas y geométricas de esta capa influyen en su eficacia en la transmisión de cargas.

Figura N° 30

#### Distribución del sistema de Inclusiones Rígidas



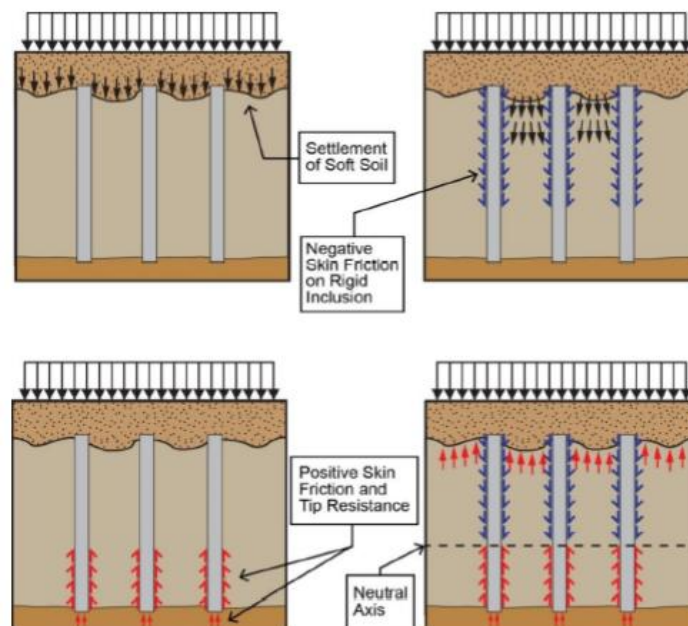
Nota: Tomada de Simon B. (2017)

La colocación de geomallas en la capa de transferencia de cargas consigue aumentar las tensiones en las inclusiones y reducirlas en el terreno blando debido al efecto membrana que se produce al existir asentamientos mínimos diferenciales entre la cabeza de las inclusiones y el suelo blando.

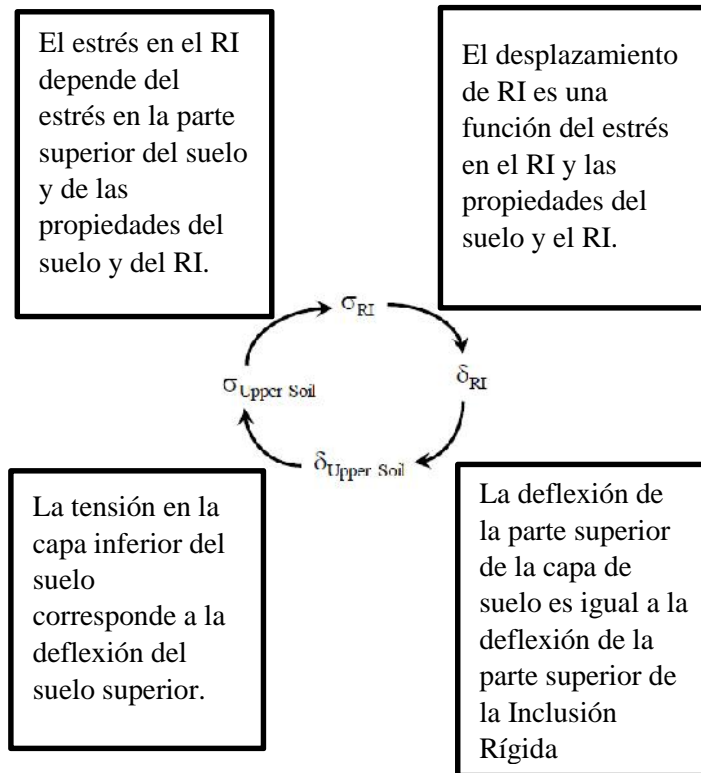
Según Gómez R, (2012) por debajo de la capa de reparto se desarrolla otro mecanismo de transferencia de cargas, que se produce a lo largo de la inclusión por el rozamiento negativo y el desplazamiento relativo entre el suelo blando y la inclusión. En la parte superficial se produce un rozamiento negativo debido a que el suelo blando se asienta más que la inclusión. Teóricamente existe una profundidad, denominada punto neutro, a la cual la inclusión y el suelo blando asientan lo mismo, y que separa la zona de rozamiento negativo de la zona de rozamiento positivo. Es muy importante definir o estimar la profundidad de este punto para definir el empotramiento y la longitud total de la inclusión. A partir de esta profundidad será necesario calcular la longitud necesaria para transmitir toda la carga de la inclusión al terreno mediante rozamiento positivo al suelo blando y mediante transmisión directa por punta al terreno competente.

Figura N° 31

#### Funcionamiento de Inclusiones Rígidas



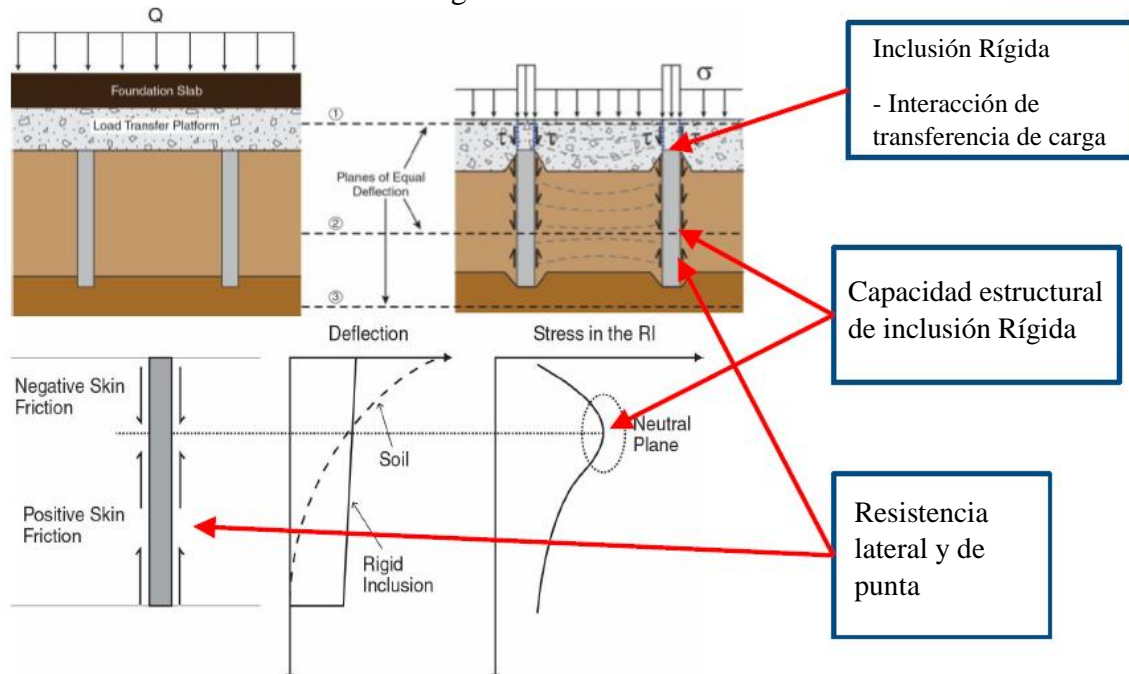




Nota: Tomada de Design and Construction of Rigid Inclusion Ground Improvement Projects. (2015)

Figura N° 32

Funcionamiento de Inclusiones Rígidas



Nota: Tomada de Design and Construction of Rigid Inclusion Ground Improvement Projects. (2015)

Interacción carga-deflexión entre el suelo y de la Inclusión Rígida:

- La fricción cutánea positiva y negativa son funciones de Inclusión Rígida, tipo de suelo, espaciamiento, propiedades la plataforma de transferencia de carga (LTP).
- Los métodos tradicionales de capacidad de cimentación profunda son inadecuados.

Para estimaciones preliminares y conservadoras:

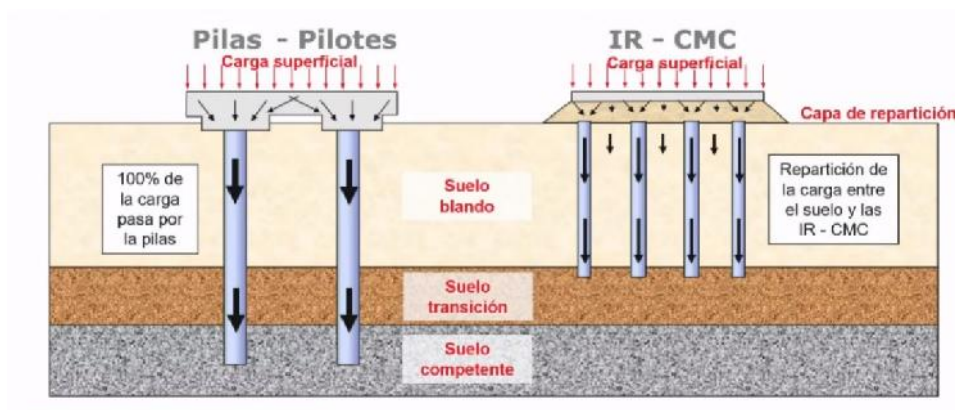
- Capítulo de pilotes de desplazamiento - Circular de pilotes de perforación de FHWA, GEC No. 8 (2007)
- Métodos de diseño de cimientos profundos basados en SPT, CPT,  $f$ ,  $S_u$ , profundidad
- Se utiliza una plataforma de transferencia de carga (LTP) para transferir la carga de la estructura a las Inclusiones Rígidas y para minimizar la formación de "hoyuelos" o tensiones de flexión excesivas en una losa o zapata.
- Los LTP a menudo consisten en 1 a 5 pies de suelo granular bien compactado y pueden incluir de 1 a 3 capas de geomalla o malla de acero incrustada (debajo de terraplenes / tanques). (Simon B., 2017)

### 2.3.9 Columnas de Modulo Controlado

A primeros de los años 1990 en Francia, la empresa Menard desarrolló el concepto innovador de Columnas de Módulo Controlado (CMC) cuando se enfrentó con el problema de la no existencia de una técnica económica de mejora del terreno que permitiera cimentar sobre suelos blandos. Se buscó una técnica de refuerzo del terreno que compitiese con las técnicas de cimentación profunda como los pilotes. (Simon B., 2017, p.10)

Figura N° 33

### Funcionamiento de la Columna de Módulo Controlado



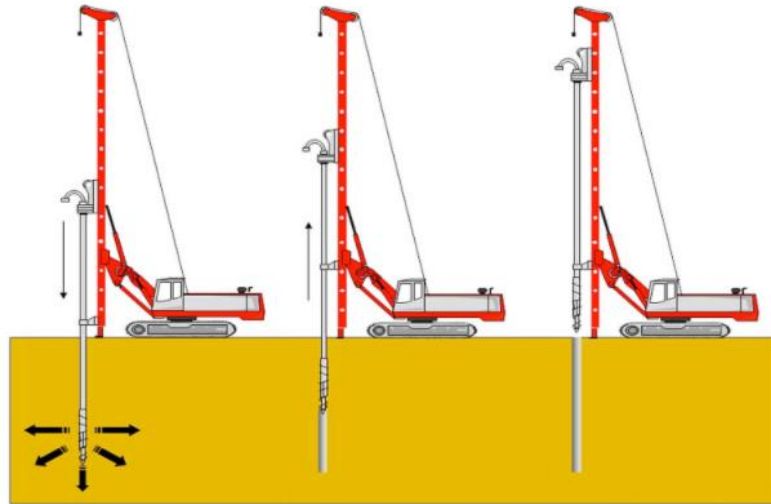
Nota: Tomada de Soletanche Bachy, Inclusiones Rígidas- Columnas de Módulo Controlado. (2020)

Las Columnas de Módulo Controlado se construyen mediante el uso de una barrena de desplazamiento que desplaza y comprime lateralmente la masa de suelo sin extracción de material. La barrena de desplazamiento es hueca, por lo que permite la creación de la columna de mortero al extraer la barrera. La lechada es inyectada a presión moderada, normalmente inferior a 10 bares. La resistencia a la compresión simple de la lechada se adapta a los requisitos del diseño y varía entre 100 y 200 Kg/cm<sup>2</sup> para las aplicaciones típicas.

La instalación se realiza sin generar residuos ni vibraciones. La lechada se coloca con la presión suficiente para evitar el colapso de los suelos desplazados durante la retirada de la barrena. El proceso permite la creación de una columna con un diámetro al menos igual al de la barrena. Los equipos de perforación necesitan una capacidad de giro elevado y un alto empuje estático hacia abajo para desplazar y comprimir de manera eficiente el suelo que rodea lateralmente. La secuencia constructiva se muestra en la Figura N°34.

Figura N° 34

Secuencia constructiva CMC



Nota: Secuencia constructiva general de una Columna de Módulo Controlado (CMC). A) Perforación; B) Extracción de la barrena y colocación del concreto; C) Fin de colocación de concreto hasta la plataforma de trabajo. Fuente: Pérez Teresa (2016).

- Métodos de Cálculo y Dimensionamiento:

A partir de los métodos que estudian la transferencia de cargas se pueden dimensionar las características de la capa para que la tensión que llega al suelo blando produzca unos asientos admisibles y homogéneos.

Mediante el análisis de los posibles métodos de rotura de la capa se fijan los parámetros geotécnicos de la misma para evitar que se produzca el punzonamiento de la inclusión en la capa de reparto o cualquier otro tipo de fallo.

Existen cuatro (4) componentes principales que interactúan entre sí: La estructura / losa, la plataforma de transferencia, la Inclusión Rígida y el suelo circundante. El diseño de una solución con inclusiones deberá incorporar todos los componentes

- La capa de repartición tenga la rigidez suficiente para transmitir la carga de la superestructura a la cabeza de las inclusiones.
- No se rebase la capacidad de carga por punta de la cabeza de la inclusión.
- Que la cabeza de la inclusión no induzca cargas puntuales en la losa de cimentación.

- Que la losa de cimentación por si sola cumpla con la revisión de los estados límite de falla.
- Que se cumpla con la revisión de los estados límite de servicio.
- Plataforma de transferencia (Load transfer Plataform - LTP):
  - Hecha de material granular compactado.
  - También puede ser de limos / arenas cementadas o tratadas con cal.
  - Puede tener georedes o geotextiles, dependiendo del método de diseño.
  - Generalmente de 600 a 1200 mm espesor.
  - Principal objetivo: Transferir la carga de la estructura a las Inclusiones Rígidas.

Enfoques de diseño:

- FHWA (USA): Método de Collin, J (Método de Viga)
- British Standard: Membrana (Catenaria)
- France ASIRI: Método de arqueo

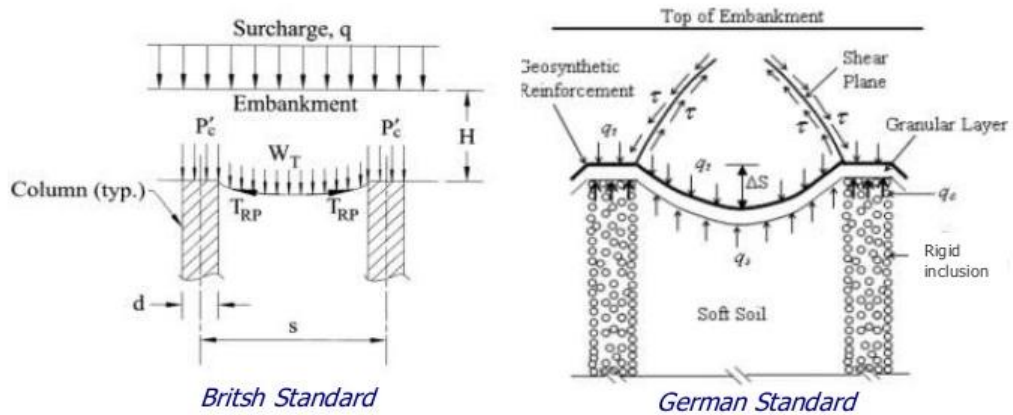
Todos estos métodos tienen el mismo objetivo: evaluar ( $Q_p$ ) y ( $q_s$ ) en función del espesor ( $H$ ), ángulo de fricción ( $F$ ) y módulo ( $E$ ).

Se basa en la suposición de que la LTP trabaja como viga y transfiere toda la carga superior a las Inclusiones Rígidas:

- Requiere un mínimo de tres capas de geotextil
- El espesor de la LTP es mayor que la mitad del claro entre inclusiones / Slab

Figura N° 35

Distribución de la carga hacia las Inclusiones Rígidas por diferentes métodos.



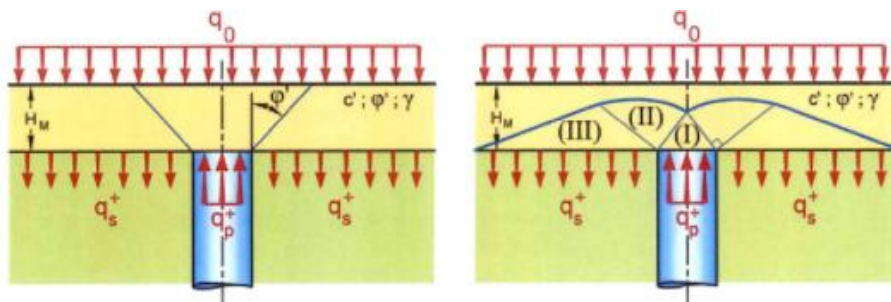
Nota: Tomada de Simon B. (2017)

Recomienda que el espesor de la LTP sea de cuando menos 1.4 veces el claro. Se utiliza un enfoque de catenaria:

- El geotextil se coloca directamente arriba de la cabeza de las Inclusiones Rígidas
- El geotextil entre las inclusiones lleva la carga a la inclusión a través de tensión. La tensión en el geotextil se calcula con la teoría de membranas.

Figura N° 36

Distribución de cargas de plataforma de transferencia de carga (LTP) a la inclusión ubicación del ángulo de fricción.



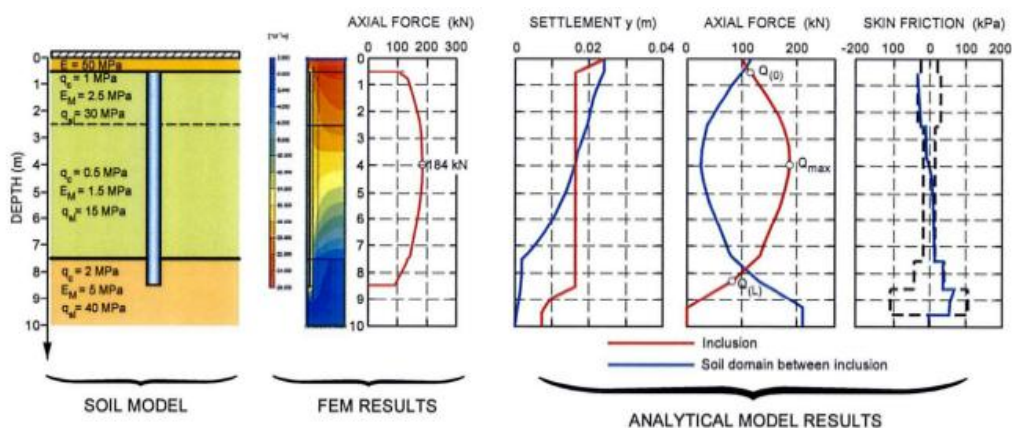
Nota: A la derecha representación del método ASIRI y a la izquierda representación de FHWA. Tomada de Simon B. (2017)

El programa de investigación ASIRI en Francia ha demostrado que el beneficio de una capa de geomalla es mínimo bajo la losa (más benéfico bajo un terraplén, ya que provee confinamiento y restricción lateral) ASIRI propone que se utilice el método de cono de difusión para modelar la

transferencia de carga en la LTP, bajo la losa el ángulo de difusión (F) se asume el ángulo pico de fricción del material de la LTP de la geometría propuesta, la carga en la Inclusión Rígida ( $Q_p$ ) y el esfuerzo en el suelo ( $q_s$ ) pueden ser estimados y usados para cálculo de asentamientos.

Figura N° 37

Distribución de cargas de método numérico y analíticos.



Nota: Simulación a una máxima escala de una carga en una platea con mejoramiento por Inclusión Rígida, comparación con el método de modelación numérico 2D Axisimétrico y el método analítico (ASIRI, 2012)

A lo largo del eje de inclusión, las inclusiones "atraen" la carga como resultado de la fricción negativa que se desarrolla, donde se asienta más el suelo blando que la inclusión. A diferencia de las bases profundas, esta fricción negativa es beneficiosa porque ayuda a transferir la carga a la columna. Debido a que las inclusiones son mucho más rígidas que el suelo circundante, el asentamiento relativo se vuelve negativo a cierta profundidad a lo largo de la inclusión. Por debajo de esa profundidad, la inclusión se asienta más que el suelo generando que la fricción se vuelva positiva.

En equilibrio, la carga axial en las inclusiones es la siguiente:

- Un valor  $Q_{(0)}$  en la cabecera, que representa la parte de carga transmitida por el LTP sobre la cabecera de inclusión.
- La carga aumenta en proporción a la fricción superficial negativa entre la cabeza y el punto neutro (la intersección con el plano intermedio de "asentamiento igual").

- Se encuentra un valor máximo  $Q_{max}$  en el punto neutro (a una profundidad  $Z_c$  por debajo del cabezal de inclusión).
- La carga disminuye en proporción a la fricción cutánea positiva entre el punto neutro y el fondo de la inclusión, conocida como “punta”.
- La carga tiene un valor  $Q(L)$  en la punta.

Simon B. (2017) señala que el funcionamiento correcto de una red de Inclusiones Rígidas exige pequeños asientos, en general, de orden centimétrico los cuales son imprescindibles para asegurar un reparto óptimo de esfuerzos. En el caso de terrenos con problemas de consolidación, el propio funcionamiento del sistema conlleva una descarga del terreno que permite reducir los asientos de consolidación en un alto porcentaje (85-95%); de esta forma las CMCs a pesar de no ser elementos drenantes, disminuyen los asientos de consolidación. Una de las grandes ventajas de esta técnica frente a las Columnas de Grava es que no necesitan del confinamiento lateral del terreno para garantizar la estabilidad de las columnas, lo que puede ser decisivo en terrenos muy blandos o con elevado contenido de materia orgánica.

- Capacidad admisible del suelo mejorado:

Ministerio de transporte y Comunicaciones (2020), en el proyecto: “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco Chinchero – Urubamba en la Región Cusco Tramo 1 km 14+229.50 al 21+730” se guio de la normativa ASIRI (2012) menciona que la capacidad portante del suelo mejorado debajo de la cimentación es la suma de la capacidad portante del suelo existente (suelo de baja resistencia)  $q_{ult \text{ Suelo}}$  y la capacidad portante de las "n" CMC bajo la cimentación:

$$Q_u = Q_{n_i} + Q_S = n q_{u \ c} \cdot A_{l_i} + (A_f - n \cdot A_C) \cdot q_{u \ c}$$

La capacidad portante de una Columnas de Módulo Controlado (CMC  $q_{ult}$ ) es la suma de la capacidad proporcionada por la Resistencia por fuste  $Q_s$  y la Resistencia en punta  $Q_p$ :



$$q_{u\ c} = \frac{Q_s + Q_p}{A_c} = 2\pi R_c \int q_s dz + \pi(R_c)^2 \cdot q_p = \frac{2}{R_c} \int q_s dz + q_p$$

Por último, la capacidad portante admisible del "suelo mejorado" se calcula a partir de la capacidad portante última dividida entre un factor de seguridad igual a 3:

$$q_s = \frac{1}{3} \frac{Q_u}{A_f}$$

En condiciones sísmicas, se considera un incremento del 30% (Norma E.060)

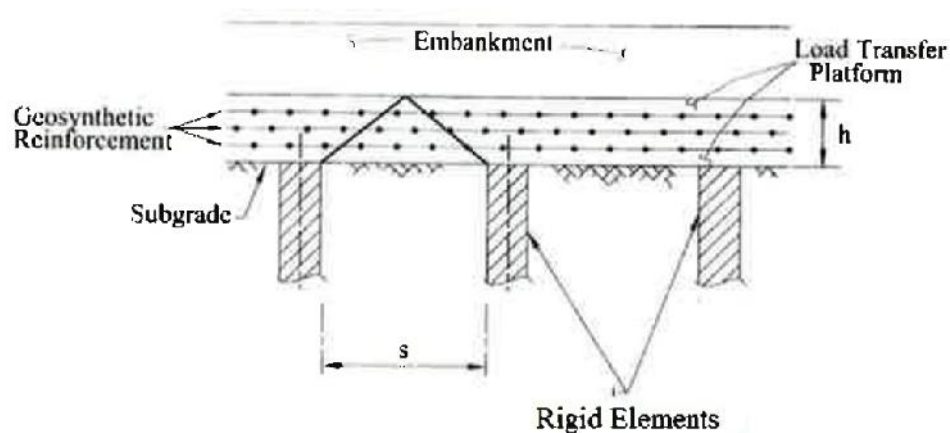
$$q_s = 1.3q_s$$

### 2.3.10 Diseño de plataforma de transferencia de carga

Para el diseño de plataforma de transferencia de carga es escogimos la de Collins, J. (2004) esta tiene como objetivos mejorar la distribución de esfuerzo transmitidos a capas inferiores, controlar los asentamientos diferenciales y mejorar la capacidad portante del suelo, se muestra el sistema de plataforma de transferencia de carga (LTP) y como interactúa con las Inclusiones Rígidas.

Figura N° 38

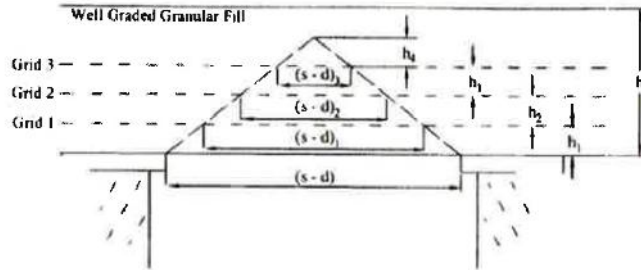
Esquema de plataforma de transferencia de carga (LTP) e Inclusiones Rígidas.



Nota: Sacado de la FHWA (2017) en el manual métodos de modificación de suelos

Figura N° 39

Distribución de cargas en la Plataforma de Transferencia de Carga (LTP) según esquema triangular.



Nota: Sacado de la FHWA (2017) en el manual métodos de modificación de suelos

La carga vertical uniforme sobre cada capa de refuerzo se puede calcular de la siguiente manera:

$$W_T = \frac{[(s-d)_n^2 + (s-d)_{n+1}^2]h_n\gamma}{2(s-d)_n^2}$$

WTn : Carga vertical uniforme que actúa sobre cada capa de refuerzo

D=(s-d)n : Distancia que se considera que existe entre los apoyos rígidos

Hn : Espesor de capa de materia granular de refuerzo

y : Peso de material granular de material reforzado

h : Espesor total del sistema (espesor del paquete estructural del pavimento más el espesor total del refuerzo)

Donde la tensión requerida en cada refuerzo se determina basándose en la teoría de la membrana tensionada y es función de la deformación en el refuerzo. la tensión por metro lineal será determinada de la siguiente manera:

$$T_r = \frac{W_T \Omega D}{2}$$

Donde:

Trpn : Tensión por metro lineal actuante sobre las geomallas

WTn : Carga vertical uniforme que actúa sobre cada capa de refuerzo

: Factor adimensional que depende del nivel de deformación del refuerzo

Tabla N° 13

Tabla para el valor de

	Deformación del refuerzo ( )%
2.07	1
1.47	2
1.23	3
1.08	4
0.97	5
0.9	6

Nota: Toma del método de Collins, J. 2004

### 2.3.11 Columna de Módulo Controlado y Columna de Grava

Columnas de Grava o Columnas de Módulo Controlado (CMC), pertenecen al grupo de mejora de terreno con adicciones o inclusiones según la clasificación de TC17 State of the Art Report sobre Procesos de construcción (Chu et al., 2009). En que se diferencian o que características comparten estas técnicas, las diferentes técnicas de instalación que tienen. Las Columnas de Grava si la comparamos a las Columnas de Módulo Controlado (CMC) en tema de antigüedad estas salen ganando; ya que fueron creadas alrededor de los años 1930 (Sondermann y Wehr,2004), el sistema de Inclusiones Rígidas fue documentado su uso a principios de 1980, principalmente por el norte de Europa (Briançon, 2002) , Las CMC está dentro de la clasificación de Inclusiones Rígidas, desarrollado en Francia por Menard Soltraitement en 1994 y patentado en los EE. UU. (Cognon 2004; Masse et al. 2017), Las CMC puede considerarse como la segunda generación de técnicas de pilotaje por desplazamiento de tornillo para la mejora del suelo.

La mejora de suelo se logra mediante la construcción de estos elementos verticales, a través de suelos de baja capacidad de carga y/o alta compresibilidad hasta llegar a una capa de suelo más resistente, debido a que estas columnas son más rígidas que el suelo circundante, atraen una parte de la carga aplicadas en la superficie, esto ayuda al suelo blando reducir a un nivel aceptable los asentamientos generados por aplicación de estas cargas.

- Diferencias entre Columnas de Grava y Columnas de Módulo Controlado (CMC):

Según ASIRI (2012), las CMC son un sistema de Inclusiones Rígidas, genera un nivel de rigidez significativamente mayor que el suelo.

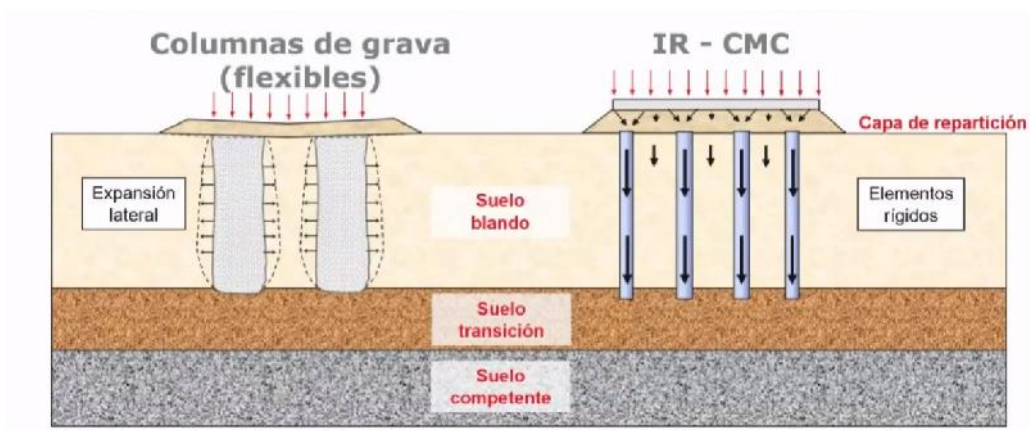
Los elementos de mejora del suelo merecen el adjetivo "rígido" siempre que el material del componente muestre una fuerte cohesión permanente, generando así un nivel de rigidez significativamente mayor que el del suelo circundante.

El concepto de Inclusión Rígida asume que la estabilidad de la columna se logra sin ningún confinamiento lateral del suelo circundante (ASIRI, 2012).

A diferencia de las Inclusiones Rígidas, las Columnas de Grava requieren un confinamiento lateral del suelo circundante. Las Columnas de Grava deben sufrir deformaciones laterales para movilizar el soporte lateral y generar una interacción entre el suelo y las columnas. La plasticidad de las columnas controla fuertemente su comportamiento, que también es bastante diferente al de las Inclusiones Rígidas que presentan deformaciones pequeñas y casi elásticas. El comportamiento de la Columna de Grava depende del ángulo de resistencia al corte del material granular, así como de su ángulo de dilatación. Ambas técnicas dependen de la densidad in situ del material granular que se puede lograr mediante el proceso de vibración y construcción. Debido a que el comportamiento de la Columna de Grava está controlado por el confinamiento del suelo, dependerá de dos factores principales: primero, las modificaciones en las propiedades del suelo provocadas por el proceso de instalación (incluidas las consecuencias del desplazamiento lateral impuesto al insertar y mover el vibrador y densificar el material granular, el aumento de la tensión horizontal en el suelo y el remodelado) y, en segundo lugar, el factor tiempo que refleja la disipación progresiva de las presiones de poro excesivas creadas por el proceso de instalación y por las cargas impuestas en la superficie del suelo.

Figura N° 40

Comparación de Columna de Grava y Columna de Módulo Controlado



Nota: Tomada de Soletanche Bachy, Inclusiones Rígidas - Columnas de Módulo Controlado. (2020)

Otra diferencia entre las técnicas es que las Inclusiones Rígidas siempre están asociadas con una capa de transferencia de carga (generalmente una capa granular, conocida como plataforma de transferencia de carga (LTP), a menos que la base del relleno del terraplén actúe como capa de transición. Los mecanismos de cizallamiento que se desarrollan dentro de la capa de transferencia y alrededor de los ejes de inclusión son esenciales para esta técnica y se activan por asentamientos diferenciales que surgen entre la inclusión “rígida” con baja compresibilidad y el suelo circundante. Los asentamientos diferenciales, y por lo tanto el cizallamiento, se extienden a las capas por encima de las cabezas de inclusión, entre las líneas centrales de la columna y la línea central de la malla, lo que significa que ya tiene lugar cierta transferencia de carga a una distancia por encima de las cabezas de inclusión. Si se considera el asentamiento promedio del suelo sobre una malla y el asentamiento en la línea central de la columna a cualquier elevación dada, parece que estos valores son iguales solo en algunos planos horizontales: el plano superior ubicado en la plataforma de transferencia o el relleno (y todos los planos superiores), el plano ubicado a lo largo de la columna y el plano ubicado a una cierta profundidad debajo de la punta de la columna (y todos los planos debajo). La existencia de estos “planos de asentamiento iguales” es característica de las mejoras del terreno por Inclusiones Rígidas e igual manera de las Columnas de Módulo Controlado.

Este escenario diferencia la mejora del suelo por Columnas de Módulo Controlado de la mejora del suelo por Columnas de Grava. Un diseño de Columna de Grava generalmente asume que los asentamientos son uniformes en cualquier plano horizontal, de modo que todos los planos son "planos de asentamiento iguales". (Simon B.,2017)

- Común entre las Columnas de Grava y Columnas de Módulo Controlado:

Para el modelo de Diseño ambos generalmente se calculan usando un modelo de celda unitaria, es decir, una columna con su volumen de suelo tributario. Este procedimiento de modelo de celda elemental conduce a un modelo menos complejo que uno que cubre todo el diseño de la cuadrícula.

Incluso con carga vertical, el modelo de celda unitaria no es válido en los bordes del área cargada (las columnas en la periferia del grupo). Tampoco es aplicable a un grupo limitado de columnas bajo una zapata. En su lugar, se pueden utilizar modelos 3D, pero siguen siendo una tarea difícil y, a menudo, están fuera del alcance de un proyecto de diseño básico. Como alternativa, se utilizan varios modelos simplificados, como los modelos de deformación plana, en los que las filas de columnas en la dirección fuera del plano se transforman en "paredes" equivalentes con promedios geométricos y mecánicos propiedades, o modelos promediados, en los que el volumen reforzado de la columna se transforma en un material homogéneo equivalente. Sin embargo, los modelos de deformaciones planas equivalentes tienen muchos inconvenientes, especialmente cuando se utilizan en mejoras de suelo RI debajo de losas de hormigón o balsas (Simon y Schlosser, 2006).

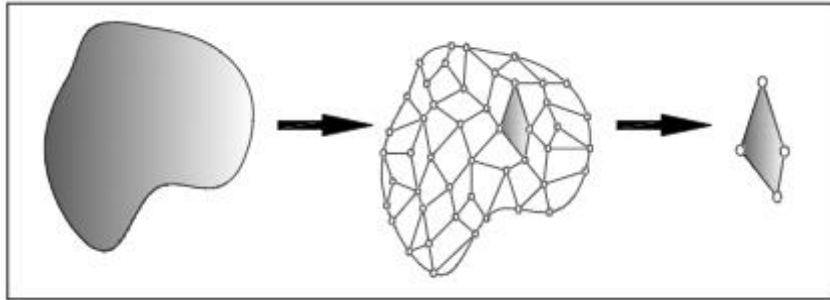
En cuanto al control de calidad, debido a que las técnicas de inclusión se componen de una gran cantidad de columnas similares que se pueden fabricar a una alta tasa de producción, el control de calidad durante la construcción es de suma importancia. El monitoreo electrónico de todas las fases de instalación se ha convertido en la norma durante estos proyectos.

### 2.3.12 Métodos de Elementos Finitos

Cabezas M. (2015) define al método de los elementos finitos como la división de un continuo conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos.

Figura N° 41

Esquema de discretización



Fuente: Esquema del proceso de discretización. Manual de Plaxis 8.5

Las ecuaciones que norman el comportamiento del continuo regirán también a cada elemento.

Díaz Y. & Lopez E. (2008) consideran que este comportamiento continuo (infinitos grados de libertad), conducido por un sistema de ecuaciones diferenciales pasa al ser modelado su comportamiento a un sistema de ecuaciones lineales (grados de libertad finitos).

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir entre:

Dominio: Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema; Condiciones de contorno: Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema (cargas, desplazamientos, temperaturas, etc.); Incógnitas: Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema (desplazamientos, tensiones, temperaturas, etc.).

Para el modelamiento por elementos finitos se debe considerar el comportamiento esfuerzo-deformación del material, se obtiene mediante las leyes, ecuaciones o modelos constitutivos. Entre los principales tenemos el modelo de Mohr Coulomb que definirá los distintos tipos de Suelos, Hoek Brown usado para el

comportamiento de rocas y Elasto – Plástico usado para el comportamiento del concreto.

También se debe considerar la diferencia entre el tipo de modelo: método Axisimétrico y Deformación Plana. Díaz Y. & Lopez E. (2008) señala que el método de Deformación Plana se utiliza para casos de geometrías con sección transversal próximamente uniforme por consecuente que sus estados de tensiones y cargas sean uniformes a lo largo de la sección; también mencionan que el método Axisimétrico se utiliza en estructuras circulares de sección transversal con un esquema de carga alrededor del eje central que le permita suponer sus estados de tensión y deformación similares en cualquier parte de la sección.

#### 2.4 Definiciones de términos básicos

**Capacidad Portante:** Es la máxima capacidad del suelo para soportar presiones o cargas aplicadas al atreves de la cimentación y que no falle por corte o sufra un asentamiento diferencial.

**Licuación:** Fenómeno por el cual el suelo pierde parte o la totalidad de su resistencia al corte.

**Actividad Sísmica:** Es el continuo movimiento de las placas tectónicas.

**Falla Geológica:** Es la fractura de la corteza terrestre que a lo largo del terreno a ocurrido un desplazamiento de bloques de suelo paralelos.

**Geomalla triaxial:** Geomalla producida para tener resistencia a la tracción en distintas direcciones.

**Análisis de elementos finitos:** Análisis realizado mediante un software especializado donde se representa la geometría del problema. Se describe mediante elementos discretos de dimensiones finitas que se analizan mediante la aplicación de principios de ingeniería mecánica. Los resultados de los análisis de elementos finitos se agregan para aproximar la solución matemática exacta.

**Columnas de Grava:** Columnas formadas con grava densificada con propósito de servir como base mejorada con la finalidad de aumentar la resistencia y la capacidad y reducir el asentamiento.



**Vibrocompactación:** un método de densificación profunda del suelo sin cohesión a través de la penetración y vibración de una sonda para reorganizar las partículas de suelo alrededor de la sonda en un estado más denso.

**Vibrodesplazamiento:** nombre para un procedimiento de instalación de Columnas de Grava, la mayor parte del suelo se desplaza lateralmente por la Columna de Grava.

**Consolidación:** relación tiempo-asentamiento que se rige por la disipación de la presión de poros provocado por una sobrecarga.

**Asentamiento diferencial:** Diferencia de asentamiento entre dos partes relevantes de una estructura. A menudo es más relevante para evitar daños a las estructuras que el asentamiento total.

**Columna de Módulo Controlado:** Es un método especialmente diseñado para el tratamiento de suelos de baja capacidad portante, asentamientos excesivos y elevada deformidad. Funciona en el reparto óptimo de las cargas mediante las inclusiones y el suelo circundante.

**Plataforma de transferencia de carga:** Es la capa que asegura transferir la carga aplicada de la estructura y la sobrecarga al suelo mejorado por inclusiones, ya sean Columnas de Grava o Columna de Módulo Controlado.

**Ensayo SPT:** Es el ensayo de Penetración estándar sirve para el reconocimiento geotécnico.

**Ensayo Límites de Atterberg:** Es un ensayo que sirve para caracterizar el comportamiento de los suelos finos.

**Contenido de Humedad:** Es expresado en porcentaje de peso agua en una muestra de suelo.

**Método MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves):** Es un método sísmico que centra en la detección de ondas sísmicas de superficie para el análisis espectral.

**SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos):** Es un sistema de clasificación de suelos más usados.

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials): Es un grupo que establece normas, diseños, manuales, especificaciones técnicas para cada ensayo, etc.

Peso específico: Es la relación entre el peso y volumen de la muestra de suelo.

Gravedad específica: Es la relación del peso unitario y su densidad de agua.

Peso unitario: Es peso del suelo por la gravedad

Ensayo de Corte Directo: Tiene como objetivo determinar la resistencia al corte del suelo consolidada y drenada.

Ensayo de pH: Determina la concentración iones hidrógenos del suelo, al presentar altos niveles de iones hidrógenos se considera ácido en caso contrario básico. Es útil al determinar la solubilidad de minerales del suelo y, la armonía de planta y suelo.

Refracción Sísmica: En un método sísmico que mide tiempo de propagación de las ondas elásticas hasta determinados lugares.

## 2.5 Hipótesis

### 2.5.1 General

- Mediante el uso de inclusiones se mejoran las propiedades del suelo y el problema de licuación.

### 2.5.2 Específico

- Mediante los parámetros geotécnicos es posible identificar las zonas susceptibles a licuación.
- Mediante la correcta evaluación de normativas y manuales se puede elegir el sistema y diseño de inclusiones para la zona de estudio.
- Las inclusiones mejoran las propiedades de los suelos y minimizan los efectos de una posible falla por licuación demostrado mediante métodos analíticos y numéricos.
- La propuesta de diseño es aplicable para la zona de estudio.

## CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO

### 3.1 Tipo, método y diseño de la investigación

Según Borjas M, (2012) define como clasificación de la ciencia de tipo aplicada recae en la posible utilidad práctica del conocimiento resultante. También menciona que la investigación cuantitativa, es conocer de una forma confiable la realidad al realizar recolección de datos y analizar estos mismos, para así probar nuestra hipótesis planteada. Además, se debe contar con resultados de diversas investigaciones que aporten a favor de la hipótesis generada.

La presente investigación es de tipo aplicada no experimental, mediante la recopilación y estudio de la metodología de diseño y teorías propuestas por diversos autores se utilizarán estos como solución para la reducción de riesgo de licuación y así cumplir las especificaciones que el proyecto requiere. Así mismo, la investigación es no experimental, ya que la investigación se realizará por métodos analíticos y modelación numérica (análisis de elementos finitos) de las inclusiones propuestas en el proyecto.

Así mismo, cuenta con enfoque tipo cuantitativo, ya que fue mediante la recolección de datos, metodologías analíticas y numéricas. Se diagnosticó la identificación de zonas susceptibles a licuación y se demostró la aplicabilidad del método de mejoramiento de suelos con inclusiones para la zona de estudio.

Según Borjas M, (2012), la investigación descriptiva determina las propiedades y características más representativa del objeto de estudio.

La presente investigación tuvo un alcance descriptivo. Para el análisis de las dos técnicas de mejoramiento de suelos tipo inclusiones se describió todos los procedimientos que conlleva cada una de ellas, además de describir las técnicas de mejoramientos de suelos más usadas.

### 3.2 Población de estudio

Según Borjas, M. 2012, denomina población o universo al conjunto de elementos o sujetos que serán motivo de estudio.

Se determina así que la población de estudio serán Sectores inestables reconocidos en el proyecto:

El proyecto construcción, mejoramiento y rehabilitación de la Carretera Cusco - Chincheros - Urubamba en el tramo 1 km. 14+229.5 al 21+730 se describirán los sectores inestables y como referencia general se presentará ciertos alcances geotécnicos de la región.

### 3.3 Muestra

Según Borjas, M. (2012), denomina a la muestra como una unidad del objeto de estudio. En la presente tesis se utilizó como muestra de estudio el sector inestable del intercambio vial aeropuerto con presencia de licuación.

El diseño muestral fue no probabilístico y los datos fueron tomados por conveniencia. La muestra tiene como característica de ser un sector inestable compuesto por suelo blando ubicada en el km 17+200, donde se realizaron estudios geotécnicos con fines de diseño de cimentación.

### 3.4 Relación entre variables

#### 3.4.1 Variable independiente

Estudio de las inclusiones

#### 3.4.2 Variable dependiente

Mejoramiento de suelos

### 3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos se desarrolló de acuerdo a las especificaciones solicitadas por el Ministerio de Transporte y comunicaciones (MTC), las condiciones de terreno y a las normativas (American Society for Testing and Materials) ASTM, lo cual fue supervisado por los profesionales designados por el MTC.

- Recolección de datos geotécnicos y procesamiento de datos validados por el ministerio de transporte y comunicaciones.

- Manuales de referencia: Para ello se usó como referencia la normativa peruana y americana siendo la NTE 0.50 (2018) y la FHWA (2017) para obtención de recomendaciones de diseño y factores de seguridad de licuación
- Obtención de valores de factores de seguridad de licuación para el suelo y el mejoramiento con Columnas de Grava se realizó mediante métodos analíticos según Boulagner. (2014) Seed, H. y Booker, J. (2003), Baez, J. (1995), Ramayajhi, D (2014). y Green, R. (2008)
- Para la obtención de esfuerzos cortantes según Mohr Coulomb y deformaciones por ecuaciones de elasticidad
- Para la obtención de capacidad de carga del suelo y de las Columnas de Módulo Controlado se usó el método de AASHTO (2014) y de Coyle y Castellano (1981)
- Obtención de valores esfuerzos y deformaciones mediante el software geotécnico de elementos finitos Plaxis 2D V20
- Por otra parte, también se utilizaron para la recolección de datos de investigaciones relacionadas con el tema como complemento del estudio.

## CAPITULO IV: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

### 4.1 Descripción General del proyecto

#### 4.1.1 Ubicación

El Proyecto se encuentra ubicado en:

Distrito : Chinchero

Provincia : Urubamba

Región : Cusco

Desde el punto de vista geográfico se ubica:

Entre el paralelo : 13°24'54.41" y 13°22'25.37" Latitud Sur

Entre los meridianos : 72°03'30.14" y 72°05'10.37" Longitud Oeste

Tabla N° 14

Coordenadas de la ubicación del proyecto

DESCRIPCIÓN	COORDENADAS UTM	
	NORTE	ESTE
Centro poblado de Chincheros (inicio)	8515058	818581
Entrada a la ciudad de Raqchi (final)	8519678	815679

Nota: Toma del proyecto MTC

El acceso carrozable parte desde la ciudad del Chinchero. Como punto de inicio el eje derecho km 14+229.50 hacia Raqchi y como punto final el eje derecho km 21+730.00, cruzando el pueblo del mismo nombre.

El área de estudio se ubica en el frontis del aeropuerto proyectado de Chinchero, distrito de Chinchero, provincia y departamento de Cusco. Con respecto al Tramo I, se ubica en km 17+200.00.

El acceso principal es por la vía que recorre las ciudades de Cusco, Chinchero y Urubamba. Esta vía en su recorrido comunica también los poblados de Poroy, Cachimayo, Chinchero, Raqchi, entre otros. El recorrido del tramo es de aproximadamente 1 hora.

Figura N° 42

### Ubicación del Proyecto



Nota: Fuente propia basado en información del proyecto

## 4.2 Geología

### 4.2.1 Geología Local

El desarrollo de la geología regional del Proyecto se ha elaborado en base a los trabajos realizados y publicados por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), en su Boletín N° 65, Cuadrángulo de Urubamba y Calca, hojas 27-r y 27-s, respectivamente y Boletín A 138 Geología del Cuadrángulo del Cusco (1:50 000), hoja 28-s. cabe recalcar que se ha mantenido la nomenclatura actualizada de las formaciones y/o grupos realizada por el INGEMMET.

#### - Depósitos Cuaternarios

Los depósitos cuaternarios se encuentran cubriendo gran parte de los afloramientos descritos, generalmente presentan espesores variados, se ubican en superficies llanas y para el área se componen por depósitos residuales. Para mayor detalle ver Anexo N° 1: Plano de Geología Local del Intercambio Aeropuerto.

#### - Depósitos residuales (O-re)

Los depósitos residuales que están compuestos de limos, arcillas, arenas y gravas y fragmentos sueltos, que formaron parte de los afloramientos existentes que fueron removidos por procesos químicos de meteorización, generalmente disolución o lixiviación.

#### 4.2.2 Ensayos realizados

Durante el desarrollo de la exploración geotécnica de campo se obtuvieron muestras representativas de suelos, donde se llevaron a cabo ensayos de mecánica de suelos para estimar los parámetros geotécnicos.

Del Anexo N° 12 al Anexo N° 51 se pueden apreciar los Resultados de Ensayos de Laboratorios, emitidos por el JNR Consultores S.A. y el Ministerio de Transporte y Comunicaciones. A continuación, se presenta la descripción de los ensayos realizados y algunos comentarios de los resultados obtenidos.

Comprende la ejecución de un programa de ensayos de laboratorio para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos característicos encontrados en el Proyecto, estos ensayos se han realizado siguiendo los procedimientos indicados en las Normas Técnicas Peruanas (NTP) y las Normas Americanas (ASTM).

- Descripción e identificación de suelos (ASTM D-2488)
- Límites de consistencia (LL, LP, IP) (ASTM D-4318)
- Clasificación SUCS (ASTM D-2487)
- Clasificación AASHTO (ASTM D-3282)
- Contenido de humedad (ASTM D-2216)
- Peso unitario del agregado global (ASTM C-29, MTC E-203)
- Gravedad específica de los sólidos (ASTM D-854)
- Peso específico de sólidos y absorción (ASTM C-127, MTC E-2069)
- Corte directo bajo condiciones drenadas (ASTM D-3080)
- Sulfatos (NTP 339.178)
- Cloruros (NTP 339.177)
- Sales Solubles Totales (NTP 339.152)
- PH (NTP 339.176)

#### 4.3 Aspectos Geodinámicas

##### 4.3.1 Geodinámica Externa

Los fenómenos de geodinámica externa están vinculados a factores climáticos, morfológicos y litológicos. En el área no se han detectado este tipo de fenómenos que pueda afectar la obra proyectada.



#### 4.3.2 Geodinámica Interna

De acuerdo al nuevo mapa de zonificación sísmica del Perú, la nueva Norma Sismo Resistente de Estructuras (E.030 - 2016) y el Mapa de Distribución de Máximas Intensidades Sísmicas observadas en el Perú (Alva J, 1984) el intercambio vial del Aeropuerto, se encuentra dentro de la zona de sismicidad intermedia (Zona 2), existiendo la posibilidad de que ocurran sismos de intensidades tan considerables como VII hasta X en la escala Mercalli Modificada.

#### 4.4 Aspectos Geotécnicos

##### 4.4.1 Estudios de suelos

Entre los estudios de suelos tenemos las investigaciones geotécnicas directas, indirectas y las perforaciones la cual fue necesario para este proyecto.

##### - Investigaciones Geotécnicas Directas:

Se ejecutaron 2 calicatas con la finalidad de evaluar condiciones geotécnicas de los materiales depositados para el correcto desarrollo del diseño.

Tabla N° 15

Ubicación de calicatas

CALICATA	PROGRESIVA	COORDENADAS UTM		NIVEL DE AGUA (m)	ENSAYOS
		N	E		
CG-04	17+200.00	8517855	818302	2.5	Ensayos Estándar: Límites de Astemmer SUCS., AASHTO, PE, Gs y PU., Ensayos Especiales: Corte directo
CG-05	17+120.00	8517805	818390	3.3	Ensayos Químicos: pH, Cl, SST y 504.

Nota: Tomado del estudio de suelos del proyecto Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco Chinchero – Urubamba en la Región Cusco Tramo 1 km 14+229.50 al 21+730. Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2020)

Con la calicata CG-04 y CG-05 se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla N° 16

Resultados de ensayos de laboratorio

CALICATA	PROGRESIVA	MUESTRA	SUCS	AASHTO	% W	LL	LP	IP	P.U. (Kg/m <sup>3</sup> )	P.E. (T/m <sup>3</sup> )
CG-04	17+200.00	M-01	CH	A-7-6 (37)	16	63	27	36	-	-
		M-02	ML	A-4 (0)	31	17	NP	NP	1 305	2.79
CG-05	17+120.00	M-01	ML	A-4 (0)	12	37	NP	NP	-	-
		M-02	ML	A-4 (0)	24	38	NP	NP	-	-
		M-03	ML	A-4 (0)	32	22	NP	NP	1 248	2.77

Nota: Tomado del estudio de suelo del proyecto Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco Chinchero – Urubamba en la Región Cusco Tramo 1 km 14+229.50 al 21+730. Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2020)

Del ensayo de corte directo bajo condiciones drenadas:

Tabla N° 17

Resultados de ensayos de corte directo

CALICATA	PROGRESIVA	MUESTRA	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)	COHESIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )	(kPa)
CG-04	17+200.00	M-02	15.9	0.21	20.38
CG-05	17+120.00	M-03	15.4	0.26	25.18

Nota: Tomado del estudio de suelo del proyecto Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco Chinchero – Urubamba en la Región Cusco Tramo 1 km 14+229.50 al 21+730. Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2020)

Tabla N° 18

Resultados de ensayos químicos

CALICATA	PROGRESIVA	MUESTRA	pH	S.S.T. (ppm)	SO <sub>4</sub> (ppm)	CI (ppm)
CG-04	17+200.00	M-02	9.1	1 033	273	90
CG-05	17+120.00	M-03	8.5	683	175	70

Nota: Tomado del estudio de suelo del proyecto Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco Chinchero – Urubamba en la Región Cusco Tramo 1 km 14+229.50 al 21+730. Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2020)

- Investigaciones Geotécnicas Indirectas:

Se realizó refracción sísmica y MASW, para nuestro estudio se usarán los ensayos próximos al intercambio vial aeropuerto. Con respecto a la refracción sísmica se obtuvieron LS-17, LS-18, LS-19, LS-20, y con respecto al ensayo MASW, fue el MASW-5 según lo resumido en las Tablas N°19 “Resumen de líneas de refracción” y Tabla N°20 “Resumen de MASW”.

Tabla N° 19

Resumen de líneas de refracción

LÍNEA SÍSMICA	ESTRATOS	Vp (m/s)	PROFUNDIDAD PROMEDIO	DESCRIPCIÓN
LS-17 y LS-18	1	673	0.0-6.1	Suelo superficial
	2	1456	4.9-?	Material más compacto
LS-19	1	569	0-6.1	Suelo superficial
	2	1567	1.1-?	Material más compacto
LS-20	1	547	0.0-5.9	Suelo superficial
	2	1556	0.6-?	Material más compacto

Nota: Tomado de los ensayos realizados del proyecto según JNR CONSULTORES S.A. (MTC 2020)

Tabla N° 20

Resumen de MASW.

ENSAYO	ESTRATOS	Vs (m/s)	CLASIFICACIÓN	CONSISTENCIA
MASW5	1	297.44	S2	Suelo intermedio
	2	299	S2	Suelo intermedio
	3	306.56	S2	Suelo intermedio

Nota: Consistencia según normativa peruana de sismos E.030, datos Tomado de los ensayos realizados del proyecto según JNR CONSULTORES S.A.C. (MTC 2020)

- Perforaciones:

Se realizaron 3 perforaciones DDH-1, DDH-2, DDH-3

Tabla N° 21

Resultados de perforaciones - Intercambio Vial Aeropuerto.

MUESTRA	PROGRESIVA	COORDENADA		MUESTRA	PROFUNDIDAD	N.F
		UTM Norte	UTM Este			
DDH-1	17+106	8517771	818375	M-01	10.00-10.45	1.9
				M-02	12.00-12.45	
				M-03	14.00-14.45	
				M-04	16.00-16.45	
DDH-2	17+166	8517825	818338	M-01	08.00-08.45	1.9
				M-02	10.00-10.45	
				M-03	12.00-12.45	
				M-04	14.00-14.45	
DDH-3	17+220	8517884	818334	M-01	10.30-10.75	1.9
				M-02	16.00-16.45	
				M-03	18.45-18.90	

Nota: Tomado del estudio de suelo del proyecto Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco Chinchero – Urubamba en la Región Cusco Tramo 1 km 14+229.50 al 21+730. Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2020)

Después descrita generalmente los ensayos de perforación, se obtuvo el resumen de número de golpes en las Tablas N°22, N°23, N°24 “Resultados SPT”

Tabla N° 22

Resultados SPT DDH-01

PROFUNDIDAD	SUCS	PESO ESPECIFICO	Ncampo
(m)		(t/m <sup>3</sup> )	
2.75	ML	1.7	6
4.75	ML	1.7	7
6.75	ML	1.7	7
8.75	CL-ML	1.7	12
10.75	CL-ML	1.7	20
12.75	CL-ML	1.7	21
14.75	CL-ML	1.7	22
16.75	CL-ML	1.7	25

Nota: Tomado del estudio de suelo del proyecto Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco Chinchero – Urubamba en la Región Cusco Tramo 1 km 14+229.50 al 21+730.

Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2020)

Tabla N° 23

Resultados SPT DDH-02

PROFUNDIDAD (m)	SUCS	PESO ESPECIFICO (t/m3)	Ncampo
2.75	ML	1.7	1
4.75	CL-ML	1.7	3
6.75	CL-ML	1.7	3
8.75	CL-ML	1.7	15
10.75	CL-ML	1.7	23
12.75	CL-ML	1.7	20
14.75	CL	1.7	22
16.75	CL	1.7	25
18.75	CL	1.7	30
20.75	CL	1.7	40

Nota: Tomado del estudio de suelo del proyecto Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco Chinchero – Urubamba en la Región Cusco Tramo 1 km 14+229.50 al 21+730.

Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2020)

Tabla N° 24

Resultados SPT DDH-03

PROFUNDIDAD (m)	SUCS	PESO ESPECIFICO (t/m3)	Ncampo
2.25	CL-ML	1.7	10
5.25	CL-ML	1.7	3
8.25	CL-ML	1.7	10
11	CL	1.7	15
14	CL	1.7	18
15	CL	1.7	22
16.75	CL	1.7	25
19.25	CL	1.7	28

Nota: Tomado del estudio de suelo del proyecto Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco Chinchero – Urubamba en la Región Cusco Tramo 1 km 14+229.50 al 21+730.

Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2020)

#### 4.4.2 Capacidad Portante

Para el cálculo de capacidad portante se consideró una cimentación de tipo platea de cimentación de medidas 14.20m x 25m plasmados en la Tabla N°25

Tabla N° 25

Datos generales del suelo del intercambio vial Aeropuerto.

Descripción	Simbología	Valor	Unidades	Equivalencias / observaciones	
Angulo de Fricción Interna		15.9	°		
Cohesión	c	20	kPa	2.04	Ton/m <sup>2</sup>
Clasificación	SUCS	ML			
Peso Específico (1)		27.91	Kn/m <sup>3</sup>		
Peso Específico (2)		27.71	Kn/m <sup>3</sup>	2.7	Ton/m <sup>3</sup>
Ancho de la Base	B	14.2	m		
Longitud de la Base	L	25	m		
Relación	B/L	0.57	L/B:	1.76	
Profundidad de Cimentación	Df	3.5	m		
Factor de Seguridad	FS	3	DF/B:	0.246	
Inclinación del terreno		4	°		
Presión efectiva	$\gamma$ :	26.27	Ton/m <sup>2</sup>	Presión efectiva B/2 por debajo de Df	

Nota 01: Resumen de datos de suelos y cálculos para el cálculo de capacidad portante en el intercambio vial aeropuerto. Fuente: Propia.

#### 4.5 Peligro sísmico

Para los análisis dinámicos el coeficiente sísmico de diseño para taludes y muros con períodos de retomo de 475 años es de 0.12g y para estructuras tipo puente o túnel con períodos de retomo de 1 000 años es de 0.20g. plasmado en la Tabla N°26

Tabla N° 26

Resumen de Resultados de las corridas del Programa Risk

Aceleraciones del poblado de chincheros						
Periodo de retomo (años)	50	100	200	400	475	1000
Intensidad	4.99	5.14	5.29	5.44	5.48	5.83
Antilogaritmo	146.5	170.9	19621	229.9	238.9	279.7
Aceleración Máx.	0.16	0.174	0.202	0.236	0.244	0.286

Nota: Tomado de los ensayos realizados del proyecto por JNR CONSULTORES S.A.C. (MTC 2020)

4.6 Datos para la evaluación de Columna de Grava y Columna de Módulo Controlado

Los datos según Poves, J. (2017) fueron realizados para un material tipo CL, mediante un ensayo de consolidación, obteniendo así los datos de Cr, Cc, e0, Pc y Poisson, el módulo de suelo fue calculado según la velocidad obtenidas del ensayo Masw, el módulo de la Columna de Grava y Columna Módulo Controlado fueron obtenidos según recomendaciones de varios autores. La densidad relativa, Permeabilidad horizontal, coeficiente de compresibilidad y razón de sobrepresión intersticial excesiva resumidos en la Tabla N°27

Tabla N° 27:

Datos de suelos para evaluación de Columna de Grava

Descripción	Símbolo	Valores	Unidad	Fuente
Modulo del suelo	Em	12000	Kn/m2	(a)
Módulo de Columnas de Grava	Eg	60000	Kn/m2	(a)
Módulo de CMC	Ec	10000000	Kn/m2	
Relación de Poison		0.33		(a)
Índice de expansibilidad	Cr	0.02		(a)
Índice de compresión	Cc	0.17		(a)
Índice de vacíos	e0	0.57		(a)
Presión de consolidación	Pc	2.2	Kg/cm2	(a)

Densidad relativa	Dr	60	%	ASTM D2049
Permeabilidad horizontal	k	3.00E-05	(m/s)	(b)
Coefficiente de compresibilidad	mvs	1.00E-04	k/pa	(b)
Razón de sobrepresión intersticial excesiva	rg	0.6		

- 
- (a) Tomado de la tesis Poves J (2017), Influencia de las Columnas de Grava compactada en el asentamiento de suelos blandos sector de Palian, 2017 en la tabla 4.45 Características Geotécnicas del Suelo, dichos datos fueron optados por conveniencia debido a que no existen datos de laboratorio de consolidación en el proyecto.
- (b) Datos de permeabilidad, coeficiente de compresibilidad y razón de sobrepresión optados para una arena floja algo limosa siendo uno de los casos más desfavorables, usados debido a que no existen datos de laboratorio de consolidación en el proyecto.

En la Tabla N°27 “Datos de suelos para evaluación de Columna de Grava” Se tomó un 60% de densidad relativa con el fin de representar un suelo denso según la ASTM D2049, además de usar datos referenciales para poder evaluar el comportamiento de la Columna de Grava en un caso desfavorable, explicados en las notas (a) y (b)



## CAPITULO V: EVALUACIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Evaluación de los parámetros geotécnicos

Con los datos generales se realizará los cálculos de capacidad portante para suelos superficiales para una cimentación de platea que se apoya el Intercambio Vial Aeropuerto, propuesto por diversos autores.

Según Meyerhof, O. para el cálculo de capacidad ultima se tiene:

Tabla N° 28

Factores según Meyerhof, O.

De capacidad de carga	Nq:	4.29	Ny:	2.7	Nc:	11.56
De forma	Sq:	1.1	Sy:	1.1	Sc:	1.2
De profundidad	Dq:	1.07	Dy:	1.07	Dc:	1.13
De Inclinación	Iq:	1	Iy:	1	Ic:	1

Nota: (Fuente: Propia)

Para que con la expresión:

$$q_u = 0.5\gamma_2 * B * N_\gamma * S_\gamma * d_\gamma * i_\gamma + C * N_c * S_c * d_c * i_c + q * N_q * S_q * d_q * i_q$$

Se obtiene:

$$q_{ult} = 224.70 \text{ Ton/m}^2 \text{ y}$$

El  $q_{ult}$  se dividirá por el factor de seguridad (FS) igual a 3, que recomienda la norma E.050 para este tipo de estructuras, para obtener la capacidad admisible.

$$Q_{adm} = 74.90 \text{ Ton/m}^2$$

Siguiendo la metodología de Vesic. A. (1973) para el tipo de suelo se tuvo los siguientes factores resumidos en la Tabla N°29

Tabla N° 29

Factores Metodología de Vesic, A. (1973)

De capacidad de carga	Nq:	4.29	Ng:	3	Nc:	11.56
De forma	Fqs:	1.16	Fgs:	0.77	Fcs:	1.21
De profundidad	Fqd:	1.07	Fgd:	1	Fcd:	1.07
De Inclinación	Fqi:	1	Fgi:	1	Fci:	1
De incompresibilidad	<b>Fqc:</b>	<b>1</b>	<b>Fgc:</b>	<b>1</b>	<b>Fcc:</b>	<b>1</b>

Nota: (Fuente: Propia)

Y con su expresión:

$$q_u = c N_c F_c F_c F_c F_c + q N_q F_q F_q F_q F_q + \frac{1}{2} \gamma N_\gamma N_\gamma N_\gamma N_\gamma N_\gamma$$

Se obtiene un

$$q_u = 216.61 \text{ Ton/m}^2$$

$$Q_u = 76895.46 \text{ ton}$$

$$Q_{adm} = q_u / FS = 72.20 \text{ Ton/m}^2$$

$$Q_{adm} = 25631.82 \text{ ton}$$

Según la metodología de ASSHTO LRFD Bridge Design Specifications (2014) para el tipo de suelo se tuvo los siguientes factores resumidos en la Tabla N°30

Tabla N° 30

Factores según ASSHTO LRFD (2014)

De capacidad de carga	Nq:	4.29	Ny:	3.02	Nc:	11.56
De forma	Sq:	1.16	Sy:	0.77	Sc:	1.21
De Inclinación	Iq:	1	Iy:	1	Ic:	1
Componentes	Nqm:	4.99	Nym:	2.33	Ncm:	14

Nota: (Fuente: Propia)

Con ello se puede calcular la capacidad de carga ultima con la siguiente formula:

$$q_n = c \cdot N_c + \frac{1}{2} \cdot B \cdot \gamma \cdot N_{\gamma m} \cdot C_{w\gamma} + \gamma \cdot D_f \cdot N_q \cdot C_w$$

Con ello y usando la expresión de ASSHTO LRFD (2014):

$$q_n = 73.24 \text{ Ton/m}^2$$

$$Q_n = 26002 \text{ Ton}$$

$$N_{cm} = 14.00$$

$$N_{ym} = 2.33$$

$$N_{qm} = 4.99$$

Con ello y usando la expresión de ASSHTO LRFD (2014) se obtiene la capacidad de carga:

$$q_n = 73.24 \text{ Ton/m}^2$$

$$Q_n = 26002 \text{ Ton}$$

## 5.2 Evaluación de susceptibilidad de licuación

Para evaluar el Criterio de Seed ET al. 2003 se usarán valores de las calicatas como Límite líquido y porcentaje de Humedad resumidos en la Tabla 31

Tabla N° 31

Datos requeridos para el criterio de Seed et al. 2003

	IP	LL	W (%)	0.8(LL)
Según la calicata GG-04	NP	17	30.5	14.45
Según la calicata GG-05	NP	22	31.8	18.7

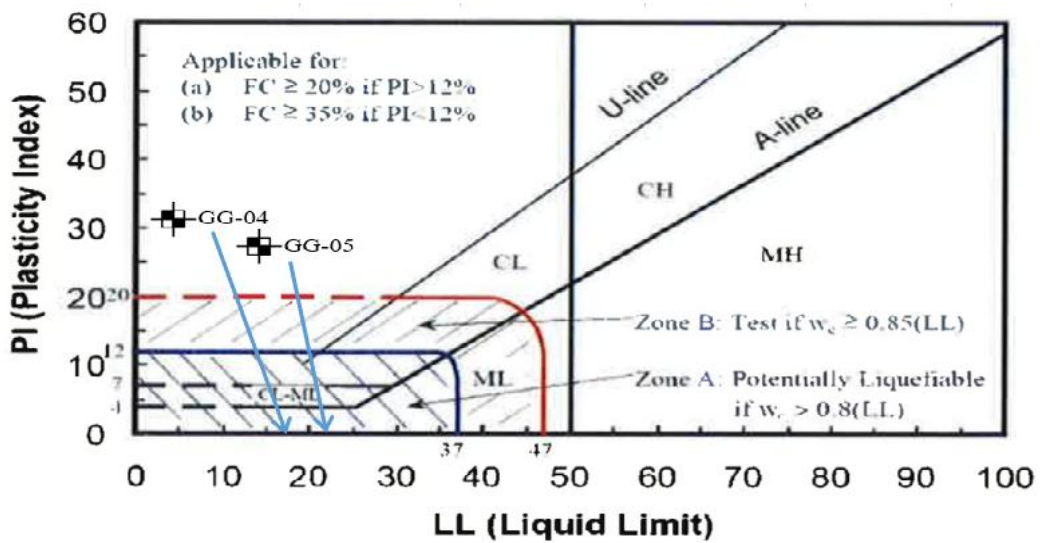
Nota 01: NP: no presenta y se le da valor de 0 y se cumple que  $W(\%) > 0.8LL$

Nota 02: Elaboración propia

Con ello se tiene que se ubican en una zona susceptible según la Figura N°43

Figura N° 43

Determinación de susceptibilidad de licuación según Seed 2003



Nota01: Se ubicó los parámetros de la calicata en la figura de Seed et al 2003

Según el Criterio de Bray, D. y Sancio, R. (2006) se usarán valores de las calicatas como límite líquido, porcentaje de humedad y contenido de finos resumidos en la Tabla N°32.

Tabla N° 32

Datos requeridos para el criterio de Bray, D. y Sancio, R. (2006)

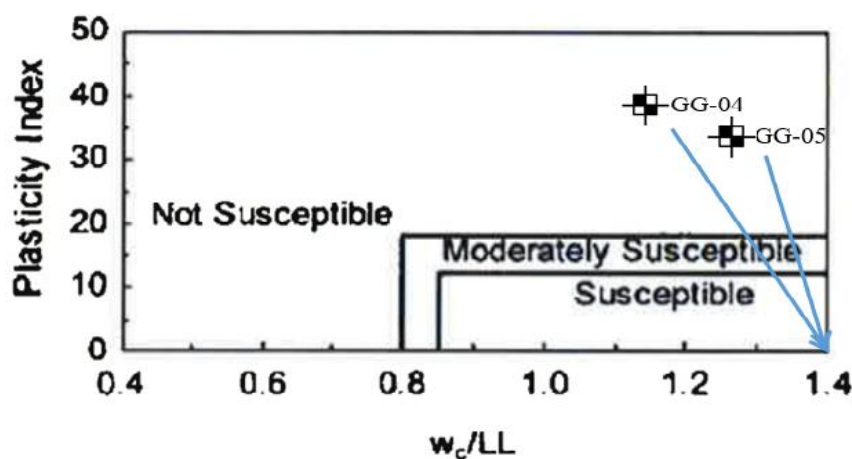
	CF	IP	LL	W%	w/LL
Según la calicata GG-04	83.8	NP	17	30.5	1.79
Según la calicata GG-05	89.5	NP	22	31.8	1.45

Nota 01: Elaboración propia

Con ello según el método de Bray, D y Sancio, R. 2006 Se ubicaban en una zona de susceptibilidad según lo mostrados en la Figura N°44

Figura N° 44

Determinación de susceptibilidad de licuación según Bray & Sancio (2006)



Nota01: Se ubicó los parámetros de la calicata en la figura de Bray & Sancio 2006

Según el criterio de Adapazari (2010) se usarán valores de las calicatas como límite líquido, porcentaje de humedad y contenido de finos resumidos en la Tabla N° 33 y Tabla N° 34 “Datos requeridos para el criterio de Adaparazi”.

Tabla N° 33

Datos requeridos para el criterio de Adaparazi (2010)

	SUCS	% Material	
		Arena	Finos
Según la calicata GG-04	ML	16.2	83.8
Según la calicata GG-05	ML	10.5	89.5

Nota: Elaboración propia

Tabla N° 34

Datos requeridos para el Criterio de Adaparazi (2010)

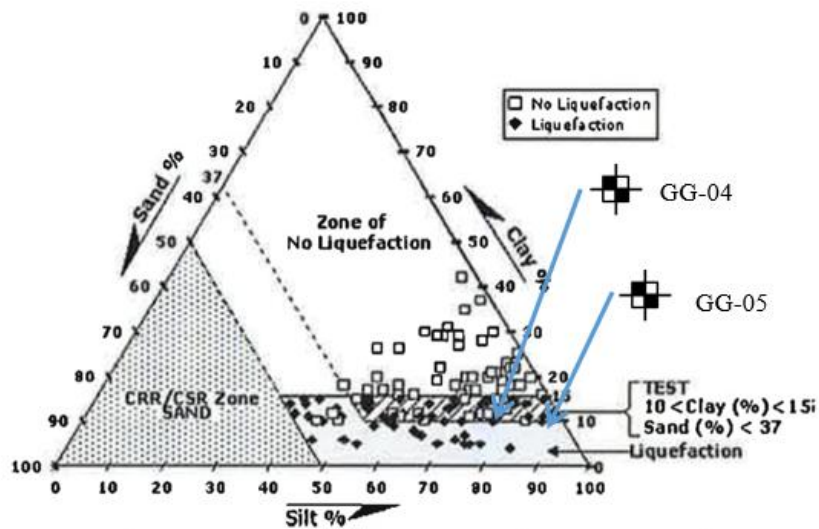
	CF	IP	LL	W%	w/LL
Según la calicata GG-04	83.8	NP	17	30.5	1.79
Según la calicata GG-05	89.5	NP	22	31.8	1.45

Nota: EL índice liquido se obtiene con la siguiente expresión  $W/LL$

Con ello se procede a hacer uso del criterio de Adaparazi (2010) usando los datos de las Tablas N°33 y N°34 “Datos requeridos para el criterio de Adaparazi (2010)” y aplicarlos en la Figuras N°45 y N°46 “Determinación de susceptibilidad de licuación según Adapazari et al 2003”.

Figura N° 45

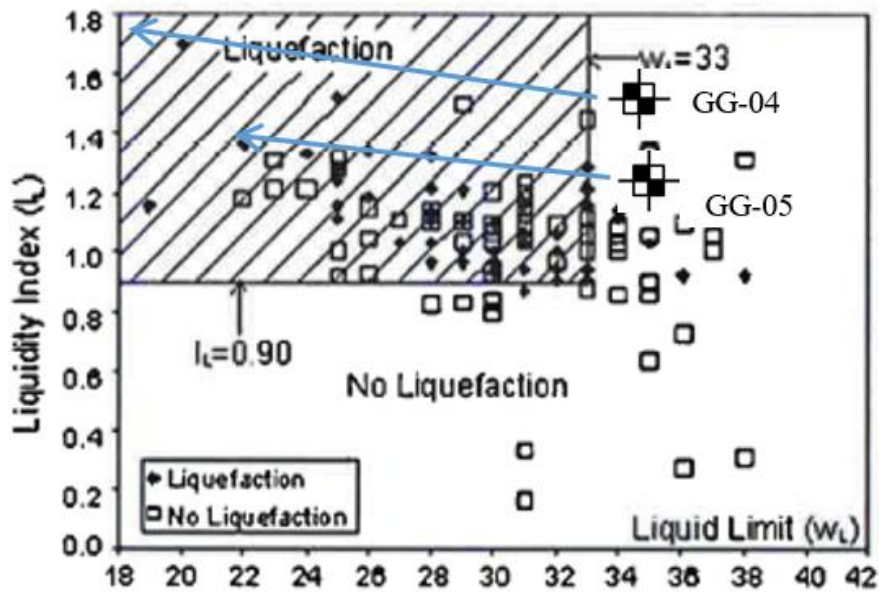
Determinación de susceptibilidad de licuación según Adapazari et al 2003.



Nota01: Se ubicó los parámetros de la calicata en la figura de porcentaje de finos de Adapazari et al 2003

Figura N° 46

Determinación de susceptibilidad de licuación según Adapazari et al 2003



Nota01: Se ubicó los parámetros de la calicata en la figura de Adapazari (2003)

### 5.3 Evaluación de potencial de licuación

Para evaluar el potencial de licuación se usarán los datos de las perforaciones DDH1, DDH02 y DDH03 ya descritas.

Primero se calculará los esfuerzos efectivos aplicados que será la diferencia del esfuerzo aplicado según el estrato a analizar menos la presión de poros aplicada sobre la misma calculadas en las Tablas N° 35, N° 36, N° 37 “Resultados de esfuerzos efectivos”.

Tabla N° 35

Resultados de esfuerzos efectivos según DDH-01

Profundidad (m)	SUCS	Peso específico (KN/m <sup>3</sup> )	Ncampo	Esfuerzo total (KN/m <sup>2</sup> )	Presión de poros (KN/m <sup>2</sup> )	Esfuerzo efectivo (KN/m <sup>2</sup> )
2.75	ML	16.67	6	45.8	8.3	37.5
4.75	ML	16.67	7	79.2	28.0	51.2
6.75	ML	16.67	7	112.5	47.6	64.9
8.75	CL-ML	16.67	12	145.9	67.2	78.7
10.75	CL-ML	16.67	20	179.2	86.8	92.4
12.75	CL-ML	16.67	21	212.5	106.4	106.1

14.75	CL-ML	16.67	22	245.9	126.1	119.8
16.75	CL-ML	16.67	25	279.2	145.7	133.5

Nota 01: Según el ensayo de perforación DDH-01 se consideró un nivel freático de: 1.90m

Tabla N° 36

Resultados esfuerzos efectivos según DDH-02

Profundidad (m)	SUCS	Peso especifico (KN/m3)	Ncampo	Esfuerzo total (KN/m <sup>2</sup> )	Presión de poros (KN/m <sup>2</sup> )	Esfuerzo efectivo (KN/m <sup>2</sup> )
2.75	ML	16.67	1	45.8	8.3	37.5
4.75	CL-ML	16.67	3	79.2	28.0	51.2
6.75	CL-ML	16.67	3	112.5	47.6	64.9
8.75	CL-ML	16.67	15	145.9	67.2	78.7
10.75	CL-ML	16.67	23	179.2	86.8	92.4
12.75	CL-ML	16.67	20	212.5	106.4	106.1
14.75	CL	16.67	22	245.9	126.1	119.8
16.75	CL	16.67	25	279.2	145.7	133.5
18.75	CL	16.67	30	312.6	165.3	147.3
20.75	CL	16.67	40	345.9	184.9	161.0

Nota 01: Según el ensayo de perforación DDH-02 se consideró un nivel freático de: 2.00m

Tabla N° 37

Resultados esfuerzos efectivos según DDH-03

Profundidad (m)	SUCS	Peso especifico (KN/m3)	Ncampo	Esfuerzo total (KN/m <sup>2</sup> )	Presión de poros (KN/m <sup>2</sup> )	Esfuerzo efectivo (KN/m <sup>2</sup> )
2.25	CL-ML	16.67	10	37.5	3.4	34.1
5.25	CL-ML	16.67	3	87.5	32.9	54.7
8.25	CL-ML	16.67	10	137.5	62.3	75.2
11.00	CL	16.67	15	183.4	89.3	94.1
14.00	CL	16.67	18	233.4	118.7	114.7
15.00	CL	16.67	22	250.1	128.5	121.5
16.75	CL	16.67	25	279.2	145.7	133.5
19.25	CL	16.67	28	320.9	170.2	150.7

Nota 01: Según el ensayo de perforación DDH-03 se consideró un nivel freático de: 1.90m

Para el cálculo del esfuerzo cíclico resistente (CRR) será calculado según los resultados obtenidos de las perforaciones, mediante el SPT obteniendo un Ncampo dado, sin embargo, dicho parámetro será corregidos según la tabla Correcciones del SPT con lo que se tiene resumido en la Tabla N°38 “Correcciones para el ensayo de penetración estándar (SPT) del proyecto”.

Tabla N° 38

Correcciones para el ensayo de penetración estándar (SPT) del proyecto

Factor	Variable del equipo	Término	Corrección
Presión efectiva	-	$C_N$	$(Pa/\sigma'_v)^m$
Presión efectiva	-		CN 1.7
Relación de energía	Martillo de rodillo	$C_E$	1
Diámetro de perforación	65-115 mm	$C_B$	1
Longitud 1	< 3m		0.75
Longitud 2	3-4 m		0.8
Longitud 3	4-6 m	$C_R$	0.85
Longitud 4	6-10 m		0.95
Longitud 5	10-30 m		1
Método de muestreo	Muestreo estándar	$C_S$	1

Nota: Adaptado de Robertson y Wride, (1998)

Una vez aplicado las correcciones correspondientes a la presión efectiva, relación de energía, diámetro de perforación y longitud, se procederá a calcular el esfuerzo cíclico resistente para una magnitud de sismo de 7.5 (CRR7.5) para las perforaciones DDH-01, DDH-02, DDH-03, calculadas en las tablas N°39, N°40, N°41 “Resultados de esfuerzo cíclico resistente para una magnitud de sismo de 7.5 (CRR 7.5)”.

Tabla N° 39

Resultados de esfuerzo cíclico resistente para una magnitud de sismo de 7.5 (CRR 7.5)

Profundidad (m)	Valores de NSPT	CN	CE	CB	CR	CS	(N1) <sub>60</sub>	Contenido de finos (%)	D (N1) <sub>60</sub>	(N1) <sub>60CS</sub>	CRR7.5
2.75	6	1.7	1	1	0.75	1	7.7	81.12	5.54	13	0.140
4.75	7	1.4	1	1	0.85	1	8.3	81.12	5.54	14	0.148
6.75	7	1.3	1	1	0.95	1	8.6	81.12	5.54	14	0.148



8.75	12	1.1	1	1	0.95	1	12.5	81.12	5.54	18	0.184
10.75	20	1.1	1	1	1	1	22.0	81.12	5.54	28	0.384
12.75	21	1	1	1	1	1	21.0	81.12	5.54	27	0.347
14.75	22	1	1	1	1	1	22.0	81.12	5.54	28	0.384
16.75	25	0.9	1	1	1	1	22.5	81.12	5.54	28	0.384

Nota 01: Según el ensayo de perforación DDH-01

Nota 02: Valores de corrección de CN, CE, CB, CR, CS según tabla

Tabla N° 40

Resultados de esfuerzo cíclico resistente para una magnitud de sismo de 7.5 (CRR 7.5)

Profundidad (m)	Valores de NSPT	CN	CE	CB	CR	CS	(N1) <sub>60</sub>	Contenido de finos (%)	D (N1) <sub>60</sub>	(N1) <sub>60CS</sub>	CRR7.5
2.75	1	1.7	1	1	0.75	1	1.3	84.55	5.53	7	0.098
4.75	3	1.5	1	1	0.85	1	3.8	84.55	5.53	9	0.111
6.75	3	1.3	1	1	0.95	1	3.7	84.55	5.53	9	0.111
8.75	15	1.1	1	1	0.95	1	15.7	84.55	5.53	21	0.219
10.75	23	1.1	1	1	1	1	25.3	84.55	5.53	31	0.555
12.75	20	1	1	1	1	1	20	84.55	5.53	26	0.316
14.75	22	1	1	1	1	1	22	86.54	5.52	28	0.384
16.75	25	0.9	1	1	1	1	22.5	86.54	5.52	28	0.384
18.75	30	0.9	1	1	1	2	54	86.54	5.52	37	1.750
20.75	40	0.9	1	1	1	3	108	86.54	5.52	37	1.750

Nota 01: Según el ensayo de perforación DDH-02

Nota 02: Valores de corrección de CN, CE, CB, CR, CS según tabla

Tabla N° 41

Resultados de esfuerzo cíclico resistente para una magnitud de sismo de 7.5 (CRR 7.5)

Profundidad (m)	Valores de NSPT	CN	CE	CB	CR	CS	(N1) <sub>60</sub>	Contenido de finos (%)	D (N1) <sub>60</sub>	(N1) <sub>60CS</sub>	CRR7.5
2.25	10	1.7	1	1	0.75	1	12.8	86.6	5.52	18	0.184
5.25	3	1.4	1	1	0.85	1	3.6	86.6	5.52	9	0.111

8.25	10	1.2	1	1	0.95	1	11.4	86.6	5.52	17	0.174
11	15	1.1	1	1	1	1	16.5	86.6	5.52	22	0.233
14	18	1	1	1	1	1	18	86.6	5.52	24	0.268
15	22	1	1	1	1	1	22	86.6	5.52	28	0.384
16.75	25	0.9	1	1	1	1	22.5	86.6	5.52	28	0.384
19.25	28	0.9	1	1	1	2	50.4	86.6	5.52	37	1.750

Nota 01: Según el ensayo de perforación DDH-03

Nota 02: Valores de corrección de CN, CE, CB, CR, CS según tabla

Ahora se calculará los esfuerzos cíclicos actuantes (CSR) para así poder obtener el factor de seguridad contra licuación comparándolos con los resultados obtenidos de los esfuerzos cíclicos resistentes para un sismo con magnitud 7.5 (CRR7.5), los factores de seguridad y la ocurrencia de licuación para las perforaciones DDH-01, DDH-02, DDH-03 son calculados y resumidos en las Tablas N°42, N°43 y N°44 “Resultados de factor de seguridad de licuación”

Tabla N° 42

Resultados de factor de seguridad de licuación según DDH-01

Profundidad (m)	rd	CSR	CRR <sub>7.5</sub>	MSF	C	K	K <sub>a</sub>	FS <sub>L</sub>	Ocurrencia licuación
2.75	0.787	0.153	0.14	1	0.1	1.1	1	1.01	Licua
4.75	0.787	0.193	0.148	1	0.11	1.07	1	0.82	Licua
6.75	0.786	0.216	0.148	1	0.11	1.04	1	0.71	Licua
8.75	0.786	0.231	0.184	1	0.12	1.03	1	0.82	Licua
10.75	0.785	0.242	0.384	1	0.18	1.01	1	1.61	No Licua
12.75	0.785	0.249	0.347	1	0.18	0.99	1	1.37	No Licua
14.75	0.784	0.255	0.384	1	0.18	0.96	1	1.45	No Licua
16.75	0.784	0.26	0.384	1	0.18	0.94	1	1.39	No Licua

Nota01: Según el estudio de peligro sísmico se consideró para  $a_{max}/g = 0.244$

Nota02: Factor de seguridad  $>1.25$  para que no ocurra licuación según la E050 para estructuras tipo A

Tabla N° 43

Resultados de factor de seguridad de licuación según DDH-02

Profundidad (m)	rd	CSR	CRR <sub>7.5</sub>	MSF	C	K	K <sub>a</sub>	FS <sub>L</sub>	Ocurrencia licuación
2.75	0.787	0.153	0.098	1	0.08	1.08	1	0.69	Licua
4.75	0.787	0.193	0.111	1	0.09	1.06	1	0.61	Licua
6.75	0.786	0.216	0.111	1	0.09	1.04	1	0.53	Licua
8.75	0.786	0.231	0.219	1	0.14	1.03	1	0.98	Licua
10.75	0.785	0.242	0.555	1	0.21	1.01	1	2.33	No Licua
12.75	0.785	0.249	0.316	1	0.17	0.99	1	1.25	No Licua
14.75	0.784	0.255	0.384	1	0.18	0.96	1	1.45	No Licua
16.75	0.784	0.26	0.384	1	0.18	0.94	1	1.39	No Licua
18.75	0.783	0.264	1.75	2	0.3	0.88	1	11.68	No Licua
20.75	0.783	0.267	1.75	3	0.3	0.85	1	16.8	No Licua

Nota01: Según el estudio de peligro sísmico se consideró para  $a_{max}/g = 0.244$

Nota02: Factor de seguridad  $>1.25$  para que no ocurra licuación según la E050 para estructuras tipo A

Tabla N° 44

Resultados de factor de seguridad de licuación según DDH-03.

Profundidad (m)	rd	CSR	CRR <sub>7.5</sub>	MSF	C	K	K <sub>a</sub>	FS <sub>L</sub>	Ocurrencia licuación
2.25	0.787	0.137	0.184	1	0.12	1.1	1	1.47	No Licua
5.25	0.787	0.2	0.111	1	0.09	1.05	1	0.59	Licua
8.25	0.786	0.228	0.174	1	0.12	1.03	1	0.79	Licua
11	0.785	0.243	0.233	1	0.14	1.01	1	0.97	Licua
14	0.785	0.253	0.268	1	0.16	0.98	1	1.03	Licua
15	0.784	0.256	0.384	1	0.18	0.96	1	1.44	No Licua
16.75	0.784	0.26	0.384	1	0.18	0.94	1	1.39	No Licua
19.25	0.783	0.265	1.75	1	0.3	0.87	1	5.78	No Licua

Nota01: Según el estudio de peligro sísmico se consideró para  $a_{max}/g = 0.244$

Nota02: Factor de seguridad  $>1.25$  para que no ocurra licuación según la E050 para estructuras tipo A

Según los cálculos realizados se pudo analizar que hay estratos que tienen potencial de licuación para el ensayo DDH01 de 2.75m a 8.75m, para el ensayo DDH02 de 2.75m a 8.75m y en el ensayo DDH03, de 5.25m a 14.0m

Con ello ahora se analizará que probabilidad y que efectos traerían consigo la ocurrencia de este efecto según Iwazaki y Torimatsu ,1982 de igual manera analizando los cálculos obtenidos en función a los ensayos de perforación considerando un factor de seguridad de 1.25 según lo descrito en la norma E.050 y limitando el parámetro de F(Z) a ello.

Los cálculos y resumen de la probabilidad de licuación para las perforaciones DDH-01, DDH-02, DDH-03 serán expuestos en las Tablas N°45, N°46, N°47 “Resultados de probabilidad de licuación”

Tabla N° 45

Resultados de probabilidad de licuación para DDH-01.

Profundidad (m)	CRR M=7.5	CSR	Espesor (m)	F(Z)	W(Z)	F(Z)W(Z)	Prob de licuación %
2.75	0.140	0.153	2.75	0.33	8.63	2.87	12.86
4.75	0.148	0.193	2.00	0.48	7.63	3.68	
6.75	0.148	0.216	2.00	0.57	6.63	3.75	
8.75	0.184	0.231	2.00	0.46	5.63	2.56	
10.75	0.384	0.242	2.00	0	4.63	0.00	
12.75	0.347	0.249	2.00	0	3.63	0.00	
14.75	0.384	0.255	2.00	0	2.63	0.00	
16.75	0.384	0.260	2.00	0	1.63	0.00	

Nota01: Metodología de Iwazaki y Torimatsu (1982) para suelos sin mejoramiento

Tabla N° 46

Resultados de probabilidad de licuación para DDH-02

Profundidad (m)	CRR M=7.5	CSR	Espesor (m)	F(Z)	W(Z)	F(Z)W(Z)	Prob de licuación %
2.75	0.098	0.153	2.75	0.61	8.63	5.23	16.95
4.75	0.111	0.193	2.00	0.67	7.63	5.13	
6.75	0.111	0.216	2.00	0.74	6.63	4.87	
8.75	0.219	0.231	2.00	0.30	5.63	1.71	
10.75	0.555	0.242	2.00	0	4.63	0.00	
12.75	0.316	0.249	2.00	0	3.63	0.00	
14.75	0.384	0.255	2.00	0	2.63	0.00	
16.75	0.384	0.260	2.00	0	1.63	0.00	
18.75	1.750	0.264	2.00	0	0.63	0.00	
20.75	1.750	0.267	2.00	0	0.00	0.00	

Nota01: Metodología de Iwazaki y Torimatsu (1982) para suelos sin mejoramiento

Tabla N° 47

Resultados de probabilidad de licuación para DDH-03.

Profundidad (m)	CRR M=7.5	CSR	Espesor (m)	F(Z)	W(Z)	F(Z)W(Z)	Prob de licuación %
2.25	0.1837	0.137	2.25	0.00	8.88	0.00	9.85
5.25	0.1112	0.200	3.00	0.69	7.38	5.11	
8.25	0.1739	0.228	3.00	0.49	5.88	2.86	
11.00	0.2330	0.243	2.75	0.29	4.50	1.30	
14.00	0.2681	0.253	3.00	0.19	3.00	0.57	
15.00	0.3836	0.256	1.00	0	2.50	0.00	
16.75	0.3836	0.260	1.75	0	1.63	0.00	
19.25	1.7496	0.265	2.50	0	0.38	0.00	

Nota01: Metodología de Iwazaki y Torimatsu (1982) para suelos sin mejoramiento

Según las tablas N°45, N°46 y N°47 para los ensayos DDH01, DDH02 y DDH03 se obtiene para una probabilidad de 12.86% ,16.95% y 9.85% y según la tabla propuesta por Iwazaki y Torimatsu ,1982 se obtiene efectos probablemente efectos severos o efectos severos. Según se indica en la norma suelos y cimentaciones E.050 ,2018, en su artículo 38,6 de cimentaciones en áreas de suelos licuables, al tener una probabilidad de licuación mayor a 10% se debe realizar procedimientos constructivos para mejorar las condiciones del suelo y así lograr una probabilidad mejor al 10%.

#### 5.4 Evaluación de asentamientos sin mejoramiento

Para el cálculo de asentamientos sin mejoramiento aplicando la sobrecarga de servicio se usaron valores recomendados o elaborados por otros investigadores debido a que no se cuenta con datos de laboratorio de consolidación según la tabla N° 11 “Propiedades físicas y mecánicas de suelo arcilloso (CL)”

Tabla N° 48

Cálculo de asentamiento sin mejoramiento

Descripción	Símbolo	Unidades	Valor
Espesor	Huz	m	8.50
Índice de expansión	Cr	kn/m <sup>2</sup>	0.02
Índice de Compresión	Cc	kn/m <sup>2</sup>	0.17
Índice de vacíos	e0		0.57
Descripción	Símbolo	Unidades	Valor
Carga de consolidación	Pc	kn/m <sup>2</sup>	215.8
Sobrecarga	P	kn/m <sup>2</sup>	196
Esfuerzo efectivo a 8.5m	P <sub>0</sub>	kn/m <sup>2</sup>	230.6
Asentamiento	Suz	m	0.27
	Suz	pulgadas	10.6

Nota 01: Elaboración propia

Los datos descritos para el cálculo de asentamientos fueron usados por Poves J. (2017) sacados del laboratorio de consolidación para un tipo de suelo CL.

#### 5.5 Evaluación de mejoramiento de suelos

Una vez evaluado los mejoramientos de suelo para poder mitigar la licuación se propondrá dos soluciones una de columnas de agregado y otra de modulo controlado describiendo parámetros de partidas para su análisis según la Tabla N°49” Resistencia y geometría de Columna de Agregado y Columna de Módulo Controlado”.

Tabla N° 49

Resistencia y geometría de Columna de Agregado y Columna de Módulo Controlado.

Tipos de columna	Capacidad admisible (Kips)		Longitudes típicas (Pies)		Diámetros típicos de la columna (Pulgadas)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Columnas de agregado	25	150	10	30	24	48
Columnas de Módulo Controlado	50	150	20	90	12	24

Nota: Tomado de la tabla 6-1: Possible Column Types"Ground Modification Methods Volumen II"

Siguiendo la metodología propuesta de evaluación de proyectos sugerida por la FHWA (2017) en su manual de métodos de modificación de suelos, se evaluó los alcances del proyecto y sus requerimientos y se resumió en la Tabla N°50.

Tabla N° 50

Secuencia para evaluar proyectos de mejoramientos de suelos

Paso	Descripción
1	El terreno presenta licuación de suelo y la estructura requiere soportar cargas considerables
2	Según el tipo de estructura tipo A según la norma E.030, esta puede fallar por deformaciones excesivas
3	Se presenta un área libre, en el cual se podría desarrollar cualquier tecnología
4	el subsuelo presenta un tipo de suelo limo arcilloso y con presencia de nivel freático
5	Se podría plantear drenes verticales, Columnas de Grava, compactación dinámica, Inclusión Rígida o pilotes
6	Se debe considerar las restricciones del proyecto como el tiempo de entrega y tiempo de servicio del proyecto
7	Los riesgos del proyecto sería la restricción del asentamiento y la licuación
8	Como diseño preliminar se puede considerar un espaciamiento de 1.5 a 2.5m
9	se podría plantear una solución alternativa como desvío, reubicación o cimentación profunda
10	Se considerará la maquinaria necesaria, materiales a usar, y los límites de servicio del proyecto

- 11 Según los factores obtenidos se tiene la Columna de Grava como mejor alternativa
- 12 Se analizará las Columnas de Grava y Inclusión Rígida, como propuestas enfocados como una investigación

Nota: Tomado de la tabla 1-7: Ground Modification Technology Selection Steps "Ground Modification Methods Volumen I", adecuado a nuestro proyecto

Así de la misma manera siguiendo la metodología propuesta de evaluación de proyectos sugerida la FHWA (2017) en su manual de métodos de modificación de suelos se realizó una matriz según la viabilidad de las posibles soluciones y se resumió en la Tabla N°51

Tabla N° 51

Evaluación de alternativas de mejoramiento de suelos

Aspectos a considerar	Factor de influencia	Columna de Grava		Columna de Módulo Controlado		Drenes Verticales		Compactación dinámica		Pilotes	
		R	P	R	P	R	P	R	P	R	P
Velocidad de construcción	4	3	12	3	12	3	12	4	16	1	4
Minimizar las alteraciones de la construcción	2	2	4	2	4	3	6	1	2	1	2
Tiempo de servicio de la obra construida	3	3	9	2	6	1	3	1	3	4	12
Costo de construcción	4	2	8	2	8	3	12	4	16	1	4
Constructibilidad	2	3	6	3	6	4	8	4	8	2	4
Aspecto ambiental	3	3	9	1	3	4	12	2	6	1	3
Grado de establecimiento	3	3	9	2	6	2	6	2	6	3	9
Familiaridad con la geotecnología	2	4	8	1	2	3	6	3	6	3	6
Procedimiento de diseño	4	3	12	1	4	2	8	2	8	3	12
Contratación	4	3	12	2	8	2	8	2	8	4	16
Coste del ciclo de vida	4	2	8	3	12	4	16	4	16	1	4
Restricción: temporada de construcción	2	3	6	3	6	2	4	2	4	2	4
Riesgo: retraso debido al tiempo de asentamiento	4	3	12	4	16	1	4	3	12	3	12
Riesgo: garantía de calidad	2	4	8	3	6	3	6	2	4	4	8
Total		123		99		111		115		100	

Nota: Matriz de selección tomado de la FHWA (2017), adecuado para nuestro proyecto, Elaboración propia. R=Ratio , P=Parcial



Además, para la elaboración de la Tabla N°51 “Evaluación de alternativas de mejoramiento de suelos.” Se tomó las siguientes consideraciones:

- Factores de peso de 1-4, que tan adecuado es la tecnología siendo 1 la menos adecuada y 4 la mejor. Factores de influencia de 1-4, siendo 4 el aspecto más influyente.
- Se consideró lo más influyente el aspecto la velocidad de la construcción, costo de construcción, riesgo por retraso debido al tiempo de asentamiento y el procedimiento de diseño debido a que se trata de un proyecto público.
- Se consideró influyente dando un peso de 3 al tiempo de servicio de la obra construida debido a lo solicitado del proyecto, el aspecto ambiental debido a las normativas exigidas, el grado de establecimiento.
- Se consideró poco influyente dando un peso de 2, las alteraciones durante la construcción al tratarse de una construcción nueva, la constructibilidad dado a que por lo general los contratistas seleccionados tienen su método de construcción y experiencia, la familiaridad con la geotecnología, la restricción por temporada de construcción y la garantía de calidad.
- Finalmente se puede decir preliminarmente que las Columnas de Grava sería la mejor solución debido a que se obtuvo un Factor de 123 según la Tabla N°51 “Evaluación de alternativas de mejoramiento de suelos”.

Aunque la Columnas de Módulo Controlado obtuvo un factor de 99, se analizará debido a similitud con las Columnas de Grava en cuanto a la densificación de suelo lo cual será analizado en el capítulo 5.7 evaluación de mejoramiento con Columnas de Módulo Controlado.

## 5.6 Evaluación de mejoramiento con Columnas de Agregado

Según las recomendaciones de la FHWA (2017), en su manual de métodos de modificación de suelos podemos evaluar el diseño de Columnas de Grava para un diámetro de 24 pulgadas, pero para fines prácticos y revisando los cálculos preliminarmente tomaremos un radio de  $a= 0.30m$ .

Para el desarrollo del cálculo para el mejoramiento con columnas de agregado se debe tener en cuenta que el objetivo principal de aplicar esta solución es la de mitigar la licuación, para eso se evaluó la metodología de 3 autores:

Baez, J. (1995), la metodología de Rayamajhi, D. (2014) y Green, R. et al (2008)

Para la metodología de Baez, J (1995) primero se debe calcular el número de ciclos requeridos para que inicie la licuación (Nl) y el número de ciclos equivalente (Neq). Los valores a usar se resumen en la Tabla N°52

Tabla N° 52

Cálculo de número de ciclos para que inicie licuación

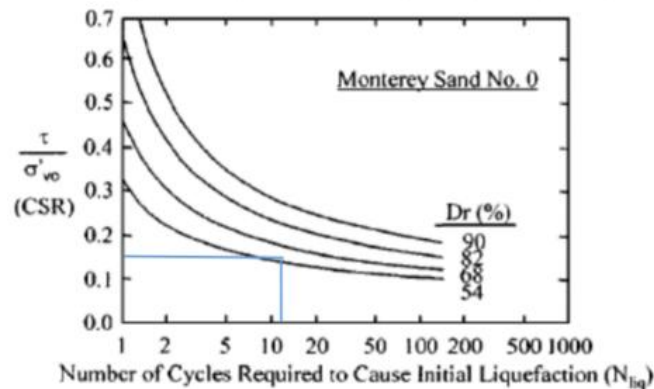
	CSR	Dr	Nliq
DDH-01	0.153	60	
DDH-02	0.153	60	12
DDH-03	0.137	60	

Nota: Dato de la densidad relativa estimado para un suelo relativamente compacto

Otro método para conocer el número de ciclos requeridos para que inicie la licuación, es estimando una densidad relativa y relacionándolo con el esfuerzo cíclico actante (CSR) y entrando al ábaco propuesto por Alba J. (1975) mostrado en la Figura N°47 “Numero de ciclos para que inicia la licuación según Alba et al 1975”.

Figura N° 47

Numero de ciclos para que inicia la licuación según Alba et al 1975



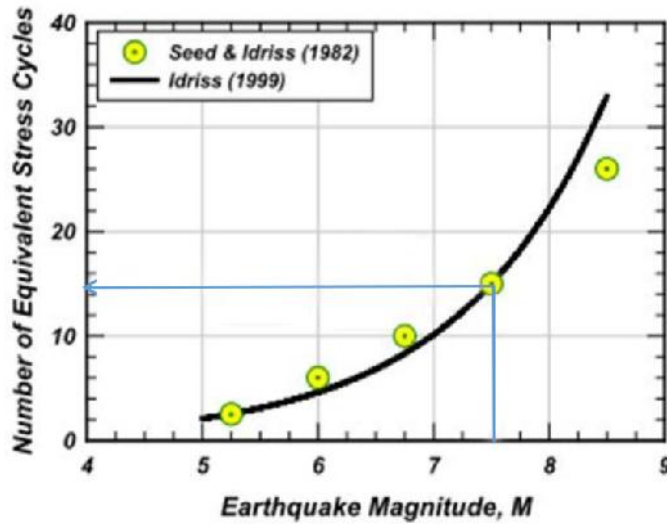
Nota01: Número de ciclos necesario para que se inicie la licuación (Nl) según Alba et al. (1975)

Para el cálculo de Neq se obtienen tres propuestas de Seed, H. y Idris, I. (1982), Selcuk y Kayabali,(2015) y Castiglia y Magistris(2018) mostrados en la Figura N°48 “Cálculo de numero equivalentes según Seed & Idris”, la Tabla 53” Número de ciclos

equivalente y tiempos de duración significativa para  $M=7.5$  y la expresión logarítmica de Castiglia y Magistris (2018)

Figura N° 48

Cálculo de numero equivalentes según Seed,H & Idris,I (1982)



Nota: Curva de estimación del número de ciclos equivalentes  $N_{eq}$  (Fuente: Seed y Idriss, 1982 y Idriss, 1999)

En la Figura N° 48 “Cálculo de numero equivalentes según Seed, H & Idris, I” para una magnitud de sismo  $M = 7.5$ , se obtiene un  $N_{eq} = 15$

Tabla N° 53

Número de ciclos equivalente y tiempos de duración significativa para  $M=7.5$

Magnitud de sismo $M_s$	$N_{eq}$	$t_d$
7.5	20	40

Nota: Número de ciclos equivalente y tiempos de duración del sismo ( $t_d$ ) en segundos (Fuente: Selcuk y Kayabali, 2015)

En la Tabla N°53 “Número de ciclos equivalente y tiempos de duración significativa para  $M=7.5$ ” Para una cierta magnitud de sismo y basado en la tabla de Selcuk y kayabali, 2015 se puede obtener el número equivalente ( $N_{eq}$ ) y tiempo de duración ( $t_d$ ).

Y según Castiglia y Magistris (2018) con su expresión logarítmica se puede obtener un  $N_{eq}$  de 23.9.

$$\ln(N_e) = 0.2792 + 0.9396 \ln(7.5) + 0.2713 \ln(40)$$

Con ello se puede obtener un resumen de datos de Neq calculados y escoger el caso más desfavorable:

Tabla N° 54

Resumen y relación Neq/Nl

	Neq
Idris (1999)	15
Selcuk y Kayabali (2015)	20
Castigia y Magistris (2018)	23.9
	Nl
Alba et al (1975)	12
	Neq/Nl
	2.0

Nota : Resumen de resultados ,elaboración propia

Nota2: Número de ciclos equivalentes (Neq ) y numero de ciclos necesarios para que inicie la licuación (Nl)

En la Tabla N°54 “Resumen y relación Neq/Nl” se usará el Neq mayor con la finalidad de obtener la proporción Neq/Nl mayor dado a que esta relación es inversamente proporcional con el espaciamiento a obtener. (a mayor relación Neq/Nl, menor espaciamiento por ende un diseño más conservador)

Esta expresión de Neq/Nl con parámetros de suelos y datos ya obtenidos se calculará en valor de Tad resumidos en la tabla N° 55.

Tabla N° 55

Datos y cálculo de Tad

Descripción	Símbolo	Unidades	Valor
Permeabilidad horizontal	k	(m/s)	3.00E-05
Coefficiente de compresibilidad	mvs	k/pa	1.00E-04
Densidad del agua	yw	N/m3	9.81
Duración del sismo	td	s	40

Razón de sobrepresión  
intersticial excesiva

$r_g$

0.6

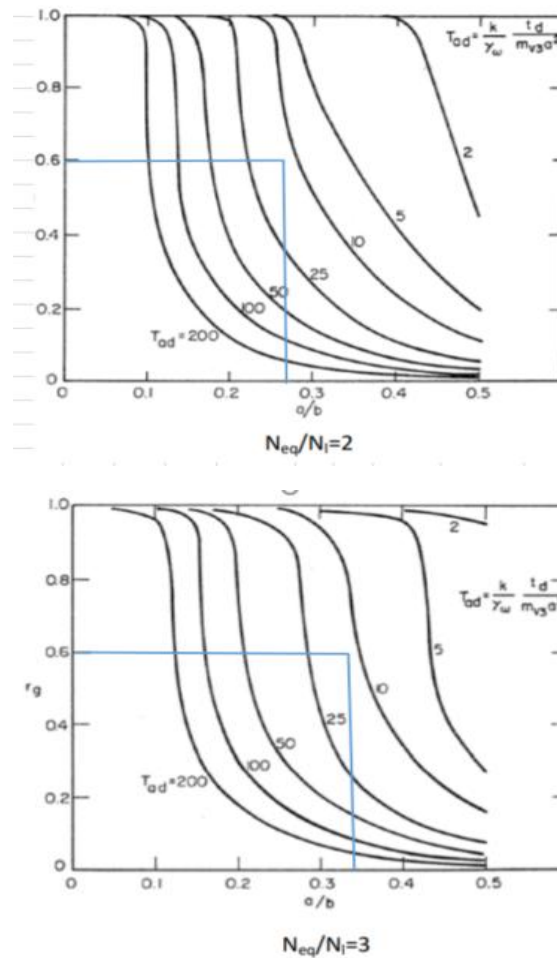
$T_{ad} =$

13.59

Nota: Elaboración propia

Figura N° 49

Cálculo de relación a/b según Seed, H y Booker, J (1977)



Nota: Calculo relación de  $N_{eq}/N_l$  y  $r_g$

Con las siguientes figura N°49 “Cálculo de relación a/b según Seed, H y Booker, J. (1977)” tomando un  $R_g = 0.6$ , se puede obtener una relación de a/b de 0.27, y de 0.34 si usamos el caso más desfavorable podríamos elegir una relación de  $N_{eq}/N_l$  de 0.4 entonces se obtendría un espaciamiento de 1.5m calculados en la Tabla N° 56.

Tabla N° 56

Distribución geométrica de Columnas de Grava.

Descripción		Valor	Und
Con ello se tiene una relación	a/b	0.4	m
Radio	a	0.3	m
Separación parcial	b	0.75	m
Separación de eje a eje		1.5	m
Relación	as	0.580	

Nota01: as considerando una distribución al 3 bolillo

También serán necesario plasmas datos y estimaciones de cálculo de módulos elásticos y obtener una relación de modulo transversales como se muestra en la Tabla N° 57.

Tabla N° 57

Cálculo de razón de módulos transversales.

Descripción			Und
Módulo de Columna de Grava			
	Ec	60	Mpa
	V	0.33	
	Gc	22.56	Mpa
Módulo de suelo máximo			
	p	1667	N/m3
	g	9.81	m/s <sup>2</sup>
Densidad másica	pt	169.93	Ns <sup>2</sup> /m4
Velocidad de onda secundario	vs	297.44	m/s
	Gsmax	15.03	Mpa
Módulo de suelo	Gs	4.51	Mpa
	Em	12.00	Mpa
Razón de módulos	RG=Gc/Gs	5.00	

Ahora con los datos hallados de Razón de módulos y la relación As se puede hallar el factor de Kg que reduce el esfuerzo cíclico actuante CSR. Según Baez, J. (1995) y el factor de Kg que propone se obtiene un CSR' reducido o con mejoramiento, y se pasa a evaluar el factor de seguridad analizando los ensayos de perforación y las correcciones respectivas ya obtenidas. Los cálculos según la metodología de Baez

serán calculados para las perforaciones DDH-01, DDH-02 y DDH-03 y resumidos en las Tablas N° 58, N° 59, N° 60 “Mejoramiento con columna de Grava para DDH-01 según Baez, J (1995)”.

Tabla N° 58

Mejoramiento con columna de Grava para DDH-01 según Baez

Profundidad	CSR	as	Kg	CSR	CRR	MSF	K	K <sub>a</sub>	FS
(m)	Sin tratamiento			Con tratamiento	M=7.5				
2.75	0.153	0.58	0.301	0.05	0.140	1	1.10	1	3.4
4.75	0.193	0.58	0.301	0.06	0.148	1	1.07	1	2.7
6.75	0.216	0.58	0.301	0.07	0.148	1	1.04	1	2.4
8.75	0.231	0.58	0.301	0.07	0.184	1	1.03	1	2.7
10.75	0.242	0.58	0.301	0.07	0.384	1	1.01	1	1.6
12.75	0.249	0.58	0.301	0.08	0.347	1	0.99	1	1.4
14.75	0.255	0.58	0.301	0.08	0.384	1	0.96	1	1.4
16.75	0.260	0.58	0.301	0.08	0.384	1	0.94	1	1.4

Nota: Metodología de Baez, J. (1995) aplicado hasta 8.75m

Tabla N° 59

Mejoramiento con columna de Grava para DDH-02 según Baez

Profundidad	CSR	as	Kg	CSR	CRR	MSF	K	K <sub>a</sub>	FS
(m)	Sin tratamiento			Con tratamiento	M=7.5				
2.75	0.153	0.58	0.301	0.05	0.098	1	1.08	1	2.3
4.75	0.193	0.58	0.301	0.06	0.111	1	1.06	1	2.0
6.75	0.216	0.58	0.301	0.07	0.111	1	1.04	1	1.8
8.75	0.231	0.58	0.301	0.07	0.219	1	1.03	1	3.2
10.75	0.242	0.58	0.301	0.07	0.555	1	1.01	1	2.3
12.75	0.249	0.58	0.301	0.08	0.316	1	0.99	1	1.2
14.75	0.255	0.58	0.301	0.08	0.384	1	0.96	1	1.4
16.75	0.260	0.58	0.301	0.08	0.384	1	0.94	1	1.4

18.75	0.264	0.58	0.301	0.08	1.750	1	0.88	1	5.8
20.75	0.267	0.58	0.301	0.08	1.750	1	0.85	1	5.6

Nota: Metodología de Baez, J. (1995) aplicado hasta 8.75m

Tabla N° 60

Mejoramiento con Columna de Grava para DDH-03 según Baez

Profundidad (m)	CSR Sin tratamiento	as	Kg	CSR Con tratamiento	CRR M=7.5	MSF	K	K <sub>a</sub>	FS
2.25	0.137	0.58	0.301	0.04	0.184	1	1.10	1	4.9
5.25	0.200	0.58	0.301	0.06	0.111	1	1.05	1	1.9
8.25	0.228	0.58	0.301	0.07	0.174	1	1.03	1	2.6
11	0.243	0.58	0.301	0.07	0.233	1	1.01	1	1.0
14	0.253	0.58	0.301	0.08	0.268	1	0.98	1	1.0
15	0.256	0.58	0.301	0.08	0.384	1	0.96	1	1.4
16.75	0.260	0.58	0.301	0.08	0.384	1	0.94	1	1.4
19.25	0.265	0.58	0.301	0.08	1.750	1	0.87	1	5.8

Nota: Metodología de Baez, J. (1995) aplicado hasta 8.75m

Así teniendo los casos más desfavorables en cuanto los factores de seguridad según Baez, J (1995) resumidos en la Tabla N°61.

Tabla N° 61

Factor de seguridad mínimo con Columna de Grava según Baez, J. (1995)

	FL	CSR	as	Kg	CSR	CRR	MSF	K	K <sub>a</sub>	FS
	Sin tratamiento				Mejorado				Mejorado	
DDH01	0.71	0.216	0.58	0.30	0.065	0.148	1	1.044	1.0	2.37
DDH02	0.53	0.216	0.58	0.30	0.065	0.111	1	1.037	1.0	1.77
DDH03	0.59	0.200	0.58	0.30	0.060	0.111	1	1.052	1.0	1.95

Nota: Resumen de factores de seguridad críticos según las tablas N°58, N°59 y N°60 "Mejoramiento con Columna de Grava según Baez, J (1995)"

Con ello se puede obtener un factor de seguridad mayor a 1.25 para los estratos intervenidos hasta 8.25m, siendo viablemente aplicable, posteriormente Rayamajhi, D. (2014) propone un factor de corrección Ry aplicado al método de Baez, J (1995) lo cual considerando el efecto de interacción de columna y terreno. Los cálculos según la metodología de Rayamajhi serán calculados para las perforaciones DDH-01, DDH-



02 y DDH-03 y resumidos en las Tablas N° 62, N° 63, N° 64 “Factor de seguridad con Columna de Grava según Rayamajhi”.

Tabla N° 62

Factor de seguridad con Columna de Grava según Rayamajhi

Profundidad (m)	Sin tratamiento					Mejorado					FS
	FL	CSR	as	Ry	KGr	CSR	CRR	MSF	K	K <sub>a</sub>	
2.75	1.01	0.153	0.58	0.33	0.73	0.112	0.140	1	1.10	1.0	1.38
4.75	0.82	0.193	0.58	0.33	0.73	0.141	0.148	1	1.07	1.0	1.12
6.75	0.71	0.216	0.58	0.33	0.73	0.158	0.148	1	1.04	1.0	0.97
8.75	0.82	0.231	0.58	0.33	0.73	0.169	0.184	1	1.03	1.0	1.11
10.75	1.61	0.242	0.58	0.33	0.73	0.177	0.384	1	1.01	1.0	1.61
12.75	1.37	0.249	0.58	0.33	0.73	0.183	0.347	1	0.99	1.0	1.37
14.75	1.45	0.255	0.58	0.33	0.73	0.187	0.384	1	0.96	1.0	1.45
16.75	1.39	0.260	0.58	0.33	0.73	0.191	0.384	1	0.94	1.0	1.39

Nota01: Según los datos de DDH01 aplicado hasta 8.75m

Tabla N° 63

Factor de seguridad con Columna de Grava según Rayamajhi

Profundidad (m)	Sin tratamiento					Mejorado					FS
	FL	CSR	as	Ry	KGr	CSR	CRR	MSF	K	K <sub>a</sub>	
2.75	0.69	0.153	0.58	0.33	0.73	0.112	0.098	1	1.08	1.0	0.95
4.75	0.61	0.193	0.58	0.33	0.73	0.141	0.111	1	1.06	1.0	0.83
6.75	0.53	0.216	0.58	0.33	0.73	0.158	0.111	1	1.04	1.0	0.73
8.75	0.98	0.231	0.58	0.33	0.73	0.169	0.219	1	1.03	1.0	1.33
10.75	2.33	0.242	0.58	0.33	0.73	0.177	0.555	1	1.01	1.0	2.33
12.75	1.25	0.249	0.58	0.33	0.73	0.183	0.316	1	0.99	1.0	1.25
14.75	1.45	0.255	0.58	0.33	0.73	0.187	0.384	1	0.96	1.0	1.45
16.75	1.39	0.260	0.58	0.33	0.73	0.191	0.384	1	0.94	1.0	1.39
18.75	5.84	0.264	0.58	0.33	0.73	0.193	1.750	1	0.88	1.0	5.84
20.75	5.60	0.267	0.58	0.33	0.73	0.196	1.750	1	0.85	1.0	5.60

Nota01: Según los datos de DDH02 aplicado hasta 8.75m

Tabla N° 64

Factor de seguridad con Columna de Grava según Rayamajhi

Profundidad	FL	CSR	as	Ry	KGr	CSR	CRR	MSF	K	K <sub>a</sub>	FS
(m)	Sin tratamiento			Mejorado				Mejorado			
2.25	1.47	0.137	0.58	0.33	0.73	0.101	0.184	1	1.10	1.0	2.00
5.25	0.59	0.200	0.58	0.33	0.73	0.146	0.111	1	1.05	1.0	0.80
8.25	0.79	0.228	0.58	0.33	0.73	0.167	0.174	1	1.03	1.0	1.07
11	0.97	0.243	0.58	0.33	0.73	0.178	0.233	1	1.01	1.0	1.32
14	1.03	0.253	0.58	0.33	0.73	0.186	0.268	1	0.98	1.0	1.41
15	1.44	0.256	0.58	0.33	0.73	0.188	0.384	1	0.96	1.0	1.96
16.75	1.39	0.260	0.58	0.33	0.73	0.191	0.384	1	0.94	1.0	1.90
19.25	5.78	0.265	0.58	0.33	0.73	0.194	1.750	1	0.87	1.0	7.88

Nota01: Según los datos de DDH03 aplicado hasta 8.25m

Si bien se obtuvieron datos de factor de seguridad menores a 1.25, se analizará de igual manera la probabilidad de licuación según Iwazaki y Tokimatsu (1982) aplicado a la metodología de Rayamajhi, D. (2014) Así analizaremos la probabilidad de licuación propuesta por Iwazaki y Tokimatsu (1982) obtuvimos una probabilidad menor al 10% lo cual indica que no habría efectos de licuación, a su vez obtener una probabilidad del 0% sería económicamente inviable. Los cálculos según la metodología de Rayamajhi serán calculados para las perforaciones DDH-01, DDH-02 y DDH-03 y resumidos en las Tablas N° 65, N° 66, N° 67 “Resultados De Probabilidad De Licuación según Rayamajhi”

Tabla N° 65

Resultados de Probabilidad de Licuación para DDH-01 según Rayamajhi (2014)

Profundidad	CRR	CSR	Espesor	F(Z)	W(Z)	F(Z)W(Z)	Potencial de licuación PL
(m)	M=7.5	Mejorado	(m)				
2.75	0.140	0.112	2.75	0.00	8.63	0.00	
4.75	0.148	0.141	2.00	0.20	7.63	1.56	4.6
6.75	0.148	0.158	2.00	0.32	6.63	2.10	

8.75	0.184	0.169	2.00	0.17	5.63	0.93
10.75	0.384	0.242	2.00	0	4.63	0.00
12.75	0.347	0.249	2.00	0	3.63	0.00
14.75	0.384	0.255	2.00	0	2.63	0.00
16.75	0.384	0.260	2.00	0	1.63	0.00

Nota: Metodología de Iwazaki y Torimatsu (1982) aplicado a la metodología de Rayamajhi

Tabla N° 66

Resultados de Probabilidad de Licuación para DDH-02 según Rayamajhi (2014)

Profundidad	CRR	CSR	Espesor	F(Z)	W(Z)	F(Z)W(Z)	Potencial de licuación PL
(m)	M=7.5	Mejorado	(m)				
2.75	0.098	0.112	2.75	0.35	8.62	3.02	
4.75	0.111	0.141	2.00	0.44	7.62	3.35	
6.75	0.111	0.158	2.00	0.54	6.62	3.57	
8.75	0.219	0.169	2.00	0.00	5.63	0.00	
10.75	0.555	0.242	2.00	0	4.63	0.00	9.94
12.75	0.316	0.249	2.00	0	3.63	0.00	
14.75	0.384	0.255	2.00	0	2.63	0.00	
16.75	0.384	0.260	2.00	0	1.63	0.00	
18.75	1.750	0.264	2.00	0	0.63	0.00	
20.75	1.750	0.267	2.00	0	0.00	0.00	

Nota: Metodología de Iwazaki y Torimatsu (1982) aplicado a la metodología de Rayamajhi

Tabla N° 67

Resultados De Probabilidad De Licuación Para DDH-03 según Rayamajhi (2014)

Profundidad	CRR	CSR	Espesor	F(Z)	W(Z)	F(Z)W(Z)	Potencial de licuación PL
(m)	M=7.5	Mejorado	(m)				
2.25	0.184	0.101	2.25	0.00	8.88	0.00	
5.25	0.111	0.146	3.00	0.49	7.38	3.62	
8.25	0.174	0.167	3.00	0.21	5.88	1.23	5.4
11	0.233	0.178	2.75	0.00	4.50	0.00	
14	0.268	0.253	3.00	0.19	3.00	0.57	

15	0.384	0.188	1.00	0	2.50	0.00
16.75	0.384	0.191	1.75	0	1.63	0.00
19.25	1.750	0.194	2.50	0	0.38	0.00

Nota: Metodología de Iwazaki y Torimatsu(1982) aplicado a la metodología de Rayamajhi

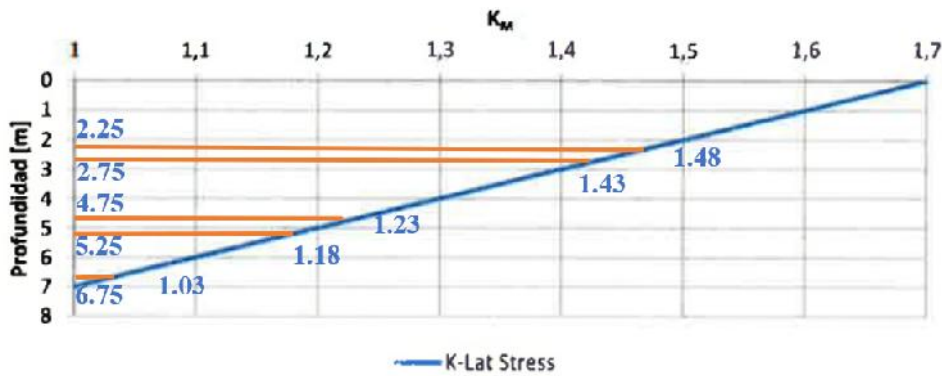
Según el método de Green et al (2008) y Salgado et al (2007) recomienda analizar las columnas de agregado, mediante la interacción del módulo de corte y la rigidez que esta proporciona. Para el diseño de este método se consideró:

- Diámetro de Pila (60cm)
- Espaciamiento (150cm)
- Una relación de áreas (Ra) de 12.56%

Como parte de la metodología de Green, R. et al (2008) y Salgado, J. et al (2007) se calcularon los factores de  $K_M$  y PC shear % con relación a la profundidad mostrados en la figura N°50 “Cálculo del  $K_M$  según Salgado et al 2007” y la figura N°51 “Cálculo del PCshear según Salgado, J et al 2007”.

Figura N° 50

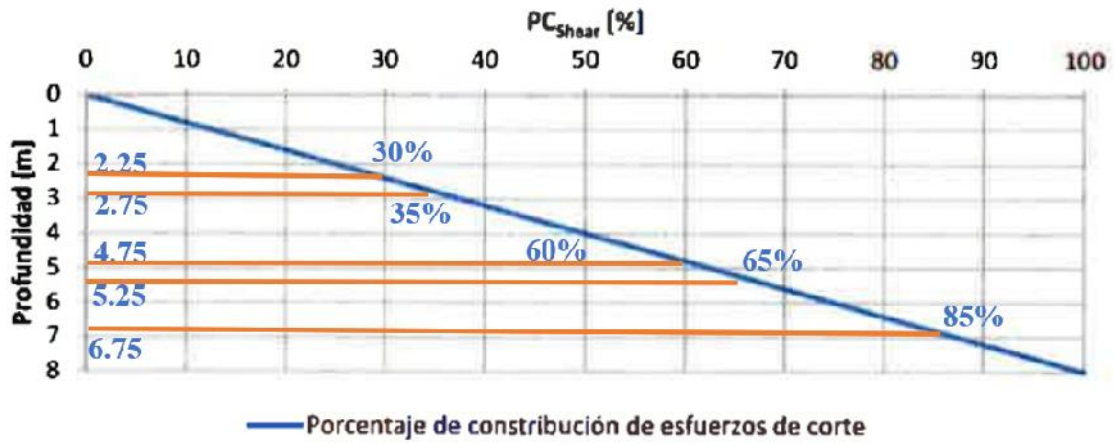
Cálculo del  $K_M$  según Salgado, J. et al 2007



Nota: Calculo del  $K_M$  según la profundidad según el ensayo de perforación DDH-02

Figura N° 51

Cálculo del PCshear según Salgado, J. et al 2007



Nota: Cálculo del Km según la profundidad según el ensayo de perforación DDH-02

Con ello se recalculó la probabilidad de licuación y los factores de seguridad de potencial de licuación para los ensayos de perforación DDH01, DDH02, DDH03 resumidos en las Tablas N°68, N°69, N°70 “Diseño De Pila De Grava - Condición Mejorada Por Corte”

Tabla N° 68

Diseño de Pila de Grava - Condición Mejorada por Corte

Prof. (m)	Relación de rigidez Rs	PC corte %	CSR Sin mejora	CRR 7.5	Fact. Km	Fact. Kg	CSR		FS	Prob. de licuación %
							Sin mejora	Mejorado		
2.75	10	35	0.15	0.14	1.43	0.76	0.12	0.20	1.89	0.00
4.75	10	60	0.19	0.15	1.23	0.61	0.12	0.18	1.64	
6.75	10	85	0.22	0.15	1.03	0.51	0.11	0.15	1.43	
8.75	10	100	0.23	0.18	1.00	0.47	0.11	0.18	1.74	
10.75	1	100	0.24	0.38	1.00	1.00	-	-	1.61	
12.75	1	100	0.25	0.35	1.00	1.00	-	-	1.37	
14.75	1	100	0.26	0.38	1.00	1.00	-	-	1.45	
16.75	1	100	0.26	0.38	1.00	1.00	-	-	1.39	

Nota01: Metodología de Green, R. et al. (2008) y Salgado, J, et al. 2007

Nota02: Para el Factor de seguridad se aplica factores de corrección MS,K y Ka y un Ra de 12.56%

Nota 03: Elaborado según datos de la perforación DDH01

Tabla N° 69

Diseño de Pila de Grava - Condición Mejorada por Corte

Prof.	Relación de rigidez	PC corte	CSR	CRR 7.5	Fact. Km	Fact. Kg	CSR	CRR	FS	Prob. de licuación %
(m)	Rs	%	Sin mejora			Mejorado				
2.75	10	35	0.15	0.10	1.43	0.76	0.12	0.14	1.30	
4.75	10	60	0.19	0.11	1.23	0.61	0.12	0.14	1.22	
6.75	10	85	0.22	0.11	1.03	0.51	0.11	0.11	1.07	
8.75	10	100	0.23	0.22	1.00	0.47	0.11	0.22	2.08	
10.75	1	100	0.24	0.56	1.00	1.00	-	-	2.33	2.54
12.75	1	100	0.25	0.32	1.00	1.00	-	-	1.25	
14.75	1	100	0.26	0.38	1.00	1.00	-	-	1.45	
16.75	1	100	0.26	0.38	1.00	1.00	-	-	1.39	
18.75	1	100	0.26	1.75	1.00	1.00	-	-	5.84	
20.75	1	100	0.27	1.75	1.00	1.00	-	-	5.60	

Nota01: Metodología de Green, R. et al. (2008) y Salgado, J, et al. 2007

Nota02: Para el Factor de seguridad se aplica factores de corrección MS,K y Ka y un Ra de 12.56%

Nota 03: Elaborado según datos de la perforación DDH02

Tabla N° 70

Diseño de Pila de Grava - Condición Mejorada por Corte

Prof.	Relación de rigidez	PC corte	CSR	CRR7.5	Factor Km	Factor Kg	CSR'	CRR'	FS	Prob de licuación %
(m)	Rs	%	Sin mejora			Mejorado				
2.25	10	30%	0.14	0.18	1.48	0.80	0.11	0.27	2.72	
5.25	10	65%	0.20	0.11	1.18	0.59	0.12	0.13	1.17	
8.25	10	100%	0.23	0.17	1.00	0.47	0.11	0.17	1.68	
11	10	100%	0.24	0.23	1.00	0.47	0.11	0.23	2.06	1.03
14	1	100%	0.25	0.27	1.00	1.00	-	-	1.03	
15	1	100%	0.26	0.38	1.00	1.00	-	-	1.44	
16.75	1	100%	0.26	0.38	1.00	1.00	-	-	1.39	
19.25	1	100%	0.26	1.75	1.00	1.00	-	-	5.78	

Nota01: Metodología de Green, R. et al. (2008) y Salgado, J, et al. 2007

Nota02: Para el Factor de seguridad se aplica factores de corrección MS,K y Ka y un Ra de 12.56%

Nota 03: Elaborado según datos de la perforación DDH03

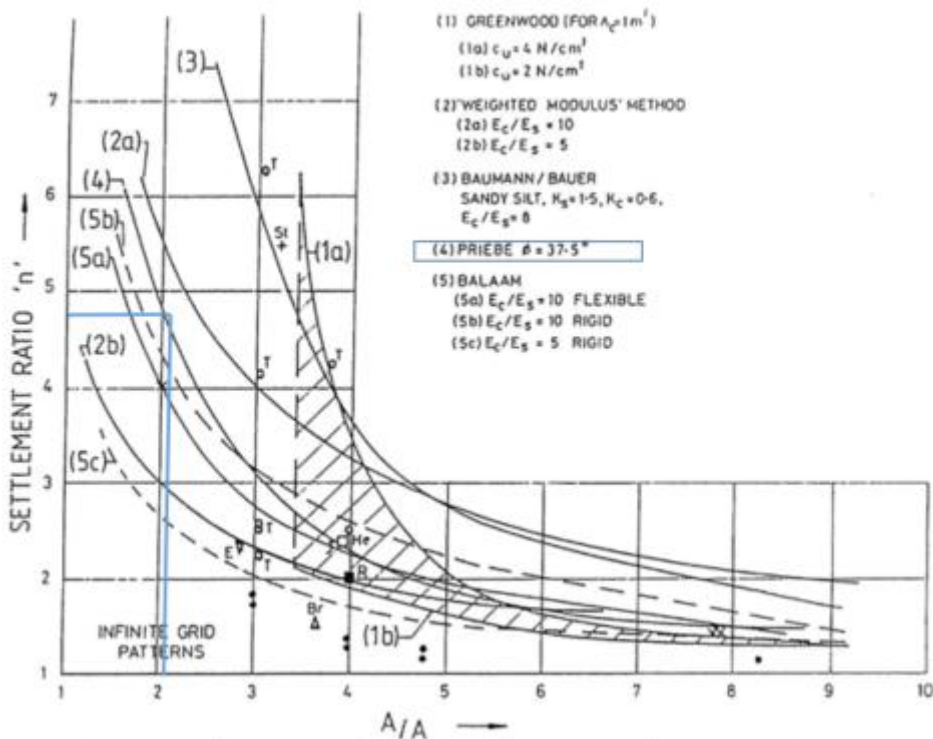
Para el cálculo de asentamientos en condición mejorada a partir de la relación de áreas efectivas se tiene:

$$\frac{(S/2)^2}{(D C_t d g)^2}$$

Para un espaciamiento de 1.5m y un diámetro de Columna de Grava de 0.60 se obtiene una relación de áreas de 2.08

Figura N° 52

Calculando en la tabla de Priebe, J. (1995) el asentamiento del suelo con mejoramiento.



Nota: Aplicación de la metodología de Priebe, J. (1995) según nuestro proyecto

Con la tabla se obtiene una ratio n de 4.8. Para un asentamiento sin mejoramiento de 10.6 pulgadas, se obtendría un asentamiento con mejoramiento de 2.2 pulgadas según la curva planteada por Priebe, H. (1995)

Para el Cálculo de asentamientos con mejoramiento de Columna de Grava se hizo uso de los datos de la Tabla N°71 "Cálculo de Asentamiento en Zona de Mejoramiento con Columnas de Grava" donde se obtuvo un asentamiento con mejoramiento con Columna de Grava de 2 pulgadas.

Tabla N° 71

## Cálculo de Asentamiento en Zona de Mejoramiento con Columnas de Grava

Descripción		Unidades	Valor
Espesor mejorado	Huz	m	8.50
Razón	Ra		12.56%
Modulo del suelo	Em	kn/m2	12000
Módulo de Columnas de Grava	Eg	kn/m2	60000
Modulo Compuesto	Ecomp	kn/m2	70492.9
Sobrecarga		kn/m2	196
Esfuerzo efectivo a 8.5m	P <sub>0</sub>	kn/m2	230
Carga aplicada	q	kn/m2	426
Asentamiento	Suz	m	0.05
	Suz	pulgadas	2.0

Nota 01: Elaboración propia

### 5.7 Evaluación de mejoramiento con Columnas de Módulo Controlado

Con el fin de permitir la construcción de las estructuras de suelo reforzado, se propone mejorar el suelo de cimentación mediante Columnas de Módulo Controlado (CMC). Las CMC tienen un diámetro de 40 cm de diámetro, con una Capa de Repartición de Carga (LTP) de espesor variable (ver Anexo Memoria de cálculo de LTP) atravesando los estratos de baja resistencia para empotrarse en el estrato resistente.

Al principio de la ejecución es necesario realizar unos ensayos de calibración que consiste en realizar unas CMC en la proximidad de las perforaciones ya ejecutadas, con el fin de establecer una correlación entre los parámetros de perforación de las CMC y los resultados de ensayos preliminares (definir un criterio de rechazo).

Las CMC serán realizadas de concreto con una resistencia a la compresión mínima a los 28 días de fck,  $28 = 150 \text{ kg/cm}^2$ .

Para el diseño preliminar de las CMC consiste en determinar el número de elementos bajo la platea de cimentación, comprobando simultáneamente las siguientes condiciones:



- La capacidad portante del suelo mejorado sea mayor a la carga solicitada.
- Los asentamientos sean menores a 2 pulgadas. (50 mm)

Se calculan por iteraciones y en base a las consideraciones del ASIRI. Como parte de este diseño, los cálculos para la cimentación se presentan a continuación:

Tabla N° 72

Cálculo Distribución Geometría de las Columnas de Módulo Controlado

LADO	TRAMO	MALLA AxA(m)		Amo) (m2)
Centro	ESTRUCT. TIPO MARCO	1.5	1.5	2.25

Nota: (1) Am es el área de la malla, 1 CMC cada Am (m2).

Para el cálculo de capacidad del Fuste, según Coyle y Castellano (1981), Para lo obtención de la fuerza resistencia a fricción, o la capacidad de fuste es:

$$Q_f = fLP$$

Clasificando la fricción por el tipo de suelo circundante a la inclusión.

- Para suelos Granulares no cohesivos:

$$f = K \cdot \sigma' \tan \phi$$

$$q = \sigma' N_q$$

- Para suelos cohesivos no friccionantes:

$$f = C$$

$$q = 9c$$

- Para limos cohesivos – friccionantes, la cual es la expresión que usaremos:

$$f = K \cdot \sigma' \tan \phi + C$$

$$q = \sigma' N_q$$

Además, el método recomienda calcular el esfuerzo efectivo máximo a una altura de análisis “z” (centro neutro relativo) la cual corresponde a 15 veces el diámetro. El valor del coeficiente k es  $1 - \sin \phi$ , el valor de p igual a el valor de phi por el diámetro.

Tabla N° 73

Cálculo de resistencia a fricción de fuste o capacidad de fuste.

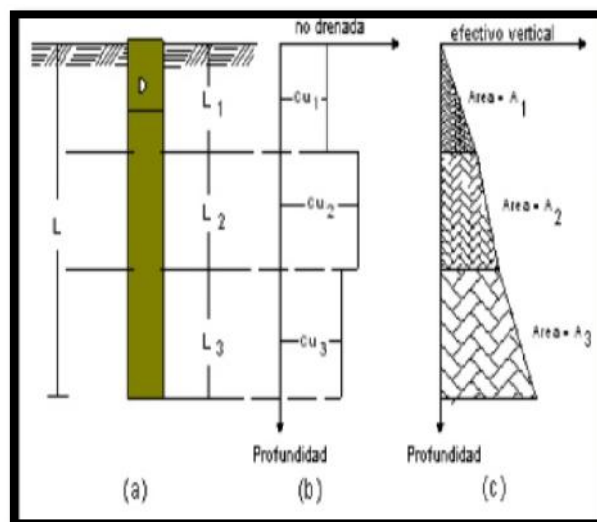
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Datos			
Longitud de la inclusión	L	10	m
	k	0.6	
	d	0.4	
Perímetro del Diámetro	p	1.26	
Cohesión del ensayo de corte directo	Cu=	60.80	kN/m2
Cálculos			
Esfuerzo efectivo	z (15d)	6	m
	$v'$ (15d)	64.75	KN/m2
		12.17	°
	f=	69.18	KN/m2
fuerza resistente a fricción	Qf=	871.69	kn

Nota: Método de Coyle y Castellano (1981)

Método fue propuesto por Vijayverjiya y Focht (1972). Se basa en la hipótesis de que el desplazamiento del suelo causado por el hincado del pilote conduce a una presión lateral pasiva a cualquier profundidad y que la resistencia unitaria superficial promedio es:

Figura N° 53

Aplicación del método en suelo estratificado



Nota: Vijayverjiya y Focht (1972).

Donde  $C_u$  promedio utiliza la siguiente expresión

$$\frac{C_{u1}L_1 + C_{u2}L_2 + \dots}{L}$$

Resolviendo obtenemos un  $C_u$  de 62.4 kn/m<sup>2</sup>

Y considerando los siguientes datos obtenidos de laboratorio:

Tabla N° 74

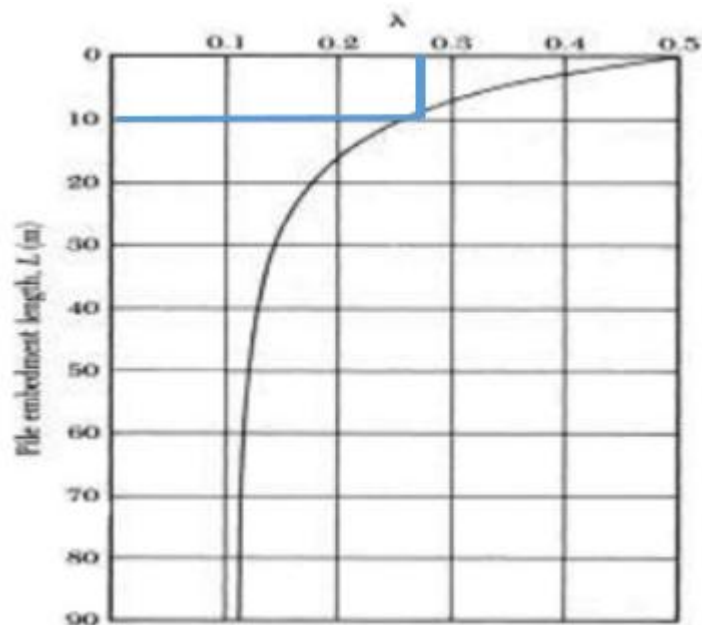
Resumen de ensayos especiales

Profundidad	Ensayo	Fricción	Cohesión
8.00-8.45	Corte directo	23.75°	0.61 kg/cm <sup>2</sup>
10.00-10.45	Corte directo	17.22°	0.62 kg/cm <sup>2</sup>
12.00-12.45	Corte directo	18.78°	0.64 kg/cm <sup>2</sup>
14.00-14.45	Corte directo	18.26°	0.66 kg/cm <sup>2</sup>

Nota: Tomado de las investigaciones realizadas del proyecto laboratorio

Figura N° 54

Cálculo de Método Landa



Nota: Elaboración propia según de método landa (McClelland, 1974)

Se tiene un factor landa de 0.275 para una altura de 10m, ahora de la misma forma se calculará el esfuerzo efectivo.

$$\sigma_v' = \frac{A_1 + A_2 + A_3 \dots}{L}$$

Con lo que se puede obtener los esfuerzos verticales:

Tabla N° 75

Cálculo de esfuerzo verticales

L	Ov	A
4	43.16	86.33
6	64.75	151.07
8	86.33	215.82
10	107.91	280.57

Nota: Método Landa

Teniendo un esfuerzo efectivo promedio para una altura de 10m, se tiene  $\sigma_v' = 73.38 \text{kn/m}^2$ .

Finalmente, con la siguiente expresión obtener:

$$f_a = \lambda(\sigma_v' + 2C_u)$$

$$f_a = 54.50 \text{kn/m}^2$$

Y usando la expresión de capacidad de:

$$Q_f = P \cdot L \cdot f_a$$

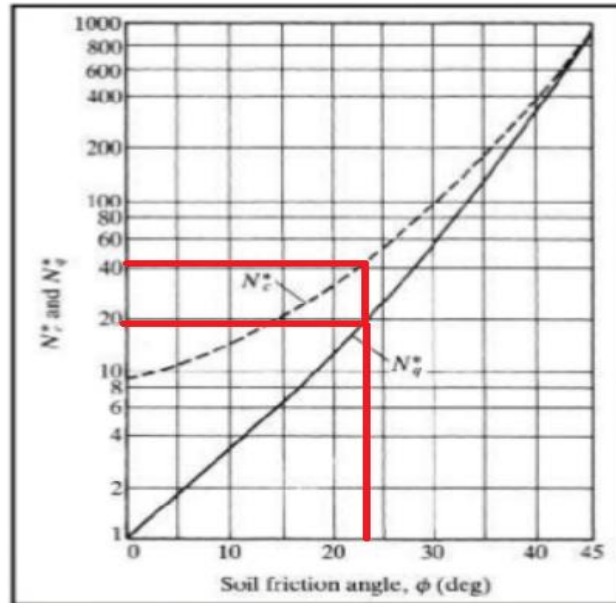
$$Q_f = 686.69 \text{Kn}$$

Para la capacidad de la punta en la inclusión, se usó el método de Meyerhof (1976) según su expresión y usando métodos simplificados para el cálculo de los factores:

$$Q_p = A_p q_p = A_p (cN_c + q'N_q)$$

Figura N° 55

Método de Meyerhof, O. (1976)



Nota: Elaboración propia , según el metodo de Meyerhof, O. (1976)

Tabla N° 76

Cálculo de capacidad de Columna de Módulo Controlado (CMC)

Descripción	Valor	Unidades
$N_q^* =$	19.1	
$N_c^* =$	42	
$q' \text{ CMC} =$	93.2	KN/m <sup>2</sup>
$A_p =$	0.13	m
$Q_p =$	565.3	KN

Nota: Procedimiento de cálculos para capacidad de CMC, elaboración propia

A ello se tiene una restricción para la capacidad de punta:

$$Q_P < A_p q_L$$

Donde:

$$q_L = 0.5 * P_a * N_q * \tan(\phi)$$

$$q_L = Q_p = 53.50 \text{ kn}$$

Tabla N° 77

Datos considerar para el cálculo de capacidad de la inclusión

Suelo en el fuste ML-CL			Suelo en la punta CL		
Descripción	Valor	Unidad	Descripción	Valor	Unidad
	1.95	T/m3		1.95	Kn/m3
sat	2.05	T/m3	sat	2.1	Kn/m3
E	12000	Kn/m2	E	25000	Kn/m2
v	0.33		v	0.4	
c	62.76	Kn/m2	c	64.72	Kn/m2
	23.75			18.26	

Nota: Datos a considerar para el cálculo de capacidad de la inclusión

Tabla N° 78

Datos generales método AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2014)

Descripción	Símbolo	Valor	Unidades	Equivalencias
Angulo de Fricción Interna		23.75	°	
Cohesión	c	62.76	kPa	6.3997 Ton/m <sup>2</sup>
Clasificación	SUCS	ML-CL		
Peso Específico (1)		19.1295	Kn/m <sup>3</sup>	
Peso Específico (2)		20.11	Kn/m <sup>3</sup>	2.0507 Ton/m <sup>3</sup>
Ancho de la Base	B	14.2	m	
Longitud de la Base	L	25	m	
Relación	B/L	0.57	L/B:	1.76
Profundidad de Cimentación	Df	3.5	m	
Factor de Seguridad	FS	3	DF/B:	0.246

Nota: Valores adaptados para el cálculo de capacidad de carga de suelo

Considerando unas sobrecargas de V (Carga vertical) = 20 Ton y H (Carga Horizontal) = 0Ton y tomando la expresión de AASHTO LRFD (2014):

$$q_n = cN_c + 0.5\gamma B N_{\gamma m} N_{w\gamma} + \gamma D_f N_q C_w$$

Y usando los factores según el tipo de suelo:

$$N_c = 18.99$$

$$N_q = 9.36$$

$$N = 9.11$$

$$S_c = 1.28$$

$$S_y = 0.77$$

$$S_q = 1.25$$

Figura N° 56

Obtención de factores de forma según AASHTO LRFD 2014

Factor	Friction Angle	Cohesion Term ( $s_c$ )	Unit Weight Term ( $s_\gamma$ )	Surcharge Term ( $s_q$ )
Shape Factors $s_c, s_\gamma, s_q$	$\phi' = 0$	$1 + \left(\frac{B}{5L}\right)$	1.0	1.0
	$\phi' > 0$	$1 + \left(\frac{B}{L}\right)\left(\frac{N_q}{N_c}\right)$	$1 - 0.4\left(\frac{B}{L}\right)$	$1 + \left(\frac{B}{L}\tan\phi'\right)$

Nota: Fuente AASTHO LRFD (2014)

Figura N° 57

Obtención de los factores de inclinación según AASHTO LRFD 2014

Factor	Friction Angle	Cohesion Term ( $i_c$ )	Unit Weight Term ( $i_\gamma$ )	Surcharge Term ( $i_q$ )
Load Inclination Factors $i_c, i_\gamma, i_q$	$\phi' = 0$	$1 - \frac{n \cdot H}{c \cdot B \cdot L \cdot N_c}$	1.0	1.0
	$\phi' > 0$	$i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1}$	$\left[1 - \frac{H}{V + c \cdot B \cdot L \cdot \cot\phi_f}\right]^{(n+1)}$	$\left[1 - \frac{H}{V + c \cdot B \cdot L \cdot \cot\phi_f}\right]^n$

NOTE:

$$\text{Where } n = \left[\frac{(2+L'/B')}{(1+L'/B')}\right] \cos^2\theta + \left[\frac{(2+B'/L')}{(1+B'/L')}\right] \sin^2\theta$$

Nota: Fuente Aastho LRFD (2014)

Así tenemos un  $n=1.36$  y  $dp=1$

Se considera unos factores de inclinación:

$$i_c = i_q = I = 1$$

$$N_{cm} = N_c \cdot S_c \cdot i_c = 24.31$$

$$N_{ym} = N_y \cdot S_y \cdot i_y = 7.04$$

$$N_{qm} = N_q \cdot S_q \cdot i_q \cdot d_q = 11.70$$

Finalmente se obtiene:

$$q_n = 258.13 \text{ Ton/m}^2$$

$$Q_n = 91636 \text{ Ton}$$

Ahora según las recomendaciones y siguiendo la metodología del LRFD se usará un factor de reducción de resistencia LRDF de 0.45 y así obtener una capacidad última de:

$$q_u = 116.16 \text{ Ton/m}^2 = 11.616 \text{ Kg/cm}^2 = 1139.50 \text{ kN}$$

$$Q_u = 41236 \text{ Ton}$$

Tabla N° 79

Criterios de diseño para Mejoramiento por Columna de Módulo Controlado.

LADO	TRAMO	MALLA A x A (m)		CAPAC. FUSTE (KN)	CAPAC. PUNTA (KN)	CAPAC. TERRENO NATURAL (KN)	CAPAC. TOTAL (KN)	MEJORA ESTÁTICA (KPa)	MEJORA SISMICA (Kpa)
Centro	ESTRUCT	1.5	1.5	779.19	53.505	1139.5	1972.19	292.18	379.83

Nota: Datos obtenidos de la formulación analítica

Tabla N° 80

Capacidad Admisible de suelo mejorado con Columna de Módulo Controlado

LADO	TRAMO	CARGA ESTÁTICA (kPa)	Qadm MEJORA ESTÁTICO (Kpa)	VERIFICACIÓN	CARGA SISMO (Kpa)	Qadm MEJORA SÍSMICO (Kpa)	VERIFICACIÓN
Centro	ESTRUCT	277	292.18	OK	362	379.83	OK

Nota: Verificación de Carga vs Capacidad Admisible del Mejoramiento.

La verificación de la capacidad portante se resume en la tabla N° 80, la Capacidad Admisible de suelo mejorado con Columna de Módulo Controlado es mayor a la capacidad de carga que requiere el intercambio vial Aeropuerto (ver Anexo N° 64 “Parámetros de Diseño Estructural”).

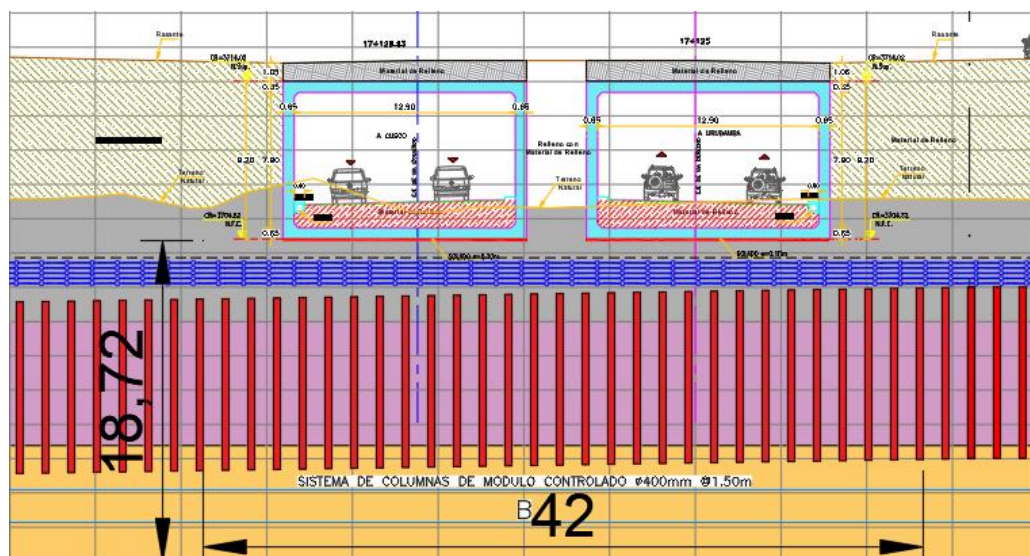


## 5.8 Evaluación de análisis numérico

Se pretende construir el mejoramiento de suelo por Columnas de Módulo Controlado de 0.4m de diámetro y una altura de 10 metros, separadas 1.5 metros entre eje a eje, o Columnas de Grava de 0.6 metros de diámetro y una altura de 8.5 metros, separadas 1.5 metros entre ejes, debajo de la cama de grava de 1 metro más la LTP que mide 1.5 metros que consistirá en 5 mallas espaciadas a 0.3 m con relleno de material granular. El terreno de apoyo está formado por una superficie horizontal de ML-CL de 9 metros (suelo blando), está subyacente a una arcilla densa de 7.02 metros de espesor. Esta estratificación fue obtenida por la perforación DDH-02 detallada en el Anexo N°43 “Ensayos Especiales de la perforación DDH-02”, además el nivel freático se sitúa encima de las inclusiones.

Figura N° 58

Construcción de Columnas de Módulo Controlado.



Nota: Dibujo en el programa AutoCAD 2018 (Fuente Propia)

El análisis numérico en este caso en particular tiene la finalidad de calcular los asentamientos y esfuerzos efectivos del Intercambio Aeropuerto Chincheros - Cusco. Para el modeló realizado en la zona del intercambio vehicular se considerarán dos fases: la primera una consolidación primaria de 5 días después de su construcción y la segunda, una consolidación secundaria de 30 días.

El procedimiento considerado para el Modelo de Elementos Finitos fue la creación del modelo geométrico el cual consta de la configuración general, la creación de la geometría, el ingreso de condiciones de contorno, el ingreso propiedades de los materiales y Generación de la malla elementos finitos y de los cálculos el cual consta del análisis de consolidación para la etapa de construcción después de 5 días y la Consolidación secundaria, segunda fase por 30 días.

En el Modelo de Elementos Finitos posee las siguientes características:

- Modelo: Deformación Plana
- Tipo de elementos 15 nodos
- Unidades de medidas estándar del Plaxis: Largo (m), fuerza (kN), tiempo (day)





Las características del Modelo de Elementos Finitos son resumidas en la figura N° 59.

Figura N° 59

Reporte de Materiales ingresados en el Programa Plaxis v20.

**PLAXIS Report**

**1.1.1.1.1 Materials - Soil and interfaces - Mohr-Coulomb**

Identification		CL	ML-CL	RELLENO	SUELO COMBINADO
Identification number		1	2	3	4
Drainage type		Drained	Undrained (A)	Drained	Drained
Colour					
Comments					
$\gamma_{unsat}$	kN/m <sup>3</sup>	19.13	19.12	19.00	19.17
$\gamma_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	20.60	20.11	20.00	20.16
Dilatancy cut-off		No	No	No	No
$e_{sat}$		0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
$e_{min}$		0.000	0.000	0.000	0.000
$e_{max}$		999.0	999.0	999.0	999.0
Rayleigh $\alpha$		0.000	0.000	0.000	0.000
Rayleigh $\beta$		0.000	0.000	0.000	0.000
E	kN/m <sup>2</sup>	45.00E3	12.00E3	45.00E3	71.33E3
$\nu$ (nu)		0.4000	0.3300	0.3500	0.3300
G	kN/m <sup>2</sup>	16.07E3	4511	16.67E3	26.82E3
$E_{swf}$	kN/m <sup>2</sup>	96.43E3	17.78E3	72.22E3	105.7E3

Nota: Datos obtenidos de los laboratorios de suelo del proyecto Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco Chinchero – Urubamba en la Región Cusco Tramo 1 km 14+229.50 al 21+730. Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2020), referencia Anexo N°43: Ensayos Especiales de la perforación DDH-02.

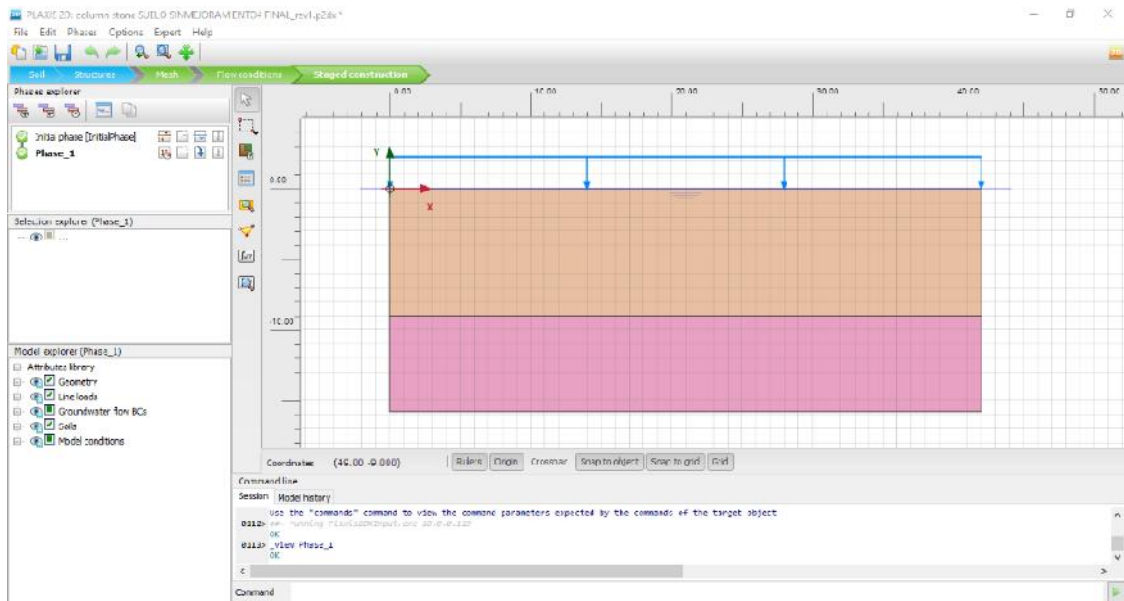
En la Figura N°59 “Reporte de Materiales ingresados en el Programa Plaxis v20.” se utilizaron los informes de suelos de la perforación DDH N°2; ya que es la más crítica

entre las perforaciones realizadas en campo, dicho laboratorio fue proporcionado por el ministerio de transporte y comunicaciones.

Para la creación de la geometría del suelo sin mejoramiento del Modelo de Elementos Finitos, se consideró los distintos estratos de suelo. Estos se crean con la herramienta Geometry line. Mostrado en la Figura N°60.

Figura N° 60

### Modelamiento de la geometría y asignación de materiales



Nota: Para el modelamiento se tomó referencia la estratificación del suelo por la perforación DDHH 2.

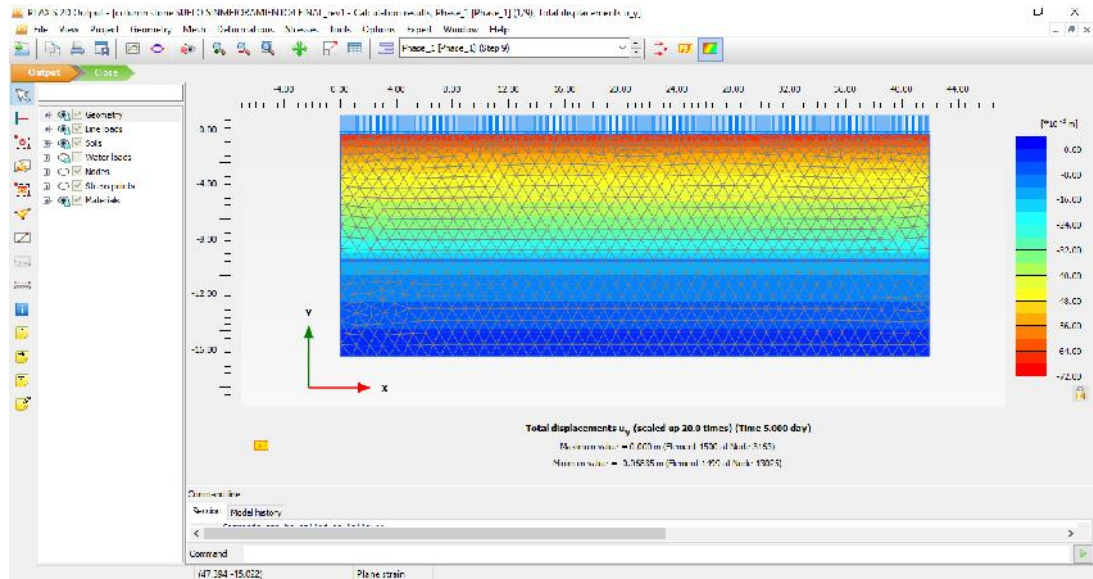
Programa computacional PLAXIS 2D v20 (Fuente Propia)

En la Figura N° 60 “Modelamiento de la geometría y asignación de materiales” como procedimiento del uso del Software se definió la estructura del suelo mediante coordenadas. Esta empieza en la coordenada (0 0) (42 0) hasta el (0 -9) (42 -9) de suelo ML-CL consecuente de (0 -9) (42 -9) al (0 -16.02) (42 -16.02) de suelo CL.

Siguiendo con el uso de software de Elementos Finitos se realizó el análisis de consolidación, para la primera fase con duración de 5 días y como segunda fase con duración de 30 días mostrados en la figura N°61 “Resultado del análisis de consolidación en 5 días” y la figura N°62 “Resultado del análisis de consolidación en 30 días”

Figura N° 61

Resultado del análisis de consolidación en 5 días

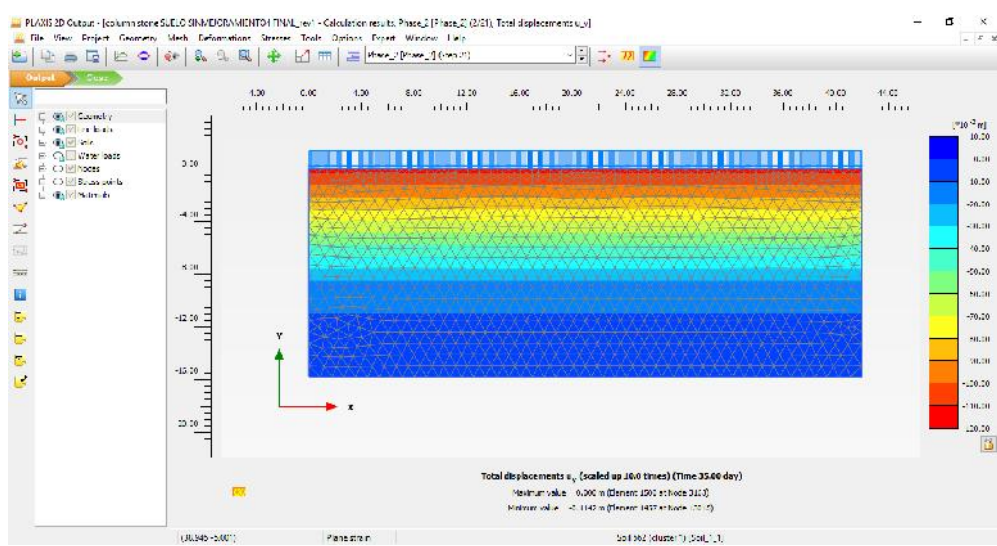


Nota: Vista en sombras de la deformación en el Programa computacional PLAXIS 2D V20 (Fuente: Propia)

En la figura N°61 “Resultado del análisis de consolidación en 5 días” El suelo al ser asignado una carga distribuida de 200 Kn/m<sup>2</sup>, sufre una deformación de -0.06835 m es decir de 2.69 plg. de asentamiento en 5 días.

Figura N° 62

Resultado del análisis de consolidación en 30 días.



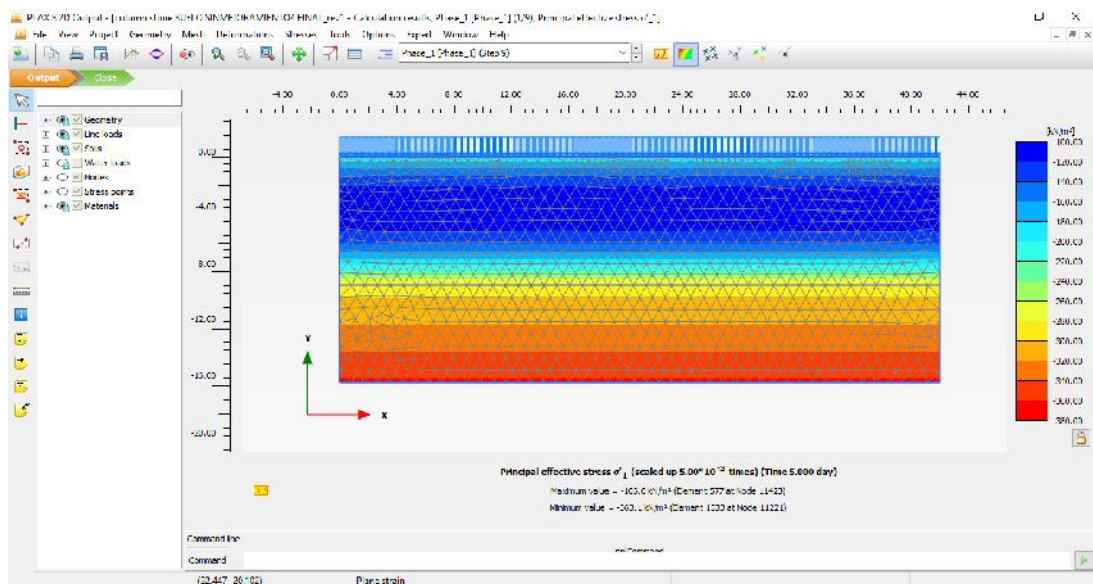
Nota: Vista en sombras de la deformación en el Programa computacional PLAXIS 2D 20V (Fuente: Propia)

En la figura N°62 “Resultado del análisis de consolidación en 30 días” Se puede observar que el suelo sufre una deformación de -0.1142 m es decir de 4.49 plg. de asentamiento en 30 días, por consecuencia podemos afirmar que el suelo sin mejoramiento sufre una deformación mayor a lo permitido en la norma E.050.

Siguiendo con el uso de software de Elementos Finitos se los resultados de esfuerzos efectivos mostrados en la Figura N°63 “Resultado del esfuerzo efectivo” obteniendo un esfuerzo efectivo máximo del suelo sin mejoramiento es 363.1 Kn/m<sup>2</sup> o un resultado de presión efectiva de 301.90 kN/m<sup>2</sup> mostrado en la Figura N°64 “Presión Efectiva en el corte A-A”.

Figura N° 63

### Resultado del esfuerzo efectivo

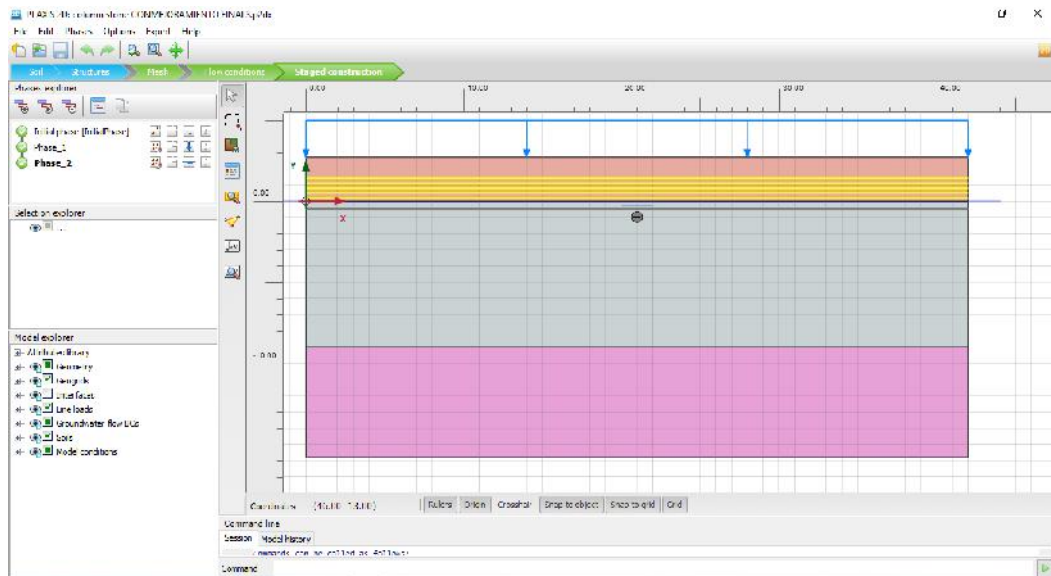


Nota: Vista en sombras del esfuerzo efectivo en el Programa computacional PLAXIS 2D V20 (Fuente Propia) para el suelo



Figura N° 65

Ingreso de propiedades y modelamiento de las Columnas de Grava y la plataforma de transferencia de carga.



Nota: Para el modelamiento se tomó referencia la estratificación del suelo por la perforación DDHH 2. Y el método de terreno homogéneo mejorado. Programa computacional PLAXIS 2D V20 (Fuente Propia)

Para el modelamiento de Columnas de Grava se tomó referencia el artículo de Castro et al 2016, quien menciona que, con la técnica de terreno homogéneo mejorado, se puede obtener valores similares que dibujando las zanjas longitudinales; ya que utiliza parámetros mejorados que ocupa toda la zona tratada con columnas. También nos recalca que esta técnica es útil para el diseño de un tratamiento ya que permite variar el área de sustitución sin necesidad de variar el modelo geométrico.

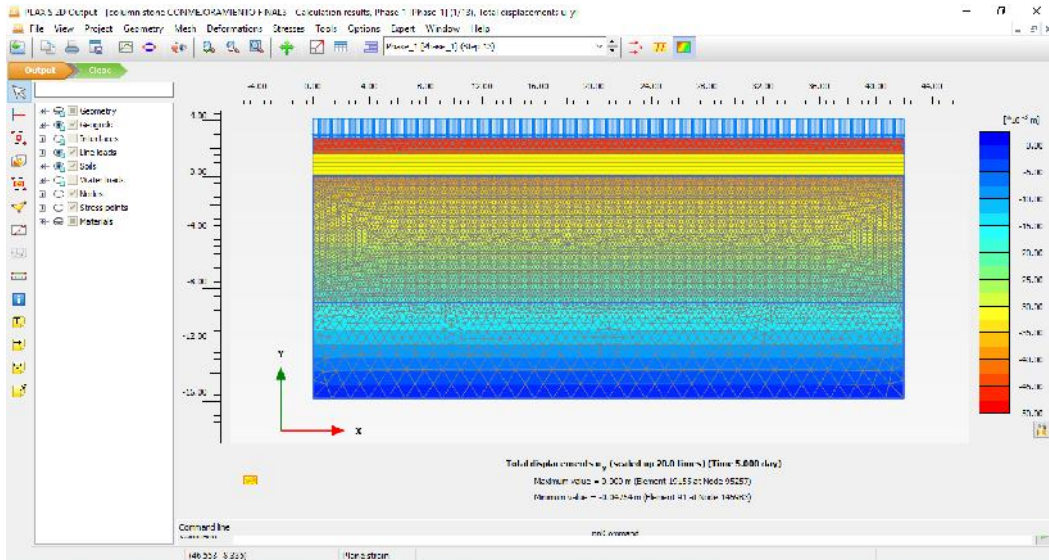
Como Resultados obtenidos del Modelo de Elementos Finitos para el caso de Columnas de Grava se obtuvo resultados de consolidación para duración de 5 días en la figura N°66 “Resultado del análisis de consolidación en 5 días”.

Considerando una mejora mecánica del suelo y una carga distribuida de  $200 \text{ Kn/m}^2$ , el suelo sufre una deformación de  $-0.04754 \text{ m}$  es decir de  $1.87 \text{ plg.}$  de asentamiento en 5 días. Para la segunda fase de una consolidación en 30 días se puede visualizar en la Figura N°67 “Resultado del análisis de consolidación en 30 días”. El suelo sufre una deformación de  $-0.04756 \text{ m}$  es decir de  $1.87 \text{ plg.}$  de asentamiento en 30 días, se

puede observar que se obtiene la misma deformación por la rápida disipación de poros que la Columna de Grava provee.

Figura N° 66

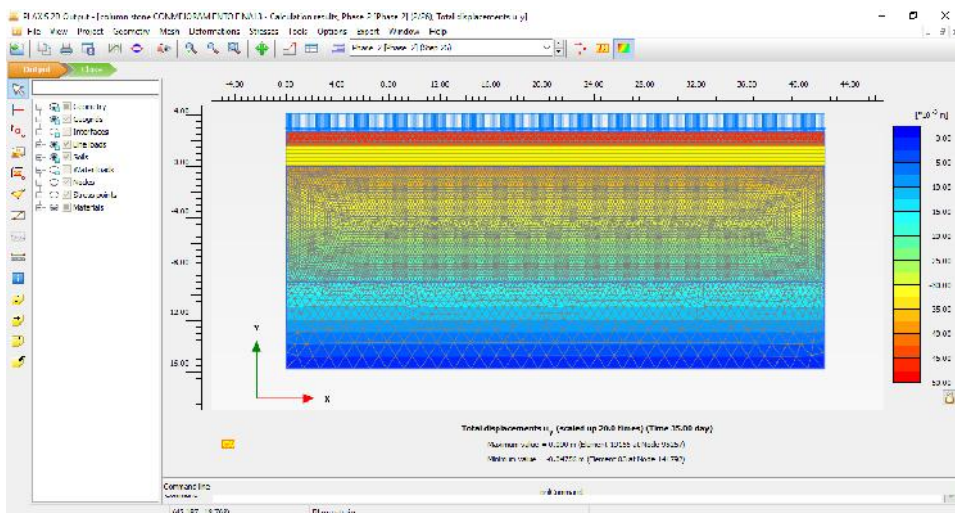
Resultado del análisis de consolidación en 5 días.



Nota: Vista en sombras de la deformación en el Programa computacional PLAXIS 2D 20V  
(Fuente: Propia)

Figura N° 67

Resultado del análisis de consolidación en 30 días



Nota: Vista en sombras de la deformación en el Programa computacional PLAXIS 2D 20V  
(Fuente: Propia)

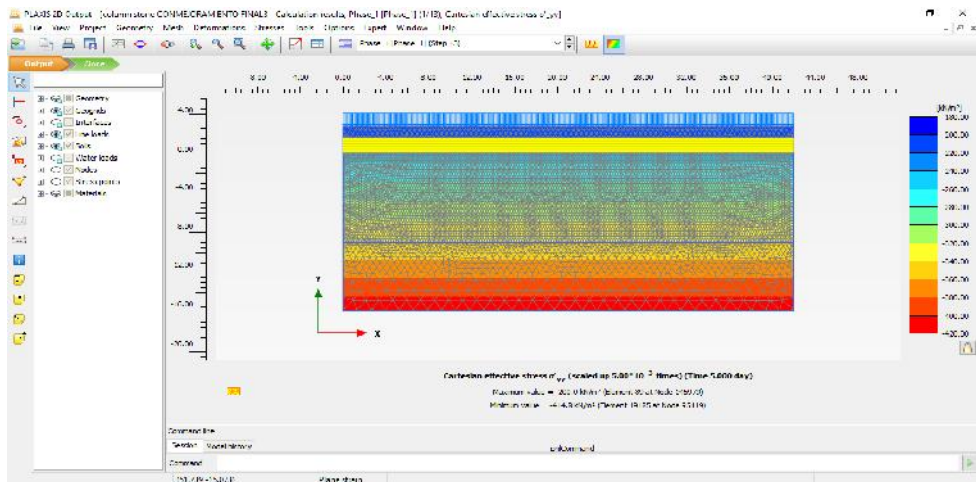


Continuando con el Modelo de Elementos Finitos de Columnas de Grava se obtuvo el esfuerzo efectivo máximo del suelo con mejoramiento de Columna de Grava es  $414.8 \text{ Kn/m}^2$ . (ver Figura N° 68)

En el Resultado del esfuerzo efectivo en el corte A-A se obtiene es una presión efectiva de  $-358.00 \text{ kN/m}^2$ . (Ver Figura N° 69)

Figura N° 68

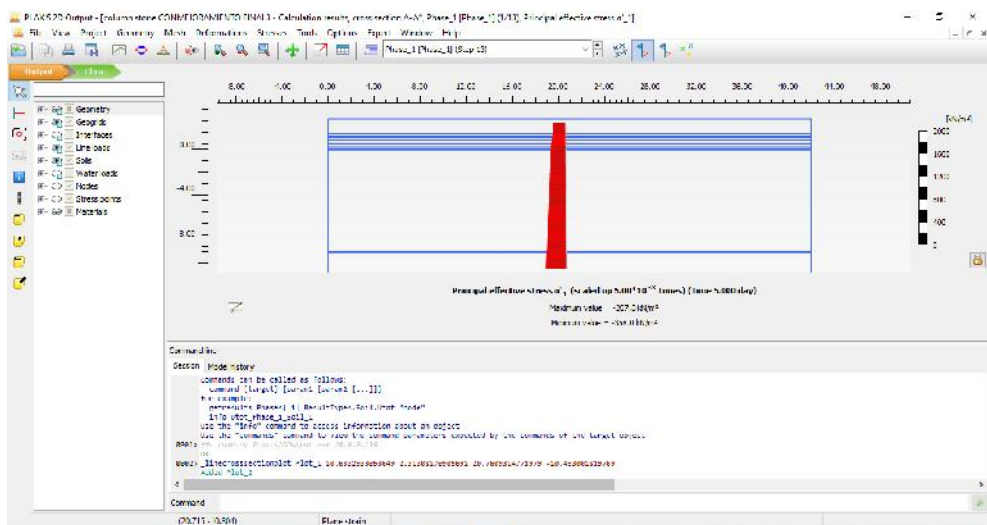
Resultado del esfuerzo efectivo



Nota: Vista en sombras del esfuerzo efectivo en el Programa computacional PLAXIS 2D V20 (Fuente Propia)

Figura N° 69

Presión Efectiva en el corte A-A.



Nota: Vista del esfuerzo efectivo distribuido en todo el corte A-A en el Programa computacional PLAXIS 2D V20 (Fuente Propia)


Prosiguiendo el análisis numérico en el programa computacional Plaxis 2D V20, se realizó el modelamiento de las Columnas de Módulo Controlado (CMC), teniendo en cuenta las consideraciones de materiales y las propiedades de la inclusión, resumidos en la Figura N°70.

Figura N° 70

Reporte de materiales ingresados en el programa Plaxis v20 en Columnas de Módulo Controlado.

**PLAXIS Report**

**1.1.1.1.2 Materials - Soil and interfaces - Linear elastic**

Identification		CMC
Identification number		4
Drainage type		Non-porous
Colour		
Comments		
$\gamma_{unsat}$	kN/m <sup>3</sup>	23.00
$\gamma_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	23.00
Dilatancy cut-off		No
$e_{i0}$		0.5000
$e_{min}$		0.000
$e_{max}$		999.0
Rayleigh $\alpha$		0.000
Rayleigh $\beta$		0.000
E	kN/m <sup>2</sup>	10.00E6
$\nu$ (nu)		0.2500
G	kN/m <sup>2</sup>	4.000E6
$E_{oed}$	kN/m <sup>2</sup>	12.00E6

Nota: Datos de las Columnas de Módulo Controlado tomados de Hung, H. (2018), ingresados al programa PLAXIS V20.

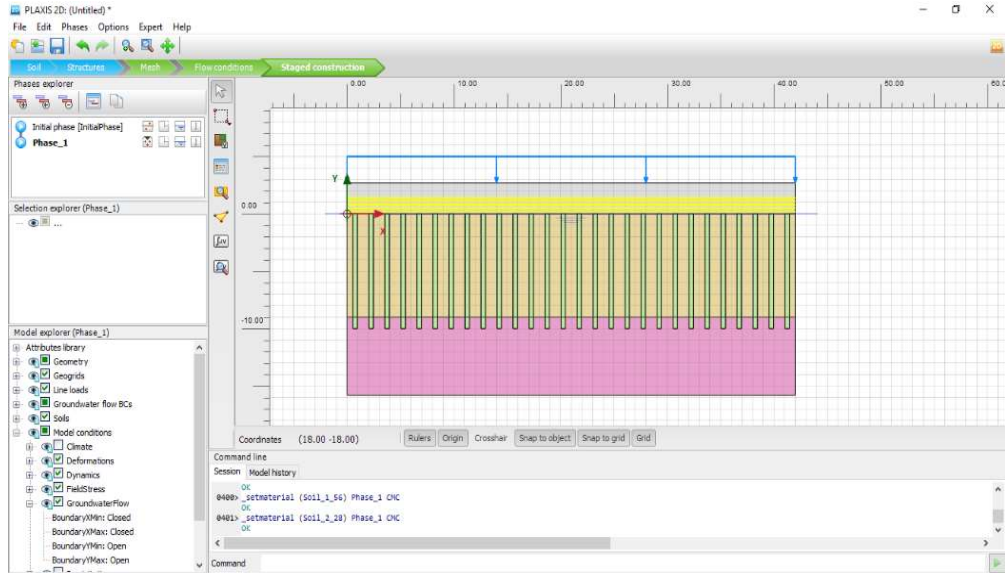
Para las propiedades de las Columnas de Módulo Controlado mostrados en la Figura N° 70, se hizo referencia a Hung, H. (2018) en su tesis doctoral Effects of Installation Sequence of Concrete Rigid Inclusions by Ground-Displacement Piling Method on Previously Installed Columns), quien nos proporciona una variedad de referencias de propiedades de las Columnas de Módulo Controlado, por distintos autores que modelizaron este tipo de inclusión semi rígida por el método numérico o método de Elementos Finitos.

El modelamiento de la geometría del suelo con mejoramiento de Columnas de Modulo Controlado, con sus distintos estratos de suelo mostrados en la Figura N° 71 “Modelamiento de la geometría y asignación de materiales”. Se consideró un modelo

tipo no lineal y no poroso adoptado para la Columnas de Módulo Controlado para fines de modelamiento.

Figura N° 71

### Modelamiento de la geometría y asignación de materiales



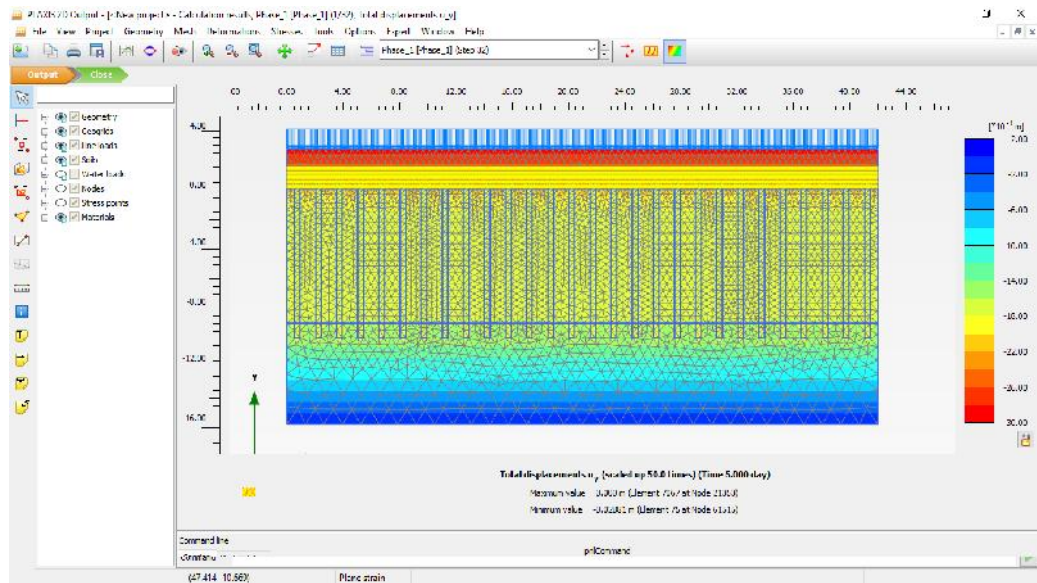
Nota: Para el modelamiento se tomó referencia la estratificación del suelo por la perforación DDHH 2 y la importación del CAD de la figura N°58. Programa computacional PLAXIS 2D V20 (Fuente Propia)

Como Resultados obtenidos del Método de Elementos Finitos para el caso de Columnas de Módulo Controlado se calculó un efecto de consolidación para un tiempo de 5 días (ver figura N°72), el suelo sufre una deformación de -0.02881 m es decir de 1.13 plg. de asentamiento.

Para la segunda fase de consolidación en un tiempo de 30 días se puede visualizar en la Figura N°73. El suelo sufre una deformación de -0.02901 m es decir de 1.14 plg. de asentamiento.

Figura N° 72

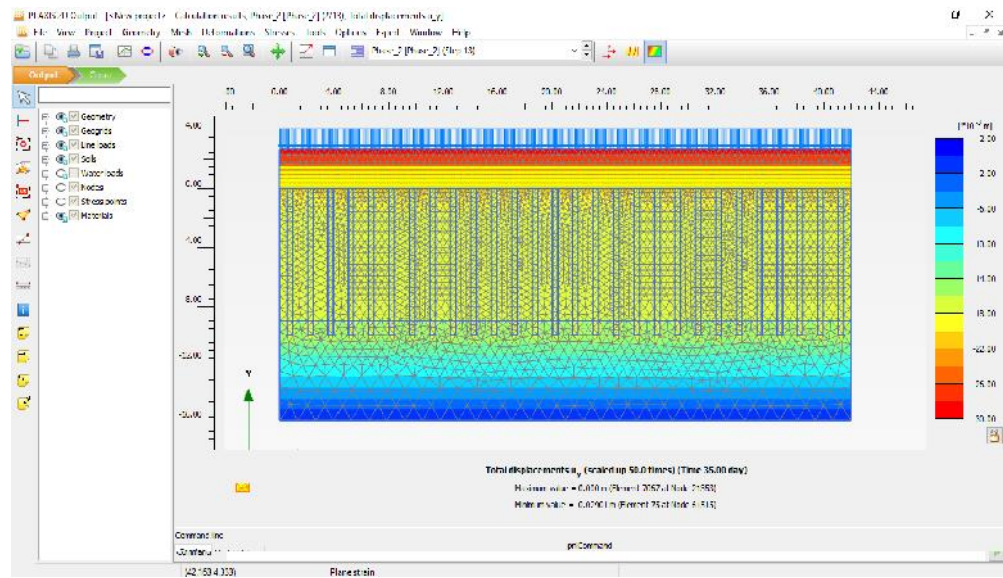
Primera fase duración 5 días.



Nota: Vista en sombras de la deformación en el Programa computacional PLAXIS 2D 20V  
(Fuente: Propia)

Figura N° 73

Segunda fase duración 30 días.

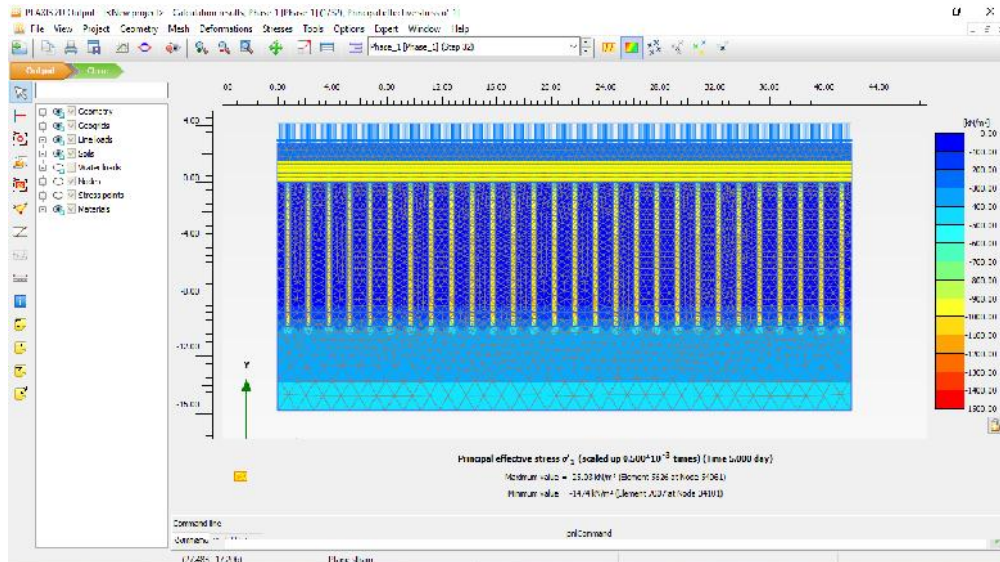


Nota: Vista en sombras de la deformación en el Programa computacional PLAXIS 2D V20  
(Fuente: Propia)

Continuando con el Modelo de Elementos Finitos de Columnas de Módulo Controlado se obtuvo el esfuerzo efectivo máximo de 1474.00 Kn/m<sup>2</sup>. (Ver Figura N°74)

Figura N° 74

Resultado del esfuerzo efectivo

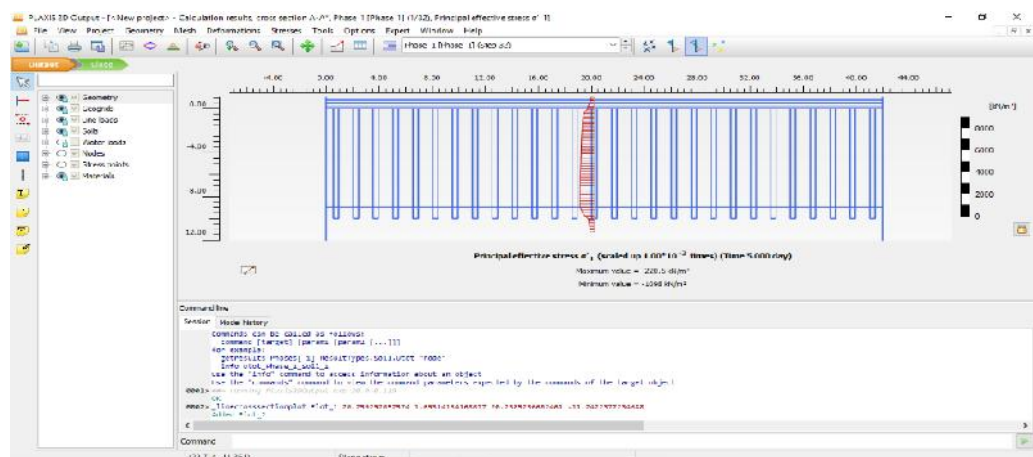


Nota: Vista en sombras del esfuerzo efectivo en el Programa computacional PLAXIS 2D V20 (Fuente Propia)

Resultado del esfuerzo efectivo en el Corte A-A de -1098.00 kN/m<sup>2</sup> en la Figura N° 75.

Figura N° 75

Presión Efectiva en el corte A-A.



Nota: Vista del esfuerzo efectivo distribuido en todo el corte A-A en el Programa computacional PLAXIS 2D V20 (Fuente Propia)

## 5.9 Propuesta de análisis del efecto de Licuación en Columnas de Módulo Controlado

Para la evaluación del riesgo de licuación, recapitularemos que es licuación, González, L. (2002), define su composición en depósitos de suelos jóvenes de arenas limosas, limos arenosos, gravas arenosas en estado saturado dichas partículas de suelo son sometidas a fuerzas laterales y se reacomodan compactándose entre ellas esto genera una excesiva presión intersticiales (por falta de drenaje) causando que falle la resistencia al cortante.

En consecuencia, podemos inferir que el efecto de licuación, está ligado a tres componentes principales: esfuerzo normal, presión de poros y el ángulo de fricción. Como lo mencionamos anteriormente las Columnas de Módulo Controlado al ser Inclusiones Rígidas tienden a aumentar la resistencia del suelo considerando este mayor esfuerzo normal podrá ser mayor a la elevación de la presión de poros en consecuencia del sismo y si nos basamos en el teorema de Mohr Coulomb, donde:

$$=c+(\sigma' - \mu) \tan$$

Si para el efecto de licuación, la presión de poros aumenta hasta igualar al esfuerzo normal por consecuencia la resistencia al corte para arenas es 0 y para los demás malos suelos como limos-arcilloso que tienen cohesión, el cortante será menor y por lo tanto menos seguridad la estructura tendrá.

Entonces al tener una zona susceptible a licuación asumiremos, que sin mejoramiento la presión de poros iguala al esfuerzo efectivo. Nuestro nuevo valor de  $\mu$  será 301.90 kN/m<sup>2</sup>, obtenida de la figura N° 64” Presión Efectiva en el corte A-A”, siendo su  $\sigma' = 150.01$  kN/m<sup>2</sup>.

$$\varphi_{comp} = \arctan(Ra \times \tan\varphi'_g + (1 - Ra) \times \tan\varphi'_m)$$

$$\varphi_{comp} = 22.54^\circ$$

Tabla N° 81

Cálculo de Razón de Pila – Espaciamiento (Ra)

Diámetro de Pila (cm)	40	cm
Espaciamiento (cm)	150	cm
Ra	5.58%	

Nota: Ra para calcular el  $\varphi_{comp}$

Proseguimos con el cálculo de la cortante en Columnas de Módulo Controlado. El esfuerzo efectivo es 1098.00 kN/m<sup>2</sup> (ver Figura N°75 “Presión Efectiva en el corte A-A”), la cohesión es 62.76 Kn/m<sup>2</sup>. Dando como respuesta a la resistencia la cortante mejorada de 393.142 kn/m<sup>2</sup> según la expresión de Morh Coulomb:

$$= 62.76 + (1098.00 - 301.90) \tan (22.54^\circ)$$

$$= 393.14 \text{ kN/m}^2$$

## 5.10 Discusión de resultados

Según lo obtenido de la evaluación de parámetros geotécnicos se pudo realizar la evaluación de licuación presentamos un resumen de resultados en la Tabla N°82.

Tabla N° 82

Resumen de factores de seguridad y probabilidad de licuación

DDH1		DDH2		DDH3	
Prof	FS	Prof	FS	Prof	FS
2.75	1.01	2.75	0.69	2.25	1.47
4.75	0.82	4.75	0.61	5.25	0.59
6.75	0.71	6.75	0.53	8.25	0.79
8.75	0.82	8.75	0.98	11.00	0.97
10.75	1.61	10.75	2.33	14.00	1.03
12.75	1.37	12.75	1.25	15.00	1.44
14.75	1.45	14.75	1.45	16.75	1.39
16.75	1.39	16.75	1.39	19.25	5.78
		18.75	5.84		
		20.75	5.60		
Probabilidad de licuación (%)					
12.86		16.95		9.85	

Nota: Elaboración propia

Se pudo identificar factores de licuación menores a 1.25 según indica la normativa E.0.50 lo cual el manual sugiere obtener valores mayores que estos u obtener una probabilidad de licuación < 10%.

Según la evaluación previa de mejoramiento de suelo se obtuvo el mejor rating a las Columnas de Grava.

Según lo obtenido por el autor Poves, J (2017) en su investigación se obtuvo un esfuerzo de 2.78 kg/cm<sup>2</sup> una consolidación vertical de 5.4 cm<sup>2</sup>/s y un asentamiento de 2 pulgadas o 5.08 cm después de realizar el mejoramiento y aplicar las cargas, lo

realizado por Priebe según el método analítico resulto 2.2 pulgadas y según el Modelo de Elementos Finitos 1.87 Pulgadas.

Además, se puede comparar para un área de reemplazo de 12.56% obteniendo en nuestra investigación y lo realizado por Núñez, F. (2017) resumido en la Tabla N°83 “Resultados de asentamientos para distintos contrastes de rigidez, para ángulos de fricción 35” quien usó una sobrecarga de 90 kN/m<sup>2</sup>, sin embargo, el autor considera un estrato muy desfavorable de 10 metros de arcilla blanda obteniendo una deformación de 0.229 m según lo calculado en la Tabla N° 84 “Interpolando resultados de asentamiento según Núñez, F. (2017)” comparado con nuestro caso de 0.047m.

Sin embargo, creemos que el análisis según las tablas propuestas, faltó considerar la carga dinámica, presencia del nivel freático y magnitud del sismo.

Tabla N° 83

Resultados de asentamientos para distintos contrastes de rigidez, para ángulos de fricción 35.

Ar (%)	Separación (m)	d(m)	dw(m)	No mejorado	Mejorado	
				E=15000 Kpa	n=2, E=30000 kpa	n=8, E=120000 kpa
					=35°	=35°
				s(m)	s(m)	s(m)
11	2	0.7	0.22	0.818	0.327	0.099
15	2	0.8	0.29	0.818	0.257	0.073

Nota: Tomada de la investigación de Núñez, F. (2017) pg55 usado para fines de referencia para la interpretación de resultados, esta tabla representa los asentamientos sin mejorar s y con mejoramiento s\*

Tabla N° 84

Interpolando resultados de asentamiento según Núñez, F. (2017)

Ar(%) /E(Kpa)	30000	60000	120000
11	0.327	0.251	0.099
12.56	0.300	0.229	0.089
15	0.257	0.196	0.073

Nota: Se obtienen valores de asentamiento en metros.



Para los resultados obtenidos en las Tablas N° 85, N° 86 y N° 87 “Resumen de factores de seguridad y probabilidad de licuación para suelo mejorado con Columna de Grava” podemos identificar de seguridad y probabilidad de licuación favorables según lo recomendado en la normativa técnica de edificación en la sección de suelos y cimentaciones E.050.

Tabla N° 85

Resumen de factores de seguridad y probabilidad de licuación para suelo mejorado con Columna de Grava.

DDH1		DDH2		DDH3	
Prof.	FS	Prof.	FS	Prof.	FS
2.75	3.35	2.75	2.31	2.25	4.88
4.75	2.72	4.75	2.03	5.25	1.95
6.75	2.37	6.75	1.77	8.25	2.62
8.75	2.71	8.75	3.24	11.00	0.97
10.75	1.61	10.75	2.33	14.00	1.03
12.75	1.37	12.75	1.25	15.00	1.44
14.75	1.45	14.75	1.45	16.75	1.39
16.75	1.39	16.75	1.39	19.25	5.78
		18.75	5.84		
		20.75	5.60		
Probabilidad de licuación (%)					
0		0		0	

Nota01: Metodología de Baez, J. (1995)

Tabla N° 86

Resumen de factores de seguridad y probabilidad de licuación para suelo mejorado con Columna de Grava.

DDH1		DDH2		DDH3	
Prof.	FS	Prof.	FS	Prof.	FS
2.75	1.38	2.75	0.95	2.25	2.00
4.75	1.12	4.75	0.83	5.25	0.80
6.75	0.97	6.75	0.73	8.25	1.07
8.75	1.11	8.75	1.33	11.00	1.32
10.75	1.61	10.75	2.33	14.00	1.41
12.75	1.37	12.75	1.25	15.00	1.96
14.75	1.45	14.75	1.45	16.75	1.90
16.75	1.39	16.75	1.39	19.25	7.88
		18.75	5.84		
		20.75	5.60		
Probabilidad de licuación (%)					

Nota: Metodología de Rayamajhi D. (2014)

Tabla N° 87

Resumen de factores de seguridad y probabilidad de licuación para suelo mejorado con Columna de Grava.

DDH1		DDH2		DDH3	
Prof.	FS	Prof.	FS	Prof.	FS
2.75	1.89	2.75	1.30	2.25	2.72
4.75	1.64	4.75	1.22	5.25	1.17
6.75	1.43	6.75	1.07	8.25	1.68
8.75	1.74	8.75	2.08	11.00	2.06
10.75	1.61	10.75	2.33	14.00	1.03
12.75	1.37	12.75	1.25	15.00	1.44
14.75	1.45	14.75	1.45	16.75	1.39
16.75	1.39	16.75	1.39	19.25	5.78
		18.75	5.84		
		20.75	5.60		
Probabilidad de licuación (%)					
0		2.54		1.03	

Nota01: Metodología de Green et al .2008 y Salgado et al. 2007

Para las Columnas de Grava se realizó un modelamiento de Elementos Finitos mediante parámetros combinados debido a la simplicidad y exactitud recomendado por Zamora, J. (2015)

Según la capacidad portante de mejoramiento por Columnas de Módulo Controlado por el método analítico, se asemeja al diseño por pilote, pero la distinción a este método costoso, es que las Columnas de Módulo Controlado ayudan a mejorar las propiedades del suelo, es por eso que dentro de su fórmula de capacidad última (tabla N° 79) vemos que el suelo es actuante. El funcionamiento de la fórmula de capacidad admisible tiene en cuenta que la carga de la superficie se reparte por medio de la capa de reparto (LTP), hacia las inclusiones y al suelo circundante; muy diferente en el caso de pilotes que su diseño va por el tema estructural ya que estos toman el 100% de la carga superficial como se visualiza en la Figura N°33 “Funcionamiento de la Columna de Módulo Controlado”.

La capacidad última es la suma de la capacidad por fuste, capacidad por punta y la capacidad del suelo. La resistencia a la fricción de fuste la hallamos por dos métodos:

el Método de Coyle y Castellano (1981), y el Método de Vijayverjiya y Focht (1972). Siendo la capacidad última de Coyle y Castellano (1982) mayor al método de , esto se debe a que solo toma uno de los datos del suelo de ML-CL, distinto al método de que es necesario más datos del ensayo de corte directo. Para una mayor estimación en la capacidad por fuste decidimos utilizar el promedio de estas capacidades para la estimación de la capacidad última. (Ver Tabla N° 73 "Cálculo de resistencia a fricción de fuste o capacidad de fuste").

Al analizar la capacidad por punta de la Columna de Módulo Controlado, por el método de Meyerhof (1976), tuvimos un primer valor de 565.27 Kn, (ver Tabla N° 76 "Cálculo de capacidad de Columna de Módulo Controlado (CMC)") pero este valor no debe pasar el límite impuesto por varios autores así que existe la condición de que  $Q_p < A_p q_L$ , al obtener  $A_p q_L = 53.50 \text{Kn}$ , se puede inferir que es mucho menor que el primer valor calculado, lo cual no cumple con el límite, siendo este límite el nuevo valor de la capacidad por punta  $Q_p$ .

Para hallar la capacidad última del suelo profundo decidimos utilizar el método más actual que teníamos que sería el método AASHTO LRFD (2014), el cual tuvimos un valor de 1139.5 kN. (Ver Tabla N° 79 "Criterios de diseño para Mejoramiento por Columna de Módulo Controlado")

La capacidad admisible del mejoramiento por Columnas de Módulo Controlado debe ser mayor a la carga estática impuesta estructuralmente, esta es calculada por la capacidad última total entre el área de la celda y el Factor de Seguridad, refiriéndonos a la Tabla N° 80, podemos asegurar que es mayor que la carga estática del intercambio vial Aeropuerto, analizado.

Para el análisis del asentamiento decidimos utilizar el método numérico con ayuda del programa Plaxis v20, resultando de 1.14 plg. de asentamiento. Por debajo del límite máximo de 2 pulgadas. (Ver Figura N° 73 "Segunda fase duración 30 días.")

### 5.11 Contratación de Hipótesis

Hipótesis General: Mediante el uso de inclusiones se mejoran las propiedades del suelo y el problema de licuación.

Mediante lo investigado pudimos demostrar que el uso del mejoramiento de suelos por el sistema de inclusiones tanto flexibles (Columna de Grava) y rígidas (Columnas de Módulo Controlado) ayudan a disminuir significativamente el efecto de licuación. Lo que demuestra que se cumplió la hipótesis planteada.

Hipótesis Específicas:

- Mediante los parámetros geotécnicos es posible identificar las zonas susceptibles a licuación.

Del análisis correspondiente podemos afirmar que si es posible identificar las zonas susceptibles a licuación con los parámetros geotécnicos obtenidos del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco Chinchero – Urubamba en la Región Cusco Tramo 1 km 14+229.50 al 21+730”. Esta identificación se comprobó mediante diferentes criterios de autores. Lo que demuestra que se cumplió la hipótesis planteada.

- Mediante la correcta evaluación de normativas y manuales se puede elegir el sistema y diseño de inclusiones para la zona de estudio.

A través de lo investigado podemos afirmar que la correcta evaluación de normativas y manuales, se pudo elegir el mejor sistema y diseño de las inclusiones. Lo que demuestra que se cumplió la hipótesis planteada.

- Las inclusiones mejoran las propiedades de los suelos y minimizan los efectos de una posible falla por licuación demostrado mediante métodos analíticos y numéricos.

Del análisis correspondiente por métodos analíticos y numéricos podemos afirmar que las inclusiones mejoran significativamente las propiedades de los suelos y minimizan los efectos de una posible falla por licuación. Lo que demuestra que se cumplió la hipótesis planteada

- La propuesta de diseño es aplicable para la zona de estudio.

Mediante el estudio y análisis correspondiente podemos afirmar que el diseño de inclusiones es aplicable para la zona de estudio “Intercambio Vial Aeropuerto”, debido que no solo minimiza el efecto de licuación sino mejora la capacidad admisible del suelo. Lo que demuestra que se cumplió la hipótesis planteada.

## CONCLUSIONES

1. Para mejorar el suelo en zonas susceptibles a licuación utilizando inclusiones, existe varios métodos de mejoramientos para la licuación. Para la investigación se tomaron los datos del proyecto intercambio vial aeropuerto, Chincheros-Cusco y se estudió los mejoramientos de suelo por inclusión (la Columna de Grava y las Columnas de Módulo Controlado), para la Columna de Grava, se ha podido demostrar de manera analítica y numérica su funcionalidad, mediante parámetros de permeabilidad y resistencia mientras que en las Columnas de Módulo Controlado, se puede verificar a través del esfuerzo efectivo obtenido por el modelamiento numérico y la capacidad que esta soporta.
2. Se pudo evaluar los factores geotécnicos, para la identificación de zona susceptible a la licuación, se hizo uso de los ensayos de laboratorio de suelo, donde se evaluó primero la susceptibilidad y segundo el potencial de licuación. Se usaron los datos de límite líquido, Límite plástico, % de finos, contenido de humedad obtenidos de las calicatas, y mediante de métodos simplificados plasmados en gráficos propuestos por Bray & Sancio (2006), Seed (2003), Adapazari (2010) en los cuales se obtuvo un suelo susceptible a licuación, con ello se puede concluir que primero es necesario evaluar de esta manera, para proceder analizar el potencial de licuación realizando los ensayos de SPT o CPT, donde se analiza a más profundidad el suelo de la zona estudiada.  
  
Para el potencial de licuación se analizaron los factores de seguridad siguiendo la metodología de Boulagner hallando valores menores a 1.25, con lo cual se obtuvo una probabilidad que ocurra licuación de 12.86%, 16.95%, 9.85%, siendo el límite 10%, según la normativa peruana concluyendo que se necesita una intervención, para reducir el efecto de licuación.
3. Se identificaron la normativa E.050 y el manual FWHA (2017) que se usaron como referencia y requisitos para la elección y el diseño de inclusiones son aplicables para la zona de estudio. Según las recomendaciones obtenidas por la FHWA (2017) siguiendo su metodología para pre evaluar los mejoramientos de suelo (Tabla N°51),

se obtuvo la mejor solución de mejoramiento a las Columnas de Grava según el rating de 123 y teniendo un menor número en las Columnas de Módulo Controlado con rating 99, siendo este análisis estimativo según nuestro criterio y contractada con la información revisada.

4. Se desarrolló un procedimiento de diseño para poder sustentar como el sistema de inclusiones mejora los suelos, minimizando los efectos de una posible falla del suelo por licuación durante un movimiento sísmico, realizado por métodos analítico y numérico:

- Para la Columna de Grava se pudo obtener los siguientes factores de seguridad aplicado a la licuación de suelos, reduciendo los efectos de esta propuesta por la metodología de Baez, J. (1995), Rayamajhi D. (2014), Green (2008) y Salgado (2007). Para todos los casos se obtuvo una probabilidad menor al 10% según indica la norma E.050 lo cual sería aceptable, sin embargo, el método de Rayamajhi se obtuvieron datos más conservadores al considerar más factores para su análisis. Además, se pudo verificar los asentamientos de suelo antes y posterior al mejoramiento de suelo por Columnas de Grava:

Teniendo en cuenta los resultados del asentamiento sin mejoramiento por método analítico de 10.6 pulgadas (Ver Tabla N°48” Cálculo de asentamiento sin mejoramiento”) y por el método numérico de 0.1146 m (Figura N° 62” Resultado del análisis de consolidación en 30 días”) que convertidas sería 4.50 plg, se pudo demostrar una mejora en este aspecto con la solución de Columnas de Grava. La metodología para obtener dicho valor fue realizada por métodos analíticos considerando un módulo elástico combinado del suelo y Columna de Grava obteniendo un asentamiento de 2 pulgadas, por métodos simplificados con ayuda del gráfico de Priebe obteniendo un asentamiento de 2.2 pulgadas y mediante el Modelo de Elementos Finitos un asentamiento de 1.87 pulgadas. En cuanto a los factores de seguridad, se obtuvieron algunos factores menores de 1,25 para el análisis de licuación siguiendo la metodología de Rayamajhi según lo recomendado de la norma E.050 para estructuras clase A, para las otras metodologías analizadas (según Green et al .2008 y según Salgado et al. 2007) se obtuvo factores de seguridad menores a 1.25. Sin embargo, se obtuvo probabilidades de licuación menores de 10% (9.94% según Rayamajhi, 2.54%

según Green (2008) y según Salgado (2007), y según Baez, J. (1995) 0%) con ello consideramos que el diseño sería aceptable técnica y económicamente.

- Para el mejoramiento por Columna de Módulo Controlado, evaluamos el riesgo de licuación con ayuda del teorema de Mohr Coulomb, se obtuvo una resistencia al cortante del suelo sin mejoramiento de  $\tau=150.01 \text{ kN/m}^2$ , a diferencia de la resistencia al cortante del suelo mejorado de  $\tau = 393.14 \text{ kN/m}^2$ , que viene siendo el triple de la resistencia sin mejoramiento, pudiendo suponer que ante un sismo de 7.5 Mg y por consecuencia se active el efecto de licuación que eleva la presión de poros, el esfuerzo efectivo sea tan alto que la presión de poros no pueda igualarlo y así se elimine el efecto de licuación.
- También para el diseño de las Columna de Módulo Controlado se tuvo en cuenta la capacidad admisible de estas, el sistema actúa en conjunto (suelo - inclusión), teniendo una capacidad última de 1972.19 kN, siendo la sumatoria entre la capacidad de fuste, capacidad de punta y capacidad del terreno natural. Obteniendo finalmente una capacidad admisible de 292.18 kN/m<sup>2</sup> siendo mayor a la carga estática aplicada de 277 kN/m<sup>2</sup>, por lo cual no se producirá un fallo por cortante del suelo ni asentamientos diferenciales excesivos.
- Adicionalmente podemos asegurar que la capacidad admisible de las Columnas de Módulo Controlado se encuentran dentro del rango propuesto por el manual "Ground Modification Methods Volumen II" donde nos asigna un rango de capacidad admisible que varía entre 50 -150 Kips que equivalen un rango de 222.41 - 667.23 kN (Tabla N°6 "Resistencia y geometría de columna de agregado y Columna de Módulo Controlado") y la capacidad admisible entre las columnas de modulo controlado llega a tener 292.18 kN/m<sup>2</sup> por el área de la celda unitaria 2.25 m<sup>2</sup> es igual a 657.405 kN, valor dentro del rango permitido.
- En cuanto a los asentamientos, las Columnas de Módulo Controlado, reducen considerablemente los asentamientos al densificar el suelo, teniendo resultados a través del método numérico de 1.14 pulgadas, por debajo del límite máximo de 2 pulgadas.

5. Se realizó el análisis de resultados obtenidos de nuestra propuesta de diseño a la zona de estudio, concluyendo que la mejor solución para el caso de minimizar los efectos de licuación, según lo investigado, tenemos a la Columna de Grava por el drenaje y densificación que otorga al suelo; sin embargo, las Columnas de Módulo Controlado se podría usar en algunos casos donde no se disponga material disponible, exista un bajo peligro sísmico, y por consecuencia presente baja susceptibilidad y probabilidad que se presente licuación. Se pudo comprobar que este método aumenta la capacidad portante del suelo, minimiza los asentamientos y aumenta la rigidez del suelo.



## RECOMENDACIONES

1. Se sugiere evaluar el diseño de Columnas de Grava y Columnas de Módulo Controlado en distintos suelos del Perú con la finalidad de dar confiabilidad al sistema de inclusiones como solución a suelos con problema de licuación tomando como base el mapa de licuación realizado por Alva, J. como zonas de aplicación.
2. Para la identificación de zonas susceptibles a licuación y determinación de potencial de licuación se recomienda evaluar en base a la experiencia de autores especializados en el tema y revisar bibliografía para analizar los resultados obtenidos de las correlaciones del ensayo SPT; en esta investigación, además se recomienda seguir un registro de datos y teorías según tipo de suelo, aplicabilidad y año de publicación, por la cantidad de parámetros usados planteados de diversos autores para determinados tipos de métodos de mejoramiento.
3. En cuanto a proyectos de Columnas de Módulo Controlado, en nuestro medio su uso es reciente y se contaba con pocas investigaciones publicadas aplicadas en el Perú, y para Columnas de Grava se contaba con poca información en cuanto a aplicación en suelos con problemas de licuación, por ello se busca con esta investigación realizada, servir como un punto de apoyo para futuros estudios que relacionen ambas técnicas con la finalidad de homologar los sistemas bajo el respaldo de la normativa técnica de edificaciones peruana.
4. Se recomienda siempre tener en cuenta un registro de historial sísmico y tener en cuenta su afectación al tipo de estructura a proyectar, así proponer una adecuada magnitud sísmica de diseño. También dado a las diversas propuestas de diseño para las Columnas de Grava y la mejora continua que tienen la metodología de diseño siempre revisar artículos actualizados, en cuanto a las Columnas de Módulo Controlado se sugiere continuar con la investigación. Para ello también se recomienda utilizar softwares de elementos finitos más sofisticados 2D y 3D y estudiar previamente el punto fuerte del software y uso del mismo.
5. Se recomienda para el análisis del mejoramiento de suelos por inclusiones tener en cuenta el tipo de estructura a proyectar, el tipo de suelo y las características sugeridas de las soluciones a aplicar.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alva, J. (2007). *Cimentaciones Superficiales*. Universidad Nacional de Ingeniería – Lima. Recuperado de: [https://www.academia.edu/39218001/Dise%C3%B1o\\_de\\_Cimentaciones\\_Dr\\_Ing\\_Jorge\\_E\\_Alva\\_Hurtado](https://www.academia.edu/39218001/Dise%C3%B1o_de_Cimentaciones_Dr_Ing_Jorge_E_Alva_Hurtado)
- Alva, J. (2016). *Evaluación del Potencial de Licuación de Suelos*, Universidad Nacional de Ingeniería – Lima. Recuperado de: <http://www.jorgealvahurtado.com/files/6.EvaluacionPotencialLicuacion.pdf>
- Alva, J. y Ortiz C, (2019). *Actualización de la ocurrencia del fenómeno de licuación de suelos en el Perú*. Universidad Nacional de Ingeniería. Recuperado de: <http://www.jorgealvahurtado.com/files/Actualizacion%20de%20ocurrencia%20de%20%20Licuacion%20de%20Suelos-Peru.pdf>
- Amini, R. (2015). *Physical modelling of vibro stone column using recycled aggregates (Tesis Doctoral)*. University of Birmingham. Birmingham, Reino Unido. Recuperado de: <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/6498/4/Amini16PhD.pdf>
- Baez, J. (1995). *A Design Model for the Reduction of Soil Liquefaction by Vibro Stone Columns*. University of Southern California. Los Angeles, California. Recuperado de: <http://digitallibrary.usc.edu/cdm/ref/collection/p15799coll17/id/496293/>
- Bazán, O. (2018). *Tectónica andina y su componente cizallante alusivo al norte del Perú*. Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/323409629\\_TECTONICA\\_ANDINA\\_Y\\_SU\\_COMPONENTE\\_CIZALLANTE\\_Alusivo\\_al\\_norte\\_del\\_Peru](https://www.researchgate.net/publication/323409629_TECTONICA_ANDINA_Y_SU_COMPONENTE_CIZALLANTE_Alusivo_al_norte_del_Peru)
- Beltrán, J. y Días, D. (2018). *Análisis de la capacidad de carga admisible de los suelos de cimentación del Complejo Arqueológico Chan - Chan debido al ascenso del nivel freático (Tesis de pregrado)*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima. Recuperado de: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/625746>

- Boulagner, R y Idris, I (2014). *CPT and SPT Based liquefaction triggering procedures*. University of California at Davis. California, Estados Unidos de América. Recuperado de:  
[https://facultysand.engineering.ucdavis.edu/boulangier/wp-content/uploads/sites/71/2014/09/Boulangier\\_Idriss\\_CPT\\_and\\_SPT\\_Liq\\_triggering\\_CGM-14-01\\_20141.pdf](https://facultysand.engineering.ucdavis.edu/boulangier/wp-content/uploads/sites/71/2014/09/Boulangier_Idriss_CPT_and_SPT_Liq_triggering_CGM-14-01_20141.pdf)
- Bouckovalas, G. et al. (2009). *Gravel Drain Performance in Liquefiable Soils: Numerical Simulation and Applicability*. 2nd International Conference on Performance Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering. Taormina, Italia. Recuperado de:  
[https://www.researchgate.net/publication/281647158\\_Gravel\\_Drain\\_Performance\\_in\\_Liquefiable\\_Soils\\_Numerical\\_Simulation\\_and\\_Applicability](https://www.researchgate.net/publication/281647158_Gravel_Drain_Performance_in_Liquefiable_Soils_Numerical_Simulation_and_Applicability)
- Borjas M, (2012). *Metodología de la investigación científica para ingenieros*. Chiclayo. Recuperado de:  
[https://www.academia.edu/33692697/Metodolog%C3%ADa\\_de\\_Investigaci%C3%B3n\\_Cient%C3%ADfica\\_para\\_ingenier%C3%ADa\\_Civil](https://www.academia.edu/33692697/Metodolog%C3%ADa_de_Investigaci%C3%B3n_Cient%C3%ADfica_para_ingenier%C3%ADa_Civil)
- Braja M. Das. (2011). Principios de dinámica de suelos. Segunda Edición.
- Braja M. Das. (2015). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Cuarta Edición.
- Bray, J. and Sancio, R. (2006). *Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*
- Casaverde, L. y Vargas, J. (1980). *Zonificación Sísmica del Perú. II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-Resistente, OEA-PUCP, Lima-Perú*. Recuperado de:  
[http://gis.proviasnac.gob.pe/expedientes/2010/CP0007-2010/ExpTecn%20Puno-Ilave%20\(RD%201041-2009\)/VOL%2001%20MEMORIA%20DESCRIPTIVA/4.0%20GEOLOGIA/Andina\\_ILAVE.pdf](http://gis.proviasnac.gob.pe/expedientes/2010/CP0007-2010/ExpTecn%20Puno-Ilave%20(RD%201041-2009)/VOL%2001%20MEMORIA%20DESCRIPTIVA/4.0%20GEOLOGIA/Andina_ILAVE.pdf)
- Cabezas M. (2015). *Modelación del comportamiento de pilotes de grava en suelo tipo limo, mediante análisis de elementos finitos (Tesis de pregrado)*. Universidad Austral de Chile. Chile. Recuperado de:  
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2015/bmfcic114m/doc/bmfcic114m.pdf>

- Castiglia, M. y Magistris, F. (2018). *Prediction of the number of equivalent cycles for earthquake motion*. Universidad de Molise. Campobasso, Italia. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/323382242\\_Prediction\\_of\\_the\\_number\\_of\\_equivalent\\_cycles\\_for\\_earthquake\\_motion](https://www.researchgate.net/publication/323382242_Prediction_of_the_number_of_equivalent_cycles_for_earthquake_motion)
- Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres, (2013). *Estudios de Microzonificación Geotécnica Sísmica y evaluación del riesgo en zonas ubicadas en los distritos de Carabayllo y el Agustino (provincia y departamento de Lima); distrito del Cusco (provincia y departamento del Cusco); y distrito de Alto Selva Alegre (provincia y departamento de Arequipa)*. Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Ingeniería Civil. Lima. Recuperado de: [http://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA%20PUBLICAR/PREVAED/Microzonificacion%20geotecnica%20sismica%20y%20evaluacion%20del%20riesgo%20en%20zonas%20ubicadas%20en%20el%20distrito%20del%20Cusco\\_TomoII.pdf](http://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA%20PUBLICAR/PREVAED/Microzonificacion%20geotecnica%20sismica%20y%20evaluacion%20del%20riesgo%20en%20zonas%20ubicadas%20en%20el%20distrito%20del%20Cusco_TomoII.pdf)
- Chu, J., Varaksin, S., Klotz, U., Mengé, P. (2009). *Construction Processes. State of the Art Report 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, Alejandría*. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/258311283\\_construction\\_processes](https://www.researchgate.net/publication/258311283_construction_processes)
- EBGEO German Recommendations for Geosynthetic (2011). *Bewehrte Erdkörper auf embankments. Ground Engineering Vol. 21, pp. 12-17*.
- Espinoza, C. y Torres, C. (2019). *Evaluación técnica y económica para el mejoramiento de suelos finos con fines de cimentación, por medio de compactación dinámica e inclusiones rígidas (Tesis de pregrado)*. Universidad Ricardo Palma. Lima. Recuperado de: <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2928>
- U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (2017). *FHWA-NHI-16-027 Volume I. Publication No.-GROUND MODIFICATION METHODS*. Recuperado de: <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/nhi16027.pdf>

- Green, R., (2008). *Energy-Based Evaluation and Remediation of Liquefiable Soils*. Geotechnical Special Publication. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/35942604\\_Energy-Based\\_Evaluation\\_and\\_Remediation\\_of\\_Liquefiable\\_Soils](https://www.researchgate.net/publication/35942604_Energy-Based_Evaluation_and_Remediation_of_Liquefiable_Soils)
- Gómez, R. (2012). *Inclusiones rígidas - Análisis comparativo de los métodos analíticos y los métodos numéricos (Tesis de maestría)*, Centro de estudios y experimentación de obras públicas CEDEX Madrid, España. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/273123713\\_Inclusiones\\_Rigidas\\_-\\_Analisis\\_Comparativo\\_de\\_los\\_Metodos\\_Analiticos\\_y\\_los\\_Metodos\\_Numericos](https://www.researchgate.net/publication/273123713_Inclusiones_Rigidas_-_Analisis_Comparativo_de_los_Metodos_Analiticos_y_los_Metodos_Numericos)
- González, L.; Ferrer, M.; Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación, Madrid, 715 p.
- Han J. (2015). *Principles and practice of ground improvement*. Editorial John Wiley (cap 1,2,10). New Jersey, Estados Unidos de América
- Huu Hung Nguyen, (2018). *Effects of Installation Sequence of Concrete Rigid Inclusions by Ground-Displacement Piling Method on Previously Installed Columns (Tesis de doctorado)*, University of Technology Sydney. Australia. Recuperado de: <https://opus.lib.uts.edu.au/bitstream/10453/129465/2/02whole.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2017). *Estadística de PAM*. Recuperado de: [https://www.mimp.gob.pe/adultomayor/regiones/Cusco2.html#:~:text=El%20departamento%20de%20Cusco%20cuenta,poblaci%C3%B3n%20adulta%20mayor%20\(126%2C379\).](https://www.mimp.gob.pe/adultomayor/regiones/Cusco2.html#:~:text=El%20departamento%20de%20Cusco%20cuenta,poblaci%C3%B3n%20adulta%20mayor%20(126%2C379).)
- Idriss, I & Boulanger, R. (2008). *Soil Liquefaction During Earthquakes*. Editorial John Wiley. New Jersey, Estados Unidos de América.
- Jordán, T. et al (1983). *Andean Tectonics Related to Geometry of Subducted Nazca Plate*. Cornell University. New York, Estados Unidos de América. Recuperado de <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article-abstract/94/3/341/202828/Andean-tectonics-related-to-geometry-of-subducted?redirectedFrom=fulltext>
- Keller (2020). *Mitigación de licuación*, Recuperado el 18 de junio del 2020 de: <https://www.keller.com.es/experiencia/soluciones/mitigacion-de-licuacion>

- Kramer S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. University of Washington. New Jersey, Estados Unidos de América. Editorial Meg Weist.
- Manica, A. (2013), *Comportamiento dinámico de las inclusiones rígidas (Tesis de maestría)*. Universidad Nacional Autónoma de México. México. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/283510544\\_Comportamiento\\_dinamico\\_de\\_inclusiones\\_rigidas](https://www.researchgate.net/publication/283510544_Comportamiento_dinamico_de_inclusiones_rigidas)
- Martínez, E. (2013). *Refuerzo de suelos mediante el uso de inclusiones de grava compactada para apoyo de cimentaciones superficiales rígidas (Tesis de maestría)*, Universidad Autónoma de México, México. Recuperado de: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/6179/Tesis.pdf?sequence=1>
- McGuire, R. (1974). *Seismic structural response Risk Analysis incorporating Peak Response Regression on Earthquake Magnitude and Distance*. Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Civil Engineering.
- Medina, P. (2018). *Mejoramiento de Terreno en suelo licuable utilizando Inclusiones Rígidas (CMC) (Tesis de pregrado)*, Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima. Obtenido en <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/2041>
- Ministerio de fomento (2009). *Guía de cimentaciones en obras de carretera*. Ministerio de fomento. Dirección general de carreteras Gobierno de España. Recuperado de: <https://www.mitma.gob.es/carreteras/normativa-tecnica/08-geologia-y-geotecnia/81-guias-tecnicas>
- Ministerio de transportes y Comunicaciones (2013). *MANUAL DE CARRETERAS. Especificaciones técnicas generales para construcción*. EG-2013. R.D. N° 22-2013-MTC. Ministerio de transportes y Comunicaciones. Recuperado de: [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH\\_PDF/MAN\\_10%20EG%202013.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_10%20EG%202013.pdf)
- Ministerio de vivienda, Construcción y saneamiento (2012) *NORMA E020 Suelos y Taludes*. Ministerio de vivienda, Construcción y saneamiento. Gobierno del Perú. Recuperado de: <http://ww3.vivienda.gob.pe/DGPRVU/docs/RNE/T%C3%ADtulo%20II%20Ha>

bilitaciones%20Urbanas/15%20CE.020%20SUELOS%20Y%20TALUDES%20DS%20N%C2%B0%20017-2012.pdf

Ministerio de vivienda, Construcción y saneamiento (2018). *NORMA NTE050 Suelos y Cimentaciones*. Ministerio de vivienda, Construcción y saneamiento. Gobierno del Perú. Recuperado de: [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/300082/d231803\\_opt.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/300082/d231803_opt.pdf)

Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2016) *Estudio Definitivo para el Mejoramiento de la Carretera Huánuco - Conococha, Sector: Huánuco - La Unión - Huallanca Ruta PE - 3N*. Ministerio de Transporte y Comunicaciones. Recuperado de: [http://gis.proviasnac.gob.pe/expedientes/2017/LPI\\_0001\\_2017/Expedientes%20Tecnicos%20TRAMO%203/109%20Memoria%20Descriptiva.pdf](http://gis.proviasnac.gob.pe/expedientes/2017/LPI_0001_2017/Expedientes%20Tecnicos%20TRAMO%203/109%20Memoria%20Descriptiva.pdf)

Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2020). *Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco Chinchero – Urubamba en la Región Cusco Tramo 1 km 14+229.50 al 21+730*. Ministerio de Transporte y Comunicaciones. Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>

Núñez, F. (2017). *Control de asentamientos en terraplenes contruidos sobre suelo fino por medio de métodos de mejoramiento de suelos basados en vibrosustitución (Tesis de pregrado)*. Universidad Andrés Bello. Chile. Recuperado de <http://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/5023>

Olarte, J. (2005). *Bases técnicas para la estimación de perdidas con fines de seguros de terremoto*. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. Recuperado de: [https://www.sbs.gob.pe/Portals/0/jer/ss\\_ntcismid/Nota\\_tecnica.pdf](https://www.sbs.gob.pe/Portals/0/jer/ss_ntcismid/Nota_tecnica.pdf)

Pezo, R. (2019). *Evaluación de fenómenos geoambientales determinados entre Characta y hacienda Paican (Camaná) (Tesis de pregrado)*. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Perú. Recuperado de: <http://bibliotecas.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10865>

Pilotes Terratest (2020). *Mejoramiento de suelos*. Terra Foundations. Recuperado el 18 de junio del 2020 de [http://terratest.com.pe/sol3\\_mejoramiento.html](http://terratest.com.pe/sol3_mejoramiento.html)

- PLAXIS 3D Manuals (2019). *Plaxis 3d Tutorial Manual Connect*. Edición V20. Recuperado de: [https://www.academia.edu/42659089/PLAXIS\\_3D\\_Tutorial\\_Manual\\_CONNECT\\_Edition\\_V20](https://www.academia.edu/42659089/PLAXIS_3D_Tutorial_Manual_CONNECT_Edition_V20)
- Pollan, J. (2014). *Diseño basado en técnicas de fiabilidad del tratamiento de mejora del terreno mediante columnas de grava (Tesis doctoral)*, Universidad Politécnica de Madrid, España. Obtenido de <http://oa.upm.es/26409/>
- Poves, J. (2017). *Influencia de las columnas de grava compactada en el asentamiento de suelos blandos, sector de Palian (Tesis de pregrado)*. Universidad Nacional del Centro del Perú. Recuperado de: <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/4106#:~:text=Utilizando%20las%20columnas%20de%20grava,y%20las%20columnas%20de%20grava.>
- Puma M. y Rincon P. (2015). *Evaluación del Potencial de Licuación del material de relave en la Presa zona norte en la mina Cobriza (Tesis de pregrado)*. Universidad Ricardo Palma. Lima. Recuperado de: <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2217>
- Rayamajhi et al (2014). *Dense Granular Columns in Liquefiable Ground. I: Shear Reinforcement and Cyclic Stress Ratio Reduction Journal Geotech. Geoenviron. ASCE*. Estados Unidos.
- EBGEO (2011). *Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements*. Alemania
- Robertson, P y Wride, C (1998). *Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test*. Geotechnical Group, University of Alberta. Canada. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/254226691\\_Evaluating\\_cyclic\\_liquefaction\\_potential\\_using\\_the\\_cone\\_penetration\\_test](https://www.researchgate.net/publication/254226691_Evaluating_cyclic_liquefaction_potential_using_the_cone_penetration_test)
- Schaefer, V. (Mayo 2012). *Ground improvement in the 21st Century: A Comprehensive Web-Based Information System*. Recuperado el 18 de junio del 2020 de [https://www.researchgate.net/publication/268590835\\_Ground\\_Improvement\\_in\\_the\\_21st\\_Century\\_A\\_Comprehensive\\_Web-Based\\_Information\\_System](https://www.researchgate.net/publication/268590835_Ground_Improvement_in_the_21st_Century_A_Comprehensive_Web-Based_Information_System)



- Seed, H. y Booker, J. (1977). *Stabilisation of potentially liquefiable sand deposits using gravel drains*. American Society of Civil Engineers, Volume: 103. New York, Estados Unidos de America. Recuperado de:  
<https://trid.trb.org/view/60207>
- Seed, H et al (2003). *Recent advances in soil liquefaction*. University of California, Berkeley. Estados Unidos de America. Recuperado de:  
[https://www.researchgate.net/publication/314359545\\_C14\\_Recent\\_advances\\_in\\_soil\\_liquefaction\\_engineering\\_A\\_unified\\_and\\_consistent\\_framework](https://www.researchgate.net/publication/314359545_C14_Recent_advances_in_soil_liquefaction_engineering_A_unified_and_consistent_framework)
- Selcuk, L. y Kayabali, K. (2015). *Evaluation of the unconfined compressive strength of rocks using nail guns*. *Engineering Geology* 195(3) Pag 164-171. Recuperado de:  
[https://www.researchgate.net/publication/279206141\\_Evaluation\\_of\\_the\\_unconfined\\_compressive\\_strength\\_of\\_rocks\\_using\\_nail\\_guns](https://www.researchgate.net/publication/279206141_Evaluation_of_the_unconfined_compressive_strength_of_rocks_using_nail_guns)
- Shehab S. and Paul W. (2014) *Geotechnical LFRD Calculations of Settlement and Bearing Capacity of GDOT Shallow Bridge Foundations and Retaining Walls*. FHWA-GA-16-1426.
- Simon B. (2017). *General report S5 Rigid Inclusions and Stone Columns*. ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI Brussels. Francia. Recuperado de:  
[https://www.researchgate.net/publication/312303446\\_General\\_report\\_S5\\_Rigid\\_Inclusions\\_and\\_Stone\\_Columns](https://www.researchgate.net/publication/312303446_General_report_S5_Rigid_Inclusions_and_Stone_Columns)
- Soletanche Bachy Cimas (2020). *Mejoramiento de suelos* Recuperado el 18 de junio del 2020 de <http://sbc.ifactum.com/web/detallecategoria/solutions/920>
- Stok, D. (2010). *Apuntes de Estructuras de Contención en Suelo Reforzado*. Universidad Nacional La Plata. Argentina. Recuperado de:  
[https://www.academia.edu/12413852/APUNTE\\_DE\\_ESTRUCTURAS\\_DE\\_CONTENCI%C3%93N\\_EN\\_SUELO\\_REFORZADO](https://www.academia.edu/12413852/APUNTE_DE_ESTRUCTURAS_DE_CONTENCI%C3%93N_EN_SUELO_REFORZADO)
- Tavera H. (2014). *Evaluación del peligro asociado a los sismos y efectos secundarios en Perú*. Instituto Geofísico del Perú. Pg. 33-37. Recuperado de:  
<https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12816/777/peligrosismos-Per%C3%ba.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Tavera, H. y Bernal, Y. (2014) *Evaluación del peligro sísmico en el Perú*. Ministerio del Ambiente, Instituto Geofísico del Perú. Recuperado de: <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/783>
- Valdiviezo, K. (2019). Uso de columnas de grava compactada para aumentar la capacidad portante del suelo en la avenida Sánchez Cerro entre la avenida Chulucanas y avenida Mártires de Uchuraccay, ubicada en el distrito de Piura - Provincia de Piura -Departamento de Piura (Tesis de pregrado), Universidad Nacional de Piura.
- Vesic, A. (1975). *Bearing Capacity of Shallow Foundations*, Duke University. Estados Unidos de America.
- Zamora, J. (2017). *Optimización de tratamientos de suelos blandos bajo terraplenes* (Tesis de pregrado), Pontificia Universidad Católica del Perú. Recuperado de: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/5596>

## ANEXOS

Anexo N° 1:

Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	ALCANCE	POBLACIÓN	MUESTRA
<p><b>GENERAL</b></p> <p>- ¿Cómo mejorar el suelo en zona susceptible a licuación utilizando inclusiones, intercambio vial aeropuerto, Chincheros-Cusco?</p>	<p><b>GENERAL</b></p> <p>- Mejorar el suelo en zona susceptible a licuación utilizando inclusiones, intercambio aeropuerto</p>	<p><b>GENERAL</b></p> <p>- Mediante el uso de inclusiones mejoraremos las propiedades del suelo y el problema de licuación.</p>	<p>La investigación será de tipo descriptiva (cuantitativa)</p>	<p>Sectores inestables reconocidos en el proyecto.</p>	<p>Sector crítico del intercambio vial aeropuerto con presencia de licuación.</p>
<p><b>ESPECÍFICAS</b></p> <p>- ¿Cómo evaluar los parámetros geotécnicos para la identificación de zonas susceptibles a licuación?</p>	<p><b>ESPECÍFICOS</b></p> <p>- Evaluar los parámetros geotécnicos para la identificación de zonas susceptibles a licuación.</p>	<p><b>ESPECÍFICOS</b></p> <p>- Mediante los parámetros geotécnicos es posible identificar las zonas susceptibles a licuación</p>			
<p>- ¿Qué normativas y manuales existentes para la elección y el diseño de inclusiones son aplicables para la zona de estudio?</p>	<p>- Identificar las normativas y manuales existentes para la elección y el diseño de inclusiones son aplicables para la zona de estudio</p>	<p>- Mediante la correcta evaluación de normativas y manuales se puede elegir el sistema y diseño de inclusiones para la zona de</p>			
<p>- ¿Cómo el sistema de inclusiones mejora los suelos, minimizando los efectos de una posible falla del suelo por licuefacción durante un movimiento sísmico utilizando métodos analítico y numérico?</p>	<p>- Demostrar que el sistema de inclusiones mejora los suelos, minimizando los efectos de una posible falla del suelo por licuefacción durante un movimiento sísmico utilizando métodos analítico y numérico.</p>	<p>- Las inclusiones mejoran las propiedades de los suelos y minimizan los efectos de una posible falla por licuación demostrando mediante métodos analíticos y numéricos</p>			
<p>- ¿Cómo analizar los resultados obtenidos de la propuesta de diseño a la zona de estudio?</p>	<p>- Analizar los resultados obtenidos de la propuesta de diseño a la zona de estudio</p>	<p>Nuestra propuesta de diseño es aplicable para nuestra zona de estudio</p>			

Nota: Elaboración propia

Anexo N° 2:

Operación de Variable Independiente

Variable	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos	Ensayo Pasos
<b>Variable independiente</b>	Los métodos de mejoramiento de suelo por inclusiones emplean columnas cilíndricas continuas y mayormente verticales atraviesan los suelos blandos hasta llegar al sustrato resistente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mediante la correcta evaluación de normativas y manuales se puede elegir el sistema y diseño de inclusiones</li> <li>- Columnas de Grava</li> <li>- Columnas de Módulo Controlado (CMC)</li> </ul>	Diseño de la capa de reparto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Normativas y Manuales para inclusiones</li> <li>- Método Analítico</li> <li>- Método Numérico</li> </ul>	<p><b>Manuales y normas</b></p> <p>FHWA (2017), NTE050</p> <p><b>Métodos analíticos y numéricos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Criterios de Diseño planteados por diversos autores Boulagner (2014)</li> <li>- Modelación numérica Plaxis v20</li> </ul>
			Diseño de los diámetros y separación de las Columnas de Grava y de CMC		
<b>Variable dependiente</b>	Los métodos de mejoramiento de soporte consisten en la modificación las condiciones de fundación del suelo como mejoramiento de las características de los suelos y aumentando el rendimiento del diseño y/o operaciones de carga.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aspectos geotécnicos</li> <li>Análisis de la cimentación</li> <li>Presencia de Licuación en suelos Limo Arcillosos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investigaciones Geotécnicas directas e indirectas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Métodos de carga Admisibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ensayo de SPT, Ensayo estándar. Límites de Atterberg, Inhumedad, SUCSS, AASHTO, PE, Gs, Pu, Ensayo especiales: Corte Directo, Ensayos Químicos: pH, Refracción Sísmica, -Meyerhof (1963), Vesic (1973), AASHTO LRFD BDS (2004)</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Métodos de carga Admisibles</li> </ul>		
Mejoramientos de suelos			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Métodos de potencial de Licuación</li> </ul>	Método simplificado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Seed et al (2003), Bray y Sancio (2006), Adapazari (2010), A. Rauch (1998)</li> </ul>
				Método probabilístico	

Nota: Elaboración propia

Anexo N° 3:

Campo de aplicación de las principales técnicas de mejora de terreno

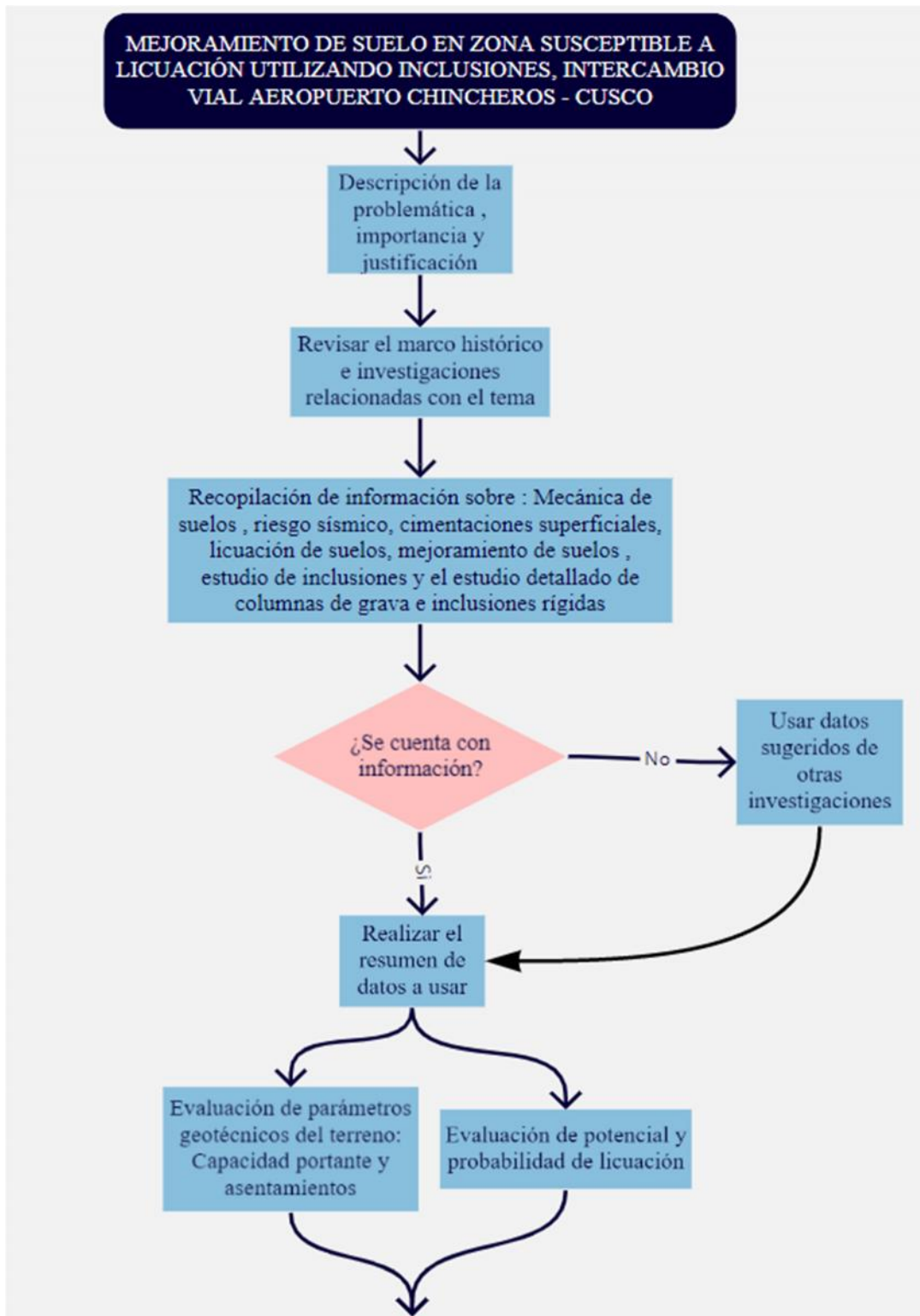
Técnica o tratamiento	Terreno		Resistencia	Mejora de Deformabilidad	Permeabilidad	Profundidad eficaz del tratamiento
	Granular	Cohesivo				
Sustitución del terreno	Suelos blandos, arcillas expansivas, suelos colapsables		Si	Si	Si	Menos de 3m
Compactación con rodillo	Cualquier terreno no saturado		Si	Si	No	Menos de 1m
Precargas	Si	Si	Si	Si	No	Varias decenas de metros
Mechas drenantes	No	Si	No	No	Si	Varias decenas de metros
Vibración profunda	Si	Si	Si	Si	No	Hasta 15m
Compactación dinámica	Cualquier tipo		Si	Si	No	Ver nota 01
Inyecciones	Hidrofracturación: Cualquier terreno		Algo	Si	Si	Hasta más 100m
	Desplazamiento: Cualquier terreno		Si	Si	Si	
Jet-Grouting	Cualquier tipo		Si	Si	Solo con columnas secantes	Menos de 20m
Columnas de grava	Cualquier tipo de suelo blando		Si	Si	Si	Menos de 20m
Columnas de suelo cemento	Cualquier tipo de suelo blando		Si	Si	No	Menos de 20m
Claveteado o cosido del terreno	Suelo de consistencia media o superior		Si	Si	No	Menos de 10m

Nota01: La profundidad a mejorar con la compactación dinámica depende de la energía específica, la densidad seca y asentamiento requerido

Nota02: Tomado manual del ministerio de fomento - España (2009), pg233. usado de referencia para la elección de las inclusiones de nuestra zona de estudio.

Anexo N° 4:

Flujograma de metodología de diseño

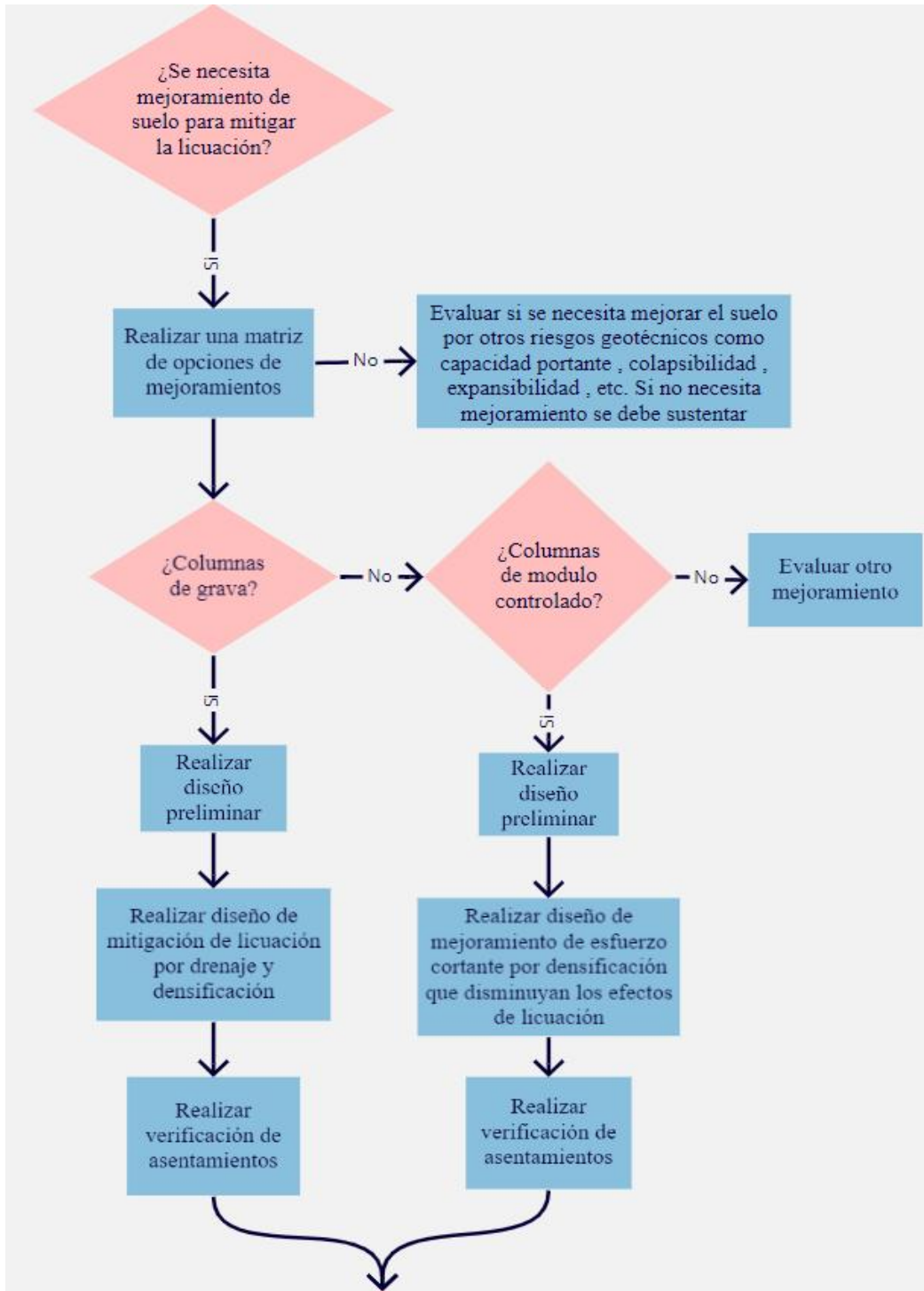


Nota: Elaboración propia

La primera parte del flujograma se realizará la pregunta de: ¿Se necesita mejoramiento de suelo para mitigar la licuación, entrando al flujograma de la etapa de diseño?

Anexo N° 5:

Flujograma de metodología de diseño

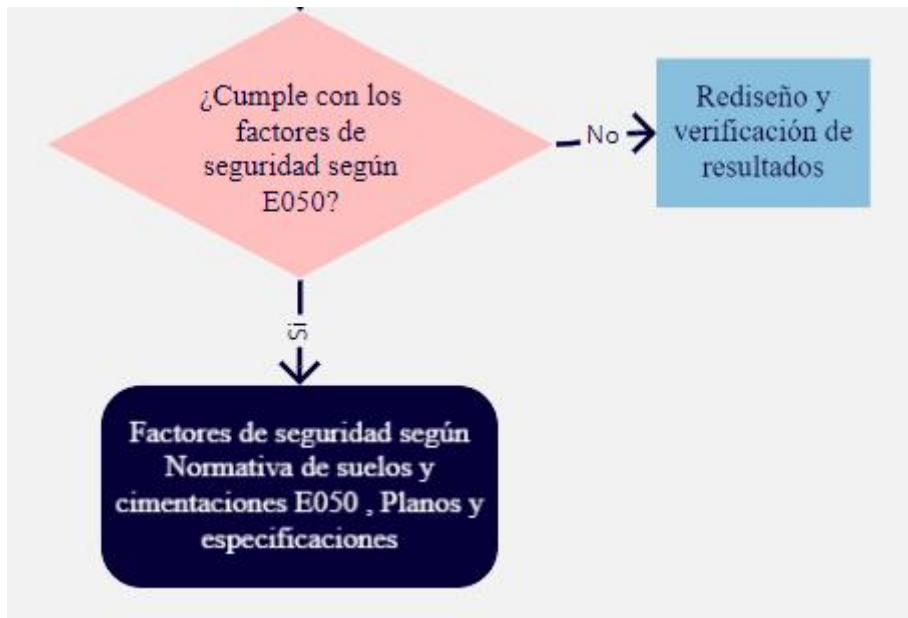


Nota: Elaboración propia

Una vez obtenido los diseños finales, expresado en el capítulo V, cabe recalcar que cada uno de los procesos deben ser verificados a las limitaciones que sugieres la normativa actual vigente para suelos y cimentaciones la cual es la E050.

Anexo N° 6:

Flujograma de verificación de diseño

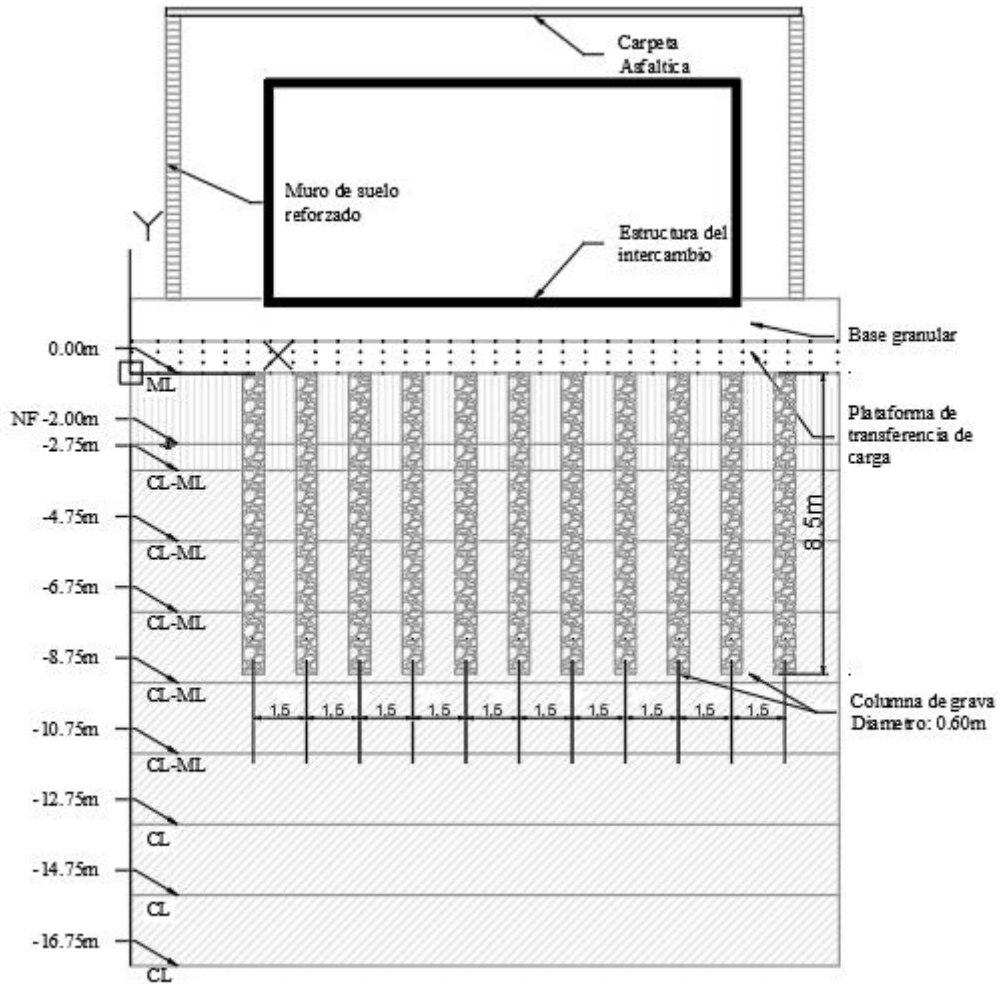


Nota: Elaboración propia



Anexo N° 7:

Esquema de propuesta de columnas de grava

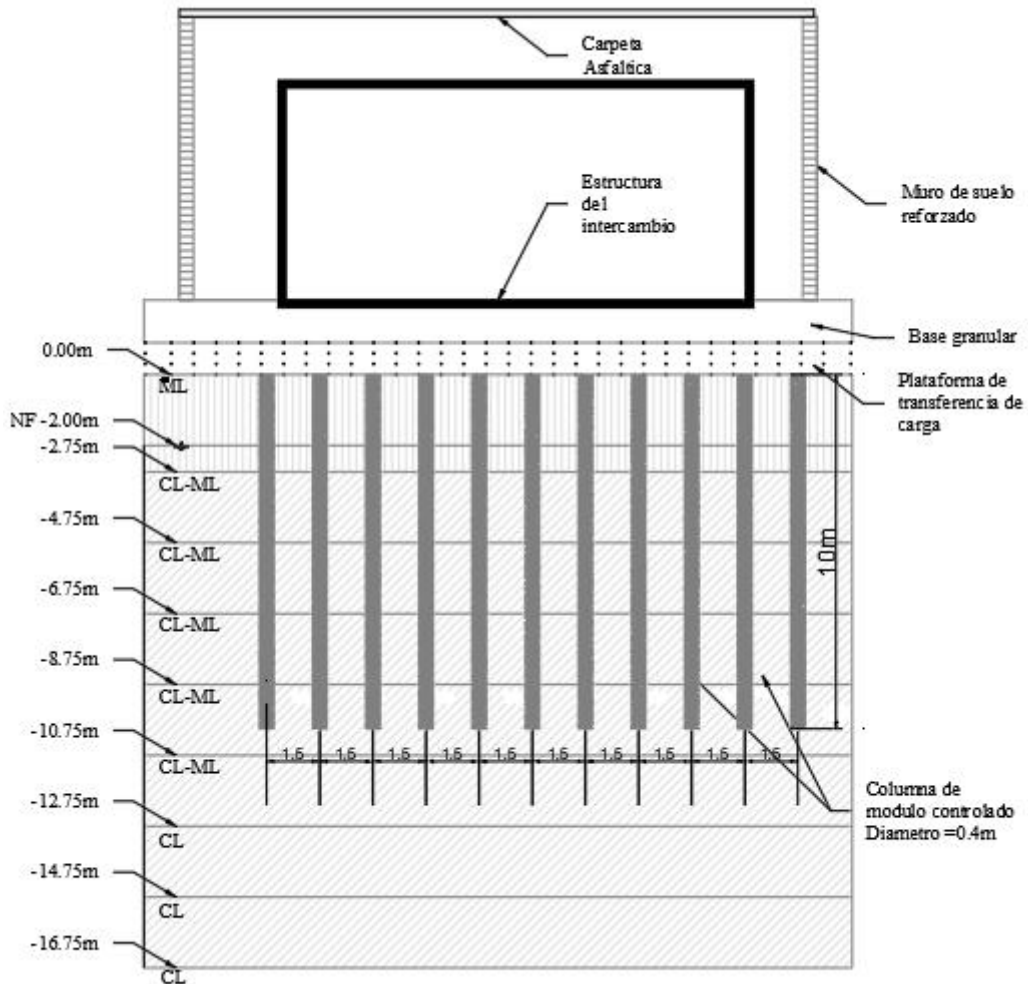


Nota: Elaboración propia

La propuesta final de la columna de grava, según los análisis realizados se obtuvo un espaciado cada 1.5m un diámetro de 0.6m y una longitud de 8.5m

Anexo N° 8:

Esquema de propuesta de Columnas de Módulo Controlado



Nota: Elaboración propia

La propuesta final de la columna de modulo controlad según los análisis realizados se obtuvo un espaciado cada 1.5m un diámetro de 0.4m y una longitud de 10m.

Con ello se espera hacer efectos los siguientes gastos propuestos en el anexo 09  
Presupuesto del proyecto de investigación

Anexo N° 9:

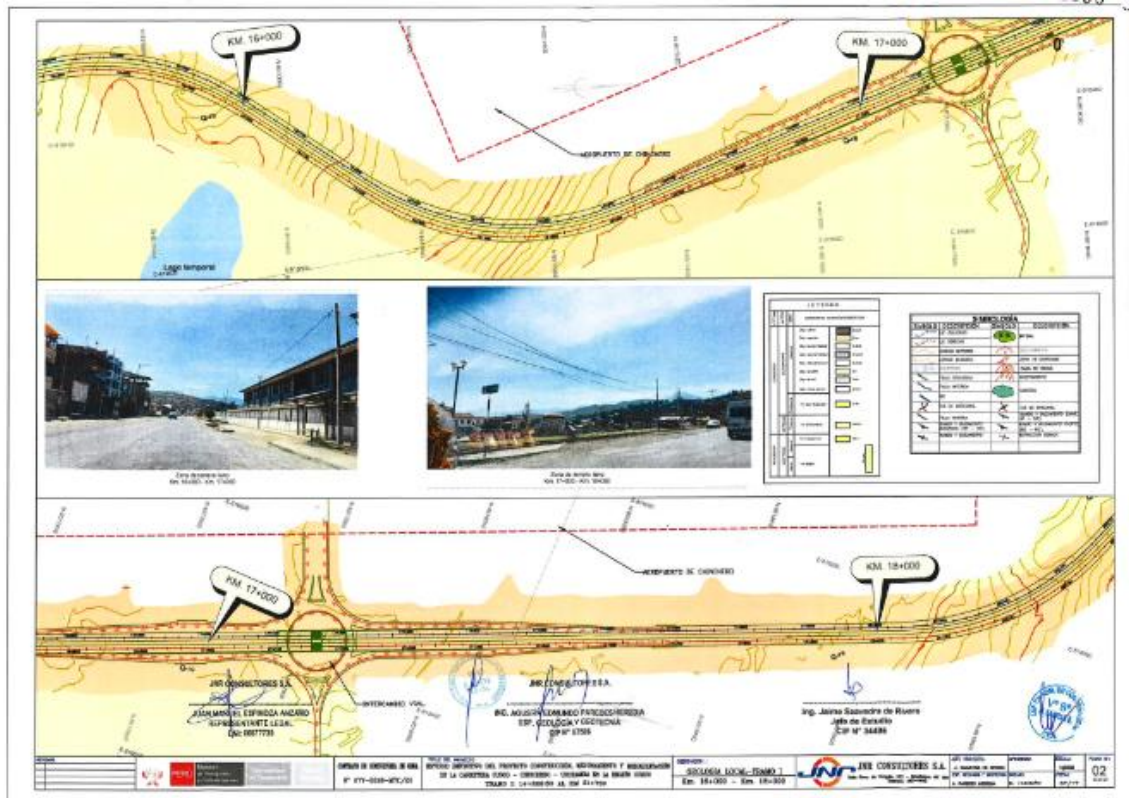
Presupuesto del proyecto de investigación

Ítem	Descripción	Und.	Cantidad	PU	Precio parcial (Soles)
<b>1</b>	<b>Recursos Físicos</b>				
	Útiles de escritorio	Glb	1	50	50
	Desgaste de equipos informáticos	Glb	2	200	400
<b>2</b>	<b>Recursos Humanos</b>				
	Asesores	Glb	2	6000	12000
<b>3</b>	<b>Servicios</b>				0
	Conexión a internet	Mes	5	100	500
	Fotocopias, impresiones y ploteos	Glb	1	400	400
	Empastado	Und.	3	30	90
<b>Costo Total</b>					<b>13440</b>

Nota: elaboración propia

Anexo N° 10:

Plano de Geología Local del Intercambio Aeropuerto.



Nota: Plano sacado del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (MTC, 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.



Anexo N° 12:

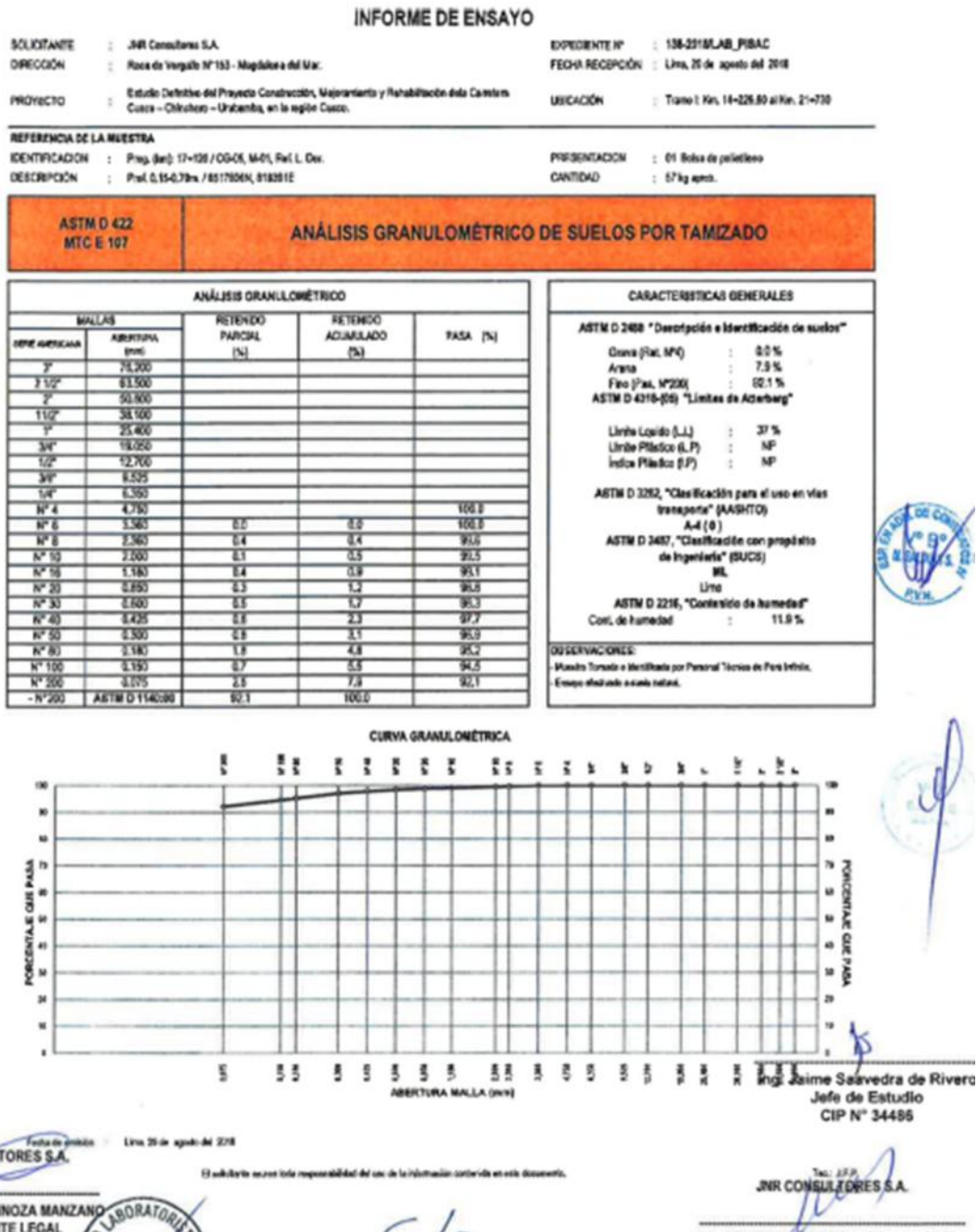
Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.



Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 13:

Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.



Nota: Información sacada del proyecto "Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730" (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 14:

Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.

**INFORME DE ENSAYO**

<b>SOLICITANTE</b> : JNR Consultores S.A. <b>DIRECCIÓN</b> : Pisco de Virgilio N° 153 - Magdalena del Mar. <b>PROYECTO</b> : Estado Definitivo del Proyecto Construcción, Mejoramiento y Rehabilitación de la Carretera Cusco - Chinchero - Urubamba, en la región Cusco.	<b>EXPEDIENTE</b> : 138-2018/LAB_PIBAC <b>FECHA RECEPCIÓN</b> : Lima, 29 de agosto del 2018 <b>UBICACIÓN</b> : Tramo 1 Km. 14+229.50 al Km. 21+730
---	--

---

<b>REFERENCIA DE LA MUESTRA</b> <b>IDENTIFICACIÓN</b> : Fog. (en) 17+105 / GG-06, M-01, Ref. L. Der. <b>DESCRIPCIÓN</b> : Pac. 8.15-0.78m. / 8317886N, 818381E	<b>PRESENTACIÓN</b> : 01 Bolsa de polietileno <b>CANTIDAD</b> : 07 kg aprox.
--	---

ASTM D 2216 MTC E. 108	DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO
---------------------------	--

DENOMINACIÓN	CONTENIDO DE HUMEDAD	
	E-1	E-2
Cápsula N°	136.0	427.0
Peso cápsula + suelo húmedo	391.0	630.8
Peso cápsula + suelo seco	364.9	630.4
Peso del Agua	26.1	30.4
Peso de la cápsula	140.0	357.4
Peso del suelo seco	224.9	269.0
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD</b>	<b>11.6</b>	<b>12.2</b>
	<b>11.9</b>	

**OBSERVACIONES:**  
 - Muestra Tomada e Identificada por Personal Técnico de Pisco Inédito.  
 - Ensayo efectuado a suelo natural.

Fecha de emisión : Lima, 29 de agosto del 2018



Handwritten signature

JNR CONSULTORES S.A.  
 ANUEL ESPINOZA MANZANO  
 REPRESENTANTE LEGAL  
 P.M. 18277796



Handwritten signature

Ing. Jaime Salvedra de Rivera  
 Jefe de Estudio  
 CIP N° 34486  
 JNR CONSULTORES S.A.  
 ING. AGUSTIN EDMUNDO PAREDES HEREDIA

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.



Anexo N° 15:

Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.

INFORME DE ENSAYO

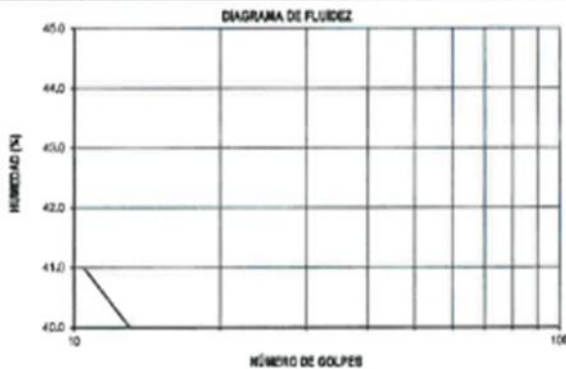
SOLICITANTE : JNR Consultores S.A. EXPEDIENTE : 136-2019/LAB\_PISAC  
 DIRECCIÓN : Rosa de Virgilio N°153 - Magdalena del Mar. FECHA RECEPCIÓN : Lima, 20 de agosto del 2019  
 PROYECTO : Estudio Definitivo del Proyecto Construcción, Mejoramiento y Rehabilitación de la Carretera Cusco - Chinchero - Urubamba, en la región de Cusco. UBICACIÓN : Tramo 1 Km. 14+229.50 al Km. 21+730

REFERENCIA DE LA MUESTRA  
 IDENTIFICACIÓN : Prog. (Int): TT+120 / CG-45, M-41, Rod. L. Der. PRESENTACIÓN : 01 Bolsas de polietileno  
 DESCRIPCIÓN : Prof. 6 150.70m / B1178NEM, 019319'E CANTIDAD : 27 kg aprox.

ASTM D 4318  
 MTC E 110, MTC E 111

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO  
 E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO	
	1	2	3	4	1	2
Ensayo N°						
Cápsula N°	135	90	75	41	~	~
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	36.81	34.77	31.29	42.57	~	~
Peso cápsula + suelo seco (g)	30.97	29.74	27.3	34.85	~	~
Peso del Agua (g)	5.84	5.03	3.99	5.72	~	~
Peso de la cápsula (g)	16.76	15.5	16.47	18.91	~	~
Peso del suelo seco (g)	14.21	13.24	10.83	15.94	~	~
Contenido de humedad (%)	39.7	38.0	36.8	36.5	~	~
Número de golpes	14	20	26	32		



RESULTADOS DE ENSAYOS	
LÍMITE LÍQUIDO (%)	37.8
LÍMITE PLÁSTICO (%)	MP
ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%)	MP
COMENTARIOS: Ensayo realizado al material presente en el mazo 140. Ensayo realizado mediante el "MÉTODICO DE MULTIPUNTO".	
OBSERVACION: Muestra Tomada e Identificada por Personal Técnico de Pvcj. Intello. Ensayo efectuado a suelo natural.	



*[Firma manuscrita]*

Fecha de emisión : Lima, 20 de agosto del 2019

El suscrito asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.

Tel.: J.F.F.  
 Fax: B.C.S.

R CONSULTORES S.A.  
 NUEL ESPINOZA MANZANO  
 REPRESENTANTE LEGAL  
 CINCOS LABORATORIA S.A. (Sello)

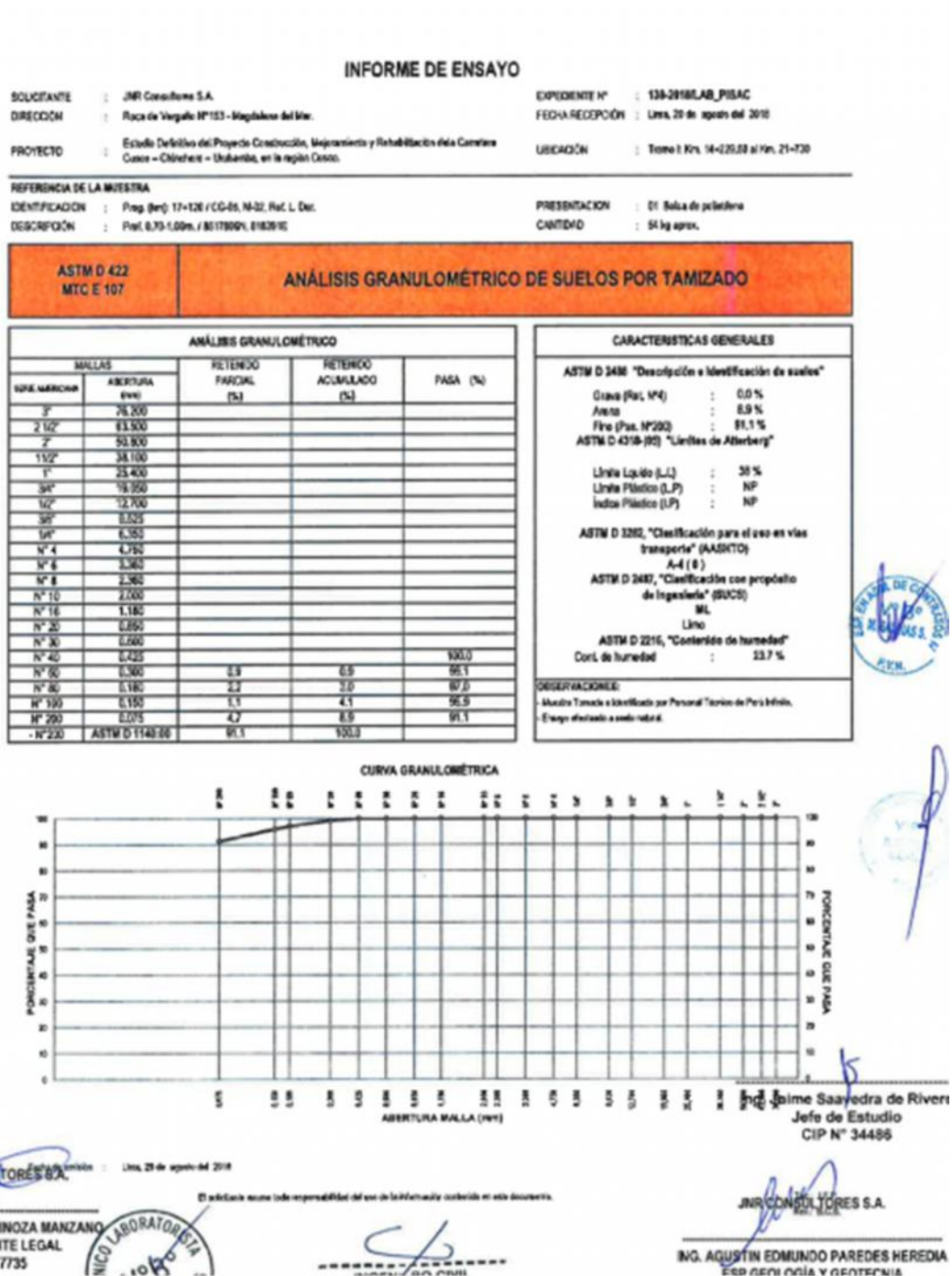
*[Firma manuscrita]*

*[Firma manuscrita]*  
 Ing. Jaime Saavedra de Riven  
 Jefe de Estudio  
 CIP N° 34488  
 JNR CONSULTORES S.A.  
 ING. AGUSTIN EDMUNDO PAREDES HEREDIA

Nota: Información sacada del proyecto "Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730" (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 16:

Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.



Nota: Información sacada del proyecto "Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730" (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gov.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 17:

Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.

**INFORME DE ENSAYO**

SOLICITANTE : JNR Consultores S.A.  
 DIRECCIÓN : Roca de Vergallo N°163 - Magdalena del Mar.  
 PROYECTO : Estudio Definitivo del Proyecto Construcción, Mejoramiento y Rehabilitación de la Carretera Cusco - Chinchero - Urubamba, en la región Cusco.

EXPEDIENTE : 138-2018/LAB\_PISAC  
 FECHA RECEPCIÓN : Lima, 20 de agosto del 2018  
 UBICACIÓN : Tramo 1: Km. 14+229.50 al Km. 21+730

REFERENCIA DE LA MUESTRA  
 IDENTIFICACIÓN : Prog. (km): 17+120 / CG-05, M-02, Ref. L. Der.  
 DESCRIPCIÓN : Prof. 0.70-1.00m. / 8517605N, 818391E

PRESENTACION : 01 Bolsa de polietileno  
 CANTIDAD : 54 kg aprox.

**ASTM D 2216  
 MTC E 108** **DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO**

DENOMINACIÓN	CONTENIDO DE HUMEDAD	
	E - 1	E - 2
Cápsula N°	341.0	141.0
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	310.0	390.7
Peso cápsula + suelo seco (g)	262.7	341.3
Peso del Agua (g)	47.3	49.4
Peso de la cápsula (g)	61.4	134.5
Peso del suelo seco (g)	201.3	206.8
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	23.5	23.9
	23.7	

OBSERVACIONES:  
 - Muestra Tomada e Identificada por Personal Técnico de Pari Infito.  
 - Ensayo efectuado a suelo natural.

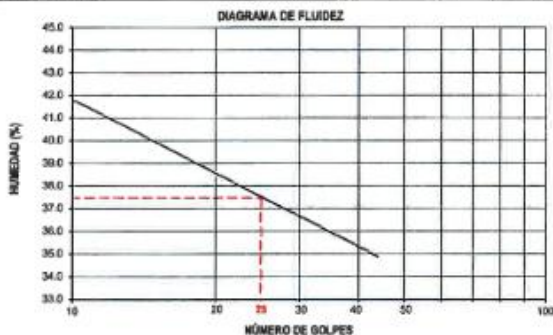


REFERENCIA DE LA MUESTRA  
 IDENTIFICACIÓN : Prog. (km): 17+120 / CG-05, M-02, Ref. L. Der.  
 DESCRIPCIÓN : Prof. 0.70-1.00m. / 8517605N, 818391E

PRESENTACION : 01 Bolsa de polietileno  
 CANTIDAD : 54 kg aprox.

**ASTM D 4318  
 MTC E 110, MTC E 111** **DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS**

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO	
	1	2	3	4	1	2
Ensayo N°						
Cápsula N°	104	61	299	43	--	--
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	33.67	31.1	33.34	32.18	--	--
Peso cápsula + suelo seco (g)	28.25	27.04	29.02	26.27	--	--
Peso del Agua (g)	5.42	4.06	4.32	3.91	--	--
Peso de la cápsula (g)	14.9	16.5	17.38	17.49	--	--
Peso del suelo seco (g)	13.35	10.54	11.64	10.78	--	--
Contenido de humedad (%)	40.6	38.5	37.1	36.3	--	--
Número de golpes	13	20	27	33		



RESULTADOS DE ENSAYOS	
LÍMITE LÍQUIDO (%)	37.5
LÍMITE PLÁSTICO (%)	NP
ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%)	NP
COMENTARIOS: - Ensayo realizado al material pasante la malla N°40. - Ensayo realizado mediante el "MÉTODO DE MULTIPUNTO".	
OBSERVACION: - Muestra Tomada e Identificada por Personal Técnico de Pari Infito. - Ensayo efectuado a suelo natural.	

Fecha de emisión : Lima, 28 de agosto del 2018

El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.

Tec.: J.F.P.  
 Rev.: B.C.S.

Nota: Información sacada del proyecto "Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730" (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

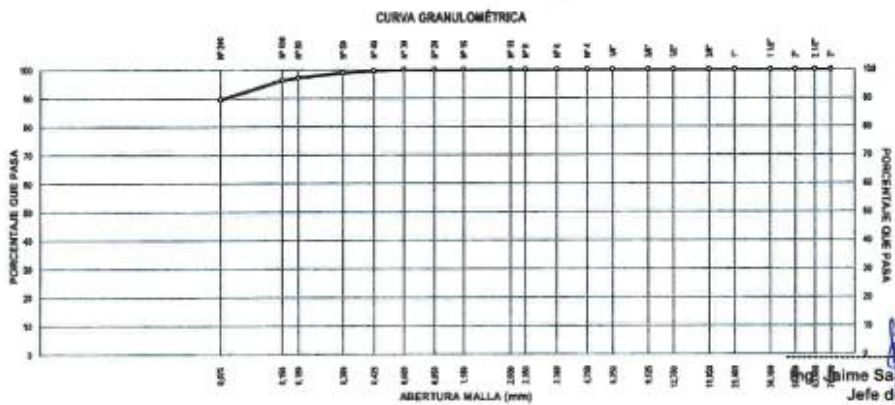
Anexo N° 18:

Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.

ASTM D 422 MTC E 107		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO		
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO				
MALLAS		RETENIDO PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PASA (%)
ESTR. AMERICANA	ABERTURA (mm)			
3"	76.200			
2 1/2"	63.500			
2"	50.800			
1 1/2"	38.100			
1"	25.400			
3/4"	19.050			
1/2"	12.700			
3/8"	9.525			
1/4"	6.350			
N° 4	4.750			
N° 6	3.300			
N° 8	2.360			
N° 10	2.000			
N° 16	1.180			
N° 20	0.850			
N° 30	0.600			100.0
N° 40	0.425	0.4	0.4	99.6
N° 50	0.300	0.7	1.1	98.9
N° 60	0.250	1.8	2.9	97.1
N° 80	0.190	0.9	3.8	96.2
N° 100	0.150	8.7	10.0	89.3
N° 200	0.075			
- N° 250	ASTM D 1140:00	89.3	100.0	

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
ASTM D 2488 "Descripción e identificación de suelos"	
Grava (Ret. M#)	: 0.0 %
arena	: 10.5 %
Fino (Pas. N°200)	: 89.5 %
ASTM D 4318-(85) "Límites de Atterberg"	
Límite Líquido (L.L.)	: 22 %
Límite Plástico (L.P.)	: NP
Índice Plástico (I.P.)	: NP
ASTM D 3282, "Clasificación para el uso en vías de transporte" (AASHTO)	
A-4 (0)	
ASTM D 2487, "Clasificación con propósito de Ingeniería" (SUCS)	
ML	
Limo	
ASTM D 2216, "Contenido de humedad"	
Cont. de humedad	: 31.6 %



REFERENCIA DE LA MUESTRA		PRESENTACION : 01 Bolsa de polietileno	
IDENTIFICACION	: Prog. (res): 17+120 / CG-05, M-03, Ret. L. Der.	CANTIDAD	: 54 kg aprox.
DESCRIPCION	: Pta. 1.60-3.50m. / 8517899N, 818381E		

ASTM D 2216 MTC E 108		DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO	
--------------------------	--	--	--

DENOMINACION	CONTENIDO DE HUMEDAD	
	E - 1	E - 2
Cápsula N°	294.0	364.0
Peso cápsula + suelo húmedo	425.1	384.4
Peso cápsula + suelo seco	348.9	319.2
Peso del Agua	76.2	75.2
Peso de la cápsula	107.8	84.2
Peso del suelo seco	241.1	235.0
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	31.6	32.0
	31.8	

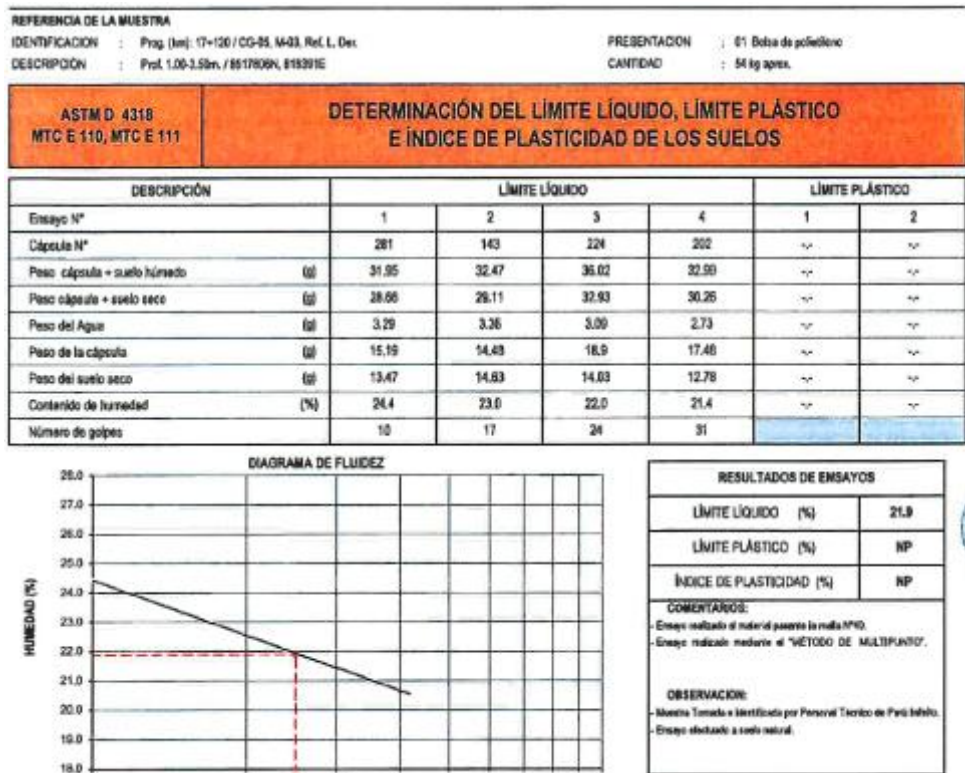
OBSERVACIONES:  
 - Muestra Tomada e Identificada por Personal Técnico de Perú Infratec.  
 - Ensayo efectuado a suelo natural.



Nota: Información sacada del proyecto "Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730" (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 19:

Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.



ASTM C 29 MTC E 283		PESO UNITARIO DEL AGREGADO GLOBAL			
PESO UNITARIO SUELTO DEL AGREGADO GLOBAL					
DESCRIPCION	UNIDAD	1	2	3	
Peso del Material + Peso del Molde	gr	8546	8546	8556	
Peso del Molde	gr	6420	6420	6420	
Peso del Material	gr	2126	2126	2136	
Volumen del Recipiente	cm <sup>3</sup>	2149	2149	2149	
Peso Unitario suelto (c/d)	gr/cm <sup>3</sup>	0.989	0.99	0.994	
PROMEDIO	kg/m <sup>3</sup>	991			

PESO UNITARIO VARELLADO DEL AGREGADO GLOBAL					
DESCRIPCION	UNIDAD	1	2	3	
Peso del Material + Peso del Molde	gr	9102	9097	9106	
Peso del Molde	gr	6420	6420	6420	
Peso del Material	gr	2682	2677	2686	
Volumen del Recipiente	cm <sup>3</sup>	2149	2149	2149	
Peso Unitario varellado (c/d)	gr/cm <sup>3</sup>	1.246	1.246	1.251	
PROMEDIO	kg/m <sup>3</sup>	1248			

OBSERVACIONES:  
 - Muestra Tomada e Identificada por Personal Técnico de Perú Inbitu.  
 - Ensayo efectuado al agregado global natural.

Nota: Información sacada del proyecto "Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730" (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 205:

Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.

INFORME DE ENSAYO					
SOLICITANTE	: JNR Consultores S.A.	EXPEDIENTE N°	: 138-2016/LAB_PISAC	FECHA RECEPCIÓN	: Lima, 20 de agosto del 2016
DIRECCIÓN	: Roca de Vergallo N° 153 - Magdalena del Mar.	PROYECTO	: Estado Definitivo del Proyecto Construcción, Mejoramiento y Rehabilitación de la Carretera Cusco - Chinchero - Urubamba, en la región Cusco.	UBICACIÓN	: Tramo 1: Km 14+229.50 al Km. 21+730
REFERENCIA DE LA MUESTRA			PRESENTACIÓN		
IDENTIFICACION	: Prog. (ser) 17+129 / CG-05, M-03, Ref. L. Der.	DESCRIPCIÓN	: Prof. 1.00-3.50m. / 8517069N, 818291E	PRESENTACION	: 01 Bolsa de polietileno
				CANTIDAD	: 60 kg aprox.
ASTM C 127 MTC E 206		METODO DE ENSAYO PARA OBTENER EL PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DEL AGREGADO GRUESO			
METODO DE LA CANASTILLA					
DESCRIPCION	UND	ENSAYO 1	ENSAYO 2	PROMEDIO	
Peso Mat. Sat. Sup. Seco ( en Aire )	...(A)	(g)	1,532.4	1,455.2	~
Peso Mat. Sat. Sup. Seco ( Sumergido en agua )	...(B)	(g)	945.2	857.5	~
Vol de Masa = Vol de Vacios = A - B	...(C)	(cm <sup>3</sup> )	586.2	597.7	~
Peso Mat. Seco a 105 °C	...(D)	(g)	1,489.2	1,404.7	~
Vol. de Masa = C - (A - D)	...(E)	(cm <sup>3</sup> )	534.0	507.2	~
PE Aparente = D/C		(T/m <sup>3</sup> )	2.525	2.519	2.522
PE Aparente ( S.S.S. ) = A/C		(T/m <sup>3</sup> )	2.614	2.609	2.612
PE Nominal = D/E		(T/m <sup>3</sup> )	2.772	2.770	2.771
Absorción = (A - D) / D		(%)	3.53	3.50	3.6
<p>DONDE:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mat. Sat. Sup. = Material Superficialmente Seco</li> <li>- Ps. = Peso Especifico</li> <li>- Mat. = Material</li> <li>- Vol. = Volúmenes</li> <li>- S.S.S. = Saturado con Superficie Seca</li> </ul> <p>OBSERVACIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Muestra Tomada e Identificada por Personal Técnico de Perti Infratec.</li> <li>- Ensayo efectuado al agregado grueso natural.</li> </ul>					
REFERENCIA DE LA MUESTRA		EQUIPO DE CORTE DIRECTO			
IDENTIFICACION	: Prog. (ser) 17+129 / CG-05, M-03, Ref. L. Der.	NOMBRE DE EQUIPO	: DIGITAL DIRECT / RESIDUAL SHEAR		
DESCRIPCION	: Prof. 1.00-3.50m. / 8517069N, 818291E	MARCA / MODELO	: FORNEY (AMERICANO)		
PRESENTACION	: 01 Bolsa de polietileno	FACTOR DE CELDA (R)	: X = 0		
CANTIDAD	: 30 kg aprox.				
ASTM D 3080		CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS			
DESCRIPCION DEL SUELO					
Clasificación SUCS (ASTM D 2487)	~	Limite Líquido (ASTM D 4318)	(%)	~	~
Clasificación OTRAS VÍAS (ASTM D 3282)	~	Índice Plástico (ASTM D 4318)	(%)	~	~
Tamaño Máximo (mm) (NTP 400.012)	~	Mat. más Fino N° 200 (ASTM D 1140)	(%)	~	~
Consistencia (s. fine) (NTP 339.150)	~	Cementación (s. grueso) (NTP 339.150)		~	~
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES DE ENSAYO					
DESCRIPCION		49.0 kPa	99.1 kPa	196.1 kPa	
Diámetro (cm)		6.358	6.356	6.356	
Área (cm <sup>2</sup> )		31.75	31.75	31.75	
Altura Inicial (cm)		2.50	2.50	2.50	
Altura Final (cm)		2.28	2.28	2.14	
Volumen Inicial (cm <sup>3</sup> )		79.38	79.38	79.38	
Volumen Final (cm <sup>3</sup> )		72.30	71.66	66.09	
Relación Diámetro / Altura		2.54	2.54	2.54	
Condición de la Estructura del suelo					
REMOLDEADA					
Peso Húmedo Inicial (g)		136.4	136.4	136.4	
Peso Húmedo Final (g)		149.7	147.3	146.7	
Peso Seco (g)		103.6	103.6	103.6	
Humedad Inicial (ASTM D 2216) (%)		31.6	31.6	31.6	
Humedad Final (ASTM D 2216) (%)		44.5	42.1	41.5	
Densidad Húmeda Inicial (g/cm <sup>3</sup> )		1.718	1.718	1.718	
Densidad Húmeda Final (g/cm <sup>3</sup> )		2.071	2.049	2.154	
Densidad Seca Inicial (g/cm <sup>3</sup> )		1.305	1.305	1.305	
Densidad Seca Final (g/cm <sup>3</sup> )		1.433	1.442	1.622	

Nota: Información sacada del proyecto "Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730" (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 21:

Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.

REFERENCIA DE LA MUESTRA		EQUIPO DE CORTE DIRECTO	
IDENTIFICACIÓN	: Prog. (Res): 17-107 / C0-45, M-61, Rel. L. Der.	NOMBRE DE EQUIPO	: DIGITAL DIRECT / RESIDUAL SHEAR
DESCRIPCIÓN	: Prof. 1.50-3.50m / 8517MM, 8163PE	MARCA / MODELO	: FORNEY (AMERICANO)
PRESENTACIÓN	: 01 Bolsas de polietileno	FACTOR DE CELDA (B)	: X + 0
CANTIDAD	: 36 kg		

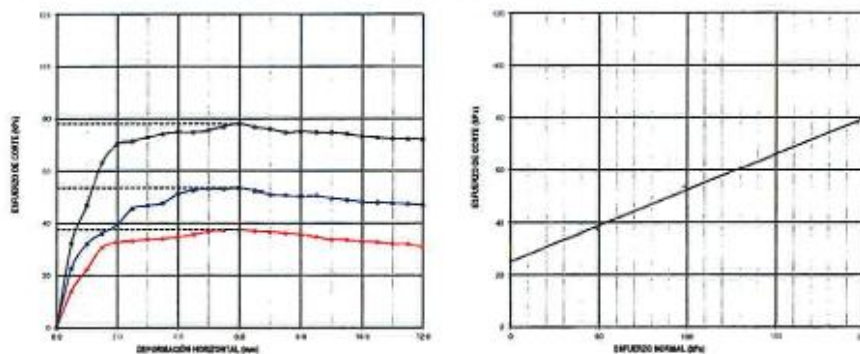
ASTM D 3080		CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS											
ESFUERZO NORMAL		49.0 kPa				98.1 kPa				196.1 kPa			
Espesor		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Altura	(cm)	2.50	2.28	2.50	2.26	2.50	2.24	2.50	2.24	2.50	2.14	2.50	2.14
Volumen	(cm <sup>3</sup> )	79.38	72.30	79.38	71.88	79.38	71.88	79.38	71.88	79.38	71.88	79.38	71.88
Humedad	(%)	31.6	44.5	31.6	42.1	31.6	42.1	31.6	42.1	31.6	41.6	31.6	41.6
Densidad Seca	(g/cm <sup>3</sup> )	1.305	1.433	1.305	1.442	1.305	1.442	1.305	1.442	1.305	1.442	1.305	1.442
Esfuerzo Corte	(kPa)		37.5		53.5		78.1		112.1		158.1		224.1

Desplaz. Horizontal (mm)	ESFUERZO NORMAL 49.0 kPa				ESFUERZO NORMAL 98.1 kPa				ESFUERZO NORMAL 196.1 kPa			
	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)
0.00	1.527	0.0	0.0	0.0	1.636	0.0	0.0	0.0	1.984	0.0	0.0	0.0
0.50	1.550	6.9	4.5	14.2	1.673	16.0	7.2	32.8	2.159	22.8	16.2	32.4
1.00	1.680	15.7	7.1	22.4	1.707	22.4	10.1	32.0	2.328	32.8	14.9	46.9
1.50	1.679	21.4	9.7	30.6	1.785	26.2	11.4	36.0	2.434	44.3	20.1	63.3
2.00	1.756	22.9	10.4	32.7	1.887	27.8	12.5	36.4	2.533	48.2	22.3	76.3
2.50	1.781	23.4	10.6	33.4	2.005	31.9	14.5	45.5	2.655	50.0	22.7	71.5
3.00	1.877	23.6	10.7	33.7	2.257	32.6	14.8	46.6	2.755	51.0	23.1	72.9
3.50	1.957	23.6	10.8	34.6	2.288	33.4	15.1	47.7	2.840	51.8	23.5	74.0
4.00	2.004	24.3	11.8	34.7	2.291	35.5	15.2	51.1	2.977	52.4	23.8	74.9
4.50	2.037	24.9	11.3	35.6	2.302	36.7	16.7	52.5	3.074	52.5	23.8	75.0
5.00	2.071	25.7	11.7	36.8	2.314	37.2	16.9	53.1	3.141	53.0	24.0	75.7
5.50	2.102	26.1	11.8	37.3	2.325	37.1	16.8	53.1	3.221	53.9	24.5	77.0
6.00	2.142	26.2	11.9	37.5	2.329	37.4	17.0	53.5	3.317	54.7	24.8	78.1
6.50	2.170	25.9	11.8	37.0	2.331	35.7	16.7	52.5	3.387	53.7	24.4	76.7
7.00	2.191	25.7	11.7	36.8	2.336	35.8	16.2	51.1	3.461	53.2	24.1	76.0
7.50	2.203	25.3	11.5	36.1	2.337	35.5	16.1	50.7	3.491	52.3	23.7	74.7
8.00	2.212	25.0	11.3	36.7	2.347	35.2	16.0	50.3	3.534	52.5	23.8	75.0
8.50	2.216	24.3	11.0	34.7	2.362	35.2	16.0	50.3	3.551	52.3	23.7	74.7
9.00	2.225	23.7	10.7	33.8	2.362	34.6	15.7	49.4	3.555	52.2	23.7	74.6
9.50	2.226	23.5	10.7	33.6	2.365	34.2	15.5	48.8	3.581	51.9	23.5	74.1
10.00	2.235	23.0	10.5	32.9	2.377	33.6	15.2	48.0	3.594	51.3	23.2	73.3
10.50	2.248	22.9	10.4	32.7	2.385	33.5	15.2	47.9	3.687	50.9	23.1	72.7
11.00	2.250	22.5	10.2	32.1	2.388	33.4	15.1	47.7	3.607	50.7	23.0	72.4
11.50	2.250	22.4	10.2	32.0	2.393	33.1	15.0	47.3	3.617	50.6	22.9	72.3
12.00	2.250	21.6	9.8	30.9	2.393	32.9	14.9	47.0	3.609	50.4	22.9	72.0

OBSERVACIONES:

ASTM D 3080		CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS									
-------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



RESULTADOS DE ENSAYO			
COHESIÓN (kPa)	25.18	ANGULO DE FRICCIÓN (°)	15.4
COHESIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )	0.26		

OBSERVACIONES:

- Muestra Tomada e Identificada por Personal Técnico de Perú Infrin.
- Ensayo efectuado con Muestra Remoldeada.

Nota: Información sacada del proyecto "Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730" (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 22:

Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.

**INFORME DE ENSAYO**

SOLICITANTE : JNR Consultores S.A.  
 DIRECCIÓN : Rosa de Vergara N°153 - Magdalena del Mar.  
 PROYECTO : Estudio Definitivo del Proyecto Construcción, Mejoramiento y Rehabilitación de la Carretera Cusco - Chinchero - Urubamba, en la región Cusco.  
 EXPEDIENTE : 138-2018/LAB\_PISAC  
 FECHA RECEPCIÓN : Lima, 23 de agosto del 2018  
 UBICACIÓN : Tramo I: Km. 14+229.50 al Km. 21+730

REFERENCIA DE LA MUESTRA  
 IDENTIFICACIÓN : Prog. (km): 17+120 / CG-05, M-03, Ref. L. Det.  
 DESCRIPCIÓN : Prof. 1.00-3.50m. / 8517806N, 818391E  
 PRESENTACIÓN : 01 Bolsa de polietileno  
 CANTIDAD : 54 kg aprox.  
 CONDICIONES AMBIENTALES  
 TEMP. AMBIENTE (°C) : 22 °C  
 TEMP. MUESTRA (°C) : 22 °C  
 HUM. RELATIVA : 67 %

**NTP 339.176 MÉTODO DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH) EN SUELOS Y AGUA SUBTERRÁNEA**

IDENTIFICACIÓN	POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)
Prog. (km): 17+120 / CG-05, M-03, Ref. L. Det.	8.5

OBSERVACIONES:  
 - Muestra Tomada e Identificada por Personal Técnico de Perú Infinito.  
 - Correlación entre (ppm) y (%): 10,000 \* (%) = (ppm)

Fecha de emisión : Lima, 23 de agosto del 2018

Tec: J.F.P.  
 Rev: B.C.S.

El editor asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.

REFERENCIA DE LA MUESTRA  
 IDENTIFICACIÓN : Prog. (km): 17+120 / CG-05, M-03, Ref. L. Det.  
 DESCRIPCIÓN : Prof. 1.00-3.50m. / 8517806N, 818391E  
 PRESENTACIÓN : 01 Bolsa de polietileno  
 CANTIDAD : 54 kg aprox.  
 CONDICIONES AMBIENTALES  
 TEMP. AMBIENTE (°C) : 22 °C  
 TEMP. MUESTRA (°C) : 22 °C  
 HUM. RELATIVA : 67 %

**NTP 339.152 MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE SALES SOLUBLES EN SUELOS Y AGUA SUBTERRÁNEA**

IDENTIFICACIÓN	SALES SOLUBLES (%)
Prog. (km): 17+120 / CG-05, M-03, Ref. L. Det.	0.0683

OBSERVACIONES:  
 - Muestra Tomada e Identificada por Personal Técnico de Perú Infinito.  
 - Correlación entre (ppm) y (%): 10,000 \* (%) = (ppm)



Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.



Anexo N° 23:

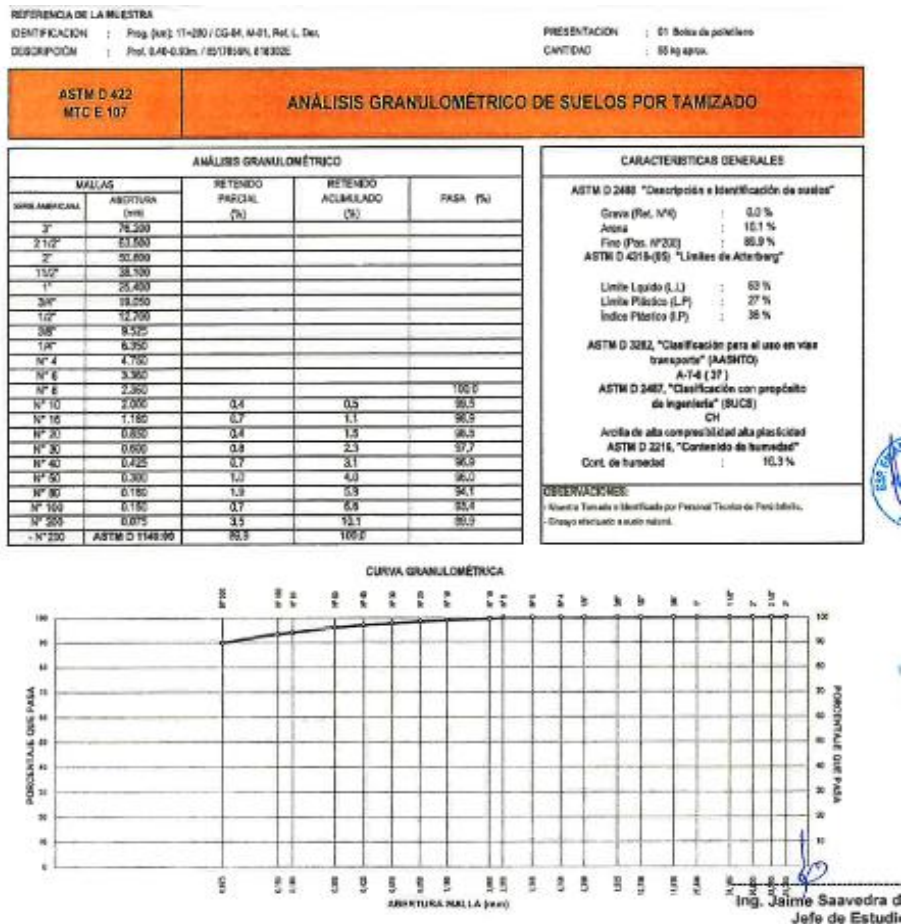
Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.



Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 24:

Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.



REFERENCIA DE LA MUESTRA  
 IDENTIFICACION : Prog. (km): 17+200 / CG-04, M-01, Ref. L. Der.  
 DESCRIPCION : Prof. 0.40-0.90m. / 8517859N, 818302E

PRESENTACION : 01 Bolsa de polietileno  
 CANTIDAD : 55 kg aprox.

**ASTM D 2216  
MTC E 108** **DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO**

DENOMINACIÓN	CONTENIDO DE HUMEDAD	
	E - 1	E - 2
Cápsula N°	479.0	389.0
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	734.2	404.9
Peso cápsula + suelo seco (g)	688.4	359.2
Peso del Agua (g)	44.8	45.7
Peso de la cápsula (g)	409.4	84.0
Peso del suelo seco (g)	280.0	275.2
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	16.0	16.8
	16.3	

**OBSERVACIONES:**  
 - Muestra Tomada e Identificada por Personal Técnico de Período Inicial.  
 - Ensayo efectuado a suela natural.

Nota: Información sacada del proyecto "Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730" (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

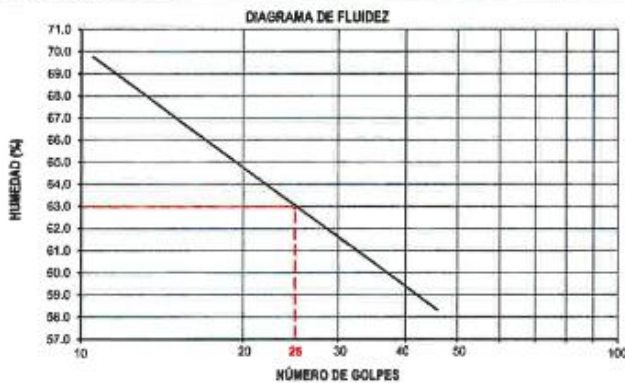
Anexo N° 25:

Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.

REFERENCIA DE LA MUESTRA						
IDENTIFICACION : Prop (km): 17+200 / CG-04, M-01, Ref. L. Der.			PRESENTACION : 01 Bolsa de polietileno			
DESCRIPCIÓN : Prof. 0.40-0.60m. / 8517855N, 818302E			CANTIDAD : 55 kg aprox.			

ASTM D 4318 MTC E 110, MTC E 111		DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS					
DESCRIPCIÓN		LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO	
Ensayo N°		1	2	3	4	1	2
Cápsula N°		215	255	36	67	169	106
Peso cápsula + suelo húmedo	(g)	43.02	40.06	40.18	37.7	23.87	31.36
Peso cápsula + suelo seco	(g)	32.9	31.6	31.98	28.98	21.81	28.24
Peso del Agua	(g)	10.12	8.26	8.21	8.72	2.06	3.12
Peso de la cápsula	(g)	17.93	18.85	18.76	14.57	14.17	16.76
Peso del suelo seco	(g)	14.97	12.85	13.22	14.41	7.94	11.48
Contenido de humedad	(%)	67.6	64.3	62.1	60.5	27.0	27.2
Número de golpes		14	21	28	35		



RESULTADOS DE ENSAYOS	
LÍMITE LÍQUIDO (%)	63.0
LÍMITE PLÁSTICO (%)	27.1
ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%)	35.9

**COMENTARIOS:**

- Ensayo realizado al material pasante la malla N°40.
- Ensayo realizado mediante el "MÉTODO DE MULTIPUNTO".

**OBSERVACION:**

- Muestra Tomada e Identificada por Personal Técnico de Perú Infratec.
- Ensayo efectuado a suelo natural.

ASTM D 422 MTC E 107		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO		
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO				
MALLAS		RETENIDO PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PASA (%)
NO. AMERICANA	ABERTURA (mm)			
2"	76.200			
3/4"	33.000			
2"	50.800			
1 1/2"	38.100			
1"	25.400			
3/4"	19.000			
1/2"	12.500			
3/8"	9.525			
1/4"	6.350			
N° 4	4.750			100.0
N° 6	3.350	0.4	0.4	99.6
N° 8	2.360	0.4	0.8	99.2
N° 10	2.000	0.1	1.0	99.0
N° 16	1.180	0.4	1.4	98.6
N° 20	0.850	0.2	1.6	98.4
N° 30	0.600	0.3	1.9	98.1
N° 40	0.425	0.4	2.3	97.7
N° 50	0.300	1.2	3.5	96.5
N° 60	0.250	3.3	6.7	93.3
N° 100	0.150	1.6	8.3	91.7
N° 200	0.075	7.9	16.2	83.8
- N° 750	ASTM D 1540-00	83.8	100.0	

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
ASTM D 2488 "Descripción e identificación de suelos"	
Grava (Ret. N°6)	: 0.0 %
Arena	: 10.2 %
Fino (Pas. N°200)	: 89.8 %
ASTM D 4316-(05) "Límites de Atterberg"	
Límite Líquido (LL)	: 17 %
Límite Plástico (LP)	: NP
Índice Plástico (I.P)	: NP
ASTM D 3283, "Clasificación para el uso en vías de transporte" (AASHTO)	
A-4 (0)	
ASTM D 2487, "Clasificación con propósito de ingeniería" (SUCS)	
ML	
Limo con arena	
ASTM D 2216, "Contenido de humedad"	
Cont. de humedad	: 30.5 %

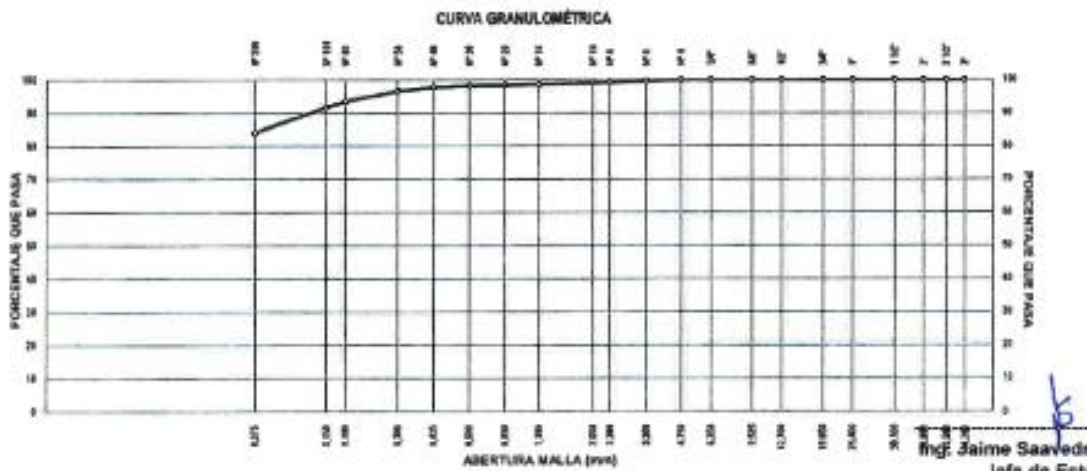
**OBSERVACIONES:**

- Muestra Tomada e Identificada por Personal Técnico de Perú Infratec.
- Ensayo efectuado a suelo natural.

Nota: Información sacada del proyecto "Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730" (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 26:

Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.



### INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : JNR Consultores S.A.  
 DIRECCIÓN : Roca de Vergallo N°183 - Magdalena del Mar.  
 PROYECTO : Estudio Definitivo del Proyecto Construcción, Mejoramiento y Rehabilitación de la Carretera Cusco - Chinchero - Urubamba, en la región Cusco.

EXPEDIENTE : 138-2018/LAB\_PISAC  
 FECHA RECEPCIÓN : Lima, 20 de agosto del 2018  
 UBICACIÓN : Tramo 1 Km. 14+229.50 al Km. 21+730

#### REFERENCIA DE LA MUESTRA

IDENTIFICACIÓN : Prog. (Int.) 17-200 / CG-04, M-02, Ref. L. Der.  
 DESCRIPCIÓN : Post. 0,30-2,70m. / 8517855N, 818302E  
 PRESENTACIÓN : 01 Bolsa de polipropileno  
 CANTIDAD : 60 kg aprox.

**ASTM D 2216  
MTC E 168**      **DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO**

DENOMINACIÓN	CONTENIDO DE HUMEDAD	
	E - 1	E - 2
Cápsula N°	90.0	206.0
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	345.6	431.8
Peso cápsula + suelo seco (g)	280.7	361.8
Peso del Agua (g)	64.9	70.0
Peso de la cápsula (g)	65.0	135.4
Peso del suelo seco (g)	215.7	226.4
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	30.1	30.9
	<b>30.5</b>	

**OBSERVACIONES:**

- Muestra Tomada e Identificada por Personal Técnico de Peñón Infratec.
- Ensayo efectuado a suelo natural.

Fecha de emisión : Lima, 20 de agosto del 2018

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 27101:

Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.

### INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : JNR Consultores S.A.  
 DIRECCIÓN : Roca de Vespillo N°153 - Maglabra del Mar.  
 PROYECTO : Estado Definitivo del Proyecto Construcción, Mejoramiento y Rehabilitación de la Carretera Cusco - Chinchero - Urubamba, en la región Cusco.  
 EXPEDIENTE : 138-2018/LAB\_PISAC  
 FECHA RECEPCIÓN : Lima, 20 de agosto del 2018  
 UBICACIÓN : Tramo I: Km. 14+229.50 al Km. 21+730

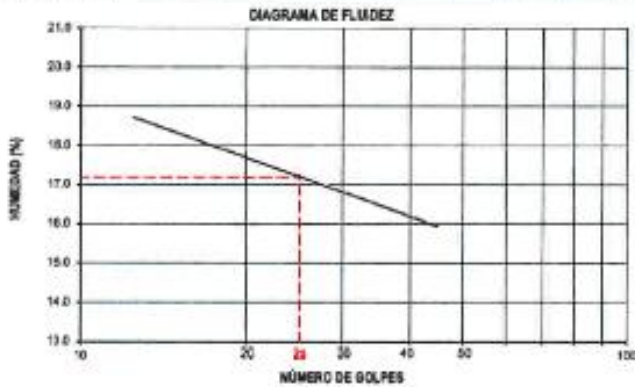
#### REFERENCIA DE LA MUESTRA

IDENTIFICACION : Prog. (km): 17+300 / CG-04, M-02, Rd. L. Der.  
 DESCRIPCIÓN : Prof. 0.99-2.73m. / 6517856N, 61832E  
 PRESENTACION : 01 Bulto de polietileno  
 CANTIDAD : 60 kg aprox.

### ASTM D 4318 MTC E 110, MTC E 111

### DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO	
	1	2	3	4	1	2
Ensayo N°	291	196	114	110	--	--
Cápsula N°	291	196	114	110	--	--
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	30.70	31.18	26.73	29.82	--	--
Peso cápsula + suelo seco (g)	28.39	28.77	24.52	27.99	--	--
Peso del Agua (g)	2.4	2.41	1.81	1.84	--	--
Peso de la cápsula (g)	15.19	14.96	14.26	16.85	--	--
Peso del suelo seco (g)	13.2	13.81	10.26	11.13	--	--
Contenido de humedad (%)	16.2	17.5	17.0	16.5	--	--
Número de golpes	16	22	26	34		



RESULTADOS DE ENSAYOS	
LÍMITE LÍQUIDO (%)	17.2
LÍMITE PLÁSTICO (%)	NP
ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%)	NP
COMENTARIOS:	
- Ensayo realizado al material pasado la malla N°60.	
- Ensayo realizado mediante el "MÉTODO DE MULTIPUNTO".	
OBSERVACION:	
- Muestra Turnada e Identificada por Personal Técnico de Pisco Infría.	
- Ensayo efectuado a nivel natural.	

Fecha de emisión : Lima, 20 de agosto del 2018

### ASTM C 127 MTC E 266

### METODO DE ENSAYO PARA OBTENER EL PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DEL AGREGADO GRUESO

METODO DE LA CANASTILLA					
DESCRIPCIÓN	UNID	ENSAYO 1	ENSAYO 2	PROMEDIO	
Peso Mat. Sat. Sup. Seco ( en Aire )	--(A)	(g)	1,476.2	1,097.2	--
Peso Mat. Sat. Sup. Seco ( Sumergido en agua )	--(B)	(g)	921.3	1,059.7	--
Vol de Masa + Vol de Vacíos = A - B	--(C)	(cm <sup>3</sup> )	554.9	638.5	--
Peso Mat. Seco a 105 °C	--(D)	(g)	1,436.8	1,046.8	--
Vol. de Masa = C - (A - D)	--(E)	(cm <sup>3</sup> )	514.5	590.1	--
PE Aparente = D/C		(T/m <sup>3</sup> )	2,587	2,582	2,585
PE Aparente ( S.B.S. ) = A/C		(T/m <sup>3</sup> )	2,690	2,058	2,659
PE Nominal = D/E		(T/m <sup>3</sup> )	2,791	2,764	2,792
Absorción = (A - D) / D		(%)	2.81	2.94	2.9

Nota: Información sacada del proyecto "Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730" (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 28:

Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.

ASTM D 3080		CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS			
DESCRIPCIÓN DEL SUELO					
Clasificación SUCS (ASTM D 2487)	--	Límite Líquido (ASTM D 4318)	(%)	--	--
Clasificación Obras Viales (ASTM D 3282)	--	Índice Plástico (ASTM D 4318)	(%)	--	--
Tamaño Máximo (mm) (NTP 400.012)	--	Mat. más Fino N° 200 (ASTM D 1140)	(%)	--	--
Coherencia (s. fino) (NTP 339.150)	--	Cementación (s. grueso) (NTP 339.150)		--	--
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPESIMENES DE ENSAYO					
DESCRIPCIÓN		49.0 kPa	98.1 kPa	196.1 kPa	
Dímetro (cm)		6.350	6.350	6.350	
Área (cm <sup>2</sup> )		31.75	31.75	31.75	
Altura Inicial (cm)		2.50	2.50	2.50	
Altura Final (cm)		2.26	2.15	2.14	
Volumen Inicial (cm <sup>3</sup> )		79.38	79.38	79.38	
Volumen Final (cm <sup>3</sup> )		71.62	68.12	68.05	
Relación Diámetro / Altura		2.54	2.54	2.54	
CONDICIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO					
REMOLEADA					
Peso Húmedo Inicial (g)		140.3	140.3	140.3	
Peso Húmedo Final (g)		156.3	163.5	156.6	
Peso Seco (g)		107.8	107.8	107.8	
Humedad Inicial (ASTM D 2216) (%)		30.2	30.2	30.2	
Humedad Final (ASTM D 2216) (%)		46.0	42.4	39.7	
Densidad Húmeda Inicial (g/cm <sup>3</sup> )		1.768	1.768	1.768	
Densidad Húmeda Final (g/cm <sup>3</sup> )		2.182	2.253	2.215	
Densidad Seca Inicial (g/cm <sup>3</sup> )		1.358	1.358	1.358	
Densidad Seca Final (g/cm <sup>3</sup> )		1.505	1.582	1.584	

ASTM D 3080		CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS											
ESFUERZO NORMAL		49.0 kPa				98.1 kPa				196.1 kPa			
Etapas		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Altura (cm)		2.50	2.26	2.50	2.15	2.50	2.15	2.50	2.14	2.50	2.14	2.50	2.14
Volumen (cm <sup>3</sup> )		79.38	71.62	79.38	68.12	79.38	68.12	79.38	68.05	79.38	68.05	79.38	68.05
Humedad (%)		30.2	46.0	30.2	42.4	30.2	42.4	30.2	39.7	30.2	39.7	30.2	39.7
Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> )		1.358	1.505	1.358	1.582	1.358	1.582	1.358	1.584	1.358	1.584	1.358	1.584
Esfuerzo Corte (kPa)		35.9				45.9				78.0			
Desplaz. Horizontal (mm)	ESFUERZO NORMAL 49.0 kPa				ESFUERZO NORMAL 98.1 kPa				ESFUERZO NORMAL 196.1 kPa				
	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (kg)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (kg)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (kg)	Esfuerzo Corte (kPa)	
0.00	1.095	0.0	0.0	0.0	1.097	0.0	0.0	0.0	2.093	0.0	0.0	0.0	
0.50	1.285	8.9	4.0	12.6	2.047	13.3	6.0	19.0	2.151	22.4	10.1	31.0	
1.00	1.425	13.5	6.1	18.2	2.205	18.9	8.6	27.1	2.237	26.2	12.8	40.3	
1.50	1.611	17.2	7.8	24.6	2.333	24.9	11.3	35.5	2.294	36.8	16.7	52.6	
2.00	1.755	20.1	9.1	28.7	2.456	26.5	12.0	37.8	2.626	40.4	18.3	57.7	
2.50	1.902	21.1	9.6	30.2	2.584	27.2	12.4	38.9	2.733	43.2	19.6	61.7	
3.00	1.982	21.9	10.0	31.4	2.685	27.7	12.6	38.5	2.906	44.5	20.2	63.5	
3.50	2.100	23.2	10.5	33.2	2.776	28.0	12.7	40.0	3.110	47.2	21.4	67.5	
4.00	2.185	24.8	11.2	35.4	2.913	29.0	13.2	41.4	3.203	48.3	21.9	68.9	
4.50	2.286	25.1	11.4	35.9	3.000	30.8	14.0	44.0	3.325	49.5	22.5	70.8	
5.00	2.335	26.4	11.1	34.9	3.083	31.7	14.4	45.3	3.410	50.3	22.8	71.8	
5.50	2.370	23.8	10.8	34.1	3.152	32.1	14.6	45.9	3.463	52.1	23.6	74.4	
6.00	2.390	24.3	11.0	34.7	3.277	31.7	14.4	45.2	3.481	53.3	24.2	76.2	
6.50	2.400	23.6	10.7	33.7	3.366	31.7	14.4	45.2	3.523	53.8	24.4	76.9	
7.00	2.414	25.0	10.4	32.9	3.439	31.2	14.2	44.6	3.544	52.8	24.0	75.5	
7.50	2.418	22.9	10.4	32.7	3.483	31.1	14.1	44.4	3.554	52.8	24.0	75.5	
8.00	2.422	22.8	10.3	32.5	3.513	30.8	14.0	44.0	3.560	51.8	23.5	74.0	
8.50	2.428	22.4	10.2	32.0	3.534	30.5	13.8	43.6	3.564	51.8	23.5	74.0	
9.00	2.441	22.2	10.1	31.7	3.544	30.3	13.8	43.3	3.568	50.8	23.0	72.6	
9.50	2.443	22.1	10.0	31.5	3.548	30.3	13.8	43.3	3.572	51.1	23.2	72.9	
10.00	2.446	21.9	10.0	31.4	3.553	29.9	13.6	42.7	3.576	50.8	23.0	72.6	
10.50	2.446	21.7	9.8	31.0	3.579	28.9	13.1	41.2	3.574	49.8	22.6	71.1	
11.00	2.451	22.1	10.0	31.6	3.579	28.7	13.0	41.0	3.579	49.5	22.6	70.8	
11.50	2.454	21.7	9.8	31.0	3.581	28.0	12.7	40.0	3.579	48.3	22.4	70.4	
12.00	2.454	21.9	10.0	31.4	3.581	28.3	12.8	40.4	3.579	48.3	21.9	68.9	

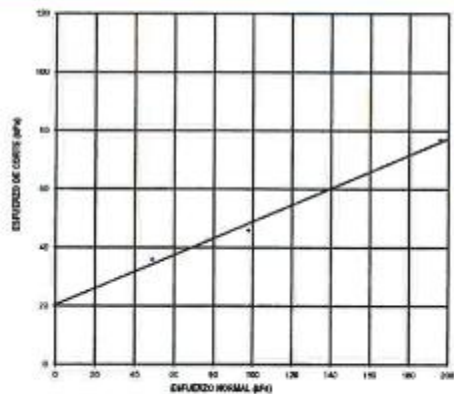
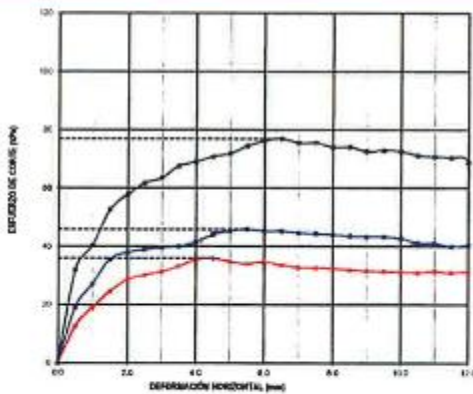
Nota: Información sacada del proyecto "Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730" (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 29:

Perfil Estratigráfico y resultados de ensayos de laboratorios.

FECHA DE RECEPCIÓN : lunes, 20 de agosto de 2018	UBICACIÓN : Tramo I: Km. 14+229.50 al Km. 21+730
REFERENCIA DE LA MUESTRA	EQUIPO DE CORTE DIRECTO
IDENTIFICACIÓN : Prog. (km): 17+200 / CG-04, M-02, Ref. L. Der.	NOMBRE DE EQUIPO : DIGITAL DIRECT / RESIDUAL SHEAR
DESCRIPCIÓN : Prof. 0.80-2.70m. / 6517855K, 819302E	MARCA / MODELO : FORNEY (AMERICANO)
PRESENTACIÓN : 01 Bolsa de polietileno	FACTOR DE CELDA (h) : X = 0
CANTIDAD : 48 kg	

**ASTM D 3080** **CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS**



RESULTADOS DE ENSAYO			
COHESIÓN (kPa)	20.38	ANGULO DE FRICCIÓN (°)	15.9
COHESIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )	0.21		

**NTP 339.152** **METODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE SALES SOLUBLES EN SUELOS Y AGUA SUBTERRÁNEA**

IDENTIFICACIÓN	SALES SOLUBLES (%)
Prog. (km): 17+200 / CG-04, M-02, Ref. L. Der.	1033.0000

**NTP 339.176** **MÉTODO DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN CUANTITATIVA DE SULFATOS SOLUBLES EN SUELOS Y AGUA SUBTERRÁNEA**

IDENTIFICACIÓN	SULFATOS EXPRESADOS COMO IÓN SO <sub>4</sub> (ppm)
Prog. (km): 17+200 / CG-04, M-02, Ref. L. Der.	273

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (PEINSAC Ingeniería de calidad - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 30:

Informe de Perforación.

### 3.2.1. Registro Estratigráfico de los Sondajes

Descripción detallada del suelo registrado en todos los sondeos realizados, siempre basados en la normativa ASTM D 2488:

#### PERFORACIÓN DDH – 01 Intercambio Aeropuerto - Eje Derecho Km 17+106

PROFUNDIDAD		DESCRIPCIÓN VISUAL DE LA TEXTURA DEL SUELO	SUCS
DESDE (m)	HASTA (m)		
0.00	0.20	Limo orgánico de plasticidad media, color marrón oscuro y negro, <u>humedad suelta.</u> (P)	OH
0.20	1.13	Limo inorgánico color gris claro, no plástico sin material orgánico, N>50 suelo residual de roca evaporítica, seca.	ML
1.13	3.63	Limo inorgánico, color amarillo verdoso de plástico baja, consistencia mediana, saturada.	ML
2.00	2.45	Limo inorgánico, color amarillo verdoso de plástico baja, consistencia mediana, saturada. N=6	SPT 01
2.45	3.00	Limo inorgánico, color amarillo verdoso de plástico baja, consistencia mediana, saturada.	ML
3.00	3.63	Limo inorgánico, color amarillo verdoso de plástico baja, consistencia mediana, saturada.	ML
3.63	4.00	Limo inorgánico de color gris verdoso, de plasticidad baja, consistencia mediana, saturada.	ML
4.00	4.45	Limo inorgánico de color gris verdoso, de plasticidad baja, consistencia mediana, saturada. N=7	SPT 02
4.45	5.00	Limo inorgánico de color gris verdoso, de plasticidad baja, consistencia mediana, saturada.	ML
5.00	6.00	Limo inorgánico de color gris verdoso, de plasticidad baja, consistencia mediana, saturada.	ML
6.00	6.45	Limo inorgánico de color gris verdoso, de plasticidad baja, consistencia mediana, saturada. N=7	SPT 03
6.45	6.60	Limo inorgánico de color gris verdoso, de plasticidad baja, consistencia mediana, saturada.	ML

JNR CONSULTORES S.A. JNR CONSULTORES S.A. Ing. Jaime Salvadora de Rivero  
 JUAN MANUEL ESPINOZA CARRERA REPRESENTANTE LEGAL DNI: 09677735  
 OFICINA Y ALMACÉN: JUSTA GARCÍA Y ROBLERO 119, BREÑA, LIMA, PERÚ  
 ING. AGUSTÍN EDUARDO PAREDES HEREDIA CIPN 34486  
 Telf. (51-1) 3332019, Celular (51) 993133319 - 941986137.  
 Email: cgomez@geosondajesac.com, geosondajesac@gmail.com  
 CIR N° 57589

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (GEOSONDAJES S.A.C - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.



Anexo N° 31:

Informe de Perforación DDH-01

PROFUNDIDAD		DESCRIPCIÓN VISUAL DE LA TEXTURA DEL SUELO	SUCS
DESDE (m)	HASTA (m)		
6.60	7.85	Limo inorgánico de color gris verdoso, de plasticidad baja, consistencia mediana, saturada.	ML
7.85	8.00	Limo inorgánico de color gris verdoso, de plasticidad baja, consistencia compacta, saturada.	ML
8.00	8.45	Limo inorgánico de color verde, no plástico a plasticidad baja, consistencia compacta, saturada. N=12	SPT 04
8.45	10.00	Limo inorgánico de color verde, no plástico a plasticidad baja, consistencia compacta, saturada.	ML
10.00	10.45	Limo inorgánico de color verde, no plástico a plasticidad baja, consistencia muy compacta, saturada. N=20	SPT 05
10.45	11.00	Limo inorgánico de color verde, no plástico a plasticidad baja, consistencia muy compacta, saturada.	ML
11.00	12.00	Limo inorgánico de color verde, no plástico a plasticidad baja, consistencia muy compacta, saturada.	ML
12.00	12.45	Limo inorgánico de color verde, no plástico a plasticidad baja, consistencia muy compacta, saturada. N=21	SPT 06
12.45	13.00	Limo inorgánico de color verde, no plástico a plasticidad baja, consistencia muy compacta, saturada.	ML
13.00	14.00	Limo inorgánico de color verde, no plástico a plasticidad baja, consistencia muy compacta, saturada.	ML
14.00	14.45	Limo inorgánico de color verde, no plástico a plasticidad baja, consistencia muy compacta, saturada. N=22	SPT 07
14.45	15.25	Limo inorgánico de color verde, no plástico a plasticidad baja, consistencia muy compacta, saturada.	ML
15.25	16.00	Arena arcillosa de color marrón, de plasticidad media, compacidad compacta, saturada.	SC
16.00	16.45	Arena arcillosa de color marrón, de plasticidad media, compacidad compacta, saturada. N=25	SPT 08
16.45	17.00	Arena arcillosa, color verde, no plástica, compacidad compacta, saturada.	SC
17.00	17.45	Arena arcillosa, color verde, no plástica, compacidad compacta, saturada.	SC

CONSULTORES S.A.

JNR CONSULTORES S.A.

Ing. Jaime Saavedra de Rivero  
Jefe de Estudio

Nota: Información sacada del proyecto "Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730" (GEOSONDAJES S.A.C - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 32:

Informe de Perforación DDH-02

PROFUNDIDAD		DESCRIPCIÓN VISUAL DE LA TEXTURA DEL SUELO	SUCS
DESDE (m)	HASTA (m)		
17.45	18.00	Arcilla inorgánica de plasticidad media, color marrón rojizo, de consistencia dura, saturada.	CL
18.00	18.45	Arcilla inorgánica de plasticidad media, color marrón rojizo, de consistencia dura, saturada. N=40	SPT 09
18.00	19.00	Arcilla inorgánica de plasticidad media, color marrón rojizo, de consistencia dura, saturada.	CL
19.00	20.20	Arcilla inorgánica de plasticidad media, color marrón rojizo, de consistencia dura, saturada.	CL
20.20	20.65	Arcilla inorgánica de plasticidad media, color marrón rojizo, de consistencia dura, saturada. N=58	SPT 10

PERFORACIÓN DDH – 02

Intercambio Aeropuerto - Eje Izquierdo Km 17+166

PROFUNDIDAD		DESCRIPCIÓN VISUAL DE LA TEXTURA DEL SUELO	SUCS
DESDE (m)	HASTA (m)		
0.00	0.33	Limo orgánico color marrón oscuro y negro de plasticidad media, muy blanda, ligeramente húmeda.	OH
0.33	0.70	Grava arcillosa color blanco amarillento, suelo residual, compacidad muy blanda y saturada.	GC
0.70	2.10	Grava arcillosa color blanco amarillento, suelo residual, compacidad muy blanda y saturada.	GC
2.10	2.55	Limo inorgánico color gris amarillento, ligeramente plástico, con leve contenido de arena muy fina, saturado y consistencia muy blanda. N=1	SPT 01
2.55	3.00	Limo inorgánico color gris amarillento, ligeramente plástico, con leve contenido de arena muy fina, saturado y consistencia muy blanda.	ML
3.00	4.00	Limo inorgánico color gris amarillento, ligeramente plástico, con leve contenido de arena muy fina, saturado y consistencia muy blanda.	ML
4.00	4.45	Limo inorgánico, color verde, consistencia blanda, de ligera plasticidad, contiene micro fósiles (conchas) y suelo saturado. N=3	SPT 02

JNR CONSULTORES S.A. JNR CONSULTORES S.A. Ing. Jaime Saavedra de Rivero  
 IN MANUEL ESPINOZA ING. AGUSTÍN EDUARDO PAREDES HEREDIA Jefe de Estudio  
 REPRESENTANTE LEGAL, C.R. 133319 - 941986137. 34486  
 DNI: 06677735 Email: cgomez@geosondajesac.com, geosondajesac@gmail.com  
www.geosondajesac.com

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (GEOSONDAJES S.A.C - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 33:

Informe de Perforación DDH-02

PROFUNDIDAD		DESCRIPCIÓN VISUAL DE LA TEXTURA DEL SUELO	SUCS
DESDE (m)	HASTA (m)		
4.45	5.45	Limo inorgánico, color verde, consistencia blanda, de ligera plasticidad, contiene micro fósiles (conchas) y suelo saturado.	ML
5.45	6.00	Limo inorgánico, color verde, consistencia blanda, de ligera plasticidad, contiene micro fósiles (conchas) y suelo saturado.	ML
6.00	6.45	Limo inorgánico, color verde, consistencia blanda, de ligera plasticidad, contiene micro fósiles (conchas) y suelo saturado. N=3	SPT 03
6.45	7.00	Limo inorgánico, color verde, consistencia blanda, de ligera plasticidad, contiene micro fósiles (conchas) y suelo saturado.	ML
7.00	8.00	Limo inorgánico, color verde, consistencia blanda, de ligera plasticidad, contiene micro fósiles (conchas) y suelo saturado.	ML
8.00	8.45	Limo inorgánico, color verde, consistencia compacta, de ligera plasticidad, contiene micro fósiles (presencia de conchas) y suelo saturado. N=15	SPT 04
8.45	9.00	Limo inorgánico, color verde, consistencia compacta, de ligera plasticidad, contiene micro fósiles (presencia de conchas) y suelo saturado.	ML
9.00	10.00	Limo inorgánico, color verde, consistencia compacta, de ligera plasticidad, contiene micro fósiles (presencia de conchas) y suelo saturado.	ML
10.00	10.45	Limo inorgánico, color verde, consistencia compacta, de ligera plasticidad, contiene micro fósiles (presencia de conchas) y suelo saturado. N=23	SPT 05
10.45	11.00	Limo inorgánico, color verde, consistencia compacta, de ligera plasticidad, contiene micro fósiles (presencia de conchas) y suelo saturado.	ML
11.00	12.00	Limo inorgánico, color verde, consistencia compacta, de ligera plasticidad, contiene micro fósiles (presencia de conchas) y suelo saturado.	ML
12.00	12.45	Limo inorgánico, color verde, consistencia compacta, de ligera plasticidad, contiene micro fósiles (presencia de conchas) y suelo saturado. N=20	SPT 06
12.45	12.91	Limo inorgánico, color verde, consistencia compacta, de ligera plasticidad, contiene micro fósiles (presencia de conchas) y suelo saturado.	ML
12.91	13.50	Limo arcilloso, color marrón rojizo, de plasticidad media consistencia muy compacta y suelo saturado	ML-CL

JNR CONSULTORES S.A. JNR CONSULTORES S.A. Ing. Jaime Saavedra de Rivero  
 UAN MANUEL ESPINOZA CARRERA REPRESENTANTE LEGAL DNI: 09677735  
 OFICINA Y ALMACÉN: JUSTA GARCÍA Y ROBLEDO 119, BREÑA, LIMA, PERÚ 34486  
 Telf. (51-1) 33320289, Celular (51-981) 133319 - 941986137.  
 Email: cgomez@geosondajesac.com, geosondajesac@gmail.com  
 CIP N° 57589

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (GEOSONDAJES S.A.C - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 34:

Informe de Perforación DDH-02

PROFUNDIDAD		DESCRIPCIÓN VISUAL DE LA TEXTURA DEL SUELO	SUCS
DESDE (m)	HASTA (m)		
13.50	14.00	Limo arcilloso, color marrón rojizo, de plasticidad media consistencia muy compacta y suelo saturado	ML-CL
14.00	14.45	Limo arcilloso, color marrón rojizo, de plasticidad media consistencia muy compacta y suelo saturado. N=22	SPT 07
14.45	15.25	Limo arcilloso, color marrón rojizo, de plasticidad media consistencia muy compacta y suelo saturado	ML-CL
15.25	16.00	Limo arcilloso, color marrón rojizo, de plasticidad media consistencia muy compacta y suelo saturado	ML-CL
16.00	16.45	Limo arcilloso, color marrón rojizo, de plasticidad media consistencia muy compacta y suelo saturado. N=25	SPT 08
16.45	17.00	Limo arcilloso, color marrón rojizo, de plasticidad media consistencia muy compacta y suelo saturado.	ML-CL
17.00	17.50	Limo arcilloso, color marrón rojizo, de plasticidad media consistencia muy compacta y suelo saturado.	ML-CL
17.50	18.00	Limo arcilloso, color marrón rojizo, de plasticidad media consistencia dura y suelo saturado.	ML-CL
18.00	18.45	Limo arcilloso, color marrón rojizo, de plasticidad media consistencia dura y suelo saturado. N=30	SPT 09
18.45	19.00	Limo arcilloso, color marrón rojizo, de plasticidad media consistencia dura y suelo saturado	ML-CL
19.00	20.00	Limo arcilloso, color marrón rojizo, de plasticidad media consistencia dura y suelo saturado.	ML-CL
20.00	20.45	Limo arcilloso, color marrón rojizo, de plasticidad media consistencia dura y suelo saturado. N=40	SPT 10



JNR CONSULTORES S.A.  
 MANUEL ESPINOZA  
 REPRESENTANTE LEGAL  
 DNI: 96677735

JNR CONSULTORES S.A.  
 ING. AGUSTÍN EDUARDO PAREDES HEREDIA  
 DNI: 81137380

Ing. Jaime Saavedra de Rivero  
 Jefe de Estudio  
 DNI: 34486

OFICINA Y ALMACÉN: JUNTA GARFÍN Y DOBLEDO 119, BREÑA, LIMA, PERÚ 34486  
 Telf. (51-1) 3332088 de Breña (51-1) 333319 - 941986137.  
 Email: cgomez@geosondajesac.com, geosondajesac@gmail.com

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (GEOSONDAJES S.A.C - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 35:

Informe de Perforación DDH-03

**PERFORACIÓN DDH – 03**  
**Intercambio Aeropuerto - Eje Derecho Km 17+220**

PROFUNDIDAD		DESCRIPCIÓN VISUAL DE LA TEXTURA DEL SUELO	SUCS
DESDE (m)	HASTA (m)		
0.00	0.80	Limo orgánico, color marrón oscuro y negro plasticidad media, ligeramente húmeda, muy blanda.	OH
0.80	1.50	Grava arcillosa, color blanco amarillento, suelo residual compactidad suelta.	GC
1.50	1.95	Limo inorgánico color blanco con parcialidad firme, húmeda, de consistencia compacta, plasticidad ligera. N=10	SPT 01
1.95	2.55	Limo inorgánico color blanco amarillento, consistencia compacta, firme, saturado, no plástico. Muestra saturada de agua.	ML
2.55	3.48	Limo inorgánico color blanco amarillento, consistencia compacta, firme, saturado, no plástico. Muestra saturada de agua.	ML
3.48	4.50	Arcilla inorgánica, color marrón claro, de plasticidad baja, consistencia compacta, saturada.	CL
4.50	4.95	Limo inorgánico color verde consistencia blanda, leve contenido de arena fina, olor a azufre, saturada nivel freático desde 1.90 m. N=3	SPT 02
4.95	7.50	Limo inorgánico color verde consistencia blanda, leve contenido de arena fina, olor a azufre, saturada nivel freático desde 1.90 m. NOTA: de 4.95 m a 7.50 m (2.55 m) Muestra lavada	ML
7.50	7.95	Limo inorgánico de color verde, consistencia blanda a media, leve contenido de arena fina, olor a azufre, N=10	SPT 03
7.95	8.50	Limo inorgánico de color verde, consistencia blanda a media, leve contenido de arena fina, olor a azufre, saturada nivel freático desde 1.90 m.	ML
8.50	9.50	Limo inorgánico de color verde, consistencia blanda a media, leve contenido de arena fina, olor a azufre, saturada nivel freático desde 1.90 m.	ML
9.50	10.30	Limo inorgánico de color verde, consistencia blanda a media, leve contenido de arena fina, olor a azufre, saturada nivel freático desde 1.90 m.	ML

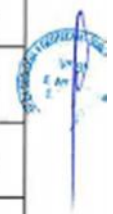
JNR CONSULTORES S.A. JNR CONSULTORES S.A. Ing. Jaime Saavedra de Rivero  
 AN MANUEL ESPINOZA Y ALMACÉN JUSTA FERRA Y ROBLERO 119, BREÑA, LIMA, PERÚ 34485 Jefe de Estudio  
 REPRESENTANTE LEGAL ING. AGUSTIN EDUARDO PAREDES VERA Telf. (51-1) 3332099 Telf. (51-1) 333319 - 941986137.

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (GEOSONDAJES S.A.C - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 36:

Informe de Perforación DDH-03

PROFUNDIDAD		DESCRIPCIÓN VISUAL DE LA TEXTURA DEL SUELO	SUCS
DESDE (m)	HASTA (m)		
10.30	10.75	Limo inorgánico de color verde, consistencia media a compacta, leve contenido de arena fina, olor a azufre, saturada nivel freático desde 1.90 m. N=15	SPT 04
10.75	11.00	Limo inorgánico de color verde, consistencia media a compacta, leve contenido de arena fina, olor a azufre, saturada nivel freático desde 1.90 m.	ML
11.00	13.25	Limo inorgánico de color verde, consistencia media a compacta, leve contenido de arena fina, olor a azufre, saturada nivel freático desde 1.90 m.	ML
13.25	13.70	Limo inorgánico de color verde, consistencia media a compacta, leve contenido de arena fina, olor a azufre, saturada nivel freático desde 1.90 m. N=18	SPT 05
13.70	14.35	Limo inorgánico de color verde, consistencia media a compacta, leve contenido de arena fina, olor a azufre, saturada nivel freático desde 1.90 m.	ML
14.35	14.75	Limo inorgánico de color verde, consistencia media a compacta, leve contenido de arena fina, olor a azufre, saturada nivel freático desde 1.90 m. N=22	SPT 06
14.75	15.25	Limo inorgánico, color marrón rojizo, plasticidad baja, consistencia compacta, saturada.	ML
15.25	16.00	Limo inorgánico, color marrón rojizo, plasticidad baja, consistencia media, saturada.	ML
16.00	16.45	Limo arcilloso color marrón rojizo de plasticidad media a baja, consistencia muy compacta saturado. N=25	SPT 07
16.45	17.00	Limo arcilloso color marrón rojizo de plasticidad media a baja, consistencia muy compacta saturado.	ML-CL
17.00	17.50	Limo arcilloso color marrón rojizo de plasticidad media a baja, consistencia muy compacta, saturado.	ML-CL
17.50	18.00	Limo arcilloso color marrón rojizo de plasticidad media a baja, consistencia muy compacta, saturado.	ML-CL
18.00	18.45	Limo arcilloso color marrón rojizo de plasticidad media a baja, consistencia muy compacta, saturado.	ML-CL
18.45	18.90	Limo arcilloso color marrón rojizo de plasticidad media a baja, consistencia muy compacta saturado. N=28	SPT 08
18.90	19.50	Limo arcilloso color marrón rojizo de plasticidad media a baja, consistencia muy compacta saturado.	ML-CL



JNR CONSULTORES S.A. JNR CONSULTORES S.A. Ing. Jaime Saavedra de Rivero  
 JUAN MANUEL ESPINOZA ORCINO Y ALMACÉN: JUSTA GARCÍA Y ROBLEDO 119, BREÑA, LIMA, PERÚ 34486  
 REPRESENTANTE LEGAL ING. AGUSTÍN EDMUNDO PAREDES HEREDIA

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (GEOSONDAJES S.A.C - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 37:

Informe de Perforación DDH-01

PROFUNDIDAD		DESCRIPCIÓN VISUAL DE LA TEXTURA DEL SUELO	SUCS
DESDE (m)	HASTA (m)		
19.50	20.30	Limo arcilloso color marrón rojizo de plasticidad media a baja, consistencia dura, saturado.	ML-CL
20.30	20.75	Limo arcilloso color marrón rojizo de plasticidad media a baja, consistencia dura. N=38	SPT 09

**% Recuperación Perforación DDH – 01**  
**Intercambio Aeropuerto - Eje Derecho Km 17+106**

DE	HASTA	PERFORACIÓN (m)	RECUPERACIÓN (m)	RECUPERACIÓN (%)
0.00	1.00	1.00	1.00	100.00
1.00	2.00	1.00	0.85	85.00
2.00	2.45	0.45	0.45	SPT -
2.45	4.00	1.55	1.50	97.00
4.00	4.45	0.45	0.40	SPT -
4.45	6.00	1.55	1.15	74.00
6.00	6.45	0.45	0.40	SPT -
6.45	8.00	1.55	1.40	90.00
8.00	8.45	0.45	0.40	SPT -
8.45	10.00	1.55	1.50	97.00
10.00	10.45	0.45	0.40	SPT -
10.45	12.00	1.55	1.50	97.00
12.00	12.45	0.45	0.40	SPT -
12.45	14.00	1.55	1.50	97.00
14.00	14.45	0.45	0.40	SPT -
14.45	16.00	1.55	1.30	84.00
16.00	16.45	0.45	0.40	SPT -
16.45	18.00	1.55	1.50	97.00
18.00	18.45	0.45	0.40	SPT -
18.45	20.20	1.35	1.30	96.00
20.20	20.65	0.45	0.45	SPT
<b>TOTAL:</b>		<b>20.65</b>	<b>19.10</b>	<b>92.00</b>

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (GEOSONDAJES S.A.C - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 38:

Informe de Perforación DDH-02

**% Recuperación Perforación DDH – 02**  
**Intercambio Aeropuerto - Eje Izquierdo Km 17+166**

DE	HASTA	PERFORACIÓN (m)	RECUPERACIÓN (m)	RECUPERACIÓN (%)
0.00	0.60	0.60	0.60	100.00
0.60	1.50	0.90	0.90	100.00
1.50	2.10	0.60	0.60	100.00
2.10	2.55	0.45	0.30	SPT
2.55	4.00	1.45	1.45	100.00
4.00	4.45	0.45	0.30	SPT
4.45	6.00	1.55	1.55	100.00
6.00	6.45	0.45	0.30	SPT
6.45	8.00	1.55	1.55	100.00
8.00	8.45	0.45	0.30	SPT
8.45	10.00	1.55	1.55	100.00
10.00	10.45	0.45	0.30	SPT
10.45	12.00	1.55	1.55	100.00
12.00	12.45	0.45	0.30	SPT
12.45	14.00	1.55	1.55	100.00
14.00	14.45	0.45	0.30	SPT
14.45	16.00	1.55	1.55	100.00
16.00	16.45	0.45	0.30	SPT
16.45	18.00	1.55	1.55	100.00
18.00	18.45	0.45	0.30	SPT
18.45	20.00	1.55	1.55	100.00
20.00	20.45	0.45	0.30	SPT
<b>TOTAL:</b>		<b>20.45</b>	<b>18.95</b>	<b>100.00</b>

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (GEOSONDAJES S.A.C - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.



Anexo N° 39:

% Recuperación Perforación DDH-03.

**% Recuperación Perforación DDH – 03**  
**Intercambio Aeropuerto - Eje Derecho Km 17+220**

DE	HASTA	PERFORACIÓN (m)	RECUPERACIÓN (m)	RECUPERACIÓN (%)
0.00	0.15	0.15	0.15	100.00
0.15	0.60	0.65	0.65	100.00
0.60	1.50	0.70	0.70	100.00
1.50	1.95	0.45	0.30	SPT -
1.95	3.48	1.53	1.53	100.00
3.48	4.50	1.02	1.00	98.04
4.50	4.95	0.45	0.30	SPT -
4.95	7.50	2.55	0.00	0.00
7.50	7.95	0.45	0.30	SPT -
7.95	8.55	0.60	0.60	100.00
8.55	10.30	1.35	1.35	100.00
10.30	10.75	0.45	0.30	SPT -
10.75	11.75	1.00	1.00	100.00
11.75	12.75	1.00	1.00	100.00
12.75	13.25	0.50	0.50	100.00
13.25	13.70	0.45	0.30	SPT -
13.70	16.00	2.30	2.30	100.00
16.00	16.45	0.45	0.30	SPT -
16.45	18.45	2.00	2.00	100.00
18.45	18.90	0.45	0.30	SPT -
18.90	20.30	1.40	1.40	100.00
20.30	20.75	0.45	0.45	SPT -
<b>TOTAL:</b>		<b>20.75</b>	<b>16.98</b>	<b>81.83</b>

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (GEOSONDAJES S.A.C - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 40:

Control de cajas Perforación

**Control de Cajas Perforación DDH – 01**  
**Intercambio Aeropuerto - Eje Derecho Km 17+106**

DESCRIPCIÓN			LÍNEA		N° DE CAJA	AVANCE		ENSAYOS
INTERCAMBIO	ESTRIBO	BUZAMIENTO	HQ	NQ		DESDE	HASTA	
DH-01	DERECHO	90	HQ		1	0.00	4.50	2 SPT
		90	HQ		2	4.50	9.45	2 SPT
		90	HQ		3	9.45	13.00	2 SPT
		90	HQ		4	13.00	17.00	2 SPT
		90	HQ		5	17.00	20.66	2 SPT
<b>TOTAL:</b>								<b>10.00</b>

**Control de Cajas Perforación DDH – 02**  
**Intercambio Aeropuerto - Eje Izquierdo Km 17+166**

DESCRIPCIÓN			LÍNEA		N° DE CAJA	AVANCE		ENSAYOS
INTERCAMBIO	ESTRIBO	BUZAMIENTO	HQ	NQ		DESDE	HASTA	
DH-02	IZQUIERDO	90	HQ		1	0.00	4.45	2 SPT
		90	HQ		2	4.45	8.45	2 SPT
		90	HQ		3	8.45	12.50	2 SPT
		90	HQ		4	12.50	16.60	2 SPT
		90	HQ		5	16.60	20.45	2 SPT
<b>TOTAL:</b>								<b>10.00</b>

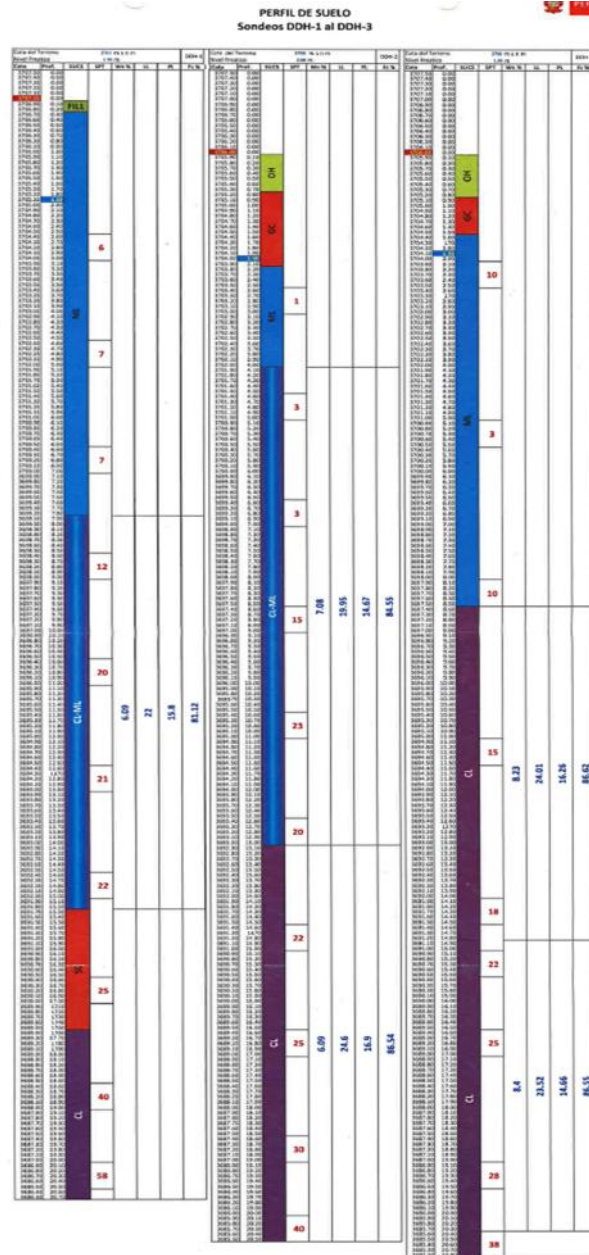
**Control de Cajas Perforación DDH – 03**  
**Intercambio Aeropuerto - Eje Derecho Km 17+220**

DESCRIPCIÓN			LÍNEA		N° DE CAJA	AVANCE		ENSAYOS
INTERCAMBIO	ESTRIBO	BUZAMIENTO	HQ	NQ		DESDE	HASTA	
DH-03	DERECHO	90	HQ		1	0.00	4.00	1 SPT
		90	HQ		2	4.00	10.75	3 SPT
		90	HQ		3	10.75	15.00	2 SPT
		90	HQ		4	15.00	19.10	2 SPT
		90	HQ		5	19.10	20.75	1 SPT
<b>TOTAL:</b>								<b>9.00</b>

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (GEOSONDAJES S.A.C - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 41:

Perfil de suelos de las Perforaciones.



Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (GEOSONDAJES S.A.C - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 42:

Ensayos Especiales de la perforación DDH-01.

- CONSULTORIA, ELABORACION DE PROYECTOS, EJECUCION Y SUPERVISION DE OBRAS CIVILES Y DE ARQUITECTURA.

- LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES.

. Urb. El Eden Lote C-3, San Sebastian - Cuzco. Tlf: 084 - 270342, RPO374270249, RPN: 898990111

Proyecto: "CONSTRUCCION, MEJORAMIENTO Y REHABILITACION DE LA CARRETERA CUSCO - CHINCHERO - URUBAMBA, EN LA REGION CUSCO"  
 Ubicación: INTERCAMBIO DESNIVEL CHINCHERO  
 Solicitante: GEOSONDAJES SAC.  
 Fecha: 7/08/2018  
 Muestra: Alterada

ENSAYOS ESPECIALES

CONDICION	MUESTRA	HORARIO	ENSAYO	Resultado	Observacion
DDH-1	DDH-1Y	10.00-10.45	CORTE DIRECTO	25.64 *	0.65 kg/cm2
DDH-1	SPT-6	12.00-12.45	CORTE DIRECTO	20.30 *	0.58 kg/cm2
DDH-1	SPT-7	14.00-14.45	CORTE DIRECTO	17.22 *	0.63 kg/cm2
DDH-1	SPT-8	16.00-16.45	CORTE DIRECTO	18.78 *	0.67 kg/cm2

ENSAYOS ESTANDARS

			Grav	Hum	Flujo	LL	LP	P	SuCS	Indice	Wp	Grav (g/cm <sup>3</sup> )	Su (kg/cm <sup>2</sup> )	Su* (kg/cm <sup>2</sup> )	Ht	FE (kg/cm <sup>2</sup> )	FC (kg/cm <sup>2</sup> )	FC* (kg/cm <sup>2</sup> )
DDH-1	DDH-1X	7.85-15.25	2.05%	16.82%	81.12%	22.00%	15.80%	6.20%	CL-ML	A-4 (3)	6.09%	856.62	115.00	2500.00	8.20	1.99	1484.43	1552.95

Nota: Información sacada del proyecto "Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730" (GEOSONDAJES S.A.C - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 43:

Ensayos Especiales de la perforación DDH-02

CONSULTORIA, ELABORACION DE PROYECTOS, EJECUCION Y SUPERVISION DE OBRAS CIVILES Y DE ARQUITECTURA.

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES.

El Eden Lobo C-3, San Sebastián - Cusco. Tlf: 084 - 270342, RUC: 20374273240, RPA: 099890111

Proyecto: "CONSTRUCCION, MEJORAMIENTO Y REHABILITACION DE LA CARRETERA CUSCO - CHINCHERO - URUBAMBA, EN LA REGION CUSCO"

Ubicación: INTERCAMBIO DESNIVEL CHINCHERO

Solicitante: GEOSONDAJES SAC

Fecha: 7/08/2018

Muestra: Alterada

ENSAYOS ESPECIALES

SONDAGE	MUESTRA	PROFUNDIDAD	ENSAYO	RESULTADO	COMENTARIO
DDH-2	SPT-4	8.00-8.45	CORTE DIRECTO	23.75 *	0.61 kg/cm <sup>2</sup>
DDH-2	SPT-5	10.00-10.45	CORTE DIRECTO	17.22 *	0.62 kg/cm <sup>2</sup>
DDH-2	SPT-6	12.00-12.45	CORTE DIRECTO	18.78 *	0.64 kg/cm <sup>2</sup>
DDH-2	SPT-7	14.00-14.45	CORTE DIRECTO	18.26 *	0.66 kg/cm <sup>2</sup>

ENSAYOS ESTANDARS

			Grav	Agua	h <sub>2</sub> O	LL	LP	P	Súcs	Índice	W <sub>p</sub>	W <sub>u</sub>	W <sub>l</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>l</sub>	W <sub>u</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>l</sub>	W <sub>u</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>l</sub>	W <sub>u</sub>
DDH-2	D-1	4.00-12.91	0.00%	15.45%	84.55%	19.95%	14.67%	5.27%	CL-ML	A-4 (5)	7.08%	529.20	105.00	2383.93	6.40	1.95	1486.83	1553.87				
DDH-2	D-2	12.91-20.00	0.00%	13.48%	86.54%	24.60%	16.90%	7.70%	CL	A-4 (5)	6.09%	443.08	120.00	3250.00	7.50	1.98	1490.66	1556.19				

Nota: Información sacada del proyecto "Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730" (GEOSONDAJES S.A.C - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 44:

Ensayos Especiales de la perforación DDH-03

CONSULTORIA, ELABORACION DE PROYECTOS, EJECUCION Y SUPERVISION DE OBRAS CIVILES Y DE ARQUITECTURA.

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES.

Urb. El Eden Lote C-3, San Sebastian - Cusco, Tlf: 084 - 270342, RFC974279249, RPM: #999990111

Proyecto: "CONSTRUCCION, MEJORAMIENTO Y REHABILITACION DE LA CARRETERA CUSCO - CHINCHERO - URUBAMBA, EN LA REGION CUSCO"

Ubicación: INTERCAMBIO DESNIVEL CHINCHERO

Solicitante: GEOSONDAJES SAC.

Fecha: 7/08/2018

Muestra: Alterada

ENSAYOS ESPECIALES

SONDAJE	MUESTRA	PROFUNDIDAD	ENSAYO	Ángulo	Presión
DDH-3	SPT - 4	10.30-10.75	CORTE DIRECTO	17.74°	0.59 kg/cm <sup>2</sup>
DDH-3	SPT - 8	18.45-18.90	CORTE DIRECTO	19.80°	0.66 kg/cm <sup>2</sup>
DDH-3	SPT - 7	16.00-16.45	CORTE DIRECTO	19.80°	0.61 kg/cm <sup>2</sup>

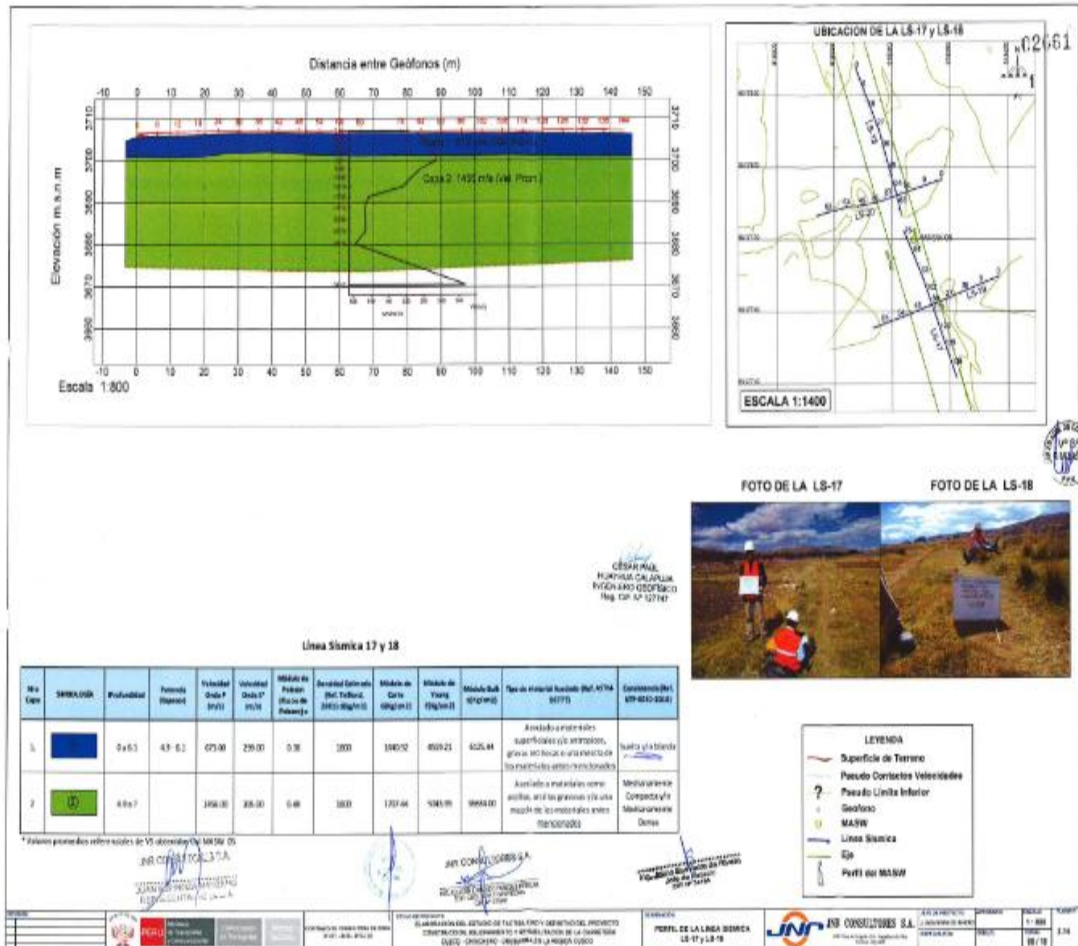
ENSAYOS ESTANDARS

	MUESTRA	PROFUNDIDAD	ESTADOS															
			Grav	Ágria	Fina	LL	LP	P	SH <sub>25</sub>	SH <sub>45</sub>	W <sub>pl</sub>	SH <sub>25</sub> (g/100)	SH <sub>45</sub> (g/100)	SPT (blows)	Dr	P.F. (blows)	Fluc. (kg/cm <sup>2</sup> )	Fluc. (kg/cm <sup>2</sup> )
DDH-3	1A	8.55-14.84	0.00%	13.38%	86.62%	24.01%	16.26%	7.75%	CL	A-4 (5)	8.23%	517.80	95.00	2531.25	6.70	1.94	1486.17	1554.70
DDH-3	1B (2A)	16.45 - 20.30	0.00%	13.45%	86.55%	23.52%	14.66%	8.86%	CL	A-4 (5)	8.40%	559.53	105.00	2676.47	7.20	1.95	1486.83	1553.87

Nota: Información sacada del proyecto "Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730" (GEOSONDAJES S.A.C - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 45:

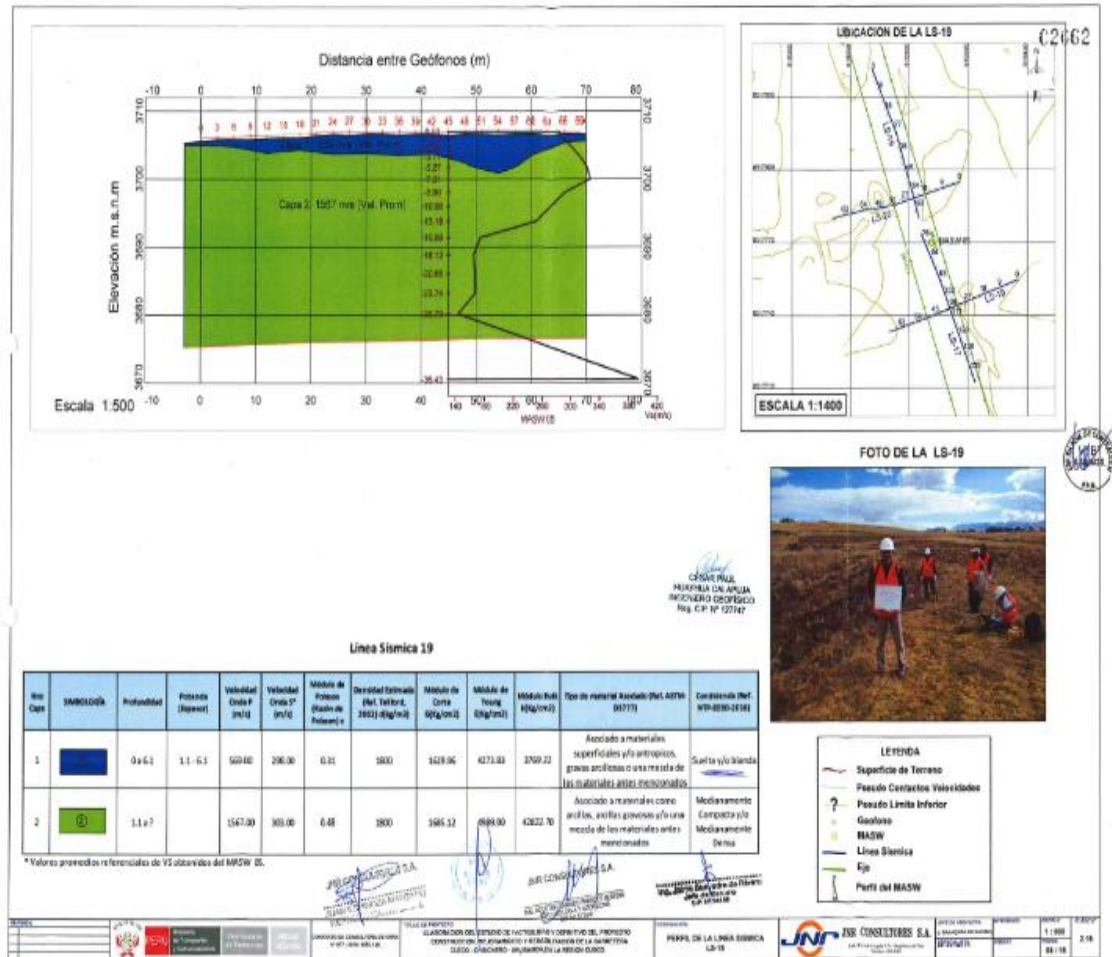
Informe de Refracción Sísmica – perfiles LS -17 y LS -18



Nota: Plano de perfil de la línea sísmica sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (JNR CONSULTORES S.A.C. - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N° 46:

Informe de Refracción Sísmica – perfiles LS -19

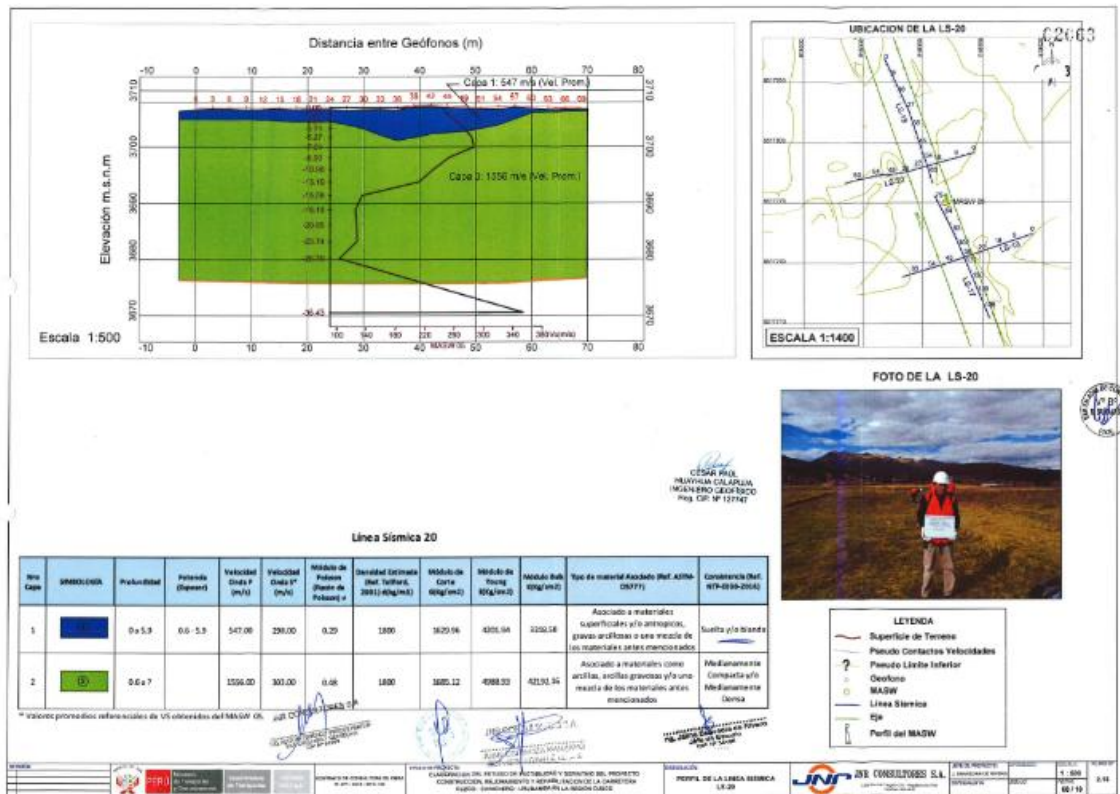


Nota: Plano de perfil de la línea sísmica sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (JNR CONSULTORES S.A.C. - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.



Anexo N° 47:

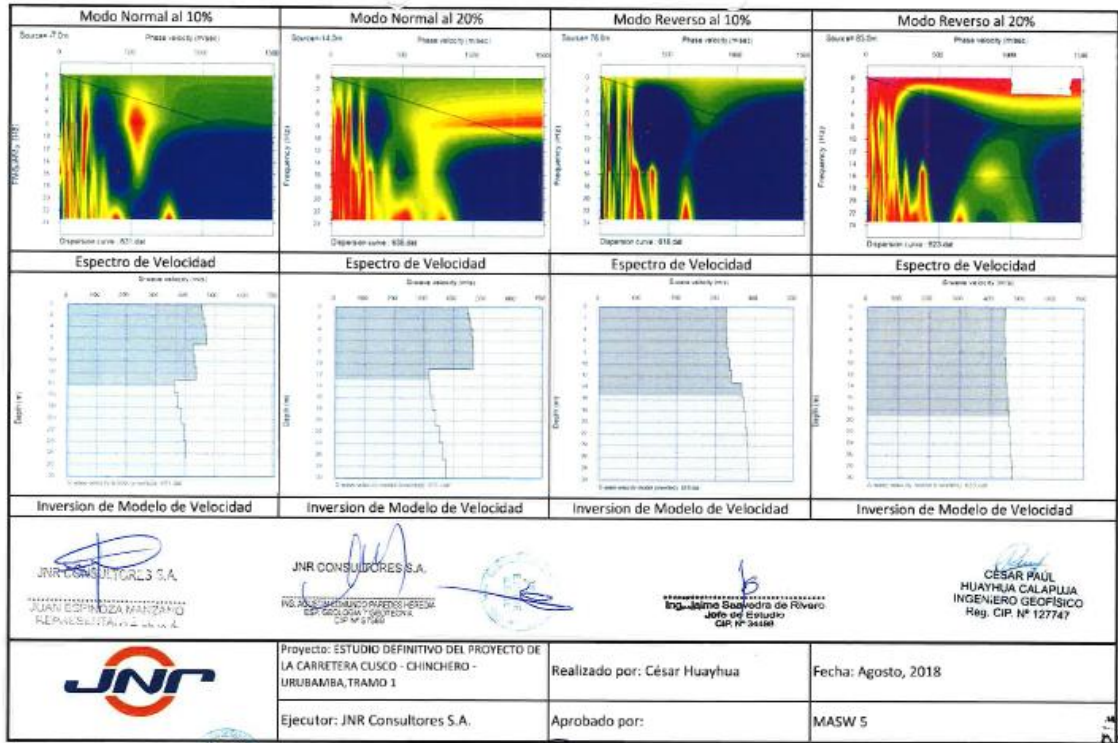
Informe de Refracción Sísmica – perfiles LS -20



Nota: Plano de perfil de la línea sísmica sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (JNR CONSULTORES S.A.C. - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N°48

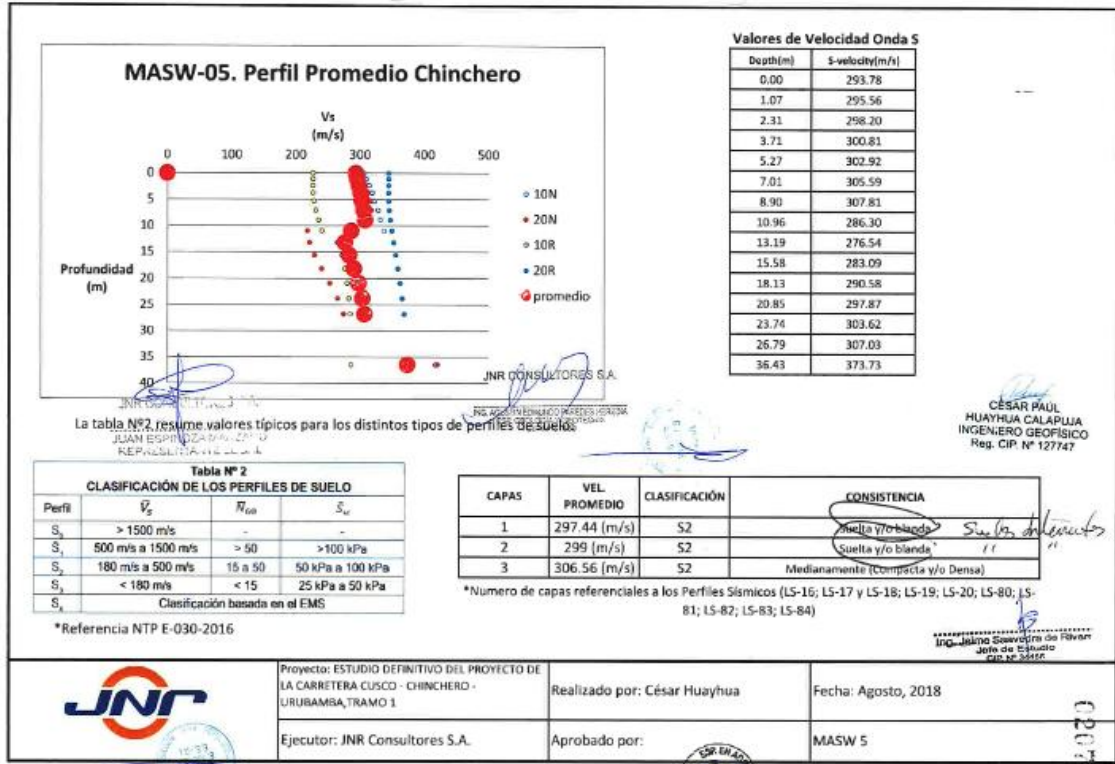
Informe de MASW



Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (JNR CONSULTORES S.A.C. - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N°49

Informe de MASW



Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (JNR CONSULTORES S.A.C. - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N°50

Parámetros Dinámicos



Cuadro N° 1: Constantes Elásticas LS-16

Nro Capa	Profundidad	Potencia (Espesor)	Velocidad Onda P (m/s)	Velocidad Onda S* (m/s)	Módulo de Poisson (Razón de Poisson) $\nu$	Densidad Estimada (Ref. Telford, 2001) $d(kg/m^3)$	Módulo de Corte $G(Kg/cm^2)$	Módulo de Young $E(Kg/cm^2)$	Módulo Bulk $K(Kg/cm^2)$	Tipo de material Asociado (Ref. ASTM-D5777)	Consistencia (Ref. NTP-8030-2016)
1	0 a 4.8	2.8 - 4.8	673.00	297.00	0.38	1800	1619.04	4465.55	6154.61	Asociado a materiales superficiales y/o antropicos, gravas arcillosas o una mezcla de los materiales antes mencionados	Suelta y/o blanda
2	2.8 a ?		1456.00	303.00	0.48	1800	1685.12	4979.07	36663.75	Asociado a materiales como arcillas, arcillas gravosas y/o una mezcla de los materiales antes mencionados	Medianamente Compacta y/o Medianamente Densa

\* Valores promedios referenciales de VS obtenidos del MASW 05.

Cuadro N° 2: Constantes Elásticas LS-17 y 18

Nro Capa	Profundidad	Potencia (Espesor)	Velocidad Onda P (m/s)	Velocidad Onda S* (m/s)	Módulo de Poisson (Razón de Poisson) $\nu$	Densidad Estimada (Ref. Telford, 2001) $d(kg/m^3)$	Módulo de Corte $G(Kg/cm^2)$	Módulo de Young $E(Kg/cm^2)$	Módulo Bulk $K(Kg/cm^2)$	Tipo de material Asociado (Ref. ASTM-D5777)	Consistencia (Ref. NTP-8030-2016)
1	0 a 6.1	4.9 - 6.1	673.00	299.00	0.38	1800	1640.92	4519.21	6125.44	Asociado a materiales superficiales y/o antropicos, gravas arcillosas o una mezcla de los materiales antes mencionados	Suelta y/o blanda
2	4.9 a ?		1456.00	305.00	0.48	1800	1707.44	5043.95	36634.00	Asociado a materiales como arcillas, arcillas gravosas y/o una mezcla de los materiales antes mencionados	Medianamente Compacta y/o Medianamente Densa

\* Valores promedios referenciales de VS obtenidos del MASW 05.



Ing. Jaime Saavedra de Rivar  
Jefe de Estudio

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (JNR CONSULTORES S.A.C. - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

## Anexo N°51

### Parámetros Dinámicos



**Cuadro N° 3: Constantes Elásticas LS-19**

Nro Capa	Profundidad	Potencia (Espesor)	Velocidad Onda P (m/s)	Velocidad Onda S* (m/s)	Módulo de Poisson (Razón de Poisson) $\nu$	Densidad Estimada (Ref. Terzaghi, 2001) $d(kg/m^3)$	Módulo de Corte $G(Kg/cm^2)$	Módulo de Young $E(Kg/cm^2)$	Módulo Bulk $K(Kg/cm^2)$	Tipo de material Asociado (Ref. ASTM-D5777)	Consistencia (Ref. NTP-E030-2016)
1	0 a 6.1	1.1 - 6.1	569.00	298.00	0.31	1800	1629.96	4273.83	3769.22	Asociado a materiales superficiales y/o antropicos, gravas arcillosas o una mezcla de los materiales antes mencionados	Suelta y/o blanda
2	1.1 a ?		1567.00	303.00	0.48	1800	1685.12	4989.90	42822.70	Asociado a materiales como arcillas, arcillas gravosas y/o una mezcla de los materiales antes mencionados	Medianamente Compacta y/o Medianamente Densa

\* Valores promedio referenciales de VS obtenidos del MASW 05.

**Cuadro N° 4: Constantes Elásticas LS-20**

Nro Capa	Profundidad	Potencia (Espesor)	Velocidad Onda P (m/s)	Velocidad Onda S* (m/s)	Módulo de Poisson (Razón de Poisson) $\nu$	Densidad Estimada (Ref. Terzaghi, 2001) $d(kg/m^3)$	Módulo de Corte $G(Kg/cm^2)$	Módulo de Young $E(Kg/cm^2)$	Módulo Bulk $K(Kg/cm^2)$	Tipo de material Asociado (Ref. ASTM-D5777)	Consistencia (Ref. NTP-E030-2016)
1	0 a 5.9	0.6 - 5.9	547.00	298.00	0.29	1800	1629.96	4201.94	3318.58	Asociado a materiales superficiales y/o antropicos, gravas arcillosas o una mezcla de los materiales antes mencionados	Suelta y/o blanda
2	0.6 a ?		1556.00	303.00	0.48	1800	1685.12	4988.93	42192.16	Asociado a materiales como arcillas, arcillas gravosas y/o una mezcla de los materiales antes mencionados	Medianamente Compacta y/o Medianamente Densa

\* Valores promedio referenciales de VS obtenidos del MASW 05.

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (JNR CONSULTORES S.A.C. - MTC 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Informe del Instituto geofísico del Perú de la actividad sísmica ocurrida en el área del Cusco.

 Instituto Geofísico del Perú  
Dirección de Sismología

02103

**INFORME DESCRIPTIVO**

La siguiente información ha sido preparada a solicitud de **JNR CONSULTORES S.A.** y comprende la actividad sísmica ocurrida en el área del Cusco. Los parámetros focales de los sismos entregados corresponden al período 1960 al 2015, con intervalo de magnitud  $\geq 4.0$  grados. A fin de tener mayor información sobre las características de la sismicidad del Perú, se recomienda visitar la página web de nuestra institución: <http://www.lap.gob.pe>

La descripción de los parámetros hipocentrales que se indican, corresponden a:

Fecha	:	Día, mes y año
Hora Origen	:	Se refiere al tiempo (hora, minuto, segundo) en que ocurrió el sismo; este se da en hora universal (UTC). Para convertir a la hora local, restar 5 horas.
Latitud	:	Se da en Grados Sur.
Longitud	:	Se da en Grados Oeste.
Profundidad	:	Se refiere a la profundidad del foco del terremoto, se da en km.
Magnitud	:	Representa la energía liberada por cada terremoto; magnitud ML magnitud local.



El mapa representa la actividad sísmica para el área de influencia solicitada, los círculos de color rojo indican la actividad superficial, cuyo intervalo de profundidad focal va de 0 a 60 km; los de color verde representan la actividad sísmica intermedia de 61 a 300 km; y los de color azul representan la actividad sísmica profunda. La magnitud del sismo está representada por el tamaño del círculo.

  
JNR CONSULTORES S.A.  
JUAN ESPINOSA MARTÍNEZ  
Ingeniero en Geología

  
JNR CONSULTORES S.A.  
ING. JUAN JOSÉ PAREDES HERRERA  
ESPECIALISTA EN GEOTECNIA  
CIP N° 87588



  
Ing. Jaime Saavedra de Rívera  
Jefe de Estudio  
CIP N° 14288

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (MTC, 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N°53

Informe del Instituto geofísico del Perú de la actividad sísmica ocurrida en el área del Cusco



Instituto Geofísico del Perú  
Dirección de Sismología

02104

### ACTIVIDAD SÍSMICA

Solicitada por : JNR CONSULTORES S.A.

Motivo : Para los fines del solicitante

AREA	AREA DE INFLUENCIA				Período Años	Rango de Magnitud	Número Eventos
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud			
Cusco	-10.80	-74.46	-15.82	-71.96	1960 - 2015	≥4.0	1,967

JNR CONSULTORES S.A.  
JUAN ESPINOZA MARTÍNEZ  
REPRESENTANTE LEGAL

JNR CONSULTORES S.A.  
REG. ADMIN. SOC. REG. FISCAL Y PERÚ  
E.O. GEOLOGÍA Y GEOTECNIA  
C.P. N° 57589



Ing. Jaime Escobedo de Rivero  
Jefe de Estudio  
C.P. N° 54401

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (MTC, 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N°54

Informe del Instituto Geofísico del Perú de la actividad sísmica ocurrida en el área del Cusco



Listado de Parámetros Hipocentrales Localizados en la Región Cusco  
Período: 1960 - 2015 Magnitud  $\geq 4.0$

02105

Fecha aaaa/mm/dd	Hora UTC	Lat. °S	Lon. °O	Prof. km	Magnitudes			
					mb	ML	Ms	Mw
1960/04/01	13:18:23.0	-14.500	-73.500	100			5.9	
1960/07/09	02:05:39.0	-13.000	-70.500	200	5.7			
1960/11/03	22:02:19.0	-14.400	-71.600	55	5.0			
1960/12/17	07:38:31.0	-15.200	-73.500	28	4.8			
1961/08/19	05:09:49.0	-10.800	-71.000	649	6.0		7.0	
1961/08/20	09:10:11.0	-11.500	-70.600	630	5.9			
1961/08/28	06:28:19.0	-15.200	-70.200	185	5.0			
1961/08/28	21:27:16.0	-14.100	-73.900	100	4.3			
1961/09/12	11:18:25.0	-11.100	-70.600	543	5.3			
1961/11/08	19:30:00.0	-13.980	-71.900	20	4.8			
1961/11/10	02:07:34.0	-14.300	-71.900	68	5.3			
1962/01/25	07:26:04.0	-15.700	-69.600	190	4.1			
1962/03/01	02:12:37.0	-15.700	-74.300	64	5.7			
1962/03/12	01:52:37.0	-13.900	-72.600	91	4.6			
1962/03/22	20:50:36.0	-14.900	-70.700	119	4.7			
1962/09/09	03:21:55.5	-15.600	-73.400	98	4.9			
1962/09/22	16:45:31.0	-15.500	-73.100	137	4.8			
1963/02/24	05:38:19.0	-15.100	-72.500	97	5.0			
1963/02/27	11:00:42.0	-15.100	-73.600	105	5.2			
1963/05/17	14:11:05.0	-14.100	-73.900	94	5.1			
1963/07/22	16:33:22.0	-12.500	-73.700	79	4.5			
1963/08/01	18:30:26.0	-15.000	-71.800	100	4.1			
1963/08/18	23:07:54.0	-14.200	-71.900	31	4.6			
1963/09/10	07:36:08.0	-14.600	-73.600	176	4.0			
1963/10/27	07:45:26.0	-14.700	-71.700	121	4.2			
1963/11/03	07:38:10.0	-15.600	-73.300	112	4.8			
1963/11/06	01:01:07.0	-12.800	-73.900	86	4.4			
1963/11/12	12:26:45.0	-15.800	-72.400	33	4.0			
1963/11/29	01:58:45.0	-15.100	-73.700	124	4.7			
1963/12/27	00:09:59.0	-13.400	-72.700	42	4.1			
1964/01/28	13:03:49.9	-14.820	-71.850	136	4.1			
1964/03/19	22:29:04.1	-15.483	-72.980	117	4.7			
1964/04/25	11:46:14.7	-15.690	-70.460	219	4.0			
1964/04/25	13:36:07.2	-15.590	-69.500	268	4.0			
1964/05/14	11:30:13.6	-15.560	-70.860	185	4.0			
1964/05/18	04:15:05.4	-12.150	-73.530	81	4.3			
1964/06/06	00:32:52.1	-14.930	-72.100	108	4.1			
1964/06/21	06:54:48.0	-15.290	-73.413	95	5.0			
1964/07/01	22:49:19.5	-14.310	-73.256	84	5.3			
1964/07/02	09:09:37.3	-11.500	-74.360		4.6			
1964/09/17	07:41:14.3	-15.780	-72.945	106	4.9			
1964/10/17	07:45:33.4	-13.460	-72.600	44	4.4			
1964/10/28	03:07:08.1	-13.500	-72.670	54	4.4			
1964/12/06	03:15:38.3	-15.530	-70.600	168	4.6			



Dr. Jaime Salazar de Tovar  
Jefe de Registro

JUAN...  
Instituto Geofísico del Perú

JNR CONSULTORES S.A.  
ING. JORGE ENRIQUE FLORES HEREDIA  
Esp. OCCUPACION GEOLOGICA  
CIP N° 21949



Nota: Información sacada del proyecto "Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730" (MTC, 2020).  
Recuperado de: <https://www.pvn.gov.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.



Anexo N°55

Informe del Instituto Geofísico del Perú de la actividad sísmica ocurrida en el área del Cusco.



0211

Fecha aaaa/mm/dd	Hora UTC	Lat. °S	Lon. °O	Prof. km	Magnitudes		
					mb	ML	Ms
1991/03/12	09:30:53.8	-15.690	-73.940	33		4.0	
1991/03/21	01:57:31.7	-14.940	-73.700	75		4.1	
1991/03/28	17:14:59.5	-14.020	-73.210	51		4.0	
1991/04/06	07:43:35.1	-15.560	-73.470	49		4.1	
1991/04/15	08:50:57.5	-12.130	-72.260	52		4.1	
1991/05/04	23:20:41.8	-13.680	-72.410	65		4.2	
1991/06/27	22:19:07.5	-10.820	-74.400	25	4.7	4.6	
1991/07/06	12:19:45.9	-13.420	-72.470	110			7.0
1991/07/22	17:05:33.3	-13.640	-73.290	78		4.0	
1991/07/23	19:44:49.8	-15.690	-71.810			5.0	5.3
1991/07/29	13:52:29.6	-14.290	-73.330	96	5.5	5.5	
1991/08/03	23:02:40.7	-14.930	-72.080	113	4.2	4.6	
1991/08/08	12:02:18.8	-11.430	-73.100	71		4.8	
1991/08/08	13:22:52.8	-11.650	-73.470	21		4.8	
1991/08/22	22:02:28.7	-15.290	-72.700	108	4.5	4.8	
1991/10/11	04:56:48.5	-15.300	-74.310	94		4.0	
1991/10/24	00:38:13.1	-14.290	-74.100	120		4.1	
1991/10/26	10:35:20.6	-15.650	-73.840	65		4.0	
1991/10/30	08:58:41.2	-14.630	-73.570	87		4.2	
1991/10/31	14:20:42.6	-14.120	-71.170	69		4.2	
1991/11/15	04:39:48.0	-14.420	-74.420	113		4.2	
1991/11/23	10:15:07.4	-12.870	-72.960	84		4.1	
1991/12/02	17:27:21.0	-15.750	-69.590	220	5.1	5.2	
1991/12/13	06:20:06.3	-15.600	-74.270	86		4.0	
1991/12/19	04:51:02.4	-11.540	-73.160	50		4.0	
1992/01/11	09:13:15.1	-15.660	-72.240	30		4.0	
1992/01/16	12:42:15.7	-14.620	-72.690	14		4.0	
1992/01/19	06:52:25.2	-14.440	-73.770	45		4.1	
1992/02/01	17:22:33.0	-15.660	-71.810	15	5.0	5.0	
1992/02/19	05:55:23.0	-13.790	-71.260	164		4.1	
1992/02/21	04:52:27.0	-14.240	-73.930	21	4.5	4.5	
1992/02/25	02:59:45.6	-15.290	-72.010	42		4.3	
1992/03/18	16:59:41.3	-11.350	-72.770	126		4.1	
1992/03/29	05:27:22.0	-12.990	-72.260	50		4.2	
1992/03/29	06:51:04.9	-11.750	-73.890	19		4.2	
1992/05/20	12:07:55.6	-11.070	-73.410	142		4.1	
1992/05/24	05:39:10.6	-14.970	-72.550	68		4.2	
1992/06/08	06:15:28.2	-13.630	-72.290	49		4.2	
1992/06/24	01:18:25.3	-12.310	-71.720	50		4.0	
1992/07/28	19:01:41.2	-13.020	-71.710	140		4.0	
1992/09/06	13:55:55.0	-15.170	-73.430	20		4.4	
1992/09/12	15:30:58.3	-15.170	-74.290	40		4.0	
1992/09/25	18:56:43.3	-14.460	-74.000	74		4.4	
1992/09/26	04:16:20.4	-15.040	-72.080	185	4.3	4.3	
1992/10/05	04:16:12.9	-15.680	-72.900	41		4.2	
1992/10/13	04:03:19.9	-15.470	-73.950	84	4.7	4.6	



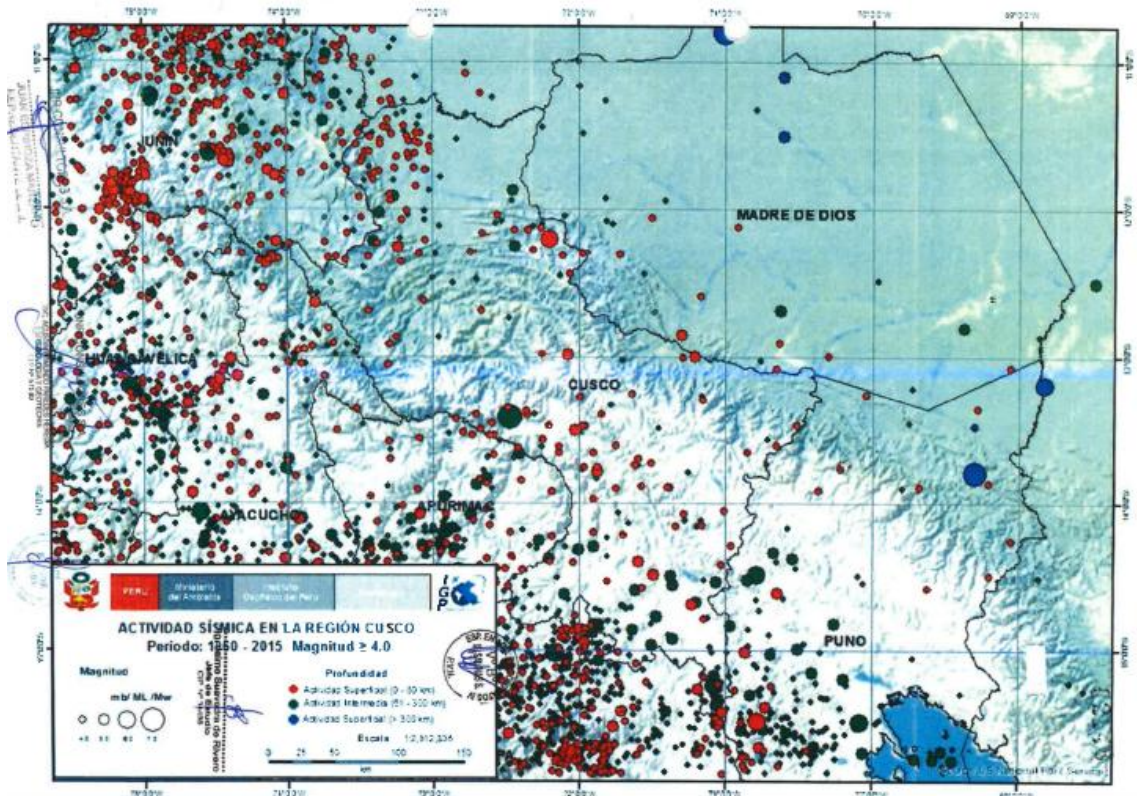
ING. Jaime Sotomayor de S.  
Jefe de Estudio  
CIP 113426

JNR CONSULTORES S.A.

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (MTC, 2020).  
Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N°56


Informe del Instituto geofísico del Perú de la actividad sísmica ocurrida en el área del Cusco.






Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (MTC, 2020).  
Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N°57

Corridas del Programa Risk



---

**RESULTS FOR SITE LOCATION**    long. -72.05    lat. -13.40    (Poblado de Chinchero)

1    PELIGRO SISMICO Subd: F1 F2 F3 F4 F5 F13 F14 F15 F16 F17 F18 F19 F20

NSTEP = 20    JCALC = 0    JPRINT = 0

LIST OF EXAMINED INTENSITIES    3.91    5.01    5.70    5.99    6.21    6.40    6.55    6.68    6.80    6.91

RISKS DESIRED    .0333    .0200    .0100    .0050    .0025    .0021    .0010    .0000


ATTENUATION DATA

	C1	C2	C3	SIGMA	RZERO	ROME	AAA	BBB
	4.23	.80	-1.00	.70	25.00	.00	100000.00	.00


NO. OF GROSS SOURCES    19

NO. OF SUBSOURCES IN GROSS SOURCES    2    2    1    1    1    1    2    2    2    1    1    2    2    2    2    1    1    1


GROSS SOURCE	L/S	COEF	M0	M1	BETA	RATE/YR	FDEPTH
1	0	1.00	4.80	8.10	2.5100	1.4900	50.0000
2	0	1.00	4.80	7.90	2.6000	3.2800	40.0000
3	0	.50	4.80	8.00	3.1400	6.4300	30.0000
4	0	.50	4.80	8.00	3.1400	6.4300	60.0000
5	0	.50	4.80	8.20	3.2400	3.7900	40.0000
6	0	.50	4.80	8.20	3.2400	3.7900	60.0000
7	0	1.00	4.80	8.20	2.8800	3.9500	60.0000
8	0	1.00	4.90	6.90	2.5200	.1800	100.0000
9	0	1.00	4.90	6.90	4.7500	.8600	100.0000
10	0	1.00	4.90	7.20	2.6900	1.6400	100.0000
11	0	1.00	4.90	7.20	3.7600	3.0900	115.0000
12	0	.33	4.90	7.50	3.6900	12.8200	90.0000
13	0	.33	4.90	7.50	3.6900	12.8200	125.0000
14	0	.33	4.90	7.50	3.6900	12.8200	160.0000
15	0	.50	4.90	7.50	2.2900	2.4300	110.0000
16	0	.50	4.90	7.50	2.2900	2.4300	180.0000
17	0	.50	4.90	7.00	3.3300	2.8700	120.0000
18	0	.50	4.90	7.00	3.3300	2.8700	160.0000
19	0	1.00	4.90	7.50	1.6900	.7500	610.0000
[BACKGROUND]	0	.00	.00	.00	.0000	.0000	.0000



INGENIERO EN SISTEMAS DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES  
JNP CONSULTORES S.A.



INGENIERO EN SISTEMAS DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES  
JNP CONSULTORES S.A.




---

ESTUDIO DEFINITIVO DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN, MEJORAMIENTO Y REHABILITACIÓN DE LA CARRETERA CUSCO - CHINCHERO - URUBAMBA, EN LA REGIÓN CUSCO, TRAMO I, KM. 14+229.50 AL KM. 21+730

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (MTC, 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N°58

Corridas del Programa Risk



INDICADOR DE COORDENADAS - 1  
0=CARTESIANAS, 1=GEOGRAFICAS



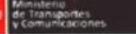




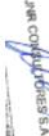



GROSS SOURCE 1	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-80.29	2.00	-78.32	2.00
GROSS SOURCE 1	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-81.39	-.97	-79.65	-1.21
GROSS SOURCE 1	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-81.52	-2.39	-80.19	-2.50
GROSS SOURCE 2	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-82.00	-3.39	-80.17	-3.45
GROSS SOURCE 2	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-82.00	-6.83	-80.67	-5.42
GROSS SOURCE 2	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-81.17	-9.00	-79.27	-7.90
GROSS SOURCE 3	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-81.17	-9.00	-79.27	-7.90
GROSS SOURCE 3	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-77.00	-14.80	-75.84	-13.87
GROSS SOURCE 4	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-81.17	-9.00	-79.27	-7.90
GROSS SOURCE 4	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-77.00	-14.80	-75.84	-13.87
GROSS SOURCE 5	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-77.00	-14.80	-75.84	-13.87
GROSS SOURCE 5	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-74.16	-17.87	-73.00	-16.53
GROSS SOURCE 6	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-77.00	-14.80	-75.84	-13.87
GROSS SOURCE 6	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-74.16	-17.87	-73.00	-16.53
GROSS SOURCE 7	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-74.16	-17.87	-73.00	-16.53
GROSS SOURCE 7	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-71.85	-19.87	-69.21	-19.00
GROSS SOURCE 7	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-71.85	-22.00	-69.21	-22.00
GROSS SOURCE 8	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-78.73	2.00	-76.00	1.82
GROSS SOURCE 8	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-81.00	-.67	-79.59	-2.55
GROSS SOURCE 8	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-81.00	-3.07	-79.20	-3.07
GROSS SOURCE 9	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-81.00	-3.07	-79.20	-3.07
GROSS SOURCE 9	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-81.93	-5.73	-78.60	-4.00
GROSS SOURCE 9	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-79.80	-8.13	-77.17	-6.53
GROSS SOURCE 10	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-79.80	-8.13	-77.17	-6.53
GROSS SOURCE 10	SUBSOURCE COORDINATE DATA	-76.00	-14.30	-73.86	-12.46

ESTUDIO DEFINITIVO DEL PROYECTO CONSTRUCCIÓN, MEJORAMIENTO Y REHABILITACIÓN DE LA CARRETERA CUSCO - CHINCHERO - URUBAMBA, EN LA REGION CUSCO, TRAMO 1: Km. 14+229.50 AL Km. 21+730

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (MTC, 2020).  
Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N°59

Corridas del Programa Risk

							
							
	GROSS SOURCE 11	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-76.38	-14.30	-73.86	-12.46
	GROSS SOURCE 11	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-73.28	-16.87	-71.21	-14.40
	GROSS SOURCE 12	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-73.28	-16.87	-71.21	-14.40
	GROSS SOURCE 12	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-70.86	-18.80	-68.93	-15.73
	GROSS SOURCE 12	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-70.38	-22.00	-67.98	-22.00
	GROSS SOURCE 13	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-73.28	-16.87	-71.21	-14.40
	GROSS SOURCE 13	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-70.86	-18.80	-68.93	-15.73
	GROSS SOURCE 13	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-70.38	-22.00	-67.98	-22.00
	GROSS SOURCE 14	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-73.28	-16.87	-71.21	-14.40
	GROSS SOURCE 14	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-70.86	-18.80	-68.93	-15.73
	GROSS SOURCE 14	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-70.38	-22.00	-67.98	-22.00
	GROSS SOURCE 15	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-79.59	-2.55	-77.50	- .73
	GROSS SOURCE 15	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-78.60	-4.00	-75.51	-2.06
	GROSS SOURCE 15	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-77.17	-6.53	-75.27	-5.33
	GROSS SOURCE 16	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-79.59	-2.55	-77.50	- .73
	GROSS SOURCE 16	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-78.60	-4.00	-75.51	-2.06
	GROSS SOURCE 16	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-77.17	-6.53	-75.27	-5.33
	GROSS SOURCE 17	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-77.17	-6.53	-75.27	-5.33
	GROSS SOURCE 17	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-73.86	-12.46	-72.03	-11.13
	GROSS SOURCE 18	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-77.17	-6.53	-75.27	-5.33
	GROSS SOURCE 18	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-73.86	-12.46	-72.03	-11.13
	GROSS SOURCE 19	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-72.31	-6.67	-71.00	-6.33
	GROSS SOURCE 19	SUBSOURCE	COORDINATE DATA	-71.14	-11.30	-69.69	-10.93
	GROSS SOURCE 1	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	72672.0			
	GROSS SOURCE 1	SUBSOURCE 2	EXACT AREA	26429.0			
	GROSS SOURCE 1		TOTAL AREA	99101.1			

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (MTC, 2020).

Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N°60

Corridos del Programa Risk

JNP		PERÚ		Ministerio de Transportes y Comunicaciones		Proviás Nacional	
GROSS SOURCE 2	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	50581.4				
	SUBSOURCE 2	EXACT AREA	63213.4				
		TOTAL AREA	113794.9				
GROSS SOURCE 3	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	155885.0				
		TOTAL AREA	155885.0				
GROSS SOURCE 4	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	155885.0				
		TOTAL AREA	155885.0				
GROSS SOURCE 5	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	77900.9				
		TOTAL AREA	77900.9				
GROSS SOURCE 6	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	77900.9				
		TOTAL AREA	77900.9				
GROSS SOURCE 7	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	89404.0				
	SUBSOURCE 2	EXACT AREA	78312.1				
		TOTAL AREA	167716.1				
GROSS SOURCE 8	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	127405.3				
	SUBSOURCE 2	EXACT AREA	20681.6				
		TOTAL AREA	148086.8				
GROSS SOURCE 9	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	55030.6				
	SUBSOURCE 2	EXACT AREA	126747.6				
		TOTAL AREA	181778.2				
GROSS SOURCE 10	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	259880.0				
		TOTAL AREA	259880.0				
GROSS SOURCE 11	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	136109.9				
		TOTAL AREA	136109.9				
GROSS SOURCE 12	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	115848.7				
	SUBSOURCE 2	EXACT AREA	132162.7				
		TOTAL AREA	248011.4				

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (MTC, 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N°61

Corridos del Programa Risk

JNR		PERU		Ministerio de Transportes y Comunicaciones		Provincias Nacionales	
GROSS SOURCE 2	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	50581.4				
	SUBSOURCE 2	EXACT AREA	63213.4				
		TOTAL AREA	113794.9				
GROSS SOURCE 3	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	155885.0				
		TOTAL AREA	155885.0				
GROSS SOURCE 4	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	155885.0				
		TOTAL AREA	155885.0				
GROSS SOURCE 5	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	77900.9				
		TOTAL AREA	77900.9				
GROSS SOURCE 6	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	77900.9				
		TOTAL AREA	77900.9				
GROSS SOURCE 7	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	89404.0				
	SUBSOURCE 2	EXACT AREA	78312.1				
		TOTAL AREA	167716.1				
GROSS SOURCE 8	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	127405.3				
	SUBSOURCE 2	EXACT AREA	20681.6				
		TOTAL AREA	148086.8				
GROSS SOURCE 9	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	55030.6				
	SUBSOURCE 2	EXACT AREA	126747.6				
		TOTAL AREA	181778.2				
GROSS SOURCE 10	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	259880.0				
		TOTAL AREA	259880.0				
GROSS SOURCE 11	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	136109.9				
		TOTAL AREA	136109.9				
GROSS SOURCE 12	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	115848.7				
	SUBSOURCE 2	EXACT AREA	132162.7				
		TOTAL AREA	248011.4				

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (MTC, 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N°62

Corridas del Programa Risk

JNP		PERU		Ministerio de Transportes y Comunicaciones		Provincias Nacionales				
<p>JUAN MANUEL EL ESPINOZA ANZANO REPRESENTANTE LEGAL DNE 9587735</p> <p>JNP CONSULTORIA S.A.S.</p> <p>ING. AGUSTINA EDUARDO PAREDES HEREDIA ESP. GEOLOGIA Y GEOTECNIA CIP N° 51589</p> <p>Ing. James Sarmiento de Riquena Jefe de Estudio CIP N° 34498</p>										
GROSS SOURCE 13	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	115848.7							
GROSS SOURCE 13	SUBSOURCE 2	EXACT AREA	132162.7							
GROSS SOURCE 13		TOTAL AREA	248011.4							
GROSS SOURCE 14	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	115848.7							
GROSS SOURCE 14	SUBSOURCE 2	EXACT AREA	132162.7							
GROSS SOURCE 14		TOTAL AREA	248011.4							
GROSS SOURCE 15	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	79081.9							
GROSS SOURCE 15	SUBSOURCE 2	EXACT AREA	105348.2							
GROSS SOURCE 15		TOTAL AREA	184430.0							
GROSS SOURCE 16	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	79081.9							
GROSS SOURCE 16	SUBSOURCE 2	EXACT AREA	105348.2							
GROSS SOURCE 16		TOTAL AREA	184430.0							
GROSS SOURCE 17	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	184241.2							
GROSS SOURCE 17		TOTAL AREA	184241.2							
GROSS SOURCE 18	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	184241.2							
GROSS SOURCE 18		TOTAL AREA	184241.2							
GROSS SOURCE 19	SUBSOURCE 1	EXACT AREA	83194.5							
GROSS SOURCE 19		TOTAL AREA	83194.5							
RESULTS FOR SITE LOCATION		-72.05	-13.40							
INTENSITY :	3.91	5.01	5.70	5.99	6.21	6.40	6.55	6.68	6.80	6.91
ANTILOG(INTENSITY):	49.90	149.90	298.87	399.41	497.70	601.85	699.24	796.32	897.85	1002.25
ALL SOURCES E(NO/YR):	.295E+01	.186E-01	.734E-03	.179E-03	.595E-04	.223E-04	.100E-04	.495E-05	.253E-05	
ALL SOURCES E(NO/YR):	.135E-05									
ALL SOURCES RISK:	.948E+00	.184E-01	.734E-03	.179E-03	.595E-04	.223E-04	.101E-04	.495E-05	.250E-05	
ALL SOURCES RISK:	.137E-05									
RISKS:	.03330	.02000	.01000	.00500	.00250	.00210	.00100			
INTENSITY:	4.84	4.99	5.14	5.29	5.44	5.48	5.63			
ANTILOG(INTENSITY):	127.10	146.54	170.88	198.21	229.92	238.66	279.74			
FIN DEL PROGRAMA										

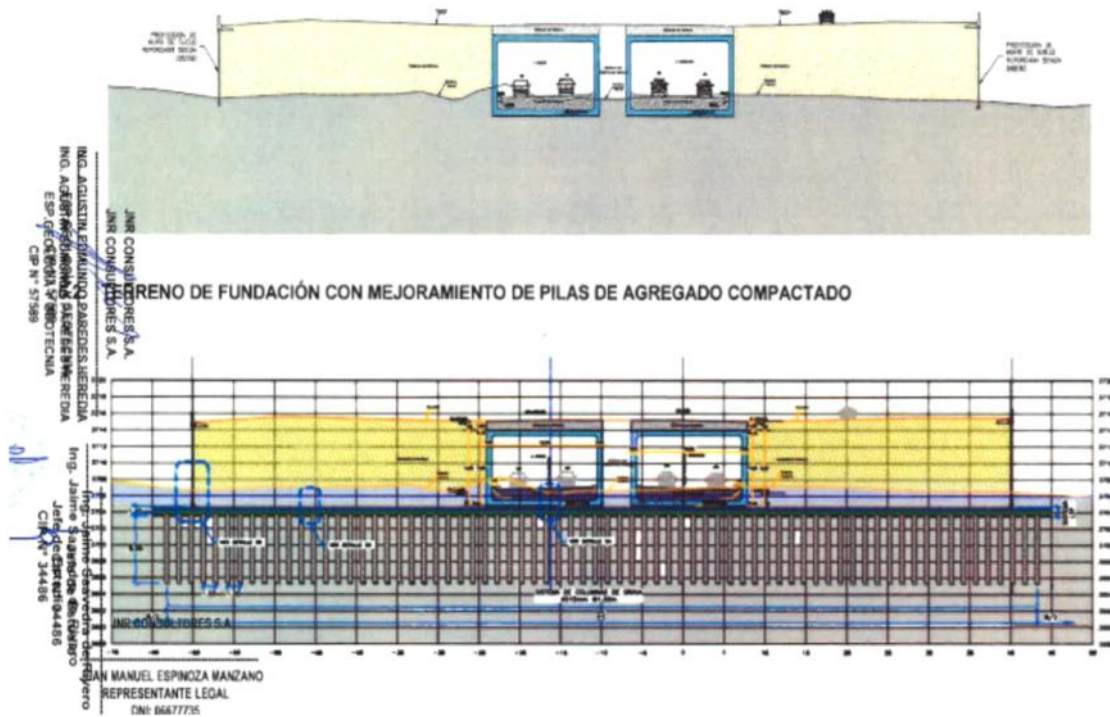
Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (MTC, 2020).  
 Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.



## Anexo N°63

### Parámetros de Diseño Geotécnico

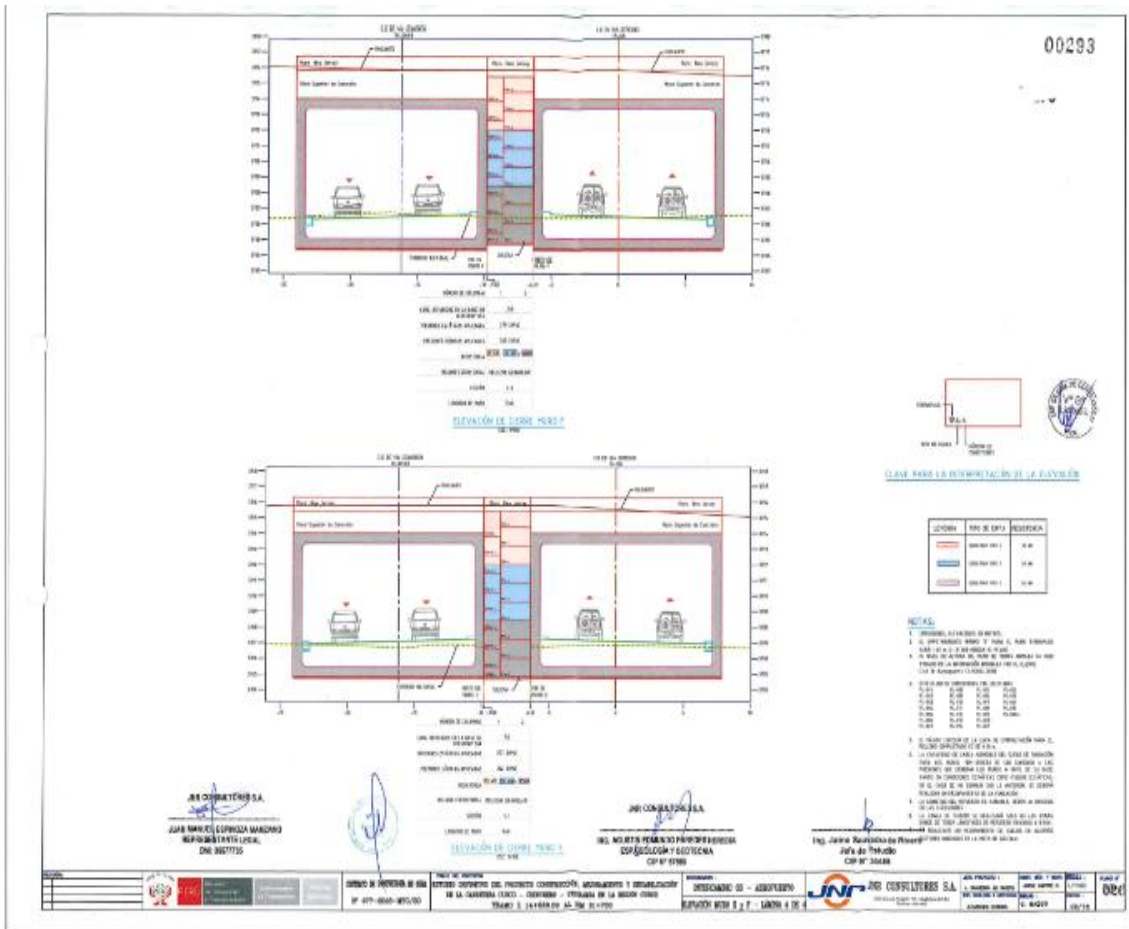
#### 5.1. TERRENO DE FUNDACIÓN SIN MEJORAMIENTO



Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (MTC, 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N°64

Parámetros de Diseño Estructural



Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (MTC, 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

Anexo N°65

Memoria de cálculo de la LTP.

**Plataforma de Transferencia de Carga con Geosintéticos (LTP)**  
Método de viga (Método Collin-2004)

**CÁLCULO PRELIMINAR**

**Tramo:** Proyecto: Mejoramiento de suelos de fundación de intercambio vial aeropuerto Chinchero      **Data:** 13/11/2018  
**Ubicación:** Cusco      **Diseño:**      **Revisión:**  
**Cliente:** JNR Consultores

**Datos de entrada:**

Tipo de cimentación profunda  
Diámetro de Pilote (d)  
Altura de plataforma (h)  
Peso unitario material granular ( $\gamma$ )  
Ángulo de fricción ( $\Phi$ )  
Espaciamento a ejes entre pilotes (s)  
Configuración de pilotes  
Esfuerzo actuante sobre la plataforma

<b>Pilas de grava</b>
<b>60 cm</b>
<b>150 cm</b>
<b>19.00 kN/m<sup>3</sup></b>
<b>34°</b>
<b>183 cm</b>
<b>TRIANGULAR</b>
<b>20.00 kN/m<sup>2</sup></b>

$\epsilon$ (%)	$\Omega$
5%	0.97

$\Omega$	Reinforcement Strain ( $\epsilon$ )%
2.07	1
1.47	2
1.23	3
1.08	4
0.97	5
0.90	6

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (MTC, 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.

## Anexo N°66

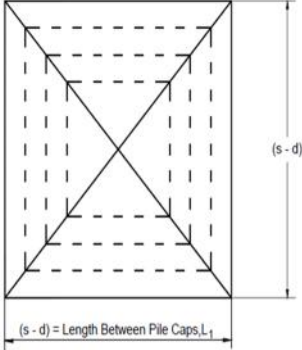
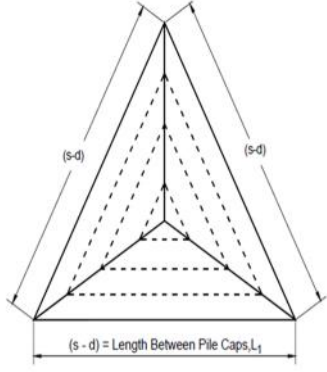
### Memoria de cálculo de la LTP.

**Proceso de Cálculo:**

Cálculo de las tensiones demandantes que actúan sobre las geomallas

n	hi (cm)	h(cm)	Li (cm)
1	30.00	30.00	107
2	30.00	60.00	86
3	30.00	90.00	64
4	30.00	120.00	43
5	30.00	150.00	21

n	Ai (cm2)	W <sub>Tn</sub> (kN/m2)	D (m)	Trpn (kN/m)
1	4957.6	29.50	0.93	13.27
2	3172.4	24.45	0.74	8.80
3	1784.0	22.85	0.56	6.17
4	792.5	22.85	0.37	4.11
5	197.8	22.85	0.19	2.05

$$W_{Tn} = [A_n + A_{n+1}] h_n \gamma / 2 A_n$$

$$T_{rpn} = W_{Tn} \Omega D/2$$

**Selección de refuerzo por capas**

PET								Resistencia a la tracción disponible	
n	Trpn (kN/m)		RF d	RF i	FR c	FRglobal			
1	13.27	TX-160	1.15	1.03	1.43	1.694	29.52 kN/m	OK	
2	8.80	TX-160	1.15	1.03	1.43	1.694	29.52 kN/m	OK	
3	6.17	TX-160	1.15	1.03	1.43	1.694	29.52 kN/m	OK	
4	4.11	TX-160	1.15	1.03	1.43	1.694	29.52 kN/m	OK	
5	2.05	TX-160	1.15	1.03	1.43	1.694	29.52 kN/m	OK	

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (MTC, 2020).  
 Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.



**FICHA TÉCNICA**  
**GEOMALLA MULTIAXIAL TX-160**

**PARA MEJORAMIENTO DE SUELOS BLANDOS Y REFUERZO DE BASES GRANULARES**

Las geomallas TX-160 son elementos elaborados a partir de láminas de resinas selectas de polipropileno, perforadas y estiradas uniformemente en tres direcciones formando costillas con un alto grado de orientación molecular y uniones integrales de alta rigidez.

La geomalla presenta una apertura triangular, un peso y características moleculares que imparten alta resistencia a la pérdida de capacidad de carga o integridad estructural contra los esfuerzos mecánicos desarrollados durante la instalación, alta resistencia a la deformación provocada por fuerzas aplicadas durante su uso y alta resistencia a la pérdida de capacidad de carga o integridad estructural contra las sollicitaciones ambientales de largo plazo.

Las geomallas son química y biológicamente inertes y resistentes a procesos degenerativos de los suelos; son resistentes al desgaste, rasgaduras y punzonamiento, y soportan cargas dinámicas aplicadas por el tráfico de construcción en cualquier dirección dentro de su plano.

La geomalla TX-160 genera una transmisión radial (360°) de esfuerzos al suelo de fundación, mediante trabazón mecánica con suelo compactado o materiales de relleno.

La geomalla posee suficiente rigidez a la flexión para lograr una instalación eficiente sobre suelos pobres o húmedos y suficiente rigidez torsional, con un mínimo de 6 costillas por unión, para resistir movimientos de rotación en el plano provocados por los suelos compactados o los materiales de relleno, cuando están sujetos a fuerzas de desplazamiento lateral tales como las causadas por un vehículo en movimiento.

La geomalla posee completa continuidad de todas las propiedades a través de su estructura y es apropiada para el refuerzo interno del suelo compactado o materiales de relleno a fin de mejorar su capacidad de soporte en aplicaciones estructurales.

JNR CONSULTORES S.A.  
  
AN MANUEL ESPINOZA MANZANO  
REPRESENTANTE LEGAL  
DNI: 96677735

JNR CONSULTORES S.A.  
  
ING. AGUSTIN EDMUNDO PAREDES HEREDIA  
ESP.GEOLÓGIA Y GEOTECNIA  
CIP N° 57589

Ing. Jaime Saavedra de Rivero  
Jefe de Estudio  
CIP N° 34486

ESTUDIO DEFINITIVO DEL PROYECTO CONSTRUCCIÓN, MEJORAMIENTO Y REHABILITACIÓN DE LA CARRETERA CUSCO - CHINCHERO - URUBAMBA  
EN LA REGIÓN CUSCO, TRAMO I, km 14+229.50 AL km 21+730

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (MTC, 2020). Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.



La geomalla estructural TX-160 presenta las características indicadas en la tabla siguiente:

PROPIEDADES	LONGITUDINAL	DIAGONAL	TRANSVERSAL	GENERAL
Distancia entre costillas paralelas, mm (pulg) <sup>(2)</sup>	40 (1.60)	40 (1.60)	-	
Peralte de la costilla, mm (pulg) <sup>(2)</sup>	-	1.6 (0.06)	1.4 (0.06)	
Ancho de la costilla, mm (pulg) <sup>(2)</sup>	-	1.0 (0.04)	1.2 (0.05)	
Forma de la costilla				rectangular
Forma de la apertura				triangular
<b>Integridad Estructural</b>				
Eficiencia en las juntas <sup>(3)</sup> %				93
Rigidez radial a bajas deformaciones, <sup>(4)</sup> kN/m @ 0.5% strain				300
Rigidez radial a bajas deformaciones, <sup>(4)</sup> (lb/pie @ 0.5% strain)				20,580
<b>Durabilidad</b>				
Resistencia a la degradación química <sup>(5)</sup>				100%
Resistencia a la degradación por luz ultravioleta y condiciones ambientales <sup>(6)</sup>				70%

**Notas:**

1. Los valores indicados son los valores mínimos promedio de rollo determinados por el método de ASTM D4759-02 salvo que se especifique lo contrario. Los valores mínimos promedios de rollo (MARV) son valores estadísticos iguales a los valores promedio menos dos veces la desviación estándar.
2. Dimensiones nominales.
3. La capacidad de transferencia de carga se mide via ASTM D6637-10 y ASTM D7737-11 y es expresada como un porcentaje de la resistencia a la tensión última.
4. El esfuerzo radial se determina a partir de los esfuerzos de tensión medidos en cualquier eje del plano para pruebas en concordancia con la ASTM D 6637-10.
5. La resistencia a la pérdida de capacidad de carga cuando la geomalla es sometida a ambientes agresivos químicamente se obtiene mediante el ensayo de inmersión de acuerdo con la EPA 9090.
6. La resistencia a la pérdida de capacidad de carga cuando la geomalla es sometida a 500 horas de luz ultravioleta y ambientes agresivos, se obtiene de acuerdo a las pruebas ASTM D 4355-05.
7. Para mayor información sobre los procesos de ensayos y normas mencionadas puede visitar los siguientes websites: [www.astm.org](http://www.astm.org), [www.drexel.edu/gri](http://www.drexel.edu/gri) o [www.epa.gov](http://www.epa.gov)

JNR CONSULTORES S.A.  
 UAN MANUEL ESPINOZA MANZANO  
 REPRESENTANTE LEGAL  
 DNI 36677735

JNR CONSULTORES S.A.  
 ING. AGUSTIN EDMUNDO PAREDES HEREDIA  
 ESP.GEOLOGÍA Y GEOTECNIA  
 CIP N° 57589

Ing. Jaime Saavedra de Rivero  
 Jefe de Estudio  
 CIP N° 34486

ESTUDIO DEFINITIVO DEL PROYECTO CONSTRUCCIÓN, MEJORAMIENTO Y REHABILITACIÓN DE LA CARRETERA CUSCO - CHINCHERO - URUBAMBA, CUSCO

Nota: Información sacada del proyecto “Construcción, mejoramiento y rehabilitación de la carretera Cusco, Chinchero - Urubamba en la región de Cusco - tramo 1, km 14+229.50 al 21+730” (MTC, 2020).

Recuperado de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/am-cusco-ene-2019.pdf>.