



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**CONSTRUCCIÓN DE UNA VIGA BENKELMAN PARA LA EVALUACIÓN
ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, USADA EN EL LABORATORIO
DE PAVIMENTOS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, SEDE
QUITO, CAMPUS SUR**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingenieros Civiles

AUTORES: Miguel Ángel Domínguez Delgado
Santiago Estéfano López Yanza

TUTOR: Francisco Roberto Ortiz Navas

Quito - Ecuador
2024

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, Miguel Ángel Domínguez Delgado con documento de identificación N° 1722225826 y Santiago Estéfano López Yanza con documento de identificación N° 1719238410; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 31 de enero del 2024

Atentamente,



Miguel Ángel Domínguez Delgado

1722225826



Santiago Estéfano López Yanza

1719238410

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Miguel Ángel Domínguez Delgado con documento de identificación N° 1722225826 y Santiago Estéfano López Yanza con documento de identificación N° 1719238410; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Construcción De Una Viga Benkelman Para La Evaluación Estructural De Pavimentos Flexibles, Usada En El Laboratorio De Pavimentos De La Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 31 de enero del 2024

Atentamente,



Miguel Ángel Domínguez Delgado

1722225826



Santiago Estéfano López Yanza

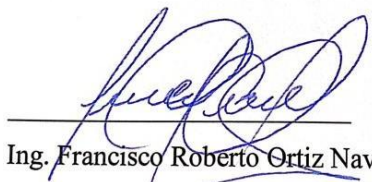
1719238410

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Francisco Roberto Ortiz Navas con documento de identificación N° 1717631244, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: CONSTRUCCIÓN DE UNA VIGA BENKELMAN PARA LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, USADA EN EL LABORATORIO DE PAVIMENTOS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, SEDE QUITO, CAMPUS SUR, realizado por Miguel Ángel Domínguez Delgado con documento de identificación N° 1722225826 y por Santiago Estéfano López Yanza con documento de identificación N° 1719238410, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 31 de enero del 2024

Atentamente,



Ing. Francisco Roberto Ortiz Navas, PhD
1717631244

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico especialmente a mi familia, quienes han sido siempre mi apoyo constante en cada paso importante que he dado en mi vida.

A mi padre Miguel, que ha sido siempre la persona que me ha brindado su ayuda y apoyo en cada proyecto que me he propuesto, por ser más que un padre un amigo. Le agradezco por guiarme por el buen camino.

A mi madre Luisa, quien ha estado a mi lado en los momentos más difíciles, nunca se ha rendido cuando más he necesitado de ella. A mi hermana Stefanny que ha sido un ejemplo para mí y quien siempre ha sabido como aconsejarme y guiarme para poder lograr mis objetivos.

Miguel Ángel Domínguez Delgado

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a todas las personas que a lo largo de mi vida estado presentes dándome su apoyo, sus fuerzas, su guía para poder ser una buena persona y un buen profesional.

A mis padres Santiago y Gloria, quienes han estado presentes siempre en cada paso de mi vida dándome un ejemplo de perseverancia, esfuerzo y dedicación para poder cumplir mis metas y objetivos planteados. Siendo un pilar importante en mi vida personal y profesional acompañándome de la mano desde el primer paso.

A mi pareja Gabriela, quien ha estado en las buenas y malas siempre apoyándome, quien con su amor y dedicación está a mi lado en cada etapa de mi vida, por ser un pilar importante al ser mi compañera de vida y darme los regalos más hermosos que podría tener, mis hijos.

A mis hijos Gabriel y Christopher, quienes son mi mayor fuente de inspiración para seguir adelante en cada escalón de mi vida, en su corta edad me dan su apoyo incondicional, fortaleciéndome en cada momento para poder seguir adelante.

Santiago Estéfano López Yanza

AGRADECIMIENTO

A mis padres Miguel y Luisa por su amor incondicional, por ser mi guía y ejemplo para ser siempre una buena persona. Agradezco su esfuerzo constante para que pueda lograr todo lo que me propongo en la vida. Por apoyarme en este camino para convertirme en profesional, por su sacrificio y palabras de aliento en cada escalón que me llevaron a alcanzar esta meta.

A mi hermana quien ha sido mi inspiración para poder convertirme en un profesional, agradezco por ser un apoyo y ejemplo.

A la Universidad por abrirme las puertas de sus aulas y permitirme estudiar esta carrera que tanto me gusta. A los docentes de la Universidad Politécnica Salesiana por compartir todos sus conocimientos y experiencia.

Miguel Ángel Domínguez Delgado

AGRADECIMIENTO

A mi padre Santiago, por ser la guía de cómo ser un profesional responsable, correcto en sus funciones. A mi madre Gloria, por ser mi más grande apoyo y estar en cada paso de mi vida, por ser una mujer guerrera que ha podido salir de cualquier adversidad y ser la gran mujer que es hoy en día, por ser mi inspiración y mi ejemplo a seguir.

A mi pareja, por ser la gran mujer que es, por ser incondicional, por el cariño, amor, dedicación que le dedica a nuestra familia día tras día, siendo mi compañera de múltiples batallas y estar juntos de la mano en cada adversidad.

A mis hijos, por ser mi mayor motivación mi incentivo para seguir adelante y no dejarme vencer, por ser los regalos más grandes que pude obtener.

A mi hermana que siempre me dio su apoyo en cada momento, dándome ánimo, empujándome adelante sin dejarme caer, dándome su consejo y guía.

A mis familiares cercanos quienes con su gran ánimo y apoyo estuvieron pendientes de que no me deje vencer y poder seguir adelante en cada decisión que he tomado.

Santiago Estéfano López Yanza

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I	1
ANTECEDENTES Y GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Problema de estudio	1
1.2.1 Antecedentes	1
1.2.2 Importancia y alcance	2
1.2.3 Delimitación.....	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Grupo Objetivo (Beneficiarios).....	3
1.5 Objetivos	4
1.5.1 Objetivo General	4
1.5.2 Objetivos Específicos.....	4
CAPÍTULO II	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1 Pavimento.....	5
2.2 Pavimento Flexible.....	5
2.3 Fallas en pavimentos	6
2.4 Viga Benkelman	6
2.5 Palanca o brazo de medida	6
2.6 Importancia de la Evaluación de Pavimentos	7
2.7 Módulo de Elasticidad.....	7
2.8 Índice de Soporte de California ‘CBR’	7
2.9 Deformímetro	8
2.10 Deformación en Pavimentos	8
2.11 Radio de Curvatura.....	8
CAPÍTULO III	10

METODOLOGÍA	10
3.1 Tipo de Investigación	10
3.2 Método	10
3.3 Recolección de Información Teórica	10
3.4 Proceso técnico de Ingeniería Civil.....	11
3.4.1 Desarrollo de la viga Benkelman	11
3.4.2 Diseño en programa asistido por computadora.....	11
3.4.3 Preparación del ensayo	11
3.4.4 Medición de la deflexión	11
3.4.5 Análisis de Resultados Obtenidos.....	11
3.4.6 Implementación de la Viga Benkelman	12
CAPÍTULO IV	13
CONSTRUCCIÓN DE LA VIGA BENKELMAN	13
4.1.1 Material	13
4.1.2 Longitud de la Viga	13
4.1.3 Ancho	13
4.1.4 Forma	13
4.1.5 Peso	14
4.1.6 Indicador de la deflexión	14
4.1.7 Peso de la carga.....	14
4.2 Diseño en programa asistido por computadora	14
4.3 Partes de la Viga Benkelman	17
4.3.1 Cuerpo de la Viga Benkelman	18
4.3.2 Apoyos del cuerpo	18
4.3.3 Deformímetros	18
4.3.4 Tornillo de fijación	18
4.3.5 Pasador/pivote.....	18

4.3.6	Brazos de aluminio	18
4.4	Ensamblaje de la Viga Benkelman.....	19
4.5	Calibración del Equipo de la Viga Benkelman	21
4.6	Planos Viga Benkelman	22
CAPÍTULO V		27
RECOLECCIÓN DE DATOS.....		27
5.1	Lugar de Análisis	27
5.2	Preparación de Equipos e Instrumentos en el ensayo	28
5.2.1	Volqueta.....	28
5.2.2.1	Cálculo de Carga en la volqueta.....	29
5.2.2	Viga Benkelman.....	31
5.3	Toma de datos.....	35
CAPÍTULO VI		49
INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....		49
6.1	Método de Análisis.....	49
6.2	Obtención de resultados	49
6.3	Conversión de los resultados	51
6.4	Procedimiento del método Prueba t pareada entre dos muestras.....	52
CAPÍTULO VII.....		69
GUÍA DE USO.....		69
7.1	Partes de la Viga Benkelman.....	69
7.1	Armado de la viga	73
7.2	Calibración del equipo.....	74
7.3	Aplicación de la norma INV E – 795 – 13	75
7.3.1	Equipo	75
7.3.2	Preparación del ensayo	75
7.3.3	Procedimiento.....	76

7.3.4 Frecuencia de medición	77
7.3.5 Cálculos	78
7.3.6 Corrección de la deflexión por temperatura	80
7.3.7 Cálculos de deflexión característica	82
CONCLUSIONES	83
RECOMENDACIONES	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ficha técnica excavadora CAT 320.....	29
Tabla 2. Distancia del punto de ensayo desacuerdo al ancho del carril.	43
Tabla 3. Deflexiones máximas y Radios de Giro del carril izquierdo de la vía.	50
Tabla 4. Deflexiones máximas y Radios de Curvatura del carril derecho de la vía.....	50
Tabla 5. Deflexiones máximas y Radios de Curvatura del carril izquierdo de la vía en milímetros.....	51
Tabla 6. Deflexiones máximas y Radios de Curvatura del carril derecho de la vía en milímetros.	52
Tabla 7. Diferencia de las Deflexiones máximas obtenidas por ambas vigas en toda la vía....	53
Tabla 8. Diferencia de los Radios de Curvatura de las Deflexiones máximas obtenidas por ambas vigas en toda la vía.....	55
Tabla 9. Valor Z_r , para diferentes niveles de confiabilidad.	63
Tabla 10. Deflexión característica y factor s/m viga estudiantes carril izquierdo.....	65
Tabla 11. Deflexión característica y factor s/m viga MTOP carril izquierdo.....	66
Tabla 12. Deflexión característica y factor s/m viga estudiantes carril derecho	67
Tabla 13. Deflexión característica y factor s/m viga MTOP carril derecho	68
Tabla 14. Partes del cuerpo de la viga	70
Tabla 15. Partes de los brazos de la viga.....	72
Tabla 16. Localización del punto de ensayo.....	76
Tabla 17. Tabla para la determinación del radio de curvatura	79
Tabla 18. Valor Z_r , para diferentes niveles de confiabilidad.	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur, entre la Av.Rumichaca y Av. Moran Valverde.....	2
Figura 2. Viga Benkelman Ministerio de Obras Públicas	15
Figura 3. Diseño 3D Viga Benkelman	15
Figura 4. Diseño Viga Benkelman Cuerpo de la viga.....	16
Figura 5. Diseño Viga Benkelman Cuerpo de la viga.....	16
Figura 6. Diseño del brazo mayor de la Viga Benkelman.....	17
Figura 7. Partes de la viga Benkelman	17
Figura8. Brazos de la viga Benkelman.....	19
Figura9. Acople entre bazo y cuerpo.....	20
Figura10. Acople entre bazo y cuerpo.....	20
Figura11. Tornillos de fijación	21
Figura 12. Tramo de análisis	27
Figura13. Vía donde se realizará el ensayo	28
Figura14. Volqueta para el ensayo	30
Figura15. Volqueta para el ensayo Cargada.....	31
Figura 16. Brazo de aluminio de la viga	31
Figura17. Ensamblaje de los brazos de la viga.....	32
Figura 18. Cuerpo de la Viga M.O.P.....	32
Figura19. Cuerpo de la Viga UPS	33
Figura20. Armado de la viga.....	33
Figura21. Vigas armadas para el ensayo	34
Figura22. Comprobación de funcionamiento de la viga	34
Figura23. Punto de Partida donde desde donde se realizará el ensayo	35
Figura24. Medición de la longitud de la vía a ensayar.....	35
Figura25. Tramo de vía a ensayar con su longitud y ancho de carril.....	36
Figura26. Abscisado del carril izquierdo de la vía	36
Figura27. Abscisa 0+000 carril izquierdo de la vía.....	37
Figura28. Abscisado del carril izquierdo de la vía	37
Figura29. Abscisado del carril derecho de la vía	38
Figura30. Abscisa 0+ 010 del carril derecho de la vía	38
Figura 31. Abscisado del carril derecho de la vía	39
Figura 32. Abscisado de ambos carriles de la vía	39
Figura 33. Colocación del brazo de la viga al eje de la rueda del camión cargado.....	40
Figura 34. Verificación de la colocación correcta del brazo más largo de la viga.....	40
Figura 35. Colocación de Varilla para encontrar la perpendicular.....	41
Figura 36. Colocación de señal para encontrar el centro del eje de la rueda del camión.....	42
Figura 37. Ajuste de los tornillos de fijación de los deformímetros del equipo.....	43
Figura 38. Transporte de la viga.....	44
Figura 39. Colocación de la Viga Previo al ensayo	44
Figura 40. Alineamiento del brazo de la viga con el centro del eje de la rueda del camión ...	45
Figura 41. Desenroscado Tornillo de Fijación de la Viga.....	45

Figura 42. Desenroscado de los Tornillo de Fijación de los brazos de la Viga	46
Figura 43. Calibración de los deformímetros	46
Figura 44. Movimiento de la volqueta al punto de ensayo.....	47
Figura 45. Observación en el deformímetro de la deflexión máxima del pavimento con su radio de curvatura	48
Figura 46. Tabla de distribución t para una prueba de dos colas	62
Figura 47. Viga Benkelman.....	69
Figura 48. Brazos de aluminio	74

RESUMEN

La realización de prácticas y ensayos de laboratorio de ingeniería civil en las universidades son necesarias para que los estudiantes puedan aplicar los conocimientos que han adquirido en clase y a su vez puedan desarrollar habilidades que les serán útiles en el ámbito laboral. El presente trabajo de titulación tiene como objetivo la construcción de una viga Benkelman para la evaluación estructural de pavimentos flexibles la cual será usada en los laboratorios de pavimentos de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus sur. Para la construcción de esta viga se realizó un diseño en base a una viga existente de los laboratorios del ministerio de obras públicas. Se tomó las medidas de la viga existe y se observó las características de esta, como de qué material estaba hecha y qué elementos tenía. Se procedió a realizar los planos en AutoCAD y se adquirió los materiales necesarios para realizar construcción de la nueva viga Benkelman. Se comprobó que ambas vigas tengan las mismas medidas y características y se realizó el ensayo mediante la norma INV E – 795 – 13 con ambos equipos con el objetivo de realizar un análisis estadístico entre los resultados de ambas vigas donde se llegó a la conclusión que la diferencia que existe entre los resultados de ambos equipos es mínima, por lo que se puede concluir que la viga construida para los laboratorios de la Universidad funciona de forma correcta. A su vez con los resultados obtenidos del ensayo de ambas vigas se calculó la deflexión característica de los dos tramos de la vía y se obtuvieron resultados similares con los datos de ambas vigas lo que corrobora el funcionamiento correcto del equipo.

Palabras Claves: Ensayos de Laboratorio, Viga Benkelman, Evaluación Estructural, Pavimentos Flexibles, AutoCAD, INV E – 795 – 13, Deflexión característica.

ABSTRACT

Carrying out civil engineering laboratory practices and tests at universities is necessary so that students can apply the acquired knowledge in class and in turn develop skills that will be useful to them in the workplace. The objective of this project is the construction of a Benkelman beam for the structural evaluation of flexible pavements which will be used in the pavement laboratories of the Salesiana Polytechnic University, Quito headquarters, south campus. For the construction of this beam, a design was made based on an existing beam from the laboratories of the Ministry of Public Works. Measurements of the existing beam were taken and its characteristics were observed, such as what material it was made of and what elements it had. The plans were made in AutoCAD and the necessary materials were acquired to construct the new Benkelman beam. It was verified that both beams have the same measurements and characteristics and the test was carried out using the INV E - 795 - 13 standard with both equipment with the objective of performing a statistical analysis between the results of both beams where it was concluded that the difference between the results of both teams is minimal, therefore, it can be concluded that the beam built for the University laboratories works correctly. At the same time, with the results obtained from the testing of both beams, the characteristic deflection of the two sections of the track was calculated and similar results were obtained with the data of both beams, which corroborates the correct operation of the equipment.

Keywords: Laboratory Tests, Benkelman Beam, Structural Evaluation, Flexible Pavements, AutoCAD, INV E – 795 – 13, Characteristic deflection

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

1.1 Introducción

En Ecuador, la construcción, la rehabilitación y el diseño de un pavimento juega un papel crucial en la infraestructura y la economía del país, permitiendo conectar diferentes regiones y mejorando la calidad de vida de la población.

Uno de los factores importantes para el diseño y construcción de un pavimento es la deflexión, la cual puede ser ensayada por diferentes equipos, uno de los más utilizados es el deflectómetro de impacto, pero por su alto costo no es factible y de fácil accesibilidad, otro equipo que se utiliza con más frecuencia es la viga Benkelman la cual posee menos costos, un fácil manejo y de fácil obtención.

En el presente proyecto se empleará la viga Benkelman, cumpliendo normas de diseño de la INV 795-13 que es el equipo existente en el Ministerio de Obras Públicas con el cual se analizará y comparará sus resultados para obtener un equipo funcional para los laboratorios de Pavimentos de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus sur.

1.2 Problema de estudio

1.2.1 Antecedentes

Uno de los puntos más importantes para favorecer y promover el aprendizaje de los estudiantes son los trabajos de laboratorios ya que mediante estas prácticas los estudiantes pueden entender de mejor manera los temas tratados en clase, además pueden confrontar la realidad mediante la práctica. En los laboratorios de pavimentos de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, Campus Sur no se cuenta con un equipo para medir la deflexión de los pavimentos flexibles, lo que ha provocado que se pueda realizar algún tipo de práctica para calcular la deflexión de un pavimento.

1.2.2 Importancia y alcance

En los laboratorios de pavimentos la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, Campus Sur, no existe un equipo para medir la deflexión de un pavimento flexible. Esto ha provocado que los estudiantes no puedan reforzar los conocimientos adquiridos en clase, sobre la evaluación de un pavimento flexible.

Como se ha mencionado anteriormente, la finalidad de este proyecto es resolver la falta de esta máquina e implementarla como material didáctico para los estudiantes, para que puedan aplicar los conocimientos adquiridos en clase de mejor manera y con esto provocar en el estudiante un mayor interés en la evaluación de pavimento.

1.2.3 Delimitación

El proyecto se va a realizar en los laboratorios de pavimentos de la Universidad Politécnica Salesiana para uso exclusivo de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil especialmente para los estudiantes que han optado tomar las materias de Itinerario de Vías.

Figura 1

Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur, entre la Av. Rumichaca y Av. Moran Valverde.



Nota. Se presenta la ubicación del laboratorio de Pavimentos del bloque E segundo piso.

Elaborado por: Los Autores, a través de Google Maps.

1.3 Justificación

La falta de conocimiento sobre la importancia de la flexión en pavimentos y la adquisición del equipo ha provocado que muchas veces no sea tomado en cuenta este parámetro al momento de evaluar un pavimento.

Sin embargo, conocer la flexión de un pavimento es de suma importancia ya que por medio de este parámetro se puede determinar la carga que puede soportar un pavimento a su vez nos permite conocer la cantidad de material que será necesaria para el diseño y construcción de su sección transversal, lo que mejora durabilidad y prolonga la vida útil del pavimento

En la actualidad los laboratorios de pavimentos de la Universidad Politécnica Salesiana no poseen el equipo necesario para realizar prácticas de flexión de pavimentos, los estudiantes tienen la necesidad del conocimiento de estas prácticas para poderlas ejercer en su vida profesional.

Este proyecto es factible porque se cuenta con un modelo existente de viga Benkelman en el laboratorio del Ministerio de Obras Públicas. Se dispone de los recursos económicos para la adquisición de materiales, construcción de la viga Benkelman y la realización del ensayo de comprobación.

1.4 Grupo Objetivo (Beneficiarios)

Este proyecto beneficiara a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil ya que contarán con un equipo para poder medir la deflexión de la superficie de un pavimento de esta manera los alumnos podrán aplicar los conocimientos adquiridos en clases mediante la realización del ensayo con la viga Benkelman. Otro Grupo que se beneficia son los docentes, ya que al contar con un equipo de medición en el laboratorio de pavimentos podrán impartir sus clases no solo de manera teórica sino también práctica.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Diseñar y construir una viga Benkelman con base a las normativas INV 795-13 y ASTM D 4695-03 para el laboratorio de pavimentos de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, Campus Sur.

1.5.2 Objetivos Específicos

Realizar el diseño de una viga Benkelman con base a las normativas INV 795-13, ASTM D 4695-03 y modelo existente del laboratorio del Ministerio de Obras Públicas para medir la deflexión de un pavimento.

Construir una viga Benkelman basada en datos obtenidos de un modelo existente con los materiales y equipos necesarios, para los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur.

Validar la viga Benkelman mediante un ensayo de deflexión en la capa de rodadura de un pavimento flexible a un tramo de vía de 200m, para la verificación del diseño y construcción de la viga.

Analizar los datos obtenidos y comparar mediante un modelo estadístico para comprobar la fiabilidad de la viga Benkelman con la existente en el Ministerio de Obras Públicas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se desarrolla una breve explicación a la bibliográfica existente en torno a la viga Benkelman, pavimentos flexibles y parámetros necesarios para la aplicación de la norma, con el fin de obtener bases, conceptos claros para realizar la respectiva práctica de la viga Benkelman.

2.1 Pavimento

Es la superficie que está construida sobre un terreno para permitir el tránsito de los vehículos y peatones. Estas superficies se diferencian y definen de acuerdo al material que es utilizado para su fabricación: asfalto para pavimentos flexibles, hormigón para pavimentos rígidos y adoquines para pavimentos articulados (Saucedo, 2010)

El pavimento es utilizado en carreteras, calles, aceras y otros sitios donde se necesite una superficie que sea segura, impermeable, cómoda para transitar y sobre todo que pueda resistir las cargas generadas por el tránsito diario.

2.2 Pavimento Flexible

El pavimento flexible se caracteriza por estar compuesto en su capa superior de material asfáltico, la cual puede ser una mezcla de asfalto en frío o en caliente la misma que se aplica sobre una base de material granular o grava (Miranda, 2010)

La capa superior de este tipo de pavimento es flexible y está diseñada para poder soportar las cargas generadas por el tráfico diario y a su vez proporcionar una superficie de rodadura que sea segura (Balarezo-zapata, 2017). El pavimento flexible es de los más utilizados por económico que otros tipos de pavimentos y también porque es más fácil de construir además este pavimento puede ser reparado o renovado de manera más sencilla.

2.3 Fallas en pavimentos

Las fallas en el pavimento pueden ser originadas dentro o fuera del paquete estructural del pavimento, es la deficiencia del pavimento que se origina cuando disminuyen sus características de servicio para las que fue diseñada (GRANJA, 2019). Las fallas pueden ser causadas por:

- a) Espesores inadecuados en los paquetes estructurales, su diseño no satisface la carga expuesta en alguna de las capas del paquete estructural.
- b) Sistema de drenaje deficiente, agrupación de agua en el pavimento que provoca una penetración en el mismo dañando las capas del sistema estructural.
- c) Mezclas asfálticas rígidas, calculo en la dosificación del asfalto mal ejecutada.
- d) Causas comunes como: incremento de tránsito, fin del periodo de diseño, factores climáticos, etc.

2.4 Viga Benkelman

Instrumento que se utiliza para medir la deflexión de un pavimento flexible que se encuentra bajo una carga de tráfico. Este aparato de medición consta de una viga de acero con una masa en su extremo libre y de dos puntos de apoyo a una trayectoria fija (NLT-356/88, 1988). La medida de deflexión de pavimento que se obtiene con esta viga es la capacidad que tiene un pavimento flexible para soportar la carga que generan los vehículos al transitar y gracias a esta medida se puede evaluar la seguridad que tiene el pavimento y su calidad.

2.5 Palanca o brazo de medida

Perfil suspendido de un bastidor a través de un pivote que tiene una determinada relación según la “INV 795 –13”, estas medidas deben facilitar su transporte y debe ser fabricado de tal forma que sea fácil de manipular para el operador.

2.6 Importancia de la Evaluación de Pavimentos

La evaluación en pavimentos es importante y a su vez esencial por varias razones, la más importante por la seguridad del usuario. Ya que una evaluación correcta del pavimento nos permite identificar daños o desgastes que pueden ser peligrosos para los conductores y demás usuarios que transitan por la vía (Orozco, y otros, 2004). Además, al realizar una correcta evaluación del pavimento nos evitamos generar costos en reparaciones o reconstrucciones del pavimento, ya conociendo el estado del pavimento de manera correcta y oportuna con proporcionar al pavimento un correcto mantenimiento estamos garantizando seguridad y durabilidad en el pavimento.

2.7 Módulo de Elasticidad

Conocido También como Modulo de Young, es un paramento que describe la capacidad que tiene un material a deformarse de manera elástica cuando se le aplica una carga. Se lo define como la relación entre un esfuerzo aplicado a un material y la deformación resultante del mismo. Este parámetro es uno de los que más se debe tomar en cuenta en el diseño de estructuras, y en la selección de materiales, ya que gracias al módulo de elasticidad podemos conocer de qué manera se comportara, un material bajo una carga y de qué forma se deformara cuando se encuentre sometido ante una carga externa (Roth, 2018).

2.8 Índice de Soporte de California 'CBR'

Ensayo desarrollado por el Departamento de Carreteras de California, el cual es usado para evaluar la capacidad de soporte del suelo y la calidad de la sub-rasante, algunos materiales de bases granulares y sub-bases (Pérez, 2023) También es usado para determinar la capacidad de soporte que tiene un suelo para soportar el tráfico vehicular, se utiliza para el diseño de estructuras de pavimentos en base al tráfico que va a soportar.

2.9 Deformímetro

Aparato de medición, usado para medir la deformación que sufre un material que se encuentra sometido ante una carga. La deformación que mide este aparato es la diferencia de longitud, ángulo o la forma que obtiene el material como resultado de la aplicación de una fuerza. Usualmente este equipo es usado para medir la deformación en edificios, puentes, vigas, rocas y otros materiales (Branko, 2007)

2.10 Deformación en Pavimentos

La deformación en los pavimentos es aquel fenómeno temporal o permanente provocado por las cargas repetidas de los vehículos y otros factores externos como el clima. Otras causas que provocan la deformación es la falta de capacidad estructural del pavimento para poder soportar las cargas de tráfico. Esta deficiencia estructural puede deberse a una construcción deficiente, una sobrecarga de tráfico, uso de materiales de mala calidad para la construcción del pavimento entre otros factores (Gutiérrez, Hernández, & Garnica, 2018)

La deformación de los pavimentos es un problema común que afecta tanto a la funcionalidad del pavimento como a la seguridad del mismo. Si no se controla este problema adecuadamente puede provocar fallas importantes en el pavimento y la necesidad de reparaciones costosas.

Para poder medir y controlar la deflexión que existen en los pavimentos se pueden implementar técnicas de monitoreo y evaluación como ensayo de viga Benkelman, tomografía eléctrica, evaluación visual entre otros (Córdoba & Heilbron, 2020).

2.11 Radio de Curvatura

Es un parámetro el cual indica la capacidad de deformación lineal que sufre el pavimento a tracción al ser sometido a una carga (Bravo, 2023).

Esta deflexión surge cuando el brazo más corto de la viga Benkelman detecta una carga. Mediante este valor se puede definir la condición estructural que tiene el pavimento. Si al realizar el ensayo se obtienen valores bajos de deflexión y valores altos de radio de giro

podemos decir que el pavimento se encuentra en buen estado tanto en sus capas superiores e inferiores. Si obtenemos valores pequeños tanto en deflexiones y radio de curvatura podemos decir que la capa superior del pavimento se encuentra en mal estado. A su vez si tenemos valores superiores en las deflexiones y en los radios de giro podemos decir que la capa superior del pavimento tiene una calidad regular y con valores altos en deflexiones y bajos en los radios de curvatura podemos decir que el pavimento no desempeña con la calidad en ninguna de sus capas. (Smith, 2017)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Tipo de Investigación

De los diferentes tipos de investigación que existe se optó por un tipo de investigación cuantitativa, porque es fundamental la recolección de datos por medio de un procedimiento técnico, también es preciso tomar medidas y estimar magnitudes (Fernández & Pértegas, 2002). En nuestro proyecto se tomarán las medidas de una viga ya existente para poder replicarla y se realizará un ensayo de deflexión del pavimento donde se obtendrán datos para ser analizados, de esta manera podremos ejecutar un análisis estructural del pavimento y comprobar el funcionamiento de la viga.

3.2 Método

El método que se aplicará en el proyecto será el lógico deductivo, ya que se basa en la lógica y utiliza principios descubiertos que se representa generalmente en fórmulas matemáticas, axiomas y definiciones para resolver casos particulares (Ramos, 2016) Con este método se busca poder aplicar las fórmulas ya existentes para el análisis de estructural del pavimento y a su vez poder usar normativas existentes en el uso de la viga Benkelman.

3.3 Recolección de Información Teórica

Para la recolección de información de este proyecto se lo hará a través de la colaboración del departamento de laboratorios del ‘Ministerio de Obras Publicas’ quienes cuentan con una Viga Benkelman de doble brazo. De esta manera el ‘Ministerio de Obras Publicas’ nos facilitara el ingreso a su laboratorio para poder tomar las medidas necesarias de su viga para poder realizar una réplica. Las dimensiones técnicas, procedimiento y fórmulas de cálculo para obtener la deflexión del pavimento las obtendremos de la normativa INV E – 795 – 13.

3.4 Proceso técnico de Ingeniería Civil

3.4.1 Desarrollo de la viga Benkelman

La viga Benkelman se desarrollará con medidas del equipo existente en el laboratorio del Ministerio de Obras Públicas. Se llevará a cabo su respectiva calibración antes de darle uso al equipo.

3.4.2 Diseño en programa asistido por computadora

Se realizará un diseño previo en un programa asistido por computadora en el cual estarán las medidas específicas y el tipo de material utilizado en la viga Benkelman.

3.4.3 Preparación del ensayo

Se cargará el camión hasta tener una carga de 80kn o 18000lbf en el eje simple trasero. Se imprimirá sobre un papel la huella de las ruedas gemelas con la presión de inflado adecuado. Se armará la viga y se comprobará el correcto funcionamiento de todo el conjunto.

3.4.4 Medición de la deflexión

La viga Benkelman se colocará en el pavimento detrás del camión, perpendicular al eje de la carga, de modo que la punta del brazo de medición (palpador) esté alineada con el punto de prueba y la viga no raspe las llantas dobles.” Si se trata de una viga doble, el palpador que deberá quedar entre los neumáticos en coincidencia con el eje, será el delantero” (INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, 2012). Se hará avanzar el camión lentamente a una distancia menor 5m y se leerá el deformímetro cada 60 segundos cuando las lecturas no difieran en más de 0.01mm se dará por finalizada la recuperación registrando la última lectura. Se repetirá el proceso de medida de acuerdo en lo especificado en la sección 9 de “INV 795 –13”

3.4.5 Análisis de Resultados Obtenidos

Una vez se obtengan los datos de una vía de unos 200 metros aproximadamente se analizará con el encargado del laboratorio del Ministerio de Obras Públicas para determinar su correcto funcionamiento, para la comprobación del equipo se comparará con los datos

obtenidos del equipo existente del Ministerio de Obras Públicas. A su vez para tener mayor fiabilidad del correcto funcionamiento de la viga se realizará una comparación entre los resultados de ambos equipos mediante un método estadístico “Prueba t pareada entre 2 muestras” el cual es un método que compara la diferencia que existen entre dos valores. Este método tiene un rango de aceptación del 5% es decir que si la diferencia entre los resultados no superar este rango de aceptación podremos concluir que el funcionamiento del equipo es correcto

3.4.6 Implementación de la Viga Benkelman

Una vez armado, calibrado y comprobado su funcionamiento, se realizará la entrega del equipo al laboratorio de Pavimentos con su respectivo formato de trabajo.

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN DE LA VIGA BENKELMAN

4.1 Especificaciones de Diseño

Las especificaciones de diseño de la Viga Benkelman están basadas en las normativas ASTM D4695 y INV E-795-13 para una Viga Benkelman de doble Brazo, en la sección 5 Equipos de la norma INV E-795-13 presenta un esquema general del dispositivo y dimensiones típicas con sus principales características.

Es de suma importancia tener en cuenta, que las especificaciones de diseño también pueden tener estándares distintos de acuerdo a las normativas, como las longitudes de los brazos de la viga con relaciones de 2:1 o 1:4 que se usaron para realizar su diseño, el modelo de la viga y por último el fabricante que realiza este equipo de medición.

Entre las especificaciones más importantes que se deben tomar en cuenta para el diseño de una Viga Benkelman de doble brazo son:

- 4.1.1 Material:** Fabricada en su mayoría de acero de alta resistencia acero A36 tipo C y duradero para el cuerpo de la viga y sus dos brazos fabricados en aluminio 7075 por su resistencia a la tracción, su bajo peso para aligerar el equipo y sea fácil de trasportar.
- 4.1.2 Longitud de la Viga:** La longitud total aproximada de la viga cuando esta armada es de 3.68m. La Longitud del brazo principal es de 2.44m y la del brazo secundario de 2.19 m. La longitud total de la viga permite obtener una buena precisión al momento de tomar los datos de la deflexión del pavimento.
- 4.1.3 Ancho:** El ancho aproximado del cuerpo principal (acero de alta resistencia) es de 10 cm. Ancho de los brazos de aluminio 1cm.
- 4.1.4 Forma:** El diseño de la Viga Benkelman de doble brazo es en forma de una letra “”L” invertida, con una parte que es más larga donde se aplicara la carga al momento de

realizar el ensayo y en la parte más corta es la que se colocara en la superficie del pavimento.

4.1.5 Peso: El peso que tiene la viga es de 26 a 27 kg aproximadamente. En su mayoría el peso de la viga es de acero de alta resistencia.

4.1.6 Indicador de la deflexión: Este equipo se encuentra equipado con dos relojes comparadores “deformímetros” los cuales indican la deflexión que sufre el pavimento cuando se le aplica una carga a la viga. Estos relojes comparadores obtienen un valor de 10 micras con una resolución de 0.01mm.

4.1.7 Peso de la carga: La carga aplicada que soportara el equipo de medición es una carga de 80kn o 18000 lbf los cuales se cargará en un camión en el eje simple trasero como indica la normativa.

4.2 Diseño en programa asistido por computadora

Para la realización de la Viga Benkelman se hará el uso de un software informático para la realización de los planos y dibujos del equipo. Para el diseño de la Viga Benkelman de doble brazo se realizó el siguiente procedimiento

- 1) El proceso inicia con la toma de medidas de una Viga existente de los laboratorios del Ministerio de Obras Públicas. A su vez se valida que las medidas sean correctas al comparar con las medidas de las normativas ASTM D4695 y INV E-795-13.

Figura 2

Viga Benkelman Ministerio de Obras Públicas



Nota. Se presenta el Cuerpo de la Viga Benkelman existente en los laboratorios del Ministerio de Obras Publicas Quito. Elaborado por: Los Autores, a través de recolección de datos.

- 2) Con las dimensiones obtenidas de la viga existente se procese a realizar la creación de un modelo en 3D (Figura 3) de la viga en este modelo además de incluir las dimensiones del mismo se colocan detalles del equipo como sujetadores, rotulas, sistemas de nivelación, espacios para deformímetros entre otros.

Figura 3

Diseño 3D Viga Benkelman



Nota. Se presenta el prototipo 3D de la viga Benkelman. Elaborado por: Los autores, a través de AutoCAD.

- 3) Una vez establecido el modelo del equipo se realiza la configuración de detalles como ubicación de conexiones estructurales, perforaciones en el cuerpo de la viga o en sus brazos, o cualquier otro componente necesario para garantizar la funcionalidad y estabilidad del equipo como se muestra en la Figura 4.

Figura 4

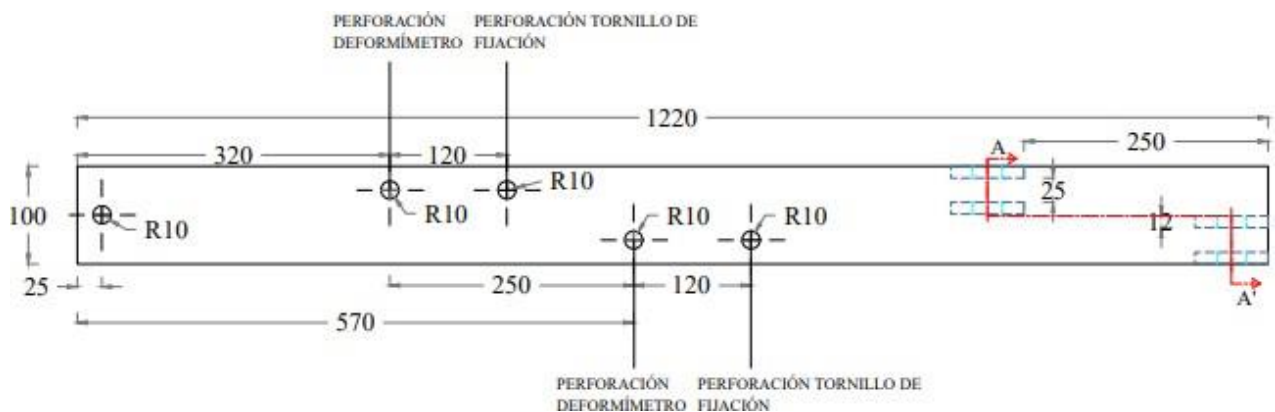
Diseño Viga Benkelman Cuerpo de la viga



Nota. Se presenta el cuerpo de la viga Benkelman. Elaborado por: Los Autores, a través de fotografías.

Figura 5

Diseño Viga Benkelman Cuerpo de la viga

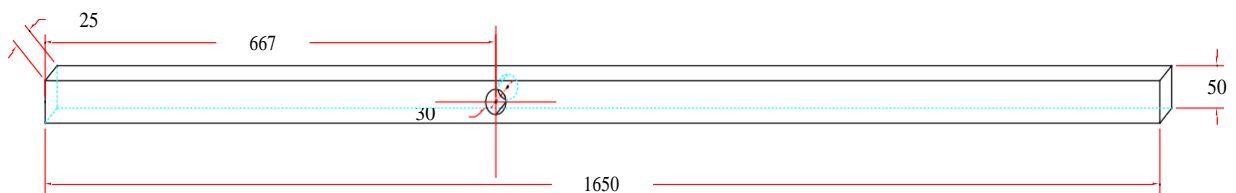


Nota. Se presenta la vista en planta del cuerpo de la viga Benkelman. Elaborado por: Los Autores, a través de AutoCAD.

- 4) Una vez finalizado el diseño del equipo se puede generar planos para la fabricación del equipo (Figura 5), los accesorios necesarios que se necesitaran y a su vez se puede calcular la cantidad de material necesario que se debe adquirir.

Figura 6

Diseño del brazo mayor de la Viga Benkelman



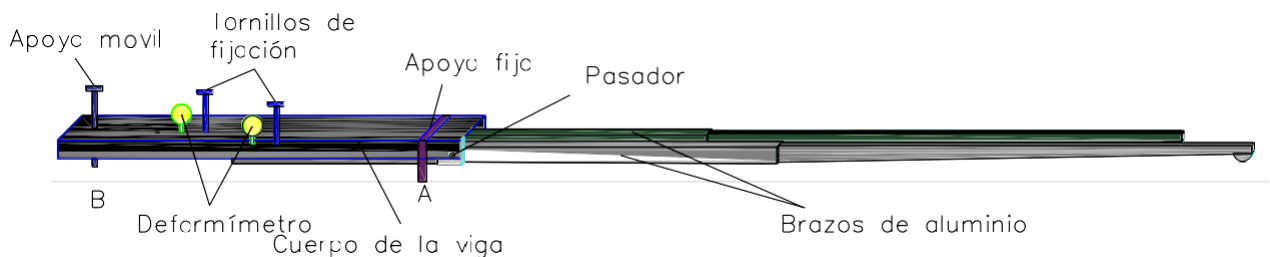
Nota. Se presenta la vista isométrica del Brazo Mayor de la viga Benkelman. Elaborado por: Los Autores, a través de AutoCAD.

4.3 Partes de la Viga Benkelman

La Viga Benkelman es un equipo mecánico el cual funciona como una palanca. Este aparato de medición se divide en dos partes principales tal y como se muestra en el siguiente esquema.

Figura 7

Partes de la viga Benkelman



Nota. Se presenta la viga Benkelman con sus partes. Elaborado por: Los Autores, a través de AutoCAD.

4.3.1 Cuerpo de la Viga Benkelman

La primera parte del equipo funciona como un cuerpo fijo y es la que se coloca sobre el pavimento que se va ensayar.

4.3.2 Apoyos del cuerpo

Los dos primeros apoyos que comparten las mismas características se colocan en la parte delantera del equipo “Punto A” y son fijos. El tercer apoyo se coloca en la parte trasera del equipo “Punto B” y es regulable.

4.3.3 Deformímetros

Los deformímetros deben estar separados a 25 cm y son regulables para el manejo del operador y del ensayo.

4.3.4 Tornillo de fijación

Son tornillos ajustables su función principal es la estabilizar los brazos para poder transportar el equipo sin ocasionar daños a los deformímetros.

4.3.5 Pasador/pivote

Es un eje de aluminio que funciona como punto de apoyo del brazo de medida o palanca.

4.3.6 Brazos de aluminio

La segunda parte del equipo son los dos brazos de aluminio los cuales se acoplan al cuerpo fijo, mediante dos cuerpos huecos del mismo material los cuales cuentan con 4 orificios, 3 orificios de las mismas características en la parte delantera y un orificio más grande en una sección del cuerpo hueco.

Figura 8

Brazos de la viga Benkelman



Nota. Se presenta el acople de los brazos de la viga Benkelman. Elaborado por: Los Autores, a través de fotografías.

Los brazos cuentan con dos placas de aluminio en la parte trasera las cuales cuentan con 3 tornillos. La parte trasera de los brazos se insertan en la parte delantera del cuerpo hueco y se los ajusta mediante los 3 tornillos.

4.4 Ensamblaje de la Viga Benkelman

Ya ensamblado los brazos de aluminio se acoplan al cuerpo fijo mediante un pasador, ambos brazos se acoplan en puntos diferentes del cuerpo fijo. A su vez el equipo cuenta con dos deformímetros los cuales se colocan en la parte superior del cuerpo fijo.

Figura 9

Acople entre bazo y cuerpo



Nota. Se presenta el acople del brazo y el cuerpo de la viga mediante el pasador. Elaborado por: Los Autores, a través de fotografías.

Los deformímetros se acoplan de forma regulable en su eje vertical con el objetivo de que al momento de realizar el ensayo los vástagos de los deformímetros tengan contacto con los brazos de la Viga para que puedan arrojar una lectura.

Figura 10

Acople entre bazo y cuerpo



Nota. Se presenta el acople del brazo y el cuerpo de la viga mediante el pasador. Elaborado por: Los Autores, a través de fotografías.

Adicionalmente el equipo posee dos tornillos de fijación que se encuentran ubicados en la parte superior de la Viga y cuya función es preservar la integridad de los deformímetros y a su vez al momento de asegurar estos tornillos se pueda transportar la Viga Benkelman armada con total seguridad.

Figura 11

Tornillos de fijación



Nota. Se presenta los tornillos de fijación colocados en el cuerpo de la viga. Elaborado por: Los Autores, a través de fotografías.

4.5 Calibración del Equipo de la Viga Benkelman

Para la calibración de los equipos de medición de Viga Benkelman se realiza en base a la normativa ASTM D 4695 “Uso y Calibración de Impacto en la Evaluación Estructural de Pavimentos” por medio del método de comparación directa entre las indicaciones del reloj comparador.

Antes de Calibrar los deformímetros del equipo se debe verificar que la viga se encuentre en una superficie estable la cual permita que todo el equipo se encuentre lo más recto posible.

Después se coloca los deformímetros en la parte superior del cuerpo de la Viga Benkelman asegurándose que se encuentren alineados al eje del equipo y a su vez que encuentren firmes con el objetivo de que no se desplacen al momento de realizar el ensayo.

Se aplica una carga estática conocida en la posición que se desea colocar la viga, se registra la lectura del deformímetro en la misma posición que se colocó el equipo y se compara el valor de esa lectura con el valor de carga conocida. Si existe una diferencia considerable entre ambos valores se deberá ajustar bien los deformímetros al equipo o a su vez calibrar los deformímetros.

Para la calibración del deformímetro se puede calibrar ajustando los tornillos de calibración del deformímetro o a su vez mediante instrucciones específicas que del fabricante del deformímetro para obtener una calibración que sea exacta. Es recomendable siempre leer las instrucciones que brinda el fabricante del deformímetro ya que la calibración de los equipos puede variar de acuerdo donde fueron fabricados.

4.6 Planos Viga Benkelman

En este literal se anexan los planos que fueron realizados por los estudiantes en base a la Viga Benkelman del Ministerio de Obras Públicas. A continuación, se detallará el contenido que posee cada plano.

PROYECTO:

CONSTRUCCIÓN DE UNA VIGA BENKELMAN PARA LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO FLEXIBLE USADA EN EL LABORATORIO DE PAVIMENTOS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, SEDE QUITO, CAMPUS SUR

ESPECIFICACIONES:

- 1) SE PRESENTA LA VIGA BENKELMAN A ESCALA.
- 2) SE PRESENTAN LAS PARTES DE PRINCIPALES DE LA VIGA BENKELMAN.
- 3) SE DETALLARÁ EN LAS SIGUIENTES PÁGINAS CADA PARTE.

NOTAS GENERALES:

TODAS LAS DIMENSIONES ESTAN DADAS EN MILÍMETRO.

DIBUJANTES:

MIGUEL DOMÍNGUEZ
ESTÉFANO LÓPEZ

CONTIENE: VIGA BENKELMAN
3D

ESCALA:
INDICADAS

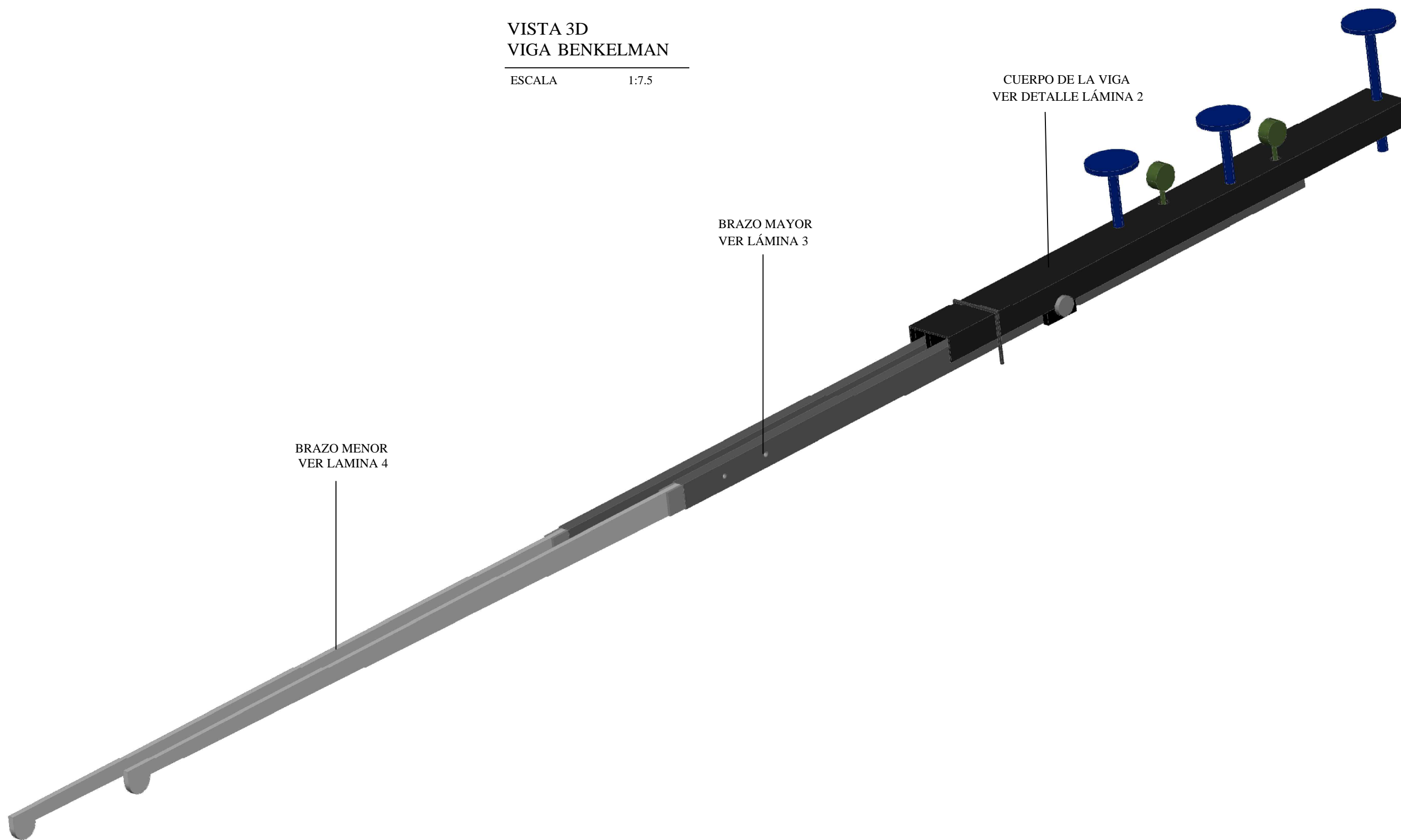
LÁMINA

FECHA:
2024

: 1

VISTA 3D
VIGA BENKELMAN

ESCALA 1:7.5



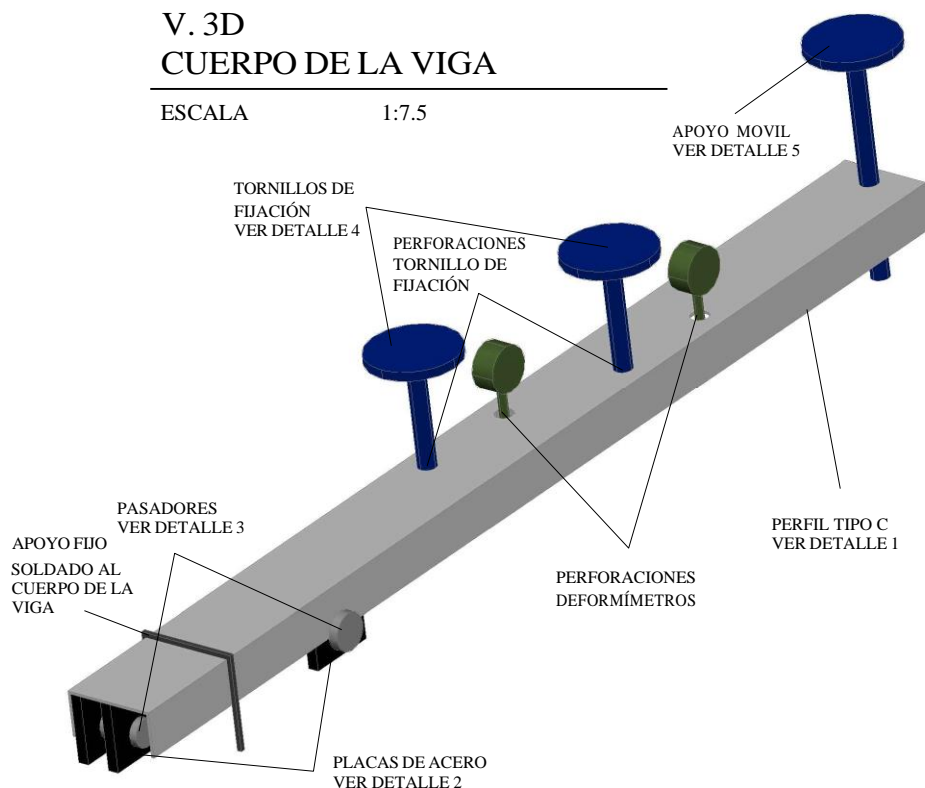
BRAZO MAYOR
VER LÁMINA 3

CUERPO DE LA VIGA
VER DETALLE LÁMINA 2

BRAZO MENOR
VER LAMINA 4

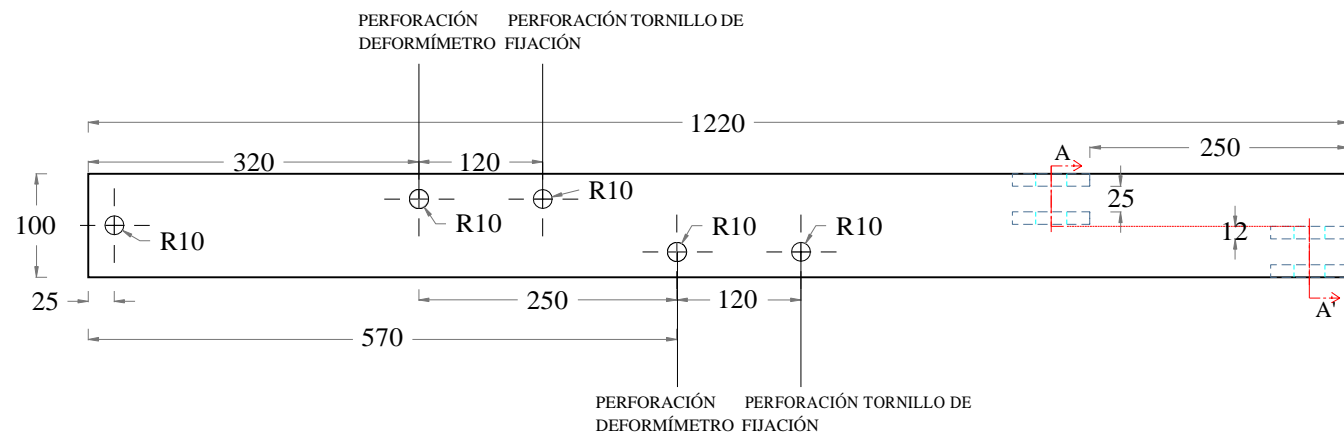
**V. 3D
CUERPO DE LA VIGA**

ESCALA 1:7.5



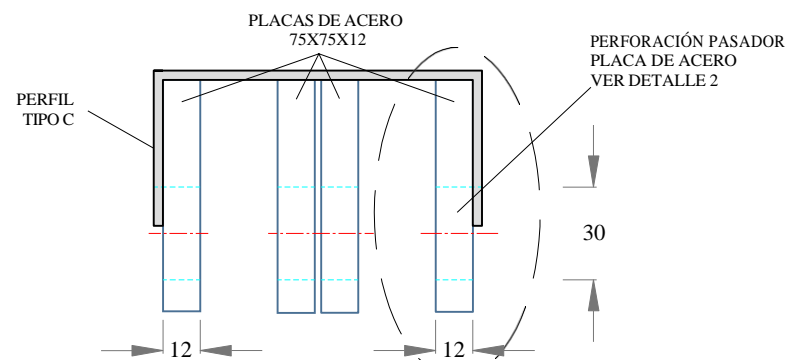
**V. PLANTA
CUERPO DE LA VIGA**

ESCALA 1:7.5



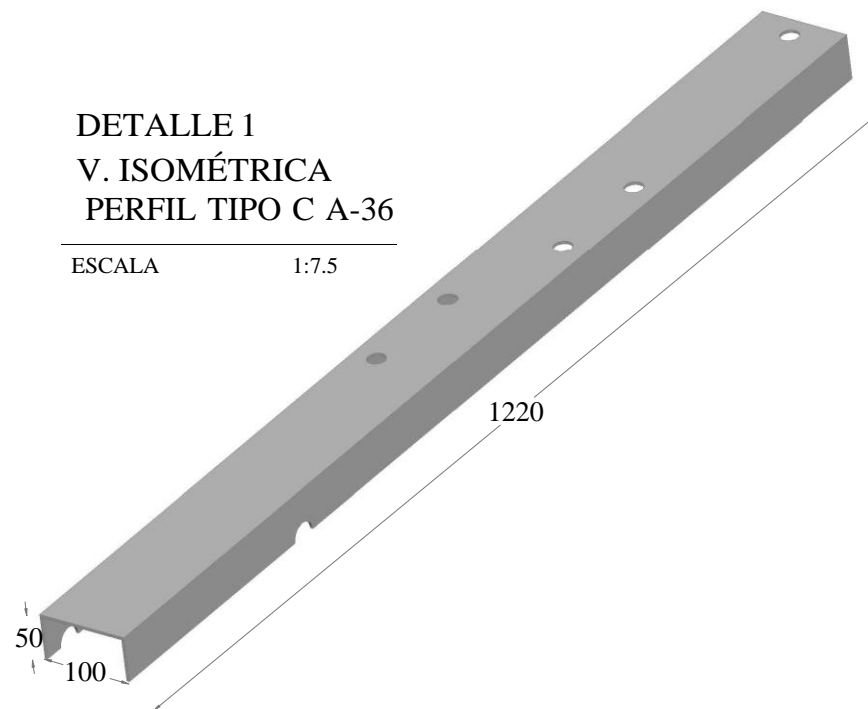
**CORTE A- A'
PLACAS DE ACERO**

ESCALA 1:2.5



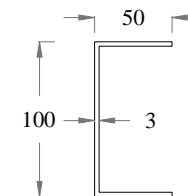
**DETALLE 1
V. ISOMÉTRICA
PERFIL TIPO C A-36**

ESCALA 1:7.5



**V. FRONTAL
PERFIL TIPO C**

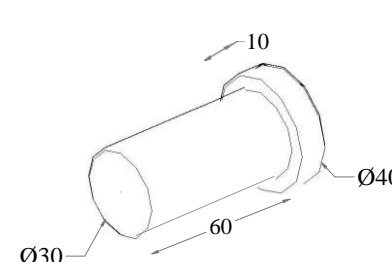
ESCALA 1:5



PERFIL TIPO C
100X50X3 A-36

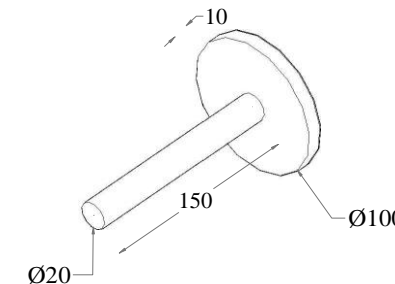
**DETALLE 3
V. ISOMÉTRICA
PASADOR**

ESCALA 1:2.5



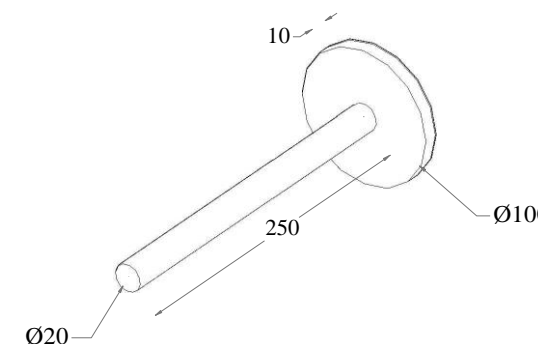
**DETALLE 4
V. ISOMÉTRICA
TORNILLO FIJACIÓN**

ESCALA 1:5



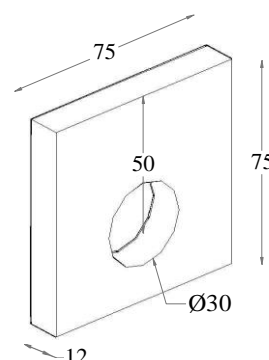
**DETALLE 5
V. ISOMÉTRICA
APOYO MOVIL**

ESCALA 1:5



**DETALLE 2
PLACA DE ACERO**

ESCALA 1:2.5



PROYECTO:

CONSTRUCCIÓN DE UNA VIGA BENKELMAN PARA LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO FLEXIBLE USADA EN EL LABORATORIO DE PAVIMENTOS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, SEDE QUITO, CAMPUS SUR

ESPECIFICACIONES:

- 1) SE USARÁ UN ACERO ESTRUCTURAL ASTM A-36.
- 2) SE USARÁ UN ACERO A-36 TIPO C 100X50X3.
- 3) SE USARÁ PARA LOS PASADORES ALUMINIO 7075.
- 4) SE SOLDARÁ LA BASE DEL APOYO FIJO CON ELECTRODO E7018.

NOTAS GENERALES:

TODAS LAS DIMENSIONES ESTAN DADAS EN MILIMETROS, A MENOS QUE INDIQUE UNA UNIDAD DIFERENTE.

DIBUJANTES:

MIGUEL DOMÍNGUEZ
ESTÉFANO LÓPEZ

CONTIENE:

CUERPO DE LA VIGA

ESCALA:

INDICADAS

LÁMINA

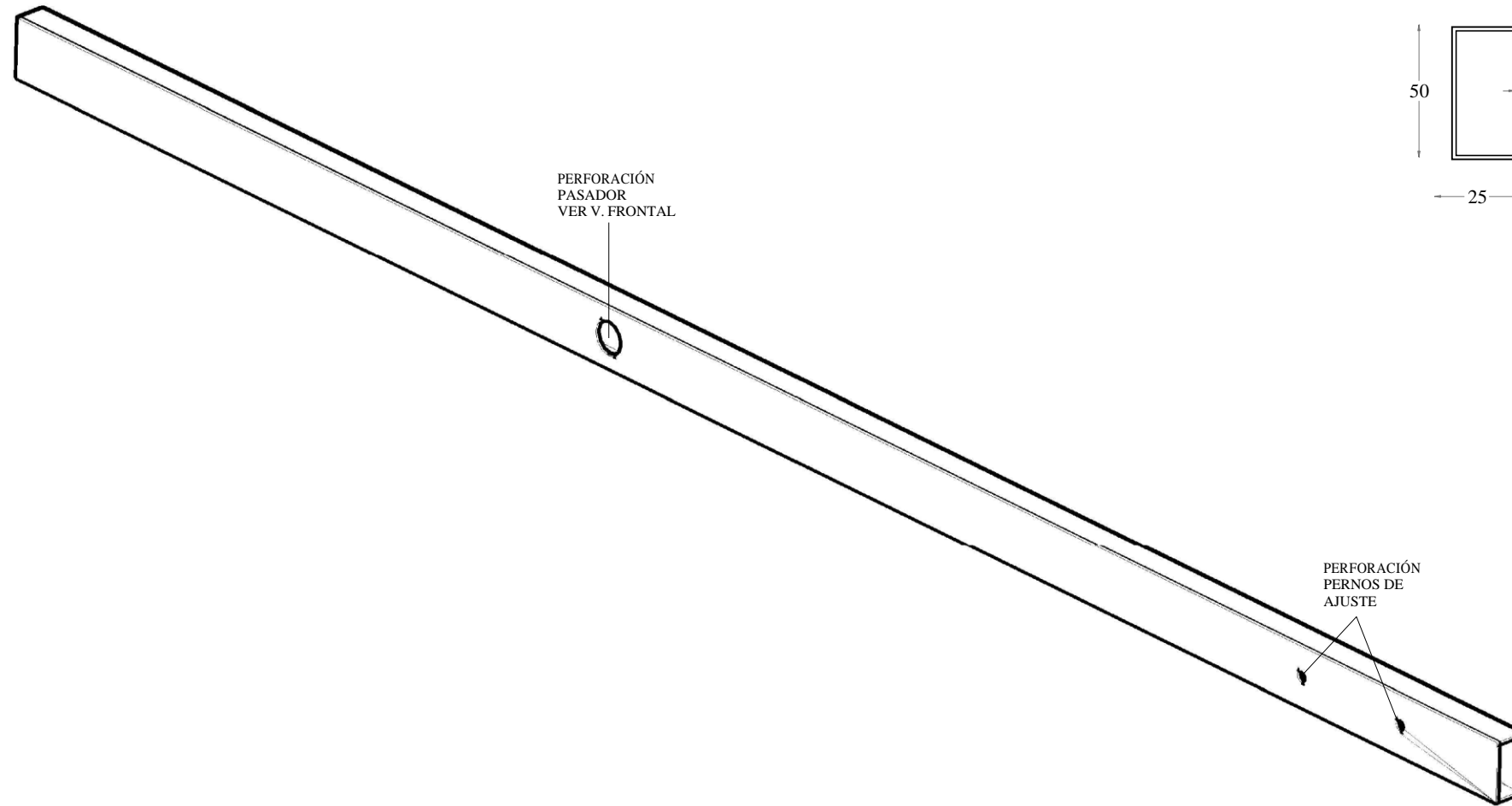
FECHA:

2024

: 2

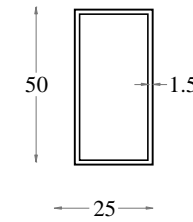
V. ISOMETRÍA
TUBO RECTANGULAR

ESCALA 1:7.5



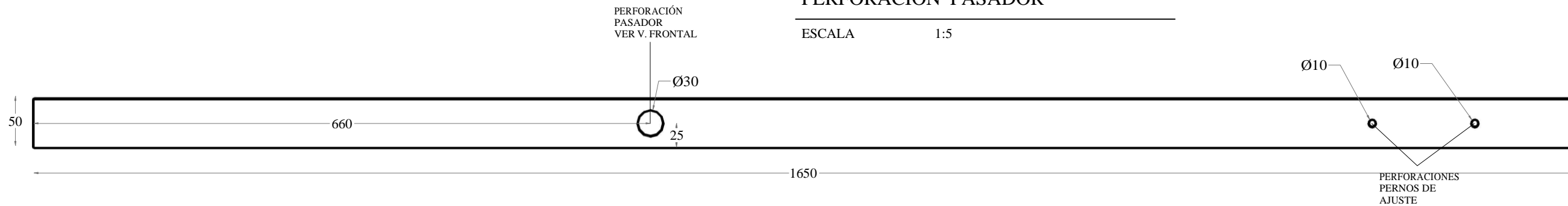
V. LATERAL
TUBO RECTANGULAR

ESCALA 1:2.5



V. FRONTAL
BRAZO MAYOR
PERFORACIÓN PASADOR

ESCALA 1:5



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
SALESIANA

PROYECTO:
CONSTRUCCIÓN DE UNA VIGA
BENKELMAN PARA LA EVALUACIÓN
ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO
FLEXIBLE USADA EN EL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS DE
LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
SALESIANA, SEDE QUITO, CAMPUS
SUR

ESPECIFICACIONES:

- 1) SE USARÁ UN ALUMINIO
HUECO RECTANGULAR 7075.

NOTAS GENERALES:

TODAS LAS DIMENSIONES ESTAN
DADAS EN MILIMETROS.

DIBUJANTES:

MIGUEL DOMÍNGUEZ
ESTÉFANO LÓPEZ

CONTIENE:

BRAZO MAYOR
VIGA BENKELMAN

ESCALA:
INDICADAS

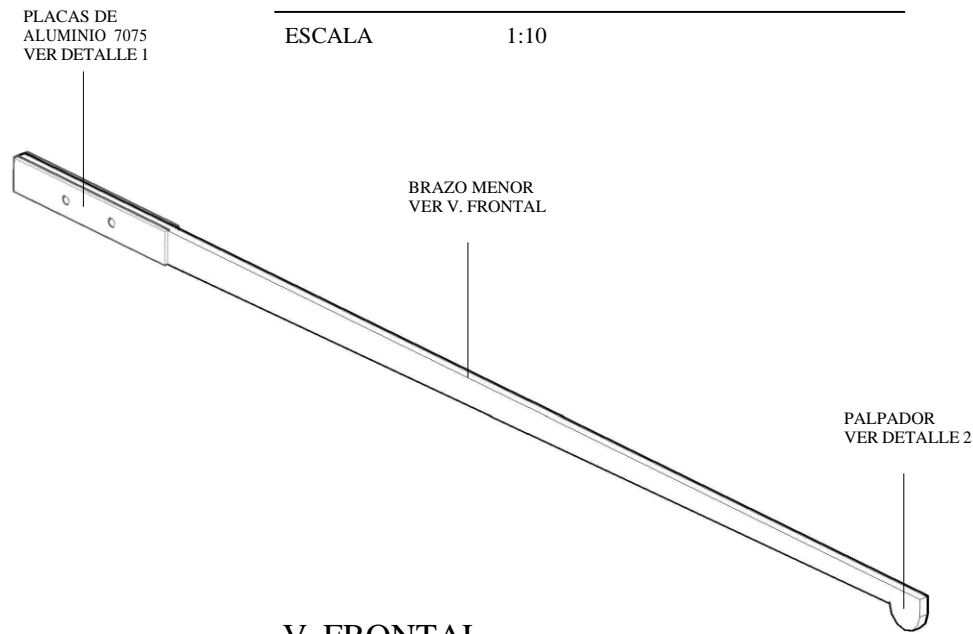
LÁMINA

FECHA:
2024

: 3

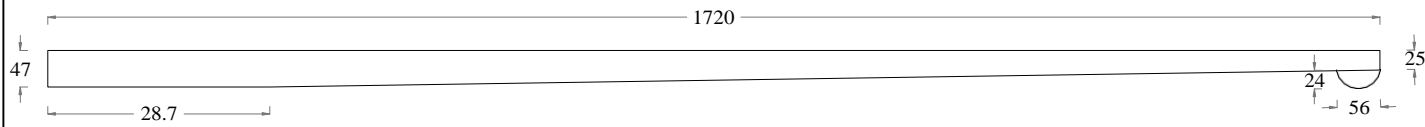
V. ISOMETRICA
BRAZO MENOR ALUMINIO 7075

ESCALA 1:10



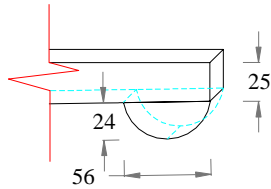
V. FRONTAL
BRAZO MENOR

ESCALA 1:15



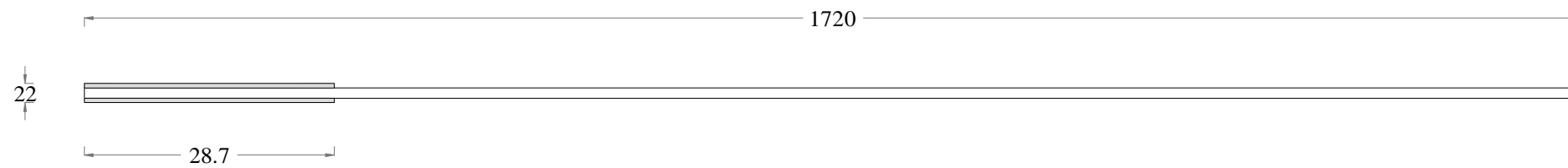
DETALLE 2
PALPADOR
BRAZO MENOR

ESCALA 1:5



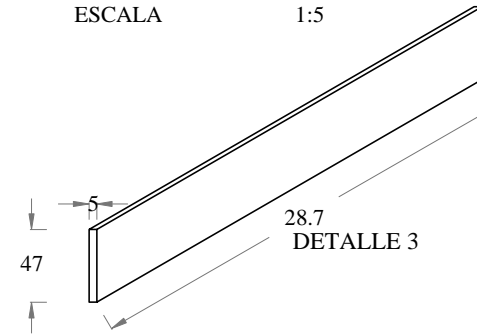
V. PLANTA
BRAZO MENOR

ESCALA 1:15



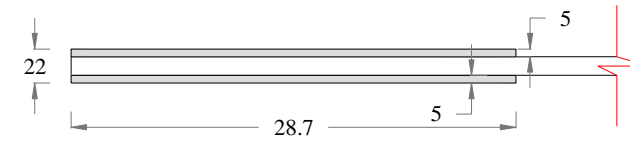
DETALLE 1
V. ISOMETRICA
PLACA DE ALUMINIO

ESCALA 1:5



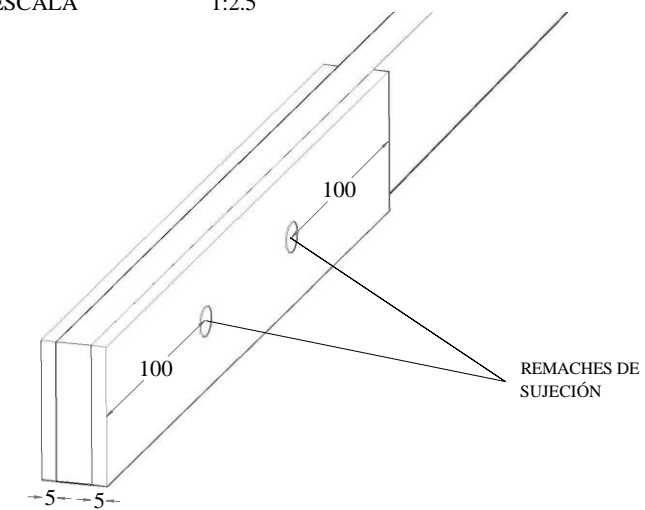
DETALLE 2
V. PLANTA
PLACA DE ALUMINIO

ESCALA 1:5



PLACAS DE ALUMINIO
REMACHADO AL BRAZO MENOR

ESCALA 1:2.5



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
SALESIANA

PROYECTO:

CONSTRUCCIÓN DE UNA VIGA
BENKELMAN PARA LA EVALUACIÓN
ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO
FLEXIBLE USADA EN EL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS DE
LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
SALESIANA, SEDE QUITO, CAMPUS
SUR

ESPECIFICACIONES:

- 1) SE USARÁ UN ALUMINIO DE CUERPO SOLIDO RECTANGULAR 7075.
- 2) DEL CUERPO SOLIDO SE FORMA EL PALPADOR MEDIANTE DESBASTE.

NOTAS GENERALES:

TODAS LAS DIMENSIONES ESTAN DADAS EN MILÍMETROS.

DIBUJANTES:

MIGUEL DOMÍNGUEZ

ESTÉFANO LÓPEZ

CONTIENE:

BRAZO MENOR
VIGA BENKELMAN

ESCALA:
INDICADAS

LÁMINA

FECHA:
2024

: 4

CAPÍTULO V

RECOLECCIÓN DE DATOS

5.1 Lugar de Análisis

Para la realización del ensayo de deflexión de pavimento se eligió como sitio de análisis la entrada principal de los laboratorios del ministerio de obras públicas (M.O.P). El motivo para escoger este lugar como punto de análisis fue porque la entrada es un tramo de vía de dos carriles suficientemente largo para poder realizar el ensayo además de ser una vía que no tiene prácticamente transito lo que ayuda a que el ensayo se realice de manera rápida sin ningún tipo de interrupción.

Figura 12

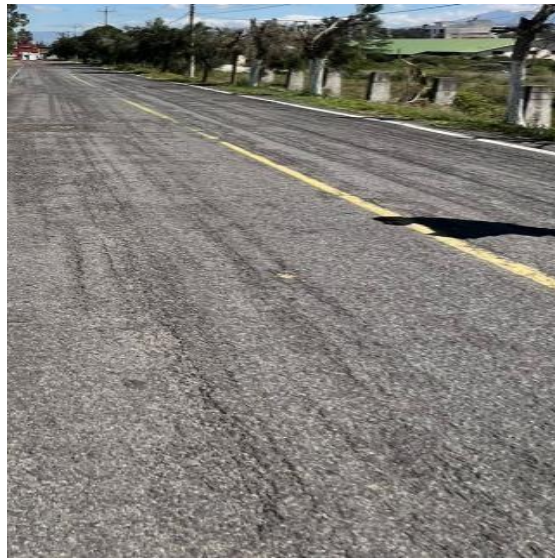
Tramo de análisis



Nota. Se presenta el tramo de vía que será ensayado. Elaborado: Por los autores a través de Google Earth.

Figura 13

Vía donde se realizará el ensayo



Nota. Se presenta el tramo de vía donde se realizará el ensayo. Elaborado: Por los autores a través de una fotografía

5.2 Preparación de Equipos e Instrumentos en el ensayo

5.2.1 Volqueta

La volqueta que se usa en el ensayo debe ser una volqueta de un solo eje. La misma que deberá tener un peso en su eje trasero de 80 KN o 18 000 lb. Todos estos parámetros se los aplicó según la norma INV 795 – 13.

Para poder obtener el peso en sus ejes trasero la volqueta deberá ser cargada de bloques, arena, piedra o ripio y una vez cargada deberá ser pesada en una balanza de pesas de ejes donde se comprobará que llegue al peso que se indica en la normativa. Ya con la volqueta cargada se procede a cubrir el material con una lona con el propósito de que si existe alguna precipitación el material no se encuentre afectado y no varíe el peso de la volqueta.

Por último, ya con la volqueta cargada se revisa la presión de aire de las llantas las cuales tienen que estar en un rango de 70 a 80 lbf/plg². En Caso de que la presión de aire supere el rango mencionado se deberá retirar aire de los neumáticos hasta llegar al rango o

viceversa en caso de comprobar que el nivel de aire de los neumáticos se encuentra menos que el rango mencionado se procede a inflar los neumáticos.

5.2.2.1 Cálculo de Carga en la volqueta

Para la realización del ensayo se escogió como material de carga la arena. Al no contar con una balanza de pesa de ejes se procedió a calcular la cantidad necesaria de material de la siguiente manera.

Se conoce que la volqueta fue cargada con excavadora mediana CAT 320 por lo que se revisó la ficha técnica del equipo para conocer la capacidad de transporte de su cuchara.

Tabla 1

Ficha técnica excavadora CAT 320

DIMENSIONES	
Pluma	Alcance HD de 5,7m(18'8")
Brazo	Alcance HD de 2,9m(9'6")
Cucharón	1,19m ³ (1,56 y d ³)
Altura del embarque(parte superior de la cabina)	2960mm 9'9"
Altura del pasamanos	2950mm 9'9"
Longitud del embarque	9530mm 31'3"
Radio de giro de la cola	2830mm 9'4"
Espacio libre del contrapeso	1050mm 3'5"
Espacio libre sobre el suelo	470mm 1'6"
Longitud de la cadena	4450mm 14'7"
Longitud hasta el centro de los rodillos	3650mm 12'0"
Entrevía	2380mm 7'9"
Anchura de transporte - zapatas de 600mm (24")	2980mm 9'9"
Anchura de transporte - zapatas de 700mm (28")	3080mm 10'1"
Anchura de transporte-zapatas de 790mm (31")	3170mm 10'5"

Nota. Se presenta la capacidad de llenado que posee una excavadora mediana CAT 320. Fuente: Ficha técnica de 320 EXCAVADORA HIDRÁULICA

Al conocer que la capacidad que tiene la excavadora mediana es de 1.19m³ y al conocer que el peso específico de la arena es $\gamma_{arena} = 1.75 \text{ t/m}^3$. Se puede calcular que cantidad de peso transporta la excavadora en cada viaje que realiza con su cucharón lleno.

$$\text{Cantidad de Peso de Arena} = 1.75 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} * 1.19\text{m}^3$$

Cantidad de Peso de Arena = 2.08 ton o´ 4585.615 libras

Al conocer el peso de arena que puede transportar el equipo se puede conocer la cantidad de viajes que debe hacer la excavadora mediana para llenar el balde de la volqueta con un peso de 18000 libras

$$\# \text{ de viajes} = \frac{18000 \text{ libras}}{4585.61 \text{ libras}}$$

$$\# \text{ de viajes} = 3.92 \approx 4$$

Al final se indicó que se realicen 4 cargas al balde de la volqueta las mismas que se realizaron de acuerdo a lo solicitado. El material de arena lleno todo el balde de la volqueta y se solicitó cubrirlo con una lona con el objetivo de que el material no se desperdicie al momento de que la volqueta se dirija al lugar del ensayo y a su vez de proteger el material en caso de que exista lluvia.

Figura 14

Volqueta para el ensayo



Nota. Volqueta que se usara en el ensayo cuya capacidad de balde es de 5m³. Elaborado: Por los autores a través de fotografía.

Figura 15

Volqueta para el ensayo Cargada



Nota. Volqueta cargada al tope del balde. Cubierta con lona en caso de lluvia. Elaborado: Por los autores a través de fotografía

5.2.2 Viga Benkelman

Se procede armar la Viga Benkelman de la siguiente manera:

5.2.2.1 Como primer paso se arman los brazos de las vigas. Se inserta los brazos de aluminio en los cuerpos huecos del mismo material y se los ajusta con las tuercas.

Figura 16

Brazo de aluminio de la viga



Nota. Se presenta el brazo de aluminio y el cuerpo hueco de la viga. Elaborado: Por los autores a través de fotografía

Figura 17

Ensamblaje de los brazos de la viga



Nota. Se presenta el proceso de armado de los brazos del equipo. Elaborado: Por los autores a través de fotografía

5.2.2.2 Una vez armado los brazos se procede a retirar los nudos del cuerpo de la viga. Se insertan los brazos por la parte inferior del cuerpo de y se insertan de nuevo los nudos para unir la viga metálica y los brazos.

Figura18

Cuerpo de la Viga M.O.P



Nota. Se presenta el cuerpo de la Viga Benkelman del M.O.P y se señala la ubicación de uno de sus nudos. Elaborado: Por los autores a través de fotografía

Figura 19

Cuerpo de la Viga UPS



Nota. Se presenta el cuerpo de la Viga Benkelman de los autores y se señala la ubicación de uno de sus nudos. Elaborado: Por los autores a través de fotografía

Figura 20

Armado de la viga



Nota. Se presenta la colocación de los brazos en la viga. Elaborado: por los autores a través de fotografía

5.2.2.3 Como último paso se colocan los deformímetros y se verifican si funcionan correctamente. Aplicando una leve carga a los brazos de la viga y observando si los deformímetros arrojan lectura.

Figura 21

Vigas armadas para el ensayo



Nota. Se presenta las vigas armadas y listas para ser usadas en el ensayo. Elaborado: Por los autores a través de fotografía

Figura 22

Comprobación de funcionamiento de la viga



Nota. Se presenta la comprobación de funcionamiento de ambas vigas. Elaborado: Por los autores a través de fotografía.

5.3 Toma de datos

5.3.1 Como primer paso se mide la longitud y ancho de los carriles del tramo de vía en el que vamos a realizar el ensayo con la ayuda de un odómetro.

Figura 23

Punto de Partida donde desde donde se realizará el ensayo



Nota. Punto de partida desde donde se realizará las medidas. Elaborado: por los autores a través de fotografía

Figura 24

Medición de la longitud de la vía a ensayar

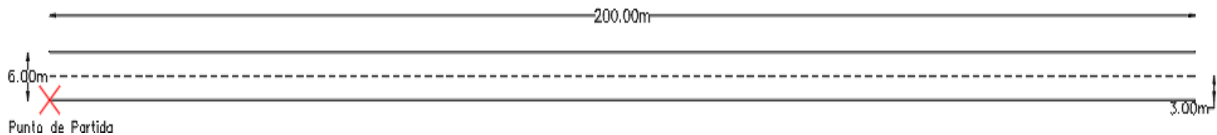


Nota. Momento en el que se procedió a realizar la medida de la longitud de la vía. Elaborado: Por los autores a través de fotografía

Después de realizar las medidas de la longitud y tramo de vía se obtuvo una longitud total de vía de 200m y un ancho de cada carril de 3m.

Figura 25

Tramo de vía a ensayar con su longitud y ancho de carril



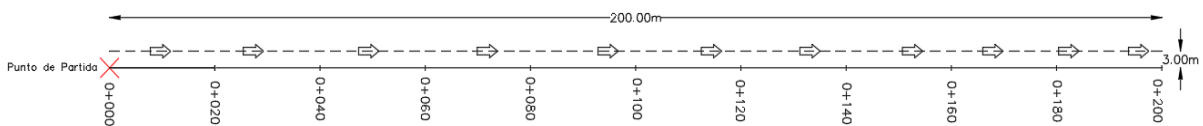
Nota. Tramo de vía que se va a ensayar donde se presenta la longitud de la vía y el ancho total del tramo de vía. Elaborado: Por los autores a través de AutoCAD

5.3.2 Una vez conocido la longitud total del tramo a ensayar se procede a colocar abscisas en los bordes de la vía para saber a qué distancia se tomarán los puntos para realizar el ensayo.

Para el carril izquierdo se partió desde el punto de partida siendo la cota 0+000 y se tomó una cota cada 20 metros hasta llegar a la cota 0+200.

Figura 26

Abscisado del carril izquierdo de la vía



Nota. Se presentan las abscisas que se tomaron al borde del carril izquierdo de la vía. Elaborado: Por los autores a través de AutoCAD

Figura 27

Abscisa 0+000 carril izquierdo de la vía



Nota. Abscisa 0+00 punto de partida. Elaborado: Por los autores a través de fotografía

Figura 28

Abcizado del carril izquierdo de la vía

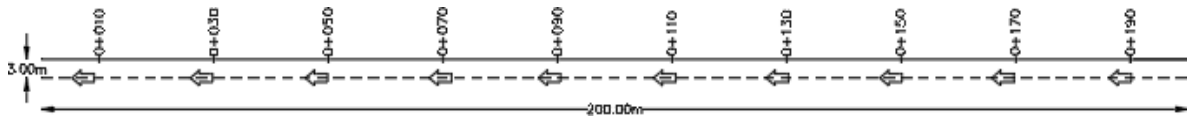


Nota. Abcizado tramo izquierdo de la vía. Elaborado: Por los autores a través de fotografía

Para el carril derecho de la vía se procedió a tomar las abscisas de igual manera cada 20 metros partiendo 10 metros delante de la abscisa 0+200.

Figura 29

Abscisado del carril derecho de la vía



Nota. Se presentan las abscisas que se tomaron al borde del carril derecho de la vía. Elaborado:

Por los autores a través de AutoCAD

Figura 30

Abscisa 0+ 010 del carril derecho de la vía



Nota. Abscisa 0+010 lado derecho de la vía. Elaborado: Por los autores a través de fotografía

Figura 31

Abscisado del carril derecho de la vía

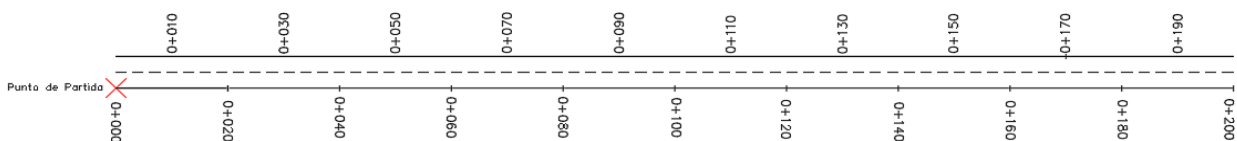


Nota. Abscisado lado izquierdo de la vía. Elaborado: Por los autores a través de fotografía.

Ya abscisado ambos tramos de la vía, se conoce que se tomaran un total de 21 datos para cada viga Benkelman

Figura 32

Abscisado de ambos carriles de la vía



Nota. Abscisado de ambos carriles de la vía a ser ensayada. Elaborado: Por los autores a través de AutoCAD

5.3.3 Ya con el abscisado realizado en ambos extremos de los carriles de la vía se procede a realizar el ensayo donde solo se tomarán las deflexiones máximas del pavimento con su radio de curvatura.

Es decir, las deflexiones que ocurren en el centro del eje de la rueda del camión a una distancia (0 cm).

Se coloca el extremo del brazo más largo en el centro del eje de la rueda de la vía.

Figura 33

Colocación del brazo de la viga al eje de la rueda del camión cargado



Nota. Colocación del extremo del brazo más largo de la viga en el eje central de la rueda trasera del camión. Elaborado: Por los autores a través de fotografía.

Figura 34

Verificación de la colocación correcta del brazo más largo de la viga



Nota. Verificación de que el extremo del brazo más largo se encuentra en el eje central de la rueda. Elaborado: Por los autores a través de fotografía

Una vez nos aseguremos que el extremo del brazo de la viga se encuentra en el centro del eje de la rueda. Colocamos una varilla en vertical en el extremo del balde de la volqueta. Buscamos la perpendicular de la varilla en el brazo más largo de la viga y marcamos con una señal.

Este proceso lo realizamos con la finalidad de facilitar el trabajo de la toma de medidas al realizar el ensayo ya que con la señal marcada en el brazo más largo podemos ubicar con facilidad el centro del eje de la rueda al realizar las siguientes mediciones.

Figura 35

Colocación de Varilla para encontrar la perpendicular



Nota. Colocación de la varilla en el extremo del balde para encontrar la perpendicular.

Elaborado: Por los estudiantes a través de fotografías

Figura 36

Colocación de señal para encontrar el centro del eje de la rueda del camión



Nota. Colocación de la señal en el brazo más largo después de haber verificado perpendicular.

Elaborado: Por los autores a través de fotografías.

5.3.4 Ya con la señal en el brazo más largo de la viga se procede a tomar nuestra primera deflexión con su respectivo radio de curvatura. Se coloca la volqueta de tal manera que el eje de la llanta trasera se encuentre ubicado perpendicular a la marca de la abscisa. A su vez el borde del neumático se debe encontrar ubicado a una distancia de 60 cm como indica normativa ya que el ancho de nuestro carril es de 3m.

Figura 37

Distancia del camión al borde la vía



Nota. Se presenta la colocación correcta de la volqueta antes de realizar el ensayo. Elaborado: por los autores a través de fotografías.

Tabla 2

Distancia del punto de ensayo desacuerdo al ancho del carril.

Ancho del Carril	Distancia del punto de ensayo desde el borde
2.70 m	0.45m
3.00 m	0.60m
3.30 m	0.75m
3.60 m o más	0.90m

Nota. Se presenta la distancia que debe tener el punto a ensayar desde el borde del carril. Fuente: Manual de Carreteras

5.3.5 Definido el punto a ensayar y colocada la volqueta de manera de correcta se procede a transportar la Viga Benkelman al lugar donde se tomará la deflexión del primer punto.

El equipo es transportado por dos operadores el primer operador se encarga de transportar el cuerpo de la viga mientras en que el segundo operador se encarga de transportar los brazos del equipo.

Antes de movilizar a la viga de un punto a otro se deberá asegurar los tornillos de fijación de ambos brazos, ya que de no hacerlo al momento de transportar los brazos del equipo provocaría que las manecillas del deformímetro se encuentren en constante movimiento haciendo que los deformímetros se descalibren o aún peor provocando el daño de los mismos.

Figura 38

Ajuste de los tornillos de fijación de los deformímetros del equipo



Nota. Momento en que se aseguran los tornillos de fijación antes de ser transportado el equipo.

Elaborado: Por los autores a través de fotografías.

Figura 39

Transporte de la viga



Nota. Transporte de la Viga Benkelman al primer punto de ensayo. Elaborado: Por los autores a través de fotografía.

5.3.6 Para tomar la medida de deflexión máxima de un punto. Se colocará la viga de forma alineada a la dirección de recorrido que realizará el camión a su vez colocará el extremo del brazo más largo de la viga en el eje central de la rueda trasera de la volqueta. Para esto se colocará una varilla de forma vertical en el extremo del balde de la volqueta y se lo alineará con la señal que se tomó en el brazo de la viga antes mencionado. Por último, se deberá verificar que el espacio que queda entre los brazos de la viga no sea desalineado, es decir el espacio que existe al inicio debe ser el mismo que el del final.

Figura 40

Colocación de la Viga Previo al ensayo



Nota. Colocación alienada de la viga al recorrido de la volqueta. Elaborado: Por los autores a través de fotografías

Figura 41

Alineamiento del brazo de la viga con el centro del eje de la rueda del camión



Nota. Momento en que se alinea la varilla con la marca del brazo de la viga. Elaborado: Por los autores a través de fotografías.

Se procede a desasegurar los tornillos de fijación de los brazos del equipo y a desasegurar el tornillo de fijación de la viga hasta que exista un contacto de los brazos con el palpador de los deformímetros nos podremos dar cuenta de esto al observar que la manecilla del deformímetro se empieza a mover.

Figura 42

Desenroscado Tornillo de Fijación de la Viga



Nota. Se presenta el momento en que se afloja el tornillo de fijación del equipo. Elaborado por los autores a través de fotografías

Figura 43

Desenroscado de los Tornillo de Fijación de los brazos de la Viga



Nota. Se presenta el momento en que aflojan los tornillos de fijación de los brazos del equipo.

Elaborado: Por los autores a través de fotografías

Se calibra los deformímetros de la siguiente manera se desajusta el tornillo de fijación del cuerpo de la viga hasta que la manecilla del deformímetro realice dos vueltas a partir del cerro del reloj. Por último, se gira el anillo del deformímetro hasta que el cero quede alineado con la manecilla del deformímetro.

Figura 44

Calibración de los deformímetros



Nota. Se presenta el momento en que calibran los deformímetros del equipo. Elaborado: Por los autores a través de fotografías

Ya con el equipo listo y los deformímetros calibrados se procede a tomar la medida de deflexión máxima del tramo analizar mediante la lectura que nos arroje el deformímetro del brazo más largo y a su vez obtenemos el radio de curvatura de la deflexión máxima mediante la lectura del deformímetro del brazo más corto de la viga.

Para la realización correcta del ensayo una persona se deberá encontrar cerca del conductor de la volqueta para indicarle cuando debe avanzar suave y lentamente, mientras otra persona estará cerca de los deformímetros para observar la deflexión que ocurre en el pavimento.

Figura 45

Movimiento de la volqueta al punto de ensayo



Nota. Momento en el que se solicita que se mueva la volqueta. Elaborado: Por los autores a través de fotografías.

Figura 46

Observación en el deformímetro de la deflexión máxima del pavimento con su radio de curvatura



Nota. Momento en el que se observa la deflexión del pavimento. Elaborado: Por los autores a través de fotografía.

CAPÍTULO VI

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

6.1 Método de Análisis

Una vez culminado el ensayo se procedió a revisar los resultados obtenidos con ambas vigas, con la ayuda de los laboratoristas del Ministerio de Obras Publicas se realizó un análisis visual de los valores obtenidos y mediante la experiencia que tiene el personal se llegó a la conclusión que los valores de ambos equipos son cercanos es decir que se validó el funcionamiento de la viga construida.

Para la elección del método de análisis se tomó en cuenta el tipo de datos que se obtuvo al realizar el ensayo. Al obtener valores que siguen una secuencia es decir que son valores que tuvieron un orden al ser tomados de forma ascendente desde la cota más pequeña del carril izquierdo de la vía y de forma descendente desde la cota más alta del carril derecho de la vía. Al obtener resultados que están relacionados entre sí ya que todos los valores que se obtuvieron fueron las deflexiones máximas y el radio de curvatura de varios tramos de la vía.

Se opto que la mejor forma para realizar un análisis de los datos obtenidos seria a través de un método estadístico conocido como “Prueba t pareada entre 2 muestras”. El cual es un método sencillo que permite el análisis de los valores de dos grupos que se relacionan entre sí. Este método se encarga de analizar si la diferencia que existen entre los valores de ambos grupos es significativa desde un punto de vista estadístico.

Hay que recalcar que este método tiene limitaciones pero que en si facilita la comprensión de diferencias entre dos resultados.

6.2 Obtención de resultados

Para obtener los resultados de ambas vigas se realizó el ensayo en una vía de dos carriles de 200 metros de longitud y 6 metros de ancho. Para el carril izquierdo se tomaron medidas de deformación cada 20 metros a partir de la cota 0+000 hasta llegar a la cota 0+200. Mientras que

para el carril derecho de la vía se tomaron medidas de deformación a partir de la cota 0+200 cada 10 metros hasta llegar a la cota 0+000. Al final se obtuvo un total de 21 deformaciones por cada Viga Benkelman.

Tabla 3

Deflexiones máximas y Radios de Giro del carril izquierdo de la vía.

N°	Izquierdo	Viga Estudiantes UPS		Viga MTOP	
		Def max	R de Giro	Def max	R de Giro
1	0+000	15	9	13	16
2	0+020	12	4	9	6
3	0+0.40	36	3	27	0
4	0+0.60	33	4	28	10
5	0+0.80	31	7	26	9
6	0+100	40	13	40	7
7	0+120	42	9	37	5
8	0+140	33	12	31	10
9	0+160	30	0	27	1
10	0+180	37	21	43	18
11	0+200	40	6	38	7

Nota. Se presentan los resultados de deflexiones máximas y Radios de giro del carril izquierdo de la vía. Elaborado por: Los autores.

Tabla 4.

Deflexiones máximas y Radios de Curvatura del carril derecho de la vía

N°	Derecho	Viga Estudiantes Ups		Viga MTOP	
		Def max	R de Giro	Def max	R de Giro
12	0+190	31	10	30	4
13	0+170	22	6	20	8
14	0+150	26	7	24	3
15	0+130	22	10	31	4
16	0+110	33	11	29	6
17	0+0.90	27	2	29	1
18	0+0.70	30	8	23	0
19	0+0.50	35	9	36	6
20	0+0.30	36	5	35	0
21	0+0.10	24	7	20	0

Nota. Se presentan los resultados de deflexiones máximas y Radios de giro del carril derecho de la vía. Elaborado por: Los autores

6.3 Conversión de los resultados

Para obtener la deflexión máxima y el radio de curvatura en unidad de milímetros se debe multiplicar el valor observado en los odómetros por la precisión del mismo la cual es de 0.01 mm para ambos deformímetros de las vigas.

$$Def_{Max}(mm) = Valor observado * Precisión del deformimetro$$

$$Def_{Max}(mm) = 15 * 0.01mm$$

$$Def_{Max}(mm) = 0.15mm$$

$$Radio de Giro(mm) = Valor observado * Precisión del deformimetro$$

$$Radio de Giro(mm) = 9 * 0.01mm$$

$$Radio de Giro (mm) = 0.09mm$$

Tabla 5

Deflexiones máximas y Radios de Curvatura del carril izquierdo de la vía en milímetros.

N°	Izquierdo	Viga Estudiantes UPS		Viga MTOP	
		Def max(mm)	R de Giro(mm)	Def max (mm)	R de Giro (mm)
1	0+000	0.15	0.09	0.13	0.16
2	0+020	0.12	0.04	0.09	0.06
3	0+0.40	0.36	0.03	0.27	0
4	0+0.60	0.33	0.04	0.28	0.1
5	0+0.80	0.31	0.07	0.26	0.09
6	0+100	0.4	0.13	0.4	0.07
7	0+120	0.42	0.09	0.37	0.05
8	0+140	0.33	0.12	0.31	0.1
9	0+160	0.3	0	0.27	0.01
10	0+180	0.37	0.21	0.43	0.18
11	0+200	0.4	0.06	0.38	0.07

Nota. Se presentan las deflexiones máximas y Radios de giro en unidad de mm del carril izquierdo de la vía. Elaborado por: Los autores

Tabla 6

Deflexiones máximas y Radios de Curvatura del carril derecho de la vía en milímetros.

N°	Derecho	Viga Estudiantes Ups		Viga MTOP	
		Def max(mm)	R de Giro(mm)	Def max(mm)	R de Giro(mm)
12	0+190	0.31	0.1	0.3	0.04
13	0+170	0.22	0.06	0.2	0.08
14	0+150	0.26	0.07	0.24	0.03
15	0+130	0.22	0.1	0.31	0.04
16	0+110	0.33	0.11	0.29	0.06
17	0+0.90	0.27	0.02	0.29	0.01
18	0+0.70	0.3	0.08	0.23	0
19	0+0.50	0.35	0.09	0.36	0.06
20	0+0.30	0.36	0.05	0.35	0
21	0+0.10	0.24	0.07	0.2	0

Nota. Se presentan las deflexiones máximas y Radios de giro en unidad de mm del carril derecho de la vía. Elaborado por: Los autores.

6.4 Procedimiento del método Prueba t pareada entre dos muestras

6.4.1 Como primer paso se debe calcular la diferencia que existen entre las medidas del grupo que vamos analizar. El primer grupo que se va analizar es grupo de las deflexiones máximas que existen a diferencias distancias en la vía y el segundo grupo analizar será el del radio de curvatura de cada una de las deflexiones máximas.

Tabla 7

Diferencia de las Deflexiones máximas obtenidas por ambas vigas en toda la vía.

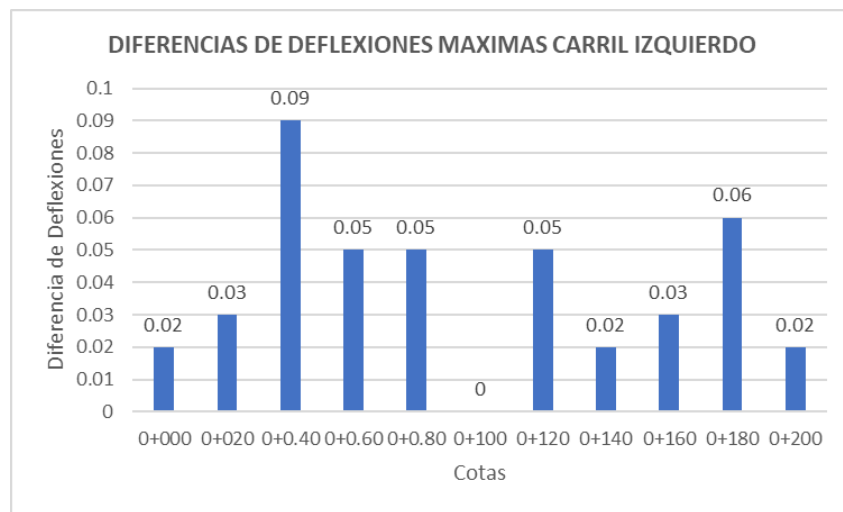
N°	COTAS	V. Estudiantes UPS	V. MTOP	DIFERENCIA(mm)
		Def max(mm)	Def max (mm)	
CARRIL IZQUIERDO				
1	0+000	0.15	0.13	0.02
2	0+020	0.12	0.09	0.03
3	0+0.40	0.36	0.27	0.09
4	0+0.60	0.33	0.28	0.05
5	0+0.80	0.31	0.26	0.05
6	0+100	0.4	0.4	0
7	0+120	0.42	0.37	0.05
8	0+140	0.33	0.31	0.02
9	0+160	0.3	0.27	0.03
10	0+180	0.37	0.43	-0.06
11	0+200	0.4	0.38	0.02
CARRIL DERECHO				
12	0+190	0.31	0.3	0.01
13	0+170	0.22	0.2	0.02
14	0+150	0.26	0.24	0.02
15	0+130	0.22	0.31	-0.09
16	0+110	0.33	0.29	0.04
17	0+0.90	0.27	0.29	-0.02
18	0+0.70	0.3	0.23	0.07
19	0+0.50	0.35	0.36	-0.01
20	0+0.30	0.36	0.35	0.01
21	0+0.10	0.24	0.2	0.04

Nota. Se presentan la diferencia que existe entre deflexiones máximas de ambas vigas.

Elaborado por: Los autores

Figura 42

Histograma de las deflexiones máximas en el carril izquierdo

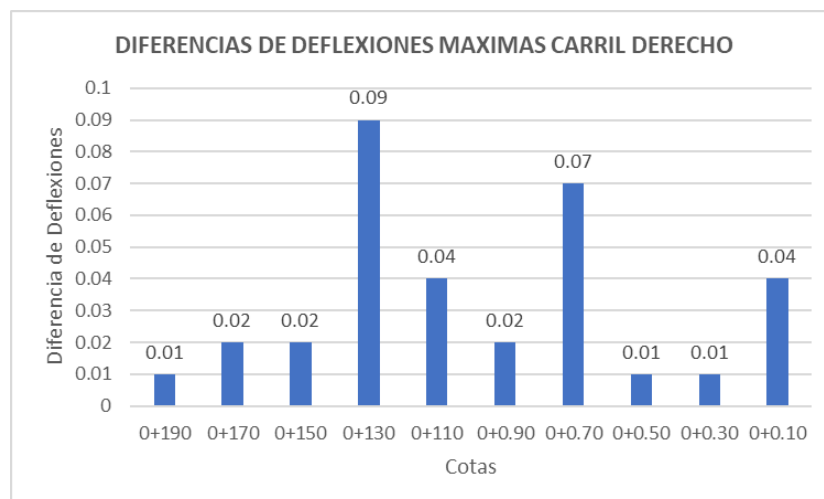


Nota. Se presentan el histograma de la diferencia de deflexiones máximas en el carril izquierdo.

Elaborado por Los autores

Figura 43

Histograma de las deflexiones máximas en el carril derecho



Nota. Se presentan el histograma de la diferencia de deflexiones máximas en el carril derecho.

Elaborado: por Los autores

Tabla 8

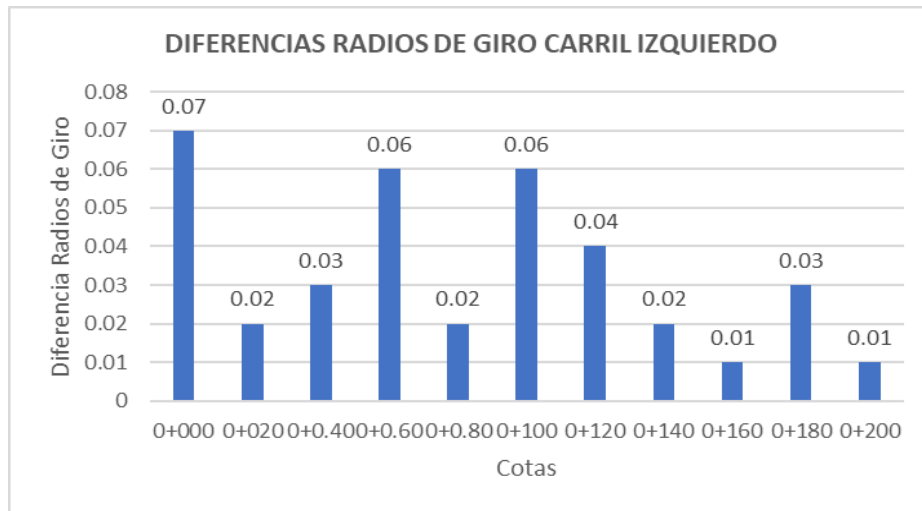
Diferencia de los Radios de Curvatura de las Deflexiones máximas obtenidas por ambas vigas en toda la vía.

N°	COTA	V.Estudiantes Ups	V.MTOP	DIFERENCIA(mm)
		R de Giro(mm)	R de Giro (mm)	
CARRIL IZQUIERDO				
1	0+000	0.09	0.16	-0.07
2	0+020	0.04	0.06	-0.02
3	0+0.40	0.03	0	0.03
4	0+0.60	0.04	0.1	-0.06
5	0+0.80	0.07	0.09	-0.02
6	0+100	0.13	0.07	0.06
7	0+120	0.09	0.05	0.04
8	0+140	0.12	0.1	0.02
9	0+160	0	0.01	-0.01
10	0+180	0.21	0.18	0.03
11	0+200	0.06	0.07	-0.01
CARRIL DERECHO				
12	0+190	0.1	0.04	0.06
13	0+170	0.06	0.08	-0.02
14	0+150	0.07	0.03	0.04
15	0+130	0.1	0.04	0.06
16	0+110	0.11	0.06	0.05
17	0+0.90	0.02	0.01	0.01
18	0+0.70	0.08	0	0.08
19	0+0.50	0.09	0.06	0.03
20	0+0.30	0.05	0	0.05
21	0+0.10	0.07	0	0.07

Nota. Se presentan las diferencias de los radios de las deflexiones máximas de la vía. Elaborado por: Los autores.

Figura 44

Histograma de la diferencia de los radios de giro en el carril izquierdo

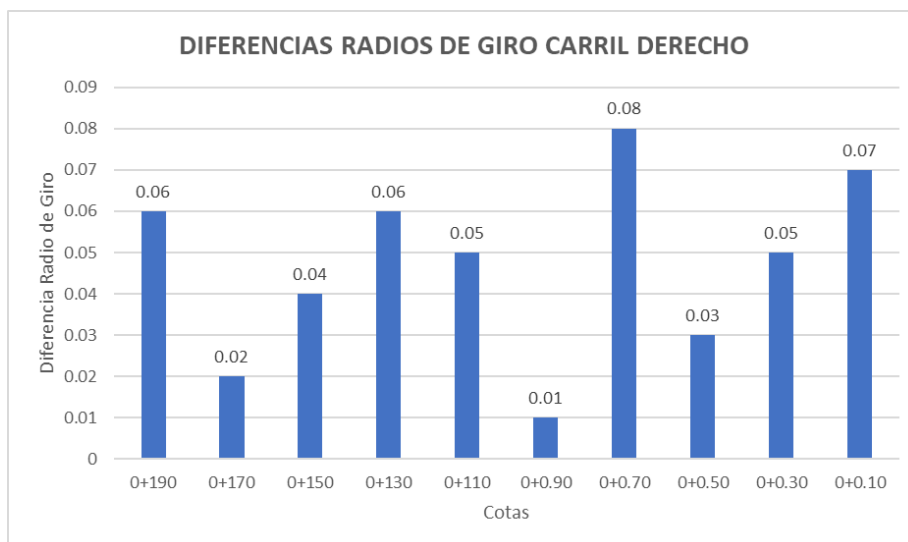


Nota. Se presentan el histograma de la diferencia de los radios de giro en el carril izquierdo.

Elaborado: por Los autores

Figura 45

Histograma de la diferencia de los radios de giro en el carril derecho



Nota. Se presentan el histograma de la diferencia de los radios de giro en el carril derecho.

Elaborado por: Los autores.

6.4.2 Se procede a calcular el valor de la media aritmética de la diferencia de ambos grupos de estudio de la siguiente manera:

$$\bar{X}_{dif} = \frac{\sum \text{diferencias}}{\# \text{ de datos}}$$

Donde:

\bar{X}_{dif} = Media Aritmética.

$\sum \text{diferencias}$ = La sumatoria de las diferencias de los valores del grupo analizado.

$\# \text{ de datos}$ = El numero de datos que se encuentran en el grupo analizar.

➤ **Media aritmética de las deflexiones máximas de la vía**

$$\bar{X}_{dif} = \frac{0.39}{21}$$

$$\bar{X}_{dif} = 0.0185$$

➤ **Media aritmética de los radios de giro de las deflexiones máximas**

$$\bar{X}_{dif} = \frac{0.42}{21}$$

$$\bar{X}_{dif} = 0.02$$

6.4.3 A su vez se procede a calcular la desviación estándar de las diferencias del grupo analizar de la siguiente forma:

$$S_{diffe} = \sqrt{\frac{\sum (x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Donde:

S_{diffe} = Desviación Estándar

X= Cada valor del grupo analizar

\bar{x} = Media aritmética

n= Numero de datos del grupo analizar

➤ **Desviación estándar de las deflexiones máximas de la vía**

$$S_{diffe} = 0.04040863$$

➤ **Desviación estándar de los radios de giro de las deflexiones máximas**

$$S_{diffe} = 0.041833$$

6.4.4 Se procede a calcular el estadístico de prueba para cada uno de los grupos analizados

$$t = \frac{\bar{x}}{S_{difee} / \sqrt{n}}$$

Donde:

t= Estadístico de Prueba

\bar{x} = Media Aritmética

S_{difee} = Desviación Estándar

n = Numero de datos del grupo analizado

➤ **Estadístico de Prueba de las deflexiones máximas de la vía**

$$t = \frac{0.0185}{0.04040863 / \sqrt{21}}$$

$$t = 2.098$$

➤ **Estadístico de Prueba de las deflexiones máximas de la vía**

$$t = \frac{0.02}{0.041833 / \sqrt{21}}$$

$$t = 2.1908$$

6.4.5 Ya con el estadístico de prueba calculado para cada uno de los grupos procedemos a imponer una hipótesis en la cual decimos que no existe una diferencia significativa entre los resultados obtenidos por la viga de los estudiantes UPS con respecto a los resultados obtenidos con la viga del MTOP

$$H_0 = \bar{D}_{prom} = 0$$

Con esta hipótesis asumimos que la diferencia que existe entre los valores del grupo analizar es nula es decir cero.

A su vez podemos proponer otra hipótesis donde podemos decir que existe diferencia significativa entre los resultados obtenidos por la viga de los estudiantes UPS con respecto a los resultados obtenidos con la viga del MTOP

$$H_0 = \bar{D}_{prom} \neq 0$$

Con esta nueva hipótesis asumimos que si existe una diferencia de valores en el grupo analizar

6.4.6 Se procede a buscar el valor crítico de nuestra distribución mediante la tabla “Distribución t para área en los dos extremos combinados”.

Hay que recalcar que estamos haciendo una prueba de dos colas por lo que al momento de realizar los cálculos era irrelevante calcular la diferencia de los valores de izquierda a derecha o de derecha a izquierda ya que se llegarían a los mismos resultados, pero con diferente signo.

Y por esta razón se aplica el uso de esta tabla ya que en esta tabla los valores son los mismos tanto en la izquierda o derecha solo que con diferente signo.

Para encontrar el valor crítico se establece los grados de libertad de la siguiente manera (N-1) en nuestro caso 20 y se establece un porcentaje de error aceptable el cual establecemos el 5% tal como establece el método

$$t(\alpha = 0.05; 20) = \pm 2.086$$

Comparamos nuestro valor t para nuestro primer grupo de análisis “Deflexiones Máximas”

$$2.098 \geq 2.086$$

Donde descartamos nuestra primera hipótesis de que no existe diferencias significativas entre los valores del grupo de análisis y asumimos nuestra segunda hipótesis que si existe una diferencia no significativa pero que no es cero.

A su vez comparamos nuestro valor t de nuestro segundo grupo de análisis “Radios de giro de las deflexiones máximas de la vía”

$$2.1908 \geq 2.086$$

Donde se descarta la primera hipótesis que no existen diferencia entre los valores del grupo de análisis y se asume la segunda hipótesis que existe una diferencia significativa entre los valores del grupo analizado.

Se procede a calcular el error porcentual que existen entre el valor del estadístico de prueba y el valor crítico de la muestra con el objetivo de conocer el error exacto en porcentaje.

$$error\% = \left| \frac{Va - Vc}{Ve} \right| \times 100\%$$

Donde:

$error\%$ = El error en porcentaje de los valores a comparar

Va = Valor aproximado

Ve= Valor exacto

Para el primer grupo de análisis “Deflexiones Máximas”

$$error\% = \left| \frac{2.098 - 2.086}{2.086} \right| \times 100\%$$

$$error\% = 0.58\%$$

Con un error 0.58% que no supera el 5% podemos llegar a la conclusión que la diferencia que existen entre las deflexiones de la Viga de los estudiantes UPS y la Viga del MTOP es despreciable ya que podemos observar que el error en porcentaje no llega ni al 1%.

Para el segundo grupo de análisis “Radios de Giro de las deflexiones Máximas de la Vía”

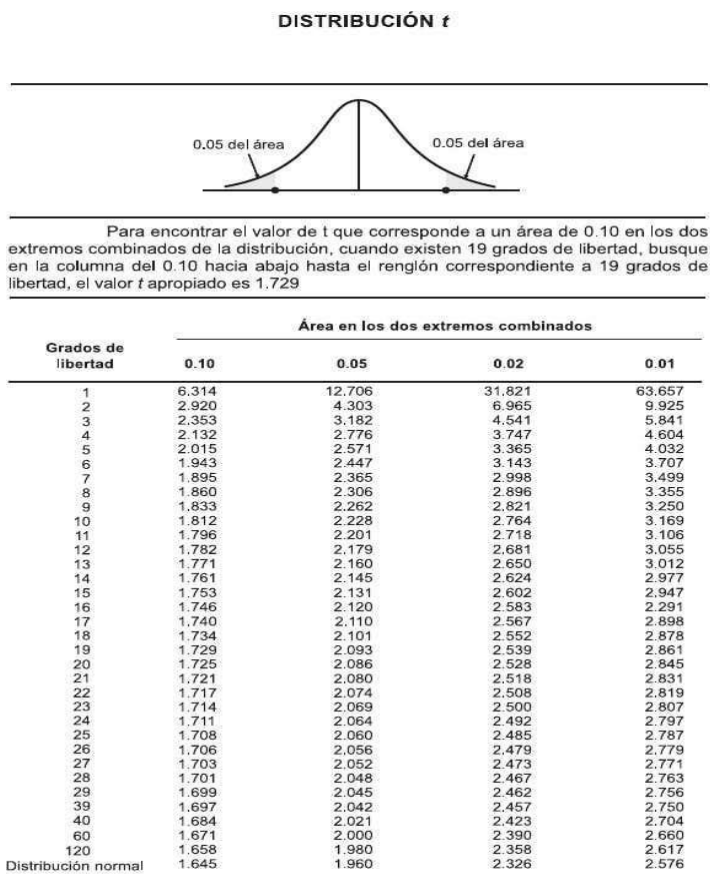
$$error\% = \left| \frac{2.19 - 2.086}{2.086} \right| \times 100\%$$

$$error\% = 4.98\%$$

Con un error del 4.98% muy próximo al error aceptable del 5% podemos decir que si existe una diferencia aceptable entre los radios de giros obtenidos de la Viga de los estudiantes UPS y la Viga del MTOP. Esto se puede ser a causa de diferentes factores ya sea por la calibración de los deformímetros o por la interpretación del técnico que este tomando los datos al momento de realizar el ensayo.

Figura 47

Tabla de distribución t para una prueba de dos colas



*Tomado de la Tabla III de Fisher y Yates, *Statistical Tables for Biological, Agricultural, and Medical Research*, publicado por Longman Group, Ltd., Londres (publicada anteriormente por Oliver & Boyd, Edimburgo) y con licencia de los autores y los editores.

Nota. Se presentan la tabla III de valores t de donde se obtuvo el valor para el método estadístico. Fuente: *Oliver y Boyd "Tablas Estadísticas"*

6.5 Deflexión característica y factor s/m

Con los datos obtenidos de las deflexiones máximas procedemos a calcular la deflexión característica según la INV795-13 (2013). Para cada tramo calculamos la deflexión promedio (dm) y la deflexión característica (dc), mediante las siguientes expresiones:

$$dm = \frac{\sum_{i=1}^n di}{n}$$

$$dc = dm + Zr \times S$$

Donde:

di : Deflexión en el eje vertical de la carga en cada punto de ensayo, 0.01 mm;

Zr : Factor de la deflexión característica dependiente del grado de confiabilidad ver (tabla 9).

Tabla 9

Valor Zr , para diferentes niveles de confiabilidad.

Confiabilidad	Zr
50	0.000
75	0.674
85	1.037
92	1.282
95	1.645
97	1.881
98	2.054
99	2.327

Nota. Se presentan la tabla Zr , aplicada para la desviación estándar con diferentes niveles de confiabilidad. Fuente: INV795-13(2013).

s: Desviación estándar, obtenida con la expresión:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (d_i - dm)^2}{n - 1}}$$

Para determinar el estado del pavimento usamos el factor s/m, que es un parámetro para determinar la uniformidad del pavimento. Con los datos obtenidos de la desviación estándar y la media del subtramo de la vía procedemos a calcular el factor mediante la siguiente expresión:

$$\text{factor } s/m = \frac{s}{dm}$$

Donde:

s: Desviación estándar;

dm: media aritmética de los valores obtenidos en la deflexión.

6.5.1 Análisis resultados deflexión características y factor s/m

Con los datos obtenidos de las deflexiones máximas de cada tramo de la vía, se realiza una hoja de cálculo que termina la deflexión máxima, deflexión característica, media, desviación estándar y factor s/m.

Tabla 10*Deflexión característica y factor s/m viga estudiantes carril izquierdo*

DATOS VIGA ESTUDIANTES CARRIL IZQUIERDO								
# pruebas (n)	Abscisas	Ensayada (di) mm	Media (m)	Máxima	(di- m)2	Desviación Estándar (s)	Característica (dc)	s/m
1	0+000	0.15	0.32	0.42	0.028	0.098	0.514	0.31
2	0+020	0.12	0.32	0.42	0.039	0.098	0.514	0.31
3	0+040	0.36	0.32	0.42	0.002	0.098	0.514	0.31
4	0+060	0.33	0.32	0.42	0.000	0.098	0.514	0.31
5	0+080	0.31	0.32	0.42	0.000	0.098	0.514	0.31
6	0+100	0.4	0.32	0.42	0.007	0.098	0.514	0.31
7	0+120	0.42	0.32	0.42	0.011	0.098	0.514	0.31
8	0+140	0.33	0.32	0.42	0.000	0.098	0.514	0.31
9	0+160	0.3	0.32	0.42	0.000	0.098	0.514	0.31
10	0+180	0.37	0.32	0.42	0.003	0.098	0.514	0.31
11	0+200	0.4	0.32	0.42	0.007	0.098	0.514	0.31

Nota. Se presentan una hoja de cálculos con los datos obtenidos carril izquierdo viga de estudiantes. Elaborado por: Los autores a través de hojas de cálculo.

Tabla 11*Deflexión característica y factor s/m viga MTOP carril izquierdo*

DATOS VIGA MTOP CARRIL IZQUIERDO								
# pruebas (n)	Abscisas	Ensayada (di) mm	Media (dm)	Máxima	(di- m)2	Desviación Estándar (s)	Característica (dc)	s/m
1	0+000	0.13	0.29	0.43	0.026	0.107	0.504	0.37
2	0+020	0.09	0.29	0.43	0.040	0.107	0.504	0.37
3	0+040	0.27	0.29	0.43	0.000	0.107	0.504	0.37
4	0+060	0.28	0.29	0.43	0.000	0.107	0.504	0.37
5	0+080	0.26	0.29	0.43	0.001	0.107	0.504	0.37
6	0+100	0.4	0.29	0.43	0.012	0.107	0.504	0.37
7	0+120	0.37	0.29	0.43	0.006	0.107	0.504	0.37
8	0+140	0.31	0.29	0.43	0.000	0.107	0.504	0.37
9	0+160	0.27	0.29	0.43	0.000	0.107	0.504	0.37
10	0+180	0.43	0.29	0.43	0.020	0.107	0.504	0.37
11	0+200	0.38	0.29	0.43	0.008	0.107	0.504	0.37

Nota. Se presentan una hoja de cálculos con los datos obtenidos del carril izquierdo viga MTOP.

Elaborado por: Los autores a través de hojas de cálculo.

Tabla 12*Deflexión característica y factor s/m viga estudiantes carril derecho*

DATOS VIGA ESTUDIANTES CARRIL DERECHO								
# pruebas	Abscisas	Ensayada	Media	Máxima	(di- m)²	Desviación	Característica	s/m
(n)		(di) mm	(dm)			Estándar	(dc)	
						(s)		
1	0+000	0.24	0.29	0.36	0.002	0.052	0.389	0.18
2	0+030	0.36	0.29	0.36	0.005	0.052	0.389	0.18
3	0+050	0.35	0.29	0.36	0.004	0.052	0.389	0.18
4	0+070	0.3	0.29	0.36	0.000	0.052	0.389	0.18
5	0+090	0.27	0.29	0.36	0.000	0.052	0.389	0.18
6	0+110	0.33	0.29	0.36	0.002	0.052	0.389	0.18
7	0+130	0.22	0.29	0.36	0.004	0.052	0.389	0.18
8	0+150	0.26	0.29	0.36	0.001	0.052	0.389	0.18
9	0+170	0.22	0.29	0.36	0.004	0.052	0.389	0.18
10	0+190	0.31	0.29	0.36	0.001	0.052	0.389	0.18

Nota. Se presentan una hoja de cálculos con los datos obtenidos del carril derecho viga de estudiantes. Elaborado por: Los autores a través de hojas de cálculo.

Tabla 13*Deflexión característica y factor s/m viga MTOP carril derecho*

DATOS VIGA MTOP CARRIL DERECHO								
# pruebas (n)	Abscisas	Ensayada (di) mm	Media (dm)	Máxima	(di-m)2	Desviación Estándar (s)	Característica (dc)	s/m
1	0+000	0.2	0.28	0.36	0.006	0.057	0.392	0.21
2	0+030	0.35	0.28	0.36	0.005	0.057	0.392	0.21
3	0+050	0.36	0.28	0.36	0.007	0.057	0.392	0.21
4	0+070	0.23	0.28	0.36	0.002	0.057	0.392	0.21
5	0+090	0.29	0.28	0.36	0.000	0.057	0.392	0.21
6	0+110	0.29	0.28	0.36	0.000	0.057	0.392	0.21
7	0+130	0.31	0.28	0.36	0.001	0.057	0.392	0.21
8	0+150	0.24	0.28	0.36	0.001	0.057	0.392	0.21
9	0+170	0.2	0.28	0.36	0.006	0.057	0.392	0.21
10	0+190	0.3	0.28	0.36	0.001	0.057	0.392	0.21

Nota. Se presentan una hoja de cálculos con los datos obtenidos del carril derecho viga MTOP.

Elaborado por: Los autores a través de hojas de cálculo.

Con los datos obtenidos según el BOE (Boletín estatal del estado) de España, la Guía para el estudio de las deflexiones en firmes de pavimento, afirma los siguientes rangos para la uniformidad del pavimento:

- Entre 0,20 y 0,30; indican tramos muy uniformes.
- Entre 0,30 y 0,40; indican menor uniformidad; considerados aceptables.
- Mayor a 0,40; no podrá considerarse que el tramo tenga un comportamiento uniforme.

Como se observa en la tabla 10 y 11 del lado izquierdo el factor s/m está en un rango de 0.30 a 0.40 lo cual nos indica menos uniformidad, pero se considera aceptable.

Como se observa en la tabla 12 y 13 del lado derecho el factor s/m esta entre un rango de 0.20 lo cual nos indica que es un rango considerado como muy uniforme y es aceptable.

CAPÍTULO VII

GUÍA DE USO

7.1 Partes de la Viga Benkelman

La viga Benkelman está dividida en dos secciones principales con las que puede funcionar tal y como se muestra en la siguiente figura (figura 46). En esta sección se indicará cada parte de la viga Benkelman y su funcionamiento.

Figura 48

Viga Benkelman



Nota. Se presenta la viga Benkelman separada en sus secciones. Elaborado por: Los autores a través de fotografía.

7.1.1 Cuerpo de la Viga

Tabla 14

Partes del cuerpo de la viga

Gráfico	Nombre	Descripción
	Apoyos fijos	Sirven como soporte del cuerpo de la viga, dan la altura necesaria para el brazo de palanca. Se encuentra al extremo del cuerpo de la viga.
	Apoyo móvil	Es un perno que funciona como apoyo se ubica en la parte posterior del cuerpo de la viga y sirve para dar calibración a los deformímetros al ensayar.



	<p>Tornillos de fijación</p>	<p>Son tornillos ajustables sirven para estabilizar los brazos móviles al momento de trasportar el equipo a otra medición.</p>
	<p>Pasador/Pivote</p>	<p>Es un pasador de aluminio que sirve para dar rotación a los brazos.</p>
	<p>Deformímetros</p>	<p>También conocidos como relojes comparadores sirven para dar lectura de la deformación del pavimento, su lectura es de distancia puede ser en mm o pulg dependiendo el equipo a utilizar.</p>


Nota. Se presentan las gráficas y la descripción del cuerpo de la viga. Elaborado por: Los autores a través de inserción de tablas.

7.1.2 Brazos de la Viga

Tabla 15

Partes de los brazos de la viga.

Gráfico	Nombre	Descripción
	Brazo de aluminio inicial	Es un brazo hueco el cual sirve de acoplamiento para el brazo secundario, se ajustan mediante tornillos para dar estabilidad. Posee un orificio en el cual encaja el pasador.
	Brazo de aluminio final	Es un brazo con un cuerpo completamente de aluminio, se ajusta al brazo inicial, su extremo es el que está en contacto con la superficie del pavimento para tomar las medidas de deflexión.

	<p>Palpador</p>	<p>Es la punta final del brazo, es el extremo del brazo que toma la medida en el ensayo.</p>
---	-----------------	--

Nota. Se presentan las gráficas y la descripción de los brazos de la viga. Elaborado por: Los autores a través de inserción de tablas.

7.1 Armado de la viga

La viga Benkelman tiene un mecanismo que no es complicado de armar ya que posee dos secciones principales las cuales constan de un máximo de 5 elementos acoplados a dichas secciones.

1. Asegurarse que los tornillos de fijación no se encuentren completamente ajustados para evitar el contacto con la colocación de los brazos de aluminio.
2. Acoplar los brazos de aluminio inicial y final mediante los tornillos y tuercas, asegurarse que se encuentre con su respectivo brazo, posee un numero en el cual especifica cuál es su par (ver la figura 47).

Figura 49

Brazos de aluminio



Nota. Se presenta los brazos de aluminio con su respectivo par. Elaborado por: Los autores a través de fotografía.

3. Colocar los brazos de aluminio ya armados a través del pasador procurando no golpear los brazos con los tornillos de fijación.
4. Colocar los deformímetros en las ranuras mediante sus respectivas tuercas de ajuste, deben estar perpendiculares a los brazos de aluminio hasta que llegue a topar el palpador del deformímetro.
5. Ajustar los brazos de fijación para el transporte del equipo, evitando que los deformímetros se descalibren por movimientos bruscos.

7.2 Calibración del equipo

Al momento de tomar una medida para el ensayo es importante calibrar el equipo a través de los deformímetros y el cuerpo de la viga.

1. Los deformímetros deben estar colocados perpendicularmente a la base de los brazos de aluminio, bien ajustados sin que tengan movimientos para poder tener valores precisos al momento de la medición.

2. Los tornillos de fijación se los deben desajustar ligeramente hasta tener un contacto con los deformímetros (palpador), quiere decir hasta que los deformímetros den algún movimiento en sus agujas.
3. Las manecillas de los deformímetros deben dar al menos 2 vueltas para poder realizar las respectivas mediciones.
4. Después de dar las 2 vueltas las manecillas, se procede a encerar los deformímetros mediante el arillo del deformímetro.

7.3 Aplicación de la norma INV E – 795 – 13

La INV E – 795 – 13 es la norma vigente en cuanto al uso de la viga Benkelman, describen el procedimiento con el cual se toman los datos en un pavimento flexible, esta norma actualmente reemplaza la norma INV E-795-07.

7.3.1 Equipo

Viga Benkelman: Es un aparato mecánico, que funciona como brazo de palanca a través de una carga puntual para determinar la deflexión del pavimento.

Vehículo de carga: Volqueta cargada de un eje trasero simple con sistema de doble rueda, debe estar cargada y pesar aproximadamente 80 kN.

Flexómetro: aparato de medición de 3 o 5 m.

Odómetro: aparato de medición, funciona mediante una rueda y un contador determinando la longitud de la rueda con la distancia recorrida.

Pintura: producto líquido ayuda a dejar marcas de distancia o puntos de medición.

Papel: papel con dimensiones mínimas de 50 x 70 cm para la marca de huella en los neumáticos.

7.3.2 Preparación del ensayo

1. El vehículo de carga debe estar cargado, puede ser de bloques de concreto, piedra, arena o lingotes de metal, la carga en el eje simple trasero debe ser de 80kN (18000lbf). Se

hace la comprobación de la carga al comienzo del ensayo si son para diferentes series de ensayo se comprueba al inicio y al final. Si los materiales utilizados como carga pueden tener variación por la humedad la carga debería estar protegida con una lona.

2. Se imprime la huella de la llanta sobre un papel con medidas mínimas de 50 x 70 cm, para este procedimiento se levanta las ruedas con un gato hidráulico sobre una superficie lo más plana posible, se pone el papel debajo de las llantas y se baja ligeramente hasta obtener el área de impresa de las ruedas. Conocida la carga por rueda y el área de la llanta se calcula la presión que no debe diferir de 552kpa (80 lbf/plg²).
3. Se arma la viga Benkelman según el literal 6.1 y se comprueba su correcto funcionamiento según el literal 6.2.

7.3.3 Procedimiento

1. El punto del pavimento a ensayar debe estar a una medida específica según el ancho del carril ver (tabla 11).

Tabla 16

Localización del punto de ensayo

Ancho del carril	Distancia desde el borde del pavimento
2,70 m	0,45 m
3,00 m	0,60 m
3,30 m	0,75 m
3,60 m o más	0.90 m

Nota. Se presentan la tabla de localización del punto de ensayo. Fuente: INV795-13 (2013).

2. Se hace un orificio de 4 a 5 cm de profundidad con diámetro aproximado de 1 cm en el sentido del punto de ensayo a aproximadamente a 50 cm del mismo, se llena con glicerina o aceite con un tiempo mínimo de 10 minutos antes de iniciado el ensayo, la temperatura estimada deberá quedar en un rango de 5 a 35°C.
3. Se coloca la rueda del vehículo de carga sobre el punto de ensayo, para esto se recomienda poner una guía vertical o marca en la el brazo de la viga para que coincida como referencia con el eje de carga, hasta hacer coincidir con una línea trasversal lo indicado en la (tabla 11).
4. Colocada la viga sobre el pavimento y haciendo coincidir la guía vertical y trasversal se ubica el palpador procurando que no roce contra las llantas.
5. Se quita el seguro de los brazos mediante los tornillos de fijación y se ajusta el tornillo trasero/apoyo móvil hasta que la parte posterior del brazo este en contacto con el deformímetro.
6. Ubicado todo en según el respectivo procedimiento se sigue el paso de la calibración del equipo (literal 7.2).
7. El vehículo de carga debe avanzar una distancia no menor a 5 m y se lee la lectura del deformímetro cada 60 seg, cuando se tenga dos lecturas sucesivas iguales se da por finalizada la recuperación del pavimento.
8. Se repite este proceso según los intervalos del (literal 6.5).

7.3.4 Frecuencia de medición

La ubicación o distancia de las pruebas del ensayo variaran según el propósito para el que se necesiten los datos.

1. Ensayo a nivel de red: es para una perspectiva general del pavimento con un limitado número de pruebas. Se las realizan a intervalos de 200 a 500 m dependiendo de las condiciones específicas del pavimento.

2. Ensayo a nivel general de proyecto: es para un análisis más detallado del pavimento como para un diseño o rehabilitación de pavimento. Se las realizan a intervalos de 50 a 200 m, mínimo de 15 pruebas para cada sección de pavimento.
3. Ensayos a nivel detallado de proyecto: es par aun análisis altamente detallado y especifico del pavimento como para determinar áreas de alta deflexión. Se las realiza en intervalos de 10 a 50 m según recomiende el ingeniero.

7.3.5 Cálculos

Según la INV 795-13(2013) se calcula la deflexión en cada punto de medida con la siguiente expresión:

$$d_i = |L_o - L_f| \times \text{Constante de la viga}$$

Donde: L_o : Lectura inicial del deformímetro, 0.01 mm

L_f : Lectura final del deformímetro, 0.01 mm

En vigas de doble brazo, la deflexión de la segunda viga d_{i25} , se calcula de la misma manera a partir de las dos lecturas de su dial y se calcula el radio de curvatura en el sitio de ensayo, con la expresión:

$$RC = \frac{3125}{d_i - d_{i25}}$$

Donde: RC: Radio de curvatura, m (Tabla 795 - 2);

d_i : Deflexión recuperable en el eje vertical de la carga, 0.01 mm;

d_{i25} : Deflexión recuperable a 25 cm del eje vertical de la carga, 0.01mm.

Tabla 17

Tabla para la determinación del radio de curvatura.

Diferencia di- di25(0.01mm)	Radio de curvatura	Diferencia di- di25(0.01mm)	Radio de curvatura
1	3125	51	61
2	1563	52	60
3	1042	53	59
4	781	54	58
5	625	55	57
6	521	56	56
7	446	57	55
8	391	58	54
9	347	59	53
10	313	60	52
11	284	61	51
12	260	62	50
13	240	63	50
14	223	64	49
15	208	65	48
16	195	66	47
17	184	67	47
18	174	68	46
19	164	69	45
20	156	70	45
21	149	71	44
22	142	72	43
23	136	73	43
24	130	74	42
25	125	75	42
26	120	76	41

27	116	77	41
28	112	78	40
29	108	79	40
30	104	80	39
31	101	81	39
32	98	82	38
33	95	83	38
34	92	84	37
35	89	85	37
36	87	86	36
37	84	87	36
38	82	88	36
39	80	89	35
40	78	90	35
41	76	91	34
42	74	92	34
43	73	93	34
44	71	94	33
45	69	95	33
46	68	96	33
47	66	97	32
48	65	98	32
49	64	99	32
50	63	100	31

Nota. Se presentan la tabla de radio de curvatura. Fuente: INV795-13(2013).

7.3.6 Corrección de la deflexión por temperatura

Según la INV 795-13(2013).” La deflexión patrón se considera cuando las lecturas se toman a 20 °C. Las deflexiones medidas a temperaturas diferentes a 20° C se corregirá cuando

el espesor de las capas asfálticas sea igual o mayor a 5 cm” (p.10), mediante la siguiente expresión”.

$$FT = \frac{1}{1 + [8 \times 10^{-4} \times Ha \times (T - 20)]}$$

Donde: FT: Factor de corrección

Ha: Espesor de las capas asfálticas, cm

T: Temperatura de las capas asfálticas en el instante del ensayo, ° C.

7.3.7 Cálculos de deflexión característica

Según la INV 795-13(2013) “Para cada subtramo de pavimento de comportamiento homogéneo se definirá una deflexión promedio” dicha deflexión promedio se la expresa como (dm) y la deflexión característica de cada tramo (dc), mediante la siguientes formulas.

$$dm = \frac{\sum_{i=1}^n di}{n}$$

$$dc = dm + Zr \times S$$

Donde:

di: Deflexión en el eje vertical de la carga en cada punto de ensayo, 0.01 mm;

Zr: Factor de la deflexión característica dependiente del grado de confiabilidad ver (tabla 18).

Tabla 18

Valor Z_r , para diferentes niveles de confiabilidad.

Confiabilidad	Z_r
50	0.000
75	0.674
85	1.037
92	1.282
95	1.645
97	1.881
98	2.054
99	2.327

Nota. Se presentan la tabla Z_r , aplicada para la desviación estándar con diferentes niveles de confiabilidad. Fuente: INV795-13(2013).

S: Desviación estándar, obtenida con la expresión:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (d_i - dm)^2}{n - 1}}$$

CONCLUSIONES

Al usar la metodología estadística “Prueba t pareada entre 2 muestras”, para comparar los resultados obtenidos entre ambas vigas, se llegó a la conclusión que para las deflexiones máximas obtenidas por ambos equipos son muy similares obteniendo un error porcentual del 0.58%, este error puede ser a causa a que cada operador de la viga tiene una interpretación distinta al momento de hacer lectura del resultado en los deformímetros.

En el caso de los radios de curvatura obtenidos por los brazos de ambos equipos se obtuvo un error porcentual, del 4.98% por lo que se llegó a la conclusión que los valores obtenidos por ambas vigas son parecidos, pero no son muy cercanos. Este error puede ser a causa a que se debe tomar en cuenta que los deformímetros de ambos equipos son los mismos, pero no tienen el mismo tiempo de uso. Los deformímetros que se usaron en la viga de los estudiantes son completamente nuevos y se encuentran calibrados, mientras que los deformímetros que se usaron en la viga del MOP, son deformímetros que ya cuentan con un tiempo de uso por lo cual no se encuentran calibrados. Esto se pudo concluir ya que al momento de realizar el ensayo en varios tramos de la vía se obtuvieron radios de curvatura con valor cero, se procedió a realizar por segunda vez el ensayo en esa abscisa obteniendo resultado de cero nuevamente.

A su vez al momento de realizar el ensayo y calibrar el deformímetro del brazo más corto de la viga del MOP el tiempo de calibración de ese deformímetro era más lento ya que las manecillas del deformímetro se movían al mínimo contacto esto se debía a que el deformímetro se encontraba muy gastado.

RECOMENDACIONES

Para la construcción de la Viga Benkelman, se recomienda usar un acero A36 tipo C para el cuerpo del equipo, ya que este tipo de acero posee una buena resistencia a la tracción garantizando la durabilidad del cuerpo de la viga. Además, que este tipo de acero admite una buena soldadura por lo que facilita el ensamblaje del cuerpo de la viga.

Para los brazos del cuerpo de la viga se recomienda usar un material de aluminio 7075 ya que este tipo de material tiene muy buena resistencia a la tracción lo que garantiza que los brazos del equipo sean duraderos, a su vez este aluminio es de bajo peso lo que facilita el transporte de la viga cuando se encuentre armada.

Al momento de escoger el material para cargar la volqueta se recomienda escoger un material como arena, ripio, bloques. Materiales que se conozcan su peso específico o su peso por unidad ya que de esta manera podremos calcular el peso exacto que necesitamos para cargar en la volqueta. A su vez se recomienda cubrir el balde de la volqueta con algún tipo de manta o toldo que cubra al material de la lluvia todo con el objetivo de que no altere el peso de la volqueta y de esta manera poder realizar el ensayo de manera correcta.

Si se procede a realizar el ensayo en un tramo de vía muy corto se recomienda tomar datos cada 10 o 20 metros, ya que de esta manera se tendrá la cantidad necesaria de datos para poder realizar el análisis estructural del pavimento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Branko. (2007). *Principios De La Instrumentación De Estructura*.
[Http://Www.Ptolomeo.Unam.Mx:8080/Xmlui/Bitstream/Handle/132.248.52.100/448/A5.Pdf?Sequence=5](http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/Xmlui/Bitstream/Handle/132.248.52.100/448/A5.Pdf?Sequence=5)
- Bravo, K. (2023). *Comportamiento Estructural Del Pavimento Flexible En Vía Tugaduaja – Engunga Del Cantón Y De La Provincia De Santa Elena Utilizando La Viga Benkelman* [tesis de pregrado, Universidad Estatal Península De Santa Elena, Ecuador]. Repositorio institucional UPSE. <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/9218/1/UPSE-TIC-2023-0005.pdf>
- Córdoba, C., & Heilbron, J. (2020). *Análisis Comparativo De La Evaluación De Esfuerzos Y Deformaciones En Pavimento Asfáltico Mediante Teorías Lineales Elásticas Y Viscoelásticas*. [tesis de pregrado, Corporación Universidad De La Costa, Colombia]. Repositorio institucional CUC.
<https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/7737/An%c3%a1lisis%20comparativo%20de%20la%20evaluaci%3%b3n%20de%20esfuerzos%20y%20deformaciones%20en%20pavimento%20asfáltico%20mediante%20teor%c3%adas%20lineales%20el%c3%alsticas%20y%20viscoel%c3%alsticas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Editorial Etecé. (2021). *Concepto*. <https://Concepto.De/Tipos-De-Investigacion/>
- Fernández, P., & Pértegas, D. (27 de mayo De 2002). *Investigación Cuantitativa Y Cualitativa*.[https://Ocw.Unican.Es/Pluginfile.Php/355/Course/Section/154/Tema%25208.Pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/355/course/section/154/Tema%25208.pdf)
- Granja, E. G. (2019). *Implementación Del Proceso De Conservación De La Estructura De La Capa De Rodadura De La Vía Patate -Píllaro En El Tramo Km 7+600 Al Km 11+400 De La Provincia De Tungurahua*. [tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato] Repositorio institucional UTA.

<https://Repositorio.Uta.Edu.Ec/Bitstream/123456789/29780/1/Tesis%20I.%20C.%201322%20-%20Tixe%20Granja%20Edisson%20Geovanny.Pdf>

Gutiérrez, C., Hernández, R., & Garnica, P. (2018). *Teorías Para Calcular Esfuerzos, Deformaciones Y Deflexiones En Pavimentos Flexibles: Un Enfoque Mecanicista*.
<https://imt.mx/Archivos/Publicaciones/Documentotecnico/Dt72.Pdf>

Instituto Nacional de Vías (2013). Guía INVIAS para Medida De Las Deflexiones De Un Pavimento Asfáltico empleando una viga Benkelman.
https://inteinsapavimentos.com.co/wp-content/uploads/2020/07/SECCIONES-700-Y-800-segunda-partemod_2013-NOV-15.pdf

Javier, M. R. (2010). *Deterioros En Pavimentos Flexibles Y Rígidos*. Valdivia.

Medina, N. M. (2019). Análisis Estructural De Pavimentación. En N. M. Medina, *Análisis Estructural De Pavimentación* (Pág. 68). Néstor Madrid Medina.

Miranda, R. (2010). *Deterioros En Pavimentos Flexibles Y Rígidos* [tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile]. Archivo digital.
<http://Cybertesis.Uach.Cl/Tesis/Uach/2010/Bmfcim672d/Doc/Bmfcim672d.Pdf>

Norma del Laboratorio del Transporte. (1988). *NLT-356/88 Medida De Las Deflexiones De Un Firme Mediante El Ensayo Con Viga Benkelman*.
<http://normativa.itafec.com/ensayos/ES.12.02.165.LT.pdf>

Orozco, J. M., Téllez, R., Solorio, R., Pérez, A., Sánchez, M., & Torras, S. (2004). Sistema De Evaluación De Pavimentos Versión 2.0. Querétaro, México.
<https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt245.pdf>

Pérez, K. (2023). *Análisis De Las Correlaciones Entre El Cbr, Dcp, Propiedades Índice Y Mecánicas En Suelos De La Parroquia Ignacio Flores Del Cantón Latacunga, Provincia De Cotopaxi*. [tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]
Repositorio institucional UTA.

<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/38075/1/Tesis%20I.C.%201752%20-%20P%20c3%a9rez%20Villacres%20Katherine%20Lissette.pdf>

Ramos, C. (2016, 16 de agosto). *Métodos y técnicas de investigación*.

https://gestiopolis.com/metodos-y-tecnicas-de-investigacion/#google_vignette

Saucedo, A. (2010). Procedimiento Constructivo Del Pavimento De Concreto Permeable.

<http://132.248.52.100:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/529/A8.pdf?sequence=8&isAllowed=y>

Smith, G. (2017). *Evaluación de calzadas en pavimentos flexibles, Cálculos De Viga*

Benkelman. https://Issuu.Com/D.Smithgonzaga/Docs/Calculos_De_Viga_Benkelman