

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

PROPUESTA CONCEPTUAL DE DISEÑO DE UNA PISTA DE PRUEBAS DE SECCIONES ESTRUCTURALES DE PAVIMENTOS

**Para obtener el título de Maestra en Infraestructura del
Transporte en la Rama de las Vías Terrestres.**

Presenta: Ing. Adriana Valdivieso Peralta

Asesor: Doctor en Geotecnia

Carlos Chávez Negrete

Morelia, Michoacán, Diciembre de 2013

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	9
2.	MARCO TEÓRICO DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS	11
2.1	PAVIMENTOS	11
2.2	TIPOS DE PAVIMENTOS.....	11
2.3	FUNCIONES DE LAS CAPAS.....	11
2.4	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS CAPAS	12
2.4.1	MEZCLA ASFÁLTICA	12
2.4.2	CAPAS GRANULARES.....	12
2.4.3	SUBRASANTE	12
2.5	MATERIALES QUE CONFORMAN EL PAVIMENTO	13
2.5.1	CAPA DE BASE	13
2.5.2	CAPA DE SUBBASE.....	13
2.5.3	CAPA SUBRASANTE.....	13
2.6	DESEMPEÑO DEL PAVIMENTO.....	14
2.6.1	AGRIETAMIENTO POR FATIGA	14
2.6.2	AHUELLAMIENTO	15
2.7	PRINCIPIO DE LAS METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES..	16
2.7.1	MÉTODO EMPÍRICO	16
2.7.2	MÉTODO EMPÍRICO – MECANICISTA (E-M)	16
2.7.3	MÉTODO MECANICISTA	20
2.8	CONCLUSIÓN	20
3.	PISTAS DE PRUEBA PARA PAVIMENTOS	21
3.1	PISTAS DE PRUEBA A GRAN ESCALA.....	21
3.1.1	PISTA DE PRUEBA AASHTO	24
3.2	PISTAS BAJO CONDICIONES ACELERADAS Y CONTROLADAS DE CARGA	33
3.2.1	ESTRUCTURAS DE PISTAS DE PRUEBA PARA APT LINEAL.....	50
3.2.2	PISTA DE PRUEBA DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM	59
3.2.3	INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE.....	66
3.3	CONCLUSIÓN	67
4.	INSTRUMENTACIÓN	69
4.1	MINNESOTA ROAD (MnRoad)	72
4.2	NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY (NCAT)	78
4.2.1	DEFORMACIÓN EN ASFALTOS.....	80

4.2.2	ESFUERZO VERTICAL.....	81
4.2.3	HUMEDAD	81
4.2.4	TEMPERATURA	82
4.2.5	ESQUEMA DE UBICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS	82
4.3	ANÁLISIS SEMIAUTOMÁTICO DEL AGRIETAMIENTO PARA EL HVS	83
4.4	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA HVS	84
4.5	CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO	84
4.6	INSTRUMENTACIÓN DRTM.....	85
4.7	CONCLUSIÓN	86
5.	SELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS PARA EL DISEÑO DE LA PISTA DE PRUEBA	87
5.1	CONDICIONES DE TRÁFICO	87
5.1.1	CARGA.....	87
5.1.2	LLANTAS	89
5.1.3	PRESIÓN DE INFLADO	90
5.1.4	SISTEMA DE SUSPENSIÓN	91
5.1.5	VELOCIDAD	91
5.1.6	TEMPERATURA AMBIENTE	92
5.1.7	DESPLAZAMIENTO LATERAL	92
5.2	CONFIGURACIÓN DEL PAVIMENTO.....	93
5.2.1	LONGITUD DE PISTA EFECTIVA	94
5.2.2	ZONA DE ACELERACIÓN/DESACELERACIÓN	95
5.2.3	ZONA DE TRANSICIÓN	95
5.2.4	CONFIGURACIÓN DE LA ZANJA	95
5.3	ESTRUCTURA DE LA PISTA	97
5.3.1	MOVILIDAD.....	97
5.3.2	APLICACIÓN DE LA CARGA.....	98
5.4	CONCLUSIÓN	98
6.	PROPUESTA CONCEPTUAL DE DISEÑO DE UNA PISTA DE PRUEBA.....	100
6.1	CONDICIONES DE TRÁFICO	100
6.2	CONFIGURACIÓN DEL PAVIMENTO.....	100
6.3	ESTRUCTURA DE LA PISTA	103
6.4	INSTRUMENTACIÓN.....	106
6.4.1	SENSORES DE RESPUESTA DINÁMICA	106
6.4.2	SENSORES DE RESPUESTA DE CONDICIONES AMBIENTALES	107
6.4.3	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	108

6.4.4	SENSORES EN LA PISTA DE PRUEBA PROPUESTA	109
7.	CONCLUSIONES GENERALES.....	112
8.	BIBLIOGRAFÍA	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 -	Ejemplo de agrietamiento por fatiga en carretera (Romero & Myers, 2006).	14
Figura 2 -	Propagación de fisura de forma ascendente.	14
Figura 3 -	Ejemplo de ahuellamiento (WAPA, 2010).	15
Figura 4 -	Procedimiento de diseño por el Método Empírico-Mecanicista (Cordo & Bustos, 2002). ...	17
Figura 5 –	Modelado de Pavimento Flexible.	18
Figura 6 -	Circuito AASHO Road Test (TRB, 2007).	25
Figura 7 -	Características de las secciones de prueba (Corredor M, s.f.).....	26
Figura 8 -	Carga en Kips de los ejes de los vehículos en AASHO Road Test	27
Figura 9 –	Flujo de diseño M-E para pavimentos flexibles (Schwartz & Carvalho, 2007).....	33
Figura 10 –	Instalación de Pista de Prueba de pavimentos de Nottingham (NTEC).	34
Figura 11 –	HVS desarrollado por CSIR ((CSIR).	35
Figura 12 -	Estructura de la pista de prueba de ARRB	36
Figura 13 –	Instalaciones de CEDEX (Tierra y Tecnología, 2013).....	37
Figura 14 –	Pista de Prueba de Canterbury (NZ TRANSPORT AGENCY WAKA KOTAHI, 2009)..	37
Figura 15 –	Pista de Prueba de Dinamarca (APT FACILITIES IN EUROPE).....	38
Figura 16 –	Pista de Prueba de Dinamarca (Zhang & Macdonald, 2002).	39
Figura 17 –	Configuración de llanta dual (Zhang & Macdonald, 2002).....	39
Figura 18 –	Pista de Prueba de EPFL (APT FACILITIES IN EUROPE)	40
Figura 19 –	Pista de Prueba de LCPC (APT FACILITIES IN EUROPE)	40
Figura 20 –	Pista de Prueba de LINTRACK (APT FACILITIES IN EUROPE)	41
Figura 21 –	Pista de Prueba de S-KSD (APT FACILITIES IN EUROPE).....	42
Figura 22 –	Pista de Prueba de INDOT/PURDUE	43
Figura 23 –	Pista de Prueba de TxMLS	43
Figura 24 –	Estructura de la Pista Lineal de OHIO APLF.....	44
Figura 25 -	Estructura de la Pista Lineal de K-ATL (NCHRP, 2004).....	45

Figura 26 - Estructura de la Pista Lineal de NAPTF (NCHRP, 2004).	47
Figura 27 - Estructura de la Pista Lineal de ATLaS.	47
Figura 28 - Estructura de la Pista de Prueba CEFET-SP APT.....	48
Figura 29 - Características de la Pista de Prueba CEFET-SP APT	48
Figura 30 - Ubicación de pistas de prueba en USA (Universidad de los Andes, 2009).	49
Figura 31 - Ubicación de pistas de Prueba de carga acelerada “APT Facilities in Europe” (TRB Committee).....	49
Figura 32 - Espacio de Aplicación de Pistas de Prueba de Pavimentos (NCHRP, 2004).	50
Figura 33 - Estructura de la Pista Lineal de CRREL-HVS (NCHRP, 2004).....	52
Figura 34 – HVS-Nordic en el sitio de prueba.....	54
Figura 35 - Geometría de la zanja donde se construyó las secciones del pavimento (Korkiala-Tanttu & Dawson, 2007).	55
Figura 36 – Longitud de las secciones (Korkiala-Tanttu & Dawson, 2007).	55
Figura 37 – HVS utilizado en FLORIDA DOT.....	56
Figura 38 – Pistas de pavimento donde se realizarán la prueba.....	56
Figura 39 – Zanjas para sección de pavimento.	56
Figura 40 – Configuración de la llanta.....	57
Figura 41 – Pista de pavimento.....	57
Figura 42 – HVS LANAMME UCR.	58
Figura 43 – Instalaciones de ubicación del HVS en LANAMME UCR.	58
Figura 44 - Pista circular, Instituto de Ingeniería UNAM.	59
Figura 45 - Elementos que conforman la Pista Circular (Corro Caballero & Prado Ollervides, 1974).	59
Figura 46 – Elementos que conforman la Pista circular UNAM.	60
Figura 47 - Elementos que conforman la Pista circular UNAM.....	60
Figura 48 - Elementos que conforman la Pista circular UNAM.....	61
Figura 49 - Programa experimental (1971-1972) realizado en la pista circular (Corro Caballero & Prado Ollervides, 1974).....	62
Figura 50 - Resultado experimentales de la pista circular (Corro Caballero & Prado Ollervides, 1974).	64
Figura 51 – Instalaciones de MnRoad (MnDOT, 2000-2012).....	73
Figura 52 – Configuración de tractocamión-semiremolque.	73
Figura 53 – Sensor de respuesta ante carga dinámica (MnDOT, 2000-2012).....	74

Figura 54 – Sensor de presión dinámica (MnDOT, 2000-2012)	75
Figura 55 – Sensor de presión dinámica (MnDOT, 2000-2012)	75
Figura 56 – Sensor para medir el nivel freático (MnDOT, 2000-2012).	76
Figura 57 – Sensor de presión estática (MnDOT, 2000-2012).	76
Figura 58 – Mecanismo para obtener la cantidad de agua drenada (MnDOT, 2000-2012)	76
Figura 59 – Termopar (MnDOT, 2000-2012).....	77
Figura 60 – Time Domain Reflectometer (MnDOT, 2000-2012)	77
Figura 61 - Pista de prueba de NCAT ubicado en Auburn, Alabama, EUA (HOT-MIX MAGAZINE, 2013).	79
Figura 62 - Mapa de las Instalaciones de NCAT (Baja SAE Auburn, 2012).	79
Figura 63 – Configuración del camión utilizado en NCAT.....	79
Figura 64 – Configuraciones de los pavimentos, imagen obtenida de (Timm, Priest, & McEwen, 2004).	80
Figura 65 - Dispositivo para medir la deformación de la carpeta asfáltica manufacturado por Construction Technologies Laboratories (CTL) (Timm, Priest, & McEwen, 2004).....	81
Figura 66 - Earth Cell Pressure marca Geokon (Timm, Priest, & McEwen, 2004).	81
Figura 67 - TDR (Time Domain Reflectometry) (Timm, Priest, & McEwen, 2004).....	82
Figura 68 – Termistor (Timm, Priest, & McEwen, 2004).	82
Figura 69 - Ubicación de Sensores	83
Figura 70 – Cámara Inteligente (Jones, 2012)	83
Figura 71 – Diagrama del nuevo sistema DAQ (Jones, 2012).....	84
Figura 72 - Ubicación de Sensores (Melhem, Sheffield, Kansas State University, & Manhattan, Kansas, 2000)	85
Figura 73 – Ubicación de los Sensores en corte Long. de la Pista DRTM de 9.0m de long. (Zhang & Macdonald, 2002)	85
Figura 74 – Ubicación de los Sensores en corte Long. de la Pista DRTM de 9.0m de long. (Zhang & Macdonald, 2002)	86
Figura 75 - Camión C2 con eje trasero simple de 4 llantas.	88
Figura 76 – Llanta Dual.	89
Figura 77 – Elementos que conforman una pista lineal para prueba de pavimentos.	93
Figura 78 – Zanja de geometría transversal trapezoidal utilizada en CAPTIF Nueva Zelanda.....	96
Figura 79 – Geometría de la zanja utilizada en la pista lineal FLORIDA DOT.....	96

Figura 80 – Sistema de Tráfico de OHIO APLF.	97
Figura 81 – Perfiles a lo largo de la Estructura de OHIO APLF.	97
Figura 82 – Sistema a base de polea y malacate.	98
Figura 83 – Actuadores que ejercen presión sobre las llantas.	98
Figura 84 – Planta de Pista de Prueba Acelerada, sin escala/cotas (m).	101
Figura 85 – Planta de Pista de Prueba Acelerada, sin escala/cotas (m).	101
Figura 86 – Corte Longitudinal de la Pista de Prueba Acelerada, sin escala/cotas (m).....	101
Figura 87 – Corte Longitudinal de la Pista de Prueba Acelerada, sin escala/cotas (m).....	102
Figura 88 – Corte Transversal de la Pista de Prueba Acelerada, sin escala/cotas (m).....	102
Figura 89 – Estructura de la Propuesta de la pista de prueba.	103
Figura 90 – Sistema de tráfico.	104
Figura 91 – Soporte en extremo izquierdo de la Pista de Prueba.	104
Figura 92 – Soporte en extremo derecho de la Pista de Prueba.	105
Figura 93 – Esquema general de la ubicación de la Pista conceptual dentro de las instalaciones de un Laboratorio.....	105
Figura 94 – Sensor de deformación del asfalto ASG (CTL GROUP).....	106
Figura 95 – Sensor para medir la presión dinámica (GEOKON)	107
Figura 96 – Sensor para la medir la presión de poro dinámica (GEOKON)	107
Figura 97 – Termopar (CAMPBELL SCIENTIFIC).....	108
Figura 98 – Medidor de Humedad en Suelos (CAMPBELL SCIENTIFIC).....	108
Figura 99 – Proceso de obtención de datos.....	109
Figura 100 – Proceso de obtención de datos.....	109
Figura 101 – Acceso a zona de Instrumentación	110
Figura 102 – Descripción de orificios.....	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Modelos de deterioro por fatiga de algunas instituciones.....	19
Tabla 2 – Modelos de deterioro por deformación permanente de algunas instituciones.....	19
Tabla 3 - Cronología sobre la evolución del diseño de pavimentos (Sánchez Sabogal, s.f.).....	21
Tabla 4 - Cronología investigaciones recientes (Sánchez Sabogal, s.f.).....	23
Tabla 5 - Cronología del experimento AASHO.....	24
Tabla 6 - Mediciones que se realizaron en cada Circuito.	25
Tabla 7 - Materiales y espesores utilizados en las secciones de pavimentos de las Pruebas AASHO. ...	26
Tabla 8 – Planilla de Evaluación.....	28
Tabla 9 – Recomendaciones del Factor Regional R (Schwartz & Carvalho, 2007).....	30
Tabla 10 – Rango del coeficiente de la capa estructural (Schwartz & Carvalho, 2007).	30
Tabla 11 – Especificaciones de la Pista de Nottingham (NTEC)	34
Tabla 12 - Especificaciones de HVS ((NCHRP, 1996).	35
Tabla 13 - Especificaciones de la ALF (NCHRP, 1996).....	36
Tabla 14 - Especificaciones de CAPTIF (NCHRP, 1996).....	38
Tabla 15 - Especificaciones de la DRTM (NCHRP, 1996).....	39
Tabla 16 - Especificaciones de EPLF (NCHRP, 1996).	40
Tabla 17 - Especificaciones de la LCPC (NCHRP, 1996).....	41
Tabla 18 - Especificaciones de LINTRACK (NCHRP, 1996).	41
Tabla 19 - Especificaciones de S-KSD (NCHRP, 1996).....	42
Tabla 20 - Especificaciones de INDOT/PURDUE (NCHRP, 1996).....	43
Tabla 21 - Especificaciones de TxMLS (NCHRP, 1996).....	44
Tabla 22 - Características de la Pista de Prueba de OHIO APLF.....	44
Tabla 23 - Características de la Pista de Prueba de K-ATL HVS.....	46
Tabla 24 - Características de la Pista de Prueba NAPTF (NCHRP, 2004).....	47
Tabla 25 - Características de la Pista de Prueba ATLaS (NCHRP, 2004).....	48
Tabla 26 - Características de algunas pistas de prueba (NCHRP, 1996)	51
Tabla 27 - Características de la Pista de Prueba de CRREL-HVS.	53
Tabla 28 - Características de la Pista de Prueba de HVS-Nordic.	54
Tabla 29 – Condiciones de tráfico de FLORIDA DOT.....	57
Tabla 30 - Espesores ensayados (Corro Caballero & Prado Ollervides, 1974).	62
Tabla 31 - Materiales empleados para las pruebas (Corro Caballero & Prado Ollervides, 1974).....	63

Tabla 32 – Grado de compactación (Corro Caballero & Prado Ollervides, 1974).....	63
Tabla 33 – Configuración de pavimento de algunas pistas lineales.	68
Tabla 34 – Condiciones de tráfico de algunas pista lineales.....	68
Tabla 35 - Instituciones que proporcionaron la información de su investigación.	70
Tabla 36 - Respuestas medidas en los pavimentos.	71
Tabla 37 - Instrumentación utilizada para medir la deformación en el asfalto ASG.....	71
Tabla 38 - Instrumentación utilizada para medir la Presión Vertical en las capas granulares.....	72
Tabla 39 - Instrumentación utilizada para medir la temperatura.	72
Tabla 40 - Características de la pista de NCAT.....	78
Tabla 41 - Pesos máximos (Ton) autorizados por tipo de eje y camino. NOM-012-SCT-2-2008.	87
Tabla 42 – Rango de cargas de algunas Pistas Lineales (NCHRP, 1996).	88
Tabla 43 - Rango de Cargas de algunas Pistas Lineales (NCHRP, 2004).	89
Tabla 44 - Configuración de algunas Pistas Lineales (NCHRP, 1996).	90
Tabla 45 – Presión de Inflado de algunas Pistas Lineales (NCHRP, 1996).	90
Tabla 46 – Suspensión de llantas de algunas Pistas Lineales (NCHRP, 1996).	91
Tabla 47 – Rango de Velocidades de algunas Pistas Lineales (NCHRP, 1996).....	92
Tabla 48 - Rango de Velocidades de algunas Pistas Lineales (NCHRP, 2004).	92
Tabla 49 – Desplazamiento Lateral.	93
Tabla 50 – Configuración de pista de prueba de algunos modelos (NCHRP, 1996).....	94
Tabla 51 - Configuración de pistas de prueba de algunos modelos (NCHRP, 2004).....	95
Tabla 52 - Condiciones de tráfico de la Propuesta de la Pista de Prueba.	100

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo abarca la reseña histórica de la evolución de las Pistas de Prueba de Pavimentos en donde se ha llevado la mayor parte de la contribución a los métodos de diseño de Pavimentos, así como la propuesta de una Pista Lineal para validar modelos de deterioro que serán utilizados en programas de diseño. Hasta hace algunas décadas los Métodos de Diseño de pavimentos flexibles estaban basados en Métodos Empíricos cuya base de investigación es la observación, en este tipo de investigaciones se limitó el estudio a las condiciones climáticas de una región en específico las cuales no han sido fácilmente extrapolables hacia otras regiones, además de esto, el tráfico al que estuvieron sometidas las secciones estructurales fue de hasta un millón de repeticiones. Sin embargo, las condiciones actuales han sufrido muchos cambios, un ejemplo de ello, es el calentamiento global que implica el cambio de clima en todo el mundo, de igual manera los acontecimientos sociales como la segunda guerra mundial dieron comienzo al incremento del tráfico de vehículos pesados como los tanques de la armada de guerra, otro factor muy importante ha sido la logística en el transporte, actualmente se están moviendo por el mundo grandes cantidades de carga por lo que el sistema ferroviario no ha sido suficiente para transportarla de un lugar a otro, es por ello que el sistema carretero ha tenido que tomar gran parte de esa responsabilidad, por esa razón la industria automovilística ha creado nuevos modelos de vehículos para carga pesada que cumplan con las condiciones requeridas, lo que genera que estos vehículos estén circulando por la red carretera acelerando el daño.

Debido a las razones planteadas anteriormente surge la necesidad de obtener nuevos métodos de diseño que cumplan con las condiciones actuales tanto climáticas como de carga a las que están siendo sometidas las estructuras de los pavimentos, la ventaja con la que se cuenta, es que la tecnología ha tenido un gran avance y la instrumentación de las secciones estructurales ha tomado mucha relevancia en la investigación, es por ello que surgen los Métodos Empírico-Mecanicistas con una tendencia a generar Métodos puramente Mecanicistas. Para los métodos Empírico-Mecanicistas, los Modelos de deterioro son de suma importancia porque se le considera el vínculo entre la parte mecanicista y la parte empírica, por este medio el daño que produce el tránsito vehicular en el pavimento puede ser representado mediante ecuaciones con las que se obtiene el número de repeticiones que soportará el pavimento antes de la falla. Los Modelos de deterioro más importantes para el diseño de pavimentos incluyen el análisis de la Deformación Permanente y la Fatiga de la carpeta asfáltica, los cuales pueden obtenerse con pruebas de laboratorio, sin embargo, es necesario que sean calibrados con mediciones de desempeño en secciones estructurales de pavimentos ubicadas en instalaciones que cuenten con Pistas de Prueba a escala real o Pistas de Prueba aceleradas, donde se observará la relación entre la respuesta del pavimento antes de las solicitaciones y el comportamiento del pavimento reflejado en los mecanismos de deterioro, de esta manera se validarán los modelos de deterioro.

Las Pistas de Prueba Acelerada (APT) son dispositivos que simulan el tráfico en estructuras de pavimento donde se busca acelerar el daño, las maneras de acelerar el daño pueden ser: modificar la velocidad de la aplicación de la carga, aumentar la magnitud de la carga, cambiar los espesores de las capas del pavimento o inducir condiciones ambientales adversas. Las pistas APT son de interés porque en este tipo de dispositivos se pueden realizar estudios del comportamiento de los pavimentos ante el aumento futuro de tráfico, de tal manera que es posible realizar investigaciones que durarían cerca de dos años en tan solo 6 meses o menos. En el mundo ha habido un gran interés en investigación sobre este tipo de dispositivos, algunos ya han sido patentados y puestos a la venta con un costo muy elevado por lo que muchas instituciones han optado por crear su propia tecnología. Cada dispositivo tiene características particulares en cuanto a rangos de aplicación de carga, rango de velocidades, tipo de suspensión, entre otros. Una vez que se busca acelerar el daño en las pistas de prueba, es necesario instrumentar las secciones estructurales para registrar las respuestas generadas. Para instrumentar las secciones adecuadamente algunas instituciones han realizado investigaciones exhaustivas con lo que han logrado obtener la experiencia sobre los sensores típicos para medir los parámetros más importantes relacionados a los mecanismos de deterioro, dichos sensores han sido divididos en dos categorías, una de ellas para la medición de las respuestas dinámicas generadas por el tráfico y la segunda serán los sensores de medición de las condiciones ambientales.

El Instituto de Ingeniería de la UNAM presentó en 1999 el DISPAV-5 que se utiliza para el Diseño de Pavimentos, éste método tiene como antecedente una investigación realizada por el año 1962 a 1973 en donde se hace una generalización teórica de los datos obtenidos en la Pista Circular con la que cuenta dicha Institución y algunos tramos experimentales. Las gráficas obtenidas en los resultados consideran que el Valor Relativo de Soporte es un buen indicador de capacidad de carga de las capas, sin embargo, las prácticas actuales consideran que la propiedad fundamental para caracterizar los materiales granulares es el Módulo de Resiliencia. Las pruebas realizadas en la Pista Circular de la UNAM no cuenta con cámaras climáticas así que utilizaron tramos de prueba para considerar los cambios climáticos, sin embargo, para aquella época no había mucho avance en cuanto a tecnología, por lo que éstas no fueron instrumentadas debidamente para obtener las respuestas ante condiciones climáticas y ante cargas por tráfico, es por ello, que es necesario aprovechar toda la tecnología que existe actualmente para hacer una verificación de los resultados obtenidos en aquella época y de esa manera mejorar el método de diseño que existe actualmente en nuestro país.

Toda la información recabada en este trabajo nos lleva a proponer el diseño conceptual de una Pista de Prueba Acelerada que estará ubicada en el Estado de Michoacán, específicamente en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, con lo que se busca que sea utilizada en un futuro para realizar una investigación sobre el impacto de las condiciones ambientales de este Estado en la Red Carretera, así como las condiciones de tráfico con la que actualmente opera la red.

2. MARCO TEÓRICO DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS

El hombre ha tenido la necesidad de movilizarse de un lado a otro y los medios de transporte han tenido que evolucionar a lo largo del tiempo conforme a las necesidades requeridas, con ello la estructura destinada a soportarlos también ha sufrido cambios. En este trabajo nos enfocaremos en la estructura destinada a soportar medios de transporte terrestres, como lo son los pavimentos. Aunque los pavimentos pueden ser rígidos o flexibles, delimitaremos este trabajo a los pavimentos flexibles.

2.1 PAVIMENTOS

Los pavimentos se conforman de varias capas (subbase, base y carpeta asfáltica), las cuales están apoyadas sobre una capa llamada subrasante que no forma parte del pavimento, pero sí de la sección estructural. La finalidad de éstas capas es disipar gradualmente el esfuerzo generado por el paso de los vehículos que transitan por dicha carretera, proporcionar una superficie de rodamiento segura y cómoda y constituir una estructura que sea capaz de resistir los efectos climatológicos del lugar.

2.2 TIPOS DE PAVIMENTOS

Los tipos de pavimentos que se utilizan comúnmente en México son los siguientes:

- Pavimentos flexibles; Su capa de rodadura es de mezcla asfáltica
- Pavimentos rígidos; Su capa de rodadura es de concreto hidráulico
- Mixtos o compuestos; Está conformado por una capa de concreto hidráulico cubierta por una capa de mezcla asfáltica.

2.3 FUNCIONES DE LAS CAPAS

Como se dijo anteriormente el pavimento tiene la finalidad de disipar esfuerzos y proporcionar una superficie de rodadura segura, sin embargo, para cumplir dicha finalidad, los pavimentos deben cumplir con ciertas características estructurales y funcionales.

Características funcionales

- Resistencia al derrapamiento, asociada a la textura de la superficie de rodadura.
- Regularidad transversal y longitudinal, asociada a las deformaciones.
- Drenaje superficial rápido para evitar el efecto de acuaplaneo.

Características estructurales

- Relacionada a las características mecánicas de los materiales, las características mecánicas definen el espesor de cada capa.

2.4 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS CAPAS

2.4.1 MEZCLA ASFÁLTICA

Se considera que son dos las propiedades fundamentales de las mezclas asfálticas, el Módulo de Elasticidad Dinámico y la Resistencia de la mezcla a la fatiga. El Módulo Dinámico mide específicamente, el tiempo que dura la deformación que se produce después de aplicar carga. El Módulo Dinámico aumenta con la frecuencia de la carga y la disminución de la temperatura. Se obtiene de pruebas de laboratorio (Prueba de rigidez axial resiliente, prueba de rigidez diametral resiliente, prueba de rigidez dinámica a flexión o prueba de rigidez dinámica cortante) los cuales son muy costosos, por lo tanto se recurre a fórmulas para su obtención como la Fórmula de Shell, la del Instituto del Asfalto, Heukelom y Klomp, Witczack entre otros, en donde las variables más sobresalientes son el tiempo de aplicación de la carga, temperatura de la mezcla, Módulo Dinámico del asfalto, porcentaje de agregados pétreos y porcentaje de vacíos.

La Resistencia a la fatiga se obtiene de igual manera de pruebas de laboratorio en donde vigas de concreto asfáltico son sometidas a flexión, de la prueba se obtiene la deformación a tensión de la parte inferior de la viga, esta respuesta se relaciona directamente con el número de aplicación de cargas. De esta prueba se obtiene las “Leyes de Fatiga” o modelos de deterioro por fatiga.

2.4.2 CAPAS GRANULARES

Para caracterizar la capa granular se requiere conocer el Módulo Resiliente y la Relación de Poisson. El Módulo resiliente se obtiene de la Prueba Triaxial Cíclica en donde los factores que afectan su valor son el tipo de material, tamaño del espécimen, tipo de compactación, peso específico, granulometría, magnitud del esfuerzo aplicado y contenido de humedad. Este parámetro es utilizado en varias metodologías de diseño de pavimentos por lo cual es necesario tener cuidado al momento de elegir su valor ya que un mismo suelo tendrá infinidad de valores de acuerdo a la variación de las condiciones de prueba.

2.4.3 SUBRASANTE

Para la capa subrasante es necesario conocer de igual manera el Módulo Resiliente y la Relación de Poisson.

2.5 MATERIALES QUE CONFORMAN EL PAVIMENTO

El pavimento está constituido por varias capas que proporcionan la Resistencia Estructural, dichas capas son de espesores variables. Ésta variación está definida en muchos métodos de diseño en función principalmente del Valor Relativo de Soporte y la cantidad acumulada de Ejes Sencillos Equivalentes de 8.2 ton a considerar.

2.5.1 CAPA DE BASE

La capa de base puede ser de dos tipos, bases hidráulicas o bases tratadas. Las bases hidráulicas de acuerdo a la norma N·CMT·4·02·002/11 son materiales granulares que se colocan sobre la subbase o la subrasante para formar la capa de apoyo de la carpeta asfáltica, de una capa de rodadura asfáltica o para una carpeta de concreto hidráulico. Las bases tratadas según la norma N·CMT·4·02·003/11 son materiales granulares que no cumplen con alguno de los requisitos de calidad establecidos en la norma N·CMT·4·02·002/11 o que, por razones estructurales, requieren la incorporación de un producto que modifica alguna de sus características físicas, generalmente haciéndolos más rígidos y resistentes y mejorando su comportamiento mecánico e hidráulico.

2.5.2 CAPA DE SUBBASE

Según la norma N·CMT·4·02·001/11 los materiales para subbase son materiales granulares, que se colocan normalmente sobre la subrasante, para formar la capa de apoyo para la base de pavimentos asfálticos. Esta capa puede no ser necesaria cuando la capa subrasante es de elevada capacidad de soporte. Su función es únicamente como cimientado de la capa de base y constituir una adecuada plataforma de trabajo.

2.5.3 CAPA SUBRASANTE

De acuerdo a la norma N·CMT·1·03/02 son suelos naturales cribados o seleccionados, producto de cortes o de la extracción de bancos que se utilizan para formar dicha capa inmediatamente encima de la cama de los cortes, de la capa subyacente o del cuerpo de un terraplén cuando ésta última no se construya y finalmente servir de desplante a un pavimento. Su función es la de recibir y soportar las cargas transmitidas por el pavimentos y distribuirlas de modo adecuado al cuerpo del terraplén. Evita que los materiales finos plásticos del terraplén contaminen el pavimento. Esta capa es considerada como la cimentación del pavimento.

Una vez que se ha construido el pavimento está sometido a muchos factores tanto climáticos como propios del uso, lo que conlleva a favorecer su deterioro a lo largo del tiempo de vida de la estructura, por lo tanto, el desempeño del pavimento está en función del deterioro del mismo. Desde hace varias décadas se han realizado estudios y experimentos para conocer los diferentes tipos de deterioro, las causas que lo originan y la manera de contrarrestarlos.

2.6 DESEMPEÑO DEL PAVIMENTO

Conocer el deterioro del pavimento es muy importante en el diseño, existen muchos factores de deterioro los cuales se dividen en superficial o estructural. Dentro del deterioro superficial entran los desprendimientos, alisamientos y exposición de agregados, en el estructural encontramos las deformaciones y agrietamientos. Se describe a continuación dos de los más importantes de acuerdo a Miller & Bellinger, (2003) el agrietamiento por fatiga y ahuellamiento.

2.6.1 AGRIETAMIENTO POR FATIGA

Ocurre en áreas sujetas a cargas por tráfico repetido, regularmente en el camino de rodadura de los vehículos. Puede ser una consecuencia de grietas interconectadas en las primeras etapas de desarrollo y usualmente son menores a 0.3m, también se le conoce como Piel de Cocodrilo. La Figura 1 muestra la imagen de una carretera con fisuras debidas a fatiga. La propagación de estas grietas es de forma ascendente como lo muestra la Figura 2. Se le considera además el mayor deterioro de la estructura.



Figura 1 - Ejemplo de agrietamiento por fatiga en carretera (Romero & Myers, 2006).

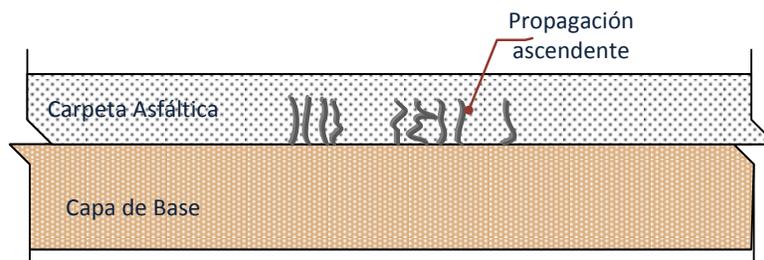


Figura 2 - Propagación de fisura de forma ascendente.

2.6.2 AHUELLAMIENTO

Es una depresión longitudinal en el camino de rodadura como lo muestra la Figura 3 y es asociado al desplazamiento transversal. Es causado por consolidación o movimiento lateral de los materiales debido a las cargas del tráfico. Algunas causas específicas pueden ser:

- Compactación insuficiente del Concreto Asfáltico en caliente durante la construcción.
- En la capa subrasante puede ser causada por una inadecuada estructura del pavimento (espesor o material).
- Un diseño inapropiado de la Mezcla Asfáltica al haberle añadido un mayor contenido de cemento asfáltico, exceso de filler o insuficiencia de adherencia entre los agregados que la componen.



Figura 3 - Ejemplo de ahuellamiento (WAPA, 2010).

2.7 PRINCIPIO DE LAS METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.

El artículo de Rondón & Reyes (2007) presenta los tipos de metodología para el diseño de pavimentos flexibles en el mundo. De acuerdo a esta publicación definiremos la diferencia que existe entre el Método Empírico, Método Empírico-Mecanicista y Método Mecanicista.

2.7.1 MÉTODO EMPÍRICO

El método empírico correlaciona el comportamiento de los pavimentos in situ a través de observaciones y mediciones de campo con factores que causan los mecanismos de deterioro de las estructuras. Los factores que consideran son los siguientes;

- Espesores de las capas.
- Calidad de los materiales (Valor Relativo de Soporte VRS)
- Clima (Precipitación y temperatura).
- Tránsito Vehicular (a través de ejes equivalentes o espectros de carga).
- Terreno de cimentación (subrasante).
- Deficiencia durante la construcción.

Los mecanismos que se intentan controlar en esta metodología son la deformación permanente y la fatiga. Actualmente se supone que la deformación permanente es la suma de las deformaciones de cada capa que conforma el pavimento. Sin embargo, el método empírico supone que ésta deformación solo se genera en el suelo de cimentación (subrasante), por ser la capa de menor rigidez y con la probabilidad de contener alto grado de humedad. Adicional a esto, la metodología de diseño no puede ser fácilmente adaptable a otras condiciones distintas al entorno para las que fueron estudiadas, por ejemplo, el incremento en las cargas vehiculares o la tendencia a los nuevos diseños automotrices.

2.7.2 MÉTODO EMPÍRICO – MECANICISTA (E-M)

Relaciona el Método empírico con el Método Mecanicista. Mecanísticamente se determinan esfuerzos, deformaciones o deflexiones asociadas a cargas por tránsito y condiciones ambientales. Los resultados se consideran como la respuesta de la estructura del pavimento. Esta respuesta se puede obtener mediante modelos matemáticos los cuales ya se implementaron en programas como el KENLAYER de la Universidad de Kentucky. Empíricamente relaciona la respuesta generada con indicadores de deterioro típicos, por ejemplo, el ahuellamiento, las fisuras y el IRI (Índice de Rugosidad Internacional).

La Figura 4 muestra el procedimiento de Diseño E-M, observamos que con los datos de entrada generamos una sección de pavimento, de esta sección inicial obtenemos las respuestas estructurales las cuales se comparan con modelos de deterioro, en seguida decidimos si la sección cumple con nuestras expectativas o se procede a modificar el diseño.

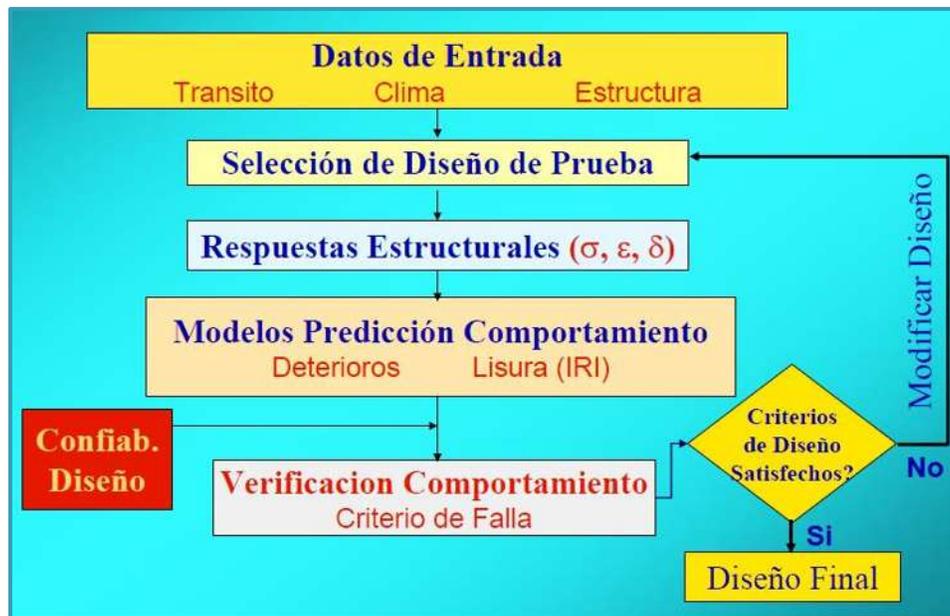


Figura 4 - Procedimiento de diseño por el Método Empírico-Mecanicista (Cordo & Bustos, 2002).

2.7.2.1 RESPUESTA ESTRUCTURAL DEL SISTEMA MULTICAPA.

El diseño, análisis y evaluación estructural de pavimentos actualmente se basa considerándolo como un sistema multicapa propuesta por Burmister en 1943, mediante gráficas que explican la distribución de esfuerzos de Boussinesq en un sistema de dos capas y que posteriormente fue extendida a n capas. Conocer la distribución de esfuerzos y las deformaciones unitarias en cada capa nos conduce a predecir el daño que sufrirá la estructura total del pavimento mediante modelos de deterioro. El procedimiento básico para analizar un pavimento supone una estructura tricapa, la capa superior será la carpeta asfáltica, la intermedia corresponde a las capas granulares y finalmente la capa subrasante, esta última se supondrá infinita en el sentido vertical y todo el sistema se considerará infinita en el sentido horizontal.

Los criterios básicos para el diseño estructural son los siguientes:

- Si la deformación horizontal por tensión ϵ_t en la parte inferior de la carpeta asfáltica es superior a la admisible se producirá agrietamiento.
- Si la deformación vertical por compresión en la subrasante ϵ_z es excesiva, se producirá una deformación permanente en dicha capa y por consiguiente en las capas superiores.

Las deformaciones ϵ_t y ϵ_z mostradas en la Figura 5 están directamente relacionadas con el número admisible de repeticiones de carga y algunos parámetros que dependen del tipo de material.

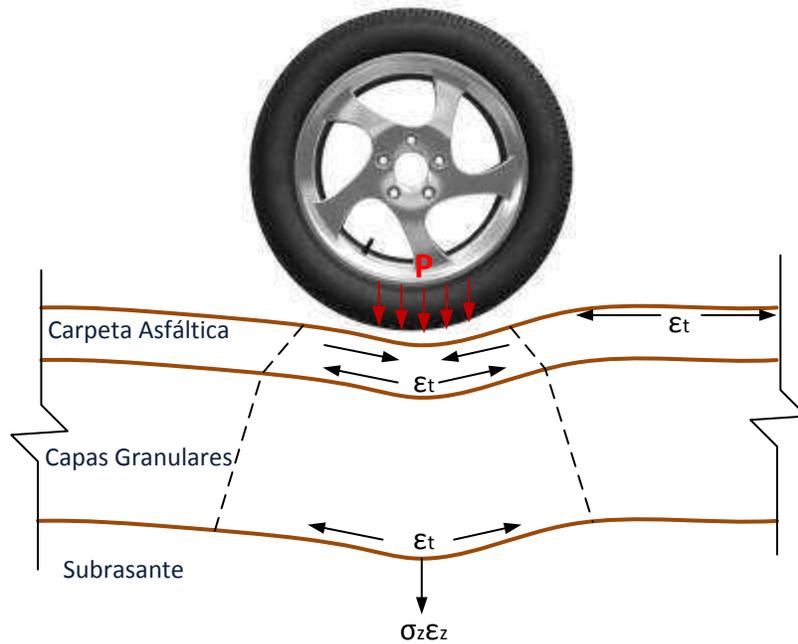


Figura 5 – Modelado de Pavimento Flexible.

2.7.2.2 MODELOS DE PREDICCIÓN DE DETERIORO.

Para las metodologías Mecanicistas y Empírico-Mecanicistas los Modelos de deterioro son de suma importancia debido a que por medio de estos se puede representar el daño que produce el tránsito vehicular hacia el pavimento con ecuaciones. Los Modelos de deterioro más importantes para el diseño de pavimentos son; Deformación Permanente y Fatiga.

Para el caso de la Fatiga, el concepto de daño acumulado propuesto por Miner en 1945, se utiliza para predecir el fracturamiento por fatiga, según este concepto, el número permisible de repeticiones de carga está relacionado con el valor de la deformación por tensión en la parte inferior de la carpeta asfáltica (Garnica Anguas & Pérez García, 2001). Una prueba de laboratorio para obtener las deformaciones es el Ensayo de Resistencia a Flexo-Tracción en la cual vigas de concreto asfáltico son sometidas a flexión y se mide la deformación ϵ_t en la parte inferior del espécimen. De esas pruebas se obtiene lo que se conoce como las leyes de fatiga, sin embargo, para que pueda considerarse una ley como tal, es necesario calibrarla con mediciones de desempeño en pavimentos a escala real, en esta etapa se ve la importancia de poseer una zona de prueba a escala real, donde se observará la relación entre la respuesta del pavimento ante sollicitaciones con el daño que genera y validar las fórmulas obtenidas en laboratorio. Una vez validadas las fórmulas se generan criterios de falla en los que se relaciona la deformación a tensión con el número de repeticiones admisibles para prevenir el agrietamiento por fatiga. La Tabla 1 muestra los Modelos de deterioro por fatiga utilizado por algunas instituciones.

Tabla 1 – Modelos de deterioro por fatiga de algunas instituciones.

Institución	Ecuación
Illinois Department of Transportation (I/DOT)	$N_f = 1.66 \times 10^{-10} \varepsilon_t^{-4.32}$ $N_f = \text{Número de repeticiones de carga para que se produzca la falla}$
Minnesota MnRoad	$N_f = 2.83 \times 10^{-6.0} \varepsilon_t^{-3.20596}$
Instituto de Ingeniería UNAM	$N_f = {}^{-0.21}\sqrt[10^{3.843}]{\varepsilon_t}$ Carreteras normales $N_f = {}^{-0.21}\sqrt[10^{3.78}]{\varepsilon_t}$ Altas especificaciones
Método SHELL	$N_f = 3.981 \times 10^{-6} x(0.856Vb + 1.8)^5 x\varepsilon_t^{-5} xE_{AC}^{-1.80}$ <p>Dónde: Vb; Volumen de Asfalto de la mezcla en % E_{AC}; Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en kPa.</p>
Asphalt Institute, EUA	$N_f = 0.414 \times 10^{4.84} \left[\left(\frac{Vb}{Vv + Vb} \right) - 0.69 \right] x\varepsilon_t^{-3.291} xE_{AC}^{-0.854}$ <p>Vb; Volumen de Asfalto de la mezcla en % Vv; Volumen de Vacíos de la mezcla en % E_{AC}; Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en kPa.</p>

En el caso de la deformación permanente se utiliza el sistema de carga Triaxial para llevar a cabo pruebas bajo carga repetida lo que simula el esfuerzo producido por vehículos en movimiento. La Tabla 2 muestra los modelos de deterioro por deformación permanente de algunas instituciones.

Tabla 2 – Modelos de deterioro por deformación permanente de algunas instituciones.

Institución	Ecuación
Instituto de Ingeniería UNAM	$N_d = 0.1761 \sqrt[10^{0.4547}]{\frac{VRS}{F_Z}}$ carreteras normales $N_d = 0.1761 \sqrt[10^{0.85}]{\frac{VRS}{F_Z}}$ Altas especificaciones

	$F_z = 1 - \frac{z^3}{(15^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}$ $N_d = \text{Número de repeticiones de carga para que se produzca la falla}$
Método SHELL	$N_d = 6.15 \times 10^{-7} x \varepsilon_z^{-4.0} \text{ confiabilidad } 50\%$ $N_d = 1.94 \times 10^{-7} x \varepsilon_z^{-4.0} \text{ confiabilidad } 85\%$ $N_d = 1.05 \times 10^{-7} x \varepsilon_z^{-4.0} \text{ confiabilidad } 100\%$
Asphalt Institute, EUA	$N_d = 1.365 \times 10^{-9} \varepsilon_z^{-4.477}$

2.7.3 MÉTODO MECANICISTA

Actualmente no hay ningún procedimiento de diseño de pavimentos exclusivamente mecanicista, sin embargo, ya se están realizando programas en elemento finito para lograr tal fin. En estos programas se consideran los estados de esfuerzos y deformaciones asumiendo que el material que forma las capas se comporta como un medio continuo y no como capas individuales.

2.8 CONCLUSIÓN

De la investigación realizada para el marco teórico se concluye que en algunas partes del mundo aún se utilizan los métodos de diseño de pavimentos cuyo fundamento ha sido obtenido del Método Empírico, el cual contempla zonas específicas que no pueden ser extrapoladas tan fácilmente. Sin embargo, es práctica usual su utilización y una de las razones es debido a que realizar una investigación de este tipo es muy costoso, a pesar de ello y gracias al avance tecnológico, algunos países han tenido la inquietud de crear nuevos métodos que contemplen fenómenos que están ocurriendo actualmente en nuestro entorno y que afectan a las redes de carreteras, por lo cual han realizado una inversión en nuevas investigaciones y así obtener nuevas metodologías para el diseño de pavimentos, esto ha permitido la transición hacia el Método Empírico-Mecanicista de diseño.

Los modelos de deterioro son muy importantes en los Métodos Empírico-Mecanicistas porque son el link para relacionar la respuesta del pavimento (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) y el comportamiento del pavimento en campo relacionado a los mecanismos de deterioro estructurales. Las ecuaciones de los modelos proporcionan el número de repeticiones de carga que es necesario para que lleguemos a la falla de la estructura. Aunque los modelos de deterioro sean obtenidos en laboratorio como se explicó anteriormente, es necesario calibrarlos para verificar su comportamiento en campo, por esa razón las pistas experimentales son muy importantes. Sin embargo, como no se cuenta con muchas pistas experimentales que estén ubicadas dentro de tramos de la red carretera, se recurre a las Pistas de Prueba a Escala Real o Pistas de Prueba Acelerada.

3. PISTAS DE PRUEBA PARA PAVIMENTOS

Las Pistas de Prueba han jugado un papel muy importante en la historia de los pavimentos, ya que por medio de ellos se ha podido observar y analizar el comportamiento de los mismos con la finalidad de obtener Métodos de Diseño. De acuerdo a la ubicación y condiciones de pruebas, estas se clasifican en Pistas de Prueba a Gran Escala y Pistas de Prueba Aceleradas. Las Pistas de Prueba a Gran Escala generalmente están siendo sometidas a condiciones normales de servicio, esto quiere decir que las condiciones de tráfico por lo general no exceden las de la normativa vigente de acuerdo a cada país. Las Pistas de Prueba Aceleradas son aquellas en las cuales se puede acelerar el daño en las estructuras de los pavimentos, esto con la finalidad de obtener el comportamiento de las estructuras a corto plazo bajo condiciones que pueden presentarse en un futuro.

3.1 PISTAS DE PRUEBA A GRAN ESCALA

Desde principios del siglo XX los departamentos de Carreteras de Estados Unidos comenzaron a construir pistas de prueba a Gran Escala, con el propósito de evaluar el efecto del clima, el material de construcción, las cargas del tránsito y el comportamiento de los pavimentos. Se tienen registros de estas pistas de las cuales se mencionan las más sobresalientes en la Tabla 3. En esta tabla se describe de igual manera la aportación de cada una de ellas comenzando con la Pista de prueba de Pittsburg hasta llegar a la guía AASHTO (American Association of State Highway Officials) de diseño de pavimentos.

Tabla 3 - Cronología sobre la evolución del diseño de pavimentos (Sánchez Sabogal, s.f.).

PISTA	AÑO	DESCRIPCIÓN
Pittsburg Road Test	1921-1922	Se construyó una pista circular donde circularon camiones del ejército, los cuales tenían neumáticos macizos para recorrer las losas con distintas configuraciones y refuerzo. Esta investigación condujo a estudios posteriores más refinados y a la inclusión de neumáticos inflables.
Bates Road Test	1922-1923	Se construyeron 78 secciones de pavimento con diferentes configuraciones para el tráfico de camiones. Se demostró la superioridad del concreto hidráulico sobre el ladrillo y el pavimento asfáltico.
Maryland Road Test	1950-1951	La finalidad fue estudiar el efecto de dos configuraciones de ejes (simple y tándem) con 2 cargas diferentes cada una, 18,000 y 22,400 libras para eje simple, para eje tándem la cargas fueron de 32,000 libras y 44,000 sobre pavimento de concreto hidráulico. Los principales hallazgos fueron; El agrietamiento aumentó con la magnitud de la carga. El bombeo se presentó

		cuando las losas estaban apoyadas sobre suelo fino, pero no sobre bases granulares. El bombeo produjo mayores deflexiones en las esquinas de las losas. El aumento de la velocidad reducía los daños en el pavimento.
Washo Road Test (The Western Association of State Highway Officials)	1953-1954	Construido en Malad, Idaho para probar el comportamiento del pavimento asfáltico. Se construyeron cuatro circuitos bajo condiciones controladas, cada una tenía una variedad de espesores de base y superficie. Las configuraciones de tráfico fueron similares a las utilizadas en Maryland Road Test.
AASHO Road Test	1951-1962	Ottawa Illinois, de este experimento surge el “AASHO Interim Guide for the Design of Rigid and Flexible Pavements”, con reediciones en 1972 y 1993. Para 1972 la AASHO ya era conocida como AASHTO.

El experimento realizado en la AASHO Road Test ha sido el experimento más importante relacionado con el diseño de pavimentos flexibles en el cual se basa la mayoría de los procedimientos de diseño que se utilizan actualmente, es por ello que lo abordaremos con más detalle en el apartado 3.2. En el experimento AASHO Road Test las condiciones de prueba estaban limitadas; incluían solo una condición ambiental, se limitó el peso en los ejes, la configuración de los ejes y la presión de los neumáticos, además de que los pavimentos fueron sometidos a un millón de repeticiones de cargas, de esta manera, se desarrollaron ecuaciones de las estadísticas de comportamiento. Sin embargo, actualmente las condiciones de prueba han cambiado, los pavimentos están siendo probados bajo más de 10 millones de repeticiones, se están considerando ampliamente las variaciones climáticas, los pesos de los ejes, las configuraciones de los ejes y las presiones de los neumáticos. De esta manera se ha desplazado el Diseño Empírico y hemos entrado al Diseño Empírico-Mecanicista.

El diseño Empírico-Mecanicista, es un procedimiento que confía en predecir la respuesta del pavimento bajo carga, es decir, determinar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones y relacionarlos empíricamente con el comportamiento en campo. El resultado es aplicable a una gama mucho más amplia de condiciones y puede adaptarse a nuevos materiales, mayores volúmenes de tráfico y otras tecnologías. De acuerdo a esta nueva metodología de investigación se han venido haciendo más pistas de pruebas a escala real, que están siendo debidamente instrumentadas gracias al enorme avance tecnológico que ha habido en 50 años de transición desde la pista de AASHO hasta la actualidad. En la Tabla 4 mencionamos las pistas más relevantes con la descripción del campo de investigación.

Tabla 4 - Cronología investigaciones recientes (Sánchez Sabogal, s.f.).

PISTA	AÑO	DESCRIPCIÓN
Westrack	1996-1998	Se construyó en Carson City Nevada en virtud de un contrato adjudicado por la Administración Federal de Carreteras (FHWA) para verificar los sistemas de diseño SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements).
Minnesota Road Research Project	Mn/DOT, 1990; Mn/DOT 2003	<p>Fue construido por el Departamento de Transporte (MnDOT) en el período 1990-1993 como una instalación a gran escala, con apertura de tráfico en 1994. Se compone de dos segmentos diferentes que corren paralelas a la I-94: uno de 5.7 kilómetros vía a la línea principal en la dirección que lleva el tráfico interestatal, y el otro de 4.0 kilómetros de circuito cerrado de bajo volumen, expuesto a tráfico controlado.</p> <p>La finalidad fue evaluar los efectos de los vehículos pesados, los cambios estacionales sobre los materiales de construcción y mejorar el diseño de pavimentos para carreteras de bajo tránsito. Se aborda con más detalle en el apartado 4.1.</p>
Virginia Smart Road	Smart Road, 2003	<p>Tiene una longitud de 2.2 millas y cuenta con 2 carriles. Terminada en 2002 cerca de Blacksburg, Virginia. Actualmente está siendo utilizado como un centro de investigación de transporte para carretera así como para la investigación de sistemas para vehículos y sistemas de transporte inteligente (ITS). El Smart Road es un proyecto conjunto del Departamento de Transporte de Virginia (VDOT), el Virginia Tech Transportation Institute (VTTI) y la Administración Federal de Carreteras (FHWA). La construcción tiene dos propósitos principales: Proporcionar una ruta directa para los automovilistas entre I-81 y Blacksburg, y ofrecer a los investigadores y desarrolladores de productos un laboratorio de investigación para probar nuevas tecnologías de transporte.</p>
NCAT Test Track	2002	<p>La finalidad fue comprobar el comportamiento de las mezclas asfálticas ante tráfico real en el transcurso del tiempo. Se aborda con más detalle en el apartado 4.2.</p>

Las pistas de prueba a escala real han sido diseñadas para soportar condiciones normales de servicio. Las pistas bajo condiciones normales de servicio, indican que la estructura del pavimento está sometida a velocidades de tráfico conforme a la reglamentación que se encuentra en vigor en cada país. En el caso de México, es la NOM-012-SCT-2-2008 la cual indica los pesos por eje y el peso bruto vehicular máximo, por lo general estas pistas se encuentran construidas en carreteras federales o estatales en donde el tráfico es monitoreado mediante aforo y la estructura del pavimento está debidamente instrumentada. Es así como iniciamos la descripción de las pistas de prueba que serán la base de éste trabajo.

3.1.1 PISTA DE PRUEBA AASHTO

En la pista de prueba AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) anteriormente conocida como AASHO Road Test (American Association of State Highway Officials) los objetivos de la prueba fueron;

- Determinar las relaciones entre repeticiones de carga y espesores requeridos
- Determinar el efecto del peso de los vehículos en puentes.
- Realizar estudios especiales referentes a tipos de bases, fatiga en pavimentos, tamaño y presión de inflado de los neumáticos.
- Obtener un registro de los recursos y materiales requeridos para mantener las secciones de prueba en condiciones de ser ensayadas.
- Desarrollar instrumentos, procedimientos de ensayo, obtener datos, tablas, gráficos y fórmulas que se indican en el apartado 3.1.1.3.

La Tabla 5 nos proporciona la cronología de la AASHO Road Test.

Tabla 5 - Cronología del experimento AASHO.

AÑO	DESCRIPCIÓN
1951-1954	Etapas de planificación.
1955	Inician los trabajos de topografía, la preparación de planos y especificaciones
Agosto, 1956	Comienza la construcción en Ottawa, Estado de Illinois.
Octubre, 1958	Inicia la aplicación de las cargas sobre los tramos de pavimentos construidos
Octubre, 1960	Se concluye con la etapa de mediciones en campo y se inicia el análisis de la información recogida en campo.
Entre 1961- 1962	Se publican las primeras guías provisionales de diseño como “AASHO Interim Guide for the Design of Rigid and Flexible Pavements” con reediciones en 1972 y 1993.

El experimento fue llevado de la siguiente manera. Se construyeron 6 circuitos, numerados del N1-N6, las cuales fueron destinadas a diferentes fines como lo indica la Tabla 6.

Tabla 6 - Mediciones que se realizaron en cada Circuito.

PISTA	DESCRIPCIÓN
Pista N1	Se destinó a medir el efecto del clima
Pista N2	Se destinó a cargas de camiones ligeros
Pistas N3, 4, 5 y 6	Se sometieron a cargas de camiones pesados

Las Figura 6 y la Figura 7 muestran el modelo de las pistas de prueba que se construyeron en Ottawa, Illinois, todos eran tramos de dos carriles y tenían la mitad del tramo de concreto y la otra mitad de Asfalto. Cada una de las tangentes del circuito con una longitud aproximada a los 2,070 m se dividió en sectores de 30m de largo.

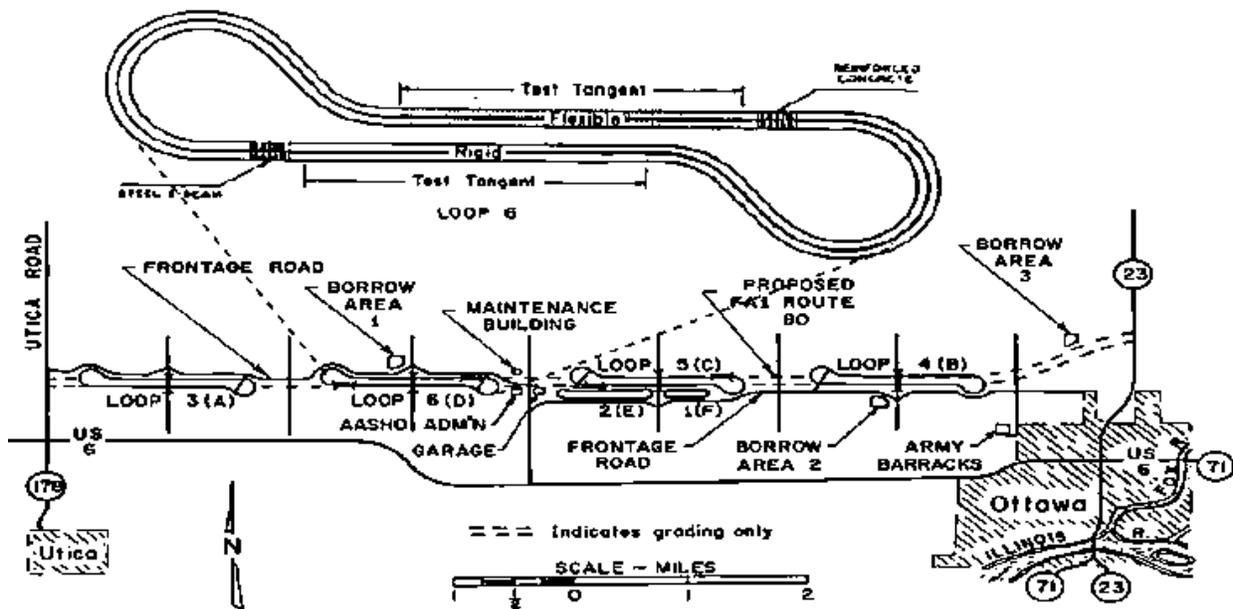


Figura 6 - Circuito AASHO Road Test (TRB, 2007).

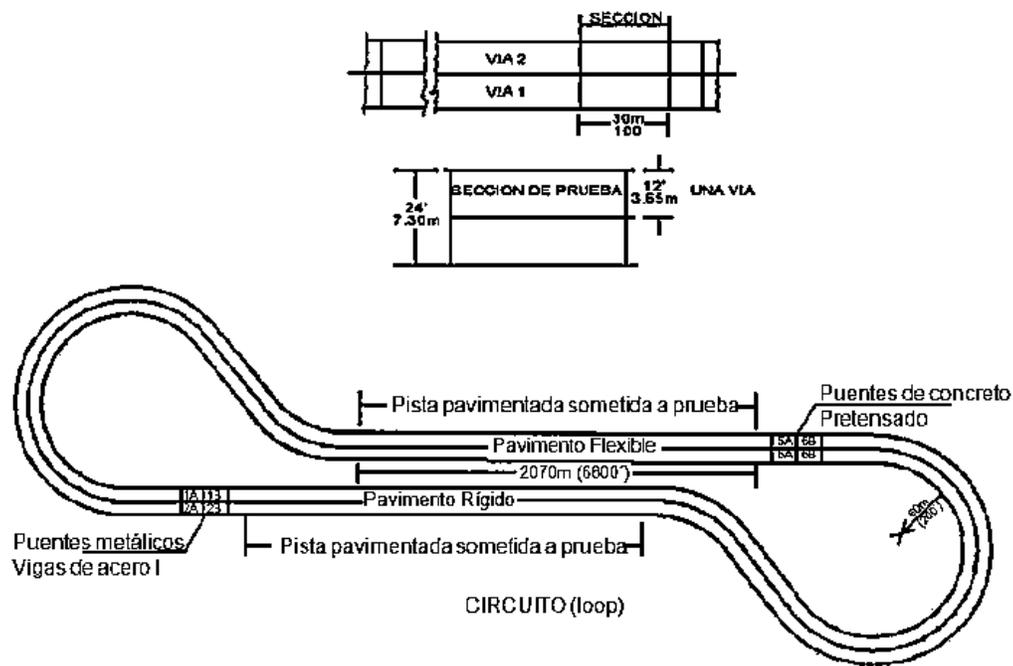


Figura 7 - Características de las secciones de prueba (Corredor M, s.f.).

3.1.1.1 CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURACIÓN

Se ensayaron 468 secciones principales de pavimentos flexibles (HMA) y 368 secciones de pavimento rígido. A cada sección se le aplicó hasta un millón de pasadas de diferentes ejes (sencillos, tándem) o hasta la falla si ésta se producía antes de completar el millón de pasadas (Figura 8).

- Ejes sencillos (2 000, 6 000, 12 000, 18 000, 22 400 y 30 000 libras)
- Ejes tándem (24 000, 32 000, 40 000 y 48 000 libras)

Una misma sección estructural construida en diferentes carriles se probaba simultáneamente para diferentes ejes (sencillo o tándem), una de ellas circulaba en un carril (Izquierdo) y la otra en el segundo carril (Derecho); en ningún momento circularon sobre un mismo canal cargas diferentes (Figura 7). La Tabla 7 muestra los materiales utilizados en cada capa para formar la sección estructural al igual que el rango de espesores de cada capa.

Tabla 7 - Materiales y espesores utilizados en las secciones de pavimentos de las Pruebas AASHO.

CAPA	MATERIAL	ESPESOR
Subrasante	Arcilla (CL); CBR entre 2 y 4%	Variable
Sub-base	Grava-Arena; CBR entre 28 y 51%	40cm
Base	Caliza Dolomítica Triturada; CBR 100%	0.0-40cm
Carpeta Asfáltica	HMA mezcla densa	2.5 - 15cm

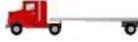
Circuito	Pista		eje delantero	Carga sobre el eje	Peso bruto
2	1		2	2	4
	2		2	6	8
3	1		4	12	28
	2		6	24	54
4	1		6	18	42
	2		9	32	73
5	1		6	224	508
	2		9	40	89
6	1		9	30	69
	2		12	48	108

Figura 8 - Carga en Kips de los ejes de los vehículos en AASHO Road Test .

3.1.1.2 MEDICIONES

Las mediciones fueron realizadas considerando las variables que en estudios previos demostraron estar relacionados con los factores de deterioro del pavimento, las cuales se describen a continuación.

- Perfil longitudinal y transversal fueron obtenidos para determinar los baches
- Rugosidad
- Agrietamiento
- Parches para calcular la cantidad de recarpeteo para mantener la sección en servicio.
- Ahuellamiento causado por cargas de los vehículos circulando a muy bajas velocidades.

A raíz de este experimento se introdujo el término de serviciabilidad como medida de calidad al usuario.

3.1.1.3 FUNDAMENTO DEL MÉTODO DE DISEÑO DE AASHTO.

El desempeño de los pavimentos es una función de su relativa capacidad para servir al tráfico sobre un periodo de tiempo. El concepto de serviciabilidad fue soportado por cinco suposiciones: La carretera se construye para brindar confort a los usuarios, la opinión de los usuarios acerca de cómo la carretera debe desempeñarse es altamente subjetivo, hay características que pueden ser medidas y

relacionadas con la percepción de los usuarios sobre el desempeño y finalmente, que el desempeño es asumido como un reflejo de la serviciabilidad con el incremento de las aplicaciones de carga. La serviciabilidad fue medida de dos maneras, la primera de manera subjetiva por medio de una planilla de evaluación denominada PSR (Present Serviceability Ratio), la cual es el promedio del valor asignado por los usuarios, el rango va de 5 a 0 (Siendo 5 muy bueno y 0 intransitable) como la mostrada en la Tabla 8 y la segunda se obtuvo estadísticamente. Estas dos medidas de serviciabilidad fueron correlacionadas obteniendo la ecuación (1) para obtener el PSI (Present Serviceability Index) en pavimentos flexibles, aunque de igual manera se obtuvieron datos de los pavimentos rígidos en este trabajo solo abarcaremos los estudios realizados en pavimentos flexibles como se mencionó en el apartado 2.

Tabla 8 – Planilla de Evaluación.

5	5
4	4
3	3
2	2
1	1
Intransitable	Intransitable

$$PSI = 5.03 - 1.91 \log(1 + SV) - 1.38RD^2 - 0.01(K + P)^{0.5} \quad (1)$$

Donde;

SV = Varianza de la pendiente longitudinal, que mide la influencia de las deformaciones longitudinales.

RD = Promedio aritmético de la profundidad del ahuellamiento en pulgadas.

K = Agrietamiento en $\text{ft}^2/1000 \text{ ft}^2$.

P = Área reparada en $\text{ft}^2/1000 \text{ ft}^2$.

Las ecuaciones originales que desarrolló la AASHO, toman en cuenta los espesores de las capas, el valor inicial y final de la serviciabilidad, el peso de la carga y número de ejes.

$$PSI(W) = PSI_0 - (PSI_0 - PSI_1) \left(\frac{W}{\rho} \right)^\beta \quad (2)$$

$$\beta = 0.4 + \frac{0.081(L_1 + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} L_2^{3.23}} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{10^{5.93} (SN + 1)^{9.36} L_2^{4.33}}{(L_1 + L_2)^{4.79}} \quad (4)$$

Donde;

W = Aplicación acumulada de carga por eje.

$PSI(W)$ = Valor de PSI en función de W

PSI_0 = Valor inicial de PSI. Para las secciones de prueba de la AASHO Road Test el valor era de 4.2.

PSI_1 = Valor de PSI cuando las secciones fallaban. En la AASHO Road Test se consideró fallado cuando el valor era 1.5.

L_1 = Para ejes simples el valor es de 1 y para eje tándem es de 2.

SN = Número estructural, $SN = 0.17D_1 + 0.06D_2 + 0.04D_3$, donde D_1 , D_2 y D_3 son los espesores de la carpeta asfáltica, capa de base y subbase en cm.

β, ρ = Parámetros que están en función del tipo de eje y el número estructural.

3.1.1.4 GUÍA PROVISIONAL 1961

La simplificación de las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) dio origen a la ecuación fundamental de diseño de la AASHO la cual se expresa como la ecuación (5) empíricamente desarrollada para un tipo de subrasante específico, materiales locales para la estructura del pavimento y condiciones ambientales locales.

$$\text{Log}W_{18} = 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log} \left[(4.2 - pt) / (4.2 - 1.5) \right]}{0.40 + \left[1094 / (SN + 1)^{5.19} \right]} \quad (5)$$

Donde;

W_{18} = Número de aplicaciones de ejes simples de 18kips para el periodo de diseño.

pt = Serviciabilidad al finalizar la vida de diseño.

SN = Número Estructural.

El Número Estructural es un parámetro que representa la resistencia estructural del pavimento. Es dado como la suma del producto del espesor de cada capa por sus coeficientes estructurales, el cual es un coeficiente empírico representando la contribución de cada capa a la resistencia del pavimento.

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 \quad (6)$$

Donde;

a_1, a_2, a_3 = Coeficientes estructurales para capa de rodadura, base y subbase respectivamente.

D_1, D_2, D_3 = Espesor de la Carpeta Asfáltica, base y subbase respectivamente.

La ecuación (5) se resuelve para obtener el valor del Número Estructural SN y en la ecuación (6) se substituye ese valor para obtener los espesores de las capas.

3.1.1.5 GUÍA PROVISIONAL 1972

En 1972 la guía provisional de diseño fue el primer intento por expandir la ecuación desarrollada en la AASHO Road Test a un rango más amplio de materiales y condiciones ambientales. Algunas características que se añadieron para el diseño de pavimentos flexibles se describen a continuación.

- Una escala de suelos soporte (S_i) fue desarrollada para reflejar la influencia de diferentes subrasantes locales en la ecuación. El rango de la escala fue de 1 a 10, el 10 correspondía a grava y el 1 a una arcilla altamente plástica. La subrasante utilizada en la AASHO Road Test fue clasificada con un valor de 3.
- Se consideró un factor regional R para ajustar el Número Estructural con la finalidad de permitir que la ecuación sea utilizada en cualquier sitio. El valor del factor estaba dentro del rango de 0.2 a 5.0, la Tabla 9 muestra el valor del rango con respecto al material.

Tabla 9 – Recomendaciones del Factor Regional R (Schwartz & Carvalho, 2007).

CONDICIÓN DEL MATERIAL DE SOPORTE	R
Congelado con una profundidad de 5" o más. (Invierno)	0.2-1.0
Seco (Verano y Otoño)	0.3-1.5
Húmedo (Primavera)	4.0-5.0

Además la guía provisional también especificaba un rango para el coeficiente estructural en cada capa aplicable a otros materiales que no fueron utilizados en AASHO Road Test. La Tabla 10 muestra el rango de valores para Carpeta Asfáltica, capa de base no tratada y subbase.

Tabla 10 – Rango del coeficiente de la capa estructural (Schwartz & Carvalho, 2007).

COEFICIENTE	RANGO
a_1 (Capa de Rodadura)	0.17-0.45
a_2 (Base no tratada)	0.05-0.18
a_3 (Subbase)	0.05-0.14

Finalmente la ecuación (5) fue modificada considerando nuevos términos como lo muestra la ecuación (7).

$$\text{Log}W_{18} = 9.36\log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log} \left[\frac{(4.2 - pt)}{(4.2 - 1.5)} \right]}{0.40 + \left[\frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}} \right]} + \log \frac{1}{R} + 0.372(S_i - 3) \quad (7)$$

Donde;

R = Factor Regional.

S_i = Valor del suelo soporte.

3.1.1.6 GUÍA DE 1993.

En la revisión realizada en 1986 se añadieron más características para el procedimiento de diseño. El enfoque tuvo cuatro consideraciones importantes.

- Mejor caracterización de la subrasante y materiales sin consolidar.
- Incorporación de drenaje en pavimentos.
- Optimizar la consideración del efecto ambiental.
- Incorporación de la confiabilidad como un factor dentro de la ecuación de diseño.

En la revisión de 1986 de la Guía AASHTO, se utilizó por primera vez la caracterización de la subrasante con su Módulo Resiliente M_R . El coeficiente de la capa estructural como un material no compactado fue relacionado cuantitativamente en la ecuación empírica fundamental. El drenaje fue incorporado dentro de la ecuación (8) del Número Estructural.

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (8)$$

Donde;

m_2, m_3 = Coeficientes de drenaje para base y subbase.

Hubieron muy pocos cambios entre la versión de 1986 a la versión de 1993, así llegamos a la ecuación (9) de diseño de la guía 1993.

$$\text{Log}W_{18} = Z_R * S_0 + 9.36\log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log} \left[\frac{(4.2 - \Delta PSI)}{(4.2 - 1.5)} \right]}{0.40 + \left[\frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}} \right]} + 2.32\log(M_R) - 8.07 \quad (9)$$

Donde;

W_{18} = Número de aplicaciones de ejes simples de 18kips para el periodo de diseño.

Z_R = Factor de confiabilidad.

S_0 = Desviación estándar.

SN = Número Estructural.

ΔPSI = PSI inicial – PSI final

M_R = Módulo Resiliente en la Subrasante (psi)

3.1.1.7 GUÍA MEPDG (2008)

Durante muchos años la Guía 1993 ha sido utilizada en el diseño de pavimentos, sin embargo, debido a la naturaleza empírica de dicha guía se vio la necesidad de elaborar una nueva utilizando conceptos mecanicistas, fue entonces cuando la AASHTO Joint Task Force on Pavement, la Federal Highway Administration (FHWA) y la National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) patrocinaron el proyecto NCHRP 1-37A para desarrollar un nuevo procedimiento de diseño Empírico-Mecanicista (M-E). Terminada la revisión de esta nueva guía bajo el proyecto NCHRP 1-40A y NCHRP 1-40D se dio origen a una nueva guía de diseño denominada MEPDG (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide) publicado oficialmente en 2008.

La MEPDG no es tan sencilla de usar como la guía de diseño de 1993, en donde los espesores de las capas son obtenidos directamente de una ecuación, ahora se realiza un proceso iterativo en donde se predice el comportamiento de la estructura del pavimento el cual se compara con los criterios de diseño seleccionados. La estructura o el material seleccionado son ajustados hasta que se logra un diseño satisfactorio. A continuación se describe paso a paso el procedimiento.

- Definición de la subrasante y capas que forman la estructura del pavimento (tipo de material y espesor), las cargas del tráfico y condiciones ambientales.
- Definición del criterio de diseño para el comportamiento aceptable del pavimento al final del periodo de diseño (por ejemplo, un aceptable nivel de ahuellamiento, fatiga, agrietamiento por cambios de temperatura y rugosidad).
- Cálculo de las cargas del tráfico mensual y las condiciones climáticas estacionales (Gradiente de temperatura en capas de concreto asfáltico, contenido de humedad en capas granulares no compactadas y subrasante).
- Modificación de las propiedades de los materiales en respuesta a las condiciones ambientales.
- Análisis de la respuesta estructural del pavimento (Deformaciones, esfuerzos y deflexiones) para cada tipo de eje y carga.
- Cálculo de deterioro previsto (Ahuellamiento, fatiga) al final de cada periodo de diseño usando el comportamiento de modelos calibrados empíricamente.
- Evaluación del comportamiento previsto en las pruebas de diseño a través de niveles de confiabilidad especificados.

El MEPDG está implementado en un Software cuyo procedimiento de operación se esquematiza en el diagrama mostrado en la Figura 9. Los pasos indicados en dicha figura, son ejecutados automáticamente, excepto la selección de los materiales y la estructura final del pavimento, lo cual se realiza a criterio del diseñador.

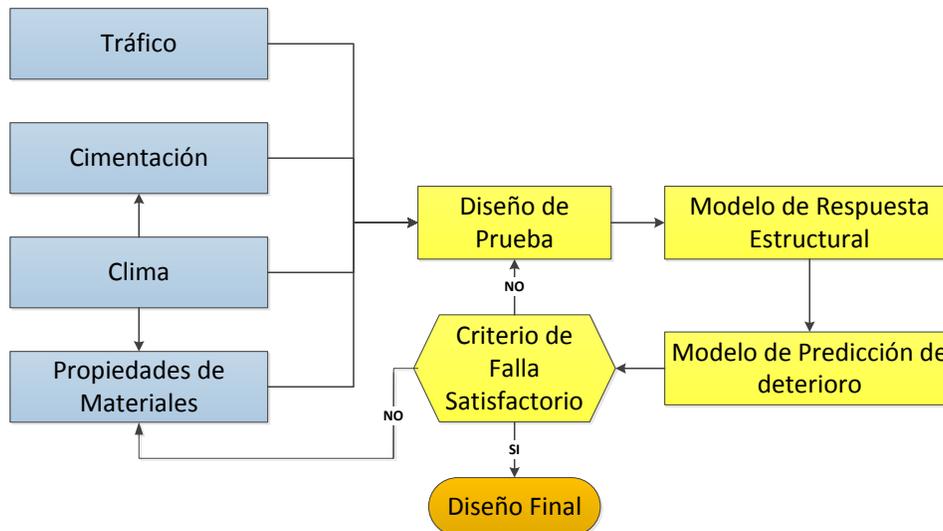


Figura 9 – Procedimiento de diseño M-E para pavimentos flexibles (Schwartz & Carvalho, 2007).

La última versión del software para el diseño de pavimentos es el DARWin-ME soportado por la guía MEPDG publicada en 2008.

3.2 ***PISTAS BAJO CONDICIONES ACELERADAS Y CONTROLADAS DE CARGA***

Mientras a principios del siglo XX en Estados Unidos estaban enfocados en las Pistas de Prueba a Gran Escala, en Europa había el interés por las Pistas de Ensayo Acelerado con siglas en inglés APT (Accelerated Pavement Testing), las cuales sirven para realizar pruebas en estructuras de pavimentos en donde se busca acelerar el daño. Existen varias maneras de acelerar el daño, entre ellas están;

- Modificar la velocidad de la aplicación de la carga
- Aumentar la magnitud de la carga
- Cambiar los espesores de las capas del pavimento
- Inducir condiciones ambientales adversas

Una de las razones por la cual los APT son de interés es debido a que en las Pista a Escala Real no es considerado el comportamiento de los pavimentos ante el aumento futuro de tráfico, por lo cual es complicado predecir su comportamiento a largo plazo. La primera investigación APT de la que se tiene registro fue conducida en el antiguo Reino Unido con el desarrollo del dispositivo circular Road Machine I en el año de 1912, mejorado en 1933 con el Road Machine II seguido del Road Machine III. Para finales de los años 60's se cambia de instalación a una pista lineal que contaba con 28m de

longitud de pista, 7m de ancho y 2m de profundidad. En 1973 fue encargado el desarrollo de una máquina a media escala ahora conocida como Nottingham Pavement Test Facility mostrada en la Figura 10.



Figura 10 – Instalación de Pista de Prueba de pavimentos de Nottingham (NTEC).

Las especificaciones de la pista se enuncian en la Tabla 11. La carga que es aplicada en este dispositivo es a través de dos actuadores hidráulicos montados en el sistema de tráfico al cual se le suministra aceite con mangueras que se mueven a lo largo de la pista en armonía con el sistema.

Tabla 11 – Especificaciones de la Pista de Nottingham (NTEC)

ESPECIFICACIONES DE LA PISTA DE NOTTINGHAM	
Rango de Carga	0-12 kN
Presión de llanta	570 kPa
Área de contacto a 10 kN	0.02 m ²
Esfuerzo de contacto a 10kN	500 kPa
Rango de velocidad	0-900 pasadas/hr
Longitud Pista efectiva	6.7 m
Longitud de Montaje	8.2 m
Rango de Temperatura	20-25°C

Para finales de los años 60's otra tecnología se estaba desarrollando en Sudáfrica por la CSIR (Council of Scientific and Industrial Research), sería el primer prototipo HVS (Heavy Vehicle Simulator) que fue completamente refinado en los años 70's y que se muestra en la Figura 11. En 1994 California CAL/APT adquiere dos HVS para validar la tecnología. En 1997 Suecia y Finlandia adquieren el HVS-Nordic al mismo tiempo que la armada de los Estados Unidos adquiriría dos equipos, la CRREL (Cold Regions Research and Engineering Laboratory) y la WES (Waterway Experiment

Station), Florida DOT compra un HVS en 2000 y finalmente en 2012 LANAMME (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales) adquiere uno.



Figura 11 – HVS desarrollado por CSIR ((CSIR).

Las especificaciones generales de la pista se enuncian en la Tabla 12, aunque existen variaciones entre los diferentes HVS´s adquiridos por las instituciones a razón de que cada una de ellas tiene necesidades distintas para su campo de investigación, más adelante se describe alguna de ellas como la adquirida por Florida DOT y la HVS-Nordic.

Tabla 12 - Especificaciones de HVS ((NCHRP, 1996).

Pista	Lineal
Dirección	Uni/bidireccional
Ejes	Medio eje, llanta Simple o dual para carreteras y llanta simple para aeródromos.
Propulsión	Motor Hidráulico/cable/cadena
Energía	Motor Diésel/Eléctrico
Rango de carga	2-10ton/carreteras, hasta 15ton/aeródromos
Suspensión	Hidráulica
Rango de Velocidad	12km/h
Pasadas/hora	950 promedio

En 1984 en Australia se desarrolla el dispositivo ALF (Accelerated Loading Facility) mostrado en la Figura 12 por ARRB (Australian Road Research Board) con patente N° 4502327 (Scrivener, Smith, Campbell, & Mansell, 1983). Para 1986 en Estados Unidos ya existe interés por la tecnología de Pistas de Prueba acelerada, por lo cual la Federal Highway Administration (FHWA) importa dos equipos ALF que se colocaron en Virginia. En 1989 China importa un dispositivo ALF a las

instalaciones de RIOH (Research Institute of Higways) y para 1993 Louisiana también adquiere un equipo ALF.



Figura 12 - Estructura de la pista de prueba de ARRB

Las especificaciones generales de la pista se enuncian en la Tabla 13.

Tabla 13 - Especificaciones de la ALF (NCHRP, 1996).

Pista	Lineal
Dirección	Uni-direccional
Ejes	Medio eje Simple, tándem, tridem (llanta simple o dual)
Propulsión	Rueda Motriz
Energía	40-50kW Motor
Rango de carga	4-10ton
Suspensión	Bolsas de aire
Rango de Velocidad	0 a 20km/h
Pasadas/hora	380

Algunas instituciones como CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) ubicado en España y que opera desde 1988 se interesaron en crear su propio diseño APT la cual se muestra en la Figura 13. La geometría de la pista de ensayo acelerado consiste en dos tramos rectos con longitud de 75m c/u, unidos por dos tramos curvos con un radio de curvatura de 25 m. La zanja en donde se coloca la estructura del pavimento tiene 8m de ancho por 2.6m de profundidad. La carga dinámica aplicada es de 65kN por medio de dos vehículos automáticos que circulan a una velocidad de 60km/h. (Tierra y Tecnología, 2013).



Figura 13 – Instalaciones de CEDEX (Tierra y Tecnología, 2013).

Entre los años 1984 y 1986 se construye el CAPTIF (Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility) ubicado en Nueva Zelanda cuya instalación es hexagonal de 26m de ancho por 6m de alto, la zanja donde se coloca la estructura del pavimento tiene 4m de ancho por 1.5m de profundidad, la pista de prueba tiene 18.5m de diámetro cuya circunferencia es de 58m, tiene capacidad para probar hasta 6 secciones. Esta instalación fue utilizada en el programa DIVINE (Dynamic Interaction vehicle Infrastructure Experiment) para la OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) con la finalidad de investigar el efecto de las cargas dinámicas sobre el deterioro de los pavimentos abarcando las cargas dinámicas producidas por diferentes tipos de suspensiones.



Figura 14 – Pista de Prueba de Canterbury (NZ TRANSPORT AGENCY WAKA KOTAHI, 2009)

Las especificaciones generales de la pista se enuncian en la Tabla 14.

Tabla 14 - Especificaciones de CAPTIF (NCHRP, 1996).

Pista	Circular
Ejes	Medio eje Simple, llanta simple o dual, con separación de 3.5cm de centro a centro de llanta
Propulsión	Rueda Motriz
Energía	55kW Motor
Rango de carga	2-6ton aprox.
Suspensión	Ballestas, bolsas de aire
Rango de Velocidad	1 a 50km/h
Pasadas/hora	Depende de la velocidad puede ser hasta 1700/h
Presión de Inflado	700 kPa

La pista DRTM (Danish Road Testing Machine) ubicada en Dinamarca (Figura 15) fue comisionada en 1973. Cuenta con 9m de longitud de pista efectiva por 2.5m de ancho y está encerrado en una cámara climática.



Figura 15 – Pista de Prueba de Dinamarca (APT FACILITIES IN EUROPE)

Las especificaciones generales de la pista se enuncian en la Tabla 15.

Tabla 15 - Especificaciones de la DRTM (NCHRP, 1996).

Pista	Lineal
Ejes	Medio eje Simple, llanta simple o dual
Propulsión	Cable
Energía	Energía Eléctrica
Rango de carga	6.5ton aprox.
Rango de Velocidad	25 a 30km/h
Pasadas/hora	417/h

En la Figura 16 y Figura 17 tenemos el corte longitudinal de la pista y la configuración de la llanta dual respectivamente.

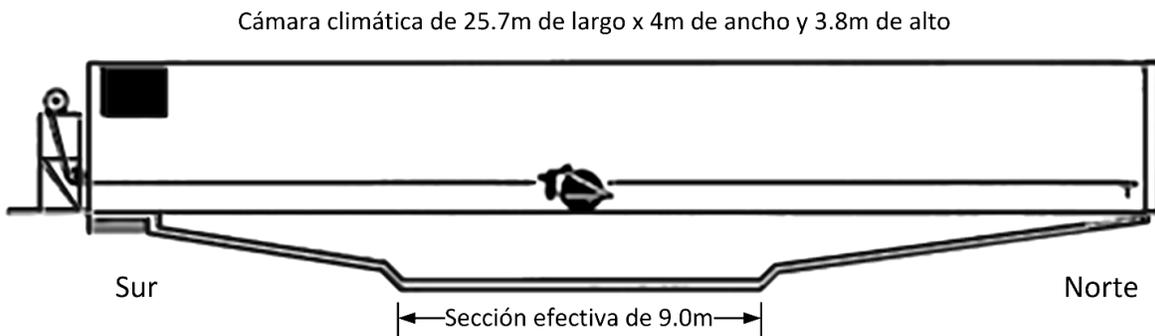


Figura 16 – Pista de Prueba de Dinamarca (Zhang & Macdonald, 2002).

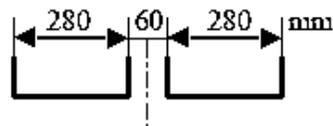


Figura 17 – Configuración de llanta dual (Zhang & Macdonald, 2002).

La pista EPFL (Ecole Polytechnique Federales de Lausanne) mostrado en la Figura 18 ubicado en Suiza fue comisionado en 1977. La longitud de pista es de 4m con ancho de 3m, la zona de rodadura es de 0.8m debido al eje dual completo.



Figura 18 – Pista de Prueba de EPFL (APT FACILITIES IN EUROPE)

Las especificaciones generales de la pista se enuncian en la Tabla 16.

Tabla 16 - Especificaciones de EPLF (NCHRP, 1996).

Pista	Lineal
Ejes	Eje completo dual
Energía	Motor Eléctrico
Rango de carga	Hasta 12ton aprox.
Suspensión	Ballestas, bolsas de aire
Rango de Velocidad	10km/h

La instalación LCPC (Laboratoire Central des Ponts and Chaussees) ubicado cerca de Nantes Francia mostrado en la Figura 19 fue comisionado en 1978.



Figura 19 – Pista de Prueba de LCPC (APT FACILITIES IN EUROPE)

Las especificaciones generales de la pista se enuncian en la Tabla 17.

Tabla 17 - Especificaciones de la LCPC (NCHRP, 1996).

Pista	Circular
Ejes	4 brazos con eje simple o tándem (llanta simple o dual)
Rango de carga	4 a 14ton aprox.
Suspensión	Neumática
Rango de Velocidad	30 a 100km/h
Pasadas/hora	1020 a 3600/h

La instalación de LINTRACK (Figura 20) se comenzó a construir en 1987 aunque fue completado en 1991 en los Países Bajos.



Figura 20 – Pista de Prueba de LINTRACK (APT FACILITIES IN EUROPE)

Algunas especificaciones de la pista se enuncian en la Tabla 18 .

Tabla 18 - Especificaciones de LINTRACK (NCHRP, 1996).

Pista	Lineal
Rango de carga	Hasta 10ton aprox.
Suspensión	Bolsas de aire
Rango de Velocidad	20km/h
Pasadas/Hora	1000/h

La pista circular S-KSD ubicada en Eslovaquia fue comisionada en 1994 la cual se muestra en la Figura 21, tiene 32m de diámetro con 1.9m de ancho.



Figura 21 – Pista de Prueba de S-KSD (APT FACILITIES IN EUROPE)

Algunas especificaciones de la pista se enuncian en la Tabla 19.

Tabla 19 - Especificaciones de S-KSD (NCHRP, 1996).

Pista	Circular
Ejes	3 brazos con eje completo.
Rango de carga	8 a 13ton aprox.
Rango de Velocidad	10-50km/h
Pasadas/hora	>300/h
Propulsión	Rueda Motriz
Energía	Motor Eléctrico

Algunos Estados de EU también decidieron crear su propia tecnología, entre ellas tenemos que en 1992 se construye la pista de prueba Indot/Purdue mostrada en la Figura 22 con longitud de pista de 6m por 1.50m de ancho. La instalación tiene capacidad para colocar 4 secciones estructurales de pavimentos.



Figura 22 – Pista de Prueba de INDOT/PURDUE

Algunas especificaciones de la pista se enuncian en la Tabla 20.

Tabla 20 - Especificaciones de INDOT/PURDUE (NCHRP, 1996).

Pista	Lineal
Ejes	Medio eje(llanta simple o dual)
Rango de carga	Hasta 90ton aprox. Uni/bidireccional
Rango de Velocidad	8km/h
Pasadas/hora	1333/h

Para 1995 se construye una instalación muy innovadora llamada TxMLS (Texas Mobile Load Simulator) mostrada en la Figura 23.



Figura 23 – Pista de Prueba de TxMLS

Algunas especificaciones de la pista se enuncian en la Tabla 21.

Tabla 21 - Especificaciones de TxMLS (NCHRP, 1996)

Pista	Lineal
Ejes	6 bogies con 12 ejes
Rango de carga	Eje simple de 2 a 11 ton aprox. Eje Dual de 3 a 19 ton aprox.
Rango de Velocidad	32.2km/h(usual), 41.5km/h(máx)
Pasadas/hora	8800/h

Las instalaciones de OH APLF (Ohio Accelerated Pavement Load Facility) están ubicadas en 1570 Granville Pike Ohio University—Lancaster Branch Lancaster, OH 43130, fue construido en 1997 con un costo de \$1.35 millones de dólares. La Figura 24 muestra una imagen de la pista y cuyas características están en la Tabla 22.



Figura 24 – Estructura de la Pista Lineal de OHIO APLF.

Tabla 22 - Características de la Pista de Prueba de OHIO APLF.

CONFIGURACIÓN DEL PAVIMENTO	
Medidas del área de prueba.	13.7m de largo, 11.6m de ancho y 2.4m de profundidad.
Medida de la sección de prueba	13.7m de largo, 1.8m de ancho y 2.4m de profundidad
Ancho del rodadura	0.350 m ± 0.254 m o 0.535m ± 0.254m
Longitud de prueba	10.7m.
CONDICIONES DE TRÁFICO	

Dispositivo de carga	Mecanismo de carga sobre ruedas empujando contra vigas de acero de reacción que se extiende a lo largo de la sección de prueba.
Configuración de llanta	Simple o dual
Carga sobre llanta	22 kN–134 kN (2.24-13.66ton)
Suspensión	Hidráulica
Velocidad	2-8km/h
Repeticiones	250/h unidireccional y 500/h bidireccional
Propulsión de carga	Cable accionado
Motor	Eléctrico
Cubierta	Construcción especial 24m de largo x 11.6m de ancho y 5.4m de altura.
CONTROL DE CLIMA	
Condiciones ambientales	Humedad ambiente 0-100%. Saturación puede ser añadido a la subrasante sobre el piso del pozo.
INSTRUMENTACIÓN	
Transductores TMW, dispositivos para medir deformación marca Dynatest y Carlson, celdas de presión, Reflectómetros Time Domain y sensores de conductividad termal.	

La instalación de K-ATL (Kansas Accelerated Testing Laboratory) está ubicada en Kansas State University Civil Engineering Infrastructure Laboratory 2112 Fiedler Hall, Manhattan, KS, construido en 1997 con un costo de \$1.00 millón de dólares (Figura 25). La Tabla 23 muestra algunas características.



Figura 25 - Estructura de la Pista Lineal de K-ATL (NCHRP, 2004).

Tabla 23 - Características de la Pista de Prueba de K-ATL HVS.

CONFIGURACIÓN DEL PAVIMENTO	
Medidas del área de prueba.	418m ²
Medida de la sección de prueba	2 zanjas con las siguientes dimensiones; El primero de 1.8m de profundidad, 9.7m de longitud y 1.8m de ancho y el segundo de 1.8m de profundidad, 6.1m de longitud y 1.8m de ancho.
Ancho del rodadura	Dependiendo de la llanta. La llanta no tiene capacidad de deambular.
Longitud de prueba	9.75 y 6.1m respectivamente
CONDICIONES DE TRÁFICO	
Dispositivo de Carga	Bogie
Configuración de llanta	Tándem dual (4-8 llantas) y eje simple (2-4 llantas)
Carga sobre llanta	Máximo 175kN
Suspensión	Bolsa de aire
Velocidad	11km/h constante en 5m de la longitud efectiva de la pista.
Repeticiones	313/h unidireccional 626/h bidireccional
Motor	Eléctrico
Cubierta	Bajo techo en una construcción de 537m ²
CONTROL DE CLIMA	
Condiciones ambientales	Temperatura del aire, temperatura del pavimento y humedad en la subrasante
INSTRUMENTACIÓN	
Dispositivos para medir la deformación, presión, desplazamiento, humedad de la subrasante.	

La NAPTF fue comisionada en 1999, está ubicado en Atlantic City, New Jersey y se muestra en la Figura 26.



Figura 26 - Estructura de la Pista Lineal de NAPTF (NCHRP, 2004).

Algunas especificaciones de la pista se enuncian en la Tabla 24.

Tabla 24 - Características de la Pista de Prueba NAPTF (NCHRP, 2004).

Pista	Lineal
Rango de carga	Máx. 33ton/llanta
Rango de Velocidad	0.1-24km/h aunque lo usual son 4km/h
Pasadas/hora	15/h a 40/h

El ATLaS (Accelerated Transportation Loading System) fue construido en 2002 en Illinois EUA mostrado en la Figura 27, con 26m de longitud de pista por 3.7m de ancho.



Figura 27 - Estructura de la Pista Lineal de ATLaS.

Algunas especificaciones de la pista se enuncian en la Tabla 25.

Tabla 25 - Características de la Pista de Prueba ATLaS (NCHRP, 2004).

Pista	Lineal
Dirección	Uni/bidireccional
Ejes	Medio eje (llanta simple o dual), llanta de avión, bogie.
Propulsión	Montaje de Cable y Winch
Energía	Eléctrica
Rango de carga	0-358kN (0-35ton aprox.)
Suspensión	Hidráulica
Rango de Velocidad	16km/h
Ciclos/hora	10,000/24h bidireccional

Con respecto a Sudamérica podemos mencionar la Instalación de CEFET-SP APT que se encuentra en Brasil y que se muestra en la Figura 28 y Figura 29. El sistema es capaz de simular hasta 17000 pasadas /24hrs, con una carga aplicada en un eje simple de 12Ton aprox.



Figura 28 - Estructura de la Pista de Prueba CEFET-SP APT

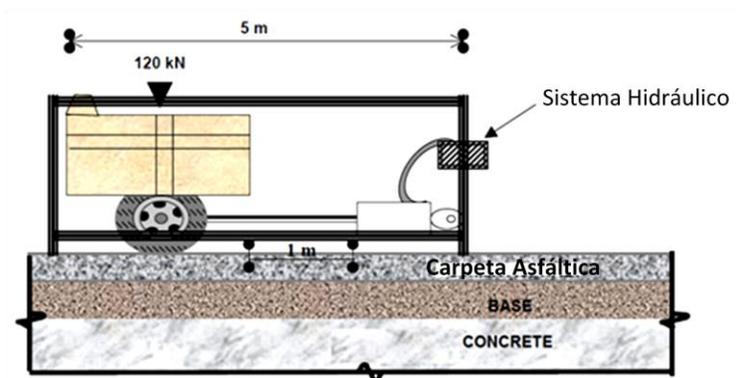


Figura 29 - Características de la Pista de Prueba CEFET-SP APT

Las pistas de prueba anteriormente descritas no son las únicas, pero sí de las más relevantes. La Figura 30 muestra las localizaciones de pistas de prueba de algunas instituciones en Estado Unidos de América en donde se están realizando investigaciones ya sea en Pistas a Gran Escala o en Pistas de Prueba Aceleradas.

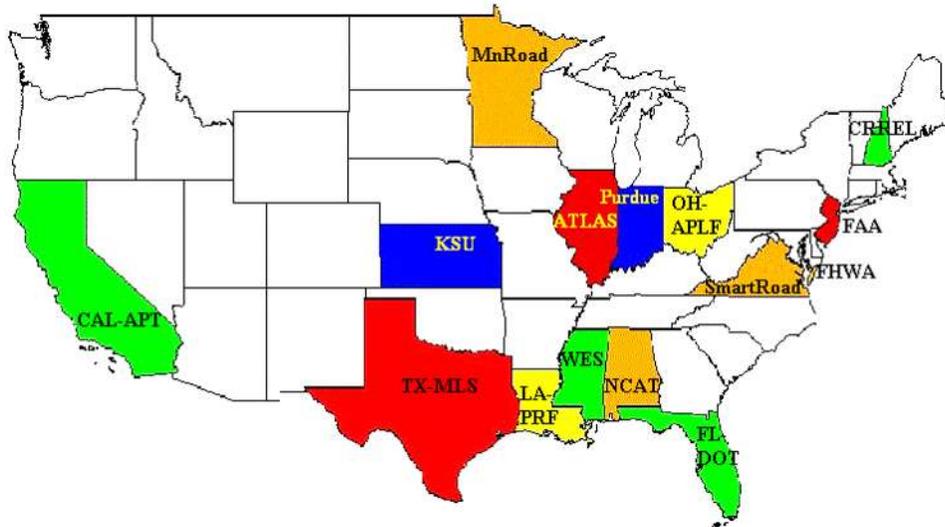


Figura 30 - Ubicación de pistas de prueba en USA (Universidad de los Andes, 2009).

De igual manera en la Figura 31 se muestra los países de Europa en donde están llevando a cabo investigaciones, aunque el mapa no es actual si nos da una idea del dominio que se esta teniendo sobre las Pistas de Prueba.

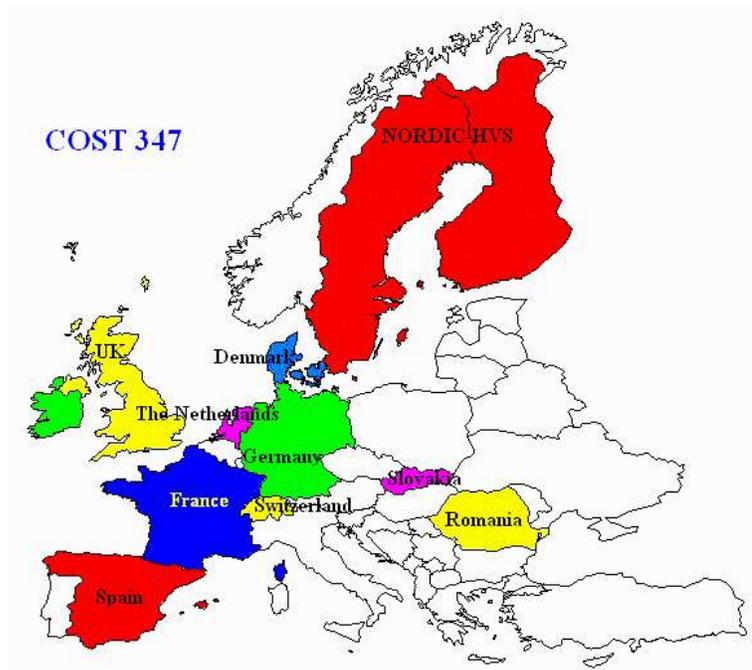


Figura 31 - Ubicación de pistas de Prueba de carga acelerada “APT Facilities in Europe” (TRB Committee).

En este trabajo nos enfocaremos en los modelos de pistas lineales, debido a que se pretende proponer que la configuración de diseño conceptual objeto de este trabajo, sea lineal, la razón de esta idea es asegurar la configuración más simple tomando en cuenta la incertidumbres del espacio con la que se contará en el momento de la implementación de dicha pista en un futuro, por lo que es más fácil adecuar una pista lineal a las condiciones del terreno a una pista circular. Aunque muchos modelos ya se describieron anteriormente, en la publicación de Metcalf (1996) de igual manera se encuentra información sobre la configuración de algunos modelos APT que fueron comisionados para su construcción en algunos países desde 1963 hasta 1995 la cual es presentada en la Tabla 26. En color azul se indican las pistas en carreteras en servicio, en color morado las pistas circulares y en color verde las pistas lineales. Los modelos lineales que más replicas han tenido son las HVS y los ALF, un ejemplo de ello se muestra de igual manera en la Tabla 26 en donde se indica en letras color naranja que los modelos FHWA-PTF, RIOH-ALF y PRF-LA están basados en el equipo ALF como se mencionó anteriormente y en letras color azul está CAL-APT que está basado en el equipo HVS, de igual manera en la publicación de la NCHRP (2004) se proporciona información de algunos modelos HVS que están en servicio como CRREL-HVS, HVS-NORDIC y FDOT HVS y que se describirán a continuación.

Tabla 26 - Características de algunas pistas de prueba (NCHRP, 1996) .

		Longitud/Diámetro de Pista (m)	Ancho desplazamiento Vertical (m)	Control de Temperatura	Configuración del Eje	Rango de velocidad (Km/h)	Rango de Carga (kN)	Suspensión de la llanta	Presión de Inflado (Mpa)	Energía (kW)
MnRoad	Minneapolis, Minnesota, U.S.A			N	a, b	60-100	365-465 XX	1, 2, 3, 4	0.7-0.88	
NARDO	Brindisi, Italia			N				1		
PTI	Pennsylvania, U.S.A	1600		N	a, b	36		1, 2, 3, 4		
PWRI	Japan	628		N	b	40	140 XX	1, 2, 3, 4		
WesTrack	Reno, Nevada, U.S.A	2800		N	f	65	676 XX			
C-TIC	Canada	38/	1.3	H, C	a, b	36	55			
CAPTIF	New Zealand	58/		N	a, b	0 - 50	21-60	1, 2, 3	0.56-0.84	55
ISETH	Zurich, Switzerland	100/30	1.3	H, C	b	80	50-80			
IUT	Illinois, U.S.A	15	1		b	3-15	0-30			
JHPC	Machida City, Japan	20/8	0.4	H, C, F		10-60	0-30			
LCPC	Nantes, France	100/30	1	N	a, b, c, d	30-105	40-75	1, 4, 5	0.65-1	750
Road Machine	Harmondsworth, United Kingdom	105/34		H	a, b	32	67			
RRT	Lassy, Romania	48/15		N	a, b, c	5-40	100-160	2, 3	0.7-1	70
S-KSD	Bratislava, Slovakia	50/16	0.95	N	a, b, c	10-70	83-130			110
UCF	Gainesville, Florida, U.S.A	49/			a, b	24-58	45-133	2		220
UNAM	Mexico City, México	27		H	b	0-30	40-65	2, 3	0.5-0.57	90
WSU	Washington, U.S.A	81	1.2		b		50			
ALF	Melbourne, Australia	12	1.4	N, X	a, b, c	1-20	40-100	1, 3		50
FHWA-PTF	Washington D.C., U.S.A	12	1.4	N, X	a, b, c	1-20	40-100	1, 3	0.54-0.99	50
RIOH-ALF	Beijing, China	12	1.4	N, X	a, b, c	1-20	40-100	1, 3	0.90-0.95	50
PRF-LA	Lousiana, U.S.A	12	1.4	N, X	a, b, c	1-20	40-100	1, 3	0.72	50
DRTM	Lyngby, Denmark	9	1	H, C, F	a, b	20-30	<65			
EPFL	Lausanne, Switzerland	5	0.8	H, C, F	b, c	10	120			
HVS	Pretoria, South Africa (Used in several provinces)	8	1.5	H, C	a, b	14	20-200	5	0.5-0.69	
CAL-APT	Richmond, California, U.S.A	8	1.5	H, C	a, b, c	0-10	20-200	5		
LINTRACK	Delft, The Netherlands	16	2	H	a, b	10-20	15-100	1, 4	0.5-1.1	80
PTF	Crowthorne, United Kingdom	7	1	H		1-20	<100	3		
INDOT/PURDUE	West Lafayette, Indiana, U.S.A	6	0.3	H, C, F	a, b	8	13-182	5	0.63-0.95	
TxMLS	Texas U.S.A	12	0.6	N, X	abcdef	12-25	22.5-47.5	1, 2, 3, 4	0.64 (Var)	240
CEDEX	Madrid, España	2*67	0.8	N	b	8-58	44-100	2		

Donde;

CONTROL DE TEMPERATURA

- C Frío
- F Congelamiento
- H Calor
- N Ninguno
- X Control de temperatura

TIPO DE CONFIGURACIÓN DE EJE

- a Rueda sencilla
- b Rueda Dual
- c Medio eje sencillo
- d Medio eje tándem dual
- e Eje completo

- f Eje Múltiple

SUSPENSIÓN

- 1 Bolsa de aire
- 2 Muelles de acero
- 3 Impulsado
- 4 Remolcado
- 5 Hidráulica

RANGO DE CARGA

- XX Peso total sobre el vehículo
- XXX Placa circular

3.2.1.1 CRREL HVS Mk IV

Las instalaciones CRREL HVS (Cold Regions Research and Engineering Laboratory – Heavy Vehicle Simulator) están en Hanover, New Hampshire. Construido en 1997 con un costo de \$5 millones de dólares (Figura 33). La Tabla 27 muestra algunas características.



Figura 33 - Estructura de la Pista Lineal de CRREL-HVS (NCHRP, 2004).

Tabla 27 - Características de la Pista de Prueba de CRREL-HVS.

CONFIGURACIÓN DEL PAVIMENTO	
Medidas del área de prueba.	8 secciones de 7.6m de longitud, 6.4m de ancho y 2.4 m de profundidad. 4 secciones de 11.4m de longitud, 6.4m de ancho y 3.7m de profundidad.
Medida de la sección de prueba	6.10m de longitud efectiva y 1.5m de ancho
Ancho del rodadura	1.50m
Longitud de prueba	6.10m
CONDICIONES DE TRÁFICO	
Dispositivo de carga	HVS: 30 m × 4,9 m × 4,3 m (longitud x ancho x altura) bajo techo con 2,508 m ² de construcción.
Configuración de llanta	Medio Eje; Simple o dual para carreteras o simple para aeródromos
Carga sobre llanta	20kN a 100kN (2-10ton) sobre configuración simple o dual y hasta 200 kN sobre llantas de avión C141.
Suspensión	Bolsa de aire
Velocidad	13km/h
Repeticiones	700/h unidireccional
Propulsión de carga	Cable
Motor	Motor eléctrico simple.
Cubierta	Unidad móvil en 2,700m ² de construcción y condiciones ambientales controladas
CONTROL DE CLIMA	
Condiciones ambientales	Temperatura del aire, temperatura del pavimento, humedad en la subrasante (Nivel freático), drenaje controlado, y congelamiento.
INSTRUMENTACIÓN	
Dispositivos para medir la deformación, presión, desplazamiento, humedad de la subrasante, temperatura y succión del suelo.	

3.2.1.2 HVS-NORDIC

De acuerdo a Korkiala-Tanttu & Dawson (2007) se realizó una investigación con la finalidad de desarrollar un método analítico para calcular la deformación permanente. Para tal fin se utilizó un HVS (Heavy Vehicle Simulator) que se muestra en la Figura 34 la cual mide 23m de largo, 3.7m de ancho y 4.2m de altura. En la Tabla 28 se mencionan algunas características de las condiciones de tráfico a las que se someterían las secciones estructurales de los pavimentos.



Figura 34 – HVS-Nordic en el sitio de prueba.

Tabla 28 - Características de la Pista de Prueba de HVS-Nordic.

CONDICIONES DE TRÁFICO	
Configuración de llanta	Simple o dual
Carga sobre llanta	20kN a 110kN (2-11Ton)
Velocidad	15km/h
Repeticiones	25,000 por día.
Propulsión de carga	cadena
Motor	Diésel y eléctrico

La geometría de la zanja donde se construyeron las secciones del pavimento se muestra en la Figura 35.

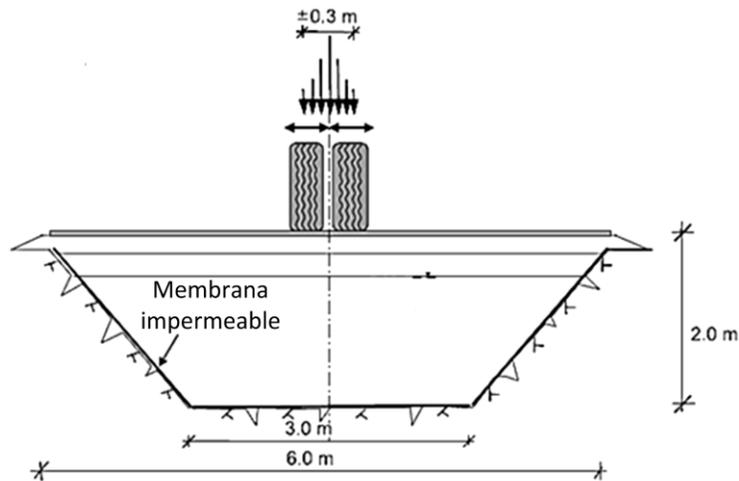


Figura 35 - Geometría de la zanja donde se construyeron las secciones del pavimento (Korkiala-Tanttu & Dawson, 2007).

En la misma publicación se indica la longitud efectiva de cada sección (Figura 36).

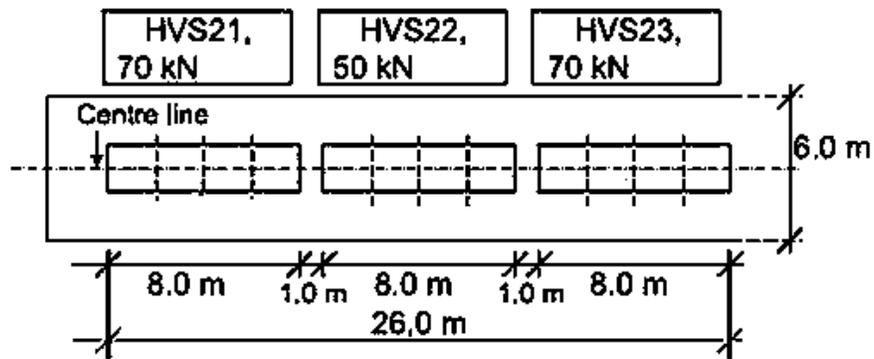


Figura 36 – Longitud de las secciones (Korkiala-Tanttu & Dawson, 2007).

3.2.1.3 FDOT HVS

El Departamento de Transporte de Florida hizo un estudio que tenía primordialmente la finalidad de evaluar y determinar un equipo APT que realizara una simulación más realista de los efectos de las cargas en los pavimentos en servicio, finalmente se cambió el enfoque a solo una evaluación del ahuellamiento en secciones.

Se utilizó un HVS (Heavy Vehicle Simulator) que tiene las siguientes dimensiones 75ft (22.5m aprox.) de longitud, 13ft (3.9m) de altura y 12ft (3.6m de ancho), mostrado en la Figura 37.



Figura 37 – HVS utilizado en FLORIDA DOT.

La prueba consistió en realizar 8 pistas de 150 x 12ft (45m x 1.50m aprox.) como se muestra en la Figura 38.



Figura 38 – Pistas de pavimento donde se realizarán la prueba.

La Figura 39 muestra las zanjas de sección rectangular donde se construyeron las secciones de pavimentos.



Figura 39 – Zanjas para sección de pavimento.

Las condiciones de tráfico son las mostradas en la Tabla 29.

Tabla 29 – Condiciones de tráfico de FLORIDA DOT.

CONDICIONES DE TRÁFICO	
Configuración de la llanta (Figura 40).	Good Year G165 super-single, carga máxima de 9000lb, presión de inflado 115psi (8.09 kg/cm ²)
Carga sobre llanta	7 – 45Kips (3 a 20ton aprox.)
Velocidad	8mph (12.87 km/h)
Repeticiones	14,500/día unidireccional y 29,000/día bidireccional



Figura 40 – Configuración de la llanta.

La carga se puede aplicar en una pista de 9.00m (30ft), sin embargo, el segmento de pista efectiva es de 6.00 (20ft) en los cuales los restantes 10ft se considera como zona de aceleración/desaceleración. 5ft (1.5m) a cada lado de la pista. La pista se muestra en la Figura 41.



Figura 41 – Pista de pavimento.

3.2.1.4 LANAMME

En América Latina ya se cuenta con el primer HVS (Figura 42) ubicado en Costa Rica. La estructura fue manufacturada en EUA con un costo de \$2.5 millones de dólares. El proyecto es financiado en su totalidad con fondos provenientes de la Ley N°8114 que otorga el 1% del impuesto a los combustibles. Tiene una altura de 3.28m, de largo 23.03 y de ancho 3.06m.



Figura 42 – HVS LANAMME UCR.

La Figura 43 muestra el laboratorio que fue construido para albergar al dispositivo HVS.

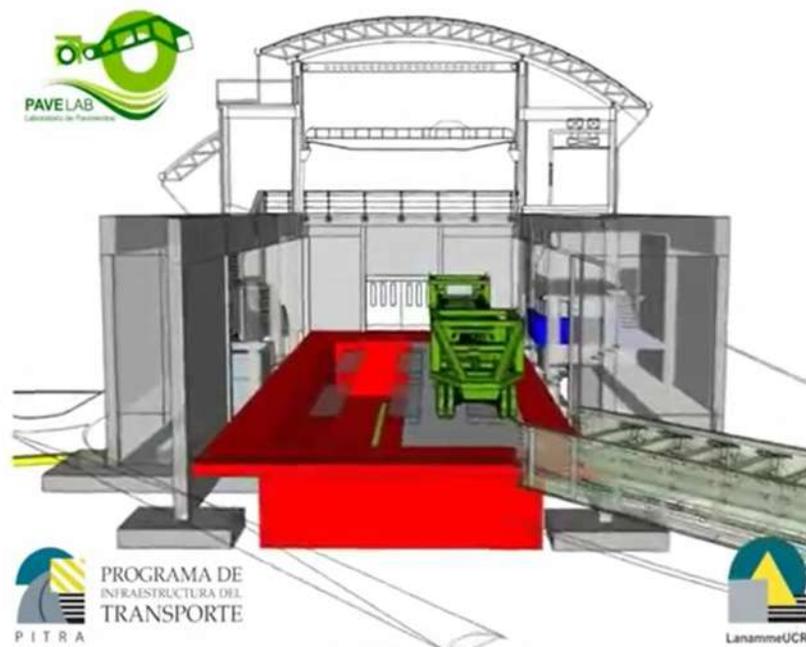


Figura 43 – Instalaciones de ubicación del HVS en LANAMME UCR.

3.2.2 PISTA DE PRUEBA DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM

México no ha sido la excepción en cuanto a la investigación en Pistas de Prueba, en 1970 se construyó una Pista circular en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Figura 44) que permitió verificar tendencias en condiciones controladas, a fin de establecer modelos matemáticos.



Figura 44 - Pista circular, Instituto de Ingeniería UNAM.

La pista, tiene 14m de diámetro y profundidad de 2.25m, de los cuales 1.50m es la profundidad efectiva para colocar la estructura del pavimento, la carga a la que estuvieron sujetas las estructuras de prueba fue de 10ton por eje aplicada mediante placas de acero (13) mostrada en la Figura 45 y Figura 46, el sistema de tráfico es por medio de eje dual (2) con llantas gemelas (3) y (4) tipo convencional para camión. La Figura 45 es un imagen creada en 1974, las Figura 46, Figura 47, y Figura 48 muestran fotografías recientes donde se ubican de igual manera las partes de la pista circular.

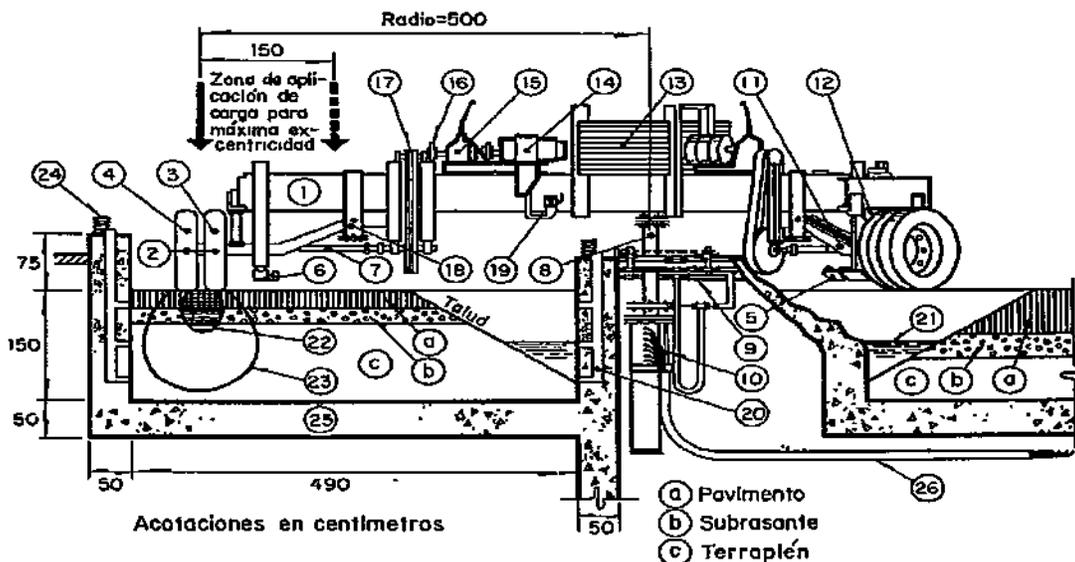


Figura 45 - Elementos que conforman la Pista Circular (Corro Caballero & Prado Ollervides, 1974).

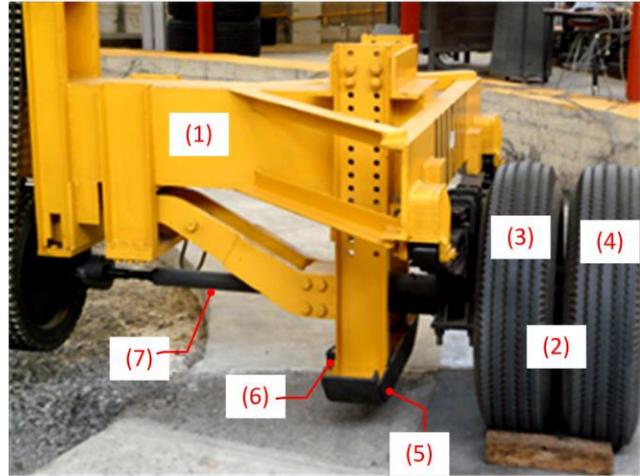


Figura 46 – Elementos que conforman la Pista circular UNAM.



Figura 47 - Elementos que conforman la Pista circular UNAM.



Figura 48 - Elementos que conforman la Pista circular UNAM.

Donde

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Marco metálico 2. Ruedas gemelas 10.00-20 3. Rueda motriz 4. Rueda libre 5. Patín 6. Microswitch de protección 7. Flecha motriz y juntas universales 8. Flecha central flotante 9. Mecanismo de excentricidad 10. Anillos razantes 11. Suspensión Independiente 12. Muelles 13. Placas de acero para lastre | <ol style="list-style-type: none"> 14. Motor de 40HP de velocidad variable 15. Caja de 5 velocidades 16. Cople flexible 17. Cadena y catarinas 18. Articulación y chumacera 19. Cilindro maestro para frenos hidráulicos 20. Tubos de instrumentación 21. Control de nivel freático 22. Bulbo de presión para placa de 30cm 23. Bulbo de presión para placa de 75cm 24. Anclas para pruebas estáticas 25. Estructura de concreto 26. Túnel |
|--|---|

Está proyectada para ensayar tres secciones diferentes simultáneamente a velocidad de operación de entre 4 y 40km/h, aún cuando lo normal es 10km/h. Se ensayaron 18 secciones estructurales (6 anillos de prueba), constituidos con capa de base protegida superficialmente con carpeta de un riego, sobre subrasantes y terraplenes de un mismo material arcillo-limoso con diferentes características de resistencia, obtenidas al variar el grado de compactación y las condiciones de prueba. En la Figura 49 se muestra el programa experimental llevada a cabo por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Las condiciones de prueba que variaron fueron; construcción, impermeabilización de los modelos y saturación a fin de establecer el nivel freático a 60cm de profundidad bajo la superficie de rodamiento.

Anillo	Sección	Espesores, cm			Grado de compactación (G), En porcentaje			Condición de prueba	VRS			ΣL a la falla (ejes de 8.2ton)		
		Carpeta	Base	Subrasante	Terraplén	Base	Subrasante		Terraplén	Base I	Subrasante II		Terraplén II	
1	1	Un riego; Di=0	15	20	115	95<G<100 (Pórter)	95<G<100 (Próctor)	95<G<100 (Próctor)	La de construcción	w=W _{opt}	141	14*	10	25 000
	2			30	105						141	17*	15	102 000
	3			40	95						141	18*	8	155 000
3	4		20	20	110						191	27*	15	1 000 000 III
	5			30	100						118	34*	16	2 800 000 III
	6			40	90						147	30*	16	5 000 000 III
4	7		25	20	105						141	29*	22	7 350 000 III
	8			30	95						141	26*	14	3 500 000 III
	9			40	85						141	22*	11	9 100 000 III
2 Sat	10		20	20	110				132	9	2*	105		
	11			30	100				173	8	1*	10		
	12			40	90				139	9	1*	85		
5 Sat	13		20	20	110				152	40	1*	5		
	14			30	100				140	40	1*	10		
	15			40	90				141	40	0.8*	20		
6 Sat	16		50	100	-				133	9.7* (z=60)		310 000 000 III		
	17		60	90	-				133	8.0* (z=74)		2 750 000 III		
	18		70	80	-				133	8.0* (z=70)		70 000 000 III		

- I Prueba de calidad; muestra compacta con el método Pórter y ensayada después de ser saturada.
- II Prueba de valor relativo de soporte en el lugar después de terminada la prueba de tránsito. *) Valor crítico de acuerdo con el concepto de resistencia relativa.
- III Regresión parabólica de las gráficas de comportamiento logp-logΣL, para una calificación de rechazo p=2.5

NOTA Para fines de análisis se considera que el coeficiente de variación en espesores es de 10 por ciento y en VRS es de 30 por ciento

Figura 49 - Programa experimental (1971-1972) realizado en la pista circular (Corro Caballero & Prado Ollervides, 1974).

Los espesores de los pavimentos ensayados cubren el intervalo mostrado en la Tabla 30.

Tabla 30 - Espesores ensayados (Corro Caballero & Prado Ollervides, 1974).

CAPA	ESPESOR
Pavimentos	Espesores de 15 a 70cm
Capa subrasante	Espesores de 20 a 100cm
Terraplén	Complemento hasta alcanzar la profundidad de 1.50cm

La calidad de los materiales empleados en las pruebas son las mostradas en la Tabla 31.

Tabla 31 - Materiales empleados para las pruebas (Corro Caballero & Prado Ollervides, 1974).

CAPA	MATERIAL	DESCRIPCIÓN
Terracerías	Limos de Baja plasticidad (ML-CL)	De mala calidad, cerca del límite de rechazo de acuerdo a SOP Expansión del 3.7% VRS de 8%
Subrasante	Arena Arcillosa (SC)	Compactada al 95 y 100% de la Prueba Proctor. Es un tepetate de buena calidad con: VRS Porter saturado de 96% Expansión del 0.1% VRS Saturado en el lugar 40%
Base	Grava arcillosa (GC)	VRS porter saturada de 145%
Base	Mezcla de Grava limosa-Grava arcillosa (GM-GC)	VRS porter saturada de 133%
Carpeta de Riego	Material pétreo 3A y Asfalto rebajado FR-3	
Impregnación	Asfalto rebajado FM-0	

Los grados de compactación se establecieron de acuerdo con la práctica usual en caminos de bajo volumen de tránsito (Tabla 32).

Tabla 32 – Grado de compactación (Corro Caballero & Prado Ollervides, 1974).

CAPA	GRADO DE COMPACTACIÓN EN %	PRUEBA
Base	95-100	Pórter
Subrasante	95-100	Próctor Estándar
Cuerpo del terraplén	85-90	Próctor Estándar

Todos los modelos ensayados en la pista circular fueron llevados a la falla o hasta 1×10^6 ejes equivalentes de aplicación con ejes sencillos equivalentes de 8.2ton. La Figura 50 muestra los resultados de las 18 secciones probadas en la pista circular.

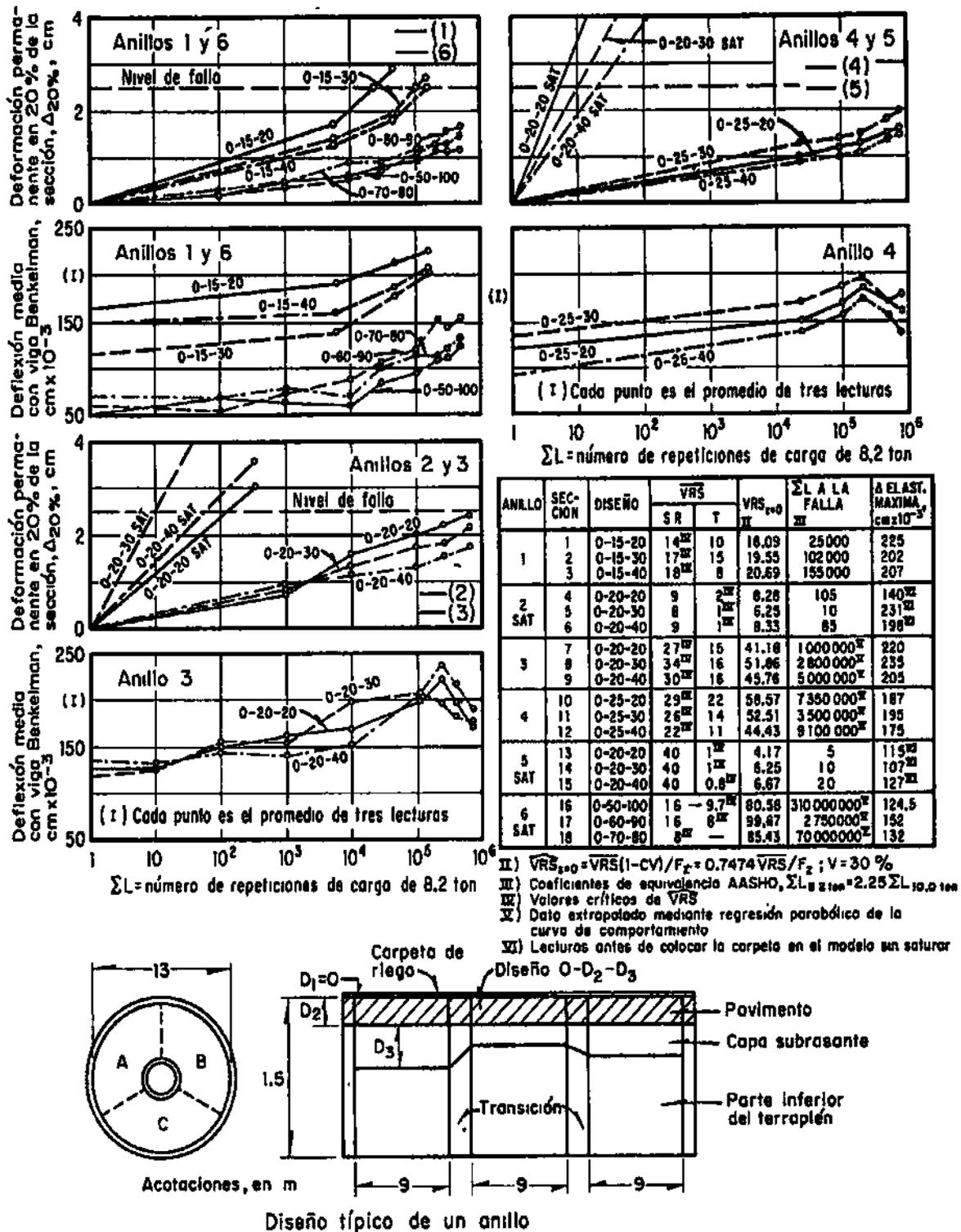


Figura 50 - Resultado experimentales de la pista circular (Corro Caballero & Prado Ollervides, 1974).

Esta información experimental fundamentó el método de diseño desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

3.2.2.1 INSTRUCTIVO 1981 –DISPAV 5

En la publicación de Corro Caballero & Prado Ollervides (1974) se describen las hipótesis del criterio de diseño desarrolladas para el diseño de pavimentos en el Método de la UNAM.

- Estructura de la carretera. Se considera que la carretera es un sistema multicapa de resistencia relativa uniforme. Si no existe esa condición de uniformidad, se supone que la capa más débil determina la resistencia del Sistema.
- Características de los materiales. Se establece que las capas están constituidas por suelos finos altamente cohesivos, caracterizados por el valor relativo de soporte crítico en el lugar VRS_z .
- Caracterización del tránsito. Los ejes equivalentes convencionales, representados por dos conjuntos de ruedas dobles de 4.1 ton de peso y sujetas a presión de inflado de 5 a 6kg/cm², se constituyen por placas flexibles de 30cm de diámetro sujetas al mismo peso, las cuales producen esfuerzos verticales uniformes de 5.8kg/cm² en condiciones estáticas.
- Mecanismos de falla. Para condiciones estáticas, la estabilidad del sistema multicapa puede analizarse utilizando los conceptos de capacidad de carga en cimentaciones.
- Ecuaciones de diseño. El método establece la hipótesis de que hay una relación lineal entre el logaritmo de la resistencia última y el del número de aplicaciones equivalentes a la falla.

La ecuación general (10) es la resultante:

$$VRS_z = VRS_0 [A]^{\log \Sigma L} [F_z] \quad (10)$$

Dónde;

VRS_z = Valor Relativo de Soporte requerido a la profundidad z.

VRS_0 = Constante experimental igual al Valor Relativo de Soporte en la superficie de un material que falla con una aplicación de carga equivalente de 8.2 ton.

A = Constante experimental.

ΣL = Número de aplicaciones equivalentes de 8.2ton a la falla

$$F_z = 1 - \frac{z^3}{(15^2 + z^2)^{3/2}} \quad \text{Coeficiente de Boussinesq.}$$

z = Profundidad

Coeficientes de daño. Indican el daño en relación al eje equivalente estándar de los vehículos a diferentes presiones de inflado y por lo tanto distintas áreas circulares de sus neumáticos. Los factores mayores a la unidad producen mayor daño al pavimento (Coria Gutiérrez, 2012).

Para 1981 se publica el Instructivo para Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles para Carreteras en el informe de Corro, Magallanes, & Prado (1981).

Para 1999 se publica el Instructivo de diseño por medio del DISPAV 5 versión 2.0 por Corro & Prado (1999) en donde se incluye el diseño de Carreteras de Altas especificaciones e información actualizada sobre el comportamiento por fatiga de las carreteras de nuestro país. En el DISPAV 5 es un programa que permiten el cálculo de secciones estructurales de hasta cinco capas, incorpora el cálculo de la deformación permanente y el cálculo por fatiga. Se basa en las hipótesis de diseño mencionadas anteriormente. El programa incorpora el concepto mecanista para la obtención de las deformaciones unitarias de fatiga.

3.2.3 *INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE*

En nuestros días aún existe el interés por estas pistas de prueba, un ejemplo de ello es la Pista de Prueba Acelerada que se pretende implementar en las instalaciones del Instituto Mexicano del Transporte en Querétaro, México denominado LEAP (Laboratorio de Ensayes Acelerados en Pavimentos) según el artículo publicado en Construcción y Tecnología en Concreto (2010), cuyo objetivo es generar el conocimiento y la tecnología que permita con prontitud, mejorar el desempeño de los pavimentos y aumentar la durabilidad a través de las siguientes acciones;

- Evaluación, validación y mejora de los Diseños Estructurales
- Estudio de la Interacción vehículo-pavimento-medio ambiente
- Evaluación de nuevos materiales
- Mejorar la modelación en Ingeniería de los Pavimentos

La implementación contempla dos pistas de prueba con las siguientes características;

- 20m de Pista Efectiva
- Espacios con respectivas rampas de acceso
- Ancho de un carril completo sobre el que correría un cuarto del vehículo equivalente a un semieje con todas sus llantas y con carga variable.
- Se contempla la aplicación por medios electromagnéticos simulando el paso de los vehículos con una llanta o dos paralelas, con una capacidad de carga individual de 3,350kg por llanta. Destaca la posibilidad de que la carga se aplique solo en un sentido del recorrido o en ambos.
- La velocidad debe ser controlable y tan alta como sea posible.

El sistema deberá estar completamente instrumentado para medir la velocidad de desplazamiento a lo largo del tramo de 20m, medir el valor real de la carga aplicada, medir el número de ciclos efectuados, entre otros. La instrumentación deberá garantizar que la información sea almacenada en una base de datos con memoria suficiente para almacenar variables y sensores por lo

menos los 6 meses que duraría la prueba, debe tener la capacidad de generar reportes de esfuerzos, desplazamientos, humedad y temperatura.

3.3 *CONCLUSIÓN*

De esta sección concluimos que para el diseño de la pista de prueba se deberán considerar varios factores que se dividirán en tres secciones, la primera sección se referirá a las condiciones de tráfico, la segunda a la configuración del pavimento y la última a las condiciones ambientales.

En las condiciones de tráfico se consideran los siguientes factores, que son los más importantes y que están incluidos en la mayoría de las pistas de prueba que se encuentran actualmente en operación.

- Carga
- Llantas
- Presión de inflado
- Suspensión
- Velocidad
- Desplazamiento lateral

En la configuración del pavimento se consideran los siguientes factores;

- Longitud total de la pista lineal
- Longitud de pista efectiva
- Zona de aceleración y desaceleración
- Geometría de la sección transversal
- Profundidad de la zanja en donde se construirá el pavimento

En las condiciones ambientales tenemos;

- Temperatura ambiente
- Nivel freático
- Humedad

En la Tabla 33 y Tabla 34 se presenta el resumen de la configuración de pavimentos y condiciones de tráfico respectivamente que están manejando algunas pistas lineales.

Tabla 33 – Configuración de pavimento de algunas pistas lineales.

CONFIGURACIÓN DEL PAVIMENTO							
NOMBRE	Área de prueba				Sección de prueba		
	Cant.	Long. (m)	Ancho (m)	Prof. de Zanja (m)	Long. efectiva (m)	Ancho (m)	Prof. de Zanja (m)
CRREL HVS	8.0	7.6	6.4	2.4	6.10	1.50	2.4 y 3.7
	4.0	11.4	6.4	3.7			
K-ATL	418m ²				9.70	1.80	1.80
					6.10	1.80	1.80
OHIO APLF	--	13.70	11.60	2.40	13.70	1.80	2.40
HVS-NORDIC	3	8.00	6.00	2.00	8.00	3.00	2.00

Tabla 34 – Condiciones de tráfico de algunas pista lineales.

CONDICIONES DE TRÁFICO				
Nombre	Velocidad	Carga	Energía	Repeticiones
	km/h	kN		
CRREL HVS	13	20 -100	Motor Eléctrico	700/h unidireccional
K-ATL	11	178	Eléctrico	313/h unidireccional
				626/h bidireccional
OHIO APLF	2-8	22 -134	Motor Eléctrico	250/h unidireccional
				500/h bidireccional
HVS-NORDIC	15	20-110	Diésel o Eléctrico	25,000 por día
ARRB	20	40-90	Eléctrico	----

4. INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación consiste en colocar dispositivos para medir la respuesta y el desempeño de estructuras o materiales, y de ésta manera poder caracterizarlos. Para realizar una instrumentación primero debemos identificar los siguientes aspectos.

- Tipo de pavimento a monitorear
- Respuestas que se pretende medir
- Tipo y configuración de carga
- Factores ambientales que influyen en el comportamiento mecánico

La instrumentación requiere además de la adecuada selección de los dispositivos que realizarán las mediciones. De tal manera que debemos considerar los siguientes puntos.

- Selección del dispositivo de acuerdo a la habilidad de medir la respuesta deseada
- La factibilidad económica
- La compatibilidad con el resto del equipo
- Disponibilidad de equipo
- Facilidad de instalación
- Durabilidad de los sensores

Además de esto, una vez elegidos los dispositivos se verificará su desempeño para corroborar la confiabilidad para su utilización, por la razón de que pueden sufrir daño por las siguientes causas.

- Daño durante su fabricación
- Daño durante la construcción del pavimento
- Daño durante su vida útil de servicio una vez instalado

Estos daños pueden aminorarse diseñando procesos adecuados de instalación que garantice la buena ubicación de los sensores, además del uso de instrumentos de alta calidad. Las respuestas a medir con frecuencia se dividen en dos grupos, solicitaciones mecánicas y solicitaciones ambientales. Dentro de las solicitaciones mecánicas se encuentran;

- Deformaciones; Relacionado con la fatiga y el ahuellamiento.
- Esfuerzos; Relacionado con la influencia de la aplicación de las cargas en las capas que forman el pavimento
- Deflexiones; Permite cuantificar las propiedades in-situ de los materiales

En las solicitaciones ambientales encontramos;

- Precipitación; Genera presión de poro al interior de los vacíos
- Temperatura; Permite conocer la respuesta o comportamiento viscoelástico de los materiales in-situ
- Humedad; Permite cuantificar la capacidad de drenaje de la estructura

La instrumentación en pistas de prueba ha sido un factor de suma importancia en el desarrollo de los métodos de diseño y los avances tecnológicos han estado facilitando este campo de estudio. Recientemente la NCAT (National Center for Asphalt Technology) ha realizado investigaciones cuyos resultados ha publicado en los siguientes artículos:

NCAT Report 04-01 “DESIGN AND INSTRUMENTATION OF THE STRUCTURAL PAVEMENT EXPERIMENT AT THE NCAT TEST TRACK”, Abril 2004

NCAT Report 09-01 “DESIGN, CONSTRUCTION AND INSTRUMENTATION OF THE 2006 TEST TRACK STRUCTURAL STUDY”, Febrero 2009.

Estas publicaciones detallan las características de la pista de prueba ubicada en sus instalaciones, las secciones estructurales de pavimentos que están utilizando en los diferentes tramos de estudio, el tipo de instrumentación empleado y los detalles de los procesos de instalación de la instrumentación. De igual manera se publicó un artículo en Febrero de 2009, “A Synthesis of Practical and Appropriate Instrumentation Use for Accelerated Pavement Testing in the United States”, en la cual mencionan a siete instituciones (Tabla 35) ubicadas en Estados Unidos que estuvieron dispuestas a compartir información sobre la instrumentación utilizada en su investigación.

Tabla 35 - Instituciones que proporcionaron la información de su investigación.

INSTITUCIONES	TIPO
NCAT Pavement Test Track	Circuito cerrado
Ohio Reseach Institute	HVS
Florida DOT	HVS
Lousiana Transportation Research Center	ALF
MnRoad	Pista a Gran Escala
Kansas State	HVS
CalTrans	HVS

En la Tabla 36 se indican con una X las respuestas que midieron en cada una de las siete instituciones, como son; la deformación horizontal, deformación vertical, presión, temperatura, y humedad.

Tabla 36 - Respuestas medidas en los pavimentos.

	DEFORMACIÓN HORIZONTAL	DEFORMACIÓN VERTICAL	PRESIÓN	TEMPERATURA	HUMEDAD
NCAT Pavement Test Track	X	X	X	X	X
Ohio Research Institute	X		X	X	X
Florida DOT	X	X	X	X	
MnRoad	X		X	X	X
Louisiana Transportation Research Center	X		X	X	X
Kansas State	X	X	X	X	X
Caltrans				X	X

En la Tabla 37 se indica cual fue la marca de fabricación del sensor utilizada para la medición de la deformación en la carpeta asfáltica en cada una de las instalaciones.

Tabla 37 - Instrumentación utilizada para medir la deformación en el asfalto ASG.

	KYOWA	DYNATEST	TOKYO SOKKI	CTL	TMK	VISHAY
Ohio Research Institute		X				
Florida DOT			X			X
NCAT Pavement Test Track				X		
MnRoad		X	X			
Kansas State					X	
Louisiana Transportation Research Center			X			
Smart Road	X	X				

En la Tabla 38 encontramos las marcas de fabricación utilizadas para la medición de la presión vertical en las capas granulares.

Tabla 38 - Instrumentación utilizada para medir la Presión Vertical en las capas granulares.

	GEOKON	RST	DYNATEST
Ohio Research Institute	X		
Florida DOT	X	X	
NCAT Pavement Test Track	X		
MnRoad	X		X
Kansas State	X		
Louisiana Transportation Research Center	X		

Finalmente, en la Tabla 39 el tipo de sensor utilizado para la medición de la temperatura en las capas del pavimento.

Tabla 39 - Instrumentación utilizada para medir la temperatura.

	TERMISTOR	TERMOPAR	TEMPERATURA BUTTON
Ohio Research Institute	X	X	
Florida DOT		X	
NCAT Pavement Test Track	X		
Caltrans		X	X
MnRoad	X	X	
Kansas State		X	
Louisiana Transportation Research Center		X	

Como uno de los temas con más relevancia en este trabajo es la instrumentación de una pista de prueba, haremos énfasis en algunas instituciones (que se mencionan en los siguientes apartados) que han realizado un trabajo lo bastante extenso y que nos servirán de guía para la instrumentación de la Pista de Prueba que se propondrá en esta tesis.

4.1 MINNESOTA ROAD (MnRoad)

Según el informe de Burnham & Pirkl (1997) en Minnesota se diseñaba con una combinación del método AASHTO y la experiencia en la construcción de pavimentos propia de ese estado. Sin embargo, con la introducción de nuevos métodos de construcción y nuevos materiales utilizados, así como el incremento significativo del volumen y cargas del tráfico, comenzó la incertidumbre en su

habilidad para predecir el comportamiento de los pavimentos, ante esas circunstancias se reconoce la necesidad de implementar nuevos métodos, la Mn/DOT (Departamento de Transporte de Minnesota) en cooperación con la Universidad de Minnesota decidió a finales de 1980 desarrollar un método de diseño Empírico-Mecanicista. Esta decisión fue tomada agregando que a esa fecha aún se diseñaba con los métodos obtenidos de AASHTO, desafortunadamente muchos resultados no podían ser extrapolados y solo eran válidos para las condiciones climáticas de Illinois.

Para comenzar con la experimentación se construyen dos pistas localizados paralelamente a la interestatal 94 (Figura 51). El primero es de 5.7km carretera interestatal sometido a condiciones normales de servicio con promedio de 28,500 vehículos al día, los camiones representan el 12.7% del tráfico total. La segunda es una de 4.0km de circuito cerrado el cual está sometido a bajo volumen de tráfico controlado, circulando por ese tramo un tractor-semirremolque de 80,000lb con 18 ruedas y 5-ejes (Figura 52) para simular las condiciones de los caminos rurales.



Figura 51 – Instalaciones de MnRoad (MnDOT, 2000-2012)

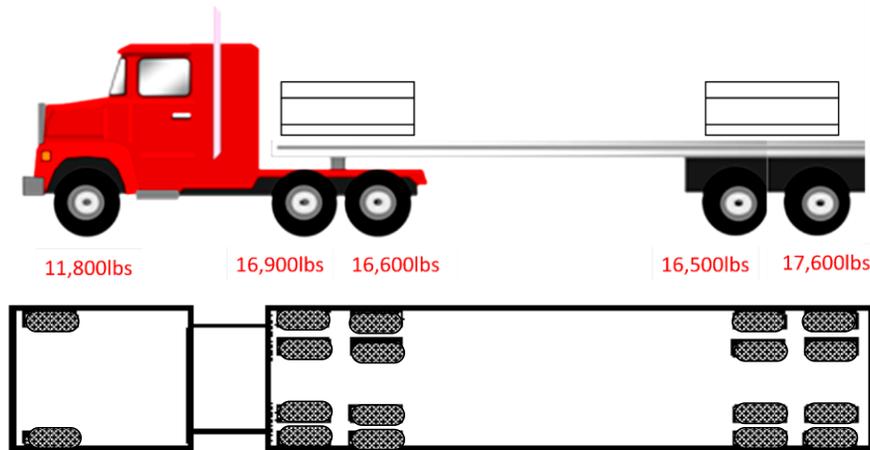


Figura 52 – Configuración de tractocamión-semiremolque.

Las pistas se dividieron en 40 segmentos (cells) de 150m aprox. cada uno. Cada cell tuvo variaciones en su capa subrasante, agregados en la base, material en la superficie y método de drenaje, además de que cada uno fue debidamente instrumentado. Los cells se dividieron en 3 grupos.

Cell	Periodo de diseño (años)	Condiciones de tráfico
5	5	Normales de servicio con tráfico pesado en Pista Lineal
14	10	Normales de servicio con tráfico pesado en Pista Lineal
17	3	Condiciones controladas con tráfico ligero en Circuito Cerrado

Con respecto al acabado en superficie, 14 fueron de concreto, 22 de superficie asfáltica y 4 de agregado. La construcción de las instalaciones comenzó en 1990. La instrumentación electrónica y la pavimentación se realizó entre 1992 y 1993, finalmente se abrió al tráfico en agosto de 1994. Para el 2007 la mayoría de los segmentos han cumplido con su vida útil y han sido reconstruidas para nuevas investigaciones según Akkari (2012), entre ellos los cells N° 5 y 6 de los cuales reseña detalladamente la instrumentación asignada. Los cells N°5 y N°6 fueron equipados con instrumentación para monitorear temperatura, humedad y deformación unitaria. Debido a que la capa de rodadura de estas secciones era de concreto, se utilizó equipo especial para medir la deformación en concreto, por lo cual no será explicada ampliamente. Para medir la humedad y la temperatura se utilizaron termopares que fueron colocados a diferentes profundidades. Hay dos categorías para la instrumentación de las estructuras de los pavimentos, una de ellas son los sensores de respuesta de carga ante el tráfico y la segunda serán los sensores de medición de condiciones ambientales. A continuación se mencionan los dispositivos que se están utilizando actualmente en la MnRoad cuya información se obtuvo de MnDOT (2000-2012).

4.1.1.1 SENSORES PARA LA RESPUESTA ANTE CARGA POR TRÁFICO

Dentro de los sensores de respuesta de carga por tráfico se encuentra el Medidor de Presión de Poro Dinámico (Figura 53) que mide rápidamente el cambio positivo de la presión de poro sobre descongelación sobresaturada en la base y capas de suelo sujetas a condiciones dinámicas de carga. Es manufacturado por Geokon.



Figura 53 – Sensor de respuesta ante carga dinámica (MnDOT, 2000-2012)

De igual manera tenemos el Sensor de Presión Dinámica (Figura 54) que mide la presión vertical en base y subrasante sujetos a carga dinámica. El sensor es embebido dentro de la base y subrasante cerca del camino de rodadura ya sea en pavimentos de asfalto o concreto hidráulico. Es manufacturado por Kulite.

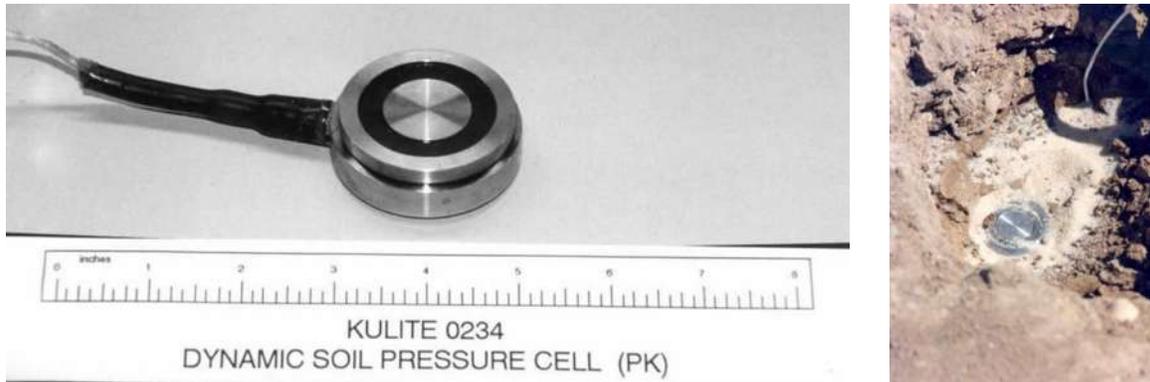


Figura 54 – Sensor de presión dinámica para suelos (MnDOT, 2000-2012)

Por último tenemos el Sensor de Presión Dinámica de la Figura 55 que mide igualmente la presión vertical en base y subrasante. El sensor es embebido dentro de la base y subrasante cerca el camino de rodadura ya sea en pavimentos asfálticos o de concreto. Es manufacturado por Geokon.



Figura 55 – Sensor de presión dinámica (MnDOT, 2000-2012)

4.1.1.2 SENSORES PARA CONDICIONES AMBIENTALES

Para la medición de las condiciones ambientales mencionaremos al Sensor de medición del Nivel Freático (Figura 56) que originalmente era un tubo de PVC envuelto en una tela.



Figura 56 – Sensor para medir el nivel freático (MnDOT, 2000-2012).

El Sensor de Presión Estática mide la presión ya sea horizontal o vertical en la base y subrasante causada por cargas ambientales (humedad, temperatura, asentamiento), es manufacturada por Geokon.



Figura 57 – Sensor de presión estática (MnDOT, 2000-2012).

De igual manera encontramos la medición de la cantidad de agua que drena por una salida en el borde el cual fue diseñado en MnRoad y posteriormente mandado a construir (Figura 58).



Figura 58 – Mecanismo para obtener la cantidad de agua drenada (MnDOT, 2000-2012)

El Termopar es un sensor que mide la temperatura, el dato es automáticamente recopilado cada 15min, manufacturado por Omega Type-T thermocouple wire. El sensor es típicamente colocado verticalmente (Figura 59), este método de montaje permite obtener perfiles de temperatura.



Figura 59 – Termopar (MnDOT, 2000-2012)

El Time Domain Reflectometer (TDR) de la Figura 60 mide el contenido de humedad en los materiales de la base y de la subrasante. Los datos fueron colectados manualmente de 1993 a 1998, pero ahora es de manera automática.



Figura 60 – Time Domain Reflectometer (MnDOT, 2000-2012)

4.2 NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY (NCAT)

Las instalaciones de NCAT se encuentran localizadas en Auburn, Alabama, EU y fue construida en el año 2000. La Tabla 40 menciona algunas características que conforman la pista.

Tabla 40 - Características de la pista de NCAT.

CONFIGURACIÓN DEL PAVIMENTO	
Longitud de Pista	2,700 m pista ovalada (Figura 61 y Figura 62) con un ancho de calzada de 3.40m
Seccionamiento de la pista	La pista se seccionó en 46 partes de 3.4 x 61m aprox.
Medida de la sección de prueba	2 secciones en tangente de 12km cada uno ligados a través de secciones en curva en ambos lados
Ancho del rodadura	Entre 1.2 a 1.3m de trayectoria en la cual la rueda del camión puede deambular.
CONDICIONES DE TRÁFICO	
Dispositivo de carga	Camión convencional tractor-remolque (Figura 63)
Configuración de carga	Tractor y triple remolque (eje simple +eje tándem+5 ejes individuales)
Carga en la ruedas	$53.4\text{kN} + (89\text{kN} \times 7) = 676.4 \text{ kN}$ (Figura 63)
Velocidad de llanta	76km/h
CONTROL DE CLIMA	
Condiciones ambientales	Se hicieron continuamente mediciones de la temperatura del aire, del pavimento, de las precipitaciones y la humedad relativa fue monitoreada continuamente.

El objetivo principal de este proyecto fue identificar el desempeño en campo de los pavimentos, así como identificar la sección que implicaba el menor costo de mantenimiento en su ciclo de vida proyectado a través de la aplicación de tráfico de camiones (10 millones de ESALs) por un periodo de 2 años.



Figura 61 - Pista de prueba de NCAT ubicado en Auburn, Alabama, EUA (HOT-MIX MAGAZINE, 2013).



Figura 62 - Mapa de las Instalaciones de NCAT (Baja SAE Auburn, 2012).

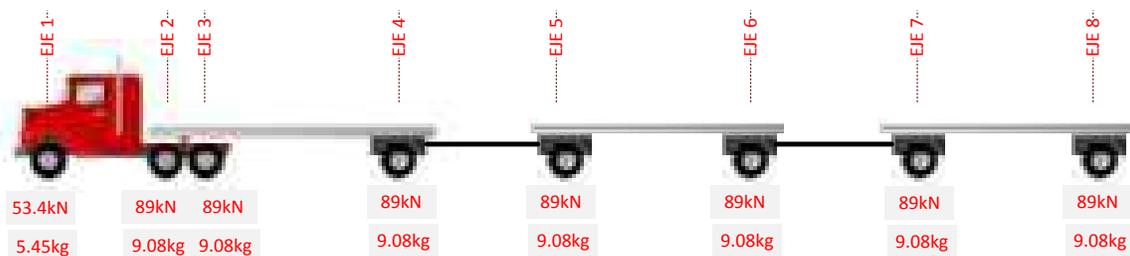


Figura 63 – Configuración del camión utilizado en NCAT.

En el año 2003 ocho secciones fueron remplazadas con la finalidad de hacer una experimentación estructural y reunir información que pudiera ser útil en la implementación del nuevo método MEPDG (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide). Como el estudio en las ocho

secciones no era suficiente para considerar todas las posibilidades de configuración de pavimentos, se decidió concentrarse principalmente en el efecto de los espesores de carpetas asfálticas y mezclas modificadas y relacionarlos con el rendimiento estructural (fatiga y ahuellamiento).

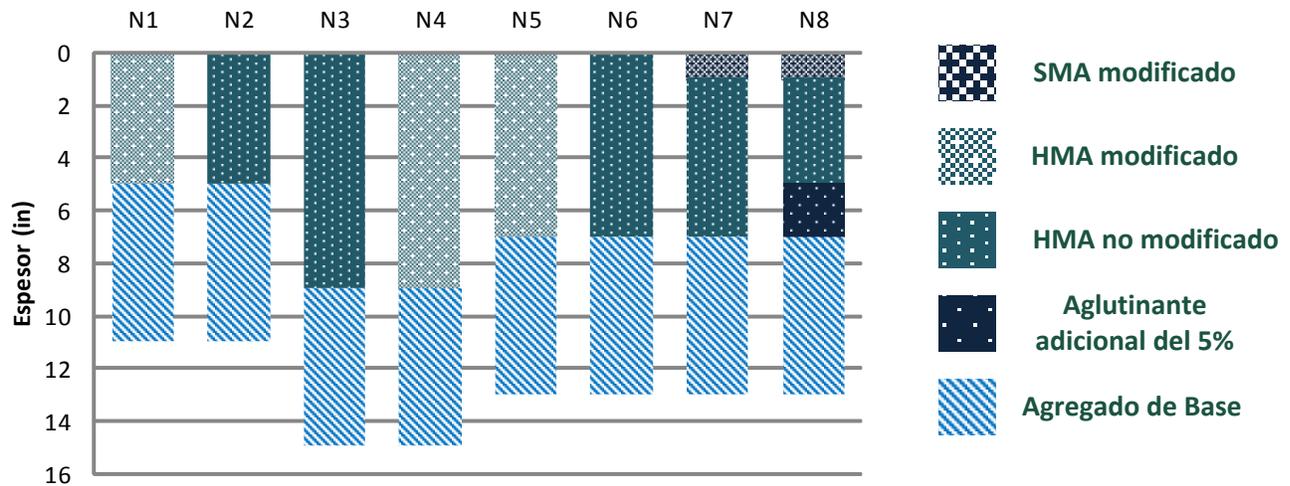


Figura 64 – Configuraciones de los pavimentos, imagen obtenida de (Timm, Priest, & McEwen, 2004).

Para la instrumentación de estas secciones se enfocaron en la medición de cuatro respuestas.

- Deformación horizontal de la mezcla asfáltica
- Esfuerzo vertical en la base y subrasante
- Humedad en la subrasante
- Temperatura

Para elegir los dispositivos a utilizar la NCAT se basó en las consideraciones que se mencionaran en los siguientes incisos.

4.2.1 DEFORMACIÓN EN ASFALTOS

Conocido como ASG (Asphalt Strain Gauge) por sus siglas en inglés, es un dispositivo para medir la deformación dinámica en la parte inferior de la capa de concreto asfáltico ante las sollicitaciones por tráfico (Figura 65). La medición de la deformación ha sido muy importante porque está relacionada a la falla por fatiga de la carpeta asfáltica. Para la elección de éste dispositivo, se basaron en la experiencia sobre instrumentación de la MnRoad y de la SmartRoad, por lo que vendedores como Dynatest y Tokyo Sokki fueron evaluados. Sin embargo, el tiempo de envío de los sensores, estaban fuera de la calendarización. Eligieron utilizar el sensor manufacturado por CTL (Construction Technologies Laboratories) por su precio razonable, por el corto tiempo de envío y por la experiencia de la empresa en instrumentación de pavimentos flexibles. El dispositivo se coloca en la parte inferior de la carpeta asfáltica.



Figura 65 - Dispositivo para medir la deformación de la carpeta asfáltica manufacturado por Construction Technologies Laboratories (CTL) (Timm, Priest, & McEwen, 2004).

4.2.2 ESFUERZO VERTICAL

Se utilizó un dispositivo llamado ECP (Earth Cell Pressure) por sus siglas en inglés cuyo propósito es medir la Presión Vertical Dinámica generada por el movimiento de los vehículos (Figura 66). Fueron evaluados vendedores como Kulite, Tokyo Sokki y Geokon. Geokon fue seleccionado en base en su amplia experiencia en instrumentación de pavimentos así como por el rendimiento obtenido en las instalaciones de MnRoad. Se coloca en la parte superior de cada capa granular (base y subrasante).



Figura 66 - Earth Cell Pressure marca Geokon (Timm, Priest, & McEwen, 2004).

4.2.3 HUMEDAD

En las primeras investigaciones realizadas en NCAT se utilizó la TDR (Time Domain Reflectometry) para medir la humedad con muy buenos resultados, por lo que se decidió seguir utilizando el mismo dispositivo. Este dispositivo fue suministrado por Campbell-Scientific. Se coloca en la capa de subrasante. El dispositivo se muestra en la Figura 67.



Figura 67 - TDR (Time Domain Reflectometry) (Timm, Priest, & McEwen, 2004).

4.2.4 TEMPERATURA

Al igual que con el dispositivo para medir humedad, en los primeros experimentos en la NCAT se utilizó el Termistor para medir la Temperatura. Se colocaron varios dispositivos a diferentes profundidades 5cm, 10cm y 25cm con respecto a la superficie del pavimento como se muestra en la Figura 68.

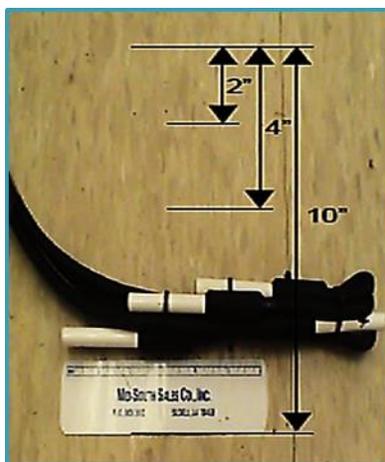


Figura 68 – Termistor (Timm, Priest, & McEwen, 2004).

4.2.5 ESQUEMA DE UBICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

La formación de los dispositivos puede ser muy simple como ubicarlos en línea recta o tan complicada dependiendo de las respuestas esperadas y del propósito del estudio. Por ejemplo, la Figura 69 muestra el esquema de ubicación de dos dispositivos fundamentales en esta investigación, se observa que los medidores de deformación del asfalto están colocados en la parte inferior de la carpeta asfáltica en el entendido que el agrietamiento en dicha capa comienza de la parte inferior hacia la parte superior, de igual manera las celdas de presión se colocarán en la parte superior de cada capa granular, en la imagen se colocaron dos dispositivos una arriba de la capa de subrasante y la segunda arriba de la capa de base. Cuando se decide cual va a ser la ubicación de los dispositivos se deben de colocar simétricamente, esto para tomar precauciones sobre las posibles fallas durante la instalación o lectura

errónea, si algún dispositivo falla el otro medirá teóricamente la misma respuesta y se puede checar la funcionalidad para asegurar la confiabilidad en las lecturas.

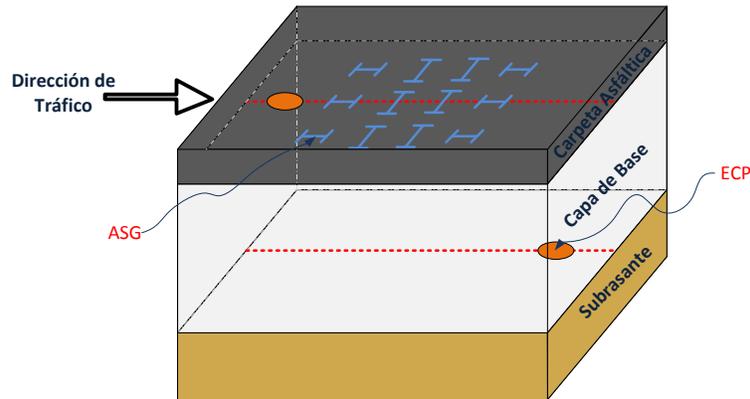


Figura 69 - Ubicación de Sensores

4.3 ANÁLISIS SEMIAUTOMÁTICO DEL AGRIETAMIENTO PARA EL HVS

Como se mencionó anteriormente, Florida DOT adquirió un HVS con el cual se han enfocado en el desempeño de los pavimentos en cuanto a agrietamiento. En 2005 desarrolló un sistema de envejecimiento acelerado para pavimentos flexibles, una vez que las secciones son sometidas a prueba se tiene que documentar el inicio y desarrollo del agrietamiento por lo cual se adecuó un sistema de cámara digital al dispositivo HVS el cual se encarga de coleccionar las imágenes cuando el sistema de tráfico es movido de un extremo al otro de la Pista a una velocidad aproximada de 3 a 5km/h, los datos coleccionados son enviados vía wireless para el procesamiento en el Software Visión Development creado por National Instrument basado en un lenguaje de programación visual. De igual manera se adecuó al HVS un perfilómetro laser para medir automáticamente el ahuellamiento a través de imágenes digitales en un tiempo de 15min aproximadamente.



Figura 70 – Cámara Inteligente (Jones, 2012)

4.4 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA HVS

Es sistema de colección de datos es una parte esencial de todo dispositivo APT, el software y hardware para la colección de datos generalmente es llamado sistema DAQ (data acquisition). La Universidad de California UCPRC desarrolló un sistema DAQ para el HVS y que puede servir de referencia para las instituciones que se están iniciando el los programas APT. Los datos de interés para los investigadores se divide en tres categorías: El primero que sería las condiciones del pavimento y las respuestas; el segundo los parámetros de carga como la presión de inflado y la carga en las llantas y el tercero que son las condiciones ambientales como lluvia y temperatura del aire. El sistema desarrollado por California es capaz de medir temperatura, desplazamiento, deformación, presión y recolectar los datos del perfilómetro laser de manera independiente, es decir, que cada componente pueda ser removida, remplazada o añadida, además de que tiene la capacidad de registrar la velocidad de operación del dispositivo HVS.

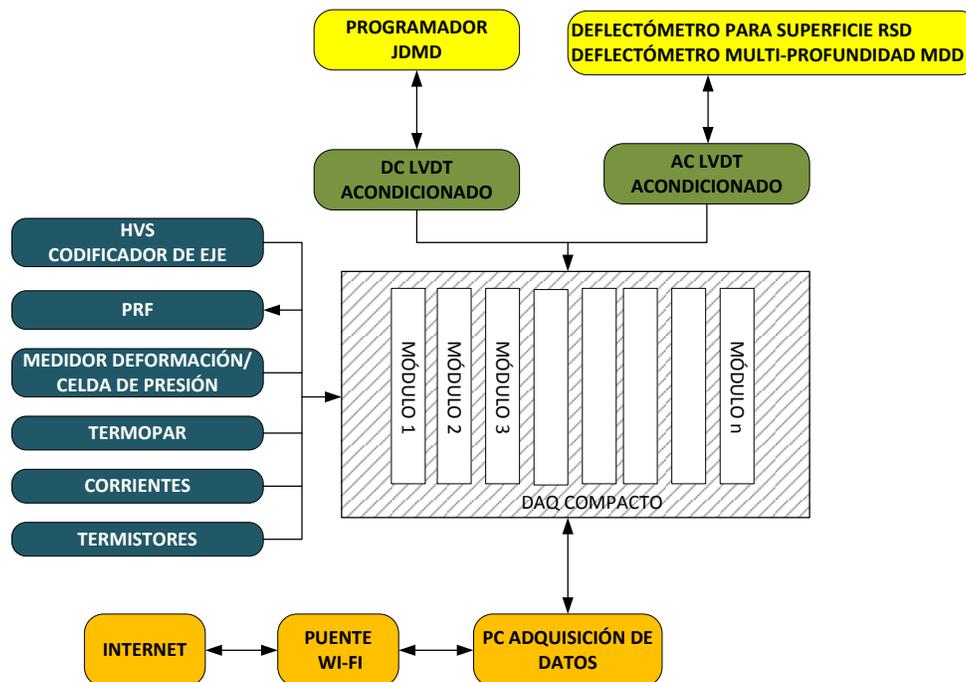


Figura 71 – Diagrama del nuevo sistema DAQ (Jones, 2012).

4.5 CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO

En las instalaciones de K-ATL en Kansas descrito anteriormente, el calor o la congelación es aplicada mediante tubos metálicos en U colocado en la subrasante a la cual se le aplica una solución de glicol que se distribuye a lo largo del tubo ya sea para congelar o calentar tanto la subrasante como al pavimento. Un antecedente en este sistema de control ambiental se tiene en la instalación de Indot/Purdue solo que en la tubería circulaba agua caliente en lugar de glicol.

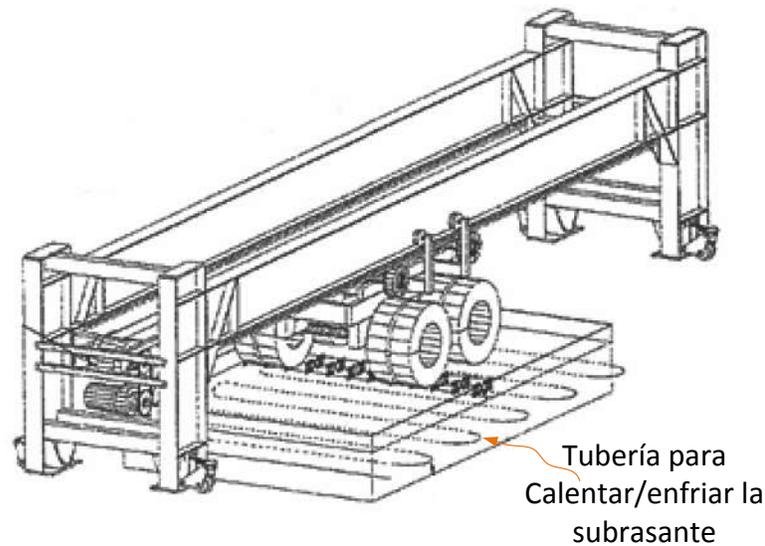


Figura 72 - Ubicación de Sensores (Melhem, Sheffield, Kansas State University, & Manhattan, Kansas, 2000)

4.6 INSTRUMENTACIÓN DRTM.

En la pista DRTM descrito anteriormente se consideró los tipos de instrumentación para ser utilizada en un estudio sobre deformación permanente en materiales de subrasante. Los sensores instalados incluyen.

- Sensores de deformación unitaria del Asfalto (ASG) para medir la deformación en la parte inferior de la carpeta asfáltica.
- Transductor de deformación en suelos (SDT) para medir la deformación horizontal y vertical en el material granular no ligado.
- Celdas de presión de suelos (SPC) para registrar los esfuerzos vertical y horizontal de materiales granulares no ligados.

Los SDTs Y SPCs fueron instalados en las capas de material granular no ligadas en ambas direcciones, vertical y horizontal como se indica en la Figura 73 y Figura 74.

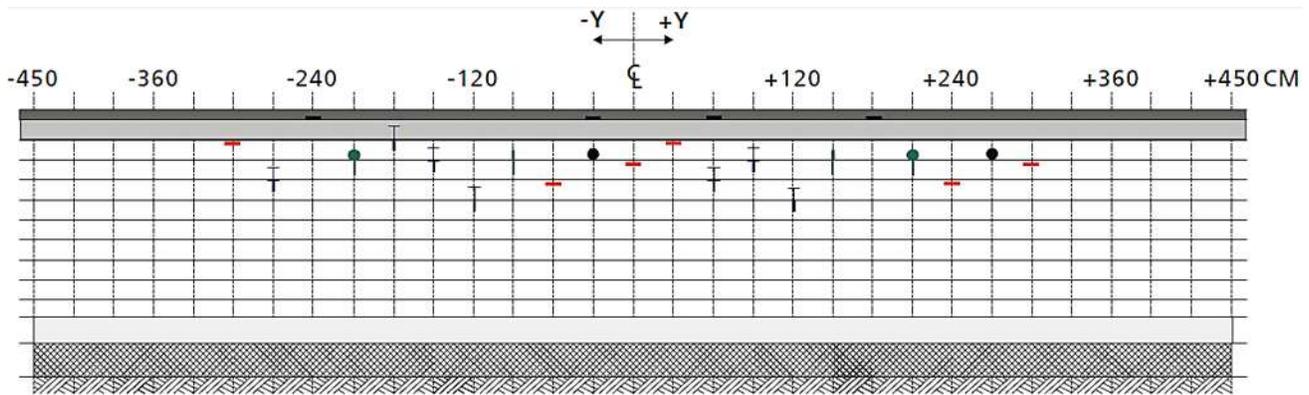


Figura 73 – Ubicación de los Sensores en corte Long. de la Pista DRTM de 9.0m de long. (Zhang & Macdonald, 2002)

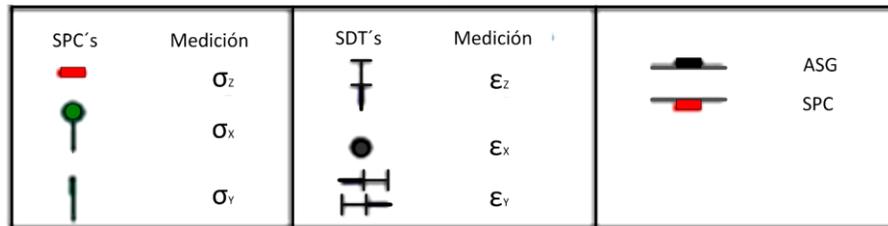


Figura 74 – Ubicación de los Sensores en corte Long. de la Pista DRTM de 9.0m de long. (Zhang & Macdonald, 2002)

4.7 CONCLUSIÓN

De acuerdo a la revisión bibliográfica concluimos que hay dos categorías para la instrumentación de las estructuras de los pavimentos, una de ellas son los sensores de respuesta dinámica y la segunda serán los sensores de medición de condiciones ambientales. Dentro de la respuesta dinámica están los medidores de la deformación de la carpeta asfáltica, la presión de poro dinámica y la presión en el suelo generada por el tráfico de los vehículos. Dentro de los sensores de medición ambiental se encuentran los medidores de la temperatura, la conductividad eléctrica en el suelo, humedad, presión de poro estática y el nivel freático. Aunque no son los únicos sensores que pueden ser colocados, si son la base de instrumentación en toda investigación. Algunas Instituciones han adecuado sus instalaciones con cámaras climáticas para implementar condiciones ambientales, como aspersores para simular la lluvia o tubería colocada en la subrasante en la cual circula agua caliente para aumentar la temperatura del pavimento.

El equipo de instrumentación que se encuentra a la venta está disponible en todo el mundo para ser adquirido, incluso hay vendedores especializados en instrumentación en pavimentos. Sin embargo, el equipo es muy costoso por lo que existen referencias de instituciones que han elaborado sus propios sensores y bases de adquisición de datos. Para la adquisición o no del equipo de instrumentación con empresas dedicadas a ello primero será necesario saber si se cuenta con el recurso monetario para la compra, así como el tiempo que se pretende contemplar para realizar las pruebas. Si se cuenta con el recurso monetario sería factible la compra para no gastar tiempo manufacturando los sensores y así, entrar de lleno a la investigación. Si no se cuenta con recursos no hay otra opción más que ser manufacturados por el propio laboratorio encargado de la investigación a realizar. Para darse una idea de los gastos implicados en el equipo de instrumentación se debe hacer una cotización, pero para ello, primero se deberá saber cuál será el grado de complejidad en cuanto a mediciones que se requiera obtener.

5. SELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS PARA EL DISEÑO DE LA PISTA DE PRUEBA

Para el diseño de la pista de prueba se deberán considerar varios factores que se dividirán en dos secciones, la primera sección se referirá a las condiciones de tráfico y la segunda a la configuración del pavimento.

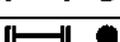
5.1 CONDICIONES DE TRÁFICO

5.1.1 CARGA

La carga de una rueda es la carga en el área de contacto del neumático con el pavimento. La mayoría de los análisis asumen que la carga de la rueda es uniformemente distribuida sobre un área circular (Morea, 2011).

Un estudio denominado “Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional” realizado en 1991, indica que las 5 configuraciones de vehículos de carga más significativos que transitan por el país son las C2, C3, T3-S2, T3-S3 y T3-S2-R4. La configuración C2 (Figura 75) arroja el mayor porcentaje de tránsito (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002). De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008 de donde se obtienen los pesos máximos autorizados por tipo de eje y camino (Tabla 41), se observa que para un eje sencillo de cuatro llantas el peso autorizado es de 10ton. Considerando que la pista solo tendrá la mitad del eje, entonces la carga será de 5ton. Sin embargo, en el apartado 3.2 se menciona que una manera de acelerar el daño en el pavimento es aumentar las cargas especificadas por la norma, por lo cual, se propone que la carga última que la pista sea capaz de soportar sea de 10ton.

Tabla 41 - Pesos máximos (Ton) autorizados por tipo de eje y camino. NOM-012-SCT-2-2008.

CONFIGURACIÓN DE EJES	TIPO DE CAMINO			
	ET4 Y ET2 A4 Y A2	B4 Y B2	C	D
 SENCILLO DOS LLANTAS	5,50	6,00	5,50	5,00
 SENCILLO CUATRO LLANTAS	10,00	9,50	8,00	7,00
 MOTRIZ SENCILLO CUATRO LLANTAS	11,00	10,50	9,00	8,00
 MOTRIZ DOBLE O TANDEM SEIS LLANTAS	15,00	13,00	11,50	11,00
 DOBLE O TANDEM OCHO LLANTAS	17,00	15,00	13,50	12,00
 MOTRIZ DOBLE O TANDEM OCHO LLANTAS	18,00	17,00	14,50	13,50
 TRIPLE O TRIDEM DOCE LLANTAS	23,50	22,50	20,00	NA

Donde;

Tipo de carretera	Código
Carretera de cuatro carriles, Eje de Transporte	ET4
Carretera de dos carriles, Eje de Transporte	ET2
Carretera de cuatro carriles	A4
Carretera de dos carriles	A2
Carretera de cuatro carriles, red primaria	B4
Carretera de dos carriles, red primaria	B2
Carretera de dos carriles, red secundaria	C
Carretera de dos carriles, red alimentadora	D

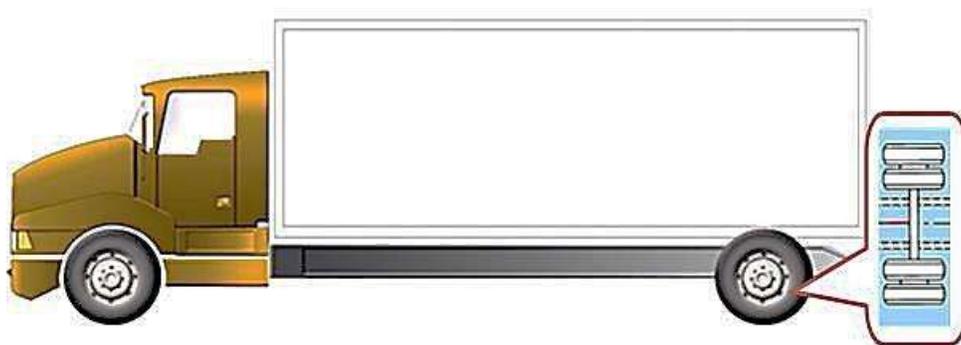


Figura 75 - Camión C2 con eje trasero simple de 4 llantas.

Con una carga 10.00Ton, estamos dentro del margen de carga a la que están siendo sometidas las secciones de pavimento en las Pistas de Prueba acelerada de algunos países (Tabla 42 y Tabla 43).

Tabla 42 – Rango de cargas de algunas Pistas Lineales (NCHRP, 1996).

RANGO DE CARGA (kN)		
ALF	Melbourne, Australia	40-100 (4-10ton)
FHWA-PTF	Washington D.C., USA	40-100 (4-10ton)
RIOH-ALF	Beijing, China	40-100 (4-10ton)
PRF-LA	Louisiana, USA	40-100 (4-10ton)
HVS	Pretoria, South Africa	20-200 (2-20ton)

Tabla 43 - Rango de Cargas de algunas Pistas Lineales (NCHRP, 2004).

NOMBRE	CARGA (TON)
CRREL HVS	2 - 10
K-ATL	17
OHIO APLF	2 - 13
HVS-NORDIC	2 - 11
ARRB	4 - 9
FLORIDA DOT	3 - 20

5.1.2 LLANTAS

La configuración del eje de la pista de prueba será la mitad de un eje sencillo de cuatro ruedas, que corresponde a la parte trasera de un camión C2 como se muestra en la Figura 76.

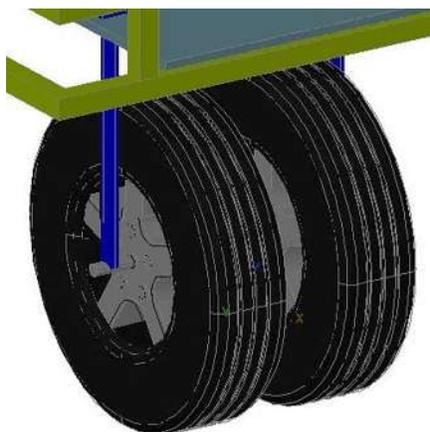


Figura 76 – Llanta Dual.

La Tabla 44 muestra el tipo de configuración que algunas pistas lineales están usando, se observa que la mayoría de ellas utiliza la mitad de un eje simple dual la cual puede ser ajustable a eje simple de una sola llanta.

Tabla 44 - Configuración de algunas Pistas Lineales (NCHRP, 1996).

CONFIGURACIÓN DEL EJE		
ALF	Melbourne, Australia	Llanta Simple y Dual (Medio eje simple, tándem o tridem)
FHWA-PTF	Washington D.C., USA	Llanta Simple y Dual (Medio eje simple)
RIOH-ALF	Beijing, China	Llanta Simple y Dual (Medio eje simple)
PRF-LA	Louisiana, USA	Llanta Simple y Dual (Medio eje simple)
HVS	Pretoria, South Africa	Llanta Simple y Dual (Medio eje simple)

5.1.3 PRESIÓN DE INFLADO

La carga del vehículo al pavimento se transmite a través de las llantas por lo cual es el único medio de contacto entre el vehículo y el pavimento. En los métodos mecanicistas, es necesario conocer el área de contacto de las llantas con el pavimento, asumiendo que la carga de contacto depende de la presión de contacto. En el diseño de pavimentos se asume también que la presión de contacto es igual a la presión de la llanta. Debido a que los ejes de carga pesados tienen presiones altas y efectos más destructivos en el pavimento, utilizar la presión de la llanta como presión de contacto es estar del lado de la seguridad (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002). La presión de inflado de las llantas depende de las especificaciones dadas en cada automóvil por lo que cada fabricante tiene su propia tabla de presión y de carga. Para la elección del neumático se deberá determinar cuál es la carga máxima que soportará, además de definir si será de configuración simple o dual, en seguida se entrará a la tabla de alguno de los fabricantes y se elegirá la carga que esté ligeramente arriba de ese valor, dicho valor le indicará cual es la presión mínima de inflado que tendrá la o las llantas. La Tabla 45 muestra las presiones de inflado que están utilizando algunas pistas lineales.

Tabla 45 – Presión de Inflado de algunas Pistas Lineales (NCHRP, 1996).

PRESIÓN DE INFLADO (MPA)		
FHWA-PTF	Washington D.C., USA	0.54-0.99 (5.4 – 9.9kg/cm ²)
RIOH-ALF	Beijing, China	0.90-0.95 (9.0 – 9.5kg/cm ²)
PRF-LA	Louisiana, USA	0.72 (7.2kg/cm ²)
HVS	Pretoria, South Africa	0.5-0.69 (5.0 – 6.9kg/cm ²)

Los métodos de diseño de pavimentos actuales se basan generalmente en presiones de inflado de 520kPa pero algunos métodos Empírico-Mecanicistas han utilizado presión de inflado de 700kPa (Morea, 2011).

5.1.4 SISTEMA DE SUSPENSIÓN

La suspensión es el conjunto de elementos mecánicos del automóvil que tienen la misión de asegurar el contacto del neumático con el terreno, proporcionando estabilidad en la marcha del vehículo, al mismo tiempo que protegen a los ocupantes y al vehículo de las irregularidades del terreno. Un proyecto de investigación realizado por la OECD (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico) proporcionó evidencia científica de los efectos dinámicos de vehículos pesados y sus sistemas de suspensión en pavimentos. Por lo cual este es un factor de igual importancia en el diseño de la estructura de la pista. La Tabla 46 muestra el tipo de suspensión utilizada en algunas pistas lineales.

Tabla 46 – Suspensión de llantas de algunas Pistas Lineales (NCHRP, 1996).

SUSPENSIÓN DE LA LLANTA		
ALF	Melbourne, Australia	Bolsas de aire, muelle de acero
FHWA-PTF	Washington D.C., USA	Bolsas de aire, muelle de acero
RIOH-ALF	Beijing, China	Bolsas de aire, muelle de acero
PRF-LA	Louisiana, USA	Bolsas de aire, muelle de acero
HVS	Pretoria, South Africa	Suspensión hidráulica

El tipo de suspensión que se requiere será para el eje trasero, por lo tanto la clasificación para elegir está entre sistema de suspensión rígido, semirrígido o independiente. Como en México se utiliza comúnmente el sistema independiente encontramos en el mercado los muelles de acero.

5.1.5 VELOCIDAD

En estudios realizados se ha demostrado que a mayor velocidad del vehículo, el tiempo de aplicación de la carga disminuye. Puesto que una de las finalidades de las pistas de prueba APT es acelerar el daño, la manera de llegar a esa finalidad es aumentar la carga por lo cual las velocidades de circulación no son muy elevadas, una muestra de ello son las velocidades de algunas pistas lineales mostradas en la Tabla 47 y la Tabla 48. Otro motivo por el cual se manejan velocidades bajas en pistas lineales es debido a que la longitud de las pistas no es apta para que el sistema de tráfico alcance velocidades muy altas en longitudes tan cortas destinadas a aceleración y desaceleración. En pistas circulares se han alcanzado velocidades de hasta 100km/h.

Tabla 47 – Rango de Velocidades de algunas Pistas Lineales (NCHRP, 1996).

RANGO DE VELOCIDAD (KM/H)		
ALF	Melbourne, Australia	1-20
FHWA-PTF	Washington D.C., USA	1-20
RIOH-ALF	Beijing, China	1-20
PRF-LA	Louisiana, USA	1-20
HVS	Pretoria, South Africa	14

Tabla 48 - Rango de Velocidades de algunas Pistas Lineales (NCHRP, 2004).

NOMBRE	VELOCIDAD (KM/H)
CRREL HVS	13
K-ATL	11
OHIO APLF	2-8
HVS-NORDIC	15
ARRB	20

Finalmente se podría proponer que las velocidades de aplicación de tráfico a la que estaría sometido nuestro sistema de tráfico varíe entre los 10 y 20km/h.

5.1.6 TEMPERATURA AMBIENTE

La temperatura ambiente es un factor de igual manera importante, algunas pistas de prueba tienen sistemas de monitoreo y son capaces de modificar las condiciones ambientales mediante cámaras climáticas en sus instalaciones, otras se encuentran al aire libre por lo cual la temperatura ambiente solo es monitoreada. La propuesta de la pista de prueba que presentará este trabajo no considera ningún control de temperatura mediante cámaras climáticas y solo se podrá monitorear la temperatura ambiente dentro de las instalaciones donde será ubicado.

5.1.7 DESPLAZAMIENTO LATERAL

La mayoría de las pistas de prueba consideran el desplazamiento lateral de los vehículos, por cual crean mecanismos que realicen la simulación. En la Tabla 49 se observa que el ancho que se está fijando para la medición de este parámetro es de hasta 1.50m.

Tabla 49 – Desplazamiento Lateral.

ANCHO DESPLAZAMIENTO LATERAL (M)		
ALF	Melbourne, Australia	1.4
FHWA-PTF	Washington D.C., USA	1.4
RIOH-ALF	Beijing, China	1.4
PRF-LA	Louisiana, USA	1.4
HVS	Pretoria, South Africa.	1.5

5.2 CONFIGURACIÓN DEL PAVIMENTO

La longitud total de las pistas lineales se divide en segmentos (Figura 77);

- Zona de aceleración/desaceleración
- Longitud de pista efectiva
- Zona de transición

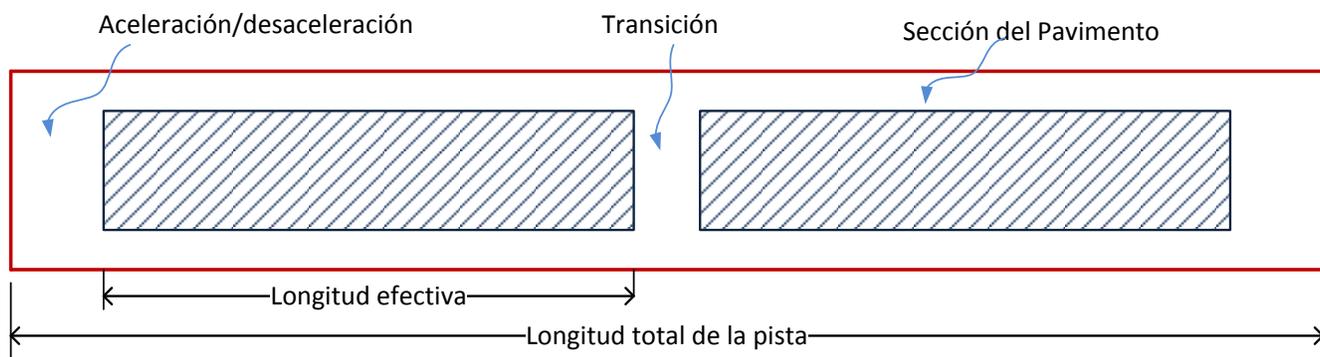


Figura 77 – Elementos que conforman una pista lineal para prueba de pavimentos.

La zona de aceleración/desaceleración ubicada al inicio y al final de la zona de transición de las llantas sirve únicamente para cambios de velocidades, dirección de tráfico o para mantener el sistema de tráfico estacionario, esta parte de la pista de prueba no es considerada en la instrumentación de donde se obtendrían los modelos de deterioro. La longitud de pista efectiva es la zona más importante porque en ella es donde se enfoca todo el estudio, en esa parte se tendrá el mayor cuidado debido a que es la zona donde estarán ubicados la mayoría de los sensores. Finalmente, la zona de transición es únicamente para pistas donde se ubique más de una sección de prueba, es la que sirve para el cambio de configuración de la estructura del pavimento.

5.2.1 LONGITUD DE PISTA EFECTIVA

Las pistas lineales más sobresalientes son el modelo HVS y el modelo ALF. De la Tabla 50 comentaremos que las pistas subrayadas en amarillo son los modelos basados en HVS y los modelos en color azul turquesa son las pistas lineales basadas en el modelo ALF. Las longitudes que marca esta tabla indican la longitud de pista efectiva en donde se llevan a cabo las pruebas.

Tabla 50 – Configuración de pista de prueba de algunos modelos (NCHRP, 1996).

LONGITUD DE PISTA EFECTIVA			
		Longitud	Ancho
ALF	Melbourne, Australia	12	1.4
FHWA-PTF	Washington D.C., USA	12	1.4
RIOH-ALF	Beijing, China	12	1.4
PRF-LA	Louisiana, USA	12	1.4
DRTM	Denmark	9	1
EPFL	Lausanne, Switzerland	5	0.8
HVS	Pretoria, South Africa (Used in several provinces)	8	1.5
CAL-APT	Richmond, California, USA	8	1.5
LINTRACK	Delft, The Netherlands	16	2
PTF	United Kingdom	7	1
INDOT/PURDUE	West Lafayette, Indiana, USA	6	0.3
TxMLS	Texas USA	12	0.6

La Tabla 51 muestra otras pistas lineales donde de igual manera se indica la longitud efectiva que se utilizó.

Tabla 51 - Configuración de pistas de prueba de algunos modelos (NCHRP, 2004).

CONFIGURACIÓN DEL PAVIMENTO							
NOMBRE	Área de prueba				Sección de prueba		
	Cant.	Long. (m)	Ancho (m)	Prof. (m)	Long. Efectiva (m)	Ancho (m)	Prof. (m)
CRREL HVS	8.0	7.6	6.4	2.4	6.10	1.50	-----
	4.0	11.4	6.4	3.7			
K-ATL	418m ²				9.70	1.80	1.80
					6.10	1.80	1.80
OHIO APLF	--	13.70	11.60	2.40	13.70	1.80	2.40
HVS-NORDIC	3	8.00	6.00	2.00	8.00	3.00	2.00

De acuerdo a esta información podemos proponer que la longitud de la pista efectiva de prueba que tendrá el modelo del presente trabajo sea de 8.00m con un ancho de 1.50m como el usado en los modelos HVS.

5.2.2 ZONA DE ACELERACIÓN/DESACELERACIÓN

Para elegir la longitud de esta zona no existe una referencia en la cual se hayan basado las pistas de prueba existentes, por ejemplo la pista de FLORIDA DOT considera 1.5m de cada lado, por lo cual en base a la experiencia de esta institución, en la pista de prueba que se propondrá en este trabajo consideraremos esa longitud para la zona de aceleración y desaceleración en cada extremo de la pista de prueba.

5.2.3 ZONA DE TRANSICIÓN

Para la zona de transición tampoco hay alguna referencia para elegir su longitud. Sin embargo, la pista de prueba HVS-NORDIC está considerando 1.00m. Esta zona solo se coloca si en la longitud total de la pista existe más de una sección de pavimento efectiva como lo muestra la Figura 77. Debido a que este trabajo considera que la pista de prueba solo tendrá una sección efectiva no se requiere zona de transición.

5.2.4 CONFIGURACIÓN DE LA ZANJA

Otro factor de suma importancia es la geometría de la zanja en donde estará colocada la sección de pavimento, ésta puede ser de sección rectangular o trapezoidal. La Figura 78 muestra la geometría de la zanja utilizada en Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility (CAPTIF) y la Figura 79 muestra la geometría de la zanja utilizada en FLORIDA DOT.

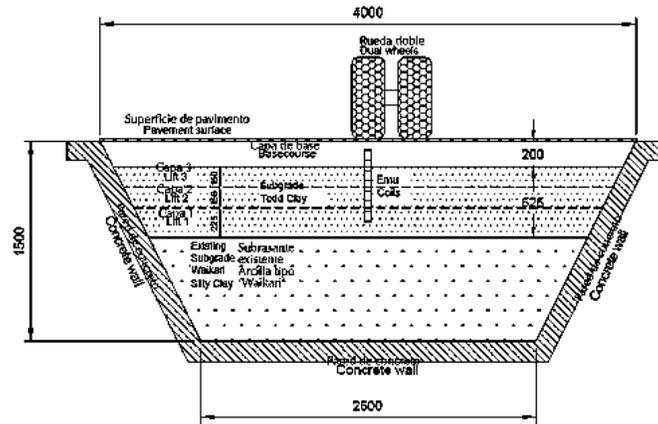


Figura 78 – Zanja de geometría transversal trapezoidal utilizada en CAPTIF Nueva Zelanda.



Figura 79 – Geometría de la zanja utilizada en la pista lineal FLORIDA DOT.

En este trabajo se considerará que la zanja sea de geometría rectangular, debido a las facilidades constructivas que eso conlleva, además de que es adecuada a la estructura ideada para la propuesta de la pista de prueba de la que más adelante se hablará.

5.3 ESTRUCTURA DE LA PISTA

Debido a que los modelos HVS y ALF son estructuras muy complejas, se toma como base la estructura OH APLF (Ohio Accelerated Pavement Load Facility), el cual está conformado básicamente por dos perfiles que van a lo largo de la estructura en el cual se sostiene el sistema de tráfico como la muestra la Figura 80 y Figura 81.



Figura 80 – Sistema de Tráfico de OHIO APLF.



Figura 81 – Perfiles a lo largo de la Estructura de OHIO APLF.

5.3.1 MOVILIDAD

Para movilizar el sistema de tráfico de la estructura de Ohio se recurre al mecanismo de la polea y el winch como lo muestra la Figura 82. En este sistema un motor es activado en un extremo para movilizar el sistema de tráfico mediante un cable, en el otro extremo se encuentra una polea se sirve únicamente de guía para dicho cable y que permite que esta se desplace libremente.



Figura 82 – Sistema a base de polea y malacate.

5.3.2 APLICACIÓN DE LA CARGA

La aplicación de la carga se puede considerar de una manera muy simple como en la estructura utilizada en el ATLaS (Accelerated Transportation Loading ASsembly), la cual se basa en actuadores para ejercer presión sobre las ruedas del sistema (Figura 83).



Figura 83 – Actuadores que ejercen presión sobre las llantas.

5.4 CONCLUSIÓN

En el mundo hay gran variedad de modelos de Pistas de Prueba con diferentes mecanismos de acuerdo a las necesidades de cada institución. Estos mecanismos pueden ser adaptables para la creación de nuevos sistemas e incluso se pueden adquirir algunos ya patentados y puestos a disposición para su compra como es el caso de LanammeUCR (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales) de la Universidad de Costa Rica que adquirió un HVS VI en Estados Unidos. Los modelos patentados son muy costosos como el HVS que tienen costos superiores a los 2.5 millones de dólares adicionándoles la construcción de las instalaciones en donde estará ubicado.

Con la investigación realizada sobre las Pistas de Prueba Acelerada se ha ideado un mecanismo relativamente sencillo considerando partes del diseño de varias pistas de prueba. Se contempla que la estructura esté soportada en dos vigas de reacción como la de Ohio APLF, el sistema de movilidad sea

a base de cable y winch como el utilizado de igual manera en Ohio APLF y que la carga sea aplicada mediante actuadores como en el ATLaS.

Para la configuración del pavimento se tomarán en cuenta que la pista de prueba solo tendrá una sección efectiva de 8m de longitud con un ancho de 1.50m como el HVS, la zona de aceleración y desaceleración sea de 1.50m como el utilizado en Florida DOT en cada extremo de la sección efectiva, no tendrá zona de transición puesto que solo tendrá una sección efectiva, finalmente, la sección transversal será de geometría rectangular para facilidad de la zona de construcción y el mayor aprovechamiento del espacio dentro del laboratorio.

Para las condiciones de tráfico se contempla una carga máxima de 10Ton sobre un semieje dual, que circulará a una velocidad de 20km/h como la mayoría de las pistas de prueba, se tomará en cuenta el sistema de suspensión que será con muelles de acero y que la presión de inflado sea de 7.00kg/cm² como los que se están considerando en la investigación con el método E-M.

Tomando en cuenta las consideraciones mencionadas en los párrafos anteriores se propondrá un Diseño de Pista de la Prueba el cual se desarrollará en el capítulo 6.

6. PROPUESTA CONCEPTUAL DE DISEÑO DE UNA PISTA DE PRUEBA

De acuerdo a las consideraciones del Capítulo 5, se propondrán las condiciones de tráfico y la configuración del pavimento que tendrá el diseño de la Pista de Prueba Acelerada objeto de este trabajo.

6.1 CONDICIONES DE TRÁFICO

En la Tabla 52 se resumen las condiciones de tráfico a las que estará sujeta la Pista de Prueba de Pavimento Acelerada.

Tabla 52 - Condiciones de tráfico de la Propuesta de la Pista de Prueba.

CONDICIONES DE TRÁFICO	
Carga	10ton
Configuración de llanta	Mitad de un eje sencillo dual
Presión de inflado	7.00kg/cm ²
Suspensión	Muelle de acero
Velocidad	20 km/h
Control de temperatura ambiente	No considerado

6.2 CONFIGURACIÓN DEL PAVIMENTO

La Figura 84 y Figura 85 muestran las dimensiones que tendrá la propuesta de la Pista de Prueba donde serán colocadas las secciones de los pavimentos.

- La pista tendrá una sección efectiva de prueba de 8m de longitud por 1.50m de ancho partiendo de la experiencia de la longitud efectiva de prueba de los dispositivos HVS.
- Se considera 1.50m como zona de aceleración y desaceleración en cada extremo de la pista, en la cual no será necesaria la instrumentación debido a que esa zona no está dentro de la longitud efectiva.
- En el extremo derecho se considera la construcción de una rampa que servirá como acceso de las máquinas para formar las secciones estructurales, cuya longitud efectiva será de 5.50m y pendiente de 20°.
- Se considera un espacio de 1.50m en el extremo izquierdo para posicionar el sistema de tráfico una vez que este sea estacionado y se denomina posición inicial de la estructura.

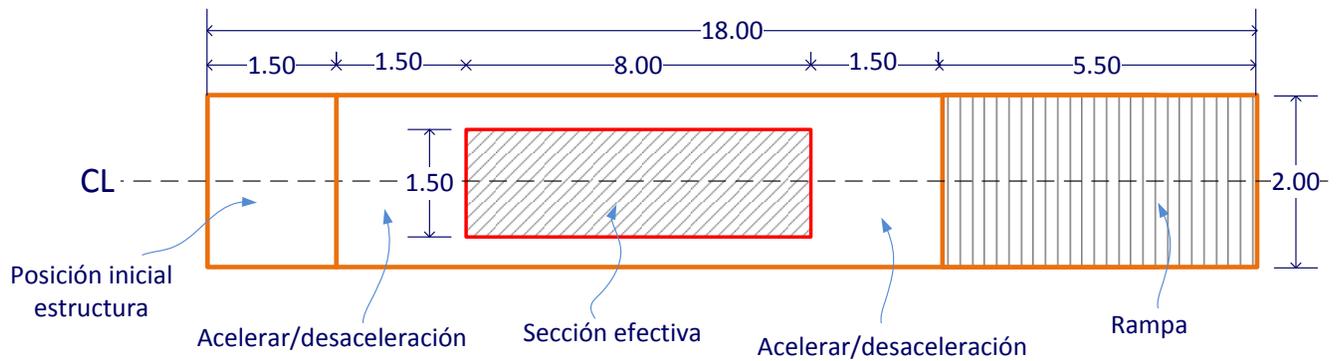


Figura 84 – Planta de Pista de Prueba Acelerada, sin escala/cotas (m).

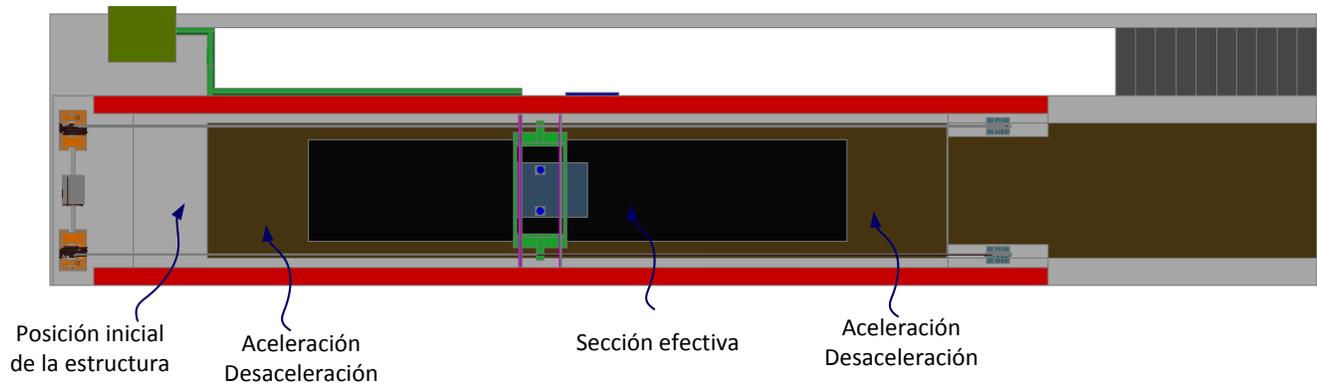


Figura 85 – Planta de Pista de Prueba Acelerada, sin escala/cotas (m).

En la Figura 86 y Figura 87 se representa el corte longitudinal de la pista conceptual de prueba. Se aprecia que hay una rampa de 5.50m de largo mencionada anteriormente que permitirá el descenso y ascenso de las máquinas de construcción de las secciones. De igual manera se observa que la profundidad de la pista es de 2.00m considerando que dicha profundidad será suficiente para colocar la sección del pavimento.

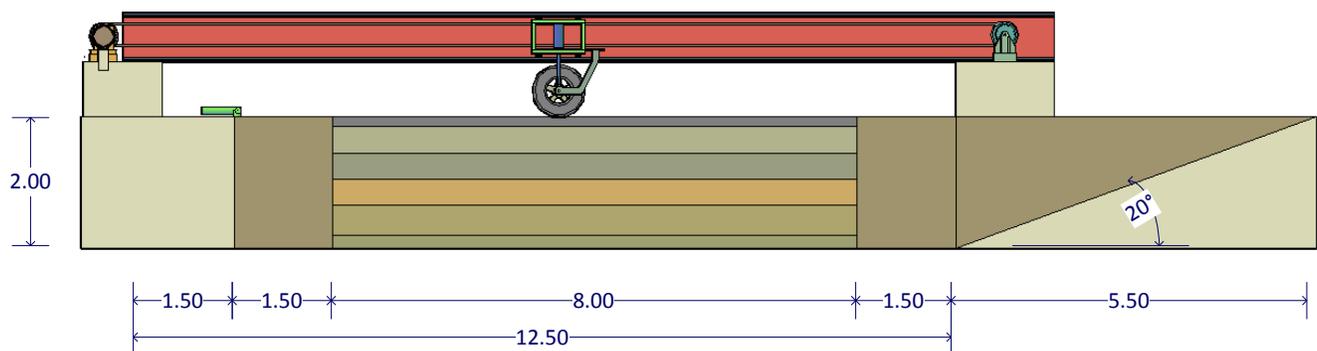


Figura 86 – Corte Longitudinal de la Pista de Prueba Acelerada, sin escala/cotas (m).

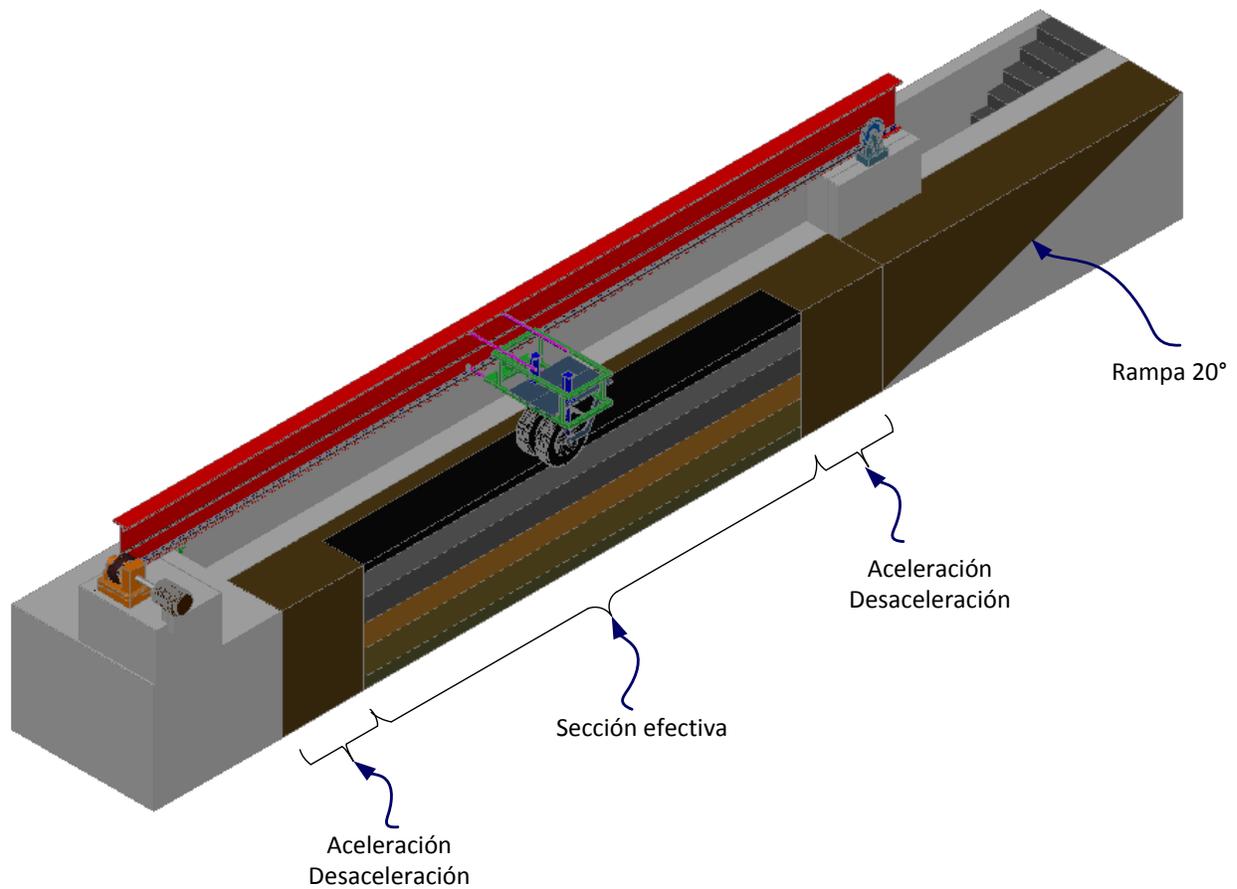


Figura 87 – Corte Longitudinal de la Pista de Prueba Acelerada, sin escala/cotas (m).

En la Figura 88 se muestra el corte transversal de la pista conceptual de prueba. La sección es cuadrada de 2.00m de profundidad x 2.00m de ancho. Aunque el ancho inferior sea de 2.00m, para la sección efectiva solo es requerido 1.50m descartando 25cm a cada lado de la sección transversal. Se contempla que podrán ser colocadas 6 capas de las cuales 5 corresponden a la sección estructural del pavimento (Carpeta Asfáltica, Base, Subbase, Subrasante y Terraplén) y 1 capa que corresponde al material de filtro que tendrá la función de saturar la zanja. Los espesores de las capas pueden variar de acuerdo al diseño de la sección estructural del pavimento.

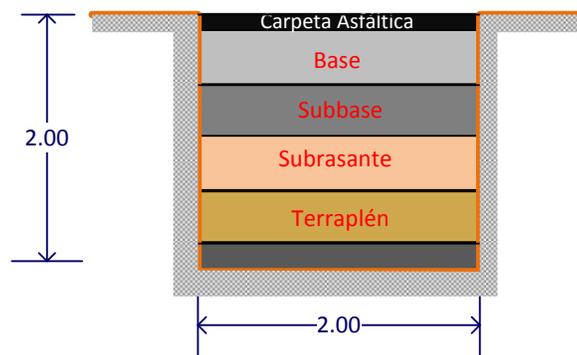


Figura 88 – Corte Transversal de la Pista de Prueba Acelerada, sin escala/cotas (m).

6.3 ESTRUCTURA DE LA PISTA

Los dispositivos APT son muy complejos, para su diseño se requiere de la colaboración de un equipo multidisciplinario, entre los cuales se encuentran Ingenieros Estructuristas, Ingenieros Mecánicos, Especialistas en Mecánica de suelos, Pavimentos, Instrumentación, entre otros. Sin embargo, se puede idear un dispositivo con las mayores simplificaciones posibles. La Figura 89 muestra el esquema general del dispositivo que se propone en este trabajo, se observa que las partes más importantes son el Sistema de tráfico, winches, poleas, un motor doble eje y las vigas de reacción que serán soportadas en sus extremos por una bases de concreto hidráulico.

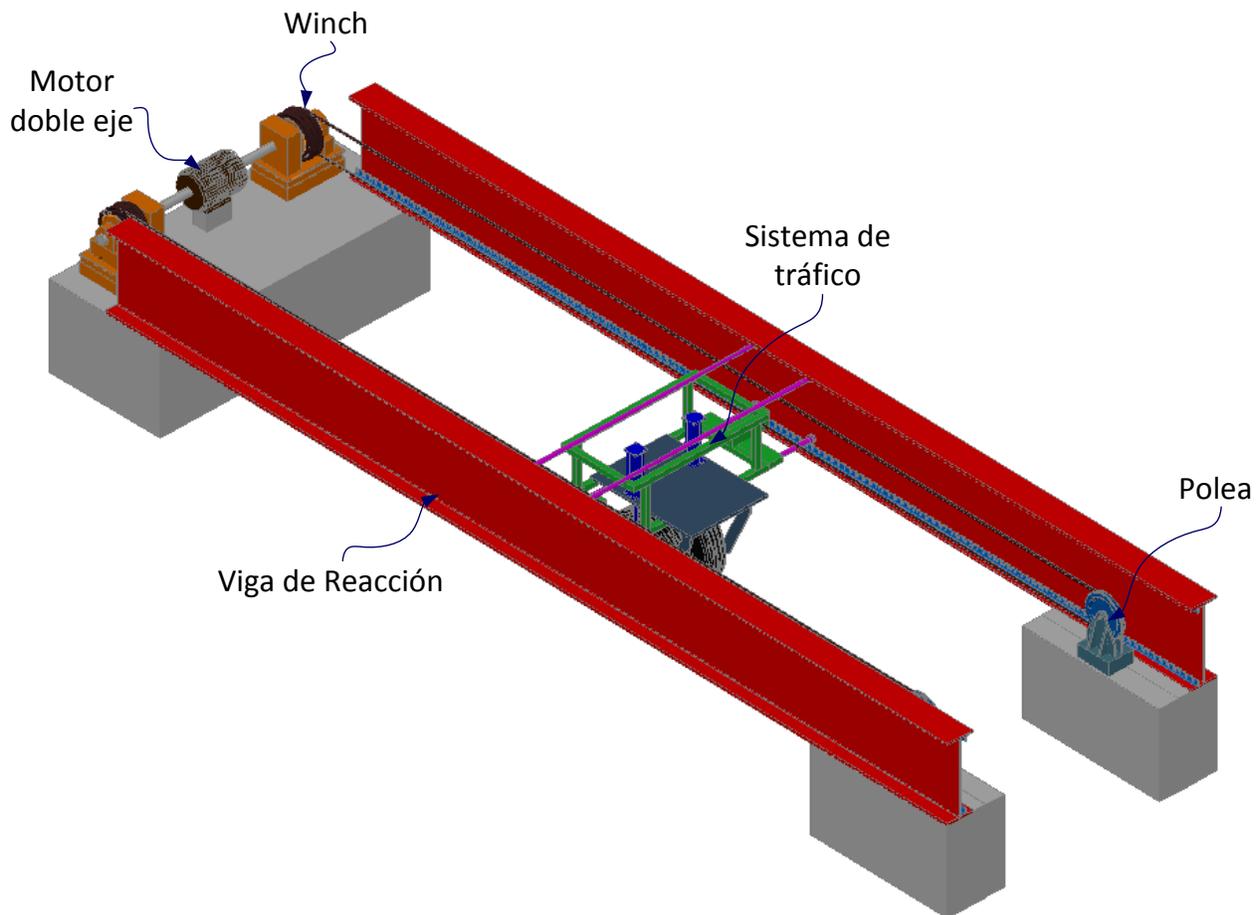


Figura 89 – Estructura de la Propuesta de la pista de prueba.

En la Figura 90 se observa que el Sistema de tráfico es de medio eje con llanta dual, al cual se le adecuarán dos actuadores hidráulicos para aplicar presión a los neumáticos. La base de reacción serán dos vigas de acero a los lados del sistema.

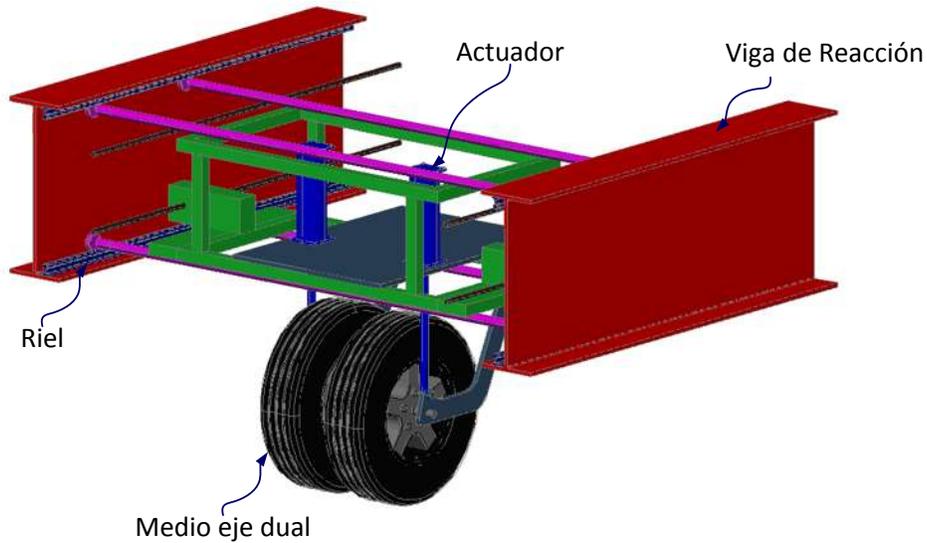


Figura 90 – Sistema de tráfico.

El sistema de tráfico puede ser impulsado mediante cable y winch. En el extremo izquierdo estarán ubicados dos winches (Figura 91) y un motor doble eje. En el extremo derecho de la pista estarán colocadas dos poleas con sus respectivos cables (Figura 92). Los cables que recorren la pista, pasan por las poleas y retornan a los winches tendrá la función de proporcionar un movimiento simétrico del sistema de tráfico a lo largo de la sección estructural del pavimento de prueba como se muestra en la Figura 89. Para facilitar la movilidad lineal del sistema de tráfico, a las vigas de acero en donde ésta estará apoyada se les puede ajustar unos rieles en los patines y al sistema de tráfico acondicionarles las ruedas tipo ferrocarril.

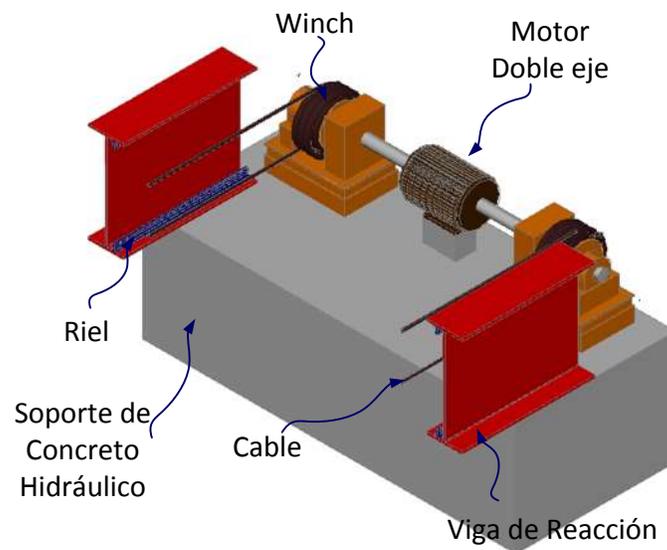


Figura 91 – Soporte en extremo izquierdo de la Pista de Prueba.

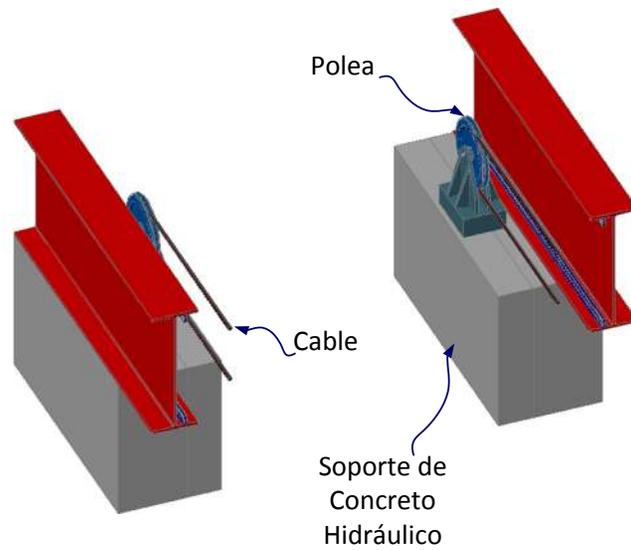


Figura 92 – Soporte en extremo derecho de la Pista de Prueba.

La Figura 93 muestra la ubicación de la Pista de Pruebas propuesta en este trabajo dentro de las instalaciones de un laboratorio de 17m x 28m, de manera que se pueda apreciar gráficamente el área de 4m x 19m que ocuparía la pista a escala real.

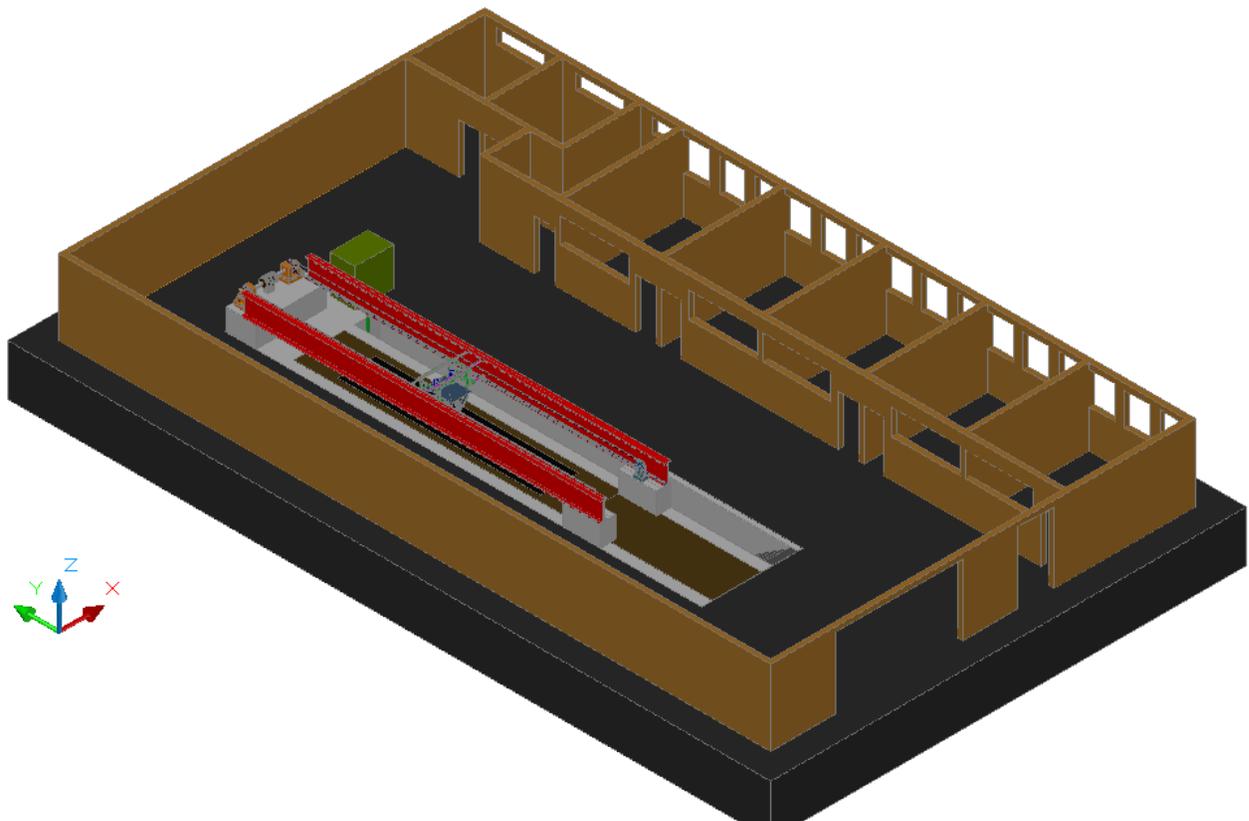


Figura 93 – Esquema general de la ubicación de la Pista conceptual dentro de las instalaciones de un Laboratorio.

6.4 INSTRUMENTACIÓN

De acuerdo a la experiencia en instrumentación de algunas instituciones dedicadas a la investigación en pistas de prueba a gran escala y aceleradas, se sabe que hay dos categorías en las que se dividen los sensores para medir los parámetros deseados; respuestas ante carga dinámica y la respuesta ante condiciones ambientales. La elección de los sensores depende de la cantidad de parámetros que se quieran medir, aunque hay sensores que tienen que ser colocados como base en toda investigación. En seguida se describen los sensores típicos que tienen que ser colocados en toda investigación referente a pavimentos flexibles.

6.4.1 SENSORES DE RESPUESTA DINÁMICA

6.4.1.1 MEDIDOR DE DEFORMACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

El medidor de deformación de mezclas asfálticas (Figura 94) de la marca CTL (Construction Technology Laboratories) está diseñado para soportar altas temperaturas y cargas de compresión asociados a la construcción del pavimento. Se utiliza para medir la tensión horizontal o la tensión vertical y puede soportar temperaturas de -34°C a 204°C .

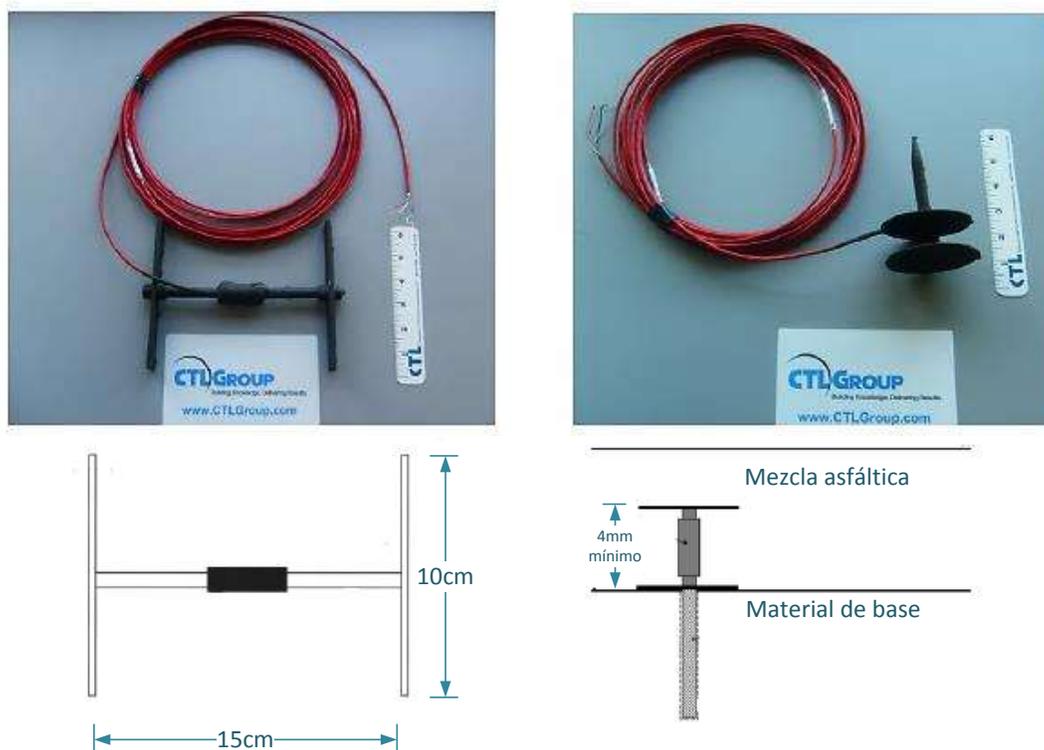


Figura 94 – Sensor de deformación de mezclas asfálticas ASG (CTL GROUP)

6.4.1.2 CELDA DE PRESIÓN DINÁMICA

La celda de presión está diseñada para medir los esfuerzos en suelos, las celdas responden no sólo a las presiones del suelo, sino también a las presiones de agua subterránea o de presión de poro, por lo tanto, la presión total o esfuerzo total.

El modelo 3510 de Geokon mostrado en la Figura 95 está diseñado para medir la presión dinámica del suelo.

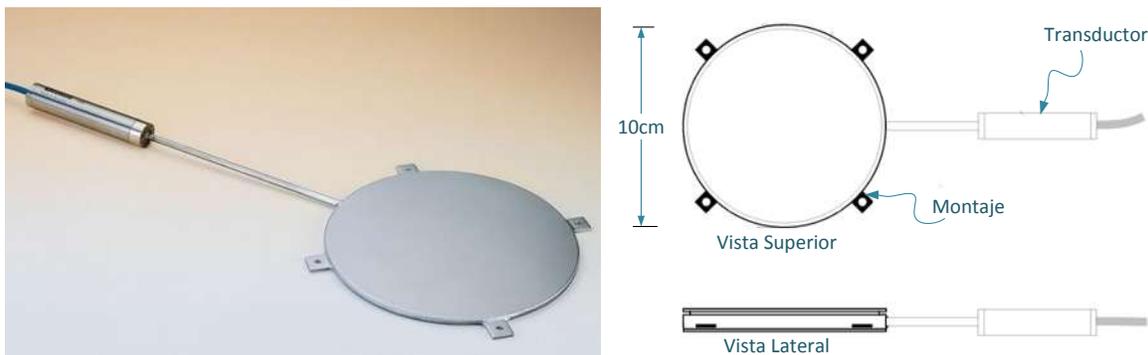


Figura 95 – Sensor para medir la presión dinámica (GEOKON)

6.4.1.3 PRESIÓN DE PORO DINÁMICO

El piezómetro de la marca Geokon modelo 3400 mostrado en la Figura 96 sirve para medir la presión de poro dinámica, el sensor tiene una longitud de 19.4cm x 3.2cm de ancho.



Figura 96 – Sensor para la medir la presión de poro dinámica (GEOKON)

6.4.2 SENSORES DE RESPUESTA DE CONDICIONES AMBIENTALES

6.4.2.1 TEMPERATURA

Dos tipos de sensores comunes para medir la temperatura son los termopares y termistores, los cuales pueden ser colocados en sitios específicos de la estructura del pavimento o pueden ser adecuados para obtener perfiles de temperatura de la estructura total.

El termopar modelo 105E de Campbell Scientific mostrado en la Figura 97 es una sonda adecuada para medir la temperatura del aire y del suelo, el aislamiento exterior es impermeable al agua y la sonda es adecuada para ser enterrada. La unión de detección está completamente sellada y con un recubierto de acero inoxidable que proporciona una excelente protección.



Figura 97 – Termopar (CAMPBELL SCIENTIFIC)

6.4.2.2 HUMEDAD

Para medir el contenido de humedad puede utilizarse el TDR (Time Domain Reflectometry) como el mostrado en la Figura 98, modelo CS630-L de la marca Campbell Scientific.



Figura 98 – Medidor de Humedad en Suelos (CAMPBELL SCIENTIFIC)

Aunque los sensores pueden ser adquiridos con empresas especializadas en este tipo de dispositivos, cabe la opción de que éstos sean manufacturados y calibrados por el propio laboratorio encargado del proyecto de Pista de Prueba para minimizar gastos de implementación.

6.4.3 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Las respuestas obtenidas de los sensores colocados en la estructura del pavimento en realidad no representarían nada si estos datos no fueran debidamente interpretados al momento de la adquisición de los datos. El proceso de la adquisición de los datos consiste en primer lugar en adquirir las señales de los fenómenos físicos a medir, como la temperatura, presión, humedad, etc., estas señales muchas veces se distorsionan por lo que se requiere de un acondicionamiento de la señal con filtros o amplificadores para ser enviados al Hardware de DAQ, el cual se conecta a una PC. El Lab View es un software comercial para DAQ aunque puede desarrollarse uno propio. La información obtenida y manipulada puede ser almacenada en el disco duro. De igual manera y con un proceso invertido puede enviarse señales al DAQ para generar un fenómeno físico. La Figura 99 muestra el proceso de la obtención de datos de manera gráfica.

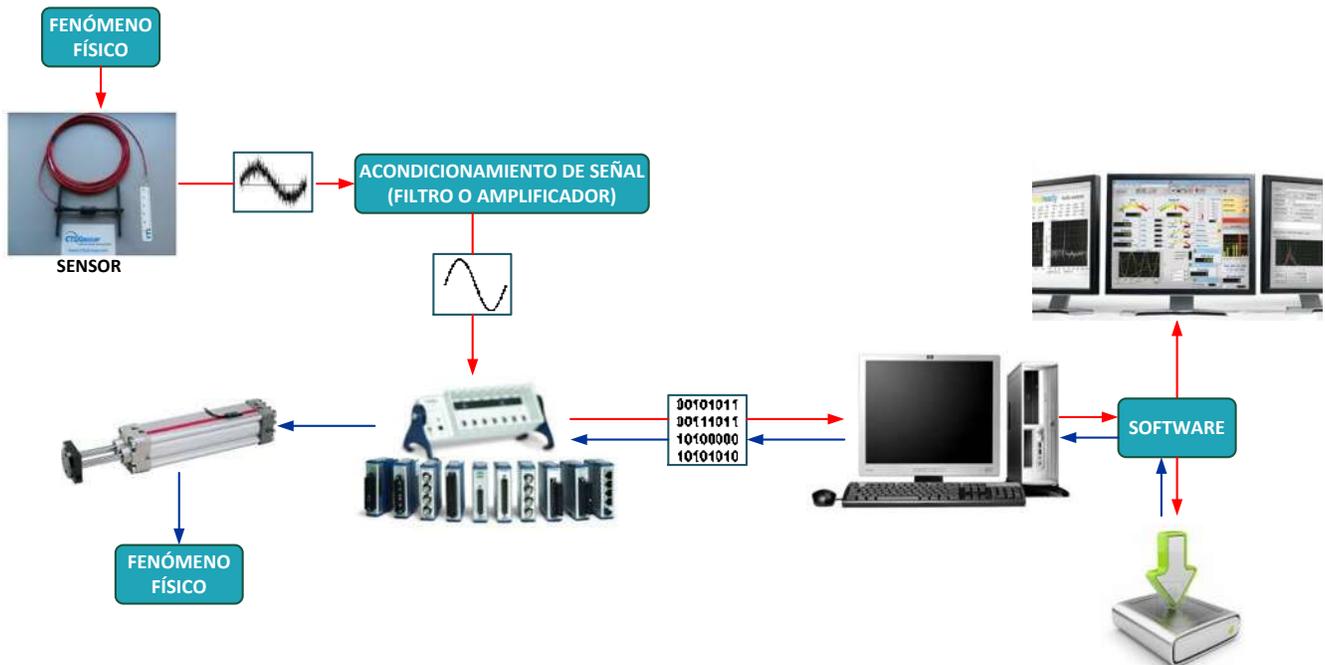


Figura 99 – Proceso de obtención de datos.

6.4.4 SENSORES EN LA PISTA DE PRUEBA PROPUESTA

Después de que cada sensor es ubicado cuidadosamente en la zona de interés como el caso de los medidores de deformación ASG y los medidores de presión ECP mostrados en la Figura 100, es necesario de igual manera colocar debidamente los cables que de estos van acompañados para que no sufran ningún daño y darles salida al exterior de la sección estructural para que sean conectados al Sistema DAQ como se indica en la Figura 101.

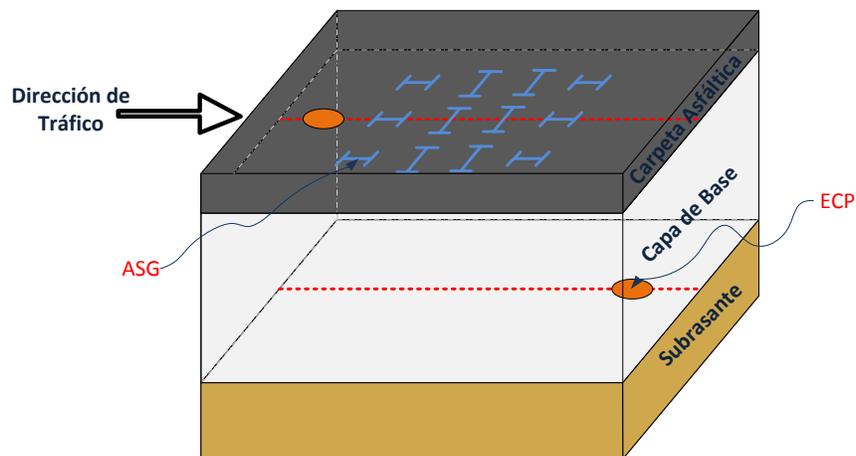


Figura 100 – Proceso de obtención de datos.

En la Figura 101 se observan unas escaleras de acceso a una zanja la cual se encuentra a 2.00m de profundidad y tiene un ancho de 1.00m, donde personal encargado de la instrumentación puede maniobrar para darle salida a los cables de los sensores y guiarlos hacia el Sistema DAQ.

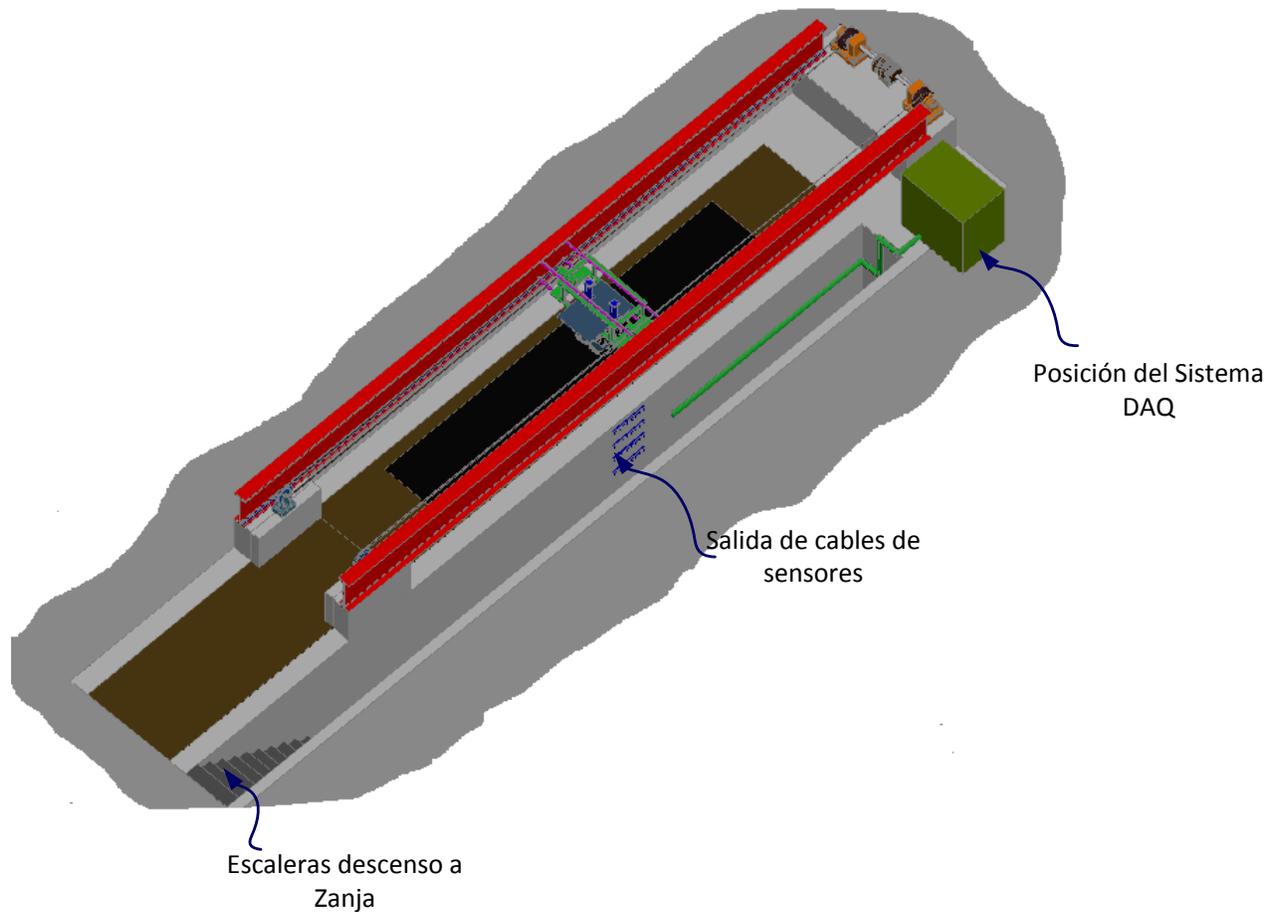


Figura 101 – Acceso a zona de Instrumentación

La Figura 102 muestra el corte longitudinal de la Zona de Instrumentación, la primera hilera de orificios en color azul partiendo de la superficie de la pista se encuentra entre la parte inferior de la Carpeta Asfáltica y la parte superior de la Capa de Base para dar salida a los cables de los sensores que sean colocadas en esas profundidades, de igual manera, la segunda hilera será para los sensores ubicados en la parte inferior de la Capa de Base y la parte superior de la Capa de subbase y así sucesivamente, de tal manera que se contemplan cuatro hileras de orificios. Una vez que los cables estén fuera de la pista de prueba se procederá a guiarlos hacia una tubería que servirá como protección para finalmente ser conectados al Sistema de Adquisición de Datos. Se observa además que la última hilera de orificios que se encuentra a lo largo de toda la pista de prueba servirá para colocar la tubería de saturación, estos tubos van directamente a la primera capa de la sección estructural que sería una capa de filtro con la función de saturar la sección estructural.

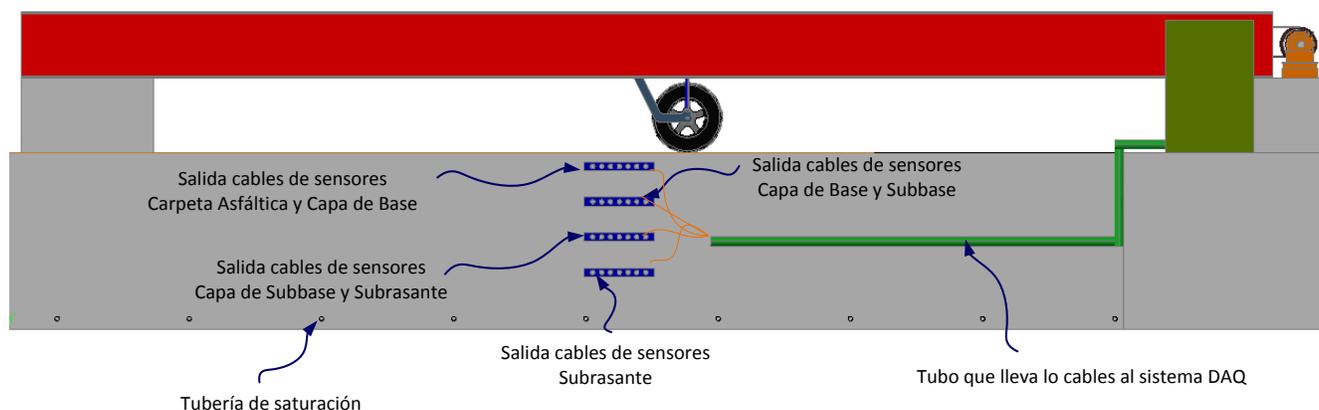


Figura 102 – Descripción de orificios.

La Pista de Pruebas Conceptual descrita anteriormente conforma las partes que toda Pista de Prueba Acelerada debe de tener, con excepción de las cámaras climáticas, debido a que no se está considerando la simulación de condiciones climáticas adversas. Se presentaron esquemas en donde se ubicaron las diferentes partes; sistema de tráfico, sistema de movilidad, soportes, configuración de la estructura del pavimento, entre otros. Se considera que la Pista de Prueba estará fija a diferencia de las pistas de prueba móviles que pueden llevarse a carreteras en servicio. Esta Pista Conceptual puede sufrir modificaciones en el transcurso de su construcción, a razón de la zona donde se pretenda construir y por consiguiente, el espacio que se le asigne, por otro lado, puede sufrir modificaciones de acuerdo a las consideraciones que el grupo multidisciplinario pueda agregarle al sistema. Como pudo observarse el diseño propuesto es relativamente sencillo en comparación con varios diseños muy complejos como los HVS y los ALF que ya están patentados, por lo que su construcción es viable.

7. CONCLUSIONES GENERALES

El tema de las Pistas de Prueba aunque fue una idea surgida a principios siglo pasado, sigue siendo un tema de suma importancia y muchos países han recurrido a esta tecnología para crear nuevas Metodologías de diseño que se adecúen a las necesidades que se tienen en este momento. Como se ha mencionado, México ya cuenta con una Pista de Prueba en el Instituto de Ingeniería de la UNAM la cual no se está utilizando para crear nuevas Metodología de Diseño, sino solo se hacen mejoras de la metodología con base en el Método Empírico, por lo cual es necesario realizar investigación completamente innovativa dejando a un lado la metodología Empírica para empezar con metodologías Empírico-Mecanicistas, por lo cual, tenemos un atraso de 20 años aproximadamente con respecto a las investigaciones que se están realizando en el mundo en éste tema, por otro lado, el Instituto Mexicano del Transporte ha mostrado interés para la implementación de una Pista de Pruebas Aceleradas en sus Instalaciones de acuerdo a la publicación Construcción y Tecnología en Concreto (2010), tomando en cuenta que ya nos encontramos en 2013, no se tienen noticias del avance en cuanto a la implementación de esta tecnología.

De acuerdo a la investigación bibliográfica se concluye que el problema que se está enfrentando son las variaciones climáticas y las condiciones de tráfico, sin embargo, una sola investigación realizada en un determinado sitio del mundo no puede ser generalizado, ni utilizado sin que sufra modificaciones en la adecuación para la utilización en otras regiones, aunque lo ideal sería que cada estado de cada país del mundo tuviera su propia investigación de acuerdo a las condiciones de su entorno, esto sería demasiado costoso, es así, que la investigación se ha englobado a la generalización de las condiciones de cada país. La ventaja con la que contamos en nuestro siglo, es que la tecnología ha tenido un gran auge y se está renovando día con día, esto permite que las investigaciones sean relativamente más fáciles con respecto a principios del siglo pasado y que la información obtenida en las investigaciones realizadas en diferentes partes del mundo esté circulando por medio de la red. Por esta razón se ve necesario que nuestro país de igual manera comience a retomar la investigación y que recurramos a la experiencia que ya tienen las diferentes instituciones del mundo que ya lograron implementar la nueva metodología de diseño E-M

El trabajo presentado en esta tesis es solo el inicio de un campo muy extenso del conocimiento en cuanto a Pistas de Prueba Acelerada se refiere. Para llevar a cabo un proyecto de esta magnitud se requiere de la colaboración de un equipo multidisciplinario, entre los cuales se encuentran Ingenieros Estructuristas, Ingenieros Mecánicos, Especialistas en Mecánica de suelos, Pavimentos, Instrumentación, entre otros. El costo para la implementación es muy elevado, así que muchas instituciones del mundo han realizado gestiones y negociaciones ante instancias gubernamentales, empresas privadas interesadas en este tipo de tecnología y han realizado convenios entre Universidades para obtener el apoyo económico, de tal manera que el conjunto sirva para solventar una investigación de esta magnitud.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. NZ TRANSPORT AGENCY WAKA KOTAHI. (2009). Obtenido de <http://www.nzta.govt.nz/network/maintaining/made-of/captif.html>
2. Baja SAE Auburn. (2012). Obtenido de <http://www.bajasaeauburn.com/maps/>
3. HOT-MIX MAGAZINE. (2013). Obtenido de http://www.hotmixmag.com/index.php?option=com_content&view=article&id=282&Itemid=154
4. Tierra y Tecnología. (2013). Obtenido de <http://www.icog.es/TyT/index.php/2013/08/la-pista-de-ensayo-acelerado-a-escala-real-del-cedex/>
5. Akkari, A. (2012). *2011 MnROAD Mainline Concrete Construction: Cells 5, 6, and 63, Final Report 2012-37*. Minnesota: Minnesota Department of Transportation.
6. APT FACILITIES IN EUROPE. (s.f.). Obtenido de http://www.k-state.edu/pavements/trb/A2B09/index_files/Europe-APTs.html
7. Burnham, T. R., & Pirkl, W. M. (1997). *Application of Empirical and Mechanistic-Empirical Pavement Design Procedures to Mn/ROAD Concrete Pavement Test Sections*. Minnesota: Minnesota Department of Transportation (Mn/DOT).
8. Byron, T., Choubane, B., & Tía, M. (s.f.). *Assesing Different Loading Configurations in Accelerated Pavement Testing*. Obtenido de [www.mrr.dot.state.mn.us: http://www.mrr.dot.state.mn.us/research/MnROAD_Project/index_files/pdfs/Choubane_B.pdf](http://www.mrr.dot.state.mn.us/http://www.mrr.dot.state.mn.us/research/MnROAD_Project/index_files/pdfs/Choubane_B.pdf)
9. CAMPBELL SCIENTIFIC. (s.f.). Obtenido de <http://campbellsci.eu/105e-specifications>
10. Construcción y Tecnología en Concreto. (2010). *Pavimentos*. Obtenido de <http://www.imcyc.com/revistacyt/mar10/pavimentos.htm>
11. Cordo, O., & Bustos, M. (2002). *Metodología Empírico-Mecanicista para el Diseño Estructural de Pavimentos (MEPDG) Experiencias de Calibración para Argentina*. Obtenido de <http://www.camineros.com/educacion/presentaciones/aashto2002%281%29.pdf>
12. Coria Gutiérrez, C. A. (2012). *MODELO DE RESPUESTA ESTRUCTURAL MULTICAPA PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES UMICH PAV*. Tesis.
13. Corredor M, G. (s.f.). Experimento Vial de la AASHO y las Guías de Diseño AASHO. Sección para Delegados la Cámara de la Construcción.
14. Corro Caballero, S., & Prado Ollervides, G. (1974). *Diseño Estructural de Carreteras con Pavimentos Flexibles, Informe 325*. Mexico D.F.: UNAM.
15. Corro, S., & Prado, G. (1999). *Diseño Estructural de Pavimentos Asfálticos, Incluyendo carreteras de altas especificaciones. Dispav-5-Vesión 2.0*. México D. F: UNAM.
16. Corro, S., Magallanes, R., & Prado, G. (1981). *Instructivo para diseño estructural de pavimentos flexibles para carreteras, Informe 444*. Mexico D.F: UNAM.
17. CSIR. (s.f.). *CSIR our future through science*. Obtenido de http://www.csir.co.za/Built_environment/Infrastructure_engineering/pdfs/poster57_lowres.pdf
18. CTL GROUP. (s.f.). *Asphalt Strain Gages*. Obtenido de www.CTLGroup.com
19. Garnica Anguas, P. (s.f.). <http://es.scribd.com/doc/111180268/Cam070-Espectro-de-Carga>. Obtenido de <http://es.scribd.com/doc/111180268/Cam070-Espectro-de-Carga>
20. Garnica Anguas, P., & Pérez García, N. (2001). *INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE COMPACTACION EN LAS DEFORMACIONES PERMANENTES DE SUELOS COHESIVOS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS*. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
21. Garnica Anguas, P., Gómez López, J. A., & Sesma Martínez, J. A. (2002). *Mecánica de materiales para pavimentos. Publicación Técnica No 197*. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.

22. Garnica, P., & Correa, A. (2004). *Conceptos Mecanicistas de Pavimentos, Publicación Tecnica N° 258*. Sanfandila, Queretaro: Instituto Mexicano del Transporte.
23. GEOKON. (s.f.). *GEOKON THE WORLD LEADER IN VIBRATING WIRE TECHNOLOGY*. Obtenido de <http://www.geokon.com/earth-pressure-cells/>
24. Jones, D. (2012). *Advanced in Pavement Design though Full-scale Accelerated Pavement Testing*.
25. Korkiala-Tanttu , L., & Dawson, A. (2007). Relating full-scale pavement rutting to laboratory permanent deformation testing. *International Journal of Pavement Engineering*, 19-28.
26. Melhem, H., Sheffield, F., Kansas State University, & Manhattan, Kansas. (2000). *ACCELERATED TESTING FOR STUDYING PAVEMENT DESIGN AND PERFORMANCE (FY 99)*.
27. Metcalf, J. B. (1996). *Application of Full Scale Accelerated Pavement Testing*. Baton Rouge, Louisiana: NCHRP 235.
28. Miller, J. S., & Bellinger, W. I. (2003). *Distress Identification Manual for Long-Term Pavement Performance Program*. Washington D C.: 4th Ed. FHWA-RD-03-031. Federal Highway Administration.
29. MnDOT. (2000-2012). *MnRoad Minnesota's Cold Weather Road Research Facility*. Obtenido de <http://www.dot.state.mn.us/mnroad/aboutus/>
30. Morea, F. (6 de Septiembre de 2011). Deformación Permanente en Mezclas Asfálticas. *Efecto de al reología de los asfaltos, la temperatura y las condiciones de carga*. Argentina: Tesis para el grado de Doctor en Ingeniería.
31. NCHRP. (1996). *Synthesis of Highway Practice 235 Application of Full-Scale Accelerated Pavement Testing*. Washington D.C.: Transportation Research Board Executive Committee.
32. NCHRP. (2004). *SYNTHESIS 325 Significant Findings from Full-Scale Accelerated Pavement Testing*. Washington D. C.: Transportation Research Board Executive Committee.
33. NTEC. (s.f.). *The University of Nottingham*. Obtenido de <http://www.nottingham.ac.uk>
34. Osorio, S. (2012). *Apuntes de Geotécnia con Enfasis en Laderas*. Obtenido de http://geotecnia-sor.blogspot.mx/2012/11/el-diseno-racional-en-la-ingenieria_8.html
35. Rico, A., & Del Castillo, H. (2005). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres. Vol II*. Mexico D. F: Limusa.
36. Romero, P., & Myers, L. A. (2006). *Caracterización del módulo dinámico de mezclas asfálticas para el diseño mecanístico-empírico de pavimentos*. Obtenido de Infraestructura Vial digital: http://www.lanamme.ucr.ac.cr/riv/index.php?option=com_content&view=article&id=242&Itemid=282
37. Rondón, H. A., & Reyes, F. A. (2007). Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: Tendencias, alcances y limitaciones. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 41-65.
38. Sánchez Sabogal, F. (s.f.). MÓDULO 1. INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE PAVIMENTOS.
39. Schwartz, C. W., & Carvalho, R. L. (2007). *Implementation of the NCHRP 1-37A Design Guide*. Maryland EUA: Department of Civil and Environmental Engineering.
40. Scrivener, S. P., Smith, W. D., Campbell, N. D., & Mansell, M. L. (1983). *Patente n° 4502327*. Sydney, Australia.
41. Timm, D. H., Priest, A. L., & McEwen, T. V. (2004). *Desing and Instrumentation of the Structural Pavement Experimental at the NCAT Test Track*. Auburn, Al: NCAT Report 04-01.
42. TRB. (July de 2007). TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR E-C118. *Pavement Lessons Learned from the AASHO Road Test and Performance of the Interstate Highway System*. Washington. DC: Transportation Research Board.
43. TRB Committee. (s.f.). *APT FACILITIES IN EUROPE*. Obtenido de http://www.k-state.edu/pavements/trb/A2B09/index_files/Europe-APTs.html

44. Universidad de los Andes. (2009). *Procedimiento para la instrumentación de pavimentos contrato 118*. Bogotá: Informe Final.
45. WAPA. (2010). *Rutting*. Obtenido de WASHINGTON ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION: <http://www.asphaltwa.com/2010/09/18/rutting/>
46. Wiman, L. G. (2001). *Accelerated Load Testing of Pavement HVS-NORDIC Tests in Sweden 1999*. Sweden: Swedish National Road and Transport Research Institute.
47. Zhang, W., & Macdonald, R. (2002). *The Danish Road Testing Machine 1995 - 2000*.