

Proyecto de Grado
Maestría en Ingeniería Civil

**Análisis de deformaciones permanentes y fatiga en diseños de pavimento flexible
y posible relación de estas con el índice de condición del pavimento, PCI.**

Presentado por:
Paula Carolina García Román

Asesora:
Silvia Caro Spinel



Universidad de Los Andes
Facultad de Ingeniería
Dpto. Ingeniería Civil y Ambiental
Bogotá, D.C, Diciembre de 2013

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 6 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 8 |
| 2.1 | Objetivo General. | 8 |
| 2.2 | Objetivos Específicos. | 8 |
| 3 | METODOLOGÍA..... | 9 |
| 3.1 | Parámetros iniciales. | 9 |
| 3.2 | Definición de escenarios. | 10 |
| 3.3 | Planteamiento casos. | 11 |
| 3.3.1 | <i>Casos para escenarios 1 y 3.</i> | 11 |
| 3.3.2 | <i>Casos para escenarios 2 y 4.</i> | 13 |
| 3.4 | Cálculo de espesores y deformaciones. | 14 |
| 3.4.1 | <i>Deformación permanente por ahuellamiento.</i> | 15 |
| 3.4.2 | <i>Deformación por fatiga.</i> | 16 |
| 3.5 | Calculo del PCI con base en la deformación permanente. | 16 |
| 3.6 | Análisis por fatiga. | 17 |
| 4 | ANALISIS DE RESULTADOS | 18 |
| 4.1 | Escenario 1: Estructura de pavimento que cumple con diseño mecanicista y se construye de manera apropiada..... | 18 |
| 4.1.1 | <i>Deformaciones permanentes.</i> | 18 |
| 4.1.2 | <i>Deformaciones por fatiga.</i> | 20 |
| 4.1.3 | <i>Cálculo del PCI.</i> | 21 |
| 4.2 | Escenario 2: Estructura de pavimento que cumple con diseño mecanicista y se construye de manera deficiente. | 21 |
| 4.2.1 | <i>Deformaciones permanentes.</i> | 22 |
| 4.2.2 | <i>Deformaciones por fatiga.</i> | 23 |
| 4.2.3 | <i>Cálculo del PCI.</i> | 25 |
| 4.3 | Escenario 3: Estructura de pavimento que no cumple con diseño mecanicista y se construye de manera adecuada..... | 26 |
| 4.3.1 | <i>Deformaciones permanentes.</i> | 26 |
| 4.3.2 | <i>Deformaciones por fatiga.</i> | 28 |
| 4.3.3 | <i>Cálculo del PCI.</i> | 29 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.4 | Escenario 4: Estructura de pavimento que no cumple con diseño mecanicista y se construye de manera deficiente. | 29 |
| 4.4.1 | <i>Deformaciones permanentes.</i> | 30 |
| 4.4.2 | <i>Deformaciones por fatiga.</i> | 31 |
| 4.4.3 | <i>Calculo del PCI.</i> | 33 |
| 5 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 34 |
| 6 | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 35 |
| | ANEXO A: PROPIEDADES DE LOS MATERIALES | 36 |
| | ANEXO B: TABLAS DEFORMACION PERMANENTE METODO VESYS..... | 38 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 Estructura pavimento flexible base..... | 9 |
| Figura 2 NE Vs. SN..... | 12 |
| Figura 3 Vv Vs. Eac..... | 14 |
| Figura 4 ϵ_p permanente Vs. NE - Escenario 1..... | 19 |
| Figura 5 ϵ_t fatiga Vs. NE - Escenario 1..... | 21 |
| Figura 6 ϵ_p permanente Vs. NE - Escenario 2..... | 23 |
| Figura 7 ϵ_t fatiga Vs. NE - Escenario 2..... | 24 |
| Figura 8 ϵ_p permanente Vs. NE - Escenario 3..... | 27 |
| Figura 9 ϵ_t fatiga Vs. NE - Escenario 3..... | 29 |
| Figura 10 ϵ_p permanente Vs. NE - Escenario 4..... | 31 |
| Figura 11 ϵ_t fatiga Vs. NE - Escenario 4..... | 32 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Niveles de tránsito..... | 9 |
| Tabla 2 Escenarios definidos..... | 10 |
| Tabla 3 Casos definidos para escenarios 1 y 3. | 11 |
| Tabla 4 Valores utilizados para ecuación AASHTO..... | 12 |
| Tabla 5 Porcentaje de variación de cambio del SN. | 12 |
| Tabla 6 Casos definidos para escenarios 2 y 4. | 13 |
| Tabla 7 Porcentaje de variación del modulo según el Vv..... | 14 |
| Tabla 8 Valores recomendados. (Huang 1993) | 15 |
| Tabla 9 Niveles de severidad falla por ahuellamiento..... | 16 |
| Tabla 10 Clasificación niveles de severidad del daño por fatiga..... | 17 |
| Tabla 11 Espesores de las estructuras para cada caso, escenario 1. | 18 |
| Tabla 12 Valores de deformación permanente, escenario 1..... | 18 |
| Tabla 13 Porcentaje de variación, deformaciones escenario 1..... | 19 |
| Tabla 14 Valores admisibles para deformación por fatiga, escenario 1. | 20 |
| Tabla 15 Valores de diseño para deformación por fatiga, escenario 1..... | 20 |
| Tabla 16 Espesores de las estructuras para cada caso, escenario 2. | 22 |
| Tabla 17 Valores de deformación permanente, escenario 2..... | 22 |
| Tabla 18 Porcentaje de variación, deformaciones escenario 2..... | 23 |
| Tabla 19 Valores admisibles para fatiga, escenario 2..... | 24 |
| Tabla 20 Valores para fatiga de diseño, escenario 2..... | 24 |
| Tabla 21 Deformaciones por fatiga para capas 1/2 ligadas y sin ligar. | 25 |
| Tabla 22 Cumplimiento de deformación admisible. C=Cumple, NC=No cumple..... | 25 |
| Tabla 23 Espesores de las estructuras para cada caso, escenario 3. | 26 |
| Tabla 24 Valores de deformación permanente, escenario 3..... | 26 |
| Tabla 25 Porcentaje de variación, deformaciones escenario 3..... | 27 |
| Tabla 26 Valores de ϵ_t fatiga admisible, escenario 3..... | 28 |
| Tabla 27 Valores de ϵ_t fatiga diseño..... | 28 |
| Tabla 28 Espesores de las estructuras para cada caso, escenario 4. | 30 |
| Tabla 29 Valores de ϵ_p permanente, Escenario 4..... | 30 |
| Tabla 30 Porcentajes de variación de ϵ_p permanente, Escenario 4..... | 31 |
| Tabla 31 Valores de ϵ_t fatiga admisible, escenario 4..... | 31 |
| Tabla 32 Valores de ϵ_t fatiga admisible, escenario 4..... | 32 |
| Tabla 33 Deformaciones por fatiga para capas 1/2 ligadas y sin ligar | 33 |

1 INTRODUCCIÓN

La ingeniería de pavimentos se encuentra dividida en dos campos de acción paralelos. El primero incluye las etapas de diseño, mientras que el segundo se centra en los sistemas de gestión que se implementaran durante el periodo de vida útil de las estructuras. Dentro del primero se desarrollan actividades como la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales a emplear, permitiendo garantizar que los diseños cumplirán con las solicitudes y normativas vigentes entregando al constructor garantía de estructuras confiables y durables; mientras que el segundo busca establecer un conjunto de operaciones y actividades asociadas al planeamiento, construcción, mantenimiento y evaluación de pavimentos existentes, con el fin de conservar condiciones de comodidad y seguridad.

Dentro del primer campo de acción se encuentra la etapa de diseño, en la cual se tienen en cuenta tres condiciones principales que aseguran la condición estructural y la durabilidad del pavimento: 1) Fatiga de las capas conformadas por materiales cementados (i.e., capas de mezcla asfáltica en el caso de pavimento flexibles), 2) Ahuellamiento o deformaciones permanentes en la estructura, y 3) Resistencia de las capas de rodadura al agrietamiento por bajas temperaturas; siendo las dos primeras las más empleadas en Colombia. En el segundo campo, metodologías para el diagnóstico del estado o condición del pavimento como el Índice de condición inicial – PCI (ASTM D 6433-07), Índice de deterioro superficial - VIZIR (Autret et al., 1982), Índice de rugosidad internacional - IRI (ASTM E 867-06), entre otros, usadas para diagnosticar la condición superficial en los pavimentos

En la literatura no existen relaciones que permitan pronosticar desde la etapa de diseño como será el comportamiento superficial de las estructuras luego de construidas y puestas en funcionamiento. Además, la mayoría de metodologías utilizadas para este fin contemplan en su mayoría diagnósticos visuales a juicio de quien esté encargado, así como velocidades específicas y temperaturas que deben ser utilizadas para las mediciones de los diferentes parámetros. Condiciones que corresponden en su mayoría a experiencias ya realizadas, pero que no son fácilmente verificables en el momento de tener los resultados de los levantamientos de campo. No obstante, esta información sirve de base para plantear medidas de rehabilitación o reconstrucción de estructuras; procedimientos que implican la inversión de recursos económicos e incomodidades para las poblaciones durante los tiempos de las obras. De acuerdo a esto es importante estudiar, investigar y tratar de encontrar relaciones numéricas que permitan establecer desde la etapa de diseño el deterioro y las fallas que incidirán en la condición superficial del pavimento durante su vida de servicio. El presente trabajo se plantea a partir de esta necesidad, como un análisis de deformaciones permanentes en la superficie del pavimento y de resistencia a la fatiga de las capas cementadas y su posible relación numérica con el cambio que se podría esperar en el índice de condición del pavimento PCI.

A lo largo del trabajo se podrá identificar que aunque no se logró establecer una aproximación clara entre el valor del PCI y los dos parámetros de desempeño del pavimento mencionados, se definió una posible metodología que podría relacionar numéricamente este valor con una de estas fallas.

Para el caso del ahuellamiento se pudo encontrar una posible relación numérica con el índice de condición del pavimento PCI. Esto se debe a que este tipo de falla además del daño estructural que produce en un pavimento; no sólo genera una condición de circulación incómoda e insegura en la superficie sino que, además, conlleva a que exista acumulación de agua en los momentos de lluvia, propiciando fenómenos como el hidroplaneo, causante de constantes accidentes viales. El cálculo de la huella potencial que se puede generar en la superficie del pavimento será calculada mediante el método VESYS (Huang, 1993), en el cual se calcula el valor de la huella permanente que podría presentarse en una estructura de pavimento específica suponiendo condiciones de diseño y construcción puntuales. Como la deformación permanente equivale a la acumulación de las pequeñas deformaciones generadas con cada aplicación de carga en cada una de las capas de la estructura, se utilizó el software de análisis elástico multicapa ALIZE, para el cálculo de las deformaciones verticales individuales, las cuales son empleadas en el modelo VESYS para obtener valores para este tipo de deformación irrecuperable.

Para el caso de la falla por fatiga de las capas asfálticas luego de revisar literatura y buscar estructuras similares que tuvieran valores medidos de fatiga y PCI en bases de datos como el LTPP (Long-Term Pavement Performance Program) (Paniati, 1991), no se logró establecer una relación numérica con el índice de condición del pavimento. Por esta razón, se utilizó el software ALIZE para el cálculo de las máximas deformaciones horizontales que se relacionan con el inicio de la fatiga y se realizó un análisis en cada uno de los escenarios planteados, teniendo en cuenta que una condición importante que debe ser considerada cuando un pavimento está siendo proyectado es la verificación mediante un análisis multi-capas de si dicha estructura será capaz de soportar las intensidades de las cargas que transitarán sobre esta durante los periodos de diseño estimados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General.

- Evaluar el impacto que generan las condiciones de calidad en los procedimientos de diseño y construcción de pavimentos, dentro del periodo de deterioro de estructuras de tipo flexibles. Dicha evaluación se realizará mediante el análisis de cuatro escenarios que reflejen diversos niveles en las actividades de diseño y construcción, en los cuales posteriormente se calcularán las deformaciones permanentes y la pérdida de resistencia por fatiga, con el objetivo de encontrar una relación directa con el índice de condición del pavimento (PCI).

2.2 Objetivos Específicos.

- Definir cuatro escenarios diferentes con base en una misma estructura de pavimento, con diferencias en las condiciones de diseño y construcción.
- Realizar el cálculo de la deformación permanente mediante el método VESYS en cada uno de los escenarios definidos y, con base en esta información, estudiar la posibilidad de encontrar un valor aproximado del PCI del pavimento.
- Realizar el cálculo de la deformación por fatiga que se producirá en las capas asfálticas de la estructura de pavimento durante los periodos de diseño y construcción, mediante el software elástico multicapa ALIZE. Estos cálculos permitirán emitir conclusiones sobre el impacto que tienen las etapas de diseño y construcción en la resistencia a la fatiga esperada del pavimento.

3 METODOLOGÍA

A continuación se describe la metodología implementada para el desarrollo del trabajo, la cual fue planteada con el fin de relacionar los valores de deformaciones por ahuellamiento y fatiga con el valor de PCI que podría presentarse en una estructura luego del paso de un número de ejes estándar de diseño de 8.2 ton determinado.

3.1 Parámetros iniciales.

La primera actividad consistió en definir la estructura de *pavimento base*, con la cual se trabajaría en los diferentes escenarios planteados. Para esto se estableció una estructura en pavimento flexible con las características que se muestran en la figura 1.

| |
|--|
| Rodadura (MDC-2, E=3500 MPa, $\nu=0.35$) |
| Base granular (E=550 MPa, $\nu=0.40$) |
| Subbase granular (E=280 MPa, $\nu=0.40$) |
| Subrasante (E=50 MPa, $\nu=0.40$) |

Figura 1 Estructura pavimento flexible base.

Como uno de los objetivos de este trabajo es cuantificar el cambio en el valor de la deformación permanente en comparación con el aumento en el número de ejes que transitarán por la estructura construida, se definieron tres niveles de tránsito diferentes, en términos del número de ejes equivalentes de 8.2 ton, que permitieran observar valores representativos. Cabe mencionar que inicialmente se realizaron los cálculos con niveles que oscilaban entre los 4.000.000 y 7.000.000 de ejes, con los cuales se obtuvieron valores muy bajos en los cálculos de deformación permanente. Por lo cual, los cálculos finales se realizaron con los niveles mostrados en la tabla 1, los cuales corresponden a vías con altos volúmenes de carga.

Tabla 1 Niveles de tránsito.

| | | |
|------------------------------------|----------|------|
| Niveles de tráfico (NE) | 2.00E+07 | NE 1 |
| | 3.00E+07 | NE 2 |
| | 4.00E+07 | NE 3 |

Para definir los espesores en los diferentes escenarios se utilizó una probabilidad de falla de 15% (i.e., una confiabilidad del diseño del 85%). Este valor es importante ya que es un valor de entrada de la metodología de diseño mecanicista que se empleó en este trabajo (Manual de diseño de pavimentos para Bogotá D.C).

3.2 Definición de escenarios.

Se plantearon 4 escenarios diferentes, combinando diferentes condiciones de calidad del diseño y construcción que podrían presentarse en un proyecto de pavimentos, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2 Escenarios definidos.

| Escenario | Diseño mecanicista | Construcción |
|-----------|--------------------|--------------|
| 1 | Cumple | Apropiada |
| 2 | Cumple | Deficiente |
| 3 | No cumple | Apropiada |
| 4 | No cumple | Deficiente |

Para la primera condición, se entendió como un buen diseño o un diseño que “cumple” las especificaciones de la metodología mecanicista, aquel cuyos espesores garantizan que los valores de deformaciones por ahuellamiento en las capas no cementadas (i.e., subrasante y granulares) y fatiga en capas cementadas (capas asfálticas), respectivamente, no superaran los valores admisibles calculados para los materiales. La definición de dichos espesores se realizó mediante el programa multicapa ALIZE.

Para la segunda condición referente al proceso constructivo, se definieron cuatro aspectos que influyen de manera significativa el comportamiento de los materiales en obra, como lo son:

1. Cumplimiento de la calidad de los materiales que llegan al sitio, esperando que cumplan con las especificaciones entregadas por el diseñador de la estructura y la mezcla, con base en las normativas legales vigentes.
2. Adecuada compactación de los materiales en obra, con el fin de cumplir: 1) los porcentajes de vacíos o densidad especificados por el diseñador en el caso de la mezcla asfáltica, 2) el nivel de densidad y de humedad especificadas para el caso de los materiales granulares (mínimos 95% de la densidad seca mediante ensayo Proctor, (Artículo 320 INVIAS, 2007), y 3) las condiciones de mejoramiento requeridas para el suelo de subrasante.
3. Construcción apropiada de los espesores de las capas finales en obra, conservando que queden iguales a los definidos en el diseño de la estructura de pavimento, ya que su disminución aumentaría los valores de deformación que se presentarán superando los valores admisibles.
4. Puesta en servicio de la estructura en el momento adecuado, ya que adelantar esta actividad, conllevará a la presencia temprana de fallas que cambiarían la condición superficial y la servicialidad del pavimento.

Para el caso de estructura con alta calidad constructiva se supone el caso más favorable para las 4 condiciones mencionadas y para el caso de construcción deficiente se cambian las condiciones 2 y 4 a la situación menos favorable.

3.3 Planteamiento casos.

3.3.1 Casos para escenarios 1 y 3.

En los escenarios 1 y 3 (buena calidad constructiva) se supone que el deterioro de los materiales se presenta de manera natural, por lo cual se calculan los módulos en 4 casos diferentes, como se muestra en la tabla 3. Posteriormente en cada caso se realiza el cálculo de las deformaciones por ahuellamiento y fatiga.

Tabla 3 Casos definidos para escenarios 1 y 3.

| Caso A | Caso B | Caso C | Caso D |
|--------------------------------|--|--|--|
| Módulos definidos inicialmente | Módulos de rodadura y granulares disminuyen X% a partir de los módulos del caso A. | Módulos de rodadura y granulares aumentan X% a partir de los módulos del caso A. | Módulos de rodadura y granulares disminuyen X% a partir de los módulos del caso B. |

Para establecer el porcentaje de disminución o aumento de los módulos, se supuso que dicha variación sería similar a la que presenta el número estructural (SN) a través del número de ciclos de carga, utilizando la ecuación 1 de la metodología de diseño semi-empírica AASHTO 93 (Corredor M. - Guías de diseño AASHTO 93).

$$\text{Log}W_{18} = Z_R \times S_o + 9.36 \times (\text{log}(SN + 1)) - 0.20 + \frac{\text{log}\left[\frac{\Delta\text{ISP}}{4.2-1.5}\right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \times \text{log}M_R - 8.07$$

Ecuación 1 Ecuación de diseño AASHTO 93

Donde;

W_{18} : Numero de aplicaciones de cargas equivalentes de 80 kN acumuladas en el periodo de diseño (n).

Z_R : Valor del desviador en una curva de distribución normal, función de la confiabilidad del diseño (R) o grado de confianza que las cargas de diseño no serán superadas por las cargas reales aplicadas sobre el pavimento.

S_o : Desviación estándar del sistema, función de posibles variaciones en las estimaciones de tránsito (cargas y volúmenes) y comportamiento del pavimento a lo largo de su vida de servicio.

ΔPSI : Perdida de serviciabilidad (Condición de servicio) prevista en el diseño, y medida como la diferencia entre la "planitud" (calidad de acabado) del pavimento al concluirse su construcción, serviciabilidad inicial (p_o) y su planitud al final del periodo de diseño, serviciabilidad final (pf).

M_R : Módulo resiliente de la subrasante y de las capas de bases y sub-bases granulares, obtenido a través de ecuaciones de correlación con la capacidad portante (CBR) de los materiales (suelos y granulares).

SN: Número estructural, o capacidad de la estructura para soportar las cargas bajo las condiciones de diseño.

En dicha ecuación se utilizaron los valores mostrados en la tabla 4.

Tabla 4 Valores utilizados para ecuación AASHTO.

| Variable | Valor |
|----------------------------|---------|
| S0 | 0.45 |
| $\Delta ISP=4.2-2.5$ | 1.7 |
| Confiabilidad 85% (ZR) | 1.037 |
| Mr (MPa) | 50 |
| Mr (Lb/pulg ²) | 7251.89 |
| W18 | Cada NE |

Mediante la cual se logra encontrar un valor de SN para cada nivel de tránsito, y posteriormente calcular la diferencia en porcentaje entre el primer y último valor de numero estructural obtenido. Encontrando un porcentaje de variación del 12%, como se puede observar en la tabla 5 y figura 2.

Tabla 5 Porcentaje de variación de cambio del SN.

| NE | SN | % Variación |
|----------|------|-------------|
| 2.00E+07 | 4.22 | 12% |
| 3.00E+07 | 4.59 | |
| 4.00E+07 | 4.77 | |

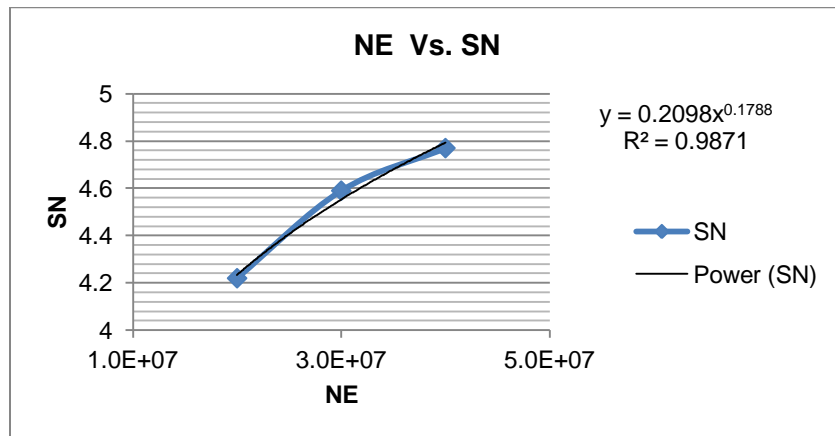


Figura 2 NE Vs. SN

Por último, se supuso que los módulos de la capa asfáltica, de base granular o granulares y de subrasante disminuyen en igual proporción en función del tiempo.

Para cada uno de los casos se realizará el análisis elástico multicapa suponiendo que todas las capas se encuentran ligadas.

3.3.2 Casos para escenarios 2 y 4.

Para los escenarios 2 y 4, se supone que se presentará un deterioro acelerado de los materiales, puesto que los diseños no cumplirán con las sollicitaciones necesarias, generando fallas a temprana edad en la estructura.

Se plantearon 4 casos diferentes para el cálculo de las deformaciones por ahuellamiento y fatiga, como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6 Casos definidos para escenarios 2 y 4.

| Caso A | Caso B | Caso C | Caso D |
|--|--|--|--|
| Módulos iniciales luego de construcción. | Módulos de rodadura y granulares disminuyen X% a partir de los módulos del caso A. | Módulos de rodadura y granulares aumentan X% a partir de los módulos del caso A. | Módulos de rodadura y granulares disminuyen X% a partir de los módulos del caso B. |

Debido a que los módulos iniciales con los cuales se calcularán los espesores y deformaciones en el caso A, deben ser menores a los de la estructura inicial, se plantea que por la compactación deficiente de los materiales, se afectará el porcentaje de vacíos de la mezcla, disminuyendo el módulo inicial. Dicho valor se calculará despejando en las siguientes ecuaciones propuestas por el Instituto del Asfalto (Huang 1993).

$$N_f = 18.4 \times 10^M \times 0.004325 \times e_t^{-3.291} \times E_{ac}^{-0.854}$$

Ecuación 2 Modelo de correlación del Instituto del Asfalto (1982).

Donde,

V_b es el volumen de bitumen, 5.5%

$$M = 4.84 \times \left(\frac{V_b}{V_v + V_b} - 0.69 \right)$$

V_v es el volumen de vacíos, 3.9%

E_{ac} es el módulo de la mezcla,

ε_t es la deformación por fatiga en capa asfáltica,

Así mismo, se utiliza la expresión de fatiga (ecuación 3), para calcular el valor de ε_t a reemplazar en la ecuación número 2 con un número de ejes de 1.000.000.

$$\varepsilon_t = 6.92 \times 10^{-3} \times N^{-0.27243}$$

Ecuación 3 Equivalencia estructural simplificada de materiales utilizados en la rehabilitación estructural de firmes.

$$\varepsilon_t = 1.61 \times 10^{-4}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 2, y variando los valores del porcentaje de vacíos Vv, se obtuvo la figura número 3 y su respectiva correlación.

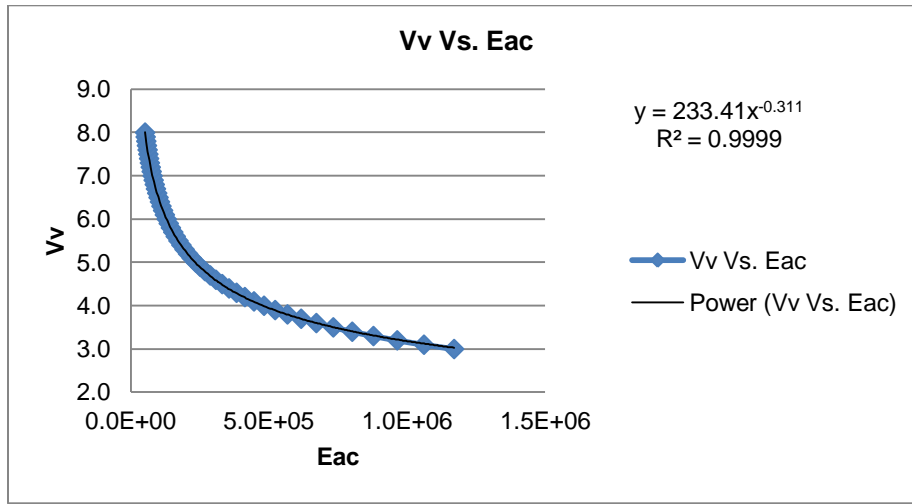


Figura 3 Vv Vs. Eac.

Con el módulo inicial de 3500 MPa, se calculó el porcentaje de vacíos de la mezcla, obteniendo un Vv=3.9%. Dicho valor, simulando el proceso deficiente de compactación, se aumenta a 4.5%, con el cual se calcula nuevamente el módulo, encontrando una variación entre ambos módulos del 35%, como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7 Porcentaje de variación del modulo según el Vv.

| | | | | | |
|------------|--------|-----|------|-----|--------------------------------------|
| Eac | 507632 | psi | 3500 | MPa | % Variación entre módulos |
| Vv | 3.9 | % | | | |
| Vv | 4.5 | % | | | 35% |
| Eac | 330232 | psi | 2277 | MPa | |

El porcentaje de aumento y disminución para los casos B, C y D, se calculará igual que lo descrito para todos los casos en el numeral 3.3.1.

Para cada caso se realizará el análisis multicapa con las condiciones medio ligadas y sin ligar. El supuesto de capas medio ligadas busca reflejar otro aspecto deficiente que se puede presentar durante la construcción del pavimento.

3.4 Cálculo de espesores y deformaciones.

Para calcular los espesores de cada una de las estructuras de pavimento que cumplan con las condiciones planteadas en cada uno de los escenarios y casos definidos en el subcapítulo 3.3, es necesario calcular las deformaciones admisibles, con las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon_{z,ad} = 0.016 \times (NE)^{-0.222}$$

Ecuación 4. Deformación vertical admisible en la subrasante y capas granulares.

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon_6 \times \left(\frac{NE}{1E6}\right)^b \times K_r \times K_t \times K_c \times K_s$$

Ecuación 5. Deformación horizontal admisible en materiales asfálticos.

Luego de esto se procederá con el cálculo de las deformaciones para cada tipo de falla.

3.4.1 Deformación permanente por ahuellamiento.

Mediante el análisis en el software multicapa ALIZE, se calcula la deformación vertical resiliente ε_r , la cual se utiliza en el modelo de VESYS:

$$\varepsilon_p = -\mu \times \varepsilon_r \times \frac{N^{1-\alpha}}{\alpha - 1}$$

Ecuación 6. Modelo Vesys.

Donde,

ε_p = deformación unitaria permanente debido a un ciclo de carga,

ε_r = deformación vertical resiliente a las 200 repeticiones de carga. Para el caso de cálculos numéricos este valor es la deformación vertical, que en este caso se obtiene para cada material mediante el programa de análisis elástico multicapa ALIZE.

N= número de aplicaciones de carga,

μ = parámetro de deformación permanente que representa una constante de proporcionalidad entre las deformaciones permanente y elástica,

α = parámetro de deformación permanente que indica la razón de decrecimiento en la deformación permanente a medida que el número de aplicaciones de carga aumenta.

Para el análisis, se emplearan los valores recomendados de α y μ para los materiales, que se muestran en la tabla 8.

Tabla 8 Valores recomendados. (Huang 1993)

| Capa | α | μ |
|-------------------|----------|-------|
| Superficial - HMA | 0.60 | 0.30 |
| Base granular | 0.90 | 0.25 |
| Subbase granular | 0.90 | 0.20 |
| Subrasante | 0.90 | 0.60 |

Para obtener mayor precisión, las capas de cada material se dividieron en subcapas de menor espesor y el valor de deformación plástica se calculo en el punto medio de cada subcapa; razón por la cual las capas de rodadura, base y subbase se dividieron como mínimo en 2 subcapas con espesores que variaron entre los 5 y 12.5 cm. Y para el caso de la subrasante, esta capa se dividió en dos subcapas de 15 cm cada una y una última capa semi-infinita, para un total de tres capas.

3.4.2 Deformación por fatiga.

El parámetro de la deformación a tensión que se relaciona con el daño por fatiga será el obtenido en el programa multicapa ALIZE en la fibra inferior de la carpeta asfáltica para cada nivel de tránsito y cada caso.

3.5 Cálculo del PCI con base en la deformación permanente.

Luego de tener el valor de deformación permanente (numeral 3.4.1), se espera lograr calcular una aproximación del valor de PCI que podría presentarse en la estructura para cada nivel de tránsito.

Para obtener lo anterior, se considerara que solo existe un tramo de pavimento con un área total de 100 m², dentro del cual se calculará el valor del PCI para cada nivel de tráfico definido. El procedimiento para dicho cálculo se realizará con base en la norma ASTM D6433-07, considerando las fallas producidas por las fallas de ahuellamiento.

Para el caso de este tipo de falla y de acuerdo con el numeral X1.19 de la norma ASTM D6433-07 para el cálculo del PCI, se deberá definir el tipo de severidad como se muestra en la tabla 9, suponiendo que la profundidad media del bache es igual al valor de la deformación permanente calculada mediante el método de VESYS.

Tabla 9 Niveles de severidad falla por ahuellamiento.

Elaboración propia con base en la tabla X1.1 de la norma ASTM D6433-07.

| Profundidad media del bache (mm) | | Nivel |
|----------------------------------|----------|-------|
| Inferior | Superior | |
| 6 | 13 | L |
| > 13 | 25 | M |
| > 25 | | H |

Luego de tener la clasificación de la falla por ahuellamiento, se realizarán los siguientes pasos:

1. Con el área de 100 m², calcular la densidad del tipo de falla.
2. Calcular el valor de deducción (DV) de las curvas del Apéndice X3 de la norma ASTM D 6433-07.
3. Calcular el valor de deducción corregido (CDV).
4. Calcular el máximo valor de deducción corregido (CDV).
5. Calcular **PCI = 100-max CDV**.
6. Por último, realizar el análisis cualitativo y cuantitativo con base en las gráficas y resultados obtenidos.

3.6 Análisis por fatiga.

Este tipo de falla no se incluirá en la aproximación del valor del PCI ya que de acuerdo con el numeral X1.5 de la norma ASTM D6433-07, esta clasificación en los niveles de severidad se realiza de manera visual, es decir, no se cuenta con una medición numérica, como se puede ver en la tabla 10.

Tabla 10 Clasificación niveles de severidad del daño por fatiga.

Elaboración propia con base en el numeral X1.5 ASTM D6433-07.

| Nivel | Descripción |
|-------|--|
| L | Grietas longitudinales que discurren paralelas entre sí, que no tengan o tengan pocas grietas interconectadas. Las grietas no se resquebrajaron. |
| M | Un mayor desarrollo de grietas en un patrón o una red de grietas que pueden ser desprendidas ligeramente. |
| H | Patrón de agrietamiento que ha progresado de manera que las piezas están bien definidas y se astillaron en los bordes. Algunas de las piezas pueden desprenderse bajo tráfico. |

Por lo anterior, para este tipo de daño se realizará un análisis cualitativo y cuantitativo utilizando los valores obtenidos en el análisis multicapa con el software ALIZE.

4 ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Escenario 1: Estructura de pavimento que cumple con diseño mecanicista y se construye de manera apropiada.

Luego de realizar el análisis en el software ALIZE, se definieron los espesores de las estructuras, cuyos valores de deformaciones estuvieran por debajo, pero cerca, de las admisibles calculadas.

Los espesores se muestran en la tabla 11, para cada caso y nivel de tráfico definido.

Tabla 11 Espesores de las estructuras para cada caso, escenario 1.

| CAPA | CASO A | | | CASO B | | | CASO C | | | CASO D | | |
|------------------|--------------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|
| | Espesor (cm) | | | | | | | | | | | |
| | NE 1 | NE 2 | NE 3 | NE 1 | NE 2 | NE 3 | NE 1 | NE 2 | NE 3 | NE 1 | NE 2 | NE 3 |
| Rodadura | 24 | 25 | 28 | 26 | 28 | 30 | 22 | 23 | 25 | 28 | 30 | 30 |
| Base Granular | 25 | 30 | 25 | 25 | 25 | 25 | 22 | 22 | 22 | 24 | 25 | 30 |
| Subbase granular | 25 | 25 | 25 | 20 | 25 | 25 | 20 | 22 | 22 | 25 | 25 | 26 |
| Subrasante | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |

Respecto a los espesores calculados se puede observar que para el caso de la rodadura y base granular este valor oscila entre 22 y 30 cm. Para el caso de la subbase granular el espesor varía entre 20 y 26 cm. Además, las estructuras del caso D son las más robustas, debido a que existe el doble de disminución de los valores de los módulos encontrados y la menos robusta la del caso C en donde los módulos aumentan 12% con respecto a los planteados inicialmente en el caso A.

4.1.1 Deformaciones permanentes.

Como es de esperarse, las cargas repetidas del tránsito generan deformaciones permanentes en la estructura de los pavimentos que se ven reflejadas en las capas asfálticas. Cabe aclarar que en este escenario en particular las deformaciones por ahuellamiento no serán fallas por deficiencia estructural ni por deterioros constructivos. Por el contrario, representan el deterioro natural que podría presentarse en una estructura de pavimento luego de que inicia su servicio al tránsito de vehículos y presenta una posible sobrecarga en la subrasante, haciendo que el esfuerzo vertical de compresión sobre la subrasante sea excesivo. Dichas deformaciones con las estructuras definidas, se calcularon mediante el método VESYS (Ecuación 6). El resumen de los resultados se visualizan en la tabla numero 12.

Tabla 12 Valores de deformación permanente, escenario 1.

| NE | ϵ_p permanente (mm) | | | |
|----------|------------------------------|--------|--------|--------|
| | Caso A | Caso B | Caso C | Caso D |
| 0.00E+00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2.00E+07 | 1.3 | 2.0 | 1.1 | 2.2 |

| NE | ϵ_p permanente (mm) | | | |
|----------|------------------------------|--------|--------|--------|
| | Caso A | Caso B | Caso C | Caso D |
| 3.00E+07 | 2.1 | 2.2 | 1.9 | 2.5 |
| 4.00E+07 | 2.2 | 2.4 | 2.1 | 2.7 |

En la figura 4 se grafican los datos de la tabla 12, para observar con claridad la tendencia de los datos.

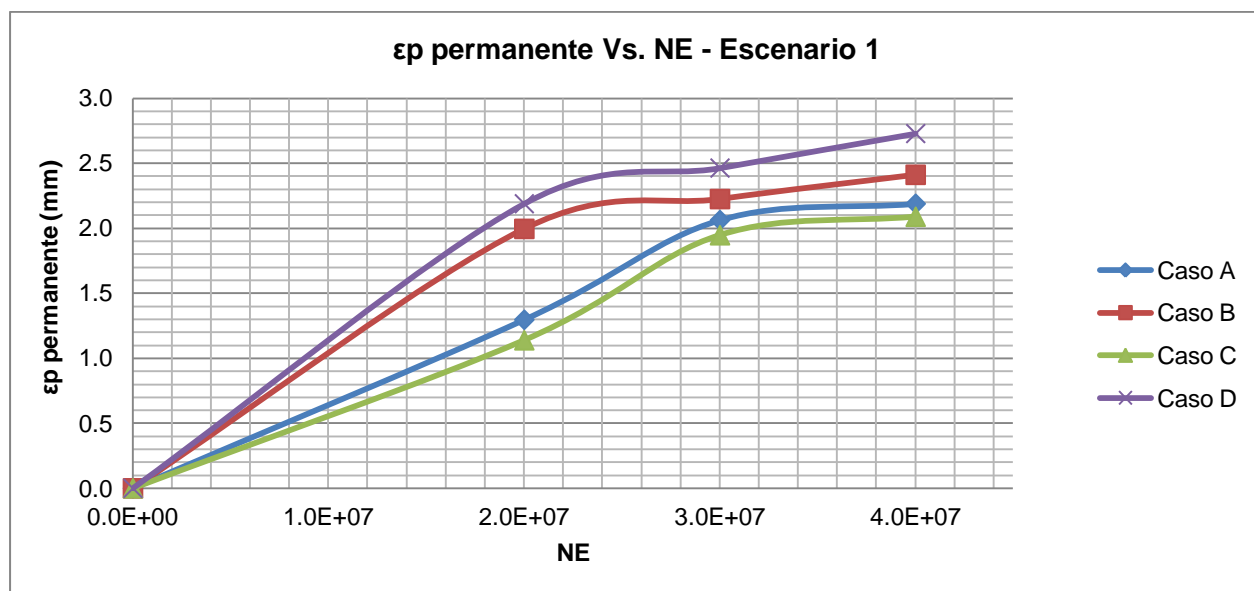


Figura 4 ϵ_p permanente Vs. NE - Escenario 1.

En la figura 4, se observa que las curvas de deformación versus ejes equivalentes tienen una forma sigmoide. Además, que la tendencia de los valores de deformación permanente tienden a estabilizarse después de los 30.000.000 de ejes equivalentes, especialmente para los casos A y C (módulos iniciales y aumento de módulos un 12% a partir del caso A), en comparación con los casos B y D (disminución del valor de los módulos a partir de los casos A y B respectivamente); por lo cual se concluye que mientras más robusta sea la estructura la deformación por ahuellamiento será menos progresiva.

A continuación se muestran los porcentajes de variación del valor de deformación permanente entre cada nivel de tránsito (tabla 13).

Tabla 13 Porcentaje de variación, deformaciones escenario 1.

| NE | % Variación - ϵ_p permanente | | | |
|----------|---------------------------------------|--------|--------|--------|
| | Caso A | Caso B | Caso C | Caso D |
| 0.00E+00 | | | | |
| 2.00E+07 | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 3.00E+07 | 37% | 10% | 42% | 11% |
| 4.00E+07 | 6% | 8% | 7% | 10% |

De acuerdo a la tabla anterior se puede deducir que en los casos A y C (módulos iniciales y aumento de módulos un 12% a partir del caso A), se presenta una gran variación en el valor de la deformación permanente, 37% y 42% respectivamente para el cambio de 20 a 30 millones de ejes equivalentes. Sin embargo y como ya se mencionó anteriormente el porcentaje de variación para el cambio de 30 a 40 millones de ejes es el más bajo, siendo de 6% y 7% para cada uno de estas dos situaciones.

En cuanto a los casos B y D (disminución del valor de los módulos a partir de los casos A y B respectivamente), se puede observar que el aumento en el valor de deformación permanente es equitativo entre el aumento de ejes de 20 a 30 y 30 a 40 millones de ejes con porcentajes que oscilan entre el 7% y 11%. Con lo cual se concluye que al presentarse disminución en los módulos de los materiales, el valor de la deformación será mayor y avanzará a velocidad constante a través del aumento del número de ejes.

4.1.2 Deformaciones por fatiga.

Para lograr un diseño óptimo de un pavimento mediante el método mecanicista, entre otras cosas debe tenerse en cuenta que los espesores que se definan son los que permitirán que las deformaciones calculadas tengan valores próximos a las admisibles, ya que así se optimizarán los recursos y no existirá un sobrediseño de la estructura.

En las tablas 14 y 15 se observan los valores de ϵ_t admisibles y ϵ_t de diseño respectivamente, que fueron calculados para cada caso y cada nivel de tránsito establecido.

Se puede observar que la diferencia entre los valores admisibles y de diseño no supera el 6%.

Tabla 14 Valores admisibles para deformación por fatiga, escenario 1.

| NE | ϵ_t fatiga admisibles | | | |
|----------|--------------------------------|----------|----------|----------|
| | Caso A | Caso B | Caso C | Caso D |
| 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 2.00E+07 | 1.04E-04 | 1.10E-04 | 1.10E-04 | 1.16E-04 |
| 3.00E+07 | 9.55E-05 | 1.01E-04 | 1.01E-04 | 1.07E-04 |
| 4.00E+07 | 9.02E-05 | 9.54E-05 | 9.54E-05 | 1.01E-04 |

Tabla 15 Valores de diseño para deformación por fatiga, escenario 1.

| NE | ϵ_t fatiga diseño | | | |
|----------|----------------------------|----------|----------|----------|
| | Caso A | Caso B | Caso C | Caso D |
| 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 2.00E+07 | 1.02E-04 | 1.08E-04 | 1.03E-04 | 1.13E-04 |
| 3.00E+07 | 9.49E-05 | 9.86E-05 | 9.83E-05 | 1.04E-04 |
| 4.00E+07 | 8.73E-05 | 9.16E-05 | 9.32E-05 | 1.01E-04 |

En la figura 5, se puede observar la tendencia de los datos de las deformaciones ϵ_t de diseño, identificando para los cuatros casos el mismo comportamiento. Contrario a la deformación por ahuellamiento, las deformaciones por fatiga disminuyen al aumentar el nivel de tráfico, situación que se debe básicamente a que la estructura es más robusta y posee mayor capacidad estructural en conjunto, que retarda la presencia de grietas en la parte inferior de las carpetas de rodadura, preservando la vida útil de la estructura.

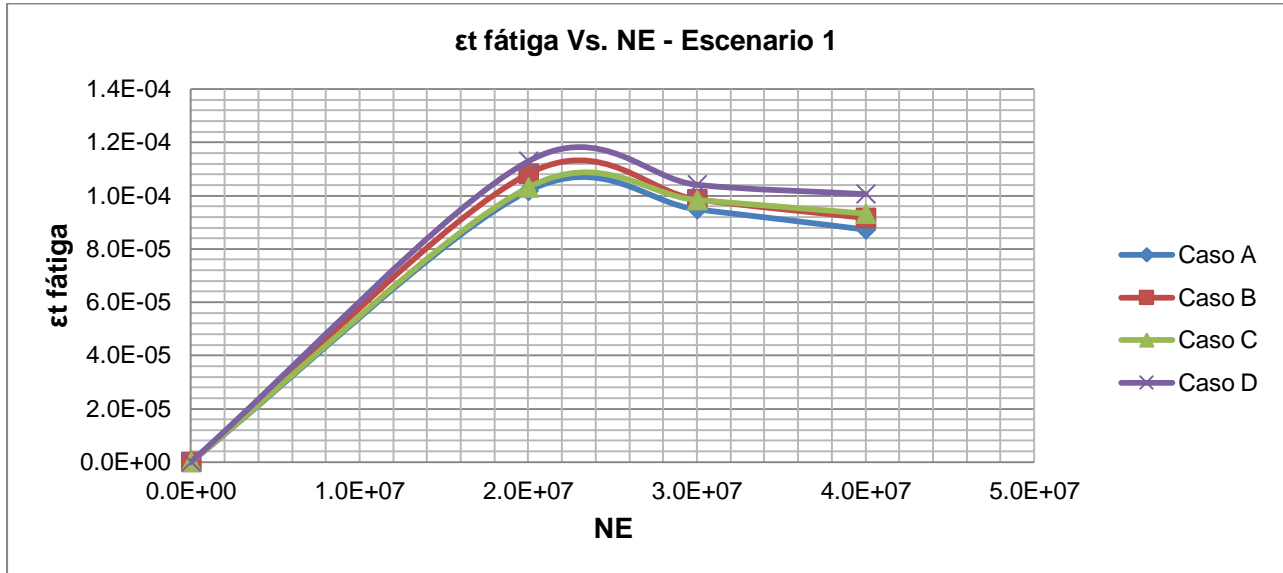


Figura 5 ϵ_t fatiga Vs. NE - Escenario 1.

Teniendo en cuenta que en este escenario no existieron fallas durante el diseño ni la construcción, la posible fisuración por fatiga que se presentara sería sólo un signo de que la estructura ha alcanzado el número de cargas para la cual fue diseñada; dejando de ser una falla temprana o no prevista y convirtiéndose en la progresión natural del diseño del pavimento.

4.1.3 Cálculo del PCI.

Para este escenario no se pudo calcular un valor aproximado para el PCI, puesto que ninguna de las huellas permanentes calculadas llegó a valores mínimos de 6 mm, como se observa en la tabla número 12. Este valor de 6 mm es el mínimo requerido para clasificar este fenómeno como un daño que incide en el índice de condición superficial de un pavimento, de acuerdo a lo especificados en la tabla 9.

Por lo tanto se puede afirmar que el pavimento se encontraría en una condición con un PCI que podría estar entre 85 y valores cercanos a 100, clasificándose según la norma ASTM D6433-07 como *bueno*.

4.2 Escenario 2: Estructura de pavimento que cumple con diseño mecanicista y se construye de manera deficiente.

Teniendo en cuenta que para el escenario 2 la estructura se diseñó correctamente, el análisis en ALIZE se ejecutó con todas las capas ligadas en cada uno de los niveles para cada tránsito, obteniendo los espesores mostrados en la tabla número 16.

Tabla 16 Espesores de las estructuras para cada caso, escenario 2.

| CAPA | CASO A | | | CASO B | | | CASO C | | | CASO D | | |
|------------------|--------------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|
| | Espesor (cm) | | | | | | | | | | | |
| | NE 1 | NE 2 | NE 3 | NE 1 | NE 2 | NE 3 | NE 1 | NE 2 | NE 3 | NE 1 | NE 2 | NE 3 |
| Rodadura | 30 | 32 | 33 | 32 | 35 | 35 | 25 | 25 | 28 | 35 | 36 | 38 |
| Base Granular | 30 | 30 | 33 | 30 | 30 | 32 | 25 | 25 | 28 | 32 | 38 | 38 |
| Subbase granular | 25 | 30 | 30 | 30 | 30 | 32 | 22 | 28 | 28 | 32 | 35 | 35 |
| Subrasante | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |

Al igual que en el escenario 1, los rangos de espesores para la carpeta de rodadura y base granular con los cuales quedaron definidas todas las estructuras de este escenario son los mismos (25-38 cm). Para el caso de la subbase granular los espesores estuvieron entre 22 y 35 cm, siendo de 13 cm la diferencia entre el rango menor y mayor para las tres capas respectivamente.

Como era de esperarse la estructura que requiere menores espesores de material es la del caso C, ya que en este los módulos son los mayores en comparación con los otros tres casos.

4.2.1 Deformaciones permanentes.

Debido a que para el escenario 2 se estableció la situación de que existiría un proceso constructivo deficiente en obra, el análisis en ALIZE para el cálculo de la deformación vertical en cada capa que permitirá encontrar el valor de la deformación permanente en toda la estructura, se realizó para las condiciones con capas medio ligadas y sin ligar como se muestra en la tabla 17 y figura 6.

Tabla 17 Valores de deformación permanente, escenario 2.

| NE | ϵ_p permanente (mm) | | | | | | | |
|----------|------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| | Caso A - 1/2 Ligada | Caso A - Sin ligar | Caso B - 1/2 Ligada | Caso B - Sin ligar | Caso C - 1/2 Ligada | Caso C - Sin ligar | Caso D - 1/2 Ligada | Caso D - Sin ligar |
| 0.00E+00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2.00E+07 | 3.1 | 3.7 | 3.5 | 4.2 | 2.2 | 2.6 | 3.8 | 4.6 |
| 3.00E+07 | 3.5 | 4.2 | 3.9 | 4.7 | 2.5 | 3.1 | 4.4 | 5.2 |
| 4.00E+07 | 3.9 | 4.6 | 4.3 | 5.1 | 3.0 | 3.5 | 4.8 | 5.7 |

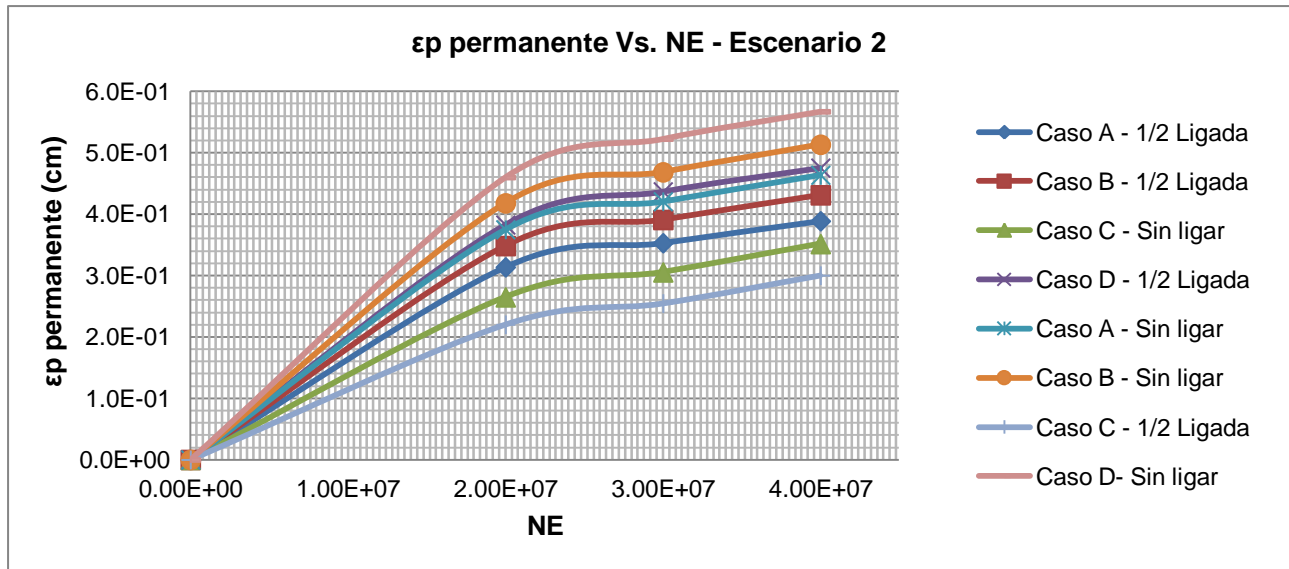


Figura 6 ϵ_p permanente Vs. NE - Escenario 2.

Contrario al comportamiento del ahuellamiento en el escenario 1, en este escenario se observa como la deformación tiende a aumentar cuando se incrementan el número de ejes equivalentes, lo cual refleja el supuesto de un mal proceso constructivo, que no solo acelera la caída del índice de condición inicial sino también la disminución de la capacidad estructural de un pavimento.

En la tabla 18, se muestran los porcentajes de variación entre los valores de la deformación permanente, los cuales no presentan mayor diferencia encontrándose en un rango entre el 8% y 15%. En comparación con el escenario 1, en el escenario 2 este tipo de deformación presenta una tendencia de aumento proporcional sin tendencia de estabilización, lo cual indica que este daño es de tipo progresivo en las estructuras cuando la construcción no se realiza de manera adecuada, a pesar de que el diseñador entregue diseños finales que satisfagan los principios de control de deterioro mecanicistas.

Tabla 18 Porcentaje de variación, deformaciones escenario 2.

| NE | ϵ_p permanente (cm) | | | | | | | |
|----------|------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | Caso A - 1/2 Ligada | Caso A - Sin ligar | Caso B - 1/2 Ligada | Caso B - Sin ligar | Caso C - 1/2 Ligada | Caso C - Sin ligar | Caso D - 1/2 Ligada | Caso D - Sin ligar |
| 0.00E+00 | | | | | | | | |
| 2.00E+07 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 3.00E+07 | 11% | 11% | 11% | 11% | 14% | 13% | 12% | 12% |
| 4.00E+07 | 9% | 9% | 9% | 9% | 15% | 13% | 8% | 8% |

4.2.2 Deformaciones por fatiga.

Para el correcto diseño de las estructuras, se ligaron todas las capas encontrando los valores de diseño para ϵ_t admisibles (tabla 19) y ϵ_t de diseño mostrados en la tabla 20 y figura 7.

Tabla 19 Valores admisibles para fatiga, escenario 2.

| NE | ϵt fatiga admisibles | | | |
|----------|--------------------------------|----------|----------|----------|
| | Caso A | Caso B | Caso C | Caso D |
| 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 2.00E+07 | 1.22E-04 | 1.29E-04 | 1.22E-04 | 1.29E-04 |
| 3.00E+07 | 1.12E-04 | 1.19E-04 | 1.12E-04 | 1.19E-04 |
| 4.00E+07 | 1.06E-04 | 1.12E-04 | 1.06E-04 | 1.12E-04 |

Tabla 20 Valores para fatiga de diseño, escenario 2.

| NE | ϵt fatiga diseño | | | |
|----------|----------------------------|----------|----------|----------|
| | Caso A | Caso B | Caso C | Caso D |
| 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 2.00E+07 | 1.21E-04 | 1.26E-04 | 1.12E-04 | 1.27E-04 |
| 3.00E+07 | 1.11E-04 | 1.13E-04 | 1.11E-04 | 1.19E-04 |
| 4.00E+07 | 1.05E-04 | 1.12E-04 | 9.65E-05 | 1.11E-04 |

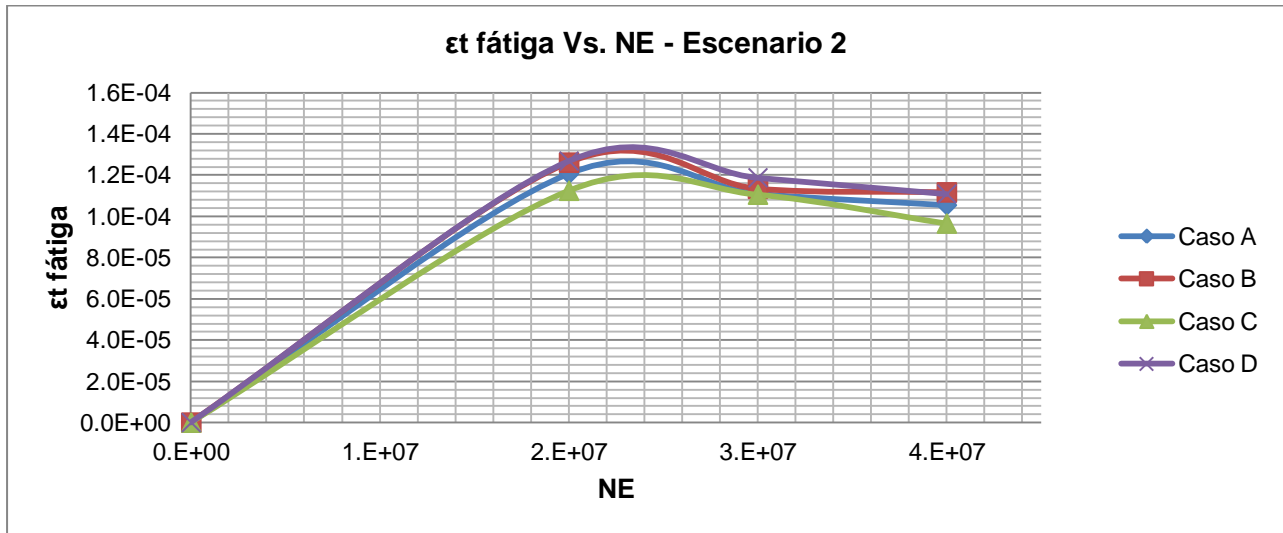


Figura 7 ϵt fatiga Vs. NE - Escenario 2.

Al igual que en el escenario 1, se puede observar que al aumentar el número de ciclos la deformación que se necesita para generar daño por fatiga a ese número de ciclos es menor, es decir, a medida que aumenta el tráfico se requieren estructuras más robustas que produzcan menores valores de deformación para evitar fallas.

Como en el proceso constructivo se tomaron las condiciones de capas medio ligadas y sin ligar, se realizó nuevamente el análisis en el programa ALIZE para observar si estos procedimientos afectaban las deformaciones por fatiga y, efectivamente, las tablas 21 y 22 muestran que ninguno de los valores de control se encuentra por debajo de los admisibles, es decir, la estructura construida presenta fallas por fatiga mucho antes de lo esperado, situación que pudo presentarse por el proceso de compactación deficiente que hace que no se conserven los espesores adecuados permitiendo grandes deflexiones en la estructura.

Tabla 21 Deformaciones por fatiga para capas 1/2 ligadas y sin ligar.

| NE | εt fatiga | | | | | | | |
|----------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | Caso A - 1/2 Ligada | Caso A - Sin ligar | Caso B - 1/2 Ligada | Caso B - Sin ligar | Caso C - 1/2 Ligada | Caso C - Sin ligar | Caso D - 1/2 Ligada | Caso D - Sin ligar |
| 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 2.00E+07 | 1.70E-04 | 2.19E-04 | 1.76E-04 | 2.27E-04 | 1.62E-04 | 2.12E-04 | 1.76E-04 | 2.24E-04 |
| 3.00E+07 | 1.55E-04 | 2.00E-04 | 1.57E-04 | 2.00E-04 | 1.60E-04 | 2.09E-04 | 1.64E-04 | 2.09E-04 |
| 4.00E+07 | 1.47E-04 | 1.89E-04 | 1.55E-04 | 1.98E-04 | 1.37E-04 | 1.78E-04 | 1.52E-04 | 1.94E-04 |

Tabla 22 Cumplimiento de deformación admisible. C=Cumple, NC=No cumple.

| NE | εt permanente (cm) | | | | | | | |
|----------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | Caso A - 1/2 Ligada | Caso A - Sin ligar | Caso B - 1/2 Ligada | Caso B - Sin ligar | Caso C - 1/2 Ligada | Caso C - Sin ligar | Caso D - 1/2 Ligada | Caso D - Sin ligar |
| 0.00E+00 | | | | | | | | |
| 2.00E+07 | NC | NC | NC | NC | NC | NC | NC | NC |
| 3.00E+07 | NC | NC | NC | NC | NC | NC | NC | NC |
| 4.00E+07 | NC | NC | NC | NC | NC | NC | NC | NC |

4.2.3 Cálculo del PCI.

Para este escenario el valor más alto para el tamaño de la deformación permanente fue de 5.7 mm, como se observó en la tabla 17, por lo tanto no se pudo calcular un valor de aproximación para el PCI.

Sin embargo, se debe tener presente que si este valor de huella permanente se estuviera presentando a lo largo de todo el pavimento, sería un problema importante que habría que solucionar ya que de acuerdo con la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA), huellas con profundidades de 5 a 7 mm pueden producir hidroplaneo en las superficies de rodamiento (Garnica P., Delgado H., y Sandoval D. 2005).

4.3 Escenario 3: Estructura de pavimento que no cumple con diseño mecanicista y se construye de manera adecuada.

En este escenario la estructura diseñada de forma incorrecta no cumple con las deformaciones a tensión en la carpeta asfáltica ni con la deformación vertical en la subrasante, para lo cual se disminuyeron los espesores de algunas capas de la estructura, obteniendo las estructuras mostradas en la tabla 23. Sin embargo, este diseño deficiente se construirá de la manera correcta conservando espesores, compactando adecuadamente, empleando los materiales adecuados y se pondrá en servicio en el momento adecuado.

Tabla 23 Espesores de las estructuras para cada caso, escenario 3.

| CAPA | CASO A | | | CASO B | | | CASO C | | | CASO D | | |
|------------------|--------------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|
| | Espesor (cm) | | | | | | | | | | | |
| | NE 1 | NE 2 | NE 3 | NE 1 | NE 2 | NE 3 | NE 1 | NE 2 | NE 3 | NE 1 | NE 2 | NE 3 |
| Rodadura | 20 | 21 | 26 | 24 | 26 | 28 | 20 | 21 | 23 | 26 | 28 | 28 |
| Base Granular | 20 | 25 | 23 | 22 | 23 | 23 | 20 | 20 | 20 | 22 | 23 | 28 |
| Subbase granular | 20 | 22 | 23 | 18 | 23 | 23 | 18 | 20 | 20 | 23 | 23 | 24 |
| Subrasante | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |

Casualmente y al igual que en los escenarios 1 y 2, el rango de variación de los espesores para la carpeta de rodadura y la base granular son los mismos (20-28 cm). Para el caso de la subbase granular los espesores estuvieron entre 18 y 24 cm, con una variación de sólo de 6 cm. Claramente en comparación con los dos escenarios anteriores los espesores son menores con el fin de producir deformaciones que superaran las admisibles.

4.3.1 Deformaciones permanentes.

Cumpliendo con la condición de que existiera una buena construcción, para el análisis de las deformaciones todas las capas fueron ligadas en el programa ALIZE. En la tabla 24 y figura 8, se muestran los resultados para cada caso y el número de ejes.

Tabla 24 Valores de deformación permanente, escenario 3.

| NE | εp permanente (mm) | | | |
|----------|--------------------|--------|--------|--------|
| | Caso A | Caso B | Caso C | Caso D |
| 0.00E+00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2.00E+07 | 1.3 | 2.1 | 1.2 | 2.3 |
| 3.00E+07 | 2.1 | 2.3 | 1.9 | 2.5 |
| 4.00E+07 | 2.2 | 2.5 | 2.1 | 2.8 |

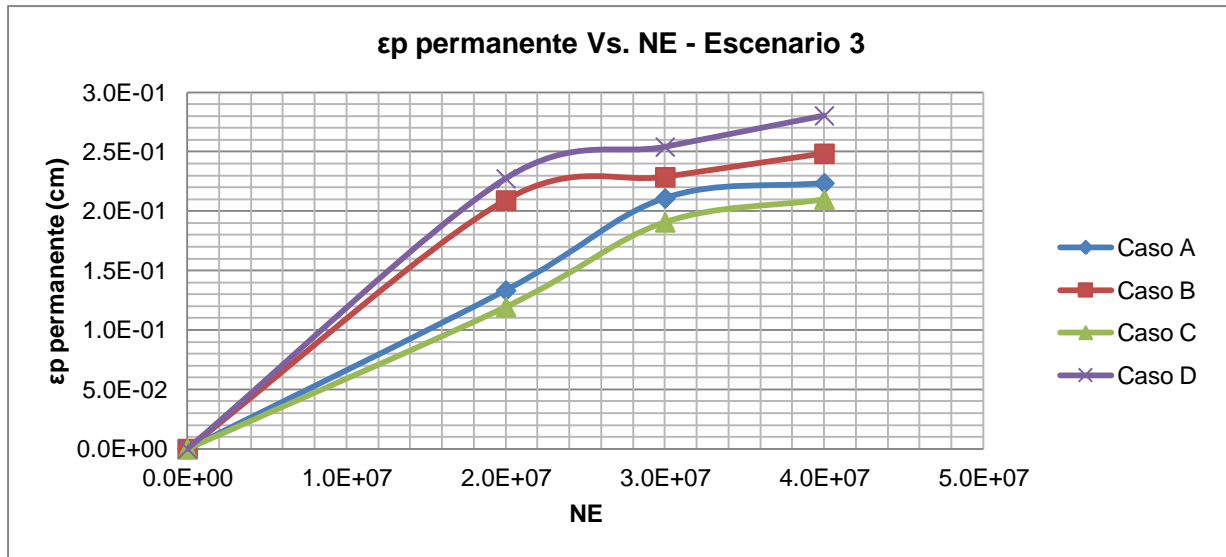


Figura 8 εp permanente Vs. NE - Escenario 3.

En comparación con los valores en mm de deformación permanente que se encontraron en el escenario 1 (tabla 12), se puede concluir que los obtenidos en este caso son muy similares, es decir, que aunque una estructura se encuentre mal diseñada, el proceso constructivo es clave en el buen desempeño de esta una vez se pone en servicio.

Para ambos escenarios la huella permanente no supera 2.8 mm, lo cual no es representativo como índice de daño, puesto que no existiría daño funcional.

Adicionalmente, se observa que al igual que en el escenario 1, las curvas de deformación versus ejes equivalentes tienen una tendencia que indica que los valores de deformación permanente tienden a estabilizarse después de los 30.000.000 de ejes equivalentes.

En la tabla 25 se muestran los porcentajes de variación del valor de deformación permanente entre cada nivel de tránsito.

Tabla 25 Porcentaje de variación, deformaciones escenario 3.

| NE | εp permanente (cm) | | | |
|----------|--------------------|--------|--------|--------|
| | Caso A | Caso B | Caso C | Caso D |
| 0.00E+00 | | | | |
| 2.00E+07 | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 3.00E+07 | 37% | 9% | 37% | 11% |
| 4.00E+07 | 6% | 8% | 9% | 9% |

Con la tabla anterior se corrobora el comportamiento similar que se presenta entre los casos A y C (módulos iniciales y aumento de módulos un 12% a partir del caso A), ya que la variación entre las deformaciones es del 37% para el primer aumento de ejes, mientras que para el segundo solo es del 6% y 9% respectivamente, siendo en estos 2 casos donde se presentan los

módulos más altos para los 4 tipos de materiales que constituyen la estructura, demostrando que mientras mayor capacidad de respuesta estructural posean los pavimentos mayor será la probabilidad de que huellas permanentes representativas se presenten en la primera parte del ciclo de vida de la misma estructura y disminuyan luego de un tiempo.

Para los casos B y D (disminución del valor de los módulos a partir de los casos A y B respectivamente), por el contrario, aunque las variaciones son menores, los valores de deformación son mayores, mostrando un comportamiento progresivo, lo cual se deberá a los módulos bajos que poseen los materiales.

4.3.2 Deformaciones por fatiga.

Las deformaciones admisibles para las estructuras de pavimento de cada caso y nivel de tránsito se calcularon con todas las capas ligadas, obteniendo los valores relacionados en la tabla 26.

Tabla 26 Valores de ϵ_t fatiga admisible, escenario 3.

| NE | ϵ_t fatiga admisible | | | |
|----------|-------------------------------|----------|----------|----------|
| | Caso A | Caso B | Caso C | Caso D |
| 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 2.00E+07 | 1.04E-04 | 1.10E-04 | 1.10E-04 | 1.16E-04 |
| 3.00E+07 | 9.55E-05 | 1.01E-04 | 1.01E-04 | 1.07E-04 |
| 4.00E+07 | 9.02E-05 | 9.54E-05 | 9.54E-05 | 1.01E-04 |

En la tabla 27 y figura 9 se muestran los valores que se obtuvieron disminuyendo los espesores para superar los admisibles en la rodadura y subrasante.

Tabla 27 Valores de ϵ_t fatiga diseño.

| NE | ϵ_t fatiga diseño | | | |
|----------|----------------------------|----------|----------|----------|
| | Caso A | Caso B | Caso C | Caso D |
| 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 2.00E+07 | 1.27E-04 | 1.21E-04 | 1.15E-04 | 1.25E-04 |
| 3.00E+07 | 1.16E-04 | 1.09E-04 | 1.09E-04 | 1.15E-04 |
| 4.00E+07 | 9.63E-05 | 1.01E-04 | 1.01E-04 | 1.10E-04 |

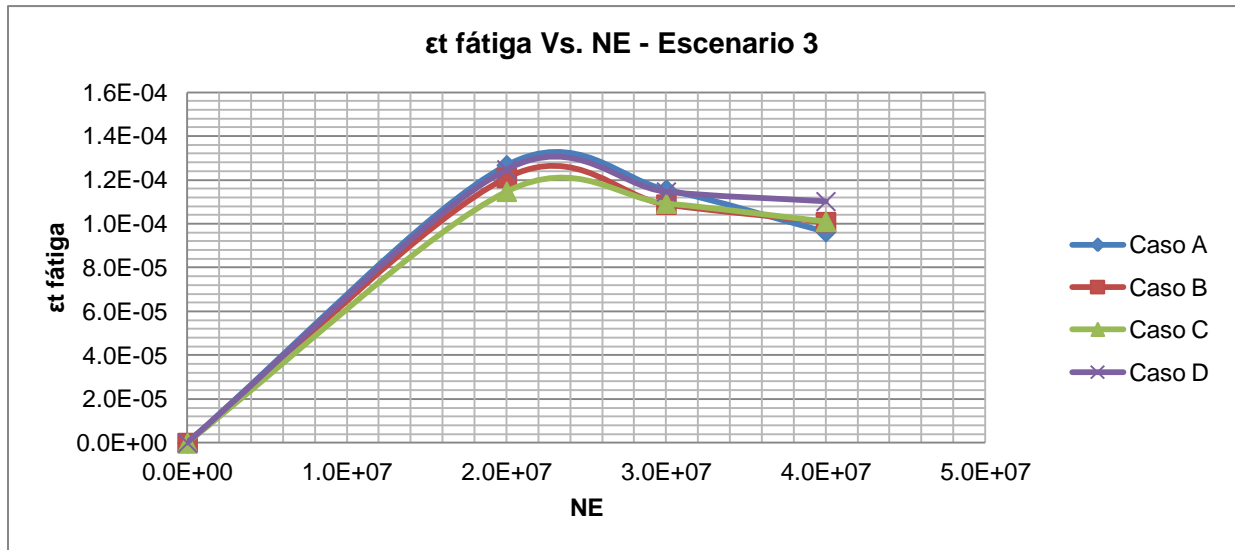


Figura 9 εt fátiga Vs. NE - Escenario 3.

Al igual que en los escenarios 1 y 2, se puede concluir que para que el pavimento soporte los números de ciclos establecidos se deben aplicar deformaciones iguales o menores a las encontradas como admisibles. Así, al aumentar el tráfico se necesitaran deformaciones menores para evitar la falla temprana.

Sin embargo debe tenerse en cuenta que este comportamiento depende también del criterio del diseñador ya que observando las tablas 26 y 27 se puede definir que hay algunos valores que superan los admisibles en muy poca proporción mientras que otros hubiesen podido establecerse más cercanos al valor permitido, es decir, sin disminuir tanto el espesor de la capa pero estableciendo espesores que constructivamente sean fáciles de realizar.

4.3.3 Cálculo del PCI.

Debido a que la deformación permanente de mayor profundidad que se presente es de 2.8 mm no se logró calcular un valor aproximado para el PCI de la estructura. Seguramente si no se presentaran otro tipo de fallas en la estructura el valor del PCI estaría entre 85 y cercano a 100, es decir, buen estado.

4.4 Escenario 4: Estructura de pavimento que no cumple con diseño mecanicista y se construye de manera deficiente.

Al igual que en el escenario 3, el diseño se realizó buscando no cumplir con las deformaciones admisibles en la carpeta y subrasante, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla numero 28. En este escenario para las 3 primeras capas de materiales se obtuvieron variaciones de máximo 13 cm entre los niveles; y al igual que en los tres escenarios anteriores las 2 primeras (carpeta y base granular) tuvieron el mismo rango de variación de 23 a 36 cm, mientras que la subbase granular estuvo entre 20 y 33 cm.

Tabla 28 Espesores de las estructuras para cada caso, escenario 4.

| CAPA | CASO A | | | CASO B | | | CASO C | | | CASO D | | |
|------------------|--------------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|
| | Espesor (cm) | | | | | | | | | | | |
| | NE 1 | NE 2 | NE 3 | NE 1 | NE 2 | NE 3 | NE 1 | NE 2 | NE 3 | NE 1 | NE 2 | NE 3 |
| Rodadura | 28 | 30 | 30 | 30 | 33 | 33 | 23 | 23 | 26 | 33 | 34 | 36 |
| Base Granular | 28 | 28 | 30 | 28 | 28 | 30 | 23 | 23 | 26 | 30 | 36 | 36 |
| Subbase granular | 23 | 28 | 28 | 28 | 28 | 30 | 20 | 26 | 26 | 30 | 32 | 33 |
| Subrasante | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |

En comparación con las estructuras obtenidas en el escenario 2 (cumple diseño y construcción deficiente), donde los módulos son iguales para los 4 niveles que en este escenario, se puede observar que el 92% de los espesores fueron reducidos solo en 2 cm, lo cual genera cierta incertidumbre respecto al tema constructivo ya que una diferencia tan pequeña fácilmente podría presentarse en obra si no hay un adecuado control y esto generaría inmediatamente disminución en el ciclo de vida de cualquier estructura de pavimento.

4.4.1 Deformaciones permanentes.

El cálculo de la deformación vertical en cada una de las capas para encontrar el valor de la deformación permanente en toda la estructura, se realizó para las condiciones de medio liga y sin ligar, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 29.

Tabla 29 Valores de ϵ_p permanente, Escenario 4.

| NE | ϵ_p permanente (mm) | | | | | | | |
|----------|------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | Caso A - 1/2 Ligada | Caso A - Sin ligar | Caso B - 1/2 Ligada | Caso B - Sin ligar | Caso C - 1/2 Ligada | Caso C - Sin ligar | Caso D - 1/2 Ligada | Caso D - Sin ligar |
| 0.00E+00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2.00E+07 | 3.2 | 3.7 | 3.6 | 4.3 | 2.6 | 3.2 | 3.8 | 4.5 |
| 3.00E+07 | 3.4 | 3.8 | 3.7 | 4.5 | 3.0 | 3.6 | 4.2 | 4.9 |
| 4.00E+07 | 4.0 | 4.7 | 4.3 | 5.0 | 3.2 | 4.0 | 4.6 | 5.3 |

Comparando con los valores obtenidos en el escenario 2 (tabla 18), en el cual la estructura se entregaba bien diseñada, se puede observar que la condición determinante para el buen desempeño de un pavimento es el proceso constructivo, ya que los valores de las deformaciones permanentes en ambos escenarios son casi iguales, estando en algunos casos por encima las del escenario 2 un par de milímetros. Concluyendo así, que un pavimento bien diseñado pero mal construido podría durar menos que uno mal diseñado y bien construido.

En la tabla 30, se relacionan los porcentajes de variación de las deformaciones con relación al cambio de niveles de tránsito, dichos valores se encuentran en un rango desde el 2% hasta el 19%.

Tabla 30 Porcentajes de variación de ϵ_p permanente, Escenario 4

| NE | ϵ_p permanente | | | | | | | |
|----------|-------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | Caso A - 1/2 Ligada | Caso A - Sin ligar | Caso B - 1/2 Ligada | Caso B - Sin ligar | Caso C - 1/2 Ligada | Caso C - Sin ligar | Caso D - 1/2 Ligada | Caso D - Sin ligar |
| 0.00E+00 | | | | | | | | |
| 2.00E+07 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 3.00E+07 | 6% | 3% | 3% | 6% | 12% | 11% | 10% | 8% |
| 4.00E+07 | 15% | 19% | 14% | 9% | 2% | 10% | 8% | 8% |

En la figura 10, se observa gráficamente el comportamiento de los valores de deformación. Como se esperaba, el caso con menores deformaciones es el C (aumento de módulos con respecto a las iniciales) bajo la condición de capas medio ligadas. Además, el nivel con mayor deformaciones es el 4 (mayor disminución de módulos) con las capas sin ligar, encontrando una diferencia promedio del 40% entre estos dos.

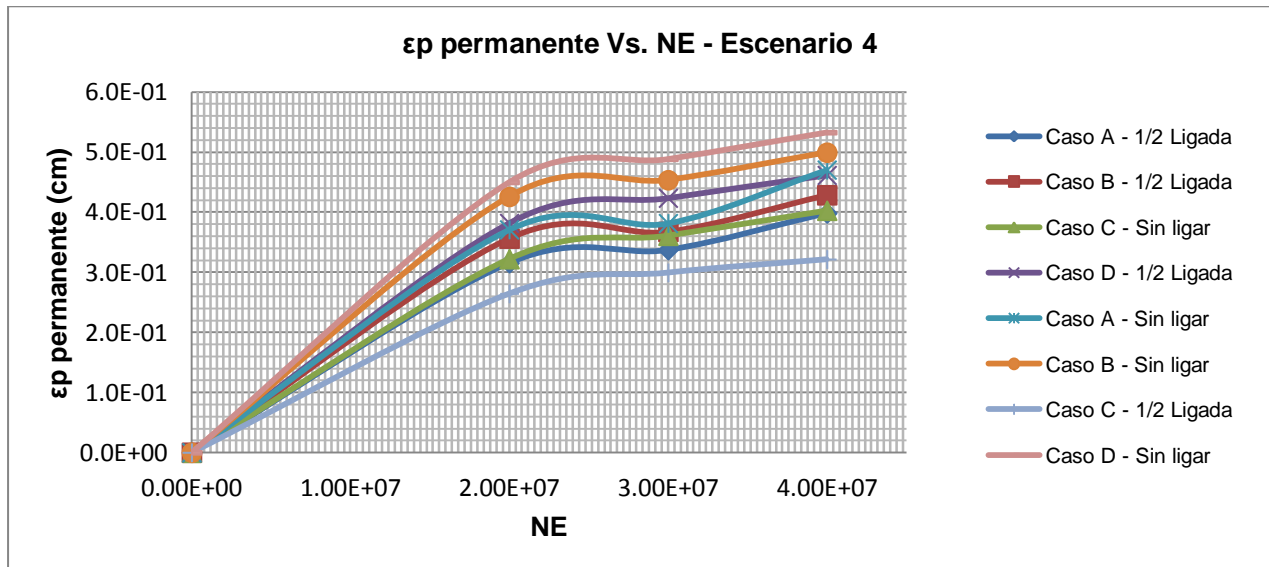


Figura 10 ϵ_p permanente Vs. NE - Escenario 4

4.4.2 Deformaciones por fatiga.

En las tablas 31 y 32 se muestran los valores admisibles para fatiga y los calculados en el diseño respectivamente.

Tabla 31 Valores de ϵ_t fatiga admisible, escenario 4.

| NE | ϵ_t fatiga admisibles | | | |
|----------|--------------------------------|----------|----------|----------|
| | Caso A | Caso B | Caso C | Caso D |
| 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 2.00E+07 | 1.22E-04 | 1.29E-04 | 1.22E-04 | 1.29E-04 |
| 3.00E+07 | 1.12E-04 | 1.19E-04 | 1.12E-04 | 1.19E-04 |
| 4.00E+07 | 1.06E-04 | 1.12E-04 | 1.06E-04 | 1.12E-04 |

Tabla 32 Valores de ϵ_t fatiga admisible, escenario 4.

| NE | ϵ_t fatiga diseño | | | |
|----------|----------------------------|----------|----------|----------|
| | Caso A | Caso B | Caso C | Caso D |
| 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 2.00E+07 | 1.32E-04 | 1.38E-04 | 1.24E-04 | 1.38E-04 |
| 3.00E+07 | 1.21E-04 | 1.24E-04 | 1.22E-04 | 1.29E-04 |
| 4.00E+07 | 1.20E-04 | 1.22E-04 | 1.06E-04 | 1.20E-04 |

En la figura número 11, se visualiza el comportamiento de las deformaciones por fatiga encontradas en el diseño para este escenario.

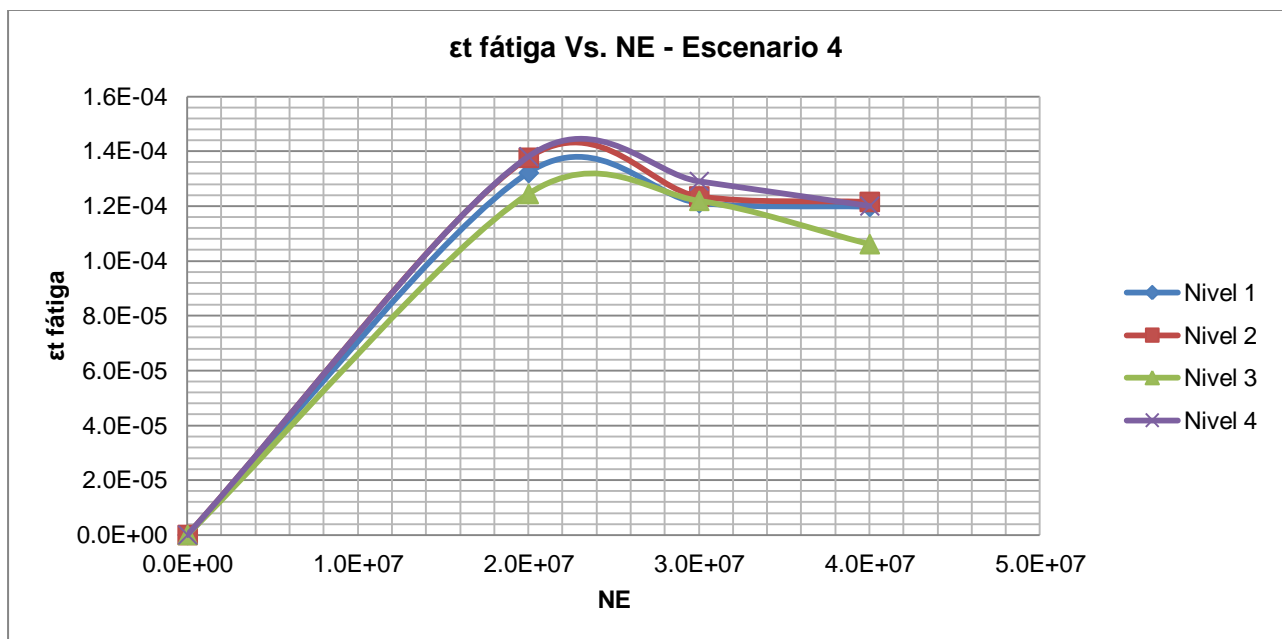


Figura 11 ϵ_t fatiga Vs. NE - Escenario 4.

Al igual que en los tres escenarios anteriores, el valor de las deformaciones por fatiga tiende a disminuir al aumentar los ejes que circularan sobre la estructura.

Como al hecho de que el diseño no fue el adecuado, se suma el mal proceso constructivo que se ejecutó en obra. En este caso, se realiza nuevamente el análisis en el programa ALIZE con las condiciones de capas medio ligadas y sin ligar, obteniendo los valores que se muestran en la tabla 33 para las deformaciones por fatiga.

Los valores encontrados para fatiga luego del proceso constructivo están en promedio 41% por encima de los entregados en el diseño, lo cual demuestra el inicio de un deterioro acelerado de los materiales que constituyen las estructuras de pavimento propuestas en este escenario.

Tabla 33 Deformaciones por fatiga para capas 1/2 ligadas y sin ligar

| NE | εt fatiga por construcción | | | | | | | |
|----------|----------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| | Caso A - 1/2 Ligada | Caso A - Sin ligar | Caso B - 1/2 Ligada | Caso B - Sin ligar | Caso C - 1/2 Ligada | Caso C - Sin ligar | Caso D - 1/2 Ligada | Caso D - Sin ligar |
| 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 2.00E+07 | 1.88E-04 | 2.43E-04 | 1.94E-04 | 2.50E-04 | 1.81E-04 | 2.38E-04 | 1.92E-04 | 2.46E-04 |
| 3.00E+07 | 1.71E-04 | 2.20E-04 | 1.72E-04 | 2.20E-04 | 1.78E-04 | 2.35E-04 | 1.79E-04 | 2.30E-04 |
| 4.00E+07 | 1.69E-04 | 2.18E-04 | 1.69E-04 | 2.17E-04 | 1.53E-04 | 1.99E-04 | 1.66E-04 | 2.12E-04 |

4.4.3 *Calculo del PCI.*

A pesar de que la deformación permanente máxima que se encontró en este escenario corresponde a 5.3 mm y no se logra calcular un valor aproximado para el PCI de la estructura, es muy posible que si exista una disminución considerable en este índice, puesto que la deformación por fatiga sufre aumentos cercanos al 50% de lo proyectado en el diseño, lo que indica que la falla superficial que dominará el valor de este parámetro será esta última, pero lastimosamente no existe una relación o medida numérica que permita darle una clasificación a la fatiga dentro del proceso de diseño de un pavimento.

Adicionalmente a esto, la medida de la fatiga que explica la norma visualmente no es la más precisa ya que dependerá de la percepción, experiencia y criterio de la persona que la realice, como recomendación estaría tomar la descripción que dan otros métodos como el VIZIR, donde la medida de la abertura de la grieta permite su clasificación en niveles de severidad, sin embargo seguirá siendo visual y no se podrá medir sino hasta que la estructura ya este construida y en funcionamiento.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la ingeniería de pavimentos hacen falta herramientas que permitan relacionar el comportamiento de los materiales con metodologías para realizar la evaluación progresiva del estado de la estructura, tales como el índice de condición inicial. Contar con herramientas de esta naturaleza permitiría estimar desde la etapa de diseño con mayor exactitud los tiempos en los cuales se deberán hacer intervenciones. Adicionalmente, estas herramientas permitirían definir qué tipo de materiales influyen de manera positiva o negativa la condición superficial de las estructuras, facilitando el diseño y construcción de pavimentos más cómodos y seguros para los usuarios.

El proceso constructivo tiene un papel decisivo dentro de la ingeniería de pavimentos ya que como se pudo observar en el desarrollo del trabajo, el simple hecho de no ligar completamente las capas de una estructura repercute directamente en el aumento de las fallas por ahuellamiento y fatiga. Estas condiciones claramente debilitan el pavimento y no le permiten cumplir con el periodo de diseño para el cual fue proyectado. De ahí la conclusión de que un pavimento mal diseñado pero construido de la manera correcta pueda durar más que uno bien diseñado y mal construido.

Aunque las fallas por ahuellamiento se pueden generar en cualquiera de las capas del pavimento, es común que sean atribuidas a la sobrecarga o poca capacidad estructural de la subrasante, razón por la cual es importante el análisis mediante el método de VESYS que se realizó, ya que demostró que gran aporte a la deformación permanente en algunos de los casos y niveles la hacen las demás capas que conforman la estructura.

Para futuros análisis de deformación permanente, se debe buscar una mejor manera para relacionar la posible causa de que la calidad de los materiales recibidos en obra no sea la que cumpla con las normas vigentes o parámetros entregados por el diseñador, ya que esto disminuiría en mayor porcentaje el valor de los módulos aumentando dicha deformación.

En cuanto a la fisuración por fatiga, se debe tener en cuenta que su formación inicial empieza en la parte inferior de las capas que tienen material asfáltico o cementado, por lo cual es posible que en el momento en que se reflejen en la superficie como falla funcional, ya exista un daño interno estructural.

Las metodologías para establecer la condición superficial del pavimento como el PCI, VIZIR, IRI, entre otras, deben seguir investigándose con el fin de lograr estandarizar parámetros como la velocidad de medición, temperatura ambiente y de la estructura, establecer valores numéricos que permitan definir los niveles de severidad para cada tipo de falla; todo esto con el fin de lograr disminuir al máximo las definiciones visuales ya que estas siempre serán diferentes para cada observador.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Garnica P., Delgado H., y Sandoval D. (2005). "Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas", *Secretaría de comunicaciones y transportes instituto mexicano del transporte*, numero 272, 1-84.

IDU, Universidad de los Andes, "Manual de diseño de pavimentos para Bogotá D.C.", 1-191.

Garnica P., Gómez J., y Sesma J. (2002). "Mecánica de materiales para pavimentos", *Secretaría de comunicaciones y transportes instituto mexicano del transporte*, numero 197, 1-234.

Sousa, J B., Weissman, S L., (1994), "Modeling permanent deformation of asphalt aggregate mixes", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Volume 63, p. 224-257.

Área de estudios especiales (2001), "Cálculo de leyes de fatiga de mezclas bituminosas", 1-12.

Rodríguez E. (2009), "Cálculo del índice de condición del pavimento flexible en la av. Luis Montero, distrito de Castilla", *Universidad de Piura*, 1-167.

Monismith, C L., Ogawa, N., Freeme, C R., "Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading", *Transportation Research Record*, Issue Number: 537, 1-17.

Sánchez F., "Caracterización del tránsito", *Modulo 4*, 1-69.

Sánchez F., "Diseño de pavimentos asfálticos para calles y carreteras", *Modulo 12*, 1-111.

Sánchez F., "Diseño de obras de rehabilitación para la corrección de deficiencias estructurales", *Modulo 20*, 1-142.

ASTM International D6433 (2007), "Standard Practices for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys", 1-46.

Garnica P., Correa A., (2004). "Conceptos mecanicistas en pavimentos", *Secretaría de comunicaciones y transportes instituto mexicano del transporte*, numero 258, 1-71.

Base de datos LTPP, <http://www.ltpo-products.com/DataPave/Index.aspx>.

Long F., (2001). "Permanent deformation of asphalt concrete pavements: A nonlinear Viscoelastic Approach to mix analyses and design", University of California Berkeley. 1-318.

ANEXO A: PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Propiedades de los materiales Escenarios 1 y 3 – caso A.

| MATERIAL | E | | μ |
|------------------|------|-----|-------|
| Capa rodadura | 3500 | MPa | 0.35 |
| Base granular | 550 | MPa | 0.4 |
| Subbase granular | 280 | MPa | 0.4 |
| Sub-rasante | 50 | MPa | 0.4 |

Propiedades de los materiales Escenarios 1 y 3 – caso B.

| MATERIAL | E | | μ |
|------------------|------|-----|-------|
| Capa rodadura | 3096 | MPa | 0.35 |
| Base granular | 487 | MPa | 0.4 |
| Subbase granular | 248 | MPa | 0.4 |
| Sub-rasante | 44 | MPa | 0.4 |

Propiedades de los materiales Escenarios 1 y 3 – caso C.

| MATERIAL | E | | μ |
|------------------|------|-----|-------|
| Capa rodadura | 3904 | MPa | 0.35 |
| Base granular | 613 | MPa | 0.4 |
| Subbase granular | 312 | MPa | 0.4 |
| Sub-rasante | 56 | MPa | 0.4 |

Propiedades de los materiales Escenarios 1 y 3 – caso D.

| MATERIAL | E | | μ |
|------------------|------|-----|-------|
| Capa rodadura | 2725 | MPa | 0.35 |
| Base granular | 428 | MPa | 0.4 |
| Subbase granular | 218 | MPa | 0.4 |
| Sub-rasante | 39 | MPa | 0.4 |

Propiedades de los materiales Escenarios 2 y 4 – Caso A.

| MATERIAL | E | | <input type="checkbox"/> |
|------------------|----------|-----|--------------------------|
| Capa rodadura | 2277 | MPa | 0.35 |
| Base granular | 358 | MPa | 0.4 |
| Subbase granular | 182 | MPa | 0.4 |
| Sub-rasante | 33 | MPa | 0.4 |

Propiedades de los materiales Escenarios 2 y 4 – Caso B.

| MATERIAL | E | | <input type="checkbox"/> |
|------------------|----------|-----|--------------------------|
| Capa rodadura | 2004 | MPa | 0.35 |
| Base granular | 315 | MPa | 0.4 |
| Subbase granular | 160 | MPa | 0.4 |
| Sub-rasante | 29 | MPa | 0.4 |

Propiedades de los materiales Escenarios 2 y 4 – Caso C.

| MATERIAL | E | | <input type="checkbox"/> |
|------------------|----------|-----|--------------------------|
| Capa rodadura | 3073 | MPa | 0.35 |
| Base granular | 483 | MPa | 0.4 |
| Subbase granular | 246 | MPa | 0.4 |
| Sub-rasante | 45 | MPa | 0.4 |

Propiedades de los materiales Escenarios 2 y 4 – Caso D.

| MATERIAL | E | | <input type="checkbox"/> |
|------------------|----------|-----|--------------------------|
| Capa rodadura | 1764 | MPa | 0.35 |
| Base granular | 277 | MPa | 0.4 |
| Subbase granular | 141 | MPa | 0.4 |
| Sub-rasante | 26 | MPa | 0.4 |

ANEXO B: TABLAS DEFORMACION PERMANENTE METODO VESYS

Deformación permanente Escenario 1, caso A, NE 20E6

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | v | α | μ | ϵ_r | ϵ_p unitario | ϵ_p capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|------|----------|-------|--------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | Rodadura | 24 | 12 | 6 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 8.80E-05 | 5.49E-02 | 1.06E-01 |
| 2 | | | 12 | 18 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 8.18E-05 | 5.11E-02 | |
| 3 | Base G. | 25 | 10 | 29 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.61E-04 | 2.17E-03 | 5.84E-03 |
| 4 | | | 10 | 39 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.37E-04 | 1.84E-03 | |
| 5 | | | 5 | 46.5 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.37E-04 | 1.84E-03 | |
| 6 | Subbase G. | 25 | 10 | 54 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.52E-04 | 1.63E-03 | 4.78E-03 |
| 7 | | | 10 | 64 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.42E-04 | 1.53E-03 | |
| 8 | | | 5 | 71.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.51E-04 | 1.62E-03 | |
| 9 | Subrasante | ∞ | 15 | 81.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 2.22E-04 | 7.17E-03 | 1.30E-02 |
| 10 | | | 15 | 96.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.81E-04 | 5.82E-03 | |
| 11 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|--------------------------------------|----------|
| ϵ_p total | 1.30E-01 |
|--------------------------------------|----------|

Deformación permanente Escenario 1, caso A, NE 30E6

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | v | α | μ | ϵ_r | ϵ_p unitario | ϵ_p capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|------|----------|-------|--------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | Rodadura | 25 | 10 | 5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 8.42E-05 | 6.18E-02 | 1.84E-01 |
| 2 | | | 10 | 15 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 8.30E-05 | 6.10E-02 | |
| 3 | | | 5 | 22.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 8.39E-05 | 6.16E-02 | |
| 4 | Base G. | 30 | 10 | 30 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.52E-04 | 2.13E-03 | 5.54E-03 |
| 5 | | | 10 | 40 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.26E-04 | 1.76E-03 | |
| 6 | | | 10 | 50 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.18E-04 | 1.65E-03 | |
| 7 | Subbase G. | 25 | 10 | 60 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.33E-04 | 1.49E-03 | 4.37E-03 |
| 8 | | | 10 | 70 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.25E-04 | 1.40E-03 | |
| 9 | | | 5 | 77.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.33E-04 | 1.49E-03 | |
| 10 | Subrasante | ∞ | 15 | 87.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.96E-04 | 6.56E-03 | 1.19E-02 |
| 11 | | | 15 | 102.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.60E-04 | 5.37E-03 | |
| 12 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|--------------------------------------|----------|
| ϵ_p total | 2.06E-01 |
|--------------------------------------|----------|

Deformación permanente Escenario 1, caso A, NE 40E6

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | v | α | μ | εr | εp unitario | εp capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|------|-----|------|----------|-------------|----------|
| 1 | Rodadura | 28 | 10 | 5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 8.60E-05 | 7.09E-02 | 1.97E-01 |
| 2 | | | 10 | 15 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 8.09E-05 | 6.67E-02 | |
| 3 | | | 8 | 24 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 7.21E-05 | 5.94E-02 | |
| 4 | Base G. | 25 | 10 | 33 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.37E-04 | 1.97E-03 | 5.36E-03 |
| 5 | | | 10 | 43 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.18E-04 | 1.70E-03 | |
| 6 | | | 5 | 50.5 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.18E-04 | 1.69E-03 | |
| 7 | Subbase G. | 25 | 10 | 58 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.31E-04 | 1.50E-03 | 4.43E-03 |
| 8 | | | 10 | 68 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.23E-04 | 1.42E-03 | |
| 9 | | | 5 | 75.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.31E-04 | 1.50E-03 | |
| 10 | Subrasante | ∞ | 15 | 85.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.93E-04 | 6.68E-03 | 1.22E-02 |
| 11 | | | 15 | 100.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.59E-04 | 5.49E-03 | |
| 12 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|-----------------|----------|
| εp total | 2.19E-01 |
|-----------------|----------|

Deformación permanente Escenario 2, Caso B, NE 20E6, medio ligadas

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | v | α | μ | εr | εp unitario | εp capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|------|-----|------|----------|-------------|----------|
| 1 | Rodadura | 32 | 10 | 5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 2.12E-04 | 1.32E-01 | 2.84E-01 |
| 2 | | | 11 | 15.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 1.53E-04 | 9.55E-02 | |
| 3 | | | 11 | 26.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 9.07E-05 | 5.66E-02 | |
| 4 | Base G. | 30 | 10 | 37 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 2.13E-04 | 2.86E-03 | 7.41E-03 |
| 5 | | | 10 | 47 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.78E-04 | 2.39E-03 | |
| 6 | | | 10 | 57 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.61E-04 | 2.16E-03 | |
| 7 | Subbase G. | 30 | 10 | 67 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.34E-04 | 2.52E-03 | 7.11E-03 |
| 8 | | | 10 | 77 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.17E-04 | 2.33E-03 | |
| 9 | | | 10 | 87 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.10E-04 | 2.25E-03 | |
| 10 | Subrasante | ∞ | 15 | 99.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 7.89E-04 | 2.54E-02 | 4.95E-02 |
| 11 | | | 15 | 114.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 7.48E-04 | 2.41E-02 | |
| 12 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|-----------------|----------|
| εp total | 3.48E-01 |
|-----------------|----------|

Deformación permanente Escenario 2, Caso B, NE 20E6, sin ligar

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | v | α | μ | ϵ_r | ϵ_p unitario | ϵ_p capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|------|----------|-------|--------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | Rodadura | 32 | 10 | 5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 2.60E-04 | 1.63E-01 | 3.17E-01 |
| 2 | | | 11 | 15.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 1.69E-04 | 1.05E-01 | |
| 3 | | | 11 | 26.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 7.88E-05 | 4.92E-02 | |
| 4 | Base G. | 30 | 10 | 37 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 2.30E-04 | 3.08E-03 | 7.84E-03 |
| 5 | | | 10 | 47 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.90E-04 | 2.55E-03 | |
| 6 | | | 10 | 57 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.64E-04 | 2.21E-03 | |
| 7 | Subbase G. | 30 | 10 | 67 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.92E-04 | 3.13E-03 | 8.77E-03 |
| 8 | | | 10 | 77 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.72E-04 | 2.92E-03 | |
| 9 | | | 10 | 87 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.53E-04 | 2.72E-03 | |
| 10 | Subrasante | ∞ | 15 | 99.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.32E-03 | 4.27E-02 | 8.40E-02 |
| 11 | | | 15 | 114.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.28E-03 | 4.13E-02 | |
| 12 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|--------------------------------------|----------|
| ϵ_p total | 4.18E-01 |
|--------------------------------------|----------|

Deformación permanente Escenario 2, Caso B, NE 30E6, medio ligadas

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | v | α | μ | ϵ_r | ϵ_p unitario | ϵ_p capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|------|----------|-------|--------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | Rodadura | 35 | 10 | 5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 2.16E-04 | 1.59E-01 | 3.32E-01 |
| 2 | | | 12.5 | 16.3 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 1.52E-04 | 1.12E-01 | |
| 3 | | | 12.5 | 28.8 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 8.30E-05 | 6.10E-02 | |
| 4 | Base G. | 30 | 10 | 40.0 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.82E-04 | 2.54E-03 | 6.73E-03 |
| 5 | | | 10 | 50.0 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.57E-04 | 2.19E-03 | |
| 6 | | | 10 | 60.0 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.43E-04 | 2.00E-03 | |
| 7 | Subbase G. | 30 | 10 | 70.0 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.07E-04 | 2.32E-03 | 6.58E-03 |
| 8 | | | 10 | 80.0 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.93E-04 | 2.16E-03 | |
| 9 | | | 10 | 90.0 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.88E-04 | 2.10E-03 | |
| 10 | Subrasante | ∞ | 15 | 102.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 7.02E-04 | 2.36E-02 | 4.59E-02 |
| 11 | | | 15 | 117.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 6.66E-04 | 2.24E-02 | |
| 12 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|--------------------------------------|----------|
| ϵ_p total | 3.91E-01 |
|--------------------------------------|----------|

Deformación permanente Escenario 2, Caso B, NE 30E6, sin ligar

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | v | α | μ | ϵ_r | ϵ_p unitario | ϵ_p capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|------|----------|-------|--------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | Rodadura | 35 | 10 | 5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 2.65E-04 | 1.94E-01 | 3.76E-01 |
| 2 | | | 12.5 | 16.3 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 1.73E-04 | 1.27E-01 | |
| 3 | | | 12.5 | 28.8 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 7.43E-05 | 5.46E-02 | |
| 4 | Base G. | 30 | 10 | 40.0 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.89E-04 | 2.65E-03 | 6.87E-03 |
| 5 | | | 10 | 50.0 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.60E-04 | 2.24E-03 | |
| 6 | | | 10 | 60.0 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.42E-04 | 1.98E-03 | |
| 7 | Subbase G. | 30 | 10 | 70.0 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.54E-04 | 2.84E-03 | 7.98E-03 |
| 8 | | | 10 | 80.0 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.38E-04 | 2.66E-03 | |
| 9 | | | 10 | 90.0 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.23E-04 | 2.49E-03 | |
| 10 | Subrasante | ∞ | 15 | 102.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.17E-03 | 3.93E-02 | 7.74E-02 |
| 11 | | | 15 | 117.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.14E-03 | 3.81E-02 | |
| 12 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|--------------------------------------|----------|
| ϵ_p total | 4.68E-01 |
|--------------------------------------|----------|

Deformación permanente Escenario 2, Caso B, NE 40E6, medio ligadas

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | v | α | μ | ϵ_r | ϵ_p unitario | ϵ_p capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|------|----------|-------|--------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | Rodadura | 35 | 10 | 5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 2.17E-04 | 1.79E-01 | 3.71E-01 |
| 2 | | | 12.5 | 16.25 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 1.52E-04 | 1.25E-01 | |
| 3 | | | 12.5 | 28.75 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 8.20E-05 | 6.76E-02 | |
| 4 | Base G. | 32 | 10 | 40 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.86E-04 | 2.68E-03 | 7.00E-03 |
| 5 | | | 11 | 50.5 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.59E-04 | 2.29E-03 | |
| 6 | | | 11 | 61.5 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.41E-04 | 2.04E-03 | |
| 7 | Subbase G. | 32 | 10 | 72 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.05E-04 | 2.36E-03 | 6.63E-03 |
| 8 | | | 11 | 82.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.90E-04 | 2.18E-03 | |
| 9 | | | 11 | 93.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.82E-04 | 2.09E-03 | |
| 10 | Subrasante | ∞ | 15 | 106.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 6.82E-04 | 2.36E-02 | 4.60E-02 |
| 11 | | | 15 | 121.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 6.49E-04 | 2.24E-02 | |
| 12 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|--------------------------------------|----------|
| ϵ_p total | 4.31E-01 |
|--------------------------------------|----------|

Deformación permanente Escenario 2, Caso B, NE 40E6, sin ligar

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | ν | α | μ | ϵ_r | ϵ_p unitario | ϵ_p capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|-------|----------|-------|--------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | Rodadura | 35 | 10 | 5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 2.65E-04 | 2.18E-01 | 4.20E-01 |
| 2 | | | 12.5 | 16.25 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 1.71E-04 | 1.41E-01 | |
| 3 | | | 12.5 | 28.75 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 7.32E-05 | 6.03E-02 | |
| 4 | Base G. | 32 | 10 | 40 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.99E-04 | 2.86E-03 | 7.34E-03 |
| 5 | | | 11 | 50.5 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.67E-04 | 2.41E-03 | |
| 6 | | | 11 | 61.5 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.44E-04 | 2.08E-03 | |
| 7 | Subbase G. | 32 | 10 | 72 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.55E-04 | 2.94E-03 | 8.20E-03 |
| 8 | | | 11 | 82.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.38E-04 | 2.74E-03 | |
| 9 | | | 11 | 93.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.19E-04 | 2.52E-03 | |
| 10 | Subrasante | ∞ | 15 | 106.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.14E-03 | 3.95E-02 | 7.79E-02 |
| 11 | | | 15 | 121.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.11E-03 | 3.84E-02 | |
| 12 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|--------------------------------------|----------|
| ϵ_p total | 5.13E-01 |
|--------------------------------------|----------|

Deformación permanente Escenario 3, Caso C, NE 20E6

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | ν | α | μ | ϵ_r | ϵ_p unitario | ϵ_p capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|-------|----------|-------|--------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | Rodadura | 20 | 10 | 5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 6.18E-05 | 3.86E-02 | 9.39E-02 |
| 2 | | | 10 | 15 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 8.86E-05 | 5.53E-02 | |
| 3 | Base G. | 20 | 10 | 25 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.83E-04 | 2.46E-03 | 4.64E-03 |
| 4 | | | 10 | 35 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.63E-04 | 2.18E-03 | |
| 5 | Subbase G. | 18 | 10 | 45 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.90E-04 | 2.04E-03 | 4.12E-03 |
| 6 | | | 8 | 54 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.94E-04 | 2.09E-03 | |
| 7 | Subrasante | ∞ | 15 | 65.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 2.91E-04 | 9.39E-03 | 1.68E-02 |
| 8 | | | 15 | 80.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 2.30E-04 | 7.41E-03 | |
| 9 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|--------------------------------------|----------|
| ϵ_p total | 1.19E-01 |
|--------------------------------------|----------|

Deformación permanente Escenario 3, Caso C, NE 30E6

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | v | α | μ | ϵ_r | ϵ_p unitario | ϵ_p capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|------|----------|-------|--------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | Rodadura | 21 | 7 | 3.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 4.67E-05 | 3.43E-02 | 1.62E-01 |
| 2 | | | 7 | 10.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 8.37E-05 | 6.15E-02 | |
| 3 | | | 7 | 17.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 8.97E-05 | 6.59E-02 | |
| 4 | Base G. | 20 | 7 | 24.5 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.82E-04 | 2.54E-03 | 6.90E-03 |
| 5 | | | 7 | 31.5 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.55E-04 | 2.17E-03 | |
| 6 | | | 6 | 38 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.56E-04 | 2.19E-03 | |
| 7 | Subbase G. | 20 | 7 | 44.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.81E-04 | 2.02E-03 | 5.99E-03 |
| 8 | | | 7 | 51.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.73E-04 | 1.93E-03 | |
| 9 | | | 6 | 58 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.82E-04 | 2.04E-03 | |
| 10 | Subrasante | ∞ | 15 | 68.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 2.69E-04 | 9.04E-03 | 1.62E-02 |
| 11 | | | 15 | 83.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 2.14E-04 | 7.18E-03 | |
| 12 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|--------------------------------------|----------|
| ϵ_p total | 1.91E-01 |
|--------------------------------------|----------|

Deformación permanente Escenario 3, Caso C, NE 40E6

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | v | α | μ | ϵ_r | ϵ_p unitario | ϵ_p capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|------|----------|-------|--------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | Rodadura | 23 | 8 | 4 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 5.71E-05 | 4.70E-02 | 1.82E-01 |
| 2 | | | 8 | 12 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 8.14E-05 | 6.71E-02 | |
| 3 | | | 7 | 19.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 8.29E-05 | 6.83E-02 | |
| 4 | Base G. | 20 | 7 | 26.5 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.64E-04 | 2.35E-03 | 6.49E-03 |
| 5 | | | 7 | 33.5 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.43E-04 | 2.06E-03 | |
| 6 | | | 6 | 40 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.44E-04 | 2.07E-03 | |
| 7 | Subbase G. | 20 | 7 | 46.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.66E-04 | 1.91E-03 | 5.66E-03 |
| 8 | | | 7 | 53.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.59E-04 | 1.83E-03 | |
| 9 | | | 6 | 60 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.67E-04 | 1.93E-03 | |
| 10 | Subrasante | ∞ | 15 | 70.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 2.48E-04 | 8.57E-03 | 1.54E-02 |
| 11 | | | 15 | 85.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.98E-04 | 6.85E-03 | |
| 12 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|--------------------------------------|----------|
| ϵ_p total | 2.10E-01 |
|--------------------------------------|----------|

Deformación permanente Escenario 4, Caso D, NE 20E6, medio ligadas

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | ν | α | μ | ϵ_r | ϵ_p unitario | ϵ_p capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|-------|----------|-------|--------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | Rodadura | 33 | 11 | 5.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 2.41E-04 | 1.50E-01 | 3.12E-01 |
| 2 | | | 11 | 16.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 1.61E-04 | 1.01E-01 | |
| 3 | | | 11 | 27.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 9.74E-05 | 6.08E-02 | |
| 4 | Base G. | 30 | 10 | 38 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 2.30E-04 | 3.09E-03 | 8.08E-03 |
| 5 | | | 10 | 48 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.95E-04 | 2.62E-03 | |
| 6 | | | 10 | 58 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.77E-04 | 2.37E-03 | |
| 7 | Subbase G. | 30 | 10 | 68 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.57E-04 | 2.76E-03 | 7.80E-03 |
| 8 | | | 10 | 78 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.39E-04 | 2.56E-03 | |
| 9 | | | 10 | 88 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.31E-04 | 2.48E-03 | |
| 10 | Subrasante | ∞ | 15 | 100.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 8.57E-04 | 2.76E-02 | 5.38E-02 |
| 11 | | | 15 | 115.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 8.13E-04 | 2.62E-02 | |
| 12 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|--------------------------------------|----------|
| ϵ_p total | 3.82E-01 |
|--------------------------------------|----------|

Deformación permanente Escenario 4, Caso D, NE 20E6, sin ligar

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | ν | α | μ | ϵ_r | ϵ_p unitario | ϵ_p capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|-------|----------|-------|--------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | Rodadura | 33 | 11 | 5.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 2.88E-04 | 1.80E-01 | 3.40E-01 |
| 2 | | | 11 | 16.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 1.75E-04 | 1.09E-01 | |
| 3 | | | 11 | 27.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 8.24E-05 | 5.15E-02 | |
| 4 | Base G. | 30 | 10 | 38 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 2.46E-04 | 3.31E-03 | 8.49E-03 |
| 5 | | | 10 | 48 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 2.06E-04 | 2.76E-03 | |
| 6 | | | 10 | 58 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.80E-04 | 2.41E-03 | |
| 7 | Subbase G. | 30 | 10 | 68 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 3.20E-04 | 3.43E-03 | 9.63E-03 |
| 8 | | | 10 | 78 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.99E-04 | 3.21E-03 | |
| 9 | | | 10 | 88 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.79E-04 | 2.99E-03 | |
| 10 | Subrasante | ∞ | 15 | 100.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.44E-03 | 4.63E-02 | 9.11E-02 |
| 11 | | | 15 | 115.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.39E-03 | 4.48E-02 | |
| 12 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|--------------------------------------|----------|
| ϵ_p total | 4.50E-01 |
|--------------------------------------|----------|

Deformación permanente Escenario 4, Caso D, NE 30E6, medio ligadas

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | ν | α | μ | ϵ_r | ϵ_p unitario | ϵ_p capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|-------|----------|-------|--------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | Rodadura | 34 | 12 | 6 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 2.42E-04 | 1.78E-01 | 3.57E-01 |
| 2 | | | 11 | 17.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 1.51E-04 | 1.11E-01 | |
| 3 | | | 11 | 28.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 9.31E-05 | 6.84E-02 | |
| 4 | Base G. | 36 | 12 | 40 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 2.26E-04 | 3.15E-03 | 8.00E-03 |
| 5 | | | 12 | 52 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.85E-04 | 2.59E-03 | |
| 6 | | | 12 | 64 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.61E-04 | 2.26E-03 | |
| 7 | Subbase G. | 32 | 11 | 75.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.31E-04 | 2.58E-03 | 7.27E-03 |
| 8 | | | 11 | 86.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.13E-04 | 2.38E-03 | |
| 9 | | | 10 | 97 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.06E-04 | 2.30E-03 | |
| 10 | Subrasante | ∞ | 15 | 109.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 7.75E-04 | 2.60E-02 | 5.08E-02 |
| 11 | | | 15 | 124.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 7.38E-04 | 2.48E-02 | |
| 12 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|--------------------------------------|----------|
| ϵ_p total | 4.23E-01 |
|--------------------------------------|----------|

Deformación permanente Escenario 4, Caso D, NE 30E6, sin ligar

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | ν | α | μ | ϵ_r | ϵ_p unitario | ϵ_p capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|-------|----------|-------|--------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | Rodadura | 34 | 12 | 6 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 2.82E-04 | 2.07E-01 | 3.84E-01 |
| 2 | | | 11 | 17.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 1.61E-04 | 1.18E-01 | |
| 3 | | | 11 | 28.5 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 7.96E-05 | 5.85E-02 | |
| 4 | Base G. | 36 | 12 | 40 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 2.53E-04 | 3.53E-03 | 8.78E-03 |
| 5 | | | 12 | 52 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 2.05E-04 | 2.86E-03 | |
| 6 | | | 12 | 64 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.71E-04 | 2.39E-03 | |
| 7 | Subbase G. | 32 | 11 | 75.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.94E-04 | 3.28E-03 | 9.14E-03 |
| 8 | | | 11 | 86.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.71E-04 | 3.03E-03 | |
| 9 | | | 10 | 97 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.52E-04 | 2.82E-03 | |
| 10 | Subrasante | ∞ | 15 | 109.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.31E-03 | 4.39E-02 | 8.66E-02 |
| 11 | | | 15 | 124.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.27E-03 | 4.27E-02 | |
| 12 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|--------------------------------------|----------|
| ϵ_p total | 4.88E-01 |
|--------------------------------------|----------|

Deformación permanente Escenario 4, Caso D, NE 40E6, medio ligadas

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | ν | α | μ | ϵ_r | ϵ_p unitario | ϵ_p capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|-------|----------|-------|--------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | Rodadura | 36 | 12 | 6.0 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 2.46E-04 | 2.03E-01 | 3.98E-01 |
| 2 | | | 12 | 18.0 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 1.50E-04 | 1.24E-01 | |
| 3 | | | 12 | 30.0 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 8.73E-05 | 7.19E-02 | |
| 4 | Base G. | 36 | 12 | 42 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 2.08E-04 | 2.91E-03 | 7.42E-03 |
| 5 | | | 12 | 54 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.72E-04 | 2.40E-03 | |
| 6 | | | 12 | 66 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.51E-04 | 2.10E-03 | |
| 7 | Subbase G. | 33 | 11 | 77.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.16E-04 | 2.49E-03 | 7.00E-03 |
| 8 | | | 11 | 88.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.00E-04 | 2.30E-03 | |
| 9 | | | 11 | 99.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 1.92E-04 | 2.21E-03 | |
| 10 | Subrasante | ∞ | 15 | 112.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 7.22E-04 | 2.49E-02 | 4.87E-02 |
| 11 | | | 15 | 127.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 6.89E-04 | 2.38E-02 | |
| 12 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|--------------------------------------|----------|
| ϵ_p total | 4.61E-01 |
|--------------------------------------|----------|

Deformación permanente Escenario 4, Caso D, NE 40E6, sin ligar

| # capa | Capa | Espesor total (cm) | Espesor (cm) | Z medio (cm) | ν | α | μ | ϵ_r | ϵ_p unitario | ϵ_p capa |
|--------|------------|--------------------|--------------|--------------|-------|----------|-------|--------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | Rodadura | 36 | 12 | 6.0 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 2.86E-04 | 2.36E-01 | 4.32E-01 |
| 2 | | | 12 | 18.0 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 1.63E-04 | 1.34E-01 | |
| 3 | | | 12 | 30.0 | 0.35 | 0.6 | 0.3 | 7.58E-05 | 6.25E-02 | |
| 4 | Base G. | 36 | 12 | 42 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 2.27E-04 | 3.26E-03 | 8.25E-03 |
| 5 | | | 12 | 54 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.88E-04 | 2.70E-03 | |
| 6 | | | 12 | 66 | 0.4 | 0.9 | 0.25 | 1.59E-04 | 2.28E-03 | |
| 7 | Subbase G. | 33 | 11 | 77.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.74E-04 | 3.16E-03 | 8.81E-03 |
| 8 | | | 11 | 88.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.55E-04 | 2.93E-03 | |
| 9 | | | 11 | 99.5 | 0.4 | 0.9 | 0.2 | 2.36E-04 | 2.72E-03 | |
| 10 | Subrasante | ∞ | 15 | 112.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.22E-03 | 4.20E-02 | 8.29E-02 |
| 11 | | | 15 | 127.5 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1.18E-03 | 4.09E-02 | |
| 12 | | | ∞ | ∞ | 0.4 | 0.9 | 0.6 | ∞ | ∞ | |

| | |
|--------------------------------------|----------|
| ϵ_p total | 5.32E-01 |
|--------------------------------------|----------|