

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Tesis

Comparación del control de grado de compactación In Situ, utilizando el deflectómetro de peso liviano (LWD) comparado a los resultados del método nuclear y método del cono de arena para un tramo del proyecto Tocache-Juanjuí, en la región San Matrín

Charo Nery Berrocal Espinal

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Civil

Huancayo, 2019

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/peru/)

ASESOR

Ing. Andrés Sotil Chávez

AGRADECIMIENTO

A mis padres Cristina Espinal Meza y Justo Berrocal Canchari quienes me brindaron su apoyo incondicional en esta etapa de formación académica, a mis hermanos, familiares y amigos por su constante apoyo.

A mi asesor Ing. Andrés Sotíl Chávez, por su paciencia, tiempo, motivación y transmitirnos sus conocimientos y facilitar la información necesaria en la elaboración de esta investigación.

A la empresa Acruta & Tapia ingenieros S.A.C. Encargado de la Supervisión del proyecto Tocache – Juanjuí, por brindarme los recursos necesarios para realizar esta investigación.

DEDICATORIA

A mis padres Cristina Espinal Meza y Justo Berrocal Canchari, por brindarme su apoyo incondicional durante toda esta formación académica

ÍNDICE

PORTADA.....	I
ASESOR	II
AGRADECIMIENTO	III
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE	V
LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE ANEXOS.....	XI
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT.....	XIV
INTRODUCCIÓN.....	XVI
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	17
1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
1.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.2.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA:.....	21
1.2.1. PROBLEMA GENERAL:.....	21
1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS:.....	21
1.3. OBJETIVOS	21
1.3.1. OBJETIVO GENERAL:.....	21
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICO:.....	21
1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	22
1.5.HIPÓTESIS Y DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.....	22
1.5.1. PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS:.....	22
1.5.2. VARIABLES:.....	23
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	24
2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.....	24
2.2. BASES TEÓRICAS	27
2.2.1. MAQUINARIAS DE COMPACTACIÓN.....	27
2.2.2. MÁQUINAS UTILIZADAS PARA LA COMPACTACIÓN DE SUELOS.....	28
2.2.3. METODOLOGÍA DE COMPACTACIÓN.....	29
2.2.3.1. COMPACTACIÓN DEL SUELO EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA.....	29
2.2.4. EQUIPOS PARA EL CONTROL DE COMPACTACIÓN IN-SITU.....	30
2.2.4.1. CÁLCULO DE LA DENSIDAD POR EL MÉTODO CONO DE ARENA.....	30
2.2.4.2. EQUIPOS	31
2.2.4.3. PROCEDIMIENTO	32
2.2.4.4. CÁLCULOS	35
2.2.5. SPEEDY CÁLCULO DE PORCENTAJE DE HUMEDAD IN-SITU	35
2.2.5.1. Procedimiento:.....	36
2.2.5.2. CÁLCULOS	36
2.2.6. DENSÍMETRO NUCLEAR	38
2.2.6.1. Equipo	39
2.2.6.2. Limitaciones:.....	40
2.2.6.3. Procedimiento:.....	41
2.2.6.4. CÁLCULOS	43
2.2.7. DEFLECTÓMETRO DE PESO LIVIANO (LWD)	43
2.2.7.1. EQUIPOS	44
2.2.7.2. PROCEDIMIENTO	46
2.2.7.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL LWD	49
2.2.7.4. Descripción del LWD.....	50
2.2.8. MÓDULO RESILIENTE.....	57
2.2.8.1. Concepto de resiliencia	57

2.2.8.2.	“Factores que afectan el Módulo Resiliente de un material granular”	59
2.2.8.3.	Diseño Estructural de la estructura del pavimento.....	63
2.2.8.4.	Métodos Mecanicistas	64
2.2.8.5.	Correlaciones existentes de módulo resiliente con otras propiedades	65
2.2.8.6.	Antecedentes del análisis estadístico	66
CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....		69
3.1.	MÉTODOS Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	69
3.1.1.	Métodos de Investigación.....	69
3.1.2.	Alcance de la Investigación	69
3.1.2.1.	Exploratorio	70
3.1.2.2.	Descriptivo:.....	70
3.1.2.3.	Correlacional:	71
3.1.3.	Diseño de la investigación.....	71
3.1.4.	Población y muestra	72
3.1.4.1.	Población:.....	72
3.1.4.2.	Muestra:.....	73
3.2.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	74
3.2.1.	PROCEDIMIENTO TÉCNICO.....	75
3.2.2.	Procedimiento metodológico.	77
3.2.2.1.	Procedimientos metodológicos para determinar la compactación en el laboratorio de un suelo a través de proctor modificado.	77
3.2.2.2.	Procedimiento metodológico para determinar la compactación en sitio de un suelo a través del cono de arena, densímetro Nuclear y LWD.....	80
3.2.2.3.	Procedimiento metodológico para el método cono de arena.....	80
3.2.2.4.	Procedimiento metodológico con densímetro Nuclear.....	82
3.2.2.5.	Procedimiento metodológico con el quipo LWD	87
3.2.2.6.	Procedimiento metodológico para analizar a diferencia de los resultados obtenidos con el LWD, “Densímetro Nuclear” y el “Cono de Arena”.	90
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN		91
4.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROYETO EVALUADO	91
4.1.1.	CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO:.....	91
4.1.2.	Resultados del tratamiento y análisis de la información (Primera visita en campo)	94
4.1.2.1.	Resultado de ensayo de cono de arena.....	94
4.1.2.2.	Resultado de los ensayos con el densímetro nuclear.....	95
4.1.2.3.	Resultados de los ensayos con el equipo LWD.....	96
4.1.2.4.	Correlación de grados de compactación LWD Vs Cono de Arena	97
4.1.2.5.	Correlación de grados de compactación LWD Vs. Densímetro Nuclear	98
4.1.2.6.	Correlación de grados de compactación cono de arena VS densímetro Nuclear	99
4.1.2.7.	Análisis de los resultados de los ensayos y de la correlación de los grados de compactación	100
4.1.3.	Muestra de resultados de la segunda obtención de resultados.....	103
4.1.3.1.	Resultado de correlación de cono de arena y densímetro nuclear obtenido..	103
4.1.3.2.	Resultado de los ensayos con el densímetro nuclear.....	104
4.1.3.3.	Resultados de los ensayos con el equipo LWD.....	105
4.1.3.4.	Correlación de grados de compactación DENSÍMETRO NUCLEAR Vs. LWD segunda visita.....	106
4.1.3.5.	Análisis de los resultados de los ensayos y de la correlación de los grados de compactación (segunda visita).....	107
4.1.4.	Obtención de correlación indirecta	109
4.1.4.1.	Correlación entre el equipo LWD Vs. DENSÍMETRO NUCLEAR	110
4.1.4.2.	Análisis del resultado de la correlación indirecta	112
4.1.5.	Comparación de tiempos empleado para cada método	112

CONCLUSIONES.....	114
RECOMENDACIONES.....	115
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116
ANEXOS.....	118
APÉNDICES.....	143

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Volúmenes mínimos del hoyo de ensayo	33
Tabla 2: Tabla de lecturas	37
Tabla 3: Especificaciones Técnicas del equipo LWD	49
Tabla 4: Especificaciones Técnicas del Software Minidyn 2	50
Tabla 5: Correlaciones entre MR y CBR	66
Tabla 6: Parámetros de Bondad de Ajuste	68
Tabla 7: Requerimiento de ensayos especiales en la Sub-base granular.....	77
Tabla 8: Modelo de planilla de la obtención de datos y cálculos de ensayo Proctor.....	79
Tabla 9: Formato de cálculo de grado de compactación por el método Cono de Arena.....	81
Tabla 10: Tabla de Registro de Resultados del Densímetro Nuclear.....	86
Tabla 11: Tabla de registro de resultados del LWD.....	89
Tabla 12: Modelo de tabla para comparar os resultados obtenidos con los equipos densímetro nuclear y LWD	90
Tabla 13: Cuadro de espesores de la estructura del pavimento	92
Tabla 14: Resultados de los ensayos con el Cono de Arena	94
Tabla 15: Resultados de los ensayos con Densímetro Nuclear	95
Tabla 16: Resultados de los ensayos con el LWD.....	96
Tabla 17: Cuadro de diferencia de grados de compactación con cada uno de los equipos	101
Tabla 18: Parámetros de Bondad de Ajuste	102
Tabla 19: Resumen de resultados de la correlación de grados de compactación	103
Tabla 20: Resultados de ensayo con el Densímetro Nuclear de la segunda visita.....	105
Tabla 21: Resultado de los ensayos con el LWD de la segunda visita	106
Tabla 22: Diferencia de grados de compactación entre el densímetro nuclear y LWD de la segunda visita a obra	108
Tabla 23: Parámetros de Bondad de Ajuste	109
Tabla 24: Resumen de resultados de la correlación de grados de compactación	109
Tabla 25: Resultado de grados de compactación con LWD, tomados como una calibración.....	110
Tabla 26: Tabla de comparación de tiempos con los tres equipos.....	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Método Cono de arena	18
Figura 2: Método nuclear – Densímetro Nuclear	18
Figura 3: Uso del Equipo Deflectómetro de Peso Liviano (LWD)	19
Figura 4: Proyecto Tocache - Juanjui	20
Figura 5: Motoniveladora	28
Figura 6: Tándem o rodillo liso de 2 tambores	29
Figura 7: Pisón a explosión	29
Figura 8: Curva de compactación proctor	30
Figura 9: Ensayo de grados de compactación por el Método de cono de arena	31
Figura 10: Placa metálica con bridas	32
Figura 11: Nivelación de suelo para colocar la placa	33
Figura 12: Colocación de placa y excavación de hoyo	33
Figura 13: Masa de suelo húmedo	34
Figura 14: Peso del frasco antes del ensayo	34
Figura 15: Frasco y cono volteado	34
Figura 16: Peso del frasco después de haber derramado la arena al hoyo.	35
Figura 17: Muestra de los materiales necesarios del Speedy	36
Figura 18: Toma de lecturas de la humedad con Speedy	36
Figura 19: Correlación de humedades	37
Figura 20: Cálculo de densidad por transmisión directa	38
Figura 21: Equipos y accesorios del densímetro nuclear	40
Figura 22: Varilla de perforación siendo clavada	42
Figura 23: Vástago introducido	42
Figura 24: Introducir el vástago hasta la profundidad necesaria	42
Figura 25: Lectura de resultados	43
Figura 26: Equipo Deflectómetro de Peso Liviano (LWD)	44
Figura 27: Partes del equipo LWD	44
Figura 28: Caja de Transporte de Equipo LWD	45
Figura 29: Apreciación de Equipo LWD	46
Figura 30: Muestra de superficie plana para ubicar el equipo LWD	46
Figura 31: Muestra de cómo se coloca la palma de la mano en la parte superior.	47
Figura 32: Muestra de cómo se levanta el plato de carga.	47
Figura 33: Muestra del impacto de amortiguadores de caucho	47
Figura 34: muestra del computador portátil.	48
Figura 35: Muestra instantánea de los gráficos históricos de impacto.	48
Figura 36: Efecto del contacto poco uniforme e/ el plato de carga y la superficie evaluada	55
Figura 37: “Efecto de la compactación en las mediciones con el LWD”	56
Figura 38: “Aumento del Módulo LWD con el número”	56
Figura 39: “Acumulación de la deformación con el número de ciclos	58
Figura 40: “Evolución del módulo de resiliencia con el número de ciclos”	62
Figura 41: “Evolución del módulo de Resiliencia con el nivel de esfuerzos”	63
Figura 42: Ensayos con el equipo LWD	75
Figura 43: Posiciones de la varilla con la fuente	84
Figura 44: Posición para realizar el conteo estándar con el densímetro nuclear.	84
Figura 45: Colocación de la varilla del densímetro nuclear	85
Figura 46: Marcado de la posición de la placa para raspado de densímetro	85
Figura 47: Ubicación Nacional:	92
Figura 48: Ubicación Regional	93
Figura 49: Ubicación local	93
Figura 50: Ubicación local	94
Figura 51: Resultados de Correlación LWD Vs. CONO DE ARENA	98
Figura 52: Resultados de correlación LWD Vs. DENSIMETRO NUCLEAR	99

Figura 53: Resultados de correlación CONO DE ARENA Vs. DENSÍMETRO NUCLEAR	100
Figura 54: Apreciación de Ecuación de la correlación de Resultados entre en Cono de Arena y Densímetro Nuclear	104
Figura 55: Resultado de Correlación entre el LWD y DENSIMETRO NUCLEAR de la segunda visita.	107
Figura 56: Resultados de correlación con el LWD vs DENSIMETRO NUCLEAR a partir de una ecuación de calibración.....	111

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Ensayo de análisis granulométrico tamizado (Primera visita)	119
Anexo 2: Ensayo de límites de Attenberg (Primera visita).....	121
Anexo 3: Ensayo de contenido de humedad (Primera visita)	122
Anexo 4: Ensayo de proctor modificado (Primera visita)	123
Anexo 5: Gravedad específica y absorción de los agregados (Primera visita)	124
Anexo 6: Ensayo de densidad de campo con cono de arena (Primera visita)	125
Anexo 7: Densidad de campo método nuclear (Primera visita).....	128
Anexo 8: Grados de compactación con el equipo (Lwd) (Primera visita)	129
Anexo 9: Ensayo de análisis granulométrico por tamizado (Segunda visita)	130
Anexo 10: Ensayo de límites de Attenberg (Segunda visita)	132
Anexo 11: Ensayo de proctor modificado (Segunda visita)	133
Anexo 12: Ensayo de abrasión, máquina de Los Ángeles (Segunda visita)	134
Anexo 13: Gravedad específica y absorción de los agregados (Segunda visita).....	135
Anexo 14: Ensayo de abrasión (Segunda visita)	136
Anexo 15: Ensayo de Cbr (Segunda visita)	137
Anexo 16: Resultados de resilientes con el Lwd a cada 5 metros de distancia (Segunda visita).....	140
Anexo 17: Grados de compactación con el equipo (Lwd) (Segunda visita)	142

RESUMEN

La compactación del suelo tiene un proceso constructivo importante en la Ingeniería Civil, ya que su finalidad es mejorar las propiedades y sus características de resistencia del suelo, la compresibilidad y la relación esfuerzo – deformación de los suelos, en donde es necesario realizar el control de calidad de materiales como es el grado de compactación con métodos que nos den resultados confiables, en el menor tiempo posible.

Por este motivo se realiza esta investigación dando uso al Deflectómetro de Peso Liviano (LWD). Un equipo al que se busca adaptar para el control de calidad de materiales, esto a través de los resultados de Módulos Resilientes del paquete estructural del pavimento, en el marco de control de calidad del suelo, usando como indicador el grado de compactación obtenido a través de Módulos Resilientes; esta investigación se realiza en el proyecto de la carretera de Tocache – Juanjuí, utilizando como patrón de comparación a los métodos de Cono de Arena con Norma MTC E - 117 y Densímetro Nuclear MTC - 124 ya que estos métodos son mencionados en las especificaciones técnicas del proyecto para el control de calidad del suelo.

Se realizó dos análisis de resultados en 2 distintas fechas de visita al proyecto, el primero se realizó con 20 muestras por cada equipo haciendo un total de 60 muestras, de donde nos da como resultado la correlación entre el cono de arena y el Densímetro Nuclear, la correlación del LWD con ambos equipos utilizados como patrón no se considera aceptable considerando los parámetros de bondad de ajuste ya que el R^2 es menor que 0.70 esta interpretación da a conocer que la correlación no es confiable estadísticamente, sin embargo la correlación entre cono de arena y el densímetro nuclear sí es válido considerado como excelente según los parámetros de bondad de ajuste lo cual tiene como resultado $R^2=0.9334$, esta correlación es usada para la correlación de la segunda visita, quiere decir que la comparación de resultados de grados de compactación en este análisis solo se realiza entre el LWD y el Densímetro Nuclear perfeccionando algunas dificultades en cuanto a la toma de datos con el equipo LWD.

Para la segunda visita se toma 12 ensayos con cada uno de los equipos haciendo un total de 24 muestras, donde no se encontró un resultado que no es aceptada por ser esta una correlación muy pobre $R^2=0.0182$, según los parámetros de bondad de ajuste, sin embargo se usó un método estadístico como una ecuación de calibración de los datos obtenidos, donde se consigue una correlación indirecta aceptable con un $R^2= 0.7147$ y es considerado bueno según los parámetros de bondad de ajuste.

Existe diferencia significativa en los valores suministrados por los 3 métodos, por lo que se considera el uso del equipo LWD no es factible en la forma que se realizó la toma de datos en este proyecto de investigación para el control de calidad de grados de compactación, pero se da a conocer datos muy importantes para futuros estudios relacionados con esta investigación, así como la consideración del tipo de material que se encuentra dentro de los 45 centímetros de altura de la estructura del pavimento, es decir la sub rasante, sub base o base que formen parte de los 45 centímetros de altura.

ABSTRACT

Soil compaction has an important construction process in Civil Engineering, since its purpose is to improve the properties and their characteristics of soil resistance, compressibility and stress-strain relationship of the soil, where it is necessary to carry out the control of quality of materials such as the degree of compaction with methods that give us reliable results, in the shortest possible time.

For this reason this research is carried out using the Lightweight Deflectometer (LWD). A team that seeks to adapt for the quality control of materials, this through the results of Resilient Modules of the structural pavement package, in the framework of soil quality control, using as an indicator the degree of compaction obtained through of Resilient Modules; This research is carried out in the Tocache - Juanjui highway project, using the Sand Cone methods with MTC E - 117 and MTC - 124 Nuclear Densimeter as a comparison standard since these methods are mentioned in the technical specifications of the project for soil quality control.

Two results analysis was carried out on 2 different dates of the project visit, the first one was carried out with 20 samples for each team making a total of 60 samples, from which the correlation between the sand cone and the Nuclear Densimeter results. The correlation of the LWD with both equipment used as a standard is not considered acceptable considering the goodness of fit parameters since R^2 is less than 0.70. This interpretation reveals that the correlation is not statistically reliable, however the correlation between sand cone and if the nuclear density meter is considered as excellent according to the parameters of goodness of fit which results in $R^2 = 0.9334$, this correlation is used for the correlation of the second visit, which means that the comparison of compaction degree results in This analysis is only performed between the LWD and the Nuclear Densimeter, perfecting some difficulties in terms of data collection with the LWD device.

For the second visit, 12 trials were taken with each of the teams making a total of 24 samples, where no result was found that is not accepted because this is a very poor correlation $R^2 = 0.0182$, according to the goodness of fit parameters, however, a statistical method was used as an equation for calibration of the data obtained, where an acceptable indirect correlation is achieved with an $R^2 = 0.7147$ and is considered good according to the goodness of fit parameters.

There is a significant difference in the values provided by the 3 methods, so the use of LWD equipment is considered not feasible in the way data was taken in this research project for the quality control of compaction degrees, but very important data is released for future

studies related to this research, as well as the consideration of the type of material that is within 45 centimeters of height of the pavement structure, that is, the sub-level, sub-base or base that are part of the height of 45 centimeters.

INTRODUCCIÓN

La compactación de un suelo tiene una gran importancia porque con esto se busca incrementar la resistencia y disminuir la deformación del suelo, que generalmente se realizan en un relleno o conformación del pavimento y terraplenes de carreteras, relleno de muro y otros; estos rellenos que son compactados deben ser verificados por el área técnica de control de calidad. En el cual se realiza el control de calidad de grado de compactación mediante diferentes metodologías de ensayos utilizados en campo como es el método de cono de arena, densímetro nuclear y la aplicación del uso del LWD para obtener grados de compactación en esta investigación, el propósito es saber si el LWD, mediante su indicador Módulos Resilientes puede ser utilizados con la misma confiabilidad de los métodos normados (cono de arena y densímetro nuclear) para el control de calidad de suelo en la determinación del Grado de Compactación.

En el CAPÍTULO I, se habla acerca del planteamiento y formulación del problema, los objetivos, la justificación e importancia, hipótesis y descripción de las variables donde se da a conocer el motivo por lo que realiza esta investigación.

En el CAPÍTULO II, se hace saber sobre el marco teórico, los antecedentes del problema planteado a través de algunas tesis, artículos, estudios relacionados con el tema. También se da a conocer el objetivo de cada uno de los ensayos a realizarse.

En el CAPÍTULO III, se detalla los métodos y alcances de la investigación realizada, las técnicas e instrumentos utilizados para la recolección de datos además todo el procedimiento que se realiza para la obtención de datos y ser procesadas y analizadas posteriormente.

En el CAPÍTULO IV, se presenta el análisis técnico de los resultados encontrados en los ensayos, teniendo en cuenta la claridad del Capítulo III, para proceder a una discusión crítica con el fin de interpretar correctamente los resultados.

Por último, se da a conocer las conclusiones y recomendaciones, respondiendo al planteamiento de problema, objetivos e hipótesis planteada.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El control de calidad de compactación de un suelo es de mucha importancia para garantizar el buen comportamiento mecánico que brindará el suelo durante toda su vida útil de proyectos de ingeniería. Existen diversas normas para realizar dicho control, entre las más utilizadas se tienen el método del cono de arena (ver Figura N° 01) normado por el “ASTM D-1556 (Standard Test Methods for Density and Unit Weight of Soil in Place BY Sand- Cone Method)”, y el método nuclear (ver Figura N° 2) normado por el “ASTM D 2922 (Standard Test Methods for Density of Soil and Soil-Aggregate in Place by Nuclear Methods)”; ambas enfocadas en la medición de densidad. Del mismo modo según estudios de investigación nuevos equipos y tecnologías podrían permitir realizar esta evaluación enfocándose en otras variables como es el módulo resiliente. Por ejemplo, el Deflectómetro de Peso Liviano (LWD, ver Figura N°03) esta normado por el “ASTM E 2835 – 11 (Standard Test Method for Measuring Deflections using a Portable Impulse Plate Load Test Device)”, es un dispositivo de medición deflectométrico no destructivo utilizado para evaluar la rigidez del suelo y determinar el módulo resiliente de materiales en la estructura del pavimento in - situ. Para obtener el grado de compactación con este equipo se sigue las pautas de la investigación Marradi et al y Milton Jimenez, quien hizo una investigación relacionado al control de calidad del pavimento donde la relación de los Módulos Resilientes obtenidos en campo con el equipo LWD dan como resultado el grado de compactación.

Figura 1: Método Cono de arena



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2: Método nuclear – Densímetro Nuclear



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3: Uso del Equipo Deflectómetro de Peso Liviano (LWD)



Fuente: Elaboración propia.

Con el equipo LWD a la actualidad aún no se establecen normas que indiquen o especifiquen la relación de módulos resilientes para el cálculo de grado de compactación, pero existen investigaciones así como artículos (comparación en campo con deflectómetro liviano en la evaluación de rigidez in –situ usado en el control de compactación, que fue expuesto por Milton Jiménez en el I congreso internacional de ingeniería y dirección de proyectos, una tesis que trata del uso del (LWD), y otro es la aplicación del retrocálculo en carreteras no asfaltadas, caso práctico: Proyecto regional Cuzco, de Daniel Gustavo Quiñonez Peralta, 2015), y otros como la metodología de evaluación in-situ de la capacidad de soporte en las estructura del pavimento (bases y sub bases) con el LWD quien tiene como autor a Alelí Osorio Lird, y da a conocer que con el uso de este equipo es una opción para obtener el grado de compactación mediante la relación de módulos resilientes.

El control de calidad se realiza obedeciendo al procedimiento y criterios de las normas peruanas los cuales son basados en las normas extranjeras ASTM antes mencionadas. Estas normas fueron adaptados a las condiciones propias de nuestra realidad del país, tales como la norma MTC E 117 “Ensayo para determinar la densidad de los suelos en campo por el método del cono de arena”, procedimiento con el que se obtiene el resultados después de 24 horas aproximadamente, y la norma MTC E 124 “Densidad en el sitio –método nuclear a profundidad reducida”, este método determina con mayor rapidez los resultados de la densidad de los suelos pero es altamente radioactivo por lo que genera que su manipulación es muy riesgosa para el operador quien debe tener de manera obligatoria su licencia para el manejo del equipo otorgado por el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN).

En el proyecto Tocache – Juanjuí, se encuentran realizando los trabajos de conformación de la estructura del pavimento (sub-base granular, base granular y carpeta asfáltica), (ver figura N° 04), y para garantizar el buen comportamiento mecánico que brindará este pavimento durante su vida útil se realiza el control de calidad de grado de compactación de la estructura del pavimento, dando cumplimiento a las normas peruanas que en las especificaciones técnicas del proyecto están descritas; MTC E 11 7 “Ensayo para determinar la densidad de los suelos en campo por el método del cono de arena” siendo este un método muy antiguo y confiable pero con deficiencias en cuanto al rendimiento del ensayo, también la norma MTC E 124 “Densidad en el sitio – método nuclear a profundidad reducida” de suelo en cada estructura.

Figura 4: Proyecto Tocache - Juanjui



Fuente: Fotografía tomada en el proyecto Tocache – Juanjuí

Sin embargo, para este tipo de proyectos carretera Tocache – Juanjuí, considerado como un proyecto de gran envergadura el equipo LWD sería una buena alternativa para realizar los ensayos de control de calidad en cuanto a los grados de compactación in-situ, ya que con este equipo es posible determinar rápidamente, en una manera no complicada, la calidad de compactación de suelos. No toma más de 2 minutos, para realizar un ensayo y los resultados son confiables de manera que se obtiene mayor rendimiento y se prioriza dar atención a los factores de tiempo y costo del proyecto.

Por lo mencionado se decide realizar una comparación de resultados de grados de compactación y ver la confiabilidad de resultados con el uso del Deflectómetro de Peso Liviano (LWD) comparado a los resultados del método nuclear y cono de arena como un patrón por ser un método más antiguo, confiable, eficiente para dicha comparación y quienes tienen su propia norma peruana, de esa manera encontrar una correlación estadística entre estas.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA:

1.2.1. PROBLEMA GENERAL:

¿Los resultados provistos por el LWD pueden ser utilizados para realizar el control de calidad de compactación de obra con la misma confiabilidad de resultados que brinda el cono de arena y densímetro nuclear?

1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS:

- ¿Cuál es la evaluación estadística de la significancia de la variación del Deflectómetro de peso liviano (LWD), comparado al método nuclear y cono de arena asumida como patrón?
- ¿Cuál es la correlación entre los datos obtenidos del Deflectómetro de peso liviano (LWD), densímetro nuclear y cono de arena?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL:

Determinar si los resultados con el LWD pueden ser utilizados para realizar el control de compactación de obra con la misma confiabilidad con las que se utilizan los resultados del cono de arena y del densímetro nuclear.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICO:

- Realizar una evaluación estadística de la significancia de la variación del Deflectómetro de peso liviano (LWD), comparado al método nuclear y cono de arena asumida como patrón

- Obtener la correlación entre los datos obtenidos del Deflectómetro de peso liviano (LWD), densímetro nuclear y cono de arena.

1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

A medida que la tecnología va avanzando en el área de la Ingeniería Civil, nuevos equipos van surgiendo. Como es en este caso el Deflectómetro de Impacto Ligero que es muy utilizado en diferentes proyectos para realizar evaluaciones estructurales en el paquete del pavimento, proporcionado un Módulo Resiliente. Además, la practicidad de su uso hace que sea muy eficiente, demostrando que un ensayo con este equipo puede ser realizado en menos de 2 minutos. Ello es la razón por el cual en esta investigación se ha utilizado el Módulo Resiliente del LWD con el fin de buscar una adaptación para obtener el Grado de Compactación de tal manera que pueda existir una correlación entre ellos para posteriormente este pueda ser utilizado como un controlador de calidad.

Al realizar la comparación se pretende determinar si los resultados con el LWD pueden ser utilizados para realizar el control de compactación de obra con la misma confiabilidad con las que se utilizan los resultados del cono de arena y el densímetro nuclear, para un tramo del proyecto Tocache - Juanjuí , de la región San Martín.

1.5. HIPÓTESIS Y DESCRIPCIÓN DE VARIABLES

Con el propósito de dar validez a los resultados obtenidos con el equipo LWD para aceptar o rechazar si estas pueden ser utilizadas para realizar el control de compactación de obra con la misma confiabilidad con las que se utilizan los resultados del cono de arena y densímetro nuclear se establece dos hipótesis.

1.5.1. PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS:

- **Hipótesis nula H_0 :** Los resultados obtenidos con el equipo LWD sí pueden ser utilizados para realizar el control de grados de compactación de obra con la misma confiabilidad con las que se utilizan los resultados del cono de arena y densímetro nuclear
- **Hipótesis Alternativa H_1 :** Los resultados obtenidos con el equipo LWD no pueden ser utilizados para realizar el control de compactación de obra con

la misma confiabilidad con las que se utilizan los resultados del cono de arena y densímetro nuclear.

1.5.2. VARIABLES:

El análisis de comparación de resultados para el equipo LWD, comparado a los métodos densímetro nuclear y cono de arena se realiza analizando la relación que existe entre una variable dependiente (Ensayos de control de calidad de compactación con el equipo LWD, densímetro nuclear y cono de arena) y una variable independiente (Correlación de los porcentajes de grado de compactación de cada sistema de medición), en este caso se detalla anteriormente la variable independiente será los ensayos de control de calidad de compactación con el equipo LWD, densímetro nuclear y cono de arena, ya que para realizar el control de calidad ensayos no depende de nadie, mientras que la variable dependiente serán los resultados del grados de compactación de acuerdo a la condición de compactación del suelo por que estos resultados van variar de acuerdo a la precisión de los equipos LWD, densímetro nuclear y cono de arena.

- **Variable Independiente:** Ensayos de control de calidad de compactación con el equipo LWD, densímetro nuclear y cono de arena.
- **Variable Dependiente:** Correlación de los porcentajes de grado de compactación de cada sistema de medición.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

(ALELÍ OSORIO LIRD) – Pontificia Universidad Católica de Chile – Desarrolló la tesis para optar el grado de Magíster - Metodología de evaluación In situ de la capacidad de soporte de bases y sub bases granulares de pavimentos flexibles con el deflectómetro de impacto liviano, desarrollado y publicado en julio del 2008.

Este desarrollo de tesis se realizó con el objetivo de proponer una metodología para el uso del Deflectómetro de Impacto Liviano en la evaluación in situ de la capacidad de soporte de capas granulares de pavimentos flexibles. Donde indica que los métodos actuales de diseño estructural de pavimentos flexibles incluido la nueva norma Guía ASASHTO 2008, Utilizan como indicador de la capacidad estructural de las capas granulares de Módulo Resiliente (MR) de la misma. Sin embargo, durante la construcción del pavimento, los materiales granulares se especifican según el valor de CBR (California Bearing Ratio) y se controlan en terreno según los valores de densidad alcanzados. Es por esta razón que es necesario incorporar en el proceso de control de calidad, un método de control de la capacidad estructural real de las capas granulares, que refleje si se cumplen o no las hipótesis de diseño. También da mención que el equipo LWD, permite evaluar en terreno el MR de las capas granulares y sub-rasante de un pavimento. Diversos estudios afirman que este equipo puede ser usado confiablemente para evaluar la capacidad estructural de estas capas; sin embargo, a la fecha mencionada de su desarrollo y año de publicación la información aun es limitada sobre su eficacia.

El presente estudio se enfocó en analizar las variables más importantes requeridas para definir la utilización del LWD como herramienta de control de terreno.

Se determinó que la repetibilidad del equipo es alta. Por otro lado, al comparar las mediciones de distintas configuraciones del LWD, se encontró que la variabilidad obtenida al realizar las mediciones con un mismo plato a distintas presiones es baja. Además, los módulos del equipo muestran una tendencia de similitud alta con los valores módulos compuestos calculados por el método Shell, en capas granulares de espesores entre 25 y 30 cm.

A partir de estos resultados, se propone una metodología de evaluación in situ el MR de las capas granulares de un pavimento a través de un procedimiento experimental que deberá realizarse para cada proyecto en particular.

(Milton Jiménez Lagos - I CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y DIRECCIÓN DE PROYECTOS) – III CONGRESO IPMA-LATNET- Universidad de Piura, desarrollo el artículo Comparación en campo con deflectómetro liviano en la evaluación de rigidez in situ usado en el control de compactación. Este artículo se realiza con el objetivo de hacer una comparación entre el procedimiento propuesto por Marradi et al (2011) para el uso del deflectómetro de peso liviano (LWD) como dispositivo de control de compactación, y el resultado obtenido con densímetro nuclear. Se da a conocer que actualmente en el Perú, se utiliza de manera tradicional la viga Benkelman y los deflectómetros de impacto (FWD Y HWD). El objetivo de utilizar estos dispositivos es calcular la rigidez del pavimento para proceder posteriormente a evaluar su estado actual, diseñar una rehabilitación y controlar la calidad dentro del proceso constructivo correspondiente. Sin embargo, al realizar el control de calidad de las capas no ligadas estos equipos generan una gran cantidad de data, acumulando muchos más datos de los que son necesarios para el control. Debido a esto, se han desarrollado dispositivos de fácil uso, económicos y que brindan resultados confiables en el área de ingeniería, los cuales difieren de las prácticas empíricas. Además, cabe resaltar que una propuesta importante para el control de calidad de pavimentos en el Perú es realizar un control rápido y de bajo costo, de la rigidez obtenida en las labores de compactación en la construcción de un firme. En base a lo anterior, el presente estudio realiza una comparación entre el procedimiento compuesto por Marradi et al, para el uso del Deflectómetro de Peso Liviano (LWD) como dispositivo de control de compactación, y el resultado obtenido con densímetro nuclear (ND).

Al llegar a la interpretación de los resultados obtenidos una de las conclusiones es que bajo regresión lineal se determinó que un incremento o disminución de una unidad del grado de compactación obtenido con el Densímetro Nuclear ocasiona una variación del 10.30% y 12.34% en el valor de R^2 respectivamente.

(Juan Martín Flores Cano) – Pontificia Universidad Católica del Ecuador, desarrolló de tesis “Validación de la determinación de la densidad in situ, de un tramo del proyecto “Collas - Tabalela”, esta investigación se basa en dar validez al uso del densímetro electrónico, esto se realiza previa comparación de resultados con densímetro nuclear y el cono y arena”, una investigación que fue desarrollado el año 2014. En esta investigación se busca encontrar una posible relación que existe entre los resultados obtenidos que son la (densidad seca y porcentaje de humedad) encontrados con el densímetro eléctrico y compararlos con los resultados obtenidos de los métodos de cono y arena y el densímetro nuclear, estos dos últimos métodos son utilizados como patrón de comparación en la investigación de este autor. El método cono de arena es conocido como un método tradicional y es muy utilizado en el medio de la construcción civil y en aquellos estudios que se realiza como es el estudio de mecánica de suelos. También se utiliza el método del densímetro nuclear para encontrar la densidad de suelo en todo los proyectos relacionados a la construcción civil y estudios de mecánica de suelos y otro de los métodos usados es un método utilizando el densímetro electrónico es muy novedoso para el mundo de la ingeniería y en la actualidad aun no es muy ocupado ni tan reconocido por una tecnología recién saliente, a lo cual se busca determinar su validación con referencia a los otros métodos comúnmente utilizados. “Esta investigación se llevó a cabo en un tramo de la carretera Collas – Tababela”, “en donde se seleccionaron 25 puntos aleatoriamente” para iniciar con la prueba de densidades secas y porcentaje de contenido de humedad, este trabajo se realizó con los tres equipos y en el mismo lugar con el fin de obtener resultados no variantes y con los datos obtenidos de DS y % W, se procede a realizar una correlación y el análisis de varianza entre el densímetro eléctrico y el cono y arena, de igual forma entre el densímetro eléctrico y el densímetro nuclear. Con motivos únicamente comparativo se realizó el mismo análisis entre el cono de arena y arena y del densímetro nuclear, llegando a una conclusión de que llegó a determinar que estos métodos ya mencionados tienen un coeficiente de correlación bajo, por lo tanto los valores de densidad seca obtenidos con el densímetro eléctrico no mantienen ninguna relación con los valores de densidad seca obtenido, ni con el cono y arena ni con el densímetro nuclear de la misma manera en la correlación realizada entre humedades obtenidas.

(BR. GERARDO E. GIL O.) – Universidad Rafael Urdaneta – Desarrollo de trabajo especial de grado “Comparación entre densímetro nuclear y eléctrico con el cono y arena para el control de compactación de suelos” desarrollado y publicado en abril del 2011. En este trabajo especial de grado superior, se desarrolló con la finalidad de comparar estadísticamente los resultados de los datos obtenidos con ambos densímetros y el cono

y arena para darle confiabilidad a los aparatos, pero principalmente para tratar de priorizar el uso del densímetro eléctrico sobre el nuclear, donde se llega a la conclusión de que en las mediciones de porcentaje de compactación en campo con el densímetro nuclear, el densímetro eléctrico y el cono y arena, no presenta diferencias significativas porque se utilizaría cualquiera de los tres para el tipo de suelo areno – arcilloso (SC). También se concluye que el tiempo empleado para conocer el valor del grado de compactación con el cono y arena es de aproximadamente de un día de duración lo que traduce en mayores gastos en la obra al momento de realizar el control. También es el método en el que por ser empírico y mecánico hay más participación del hombre al momento de realizar la medición, lo que podría incurrir un porcentaje de error mayor en comparación con el error del densímetro nuclear y del eléctrico.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. MAQUINARIAS DE COMPACTACIÓN

Con las maquinarias de compactación nos ayudan a incrementar las características de resistencia de los suelos, aumentando la capacidad de carga de las cimentaciones construidas, reduciendo los vacíos con la finalidad de mejorar sus propiedades geomecánicas con el fin de que este pueda soportar las cargas a las que van a ser sometidos en un futuro, de esta manera reducen su capacidad de deformación, al mismo tiempo el esponjamiento, la contracción y la permeabilidad del suelo (Braja. M. Das, 1999).

MOTONIVELADOR

Para realizar los trabajos del extendido del material y la nivelación para la posterior compactación la motoniveladora es la maquina más utilizada en diferentes proyectos de carretera ver figura N° 05, puede realizar movimiento de tierras de corta distancia, pero de grandes cantidades. En esta investigación la compactación de la sub base del pavimento es el tema principal, pero a través del trabajo que realiza esta máquina que es la de preparar el terreno se llega a obtener los resultados buscados. (Flores, 2014).

Figura 5: Motoniveladora



Fuente: Fotografía tomada en el proyecto Tocache – Juanjuí (batido de material)

2.2.2. MÁQUINAS UTILIZADAS PARA LA COMPACTACIÓN DE SUELOS

Existen diferentes tipos de maquinarias que realizan trabajos de compactación de suelo y la elección de cada maquinaria a usarse depende del tipo de suelo y las propiedades mecánicas. Con el fin de que la compactación sea correctamente realizada, en ocasiones se combinan dos o más equipos para conseguir la mejoría de las propiedades mecánicas del suelo. Dependiendo de la acción que esta produzca en el suelo pueden compactar con maquinarias por carga estática o por carga dinámica. (Flores, 2014)

CARGA ESTÁTICA	CARGA DINÁMICA
<p>Por carga estática se consigue eliminar los vacíos del suelo para llegar a la compactación a través de una carga continua de repetidas veces así sumarle el número de pasadas y generar una carga y descarga al área de contacto con el suelo, de esa manera aplicar una presión constante para obtener un agrupamiento de las partículas. (Flores,2014)</p>	<p>Este tipo de compactación se origina al dejar caer un peso desde una determinada altura produciendo un impacto en el suelo con la finalidad de generar un agrupamiento de partículas a través de ondas de presión en la masa del suelo y así eliminar los vacíos para encontrar el buen mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo. (Flores,2014)</p>
<p>Figura 6:Tándem o rodillo liso de 2 tambores</p>  <p>Fuente:https://www.google.com.pe/search?q=rodillo+vibrante+autopropulsado</p>	<p>Figura 7: Pisón a explosión.</p>  <p>Fuente:https://www.google.com.pe/search?q=rodillo+vibrante+autopropulsado</p>

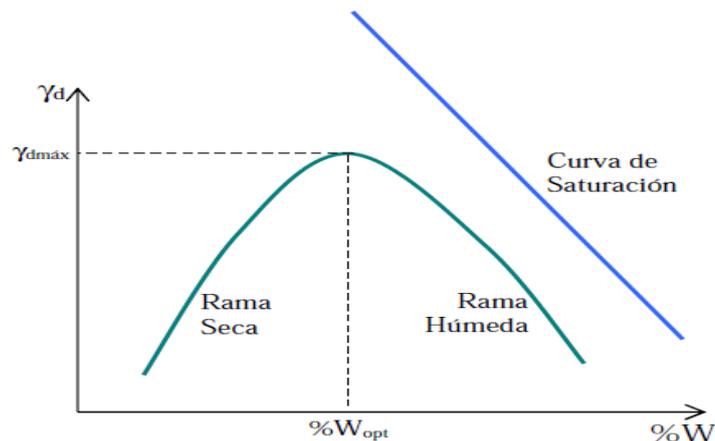
2.2.3. METODOLOGÍA DE COMPACTACIÓN.

2.2.3.1. COMPACTACIÓN DEL SUELO EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA

Con los resultados de este ensayo se encuentra la relación que existe entre el porcentaje de contenido de agua y el peso unitario seco del suelo a través de una curva que se hace llamar la curva de compactación de suelo ver figura N°08. Como se muestra en la figura la que determina el contenido óptimo de porcentaje de humedad para la compactación del

suelo es el contenido más alto se la densidad máxima. Este ensayo se aplica cuando su porcentaje de masa retenida en el tamiz $\frac{3}{4}$ " es igual o menor a 30% de sus partículas retenidas en dicho tamiz. (Quiñonez, 2015; MTC E 115, 2016)

Figura 8: Curva de compactación proctor



Fuente:https://www.google.com.pe/search?rlz=1C1GCEA_enPE748PE748&biw=1366&bih=613&tbm=isch&sa=1&ei

Este ensayo fue realizado en laboratorio de la carretera Tocache – Juanjuí de acuerdo a la norma (MTC E 115,2016), que se presenta en el apéndice 01.

2.2.4. EQUIPOS PARA EL CONTROL DE COMPACTACIÓN IN-SITU

2.2.4.1. CÁLCULO DE LA DENSIDAD POR EL MÉTODO CONO DE ARENA

Este ensayo es conocido como un método tradicional para la determinación de la densidad de suelo in – situ. (Figura N° 09). Teniendo en consideración en nuestras normas nos indica que este ensayo es aplicado en suelos que no contengan una gran cantidad visible de rocas o gravas de tamaño de partículas mayor a $1 \frac{1}{2}$ in. Para poder determinar la densidad es importante tomar en cuenta que el material donde se va a realizar el ensayo tenga una cohesión suficiente para que los lados del

hoyo se mantengan estables al momento de realizar el ensayo. Este tipo de ensayos no se puede realizar en suelos orgánicos, saturados o con una plasticidad alta ya que podría presentarse deformaciones o comprimirse durante la excavación. (MTC E 117, 2016; Flores, 2014)

Figura 9: Ensayo de grados de compactación por el Método de cono de arena



Fuente: Fotografía tomada durante el ensayo en la Carretera Tocache - Juanjuí

2.2.4.2. EQUIPOS

Para el inicio de este ensayo se necesita un contenedor de arena este debe ser un frasco ajustable con un volumen de capacidad superior al hoyo que se va hacer en suelo, también se necesita el cono de arena, este debe ser un aparato desmontable con su válvula cilíndrica y con un hueco de aproximadamente $\frac{1}{2}$ " de diámetro pegada a un embudo metálico en un lado y al contenedor de arena en el otro lado, la válvula debe impedir por completo el paso de la arena cuando este se haya volteado y esté cerrado, también se necesita de una placa metálica que tenga un agujero en el centro con una brida como se muestra en la figura N°10. (Flores, 2014; MTC E 117, 2016)

Figura 10: Placa metálica con bridas



Fuente: Flores, 2014

La arena con la que se va realizar este ensayo debe ser limpia, seca, uniforme en su densidad como en su granulometría, durable, no debe tener ninguna partícula cementante y capaz de caer libremente, sus partículas de mayor tamaño no deben pasar el tamiz N° 10. Para realizar este ensayo es necesario contar con algunos accesorios como una balanza, cucharón, cincel, combo, clavos para estabilizar la placa, brocha, fundas, una franela, hojas de campo, etc. (Flores, 2014; MTC E 117, 2016)

2.2.4.3. PROCEDIMIENTO

Al iniciar el ensayo considerar que el volumen del hoyo depende del TM de la partícula del suelo que se va ensayar, ver tabla |N° 01, donde se describe la profundidad a realizarse de acuerdo al Tamaño Máximo de Partícula (MTC E 117, 2016).

Tabla 1: Volúmenes mínimos del hoyo de ensayo

Tamaño Máximo de la partícula		Volumen Mínimo del Orificio de Ensayo	
Pulgada	mm	cm ³	pies ³
½	12.5	1420	0.05
1	25.0	2120	0.075
2	50.0	2830	0.1

Fuente: Tabla extraída del Manual de Ensayo de Materiales (MTC E 117,2016)

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO	
<p>Nivelar el suelo utilizando la placa en la zona donde se va a realizar, luego colocar la placa en el suelo verificando que la superficie del suelo esté en contacto con la placa en el centro donde se hará el hoyo, luego asegurar la placa con los clavos para que esta se mantenga estable durante el ensayo.</p>	<p>Figura 11: Nivelación de suelo para colocar la placa</p>  <p>Fuente: Fotografía tomada durante el ensayo de la carretera Tocache - Juanjuí</p>
<p>Situando el hueco circular al medio de la placa, formar el hoyo, el hoyo se debe realizar con la comba y el cincel teniendo cuidado para no desmoronar la pared lateral, lo cual debe quedar lo más liso posible y el fondo debe quedar plano. (Flores, 2014</p>	<p>Figura 12: Colocación de placa y excavación de hoyo</p>  <p>Fuente: Fotografía tomada durante el ensayo de la carretera Tocache - Juanjuí</p>

<p>Extraer el suelo del hoyo con un cucharón y colocar en un recipiente sin perder nada de material extraído ya que estas pérdidas influyen en los cálculos para obtener las densidades. Considerar que el recipiente donde se va almacenar el suelo debe evitar la pérdida de humedad hasta que la masa del suelo sea determinado y una muestra de ello sea destinado para la obtención de la humedad. (MTC E 117, 2016; Flores, 2014)</p>	<p>Figura 13: Masa de suelo húmedo</p>  <p>Fuente: Fotografía tomada durante el ensayo de la carretera Tocache - Juanjuí</p>
<p>Pesar el equipo cono y arena luego anotar para los cálculos necesarios. Este peso se realiza antes de voltear el cono y arena considerado como peso inicial del ensayo.</p>	<p>Figura 14: Peso del frasco antes del ensayo</p>  <p>Fuente: Fotografía tomada durante el ensayo de la carretera Tocache - Juanjuí</p>
<p>Una vez realizado el hoyo, verificar si la placa está libre de toda partícula de suelos, en especial la brida. Luego colocar el cono haciendo que este encaje en la brida de la placa, tomando en cuenta que la válvula del cono debe estar cerrada, en seguida abrir la válvula para que caiga la arena libremente y cuando se observa que la arena ya dejó de caer más, cerrar la válvula y levantar el frasco con el cono y arena.(MTC E 117, 2016; Flores, 2014)</p>	<p>Figura 15: Frasco y cono volteado</p>  <p>Fuente: Fotografía tomada durante el ensayo de la carretera Tocache - Juanjuí</p>

Pesar el frasco con el cono y arena después de haber derramado la arena en el hoyo. Anotar para proseguir con los cálculos.

Figura 16: Peso del frasco después de haber derramado la arena al hoyo.



Fuente: Fotografía tomada durante el ensayo de la carretera Tocache - Juanjuí

2.2.4.4. CÁLCULOS

El resultado de este ensayo se realiza como en la tabla N° 09, que se presenta en la metodología de trabajo.

2.2.5. SPEEDY CÁLCULO DE PORCENTAJE DE HUMEDAD IN-SITU

El Spedy es un instrumento utilizado para determinar la humedad de suelos con carburo de calcio en laboratorio in – situ ver figura N° 17, se aplica este ensayo en lugares donde no es posible instalar la cocina o un horno y cuando se requiere obtener la humedad en corto tiempo se realiza con partículas que quedan retenidas en el tamiz N° 4. (MTC E 126, 2016)

Figura 17: Muestra de los materiales necesarios del Speedy



Fuente: Fotografía tomada durante los ensayos en campo proyecto Tocache – Juanjuí

2.2.5.1. Procedimiento:

El procedimiento de este ensayo se realizó siguiendo los pasos que indican la norma MTC E -126., esta norma se está presentando en el apéndice 02

Figura 18: Toma de lecturas de la humedad con Speedy

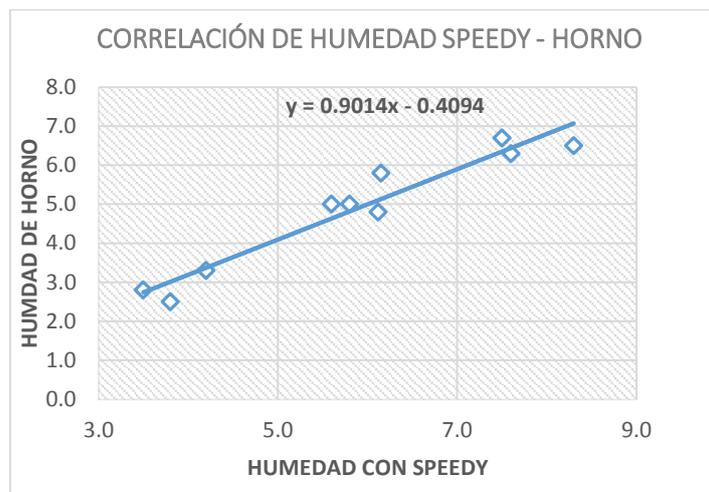


Fuente: Fotografía tomada durante los ensayos en campo proyecto Tocache – Juanjuí

2.2.5.2. CÁLCULOS

El porcentaje (%) de humedad de suelo se determina a partir de la correlación realizada con el Speedy y en el horno. ver figura N° 19

Figura 19: Correlación de humedades



Fuente: Elaboración propia

Considerando las recomendaciones de la norma se preparó una tabla de lectura ver tabla N° 02, donde se da conocer una correlación de humedades para facilitar el trabajo al personal quien realiza el trabajo.

Tabla 2: Tabla de lecturas

CORRELACIÓN DE HUMEDADES	
SPEEDY	HORNO
1.0	0.49
1.5	0.94
2.0	1.39
2.5	1.84
3.0	2.29
3.5	2.75
4.0	3.20
4.5	3.65
5.0	4.10
5.5	4.55
6.0	5.00
6.5	5.45
7.0	5.90
7.5	6.35
8.0	6.80
8.5	7.25
9.0	7.70
9.5	8.15
10.0	8.60

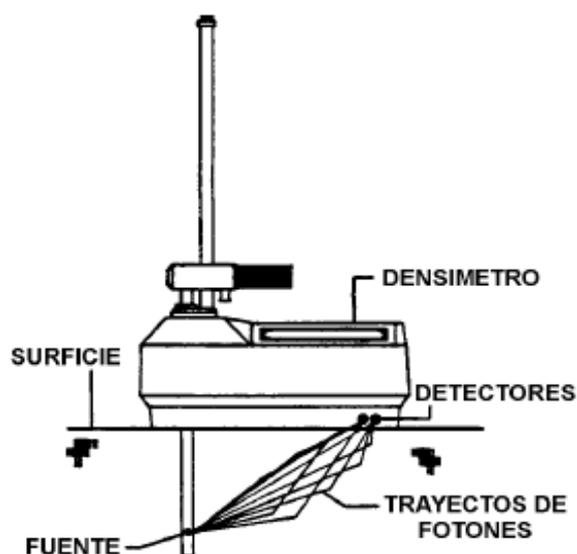
Fuente: Elaboración propia

2.2.6. DENSÍMETRO NUCLEAR

El densímetro nuclear es utilizado principalmente para los controles de calidad en suelos y agregados compactados, es requerido mayormente en el ámbito de la construcción civil por ser un ensayo no destructivo, como también para investigaciones y al no dañar el área de trabajo. (Flores, 2014).

El densímetro nuclear nos calcula la densidad in-situ de suelos o agregados de una manera rápida y sin destruir el área de ensayo, existen tres maneras de utilizar este equipo por retro dispersión, por transmisión directa y Colchón de aire, donde el método más usado es la de transmisión directa. (Flores, 2014)

Figura 20: Cálculo de densidad por transmisión directa



Fuente: “Manual de usuario del densímetro nuclear para medición de humedad – densidad Modelo 3430”

Se obtiene la “densidad húmeda” del suelo a través de la disminución de la radiación gamma desde una fuente ubicada a no más de 300 mm hacia un detector que está ubicado en la superficie del suelo ver figura N° 20. El equipo densímetro nuclear compara la velocidad a la que viajaron los rayos gamma con datos previamente establecidos durante la calibración para calcular los valores de la densidad en masa por unidad de volumen. Por otra parte, para obtener la densidad seca se muestra la masa del agua por unidad del “volumen de la densidad húmeda”. (Flores, 2014)

El equipo también está calibrado para leer el grado de compactación en porcentajes, o sea el contenido de agua en masa por unidad de volumen y al dividir

este valor para la densidad del agua y multiplicándola por 100 se obtiene un equivalente al contenido de agua volumétrico. La cantidad de agua en masa por unidad de volumen obtenido se calcula a través de un proceso de disminución de la velocidad de los neutrones por el hidrógeno; durante el ensayo la “fuente de neutrones” y el detector de neutrones térmicos están ubicados en la superficie. Finalmente, para obtener el contenido de agua gravimétrico se divide la masa del agua en los vacíos o para la masa total del material. (Flores, 2014)

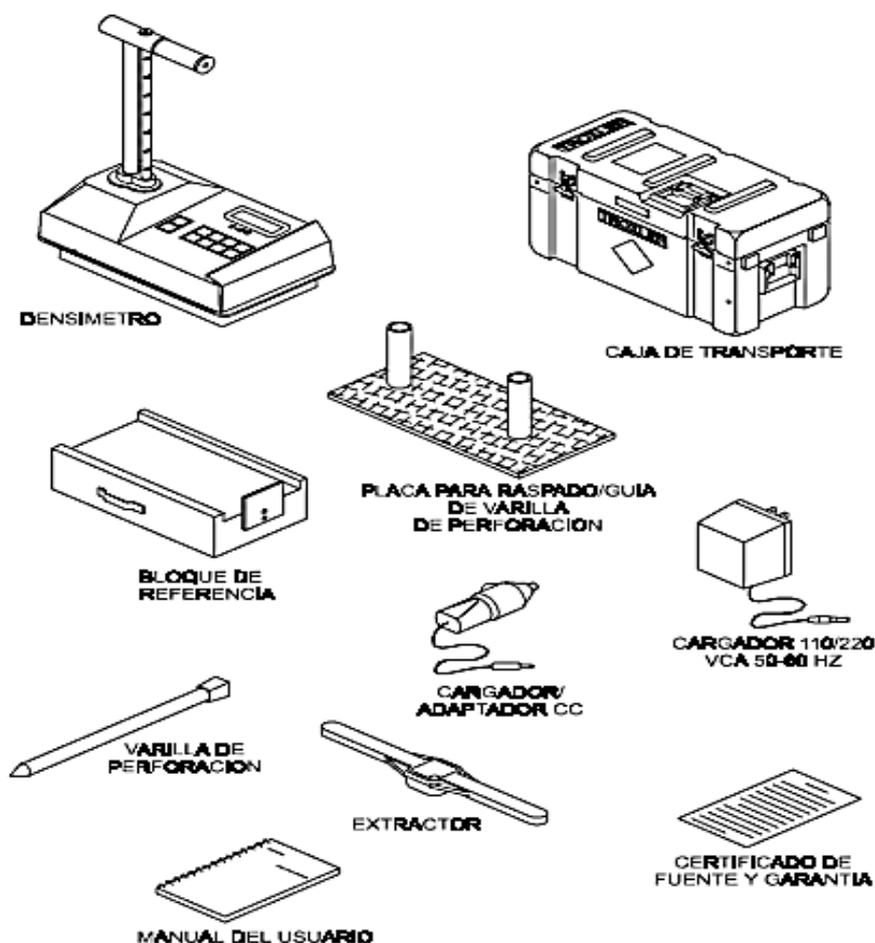
El método de transmisión directa es el más utilizado como se mencionó anteriormente. Ver figura N° 20, en donde la sonda que es la fuente de rayos gamma se extiende desde la base del equipo a través de un hueco previamente realizado a una profundidad deseada. (Flores, 2014)

Los operadores de este tipo de equipo deben estar capacitados por seguridad y precaución al manejar, porque este es un equipo que contiene fuentes radioactivas de neutrones y rayos gamma que emite una radiación que es perjudicial para la salud en nuestro país para operar este equipo es necesario contar con un permiso del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) y además de todo el equipo de protección personal debe tener un medidor de radiación (dosímetro). (MTC E 124, 2016; Flores, 2014).

2.2.6.1. Equipo

El Densímetro Nuclear, es un equipo dotado con un medidor nuclear para hacer pruebas de densidad húmeda y porcentaje de contenido de humedad in – situ; varilla de perforación, es una varilla de acero con la cual se hace el agujero para que el vástago ingrese; placa guía, es una placa para mantener a la varilla de perforación vertical mientras se realiza el agujero; combo, sirve para clavar la varilla de perforación en el suelo. (MTC E 124, 2016; Flores, 2014)

Figura 21: Equipos y accesorios del densímetro nuclear



Fuente:
Manual de usuario del densímetro nuclear para medición de humedad – densidad Modelo 3430

2.2.6.2. Limitaciones:

En el “Manual de Ensayo de Materiales” (MTC E 124, 2016; y en la investigación de Flores, 2014) menciona lo siguiente:

Antes de iniciar con los trabajos de control de calidad es importante tener en cuenta de algunos factores que pueden afectar o incidir en las medidas de densidad in- situ.

- Si se realiza el ensayo por retrodispersión por que las medidas de densidad y contenido de agua son influenciados principalmente por el material en la superficie y cuando se realiza el ensayo por

transmisión directa los valores densidad y cantidad de agua son el promedio de todos los valores obtenidos desde el vástago hincado dentro del suelo hasta la superficie ver figura N° 20

- Las partículas sobredimensionados o grandes vacíos pueden causar resultados variables de mayor o menor densidad. También se debe de considerar que otros equipos radiactivos deben estar alejado por lo menos 9m.

2.2.6.3. Procedimiento:

En el lugar donde se va efectuar los ensayos, procurar que el equipo no tenga ningún otro objeto radioactivo a menos de 6 metros y en casos de que se amerite un ensayo en un relleno de zanjas, alcantarillas y otros sitios cerrados, es necesario realizar el ensayo con opciones que propone el manual del equipo densímetro nuclear

Es necesario que la superficie del terreno elegido para realizar el ensayo esté limpio, de esa manera evitar cualquier tipo de material ajeno o el mismo material, pero suelto.

En el caso de que se visualice irregularidades en la superficie que se va hacer el ensayo, la máxima profundidad permitida del agujero bajo el equipo es de 3mm el cual puede ser regularizado con arena del propio material de conformación.

Es de mucha importancia el contacto de la superficie con el equipo para realizar el ensayo, de lo contrario si no existe contacto con el suelo se pierde radiación y por lo tanto los resultados son variables.

(MTC E 124, 2016; Flores, 2014).

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO POR TRANSMISION DIRECTA

Realizar el agujero en la base granular con el apoyo de la placa guía, la varilla de perforación y un combo

La introducción del agujero debe estar completamente perpendicular al suelo o vertical de tal manera que no se ocasione la inclinación del equipo al momento de bajar el vástago en el agujero.

Al momento de retirar la varilla de la perforación hacerlo con bastante cuidado para no causar un desmoronamiento del suelo al agujero o que se dañe la superficie..

(MTC E 124, 2016; Flores, 2014).

Seguidamente se coloca el equipo en la superficie y se introduce el vástago al agujero hasta la profundidad deseada. (MTC E 124, 2016; Flores, 2014).

El equipo puede ser suavemente movida circularmente por alrededor del orificio para encontrar que el vástago este en completo contacto con el suelo.

Poner la profundidad a la que se va realizar el ensayo en el equipo y colocar el dato del proctor el cual fue calculado en laboratorio para obtener la relación de densidades y obtener el porcentaje de compactación in-situ.

Figura 22: Varilla de perforación siendo clavada



Fuente : Fotografía tomada durante los ensayos en campo

Figura 23: Vástago introducido



Fuente: Fotografía tomada durante los ensayos en campo

Figura 24: Introducir el vástago hasta la profundidad necesaria



Fuente: Fotografía tomada durante los ensayos en campo

Leer el grado de compactación, la densidad húmeda, densidad seca y el contenido de humedad in- situ. (MTC E 124, 2016; Flores, 2014).

Figura 25: Lectura de resultados



Fuente: Fotografía tomada durante los ensayos en campo

2.2.6.4. CÁLCULOS

El resultado de este ensayo se registra como indica la tabla N° 10, que se presenta en la metodología de trabajo.

2.2.7. DEFLECTÓMETRO DE PESO LIVIANO (LWD)

El “Deflectómetro de Impacto Liviano” (LWD), es un dispositivo de impacto portátil que fue creado para realizar ensayos no destructivos en el pavimento mediante la capacidad de carga de suelo a través de los módulos elásticos in – situ de la subrasante, subbase y base. Ver figura N° 26. (QUIÑONEZ, 2015)

El deflectómetro es un aparato muy fiable con diseño ergonómico y una estructura especial, lo que permite que el transporte del equipo es fácil y realizado por una sola persona de la misma manera el manejo es fácil y los resultados es inmediato in – situ. (Osorio, 2008)

Nazzal, 2003 (citado en la investigación de Osorio, 2008), da a conocer que el origen de este equipo es en Alemania y en la actualidad existen diversos tipos y versiones de LWD en el mercado, son bastante diferentes en su diseño y modo de operación, pero tienen un mecanismo similar de funcionamiento por lo que las mediciones con cada uno también son variables.

En esta investigación se está utilizando el LWD “Minidyn Versión 3” (Figura N°26)

Figura 26: Equipo Deflectómetro de Peso Liviano (LWD)



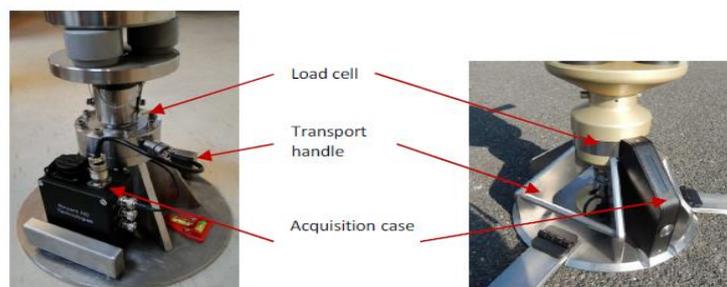
Fuente: Fotografía tomada en el proyecto Tocache - Juanjuí

2.2.7.1. EQUIPOS

En la investigación de Gustavo Quiñonez (2015) da a conocer que el equipo consta de diferentes partes bien diferenciadas como se describe en los siguientes ítems.

- Unidad principal con la célula integral de carga, sensor de deflexión central, unidad electrónica, modulo inalámbrico con compartimiento de la batería, que incluye un diámetro de 150mm, convertible a un diámetro de 100mm

Figura 27: Partes del equipo LWD



Fuente: 3IPE Ingeniería de pavimentos.

- Placa de diámetro 300mm, para sistema de placa dual 150/300mm
- 300 mm de diámetro acanalado jebe de goma
- Caída peso eje guía, partes superior e inferior
- Peso del gatillo
- 10 kg de peso básico de la gota
- Enchufe de bloqueo sensor
- Cargador de batería estándar (AA, RC6) incluye 4 pilas recargables
- EQUIPAMIENTO OPCIONAL

Como se aprecia en la figura N° 28 el equipo LWD tiene un equipamiento opcional que es la caja de transporte de equipos estándar donde se incluye el carrito transportador, sensor de deflexión y otros.

Figura 28: Caja de Transporte de Equipo LWD



Fuente: Fotografía tomada en el proyecto Tocache - Juanjuí

2.2.7.2. PROCEDIMIENTO

El funcionamiento del equipo se detalla de manera más sencilla apreciando la figura N° 29.

“El LWD está equipado con una célula de carga de precisión que mide la fuerza de impacto que produce el peso de caída y con un geófono de precisión (sensor de velocidad sísmica) que mide la velocidad con que deforma la capa evaluada a causa del impacto producido por la carga”. Para tener un resultado con mayor exactitud es necesario que el geófono tenga un contacto directo con el material a evaluarse a través del hueco del plato de carga. (Osorio, 2008)

Figura 29: Apreciación de Equipo LWD



Fotografía tomada en el proyecto Tocache – Juanjuí

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO LWD (MINIDYN VERSIÓN 3)

El lugar o superficie donde se va apoyar el equipo necesita ser homogéneo y es recomendable adicionar una arena fina del mismo material para nivelar la superficie. Luego cuando el plato este posicionado en la superficie , se debe empezar a rotar el equipo en forma circular con las dos manos hasta uniformizar el contacto con el terreno con la arena fina adicionada si fuese necesario.(3IPE Ingeniería de Pavimento)

Figura 30: Muestra de superficie plana para ubicar el equipo LWD



Fuente: Fotografía tomada durante los ensayos en campo

Primero se debe colocar la palma de una de sus manos en la parte superior de la vara como se aprecia en la figura N°31, mientras que con la otra mano se levanta la pesa, luego cuando alcance la altura máxima se debe soltar.(3IPE Ingeniería de Pavimento)

Figura 31: Muestra de cómo se coloca la palma de la mano en la parte superior.



Fuente: Fotografía tomada durante los ensayos en campo

Se debe mantener una fuerza aplicada constante de empuje con la palma que sostiene la vara, así se evita que el plato se mueva en el terreno, este plato se debe mantener bien apoyado. (3IPE Ingeniería de Pavimento)

Figura 32: Muestra de cómo se levanta el plato de carga.



Fuente: Fotografía tomada durante los ensayos en campo

“Luego se sigue el procedimiento de levantar la carga hasta la altura necesaria para reproducir la presión requerida sobre la capa evaluada y se deja caer libremente la carga. La barra por donde se desliza la carga posee una manija ajustable con dispositivo de seguridad que se emplea para determinar la altura de caída del peso” (Osorio, 2008)

Figura 33: Muestra del impacto de amortiguadores de caucho.



Fuente: Fotografía tomada durante los ensayos en campo

“Al realizar el ensayo no se debe realizar dos mediciones en el mismo punto, ya que cada medición equivale a 6 pruebas, es decir a 6 golpes de la pesa. La razón de esto es porque la primera medición compactará el terreno y al tomar la segunda medición en el mismo punto se obtendrá un módulo mayor al real”. Se debe soltar la pesa a la máxima altura posible en cada una de las 6 pruebas para obtener la mayor carga del terreno. (3IPE Ingeniería de Pavimento)

Los amortiguadores de cauchos a las que impacta la caída de carga en el equipo tiene la función de

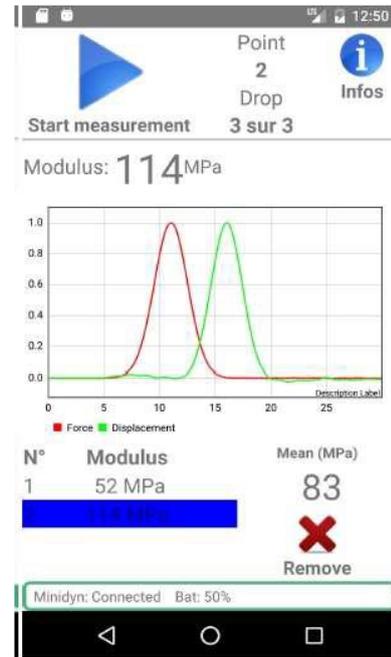
determinar el tiempo de demora y valor pico del pulso de carga. Es importante saber que a gran cantidad de amortiguadores el pulso será más corto, por ende, el pico de carga será más alto. (Osorio, 2008)

El LWD está equipado por un computador portátil al cual se puede conectar inalámbricamente, se puede decir que el computador portátil tiene gran similitud a un celular del cual se transmite los valores medidos en ese preciso instante del ensayo, medidas que son producto de la celda de carga y el geófono ver figura N° 34. En el computador portátil está instalado un software que permite y calcula inmediatamente el valor del módulo Elástico.

“Las mediciones obtenidas durante el ensayo pueden ser impresas o transferidas para procesamiento posterior en hoja electrónica o documento de texto. El tiempo que se demora en realizar la medición correspondiente a una caída demora entre 40 a 60 segundos”. (Osorio, 2008)

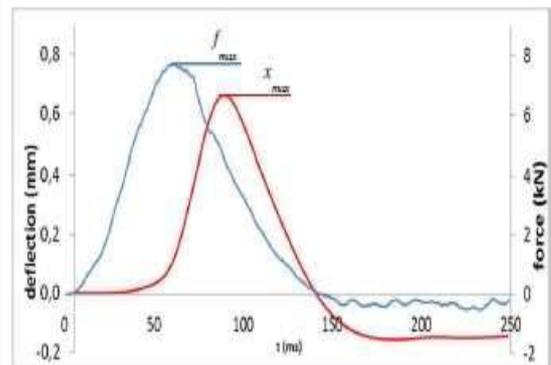
El software rápidamente dibuja o genera los gráficos históricos y muestra instantáneamente. Ver figura N°35 los gráficos históricos de impacto y deflexión, a la vez almacena para ser procesada. (Osorio, 2008)

Figura 34: muestra del computador portátil.



Fuente:3IPE Ingeniería de Pavimento

Figura 35: Muestra instantánea de los gráficos históricos de impacto.



Fuente:3IPE Ingeniería de Pavimento

2.2.7.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL LWD

En las especificaciones técnicas del LWD mostradas en la Tablas N° 3 y N° 4, se observa que cuenta con dos platos de diámetros iguales, pero carga con pesos distintos y otras descripciones con la finalidad de encontrar la presión que requiere para el ensayo.

Tabla 3: Especificaciones Técnicas del equipo LWD

Especificaciones	Descripción
Hardware	Minidyn versión 3
Peso de la barra más base	15 Kg
Pesos para ensayos	10 Kg y 20 Kg
Diámetro del plato	300 mm
Materiales	Aluminio Anodizado y Acero Inoxidable
Distancia de caída de las pesas	75 cm hasta 100 cm
Ambiente	IP65 -20°C hasta +40°C
Célula de carga	Medidor de Tensión Máxima carga: 25 Kn Error: <0.3% FS
Desplazamiento de sensor	Geófono vertical Rango de Frecuencia: 4.5 Hz...2500Hz Resolución: 1µm
Rango de Modulo	10 Kg de peso: 10 MPa hasta 120 MPa 20 Kg de peso: 20 MPa hasta 200 MPa
Poder	Funciona con Batería Se carga con un cable USB (5 V, 0.5 A)
Transferencia de datos	Por USB o Bluetooth
Autonomía	15 h en Standby 5 h de medición Apagado automático después de 15 min

Fuente: 3IPE Ingeniería de pavimentos.

Tabla 4: Especificaciones Técnicas del Software Minidyn 2

Especificaciones	Descripción
Tipo	Teléfono Smartphone Android
Resistencia	Clasificación IP67 Resistencia a los golpes
Pantalla	4" WVGA
Transferencia de datos	Usando Email por Wi-Fi o 3G Transferencia directa usando cable USB
Capacidad de almacenaje	➤ 100000 mediciones
Instalación de Software	Android Minidyn
Funciones	Adquisición y revisión
Conexión	Bluetooth
Método de Rigidez	MAX
Método de correlación	Boussinesq, Lineal y Exponencial

Fuente: 3IPE Ingeniería de pavimentos.

2.2.7.4. Descripción del LWD

El LWD es un equipo que es fácil de usar y es la razón por lo cual muchos investigadores están utilizando ampliamente para la evaluación de materiales como control de calidad, esto se aplica en laboratorios que se dedican al estudio del comportamiento de suelos, también en proyectos de carreteras, específicamente en la estructura de pavimentos de espesores menores o iguales a 45 cm aproximadamente. (Osorio, 2014)

En la gran mayoría de trabajos realizados hasta la actualidad por parte de los investigadores se están enfocando en demostrar lo útil y confiable que puede ser este equipo LWD para ensayos de control de calidad. (Osorio, 2008)

En los siguientes textos se da a conocer algunas investigaciones referentes a la influencia en las mediciones con algunas variables del equipo.

“Profundidad de Influencia de la medición”.

Nazzari, 2003 (Citado en la Investigación de Osorio, 2008) da a conocer que se realizó un estudio de control de calidad en laboratorio con la finalidad de evaluar cómo influye la profundidad en los resultados de los módulos resilientes, fue realizado entre 267 mm y 280mm de espesor, este estudio es realizado para suelos que tiene un módulo resiliente alto y el otro con módulo resiliente blando respectivamente al espesor mencionado. Se hace saber sobre la influencia en cuanto a la profundidad y equipo para los resultados, lo cual decrece la influencia en la profundidad con el incremento del módulo elástico. Donde se llega a concluir que el equipo LFWD se utiliza para evaluar la capacidad estructural de la estructura del pavimento durante la ejecución, ya que las capas de la base y sub base normalmente no supera espesores mayores a 300mm y no es menor a un espesor de 150mm.

Peterson et al, 2006 (Citado en la Investigación de Osorio, 2008), da a conocer que la estimación de tensionamiento forma un volumen aproximado de 3000cm³ de suelo lo cual tiene similitud al volumen del plato de carga, lo que quiere decir que el tensionamiento del LWD se da en profundidades de 100 mm a 300mm aproximadamente.

Contacto entre el geófono y la superficie

Fleming, 2006 (Citado en la Investigación de Osorio, 2008), da a conocer que en varios autores que realizaron una investigación sobre este equipo es normal percibir la huella que deja la punta del geófono que a veces se nota un contraste en la superficie, por esta razón en suelos con un módulo bajo como por ejemplo la subrasante es recomendable el uso de geófonos con punta más larga, de manera que se puede evitar las posibles deformaciones producto de asentamiento del geófono.

Cantidad de golpes por punto evaluado

Kamiura et al., 2000 (Citado en la Investigación de Osorio,2008), da a conocer que después de haber realizado los 3 primeros golpes del ensayo, los siguientes resultados deflexión se hacen constantes, por esta razón el promedio de los 3 últimos golpes, es decir el 4°, 5° y 6° golpe

son considerados como los más representativos para la superficie evaluada.

Fleming, 2006 (Citado en la Investigación de Osorio,2008), da a conocer que los golpes que se deben realizar en cada punto de ensayo seis golpes de los cuales los tres primeros son descartados, porque estas 3 primeras sirven como una calibración del ensayo a realizarse, y el promedio de los 3 últimos se considera como resultado módulo elástico.

“Temperatura de los amortiguadores y la rigidez”

Fleming, 2006 (Citado en la Investigación de Osorio, 2008), da a conocer que se realizaron varios ensayos para verificar la influencia de la temperatura en los amortiguadores, los cuales se realizaron en tres distintas temperaturas utilizando dos amortiguadores y un peso de 100kPa aproximadamente para cada temperatura, de los cuales con los resultados obtenidos se llega a la conclusión de que la temperatura de los amortiguadores no tiene influencia significativa en las mediciones

Fleming, 2006 (Citado en la Investigación de Osorio,2008), da a conocer que se realizaron investigaciones con la finalidad de analizar si influye la rigidez del amortiguador en los resultados de módulos siendo así que para los amortiguadores más rígidos la carga aplicada fue la más pequeña y para los amortiguadores poco flexibles se aplicaron las cargas más grandes. En este caso se realizaron con cargas de 150kN/m, 500kN/m Y 1100kN/m respectivamente, de donde se concluye de los resultados obtenidos, que a mayor rigidez y aplicando la carga más pequeña se produce tiempo regular entre la carga aplicada y la deflexión máxima, este resultado obtenido disminuye al bajar la rigidez y aumentar la carga, también se concluye que a menor rigidez del amortiguador, que en este caso es de 150kN/m, los resultados de la carga máxima y deflexión máxima ocurre simultáneamente, y es por esta razón que remienda utilizar el amortiguador con menor rigidez.

Repetibilidad de las mediciones

Nazzal, 2003 (Citado en la Investigación de Osorio, 2008), da a conocer que en un estudio evaluaron la repetibilidad de los controles con el equipo LWD, obteniendo como resultado un Cv que tiene una variación de 2,1%

hasta 28,1 %. El $Cv = 28,1$ es considerado como un valor o resultado muy elevado, por esta razón se sugiere realizar un estudio de la respetabilidad de las mediciones del LWD para futuras investigaciones, porque con el aumento del módulo elástico del material a ser evaluado se notaba una mejora de la repetibilidad.

Fleming, 2006 (Citado en la Investigación de Osorio, 2008) da a conocer que en otra investigación realizada en el Reino Unido dieron a conocer la variabilidad en los controles en suelos de Subrasantes de suelos finos: Cv entre 25 y 60%, capa granular Cv entre 10 y 40 %, capa granular (grava chancada bien graduada), y un Cv de 15% aproximadamente (mismo material, contenido de humedad, espesor, etc. En cada estructura del pavimento), según el tipo de material evaluado mayor Cv para mayor humedad.

Plato de carga

Christ van Gurp et al., 2001 (Citado en la Investigación de Osorio, 2008), da a conocer normalmente en los ensayos se utiliza el plato de 300mm. Ya que en la investigación de (Sweere, 1990) da a conocer que el uso de platos con 300mm no son confiables debido a que cuando realizaron estudios con el martillo Clegg y loadman concluyen que el área que tiene contacto con el equipo no debe ser pequeño, porque los pavimentos son diseñados a flexión por ende la medición con el LWD también es por flexión y no por corte. Cuando se realiza un ensayo se tiene que hacer con platos que tengan mayor diámetro a 300 mm en materiales granulares, esto para que el control de resultados con el porcentaje de piedras de diseño aproximadamente, de esta manera al mover el plato alrededor del punto de ensayo la variación entre una medición y otra en el mismo punto será bajo

Pulso de carga

Fleming et al., 2000 (Citado en la Investigación de Osorio, 2008) da a conocer que con un plato 15 Kilos de carga el pulso de carga requerido es de ≥ 18 milisegundos.

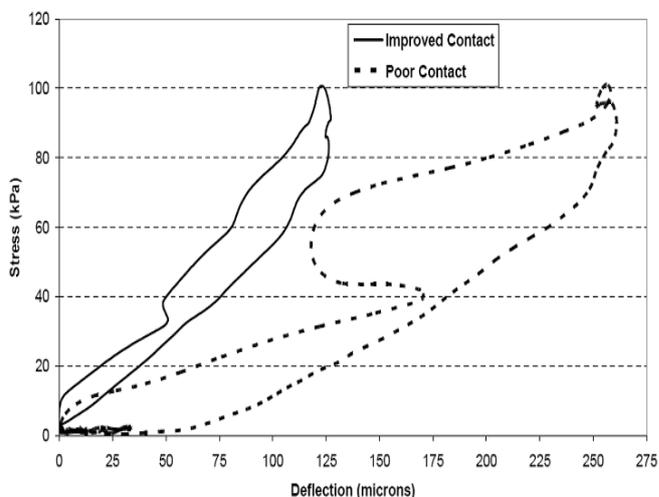
“Número de mediciones por capa evaluada”

“Collop, 2001” (Citado en la Investigación de Osorio, 2008) da a conocer que para el equipo LWD se ha concluido que la SD de un conjunto de controles depende de la cantidad de ensayos que se han hecho. Para garantizar el 95% de confiabilidad en el valor de la SD encontrada se debe realizar por lo menos 50 muestras a una distancia máxima de 10 metros.

Uniformidad del área de la superficie para el contacto con el plato

Lambert et al., 2006 (Citado en la Investigación de Osorio, 2008) da a conocer que en un estudio de laboratorio se realizaron ensayos con el LWD en material de base granular (grava chancada bien graduada) en una plataforma con superficie no tan homogéneo, luego se hizo ensayos en el mismo material después de agregar una mini capa de arena fina con la finalidad de homogenizar la superficie de apoyo donde va ser sentada el plato del LWD. Se obtuvo como resultado como se aprecia en la Figura N° 36 donde se concluye que cuando se realiza las mediciones en materiales de poca uniformidad en el punto de ensayo la curva tensión-deformación es demasiado deformado, sin embargo cuando la plataforma del punto ensayo es homogéneo la curva tensión – deformación tiene poca distorsión. Es por este motivo que para las medidas se debe uniformizar el punto de control con una mini capa de arena con las mismas características del material de conformación y se observe la curva tensión-deformación con menos distorsión. También no se debe hacer mucho movimiento al equipo al momento emplear la carga así evitar la distorsión y tener un resultado confiable del control.

Figura 36: Efecto del contacto poco uniforme e/ el plato de carga y la superficie evaluada

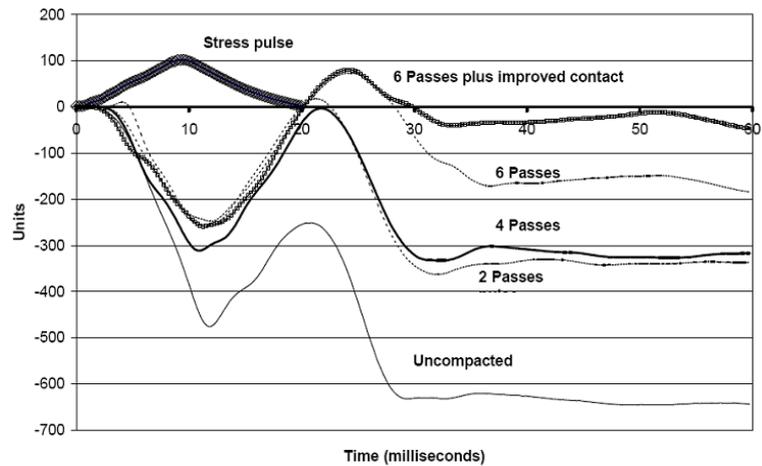


Fuente: Figura extraída de la Investigación de Lambert et al, 2006

Nivel de compactación

“Lambert et al, 2006” (Citado en la Investigación de Osorio, 2008), da a conocer que en el mismo lugar donde se hizo un estudio para analizar la influencia de la uniformidad de la superficie en los resultados, para esto se hizo una capa de 100mm en el lugar de ensayo para diferentes grados de compactación. Luego con los resultados obtenidos se concluye que se debe tener un control del trazo de la curva “tensión-deformación” y eliminarse aquellas mediciones que reflejan que no tiene mucha uniformidad. Se realizó mediciones para varios ciclos de rodillos compactadores, determinando que para tener una curva con mayor uniformidad es necesario que el rodillo compactador pase más de 6 ciclos y es siempre y cuando la capa de la superficie en el punto de ensayo se haya uniformizado con una capa de arena fina ver figura N°37.

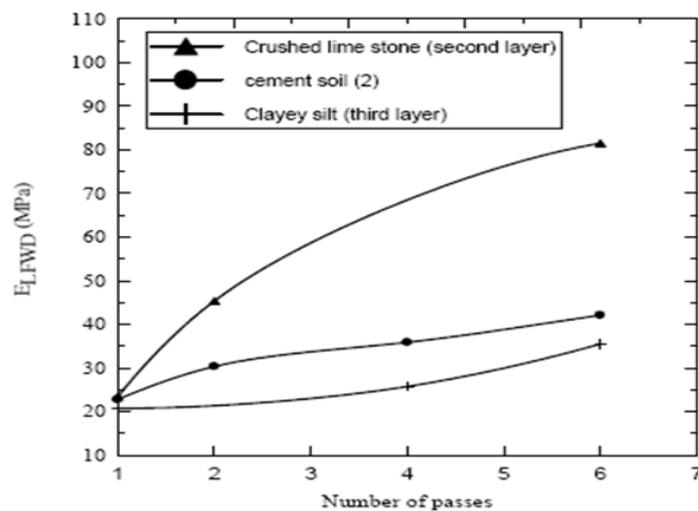
Figura 37: “Efecto de la compactación en las mediciones con el LWD”



Fuente: Figura extraída de la Investigación de Osorio, 2008. (Citado como fuente al autor de la imagen Lambert et al., 2006)

Nazzal, 2003 (Citado en la Investigación de Osorio, 2008) da a conocer un estudio donde realizaron controles usando el LWD en tres suelos diferentes, y para cada tipo de suelo del estudio se fue aumentando la cantidad de ciclos por el compactador, y se visualizó que con el aumento de ciclos el módulo elástico también crece.

Figura 38: “Aumento del Módulo LWD con el número”



Fuente: Figura extraída de la Investigación de Osorio, 2008. (citado como fuente al autor de la imagen Nazzal, 2003)

Nazzal, 2003 (Citado en la Investigación de Osorio,2008) da a conocer que el módulo elástico obtenido con LWD y el peso específico de un material con el mismo contenido de humedad en ambos tiene una relación, siendo así que cuando el módulo elástico es elevado el peso específico también es mayor.

2.2.8. MÓDULO RESILIENTE

Seed et al 1955 (Citado en la Investigación de Quiñones, 2015) da a conocer que el término de Módulo de resiliencia fue dado por Seed y sus colegas, este término quiere decir la medición de la “magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre deformación axial recuperable”.

2.2.8.1. Concepto de resiliencia

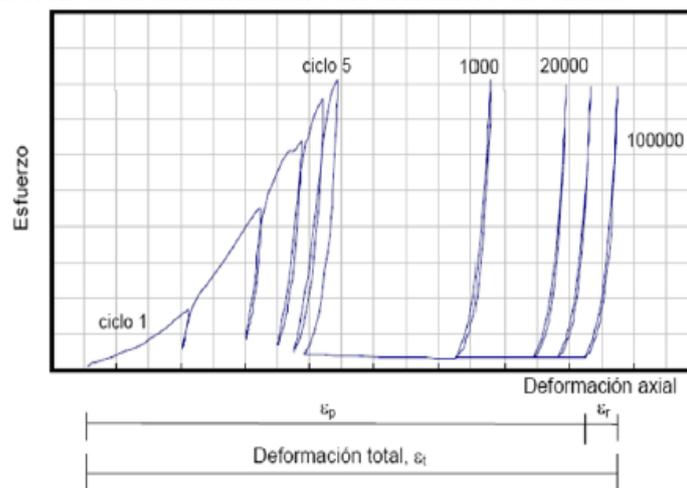
Huang, 1993, (Citado en la investigación de Osorio,2008) da a conocer que en la estructura de un pavimento las cargas que son transmitidas al pavimento inducen un estado de deformaciones Si se considera al material de la sub-rasante, como un comportamiento elástico e isotrópico y homogéneo entonces los esfuerzos y deformaciones se relacionarían con las características propias del material (Elasticidad, Poisson), pero como las cargas impuestas por el tránsito tienen un carácter dinámico los cuales son pequeños en el tiempo de aplicación y la deformación se recupera al finalizar la carga. Pero se sabe que la gran mayoría de suelos de la estructura de un pavimento no presentan un comportamiento elástico porque esta tiende a deformarse permanentemente cuando la carga es aplicada. Pese a ello cuando el pavimento es sometido a una carga pequeña comparado a la resistencia del suelo y esta es repetida reiteradas veces, el resultado de la deformación cada vez que se repita ya es poco apreciable y se considera una deformación recuperable, por esta razón se puede considerar como suelo o material elástico es por ello que se introduce el término de módulo resiliente que corresponde a un “módulo elástico supuesto”. (Quiñonez, 2015).

Garnica et.al., 2002 (Citado en la investigación de Osorio, 2008), da a conocer, que es apreciable que del ciclo uno hasta el ciclo cinco la

deformación que presenta la figura N° 39 es constante y regular. Donde también se aprecia que al aumentar la cantidad de veces de aplicación carga va disminuyendo, así como llega al ciclo cinco. También se aprecia que cuando la aplicación de carga continua más y más llega un punto donde la deformación que sufre el suelo es considerado recuperable en su totalidad, así como se aprecia en la figura N° 42 (ϵ_r) logrando un punto de equilibrio, esto cuando el esfuerzo desviador sea pequeño y garantice que la muestra no tenga falla.

“Garnica et.al., 2002” (Citado en la investigación de Osorio, 2008) da a conocer que un aproximado del 70% de la deformación sucede en los primeros ciclos de carga. Ver figura N° 39. Luego aparece la deformación considerado como segunda fase que ocurre cuando se aplica la carga en los primeros miles de ciclos, el 70% de deformación acumulada detallado anteriormente se hace llamar primera fase. Posteriormente se logra llegar a la tercera fase cuando la deformación acumulada es muy pequeña, por ende, la deformación permanente obtiene un valor máximo y desde ese instante en que la deformación es pequeña, las siguientes aplicaciones de ciclos de carga deja de tener efecto adicional en la deformación del suelo.

Figura 39: “Acumulación de la deformación con el número de ciclos



Fuente: Figura extraída de la Investigación de Osorio, 2008. (citado como fuente al autor de la imagen Garnica et.al., 2002)

A partir de que la deformación es mínima, es considerado como una deformación elástica o también llamado resiliente, que quiere decir que el material ha llegado a su estado de resiliencia, por esta razón los resultados se hacen llamar “Módulo de Resiliencia”. (Osorio, 2008)

“Este módulo es definido como el cociente entre la tensión desviadora dinámica aplicada y deformación unitaria resiliente producida por esta tensión dinámica (Seed et al, 1962). En otras palabras, el módulo resiliente es el módulo elástico medido cuando el material alcanza su etapa de resiliencia” (Osorio, 2008)

2.2.8.2. “Factores que afectan el Módulo Resiliente de un material granular”

Garnica et.al., 2002 (Citado en la investigación de Osorio, 2008) da a conocer que los materiales granulares no pueden tener un único módulo resiliente. Debido a que tiene variabilidades por la existencias de factores que afectan al módulo resiliente y estos factores se clasifican en dos grupos que son los factores externos y factores inherentes al material y sus características, tales como:

Factores inherentes al material y sus características: tipo de material, tamaño, granulometría, contenido de agua, peso específico y nivel y tipo de compactación, en seguida se resume de investigaciones realizadas, el cómo influyen los factores señalados en el módulo resiliente de materiales granulares (Osorio, 2008)

Tipo de material

Garnica et.al., 2002 (Citado en la investigación de Osorio, 2008), da a conocer que el tipo de material en relación a sus características, influyen la naturaleza de la roca, la solidez de los granos y tamaño máximo de las partículas, su angulosidad y rugosidad, su composición granulométrica, etc.

Se realizó un estudio de seis tipos de agregados, los cuales consistieron en materiales comúnmente usados en la construcción de bases y subbases de pavimentos de carreteras en Oklahoma, USA. Y se obtuvo como resultado que la diferencias en el módulo de resiliencia debido al

tipo de material, tienen una variación entre 20 y 50%. (Musharraf et al, 1994, citado en Osorio, 2008)

En las investigaciones hecha por Corro (citado en Osorio, 2008), una grava arcillosa puede tener MR del orden de 375 MPa, y una grava arenosa alcanza valores de 650 MPa.

En otras investigaciones como la de Brown, 1996 sugiere módulos del orden de 100 MPa para bases y garantizar la buena calidad de material y de 40 MPa para bases granulares deficientes. (Citado en Osorio, 2008)

Granulometría

Ping Tiam (Citado en Garnica et al, 2002 y lo mismo en la Investigación de Osorio,2008), hizo una investigación en el cual reporta los resultados de un estudio realizado con dos materiales granulares que son utilizados con bastante frecuencia en la construcción de subbases y bases de pavimento en Oklahoma, en los cuales se trabajaron con tres diferentes granulometrías y como resultado se observan que la variación del módulo de resiliencia debido a las diferencias de granulometría, fue de 10 a 50% y de 0 a 22% para distintos materiales. Se encontró una gran diferencia de los Modulos Resilientes obtenidos con materiales de granulometría fina en relación con los obtenidos en materiales de granulometría media y gruesa.

Contenido de Humedad

En el mismo estudio de Ping Tiam (Citado en Garnica et al, 2002) el contenido de agua fue correspondiente a óptimo (4.6 a 6.3 %), más menos 2% a la misma. Con los resultados obtenidos se concluye que salvo para niveles de esfuerzo muy pequeños, el MR disminuye conforme el contenido de agua se incrementa. (Osorio, 2008)

Rada y Witczac (citados en Garnica et al, 2002) realizaron una evaluación de 271 resultados de pruebas obtenidos de 10 diferentes agencias de investigación de USA y encontraron las variables que más influyen en el MR de los materiales granulares y estos son: el estado de esfuerzo, el grado de saturación, el grado de compactación y principalmente en

suelos triturados angulosos, el aumento del contenido de agua conlleva reducir el MR. (Osorio, 2008)

“Peso específico y Nivel de compactación”

Para suelos granulares con grados de compactación al 95% en vez del 100%, el MR disminuye al disminuir el peso específico, por lo tanto, la deformación elástica aumenta con un factor de 1.5 a 2.0 y. (Osorio, 2008)

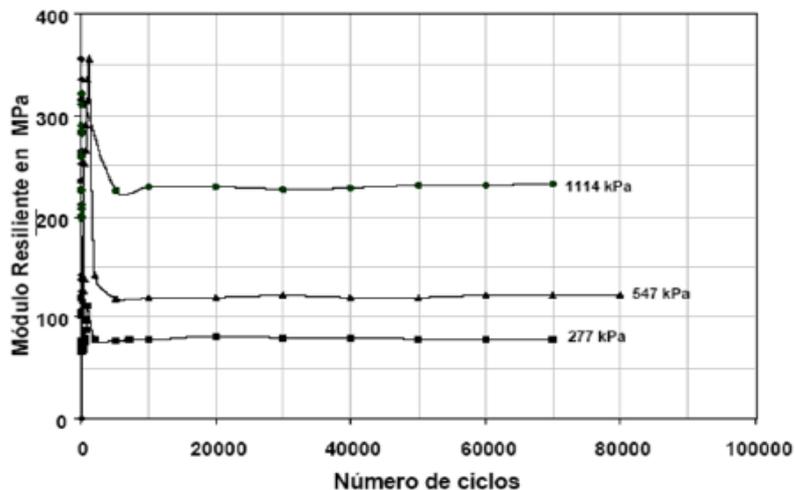
“Rada y Witczac” y “Garnica et al, 2002” (citado en la investigación de Osorio,2008) encontraron que cuando la carga tiene peso volumétrico seco grande, los valores de MR también son altos.

Factores externos: Los factores externos que podrían alterar los resultados son:

Magnitud del esfuerzo aplicado

Garnica et al, 2002 (Citado en la investigación de Osorio, 2008) da a conocer que realizaron estudios en el “Instituto Mexicano del Transporte” con la finalidad de ver la influencia del esfuerzo aplicado en el Módulo de Resiliencia, donde los resultados dan a conocer que cuando el Modulo Resiliente aumenta cuando la deformación acumulado es muy pequeña. Ver figura N° 40, se aprecia que el material está sometido a tres diferentes esfuerzos cíclicos (277, 547 y 114 kPa) este material tiene la misma granulometría. Con esto se concluye entonces que el MR del suelo granular dependerá del nivel de esfuerzo aplicado.

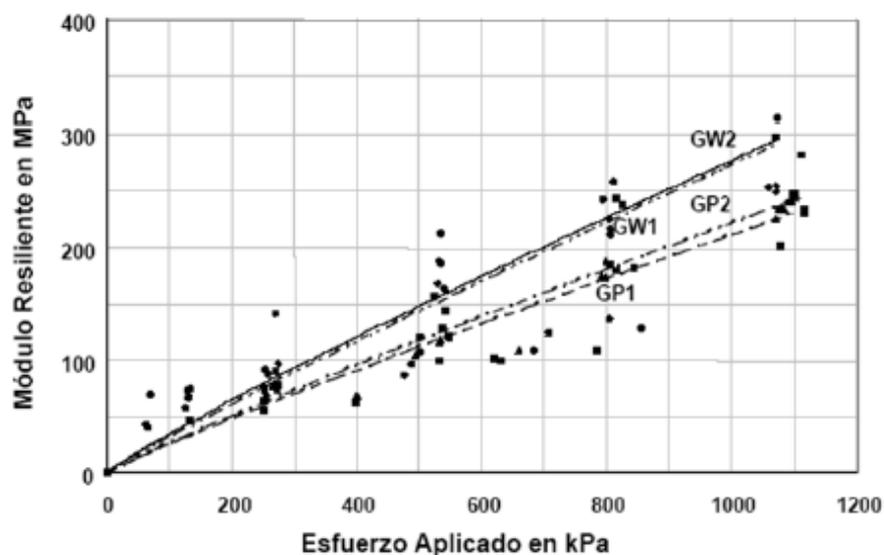
Figura 40: “Evolución del módulo de resiliencia con el número de ciclos”



Fuente: Figura extraída de la Investigación de Osorio, 2008. (citado como fuente al autor de la imagen Garnica et.al., 2002)

Garnica et al, 2002 (Citado en la investigación de Osorio, 2008) da a conocer que se muestra el crecimiento del MR con la magnitud del esfuerzo aplicado. Ver figura N° 41, para las cuatro granulometrías. También da a conocer que el MR de los materiales con la misma granulometría se agrupa, así como el material GW1 con GW2 (bien graduados) y de GP1 con GP2 (mal graduados) igualmente se agrupan. También observamos que para el máximo nivel de esfuerzos aplicados (1100 kPa) es de esperarse MR del orden de 300 MPa en materiales bien graduados y de 240 MPa en materiales uniformes. Se muestra en la investigación una cierta influencia de la granulometría en los valores de módulo de resiliencia.

Figura 41: “Evolución del módulo de Resiliencia con el nivel de esfuerzos”



Fuente: Figura extraída de la Investigación de Osorio,2008. (citado como fuente al autor de la imagen Garnica et.al, 2002)

2.2.8.3. Diseño Estructural de la estructura del pavimento.

Angelone et al, 2000 (Citado en la investigación de Osorio, 2008) da a conocer que el concepto de MR fue introducido por Seed et al y sus colegas de la Universidad de California en 1962, pero en los últimos años el concepto de MR ganó reconocimiento como propiedad que describe de mejor manera el comportamiento resiliente de los suelos granulares y de subrasante

El diseño estructural de un pavimento diseñado tanto por el método empírico AASHTO como los distintos métodos empírico-mecanicistas emplean como característica mecánica de los materiales el MR de los suelos. (Osorio, 2008)

En el guía AASHTO 2008, que propone un método empírico-mecanicista, también se utiliza el MR para caracterizar mecánicamente a las capas granulares del pavimento y de acuerdo a los niveles de confiabilidad del diseño plantea diferentes formas de obtener el MR. (Osorio, 2008)

Método Empírico AASHTO

El método empírico AASHTO'93 propone como medida de capacidad de soporte del suelo de subrasante el MR, así como también para las demás capas del pavimento recomienda asignar un coeficiente estructural que desde esta versión de la guía se correlacionó con el MR de cada capa. (Osorio, 2008)

Los coeficientes estructurales para el diseño de las capas pueden ser obtenidos a través del valor del CBR y se relaciona directamente con el MR de la siguiente forma. (Osorio, 2008)

Para bases granulares $a_2 = 0.249(\log M_R) - 0.977$ MR en psi

Para sub bases granulares $a_3 = 0.227(\log M_R) - 0.839$ MR en psi

Usualmente en su gran mayoría los valores del coeficiente estructural para la estructura del pavimento se consideran (0,13 = base granular) con $CBR \geq 80\%$ y (0,12 = subbase granular) con $CBR \geq 40\%$. (Osorio, 2008)

Como se puede ver en las ecuaciones mostradas, para los valores de coeficientes estructurales se tienen valores de MR asociados es decir que el a_2 y a_3 se obtienen a través considerando el MR, y estos son los que deberían ser controlados en terreno una vez construidos para garantizar que se cumplan las hipótesis del diseño. (Osorio, 2008)

2.2.8.4. Métodos Mecanicistas

En los métodos empírico-mecanicistas, incluyendo la nueva Guía AASHTO 2008 (NCHRP, 2007) utilizan el criterio de modelación de los parámetros y variables de diseño con el fin de determinar las tensiones y deformaciones a través del análisis de un sistema multicapa e ingresarlos a modelos de fatiga para obtener los ejes equivalentes de tráfico que soportará una estructura a la cual va ser sometida. (Osorio, 2008)

Estos métodos utilizan como parámetros de caracterización de las capas componentes de la estructura del pavimento el MR de las mismas.

2.2.8.5. Correlaciones existentes de módulo resiliente con otras propiedades

se crearon alternativas para incorporar de forma más fácil el MR a los métodos de diseño estructural de pavimentos a través de correlaciones empíricas con el CBR esto debido a la complejidad que tiene el ensayo de determinación de MR y a que no es fácil de disponer del equipo (Osorio, 2008)

Angelone et al, 2000 (Citado en la investigación de Osorio, 2008) da a conocer que las correlaciones presentadas ver tabla N° 04 recomendada por el manual de carreteras chileno para suelos de subrasantes describen el comportamiento lineal elástico de los materiales granulares. Sin embargo, pruebas de laboratorio y ensayos en terreno han demostrado que estos materiales tienen un comportamiento tenso-dependiente. Por tanto, estas correlaciones se deben utilizar sólo como un primer acercamiento al MR en los métodos de diseño de pavimentos.

(Cecilia Herrera, 2014), Indica lo que normalmente resulta complicado realizar el ensayo de módulo resiliente puesto que se requiere de un equipo de laboratorio especial, el cual está constituido por una cámara triaxial para ensayos cíclicos, un marco de carga con un actuador dinámico servo controlado que nos sirve para producir una onda sinusoidal media en un período y frecuencia determinados; un panel de control y de mediciones de presiones de cámara, de poros y efectiva, y una unidad de adquisición de datos con software de procesamiento. En este sentido, la “Guía de diseño AASTHO 2008” ha propuesto correlaciones que determinan el mantenimiento rutinario (MR) a partir de ensayos de CBR.

Se muestra en la Tabla N° 05 algunas correlaciones que determina el (MR) a partir del CBR obtenido en laboratorio.

Tabla 5: Correlaciones entre MR y CBR

Esta correlación está dado por Heukelom y Klomp y es para suelos finos y que tengan un CBR menor a 10%.	$MR(\text{psi})=1500 \times \text{CBR}$
El Instituto del Asfalto estable la correlación mostrada Donde: A= (De 772 hasta 1155) B= (De 369 hasta 555)	$MR(\text{psi})=A+B \times \text{CBR}$
Es recomendable usar la ecuación mostrada para suelos finos que tengan un CBR saturado menor a 20% (Guía AASHTO 2008)	$MR(\text{psi})=1000+555 \times \text{CBR}$
“Guía AASHTO 2008”	$MR(\text{psi})=2555 \times \text{CBR}^{0.65}$

Fuente: Cecilia Herrera, 2014

2.2.8.6. Antecedentes del análisis estadístico

En la investigación del Ing. Andrés Sotil Chávez, utilizó ampliamente la medición diferente del grado de correlación entre los valores de laboratorio medidos y las respuestas predichas.

Con las mediciones el investigador obtuvo diferentes ecuaciones y modelos a los cuales se le llama los parámetros de bondad de ajuste entre ellos los que fueron más utilizados y reportados es el coeficiente de determinación (R²), el error estándar de estimación (Se) y la precisión relativa (Se/Sy).

Para modelos lineales, el coeficiente de determinación R², es una medida de la precisión del modelo. El error estándar de estimación se refleja el error probable en la predicción.

Sin embargo, es importante reconocer que, para la evaluación de modelos no lineales, el R² no es una buena medida de la precisión del modelo, ya que depende de una separación lineal de las variables. En cambio, la precisión del modelo debe evaluarse mediante la relación de error estándar o la precisión relativa, Se/Sy, donde Sy es la desviación estándar de la variable de criterio. Teniendo el Se / Sy como base, se puede calcular un valor de R² para propósitos comparativos usando la siguiente ecuación:

$$R^2 = 1 - \frac{(n-v) * \left[\frac{Se}{Sy} \right]^2}{(n-1)}$$

Donde:

n = número de muestras

v = número de coeficientes de regresión

En la investigación realizada por el Ing. Andrés Sotil Chávez, a lo largo del análisis estableció un criterio subjetivo para usar adecuadamente estos parámetros de bondad de ajuste; y se muestra en la tabla N° 06 la cual es utilizada como base fundamental para el análisis de los resultados de la correlación que se busca en esta investigación

Tabla 6: Parámetros de Bondad de Ajuste

	Parámetro de bondad de ajuste	
CRITERIO	R2	Se/Sy
Excelente	Superior a 0,90	Más bajo que 0.350
Bueno	Entre 0.70 a 0.89	Entre 0.36 y 0.55
Regular	Entre 0,40 y 0,69	Entre 0.56 y 0.75.
Pobre	Entre 0.20 a 0.39	Entre 0.76 y 0.90.
Muy pobre	Más bajo que 0.19	Entre 0,90 y 1,00.
Sin correlación	Valores imaginarios	Superior a 1,00

Fuente: Ing. Andrés Sotil Chávez.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. MÉTODOS Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

Con el objetivo de lograr un procedimiento adecuado en la investigación del estudio y con el fin de poseer la mayor exactitud y confiabilidad, es importante la organización de una metodología de trabajo que al investigador le permita realizar y verificar la visión teórica del problema y el objetivo planteado (Gerardo Gil, 2011).

3.1.1. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

El método de investigación es “cuantitativo” porque se realizará diversos procedimientos de decisión, usando magnitudes numéricas que van a ser tratados mediante herramientas estadísticas.

3.1.2. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

“Según Hernández Sampieri (2006) para la definición del alcance de la investigación existen cuatro tipos de investigación: “exploratoria”, “descriptiva”, “correlacional” o explicativa, a continuación, se detalla la definición de los alcances a utilizarse en esta investigación”..

“Hernández Sampieri (2006) da a conocer en qué consiste el alcance exploratorio y es de la siguiente manera, se realizan los estudios exploratorios cuando el fin es explorar una investigación que aún no es tan difundido, del cual existen muchas

dudas, no está definido claramente y se tiene ideas vagas y como guía de investigación existe poca información porque son temas nuevos”.

“Hernández Sampieri (2006) da a conocer en que el alcance descriptivo pretende medir o recoger información sobre diversos aspectos, medidas o componentes del tema de investigación. En una investigación descriptiva se elige una cantidad de materias para medir y describir el tema de investigación buscado”.

“Hernández Sampieri (2006) da a conocer en qué consiste el alcance correlacional de la siguiente manera, estos estudios tienen el objetivo de conocer una similitud o grado de asociación a partir de dos variables, a través de una relación entre ellas. En la gran mayoría se encuentran en este tipo de estudios en tres, cuatro o más variables, conceptos y categorías”.

3.1.2.1. Exploratorio

Por lo antes mencionado esta investigación se define como un estudio exploratorio ya que la investigación se basa en nuevos estudios porque a diferencia del “cono de arena” y el “densímetro nuclear”. El “equipo LWD” en especial ha sido poco estudiado relacionado al tema de grados de compactación obtenido a través de módulos resilientes, ya que este equipo está diseñado para obtener resultados de deflexiones de una estructura de pavimento. Pero se pretende adaptar este equipo para obtener los grados de compactación de un suelo, para este tema solo existe guías vagamente relacionados con el problema del estudio, es necesario indagar sobre este tema y es eso lo que se muestra en esta investigación para que a un futuro, esta investigación sirva de referencia a investigadores relacionados con el tema presentado.

3.1.2.2. Descriptivo:

Por lo antes mencionado se define esta investigación como de tipo descriptivo ya que describe tendencia de una cantidad de población con la finalidad de medir una información con ayuda de guías, libros y otros de manera independiente sobre las variables a las que refieren y describir, es decir el objetivo de esta investigación es recolectar datos

sobre la compactación del suelo utilizando el equipo LWD, “densímetro nuclear” y “cono de arena”.

3.1.2.3. Correlacional:

Por lo antes mencionado se define esta investigación como de tipo correlacional ya que está dirigido a realizar una comparación de resultados del Deflectómetro de peso liviano (LWD), método nuclear y cono de arena de donde se obtendrá una correlación mediante el patrón que en este caso es el método nuclear y cono de arena de esa manera validar la aplicación del equipo (LWD).

3.1.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño de investigación es la estrategia o un plan que se elabora para obtener la información requerida durante un estudio o una investigación.

Esta investigación se encuentra dentro del diseño no experimental ya que no se manipulan deliberadamente las variables, porque se observan tal y como se desarrollan en su contexto natural y en el lugar de aplicación de la investigación para después analizarlos. En este estudio de investigación se han hecho la medición con métodos, sin manipular las variables y procedimientos de los ensayos ni las condiciones de los ensayos realizándose in-situ.

Así también es no experimental de tipo transaccional o transversal porque recolecta datos en un solo momento o instante (abril y junio del año 2018), un tiempo único y el propósito es describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado (verificar el efecto de cambio de metodología en la determinación del grado de compactación).

En la investigación de Gil, (2011) con referencia a Hernández Sampieri (2006), indica que los diseños transaccionales descriptivos tienen como finalidad indagar la incidencia de las modalidades o niveles de una o más variables en una población”. En donde el procedimiento consiste en ubicar en una o diversas variables a un grupo de personas, objetos, situaciones, contextos, fenómenos; y así proporcionar su descripción.

En (Hernández Sampieri, 2006) nos da a conocer que en ciertas ocasiones, el investigador pretende realizar descripciones comparativas entre grupos, o subgrupos de personas u otros seres vivos, objetos, comunidades o indicadores y es eso justamente lo que se busca en esta investigación hacer una comparación de grados de compactación de la sub-base granular con el equipo LWD, densímetro nuclear, y cono de arena.

A pesar de ser de tipo no experimental, es necesario realizar una serie de pruebas o experimentos antes de medir la variable como tal. Existen dos tipos de experimentos, en laboratorio y en el campo.

La experimentación en laboratorio es donde el investigador tiene que crear una situación artificial de la vida real, en donde controla algunas y manipula otras, porque él puede observar y medir el efecto de manipulación de las variables independientes en la variable dependiente en una situación en donde los efectos de otras variables hayan sido controlados. En este caso se realizan las pruebas para determinar en laboratorio cuál es el máximo valor de densidad que puede alcanzar el suelo, así como también otras características necesarias para realizar los estudios posteriores.

Por otra parte, el experimento en el campo se refiere a un estudio de una situación real, en donde una o más variables independientes estarán sujetas a manipulación bajo estricto control de otras variables de control. Eso es relativo hasta donde permita la condición del estudio. En este sentido, la investigación de campo se realizó a través de los densímetros y el cono de arena para determinar la situación real del suelo, en cuanto a compactación se refiere.

3.1.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.1.4.1. Población:

Según, Hernández Sampieri (2006), “define a la población como un conjunto total a estudiarse donde los casos que tienen las mismas características de manera que coincida con una serie de especificaciones lo cual da origen a los datos de investigación”.

Según lo antes descrito, en esta investigación la población estudiada estuvo constituida por la sub-base granular del proyecto Tocache –

Juanjuí, ubicada en la región de San Martín y la variable es el grado de compactación de la sub-base granular.

3.1.4.2. Muestra:

Según Gil (2011) da a conocer que en todo proceso de investigación lo ideal sería medir a cada uno de los individuos o componente de la población, pero en la práctica real del día a día es casi imposible realizar esta medición a toda la población, por motivos económicos o limitaciones de tiempo y espacio, por esta razón descrita en la investigación se toma una muestra siendo esta la más representativa y reflejará las características de la totalidad de la población, siendo este una muestra no probabilística porque la elección de la muestra no depende de la toma de decisiones de un grupo de personas y en esta muestra no probabilística las muestras seleccionadas no dependerán de criterios posibles aplicables a la investigación por que no se realiza en base a fórmulas.

Durante la investigación se realizaron dos visitas a obra para realizar los ensayos, por el motivo de que en la primera visita los datos no fueron tomados de una manera correcta con el equipo LWD, ya que este equipo es novedad para realizar este ensayo de obtención de grado de compactación, mientras que con el equipo “densímetro nuclear” y “cono de arena” los datos si fueron tomados de manera correcta. La mala práctica de recolección de datos fue notado durante el procesamiento del análisis de resultados que se detalla puntualmente en la presentación de datos de esta investigación, por este motivo se decide volver a tomar los datos en campo de una manera correcta y así obtener un análisis de datos confiables.

En la primera de visita a obra se realiza los ensayos con una muestra de 20 puntos con cada uno de los equipos (LWD, densímetro nuclear y cono de arena), haciendo un total de 60 muestras, esta cantidad de muestra es no probabilística y es determinado de acuerdo a la variable del estudio en este caso el grado de compactación y los instrumentos utilizados equipo (LWD, “densímetro nuclear” y “cono de arena”). Para la

determinación de esta muestra también se considera las limitaciones temporales y los espacios de trabajo.

Para la segunda visita la muestra representativa para realizar los ensayos y que representan a toda la extensión de área de la sub base granular compactado fue determinado considerando al igual que en la primera visita de acuerdo a variable, las limitaciones temporales y el espacio de trabajo, también en esta segunda visita se consideró la recomendación y sugerencias de profesionales en el área de estadística, así también profesionales en el área de suelos y pavimentos que vienen trabajando en muchos proyectos de carretera realizando trabajos similares y afirman que hasta la actualidad no tuvieron problemas en cuanto al control de calidad de sus pavimentos. Habiendo identificado el error de toma de datos con el equipo LWD en la primera visita, en esta segunda visita se toma 108 puntos de los cuales se hace un promedio obteniendo un total de 12 puntos para el LWD y 12 muestras con el densímetro nuclear haciendo un total de 24 muestras. Ya no se toma una muestra con el cono de arena porque previa a esta segunda toma de datos ya se tiene el análisis de resultados de la correlación del densímetro nuclear y el cono de arena obtenida durante la primera visita de la investigación, esta correlación también es utilizada para el trabajo rutinario de la liberación de la sub base granular del proyecto completo. Es importante mencionar que después de haber encontrado la correlación entre el densímetro nuclear y cono de arena los trabajos de la liberación de la sub base solo se realiza con el densímetro nuclear en este proyecto. Por esta razón la comparación final de esta investigación se realiza solo con dos equipos que son el LWD y el densímetro nuclear.

3.2. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La recolección de información para la investigación implica elaborar un plan detallado del procedimiento que se conduzcan a reunir datos con un propósito específico. Para lograr esto disponemos de una gran variedad de instrumentos o técnicas tanto cuantitativas como cualitativas.

La recolección de datos depende en gran parte del tipo de investigación y del problema planteado para la misma, así mismo puede efectuarse desde una simple ficha bibliográfica, observación, cuestionario o encuesta, entre otros. (Gil, 2011)

Otra de las herramientas empleadas para el desarrollo de esta investigación fue la observación, la cual se emplea para indicar todas las formas de percepción. (Gil, 2011)

Figura 42: Ensayos con el equipo LWD



Fuente: fotografía tomada durante los ensayos realizados de la Carretera Tocache – Juanjuí

“La observación que se emplea en esta investigación es de tipo directo, ya que es aquella en la cual el investigador puede observar y recoger datos mediante su propia observación o el empleo de los propios sentidos, especialmente de la vista”. “Esta inspección es la que se hace directamente a un fenómeno dentro del medio en que se presenta a fin de contemplar todos los aspectos inherentes a su comportamiento y características dentro de ese campo. El observador puede entrar en contacto directo con el fenómeno observado pudiendo permanecer aislado del mismo o a participar en él”.

Para esta investigación de comparación de resultados de grados de compactación, las técnicas de recolección empleados son de tipo cuantitativos y están representadas por densímetro nuclear, LWD y cono de arena.

3.2.1. PROCEDIMIENTO TÉCNICO

La investigación se realizó en la carretera Tocache – Juanjuí en un tramo de 300 metros, (km 26+500 al km 26+800), en la Subbase granular del pavimento, el proyecto está siendo realizado por el consorcio integración vial (San Martín Contratistas Generales, Johesa S.A.C y Malaga S.A).

Se eligió un área compactado y representativo para tomar las pruebas de densidades y humedades por cada método de la misma manera para la obtención del módulo resiliente con el equipo LWD y hacer la respectiva comparación.

En la primera visita el área de trabajo se dividió en 20 puntos representativos a cada 25 metros, mientras que en la segunda visita el área representativa de trabajo se divide en 12 puntos.

En cada uno de esos 20 puntos de la primera visita se realizaron los tres ensayos precisamente en el mismo punto para alteración en los resultados del grado de compactación con cada uno de los métodos con el densímetro nuclear, cono de arena y el equipo LWD. Al tener 20 puntos de medición de grados de compactación con tres distintos métodos en total se realizaron 60 ensayos. Mientras que para la segunda visita corrigiendo los errores encontrados en la recolección de datos de la primera visita se realizó 108 mediciones con el equipo LWD para promediar a cada nueve mediciones están tomadas a cada cinco metros al centro de la vía y al borde izquierdo y derecho de la plataforma completa de la carretera Tocache – Juanjuí. Y doce puntos con el densímetro nuclear

Se realizó un muestreo de material de la sub-base granular del área elegida para cumplir con los requerimientos de los ensayos especiales que son necesarios para hacer una caracterización a través de ensayos de clasificación y compactación en el laboratorio es decir los ensayos de proctor y CBR y otros ensayos que pide las especificaciones técnicas de este proyecto como se muestra en la tabla N° 06 y son adjuntados en los anexos de la investigación.

Tabla 7: Requerimiento de ensayos especiales en la Sub-base granular

SUB BASE GRANULAR					
REQUERIMIENTO DE ENSAYOS ESPECIALES					
ENSAYO	Norma MTC	Norma ASTM	Norma ASSHTO	Requerimiento	
				< 3000 msnm	>= 3000 msnm
“Abrasión Los Ángeles”	MTC E 207	C131	T 96	50% máx	50% máx
“CBR ”	MTC E 132	D1883	T 193	40% mín	40% mín
“Límite Líquido”	MTC E 110	D 4318	T 89	25% máx	25% máx
“Índice de Plasticidad”	MTC E 111	D 4318	T 90	6% máx	4% máx
“Equivalente de Arena”	MTC E 114	D 2419	T 176	25% mín	35% mín
“Sales Solubles”	MTC E 219			1% máx	1% máx
“Partículas Chatas y Alargadas”		D 4791		20% máx	20% máx

Fuente: Cuadro extraído del expediente técnico del proyecto Tocache - Juanjuí

3.2.2. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.

Los procedimientos o pasos a seguir para recolectar los datos necesarios para realizar el estudio, se presentan de forma detallada, con el fin de conseguir cada objetivo planteado en la investigación.

3.2.2.1. Procedimientos metodológicos para determinar la compactación en el laboratorio de un suelo a través de proctor modificado.

Para encontrar o determinar la densidad máxima seca en laboratorio se realizó a través de la norma de proctor modificado MTC E 115 -2016 “COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO LA ENERGÍA MODIFICADA (56000 pie-lb/pie³ o 2700 Kn –m/m³). (MTC E 115, 2016)

- Esta investigación es realizada siguiendo cada uno de los pasos establecidos en la norma MTC E 115 - 2016 para la realización del ensayo "Proctor Modificado".
- En la tabla N° 08, se muestra el modelo de la planilla de la obtención de datos que es elaborada para la entrega de resultados de esta investigación y al mismo tiempo es utilizado para el reporte de los informes de este proyecto Tocache – Juanjui.
- La norma utilizada se presenta en el apéndice 01, de la presentación de esta investigación.

Tabla 8: Modelo de planilla de la obtención de datos y cálculos de ensayo Proctor

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS						
RELACION DENSIDAD/HUMEDAD (PROCTOR)						
(MTC E-115, E 116 / ASTM D-1557, D 698 / AASHTO T-180)						
OBRA	:					
CANTERA	:					
UBICACIÓN	:					
MUESTREO	:					
Método de Compactación		N° de Capas	N° de golpes			
NUMERO DE ENSAYOS		1	2	3	4	
Peso Suelo + Molde	gr.					
Peso Suelo Húmedo Compactado	gr.					
Peso del Molde	gr.					
Peso Volumétrico Húmedo	gr.					
Volumen Molde						
Peso Suelo Húmedo + Tara	gr.					
Peso Suelo Seco + Tara	gr.					
Peso de la Tara	gr.					
Peso del agua	gr.					
Peso del suelo seco	gr.					
Contenido de agua	%					
Densidad Seca	gr/cc					
RESULTADOS						
Densidad Máxima Seca		(gr/cm3)	Humedad óptima			%
Densidad Máxima Seca Corregida		(gr/cm3)	Humedad óptima			%
RELACION HUMEDAD - DENSIDAD SECA						
OBSERVACIONES:						

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.2. Procedimiento metodológico para determinar la compactación en sitio de un suelo a través del cono de arena, densímetro Nuclear y LWD

La compactación del suelo puede determinarse a través de diferentes métodos y aparatos, siendo objeto de estudio en esta investigación cono de arena, densímetro Nuclear y LWD.

3.2.2.3. Procedimiento metodológico para el método cono de arena

Para encontrar el grado de compactación a través de la relación de densidades obtenidas en laboratorio y campo se realiza obedeciendo a la norma “MTC E 117-201” “ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DE LOS SUELOS EN EL CAMPO POR EL MÉTODO DEL CONO DE ARENA”

- Esta investigación fue realizada siguiendo cada uno de los pasos establecidos en la norma MTC E 117 - 2016 para encontrar densidad de campo y la relación entre la densidad máxima obtenida en campo y la de laboratorio nos da como resultados los grados de compactación.
- En la tabla N° 09 se muestra el modelo de la plantilla de la obtención de datos que fue elaborada para la entrega de resultados de esta investigación y al mismo tiempo es utilizado para el reporte de los informes de este proyecto Tocache – Juanjuí.
- La norma utilizada se presenta en el apéndice 03, de la presentación de esta investigación.

Tabla 9: Formato de cálculo de grado de compactación por el método Cono de Arena

ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DE LOS SUELOS EN EL CAMPO POR EL METODO DEL CONO DE ARENA										
(NORMA MTC E 117, AASHTO T-191, T-238, T-217)										
OBRA	:									
TRAMO	:									
MATERIAL	:									
CANTERA	:									
UBICACIÓN	:									
DENSIDAD HUMEDA										
LADO										
UBICACIÓN DEL ENSAYO			Km							
CAPA										
ESPESOR DE CAPA (m)										
FECHA DE ENSAYO										
1	Peso del frasco + arena		g							
2	Peso del frasco + arena que queda		g							
3	Peso de arena empleada (1-2)		g							
4	Peso de arena en el cono		g							
5	Peso de arena en la excavación (3-4)		g							
6	Densidad de la arena		g/cm ³							
7	Volumen del material extraído (5/6)		cm ³							
8	Peso del recipiente + suelo + grava		g							
9	Peso del recipiente		g							
10	Peso del suelo + grava (8-9)		g							
11	Peso retenido en la malla 3/4"		g							
12	% de Material > 3/4" (Grava) (11/10*100)		gr/cm ³							
13	% de Material < 3/4" (Arena) (100 - 12)		cm ³							
14	Densidad Húmeda (10/7)		g							
15	Densidad Seca (14/(100+21)*100)		cm ³							
DENSIDAD EN SITIO - HUMEDAD AASHTO T - 217										
16	Peso recipiente + suelo húmedo		g							
17	Peso recipiente + suelo seco		g							
18	Peso de agua (16-17)		g							
19	Peso de recipiente		g							
20	Peso de suelo seco (17-19)		g							
21	Contenido de humedad (18/20)*100		%							
CORRECCIÓN POR GRAVA ASTM D- 4718										
22	Máxima densidad seca		gr/cm ³							
23	Optimo contenido de humedad		%							
24	Peso Específico grava		gr/cm ³							
25	Contenido humedad grava		%							
26	Máx. Densidad corregida (100 / (13/22)+(12/24))		gr/cm ³							
28	Grado de compactación (15/26*100)		%							
29	Compactación Requerida		%							
30	Aprobación (Cumple / No Cumple)									

OBSERVACIONES:

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.4. Procedimiento metodológico con densímetro Nuclear

Para determinar el grado de compactación con densímetro nuclear a través de la relación de densidades obtenidas en laboratorio y campo se realiza obedeciendo a la norma “MTC E 124-2016” “DENSIDAD EN EL SITIO – MÉTODO NUCLEAR A PROFUNDIDAD REDUCIDA”.

Esta investigación fue realizada siguiendo cada uno de los pasos establecidos en la norma MTC E 14 - 2016 para encontrar densidad de campo y la relación entre la densidad máxima obtenida en campo y la de laboratorio nos da como resultados los grados de compactación.

- En la tabla N° 10 se muestra el modelo de la plantilla de la obtención de datos que fue elaborada para la entrega de resultados de esta investigación y al mismo tiempo es utilizado para el reporte de los informes de este proyecto Tocache – Juanjuí.
- La norma utilizada se presenta en el apéndice 04, de la presentación de esta investigación.

Se hace saber algunas consideraciones antes del inicio de la operación a este “equipo radioactivo”. Para la prevención del personal autorizado a utilizar este equipo, en base a la experiencia adquirida se debe tomar en consideración de lo siguiente:

El densímetro nuclear utilizado (Troxler Modelo 3440) está diseñado para realizar la medición a través de dos modos de operación: por retrodispersión y por transmisión directa. El método usado para recoger los datos en la investigación fue el de “**transmisión directa**”.

Para prevenir los efectos de radiación en personas y otros equipos, el área de trabajo fue delimitado bajo implementos de seguridad como: conos, letreros y símbolo respectivo con el riesgo de radiactividad.

El Densímetro nuclear por ser un equipo radioactivo solo puede operar un personal autorizado, otras personas no autorizadas no pueden operar el equipo en mención ni estar cerca del equipo cuando este es usado. (Gil, 2011)

Para iniciar el trabajo se ubica el punto de ensayo y luego se perfora el suelo donde se marca el suelo con la placa para que el operador realice el trabajo y penetre el vástago para el inicio de la medida. (Gil, 2011)

Es importante considerar que la placa esté en contacto directo con el suelo para bajar el vástago y ubicar en la perforación. (Gil, 2011)

El trabajo no se puede realizar cuando exista movimiento de maquinarias y vehículos. Todo inicio de trabajo se debe realizar previa coordinación con la supervisión de proyecto para determinar la hora de inicio de trabajo, las rutas de circulación, los accesos y zonas de trabajo. (Gil, 2011)

Cuando se haya terminado el trabajo se debe guardar el equipo en la caja correspondiente para luego ser transportado a lugar determinado.

Procedimiento para la recolección de datos con el densímetro nuclear.

Fase I.

Activación del densímetro Nuclear

Para la activación del equipo es necesario que las baterías estén cargadas de (Níquel y Cadmio) con su respectiva sonda que es usado como la fuente de alimentación y una vez que este se active la pantalla del densímetro se prende para poder iniciar la toma de datos. (Gil, 2011)

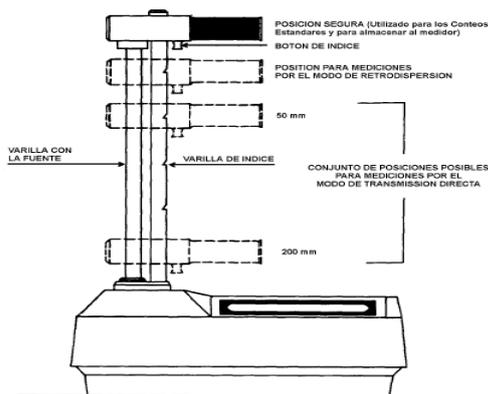
Fase II:

Configuración de los parámetros.

Cuando se inicie la activación del equipo el funcionamiento inicia donde establece unidades de medida, tiempo de conteo y otros. Mientras no se apague el equipo las unidades y tiempo establecido se mantienen durante la permanencia del trabajo. (Gil, 2011)

Fase III: Posiciones de la varilla con la fuente (ver fig. 43)

Figura 43: Posiciones de la varilla con la fuente.

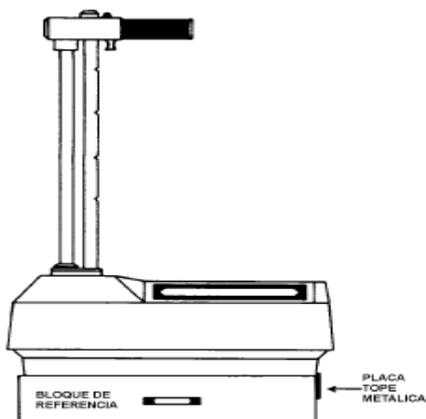


Fuente: Manual de usuario del densímetro nuclear para medición de humedad – densidad Modelo 3430

Fase IV: Realización del conteo estándar

Se recomienda que se tome diariamente un “conteo estándar” para poder obtener datos con mayor precisión. El conteo estándar se realiza en lugar donde la superficie sea plana y esté seca, también el equipo debe estar alejado por lo menos 10 metros de otros equipos radioactivos y 3 metros de alguna estructura vertical. (Gil, 2011)

Figura 44: Posición para realizar el conteo estándar con el densímetro nuclear.



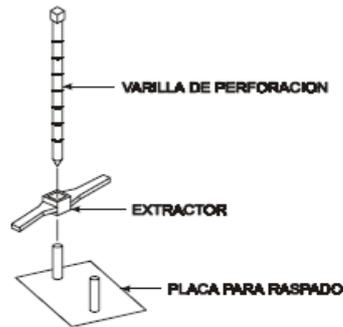
Fuente: Manual de usuario del densímetro nuclear para medición de humedad – densidad Modelo 3430

Fase V: preparación del suelo y colocación del densímetro

Colocar la placa en la superficie haciendo un movimiento de atrás hacia adelante provocando un raspado y uniformizar la superficie. Si la

superficie tiene desigualdades rellenar con arena fina para nivelar la superficie. (Gil, 2011)

Figura 45: Colocación de la varilla del densímetro nuclear

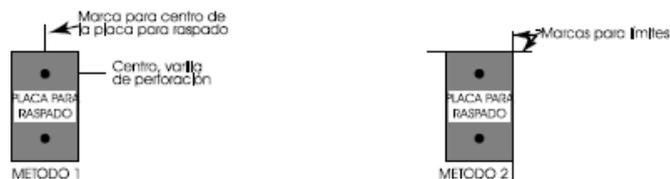


Fuente: Manual de usuario del densímetro nuclear para medición de humedad – densidad Modelo 3430

Colocarse un dosímetro individual y unas gafas de protección. Con su pie sujetado a la placa, golpear con un martillo el extremo de la varilla de perforación, hasta que este alcance a una profundidad que sea por lo menos 50 mm mayor que la profundidad necesaria para la medición.

Para que se coloque el instrumento con la precisión máxima, marcar en el suelo el contorno de la placa de raspado antes de retirar la varilla de perforación (Ver. Fig. 46)

Figura 46: Marcado de la posición de la placa para raspado de densímetro



Fuente: Manual de usuario del densímetro nuclear para medición de humedad – densidad Modelo 3430

Una vez que la varilla haya sido perforada, para retirar del agujero se debe realizar en forma recta y sin aflojar la varilla con golpes de los horizontales y con ninguna herramienta, así como un martillo, ya que si se realiza esta mala práctica de trabajo se podría generar una deformación del orificio a realizarse.

Seguido al anterior procedimiento se debe retirar la placa para dejar libre la superficie para introducir la varilla con la fuente, teniendo cuidado en no hacer movimientos laterales e inestabilidad el oficio para en ensayo requerido.

Después de haber colocado en la posición correcta la fuente se procede a introducir la varilla a la altura deseada. Para saber si la varilla a encontrado una posición se escucha un sonido de engrapes así da a conocer que el equipo ha encontrado la posición correcta para realizar el control.

En la tabla N° 10, se muestra el formato a utilizar para registrar los resultados de los ensayos.

Tabla 10: Tabla de Registro de Resultados del Densímetro Nuclear

DENSIDAD DE CAMPO (MÉTODO DEL DENSÍMETRO NUCLEAR)										
OBRA : _____						N° REGISTRO :				
TRAMO : _____						TÉCNICO :				
ESTRUCTURA : _____						ING° :				
PROGRESIVA : _____						RESP. :				
						FECHA :				
PUNTOS	UBICACIÓN	CARRIL	ESPESOR	CANTERA	HUMEDAD		DENSIDAD			Di % COMPAC.
					OPTIMO	CAMPO	DEN. HUM.	DEN. SECA	MAX. LAB.	
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										

14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
OBSEVACIONES:										

Fuente: Elaboración Propia

3.2.2.5. Procedimiento metodológico con el quipo LWD

Para determinar el grado de compactación con LWD a través de la relación de Modulo de Resiliente obtenidas en laboratorio y campo se realiza siguiendo los pasos del artículo de Milton Jimenez quien realizó una comparación entre el procedimiento propuesto por Marradi et al y Milton Jiménez para el uso del deflectómetro de peso liviano (LWD) como dispositivo de control de compactación, y el resultado obtenido con densímetro nuclear que fue expuesto en el Congreso Internación de Ingeniería y Dirección de Proyectos.

- En la tabla N° 11 se muestra el modelo de la plantilla de la obtención de datos que es elaborada para la entrega de resultados de esta investigación.
- La guía utilizada se presenta en el apéndice 05, el Manual de uso del LWD.

Fase I: Preparación de Terreno

El terreno donde se va apoyar el Minidyn necesita ser homogéneo. Si es necesario es recomendable una fina capa de arena del mismo material para nivelar la superficie, una vez que el equipo este posicionado rotar el Minidyn con la mano con el objetivo de uniformizar al máximo el contacto con el terreno.

Fase II: Hacer un punto de prueba.

Como el grado de compactación se obtiene de la relación de un primer resultado llamado M1 y el tercer resultado llamado M2, se procede a tomar los datos de la siguiente manera.

El procedimiento consiste en tomar el M1, y esto se obtiene siguiendo los pasos:

- Se debe mantener una fuerza constante de empuje con la palma que sostiene la vara, así se evitará que el plato se desplace por el terreno y tomar medidas erróneas.
- No debe realizarse dos mediciones en el mismo punto, cada medición equivale a 6 pruebas, es decir 6 golpes de la pesa. La razón de esto es porque la primera medición compactará el terreno y al tomar la segunda medición en el mismo punto se obtendrá un módulo mayor al real.
- Se debe soltar la pesa a la máxima altura posible en cada una de las 6 pruebas para obtener la mayor carga del terreno.

Después de obtener el M1 se toma el segundo “Módulo Resiliente” con el peso de 20 kilos este dato tiene el fin de solo ver la diferencia de cuanto es la variación del M1, CUANDO ESTE MATERIAL ES COMPACTADA CON EL PESO DE 20 KILOS y luego nuevamente se toma el cálculo con el peso de 10 kilos al que llamamos M2, lo que quiere decir que la relación de la variación del módulo M1 Y M2 nos da como resultado el grado de compactación de ese material.

Lo aplicado en esta investigación se realiza siguiendo los pasos detallados anteriormente y se da de la siguiente manera:

- Con el equipo LWD se procede a tomar las medidas de módulos Resilientes con la pesa de 10 kilos en el mismo lugar donde se toma los datos con el densímetro nuclear de lo cual al módulo resiliente resultante se le nombra M1
- Seguidamente con el equipo LWD también se procede a tomar las medidas de Modulo Resiliente pero con la pesa de 20 kilos, este

dato solo se realiza al inicio de la prueba de datos como una calibración del equipo

- Finalmente se repite a tomar los datos con el equipo LWD con la pesa de 10 kilos lo cual llamamos al módulo resiliente resultante M2.

Fase III: Llenar el formato diseñado para obtención de resultados

Registrar los resultados de los ensayos en el modelo de tabla que se muestra en la tabla N° 11.

Tabla 11: Tabla de registro de resultados del LWD

GRADO DE COMPACTACIÓN CON EL EQUIPO LWD						
MÓDULO (Mpa)					MR INICIAL =	
PUNT.	UBICACIÓN	LADO	CAPA	ESPESOR DE CAPA (cm.)	MÓDULOS (MPa)	(LWD) Grado de Compactación
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
OBSERVACIONES:						

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.6. Procedimiento metodológico para analizar a diferencia de los resultados obtenidos con el LWD, “Densímetro Nuclear” y el “Cono de Arena”.

Codificar los datos obtenidos en el modelo de tabla N° 12 que se muestra para registrar los resultados de cada ensayo realizado con cada uno de los equipos.

Tabla 12: Modelo de tabla para comparar os resultados obtenidos con los equipos densímetro nuclear y LWD

LWD				Cono de Arena				Densímetro Nuclear			
Cant.	Ubicación	Lado	Grado de compactación	Cant.	Ubicación	Lado	Grado de compactación	Cant.	Ubicación	Lado	Grado de compactación
1				1				1			
2				2				2			
3				3				3			
4				4				4			
5				5				5			
6				6				6			
7				7				7			
8				8				8			
9				9				9			
10				10				10			
11				11				11			
12				12				12			
13				13				13			
14				14				14			
15				15				15			
16				16				16			
17				17				17			
18				18				18			
19				19				19			
20				20				20			

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO EVALUADO

“La carretera Tocache – Juanjuí, Tramo: Pizana - Campanilla, es parte de la ruta Nacional Longitudinal (PE – 5N). (Carretera Fernando Belaunde Terry) (ex marginal de la selva), que permite la intersección entre las regiones de Amazonas, San Martín, Huánuco y Ucayali”. (Expediente Técnico del proyecto Tocache – Juanjuí, 2018).

La zona de estudio “Tocache – Juanjuí”: “Tramo Pizana - La Pólvora - Pizarrón – Campanilla” del km 0+000 al km 89+793, la vía es de 2 carriles con un ancho de 5.5 m en cada carril, se encuentra ubicado al sur y al norte del departamento de San Martín ; geográficamente pertenece a la zona de selva alta o región tropical con una altitud de 318 m.s.n.m. y los 970 m.s.n.m.

El diseño de espesores del pavimento fue efectuado de acuerdo a las metodologías: “AASHTO 1993 Y ASPHALT INSTITUTE 1991”, para un periodo de diseño de 10 años.

4.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO:

En la Tabla N° 13, se da conocer los espesores de la estructura del pavimento diseñado para el proyecto: Tocache – Juanjuí

Tabla 13: Cuadro de espesores de la estructura del pavimento

PAVIMENTO FLEXIBLE	
Capa (cm)	Espesor
Capeta asfáltica (cm)	9
Base (cm)	20
Sub base (cm)	15

Fuente: Expediente técnico del proyecto

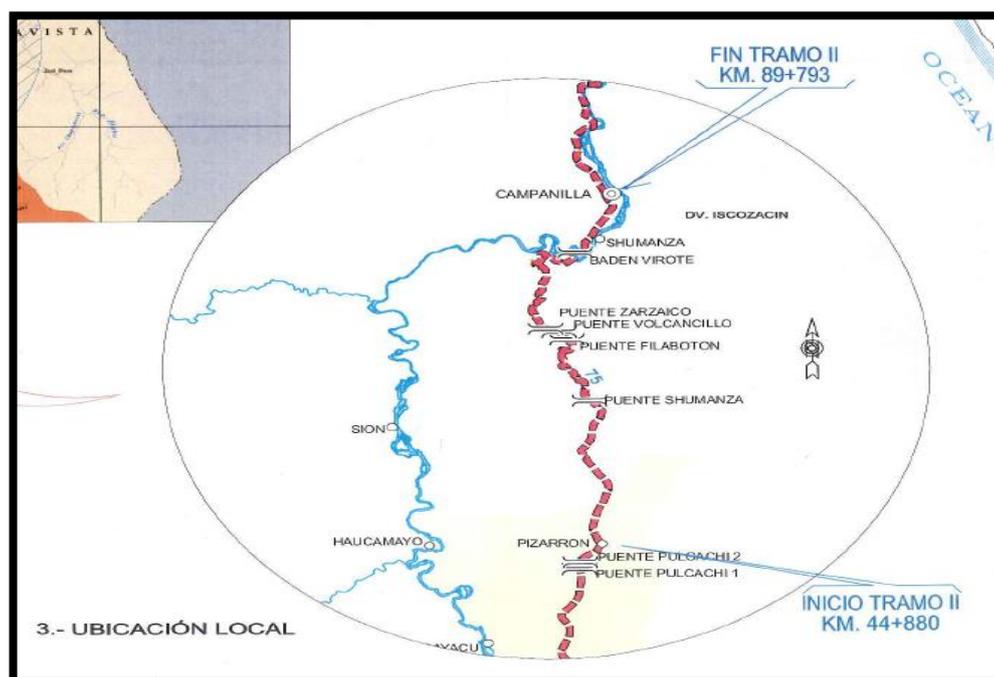
El lugar de la investigación es en la región de San Martín como se muestra en figura N° 47, provincia de Tocache. Ver figura N° 48, distrito La pólvora. Ver figura N° 49 y el Distrito de San Martín. Ver figura N° 50.

Figura 47: Ubicación Nacional:



Fuente: Expediente Técnico del Proyecto

Figura 50: Ubicación local



Fuente: Expediente Técnico del Proyecto

4.1.2. RESULTADOS DEL TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN (PRIMERA VISITA EN CAMPO)

4.1.2.1. Resultado de ensayo de cono de arena

Se muestra los valores obtenidos in situ a través de ensayo de cono de arena del kilómetro 21+000 al kilómetro 21+500 del proyecto a cada 25 metros de distancia. Como se aprecia en la Tabla N° 14, en esta tabla se presenta un resumen de resultados dando a conocer la cantidad, la Densidad Seca, Densidad Húmeda, Porcentaje de Humedad y Grado de compactación.

Tabla 14: Resultados de los ensayos con el Cono de Arena

RESULTADOS DE CONO DE ARENA				
Pto.	D. Seca (g/cm ³)	D. Húmeda (g/cm ³)	Humedad (%)	Compactación (%)
1	2.323	2.413	3.9	100.8
2	2.313	2.404	3.9	101.1
3	2.327	2.413	3.7	101.7
4	2.346	2.432	3.7	101.3

5	2.342	2.435	4.0	101.2
6	2.315	2.407	4.0	100.9
7	2.316	2.387	3.1	100.8
8	2.325	2.419	4.1	101.2
9	2.342	2.433	3.9	101.0
10	2.328	2.431	4.4	101.7
11	2.322	2.420	4.2	101.5
12	2.324	2.411	3.7	101.0
13	2.302	2.400	4.3	100.9
14	2.302	2.414	4.9	101.4
15	2.326	2.415	3.8	101.3
16	2.349	2.431	3.5	101.4
17	2.342	2.440	4.2	101.1
18	2.331	2.419	3.8	100.9
19	2.331	2.429	4.2	100.4
20	2.313	2.407	4.1	100.7

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2.2. Resultado de los ensayos con el densímetro nuclear

Durante el ensayo con el densímetro nuclear se tomaron tres medidas en cada punto. El resultado que se observa es el promedio de las tres medidas del mismo punto de ensayo del kilómetro 21+000 al kilómetro 21+500 del proyecto a cada 25 metros de distancia.

Los valores obtenidos in – situ con el densímetro nuclear son los siguientes que se aprecia en la Tabla N° 15, en esta tabla se presenta un resumen de resultados dando a conocer la cantidad, la Densidad Seca, Densidad Húmeda, Porcentaje de Humedad y Grado de compactación.

Tabla 15: Resultados de los ensayos con Densímetro Nuclear

RESULTADO DE DENSIMETRO NUCLEAR				
Pto.	D. Seca (g/cm3)	D. Húmeda (g/cm3)	Humedad (%)	Compactación (%)
1	2.312	2.393	3.5	98.8
2	2.319	2.398	3.4	99.1
3	2.335	2.403	2.9	99.8
4	2.321	2.391	3.0	99.2
5	2.321	2.388	2.9	99.2
6	2.314	2.376	2.7	98.9

7	2.312	2.386	3.2	98.8
8	2.324	2.401	3.3	99.3
9	2.317	2.400	3.6	99.0
10	2.333	2.412	3.4	99.7
11	2.328	2.398	3.0	99.5
12	2.319	2.391	3.1	99.1
13	2.314	2.386	3.1	98.9
14	2.328	2.402	3.2	99.5
15	2.324	2.410	3.7	99.3
16	2.326	2.400	3.2	99.4
17	2.314	2.381	2.9	98.9
18	2.323	2.397	3.2	99.3
19	2.326	2.398	3.1	99.4
20	2.312	2.379	2.9	98.8

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2.3. Resultados de los ensayos con el equipo LWD

En esta primera visita a obra, los datos de los ensayos fueron tomados en el mismo punto en el que se realizó el ensayo por el método “cono de arena” y “densímetro nuclear”. Los valores de módulo resiliente obtenido in- situ con el equipo LWD son los siguientes que se muestra en la tabla N° 16, donde se da a conocer la ubicación, el lado de la vía, el espesor de la capa, la estructura del pavimento, los resultados de los módulos, y el grado de compactación obtenido a través de la relación del M2 y M1 como se aprecia en la tabla N° 16

Los grados de comparación se realizan en base a lo aplicado del investigador Marradi et al y Milton Jimenez.

Tabla 16: Resultados de los ensayos con el LWD

MÓDULO (Mpa)					M1= 93 MPa	
PUNT.	UBICACIÓN	LADO	CAPA	ESPEJOR DE CAPA (cm.)	MÓDULOS (MPa) M2	(LWD) Grado de Compactación
1	21+000	D	SB	0.15	70	75%
2	21+020	E	SB	0.15	88	95%
3	21+040	I	SB	0.15	89	96%
4	21+060	D	SB	0.15	88	95%
5	21+080	E	SB	0.15	82	88%

6	21+100	I	SB	0.15	82	88%
7	21+120	D	SB	0.15	82	88%
8	21+140	I	SB	0.15	88	95%
9	21+160	D	SB	0.15	108	116%
10	21+180	I	SB	0.15	92	99%
11	21+200	D	SB	0.15	97	104%
12	21+220	I	SB	0.15	79	85%
13	21+240	D	SB	0.15	85	91%
14	21+260	I	SB	0.15	95	102%
15	21+280	D	SB	0.15	87	94%
16	21+300	I	SB	0.15	94	101%
17	21+320	D	SB	0.15	79	85%
18	21+340	I	SB	0.15	90	97%
19	21+360	I	SB	0.15	88	95%
20	21+380	D	SB	0.15	87	94%

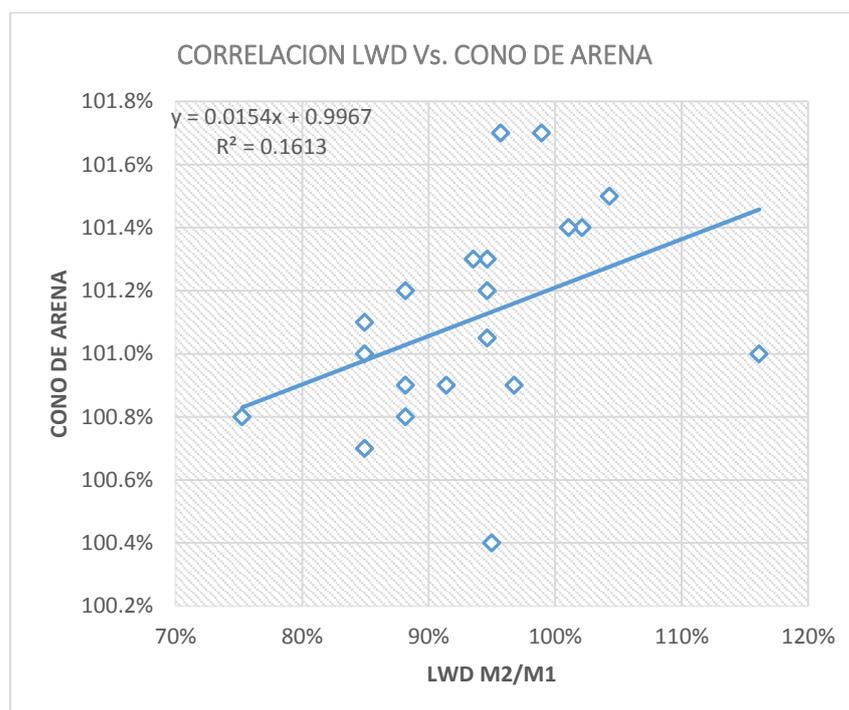
Fuente: Elaboración Propia

4.1.2.4. Correlación de grados de compactación LWD Vs Cono de Arena

La correlación entre estos dos equipos no tiene aceptación debido a que este tiene mucha variación, desde el punto de vista estadístico ya que el R2 debería de estar por encima de 0.70 para decir que una correlación es aceptable según los parámetros de bondad de ajuste estadístico.

El resultado que se muestra en la figura N° 51 el R2=0.1613 quiere decir que no tiene relación directa entre ambos equipos, es decir con estos resultados obtenidos en campo el LWD y CONO DE ARENA tiene mucha variación lo cual no puede ser usado como una correlación aceptable estadísticamente.

Figura 51: Resultados de Correlación LWD Vs. CONO DE ARENA



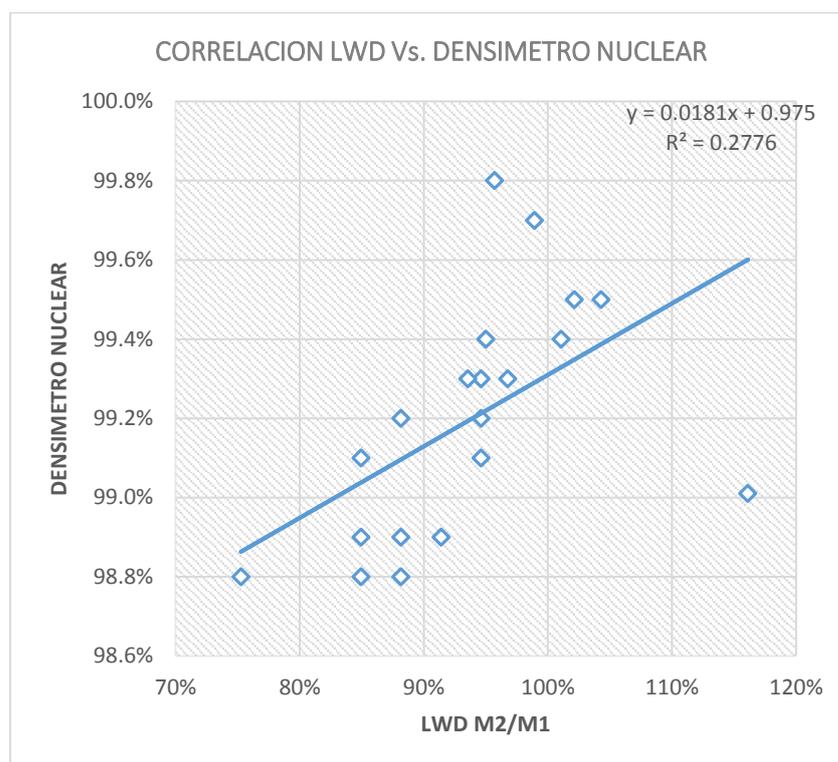
Fuente: Elaboración Propia

4.1.2.5. Correlación de grados de compactación LWD Vs. Densímetro Nuclear

La correlación entre estos dos equipos tiene mucha variación, desde el punto de vista estadístico y los parámetros de bondad de ajuste ya que el R2 debería de estar por encima de 0.70 para decir que una correlación es aceptable.

El resultado que se muestra en la figura N° 52 el $R^2=0.2776$ no tiene relación directa entre ambos equipos, es decir con estos resultados obtenidos en campo el LWD y DENSÍMETRO NUCLEAR tiene mucha variación lo cual no puede ser usado como una correlación aceptable.

Figura 52: Resultados de correlación LWD Vs. DENSIMETRO NUCLEAR

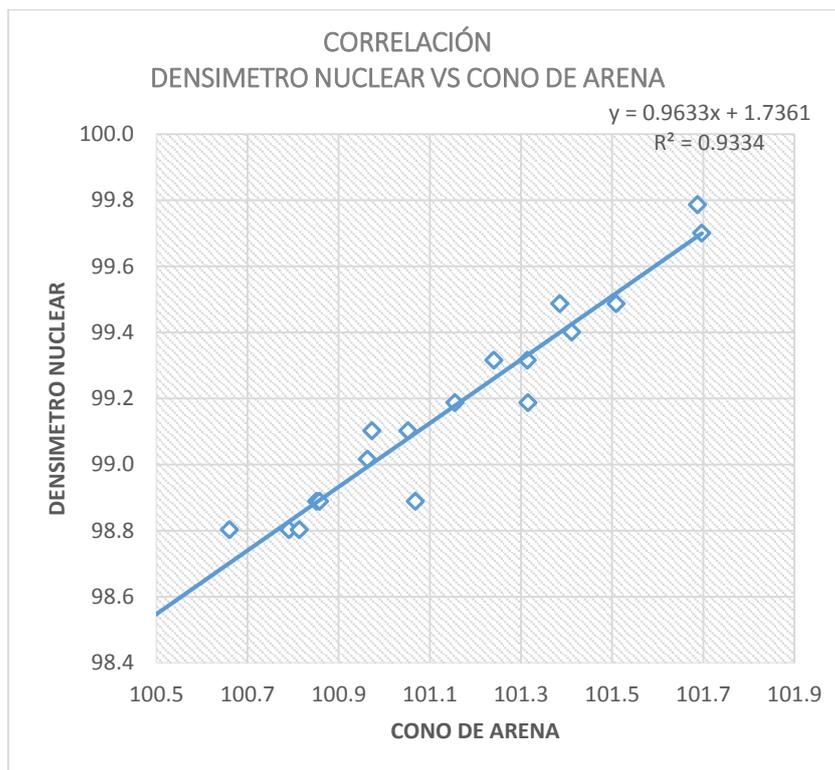


Fuente: Elaboración Propia

4.1.2.6. Correlación de grados de compactación cono de arena VS densímetro Nuclear

La correlación entre Cono de Arena y el Densímetro Nuclear tiene un resultado de $R^2 = 0.9334$. Ver figura N° 53, lo cual es aceptable, se da a conocer que la variación de resultados entre estos equipos no tiene mucha significancia por lo que se puede utilizar el densímetro nuclear para calcular el grado de compactación previa aplicación de la corrección respecto al resultado del cono de arena con la ecuación obtenida de $Y = 0.9633X + 1.7361$, quiere decir que si con el densímetro nuclear el grado de compactación se tiene como resultado 100%, aplicando la correlación encontrada $Y = 0.9633X + 1.7361$, el grado de compactación del punto de control sería 98.06%.

Figura 53: Resultados de correlación CONO DE ARENA Vs. DENSÍMETRO NUCLEAR



Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de los ensayos con “cono de arena” y “densímetro nuclear” del km 21+340 lado izquierdo y el km 21+360 lado derecho se descartan para la correlación por ser valores alejados a los resultados similares de los demás puntos del tramo de investigación.

4.1.2.7. Análisis de los resultados de los ensayos y de la correlación de los grados de compactación

En la primera visita a campo se realizaron los ensayos con el equipo del “cono de arena”, “densímetro nuclear” y el equipo LWD para obtener los grados de compactación. Cada uno de ellos se realizó 20 muestras como se presenta en la tabla N° 17.

4.1.2.7.1. Análisis de los resultados

Tabla 17: Cuadro de diferencia de grados de compactación con cada uno de los equipos

DIFERENCIA DE GRADOS DE COMPACTACIÓN						
CANT	MÉTODOS			DIFERENCIA DE % DE GRADOS DE COMPACTACIÓN		
	CONO DE ARENA	DENSÍMETRO NUCLEAR	LWD	CONO DE ARENA Y DENSÍMETRO NUCLEAR	CONO DE ARENA Y LWD	DENSÍMETRO NUCLEAR Y LWD
1	100.8	98.8	75	2	25.8	23.8
2	101.1	99.1	95	2	6.1	4.1
3	101.7	99.8	96	1.9	5.7	3.8
4	101.3	99.2	95	2.1	6.3	4.2
5	101.2	99.2	88	2	13.2	11.2
6	100.9	98.9	88	2	12.9	10.9
7	100.8	98.8	88	2	12.8	10.8
8	101.2	99.3	95	1.9	6.2	4.3
9	101	99	116	2	-15	-17
10	101.7	99.7	99	2	2.7	0.7
11	101.5	99.5	104	2	-2.5	-4.5
12	101	99.1	85	1.9	16	14.1
13	100.9	98.9	91	2	9.9	7.9
14	101.4	99.5	102	1.9	-0.6	-2.5
15	101.3	99.3	94	2	7.3	5.3
16	101.4	99.4	101	2	0.4	-1.6
17	101.1	98.9	85	2.2	16.1	13.9
18	100.9	99.3	97	1.6	3.9	2.3
19	100.4	99.4	95	1	5.4	4.4
20	100.7	98.8	94	1.9	6.7	4.8

Fuente: Elaboración Propia

En el análisis de los datos de la correlación entre los 3 equipos se observó que la toma de datos de los valores con el equipo LWD, no fueron tomados de una manera correcta, ya que los resultados de los ensayos deberían de ser tomados a una distancia máxima de 5 metros según la investigación de Marradi et al y Milton Jiménez. Por esta razón se deduce que en el análisis de los resultados tiene mucha variabilidad así como se aprecia en la tabla N°17, entre “cono de arena y densímetro nuclear”, “cono de arena y LWD”, “densímetro nuclear y LWD”, la diferencia de grados de compactación es de 1 % a 2.1%, 0.4% a 25.8% y 0.7% a 23.8% respectivamente.

4.1.2.7.2. Análisis de resultados según el estadístico parámetros de bondad de ajuste

Considerando los parámetros de bondad de ajuste (ver tabla N° 18 para aceptar una correlación en modelos lineales, el coeficiente de determinación (R²) quien es la medida de precisión del modelo debería estar entre **bueno y excelente**.

Tabla 18: Parámetros de Bondad de Ajuste

CRITERIO	Parámetro de bondad de ajuste	
	R ²	Se/Sy
Excelente	Superior a 0,90	Más bajo que 0.350
Bueno	Entre 0.70 a 0.89	Entre 0.36 y 0.55
Regular	Entre 0,40 y 0,69	Entre 0.56 y 0.75.
Pobre	Entre 0.20 a 0.39	Entre 0.76 y 0.90.
Muy pobre	Más bajo que 0.19	Entre 0,90 y 1,00.
Sin correlación	Valores imaginarios	Superior a 1,00

Fuente: Dr. Ing. Andrés Sotil Chávez, Ph.D

El R² del resultado obtenido en esta investigación están entre **pobre (0.20 a 0.39) y muy pobre (más bajo que 0.19)** ver tabla N° 19 de lo cual se concluye que la correlación encontrada no es aceptable.

Tabla 19: Resumen de resultados de la correlación de grados de compactación

RESULTADOS			
	Correlación		
Resultado	LWD vs. CONO DE ARENA	LWD vs. DENSÍMETRO NUCLEAR	CONO DE ARENA vs. DENSÍMETRO NUCLEAR
R2 (Coeficiente de determinación)	R2= 0.1613	R2= 0.2776	R2= 0.9334
Ecuación	Y= 0.0154X + 0.9967	Y= 0.0181X + 0.975	Y= 0.0181X + 0.975

Fuente: Elaboración Propia

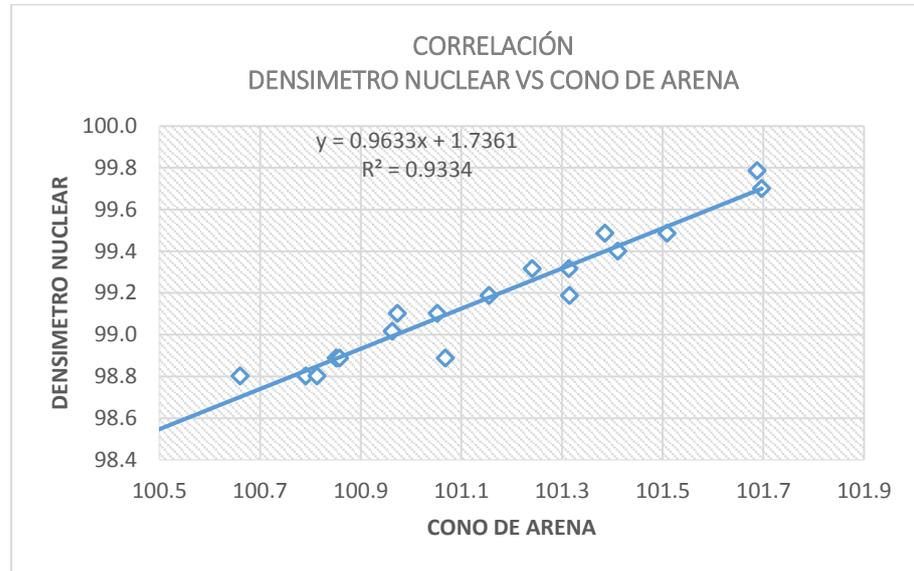
Uno de los principales motivos que se encontró de esta variación significativa, se debe a que el equipo LWD toma lecturas de módulos resilientes de altura de hasta 0.45 metros según manual del uso del LWD.

4.1.3. MUESTRA DE RESULTADOS DE LA SEGUNDA OBTENCIÓN DE RESULTADOS

4.1.3.1. Resultado de correlación de cono de arena y densímetro nuclear obtenido.

En esta segunda visita ya no se realiza la correlación entre el densímetro nuclear y cono de arena, ya que en el análisis de los primeros datos la correlación entre el cono de arena y densímetro nuclear es considerado aceptable de acuerdo a los parámetros de bondad de ajuste, ver la tabla N° 18 donde el R2 es superior a 0.90 (R2= 0.9334 ver figura N° 54) y es considerado como **excelente**, por lo tanto se puede utilizar los resultados de este equipo con mayor confiabilidad para el control de calidad del pavimento, al mismo tiempo es utilizado para encontrar la correlación entre el densímetro nuclear y LWD, con los nuevos resultados encontrados en la segunda visita al proyecto.

Figura 54: Apreciación de Ecuación de la correlación de Resultados entre en Cono de Arena y Densímetro Nuclear



Fuente: Elaboración Propia

La correlación entre el “cono de arena” y el “Densímetro Nuclear” es considerada como base fundamental para la correlación con los nuevos datos obtenidos en campo con criterios más aceptables en la medición de esta nueva toma de datos.

4.1.3.2. Resultado de los ensayos con el densímetro nuclear

En la tabla N° 20, se presenta los resultados del ensayo con en densímetro nuclear en la segunda visita a obra. Los valores obtenidos son densidad seca, densidad húmeda, porcentaje de humedad y grado de compactación in – situ.

Tabla 20: Resultados de ensayo con el Densímetro Nuclear de la segunda visita

DÉNSIMETRO NÚCLEAR					
PTO	PROGRESIVA	HUMEDAD	DENSIDAD	DENSIDAD	% DE GRADO DE COMPACTACIÓN
			HUMEDA	SECA	
1	26+510	3.1	2.383	2.311	101.6
2	26+530	2.9	2.353	2.286	102.7
3	26+550	3.1	2.418	2.346	100.1
4	26+570	3.1	2.423	2.350	99.9
5	26+590	3.4	2.416	2.336	100.5
6	26+610	3.0	2.397	2.327	100.9
7	26+630	2.9	2.416	2.348	100
8	26+650	3.2	2.392	2.318	101.3
9	26+670	3.4	2.369	2.291	102.5
10	26+690	2.9	2.428	2.360	99.5
11	26+710	3.0	2.411	2.341	100.3
12	26+730	3.3	2.406	2.329	100.8

Fuente: Elaboración Propia

4.1.3.3. Resultados de los ensayos con el equipo LWD

Para tomar los datos de Módulo Equivalente en la segunda visita a obra, considerando el criterio de la investigación de Marradi et al y Milton Jiménez, se realizó las evaluaciones respectivas a cada cinco metros con el fin de verificar una menor variación en los resultados tomando en consideración la homogeneidad del material.

Durante el ensayo con el LWD se tomaron tres medidas, al lado derecho, al eje de la vía y al lado izquierdo, esto a cada cinco metros haciendo un total de nueve medidas de los cuales se muestra en la tabla N° 21, el resumen del promedio de las 9 medidas tomadas como se detalló anteriormente.

Tabla 21: Resultado de los ensayos con el LWD de la segunda visita

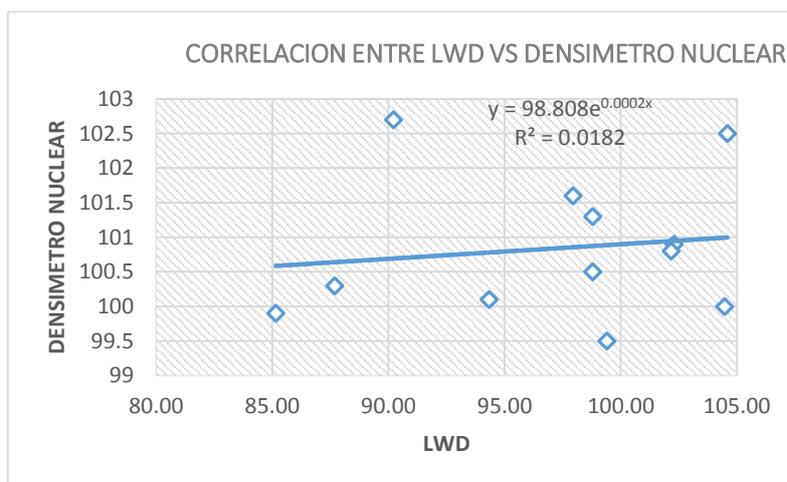
PUNT.	MÓDULO (Mpa)				M1= 92Mpa	
	UBICACIÓN	LADO	CAPA	ESPESOR	MÓDULO	(LWD) Grado de Compactación
1	26+510	D	SB	0.15	90.11	97.95
2	26+530	E	SB	0.15	83.00	90.22
3	26+550	I	SB	0.15	86.78	94.32
4	26+570	D	SB	0.15	78.33	85.14
5	26+590	E	SB	0.15	90.89	98.79
6	26+610	I	SB	0.15	94.11	102.29
7	26+630	D	SB	0.15	96.11	104.47
8	26+650	E	SB	0.15	90.89	98.79
9	26+670	I	SB	0.15	96.22	104.59
10	26+690	D	SB	0.15	91.44	99.40
11	27+710	E	SB	0.15	80.67	87.68
12	27+730	I	SB	0.15	94.00	102.17

Fuente: Elaboración Propia

4.1.3.4. Correlación de grados de compactación DENSÍMETRO NUCLEAR Vs. LWD segunda visita

La correlación entre estos dos equipos tiene mucha variación, desde el punto de vista estadístico los parámetros de bondad de ajuste ya que el R2 debería de estar por encima de 0.70 para decir que una correlación es aceptable y/o excelente según los parámetros de bondad de ajuste. El resultado de esta correlación es de R2= 0.0182. Ver figura N° 55.

Figura 55: Resultado de Correlación entre el LWD y DENSIMETRO NUCLEAR de la segunda visita.



Fuente: Elaboración Propia

4.1.3.5. Análisis de los resultados de los ensayos y de la correlación de los grados de compactación (segunda visita)

En la segunda visita a campo se realizaron los ensayos con el equipo “densímetro nuclear” y el equipo LWD para obtener los grados de compactación con cada uno de ellos se realizó 12 muestras como se presenta en la tabla N° 22

4.1.3.5.1. Análisis de resultados

En la tabla N° 22 se da conocer la variación que existe entre los resultados de los ensayos con densímetro nuclear y LWD de 0.1% y 14.76 %

Según los resultados de comparación entre los equipos con de arena, densímetro nuclear y LWD, se ha determinado que no existe una correlación directa para determinar el Grado de Compactación.

Tabla 22: Diferencia de grados de compactación entre el densímetro nuclear y LWD de la segunda visita a obra

DIFERENCIA DE GRADOS DE COMPACTACIÓN			
CANT	MÉTODOS		DIFERENCIA DE GRADOS DE COMPACTACIÓN
	DENSÍMETRO NUCLEAR	LWD	ENTRE DENSÍMETRO NUCLEAR Y LWD
1	101.6	97.95	3.65
2	102.7	90.22	12.48
3	100.1	94.32	5.78
4	99.9	85.14	14.76
5	100.5	98.79	1.71
6	100.9	102.29	-1.39
7	100	104.47	-4.47
8	101.3	98.79	2.51
9	102.5	104.59	-2.09
10	99.5	99.4	0.1
11	100.3	87.68	12.62
12	100.8	102.17	-1.37

Fuente: Elaboración Propia

4.1.3.5.2. Análisis de resultados según el estadístico parámetros de bondad de ajuste

Para la interpretación de los resultados encontrados se considera los mismos criterios del primer análisis que son los parámetros de bondad de ajuste para aceptar una correlación en modelos lineales, el coeficiente de determinación (R²) quien es la medida de precisión del modelo debería estar entre **bueno y excelente** como se aprecia en la tabla N° 23.

Tabla 23: Parámetros de Bondad de Ajuste

Parámetro de bondad de ajuste		
CRITERIO	R2	Se/Sy
Excelente	Superior a 0,90	Más bajo que 0.350
Buena	Entre 0.70 a 0.89	Entre 0.36 y 0.55
Regular	Entre 0,40 y 0,69	Entre 0.56 y 0.75.
Pobre	Entre 0.20 a 0.39	Entre 0.76 y 0.90.
Muy pobre	Más bajo que 0.19	Entre 0,90 y 1,00.
Sin correlación	Valores imaginarios	Superior a 1,00

Fuente: Dr. Ing. Andrés Sotil Chávez, Ph.D

El R2 del resultado obtenido en esta investigación según los parámetros de la bondad de ajuste es considerado como **muy pobre (más bajo que 0.19)** ver tabla N° 24 de lo cual se concluye que la correlación encontrada no es aceptable ni confiable para utilizar este equipo como una herramienta para el cálculo de grado de compactación como control de calidad.

Tabla 24: Resumen de resultados de la correlación de grados de compactación

RESULTADOS DE LA SEGUNDA VISITA	
Resultado	CORRELACIÓN
	LWD vs. DENSÍMETRO NUCLEAR
R2 (Coeficiente de determinación)	R2= 0.018
Ecuación	$Y= 98.80e^{0.0002x}$

Fuente: Elaboración Propia

4.1.4. OBTENCIÓN DE CORRELACIÓN INDIRECTA

Sin embargo, no pudiendo encontrar una correlación directa entre el densímetro nuclear y cono de arena, se realizó una calibración de los resultados encontrados mostrada en la Tabla N° 25, usando una metodología estadística, lo cual consiste en que la suma de toda la desviación estándar de los resultados sea cero de tal manera en que se pueda encontrar los grados de compactación en porcentajes con una ecuación al que llamaremos ecuación de calibración y con esos resultados buscar una correlación indirecta.

De los cuales tenemos como resultados el grado de compactación lo siguiente.

Tabla 25: Resultado de grados de compactación con LWD, tomados como una calibración.

PUNTOS	PROGRESIVA	MÓDULO	DESV. ESTÁNDAR	G.C LWD
1	26+510	90.11	15.20	101.2
2	26+530	83.00	21.85	102.1
3	26+550	86.78	9.39	99.8
4	26+570	78.33	13.73	100.1
5	26+590	90.89	13.75	101.0
6	26+610	94.11	15.06	101.5
7	26+630	96.11	7.88	100.2
8	26+650	90.89	5.60	99.3
9	26+670	96.22	10.58	100.7
10	26+690	91.44	13.50	101.0
11	27+710	80.67	15.98	100.7
12	27+730	94.00	8.50	100.1

Fuente: Elaboración Propia

4.1.4.1. Correlación entre el equipo LWD Vs. DENSIMETRO NUCLEAR

Con los resultados obtenidos de la ecuación de calibración se realiza una correlación aplicable al ensayo de control de calidad de grados de compactación, las especificaciones técnicas del proyecto mencionan que se debe realizar tramos de prueba para saber y tener referencia con cuantos ciclos la sub base granular se compacta al grado requerido por el proyecto que en este caso es el 100% para garantizar la buena compactación.

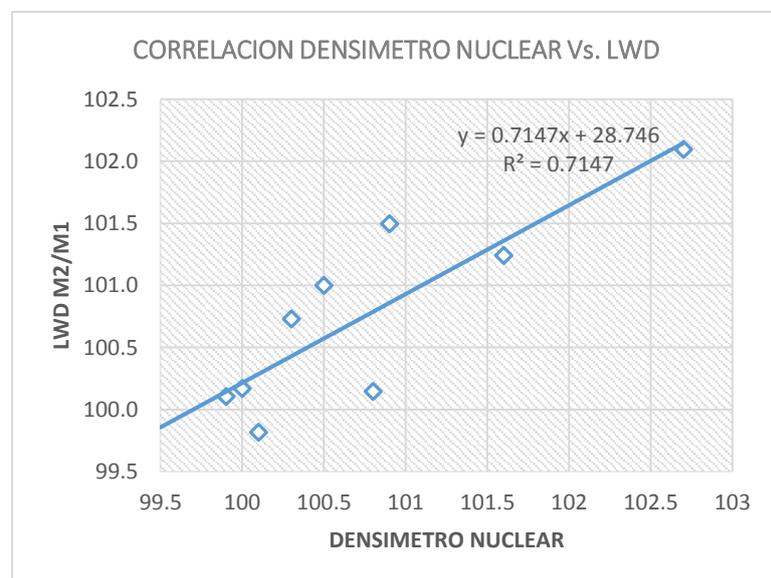
Una vez colocado en campo el material según su metrado para cumplir con el espesor que en este caso del proyecto es de 15 centímetros el rodillo realiza un promedio de 10 ciclos un tramo de aproximadamente 300 metros hasta 500 metros, luego el área de calidad del proyecto ingresa a verificar el grado de compactación de los cuales el resultado puede ser mayor o menor, en el caso del tramo de prueba del proyecto el

grado de compactación faltaba en 2% a 3% en diferentes puntos a lo que se indica al capataz encargado que aumente el número de ciclos para llegar al grado de compactación que requiere el material, una vez que el tramo de prueba es recompactada o ya se aumente el número de ciclos para obtener 100% de grado de compactación en el tramo de prueba.

A partir de este tramo de prueba realizado se mantiene esta cantidad de ciclos para garantizar la buena compactación del material que es verificado como control de calidad a cada 250m² que indica las especificaciones técnicas.

Como en estas partidas del proyecto se realiza un tramo de prueba se decide realizar una correlación de calibración como una prueba de control de calidad para ver si los resultados de ecuación de calibración pueden ser usadas y aceptadas de acuerdo a los parámetros de bondad de ajuste estas considerados como una correlación indirecta con el equipo LWD y el Densímetro para la investigación. De lo cual se tiene el siguiente resultado:

Figura 56: Resultados de correlación con el LWD vs DENSIMETRO NUCLEAR a partir de una ecuación de calibración



Fuente: Elaboración Propia

4.1.4.2. Análisis del resultado de la correlación indirecta

En esta interpretación de los resultados se considera los parámetros de bondad de ajuste, donde el resultado de la ecuación de calibración es $R^2 = 0.7147$ y una ecuación de $Y = 0.7147X + 28.746$, por lo tanto, es considerado como bueno y es aceptable la correlación indirecta por ser el R^2 superior a 0.70. Según los parámetros de bondad de ajuste

4.1.5. COMPARACIÓN DE TIEMPOS EMPLEADO PARA CADA MÉTODO

En la tabla N° 26, se presenta una comparación de tiempos en minutos para realizar los ensayos con cada uno de los métodos, al usar el equipo cono de arena el tiempo que demora es de 40 minutos aproximadamente, con el densímetro nuclear 7 minutos con toda la calibración, pero después que se haya realizado la calibración la duración para realizar un ensayo es de 3 minutos aproximadamente y para el ensayo con el equipo LWD se demora 9 minutos aproximadamente incluyendo toda el proceso de calibración, pero después de la calibración el tiempo de duración del ensayo por cada punto es de 3 minutos.

Con esta información se deduce que con el equipo densímetro nuclear y LWD el tiempo que demora para hacer el ensayo es menos, siendo estas una de las mejores alternativas para mejorar el rendimiento de la obra, el método por el cono de arena es una forma mecánica de obtener las densidades y toma mucho tiempo para desarrollar el ensayo, consecuente a eso el rendimiento no es favorable para el avance del proyecto, es una de las razones por el cual se invoca realizar más investigación referente a estos nuevos equipos tecnológicos de manera en que se pueda encontrar resultados aprobatorios, confiables y favorables para el que haga uso de ese tipo de tecnologías avanzadas.

Tabla 26: Tabla de comparación de tiempos con los tres equipos

Tiempo Empleado en Minutos (Aprox.)			
	Método		
Tiempo	Cono y Arena	Densímetro Nuclear	LWD
Tiempo de Calibración	5	5	5
Tiempo de Medición	25	3	2
Tiempo de Resultado	10	0	1
Total	40	8	9

Fuente: Elaboración Propia

CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos con el equipo LWD no pueden ser utilizados para realizar el control de compactación de obra con la misma confiabilidad con las que se utilizan los resultados del cono de arena y densímetro nuclear, ya que los resultados de los ensayos muestran un R^2 estadístico menor al 0.70 esto significa que las correlaciones encontradas entre el LWD, densímetro nuclear y cono de arena no son confiables estadísticamente.
2. La evaluación estadística muestra los siguientes resultados.
 - La variación de resultados a una distancia de 25 metros de un punto de muestra a otro punto; entre el cono de arena Vs. LWD varia de 0.4 % a 25.8%, y entre densímetro nuclear Vs LWD varia de 0.7 % a 23.8%, estos resultados no son confiables porque muestra una variación elevada, mientras que entre el cono de arena Vs densímetro nuclear la variación es de 1% a 2.1% y esta correlación si es aceptable.
 - La variación de los resultados del segundo análisis a una distancia no mayor a 5 metros de un punto de muestra a otro punto, entre el densímetro nuclear Vs. LWD es de 0.1% a 14.76%, donde se concluye que la variación de grados de compactación continua; por lo tanto, estos resultados no son aceptables.
3. La correlación de mediciones de grados de compactación del primer análisis entre los Equipos LWD, Densímetro Nuclear y Cono de Arena tiene una diferencia significativa siendo, el $R^2=0.1613$ entre LWD y Densímetro Nuclear, y $R^2=0.2776$ entre el LWD y Cono de Arena, sin embargo, la correlación entre Densímetro Nuclear y Cono de Arena no tiene una diferencia significativa teniendo como resultado un $R^2=0.9334$. La correlación de la comparación de los resultados del segundo análisis de visita a obra, también tiene una diferencia significativa de $R^2=0.0182$, lo cual se concluye que la comparación de estos resultados tiene mucha diferencia teniendo en cuenta que una correlación de mediciones es aceptable cuando el $R^2 = 0.70$, estadísticamente.
 - Sin embargo no teniendo una relación directa entre estos equipos se busca una correlación de calibración encontrando como resultado una correlación indirecta recomendable con un $R^2=0.7147$ y ecuación $Y=0.7147X+28.746$.

RECOMENDACIONES

1. En futuras investigaciones considerar qué tipo de material se está colocando inferior a la capa de la estructura del pavimento que puede ser la sub-rasante o sub base, por motivos de que el equipo LWD toma datos hasta un espesor de 45 cm y en esta investigación el espesor de Sub base granular es de 15 cm, que quiere decir que los 30 cm restantes el equipo está considerando en los resultados el material de la Sub rasante.
2. Antes de iniciar con las medidas para realizar este tipo de investigaciones los equipos para los ensayos con el cono de arena, densímetro nuclear y LWD, deben estar debidamente verificados en su buen funcionamiento y constatados por los certificados de calibración de los equipos.
3. Se recomienda alejar de la zona de ensayo a las personas no autorizadas para el uso de los equipos, siendo estas alejadas a una distancia mínima de 10 metros, y el operador del equipo debe contar con un dosímetro con la finalidad de saber a cuánto de radiación está siendo expuesto.
4. El método del densímetro nuclear y el uso del LWD dan medidas de forma no destructiva con el que se puede saber el control de calidad del grado de compactación por esta razón estos quipos deben ser los primeros en ser considerados para el control de calidad, además el tiempo efectuado para el ensayo, la simplicidad y otros factores comparados con los métodos destructivos como el método de cono de arena no es favorable para el avance de obra.
5. Se recomienda seguir la investigación considerando criterios en las profundidades y la humedad de los suelos en diferentes tipos de suelo y diferentes climas y considerando diferentes distancias de un punto a otro punto de ensayo.
6. Evitar el movimiento del plato del equipo LWD para no provocar resultados erróneos de la obtención de medidas de módulo recibiente.
7. Realizar los controles de grados de compactación en climas favorables e inmediatamente después de haber compactado la capa del suelo para evitar variabilidad de resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aleli Osorio Lird, (2008). Metodología de evaluación In situ de la capacidad de soporte de bases y subbases granulares de pavimentos flexibles con el deflectómetro de impacto liviano, Pontificia Universidad Católica de Chile
2. Milton Jimenez Lagos, (2016). Comparación en campo con deflectómetro liviano en la evaluación de rigidez in situ usado en el control de compactación. Universidad de Piura, desarrollo el artículo
3. INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA, (2010). “Validación del método para medición de densidades de materiales compactados mediante el uso del densímetro electrónico” Escuela de Ingeniería en Construcción.
4. María Soledad Gómez Lorenzeni (2006) “Correlación entre densímetro nuclear y cono de arena para suelos finos de baja plasticidad y no cohesivos”. Escuela de construcción civil pontificia Universidad Católica de Chile.
5. Juan Martín Flores Cano, (2014). “validación de la determinación de la densidad in situ, de un ramo del proyecto “Collas - Tabalela”, utilizando un densímetro y comparando los resultados con el densímetro nuclear y el cono y arena”. Pontificia Universidad Católica del Ecuador
6. Silvia Alexandra Guerrón Vecillas, (2013) “Comparación de resultados de densidad de campo por los métodos cono y arena, volumétrico y densímetro nuclear”. Universidad Central del Ecuador.
7. BR. GERARDO E. GIL O, (2011) “Comparación entre densímetro nuclear y eléctrico con el cono y arena para el control de compactación de suelos”. Universidad Rafael Urdaneta
8. Norma MTC E 117, (2016). “Ensayo para determinar la densidad de los suelos en el campo por el método de cono de arena”.
9. Norma MTC E 124, (2016). “Densidad en el sitio –método nuclear a profundidad reducida”.
10. Norma MTC E 132, (2016). “Resistencia de suelo”. CBR (California Bearing Ratio)
11. Norma MTC E 115, (2016). Proctor Modificado (Compactación de Suelos en Laboratorio Utilizando la Energía Modificada (56000 pie-lb/pie³).
12. Norma MTC E 126, (2016). Speedy Contenido de Humedad en Suelos Metodo Carburo de Calcio

13. BRAJA M. DAS, (2006). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. California State University, Sacramento.
14. JUÁREZ BADILLO. RICO RODRIGUEZ, (2006) Mecánica de suelos.
15. Rico Rodríguez, Alfonso, (2008). “La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas”.México

ANEXOS

CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL DE BASE GRANULAR DE LA CANTERA DE MISHOLLO DE LA PRIMERA VISITA A CAMPO

ANEXO 1: ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO TAMIZADO (PRIMERA VISITA)

ENSAYO DE ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO											
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS											
MTC E 107, E 204 - ASTM D 422 - AASHTO T-11, T-27 Y T-88											
OBRA	: Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tocache - Juanjui					N°					
TRAMO	: Pizana - La Pólvera - Pizarrón - Campanilla					REGISTRO	:				
MATERIAL	: Sub-base					TÉCNICO	: P.C.C				
CALICATA	:					ING° RESP.	: J.P.M				
MUESTRA	:					FECHA	: 20/05/2018				
PROFUND.	:					HECHO POR	: W.F.L				
CANTERA	: Mishollo					DEL KM	: 21+000				
UBICACIÓN	:					AL KM	: 21+500				
						LADO	: Plataforma Completa				
TAMIZ	ABERT. mm.	PESO RET.	%RET. PARC.	%RET. AC.	% Q' PASA	HUSO A	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA				
7"	177.800						PESO TOTAL	=	22,685.0	gr	
6"	152.400						PESO DE GRAVA	=	14201.0	gr	
5"	127.000						PESO DE ARENA	=	8484.0	gr	
4 1/2"	114.300						PESO FINO	=	709.8	gr	
4"	101.600						LÍMITE LÍQUIDO	=	N.P.	%	
3 1/2"	88.900						LÍMITE PLÁSTICO	=	N.P.	%	
3"	76.200										
2 1/2"	63.500										
2"	50.800				100.0	100 - 100	ÍNDICE PLÁSTICO	=	N.P.	%	
1 1/2"	38.100	1,679.0	7.4	7.4	92.6		CLASF. AASHTO	=	A-1-a	[0]	
1"	25.400	4,582.0	20.2	27.6	72.4		CLASF. SUCCS	=	GP		
3/4"	19.050	3,448.0	15.2	42.8	57.2		MAX. DENS. SECA	=	2.340	(gr/cm3)	
1/2"	12.700	1,724.0	7.6	50.4	49.6		OPT. CONT. HUM.	=	6.12	%	
3/8"	9.525	1,225.0	5.4	55.8	44.2	30 - 65					
1/4"	6.350										
# 4	4.760	1,543.0	6.8	62.6	37.4	25 - 55	% Grava	=	62.6	%	
# 8	2.360						% Arena	=	34.4	%	
# 10	2.000	163.2	8.6	71.2	28.8	15 - 40	% Fino	=	3.0	%	
# 20	0.850	108.2	5.7	76.9	23.1		% HUMEDAD		P.S.H.	P.S.S.	% Humedad
# 40	0.420	184.1	9.7	86.6	13.4	8 - 20			1683.6	1609.3	4.6%
# 50	0.300						Observaciones :				
# 80	0.180										
# 100	0.150	167.0	8.8	95.4	4.6						
# 200	0.075	30.4	1.6	97.0	3.0	2 - 8					
< # 200	FONDO	56.9	3.0	100.0	0.0						
FRACCIÓN		709.8					Coef. Uniformidad		71	Índice de Consistencia	
TOTAL		22,685.0					Coef. Curvatura		0.9	-	
Descripción suelo:	Grava pobremente gradada con arena						Pot. de Expansión		Bajo	-	

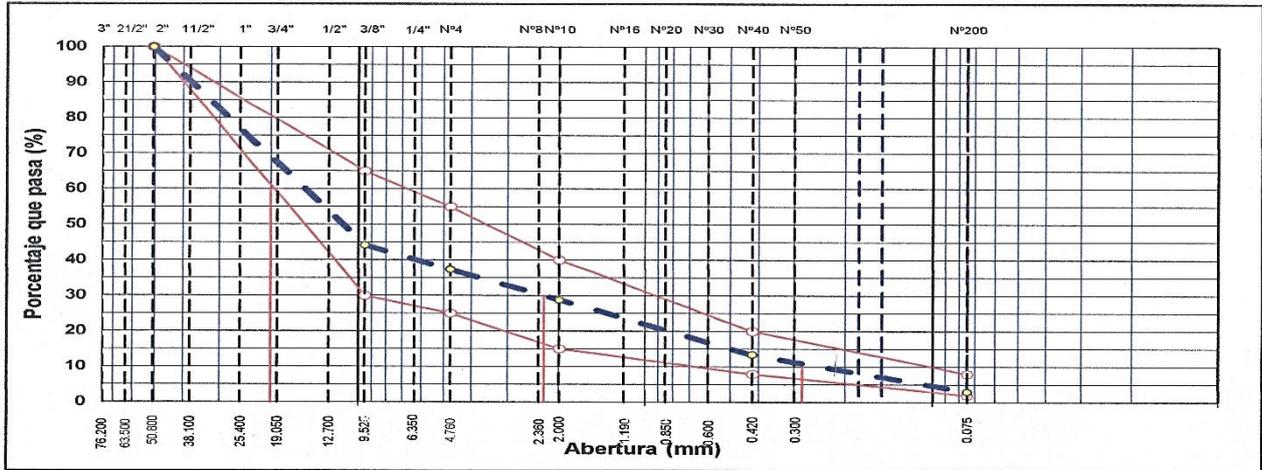
CONSORCIO INTEGRACIÓN VIAL
REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA
TOCACHE - JUANJUI TRAMO PIZANA - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



116

CURVA GRANULOMÉTRICA



CONSORCIO INTEGRACIÓN VIAL
 REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA
 TOCACHE - JOJANUI TRAMO PIZANA - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
 ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS

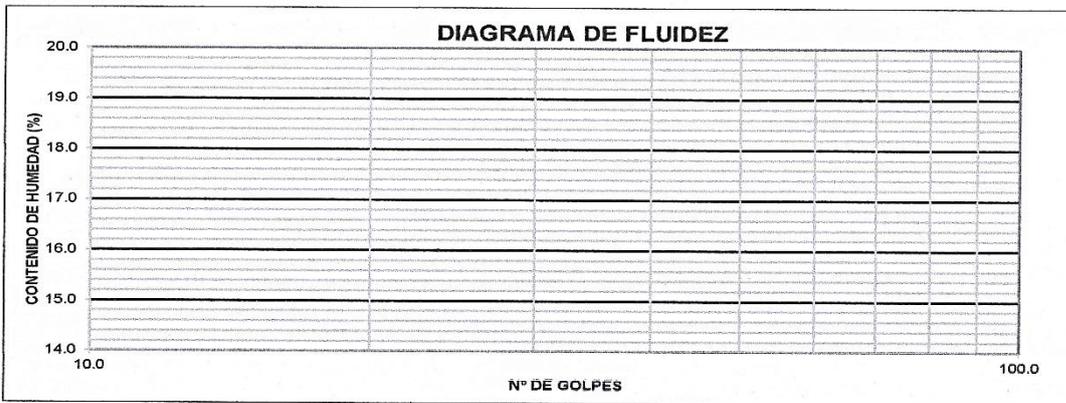


ANEXO 2: ENSAYO DE LÍMITES DE ATTERBERG (PRIMERA VISITA)

LIMITES DE ATTERBERG			
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS			
MTC E 110 Y E 111 - ASTM D 4318 - AASHTO T-89 Y T-90			
OBRA :	Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tocache - Juanjui	-	N° REGISTRO :
TRAMO :	Pizana - La Pólvara - Pizarrón - Campanilla	-	TÉCNICO : P.C.C
MATERIAL :	Sub-base	-	ING° RESP. : J.P.M
CALICATA :			FECHA : 20/05/2018
MUESTRA :			HECHO POR : W.F.L
PROFUND. :			DEL KM : 21+000
CANTERA :	Mishollo		AL KM : 21+500
UBICACIÓN :			LADO : Plataforma Completa

LÍMITE LÍQUIDO (MALLA N° 40)			
N° TARRO			
TARRO + SUELO HÚMEDO			
TARRO + SUELO SECO			
AGUA			
PESO DEL TARRO			N.P.
PESO DEL SUELO SECO			
% DE HUMEDAD			
N° DE GOLPES			

LÍMITE PLÁSTICO (MALLA N° 40)			
N° TARRO			
TARRO + SUELO HÚMEDO			
TARRO + SUELO SECO			
AGUA			N.P.
PESO DEL TARRO			
PESO DEL SUELO SECO			
% DE HUMEDAD			



CONSTANTES FÍSICAS DE LA MUESTRA		OBSERVACIONES
LÍMITE LÍQUIDO	N.P.	
LÍMITE PLÁSTICO	N.P.	
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	N.P.	

CONSORCIO INTEGRACIÓN VIAL
REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA
TOCACHE - JUANJUI TRAMO PIZANA - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamaní
ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



118

ANEXO 3: ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD (PRIMERA VISITA)

CONTENIDO DE HUMEDAD
NORMA (ASTM - D2216, MTC E 108)

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS

OBRA : Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tocache - Juanjui TRAMO : Pizana - La Pólvara - Pizarrón - Campanilla MATERIAL : Sub-base CALICATA : MUESTRA : PROFUND. : CANTERA : Mishollo UBICACIÓN : Km. 00+000 L.I	Nº REGISTRO : TÉCNICO : P.C.C INGº RESP. : J.P.M FECHA : 20/05/2018 HECHO POR : W.F.L DEL KM : 21+000 AL KM : 21+500 LADO : Plataforma Completa
---	--

DATOS

Nº de Ensayo	1		
Peso de Mat. Humedo + Tara (gr.)	1683.60		
Peso de Mat. Seco + Tara (gr.)	1609.30		
Peso de Tara (gr.)			
Peso de Agua (gr.)	74.30		
Peso Mat. Seco (gr.)	1609.30		
Humedad Natural (%)	4.62		
Promedio de Humedad (%)		4.6	

OBSERVACIONES:

CONSORCIO INTEGRACIÓN VIAL
 REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA
 TOCACHE - JUANJUI TRAMO PIZANA - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
 ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



ANEXO 4: ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO (PRIMERA VISITA)

ENSAYO PROCTOR MODIFICADO - CORREGIDO						
MTC E 115 - ASTM D 1557 - AASHTO T-180 D						
OBRA	Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tocache - Juanjui				N° REGISTRO	:
TRAMO	Pizana - La Pólvera - Pizarrón - Campanilla				TÉCNICO	:
MATERIAL	Sub-base				ING°	:
MUESTRA					RESP.	:
PROFUND.					FECHA	:
CANTERA	Mishollo				DEL KM	:
UBICACIÓN	Km. 00+000 L.I				AL KM	:
					CARRIL	:
						:
						:
COMPACTACIÓN						
MÉTODO DE COMPACTACIÓN	:					"C"
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	:					56
NUMERO DE CAPAS	:					5
NUMERO DE ENSAYO						
	1	2	3	4		
PESO (SUELO + MOLDE) (gr)	11020	11258	11415	11436		
PESO DE MOLDE (gr)	6540	6540	6540	6540		
PESO SUELO HÚMEDO (gr)	4480	4718	4875	4896		
VOLUMEN DEL MOLDE (cm ³)	2113	2113	2113	2113		
DENSIDAD HÚMEDA (gr/cm ³)	2.120	2.233	2.307	2.317		
DENSIDAD SECA (gr/cm ³)	2.056	2.123	2.152	2.118		
CONTENIDO DE HUMEDAD						
RECIPIENTE N°	s/n	s/n	s/n	s/n		
PESO (SUELO HÚMEDO + TARA) (gr)	596.80	604.20	639.80	644.60		
PESO (SUELO SECO + TARA) (gr)	578.80	574.60	596.70	589.20		
PESO DE LA TARA (gr)						
PESO DE AGUA (gr)	18.00	29.60	43.10	55.40		
PESO DE SUELO SECO (gr)	578.80	574.60	596.70	589.20		
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	3.11	5.15	7.22	9.40		
MÁXIMA DENSIDAD SECA (gr/cm ³)	2.152			ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	7.34	
CURVA DE COMPACTACIÓN						
CORRECCION POR GRAVA ASTM D-4718						
Gravedad Especifica, Dc	2.650	Peso suelo húmedo+tara	1792.6			
Porcentaje por Peso de la Fracción Gruesa, Pc	42.8	Peso suelo seco + tara	1777.9			
Porcentaje por Peso de la Fracción Fina, Pf	57.2	Peso de Tara				
Contenido de Humedad optima del Proctor. Wo	7.34	Peso de agua	14.7			
Contenido de Humedad de la Fracción Gruesa, Wc	0.83	Peso fracción grueso seco	1777.9			
Densidad seca de la Fracción Fina, γDF	2.152	Contenido de humedad	0.83			
Contenido de humedad optima corregido, Cw	4.55					
Densidad Optima Seca Corregida	2.340					

CONSORCIO INTEGRACIÓN VIAL
REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA
TOCACHE - JUANJUI TRAMO PIZANA - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



ANEXO 5: GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS (PRIMERA VISITA)

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE LOS AGREGADOS
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS

(NORMA AASHTO T-84, T-85)

OBRA : Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tocache - Juanjui TRAMO : Pizana - La Pólvora - Pizarrón - Campanilla MATERIAL : Sub-base CALICATA : MUESTRA : PROFUND. : CANTERA : Mishollo UBICACIÓN :	Nº REGISTRO : TÉCNICO : P.C.C INGº RESP. : J.P.M FECHA : 20/05/2018 HECHO POR : W.F.L DEL KM : 21+000 AL KM : 21+500 LADO : Plataforma Completa
--	--

DATOS DE LA MUESTRA

AGREGADO GRUESO				
A	Peso material saturado superficialmente seco (en aire) (gr)	6240.0	6185.0	
B	Peso material saturado superficialmente seco (en agua) (gr)	3899.0	3867.0	
C	Volumen de masa + volumen de vacíos = A-B (cm³)	2341.0	2318.0	
D	Peso material seco en estufa (105 °C)(gr)	6200.0	6146.0	
E	Volumen de masa = C- (A - D)(cm³)	2301.0	2279.0	PROMEDIO
	Pe bulk (Base seca) = D/C	2.648	2.651	2.650
	Pe bulk (Base saturada) = A/C	2.666	2.668	2.667
	Pe Aparente (Base Seca) = D/E	2.694	2.697	2.696
	% de absorción = ((A - D) / D * 100)	0.645	0.635	0.64%
OBSERVACIONES:				

CONSORCIO INTEGRACIÓN VIAL
 REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA
 TOCACHE - JUANJUI TRAMO PIZANA - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
 ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



ANEXO 6: ENSAYO DE DENSIDAD DE CAMPO CON CONO DE ARENA (PRIMERA VISITA)

ENSAYO DE DENSIDAD DE CAMPO PRIMERA VISITA											
(NORMA AASHTO T-191, T-238, T-217)											
OBRA		: Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tocache - Juanjui									
TRAMO		: Pizana - La Polvora - Pizarron - Campanilla									
MATERIAL		: Sub - Base Granular									
CANTERA		: Mishollo									
UBICACIÓN		: Km. Km. 21+000 21+500 Plataforma Completa									
DENSIDAD HUMEDA											
LADO		DERECHO	EJE	IZQUIERDO	DERECHO	EJE	IZQUIERDO	DERECHO	EJE	IZQUIERDO	
UBICACION DEL ENSAYO	Km	21+000	21+020	21+040	21+060	21+080	21+100	21+120	21+140	21+160	
CAPA		SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	
ESPESOR DE CAPA (m)		0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	
FECHA DE ENSAYO		22/05/18	22/05/18	22/05/18	22/05/18	22/05/18	22/05/18	22/05/18	22/05/18	22/05/18	
1	Peso del frasco + arena	g	9290	9170	9500	9362	9324	9160	9120	9000	9000
2	Peso del frasco + arena que queda	g	3740	3090	3905	3330	3798	3550	3309	3011	3380
3	Peso de arena empleada (1-2)	g	5550	6080	5595	6032	5526	5610	5811	5989	5620
4	Peso de arena en el cono	g	1441	1441	1441	1441	1441	1441	1441	1441	1441
5	Peso de arena en la excavación (3-4)	g	4109	4639	4154	4591	4085	4169	4370	4548	4179
6	Densidad de la arena	g/cm ³	1.438	1.438	1.438	1.438	1.438	1.438	1.438	1.438	1.438
7	Volumen del material extraído (5/6)	cm ³	2857	3226	2889	3193	2841	2899	3039	3163	2906
8	Peso del recipiente + suelo + grava	g	6920	7780	6998	7793	6945	7006	7282	7679	7098
9	Peso del recipiente	g	24	24	28	28	28	28	28	28	28
10	Peso del suelo + grava (8-9)	g	6896	7756	6970	7765	6917	6978	7254	7651	7070
11	Peso retenido en la malla 3/4"	g	2366	2406	2146	2843	2528	2257	2380	2487	2640
12	% de Material > 3/4" (Grava) (11/10*100)	gr/cm ³	34.3	31.0	30.8	36.6	36.5	32.3	32.8	32.5	37.3
13	% de Material < 3/4" (Arena) (100 - 12)	cm ³	65.7	69.0	69.2	63.4	63.5	67.7	67.2	67.5	62.7
14	Densidad Húmeda (10/7)	g	2.413	2.404	2.413	2.432	2.435	2.407	2.387	2.419	2.433
15	Densidad Seca (14/(100+21)*100)	cm ³	2.323	2.313	2.327	2.346	2.342	2.315	2.316	2.325	2.342
DENSIDAD EN SITIO - HUMEDAD AASHTO T - 217											
16	Peso recipiente + suelo húmedo	g	1585.20	1580.00	1680.00	1980.00	1572.20	1570.00	1690.00	1280.00	1600.00
17	Peso recipiente + suelo seco	g	1525.80	1520.20	1620.00	1910.00	1512.30	1510.00	1639.90	1230.00	1540.00
18	Peso de agua (16-17)	g	59.40	59.80	60.00	70.00	59.90	60.00	50.10	50.00	60.00
19	Peso de recipiente	g									
20	Peso de suelo seco (17-19)	g	1525.80	1520.20	1620.00	1910.00	1512.30	1510.00	1639.90	1230.00	1540.00
21	Contenido de humedad (18/20)*100	%	3.9	3.9	3.7	3.7	4.0	4.0	3.1	4.1	3.9
CORRECCION POR GRAVA ASTM D- 4718											
22	Máxima densidad seca	gr/cm ³	2.152	2.152	2.152	2.152	2.152	2.152	2.152	2.152	2.152
23	Óptimo contenido de humedad	%	7.34	7.34	7.34	7.34	7.34	7.34	7.34	7.34	7.34
24	Peso Especifico grava	gr/cm ³	2.667	2.667	2.667	2.667	2.667	2.667	2.667	2.667	2.667
25	Contenido humedad grava	%	0.61	0.82	0.70	0.81	0.91	0.90	0.80	0.85	0.79
26	Máx. Densidad corregida (100 / (13/22)+(12/24))	gr/cm ³	2.305	2.289	2.288	2.316	2.315	2.295	2.298	2.296	2.319
28	Grado de compactación (15/26*100)	%	100.8	101.1	101.7	101.3	101.2	100.9	100.8	101.2	101.0
29	Compactación Requerida	%	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
30	Aprobación (Cumple / No Cumple)		Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

CONSORCIO INTEGRACION VIAL
REHABILITACION Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA
TOCACHE - JUANJUI TRAMO PIZANA - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



122

ENSAYO DE DENSIDAD DE CAMPO PRIMERA VISITA
(NORMA AASHTO T-191, T-238, T-217)

OBRA	: Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tocache - Juanjui
TRAMO	: Pizana - La Polvora - Pizarron - Campanilla
MATERIAL	: Sub - Base Granular
CANTERA	: Mishollo
UBICACIÓN	: Km. 21+000 Km. 21+500 Plataforma Completa

DENSIDAD HUMEDA

LADO			DERECHO	EJE	IZQUIERDO	DERECHO	EJE	IZQUIERDO	DERECHO	EJE	IZQUIERDO
UBICACIÓN DEL ENSAYO		Km	21+180	21+200	21+220	21+240	21+260	21+280	21+300	21+320	21+340
CAPA			SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB
ESPESOR DE CAPA (m)			0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
FECHA DE ENSAYO			22/05/18	22/05/18	22/05/18	23/05/18	23/05/18	23/05/18	23/05/18	23/05/18	23/05/18
1	Peso del frasco + arena	g	9233	9038	9200	9158	9070	9102	9065	9068	9243
2	Peso del frasco + arena que queda	g	3383	3262	3599	3541	3730	2998	3020	3242	3349
3	Peso de arena empleada (1-2)	g	5850	5776	5601	5617	5340	6104	6045	5826	5894
4	Peso de arena en el cono	g	1441	1441	1441	1441	1441	1441	1441	1441	1441
5	Peso de arena en la excavación (3-4)	g	4409	4335	4160	4176	3899	4663	4604	4385	4453
6	Densidad de la arena	g/cm ³	1.438	1.438	1.438	1.438	1.438	1.438	1.438	1.438	1.438
7	Volumen del material extraído (5/6)	cm ³	3066	3015	2893	2904	2711	3243	3202	3049	3097
8	Peso del recipiente + suelo + grava	g	7483	7323	7003	6997	6574	7859	7811	7468	7520
9	Peso del recipiente	g	28	28	28	28	28	28	28	28	28
10	Peso del suelo + grava (8-9)	g	7455	7295	6975	6969	6546	7831	7783	7440	7492
11	Peso retenido en la malla 3/4"	g	2316	2244	2354	2058	1766	2538	2856	2740	2641
12	% de Material > 3/4" (Grava) (11/10*100)	gr/cm ³	31.1	30.8	33.7	29.5	27.0	32.4	36.7	36.8	35.3
13	% de Material < 3/4" (Arena) (100 - 12)	cm ³	68.9	69.2	66.3	70.5	73.0	67.6	63.3	63.2	64.7
14	Densidad Húmeda (10/7)	g	2.431	2.420	2.411	2.400	2.414	2.415	2.431	2.440	2.419
15	Densidad Seca (14/(100+21)*100)	cm ³	2.328	2.322	2.324	2.302	2.302	2.326	2.349	2.342	2.331

DENSIDAD EN SITIO - HUMEDAD AASHTO T - 217

16	Peso recipiente + suelo húmedo	g	1860.00	1589.00	1447.00	2056.00	1888.00	1436.00	1717.00	1436.00	1717.00
17	Peso recipiente + suelo seco	g	1781.00	1525.00	1395.00	1972.00	1800.00	1383.00	1659.00	1383.00	1659.00
18	Peso de agua (16-17)	g	79.00	64.00	52.00	84.00	88.00	53.00	58.00	53.00	58.00
19	Peso de recipiente	g									
20	Peso de suelo seco (17-19)	g	1781.00	1525.00	1395.00	1972.00	1800.00	1383.00	1659.00	1383.00	1659.00
21	Contenido de humedad (18/20)*100	%	4.4	4.2	3.7	4.3	4.9	3.8	3.5	4.2	3.8

CORRECCION POR GRAVA ASTM D- 4718

22	Máxima densidad seca	gr/cm ³	2.152	2.152	2.152	2.152	2.152	2.152	2.152	2.152	2.152
23	Optimo contenido de humedad	%	7.34	7.34	7.34	7.34	7.34	7.34	7.34	7.34	7.34
24	Peso Especifico grava	gr/cm ³	2.667	2.667	2.667	2.667	2.667	2.667	2.667	2.667	2.667
25	Contenido humedad grava	%	0.82	0.90	0.70	0.80	0.84	0.70	0.82	0.70	0.82
26	Máx. Densidad corregida (100 / (13/22)+(12/24))	gr/cm ³	2.289	2.288	2.302	2.282	2.270	2.296	2.316	2.317	2.309
28	Grado de compactación (15/26*100)	%	101.7	101.5	101.0	100.9	101.4	101.3	101.4	101.1	100.9
29	Compactación Requerida	%	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
30	Aprobación (Cumple / No Cumple)		Cumple								

CONSORCIO INTEGRACIÓN VIAL
REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA
TOCACHE - JUANJUI TRAMO PIZANA - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



123

ENSAYO DE DENSIDAD DE CAMPO PRIMERA VISITA
(NORMA AASHTO T-191, T-238, T-217)

OBRA : Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tocache - Juanjui
 TRAMO : Pizana - La Polvora - Pizarron - Campanilla
 MATERIAL : Sub - Base Granular
 CANTERA : Mishollo
 UBICACIÓN : Km. 21+000 Km. 21+500 Plataforma Completa

DENSIDAD HUMEDA

LADO		DERECHO	EJE						
UBICACIÓN DEL ENSAYO	Km	21+360	21+380						
CAPA		SB	SB						
ESPESOR DE CAPA (m)		0.15	0.15						
FECHA DE ENSAYO		23/05/18	23/05/18						
1	Peso del frasco + arena	g	9090	9000					
2	Peso del frasco + arena que queda	g	3728	3005					
3	Peso de arena empleada (1-2)	g	5362	5995					
4	Peso de arena en el cono	g	1441	1441					
5	Peso de arena en la excavación (3-4)	g	3921	4554					
6	Densidad de la arena	g/cm ³	1.438	1.438					
7	Volumen del material extraído (5/6)	cm ³	2727	3167					
8	Peso del recipiente + suelo + grava	g	6650	7652					
9	Peso del recipiente	g	28	28					
10	Peso del suelo + grava (8-9)	g	6622	7624					
11	Peso retenido en la malla 3/4"	g	2489	2499					
12	% de Material > 3/4" (Grava) (11/10*100)	gr/cm ³	37.6	32.8					
13	% de Material < 3/4" (Arena) (100 - 12)	cm ³	62.4	67.2					
14	Densidad Húmeda (10/7)	g	2.429	2.407					
15	Densidad Seca (14/(100+21)*100)	cm ³	2.331	2.313					

DENSIDAD EN SITIO - HUMEDAD AASHTO T - 217

16	Peso recipiente + suelo húmedo	g	1995.00	1757.00					
17	Peso recipiente + suelo seco	g	1917.00	1691.00					
18	Peso de agua (16-17)	g	78.00	66.00					
19	Peso de recipiente	g							
20	Peso de suelo seco (17-19)	g	1917.00	1691.00					
21	Contenido de humedad (18/20)*100	%	4.2	4.1					

CORRECCION POR GRAVA ASTM D- 4718

22	Máxima densidad seca	gr/cm ³	2.152	2.152					
23	Optimo contenido de humedad	%	7.34	7.34					
24	Peso Especifico grava	gr/cm ³	2.667	2.667					
25	Contenido humedad grava	%	0.70	0.84					
26	Máx. Densidad corregida (100 / (13/22)+(12/24))	gr/cm ³	2.320	2.297					
27	Opt. Humedad corregida (12*25/100)+(13*23/100)	%	4.84	5.21					
28	Grado de compactación (15/26*100)	%	100.4	100.7					
29	Compactación Requerida	%	100.0	100.0					
30	Aprobación (Cumple / No Cumple)		Cumple	Cumple					

CONSORCIO INTEGRACIÓN VIAL
 REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA
 TOCACHE - JUANJUI TRAMO PIZANA - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
 ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS

3



ANEXO 7: DENSIDAD DE CAMPO MÉTODO NUCLEAR (PRIMERA VISITA)

DENSIDAD DE CAMPO (METODO DEL DENSIMETRO NUCLEAR) PRIMERA VISITA										
OBRA :Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tocache - Juanjui TRAMO :Pizana - La Polvora - Pizarron - Campanilla MATERIAL :Sub - Base Granular PROGRESIVA :KM 21+000 - KM 21+500 Plataforma completa CANTERA :Mishollo							N° REGISTRO : TÉCNICO : ING° RESP. : FECHA 21/05/18 - 22/05/18			
PUNTOS	UBICACIÓN	CARRIL	ESPESOR	CANTERA	HUMEDAD		DENSIDAD			DI % COMPAC.
					OPTIMO	CAMPO	DEN. HUM.	DEN. SECA	MAX. LAB.	
1	21+000	D	0.15	MISHOLLO	4.55	3.5	2.393	2.312	2.340	98.8
2	21+020	E	0.15	MISHOLLO	4.55	3.4	2.398	2.319	2.340	99.1
3	21+040	I	0.15	MISHOLLO	4.55	2.9	2.403	2.335	2.340	99.8
4	21+060	D	0.15	MISHOLLO	4.55	3.0	2.391	2.321	2.340	99.2
5	21+080	E	0.15	MISHOLLO	4.55	2.9	2.388	2.321	2.340	99.2
6	21+100	I	0.15	MISHOLLO	4.55	2.7	2.376	2.314	2.340	98.9
7	21+120	D	0.15	MISHOLLO	4.55	3.2	2.386	2.312	2.340	98.8
8	21+140	E	0.15	MISHOLLO	4.55	3.3	2.401	2.324	2.340	99.3
9	21+160	I	0.15	MISHOLLO	4.55	3.6	2.400	2.317	2.340	99.0
10	21+180	D	0.15	MISHOLLO	4.55	3.4	2.412	2.333	2.340	99.7
11	21+200	E	0.15	MISHOLLO	4.55	3.0	2.398	2.328	2.340	99.5
12	21+220	I	0.15	MISHOLLO	4.55	3.1	2.391	2.319	2.340	99.1
13	21+240	D	0.15	MISHOLLO	4.55	3.1	2.386	2.314	2.340	98.9
14	21+260	E	0.15	MISHOLLO	4.55	3.2	2.402	2.328	2.340	99.5
15	21+280	I	0.15	MISHOLLO	4.55	3.7	2.410	2.324	2.340	99.3
16	21+300	D	0.15	MISHOLLO	4.55	3.2	2.400	2.326	2.340	99.4
17	21+320	E	0.15	MISHOLLO	4.55	2.9	2.381	2.314	2.340	98.9
18	21+340	I	0.15	MISHOLLO	4.55	3.2	2.397	2.323	2.340	99.3
19	21+360	D	0.15	MISHOLLO	4.55	3.1	2.398	2.326	2.340	99.4
20	21+380	E	0.15	MISHOLLO	4.55	2.9	2.379	2.312	2.340	98.8
OBSERVACIONES:										

CONSORCIO INTEGRACIÓN VIAL
 REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA
 TOCACHE - JUANJUI TRAMO PIZANA - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
 ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



ANEXO 8: GRADOS DE COMPACTACIÓN CON EL EQUIPO (LWD) (PRIMERA VISITA)

GRADOS DE COMPACTACION CON EL EQUIPO LWD DE LA PRIMERA VISITA A OBRA

MODULO DE MARRADI ET AL (Mpa)					M1= 93 MPa	
PUNT.	UBICACIÓN	LADO	CAPA	ESPESOR DE CAPA (cm.)	MODULOS (MPa)	(LWD) Grado de Compactación
1	21+000	D	SB	0.15	70	75%
2	21+020	E	SB	0.15	88	95%
3	21+040	I	SB	0.15	89	96%
4	21+060	D	SB	0.15	88	95%
5	21+080	E	SB	0.15	82	88%
6	21+100	I	SB	0.15	82	88%
7	21+120	D	SB	0.15	82	88%
8	21+140	I	SB	0.15	88	95%
9	21+160	D	SB	0.15	108	116%
10	21+180	I	SB	0.15	92	99%
11	21+200	D	SB	0.15	97	104%
12	21+220	I	SB	0.15	79	85%
13	21+240	D	SB	0.15	85	91%
14	21+260	I	SB	0.15	95	102%
15	21+280	D	SB	0.15	87	94%
16	21+300	I	SB	0.15	94	101%
17	21+320	D	SB	0.15	79	85%
18	21+340	I	SB	0.15	90	97%
19	21+360	I	SB	0.15	88	95%
20	21+380	D	SB	0.15	87	94%

CONSORCIO INTEGRACIÓN VIAL
REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LAS CARRETERAS
TOCACHI - JUANJUI TRAJICO PIZANA - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacio Mamani
ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL DE BASE GRANULAR DE LA CANTERA DE MISHOLLO DE LA SEGUNDA VISITA A CAMPO

ANEXO 9: ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO (SEGUNDA VISITA)

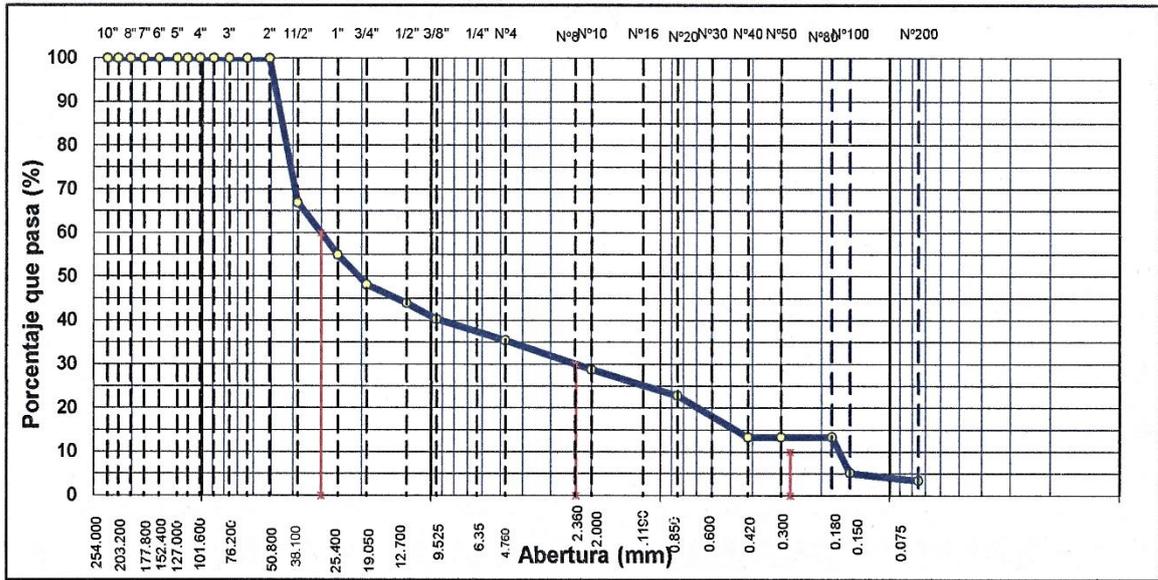
ENSAYO DE ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO										
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS/CONCRETO Y PAVIMENTOS										
MTC E 107, E 204 - ASTM D 422 - AASHTO T-11, T-27 Y T-88										
OBRA	Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tocache - Juanjui	N°								
TRAMO	Pizana - La Pólvara - Pizarrón - Campanilla	REGISTRO	:							
MATERIAL	Sub Base	TÉCNICO	: C.A.A							
CALICATA		ING° RESP.	: L.E.S							
MUESTRA		FECHA	:							
PROFUND.		HECHO POR	: S.O.R							
CANTERA	Mishollo	DEL KM	: 26+500							
UBICACIÓN		AL KM	: 27+000							
		LADO	: Plataforma Completa							
TAMIZ	ABERT. mm.	PESO RET.	%RET. PARC.	%RET. AC.	% Q' PASA	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA				
10"	254.000									
9"	228.600									
8"	203.200									
7"	177.800									
6"	152.400									
5"	127.000					PESO TOTAL	=	25,501.0	gr	
4 1/2"	114.300					PESO DE GRAVA	=	16459.0	gr	
4"	101.600					PESO DE ARENA	=	9042.0	gr	
3 1/2"	88.900					PESO FINO	=	645.0	gr	
3"	76.200					LÍMITE LÍQUIDO	=	N.P.	%	
2 1/2"	63.500					LÍMITE PLÁSTICO	=	N.P.	%	
2"	50.800				100.0	ÍNDICE PLÁSTICO	=	N.P.	%	
1 1/2"	38.100	8,410.0	33.0	33.0	67.0	CLASF. AASHTO	=	A-1-a	{ 0	
1"	25.400	3,069.0	12.0	45.0	55.0	CLASF. SUCCS	=	GP		
3/4"	19.050	1,741.0	6.8	51.8	48.2	MAX. DENS. SECA	=	2.348	(gr/cm3)	
1/2"	12.700	1,058.0	4.1	56.0	44.0	OPT. CONT. HUM.	=	6.12	%	
3/8"	9.525	942.0	3.7	59.7	40.3					
1/4"	6.350									
# 4	4.760	1,239.0	4.9	64.5	35.5					
# 8	2.360					% Grava	=	64.5	%	
# 10	2.000	121.0	6.7	71.2	28.8	% Arena	=	32.0	%	
# 20	0.850	107.2	5.9	77.1	22.9	% Fino	=	3.5	%	
# 40	0.420	173.1	9.5	86.6	13.4	% HUMEDAD		P.S.H.	P.S.S	% Humedad
# 50	0.300		0.0	86.6	13.4			448.0	429.0	4.4%
# 80	0.180		0.0	86.6	13.4	Observaciones	:			
# 100	0.150	149.2	8.2	94.8	5.2					
# 200	0.075	31.1	1.7	96.5	3.5					
< # 200	FONDO	63.4	3.5	100.0	0.0					
FRACCIÓN		645.0				Coef. Uniformidad		110	Índice de Consistencia	
TOTAL		25,501.0				Coef. Curvatura		0.7	-	
Descripción suelo:	Grava pobremente gradada con arena					Pot. de Expansión		Bajo	-	

CONSORCIO INTEGRACION VIAL
REHABILITACION Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA
TOCACHE - JUANJUI TRAMO PIZANA - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



CURVA GRANULOMÉTRICA



CONSORCIO INTEGRACIÓN VIAL
REPARACIÓN Y MEJORA DE CARRETERAS
YOCACHE - JUANJUI TRAWO PIZAPA - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



ANEXO 10: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG (SEGUNDA VISITA)

LIMITES DE ATTERBERG			
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS			
MTC E 110 Y E 111 - ASTM D 4318 - AASHTO T-89 Y T-90			
OBRA	Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tocache - Juanjui	N° REGISTRO	:
TRAMO	Pizana - La Pólvara - Pizarrón - Campanilla	TÉCNICO	: C.A.A
MATERIAL	Sub Base	ING° RESP.	: L.E.S
CALICATA	:	FECHA	:
MUESTRA	:	HECHO POR	: S.O.R
PROFUND.	:	DEL KM	: 26+500
CANTERA	: Mishollo	AL KM	: 27+000
UBICACIÓN	:	LADO	: Plataforma Completa
LÍMITE LÍQUIDO (MALLA N° 40)			
N° TARRO			
TARRO + SUELO HÚMEDO			
TARRO + SUELO SECO			
AGUA	N.P.		
PESO DEL TARRO			
PESO DEL SUELO SECO			
% DE HUMEDAD			
N° DE GOLPES			
LÍMITE PLÁSTICO (MALLA N° 40)			
N° TARRO			
TARRO + SUELO HÚMEDO			
TARRO + SUELO SECO			
AGUA	N.P.		
PESO DEL TARRO			
PESO DEL SUELO SECO			
% DE HUMEDAD			
DIAGRAMA DE FLUIDEZ			
20.0 19.0 18.0 17.0 16.0 15.0 14.0			100.0
CONSTANTES FÍSICAS DE LA MUESTRA		OBSERVACIONES	
LÍMITE LÍQUIDO	N.P.		
LÍMITE PLÁSTICO	N.P.		
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	N.P.		

CONSORCIO INTEGRACIÓN VIAL
REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA
TOCACHE - JUANJUI TRONCALBA - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



ANEXO 11: ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD (SEGUNDA VISITA)

CONTENIDO DE HUMEDAD			
NORMA (ASTM - D2216, MTC E 108)			
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS			
OBRA	: Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tocache - Juanjui	Nº REGISTRO	:
TRAMO	: Pizana - La Pólvara - Pizarrón - Campanilla	TÉCNICO	: C.A.A
MATERIAL	: Sub base	INGº RESP.	: L.E.S
CALICATA	:	FECHA	:
MUESTRA	:	HECHO POR	: S.O.R
PROFUND.	:	DEL KM	: 26+500
CANTERA	: Mishollo	AL KM	: 27+000
UBICACIÓN	:	LADO	: Plataforma Completa
DATOS			
Nº de Ensayo	1		
Peso de Mat. Humedo + Tara (gr.)	448.00		
Peso de Mat. Seco + Tara (gr.)	429.00		
Peso de Tara (gr.)			
Peso de Agua (gr.)	19.00		
Peso Mat. Seco (gr.)	429.00		
Humedad Natural (%)	4.43		
Promedio de Humedad (%)	4.4		
OBSERVACIONES: _____			

CONSORCIO SUPERVISOR VIAL
 REPARACIÓN Y MEJORAMIENTO DE CARRETERAS
 YOCACHE - JUANJUI - PIZANA - CAMANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
 ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



ANEXO 12: ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO (SEGUNDA VISITA)

ENSAYO PROCTOR MODIFICADO - CORREGIDO					
MTC E 115 - ASTM D 1557 - AASHTO T-180 D					
OBRA	: Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera	N° REGISTRO	:		
TRAMO	: Tocache - Juanjui	TÉCNICO	:	C.A.A	
MATERIAL	: Sub Base	ING°	:	L.E.S	
MUESTRA	:	RESP.	:		
CALICATA	:	FECHA	:		
PROFUND.	:	HECHO POR	:	S.O.R	
CANTERA	: Mishollo	DEL KM	:	26+500	
UBICACIÓN	:	AL KM	:	27+000	
		CARRIL	:	Plataforma	
				Completa	
COMPACTACIÓN					
MÉTODO DE COMPACTACIÓN	:	"C"			
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	:	56			
NUMERO DE CAPAS	:	5			
NUMERO DE ENSAYO		1	2	3	4
PESO (SUELO + MOLDE) (gr)		10765	11042	11258	11325
PESO DE MOLDE (gr)		6511	6511	6511	6511
PESO SUELO HÚMEDO (gr)		4254	4531	4747	4814
VOLUMEN DEL MOLDE (cm ³)		2126	2126	2126	2126
DENSIDAD HÚMEDA (gr/cm ³)		2.001	2.131	2.233	2.264
DENSIDAD SECA (gr/cm ³)		1.934	2.023	2.080	2.068
CONTENIDO DE HUMEDAD					
RECIPIENTE N°		s/n	s/n	s/n	s/n
PESO (SUELO HÚMEDO + TARA) (gr)		336.10	331.90	386.40	449.40
PESO (SUELO SECO + TARA) (gr)		324.90	315.00	360.00	410.40
PESO DE LA TARA (gr)					
PESO DE AGUA (gr)		11.20	16.90	26.40	39.00
PESO DE SUELO SECO (gr)		324.90	315.00	360.00	410.40
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		3.45	5.37	7.33	9.50
MÁXIMA DENSIDAD SECA (gr/cm³)	2.087	ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		8.16	
CURVA DE COMPACTACIÓN					
CORRECCION POR GRAVA ASTM D-4718					
Gravedad Especifica, Dc	2.657	Peso suelo húmedo+tara	534.9		
Porcentaje por Peso de la Fracción Gruesa, Pc	51.8	Peso suelo seco + tara	531.3		
Porcentaje por Peso de la Fracción Fina, Pf	48.2	Peso de Tara			
Contenido de Humedad optima del Proctor, Wo	8.16	Peso de agua	3.6		
Contenido de Humedad de la Fracción Gruesa, Wc	0.68	Peso fracción grueso seco	531.3		
Densidad seca de la Fracción Fina, γDF	2.087	Contenido de humedad	0.68		
Contenido de humedad optima corregido, Cw	4.28				
Densidad Optima Seca Corregida	2.348				

CONSORCIO SUPERVISOR VIAL
REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA
TÓCACHÉ - JUANJUI TRONCALBA - PIZARRÓN - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



ANEXO 13: GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS (SEGUNDA VISITA)

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE LOS AGREGADOS					
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS					
(NORMA AASHTO T-84, T-85)					
OBRA	: Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tocache - Juanjui	N° REGISTRO	:		
TRAMO	: Pizana - La Pólvara - Pizarrón - Campanilla	TÉCNICO	: C.A.A		
MATERIAL	: Sub Base	ING° RESP.	: L.E.S		
CALICATA	:	FECHA	:		
MUESTRA	:	HECHO POR	: S.O.R		
PROFUND.	:	DEL KM	: 26+500		
CANTERA	: Mishollo	AL KM	: 27+000		
UBICACIÓN	:	LADO	: Plataforma Completa		
DATOS DE LA MUESTRA					
AGREGADO GRUESO					
A	Peso material saturado superficialmente seco (en aire) (gr)	5824.0	5675.0		
B	Peso material saturado superficialmente seco (en agua) (gr)	3644.0	3549.0		
C	Volumen de masa + volumen de vacíos = A-B (cm ³)	2180.0	2126.0		
D	Peso material seco en estufa (105 °C)(gr)	5795.0	5646.0		
E	Volumen de masa = C- (A - D) (cm ³)	2151.0	2097.0		PROMEDIO
	Pe bulk (Base seca) = D/C	2.658	2.656		2.657
	Pe bulk (Base saturada) = A/C	2.672	2.669		2.670
	Pe Aparente (Base Seca) = D/E	2.694	2.692		2.693
	% de absorción = ((A - D) / D * 100)	0.500	0.514		0.51%
OBSERVACIONES:					

CONSORCIO DE INTERCOMUNICACION VIAL
REHABILITACION Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA
TOCACHE - JUANJUI TRAMO PIZANA - PIZARRON - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



ANEXO 14: ENSAYO DE ABRASIÓN (SEGUNDA VISITA)

ENSAYO DE ABRASIÓN (MÁQUINA DE LOS ÁNGELES) SB-BG				
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS				
MTC E 207 - ASTM C 535 - AASHTO T-96				
OBRA :	Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tocache - Juanjui			N° REGISTRO :
TRAMO :	Pizana - La Polvora - Pizarrón - Campanilla			TÉCNICO : P.C.C
MATERIAL :	Sub-Base Granular			ING° RESP. : J.P.M
CALICATA :				FECHA :
MUESTRA :				HECHO POR : L.F.L
PROFUND. :				DEL KM :
CANTERA :	Mishollo			AL KM :
UBICACIÓN :				LADO :
Tamiz Pasa - Retiene	Gradaciones			
	A	B	C	D
1 1/2" - 1"	1250.0			
1" - 3/4"	1250.0			
3/4" - 1/2"	1250.0			
1/2" - 3/8"	1252.0			
3/8" - 1/4"				
1/4" - N° 4				
N° 4 - N° 8				
Peso Total	5002.0			
(%) Retenido en la malla N° 12	4208.0			
(%) Que pasa en la malla N° 12	794.0			
N° de esferas	12			
Peso de las esferas (gr)	5000 ± 25			
% Desgaste	15.9%			
OBSERVACIONES :				

CONSORCIO INTEGRACIÓN VIAL
REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA
TOCACHE - JUANJUI TRAMO PIZANA - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



ANEXO 15: ENSAYO DE CBR (SEGUNDA VISITA)

ENSAYO DE CBR SB-GB	
OBRA : Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tocache - Juanjui	Nº REGISTRO :
TRAMO : Pizana - La Polvora - Pizarrón - Campanilla	TÉCNICO : P.C.C
MATERIAL : Sub-Base Granular	INGº RESP. : J.P.M
CALICATA :	FECHA :
MUESTRA :	HECHO POR : L.F.L
PROFUND. :	DEL KM :
CANTERA : Mishollo	AL KM :
UBICACIÓN :	LADO :

DATOS DEL PROCTOR

MAXIMA DENSIDAD : 2.087 g/cm ³
SECA OPTIMO
CONTENIDO DE HUMEDAD : 8.16 %

CAPACIDAD : 6000 Lbs.
ANILLO : 1

MTC E 132 - ASTM D 1883 - AASHTO T-193

Molde Nº	22		20		19	
Nº Capa	5		5		5	
Golpes por capa Nº	56		25		12	
Cond. de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO
Peso molde + suelo húmedo (gr)	12395		12092		12101	
Peso de molde (gr)	7596		7518		7741	
Peso del suelo húmedo (gr)	4799		4574		4360	
Volumen del molde (cm ³)	2122		2115		2110	
Densidad húmeda (gr/cm ³)	2.262		2.163		2.066	
Humedad (%)	8.07		8.05		8.09	
Densidad seca (gr/cm³)	2.093		2.002		1.911	
Tarro Nº	S/N		S/N		S/N	
Tarro + Suelo húmedo (gr)	822.40		736.70		745.80	
Tarro + Suelo seco (gr)	761.00		681.80		690.00	
Peso del Agua (gr)	61.40		54.90		55.80	
Peso del tarro (gr)						
Peso del suelo seco (gr)	761.00		681.80		690.00	
Humedad (%)	8.07		8.05		8.09	
Promedio de Humedad (%)	8.07		8.05		8.09	

CONSORCIO INTEGRACIÓN VIAL
REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA
TOCACHÉ - JUANJUI TRAMO PIZANA - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



EXPANSION											
FECHA	HORA	TIEMPO Hr.	DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION	
				mm	%		mm	%		mm	%
NO EXPANSIVO											

PENETRACION													
PENETRACION pulg	CARGA STAND. kg/cm2	MOLDE N° 22				MOLDE N° 20				MOLDE N° 19			
		CARGA		CORRECCION		CARGA		CORRECCION		CARGA		CORRECCION	
		Dial (div)	kg/cm2	kg/cm2	%	Dial (div)	kg/cm2	kg/cm2	%	Dial (div)	kg/cm2	kg/cm2	%
			0			0				0			
0.025		205	11			114	6			62	3		
0.050		372	19			222	12			107	6		
0.075		556	29			350	18			172	9		
0.100	70.5	759	40	36.2	51.4	516	27	24.16	34.3	253	13	14.83	21.0
0.150		972	51			690	36			377	20		
0.200	105.7	1229	64	67.0	63.4	862	45	48.46	45.9	552	29	31.05	29.4
0.250		1505	79			1196	63			728	38		
0.300		1796	94			1323	69			871	46		
0.400		2323	122			1788	94			1162	61		
0.500		2710	142			2045	107			1409	74		

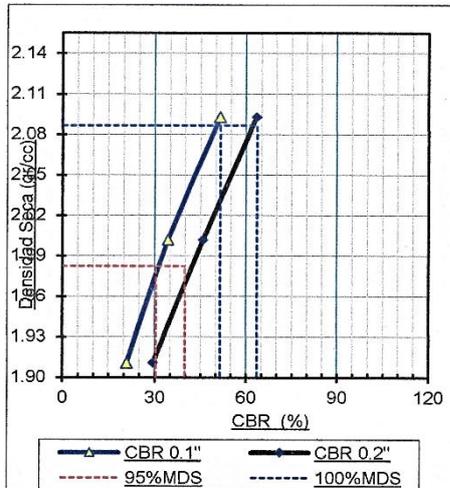

 CONSORCIO SUPERVISOR VIAL
 ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS
Ing. Javier Palacios Mamani
 ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



GRAFICO DE PENETRACION DE CBR SB-BG

OBRA	: Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tocache - Juanjui	N° REGISTRO
TRAMO	: Pizana - La Polvora - Pizarrón - Campanilla	TÉCNICO : P.C.C
MATERIAL	: Sub-Base Granular	ING° RESP. : J.P.M
CALICATA	:	FECHA
MUESTRA	:	HECHO POR : L.F.L
PROFUND.	:	DEL KM
CANTERA	: Mishollo	AL KM
UBICACIÓN	:	LADO :

Generar gráfico

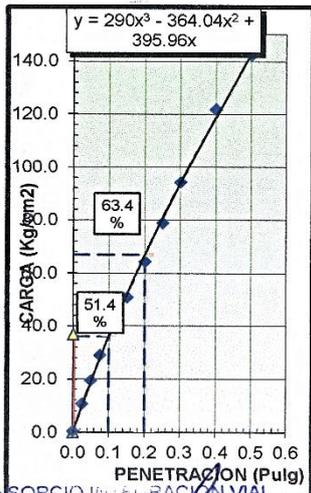


RESULTADOS:

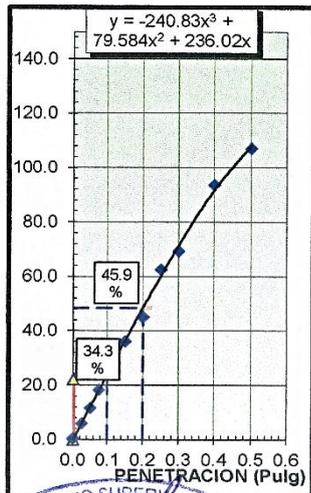
C.B.R. AL 100% DE M.D.S. (%)	0.1":	51.4	0.2":	63.4
C.B.R. AL 95% DE M.D.S. (%)	0.1":	30.3	0.2":	39.8

OBSERVACIONES:

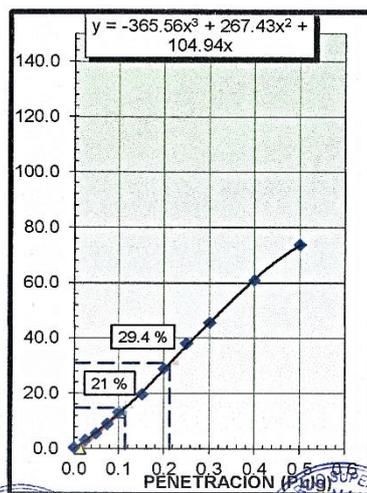
EC = 56 GOLPES



EC = 25 GOLPES



EC = 12 GOLPES



CONSORCIO INTERMUNICIPAL VIAL
REHABILITACION Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA
TOCACHE - JUANJUI TRAMO PIZANA - CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
ESPECIALISTA EN SUPERFICIOS Y PAVIMENTOS



ANEXO 16: RESULTADOS DE RESILIENTES CON EL LWD A CADA 5 METROS DE DISTANCIA (SEGUNDA VISITA)

RESULTADOS CON EL DÉNSIMETRO NÚCLEAR DE LA SEGUNDA VISITA					
PTO	PROGRESIVA	HUMEDAD	DENSIDAD HUMEDA	DENSIDAD SECA	% DE GRADO DE COMPACTACIÓN
1	26+510	3.1	2.383	2.311	101.6
2	26+530	2.9	2.353	2.286	102.7
3	26+550	3.1	2.418	2.346	100.1
4	26+570	3.1	2.423	2.350	99.9
5	26+590	3.4	2.416	2.336	100.5
6	26+610	3.0	2.397	2.327	100.9
7	26+630	2.9	2.416	2.348	100
8	26+650	3.2	2.392	2.318	101.3
9	26+670	3.4	2.369	2.291	102.5
10	26+690	2.9	2.428	2.360	99.5
11	26+710	3.0	2.411	2.341	100.3
12	26+730	3.3	2.406	2.329	100.8

RESULTADOS CON EL LWD A CADA 5 METROS DE LA SEGUNDA VISITA

Progresiva	PROGRESIVA CADA 5 METROS	LWD			MODULO RESILIENTE PROMEDIO
		Carril			
		Derecho	Medio	Izquierdo	
	26+500	89	96	72	
	26+505	93	94	94	
26+510	26+510	105	71	94	90.11
	26+515	104	59	97	
	26+520	83	98	111	
	26+525	94	81	94	
26+530	26+530	63	97	107	83.00
	26+535	55	106	50	
	26+540	46	92	91	
	26+545	66	85	95	
26+550	26+550	89	87	97	86.78
	26+555	85	95	82	
	26+560	71	59	108	
	26+565	95	89	68	
26+570	26+570	92	91	62	78.33
	26+575	79	62	67	
	26+580	87	80	103	
	26+585	98	65	104	
26+590	26+590	70	95	98	90.89
	26+595	93	101	94	

CONSORCIO SUPERVISOR VIAL
REHABILITACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA CARRETERA
TÓCACHÉ - JUANJUÍ - PIZANA - CAMONILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



	26+600	88	78	101	
	26+605	85	76	81	
26+610	26+610	95	111	87	94.11
	26+615	89	123	100	
	26+620	83	101	104	
	26+625	87	98	88	
26+630	26+630	100	85	107	96.11
	26+635	101	95	104	
	26+640	72	108	91	
	26+645	99	94	85	
26+650	26+650	96	83	85	90.89
	26+655	91	95	90	
	26+660	96	92	69	
	26+665	102	111	98	
26+670	26+670	105	100	92	96.22
	26+675	93	91	74	
	26+680	102	105	84	
	26+685	101	106	93	
26+690	26+690	91	100	94	91.44
	26+695	95	83	60	
	26+700	88	72	87	
	26+705	93	63	59	
26+710	26+710	105	72	78	80.67
	26+715	78	77	101	
	26+720	94	73	72	
	26+725	91	83	104	
26+730	26+730	87	90	95	94.00
	26+735	107	102	87	
	26+740	98	94	94	

CONSORCIO SUPERVISOR VIAL
REHABILITACION Y TOCACHES - JUANJUI T.M.
DE LA COMPAÑIA ZANA - PANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS



ANEXO 17: GRADOS DE COMPACTACIÓN CON EL EQUIPO (LWD) (SEGUNDA VISITA)

RESULTADOS DEL PROMEDIO DE MODULO RESILIENTE A CADA 5 METROS DE LA SEGUNDA VISITA

PUNTOS	PROGRESIVA	MODULO	DESV. ESTÁNDAR	G.C LWD
1	26+510	90.11	15.20	101.2
2	26+530	83.00	21.85	102.1
3	26+550	86.78	9.39	99.8
4	26+570	78.33	13.73	100.1
5	26+590	90.89	13.75	101.0
6	26+610	94.11	15.06	101.5
7	26+630	96.11	7.88	100.2
8	26+650	90.89	5.60	99.3
9	26+670	96.22	10.58	100.7
10	26+690	91.44	13.50	101.0
11	27+710	80.67	15.98	100.7
12	27+730	94.00	8.50	100.1



CC
REHABILITACIÓN
TOCACHE - JUANJUI II.
SECCION VIAL
SECRETARIA
ZONA CAMPANILLA

Ing. Javier Palacios Mamani
ESPECIALISTA EN SUELOS Y PAVIMENTOS

APÉNDICES

APÉNDICE 01

**COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORTORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA
MODIFICADA (56000 pie-lb/pie³ [2700 kN –m/m³])**

APÉNDICE 02
MTC E 126-2016 SPEEDY
“CONTENIDO DE HUMEDAD EN SUELOS MÉTODO DEL CARBURO DE CALCIO”

APÉNDICE 03

MTC E 117-2016

**“ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DE LOS SUELOS EN EL CAMPO
POR EL MÉTODO DEL CONO DE ARENA”**

APÉNDICE 04

MTC E 124-2016

“DENSIDAD EN EL SITIO – MÉTODO NUCLEAR A PROFUNDIDAD REDUCIDA”

APÉNDICE 05

“MANUAL DE USO DEL DEFLECTÓMETRO DE PESO LIVIANO”