

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO



**PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE
CALIDAD DE LA COMPACTACIÓN DE GEOMATERIALES
UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS
MEDIANTE EL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO
LIVIANO (LWD)**

PRESENTADO POR:

MARIO ALEJANDRO AVELAR PINEDA

DAVID SALVADOR CEA CARRANZA

PARA OPTAR AL TITULO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA VIAL

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO 2024

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LCDO. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE POSGRADO

DIRECTOR:

MSc. ELMER ARTURO CARBALLO RUÍZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA VIAL

Título:

PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE LA COMPACTACIÓN DE GEOMATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS MEDIANTE EL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO LIVIANO (LWD)

Presentado por:

MARIO ALEJANDRO AVELAR PINEDA

DAVID SALVADOR CEA CARRANZA

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

PhD. ERWIN RAFAEL KOHLER FONTECILLA

SAN SALVADOR, MARZO 2024

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:



PhD. ERWIN RAFAEL KOHLER FONTECILLA

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos:

El total apoyo de las instituciones FOVIAL y MOP quienes permitieron el acceso a los proyectos para la realización de la investigación.

Al personal del laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, por su valiosa colaboración en la etapa de laboratorio de la investigación.

Al personal de dirección técnica y control de calidad de los proyectos seleccionados para esta investigación, por su colaboración en la fase de medición de campo.

De manera muy especial a nuestros amigos de la empresa 3ipe™ por su apoyo incondicional en la realización de esta investigación y apoyo con su conocimiento (Erwin Kohler y Rodrigo Canedo).

Mario Avelar

David Cea.

DEDICATORIA.

Dedico esta tesis especialmente a mi Madre que Dios la tenga en su Eterna Presencia, por su gran amor y sacrificio, a mi Padre por el gran apoyo brindado a lo largo de toda mi vida, a mi esposa y mis hijos, por ser cada día el motor que me motiva para seguir adelante, por el apoyo y comprensión, a mi hermana por el apoyo y cariño de siempre, Gracias.

AGRADECIMIENTO.

Agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi vida profesional y en mi carrera, por ser mi fortaleza en momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de experiencias, retos, oportunidades y sobre todo Felicidad.

Doy las gracias a nuestros compañeros de estudio, en especial a mi Compañero de tesis, con quienes compartimos momentos de trabajo y estudio para culminar las materias.

Finalmente manifiesto mi más profundo orgullo y respeto a la Universidad de El Salvador y al equipo de seres humanos brillantes que nos brindaron su apoyo, gracias.

Mario Avelar

DEDICATORIA.

A mi esposa e hijos por su paciencia y motivación constante.

David Cea.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	xv
1. CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
1.3. OBJETIVOS GENERAL Y ESPECIFICOS.....	12
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	12
1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	12
1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	12
1.4.1. ALCANCES.....	12
1.4.2. LIMITACIONES.....	13
1.4.3. JUSTIFICACIÓN.....	13
2. CAPÍTULO 2. DEFLECTOMETRO DE IMPACTO LIGERO (LWD).....	15
2.1. HISTORIA DEL LWD.....	15
2.1.1. EVOLUCIÓN DEL LWD EN LA INVESTIGACIÓN.....	16
2.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL LWD.....	20
2.2.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA MEDICIÓN DE MÓDULO.....	25
2.2.1.1. DIÁMETRO DE LA PLACA.....	25
2.2.1.2. RIGIDEZ DE LA PLACA.....	25
2.2.1.3. ESFUERZO DE CONTACTO CON LA PLACA.....	28
2.2.1.4. TASA DE APLICACIÓN DE LA CARGA Y AMORTIGUADOR.....	28
2.2.1.5. UBICACIÓN Y TIPO DE SENSOR DE DEFORMACIÓN.....	29
2.3. EQUIPO SELECCIONADO PARA MEDICIONES DE CAMPO.....	30
3. CAPÍTULO 3. CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD (QC/QA) DE LA COMPACTACIÓN UTILIZANDO EL LWD.....	35
3.1. GENERALIDADES.....	35
3.2. DESARROLLO DE PROCEDIMIENTO DE QC/QA UTILIZANDO LWD.....	36
3.2.1. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO OBJETIVO MEDIANTE LWD UTILIZANDO MOLDE DE COMPACTACIÓN PROCTOR.....	39
3.2.2. CONTROL DE CALIDAD DE LA COMPACTACIÓN MEDIANTE DEFLECTÓMETRO DE -IMPACTO LIGERO LWD.....	42

3.3.	QC/QA BASES GRANULARES CON RAP (RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT AGGREGATE).....	44
3.4.	ESPECIFICACIONES EXISTENTES.....	46
3.4.1.	SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTE DE MÉXICO.....	46
3.4.2.	SOCIEDAD ESTADOUNIDENSE PARA ENSAYOS Y MATERIALES (ASTM).....	46
3.5.	FUTURO DEL QC/QA COMPACTACIÓN DE SUELOS.....	47
4.	CAPÍTULO 4. IMPLEMENTACIÓN QC/QA EN PROYECTOS EN EJECUCIÓN.	52
4.1.	PROYECTOS SELECCIONADOS.....	52
4.2.	DETERMINACIÓN DEL MÓDULO OBJETIVO.....	54
4.3.	RESULTADOS DETERMINACIÓN MÓDULO OBJETIVO.	57
4.3.1.	INTERSECCIÓN CA01W -RN23S – RN07W-	57
4.3.1.1.	SUBRASANTE.....	58
4.3.1.2.	CAPA BASE.....	61
4.3.2.	PROYECTO BYPASS SAN MIGUEL.....	64
4.3.2.1.	SUBRASANTE.....	64
4.3.2.2.	CAPA SUB-BASE Y BASE.....	66
4.4.	RESULTADOS OBTENIDOS MEDICIÓN DE MÓDULOS EN CAMPO.....	68
4.4.1.	INTERSECCIÓN CA01W -RN23S – RN07W.....	69
4.4.1.1.	SUBRASANTE.....	69
4.4.1.2.	CAPA BASE.....	71
4.4.2.	BYPASS SAN MIGUEL.....	74
4.4.2.1.	SUBRASANTE.....	74
4.4.2.2.	CAPA SUBBASE.....	77
4.4.2.3.	CAPA BASE.....	79
5.	CAPÍTULO 5. PROPUESTA METODOLOGIA PARA CONTROL DE CALIDAD DE LA COMPACTACIÓN DE GEOMATERIALES CON EL LWD.....	82
5.1.	PROPUESTA METODOLÓGICA (NORMA A IMPLEMENTAR). CONTROL DE COMPACTACIÓN DE GEOMATERIALES PARA PAVIMENTOS CON LWD.....	82
5.1.1.	OBJETO.....	82
5.1.2.	DOCUMENTOS DE REFERENCIA.....	82
5.1.3.	DEFINICIONES.....	83
5.1.4.	SIGNIFICADO Y USO.....	83
5.1.5.	EQUIPO.....	84
5.1.6.	PROCEDIMIENTO PARA USO DE LWD.....	85
5.1.6.1.	OBTENCIÓN DEL MÓDULO OBJETIVO EN LABORATORIO.....	85

5.1.6.2.	MEDICIÓN DE MÓDULO EN CAMPO.....	90
5.1.7.	DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE COMPACTACIÓN.....	96
5.1.8.	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN.....	96
5.1.9.	FORMA DE REPORTAR RESULTADOS.....	97
6.	CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	98
6.1.	CONCLUSIONES.....	98
6.2.	RECOMENDACIONES.....	100
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	102
	APÉNDICE 1.....	106

INDICE DE FIGURAS.

FIGURA 1.3.1-1	PAVIMENTO ESTÁNDAR ROMANO. FUENTE: (MENDOZA-SÁNCHEZ ET AL. 2023).....	3
FIGURA 1.3.1-2	SECCIÓN TÍPICA ESTRUCTURA MCADAM. FUENTE: (MENDOZA-SÁNCHEZ ET AL. 2023).....	5
FIGURA 2.1.1-1	DIAGRAMA DE ÁRBOL, ÁREAS DE INVESTIGACIÓN.....	17
FIGURA 2.1.1-2	TIPO DE DOCUMENTO PORCENTAJE (%) DE 352 PUBLICACIONES.....	18
FIGURA 2.1.1-3	UBICACIÓN GEOGRÁFICA PUBLICACIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	19
FIGURA 2.1.1-4	NÚMERO DE PUBLICACIONES POR AÑO, PERIODO DE 20 AÑOS, FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	19
FIGURA 2.2-1	ESQUEMA LWD MARCA 3IPE™.....	21
FIGURA 2.2-2	ESQUEMA DEL MOVIMIENTO LWD-SUELO (SCHWARTZ ET AL., 2017).....	22
FIGURA 2.2-3	ENSAYO LWD EN UNA Y DOS CAPAS.....	23
FIGURA 2.2.1.2-1	PRESIÓN DE CONTACTO, PERFIL DE DEFLEXIÓN DE LA PLACA Y FACTOR DE RIGIDEZ (K) (DUDDU & CHENNARAPU, 2022).....	26
FIGURA 2.2.1.2-2	FACTORES DE DISTRIBUCIÓN A (SCHWARTZ ET AL., 2017).....	27
FIGURA 2.2.1.5-1	UBICACIÓN SENSORES EN LOS LWD.....	30

FIGURA 2.3-1 EQUIPO LWD 3IPE™	32
FIGURA 2.3-2 AMBIENTE APLICACIÓN EQUIPO LWD 3IPE™.....	32
FIGURA 2.3-3 AMBIENTE MEDICIÓN APLICACIÓN LWD 3IPE™.....	33
FIGURA 2.3-4 DEFORMACIÓN/TIEMPO ENSAYO LWD 3IPE™ (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	34
FIGURA 2.3-5 FUERZA/TIEMPO ENSAYO LWD 3IPE™ (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	34
FIGURA 3.2.1-1 ESQUEMA MEDICIÓN LWD SOBRE MOLDE PROCTOR (AFSHARIKIA & SCHWARTZ, 2018).	40
FIGURA 3.5-1 PAÍSES CON MAYOR INVESTIGACIÓN PALABRAS CLAVE.	49
FIGURA 3.5-2 NÚMERO DE PUBLICACIONES POR AÑO.....	49
FIGURA 3.5-3 CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA COMPACTACIÓN PARA EL MOVIMIENTO DE TIERRAS. (ZHANG ET AL., 2022).	51
FIGURA 4.1-1 ESTRUCTURA PAVIMENTO CA01W - RN23S - RN07W.....	53
FIGURA 4.1-2 ESTRUCTURA PAVIMENTO BYPASS SAN MIGUEL.....	53
FIGURA 4.2-1 ALTURA CAÍDA LABORATORIO. (FUENTE: PRESENTACIÓN LWD COMPACTACIÓN DE SUELOS, JAVIER CASTAÑEDA, 2023).....	54
FIGURA 4.2-2 CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA. (FUENTE: PRESENTACIÓN LWD COMPACTACIÓN DE SUELOS, JAVIER CASTAÑEDA, 2023).....	56
FIGURA 5.1.5-1 EQUIPO LWD SEGÚN ASTM E 2583.	85
FIGURA 5.1.6.1-1 ESQUEMA DE EQUIPO SOBRE EL MOLDE PROCTOR.	87
FIGURA 5.1.6.1-2 POSICIONAMIENTO LWD EN MOLDE PROCTOR EN LABORATORIO.	87
FIGURA 5.1.6.2-1 UBICACIÓN DE EQUIPO Y PREPARACIÓN DE SUPERFICIE.....	91
FIGURA 5.1.6.2-2 MEDICIÓN DE MÓDULO PREVIO A LA CONFORMACIÓN Y COMPACTACIÓN DE SIGUIENTE CAPA.	95

INDICE DE TABLAS.

TABLA 1.2-1 ESPECIFICACIONES PARA CONTROL DE COMPACTACIÓN (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	9
<i>TABLA 2-1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS EQUIPO 3IPE™</i>	31
TABLA 3.2-1 VALORES TÍPICOS DE COEFICIENTE POISSON (MEPDG) (AFSHARIKIA & SCHWARTZ, 2018)	42
TABLA 4-1 MÓDULO OBJETIVO SUBRASANTE.....	59
TABLA 4-2 MÓDULO OBJETIVO BASE.....	62
TABLA 4-3 MÓDULO OBJETIVO SUBRASANTE.....	65
TABLA 4-4 MÓDULO OBJETIVO SUBBASE Y BASE.....	67
TABLA 4-5 RESULTADO MEDICIÓN DE DEFLEXIONES EN SUBRASANTE.....	69
TABLA 4-6 MÓDULO CALCULADO SUBRASANTE.....	69
TABLA 4-7 % DE COMPACTACIÓN NDG Y % COMPACTACIÓN E OBJETIVO.....	70
TABLA 4-8 MÓDULO DE CAMPO CORREGIDO POR CAPA BASE.....	72
TABLA 4-9 % DE COMPACTACIÓN NDG Y % COMPACTACIÓN E OBJETIVO. CAPA BASE	72
TABLA 4-10 RESULTADOS MEDICIÓN DEFLEXIONES EN SUBRASANTE.....	74
TABLA 4-11 MÓDULO CALCULADO SUBRASANTE.....	75
TABLA 4-12 % DE COMPACTACIÓN NDG Y % COMPACTACIÓN E OBJETIVO. SUBRASANTE.....	76
TABLA 4-13 MÓDULO DE CAMPO CORREGIDO POR CAPA SUB-BASE.....	77
TABLA 4-14 % DE COMPACTACIÓN NDG Y % COMPACTACIÓN E OBJETIVO. CAPA SUB-BASE.....	78
TABLA 4-15 MÓDULO DE CAMPO CORREGIDO POR CAPA BASE.....	79
TABLA 4-16 % DE COMPACTACIÓN NDG Y % COMPACTACIÓN E OBJETIVO. CAPA BASE. ...	80
TABLA 5-1 VALORES TÍPICOS A CONSIDERAR PARA EL COEFICIENTE POISSON.....	89
TABLA 5-2 FACTOR DE DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZO.....	93
TABLA 5-3 VALORES DE MÓDULO POR TIPO DE SUELO. VALORES TÍPICOS (SCT EP-4)	95

TABLA APÉNDICE 1 - 1 DEFINICIÓN MÓDULO LABORATORIO.....	106
TABLA APÉNDICE 1 - 2 DEFINICIÓN MÓDULO CAMPO	106
TABLA APÉNDICE 1 - 3 DEFINICIÓN MÓDULO LABORATORIO.....	107
TABLA APÉNDICE 1 - 4 DEFINICIÓN MÓDULO CORREGIDO POR ESPESOR CAPA.....	108
TABLA APÉNDICE 1 - 5 RELACIÓN ENTRE MÓDULO MEDICO EN CAMPO VS EL MÓDULO OBJETIVO (SUB RASANTE).....	109
TABLA APÉNDICE 1 - 6 RELACIÓN ENTRE MÓDULO MEDICO EN CAMPO VS EL MÓDULO OBJETIVO (BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO)	109
TABLA APÉNDICE 1 - 7 DEFINICIÓN MÓDULO OBJETIVO EN LABORATORIO	110
TABLA APÉNDICE 1 - 8 DEFINICIÓN MÓDULO DE CAMPO	110
TABLA APÉNDICE 1 - 9 DEFINICIÓN MÓDULO OBJETIVO SUBBASE.	112
TABLA APÉNDICE 1 - 10 DEFINICIÓN MÓDULO OBJETIVO	113
TABLA APÉNDICE 1 - 11 MÓDULO CORREGIDO BEA	114

INDICE DE GRAFICAS.

GRÁFICA 4.3.1-1 RELACIÓN PVSM VS % HUMEDAD AASHTO T 180 SUBRASANTE.....	58
GRÁFICA 4.3.1-2 MODULO OBJETIVO SUBRASANTE.	60
GRÁFICA 4.3.1-3 PVSM VS % HUMEDAD - E_{LWD} VS % HUMEDAD SUBRASANTE.....	61
GRÁFICA 4.3.1.2-1 RELACIÓN PVSM VS % HUMEDAD AASHTO T 180 BASE.....	62
GRÁFICA 4.3.1.2-2 MÓDULO OBJETIVO BASE.....	63
GRÁFICA 4.3.1.2-3 PVSM VS % HUMEDAD - E_{LWD} VS % HUMEDAD BASE.....	63
GRÁFICA 4.3.2.1-1 RELACIÓN PVSM VS % HUMEDAD AASHTO T 180 SUBRASANTE.....	64
GRÁFICA 4.3.2.1-2 MODULO OBJETIVO SUBRASANTE.	65
GRÁFICA 4.3.2.1-3 PVSM VS % HUMEDAD - E_{LWD} VS % HUMEDAD SUBRASANTE.....	66
GRÁFICA 4.3.2.2-1 RELACIÓN PVSM VS % HUMEDAD AASHTO T 180 BASE Y -SUB BASE.	67
GRÁFICA 4.3.2.2-2 MÓDULO OBJETIVO SUB BASE Y BASE.....	68
GRÁFICA 4.4.1.1-1 % NDG VS % $E_{OBJETIVO}$ SUBRASANTE.	70
GRÁFICA 4.4.1.2-1 % NDG VS % $E_{OBJETIVO}$ BASE.	73

GRÁFICA 4.4.1.2-2 % DE COMPACTACIÓN NDG VS % E CAMPO/E OBJETIVO (SUBRASANTE Y BASE).	74
GRÁFICA 4.4.2.1-1 % NDG VS % E OBJETIVO SUBRASANTE.	77
GRÁFICA 4.4.2.2-1 % NDG VS % E OBJETIVO SUB BASE.	79
GRÁFICA 4.4.2.3-1 % NDG VS % E OBJETIVO BASE.	81
GRÁFICA 4.4.2.3-2 % DE COMPACTACIÓN NDG VS % E CAMPO/E OBJETIVO (SUBRASANTE, SUB BASE Y BASE).	81
GRÁFICA 5.1.6.1-1 DETERMINACIÓN MÓDULO OBJETIVO.	90
GRÁFICA 6.1-1 RESULTADOS IMPLEMENTACIÓN DE QC CON MÓDULO OBJETIVO.	99

INDICE DE ECUACIONES.

ECUACIÓN 2.2-1 ECUACIÓN DE BOUSSINESQ	23
ECUACIÓN 2.2-2 BURMISTER, CÁLCULO PARA UN SISTEMA DE DOS CAPAS	24
ECUACIÓN 2.2.1.2-1 ECUACIÓN RIGIDEZ RELATIVA PLACA. (BOROWICKA H, 1936)	27
ECUACIÓN 3.2.1-1 MODULO EN MOLDE PROCTOR.	41
ECUACIÓN 3.2.2-1 MODULO DE CAMPO.	43
ECUACIÓN 3.2.2-2 MODULO POR CAPA CORREGIDO.	44
ECUACIÓN 4.2-1 FUERZA APLICADA EN LABORATORIO.	55
ECUACIÓN 4.2-2 ALTURA DE CAÍDA LABORATORIO	57
ECUACIÓN 5.1.6.1-1 ALTURA DE CAÍDA LABORATORIO	86
ECUACIÓN 5.1.6.1-2 COEFICIENTE VARIACIÓN.	88
ECUACIÓN 5.1.6.1-3 COEFICIENTE DE RIGIDEZ (K)	88
ECUACIÓN 5.1.6.1-4 OBTENCIÓN DE MÓDULO EN EL MOLDE PROCTOR.	88
ECUACIÓN 5.1.6.2-1 MÓDULO DE CAMPO.	92
ECUACIÓN 5.1.6.2-2 MÓDULO CORREGIDO POR CAPA.	94
ECUACIÓN 5.1.7-1 PORCENTAJE DE COMPACTACIÓN	96

INTRODUCCIÓN.

La compactación de los suelos ha formado parte de los procesos constructivos de vías y otras estructuras desde siempre, ya sea de manera intuitiva o intencional, no fue hasta 1930 que un ingeniero de campo de la oficina de obras hidráulicas y abastecimiento de California R.R. Proctor realizó investigaciones sobre la relación de la humedad, densidad del suelo y energía de compactación, introduciendo la denominada curva de Proctor en donde se relaciona la densidad a distintos puntos de humedad para la obtención de una densidad máxima y humedad óptima, lo cual ha constituido desde entonces en un procedimiento para el control de calidad de los trabajos de compactación.

A más de 90 años después de que R.R. Proctor realizará sus publicaciones, todas las especificaciones de trabajos viales contemplan el uso del mismo procedimiento de verificación de la compactación, el cual ha mostrado ser útil y ha funcionado, sin embargo, no sabemos con exactitud si al obtener esta compactación estamos dejando una capa para el caso de pavimentos con la rigidez requerida.

Por tal motivo y teniendo en consideración el desarrollo de nuevas alternativas en el control de calidad de la compactación es que surge este documento, con el objetivo principal de dar a conocer una de las propuestas de control de calidad en compactación que permite una transición “gentil” entre el actual método de control de compactación y la nueva propuesta. Esta consiste en la determinación de un módulo objetivo en el molde Proctor de 152.40 mm de diámetro, el módulo es definido en laboratorio en los mismos puntos de humedad que se utilizan para la construcción de la curva Proctor, este es medido con un deflectómetro de impacto ligero (LWD por sus siglas en Ingles). Una vez obtenidos todas las humedades, densidades y módulos se plotea la curva Proctor y la curva de módulos en función de la humedad, tomando como módulo objetivo aquel que se obtiene en el punto de humedad óptima de compactación.

En el presente documento, se presenta una descripción del equipo LWD y sus principios de funcionamiento, junto con un análisis en la evaluación de la investigación relacionada al LWD y el control de calidad de las compactaciones, se describe el equipo utilizado para las evaluaciones realizadas, se presenta una descripción de los últimos esfuerzos en el desarrollo de la nueva propuesta de control de calidad de compactación de los suelos. Adicionalmente se incluyen los resultados obtenidos al implementar el control de calidad de la compactación con el LWD en proyectos recientemente ejecutados en El Salvador, teniendo como último y más importante aporte una propuesta de especificación para que pueda ser revisada y en el mejor de los casos adoptada por las instituciones encargadas del mantenimiento y construcción de vías en El Salvador o para el control en general de compactación de suelos.

1. CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.

1.1. ANTECEDENTES.

La compactación de los suelos ha sido una necesidad inherente de mejora del comportamiento de los mismos, específicamente de aquellos destinados para uso de construcción de cualquier tipo de obra. Especialmente los que estén destinados a infraestructura de transporte. Aunque puede aceptarse que los primeros constructores de carreteras no entendían los principios de la mecánica del suelo, sabían intuitiva (y empíricamente) que si se aplicaba una carga pesada al suelo (ya fuera estática o dinámica) sus características mejoraban de tal manera que proporcionaba una vía mecánicamente más estable y adecuada para sus fines. (Ebels, L.J. et al., 2004)

Un ejemplo de mejora intuitiva del suelo se remonta a antes de la invención de la rueda (antes del 3500 a.C.). En aquella época, los incas de Sudamérica ya disponían de una extensa red de caminos contruidos enteramente con mano de obra humana. (Rodriguez R.; H. del Castillo; G. F. Sowers., 1988). Así mismo, las carreteras de Europa y Oriente medio apenas eran más que caminos de tierra, creados por el tráfico repetido de animales y personas, que de hecho compactaban el suelo (compactación debida al tráfico) y creaban así una vía más estable. Sin embargo, con la llegada de la rueda (hacia el 3500 a.C.) y el aumento del uso de carros tirados por animales, aumentó la necesidad de mejorar las carreteras. (Ebels, L.J. et al., 2004).

Se tienen evidencias que las primeras carreteras en Babilonia datan de 2000 a.C. a 1500 a.C., estas fueron construidas con bloques de tamaño uniforme en varias capas dentro de un corte en caja. Entre los años 500 a.C. y 500 d.C., los romanos establecieron en Europa una extensa red de carreteras bien construidas y diseñadas. Estas carreteras tenían principalmente fines estratégicos y militares y se construyeron para poder controlar la extensa zona geográfica del Imperio Romano. La *Figura 0-1*

muestra una sección transversal de la estructura de pavimento "estándar" y se puede observar que tiene cierto parecido con la estructura de pavimento babilónica. (Ebels, L.J. et al. 2004).

Se dice que los romanos compactaban el subsuelo bajo la primera capa de bloques de piedra arrastrando a mano pesados rodillos para crear una superficie firme sobre la cual colocaban los bloques de piedra. Si se consideraba que el subsuelo era demasiado débil, se colocaba una capa de postes de madera antes de la primera capa de bloques de piedra. Algunas de las carreteras construidas por los romanos siguen en uso hoy en día (la Vía Appia de Roma, construida por Apio Claudio en el 300 a.C.). (Ebels, L.J. et al. 2004).

Hoy en día sabemos que, la densificación mediante la compactación del suelo mejora sus propiedades, aumenta la resistencia y la capacidad portante del suelo y reduce la compresibilidad y la permeabilidad. (Kodikara et al., 2018).

Sin embargo, no fue hasta principios del siglo XVIII que, se reconoció la importancia estratégica de los desplazamientos interurbanos y surgió la necesidad de disponer de carreteras de alto nivel. En Francia se creó en 1716 el "*Corps des Ponts et Chaussées*" (Cuerpo de Ingenieros de Puentes y Caminos), donde se formaba a los soldados en técnicas de ingeniería para satisfacer la necesidad de desarrollar infraestructuras. El equivalente civil de esta institución, "*La Ecole des Ponts et Chaussées*" (Escuela de Puentes y Caminos), se creó en 1747 bajo la dirección de Jean-Rodolphe Perronet. Fue la primera escuela de ingeniería civil y fue el interés comercial quién la impulsó. (Ebels, L.J. et al., 2004).

A raíz de este renacimiento en la construcción de carreteras y el reconocimiento estratégico de las vías desde el punto de vista comercial y militar, se reconocen ciertas filosofías de construcción de estructuras de pavimentos. Alrededor de 1765 Pierre-Marie Tresaguet (1716 – 1796) ingeniero graduado de la "*Ecole des Ponts et Chaussées*" (Escuela de Puentes y Caminos) Continuó el desarrollo

iniciado por los romanos y diseñó estructuras de pavimentación con capas de subbase compuestas por grandes rocas.

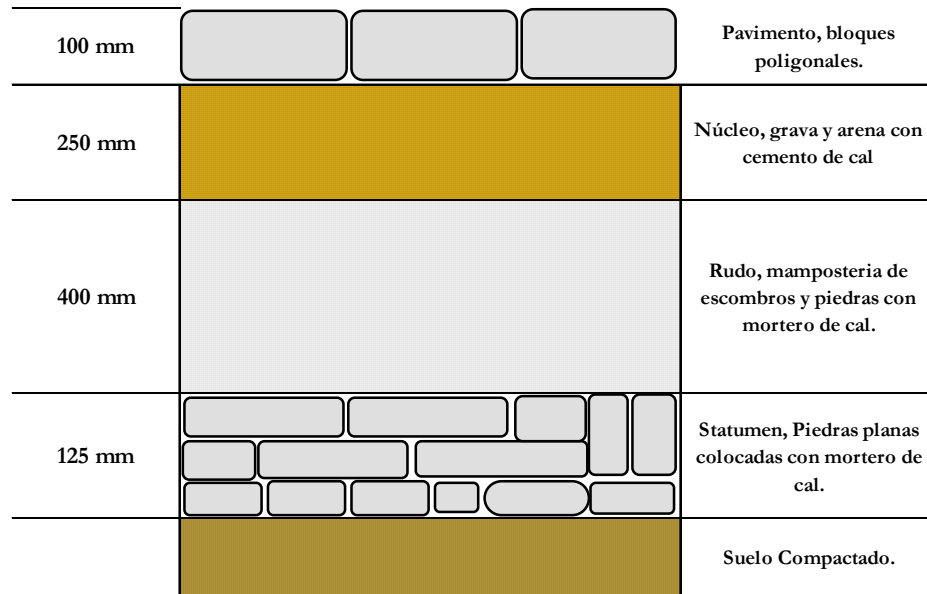


Figura 0-1 Pavimento Estándar Romano. Fuente: (Mendoza-Sánchez et al. 2023)

Los espacios entre las rocas grandes se rellenaban con rocas más pequeñas para obtener una superficie de subbase nivelada. Encima de esta subbase de rocas se construía una capa de base de rocas de menor tamaño, que seguía siendo esencialmente un material de nivelación uniforme. En paralelo Thomas Telford (1757 – 1834) de Escocia y John Metcalf (1717 – 1810) de Inglaterra aplicaron filosofías similares. (Ebels, L.J. et al. 2004).

Un gran avance en la construcción de carreteras fue establecido por John Louden McAdam (1756 - 1836), también de Escocia. La filosofía de McAdam era que los cimientos de piedra de gran tamaño no eran necesarios cuando se utilizaba una capa densa de rocas de menor tamaño, que tuvieran suficiente fricción entre partículas. Probablemente sin comprender del todo por qué su capa de pavimento era tan resistente, McAdam utilizó el principio del entrelazamiento de partículas para crear resistencia y el principio del aumento de la densidad para aumentar aún más la resistencia de la capa.

La mayor densidad de la capa y el entrelazamiento de partículas en el material se consiguieron de forma innovadora extendiendo primero los áridos más gruesos y colocando después los finos en los huecos entre los áridos más gruesos (*Figura 0-2*). Existía macadán seco y húmedo (ligado al agua), según la forma en que se introducían los finos en los huecos entre los áridos más gruesos. (Ebels, L.J. et al. 2004).

La nueva filosofía implementada por McAdam, presento una optimización en los costos de construcción, por lo que la misma tuvo mucha aceptación, esta filosofía es posible encontrarla en los pavimentos “macadam” de los primeros desarrollos urbanísticos del área metropolitana de San Salvador.



Imagen 1.1-1 Calle urbana de San Salvador construida con macadam, año 1920.

50 mm		Roca triturada 25 mm tamaño máximo
200 mm		Roca triturada 75 mm tamaño máximo
		Suelo Compactado

Figura 0-2 Sección típica estructura McAdam. Fuente: (Mendoza-Sánchez et al. 2023)

Tras la invención de los compactadores de vapor en 1860, la construcción de carreteras dio un nuevo giro al cambiar por completo el nivel de compactación.



Imagen 1.1-2 Rodillo doble tándem impulsado a vapor, calles San Salvador 1920.

El rodillo de pata de cabra “*sheep foot*” se inventó en Estados Unidos en 1906 inspirado en la pisada del ganado que se utilizaba en Inglaterra en 1820 para compactar el material en las presas de terraplén. Los primeros rodillos de pata de oveja tenían una masa ligera, de 2,7 a 4,5 toneladas, y una presión de pisada de 414 a 690 kPa. Tras la invención de los motores de combustión interna en 1876, la capacidad de carga de los rodillos se elevó a 30 toneladas. La mayor parte del desarrollo posterior de los rodillos de pata de cabra no se produjo en lo que respecta al peso, sino a la forma de la pata y a los avances mecánicos. Después de la Segunda Guerra Mundial, los avances más significativos se produjeron en el campo de la compactación vibratoria. En la actualidad, los rodillos vibratorios ocupan un lugar muy destacado en la construcción de carreteras y se han vuelto muy eficaces para producir capas de pavimento granular de alta densidad. (Kodikara et al., 2018).

Gracias a los adelantos logrados a finales del siglo XIX, la construcción de vías de circulación tuvo un crecimiento acelerado, así mismo, las filosofías implementadas al momento Tresaguet, Telford e incluso McAdam se habían convertido en alternativas muy costosas para que el crecimiento fuera sostenible y se cumpliera con la necesidad de vías.

Por tal motivo, fue evidente que era necesario hacer un uso más eficaz de las fuentes de material natural existente para proporcionar estructuras de pavimento rentables que pudieran soportar la carga de tráfico requerida y, al mismo tiempo, se mantuvieran en un estado aceptable. Para ello era necesario comprender mejor el comportamiento de los materiales no aglomerados. (Ebels, L.J. et al., 2004). Esto fue experimentado en la primera guerra mundial donde la necesidad de caminos para el abastecimiento de tropas fue un reto para los ingenieros militares de la época, esto debido al desarrollo de camiones de gran capacidad de carga tales como el modelo T de Ford que tuvo varios usos en el frente de ataque (Ebels, L.J. et al., 2004).

Con el aumento de la inversión de fondos públicos en construcción y mantenimiento de carreteras, fue necesario coordinar más los esfuerzos para mejorar la calidad de los procesos de construcción de

carreteras y garantizar la calidad de los resultados. Se prestó más atención al diseño de las carreteras y a las normas técnicas y se investigó mejor como invertir mejor el dinero. Esto llevó a la realización de pruebas en carreteras a escala real para evaluar y supervisar el rendimiento de las construcciones de pavimentos. Un ejemplo interesante de una de las primeras pruebas a escala real es la prueba de carretera de Bates, que se llevó a cabo entre 1922 y 1923 en Illinois (EE. UU.). La prueba de la carretera de Bates consistió en la construcción de una pista de pruebas, formada por diferentes tipos de pavimento (Adoquín, asfalto y hormigón), por la que circularon camiones antiguos de la Primera Guerra Mundial. Se comprobó que sólo una de las 22 secciones de adoquín, tres de las 17 de asfalto y diez de las 24 de hormigón funcionaban satisfactoriamente. (Ebels, L.J. et al., 2004).

Resulta sorprendente que hasta finales de los años veinte apenas se investigara científicamente el desarrollo de normas técnicas para el diseño y la construcción de firmes. En aquella época, las carreteras se construían generalmente según las mejores prácticas y la experiencia práctica de los ingenieros de caminos de una región determinada. Aunque ya se sabía desde hacía tiempo que el aumento de la compactación mejoraba el comportamiento de los materiales no ligados, la comprensión teórica de la misma aún no estaba lo suficientemente desarrollada como para mejorar el diseño de los firmes y proporcionar normas adecuadas. (Ebels, L.J. et al. 2004).

Durante 1928 y 1929, el Departamento de Carreteras de California realizó un estudio de su red de carreteras para evaluar el tipo de deterioro y sus posibles causas. A partir de este estudio se determinó que la compactación insuficiente y variable durante la construcción era la causa principal de los problemas. Además, se determinó que el grado de compactación tenía un mayor efecto en el rendimiento de la carretera que cualquier otro factor, aparte de los materiales que se hinchan significativamente al humedecerse (material con un alto contenido de arcilla). Además, se determinó que el espesor insuficiente del firme sobre materiales con una resistencia al corte insuficiente (recubrimiento inadecuado de la subrasante) era otro factor que provocaba problemas. Las principales

conclusiones de este estudio dieron lugar a un impulso para comprender mejor estas dos propiedades. (Otte, 1979).

Entre los años 1930 y 1933 se tuvo el desarrollo de dos ensayos enfocados a comprender el comportamiento del suelo frente a la aplicación de cargas, su relación entre humedad y energía de compactación, fue desarrollado por Porter denominado el “*California Bearing Ratio CBR*” En las fases iniciales de las investigaciones del ensayo CBR, las muestras de suelo se compactaron mediante compactación estática. El método de compactación mediante presión estática resultó ser engorroso y su disponibilidad era limitada. (Corney. et al 1997). En un esfuerzo independiente de las actividades del Departamento de Carreteras de California, R. R. Proctor, ingeniero de campo de la Oficina de Obras Hidráulicas y Abastecimiento de Los Ángeles (California), realizó investigaciones sobre las relaciones entre la densidad del suelo, la energía de compactación y el contenido de humedad. Proctor publicó una serie de cuatro artículos en el *Engineering News Record* sobre la compactación del suelo en 1933. En estas publicaciones introdujo su denominada curva de Proctor, la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca máxima, que constituyó la base de los procedimientos de control de la compactación de la Oficina y que sigue utilizándose en la actualidad. El procedimiento de compactación de muestras desarrollado por Proctor para su ensayo fue adoptado por Porter para el ensayo CBR. (Ebels, L.J. et al., 2004).

Así mismo debido a la simplicidad del ensayo desarrollado por Proctor, este fue adoptado por la *American Association of State Highway Officials* (AASHO, después AASHTO), publicando su especificación estándar en 1942. (Corney, et al. 1997).

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En la actualidad la filosofía de diseño de los pavimentos está orientada al uso un método mecanístico – empírico dicho método utiliza como valor de entrada para la caracterización de los geomateriales el módulo elástico resistente de cada una de las capas dispuestas a conformar la estructura del pavimento. Todas estas capas de geomateriales deben ser objeto de un proceso controlado de compactación con requisitos establecidos por las instituciones encargadas de la construcción, mantenimiento y rehabilitación de las vías, tanto a nivel Regional (Centroamérica) como a nivel local. Al realizar una revisión de las Especificaciones de Construcción de Carreteras 2ª edición y las Condiciones Técnicas de Mantenimiento del Fondo de Conservación Vial (FOVIAL) de El Salvador, podemos constatar que la mayoría de las actividades relacionadas a la compactación de suelo tienen como referencia determinar la relación humedad-densidad de los suelos utilizando los estándares AASHTO T99 o AASHTO T180, según aplique. A continuación, se presenta un resumen de la revisión realizada y el requerimiento específico para cada actividad:

Tabla 1.2-1Especificaciones para control de compactación (fuente: elaboración propia).

Documento técnico	Actividad	Requerimiento	Institución
Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales 2a edición	Excavación y relleno para estructuras mayores	$C^1 \geq 98\%$ de la Densidad máxima AASHTO T 99	SIECA ²
Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales 2a edición	Excavación y relleno para otras estructuras	$C \geq 95\%$ de la Densidad máxima AASHTO T 99	SIECA
Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales 2a edición	Estabilización de la Subrasante.	$C \geq 95\%$ CBR de la Densidad máxima	SIECA
Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales 2a edición	Subbase o Base granular.	$C \geq 95\%$ de la Densidad máxima AASHTO T 180	SIECA

¹ C: Grado de compactación.

² SIECA: Secretaría de Integración Económica Centroamericana.

Documento técnico	Actividad	Requerimiento	Institución
Especificaciones para la construcción de carreteras y puentes regionales 2 edición.	Subbase y Base con materiales estabilizados.	C ≥ 95% de la Densidad máxima AASHTO T 180 ó 134	SIECA
Especificaciones para la construcción de carreteras y puentes regionales 2 edición.	Estabilización de los agregados.	C ≥ 95% de la Densidad máxima AASHTO T 180	SIECA
Especificaciones para la construcción de carreteras y puentes regionales 2 edición.	Mezcla de Agregado y suelo vegetal para recubrimiento	C ≥ 90% de la Densidad máxima AASHTO T 99	SIECA
Especificaciones para la construcción de carreteras y puentes regionales 2 edición.	Agregados triturados para rellenos.	C ≥ 95% de la Densidad máxima AASHTO T 180	SIECA
Especificaciones para la construcción de carreteras y puentes regionales 2 edición.	Base tratada con asfalto.	C ≥ 95% de la Densidad máxima AASHTO T 180	SIECA
Condiciones Técnicas	MR 0201 Conformación de Calzada	C ≥ 95% de la Densidad máxima AASHTO T 180	FOVIAL
Condiciones Técnicas	MR0204 Mejoramiento de la superficie con material de aporte (estabilizado).	C ≥ 95% de la Densidad máxima AASHTO T 180	FOVIAL
Condiciones Técnicas	MR0205 Mejoramiento de la superficie con material de aporte.	C ≥ 95% de la Densidad máxima AASHTO T 180	FOVIAL
Condiciones Técnicas	MR0302.1 Base para bacheo MR0302.2 Base para bacheo nocturno	C ≥ 95% de la Densidad máxima AASHTO T 180	FOVIAL
Condiciones Técnicas	MR0313 Reciclado de pavimento (estabilizado con cemento o cal)	C ≥ 95% de la Densidad máxima AASHTO T 180	FOVIAL
Condiciones Técnicas	MR0501 Reconstrucción de hombros	C ≥ 95% de la Densidad máxima AASHTO T 180	FOVIAL
Condiciones Técnicas	MR0503 Estabilización de hombros con cemento	C ≥ 95% de la Densidad máxima AASHTO T 180	FOVIAL
Condiciones Técnicas	MR0801 Suministro, transporte y colocación de alcantarillas	C ≥ 95% de la Densidad máxima AASHTO T 180	FOVIAL
Condiciones Técnicas	MR1107 Relleno para estructuras varias	C ≥ 90% de la Densidad máxima AASHTO T 180	FOVIAL
Condiciones Técnicas	MR1201 Estabilización de suelos con cemento	C ≥ 95% de la Densidad máxima AASHTO T 180	FOVIAL

Documento técnico	Actividad	Requerimiento	Institución
Condiciones Técnicas	MR1202 Pavimentos UNICAPA de alto desempeño (PUAD)	C = 100% de la Densidad máxima AASHTO T 180	FOVIAL
Condiciones Técnicas	MR1203 Estabilización de suelos con cal o mezclas de cal y cemento	C ≥ 95% de la Densidad máxima AASHTO T 180 para Estabilización cemento - cal. C ≥ 90% de la Densidad máxima AASHTO T 180 para Estabilización cal - cemento	FOVIAL

Adicionalmente a lo plasmado en la **Tabla 1.2-1** para realizar el control en campo en la práctica local y regional se realiza mediante dos ensayos, AASHTO T – 191 Método normalizado de ensayo de la densidad del suelo in situ por el método del cono de arena y AASHTO T – 310 Método normalizado de ensayo de la densidad en el lugar y del contenido de humedad del suelo y de los agregados del suelo por métodos nucleares (poca profundidad).

A pesar de los muchos avances en las tecnologías de compactación, el ensayo Proctor sigue siendo un componente importante en los procedimientos de control de calidad de la compactación de materiales no ligados. (Nazzal et al., 2014). Históricamente, resulta interesante que Ralph Proctor aclarara en 1948 que ni la resistencia al corte ni la consolidación de los suelos compactados son proporcionales al porcentaje de la Densidad Seca Máxima (DSM), por lo tanto, obtener un "95% de la DSM estándar" no asegura necesariamente el 95% de la resistencia al corte de un suelo. (Afsharikia, 2019)

La densidad es una propiedad relativamente fácil de medir sobre el terreno, y está vagamente correlacionada con propiedades de ingeniería más fundamentales. Sin embargo, no es un dato directo para el diseño estructural de las estructuras de pavimento y no está directamente relacionado con su desempeño. (Schwartz et al., 2017).

Las pruebas de densidad con densímetros nucleares son menos deseables por motivos de seguridad, reglamentación y costos. (Schwartz et al., 2017)

Consecuentemente, es necesario la exploración de un método de control de compactación que nos brinde información directamente relacionada con las propiedades mecánicas fundamentales para el diseño estructural de pavimentos, que sirva para la recepción de los trabajos de compactación y permita eliminar los riesgos relacionados al uso de densímetros nucleares.

1.3. OBJETIVOS GENERAL Y ESPECIFICOS.

1.3.1. OBJETIVO GENERAL.

Establecer una propuesta de metodología de control de calidad de la compactación de geomateriales utilizados en la construcción de pavimentos mediante el uso del deflectómetro de impacto ligero LWD, por sus siglas en Ingles.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- i.** Describir el funcionamiento del Deflectómetro de impacto ligero (LWD).
- ii.** Realizar una comparación de módulos medidos in situ contra los porcentajes de compactación obtenidos y especificados en proyectos viales.
- iii.** Redactar una propuesta de especificación para el control de calidad de compactación mediante el LWD en El Salvador.

1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES.

1.4.1. ALCANCES.

En la actualidad existen investigaciones recientes que han desarrollado metodologías para el control y aseguramiento de la calidad en la construcción de las capas de geomateriales que conforman la estructura de pavimento, enfocadas al control de propiedades mecánicas. Nuestro alcance cubrirá el la descripción y puesta en práctica del uso del deflectómetro de impacto ligero (LWD) en el control de compactación, haciendo uso del módulo objetivo obtenido en laboratorio, en dos proyectos en

ejecución en El Salvador y comparación entre los datos obtenidos en campo con el LWD y los obtenidos con densímetro nuclear.

Posterior a esta descripción e interpretación de resultados, se elaborará una propuesta para el control de compactación con LWD, con base a los nuevos estándares aprobados internacionalmente.

1.4.2. LIMITACIONES.

No se contó con la construcción de tramos controlados para la aplicación de la metodología, se utilizó los datos de la unidad de Control de Calidad de los proyectos visitados para el trabajo de campo, relacionado a densidad de campo y humedad al momento de la medición.

1.4.3. JUSTIFICACIÓN.

Como se ha podido constatar la compactación es un proceso fundamental para la construcción de capas estructurales de pavimentos y de otras actividades involucradas en la construcción de estos. Adicionalmente a esto, en la actualidad el control de compactación de los suelos se basa en la verificación de la densificación del suelo, esta verificación es realizada comparando la densidad obtenida en laboratorio mediante el ensayo Proctor (utilizando la energía de compactación directamente proporcional al tipo de estructura) versus la obtenida en campo posterior al proceso de compactación la cual, es obtenida con ensayo de cono y área o con densímetro nuclear; sin embargo, el control de compactación mediante la verificación de la densificación, no proporciona una propiedad mecánica del suelo que podamos relacionar con las características de los suelos que es utilizada para el diseño de los mismos.

Por tal motivo, es necesario conocer el desarrollo de las nuevas alternativas existentes en el área de pavimentos enfocadas a conocer la “rigidez” en sustitución de la densidad del suelo. Cabe mencionar que, el control de compactación de los suelos mediante la densidad ha sido ampliamente adoptado

debido a la facilidad y bajo costo para el “aseguramiento” de la calidad, sin embargo, en los últimos años ha existido desarrollo en equipos que, permiten conocer la rigidez del suelo compactado.

Por lo tanto, este documento tiene como fin el dar a conocer una de las alternativas de control de compactación de los suelos mediante el control de la rigidez, haciendo uso de un deflectómetro de impacto ligero (L.W.D.), realizando a su vez una propuesta metodológica para la implementación del control de rigidez en la construcción de pavimentos en el país.

2. CAPÍTULO 2. DEFLECTOMETRO DE IMPACTO LIGERO (LWD).

2.1. HISTORIA DEL LWD.

El desarrollo del método de análisis de suelos mediante LWD (*Light Weight Deflectometer*), a veces llamado LFWD (*Light Falling Weight Deflectometer*) comenzó en los años 50 del siglo XX. En 1957 se probó en Japón un LWD construido de forma similar al moderno (Sulewska, 2012).

El deflectómetro de impacto ligero (LWD) es un dispositivo portátil de caída de peso que apareció por primera vez en 1981 en Magdeburgo (Alemania) y fue desarrollado como dispositivo de ensayo in situ por el Instituto Federal de Investigación de Carreteras y la empresa HMP de Alemania. (Elhakim et al., 2014)

El LWD ha ganado aceptación y popularidad en varios países, como Estados Unidos, ya que existe un interés creciente en el uso del LWD como dispositivo de ensayo in situ para el control y el aseguramiento de calidad de la compactación del movimiento de tierras. (Elhakim et al., 2014).

El primer uso de la LWD en los Estados Unidos de América año 2005, se llevó a cabo en el Centro de Investigación y Desarrollo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. (ERDC), donde el deflectómetro portátil de caída de peso (PFWD), que ahora se conoce como LWD, se utilizó como herramienta de evaluación rápida de aeródromos para determinar la resistencia/CBR de los suelos de pavimento subyacentes (Ordaz, 2023).

Eventualmente debido a su versatilidad el equipo fue objeto de varios estudios, en el Reino Unido en se publicó un artículo llamado “Revisión del deflectómetro ligero para la evaluación rutinaria in situ de la rigidez de los materiales de los pavimentos”, publicado por la *National Academy of Sciences*. En el artículo se presenta una serie de investigaciones de laboratorio que demuestran la sensibilidad a la forma del contacto placa/superficie, así como las limitaciones en la interpretación de los picos de desplazamiento del dispositivo. En conclusión, se establece que se requiere una buena comprensión

del funcionamiento del dispositivo y una cuidadosa especificación de las variables de ensayo tanto para analizar los datos correctamente como para permitir la comparación entre conjuntos de datos. (Fleming, P. et al., 2007).

El interés sobre el equipo y su potencial uso en el Control de Calidad y Aseguramiento de la Calidad de la compactación de materiales en la construcción de pavimentos, generó la investigación del comportamiento del LWD para dicho fin, surgiendo investigaciones orientadas al aseguramiento de la calidad en la compactación basada en el módulo para materiales no ligados mediante el Deflectómetro Ligero (Afsharikia, 2019) y esfuerzos como los del DOT de Maryland con la investigación denominada “Estandarización de las Mediciones de Módulo Mediante Deflectómetro de Impacto Ligero para el Aseguramiento de la Calidad de la Compactación” (Schwartz et al., 2017).

2.1.1. EVOLUCIÓN DEL LWD EN LA INVESTIGACIÓN

En este apartado se pretende evaluar y mostrar el comportamiento en cuanto a la generación de documentos, artículos y publicaciones (interés) relacionadas al deflectómetro de impacto ligero para lo cual se ha hecho uso del Web of Science (<https://www.webofscience.com/>). Se adoptó realizar una búsqueda en todas las bases de datos disponibles, siendo las bases de datos las siguientes:

- Web of Science Core Collection
- Current Contents Connect
- Derwent Innovations Index
- Grants Index
- KCI-Korean Journal Database
- MEDLINE®
- ProQuest™ Dissertations & Theses Citation Index
- SciELO Citation Index

Utilizando las siguientes palabras claves: *Continuous Compaction Control*, *LFWD*, *Light Falling Weight Deflectometer*, *Light Falling Weight Deflectometer LFWD*, *Light Weight Deflectometer*, *Light Weight Deflectometer LWD*, *LWD*, *PFWD* Y *Soil Compaction Control LWD*.

Como resultado de la búsqueda se obtuvo un total de 352 publicaciones relacionadas con las palabras clave definidas, cabe destacar que, durante el análisis de la información las cinco áreas de investigación en donde más se han generado documentos relacionados con el deflectómetro de impacto ligero LWD son: ingeniería, tecnología de la construcción, instrumentos e instrumentación, ciencia de los materiales y transporte.

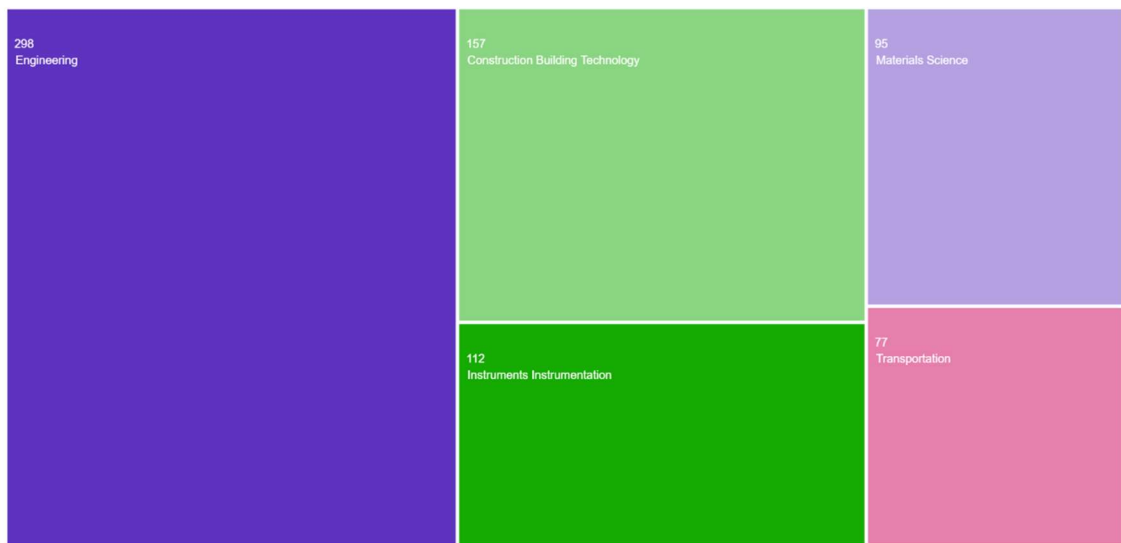


Figura 2.1.1-1 Diagrama de árbol, áreas de investigación.

De la **Figura 2.1.1-1** se puede comentar que, el 85% de las publicaciones está dentro del área de investigación de la ingeniería, el 45% tecnología de la construcción, 32% corresponde al área de instrumentos e instrumentación, 27% corresponde a la ciencia de materiales y el 22% cae en el área de investigación de transporte. Cabe aclarar que hay documentos que tienen aplicación en más de un área de investigación.

Respecto al tipo de documentos generado se tiene que el 60.23% corresponde a artículos, el 20.46% a documentos presentados en conferencias, el 14.49% tesis de disertación, artículos de acceso anticipado con un 3.98% y con un 0.85% correspondiente a revisiones de artículos, en este caso los porcentajes expresados son respecto a los 352 artículos analizados, ver **Figura 2.1.1-2**.

En relación con la ubicación geográfica en donde se han generado las publicaciones, tenemos que el 39.49% de las mismas tienen como país de origen Estados Unidos de América, seguidos de República de China con el 12.21%, teniendo en tercer lugar a India con un total de 7.10%, en estos tres países se concentra cerca del 60% de publicaciones analizadas. Para América latina tenemos a Chile y Brasil con un 1.36% y 1.71% respectivamente totalizando apenas un 3.07%. El resto de las ubicaciones pueden ser observadas en la **Figura 2.1.1-3**.

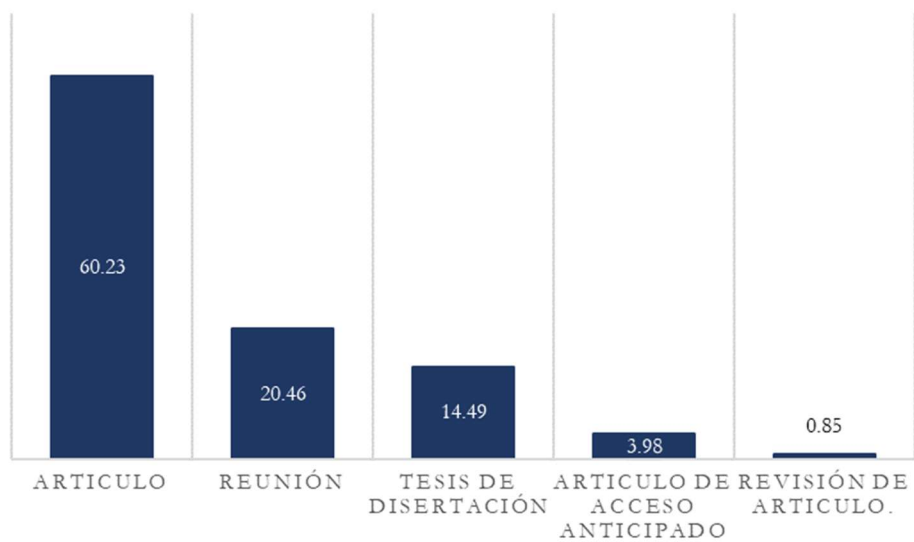


Figura 2.1.1-2 Tipo de documento porcentaje (%) de 352 publicaciones.

Teniendo en consideración todo el análisis de los documentos se puede ver claramente que en los últimos 5 años se ha mantenido el interés en investigaciones utilizando LWD. Esto coincide con el impulso observado para la adopción del equipo para el aseguramiento y control de calidad de compactación de geomateriales en la construcción de pavimentos (Schwartz et al., 2017). Estos esfuerzos han sido la base fundamental para el desarrollo de esta propuesta y han abierto la puerta a la creación de un método basado en una propiedad mecánica y no subjetiva.

Sin embargo, el interés y constante crecimiento en el desarrollo de investigación con el deflectómetro de impacto ligero radica en que, aunque todos los dispositivos portátiles tienen sus ventajas y desventajas, el LWD se ha revelado como la herramienta más aceptable, ya que conserva cierta flexibilidad en el protocolo de ensayo, como el tamaño variable de la placa, la magnitud de la carga y la recolección de datos, con el factor añadido e importante de que se asemeja más a la velocidad de carga y el área de una (única) rueda móvil, y funciona de forma similar a la FWD. (Fleming, P. et al., 2007)

2.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL LWD

El deflectómetro de impacto ligero (LWD) es un deflectómetro portátil que consta de una masa descendente y un sensor de medición de desplazamiento fijado en el centro de una placa de carga. (Nazzal et al., 2014).

El principio de trabajo del LWD consiste en simular las condiciones de carga del suelo (subrasante, subbase, base u otras) debidas a las ruedas de un vehículo en movimiento. (Sulewska, 2012).

El deflectómetro de impacto ligero (LWD) mide la deformación vertical causada por la caída de una masa que impacta contra una placa apoyada en el suelo (Kuttah, 2023).

Los principales componentes que conforman un deflectómetro de impacto ligero LWD, se pueden apreciar en la **Figura 2.2-1**, en la cual se presentan sus partes más comunes, siendo éstas las siguientes:

1. Vástago guía.
2. Mecanismo de fijación y liberación superior de masa de ensayo.
3. Masa de ensayo (10, 15 o 20 Kg).
4. Electrónica para comunicación y envío de datos (Bluetooth en algunos casos).
5. Celda de carga.
6. Amortiguadores.
7. Placa circular de carga con radio de 150mm o 300mm.
8. Sensor de deformación (geófono).
9. Llantas para movilización equipo en campo.
10. Geófonos adicionales (opcionales).

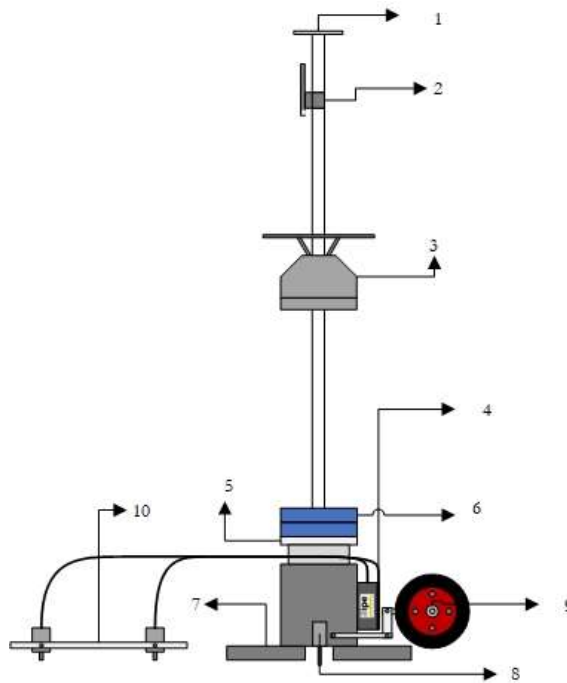


Figura 2.2-1 Esquema LWD marca 3ipe™.

El equipo funciona dejando caer la masa de ensayo desde una altura que genere la carga deseada, lo cual genera una deformación en el suelo que acompaña la placa apoyada sobre el mismo, algunos

equipos cuentan con celda de carga que permite definir de manera precisa la carga aplicada y otros la establecen como un valor constante, el objetivo principal de la prueba es la determinación de la máxima deformación y la carga máxima aplicada.

El sistema LWD-suelo es parecido a un sistema masa-resorte-amortiguador de dos grados de libertad, durante la carga y el rebote hasta el momento en que la carga de impacto se hace cero, tras lo cual el sistema se desacopla. (Schwartz et al., 2017). Ver **Figura 2.2-2**.

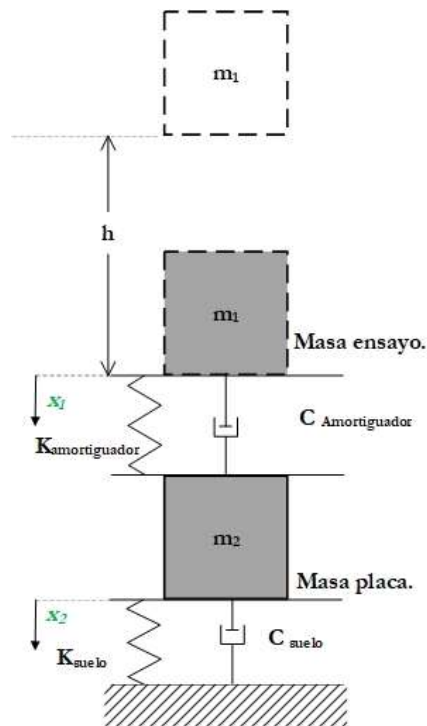


Figura 2.2-2 Esquema del movimiento LWD-suelo (Schwartz et al., 2017)

El ensayo consiste en liberar la masa desde la altura definida en la varilla guía con la ayuda del dispositivo de fijación/liberación de masa. Esta masa al impactar sobre los amortiguadores transmite una carga de pulso (similar a la que genera un vehículo en movimiento) sobre el suelo compactado o en estado natural. Un sensor de velocidad o un acelerómetro registran la velocidad o la aceleración de los movimientos de la placa o del suelo en función de la posición del sensor. La posición y el tipo del

sensor de deflexión son diferentes en los distintos dispositivos LWD. (Schwartz et al., 2017). Una vez finalizado el ensayo, se calcula el desplazamiento máximo mediante integraciones dobles/sencillas de las aceleraciones/velocidades. (Schwartz et al., 2017).

Los LWD se utilizan generalmente para determinar el módulo de las capas de subrasante o de base. En otras palabras, se utilizan para evaluar sistemas de una o dos capas, como se muestra en la **Figura 2.2-3**

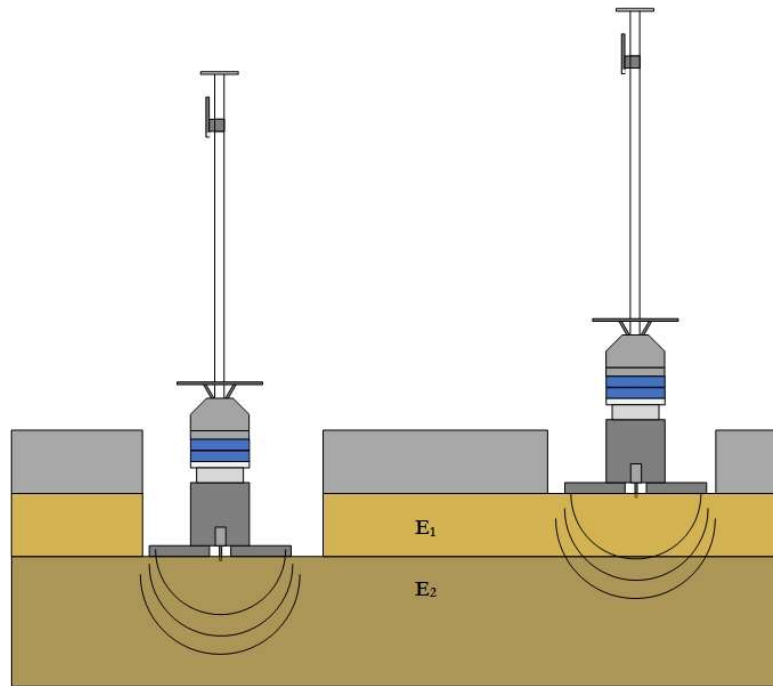


Figura 2.2-3 Ensayo LWD en una y dos capas

El módulo medido se calcula la ecuación de Boussinesq:

$$E = \frac{2k_s(1 - \nu^2)}{Ar_0}$$

Ecuación 2.2-1 Ecuación de Boussinesq

Donde:

$$k_s = \left| \frac{F_{m\acute{a}x.}}{\delta_{m\acute{a}x.}} \right|$$

$F_{m\acute{a}x.}$ Fuerza máxima del ensayo.

$\delta_{m\acute{a}x.}$ Deformación máxima registrada.

$A.$ Factor de distribución de esfuerzo.

$r_0.$ Radio placa.

Esta ecuación supone que, el medio de ensayo es continuo semi infinito linealmente elástico, isótropo y homogéneo. Se suponen dos de los parámetros necesarios para determinar el módulo, el factor de forma para la distribución de la tensión de contacto entre la placa y el suelo (A) y la relación de Poisson (ν). (Schwartz et al., 2017).

De igual forma, para un sistema de dos capas, Burmister (1945) propuso la siguiente fórmula donde E_1 es el módulo de la capa superior con un espesor de h y E_2 es el módulo de la capa subyacente, ver la expresión en **Ecuación 2.2-2**.

$$w_{0,0} = w_{0,h_e} + (w_{0,0} - w_{0,h}) = \frac{2(1 - \nu^2)F_{m\acute{a}x.}}{\pi r_0} \left\{ \frac{1}{E_2 \sqrt{1 + \left(\frac{h}{r_0} \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} \right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{r_0} \right)^2}} \right]}{E_1} \right\}$$

Ecuación 2.2-2 Burmister, cálculo para un sistema de dos capas

2.2.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA MEDICIÓN DE MÓDULO.

Existen diversos factores que pueden influir en el valor del módulo elástico que se obtenga haciendo uso del LWD, entre ellos el diámetro de la placa, la distribución de esfuerzos en la placa, la rigidez de la placa, los amortiguadores, ubicación del sensor de deformación, que cuenten con celda de carga o que la carga sea asumida. A continuación, se describen estos factores.

2.2.1.1. DIÁMETRO DE LA PLACA.

El rango de diámetros en los LWD oscila entre 100 – 300 mm. La selección del diámetro de la placa de carga es un factor significativo que influye en el módulo de deformación debido a la razón de la profundidad de influencia (Chaddock B & Brown A J, 1995; citado en Duddu & Chennarapu, 2022). Por lo general, la profundidad de influencia es igual a 1,0-1,5 veces el diámetro de la placa de carga. Se constata que la disminución del diámetro de la placa de carga conduce a un aumento del módulo, debido a la razón del aumento de las tensiones de contacto de la placa de carga. Vennapusa & White (2009) recomiendan el uso de diámetros de placa de 300, 200 y 100 mm para rangos de $E_{LWD} < 125$ MPa, $125\text{MPa} < E_{LWD} < 170\text{MPa}$ y $E_{LWD} > 170$, respectivamente.

2.2.1.2. RIGIDEZ DE LA PLACA.

El factor de rigidez de la placa depende de la forma de la distribución de carga (presión de contacto), la cual depende la rigidez de la placa y del tipo de geomaterial, como se muestra en la **Figura 2.2.1.2-1**.

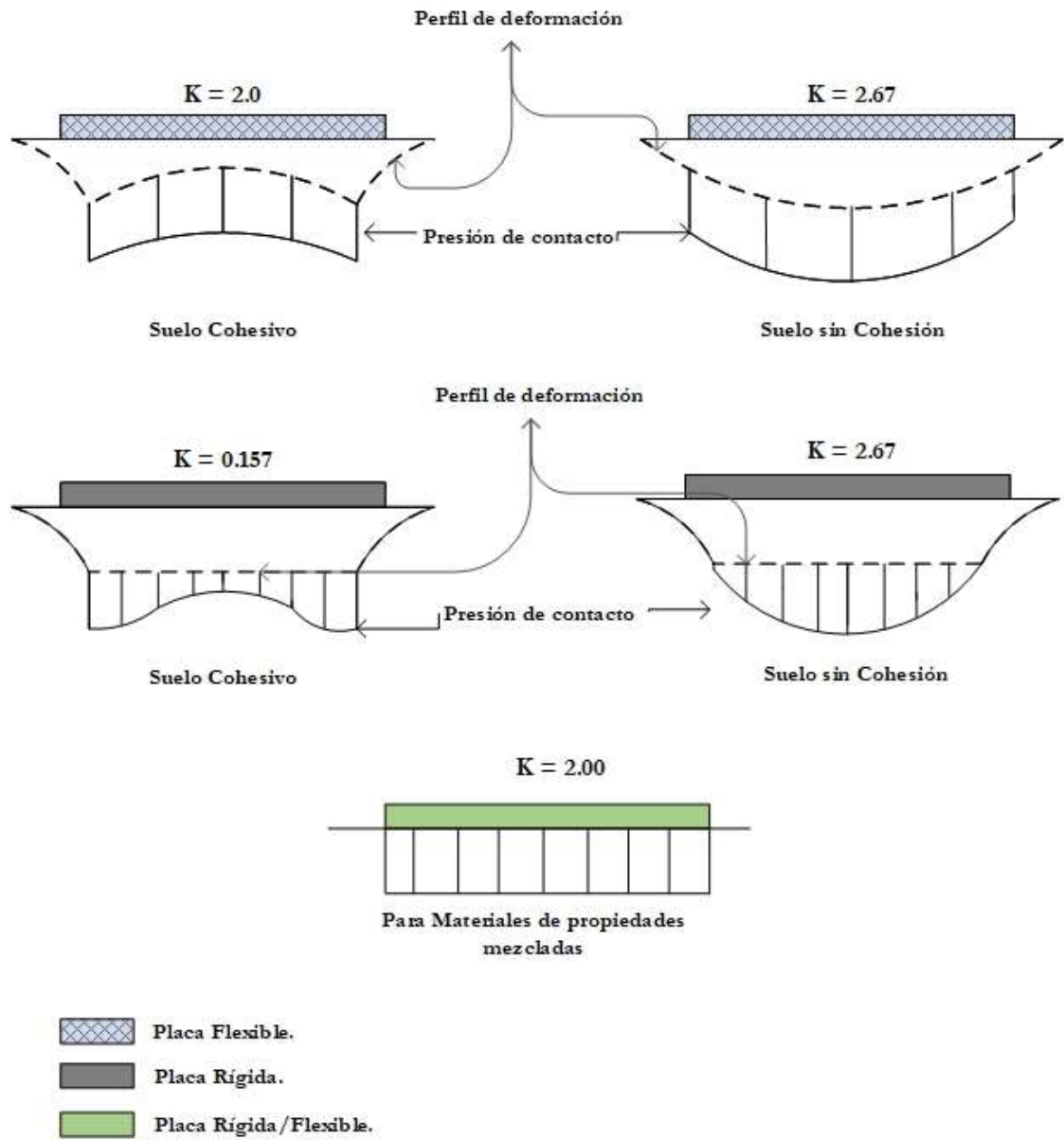


Figura 2.2.1.2-1 Presión de contacto, perfil de deflexión de la placa y factor de rigidez (K) (Duddu & Chennarapu, 2022)

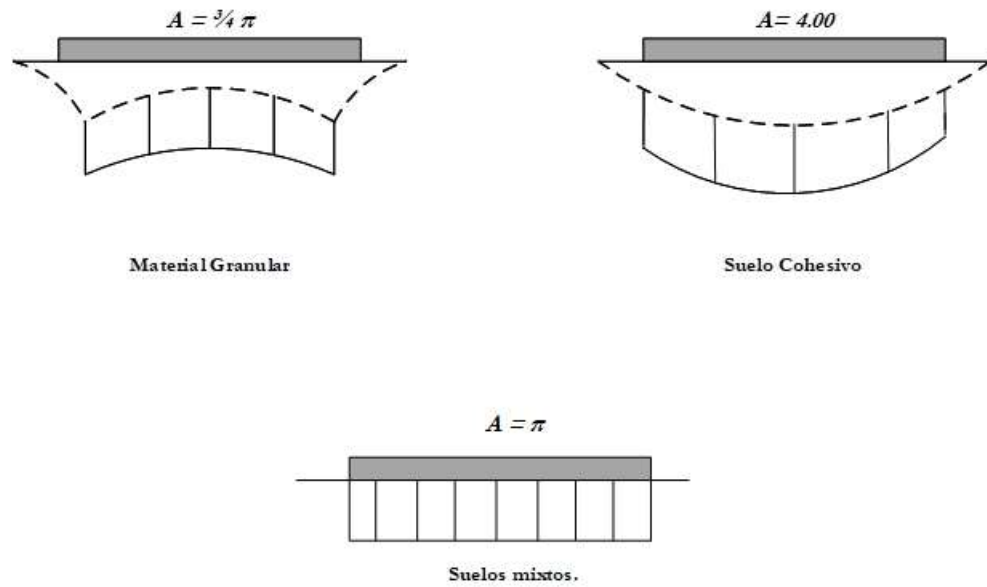


Figura 2.2.1.2-2 Factores de distribución A (Schwartz et al., 2017)

Borowicka (1936) propuso una solución analítica para evaluar la rigidez relativa de la placa, mediante la siguiente expresión:

$$K = \frac{E_p(1 - \nu_p^2)}{6E_s(1 - \nu_s^2)} \left(\frac{t_p}{r} \right)^3$$

Ecuación 2.2.1.2-1 Ecuación rigidez relativa placa. (Borowicka H, 1936)

Donde; K = Rigidez relativa de la placa de carga, E_p y E_s = Módulo de elasticidad de la placa de carga y del geomaterial compactado respectivamente (MPa), ν_p y ν_s = Relación de Poisson de la placa de carga y del geomaterial compactado respectivamente, t_p = Espesor de la placa de carga (m) y r = Radio de la placa de carga (m).

Para $K = 0$, la distribución de la tensión de contacto bajo la placa de carga es uniforme y se considera una placa flexible, $K > 0$, la distribución de la tensión de contacto en los bordes aumenta hasta el infinito y varía en el centro de la placa de carga, y $K = \infty$, la tensión de contacto en el centro de la placa de carga es la mitad de la tensión aplicada y se considera una placa perfectamente rígida.

2.2.1.3. ESFUERZO DE CONTACTO CON LA PLACA.

Se supone que el esfuerzo de contacto entre la placa de carga y los geomateriales compactados es uniforme o similar al de una parábola o una parábola inversa para una placa rígida sobre un semi-espacio elástico (como se muestra en la **Figura 2.2.1.2-1** y **Figura 2.2.1.2-2**). Debe evaluarse la aplicabilidad de la teoría del semi-espacio elástico lineal al dispositivo LWD, así como la naturaleza de la tensión de contacto entre la placa de carga y los geomateriales compactados (Duddu & Chennarapu, 2022).

La fuerza de impacto y el diámetro de la placa de carga del LWD están diseñados para proporcionar una tensión de contacto máxima en el rango de 100-200 kPa, simulando el pulso de tensión aproximado en una subrasante o capa de base típica causado por la carga de tráfico sobre un pavimento acabado. (Nazzal, M. D. et al., 2007; como citado en Duddu & Chennarapu, 2022).

Se ha observado que la evaluación del esfuerzo de contacto bajo la placa de carga LWD se ve afectado por el diámetro de la placa de carga. Por lo tanto, el área de contacto tiene un impacto significativo en el E_{LWD} . (Duddu & Chennarapu, 2022).

2.2.1.4. TASA DE APLICACIÓN DE LA CARGA Y AMORTIGUADOR.

La tasa de aplicación de la carga puede regularse modificando la rigidez del amortiguador entre el peso de caída y la placa de carga de contacto y, por tanto, puede afectar al módulo de deformación medido. Se evaluó en laboratorio la influencia de la temperatura en los amortiguadores LWD y, por tanto, en las características de carga. Independientemente de la temperatura del amortiguador, la rigidez permaneció constante, el único cambio observable fue la duración del impulso de carga, que aumentó con la temperatura del amortiguador o cojín de caucho de 18 a 20 milisegundos. Esto era de esperar, ya que los amortiguadores se ablandan ligeramente cuando se calientan (Fleming, P. et al., 2007).

2.2.1.5. UBICACIÓN Y TIPO DE SENSOR DE DEFORMACIÓN.

Los distintos fabricantes de LWD proporcionan diversos sensores y su posición incorporada. Por ejemplo, el geófono se utiliza en contacto directo con el geomaterial compactado a través de un orificio en el centro de la placa de carga para medir la velocidad del geomaterial compactado, otros utilizan un acelerómetro dentro de la placa de carga. Ver **Figura 2.2.1.5-1**.

Hay dos tipos de equipos y cada uno cuenta con su estandarización ASTM:

- ASTM E 2583 *Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD)*.
- ASTM E 2835 *Standard Test Method for Measuring Deflections using a Portable Impulse Plate Load Test Device*.

Con base a comparaciones realizadas entre equipos que poseen o no celda de carga, si cuentan con un geófono o acelerómetro en la placa para la determinación de la deformación máxima, se puede mencionar que los módulos medidos con equipo con geófono al centro de la plana resultaron ser entre 1.75 y 2.2 veces mayores a los obtenidos en un equipo que obtenga deformación mediante un acelerómetro en la placa de carga, esto debido a que se espera que las deflexiones sean más altas, en estos últimos. (Nazzal et al., 2014). La adopción de un valor de fuerza aplicada constante no da lugar a variaciones significativas en el módulo estimado, ya que los dispositivos LWD se utilizan habitualmente para ensayar capas compactadas rígidas. (White et al., 2007).

Además, los LWD contruidos según las especificaciones ASTM E2583 y ASTM E2835 siempre producirán resultados diferentes (porque se basan en configuraciones de sensores de LWD diferentes, deformaciones del suelo frente a deformaciones de la placa), y la relación entre estos resultados será difícil de predecir (Stamp & Mooney, 2013).



Figura 2.2.1.5-1 Ubicación sensores en los LWD

Sin embargo, al tener conciencia de la importancia de la compactación en el desempeño de los pavimentos, y la importancia en su fase de construcción donde deben realizarse estrictos controles de calidad y tomando en consideración todos los esfuerzos realizados para dejar de lado la “subjetividad” en la medición de propiedades de los suelos, optamos por el uso de equipos capaces de medir la carga máxima aplicada en cada ensayo, así como también la deformación máxima a través del centro de la placa directamente con el suelo, siendo estos equipos los estandarizados por la ASTM E 2583 Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD).

2.3. EQUIPO SELECCIONADO PARA MEDICIONES DE CAMPO.

Con el objetivo de realizar la comparación de módulos medidos en campo versus los porcentajes de compactación en campo se utilizó un equipo LWD en los proyectos a los que se tuvo acceso para hacer las mediciones.

Tal como lo mencionamos en el apartado **2.2.1.5**, para nuestras mediciones seleccionamos un equipo que cumpliera con el estándar ASTM E 2583, seleccionando el equipo Deflectómetro de Impacto Ligero 3ipe™. Ver *Tabla 2-1 Especificaciones técnicas equipo 3ipe™*.

La empresa 3ipe™ es una empresa chilena que se dedica a la ingeniería de pavimentos, aplicando conocimientos y experiencia. Dispone de equipos de evaluación de la condición estructural y funcional, pero lo que ofrecen va más allá de las mediciones. Además de la división de consultoría, en

la cual se hace diseños y gestión de pavimentos, poseen con una división dedicada a productos para pavimentación, y una división dedicada a equipos. La división de equipos desarrolla, comercializa y brinda servicios de calibración de equipos de evaluación de pavimentos, entre ellos el LWD desarrollado y construido por 3ipe™.

Tabla 2-1 Especificaciones técnicas equipo 3ipe™.

Especificaciones del LWD 3ipe™	
Peso del equipo sin la masa de ensayo:	20kg.
Masa de ensayo:	10kg (con acoples extras opcionales de 5kg), para sumar 15 o 20kg
Diámetro de la placa:	300 - 150 mm
Material de la placa:	Aluminio dureza 2005
Material del resto del equipo:	Acero Inoxidable y aluminio.
Sensor de carga:	Capacidad máxima de 30KN, error máximo de 0.30%
Sensor de deflexión:	Geófono. Rango de 2mm resolución 1µm. Opcional agregar 2 sensores adicionales.
Alimentación de energía:	Baterías recargables mediante cable USB
Transferencia de datos:	Puerto Bluetooth
Autonomía:	> 15 horas.



Figura 2.3-1 Equipo LWD 3ipe™.

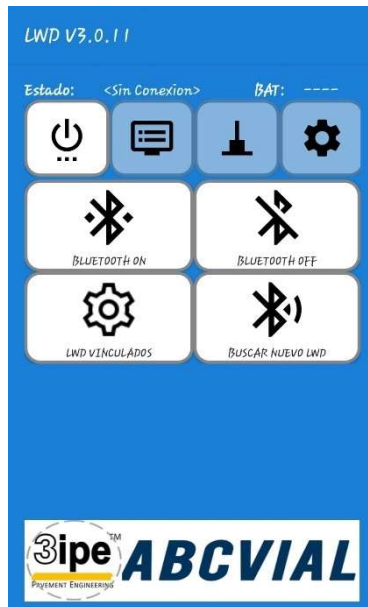


Figura 2.3-2 Ambiente aplicación equipo LWD 3ipe™.

El equipo funciona a través de una aplicación disponible para sistema Android, que puede ser instalada en cualquier teléfono inteligente que tenga la opción de conexión a través de puerto Bluetooth, la aplicación se llama LWD 3.0.11 ver **Figura 2.3-2** y **Figura 2.3-3**

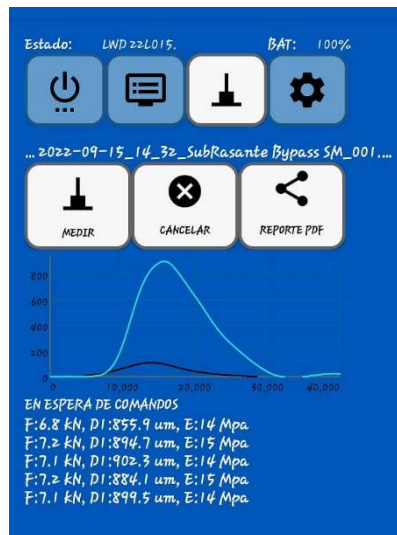


Figura 2.3-3 Ambiente medición aplicación LWD 3ipe™.

La aplicación permite a su vez el establecimiento de valores de Poisson para el material a medir, así como también el factor de distribución del esfuerzo. Toda la información se almacena en la aplicación y posteriormente se puede obtener un archivo .csv para análisis de los datos. Adicionalmente se tiene el modo calibración el cual se utiliza con el soporte técnico de 3ipe™ para la verificación de las constantes y resultados, de igual forma se puede utilizar este modo para obtener el registro de toda la historia de cada ensayo, es decir, se puede registrar cada golpe y su historia de carga y deformación. Ver **Figura 2.3-4** y **Figura 2.3-5**.

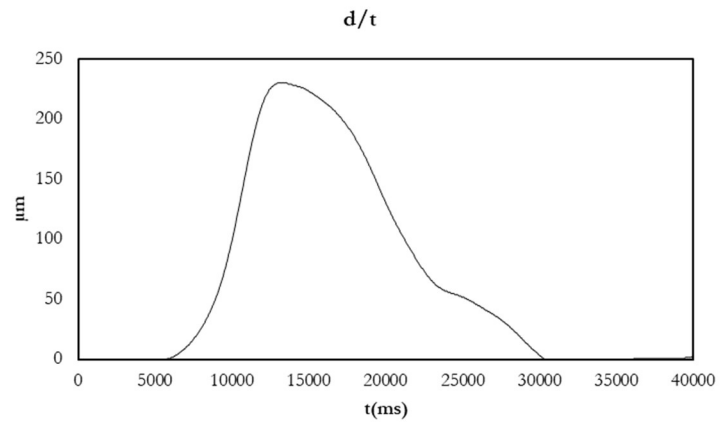


Figura 2.3-4 Deformación/tiempo ensayo LWD 3ipe™ (Fuente: Elaboración propia)

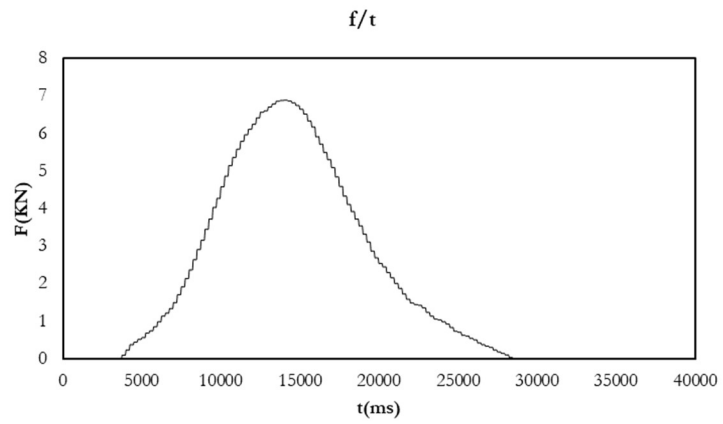


Figura 2.3-5 Fuerza/tiempo ensayo LWD 3ipe™ (Fuente: Elaboración propia)

3. CAPÍTULO 3. CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD (QC/QA) DE LA COMPACTACIÓN UTILIZANDO EL LWD.

3.1. GENERALIDADES.

El estado de la red de carreteras de un país condiciona su desempeño económico, industrial, social y cultural. Las exigencias actuales sobre el estado de las carreteras requieren que los usuarios circulen en forma segura y eficiente a altas velocidades. Por tal motivo en el diseño y construcción de los pavimentos de estas carreteras se debe tomar en consideración un adecuado control y aseguramiento de la calidad, de manera de que se proporcione pavimentos que duren mucho tiempo, que requieran menor costo de mantenimiento y que cuesten lo menos posible. Para obtener esto la compactación de las capas granulares de la estructura de pavimento representan un factor directamente proporcional. (Dwivedi & Suman, 2023).

Para mejorar las características de ingeniería de las carreteras es importante controlar la compactación durante la construcción. El objetivo de la compactación de las capas de la carretera es mejorar sus propiedades mecánicas (Dwivedi & Suman, 2023).

Como se ha comentado anteriormente, la mayoría de las actividades relacionadas a compactación de capas de geomateriales para estructuras de pavimento están siendo controladas mediante la densificación, es decir comparar la densidad máxima obtenida en laboratorio versus la que se pueda medir en campo después de un patrón (tren) de compactación definido. Para esto se toma en cuenta la humedad óptima definida en laboratorio. Esta verificación de la densificación del suelo se realiza por medio de ensayos como el plato y cono de arena o utilizando un densímetro nuclear (NDG). Según los expertos, los métodos actuales de control de calidad basados en la verificación de la densificación requieren mucha mano de obra, son lentos, peligrosos (NDG), de precisión incierta e inadecuados para situaciones en las que los materiales de la obra varían a lo largo de las secciones analizadas. (*Soil Stiffness Gauge for Soil Compaction Control, FHWA, 1998*).

Los métodos de aseguramiento de la calidad de la compactación basados en la densidad que utilizan densímetros nucleares (*Nuclear Device Gauge*, NDG) han sido la práctica convencional durante muchos años. La densidad es una propiedad relativamente fácil de medir sobre el terreno y se correlaciona vagamente con las propiedades de ingeniería más fundamentales. Sin embargo, la densidad no es un dato directo para el diseño estructural de los pavimentos y no está directamente relacionada con el desempeño del mismo. El módulo elástico es el dato básico de los materiales necesario para el diseño estructural de los pavimentos. (Afsharikia, 2019).

En general, se cree que el LWD y otros dispositivos para medición de rigidez (como el *Geogauge*) son dispositivos extravagantes. Sin embargo, estos dispositivos se utilizan habitualmente en la práctica para estimar la rigidez o el módulo de las capas de pavimentos y para el control de calidad durante la construcción de las capas de los mismos. Dado que estos dispositivos son mejores que los ensayos destructivos en muchos aspectos, los usuarios pueden juzgar rápidamente la calidad, la versatilidad de realizar cambios durante la construcción sin demora y terminar el proyecto a tiempo. (Dwivedi & Suman, 2023).

3.2. DESARROLLO DE PROCEDIMIENTO DE QC/QA UTILIZANDO LWD.

Como se ha establecido existe una relación directa entre la compactación de geomateriales de las capas de pavimentos y su desempeño durante su vida útil, de igual forma se tiene un consenso en la industria sobre la necesidad de utilizar métodos más adecuados para llevar a cabo el QC/QA de esta actividad.

(Nazzal et al., 2014) en su investigación *Non-Nuclear Methods for Compaction Control of Unbound Materials* (Métodos no nucleares para el control de la compactación de materiales no ligados), comprobó que la mayoría de DOT (*Department of Transportation*) de EE. UU. de América utilizaba métodos de control de compactación mediante la verificación de la densidad y humedad mayormente con densímetros nucleares. También concluyó que La mayoría de los DOT están interesados en aplicar especificaciones

basadas en la rigidez y la resistencia para el control de la compactación de materiales no ligados, pero pocos DOT habían desarrollado tales especificaciones. A ese momento únicamente los Departamentos de Transporte de Indiana y Minnesota habían aplicado ampliamente especificaciones basadas en la rigidez y la resistencia, y ambos utilizaban el DCP (Cono de penetración dinámico, por sus siglas en inglés) y el LWD en esas especificaciones.

Posteriormente Sadaf Khosravifar (2015) condujo la investigación denominada *Large-scale controlled-condition experiment to evaluate light weight deflectometers for modulus determination and compaction quality assurance of unbound pavement materials* (Experimento de condiciones controladas a gran escala para evaluar Deflectómetros ligeros para la determinación del módulo y el aseguramiento de la calidad de compactación de materiales de pavimentos no ligados). Se estudiaron cuidadosamente las respuestas dinámicas de tres LWD diferentes a través de un entorno experimental controlado a gran escala. Se diseñaron y construyeron tres grandes trincheras de prueba de 4.5 x 4.5 m en las condiciones de humedad y densidad deseadas para simular escenarios de calidad de construcción aceptable (trincheras 2 y 3) y deficiente (trincheras 1). Las trincheras se construyeron cuidadosamente utilizando dos tipos diferentes de suelos de subrasante cohesivos y no cohesivos y un tipo de base de agregado granular. Las trincheras de prueba estaban equipadas con sensores ambientales in situ para controlar las variaciones posteriores a la compactación en el contenido volumétrico de agua y las celdas de temperatura y presión para evaluar la zona de influencia de la carga LWD.

Como parte de la investigación se realizaron pruebas de módulo resiliente, MR, en el material compactado en condiciones óptimas, así como en las condiciones de construcción en terreno. Se evaluaron modelos constitutivos de materiales basados en la mecánica de suelos no saturados en varios suelos cohesivos y no cohesivos para comprobar su idoneidad para el trabajo de aseguramiento de la calidad basado en LWD. Los resultados mostraron que ninguno de los modelos existentes eran lo

suficientemente precisos como para ser utilizados como base para la determinación del módulo objetivo.

Esto condujo al nuevo enfoque de utilizar las pruebas LWD directamente en el molde de compactación Proctor para encontrar el módulo de campo objetivo en una condición de humedad dada. A continuación, se enumeran los beneficios de esta práctica según el estudio:

- a. El ensayo proporciona información valiosa sobre la respuesta del suelo a la humedad, la densidad y los esfuerzos, que puede utilizarse para adaptar los criterios de compactación sobre el terreno. Adicionalmente se observó que para suelos cohesivos se tuvo un aumento del módulo con la disminución de la humedad hasta un punto abajo del % de compactación, a partir del cual el módulo disminuía, para los suelos no cohesivos mostraron un aumento continuo del módulo con la disminución del contenido de humedad. Para la base de agregado granular no se observó una tendencia clara con los cambios de humedad.
- b. De los resultados se desprende una fuerte correlación con el ensayo de módulo resiliente en laboratorio. Los valores de MR a los mismos niveles de esfuerzo fueron superiores a los de las pruebas de LWD en molde debido principalmente a las suposiciones en la relación de Poisson. Sin embargo, la correlación fue muy fuerte con valores R de 0,89, 0,79 y 0,73 para cada uno de los equipos utilizados.
- c. El beneficio más importante que se obtiene de la prueba es encontrar el módulo de campo objetivo en unas condiciones de humedad y densidad determinadas.

La investigación realizada por Khosravifar (2015) abrió la puerta para que Schwartz et al. (2017) continuaran con la investigación denominada *Standardizing lightweight deflectometer modulus measurements for compaction quality assurance* (Estandarización de las mediciones del módulo del deflectómetro de impacto ligero para garantizar la calidad de la compactación). En la cual se realizaron validaciones de campo en proyectos en ejecución con el objetivo de verificar que los procedimientos propuestos

fueran adecuados. El resultado final de esta investigación fue la propuesta de dos procedimientos para el establecimiento del QC/QA de geomateriales utilizando el LWD:

- *Laboratory determination of Target Modulus using LWD drops on compacted proctor mold.* (Determinación en laboratorio del Módulo Objetivo Mediante LWD en molde de compactación Proctor).
- *Compaction Quality Control Using Light Weight Deflectometer (LWD).* (Control de Calidad de la Compactación Mediante Deflectómetro de -impacto Ligero LWD).

Concluyendo que, las mediciones de LWD sobre molde Proctor para la determinación de módulos objetivos proporciona una transición suave de los métodos basados en la densidad a los basados en el módulo. Asimismo, es aplicable a una variedad de geomateriales incluyendo subrasantes y bases químicamente estabilizadas y no estabilizadas. Adicionalmente el método es rentable y no aumenta significativamente el trabajo de campo. Posteriormente Afsharikia & Schwartz (2018) continuaron con la implementación de los procedimientos recomendados en la fase de estandarización.

3.2.1. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO OBJETIVO MEDIANTE LWD UTILIZANDO MOLDE DE COMPACTACIÓN PROCTOR.

Con base a lo observado por Khosravifar (2015), respecto al establecimiento de un módulo objetivo relacionado al módulo resiliente, se propuso la medición directa del LWD sobre el molde Proctor, con el objetivo de determinar un módulo “objetivo” haciendo uso del procedimiento ya estandarizado para la determinación de la densidad máxima y el porcentaje óptimo de compactación.

El módulo del suelo se obtiene a partir de la teoría de la elasticidad para un cilindro de material elástico con deflexiones laterales limitadas. En este análisis se asumió que (a) el suelo es un material elástico, (b) la deformación se produjo sólo en el material del suelo y no en la cimentación de hormigón rígido subyacente, y (c) la carga de impacto fue cuasi-estática. (Schwartz et al., 2017).

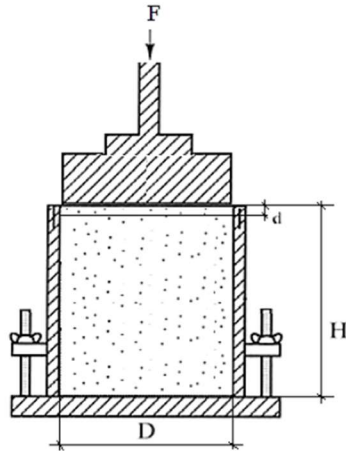


Figura 3.2.1-1 Esquema medición LWD sobre Molde Proctor (Afsharikia & Schwartz, 2018).

Para un material isotrópicamente elástico, las relaciones tensión-deformación para las condiciones axialmente simétricas en el molde Proctor bajo carga LWD son las siguientes

$$\varepsilon_h = \frac{1}{E}(-v\sigma_z + (1 - v)\sigma_h)$$

En donde:

$\sigma_z, \varepsilon_z =$ esfuerzo y deformación axial.

$\sigma_h, \varepsilon_h =$ esfuerzo horizontal, radial.

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - 2v\sigma_h)$$

Para el caso de la deformación unidimensional donde la deformación unitaria en las direcciones laterales puede considerarse nula:

$$\varepsilon_h = \frac{1}{E}(-v\sigma_z + (1-v)\sigma_h) = 0$$

$$\rightarrow \sigma_h = \frac{v}{1-v}\sigma_z$$

Reemplazando σ_h en la ecuación ε_z :

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left(\sigma_z - 2v\frac{v}{1-v}\sigma_z\right)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}\left(1 - \frac{2v^2}{1-v}\right)$$

En donde:

$$\varepsilon_z = \frac{\text{Deflexión}}{\text{longitud}} = \frac{d}{H}$$

$$\sigma_z = \frac{\text{fuerza}}{\text{área}} = \frac{F}{\frac{\pi D^2}{4}}$$

$v = \text{Coeficiente de Poisson}$

$H = \text{Altura del molde}$

$F = \text{Fuerza aplicada por el LWD}$

$d = \text{deflexión medida por el LWD}$

Por lo tanto, el módulo de elasticidad en el molde Proctor viene dado por:

$$E = \left(1 - \frac{2v^2}{1-v}\right) \frac{4H}{\pi D^2} \times \frac{F}{d}$$

Ecuación 3.2.1-1 Módulo en molde Proctor.

Es de esta manera que se propone obtener el módulo en cada punto de humedad utilizado para la determinación de la curva Proctor para la obtención del contenido óptimo de humedad.

De igual forma se hace la sugerencia de valores del coeficiente Poisson según el tipo de material que se esté evaluando, esto según la filosofía MEPDG³, ver **Tabla 3.2-1**

Tabla 3.2-1 Valores típicos de coeficiente Poisson (MEPDG) (Afsharikia & Schwartz, 2018)

Material	Rango de valores.	Valor Típico
Material granular no tratado	0.30 - 0.40	0.35
Material granular tratado con cemento	0.10 - 0.20	0.15
Material fino tratado con cemento	0.15 - 0.35	0.25
Material estabilizado con cal	0.10 - 0.25	0.20
Arena suelta o Arena Limosa	0.20 - 0.40	0.30
Arena densa	0.30 - 0.45	0.35
Arcillas blandas saturadas	0.40 - 0.50	0.45
Limo.	0.30 - 0.35	0.32
Arcilla no saturada.	0.10 - 0.30	0.20
Arcilla arenosa.	0.20 - 0.30	0.25
Arena de grano grueso.	0.15	0.15
Arena de grano fino	0.25	0.25

3.2.2. CONTROL DE CALIDAD DE LA COMPACTACIÓN MEDIANTE DEFLECTÓMETRO DE -IMPACTO LIGERO LWD.

Esta es la propuesta de procedimiento para la implementación del QC/AC definiendo como primer paso el módulo objetivo en el molde de compactación Proctor. La propuesta consiste en:

1. Realizar la medición en campo con el LWD, obtener los valores de deflexión máxima y carga máxima por ensayo, acorde a la norma ASTM E 2583 o ASTM E 2835 según el equipo que se esté utilizando,
2. Registrar la información por punto, y

³ MEPDG: *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide*

3. Proceder al cálculo de los módulos involucrados en el proceso.

El módulo de campo se calcula mediante la ecuación de Boussinesq en un semi-espacio, suponiendo que el medio de ensayo es un continuo semi-infinito lineal elástico, isótropo y homogéneo:

$$E_{\text{campo}} = \frac{2k(1 - \nu^2)}{Ad}$$

Ecuación 3.2.2-1 Módulo de campo.

E_{campo} = Módulo de campo

k = promedio de la rigidez del suelo = F/δ según la medida del LWD.

F = Carga máxima aplicada con el LWD.

δ = Máxima deflexión medida con el LWD.

A = Factor de distribución del esfuerzo.

ν = Coeficiente de Poisson.

d = Radio de la placa.

El módulo objetivo para la subrasante: se supone que la capa de subrasante tiene una extensión infinita en las direcciones horizontal y vertical descendente. Por lo tanto, el módulo objetivo equivale al módulo objetivo del material con un contenido de humedad determinado como se describió en numeral **3.2.1**.

Para el módulo de superficie objetivo para capas base-Según la Guía AASHTO para el Diseño de Estructuras de Pavimento (AGDPS⁴), la deflexión total de la superficie directamente bajo la carga

⁴ AGDPS: *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*

circular (placa LWD) es la suma de la deformación que ocurre en la capa superior e inferior (Schwartz et al., 2017) Cuando se evalúa una capa base de espesor finito, el módulo objetivo obtenido en la sección 3.2.1 debe corregirse utilizando la siguiente ecuación:

$$E_{\text{Objetivo-Corregido}} = 1 / \left\{ \frac{1}{E_2 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{h}{d} \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} \right)^2} \right]} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{d} \right)^2}} \right]}{E_1} \right\}$$

Ecuación 3.2.2-2 Módulo por capa corregido.

Donde:

$E_{\text{Objetivo-Corregido}}$ = Módulo corregido para el espesor finito

E_2 = Módulo “fundación”, medido con el LWD antes de la colocación de la capa superior.

E_1 = Módulo objetivo definido en el molde Proctor.

h = Espesor de la capa.

d = Diámetro de la placa LWD utilizado en la medición.

Posterior a la obtención de los módulos medido y corregido por capa finita, se procede a la comparación entre los mismo, tal cual fuera una comparación de densidades.

3.3. QC/QA BASES GRANULARES CON RAP (RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT AGGREGATE).

La utilización de RAP en la rehabilitación de pavimentos es una práctica ampliamente utilizada en El Salvador, formando esta parte de las especificaciones de mantenimiento rutinario y periódico del FOVIAL. Bajo el código MR0313 (Condiciones técnicas CT, FOVIAL 2024).

Este trabajo consiste en escarificar en el sitio la capa de rodadura asfáltica, base granular y/o subrasante, incorporando y mezclando un material estabilizante, agua y material de aporte si fuera necesario, para después homogenizar, mezclar, uniformizar, conformar y compactar la mezcla hasta obtener una capa compactada con el espesor indicado.

En cuanto al QC/QA de la capa construida con RAP, las CT establecen La base reciclada y estabilizada con cemento, cal o emulsión deberán obtener como mínimo el 95% del P.V.S.M. (Peso Volumétrico “Densidad” Seco Máximo) según AASHTO T-180. Para la verificación se permite el uso de cono de arena y Densímetro Nuclear (NDG⁵).

Esta densidad seca que representa las condiciones del campo se compara con la densidad seca máxima objetivo obtenido a partir del ensayo Proctor que se realiza en el laboratorio. Sin embargo, en el caso de que el árido no ligado se cree a partir de RAP, el NDG no proporciona resultados precisos para las mediciones del contenido de humedad (Viyant et al., 2004; como citado en Akmaz et al., 2020). Esto se debe a que el contenido asfalto de los áridos dentro del RAP contiene compuestos de hidrocarburos, que absorben los rayos gamma de la fuente radiactiva y afectan a los resultados del contenido de humedad (Smith & Diefenderfer, 2008; como citado en Akmaz et al., 2020), Por lo tanto, la densidad seca calculada a partir del equipo NDG también resulta inexacta.

Con el objetivo de eliminar la incertidumbre e inexactitud en el cálculo de la densidad de campo mediante los NDG, la alternativa de utilizar el LWD en el control de compactación de las capas de agregados con RAP, podría ser una alternativa viable.

⁵ NDG: *Nuclear Density Gauge*

3.4. ESPECIFICACIONES EXISTENTES.

3.4.1. SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTE DE MÉXICO.

En diciembre del 2020 la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) de México, emite la EP-04 “Especificación Particular para Uniformizar el Uso del Equipo Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD) tanto en Campo como en Laboratorio, Como Herramienta para el Control de la Compactación”. Esta especificación describe el procedimiento para el manejo del equipo LWD para ser utilizado en el control de compactación en campo para terracería o pavimentos. Tomando como base la norma ASTM E 2835 y la norma TP123-01 propuesta por (Schwartz et al., 2017) publicada en AASHTO.

De esta forma, México se convirtió en el primer país en estandarizar el uso del LWD para trabajos de compactación.

3.4.2. SOCIEDAD ESTADOUNIDENSE PARA ENSAYOS Y MATERIALES (ASTM).

En noviembre de 2022 la Sociedad Estadounidense para Ensayos y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) aprobó el estándar ASTM E 3331-22a *Measuring Target Modulus Using Light Weight Deflectometer (LWD) on Compacted Proctor Mold Samples* (Medición del módulo objetivo utilizando un deflectómetro de impacto ligero (LWD) en muestras compactadas de molde Proctor). Publicada en diciembre del mismo año.

Este método de ensayo describe el procedimiento para determinar el módulo objetivo (o deflexión) necesario para la compactación control de calidad de geomateriales utilizando caídas del deflectómetro de peso ligero (LWD) cae sobre un molde Proctor compactado en el laboratorio.

El nuevo estándar está basado en la investigación desarrollada por Schwartz, C., Afsharikia, Z., & Khosravifar, S. (2017). *Standardizing Lightweight Deflectometer Modulus Measurements for Compaction Quality Assurance*.

Los documentos de referencia de este nuevo estándar son:

- **ASTM D698** Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)).
- **ASTM D1557** Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))
- **ASTM E2583** Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD).
- **ASTM E2835** Standard Test Method for Measuring Deflections Using a Portable Impulse Plate Load Test Device
- **AASHTO T 99** Standard Method of Test form Moisture Density Relations of Soils Using a 2.5Kg Rammer and 305 mm. Drop.
- **AASHTO T 180** Standard Method of Test form Moisture Density Relations of Soils Using a 4.54Kg Rammer and 457 mm. Drop.
- **AASHTO T 265** Standard Method of Test for laboratory Determination of Moisture Content of Soils.

3.5. FUTURO DEL QC/QA COMPACTACIÓN DE SUELOS.

Los objetivos de la implementación del QC/QA son el de mejorar la calidad en el trabajo de movimiento de tierras, reducir los costes del ciclo de vida, otorgar la responsabilidad de la calidad al contratista y reducir los conflictos. (Zhang et al., 2022).

Los métodos convencionales de compactación, que se basan en análisis de predicción, simulación y en análisis de factores de influencia antes de la construcción, supervisión in situ durante la construcción y pruebas puntuales posteriores a la compactación, tienen las siguientes limitaciones.

- Las pruebas de muestreo presentan desventajas obvias de muestreo puntual, mediciones destructivas, baja eficiencia, alto costo y mayor requerimiento de personal técnico. No es posible obtener la calidad de compactación de toda el área de trabajo, ni pueden satisfacer las necesidades reales de la construcción mecanizada a gran escala. (Xu & Chang, 2016).
- La supervisión manual es propensa a errores de juicio, escasa precisión de control y con considerable influencia humana. (Liu et al., 2016).
- Los análisis de predicción y simulación, así como el análisis de los factores de influencia antes de la construcción, no son oportunos. Además, los métodos convencionales de compactación pueden interferir con la posterior operación de construcción. (Liu et al., 2020).

Los métodos de compactación digital se han convertido en una solución a algunos de los problemas asociados a los métodos de compactación convencionales. Este tipo de método realiza el QC/QA mediante la detección continua de la calidad de la compactación y un constante monitoreo en tiempo real de los parámetros de compactación. Con la profundización de la investigación y la aplicación práctica de diversos tipos de proyectos, se han propuesto una tras otras varias tecnologías representativas de compactación digital, como el control continuo de la compactación (Continuous Compaction Control CCC), el Monitoreo de la compactación integrada en el rodillo (compactador) (Roller-Integrated Compaction Monitoring RICM) y las tecnologías de compactación inteligente (Intelligent Compaction IC). (Zhang et al., 2022).

Con el objetivo de evaluar la tendencia de investigación en el campo de la compactación, se realizó una búsqueda en el sitio web of science utilizando todas las bases de datos disponible, con las palabras claves siguientes: “Continuous compaction control”, “Roller integrated compaction monitoring”,

“Intelligent Compaction”, “Compaction quality road”, “Compaction quality airport”, “Compaction quality dam”, “Compaction quality railway”, “compaction quality embankment” fijando un periodo para la búsqueda desde el 2020 al 2023. Se obtuvo un total de 631 publicaciones relacionadas con las palabras claves utilizadas en la búsqueda, analizando la región o país de procedencia de las mismas, se obtiene que los 10 países donde más se está generando investigación respecto al tema son los siguiente:

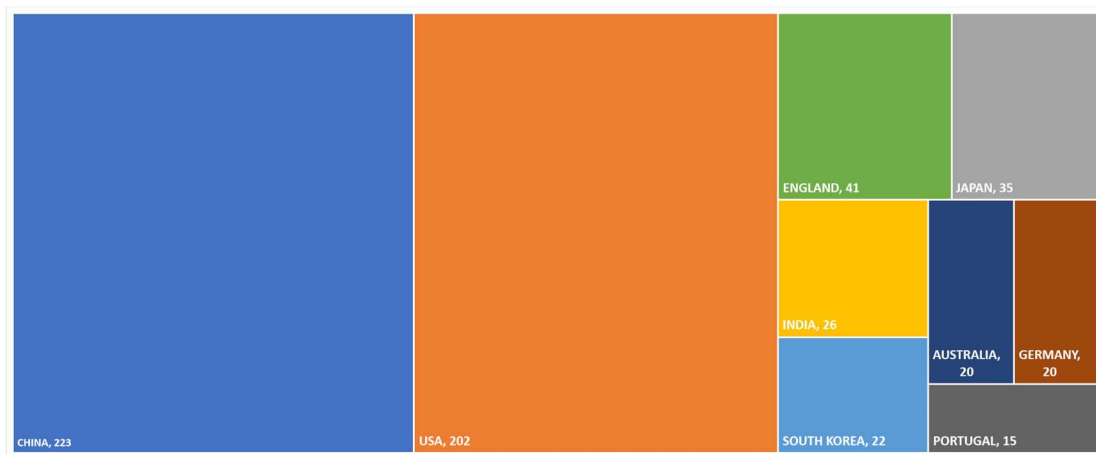


Figura 3.5-1 Países con más publicaciones asociadas a compactación.

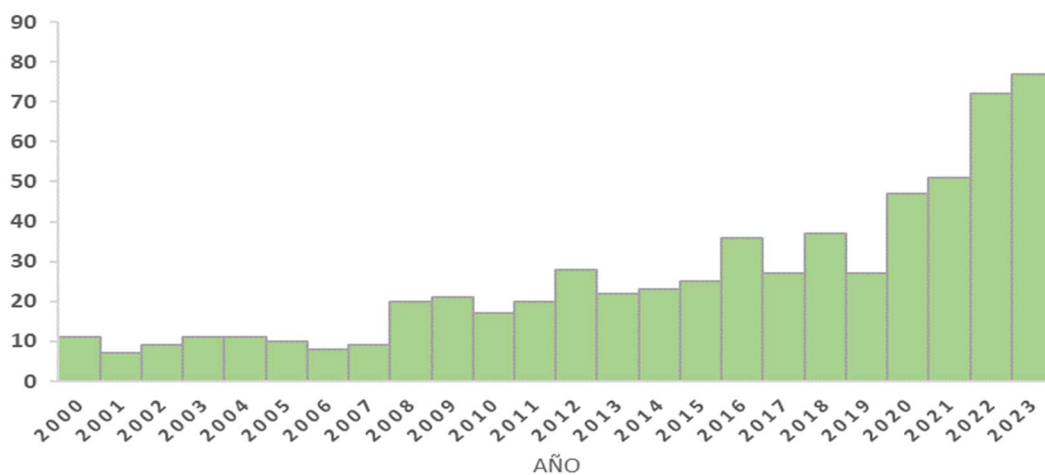


Figura 3.5-2 Número de publicaciones por año asociadas a compactación.

Como se puede observar el tema ha tomado un crecimiento constante a lo largo del periodo analizado, lo cual es un indicador que, el tema está siendo seriamente analizado y tomado en consideración para la nueva forma de aplicar el QC/QA de la compactación de suelos, esto motivado a solventar las deficiencias de los métodos actuales.

(Zhang et al., 2022) en su publicación “*A Review on Roller Compaction Quality Control and Assurance Methods for Earthwork in Five Application*” presenta una clasificación para aclarar la evolución de los métodos de control y aseguramiento de la calidad para la compactación en general.

Las etapas del revolucionario desarrollo se pueden dividir a grandes rasgos en cuatro áreas: la compactación convencional, la compactación digital en rodillos, la compactación por rodillos automática y la compactación inteligente. En la era de la compactación convencional, la conducción manual, la supervisión manual y la detección de puntos de muestreo son las características más destacadas de este periodo. Para conseguir una supervisión en tiempo real de los parámetros de compactación y de la calidad de la compactación, los investigadores propusieron la tecnología de compactación con rodillos digitales. Los métodos de control y aseguramiento de la calidad han evolucionado de la era 1.0 a la era 2.0, marcada por la conducción manual, la supervisión y gestión digital, la detección de puntos de muestreo y el posicionamiento espacial. Con el objetivo de controlar con precisión los parámetros de compactación, los expertos han propuesto la tecnología de compactación por compactado automático, que realiza parcialmente el control activo del proceso de compactación. En esta era, el modo de conducción manual se transformó en un modo de conducción automática. Con el desarrollo de las nuevas tecnologías, se espera que se resuelvan los problemas de QC/QA relacionados con la compactación digital con rodillo y la compactación de rodillos automática existentes. Basándose en el marco de la toma de decisiones inteligente material-máquina-información-máquina, los métodos de control inteligente de la compactación hacen que los métodos de QC/QA entren en la era 4.0. En la nueva era, la intención última es resolver los problemas actuales,

como eliminar por completo la influencia de los factores humanos en el control y la verificación de la calidad de la compactación. (Zhang et al., 2022)

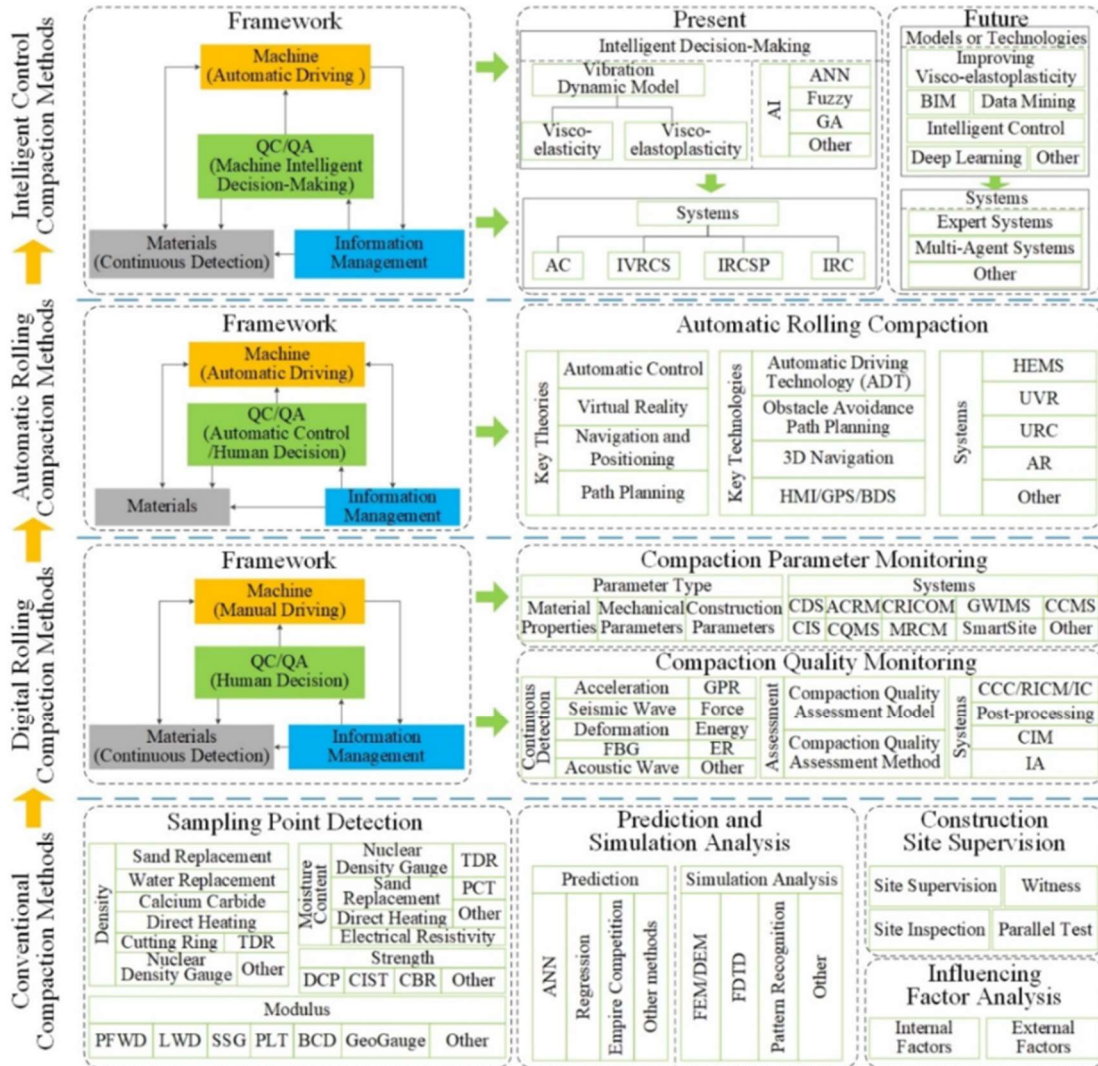


Figura 3.5-3 Clasificación de los métodos de control y aseguramiento de la calidad de la compactación para el movimiento de tierras. (Zhang et al., 2022).

4. CAPÍTULO 4. IMPLEMENTACIÓN QC/QA EN PROYECTOS EN EJECUCIÓN.

Este capítulo tiene como objetivo principal el presentar los pasos seguidos para la determinación de módulo objetivo y la verificación realizada en campo. Se realizó visita a dos proyectos en ejecución en los cuales se estaban construyendo estructuras de pavimento.

4.1. PROYECTOS SELECCIONADOS.

Los proyectos a los cuales se realizó visita y se tuvo apertura por parte del propietario FOVIAL y MOP para realizar las mediciones fueron los siguientes:

1. Intersección entre las Rutas Ca01W (Carretera Panamericana) – RN23S (Periférico Claudia Lars) – RN07W (Sitio Del Niño – Nejapa), Municipio De San Juan Opico, La Libertad.
2. Construcción de Bypass en la Ciudad de San Miguel.

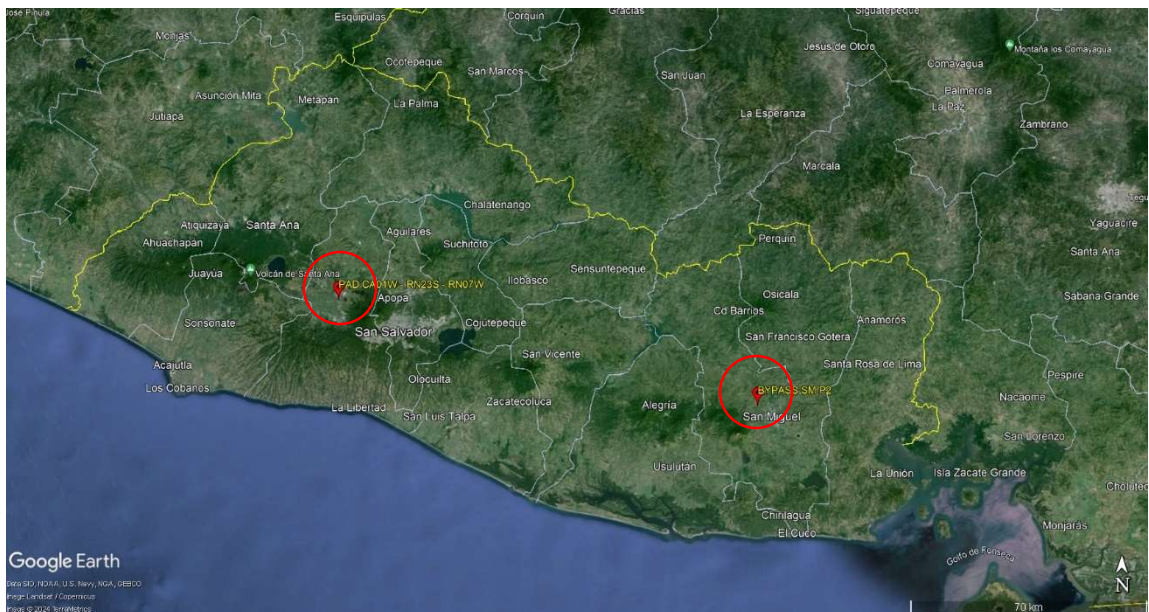


Ilustración 4-1 Ubicación proyectos.

Ambos proyectos contemplaban la construcción de estructuras de pavimentos, con las siguientes estructuras de pavimentos.

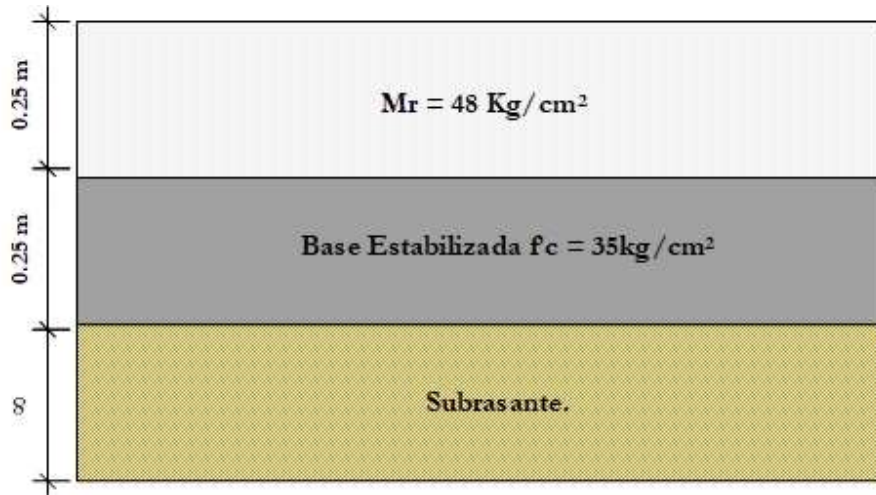


Figura 4.1-1 Estructura pavimento CA01W - RN23S - RN07W

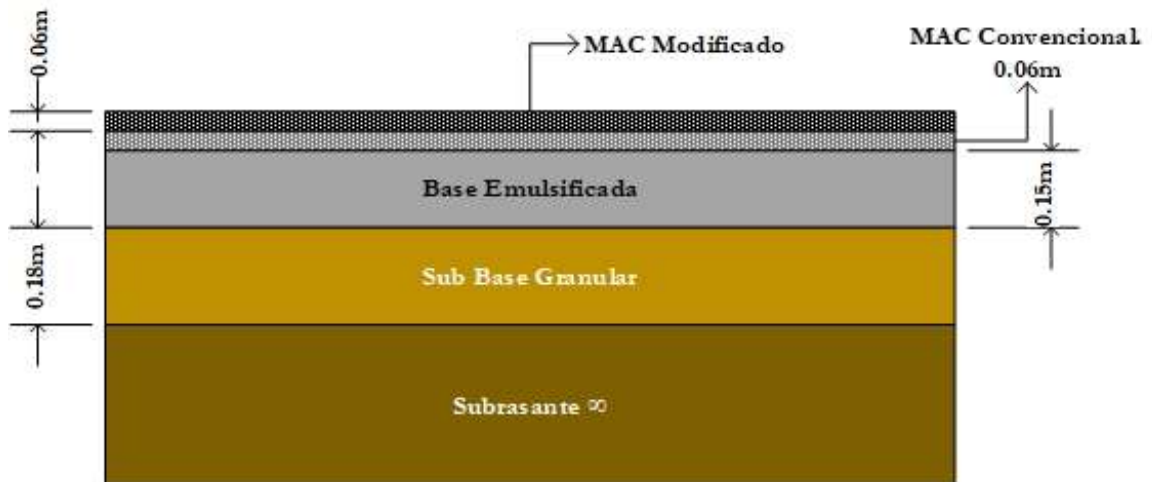


Figura 4.1-2 Estructura pavimento Bypass San Miguel

Ambos proyectos fueron visitados al momento de construcción de las capas granulares, previo a eso se hizo visita con los encargados de calidad de cada proyecto debido a que el planteamiento inicial era el de determinar los módulos objetivos en el laboratorio de control de calidad (QC) de cada proyecto. Sin embargo, debido a la cantidad de trabajo que se tenía en ambos proyectos y a la limitante de

personal, se optó por realizar el muestro de cada material y proceder con la determinación del módulo objetivo en el laboratorio de suelos y materiales de la Escuela de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de El Salvador.

4.2. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO OBJETIVO.

Una vez obtenidas las muestras en los proyectos, se procedió a la determinación de los módulos objetivo de cada material, en laboratorio se procedió acorde a las recomendaciones de la AASHTO T 180.

Como primer paso era necesario determinar la altura de caída que tendría la masa de 10 Kg, para tener en laboratorio una presión similar a la que habría luego en campo, sobre todo teniendo en consideración que la placa para la determinación del módulo objetivo en laboratorio es de 150 mm diámetro y la placa de 300 mm de diámetro es con la que se medirá en campo, la altura se obtiene de la siguiente manera.

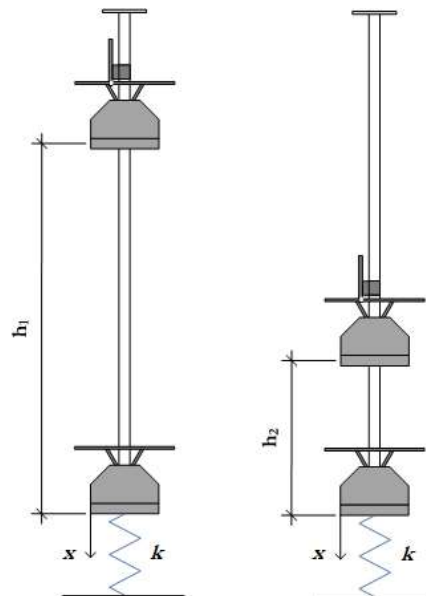


Figura 4.2-1 Altura caída laboratorio. (Fuente: Presentación LWD Compactación de suelos, Javier Castañeda, 2023)

Sabemos que debemos tener la misma presión en laboratorio que en campo, la expresión para la presión es:

$$P = \frac{F}{A} \rightarrow P_1 = P_2 \therefore \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

El área viene dada por la expresión:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Sustituyendo tenemos:

$$\frac{F_1}{\frac{1}{4}\pi D_1^2} = \frac{F_2}{\frac{1}{4}\pi D_2^2}$$

Sabemos también que:

$$D_2 = \frac{D_1}{2}$$

Sustituyendo:

$$\frac{F_1}{\frac{\pi D_1^2}{4}} = \frac{F_2}{\frac{\pi D_1^2}{16}} \therefore F_1 \left(\frac{\pi D_1^2}{16} \right) = F_2 \left(\frac{\pi D_1^2}{4} \right) \therefore F_1 \left(\frac{\pi D_1^2}{4} \right) = F_2 (\pi D_1^2)$$

Resolviendo para la Fuerza en posición 2, obtenemos que:

$$F_2 = \frac{F_1}{4}$$

Ecuación 4.2-1 Fuerza aplicada en laboratorio.

La fuerza viene dada por la acción de la energía potencial y la energía elástica:

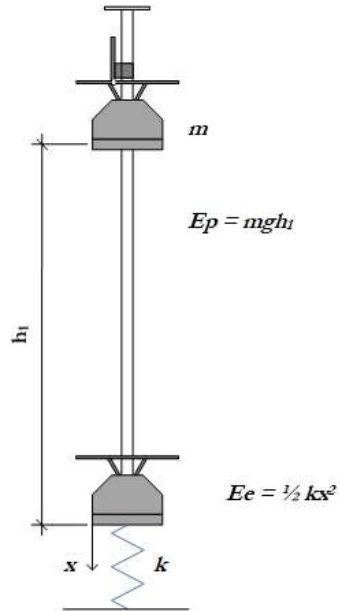


Figura 4.2-2 Conservación de la energía. (Fuente: Presentación LWD Compactación de suelos, Javier Castañeda, 2023)

Igualando las energías obtenemos:

$$E_p = E_e \therefore mgh = \frac{kx^2}{2}$$

De la ley de Hooke sabemos que:

$$F = Kx \therefore x = \frac{F}{k}$$

Sustituyendo:

$$2mgh = k \left(\frac{F}{K} \right)^2$$

Despejando para F, obtenemos:

$$F = \sqrt{2mghk}$$

Sabemos que al igualar presiones que:

$$F_2 = \frac{F_1}{4}$$

Sustituyendo y simplificando obtenemos

$$4\sqrt{2mgh_2k} = \sqrt{2mgh_1k}$$

Eliminando radicales al elevar al cuadrado obtenemos:

$$32mgh_2k = 2mgh_1k$$

Resolviendo para h_2 obtenemos que:

$$h_2 = \frac{h_1}{16}$$

Ecuación 4.2-2 Altura de caída laboratorio

Una vez establecidas estas relaciones, se procedió a ajustar la altura del equipo para continuar posteriormente con la ejecución de la medición de módulos en el molde Proctor.

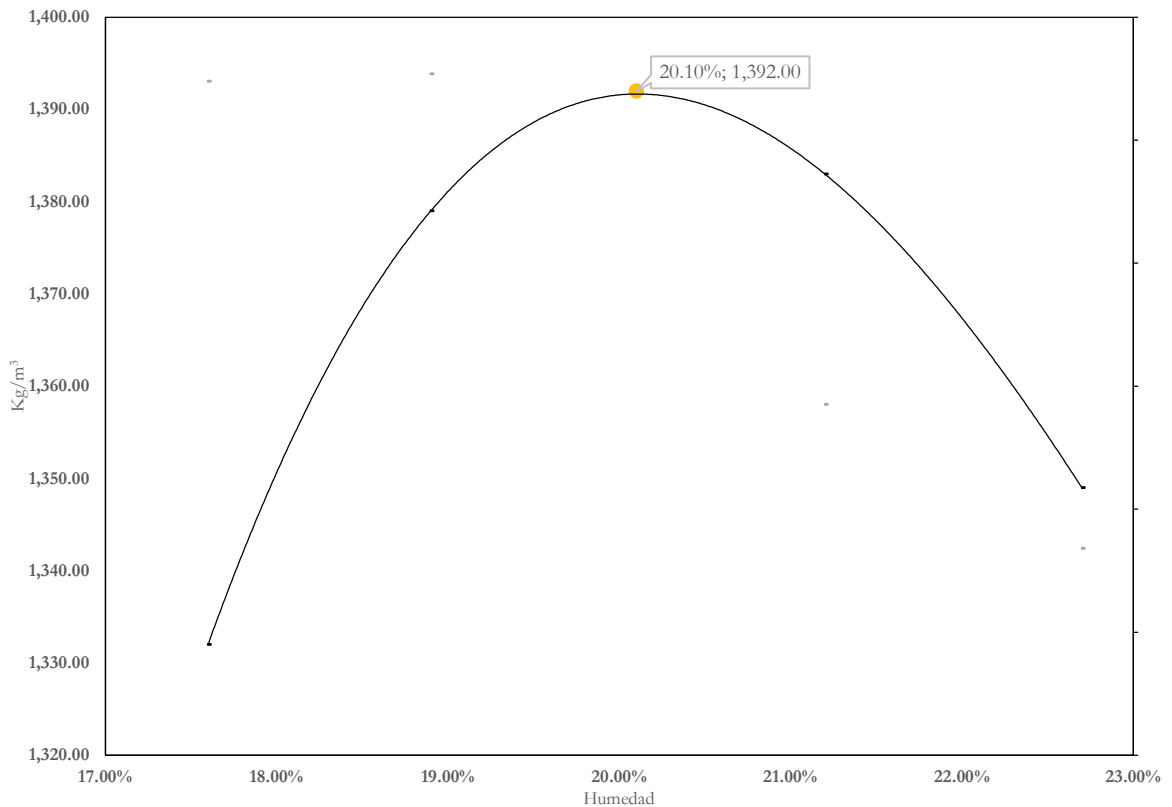
4.3. RESULTADOS DETERMINACIÓN MÓDULO OBJETIVO.

4.3.1. INTERSECCIÓN CA01W -RN23S – RN07W-

Tal como se muestra en la **Figura 4.1-1**, el pavimento construido en dicho proyecto consta de una capa de concreto hidráulico con un MR de 48 Kg/cm² 28 días con 0.25 m de espesor, una base estabilizada con cemento de f_c 35 kg/cm² a 7 días con 0.25 m de espesor y una capa de subrasante con material del sitio estabilizado mecánicamente.

4.3.1.1. SUBRASANTE.

El material de subrasante del proyecto es un material limo arenoso cuyo peso volumétrico seco máximo (PVSM) de 1,392 Kg/m³ y humedad óptima de compactación de 20.30% según AASHTO T -180.



Gráfica 4.3.1.1-1 Relación PVSM vs % humedad AASHTO T 180 Subrasante.

En el momento de la determinación de la curva Proctor se procedió con la medición del módulo para cada punto de humedad. Con el uso de la **Ecuación 3.2.1-1** para la obtención del módulo en molde Proctor, la cual se presentó en el apartado **3.2.1**

Se procedió con la aplicación de 3 golpes de asentamiento seguido por los 3 golpes de medición según lo recomendado, siendo los resultados obtenidos los siguientes:

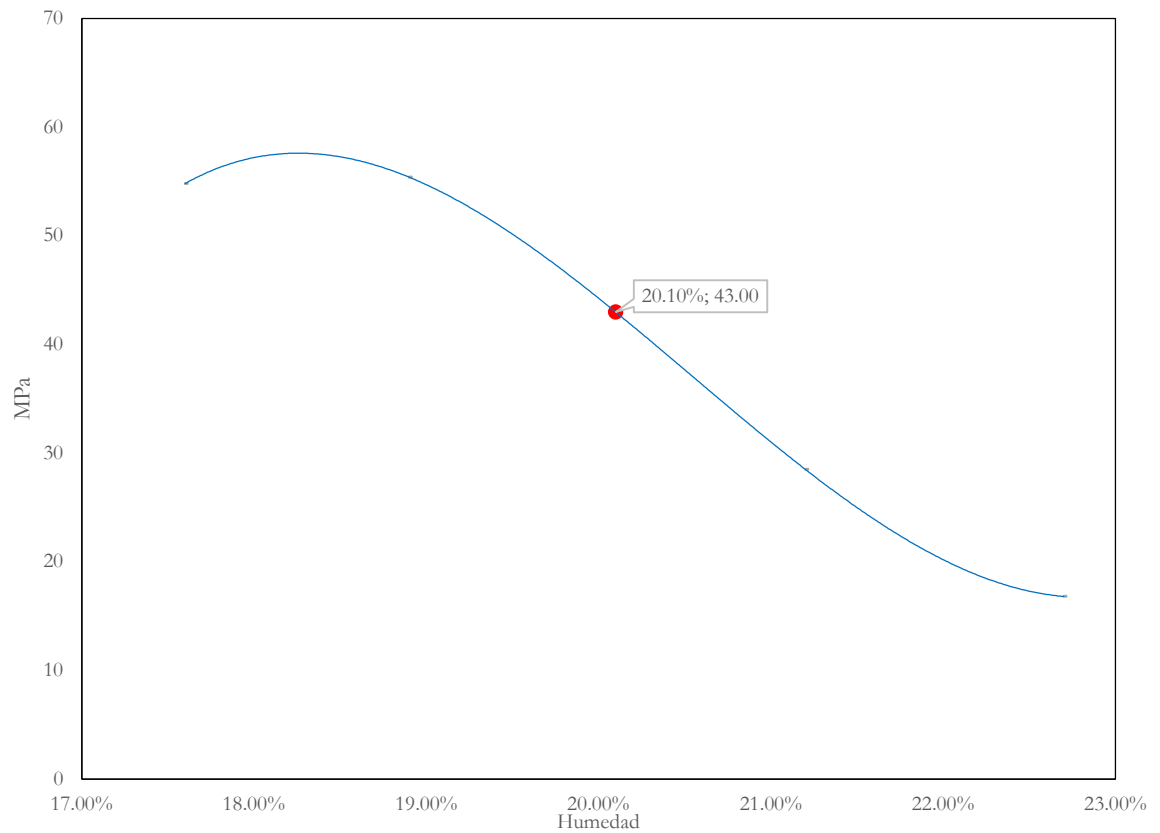
Tabla 4-1 Módulo objetivo Subrasante.

Punto Humedad	Fuerza (KN)	Deformación (μm)	Coefficiente Poisson	Diámetro placa (mm)	H _{Molde} (mm)	E _{LWD} (MPa)	E _{LWD} (promedio) (MPa)
18%	1.55	118.50	0.35	150.00	116.40	53.68	54.80
	1.58	117.90	0.35	150.00	116.40	55.00	
	1.59	117.00	0.35	150.00	116.40	55.77	
20%	1.58	127.40	0.35	150.00	116.40	50.90	55.40
	1.65	119.30	0.35	150.00	116.40	56.76	
	1.51	106.10	0.35	150.00	116.40	58.41	
22%	1.52	260.50	0.35	150.00	116.40	23.95	28.50
	1.61	226.60	0.35	150.00	116.40	29.16	
	1.54	194.60	0.35	150.00	116.40	32.48	
24%	1.70	477.70	0.35	150.00	116.40	14.61	16.80
	1.67	441.10	0.35	150.00	116.40	15.54	
	1.68	338.80	0.35	150.00	116.40	20.35	



Figura 4.3.1.1-1 Determinación Módulo objetivo Laboratorio.

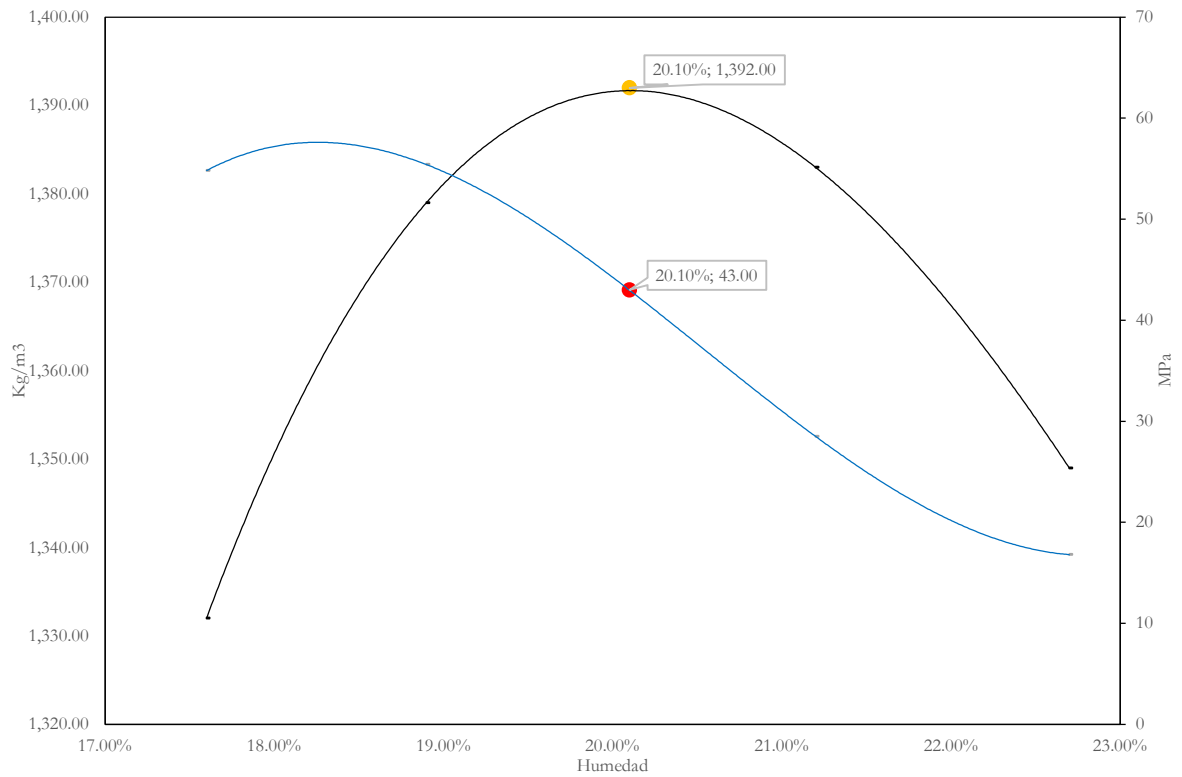
Al plotear lo resultado obtenidos en una gráfica se aprecia el siguiente comportamiento:



Gráfica 4.3.1.1-2 Módulo objetivo subrasante.

Ahora ya contamos con los elementos suficientes para la determinación del módulo objetivo, este se selecciona sobre la gráfica de Módulo objetivo en el punto de humedad óptima.

Tal como se puede apreciar en la **Gráfica 4.3.1.1-3**, el módulo objetivo para la subrasante es de 43 MPa para una humedad de 20.10% (óptima).



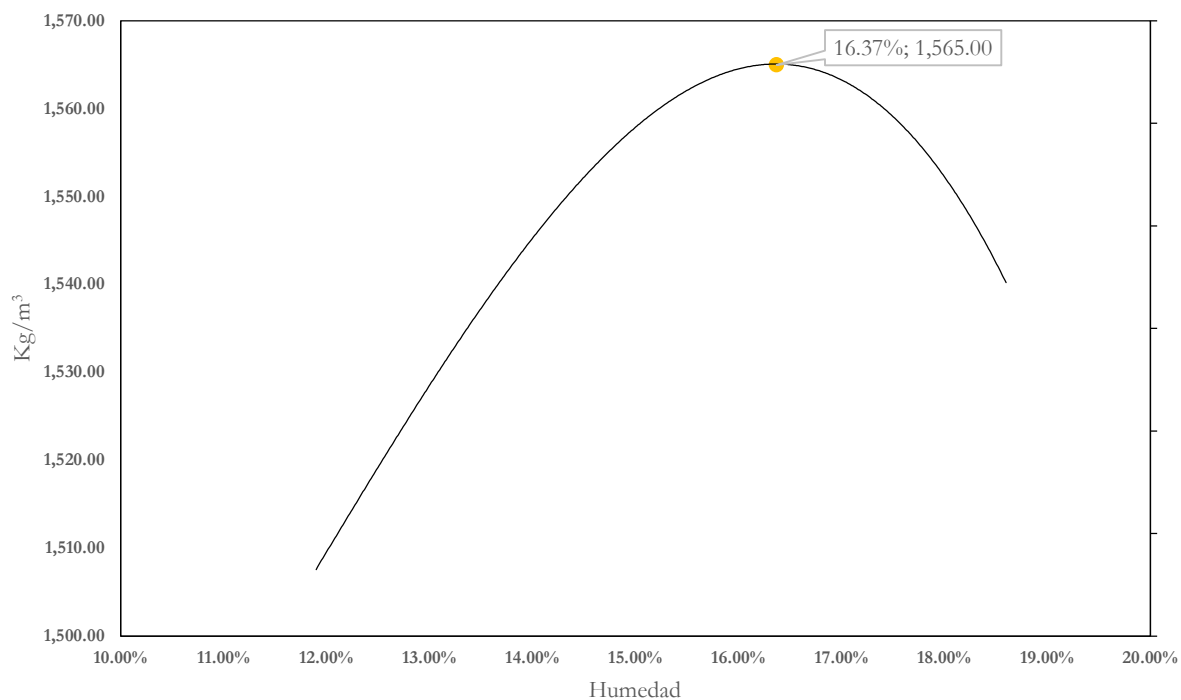
Gráfica 4.3.1.1-3 PVSM vs % Humedad - E_{LWD} vs % Humedad Subrasante.

4.3.1.2. CAPA BASE.

Al igual que el procedimiento de la capa subrasante, se procedió a la determinación del PVSM y el porcentaje óptimo de humedad para la compactación del material.

Este material está conformado por una combinación de materiales con una proporción de 40% de limo con 60% de grava, el cual posteriormente es estabilizado con cemento para la obtención de la resistencia requerida por el diseño.

El PVSM obtenido en laboratorio para este material fue de 1,565 Kg/m³ con un porcentaje óptimo de humedad de 16.37%.

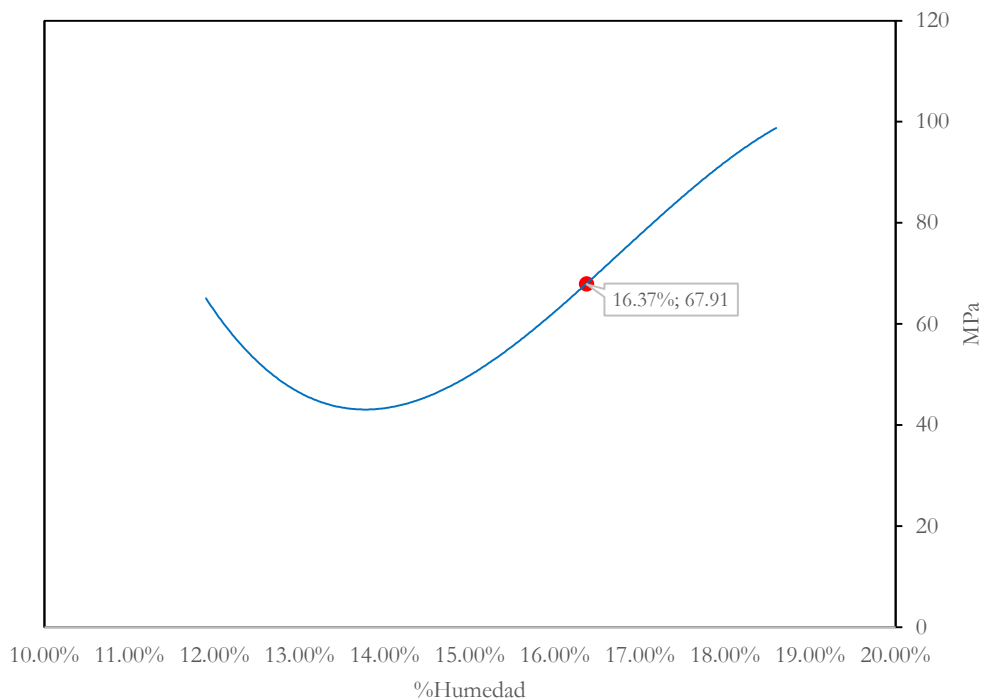


Gráfica 4.3.1.2-1 Relación PVSM vs % humedad AASHTO T 180 Base

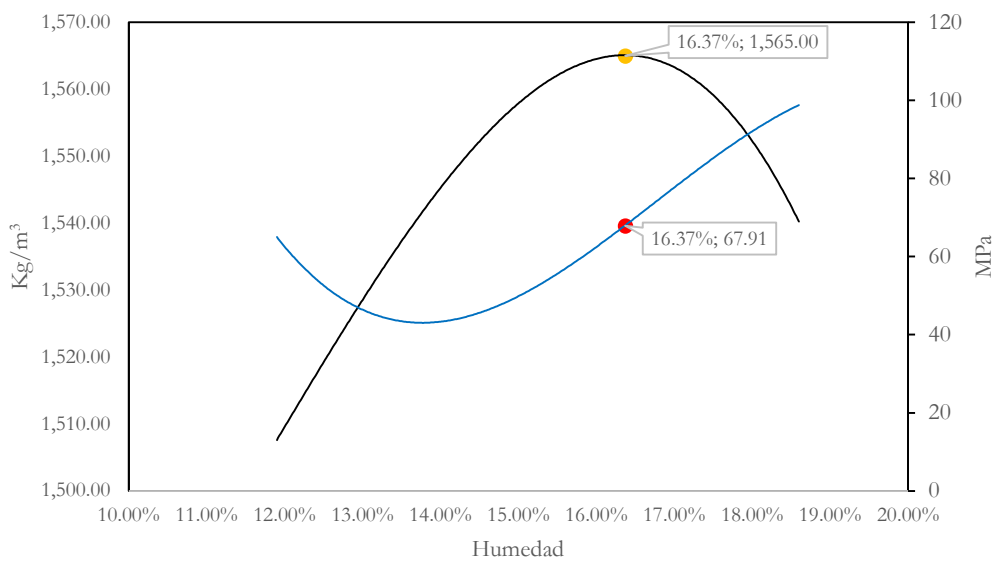
Aplicando la **Ecuación 3.2.1-1** para esta capa obtenemos:

Tabla 4-2 Módulo objetivo Base.

Punto Humedad	Fuerza (KN)	Deformación (µm)	Coefficiente Poisson	Diámetro placa (mm)	H _{Molde} (mm)	π E _{LWD} (MPa)	E _{LWD} (promedio) (MPa)
12%	1.64	106.20	0.35	150.00	116.40	63.38	64.00
	1.57	96.40	0.35	150.00	116.40	66.84	
	1.59	105.80	0.35	150.00	116.40	61.68	
13%	1.64	136.10	0.35	150.00	116.40	49.45	47.90
	1.69	147.70	0.35	150.00	116.40	46.96	
	1.67	144.60	0.35	150.00	116.40	47.40	
15%	1.25	132.40	0.35	150.00	116.40	38.74	46.00
	1.60	132.90	0.35	150.00	116.40	49.41	
	1.60	132.00	0.35	150.00	116.40	49.75	
17%	1.51	76.54	0.35	150.00	116.40	80.96	77.90
	1.35	69.10	0.35	150.00	116.40	80.18	
	1.48	83.80	0.35	150.00	116.40	72.48	
19%	1.43	62.00	0.35	150.00	116.40	94.66	98.20
	1.55	63.00	0.35	150.00	116.40	100.97	
	1.56	64.60	0.35	150.00	116.40	99.11	



Gráfica 4.3.1.2-2 Módulo Objetivo Base



Gráfica 4.3.1.2-3 PVSM vs % Humedad - ELWD vs % Humedad Base.

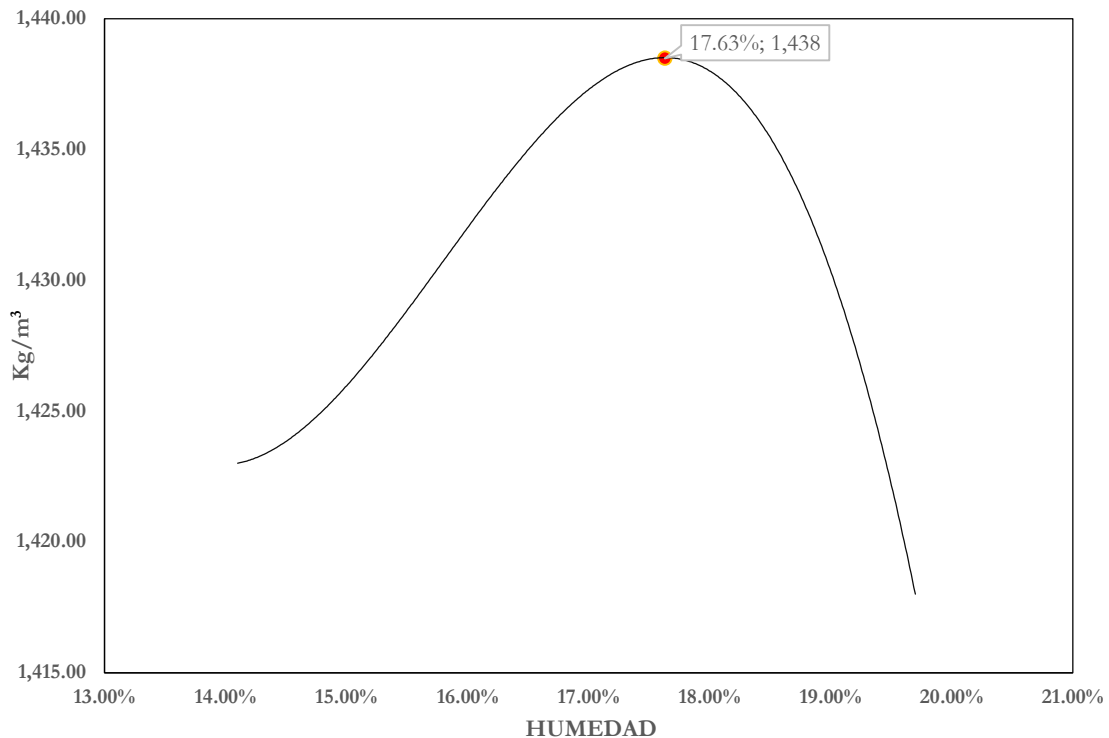
Para la capa base se obtiene un módulo objetivo de 67.91 MPa con una humedad óptima del 16.37%.

4.3.2. PROYECTO BYPASS SAN MIGUEL.

Este proyecto tal como se muestra en la **Figura 4.1-2** consta de 2 capas de mezcla asfáltica en caliente una con asfalto sin modificar (convencional) y otra con asfalto modificado de 0.06 m cada una, con base con emulsión de 0.15 m de espesor, una subbase de 0.18 m sobre una subrasante. Para este proyecto los materiales utilizados para la base con emulsión y la subbase son los mismos, la diferencia radica que en la capa base se incorporó la emulsión y un porcentaje de cemento.

4.3.2.1. SUBRASANTE.

El material de subrasante, por tratarse de un proyecto de apertura es un material de acarre en donde se ha construido una capa de al menos 0.45 m con este material, el PVSM obtenido fue de 1,438 Kg/m³ con una humedad óptima de compactación de 17.63%.

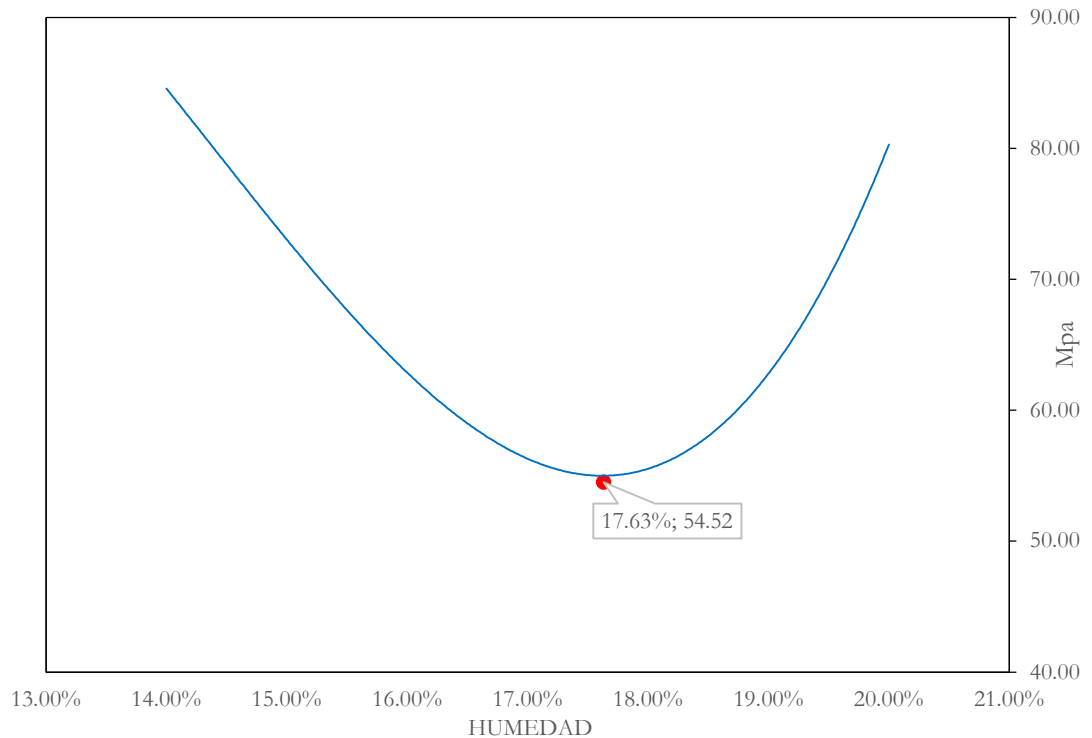


Gráfica 4.3.2.1-1 Relación PVSM vs % humedad AASHTO T 180 Subrasante.

Haciendo uso de la **Ecuación 3.2.1-1** obtenemos los siguientes resultados.

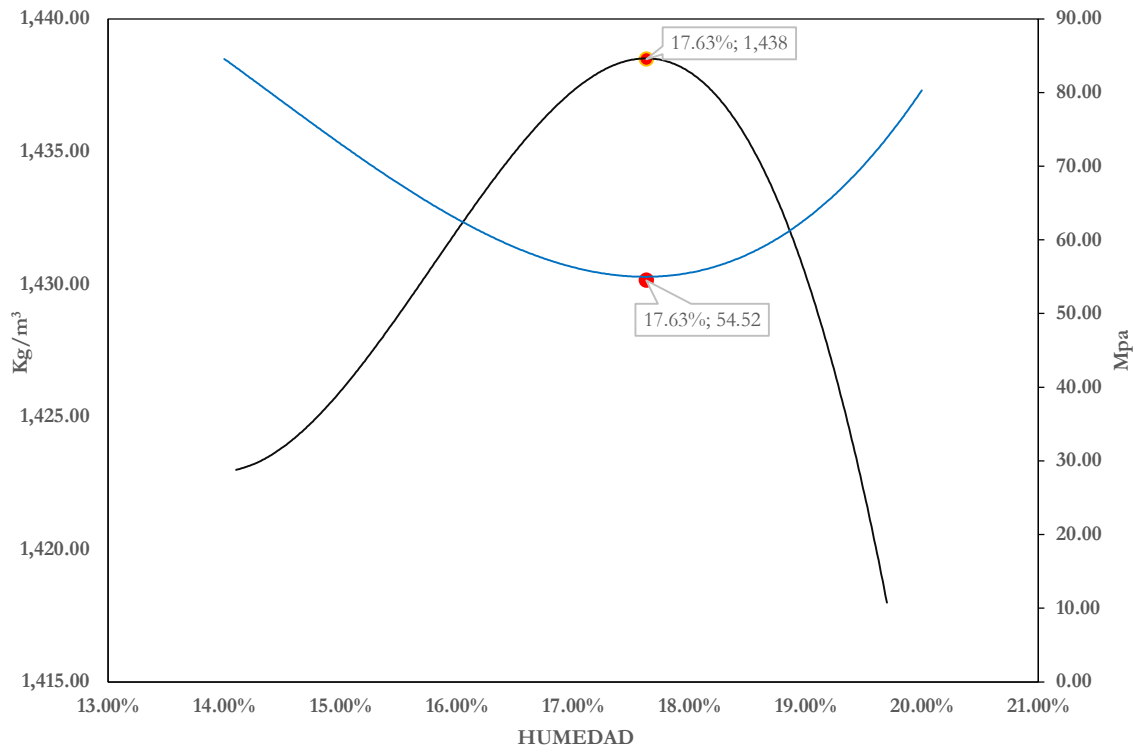
Punto Humedad	Fuerza (KN)	Deformación (μm)	Coefficiente Poisson	Diámetro placa (mm)	H_{Molde} (mm)	E_{LWD} (MPa)	E_{LWD} (promedio) (MPa)
14%	1.60	100.30	0.35	150.00	116.40	78.06	84.60
	1.60	85.80	0.35	150.00	116.40	91.25	
	1.60	92.70	0.35	150.00	116.40	84.46	
16%	1.75	129.20	0.35	150.00	116.40	66.28	62.90
	1.61	129.10	0.35	150.00	116.40	61.02	
	1.69	134.90	0.35	150.00	116.40	61.30	
18%	1.51	134.50	0.35	150.00	116.40	54.93	55.50
	1.68	151.30	0.35	150.00	116.40	54.33	
	1.67	142.60	0.35	150.00	116.40	57.30	
20%	1.36	91.00	0.35	150.00	116.40	73.13	80.30
	1.63	91.40	0.35	150.00	116.40	87.26	
	1.51	91.80	0.35	150.00	116.40	80.49	

Tabla 4-3 Módulo objetivo Subrasante.



Gráfica 4.3.2.1-2 Módulo objetivo subrasante.

Al combinar las gráficas para la obtención del módulo objetivo, obtenemos que el módulo objetivo para la subrasante es de 54.52 MPa para una humedad óptima de 17.63%, según **Gráfica 4.3.2.1-3**



Gráfica 4.3.2.1-3 PVSM vs % Humedad - E_{LWD} vs % Humedad Subrasante.

4.3.2.2. CAPA SUB-BASE Y BASE.

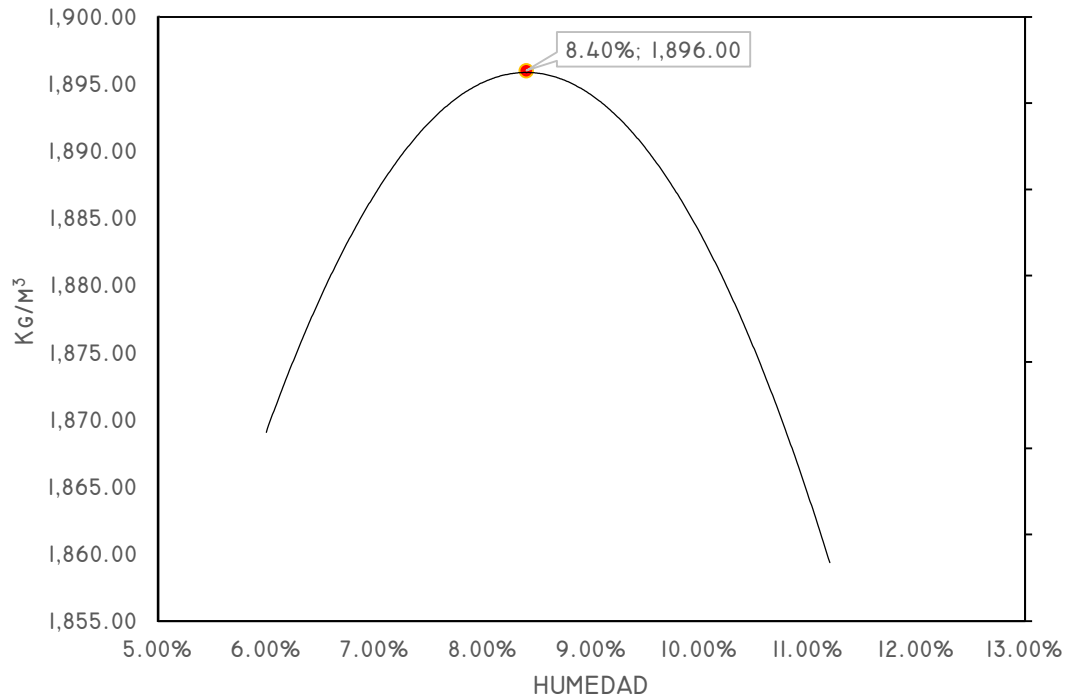
El material para base y subbase son de acarreo de la misma procedencia y se obtuvo un PVSM de 1,896 Kg/m³ y una humedad óptima de 8.40%. **Gráfica 4.3.2.2-1**

Se procedió con la obtención del módulo objetivo haciendo uso de la **Ecuación 3.2.1-1**, obteniendo los resultados que se muestran en la **Tabla 4-4**.

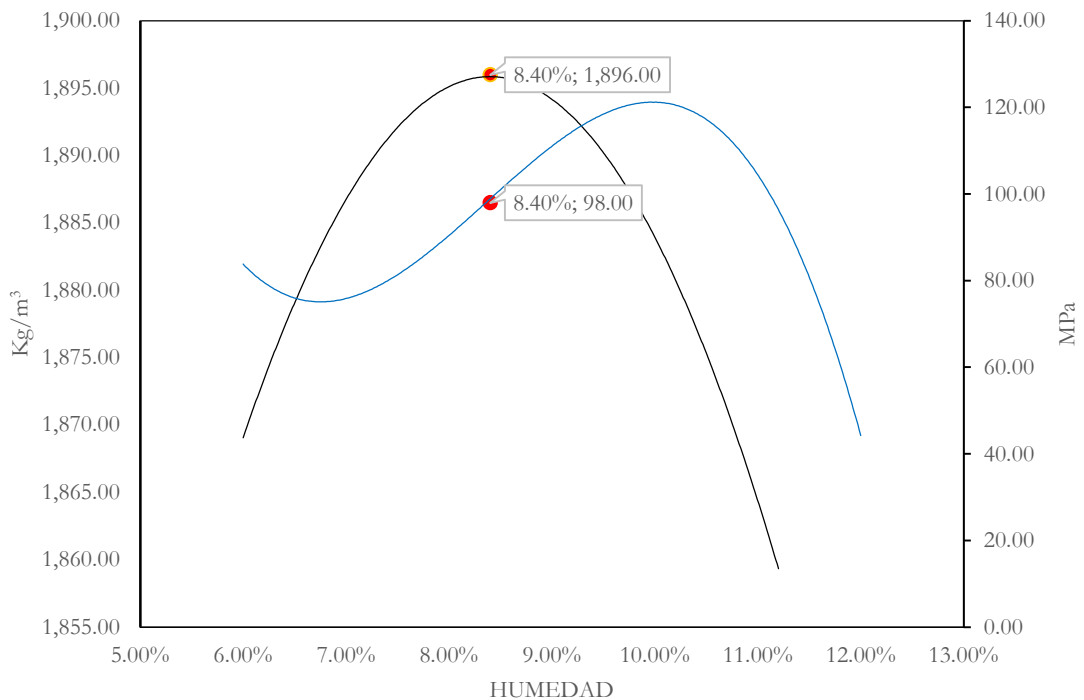
Una vez obtenidos los valores de módulo dentro del molde Proctor y combinando las curvas se obtiene el valor de módulo objetivo, para este material se obtuvo que el módulo objetivo será de 98 MPa para una humedad óptima de 8.40% como se presenta en la **Gráfica 4.3.2.2-2**.

Tabla 4-4 Módulo objetivo subbase y base.

Punto Humedad	Fuerza (KN)	Deformación (µm)	Coefficiente Poisson	Diámetro placa (mm)	H _{Molde} (mm)	E _{LWD} (MPa)	E _{LWD} (promedio) (MPa)
6%	1.64	88	0.35	150	116.4	76.49	83.80
	1.68	80.6	0.35	150	116.4	85.55	
	1.63	74.8	0.35	150	116.4	89.44	
8%	1.67	77.8	0.35	150	116.4	88.10	90.40
	1.72	76.8	0.35	150	116.4	91.92	
10%	1.73	77.8	0.35	150	116.4	91.26	121.20
	1.69	62.1	0.35	150	116.4	111.69	
	1.72	56.65	0.35	150	116.4	124.61	
12%	1.69	54.5	0.35	150	116.4	127.27	44.30
	1.55	160.1	0.35	150	116.4	39.73	
	1.55	145.2	0.35	150	116.4	43.81	
	1.59	132.5	0.35	150	116.4	49.25	



Gráfica 4.3.2.2-1 Relación PVSM vs % humedad AASHTO T 180 base y -Subbase.



Gráfica 4.3.2.2-2 Módulo objetivo subbase y base.

4.4. RESULTADOS OBTENIDOS MEDICIÓN DE MÓDULOS EN CAMPO.

Posterior a la definición de los módulos objetivo en laboratorio, se procedió a realizar las mediciones en campo, estas fueron realizadas en los proyectos en un día de trabajo normal, se acompañó el proceso de confirmación de las capas y se realizaron las mediciones en los sitios donde el QC de cada proyecto los realizaba, con el objetivo de no interferir en el proceso constructivo.

Se realizó el procedimiento según las recomendaciones de la norma ASTM E2583, todas las mediciones se realizaron con la placa de 300 mm y una masa de 10 Kg. Para la ejecución del ensayo en cada punto se realizaron tres golpes de acomodamiento y se realizaron tres para la medición.

4.4.1. INTERSECCIÓN CA01W -RN23S – RN07W.

4.4.1.1. SUBRASANTE.

A continuación, se presenta los resultados de los ensayos ejecutados en la capa de subrasante del proyecto.

Tabla 4-5 Resultado medición de deflexiones en Subrasante.

<i>Punto</i>	<i>F (KN)</i>	<i>δ (μm)</i>
1	7.14	392.6
2	7.25	394.4
3	7.24	383
4	7.36	390.9
5	7.32	378.7
6	8.03	496.1
7	7.44	468.6
8	7.58	456.7
9	7.51	458.7
10	7.42	443.3

Con la información de la carga máxima y deformación máxima aplicando la **Ecuación 3.2.2-1** podemos obtener el módulo de campo de cada punto. Los resultados de módulo se presentan en la **Tabla 4-6.**

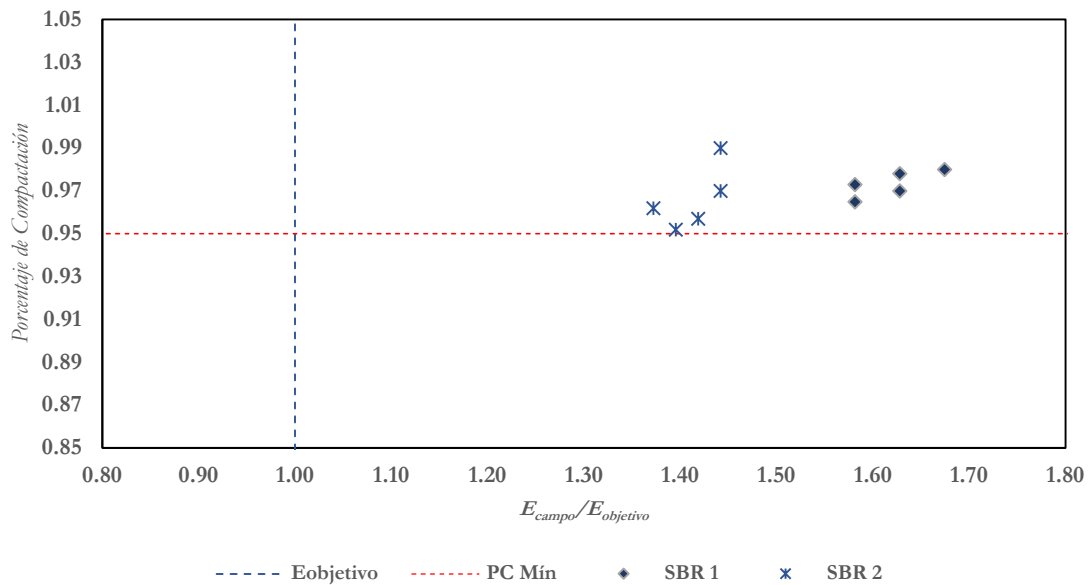
Tabla 4-6 Módulo Calculado Subrasante.

<i>F (KN)</i>	<i>δ (μm)</i>	<i>ν</i>	<i>d (mm)</i>	<i>A</i>	<i>k</i>	<i>E₁ (MPa)</i>
7.14	392.6	0.35	150	π	18.19	68.00
7.25	394.4	0.35	150	π	18.38	68.00
7.24	383	0.35	150	π	18.90	70.00
7.36	390.9	0.35	150	π	18.83	70.00
7.32	378.7	0.35	150	π	19.33	72.00
8.03	496.1	0.35	150	π	16.19	60.00
7.44	468.6	0.35	150	π	15.88	59.00
7.58	456.7	0.35	150	π	16.60	62.00
7.51	458.7	0.35	150	π	16.37	61.00
7.42	443.3	0.35	150	π	16.74	62.00

Con los módulos calculados en la **Tabla 4-6** podemos determinar una relación entre este módulo y el módulo objetivo definido en el numeral **4.3.1.1**.

Tabla 4-7 % de compactación NDG y % Compactación E Objetivo.

E_{objetivo}	PC_{NDG}	$E_{\text{campo}}/E_{\text{objetivo}}$
43.00	97%	158%
43.00	97%	158%
43.00	97%	163%
43.00	98%	163%
43.00	98%	167%
43.00	95%	140%
43.00	96%	137%
43.00	97%	144%
43.00	96%	142%
43.00	99%	144%



Gráfica 4.4.1.1-1 % NDG vs % E Objetivo Subrasante.

En la **Tabla 4-7** se presenta el porcentaje de compactación que típicamente se mide obra con el Densímetro Nuclear (NDG, por sus siglas en Inglés), adicionalmente se presenta la relación o

porcentaje de compactación obtenido al realizar la relación entre el módulo medido en campo y el módulo objetivo definido en laboratorio. En la **Gráfica 4.4.1.1-1** se puede apreciar de manera visual el comportamiento y la comparación mencionada. Adicionalmente se observa que todos cumplen con el criterio de porcentaje de compactación y todos los puntos exceden el módulo objetivo definido en campo.

Al momento de la verificación en campo, el valor de humedad medido por el NDG fue de 19.30% en promedio. Siendo esto un 3.98% inferior a la humedad definida como óptima, esto podría ser una explicación del sobre valor en el módulo obtenido en la medición, al revisar la **Gráfica 4.3.1.1-3** y al plotear la humedad promedio tendríamos un valor de Módulo objetivo aproximado de 52 MPa. Sabemos que la humedad es uno de los principales factores que influyen en el valor del módulo (Schwartz et al., 2017).

4.4.1.2. CAPA BASE.

Para la verificación de módulo en esta capa es necesario realizar la corrección del módulo medido en campo, ya que, el espesor de la capa es inferior al espesor de influencia del LWD. La cual oscila entre 1.00 – 1.50 veces el diámetro de la placa con la que se mide, para nuestro caso particular la base es de 0.25 m por tal motivo es necesaria la corrección, de lo contrario estaríamos tomando en cuenta para la evaluación del módulo un valor de módulo correspondiente a una capa de aproximadamente 0.45 m de espesor.

Esta corrección se realiza con la **Ecuación 3.2.2-2**, la cual involucra el espesor de la capa y el módulo de la capa subyacente, en nuestro caso el módulo medido de la subrasante (Ver **Tabla 4-6**). Para la corrección se decidió utilizar el valor promedio de los valores medidos.

A continuación, se presenta tabla resumen con los valores corregidos de todos los ensayos medidos en la capa base.

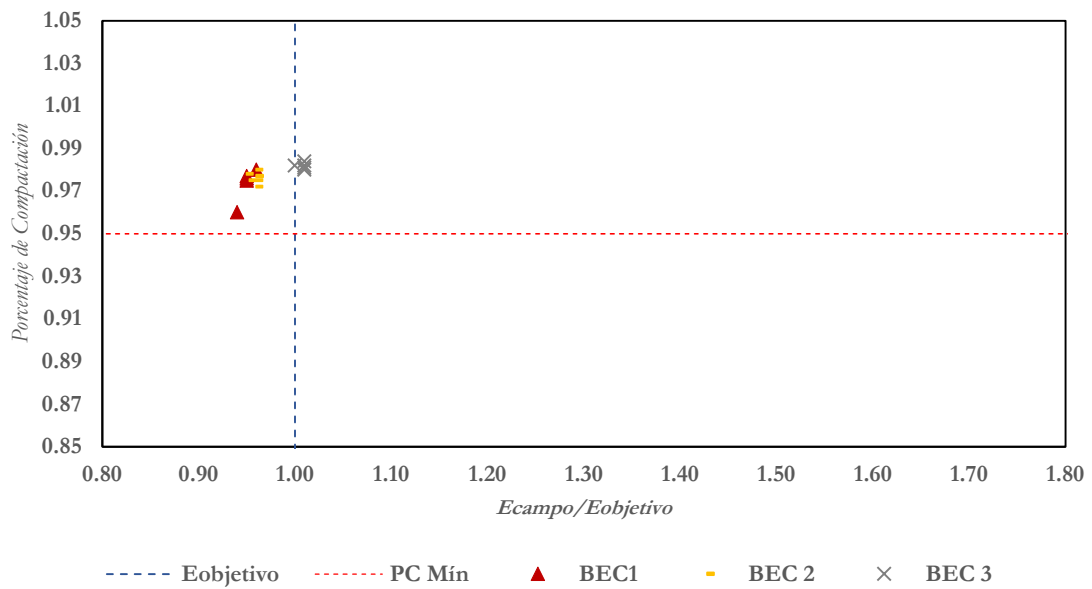
Tabla 4-8 Módulo de campo corregido por capa Base.

F (KN)	δ (μm)	ν	d (mm)	A	k	E_1 (MPa)	h (m)	E_2 (MPa)	E corregido.
7.3	569.2	0.35	150	2.67	12.83	56.00	0.25	65.20	63.90
7.3	526.3	0.35	150	2.67	13.87	61.00	0.25	65.20	64.60
7.3	523.6	0.35	150	2.67	13.94	61.00	0.25	65.20	64.60
7.3	502.4	0.35	150	2.67	14.53	64.00	0.25	65.20	64.90
7.3	516.7	0.35	150	2.67	14.13	62.00	0.25	65.20	64.60
7.5	550.3	0.35	150	2.67	13.63	60.00	0.25	65.20	64.40
7.4	514.4	0.35	150	2.67	14.39	63.00	0.25	65.20	64.90
7.6	523	0.35	150	2.67	14.53	64.00	0.25	65.20	64.90
7.4	488.2	0.35	150	2.67	15.16	66.00	0.25	65.20	65.10
7.4	485.4	0.35	150	2.67	15.25	67.00	0.25	65.20	65.40
7.29	342.5	0.35	150	2.67	21.28	93.00	0.25	65.20	68.20
7.28	332.8	0.35	150	2.67	21.88	96.00	0.25	65.20	68.50
7.35	326.4	0.35	150	2.67	22.52	99.00	0.25	65.20	68.70
7.48	318.4	0.35	150	2.67	23.49	103.00	0.25	65.20	68.90
7.33	314.9	0.35	150	2.67	23.28	102.00	0.25	65.20	68.90

Con el módulo corregido, procedemos a la verificación contra el módulo objetivo definido en el numeral 4.3.1.2.

Tabla 4-9 % de compactación NDG y % Compactación E Objetivo. Capa Base

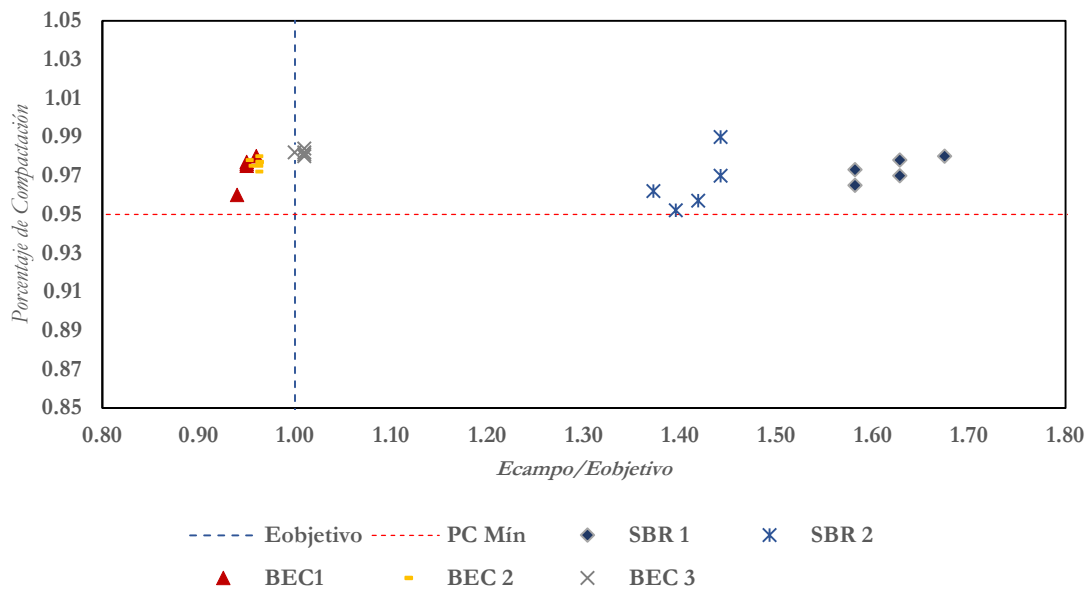
E corregido	E objetivo	PC (NDG)	$E_{\text{campo}}/E_{\text{objetivo}}$
63.90	67.91	96%	94%
64.60	67.91	96%	95%
64.60	67.91	96%	95%
64.90	67.91	96%	96%
64.60	67.91	96%	95%
64.40	67.91	98%	95%
64.90	67.91	98%	96%
64.90	67.91	98%	96%
65.10	67.91	98%	96%
65.40	67.91	98%	96%
68.20	67.91	98%	100%
68.50	67.91	98%	101%
68.70	67.91	98%	101%
68.90	67.91	98%	101%
68.90	67.91	98%	101%



Gráfica 4.4.1.2-1 % NDG vs % E Objetivo Base.

Al revisar los valores de módulo corregidos se observa que, los módulos de subrasante son superiores a los de capa base, sin embargo, al tener en consideración que la capa base es una capa estabilizada con cemento y que la medición se realiza inmediatamente después de la compactación aún no se registra la influencia de la adición de cemento en el material, por tal motivo se presenta una variación que pareciera no ser lógica, es decir, colocar un material con menor módulo que la subrasante no tendría sentido. Otros estudios han mostrado que la evaluación de módulo con LWD en capas estabilizadas con cemento registra un aumento sustancial de rigidez, especialmente durante los primeros 7 días.

En términos generales las capas evaluadas cumplen con el criterio de compactación establecido en las especificaciones del proyecto y cumplen con el criterio del módulo objetivo, pues todos los valores superaron dicho módulo.



Gráfica 4.4.1.2-2 % de Compactación NDG vs % $E_{campo}/E_{objetivo}$ (Subrasante y Base).

4.4.2. BYPASS SAN MIGUEL.

4.4.2.1. SUBRASANTE.

Los resultados de los ensayos ejecutados son los siguientes:

Tabla 4-10 Resultados medición deflexiones en Subrasante.

F (KN)	δ (μm)
7.30	608.20
7.35	585.60
7.32	572.40
7.31	574.90
7.45	580.40
7.39	571.60
7.25	498.30
7.19	435.80
7.28	421.50
7.33	427.90
7.37	435.80

F (KN)	δ (μm)
7.26	420.60
7.37	589.80
7.41	585.70
7.32	578.00
7.42	574.50
7.37	577.00
6.96	594.80

Los valores presentados en la tabla anterior son utilizados para la determinación del módulo de la capa con el uso de la **Ecuación 3.2.2-1**.

Tabla 4-11 Módulo calculado Subrasante.

F (KN)	δ (μm)	ν	d (mm)	A	k	E_1 (MPa)
7.3	608.20	0.35	150	2.67	12.00	53.00
7.35	585.60	0.35	150	2.67	12.55	55.00
7.32	572.40	0.35	150	2.67	12.79	56.00
7.31	574.90	0.35	150	2.67	12.72	56.00
7.45	580.40	0.35	150	2.67	12.84	56.00
7.39	571.60	0.35	150	2.67	12.93	57.00
7.25	498.30	0.35	150	2.67	14.55	64.00
7.19	435.80	0.35	150	2.67	16.5	72.00
7.28	421.50	0.35	150	2.67	17.27	76.00
7.33	427.90	0.35	150	2.67	17.13	75.00
7.37	435.8	0.35	150	2.67	16.91	74.00
7.26	420.6	0.35	150	2.67	17.26	76.00
7.37	589.8	0.35	150	2.67	12.5	55.00
7.41	585.70	0.35	150	2.67	12.65	55.00
7.32	578.00	0.35	150	2.67	12.66	55.00
7.42	574.50	0.35	150	2.67	12.92	57.00
7.37	577.00	0.35	150	2.67	12.77	56.00
6.96	594.80	0.35	150	2.67	11.70	51.00

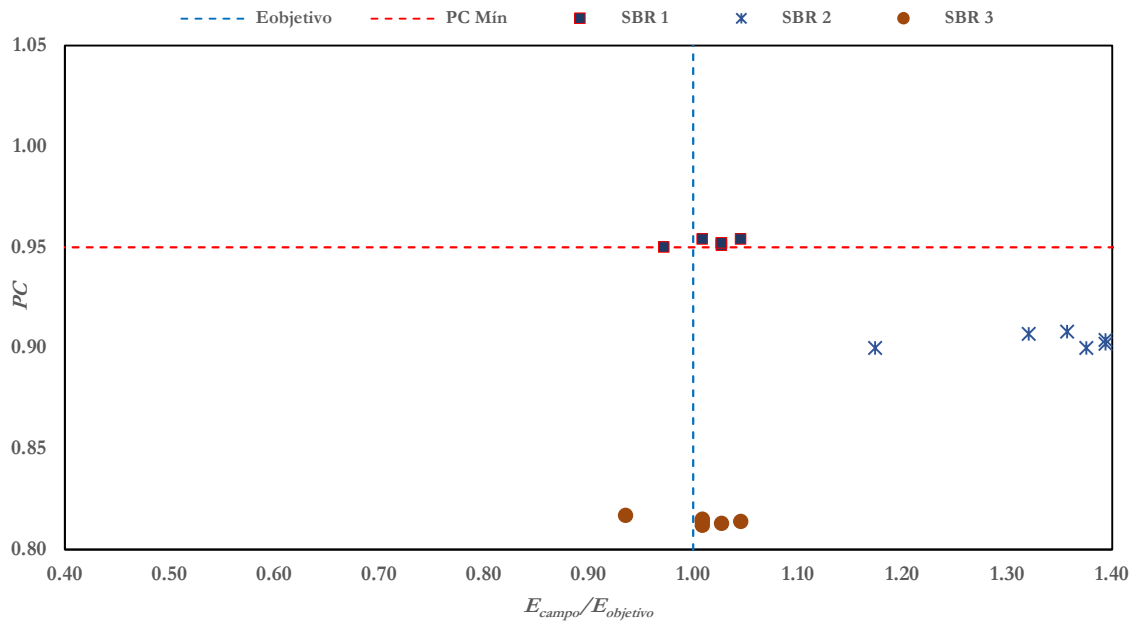
Obtenidos los valores de módulo medido en campo, podemos realizar la verificación con el módulo objetivo definido en el numeral **4.3.2.1**.

Tabla 4-12 % de compactación NDG y % Compactación E Objetivo. Subrasante.

E_{objetivo}	PC_{NDG}	E_{objetivo}
54.52	95%	97%
54.52	95%	101%
54.52	95%	103%
54.52	95%	103%
54.52	95%	103%
54.52	95%	105%
54.52	90%	117%
54.52	91%	132%
54.52	90%	139%
54.52	90%	138%
54.52	91%	136%
54.52	90%	139%
54.52	81%	101%
54.52	81%	101%
54.52	82%	101%
54.52	81%	105%
54.52	81%	103%
54.52	82%	94%

Se observa que desde el criterio de módulo objetivo la mayoría supera el módulo objetivo determinado para este material, incluso en los puntos donde la compactación no cumplió con el valor mínimo esperado, estos puntos en los cuales no se cumplió con la densidad deseada se obtuvo valores de humedad superiores a 20%, al verificar el comportamiento del suelo en términos de PVSM y Módulo en la **Gráfica 4.3.2.1-2** se observa un descenso en el PVSM y un incremento en el módulo.

En la **Gráfica 4.4.2.1-1** se puede apreciar el comportamiento del suelo al ser evaluado con el umbral mínimo de compactación y el módulo objetivo.



Gráfica 4.4.2.1-1 % NDG vs % E Objetivo Subrasante.

4.4.2.2. CAPA SUBBASE.

Tal como se comentó en el numeral 4.4.1.2 es necesario realizar la corrección del módulo por el espesor de la capa, los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Tabla 4-13 Módulo de campo corregido por capa Sub-Base.

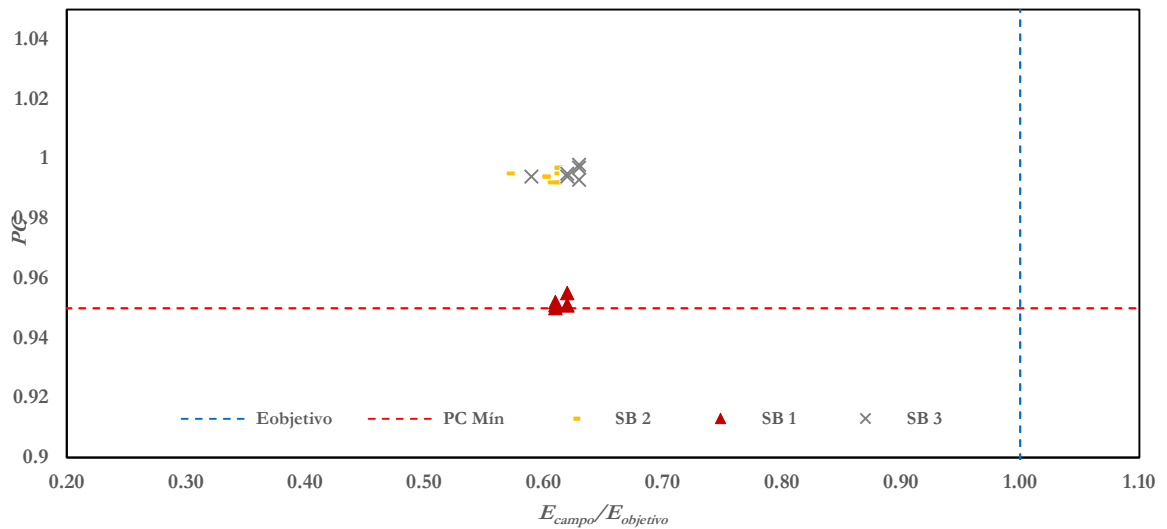
F (KN)	δ (μm)	ν	d (mm)	A	k	E_1 (MPa)	h (m)	E_2 (MPa)	E corregido.
7.12	406.30	0.35	150.00	2.00	17.52	102.49	0.18	55.00	59.80
7.20	394.40	0.35	150.00	2.00	18.26	106.82	0.18	55.00	60.20
7.19	387.80	0.35	150.00	2.00	18.54	108.46	0.18	55.00	60.20
7.26	381.30	0.35	150.00	2.00	19.04	111.38	0.18	55.00	60.60
7.14	378.30	0.35	150.00	2.00	18.87	110.39	0.18	55.00	60.40
7.15	381.20	0.35	150.00	2.00	18.76	109.75	0.18	55.00	60.40
7.10	628.90	0.35	150.00	2.00	11.29	66.05	0.18	55.00	56.30
7.12	422.20	0.35	150.00	2.00	16.86	98.63	0.18	55.00	59.40
7.20	431.10	0.35	150.00	2.00	16.70	97.70	0.18	55.00	59.40
7.15	416.80	0.35	150.00	2.00	17.15	100.33	0.18	55.00	59.60
7.22	419.80	0.35	150.00	2.00	17.20	100.62	0.18	55.00	59.60
7.21	449.90	0.35	150.00	2.00	16.03	93.78	0.18	55.00	59.20
7.13	524.50	0.35	150.00	2.00	13.59	79.50	0.18	55.00	57.80

F (KN)	δ (μm)	ν	d (mm)	A	k	E_1 (MPa)	h (m)	E_2 (MPa)	E corregido.
7.17	376.70	0.35	150.00	2.00	19.03	111.33	0.18	55.00	60.40
7.39	361.50	0.35	150.00	2.00	20.44	119.57	0.18	55.00	61.00
7.40	349.60	0.35	150.00	2.00	21.17	123.84	0.18	55.00	61.40
7.34	343.80	0.35	150.00	2.00	21.35	124.90	0.18	55.00	61.40
7.37	342.00	0.35	150.00	2.00	21.55	126.07	0.18	55.00	61.60

Tabla 4-14 % de compactación NDG y % Compactación E Objetivo. Capa Sub-Base.

E corregido	E objetivo	PC (NDG)	$E_{\text{campo}}/E_{\text{objetivo}}$
59.80	98.00	95.00%	61.02%
60.20	98.00	95.10%	61.43%
60.20	98.00	95.20%	61.43%
60.60	98.00	95.50%	61.84%
60.40	98.00	95.10%	61.63%
60.40	98.00	95.10%	61.63%
56.30	98.00	99.50%	57.45%
59.40	98.00	99.20%	60.61%
59.40	98.00	99.50%	60.61%
59.60	98.00	99.70%	60.82%
59.60	98.00	99.20%	60.82%
59.20	98.00	99.40%	60.41%
57.80	98.00	99.40%	58.98%
60.40	98.00	99.50%	61.63%
61.00	98.00	99.40%	62.24%
61.40	98.00	99.30%	62.65%
61.40	98.00	99.70%	62.65%
61.60	98.00	99.80%	62.86%

Como resultado se obtiene que la capa Subbase cumple con el criterio de Porcentaje de compactación, al comparar el PVSM obtenido en campo versus el PVSM determinado en laboratorio, una verificación tradicional. Sin embargo, al revisar por el criterio de módulo objetivo el módulo más cercano al definido como objetivo obtuvo únicamente el 62.86% del módulo objetivo.



Gráfica 4.4.2.2-1 % NDG vs % E Objetivo Sub-Base.

4.4.2.3. CAPA BASE.

En este caso es necesario realizar una corrección más por capa, para lo cual se toma como módulo de la capa subyacente el medido sin corrección de la capa subbase, el valor utilizado en nuestros cálculos ha sido el valor promedio.

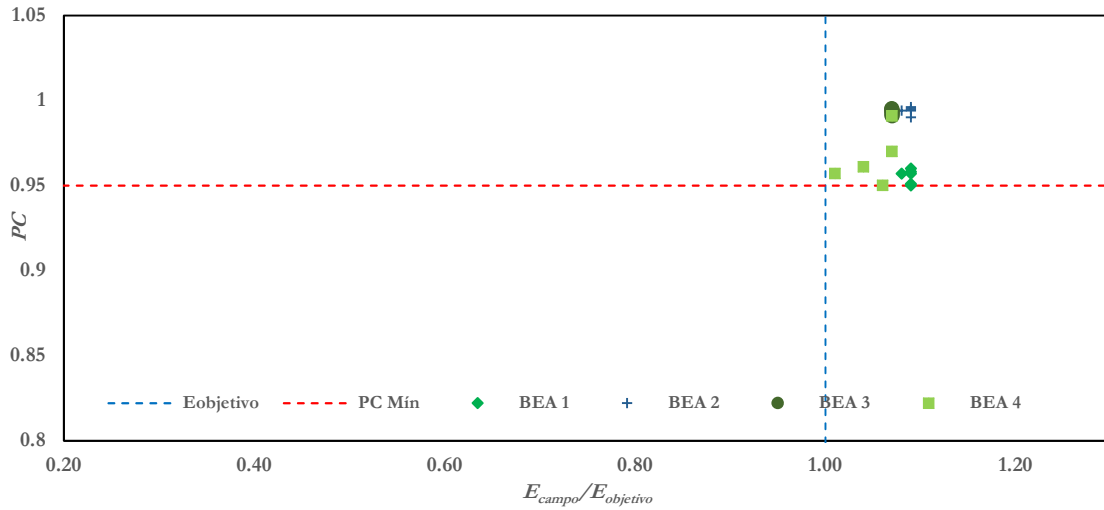
Tabla 4-15 Módulo de campo corregido por capa Base.

F (KN)	δ (μm)	ν	d (mm)	A	k	E_1 (MPa)	h (m)	E_2 (MPa)	E corregido.
7.20	278.80	0.35	150.00	2.67	25.82	113.14	0.15	105.00	106.30
7.10	261.80	0.35	150.00	2.67	27.12	118.84	0.15	105.00	106.70
7.20	264.70	0.35	150.00	2.67	27.20	119.19	0.15	105.00	106.70
7.30	260.70	0.35	150.00	2.67	28.00	122.70	0.15	105.00	107.10
7.30	266.60	0.35	150.00	2.67	27.38	119.98	0.15	105.00	106.70
7.20	260.60	0.35	150.00	2.67	27.63	121.08	0.15	105.00	107.10
7.20	305.20	0.35	150.00	2.67	23.59	103.37	0.15	105.00	104.90
7.20	272.30	0.35	150.00	2.67	26.44	115.86	0.15	105.00	106.30
7.20	268.10	0.35	150.00	2.67	26.86	117.70	0.15	105.00	106.70
7.30	263.50	0.35	150.00	2.67	27.70	121.38	0.15	105.00	107.10
7.20	263.20	0.35	150.00	2.67	27.36	119.89	0.15	105.00	106.70
7.30	260.60	0.35	150.00	2.67	28.01	122.74	0.15	105.00	107.10
7.30	326.80	0.35	150.00	2.67	22.34	97.89	0.15	105.00	104.50
7.20	321.70	0.35	150.00	2.67	22.38	98.07	0.15	105.00	104.50

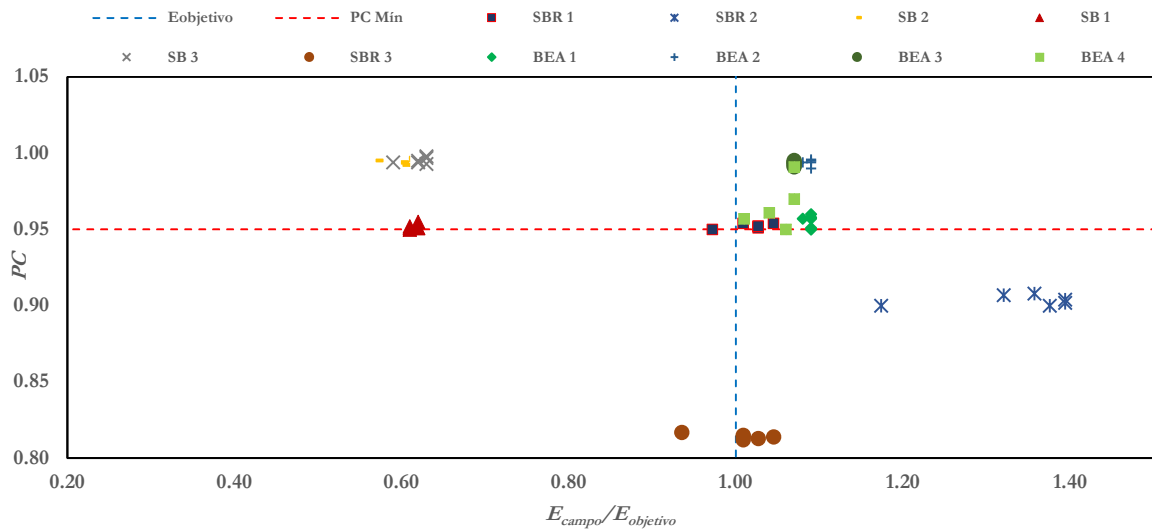
F (KN)	δ (μm)	ν	d (mm)	A	k	E_1 (MPa)	h (m)	E_2 (MPa)	E corregido.
7.20	314.20	0.35	150.00	2.67	22.92	100.44	0.15	105.00	104.90
7.30	311.60	0.35	150.00	2.67	23.43	102.67	0.15	105.00	104.90
7.40	309.60	0.35	150.00	2.67	23.90	104.73	0.15	105.00	105.20
7.50	310.20	0.35	150.00	2.67	24.18	105.96	0.15	105.00	105.20
7.40	532.30	0.35	150.00	2.67	13.90	60.91	0.15	105.00	99.10
7.30	392.30	0.35	150.00	2.67	18.61	81.55	0.15	105.00	102.30
7.10	322.60	0.35	150.00	2.67	22.01	96.45	0.15	105.00	104.10
7.20	309.20	0.35	150.00	2.67	23.29	102.06	0.15	105.00	104.90
7.20	314.30	0.35	150.00	2.67	22.91	100.39	0.15	105.00	104.90

Tabla 4-16 % de compactación NDG y % Compactación E Objetivo. Capa Base.

E corregido	E objetivo	PC (NDG)	E_{ccampo}/E objetivo
106.30	98.00	95.70%	108.47%
106.70	98.00	96.00%	108.88%
106.70	98.00	95.70%	108.88%
107.10	98.00	95.80%	109.29%
106.70	98.00	95.00%	108.88%
107.10	98.00	95.10%	109.29%
104.90	98.00	99.50%	107.04%
106.30	98.00	99.40%	108.47%
106.70	98.00	99.60%	108.88%
107.10	98.00	99.00%	109.29%
106.70	98.00	99.40%	108.88%
107.10	98.00	99.50%	109.29%
104.50	98.00	99.10%	106.63%
104.50	98.00	99.20%	106.63%
104.90	98.00	99.50%	107.04%
104.90	98.00	99.40%	107.04%
105.20	98.00	99.30%	107.35%
105.20	98.00	99.40%	107.35%
99.10	98.00	95.70%	101.12%
102.30	98.00	96.10%	104.39%
104.10	98.00	95.00%	106.22%
104.90	98.00	99.10%	107.04%
104.90	98.00	97.00%	107.04%



Gráfica 4.4.2.3-1 % NDG vs % E Objetivo Base.



Gráfica 4.4.2.3-2 % de Compactación NDG vs % E campo/E objetivo (Subrasante, Sub-Base y Base).

Como se puede observar en las verificaciones que se realizaron en ambos proyectos, podemos decir que, el cumplir con la especificación respecto al porcentaje de compactación comparando las densidades de campo versus la establecida en laboratorio, no garantiza que el suelo esté obteniendo el módulo (rigidez) objetivo.

5. CAPÍTULO 5. PROPUESTA METODOLOGIA PARA CONTROL DE CALIDAD DE LA COMPACTACIÓN DE GEOMATERIALES CON EL LWD.

El presente capítulo tiene como objetivo, dejar preparada la propuesta de norma para su implementación en los proyectos viales a nivel nacional por cualquier institución relacionada con la construcción y mantenimiento de la red vial nacional o cualquier otra área que trabaje con la compactación de geomateriales.

5.1. PROPUESTA METODOLÓGICA (NORMA A IMPLEMENTAR). CONTROL DE COMPACTACIÓN DE GEOMATERIALES PARA PAVIMENTOS CON LWD.

5.1.1. OBJETO.

Esta norma describe el procedimiento para la determinación del módulo objetivo haciendo uso del Deflectómetro de Impacto Ligero y molde Proctor. Así como también el procedimiento a seguir en campo para la verificación del módulo objetivo determinado en laboratorio, ecuaciones a utilizar y recomendaciones en general.

5.1.2. DOCUMENTOS DE REFERENCIA.

- **ASTM D 698** *Método de prueba estándar para características de compactación de laboratorio utilizando el esfuerzo estándar 12 400 ft-lbf/ft³ (600 KN-m/m³).*
- **ASTM D 1557** *Método de prueba estándar para características de compactación de laboratorio utilizando el esfuerzo modificado estándar 56 000 ft-lbf/ft³ (2,700 KN-m/m³).*
- **ASTM E 2583** *Método de ensayo normalizado para medir deflexiones con un deflectómetro de impacto ligero (LWD)*
- **AASHTO T 180** *Método de prueba estándar para determinar la relación entre la humedad y la densidad de los suelos utilizando un pisón de 4,54 kg y una caída de 457 mm.*

- **AASHTO T 99** *Método de prueba estándar para determinar la relación entre la humedad y la densidad de los suelos utilizando un pisón de 2,5 kg y una caída de 305 mm.*
- **AASHTO T 265** *Método de prueba estándar para la determinación en laboratorio del contenido de humedad de los suelos.*
- **SCT – EP04** *Especificación particular para uniformizar el uso del equipo Deflectómetro de impacto Ligero (LWD) tanto en campo como en laboratorio, como herramienta para el control de compactación.*
- **ASTM E3331-22a** *Método de ensayo estándar para la medición del módulo objetivo utilizando un deflectómetro de impacto ligero (LWD) en molde Proctor.*

5.1.3. DEFINICIONES.

- *LWD (Light Weight Deflectometer).* Deflectómetro de impacto ligero. Equipo que cumple con los requerimientos de la ASTM E 2583.
- *Molde Proctor.* Cilindro metálico con las dimensiones y especificaciones de acuerdo con lo establecido en la AASHTO T 99 o T 180. Se deberán utilizar únicamente para moldes de 152.40 mm (6 in) de diámetro según lo especificado en AASHTO T 99 o T 180.
- *Apisonador o martillo de compactación.* Martillo metálico acorde a las especificaciones AASHTO T 99 para energía de compactación estándar o AASHTO T 180 para energía de compactación modificada.

5.1.4. SIGNIFICADO Y USO.

Los procedimientos descritos en esta especificación son aplicables para la determinación del porcentaje de compactación en muestras de suelo que cumplan con el criterio de aceptación definido, en estado natural o compactado, mediante la relación del módulo de superficie en campo (*ELWD Campo*) con respecto al módulo objetivo (*ELWD Objetivo*) determinado en laboratorio con el LWD utilizando molde Proctor por lo métodos B y D (AASHTO T 99 – T 180). Para el Control de Calidad/Aseguramiento de la Calidad del proceso de compactación.

5.1.5. EQUIPO.

1. Deberá cumplir lo establecido en la ASTM E 2583, para equipos con celda de carga. El dispositivo LWD es un dispositivo generador de fuerza. El dispositivo utilizará una masa (10 Kg) capaz de elevarse y dejarse caer desde alturas predeterminadas. El peso de caída impacta contra una placa de carga que descansa en la parte superior del molde Proctor/Suelo compactado.
2. El impulso de fuerza resultante deberá ser capaz de proporcionar un impulso de carga en forma de onda Haversiana, con un tiempo de carga conforme al método de prueba ASTM E 2583.
3. El plato debe ser capaz de distribuir uniformemente la carga sobre la superficie de contacto, así como, permitir la medición de la deflexión en el centro del punto de impacto mediante un sensor que atraviesa la placa por un orificio en el centro.
4. Los sensores del equipo para medir las deflexiones pueden ser varios tipos entre ellos pueden ser: transductores de desplazamiento, velocidad o aceleración.
5. Debe contar con un sistema de procesamiento de datos, donde se muestre en tiempo real y almacene de forma automática o manual las mediciones realizadas, incluyendo al menos coordenadas del ensayo e imágenes de referencia.
6. Poseerá celda de carga para medir la fuerza del impacto aplicado, esta deberá estar posicionada de manera tal que no restrinja la habilidad de obtener las deflexiones bajo el plato de carga, deberá ser resistente al agua y a los impactos de la masa de ensayo.
7. El equipo deberá tener un tamaño y peso tal que, permita su fácil transporte y desplazamiento en la obra para los ensayos. (ver **Figura 5.1.5-1** para referencia).



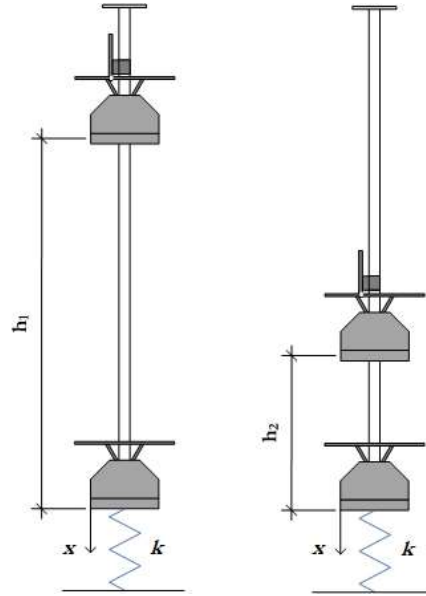
Figura 5.1.5-1 Equipo LWD según ASTM E 2583.

5.1.6. PROCEDIMIENTO PARA USO DE LWD.

5.1.6.1. OBTENCIÓN DEL MÓDULO OBJETIVO EN LABORATORIO.

Para la determinación del módulo objetivo en laboratorio se deberán tomar en consideración las siguientes recomendaciones:

1. La metodología de determinación de módulo objetivo en molde Proctor, tiene aplicabilidad utilizando los métodos B y D ya sea AASHTO T – 180 o T – 99.
2. El equipo deberá ser configurado de tal manera que la altura de caída en laboratorio que genere el mismo esfuerzo (presión de contacto) al que se tendrá en la medición en campo, teniendo en consideración que la placa a utilizar en laboratorio será de 150 mm y las mediciones en campo usualmente son realizadas con la placa de 300 mm, esto será determinado en función del espesor de capa a evaluar. Generalmente la altura de caída deberá ser:



$$h_2 = \frac{h_1}{16}$$

Ecuación 5.1.6.1-1 Altura de caída laboratorio.

3. Finalizado cada punto de prueba, se debe colocar el LWD con el plato de carga de 150 mm de diámetro, en la parte superior del molde Proctor ($d = 152.40$ mm) se debe girar 45° hacia la derecha y hacia la izquierda para asentar el plato, teniendo el cuidado que no entre en contacto con el borde del molde, si los componentes del equipo lo permiten es posible utilizar un collarín convencional para asegurar que el contacto del plato de carga sea con la superficie del suelo durante la prueba.

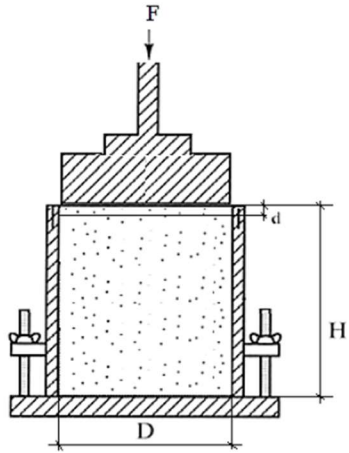


Figura 5.1.6.1-1 Esquema de equipo sobre el molde Proctor.



Figura 5.1.6.1-2 Posicionamiento LWD en molde Proctor en laboratorio.

4. Se deben realizar 3 golpes (dejar caer el peso sobre el plato a 1/16 de la altura de caída de campo) de acomodamiento y posteriormente 3 golpes más para obtener el módulo LWD, concluidas los golpes estos deberán registrarse y exportarse para su manejo.
5. Se deberá realizar una verificación del coeficiente de variación (C.V.) en donde será necesario repetir la medición si el C.V. > 10%

$$C.V. = s/\delta \times 100$$

Ecuación 5.1.6.1-2 Coeficiente Variación.

Donde:

C.V. = Coeficiente de variación, (%)

s = Desviación estándar de las mediciones

δ = Media aritmética de las mediciones.

6. Se debe determinar el coeficiente de rigidez K con la siguiente ecuación:

$$k = F / \delta$$

Ecuación 5.1.6.1-3 Coeficiente de Rigidez (K).

Donde:

F = Carga. (KN) (promedio de las 3 cargas registradas por ensayo).

δ = deformación. (mm) (promedio de las 3 deformaciones registradas por ensayo)-

7. Se debe obtener el módulo para cada punto ensayado esto se realizar con la siguiente ecuación

$$E_{LWD_{Objetivo}} = \left(1 - \frac{2\nu^2}{1 - \nu}\right) \frac{4H}{\pi D^2} K \times 1000 \text{ (MPa)}$$

Ecuación 5.1.6.1-4 Obtención de módulo en el molde Proctor.

Donde:

$E_{LWD_{Objetivo}}$ = Módulo en (MPa)

ν = Coeficiente de Poisson (adimensional ver valores en **Tabla 5-1**)

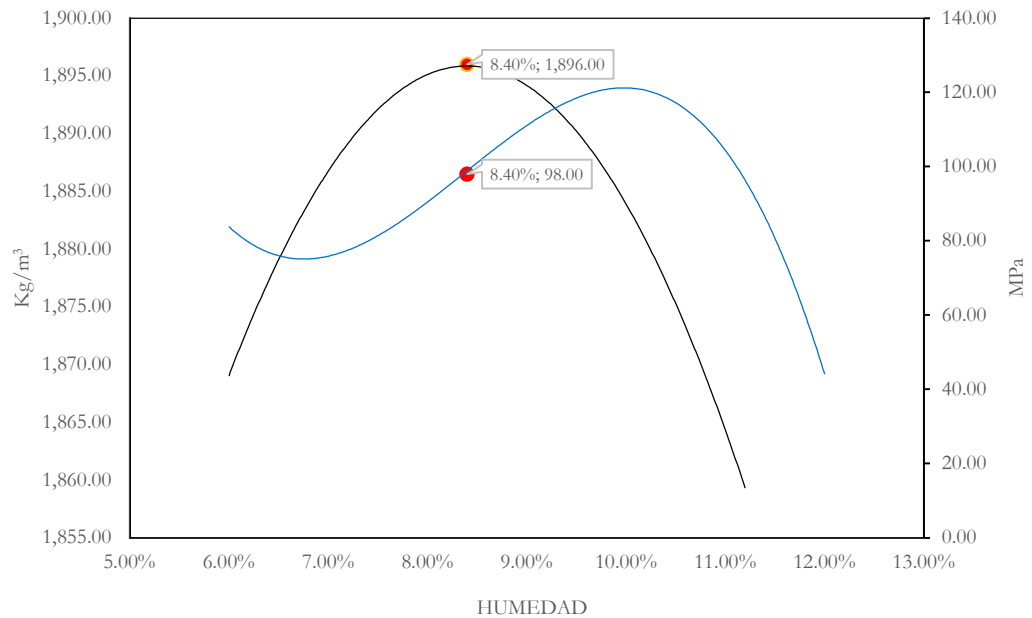
H = Altura del molde (mm)

D = Diámetro placa (mm)

K = Coeficiente Rigidez (**Ecuación 5.1.6.1-3**) (KN/mm)

Tabla 5-1 Valores típicos a considerar para el coeficiente Poisson.

Material	Rango de valores.	Valor Típico
Material granular no tratado	0.30 - 0.40	0.35
Material granular tratado con cemento	0.10 - 0.20	0.15
Material fino tratado con cemento	0.15 - 0.35	0.25
Material estabilizado con cal	0.10 - 0.25	0.20
Arena suelta o Arena Limosa	0.20 - 0.40	0.30
Arena densa	0.30 - 0.45	0.35
Arcillas blandas saturadas	0.40 - 0.50	0.45
Limo.	0.30 - 0.35	0.32
Arcilla no saturada.	0.10 - 0.30	0.20
Arcilla arenosa.	0.20 - 0.30	0.25
Arena de grano grueso.	0.15	0.15
Arena de grano fino	0.25	0.25



Gráfica 5.1.6.1-1 Determinación Módulo Objetivo.

8. Posteriormente se construye el gráfico para la determinación del PVSM y la humedad óptima de compactación y la curva de módulos medidos por cada punto de humedad, con lo cual se obtendrá el módulo objetivo. Interceptando el valor del % óptimo de humedad de compactación, con la curva de módulo para obtener el módulo objetivo.

Ver **Gráfica 5.1.6.1-1 Determinación Módulo Objetivo.**

5.1.6.2. MEDICIÓN DE MÓDULO EN CAMPO.

Una vez se ha determinado el módulo objetivo de las capas a controlar en el laboratorio es necesario tomar en consideración lo siguiente:

1. El equipo con el que se medirá en campo debe ser el mismo que se utilizó para la determinación de los módulos objetivo en laboratorio, con el ajuste correspondiente en la altura y diámetro de la placa.

2. Se debe considerar una frecuencia de muestreo acorde a lo establecido en la ASTM D 3665, con lo que podemos garantizar que se revisará todo el lote de producción y no un área focalizada. Esto debe aplicarse por capa. Podría adoptarse una secuencia en zigzag (tresbolillo) por carril de manera que en un tramo de 250m tengamos un mínimo de 10 ensayos de módulo.
3. Se posiciona el equipo LWD sobre el punto de interés. La superficie de prueba deberá estar limpia, uniforme y sin partículas granulares sueltas tanto como sea posible. Si la superficie de prueba pertenece a una capa de base o subbase donde está compuesta por grava, se recomienda colocar una capa delgada de arena fina para colocar sobre ella el equipo, esto ayuda a tener un contacto uniforme entre el plato de carga y la superficie de prueba.



Figura 5.1.6.2-1 Ubicación de equipo y preparación de superficie.

4. Se posiciona el plato de carga y el sensor, se oscila 45° aproximadamente hacia atrás y hacia adelante para asegurarse de que estén posados sobre una superficie firme y estable.

5. Se eleva la masa a la altura de prueba, haciéndole caer libremente 3 veces como acondicionamiento, posteriormente 3 caídas más para obtener resultados los cuales se promedian automáticamente para cada punto de interés, se registran y se exportan a un sistema de registro y se continua con los siguientes puntos.
6. Se eleva la masa a la altura de prueba, haciéndole caer libremente 3 veces como acondicionamiento, posteriormente 3 caídas más para obtener resultados los cuales se promedian automáticamente para cada punto de interés, se registran y se exportan a un sistema de registro y se continua con los siguientes puntos.
7. Se deberá registrar la humedad del suelo que se está compactando para realizar la revisión si se está cumpliendo con la humedad óptima de compactación y la utilizada para la determinación del módulo. La humedad podrá ser determinada de la siguiente manera:
 - 7.1. ASTM D 4643-00, Determinación del contenido de agua (humedad) del suelo mediante calentamiento en horno de microondas.
 - 7.2. ASTM D 4944-11, Determinación en campo del contenido de agua (humedad) del suelo mediante el probador de presión de gas de carburo de calcio.
 - 7.3. ASTM D 4959-16, Determinación del contenido de agua del suelo mediante calentamiento directo.

Se tomará de manera aleatoria de las ubicaciones a muestrear, al menos 3 muestras representativas de cada ubicación seleccionada, para obtener su contenido de humedad,

8. Una vez finalizada la medición de módulos en campo y determinada la deflexión máxima y carga máxima se procede al cálculo detallado, con la siguiente ecuación:

$$E_{LWD\text{campo}} = \left[\frac{2k(1-\nu^2)}{AR} \right] \times 1000$$

Ecuación 5.1.6.2-1 Módulo de campo.

Donde:

$E_{LWD_{campo}}$ = Módulo de campo del suelo (MPa)

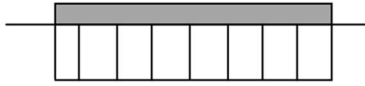
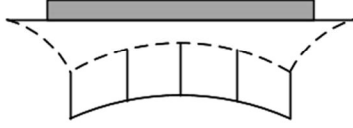
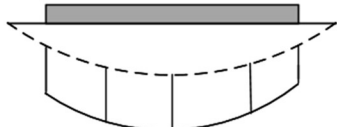
k = Coeficiente de rigidez del suelo, otorgado con el equipo LWD (kN/mm)

ν = Coeficiente de Poisson según el tipo de suelo, de acuerdo con la **Tabla 5-1**

A = Factor de distribución de esfuerzo, (adimensional). Ver **Tabla 5-2**

R = Radio del plato de carga, (mm)

Tabla 5-2 Factor de distribución de esfuerzo.

Tipo de Suelo	Factor (A)	Factor de distribución de esfuerzos
Suelos Mixtos.	2	
Material Granular	2.67	
Suelos Cohesivos	$\pi/2$	

9. Cuando se necesita conocer el valor en un sistema de capas (base o subbase) se obtendrá el módulo objetivo corregido, primeramente, obteniendo el módulo LWD de la capa inferior (E_2) (subbase o subrasante) ya compactada, para posteriormente, obtener el módulo LWD de la capa superior (E_1) (base y subbase); los resultados obtenidos del sistema de capas, se corregirán de acuerdo a la

Ecuación 5.1.6.2-2 Módulo Corregido por capa.

$$E_{Campo\ -Corregido} = 1 / \left\{ \frac{1}{E_2 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{h}{d} \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} \right)^2} \right]} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{d} \right)^2}} \right]}{E_1} \right\}$$

Ecuación 5.1.6.2-2 Módulo Corregido por capa.

Donde:

$E_{Campo\ Corregido}$ = Módulo de campo del suelo corregido (MPa)

E_1 = Módulo de campo de la capa superior (base), medido con el equipo LWD, (MPa)

E_2 = Módulo de campo de la capa inferior (subbase o subrasante), medido con el equipo LWD, (MPa).

h = Espesor de la capa superior, (m)

d = Radio del plato de carga, (m).



Figura 5.1.6.2-2 Medición de módulo previo a la conformación y compactación de siguiente capa.

10. Las mediciones para el caso de materiales estabilizados, para que el método tenga aplicación el módulo debe ser medido inmediatamente después de la construcción de la capa, hasta un periodo no mayor a dos horas.
11. En la **Tabla 5-3** se muestran valores de rangos típicos según el tipo de suelo para referencia.

Tabla 5-3 Valores de Módulo por tipo de suelo. Valores típicos (SCT EP-4)

Tipo de suelo	Módulo LWD de campo (MPa)
Base granular / Subbase	100 - 550
Subrasante	30 - 276

Tipo de suelo	Módulo LWD de campo (MPa)
Suelo estabilizado mecánicamente	140 - 690
Suelo tratado con cemento	690 - 1700
Base tratada con cemento	1050 - 2750

5.1.7. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE COMPACTACIÓN.

Una vez obtenido el módulo objetivo E_{LWD} objetivo y los módulos de campo E_{LWD} CAMPO, se calculan y reportan el porcentaje de compactación del suelo, para cada punto muestreado, como se indica a continuación:

$$P_c = \frac{E_{LWD \text{ CAMPO}}}{E_{LWD \text{ OBJETIVO}}} \times 100$$

Ecuación 5.1.7-1 Porcentaje de compactación

Donde:

P_c = Porcentaje de compactación, (%)

E_{LWD} objetivo = Módulo objetivo, obtenido del suelo en el laboratorio, (MPa)

E_{LWD} campo = Módulo de campo, obtenido del suelo en estado natural o estado compactado, (MPa).

5.1.8. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN.

1. Los valores del porcentaje de compactación obtenidos, se considera aceptables para cada punto, cuando el cociente sea mayor o igual a **1**.
2. Se aceptará el tramo de compactación, cuando más del 85% de los valores, cumplan con el referido en el punto anterior.

5.1.9. FORMA DE REPORTAR RESULTADOS.

Los resultados de las pruebas realizadas se analizan y reportan por separado de acuerdo con lo siguiente:

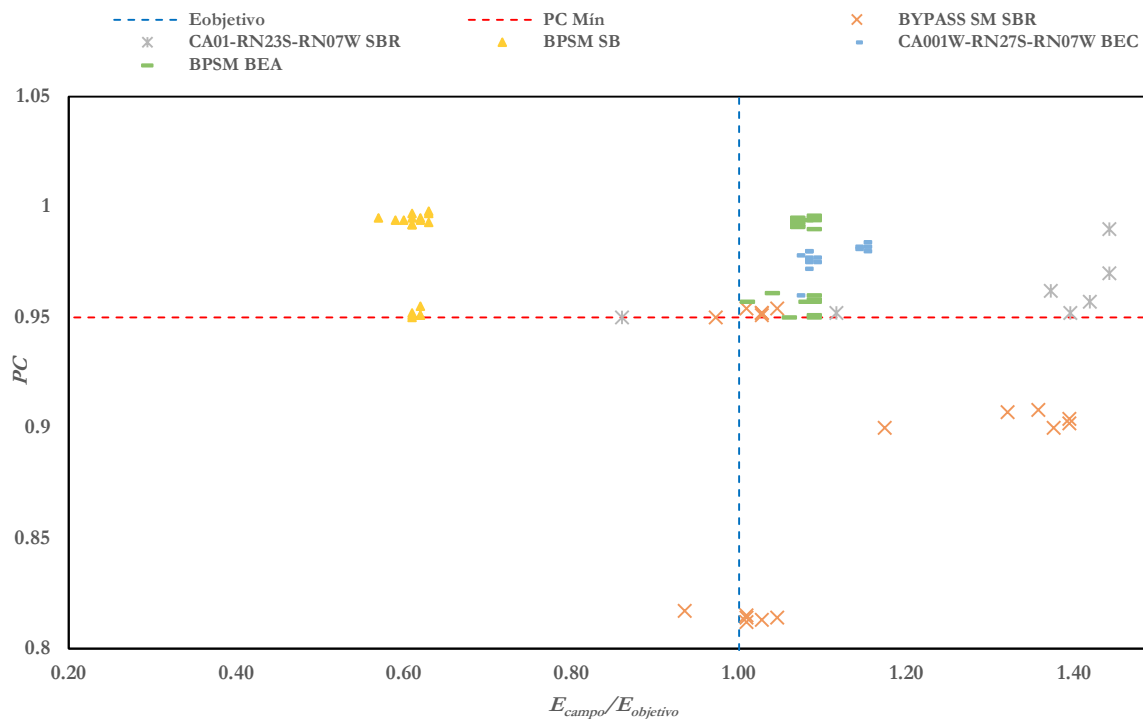
1. Ubicación del proyecto y descripción del clima.
2. Tipo de suelo, número de prueba, espesor de capa y línea del tiempo de la construcción.
3. Dispositivo de medición del contenido de agua, número de muestra y ubicación, porcentaje de contenido de agua.
4. Modelo del LWD usado en campo, tamaño de la placa de carga distancia de caída y peso de caída.
5. Coordenadas del área de muestreo y ubicaciones de las muestras numeradas.
6. Corrección del módulo objetivo para el espesor finito de capa y el radio de la placa de carga del LWD.
7. Identificador de la ubicación de la prueba y Módulo el LWD medido o el nombre del archivo de cada ubicación.

6. CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En este capítulo se resumen los principales hallazgos encontrados durante la investigación, pruebas de laboratorio y de campo, del presente estudio, los hemos clasificado en conclusiones y recomendaciones.

6.1. CONCLUSIONES.

- Se confirma que el interés en el uso del Deflectómetro de Impacto Ligero LWD ha incrementado en los últimos años con base al análisis realizado en el numeral **2.1.1**. Siendo la versatilidad del equipo, facilidad del ensayo y calidad de la información que se puede obtener en corto tiempo sus principales ventajas, así como también una considerable reducción en los costes de operación para la verificación de rigidez y control de compactación de los suelos al mismo tiempo, entregando un valor de uso primordial en los métodos de diseño mecánico empírico de pavimentos.
- Se implementó los procedimientos base que han dado origen a especificaciones actuales como la ASTM E 3331 y la SCT EP-4, con el objetivo de verificar que comportamiento estábamos teniendo en la práctica local de compactación de geomateriales, específicamente para las capas de pavimentos, confirmándose lo observado por otros investigadores en el sentido de que la densidad de campo no está directamente relacionada con la rigidez del suelo. Esto significa que cumplir con el porcentaje mínimo de compactación establecida en las especificaciones de los proyectos no es garantía de tener los valores requeridos en términos de módulos. En la **Gráfica 6.1-1** se presenta esta conclusión, en la cual se han ploteado todos los ensayos ejecutados en la fase de implementación.



Gráfica 6.1-1 Resultados implementación de QC con módulo objetivo.

- Los Resultados acá presentados, no son un indicador de aceptación o rechazo de las capas de pavimento en los proyectos analizados, ya que sus especificaciones técnicas no contemplan el uso del módulo objetivo para el QC/QA de la compactación de geomateriales en pavimentos, sin embargo, demuestran la necesidad de replantear el procedimiento de verificación y recepción de los trabajos de compactación en los pavimentos.
- Con base a lo investigado y plasmado en el numeral 3.3 de este documento, el uso de Densímetro Nuclear (NDG) para el control de compactación de capas granulares que incluyen el uso de RAP, tienden a proporcionar datos poco precisos, debido a que el contenido de asfalto remanente en los agregados del RAP (Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate) contiene compuestos de hidrocarburos que absorben los rayos gamma de la fuente radiactiva afectando la calidad de los resultados arrojados. Esta técnica de

mantenimiento se encuentra en las condiciones técnicas del FOVIAL bajo el código MR 0313.

- La humedad es uno de los factores más influyentes en la determinación de módulos, por tal motivo se deben implementar controles más estrictos para los procesos de construcción, tal como se pudo observar en las curvas de determinación de módulos objetivos en el CAPÍTULO 4. IMPLEMENTACIÓN QC/QA EN PROYECTOS EN EJECUCIÓN. las variaciones son sustanciales y el incremento o disminución del valor del módulo no presenta una relación directamente proporcional a la humedad, para el caso de los materiales de los proyectos en donde se implementó.

6.2. RECOMENDACIONES.

- En el mercado existen dos tipos de dispositivos LWD para la determinación de módulos los cuales están especificados mediante las ASTM E 2835 y E 2583. Se recomienda únicamente el uso de los dispositivos que cumplan con las ASTM E 2583 los cuales están equipados con celda de carga para la determinación de la carga máxima de impacto y no asumen una carga constante como los equipos que no tienen esta celda. Esto teniendo en consideración los esfuerzos realizados para dejar de usar métodos empíricos y subjetivos en el área de pavimentos.
- Se recomienda realizar un programa de implementación del método de QC/QA de la compactación para geomateriales en la construcción de pavimentos, incluyendo en las especificaciones técnicas de proyectos a nivel de fase de investigación en el uso del LWD ASTM E 2583 para la determinación de módulo objetivo y verificación en campo, para su evaluación y puesta en marcha en los trabajos en el país.

- Se recomienda la conducción de investigación para validar si el efecto de inexactitud en los resultados reportados por el uso de NDG en capas donde se utilice RAP está comprometiendo el QC de la construcción de capas estructurales de pavimentos.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- Afsharikia, Z. (2019). Modulus Based Compaction Quality Assurance for Unbound Materials Using Lightweight Deflectometer (LWD). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16344.55044>
- Afsharikia, Z., & Schwartz, C. (2018). Implementation of Lightweight Deflectometer (LWD) for Modulus Based Compaction Quality Assurance of Unbound Materials—SHAUM 4-51 Final Report. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19699.99365>
- Akmaz, E., Ullah, S., Tanyu, B., & Guler, E. (2020). Construction Quality Control of Unbound Base Course using Light Weight Deflectometer where Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate is Used as an Example. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2674, 036119812093447. <https://doi.org/10.1177/0361198120934473>
- Borowicka H. (1936). Influence of rigidity of a circular foundation slab on the distribution of pressures over a contact surface. vol 2.
- Chaddock B & Brown A J. (1995). Road foundation assessment. pp 200-208.
- Duddu, S. R., & Chennarapu, H. (2022). Quality control of compaction with lightweight deflectometer (LWD) device: A state-of-art. *International Journal of Geo-Engineering*, 13(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s40703-021-00171-2>
- Dwivedi, S., & Suman, S. K. (2023). A comprehensive review on non-destructive testing using LWD and Geogauge for quick QC/QA of pavement layers. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(3), 101. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01061-5>
- Ebels, L.J., Lorio, R., & van der Merwe, C. (2004). The Importance of Compaction from an Historical Perspective. *Proceedings of the 23rd Southern African Transport Conference (SATC 2004)*, 34-43.
- Elhakim, A., Elbaz, K., & Amer, M. (2014). The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction. *HBRC Journal*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.12.003>

- Fleming, P., Frost, M., & Lambert, J. P. (2007). Review of lightweight deflectometer for routine in situ assessment of Review of lightweight deflectometer for routine in situ assessment of pavement material stiffness.
https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Review%20of%20lightweight%20deflectometer%20for%20routine%20in%20situ%20assessment%20of%20pavement%20material%20stiffness&author=P.R.%20Fleming&publication_year=2007
- Kodikara, J., Islam, T., & Sountharajah, A. (2018). Review of soil compaction: History and recent developments. *Transportation Geotechnics*, 17, 24-34.
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.09.006>
- Kuttah, D. (2023). Assessing the interactions among factors affecting the light-weight deflectometer measurements. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(6), 238.
<https://doi.org/10.1007/s10064-023-03231-2>
- Liu, D., Lin, M., & Li, S. (2016). Real-Time Quality Monitoring and Control of Highway Compaction. *Automation in Construction*, 62, 114-123.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.11.007>
- Liu, D., Wang, Y., Chen, J., & Zhang, Y. (2020). Intelligent compaction practice and development: A bibliometric analysis. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 27(5), 1213-1232. <https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2019-0252>
- Mendoza-Sanchez, J. F., Alonso-Guzman, E., Espitia, R., Martinez Molina, W., & García, H. (2023). Influencia del clima en los métodos de diseño de pavimentos flexibles.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10305.74088>
- Nazzal, M. D., Abu-Farsakh, M. Y., Alshibli, K., & Mohammad, L. (2007). Evaluating the Light Falling Weight Deflectometer Device for in Situ Measurement of Elastic Modulus of Pavement Layers. *Transportation* (Vol. 2016, pp. 13-22). *Transportation Research Record*.
<https://doi.org/10.3141/2016-02>

- Nazzal, M., National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, & National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2014). Non-Nuclear Methods for Compaction Control of Unbound Materials (p. 22431). Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/22431>
- Ordaz, M. (2023). Assessment of light weight deflectometer for low volume roads experiencing rapidly increased traffic levels. <https://scholarsjunction.msstate.edu/td/5956>
- Khosravifar, Sadaf. (2015). Large-Scale Controlled-Condition Experiment to Evaluate Light Weight Deflectometers for Modulus Determination and Compaction Quality Assurance of Unbound Pavement Materials. University of Maryland.
- Schwartz, C., Afsharikia, Z., & Khosravifar, S. (2017). Standardizing Lightweight Deflectometer Modulus Measurements for Compaction Quality Assurance.
- Smith, B., & Diefenderfer, B. (2008). Comparison of Nuclear and Nonnuclear Pavement Density Testing Devices. Transportation Research Record, 2081, 121-129. <https://doi.org/10.3141/2081-13>
- Soil Stiffness Gauge for Soil Compaction Control | FHWA. (1998). <https://highways.dot.gov/public-roads/marchapril-1998/soil-stiffness-gauge-soil-compaction-control>
- Sulewska, M. J. (2012). The Control of Soil Compaction Degree by Means of LFWD. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2012.05>
- Vennapusa PKR & White DJ. (2009). Comparison of light weight deflectometer measurements for pavement foundation materials. ASTM Int Geotech Test J 32(3), 239-251.
- Viyant, C., Rathje, E., & Rauch, A. (2004). Compaction Control of Crushed Concrete and Recycled Asphalt Pavement using Nuclear Gauge. 958-966. [https://doi.org/10.1061/40744\(154\)83](https://doi.org/10.1061/40744(154)83)

Xu, Q., & Chang, G. K. (2016). Adaptive quality control and acceptance of pavement material density for intelligent road construction. *Automation in Construction*, 62, 78-88.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.11.004>

Zhang, Q., An, Z., Huangfu, Z., & Li, Q. (2022). A Review on Roller Compaction Quality Control and Assurance Methods for Earthwork in Five Application Scenarios. *Materials*, 15(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/ma15072610>

APÉNDICE 1.

En el presente apartado se deja los resúmenes de los cálculos realizados para la fase de implementación descritas en este documento.

Cálculos realizados en laboratorio para la capa Subrasante proyecto 1 definido en 4.1 PROYECTOS SELECCIONADOS. Solución de **Ecuación 3.2.1-1**.

I. Capa Subrasante.

Tabla Apéndice 1 - 1 Definición Módulo Laboratorio.

Punto Humedad	Fuerza (KN)	Deformación (μm)	K (Rigidez Suelo)	Coficiente Poisson	Diámetro placa (mm)	H_{Molde} (mm)	E_{LWD} (MPa)	E_{LWD} (promedio) (MPa)
18%	1.550	118.500	0.013	0.350	150.000	116.400	53.680	54.80
	1.580	117.900	0.013	0.350	150.000	116.400	55.000	
	1.590	117.000	0.014	0.350	150.000	116.400	55.770	
20%	1.580	127.400	0.012	0.350	150.000	116.400	50.900	55.40
	1.650	119.300	0.014	0.350	150.000	116.400	56.760	
	1.510	106.100	0.014	0.350	150.000	116.400	58.410	
22%	1.520	260.500	0.006	0.350	150.000	116.400	23.950	28.50
	1.610	226.600	0.007	0.350	150.000	116.400	29.160	
	1.540	194.600	0.008	0.350	150.000	116.400	32.480	
24%	1.700	477.700	0.004	0.350	150.000	116.400	14.610	16.80
	1.670	441.100	0.004	0.350	150.000	116.400	15.540	
	1.680	338.800	0.005	0.350	150.000	116.400	20.350	

Solución de **Ecuación 3.2.2-1 Módulo de campo**.

Tabla Apéndice 1 - 2 Definición Módulo campo

Punto	F (KN)	δ (μm)	ν	d (mm)	A	k	E_1 (MPa)
1	7.14	392.6	0.35	150	3.1416	18.19	68.00
2	7.25	394.4	0.35	150	3.1416	18.38	68.00
3	7.24	383	0.35	150	3.1416	18.90	70.00
4	7.36	390.9	0.35	150	3.1416	18.83	70.00
5	7.32	378.7	0.35	150	3.1416	19.33	72.00
6	8.03	496.1	0.35	150	3.1416	16.19	60.00
7	7.44	468.6	0.35	150	3.1416	15.88	59.00
8	7.58	456.7	0.35	150	3.1416	16.60	62.00
9	7.51	458.7	0.35	150	3.1416	16.37	61.00
10	7.42	443.3	0.35	150	3.1416	16.74	62.00

II. Capa Base Estabilizada.

Solución de Ecuación 3.2.1-1.

Tabla Apéndice 1 - 3 Definición Módulo laboratorio

Punto Humedad	Fuerza (KN)	Deformación (µm)	K (Rigidez Suelo)	Coficiente Poisson	Diámetro placa (mm)	H _{Molde} (mm)	E _{LWD} (MPa)	E _{LWD} (promedio) (MPa)
12%	1.64	106.20	0.015	0.35	150.00	116.40	63.38	64.00
	1.57	96.40	0.016	0.35	150.00	116.40	66.84	
	1.59	105.80	0.015	0.35	150.00	116.40	61.68	
13%	1.64	136.10	0.012	0.35	150.00	116.40	49.45	47.90
	1.69	147.70	0.011	0.35	150.00	116.40	46.96	
	1.67	144.60	0.012	0.35	150.00	116.40	47.40	
15%	1.25	83.90	0.015	0.35	150.00	116.40	61.15	53.40
	1.60	132.90	0.012	0.35	150.00	116.40	49.41	
	1.60	132.00	0.012	0.35	150.00	116.40	49.75	
17%	1.51	188.30	0.008	0.35	150.00	116.40	32.91	61.90
	1.35	69.10	0.020	0.35	150.00	116.40	80.18	
	1.48	83.80	0.018	0.35	150.00	116.40	72.48	
19%	1.43	62.00	0.023	0.35	150.00	116.40	94.66	98.20
	1.55	63.00	0.025	0.35	150.00	116.40	100.97	
	1.56	64.60	0.024	0.35	150.00	116.40	99.11	

Para la definición del módulo a ser comparado con el módulo objetivo se debe corregir con el sistema de capas, haciendo uso con el módulo definido en campo **Tabla Apéndice 1 - 2 Definición Módulo campo**.

A continuación, se presenta la solución de la **Ecuación 3.2.2-2 Módulo por capa corregido**.

Tabla Apéndice 1- 4 Definición Módulo Corregido por espesor capa

$F (Kn)$	$\delta (\mu m)$	ν	$d (mm)$	A	k	$E_1 (MPa)$	$h (m)$	$E_2 (MPa)$	h/d	E_1/E_2	$\sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}}$	$\left(\frac{h}{d}\right)^2$	$\sqrt{1 + \left(\frac{h}{d}\sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}}\right)^2}$	$\sqrt{1 + \left(\frac{h}{d}\right)^2}$	$E_{\text{corregido}}$
7.3	569.2	0.35	150	2.67	12.83	56.00	0.25	65.20	1.67	0.86	0.95	2.79	122.3	1.95	63.90
7.3	526.3	0.35	150	2.67	13.87	61.00	0.25	65.20	1.67	0.94	0.98	2.79	125	1.95	64.60
7.3	523.6	0.35	150	2.67	13.94	61.00	0.25	65.20	1.67	0.94	0.98	2.79	125	1.95	64.60
7.3	502.4	0.35	150	2.67	14.53	64.00	0.25	65.20	1.67	0.98	0.99	2.79	126	1.95	64.90
7.3	516.7	0.35	150	2.67	14.13	62.00	0.25	65.20	1.67	0.95	0.98	2.79	125	1.95	64.60
7.5	550.3	0.35	150	2.67	13.63	60.00	0.25	65.20	1.67	0.92	0.97	2.79	124.1	1.95	64.40
7.4	514.4	0.35	150	2.67	14.39	63.00	0.25	65.20	1.67	0.97	0.99	2.79	126	1.95	64.90
7.6	523	0.35	150	2.67	14.53	64.00	0.25	65.20	1.67	0.98	0.99	2.79	126	1.95	64.90
7.4	488.2	0.35	150	2.67	15.16	66.00	0.25	65.20	1.67	1.01	1.00	2.79	126.9	1.95	65.10
7.4	485.4	0.35	150	2.67	15.25	67.00	0.25	65.20	1.67	1.03	1.01	2.79	127.8	1.95	65.40
7.29	342.5	0.35	150	2.67	21.28	93.00	0.25	65.20	1.67	1.43	1.13	2.79	139.2	1.95	68.20
7.28	332.8	0.35	150	2.67	21.88	96.00	0.25	65.20	1.67	1.47	1.14	2.79	140.2	1.95	68.50
7.35	326.4	0.35	150	2.67	22.52	99.00	0.25	65.20	1.67	1.52	1.15	2.79	141.2	1.95	68.70
7.48	318.4	0.35	150	2.67	23.49	103.00	0.25	65.20	1.67	1.58	1.16	2.79	142.1	1.95	68.90
7.33	314.9	0.35	150	2.67	23.28	102.00	0.25	65.20	1.67	1.56	1.16	2.79	142.1	1.95	68.90

Una vez se han realizado todos los cálculos se procede a la obtención de la relación entre el Módulo medico en campo y el Módulo definido en laboratorio.

Tabla Apéndice 1 - 5 Relación entre Módulo Medico en campo vs el Módulo Objetivo (Sub rasante)

E_t (MPa)	E_{objetivo}	E_{objetivo}
68.00	43.00	158%
68.00	43.00	158%
70.00	43.00	163%
70.00	43.00	163%
72.00	43.00	167%
60.00	43.00	140%
59.00	43.00	137%
62.00	43.00	144%
61.00	43.00	142%
62.00	43.00	144%

Tabla Apéndice 1 - 6 Relación entre Módulo Medico en campo vs el Módulo Objetivo (Base Estabilizada con Cemento)

$E_{\text{corregido}}$	E_{objetivo}	$E_{\text{campo}}/E_{\text{objetivo}}$
63.90	60.00	107%
64.60	60.00	107%
64.60	60.00	107%
64.90	60.00	107%
64.60	60.00	107%
64.40	60.00	107%
64.90	60.00	107%
64.90	60.00	107%
65.10	60.00	107%
65.40	60.00	107%
68.20	60.00	114%
68.50	60.00	114%
68.70	60.00	114%
68.90	60.00	114%
68.90	60.00	114%

Cálculos para Proyecto 2 definido en **4.1PROYECTOS SELECCIONADOS**.

I. SUBRASANTE.

Solución de **Ecuación 3.2.1-1**

Tabla Apéndice 1 - 7 Definición Módulo objetivo en laboratorio

Punto Humedad	Fuerza (KN)	Deformación (μm)	K(rigidez del suelo)	Coefficiente Poisson	Diámetro placa (mm)	H _{Molde} (mm)	E _{LWD} (MPa)	E _{LWD} (promedio) (MPa)
14%	1.60	100.30	0.0160	0.35	150.00	116.40	78.06	84.60
	1.60	85.80	0.0186	0.35	150.00	116.40	91.25	
	1.60	92.70	0.0173	0.35	150.00	116.40	84.46	
16%	1.75	129.20	0.0135	0.35	150.00	116.40	66.28	62.90
	1.61	129.10	0.0125	0.35	150.00	116.40	61.02	
	1.69	134.90	0.0125	0.35	150.00	116.40	61.30	
18%	1.51	134.50	0.0112	0.35	150.00	116.40	54.93	55.50
	1.68	151.30	0.0111	0.35	150.00	116.40	54.33	
	1.67	142.60	0.0117	0.35	150.00	116.40	57.30	
20%	1.36	63.20	0.0215	0.35	150.00	116.40	105.29	91.00
	1.63	91.40	0.0178	0.35	150.00	116.40	87.26	
	1.51	91.80	0.0164	0.35	150.00	116.40	80.49	

Solución de **Ecuación 3.2.2-1 Módulo de campo**.

Tabla Apéndice 1 - 8 Definición Módulo de Campo

F (KN)	δ (μm)	ν	d (mm)	A	k	E _I (MPa)
7.30	608.20	0.35	150.00	2.67	12.00	53.00
7.35	585.60	0.35	150.00	2.67	12.55	55.00
7.32	572.40	0.35	150.00	2.67	12.79	56.00
7.31	574.90	0.35	150.00	2.67	12.72	56.00
7.45	580.40	0.35	150.00	2.67	12.84	56.00
7.39	571.60	0.35	150.00	2.67	12.93	57.00
7.25	498.30	0.35	150.00	2.67	14.55	64.00
7.19	435.80	0.35	150.00	2.67	16.50	72.00
7.28	421.50	0.35	150.00	2.67	17.27	76.00
7.33	427.90	0.35	150.00	2.67	17.13	75.00
7.37	435.80	0.35	150.00	2.67	16.91	74.00
7.26	420.60	0.35	150.00	2.67	17.26	76.00
7.37	589.80	0.35	150.00	2.67	12.50	55.00
7.41	585.70	0.35	150.00	2.67	12.65	55.00

F (KN)	δ (μm)	ν	d (mm)	A	k	E_1 (MPa)
7.32	578.00	0.35	150.00	2.67	12.66	55.00
7.42	574.50	0.35	150.00	2.67	12.92	57.00
7.37	577.00	0.35	150.00	2.67	12.77	56.00
6.96	594.80	0.35	150.00	2.67	11.70	51.00

II. SUB-BASE.

Definición del Módulo objetivo.

Solución de **Ecuación 3.2.1-1**

Punto Humedad	Fuerza (KN)	Deformación (μm)	K(Rígidez suelo)	Coefficiente Poisson	Diámetro placa (mm)	H_{Molde} (mm)	E_{LWD} (MPa)	E_{LWD} (promedio) (MPa)
6%	1.64	88	0.0186	0.35	150	116.4	76.49	83.80
	1.68	80.6	0.0208	0.35	150	116.4	85.55	
	1.63	74.8	0.0218	0.35	150	116.4	89.44	
8%	1.67	77.8	0.0215	0.35	150	116.4	88.10	90.40
	1.72	76.8	0.0224	0.35	150	116.4	91.92	
	1.73	77.8	0.0222	0.35	150	116.4	91.26	
10%	1.69	62.1	0.0272	0.35	150	116.4	111.69	121.20
	1.72	56.65	0.0304	0.35	150	116.4	124.61	
	1.69	54.5	0.031	0.35	150	116.4	127.27	
12%	1.55	160.1	0.0097	0.35	150	116.4	39.73	44.30
	1.55	145.2	0.0107	0.35	150	116.4	43.81	
	1.59	132.5	0.012	0.35	150	116.4	49.25	

Para la definición del módulo a ser comparado con el módulo objetivo se debe corregir con el sistema de capas, haciendo uso con el módulo definido en campo **Tabla Apéndice 1 - 8 Definición Módulo de Campo**

A continuación, se presenta la solución de la **Ecuación 3.2.2-2 Módulo por capa corregido**.

Tabla Apéndice 1 - 9 Definición Módulo objetivo Subbase.

$F (Kn)$	$\delta (\mu m)$	ν	$d (mm)$	A	k	$E_1 (MPa)$	$h (m)$	$E_2 (MPa)$	h/d	E_1/E_2	$\sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}}$	$\left(\frac{h}{d}\right)^2$	$\sqrt{1 + \left(\frac{h}{d} \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}}\right)^2}$	$\sqrt{1 + \left(\frac{h}{d}\right)^2}$	$E_{\text{corregido.}}$
7.12	406.3	0.35	150	2.00	17.52	102.49	0.18	55.00	1.2	1.86	1.23	1.44	98.1	1.56	59.80
7.2	394.4	0.35	150	2.00	18.26	106.82	0.18	55.00	1.2	1.94	1.25	1.44	99.2	1.56	60.20
7.19	387.8	0.35	150	2.00	18.54	108.46	0.18	55.00	1.2	1.97	1.25	1.44	99.2	1.56	60.20
7.26	381.3	0.35	150	2.00	19.04	111.38	0.18	55.00	1.2	2.03	1.27	1.44	100.3	1.56	60.60
7.14	378.3	0.35	150	2.00	18.87	110.39	0.18	55.00	1.2	2.01	1.26	1.44	99.7	1.56	60.40
7.1	628.9	0.35	150	2.00	11.29	66.05	0.18	55.00	1.2	1.2	1.06	1.44	89	1.56	56.30
7.12	422.2	0.35	150	2.00	16.86	98.63	0.18	55.00	1.2	1.79	1.21	1.44	97	1.56	59.40
7.2	431.1	0.35	150	2.00	16.7	97.70	0.18	55.00	1.2	1.78	1.21	1.44	97	1.56	59.40
7.15	416.8	0.35	150	2.00	17.15	100.33	0.18	55.00	1.2	1.82	1.22	1.44	97.5	1.56	59.60
7.21	449.9	0.35	150	2.00	16.03	93.78	0.18	55.00	1.2	1.71	1.20	1.44	96.4	1.56	59.20
7.13	524.5	0.35	150	2.00	13.59	79.50	0.18	55.00	1.2	1.45	1.13	1.44	92.7	1.56	57.80
7.17	376.7	0.35	150	2.00	19.03	111.33	0.18	55.00	1.2	2.02	1.26	1.44	99.7	1.56	60.40
7.39	361.5	0.35	150	2.00	20.44	119.57	0.18	55.00	1.2	2.17	1.29	1.44	101.4	1.56	61.00
7.4	349.6	0.35	150	2.00	21.17	123.84	0.18	55.00	1.2	2.25	1.31	1.44	102.5	1.56	61.40
7.34	343.8	0.35	150	2.00	21.35	124.90	0.18	55.00	1.2	2.27	1.31	1.44	102.5	1.56	61.40
7.37	342	0.35	150	2.00	21.55	126.07	0.18	55.00	1.2	2.29	1.32	1.44	103	1.56	61.60

III. BASE EMULSIFICADA (ESTABILIZADA CON EMULSIÓN).

Definición del Módulo objetivo.

Solución de **Ecuación 3.2.1-1**

Tabla Apéndice 1 - 10 Definición Módulo objetivo

Punto Humedad	Fuerza (KN)	Deformación (µm)	K(Rígidez suelo)	Coficiente Poisson	Diámetro placa (mm)	H _{Molde} (mm)	E _{LWD} (MPa)	E _{LWD} (promedio) (MPa)
6%	1.64	88	0.0186	0.35	150	116.4	76.49	83.80
	1.68	80.6	0.0208	0.35	150	116.4	85.55	
	1.63	74.8	0.0218	0.35	150	116.4	89.44	
8%	1.67	77.8	0.0215	0.35	150	116.4	88.10	90.40
	1.72	76.8	0.0224	0.35	150	116.4	91.92	
	1.73	77.8	0.0222	0.35	150	116.4	91.26	
10%	1.69	62.1	0.0272	0.35	150	116.4	111.69	121.20
	1.72	56.65	0.0304	0.35	150	116.4	124.61	
	1.69	54.5	0.031	0.35	150	116.4	127.27	
12%	1.55	160.1	0.0097	0.35	150	116.4	39.73	44.30
	1.55	145.2	0.0107	0.35	150	116.4	43.81	
	1.59	132.5	0.012	0.35	150	116.4	49.25	

Para la definición del módulo a ser comparado con el módulo objetivo se debe corregir con el sistema de capas, haciendo uso con el módulo definido en campo **Tabla Apéndice 1 - 9 Definición Módulo objetivo Subbase.**(E₁)

A continuación, se presenta la solución de la **Ecuación 3.2.2-2 Módulo por capa corregido.**

El modulo E₂ corresponde al promedio del módulo medido en campo con el LWD.

Tabla Apéndice 1 - 11 Módulo corregido BEA

F (Kn)	δ (μm)	ν	d (mm)	A	k	E_1 (MPa)	h (m)	E_2 (MPa)	h/d	E_1/E_2	$\sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}}$	$\left(\frac{h}{d}\right)^2$	$\sqrt{1 + \left(\frac{h}{d}\sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}}\right)^2}$	$\sqrt{1 + \left(\frac{h}{d}\right)^2}$	$E_{\text{corregido}}$
7.20	278.80	0.35	150	2.67	25.82	113.14	0.15	105.00	1.00	1.08	1.03	1.00	150.70	1.41	106.30
7.10	261.80	0.35	150	2.67	27.12	118.84	0.15	105.00	1.00	1.13	1.04	1.00	151.50	1.41	106.70
7.20	264.70	0.35	150	2.67	27.2	119.19	0.15	105.00	1.00	1.14	1.04	1.00	151.50	1.41	106.70
7.30	260.70	0.35	150	2.67	28	122.70	0.15	105.00	1.00	1.17	1.05	1.00	152.30	1.41	107.10
7.30	266.60	0.35	150	2.67	27.38	119.98	0.15	105.00	1.00	1.14	1.04	1.00	151.50	1.41	106.70
7.20	260.60	0.35	150	2.67	27.63	121.08	0.15	105.00	1.00	1.15	1.05	1.00	152.30	1.41	107.10
7.20	305.20	0.35	150	2.67	23.59	103.37	0.15	105.00	1.00	0.98	0.99	1.00	147.80	1.41	104.90
7.20	272.30	0.35	150	2.67	26.44	115.86	0.15	105.00	1.00	1.1	1.03	1.00	150.70	1.41	106.30
7.20	268.10	0.35	150	2.67	26.86	117.70	0.15	105.00	1.00	1.12	1.04	1.00	151.50	1.41	106.70
7.30	263.50	0.35	150	2.67	27.7	121.38	0.15	105.00	1.00	1.16	1.05	1.00	152.30	1.41	107.10
7.20	263.20	0.35	150	2.67	27.36	119.89	0.15	105.00	1.00	1.14	1.04	1.00	151.50	1.41	106.70
7.30	260.60	0.35	150	2.67	28.01	122.74	0.15	105.00	1.00	1.17	1.05	1.00	152.30	1.41	107.10
7.30	326.80	0.35	150	2.67	22.34	97.89	0.15	105.00	1.00	0.93	0.98	1.00	147.00	1.41	104.50
7.20	321.70	0.35	150	2.67	22.38	98.07	0.15	105.00	1.00	0.93	0.98	1.00	147.00	1.41	104.50
7.20	314.20	0.35	150	2.67	22.92	100.44	0.15	105.00	1.00	0.96	0.99	1.00	147.80	1.41	104.90
7.30	311.60	0.35	150	2.67	23.43	102.67	0.15	105.00	1.00	0.98	0.99	1.00	147.80	1.41	104.90
7.40	309.60	0.35	150	2.67	23.9	104.73	0.15	105.00	1.00	1	1.00	1.00	148.50	1.41	105.20
7.50	310.20	0.35	150	2.67	24.18	105.96	0.15	105.00	1.00	1.01	1.00	1.00	148.50	1.41	105.20
7.40	532.30	0.35	150	2.67	13.9	60.91	0.15	105.00	1.00	0.58	0.83	1.00	136.50	1.41	99.10
7.30	392.30	0.35	150	2.67	18.61	81.55	0.15	105.00	1.00	0.78	0.92	1.00	142.70	1.41	102.30
7.10	322.60	0.35	150	2.67	22.01	96.45	0.15	105.00	1.00	0.92	0.97	1.00	146.30	1.41	104.10
7.20	309.20	0.35	150	2.67	23.29	102.06	0.15	105.00	1.00	0.97	0.99	1.00	147.80	1.41	104.90
7.20	314.30	0.35	150	2.67	22.91	100.39	0.15	105.00	1.00	0.96	0.99	1.00	147.80	1.41	104.90