



UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOSAS DE
SOBREANCHOS EN CARRETERAS DE PAVIMENTO
RÍGIDO CONSTRUIDAS CON PAVIMENTADORA CON
ENCOFRADO DESLIZANTE”

*TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERIA
EN VIALIDAD Y TRANSPORTE*

AUTOR: ING. DANIEL LEONIDAS CÁRDENAS JARAMILLO
CI: 0104031232

DIRECTOR: ING. JAIME ASDRUBAL BOJORQUE IÑEGUEZ. PHD
CI: 0102857885

CUENCA, ENERO DEL 2017

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOSAS DE SOBREANCHOS EN CARRETERAS DE PAVIMENTO RÍGIDO CONSTRUIDAS CON PAVIMENTADORA CON ENCOFRADO DESLIZANTE

Ing. Daniel Cárdenas Jaramillo

17 de enero de 2017

RESUMEN

La construcción, reconstrucción, y rehabilitación de carreteras de pavimento rígido se puede realizar por medio de varias alternativas, cada una con sus respectivas ventajas y limitantes. La modalidad que mayor rendimiento produce es la construcción con pavimentadora con encofrado deslizante, sin embargo, ésta maquinaria no modifica su ancho para construir los sobreanchos en las curvas, como consecuencia esta zona de la vía tiene que ser construida como un elemento diferente a la losa de calzada; este proceso constructivo no tiene una guía o una especificación técnica por lo que se han venido ejecutado estos trabajos a intuición de los responsables de los proyectos viales y por consiguiente se han construido sobreanchos de diferentes maneras sin saber cual de ellas es la mejor o menos perjudicial para el rendimiento de la vía.

La presente investigación pretende ser una guía que aclare las ventajas y desventajas de los diferentes casos de construcción de sobreanchos, analizando en cada caso, por medios analíticos y computacionales, el comportamiento de esta sección al aplicar las cargas de tránsito que se supone debe soportar y así brindar la información necesaria al especialista vial para diseñar, fiscalizar y construir carreteras más eficientes que garanticen el periodo de vida útil para las cuales fueron diseñadas. En esta investigación se ha determinado que a medida que las secciones de pavimento rígido disminuyen, las respuestas de la subrasante también lo hace provocando que la vida útil de una carretera disminuya considerablemente, de igual manera, mientras que se construye una parte de la vía, en este caso el sobreancho, con una resistencia menor, esto también influirá de manera negativa en el comportamiento de la carretera, demostrando que los procesos constructivos utilizados hasta el momento en nuestro país presentan grandes deficiencias cuyos resultados han saltado a la vista en las obras construidas hasta la fecha.

PALABRAS CLAVE: sobreancho, pavimento rígido, diseño, comportamiento, pavimentadora

ABSTRACT

This current research aims to explain the pro and cons on the different processes of widening.

By running an analytical and computational simulation of the behaviour of the sections exposed to traffic loads, it is expected to obtain necessary and objective information to design, control and build roads in a more efficient way. This guarantee the comply of the intended lifetime of this kind of structures.



Furthermore, it will conclude that as long that rigid pavement sections decrease, response of the subgrade does as well, causing that the lasting of the road decreases considerably. Similarly, as long as a part of the road is built with a less resistance pavement, the behaviour of the road will be negatively influenced.

This demonstrates that the building process used nowadays in Ecuador has major deficiencies which is checkable on empiric studies.

KEYWORDS: widening,rigid pavement, design, behaviour, road paver.



Índice

1. Introducción	8
1.1. Análisis del problema	9
1.2. Justificación	14
1.3. Objetivos	15
1.3.1. Objetivo General	15
1.3.2. Objetivo Específicos	15
1.4. Metodología de Investigación	15
2. Marco Teórico	16
2.1. Sobreancho	16
2.2. Soporte de la subrasante (módulo de reacción k)	17
2.3. Corrección de la respuesta k de la subrasante	17
2.4. Esfuerzos en pavimentos rígidos	20
2.4.1. Área de contacto y radio equivalente	20
2.4.2. Rigidez Relativa	21
2.4.3. Esfuerzos y Deformaciones debido a cargas	22
2.5. Esfuerzos debido a temperatura (alabeo)	23
2.6. Esfuerzos debido a la fricción	23
2.7. Diseño y Evaluación de Pavimentos	24
2.7.1. Método AASHTO	24
2.7.2. Método PCA (Portland Cement Association)	24
2.8. Juntas	31
3. Cálculos, Análisis Y Resultados	32
3.1. Cálculo de sobreancho	32
3.2. CASO 1: Sobreancho como cuña de hormigón	33
3.2.1. Losa de pavimento rígido normal 4,65x4,65 m	33
3.2.2. Sección de sobreancho 4,65x1,00 m	44
3.2.3. Sección de sobreancho 4,65x0,50 m	45
3.2.4. Sección de sobreancho 4,65x0,25 m	46
3.2.5. Sección de sobreancho 4,65x0,10 m	47
3.2.6. Comparación de resultados	48
3.3. CASO 2: Sobreancho dentro de cuneta	53
3.3.1. Corrección de respuesta de subrasante	54
3.4. CASO 3: Sobreancho en el eje	62
3.5. Comparación de resultados	70
4. Metodología recomendada	74
4.1. Análisis caso 1	75
4.2. Análisis caso 2	78
4.2.1. Corrección de subrasante	78
4.2.2. Análisis tensional del elemento	79
4.2.3. Análisis por medio de elementos finitos	79
4.2.4. Repeticiones Admisibles	79
4.2.5. Porcentajes de fatiga y erosión	80
4.3. Comparación Final	81
5. Conclusiones	83
6. Recomendaciones	85



7. ANEXOS	86
7.1. Cálculos cuñas de hormigón en el borde 4,5 MPa	86
7.1.1. Sección de sobreancho máxima 4,65X1,00 m	86
7.1.2. Sección de sobreancho reducida 4,65X0,50 m	94
7.1.3. Sección de sobreancho menor 4,65X0,25 m	102
7.1.4. Sección de sobreancho menor 4,65X0,10 m	110
7.2. Cálculos modelación en el eje	118
7.2.1. Sección 4,65x1,00 m	118
7.2.2. Sección 4,65x0,50 m	123
7.2.3. Sección 4,65x0,25 m	128
7.2.4. Sección 4,65x0,10 m	133
7.3. Cálculos metodología recomendada	138
7.3.1. Alternativa Recomendada 1	138
7.3.2. Alternativa Recomendada 2	154



DANIEL LEONIDAS CÁRDENAS JARAMILLO, autor de la tesis "**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOSAS DE SOBREENCHO EN CARRETERAS DE PAVIMENTO RÍGIDO CONSTRUIDAS CON PAVIMENTADORA CON ENCOFRADO DESLIZANTE**" reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de **MASTER EN INGENIERIA EN VIALIDAD Y TRANSPORTE**. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 16 de enero de 2017



DANIEL LEONIDAS CÁRDENAS JARAMILLO
C.I. 010403123-2



Universidad de Cuenca

DANIEL LEONIDAS CÁRDENAS JARAMILLO, autor de la tesis **"ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOSAS DE SOBRECARGO EN CARRETERAS DE PAVIMENTO RÍGIDO CONSTRUIDAS CON PAVIMENTADORA CON ENCOFRADO DESLIZANTE"**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 16 de enero de 2017

DANIEL LEONIDAS CÁRDENAS JARAMILLO
C.I 010403123-2

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mis padres y hermanos quienes con su apoyo incondicional y ejemplo me han enseñado a luchar por conseguir las metas planteadas. Por las enseñanzas y consejos de vida.

A Andrea quien con su comprensión y cariño hace que todo esfuerzo valga la pena.

Daniel Cárdenas J.

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento a la empresa ACSAM CONSULTORES impulsores de mi carrera profesional.

A la empresa EMOV EP y en especial al Dr. Alfredo Aguilar por la confianza depositada en mí y por la apertura en la culminación de esta tesis.

Agradecimiento Póstumo:

Al Dr. Leonardo Morales Ordoñez quien incursionó mi carrera en la Ingeniería en Vialidad y Transporte y que, con su apoyo hizo posible la realización de esta titulación.

Agradecimiento Especial:

Al Dr. Jaime Bojorque I. por su entusiasmo, dedicación y preocupación en el desarrollo de esta tesis, por su guía y por compartir su experiencia y conocimientos.

A todos los amigos incondicionales que me impulsaron y me dieron ánimos para cumplir esta meta.

Daniel Cárdenas J.



1. Introducción

El actual gobierno se ha caracterizado por la construcción de varias obras viales a lo largo del país las mismas se las ha venido realizando a un ritmo de gasto de alrededor de \$1000 millones anuales, dicha inversión está representada por la construcción reparación y rehabilitación de carreteras.

El gasto en obras viales se inició con el plan Relámpago en el año 2007, organizado por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas que consistió en la adjudicación por emergencia de contratos de carreteras y puentes, tal como lo muestra el (*Cuadro 1*) en donde se describe la inversión en proyectos viales en el país. El resultado de esto no fue del todo satisfactorio dado que una de las causas fue que en poco tiempo las carreteras construidas con pavimento rígido presentaban problemas como colapso o fisuramiento de las losas construidas.

AÑO	INVERSIÓN
2007	348'883.937
2008	515'237.429
2009	1.095'571.595
2010	990'476.080
2011	985'650.478
2012	1.234'050.307
2013	1.650'014.268
2014	1.405'429.372
2015	674'686.534

Cuadro 1: Inversión en proyectos viales Ecuador 2007-2015. **Fuente:** MTOP.

La construcción de carreteras en pavimento rígido ha sido uno de los puntos estratégicos enmarcados por el gobierno actual de nuestro país. Este método de construcción en ese entonces era considerado relativamente nuevo en la región y por consiguiente trajo consigo problemas en varios de estos proyectos, dado que los procesos no eran del todo conocidos o dominados tanto por administradores, constructores y fiscalizadores de dichos proyectos.

Las diversas formas posibles de construir vías de pavimento rígido ya sea con rodillos vibratorios, reglas vibratorias, pavimentadoras con perfiles deslizantes, etc., tienen ventajas y desventajas en sus procesos, pero, de igual manera, en todas ellas se debe tener ciertas consideraciones para una correcta construcción con el fin de evitar problemas a corto y largo plazo.

Es así que la construcción de carreteras con pavimentadora con encofrado deslizante, si bien es cierto se presenta como una de las mejores opciones para estos proyectos tanto por el método constructivo que utiliza como el rendimiento que produce, tiene la desventaja de construir carriles de ancho constante, es decir, no puede modificar su ancho para la construcción de sobreanchos.

Puesto que los proyectos de gran magnitud en el país son desarrollados por grandes constructoras cuyo poder adquisitivo de maquinaria y tecnología hace posible la construcción por medio de este método; es necesario entonces analizar las consecuencias de este limitante en la construcción con el fin de evitar posibles fracasos en las losas de los sobreanchos construidos, puesto que la construcción en pavimento rígido representa grandes inversiones de capital. El hecho de que una pavimentadora móvil de última generación no construya sobreanchos, implica que los mismos sean realizados después de la construcción de la losa de calzada, es así que, el

método constructivo de los sobreanchos ha quedado determinado por el *instinto* del ingeniero diseñador, constructor o fiscalizador. Como consecuencia se han ejecutado varias alternativas al momento de construir los sobreanchos y al no especificarse o no estudiarse el procedimiento a seguir en estos casos en las normativas nacionales o internacionales, en las guías de construcción de pavimentos o en libros o artículos científicos sobre el tema, no se puede saber con certeza cuál de las alternativas constructivas de sobreanchos es la más *eficiente*. La única certeza que se tiene es que, en una curva, la losa de la calzada de pavimento rígido construida con una pavimentadora con encofrado deslizante y el sobreancho correspondiente a dicha curva, no conformarán un estructura monolítica; serán elementos individuales y por ende el comportamiento al aplicar la misma carga sobre estos diferirá uno de otro, como consecuencia este comportamiento tiene que ser analizado.

Con la finalidad de entender mejor estos sistemas de sobreancho se presenta la siguiente investigación.

1.1. Análisis del problema

En gran parte de los proyectos viales realizados en nuestro país, no se ha mantenido un proceso constructivo de sobreanchos típico o común. En unos proyectos se encuentra cuñas de pavimento rígido en los sobreanchos (figura 1a), en otros una construcción monolítica de sobreancho y cuneta (figura 1b). Algunos ejemplos de estas construcciones se observa en las figuras 3-6.

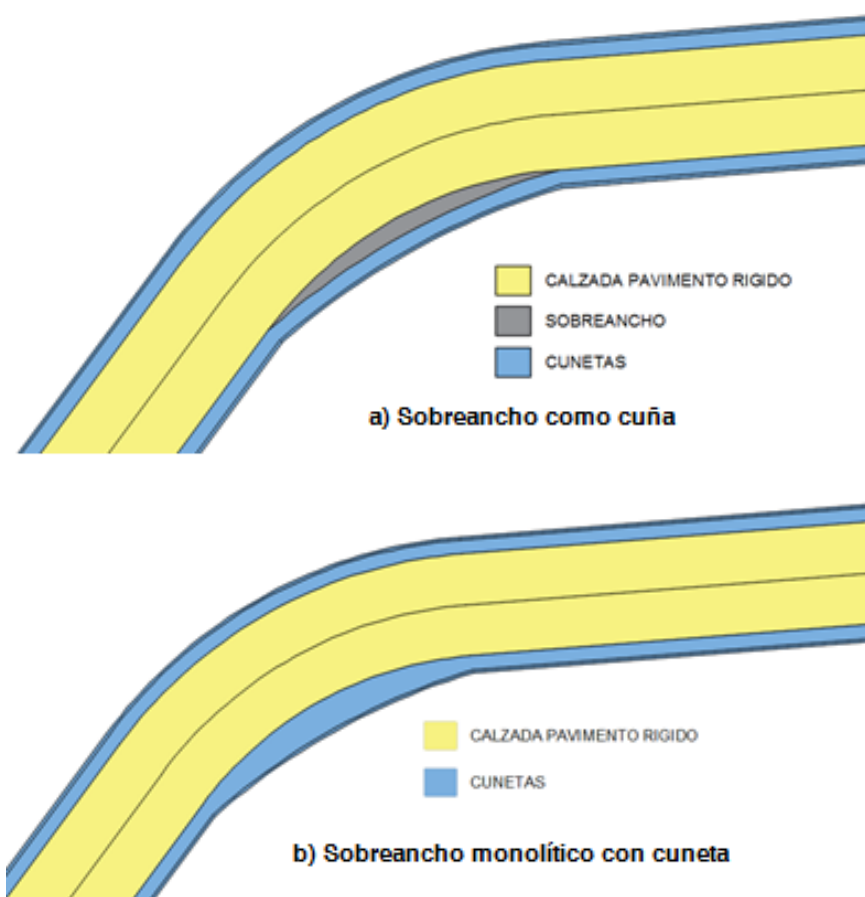


Figura 1: Métodos de construcción y emplazamiento de sobreanchos.

Las normas MOP 2002 y ahora las NEVI recién aprobadas en el año 2012, si bien es cierto

especifican en cuales casos se debe colocar un sobreancho, como se debe realizar el cálculo del mismo en base al radio de curva y la velocidad de diseño del proyecto, el lugar en donde se emplaza el sobreancho en curvas circulares y curvas espirales, no especifica cómo se lo debe construir. El ingeniero constructor o fiscalizador al tener un diseño aprobado para la losa de pavimento rígido asume que ese mismo diseño funcionará para los sobreanchos sin considerar algunos aspectos en los siguientes casos:

- Caso 1: El sobreancho es una cuña que tiene la misma resistencia que el hormigón de calzada pero que tiene una forma irregular que no guarda la relación $(L/B) = 1 - 1,4$.
- Caso 2: El sobreancho se construye al momento de fundir las cunetas formando un elemento monolítico pero cuya resistencia es menor que la del hormigón de calzada. Es decir, la cuneta y el sobreancho forman una estructura monolítica.

Al revisar bibliografías internacionales [1–8] se encuentra que se tiene poca información sobre esta incertidumbre, la misma que no se la resuelve en las especificaciones locales [9]. Una breve guía de recomendaciones de procesos de construcción de carreteras de pavimento rígido [10] describe que se puede realizar la fundición del sobreancho en el eje de la calzada tal como se puede observar en la figura 2, en donde ya no se tendrá una, sino dos juntas longitudinales, especificado este procedimiento para sobreanchos mayores a $1,2\text{ m.}$, sin embargo, no se hace mayor referencia técnica sobre la efectividad del proceso.



Figura 2: Construcción de sobreanchos en el eje de la vía. [10].

Esta bibliografía [10] abre la puerta a un tercer caso:

- Caso 3: El sobreancho se construye en el eje de la vía pero aún sigue teniendo la forma de una cuña irregular, cuya relación $(L/B) \neq 1 - 1,4$.

El problema radica en que se han podido observar defectos en los sobreanchos contruidos por un método u otro, así de esta forma se encuentra fisuras en las cuñas de los sobreanchos (*construidos*

al borde de la calzada) y un desgaste demasiado rápido de la superficie de sobreancho fundida monolíticamente con la cuneta. Como ejemplo se pueden ver las fotografías tomadas en diferentes vías cercanas a la ciudad de Cuenca, en la figura 3 y 4 se aprecian fallas en los sobreanchos en la vía Zhud-Cochancay-El Triunfo y Cumbe - Loja, los mismos que han sido construidos como una cuña de pavimento rígido. En las figuras 5 y 6 se pueden apreciar fisuras en los sobreanchos endebedos en las cunetas de las vías Cuenca-Salado-Lentag y Cuenca-Molleturo-Naranjal.

Figura 3: Fallas de sobreanchos en la vía Zhud - Cochancay - El Triunfo. Provincia Cañar.



Fisura transversal en cuña.



Rotura en las esquinas de paño y cuña



Rotura al inicio de cuña



Rotura en esquina con pulimiento



Pulimiento de superficie en zona de sobreancho



Pulimiento de calzada diferente de cuneta

Figura 4: Fallas de sobreanchos en la vía Cuenca - Cumbe - Loja. Provincia Azuay - Loja.



Desgaste zona de sobreancho.



Despostillamiento sobreancho cuneta



Rotura de esquina sobreancho



Despostillamiento sobreancho



Fisura Transversal en cuneta



Fisura Transversal en cuneta

Figura 5: Fallas de sobreanchos en la vía Cuenca - Salado - Lentag. Provincia Azuay.



Fisura esquina en cuneta zona sobreancho.



Despostillamiento esquina cuneta



Desgaste mayor zona sobreancho cuneta



Pulimiento zona de sobreancho



Pulimiento y despostillamiento sobreancho



Pulimiento diferente calzada y cuneta

Figura 6: Fallas de sobreanchos en la vía Cuenca - Molleturo - Naranjal. Provincia Azuay.



Desgaste zona de sobreancho.



Despostillamiento sobreancho cuneta



Rotura de esquina sobreancho



Despostillamiento sobreancho



Fisura Transversal en cuneta



Fisura Transversal en cuneta

1.2. Justificación

Con los antecedentes antes indicados, es claro que el comportamiento de los sobreanchos requiere un estudio más detallado y no se debe asumir que el mismo diseño o método constructivo para las losas de pavimento rígido se aplicará para la sección del sobreancho puesto que la respuesta de la subrasante y los esfuerzos producidos al fondo de una losa dependen en gran medida de su geometría [11].

Una fisura o grieta que atraviesa un paño de hormigón implica entre muchas cosas: eliminación de la transferencia de carga y la infiltración de agua hacia la estructura de la vía, como

consecuencia se desarrollan fallas en los pavimentos de concreto como son: inestabilidad de la subrasante, bombeo con la consecuente pérdida de soporte y deterioro del concreto debido a fisuras de durabilidad [12]. A su vez, un deterioro en la capa superficial produce una exposición de agregados. Cuando el agregado en la superficie llega a ser muy suave al tacto, la adherencia con las llantas de los vehículos se reduce considerablemente. La reducción de la fricción o resistencia al deslizamiento, puede alcanzar niveles de riesgo para la seguridad del tránsito [13].

Si se analiza el número de curvas que tiene una carretera cualquiera, cada una de ellas con su respectivo sobreancho y se cuantifica el volumen de hormigón utilizado para la construcción de los sobreanchos, se determina que este volumen representa grandes capitales de inversión, tanto en la construcción como en la reparación de estas zonas. De igual forma, el riesgo de accidentes por pérdida de adherencia se debe considerar. Estos factores hacen importante el estudio para evitar accidentalidad y para no incurrir en gastos vanos o reparaciones recurrentes e innecesarias.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Determinar el comportamiento de las losas de sobreancho para definir la alternativa más eficiente de construcción de las mismas, en base a análisis analíticos y computacionales.

1.3.2. Objetivo Específicos

- Investigar el comportamiento tensión-deformación de losas de sobreancho construidas al borde interno de la curva en forma de cuña así como la predicción de su vida útil.
- Analizar el comportamiento tensión-deformación de losas de sobreancho construidas en el eje de la vía en forma de cuña así como la predicción de su vida útil.
- Estudiar el comportamiento tensión-deformación de losas de sobreancho construidas monolíticamente con la cuneta cuya resistencia es menor que la resistencia del pavimento de calzada, así como la predicción de su vida útil.
- Analizar las mejores alternativas para la construcción de sobreanchos y emitir conclusiones y recomendaciones.

1.4. Metodología de Investigación

La investigación propuesta es de carácter exploratoria con una investigación aplicada, la misma que se enfoca en el comportamiento de un elemento estructural (*sobreancho*) aislado contruido de varias alternativas, que forma parte de una vía y que trabaja independiente al ser sometido a cargas de tránsito.

Las actividades que se realizarán en esta investigación son:

- Determinar diferentes secciones de sobreancho de una curva cualquiera para ser analizadas. Estas secciones se determinan de acuerdo al diseño geométrico de carreteras en la que un sobreancho se calcula de acuerdo al radio de la curva de estudio.
- Estudiar el comportamiento de la respuesta de la subrasante bajo una losa cargada de geometría irregular (*sobreancho*) y compararla con el comportamiento de la subrasante bajo una losa cargada de geometría regular. Se realizarán correcciones de la respuesta de la subrasante mediante fórmulas descritas en la sección 2.3, las mismas que dependen de las dimensiones de la losa cargada sobre la misma.

- Comparar las diferencias en la variación de la respuesta de la subrasante con cada sección de la losa cargada y determinar los esfuerzos en la misma producidos por la aplicación de la carga de tránsito mediante un programa de análisis de elementos finitos.
- Verificar los diseños de la losa de pavimento rígido y estimar la vida útil de las secciones de sobreancho. Esto se verificará de acuerdo al método AASHTO y el método PCA.
- Analizar por medio de elementos finitos, los esfuerzos y deformaciones generados por las distintas posiciones de carga en una losa de geometría regular y en una losa de geometría irregular (*sobreancho*).
- Realizar comparaciones de los resultados analíticos y los resultados obtenidos por elementos finitos e interpretar los resultados.
- Emitir conclusiones y recomendaciones.

Todas estas actividades se realizarán para los tres casos planteados en los objetivos específicos.

2. Marco Teórico

2.1. Sobreancho

Al circular un vehículo pesado cuyo cuerpo es rígido y al entrar a una curva, la trayectoria de las ruedas posteriores es diferente a la trayectoria de las delanteras haciendo que el vehículo requiera de un espacio mayor, razón por la cual en esta zona se desarrolla el *sobreancho*. Este incremento en la sección transversal de la vía se ubica en la zona interna de las curvas cuando se trata de curvas circulares y cuando se tienen curvas de transición se lo reparte a ambos lados. El sobreancho depende de algunos factores como:

1. Número de carriles (n)
2. Velocidad específica (V)
3. Radio de la curva (R)
4. Longitud del vehículo (L)

La expresión para obtener el sobreancho (S) en una curva es:

$$S = n(R - \sqrt{R^2 - L^2}) + \frac{0,1V}{\sqrt{R}} \quad (1)$$

Sin embargo, se pueden también obtener valores del sobreancho necesario de acuerdo a tablas expuestas en las normas viales de nuestro país. [9]

El sobreancho debe desarrollarse en toda la longitud de transición del peralte (L_s) (*figura 7*) de la curva correspondiente que se obtiene por medio de la expresión:

$$L_s = \frac{e}{m} \quad (2)$$

Donde:

e : Peralte máximo del carril en la curva de estudio

m : Pendiente relativa de los bordes

Cabe recalcar que la ecuación (2) se utiliza para curvas circulares.

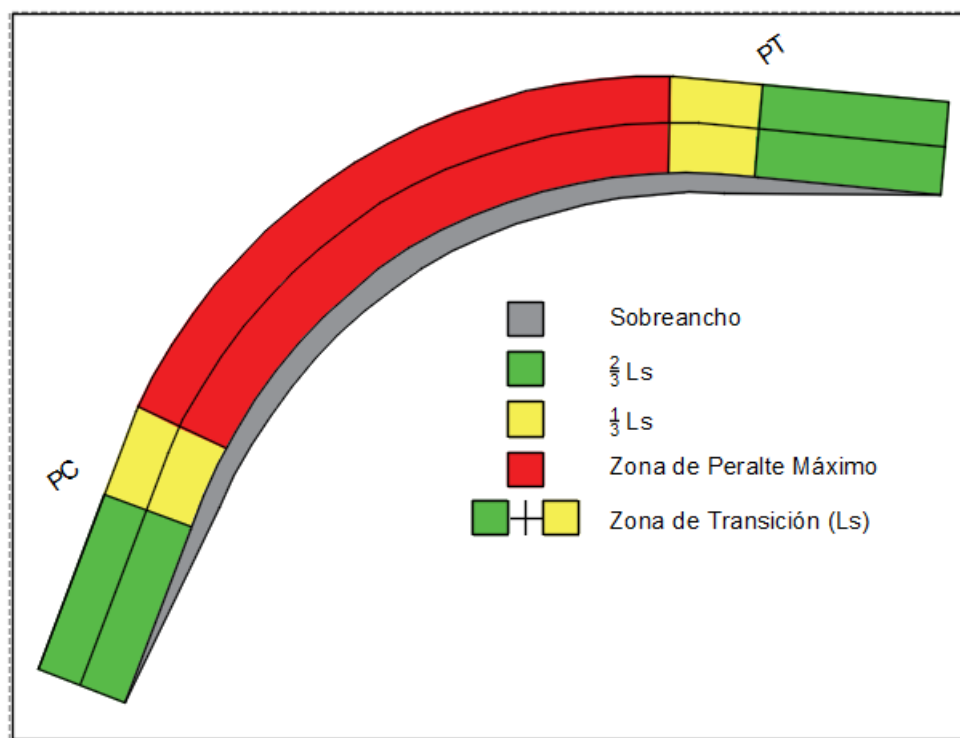


Figura 7: Zonas de evolución del sobreancho.

2.2. Soporte de la subrasante (módulo de reacción k)

La reacción de la subrasante se puede obtener de acuerdo a los diferentes recursos que se tengan para este fin. Se pueden utilizar ensayos en campo como: CBR, penetrómetro dinámico de cono, placa con carga estática; existiendo correlaciones entre diferentes parámetros del suelo [14], cuyo uso debe ser meticuloso al ser necesario en los casos que se tenga una información limitada de la subrasante. En la figura 8 se pueden encontrar las correlaciones entre los tipos de materiales de acuerdo a su clasificación, su respectivo CBR y su módulo de reacción.

El ensayo de placa es uno de los métodos más recomendados para determinar el módulo de reacción k de la subrasante, se basa en suponer que el suelo en el cual se asienta la losa de pavimento rígido se comporta como un resorte que tiene una constante k , al aplicar una carga P , se produce una deflexión en la losa Δ , siendo la presión aplicada proporcional a k y a Δ , (figura 9).

Entonces, analíticamente lo mencionado se expresa por:

$$P = k\Delta \quad (3)$$

Para obtener el valor de k :

$$k = \frac{P}{\Delta} \quad (4)$$

El valor de reacción k de la subrasante se obtiene del cociente entre la presión aplicada en la losa de pavimento rígido y la deformación que sufre la misma, (*Modelo de Winkler*) [11].

2.3. Corrección de la respuesta k de la subrasante

La respuesta de la subrasante es uno de los parámetros determinantes en el diseño del espesor de la losa de pavimento rígido. Si bien es cierto, se ha definido la resistencia de la subrasante

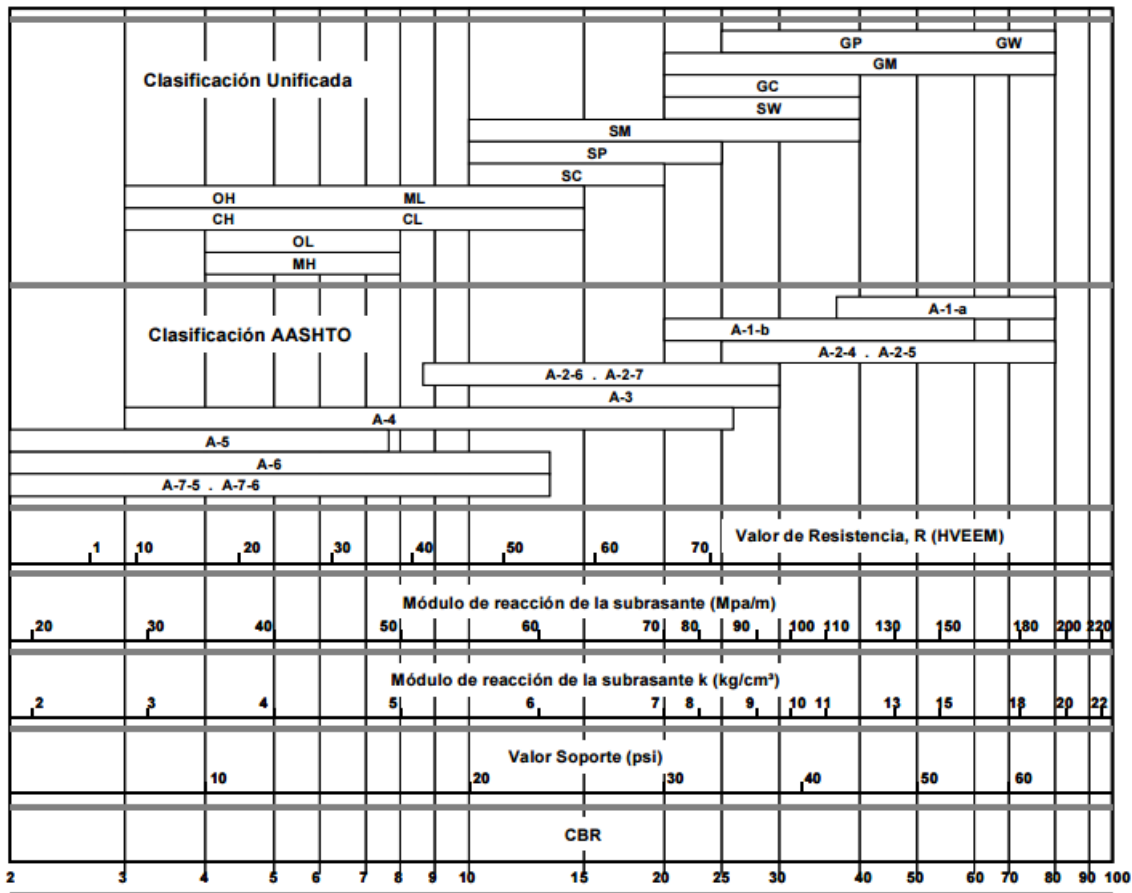


Figura 8: Relaciones de parámetros del suelo, [14].

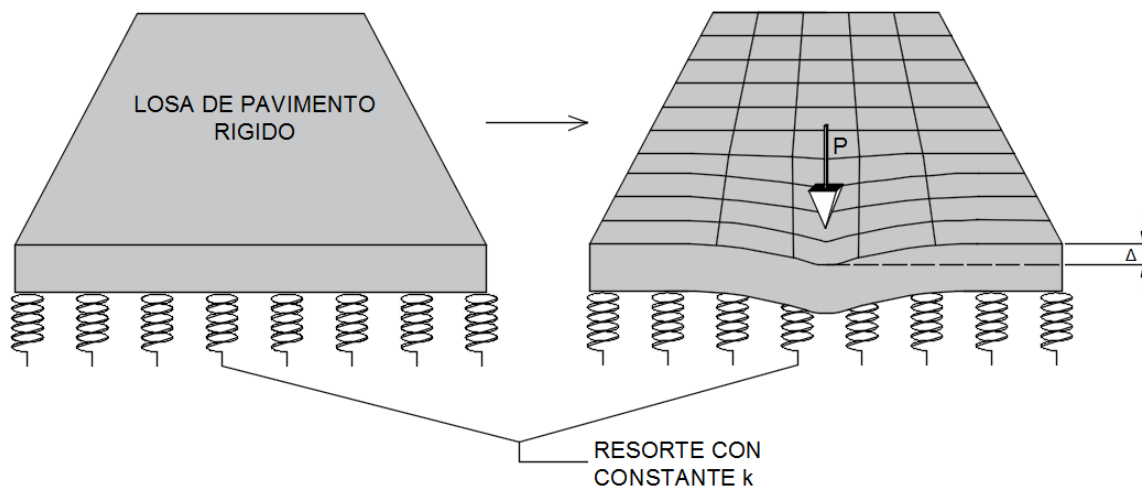


Figura 9: Losa cargada apoyada sobre resortes.

de acuerdo al tipo de material, no se ha considerado la geometría del elemento que soporta la carga y cuya variación afecta al módulo de respuesta de la subrasante [11]. Teniendo en cuenta que el sobreancho es una cuña de forma irregular esta corrección se convierte en una de las partes más importantes de este estudio.

En la referencia [11], se propone una corrección por forma, determinada por:

- Para losas cuadradas:

$$k_s = k_{s30} \left[\frac{b + 0,3}{2b} \right]^2 \quad (5)$$

- Para losas rectangulares:

$$k_s = \frac{2}{3} k_{s_{cuadrada}} \left[1 + \frac{b}{2L} \right] \quad (6)$$

En donde:

b : es el ancho equivalente de la cimentación.

k_s : es la respuesta de la subrasante corregida.

k_{s30} : es la respuesta de la subrasante en un ensayo de placa de 30 cm.

$k_{s_{cuadrada}}$: respuesta de la subrasante corregida para losas cuadradas.

L : es la longitud de la losa de pavimento rígido.

De igual forma se determina un k_s de acuerdo a las deformaciones verticales en el suelo al aplicar una carga en una cimentación definidas por [11]:

- Para una esquina:

$$k_s = \frac{2E_s}{B(1 - v^2)I_{ce}} \quad (7)$$

- Para el centro:

$$k_s = \frac{E_s}{B(1 - v^2)I_{ce}} \quad (8)$$

Donde:

v : es el coeficiente de Poisson

E_s : módulo de elasticidad

I_{ce} : coeficiente de influencia

$$I_{ce} = \frac{1}{\pi} \left[\ln \left(\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{L}{B}\right)^2} + \frac{L}{B}}{\sqrt{1 + \left(\frac{L}{B}\right)^2} - \frac{L}{B}} \right) + \frac{L}{B} \ln \left(\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{L}{B}\right)^2} + \frac{L}{B}}{\sqrt{1 + \left(\frac{L}{B}\right)^2} - \frac{L}{B}} \right) \right] \quad (9)$$

L y B son las dimensiones de la cimentación.

De las ecuaciones (7) y (8) se puede ver que la forma general para determinar la reacción de la subrasante depende de los parámetros elásticos del suelo y las expresión general viene dada por:

$$k_s = \frac{E_s}{(1 - v^2)I} \quad (10)$$

Nuevamente I es un coeficiente de influencia que toma en cuenta el tamaño y rigidez de la cimentación.

De acuerdo a [15] para un medio semi-infinito homogéneo el factor I se define por:

$$I = \frac{m^{1/2}}{T_m} \quad (11)$$

Donde:

$$m = \frac{L}{B} \quad (12)$$

$$T_m = \frac{L}{B} \text{ para } \frac{L}{B} > 1 \quad (13)$$

2.4. Esfuerzos en pavimentos rígidos

Westergaard en 1920 [1] desarrolló el primer modelo considerado completo en el que se describía el comportamiento de una losa de pavimento rígido, partiendo de algunas suposiciones:

- Las losas estan en equilibrio y se comportan como un sólido homogéneo elástico.
- La reacción del suelo se comporta de acuerdo al modelo de Winkler.
- La reacción del suelo es vertical y proporcional a la deflexión de la losa.

2.4.1. Área de contacto y radio equivalente

Para el caso de la superficie de distribución de cargas se consideró que los neumáticos producen una presión de contacto que se distribuye en una área rectangular (*fig.10*) la cual se obtiene por la expresión:

$$A_c = \frac{P}{q} \quad (14)$$

$$L = \sqrt{\frac{A_c}{0,5227}} \quad (15)$$

donde:

A_c : Área de contacto [m^2]

P : Carga por neumático [N]

q : Presión de inflado de los neumáticos [N/m^2]

L : Variable para determinar los lados de la carga rectangular.

El radio equivalente (a) se calcula con la expresión:

$$a = \sqrt{\frac{A_c}{\pi}} \quad (16)$$

Radio ficticio de la distribución de carga, b

De acuerdo a [16] al aplicar una carga en la superficie de la losa habrá una distribución de esfuerzos en el fondo de la misma definida mediante la ecuación:

$$b = \sqrt[2]{1,6a^2 + h^2} - 0,675h \quad \text{si} \quad a < 1,724h \quad (17)$$

$$b = a \quad \text{si} \quad a > 1,724h \quad (18)$$

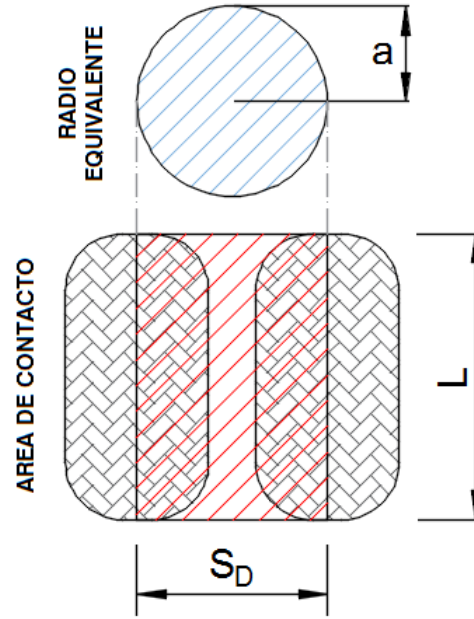


Figura 10: Área de contacto y radio equivalente

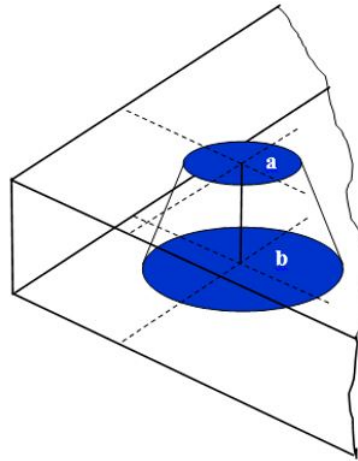


Figura 11: Radio ficticio de distribución en el fondo de la losa [16].

2.4.2. Rigidez Relativa

Para obtener el radio de rigidez relativa (L_r) se utiliza la expresión:

$$L_r = \sqrt[4]{\frac{E_s H^3}{12(1 - \nu^2)k}} \quad (19)$$

Donde:

E_s : Módulo de Elasticidad de la losa (kg/cm^2)

H : Espesor de la losa (cm)

ν : Coeficiente de Poisson

k : Módulo de reacción de la subrasante (kg/cm^3)

2.4.3. Esfuerzos y Deformaciones debido a cargas

El resultado de los estudios realizados por Westergaard [17] se resume en tres casos:

1. Esfuerzo máximo y deflexión en el centro de la losa (*fig.11a*)

- El esfuerzo de tracción (σ_t) se expresa por:

$$\sigma_t = 0,31625 \frac{P}{H^2} \left(4 \log_{10} \frac{L_r}{b} + 1,0693 \right) \quad (20)$$

Donde:

σ_t : Esfuerzo de tracción generado por la carga (kg/cm^2)

P : Carga total aplicada (kg)

H : Espesor de la losa (cm)

b : Radio de presiones en el fondo de una losa (m)

Para determinar b se utiliza la expresión:

$$b = a \quad \text{cuando} \quad a \geq 1,724H \quad (21)$$

a se ha definido en la ecuación 16.

$$b = \sqrt{1,6a^2 + H^2} + 0,675H \quad \text{cuando} \quad a < 1,724H \quad (22)$$

- La deformación (Δ_c) se expresa por:

$$\Delta_c = \frac{P}{8kL_r^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{a}{2L_r} \right) - 0,673 \right] \left(\frac{a}{L_r} \right)^2 \right\} \quad (23)$$

2. Esfuerzo máximo y deflexión en la esquina de la losa (*fig.11b*)

- El esfuerzo de tracción se expresa por:

$$\sigma_e = \frac{3P}{H^2} \left[1 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{L_r} \right)^{0,6} \right] \quad (24)$$

- La deformación se expresa por:

$$\Delta_e = \frac{P}{kL_r^2} \left[1,1 - 0,88 \left(\frac{a\sqrt{2}}{L_r} \right) \right] \quad (25)$$

3. Esfuerzo máximo y deflexión en el borde de la losa (*fig.11c*)

- El esfuerzo de tracción se expresa por:

$$\sigma_{b(circulo)} = \frac{0,803P}{H^2} \left[4 \log \left(\frac{L_r}{a} \right) + 0,666 \left(\frac{a}{L_r} \right) - 0,034 \right] \quad (26)$$

$$\sigma_{b(semicirculo)} = \frac{0,803P}{H^2} \left[4 \log \left(\frac{L_r}{a} \right) + 0,282 \left(\frac{a}{L_r} \right) + 0,650 \right] \quad (27)$$

- La deformación se expresa por:

$$\Delta_{b(circulo)} = \frac{0,431P}{kL_r^2} \left[1 - 0,82 \left(\frac{a}{L_r} \right) \right] \quad (28)$$

$$\Delta_{b(semicirculo)} = \frac{0,431P}{kL_r^2} \left[1 - 0,349 \left(\frac{a}{L_r} \right) \right] \quad (29)$$

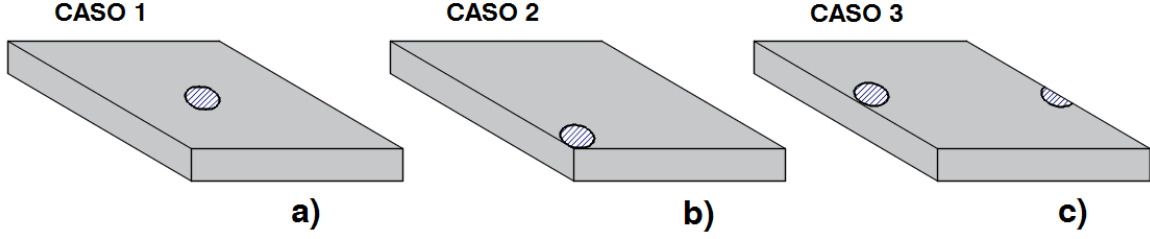


Figura 12: Casos de ubicación de carga en una losa.

2.5. Esfuerzos debido a temperatura (alabeo)

Es importante definir que existe un diferencial de temperatura, principalmente debido a que la losa expuesta a la intemperie en su superficie está en contacto con la temperatura ambiental y la acción directa del clima, no así, la base de la losa la misma que al encontrarse en el interior y en contacto con la rasante tiene una temperatura inferior, este tipo de acciones genera esfuerzos por alabeo cuyas ecuaciones determinadas por Bradbury [18] son:

- Esfuerzos en el borde de la losa (σ_b):

$$\sigma_b = \frac{CE\alpha\Delta t}{2} \quad (30)$$

- Esfuerzos en el interior de la losa (centro) (σ_i):

$$\sigma_i = \frac{E\alpha\Delta t}{2} \left[\frac{Cx + \mu Cy}{1 - \mu^2} \right] \quad (31)$$

- Esfuerzos en la esquina de la losa (σ_e):

$$\sigma_e = \frac{E\alpha\Delta t}{3(1 - \mu)} \left[\sqrt{\frac{a}{Lr}} \right] \quad (32)$$

Donde:

C: Coeficiente que depende de la longitud de la losa y del radio de rigidez realtiva.

α : Coeficiente de dilatación térmica del concreto.

E: Módulo elástico del concreto. Δt : Diferencia de temperatura entre las dos caras de la losa.

Cx: Coeficiente en la dirección en la cual se calcula el esfuerzo.

Cy: Coeficiente en la dirección perpendicular a Cx.

μ : Relación de Poisson del concreto.

a: Radio equivalente del área cargada.

Lr: Radio de rigidez relativa.

2.6. Esfuerzos debido a la fricción

La fricción entre la losa y la subrasante, debido a la reducción de temperatura durante el fraguado del concreto, produce esfuerzos en la losa, sin embargo estos esfuerzos son importantes en losa cuya longitud es considerable y se calcula por medio de la ecuación:

$$\sigma_f = \frac{w f L}{2} \quad (33)$$

Donde:

- w: Peso específico del hormigón (pci).
- f: Coeficiente de fricción
- L: Longitud de la losa (in).
- σ_f : Esfuerzo de fricción (psi).

2.7. Diseño y Evaluación de Pavimentos

2.7.1. Método AASHTO

Para el diseño de pavimento rígido por el método de la AASHTO se deben considerar los siguientes parámetros:

- W_{18} : número de aplicaciones de cargas equivalentes de 18kips (80kN)
- D : Espesor de pavimento de hormigón (pulg.)(mm)
- ΔPSI : Pérdida de serviciabilidad de diseño
- Z_R : Valor estandar de confiabilidad en la curva de distribución normal
- S_0 : Desviación estandar de todas las variables
- M_R : Módulo de rotura del hormigón (psi)
- E_c : Módulo de elasticidad del hormigón (psi)
- k : Módulo de reacción de la subrasante (pci)(kPa/mm)
- C_d : Coeficiente de drenaje
- J : Coeficiente de transmisión de cargas en las juntas

El método se basa en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \log W_{18} = & Z_R \cdot S_0 + 7,35 \log(D + 1) - 0,06 + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{4,5-1,5} \right]}{1 + \frac{1,624 \times 10^7}{(D+1)^{8,46}}} \\ & + (4,22 - 0,32 p_t) \log \left[\frac{M_R \cdot C_d \cdot (D^{0,75} - 1,132)}{215,63 \cdot J \left[D^{0,75} - \frac{18,42}{(k/E_c)^{0,25}} \right]} \right] \end{aligned} \quad (34)$$

Esta ecuación se puede resolver por medio de métodos computacionales, sin embargo también puede utilizarse un monograma (*fig.12*) para determinar de acuerdo a los parámetros expuestos el espesor D de la losa [19].

2.7.2. Método PCA (Portland Cement Association)

En este método de diseño se consideran y se calculan los esfuerzos inducidos por las cargas actuantes en las losas de pavimento rígido y se comparan con las resistencias de diseño. Esta comparación es denominada **relación de esfuerzos**. De acuerdo a [19] una vez determinada la relación se procede a calcular el número de repeticiones esperadas para un periodo de diseño. La relación de estos cálculos (en porcentaje que representa la resistencia consumida o utilizada por el tránsito), no debe exceder el 100 %. El método PCA para el diseño del pavimento rígido se centra en:

- Tipos de Fallo:

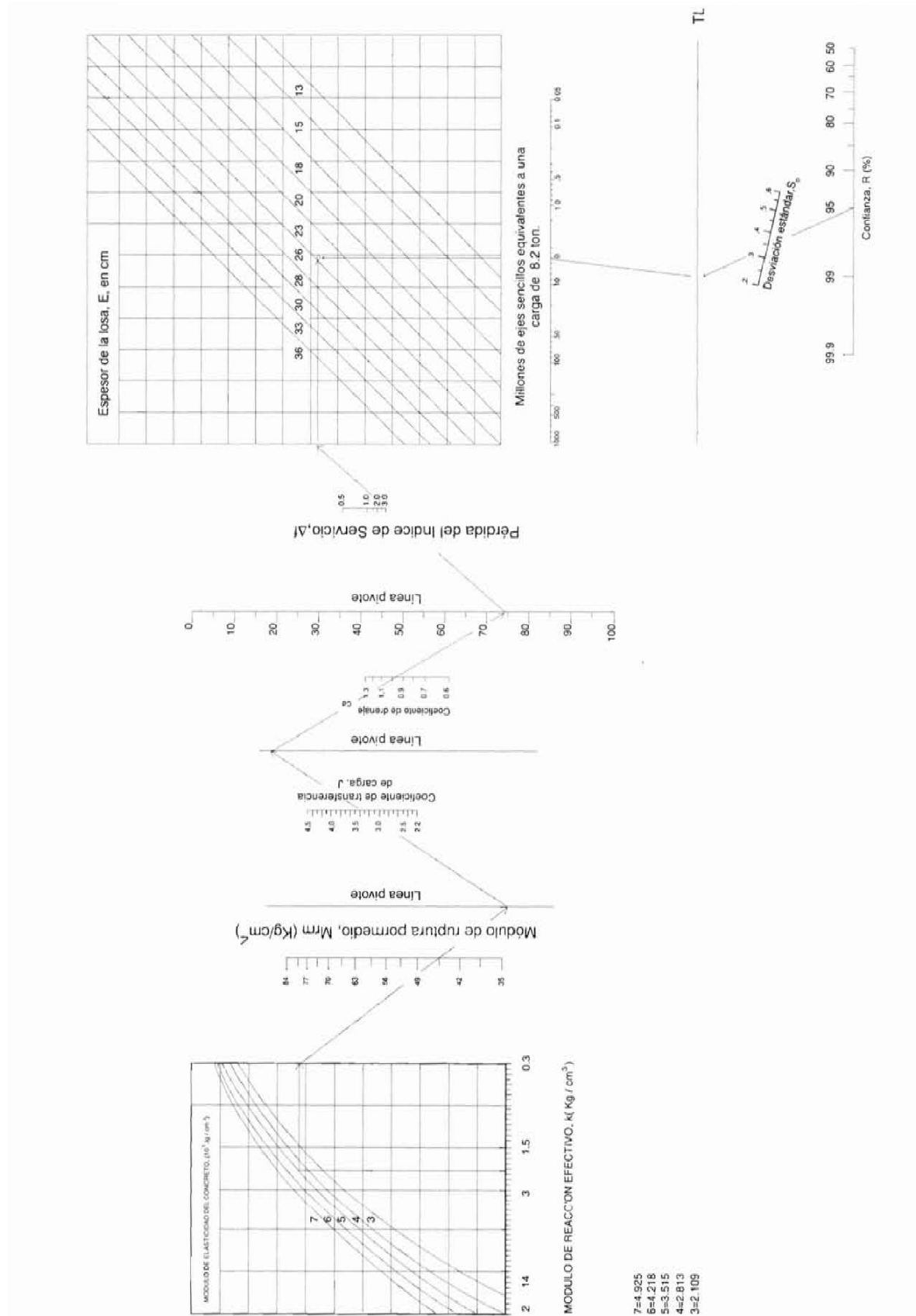


Figura 13: Nomograma de diseño paavimentos rígidos (AASHTO) [19].

- Fallo por Fatiga
- Fallo por Erosión
- Factores de Diseño
 - Cargas de Tránsito
 - Resistencia del hormigón
 - Resistencia de la subrasante o conjunto de la resistencia de la subrasante y base.

En el análisis de fallo por fatiga se debe encontrar los esfuerzos equivalentes, para ejes simples, tandem y tridem considerando si hay o no bermas de hormigón adyacentes (*Cuadro 3-4*).

ESPESOR DE LOSA (mm)	Esfuerzo equivalente con berma de hormigon (ejes simples y tandem)											
	K combinado (Mpa/m)											
	20		40		60		80		140		180	
100	4.18	3.48	3.65	3.1	3.37	2.94	3.19	2.85	2.85	2.74	2.72	2.72
110	3.68	3.07	3.23	2.71	2.99	2.56	2.83	2.47	2.55	2.35	2.43	2.32
120	3.28	2.75	2.88	2.41	2.67	2.26	2.54	2.17	2.29	2.05	2.19	2.02
130	2.95	2.49	2.6	2.17	2.41	2.02	2.29	1.94	2.07	1.82	1.99	1.78
140	2.68	2.27	2.36	1.97	2.19	1.83	2.08	1.75	1.89	1.63	1.81	1.59
150	2.44	2.08	2.15	1.8	2	1.67	1.9	1.59	1.73	1.48	1.66	1.44
160	2.24	1.93	1.97	1.66	1.84	1.53	1.75	1.46	1.59	1.35	1.53	1.31
170	2.06	1.79	1.82	1.54	1.7	1.42	1.62	1.35	1.48	1.24	1.42	1.2
180	1.91	1.67	1.69	1.43	1.57	1.32	1.5	1.25	1.37	1.15	1.32	1.11
190	1.77	1.57	1.57	1.34	1.46	1.23	1.4	1.17	1.28	1.07	1.23	1.03
200	1.65	1.48	1.46	1.26	1.37	1.16	1.3	1.1	1.19	1	1.15	0.96
210	1.55	1.4	1.37	1.19	1.28	1.09	1.22	1.03	1.12	0.93	1.08	0.9
220	1.45	1.32	1.29	1.12	1.2	1.03	1.15	0.97	1.05	0.88	1.01	0.85
230	1.37	1.26	1.21	1.07	1.13	0.98	1.08	0.92	0.99	0.83	0.96	0.8
240	1.29	1.2	1.15	1.01	1.07	0.93	1.02	0.87	0.94	0.79	0.9	0.76
250	1.22	1.14	1.08	0.97	1.01	0.88	0.97	0.83	0.89	0.75	0.86	0.72
260	1.16	1.09	1.03	0.92	0.96	0.84	0.92	0.79	0.84	0.71	0.81	0.68
270	1.1	1.04	0.98	0.88	0.91	0.81	0.87	0.76	0.8	0.68	0.77	0.65
280	1.05	1	0.93	0.85	0.87	0.77	0.83	0.73	0.76	0.65	0.74	0.62
290	1	0.96	0.89	0.81	0.83	0.74	0.79	0.7	0.73	0.62	0.7	0.06
300	0.95	0.93	0.85	0.78	0.79	0.71	0.76	0.67	0.7	0.6	0.67	0.57
310	0.91	0.89	0.81	0.75	0.76	0.69	0.72	0.64	0.67	0.58	0.64	0.55
320	0.87	0.86	0.78	0.73	0.73	0.66	0.69	0.62	0.64	0.55	0.62	0.53
330	0.84	0.83	0.74	0.7	0.7	0.64	0.67	0.6	0.61	0.53	0.59	0.51
340	0.8	0.8	0.71	0.68	0.67	0.62	0.64	0.58	0.59	0.52	0.57	0.49
350	0.77	0.78	0.69	0.66	0.64	0.6	0.61	0.56	0.57	0.5	0.55	0.47

Cuadro 2: Esfuerzos equivalentes con berma de hormigón [16].

Obtenidos estos esfuerzos equivalentes se procede a verificar el nomograma correspondiente en donde se obtiene el número de repeticiones admisibles de carga (*fig.13*).

Finalmente, se calcula el porcentaje de fatiga consumida por cada carga, dividiendo el número de ejes esperados entre el número de ejes admisibles (expresado en %).

En la falla por erosión, se sigue un proceso similar:

- Determinar los factores de erosión para cargas simples y tandem, (*cuadro4-5*).
- Determinar las repeticiones admisibles por erosión (*fig.14-15*)
- Calcular el porcentaje de erosión de cada carga, dividiendo el número de ejes esperados entre los números de ejes admisibles (expresado en %).
- Determinar la sumatoria de porcentaje de erosión producida por los ejes simples y tandem.



ESPELOR DE LOSA (mm)	Esfuerzo equivalente sin berma de hormigon (ejes simples y tandem)											
	K combinado (Mpa/m)											
	20		40		60		80		140		180	
100	5.42	4.39	4.75	3.83	4.38	3.59	4.13	3.44	3.66	3.22	3.45	3.15
110	4.74	3.88	4.16	3.35	3.8	3.12	3.63	2.97	3.23	2.76	3.06	2.68
120	4.19	3.47	3.69	2.98	3.41	2.75	3.23	2.62	2.88	2.4	2.73	2.33
130	3.75	3.14	3.3	2.68	3.06	2.46	2.89	2.33	2.59	2.13	2.46	2.05
140	3.37	2.87	2.97	2.43	2.76	2.23	2.61	2.1	2.34	1.9	2.23	1.83
150	3.06	2.64	2.7	2.23	2.51	2.04	2.37	1.92	2.13	1.72	2.03	1.65
160	2.79	2.45	2.47	2.06	2.29	1.87	2.17	1.76	1.95	1.57	1.86	1.5
170	2.56	2.28	2.26	1.91	2.1	1.74	1.99	1.63	1.8	1.45	1.71	1.38
180	2.37	2.14	2.09	1.79	1.94	1.62	1.84	1.51	1.66	1.34	1.58	1.27
190	2.19	2.01	1.94	1.67	1.8	1.51	1.71	1.41	1.54	1.25	1.47	1.18
200	2.04	1.9	1.8	1.58	1.67	1.42	1.59	1.33	1.43	1.17	1.37	1.11
210	1.91	1.79	1.68	1.49	1.56	1.34	1.48	1.25	1.34	1.1	1.28	1.04
220	1.79	1.7	1.57	1.41	1.46	1.27	1.39	1.18	1.26	1.03	1.2	0.98
230	1.68	1.62	1.48	1.34	1.38	1.21	1.31	1.12	1.18	0.98	1.13	0.92
240	1.58	1.55	1.38	1.28	1.3	1.15	1.23	1.06	1.11	0.93	1.06	0.87
250	1.49	1.48	1.32	1.22	1.22	1.09	1.16	1.01	1.05	0.88	1	0.83
260	1.41	1.41	1.25	1.17	1.16	1.05	1.1	0.97	0.99	0.84	0.95	0.79
270	1.34	1.36	1.18	1.12	1.1	1	1.04	0.93	0.94	0.8	0.6	0.75
280	1.28	1.3	1.12	1.07	1.04	0.96	0.99	0.89	0.89	0.77	0.86	0.72
290	1.22	1.25	1.07	1.03	0.99	0.92	0.94	0.85	0.85	0.74	0.81	0.69
300	1.16	1.21	1.02	0.99	0.95	0.89	0.9	0.82	0.81	0.71	0.78	0.66
310	1.11	1.16	0.97	0.96	0.9	0.86	0.86	0.79	0.77	0.68	0.74	0.64
320	1.06	1.12	0.93	0.92	0.86	0.83	0.82	0.76	0.74	0.66	0.71	0.62
330	1.02	1.09	0.89	0.89	0.83	0.8	0.78	0.74	0.71	0.63	0.68	0.59
340	0.98	1.05	0.85	0.86	0.79	0.77	0.75	0.71	0.68	0.61	0.65	0.57
350	0.94	1.02	0.82	0.84	0.76	0.75	0.72	0.69	0.65	0.59	0.62	0.55

Cuadro 3: Esfuerzos equivalentes sin berma de hormigón [16].

ESPELOR DE LOSA (mm)	Factor de Erosión con berma de hormigon (ejes simples y tandem)											
	K combinado (Mpa/m)											
	20		40		60		80		140		180	
100	3.27	3.25	3.24	3.17	3.22	3.14	3.21	3.12	3.17	3.11	3.15	3.11
110	3.16	3.16	3.12	3.07	3.1	3.03	3.09	3	3.05	2.98	3.03	2.97
120	3.05	3.08	3.01	2.98	2.99	2.93	2.98	2.9	2.94	2.86	2.92	2.84
130	2.96	3.01	2.92	2.9	2.89	2.85	2.88	2.81	2.84	2.76	2.82	2.74
140	2.87	2.94	2.82	2.83	2.8	2.77	2.78	2.74	2.75	2.67	2.73	2.65
150	2.79	2.88	2.74	2.77	2.72	2.71	2.7	2.67	2.67	2.6	2.65	2.57
160	2.71	2.82	2.66	2.71	2.64	2.65	2.62	2.6	2.59	2.53	2.57	2.5
170	2.64	2.77	2.59	2.65	2.57	2.59	2.55	2.55	2.51	2.46	2.49	2.43
180	2.57	2.72	2.52	2.6	2.5	2.54	2.48	2.49	2.44	2.41	2.42	2.37
190	2.51	2.67	2.46	2.56	2.43	2.49	2.41	2.44	2.38	2.35	2.36	2.32
200	2.45	2.63	2.4	2.51	2.37	2.44	2.35	2.4	2.31	2.31	2.3	2.27
210	2.39	2.58	2.34	2.47	2.31	2.4	2.29	2.35	2.26	2.26	2.24	2.22
220	2.34	2.54	2.29	2.43	2.26	2.36	2.24	2.31	2.2	2.22	2.18	2.18
230	2.29	2.5	2.23	2.39	2.21	2.32	2.19	2.27	2.15	2.18	2.13	2.13
240	2.24	2.46	2.18	2.35	2.16	2.28	2.13	2.23	2.1	2.14	2.08	2.1
250	2.19	2.43	2.14	2.31	2.11	2.24	2.09	2.2	2.05	2.1	2.03	2.06
260	2.15	2.39	2.09	2.28	2.06	2.21	2.04	2.16	2	2.07	1.98	2.02
270	2.1	2.36	2.05	2.24	2.02	2.18	2	2.13	1.96	2.03	1.94	1.99
280	2.06	2.32	2.01	2.21	1.98	2.14	1.95	2.1	1.91	2	1.89	1.96
290	2.02	2.29	1.97	2.18	1.93	2.11	1.91	2.06	1.87	1.97	1.85	1.93
300	1.98	2.26	1.93	2.15	1.9	2.08	1.87	2.03	1.83	1.94	1.81	1.9
310	1.95	2.23	1.89	2.12	1.86	2.05	1.84	2.01	1.79	1.91	1.77	1.87
320	1.91	2.2	1.85	2.09	1.82	2.03	1.8	1.98	1.76	1.88	1.74	1.84
330	1.87	2.17	1.82	2.06	1.78	2	1.76	1.95	1.72	1.86	1.7	1.81
340	1.84	2.15	1.78	2.04	1.75	1.97	1.73	1.92	1.69	1.83	1.67	1.79
350	1.81	2.12	1.75	2.01	1.72	1.95	1.69	1.9	1.65	1.8	1.63	1.76

Cuadro 4: Factor erosión con berma de hormigón [16].

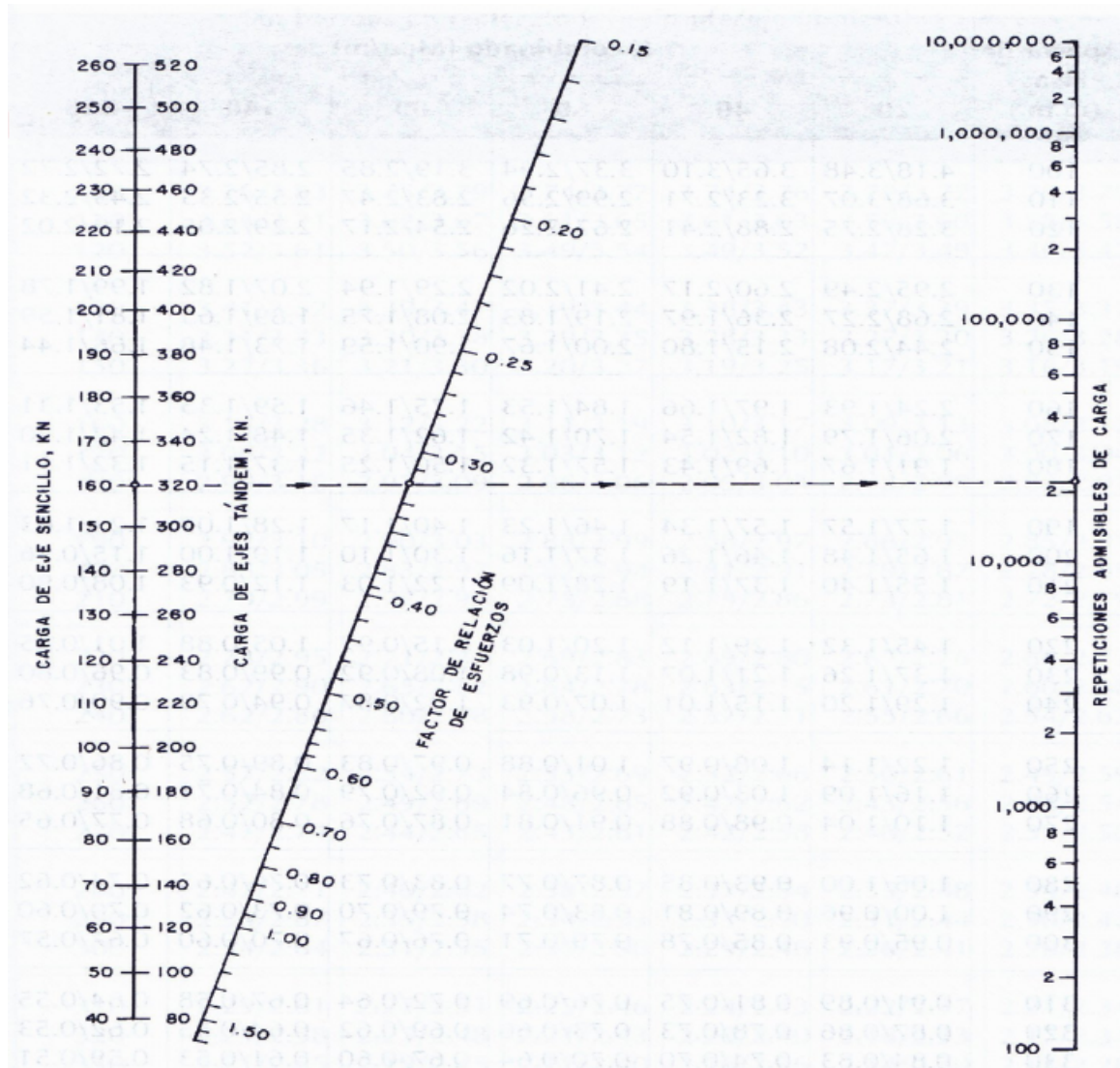


Figura 14: Nomograma para el análisis de fatiga [16].

Para determinar los factores de erosión de igual manera debe considerarse el efecto de las bermas de hormigón adyacentes puesto que estas reducen los esfuerzos de flexión y las deflexiones producidas por las solicitaciones debidas a las cargas de los vehículos y los pasadores.

Los nomogramas que se utilizan para determinar el número de repeticiones admisibles se presenta en las figuras 14 y 15.



ESPEJOR DE LOSA (mm)	Factor de Erosión sin berma de hormigon (ejes simples y tandem)											
	K combinado (Mpa/m)											
	20		40		60		80		140		180	
100	3.76	3.83	3.75	3.83	3.74	3.77	3.74	3.76	3.72	3.72	3.7	3.7
110	3.63	3.71	3.62	3.35	3.61	3.65	3.61	3.63	3.59	3.6	3.58	3.58
120	3.52	3.61	3.5	2.98	3.49	3.54	3.49	3.52	3.47	3.49	3.46	3.47
130	3.41	3.52	3.39	2.68	3.39	3.44	3.38	3.43	3.37	3.39	3.35	3.37
140	3.31	3.43	3.3	2.43	3.29	3.35	3.28	3.33	3.27	3.3	3.26	3.28
150	3.22	3.36	3.21	2.23	3.2	3.27	3.19	3.25	3.17	3.21	3.16	3.19
160	3.14	3.28	3.12	2.06	3.11	3.19	3.1	3.17	3.09	3.13	3.08	3.12
170	3.06	3.22	3.04	1.91	3.03	3.12	3.02	3.1	3.01	3.06	3	3.04
180	2.99	3.16	2.97	1.79	2.96	3.06	2.95	3.03	2.93	2.99	2.92	2.97
190	2.92	3.1	2.9	1.67	2.88	2.99	2.88	2.97	2.86	2.93	2.85	2.91
200	2.85	3.05	2.83	1.58	2.82	2.94	2.81	2.91	2.79	2.87	2.78	2.85
210	2.79	2.99	2.77	1.49	2.75	2.88	2.75	2.86	2.73	2.81	2.72	2.79
220	2.73	2.95	2.71	1.41	2.69	2.83	2.69	2.8	2.67	2.76	2.66	2.73
230	2.67	2.9	2.65	1.34	2.64	2.78	2.63	2.75	2.61	2.7	2.6	2.68
240	2.62	2.86	2.6	1.28	2.58	2.73	2.57	2.71	2.55	2.66	2.54	2.63
250	2.57	2.82	2.54	1.22	2.53	2.69	2.52	2.66	2.5	2.61	2.49	2.59
260	2.52	2.78	2.49	1.17	2.48	2.65	2.47	2.62	2.45	2.56	2.44	2.54
270	2.47	2.74	2.44	1.12	2.4	2.61	2.42	2.58	2.4	2.52	2.39	2.5
280	2.42	2.71	2.4	1.07	2.38	2.57	2.37	2.54	2.35	2.48	2.34	2.46
290	2.38	2.67	2.35	1.03	2.34	2.53	2.33	2.5	2.31	2.44	2.3	2.42
300	2.34	2.64	2.31	0.99	2.3	2.5	2.29	2.46	2.26	2.41	2.26	2.38
310	2.29	2.61	2.27	0.96	2.25	2.46	2.24	2.43	2.22	2.37	2.21	2.34
320	2.25	2.58	2.23	0.92	2.21	2.43	2.2	2.4	2.18	2.33	2.17	2.31
330	2.21	2.55	2.19	0.89	2.17	2.4	2.16	2.36	2.14	2.3	2.13	2.28
340	2.18	2.52	2.15	0.86	2.14	2.37	2.12	2.33	2.1	2.27	2.09	2.24
350	2.14	2.49	2.11	0.84	2.1	2.34	2.09	2.3	2.07	2.24	2.06	2.21

Cuadro 5: Factor erosión sin berma de hormigón [16].

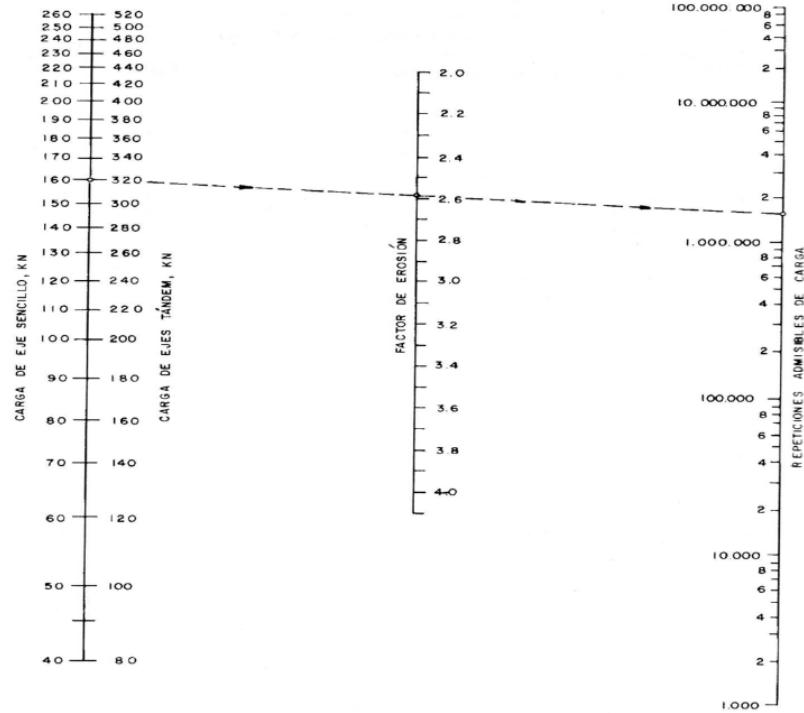


Figura 15: Nomograma analisis erosión con berma hormigón .

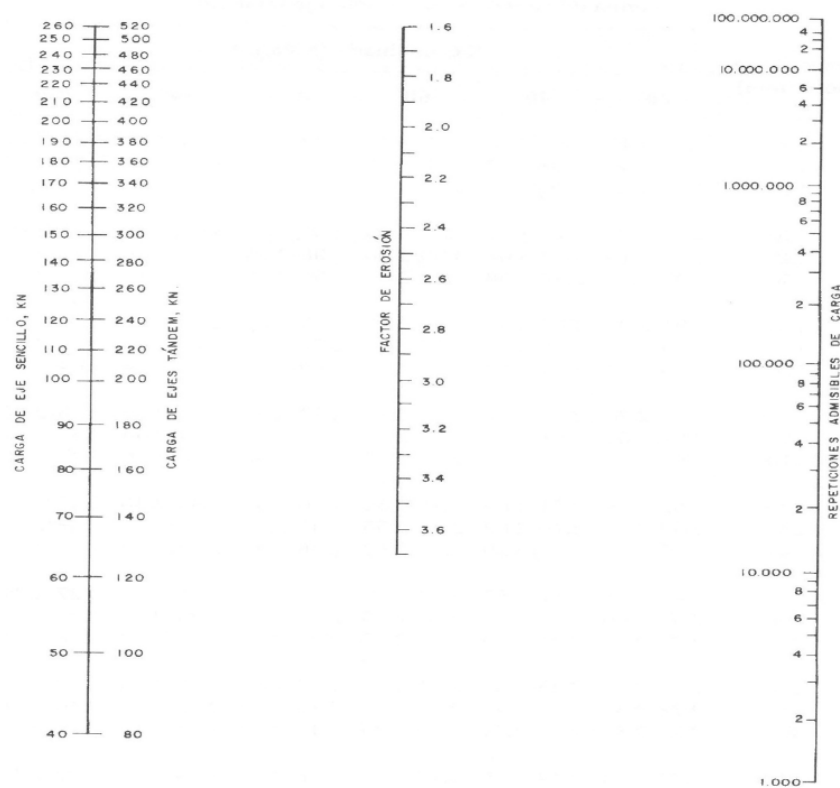


Figura 16: Nomograma analisis erosión sin berma hormigón .

2.8. Juntas

Las juntas son consideradas como el método más eficiente para controlar agrietamientos, generalmente en el pavimento se presentan movimientos debido al secado del hormigón y después a la temperatura, razón por la cual el libre movimiento del pavimento a través de juntas adecuadamente espaciadas es necesario. Las juntas se convierten de esta manera en fisuras provocadas intencionalmente, controladas y planificadas dentro del proceso constructivo del pavimento rígido.

Un adecuado diseño de juntas permitirá:

- Prevenir la formación de fisuras transversales y longitudinales.
- Proveer adecuada transferencia de carga.
- Prevenir la infiltración de agua y de materiales incompresibles a la estructura del pavimento.
- Permitir el movimiento de las losas.

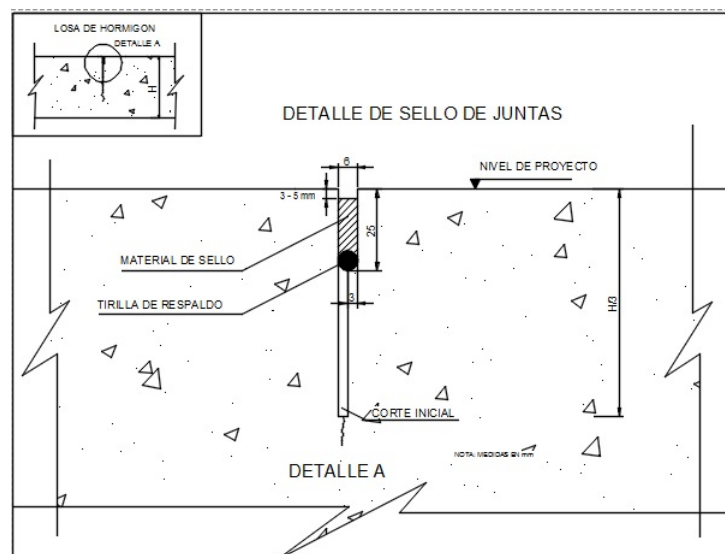
Existen tres tipos de juntas:

- Juntas de Contracción.
- Juntas de Construcción.
- Juntas de Dilatación.

De acuerdo a [20] el espaciamiento recomendado para las juntas transversales es:

Espesor del Pavimento	Espaciamiento entre juntas
125 mm	3.0 a 3.8 m
150 mm	3.7 a 4.6 m
175 mm	4.3 a 4.6 m
200 mm o mas	4.6 m

Un esquema del corte y sellado de la junta se presenta en la siguiente gráfica:



3. Cálculos, Análisis Y Resultados

3.1. Cálculo de sobreancho

Se tomará como ejemplo una curva del proyecto: reconstrucción de la vía Zhud-Cochancay-El Triunfo y pasos laterales, vías de acceso a la central Ocaña mostrada en la figura 16. Dentro de este proyecto se realizó la construcción de una de las vías de acceso a la central Ocaña cuyo inicio es en el km 39+430 de la vía Zhud-Cochancay-El Triunfo. En esta curva existen sobreanchos hasta de 1 metro.

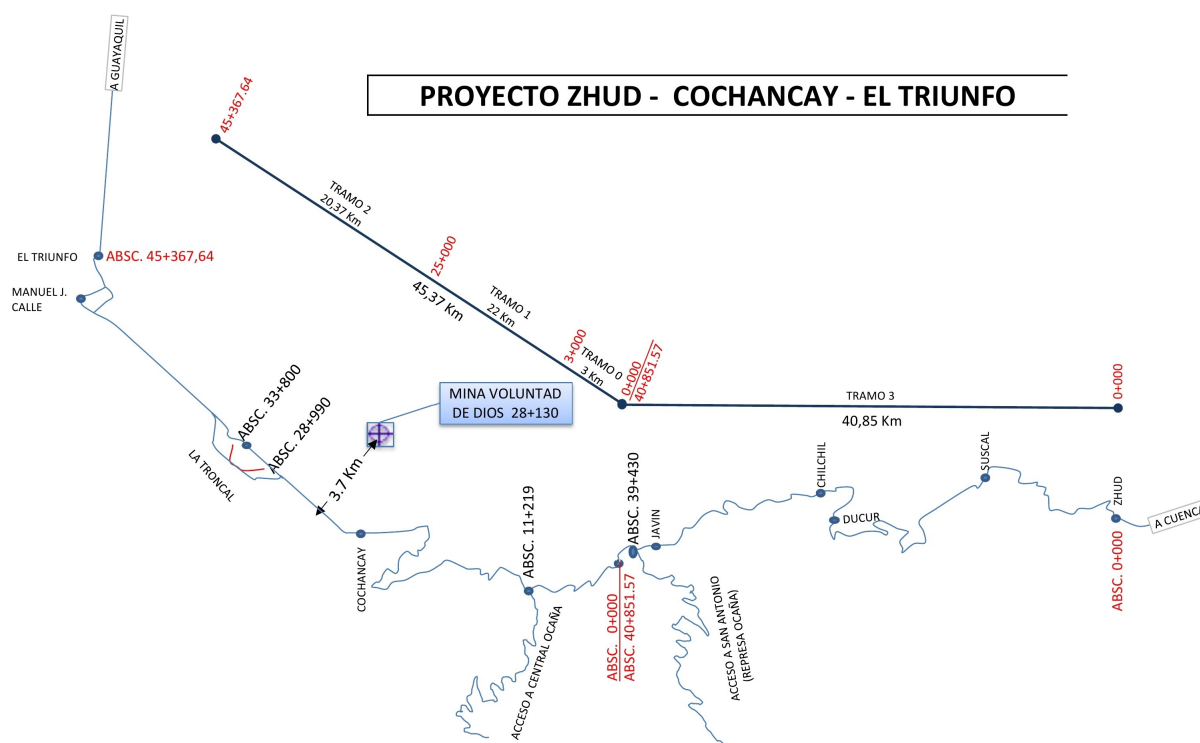


Figura 17: Croquis proyecto Zhud-Cochancay-El Triunfo.

En el cuadro 6 se presentan algunos detalles de la curva de estudio.

ABSCISA	PUNTO	S	P	COTA DE PROYECTO EN RASANTE (BASE)				COTA DE PROYECTO EN MEJORAMIENTO					
				BORDE IZQ.		BORDE DER.		BORDE IZQ.		BORDE DER.			
				DIST EJE	COTA	COTA EJE	DIST EJE	DIST EJE	COTA	COTA EJE	DIST EJE	COTA	DIST EJE
0+939.19	A	0.00	3.00	3.40	1,213.59	1,213.66	1,213.59	3.40	3.40	1,213.44	1,213.51	1,213.43	4.20
0+942.23	B	0.33	3.00	3.73	1,213.26	1,213.33	1,213.33	3.40	3.73	1,213.11	1,213.18	1,213.18	4.20
0+945.27	C	0.67	3.00	4.07	1,212.91	1,212.99	1,213.06	3.40	4.07	1,212.76	1,212.84	1,212.92	4.20
0+945.27	D	0.67	3.00	4.07	1,212.91	1,212.99	1,213.06	3.40	4.07	1,212.76	1,212.84	1,212.92	4.20
0+946.79	E	1.00	3.00	4.40	1,212.69	1,212.82	1,212.92	3.40	4.40	1,212.54	1,212.67	1,212.80	4.20
0+950.00		1.00	3.00	4.40	1,212.35	1,212.48	1,212.58	3.40	4.40	1,212.20	1,212.33	1,212.46	4.20
0+960.00		1.00	3.00	4.40	1,211.25	1,211.38	1,211.48	3.40	4.40	1,211.10	1,211.23	1,211.36	4.20
0+970.00		1.00	3.00	4.40	1,210.10	1,210.23	1,210.33	3.40	4.40	1,209.95	1,210.08	1,210.21	4.20
0+979.48	EA´	1.00	3.00	4.40	1,208.87	1,209.00	1,209.10	3.40	4.40	1,208.72	1,208.85	1,208.98	4.20
0+981.00	DA´	0.67	3.00	4.07	1,208.72	1,208.80	1,208.87	3.40	4.07	1,208.57	1,208.65	1,208.73	4.20
0+981.00	CA´	0.67	3.00	4.07	1,208.72	1,208.80	1,208.87	3.40	4.07	1,208.57	1,208.65	1,208.73	4.20
0+984.04	BA´	0.33	3.00	3.73	1,208.33	1,208.40	1,208.40	3.40	3.73	1,208.18	1,208.25	1,208.25	4.20
0+987.08	AA´	0.00	3.00	3.40	1,207.93	1,208.00	1,207.93	3.40	3.40	1,207.78	1,207.85	1,207.77	4.20

Cuadro 6: Detalle de curva de estudio.

Para todos los casos de estudio se tomará como subrasante una arcilla que tiene las características especificadas en el cuadro 7, puesto que este material se encuentra comúnmente en varios sectores en donde se implementó este proyecto vial. Es importante recalcar que el pavimento rígido absorbe los esfuerzos generados en el mismo, sin embargo también transmite esfuerzos a las capas inferiores, especialmente si la construcción es deficiente y la geometría

es compleja, aumenta el potencial de punzonamiento, a diferencia del pavimento flexible que transmite casi la totalidad de estos esfuerzos a la subrasante. Es recomendable utilizar una base de espesor mínimo con el fin de evitar erosión de la subrasante, sin embargo el pavimento rígido puede ser colocado sobre cualquier tipo de material.

Mat Par	E (MPa)	μ (poisson)	K30 (MPa)
Arcila	20 - 40	0.20 - 0.50	30 - 60

Cuadro 7: Parámetros del suelo [21].

Para el análisis se empleará una resistencia de subrasante de 30 MPa y un coeficiente de poisson de 0,15.

Desarrollando los casos expuestos anteriormente se tiene:

3.2. CASO 1: Sobreancho como cuña de hormigón

Para el estudio de este caso se divide el sobreancho en varios paños de pavimento rígido de sección variable, las secciones serán: 4,65x4,65, 4,65x1,00, 4,65x0,50, 4,65x0,25, 4,65x0,10, de tal forma que se simule correctamente la disminución del sobreancho. Se realizará el análisis con un espesor de losa de 27 cm. tal cual fue el diseño utilizado en la vía Zhud-Cochancay-El Triunfo. Una vez definidas las secciones se realizarán las correcciones por forma de la losa, se procederá a evaluar el estado tensional del elemento y a calcular el número de repeticiones admisibles por el método AASHTO y los porcentajes de consumo por esfuerzos y por erosión por medio del método PCA.

3.2.1. Losa de pavimento rígido normal 4,65x4,65 m

La vía Zhud-Cochancay-El Triunfo tiene paños de pavimento rígido de dimensiones 4,65 x 4,65 metros. Es una vía que tiene dos carriles de circulación y cunetas de 4,65 y 1 m. de ancho respectivamente. En esta vía se pueden encontrar sobreanchos contruidos como una cuña independiente y también existen sobreanchos contruidos dentro la misma cuneta. En este caso se estudiará la cuña.

Corrección de subrasante

Datos de entrada:

B	4.65	m
L	4.65	m
k	30	MPa/m

De la ecuación 10 se tiene:

$$k_s = \frac{E_s}{1-\nu^2} I$$

I es el factor que depende de la forma de la cimentación. De la ecuación 11 se tiene:

$$I = \frac{m^{1/2}}{T_m} = \frac{\sqrt{\frac{4,65}{4,65}}}{\frac{4,65}{4,65}} = 1$$

Por lo tanto el k corregido es:

$$k_s = 34,19 \text{ MPa}$$

Análisis Tensional del Elemento

Dentro del análisis tensional del elemento se analizan 3 esfuerzos puntuales:

- Por alabeo
- Por cargas y,
- Por fricción.

Los datos a utilizarse para el análisis se especifican en el cuadro 8.

DATOS			
Mr	34.19	kg/cm3	Módulo de reacción de la subbase
Lx	465	cm	Longitud x
Ly	465	cm	Longitud y
Ec	300000	kg/cm2	Módulo elástico del concreto
Sc	45	kg/cm2	Módulo de ruptura
μ	0.15		Coefficiente de Poisson
Δt	16	$\Delta ^\circ\text{C}$	Diferencial de temperatura
α	0.000009	cm/ $\Delta ^\circ\text{C}$	Coefficiente de expansión térmica
h	27	cm	Espesor de la losa
f	1.5		Coefficiente de fricción
w	24	kg/m2	Peso de la losa

Cuadro 8: Datos de entrada para análisis tensional.

- Esfuerzos por Alabeo

Radio de rigidez relativa.- De acuerdo a (19):

$$Lr = \sqrt[4]{\frac{EH^3}{12(1-\mu^2)k}} = 61,94 \text{ cm}$$

De esta forma al dividir el largo y el ancho de la losa de estudio para el radio de rigidez relativa se obtiene un valor, el mismo que se compara con la figura 18 para encontrar los coeficientes de bradbury.

$$\begin{aligned} lx/Lr &= 7,51 & C1 &= 1 = Cx \\ ly/Lr &= 7,51 & C2 &= 1 = Cy \end{aligned}$$

En este caso C1 y C2 son iguales a 1.

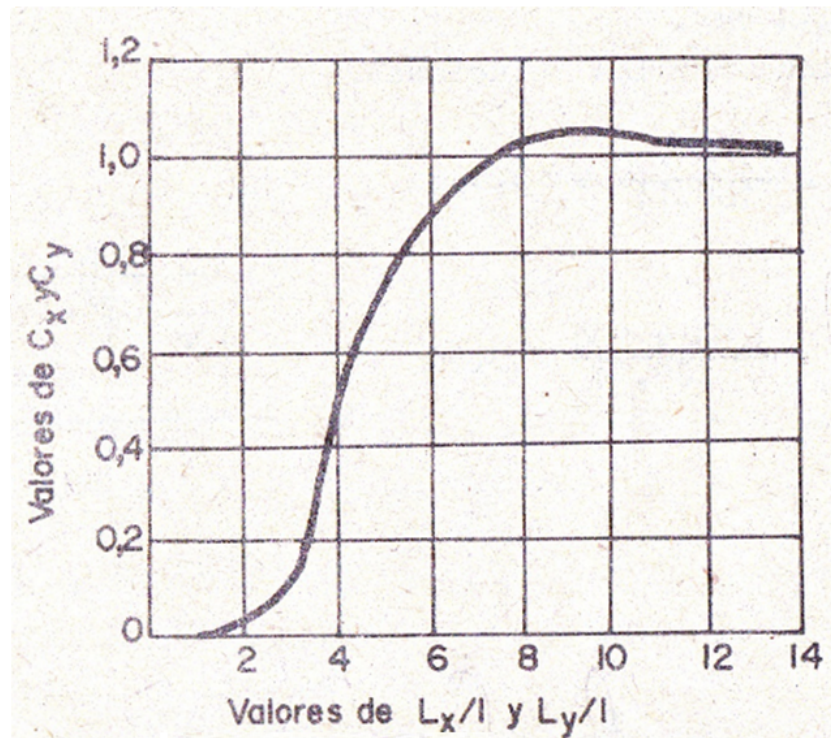


Figura 18: Gráfica para encontrar los coeficientes de Bradbury [16].

Esfuerzos en el borde longitudinal.- De acuerdo a (30):

$$\sigma_{tb} = \frac{CE\alpha\Delta t}{2} = 21,64 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en el interior de la losa.- De acuerdo a (31):

$$\sigma_{ti} = \frac{E\alpha\Delta t}{2} \left[\frac{C_x + uC_y}{1-u^2} \right] = 25,46 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en la esquina de la losa.- De acuerdo a (32):

$$\sigma_e = \frac{E\alpha\Delta t}{3(1-u)} \left[\sqrt{\frac{a}{Lr}} \right] = 9,46 \text{ kg/cm}^2$$

■ Esfuerzos por efectos del tráfico

Para realizar el análisis por efectos del tráfico se utilizará una carga puntual equivalente a un neumático de un camión tipo, esto es una carga de 4100 kg, la presión de inflado del neumático utilizada para todos los casos de estudio es de 14 kg/cm².

- 1) *Carga Aplicada:* $P = 4100 \text{ kg}$.
- 2) *Número de ruedas:* 1
- 3) *Presión de ruedas:* 14 kg/cm²
- 4) *Carga por rueda:* 4100 kg.
- 5) *Area de contacto por rueda:* $(4)/(3) = 292,85 \text{ cm}^2$

Radio de contacto equivalente

De la ecuación 16 se tiene:

$$a = \sqrt[2]{\frac{A_T}{\pi}} = 9,66$$

Radio ficticio de la distribución de carga, b

De la ecuación 17 y 18 se tiene:

$$b = \sqrt[2]{1,6a^2 + h^2} - 0,675h \quad \text{si} \quad a < 1,724h$$

$$b = a \quad \text{si} \quad a > 1,724h$$

$$b = 11,41$$

Relaciones para obtener coeficientes de Westergard

$$L/b = 5,430$$

$$a/L = 0,156$$

Esfuerzos en el interior de la losa

De acuerdo a la ecuación 20 se tiene:

$$\sigma_t = 0,31625 \frac{P}{H^2} \left(4 \log_{10} \frac{L_r}{b} + 1,0693 \right) = 7,15 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en el borde de la losa

De acuerdo a la ecuación 26 se tiene:

$$\sigma_t = 0,57185 \frac{P}{2H^2} \left(4 \log_{10} \frac{L_r}{b} + 0,3593 \right) = 10,65 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en la esquina de la losa

De acuerdo a la ecuación 24 se tiene:

$$\sigma_e = \frac{3P}{H^2} \left[1 - \left(\frac{1,414a}{L_r} \right)^{1,2} \right] = 14,16 \text{ kg/cm}^2$$

- Esfuerzos por efectos de la fricción

De la ecuación 33 se tiene:

$$\sigma_t = \frac{w f L}{2} = 11,92 \text{ psi} = 0,837 \text{ kg/cm}^2$$

Un resumen de las tensiones obtenidas se encuentra en el cuadro 9.

Tipos de esfuerzos	Esfuerzos obtenidos (kg/cm2)		
	Interior	Borde	Esquina
Alabeo	36.05	30.64	9.46
Carga	7.15	10.65	14.160
Fricción	0.837	0.837	0.837
Totales	44.04	42.13	24.45

Cuadro 9: Resumen de tensiones losa 4.65x4.65.

Análisis por elementos finitos:

Para realizar este análisis se utilizará el programa EverFE 2.24, que es una herramienta que simula la respuesta de una losa de pavimento rígido ante cargas axiales y efectos ambientales.

Se realizará una descripción completa sobre el funcionamiento del programa en el primer caso (losa 4.65x4.65 m.) en el resto de casos se mostrarán los resultados obtenidos, los cálculos se encuentran en el Anexo 1 de la presente investigación.

En la figura 19 se indica como se ingresan las características geométricas del elemento tales como: longitud (length), ancho (width), espesor de la losa (slab thickness), espesor de la capa de subrasante (Layer 1 depth), las características como “first skew angle” y “second skew angle” tienen un valor de cero puesto que estas losas son cuadradas y no tienen inclinación en ninguno de los bordes. Adicional a esto se define un único elemento de análisis como una losa aislada.

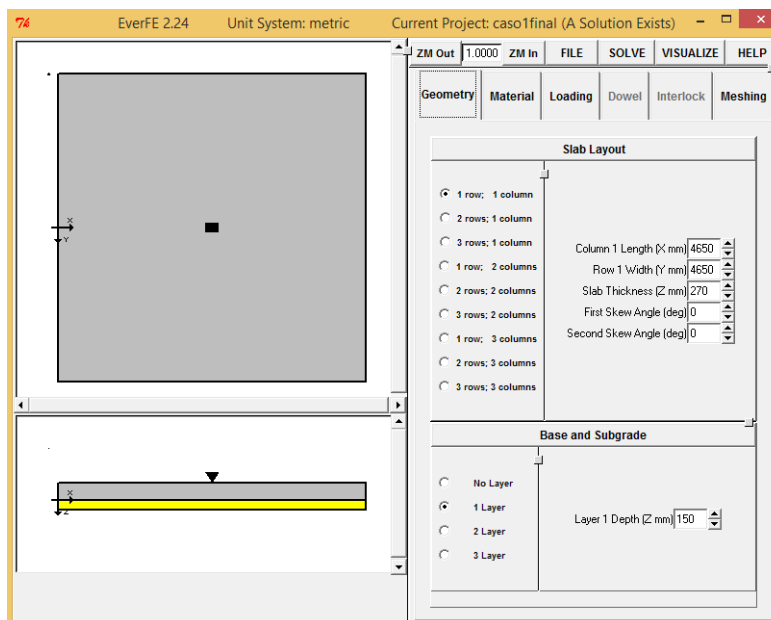


Figura 19: Modelación del elemento.

En la figura 20 se ingresan las características de los materiales, tanto de la losa de pavimento rígido como de la base debajo del mismo.

Las características principales son:

- Módulo elástico del concreto (E)
- Coeficiente de poisson (ν)
- Coeficiente de expansión térmica (α)
- Densidad de la losa (density)

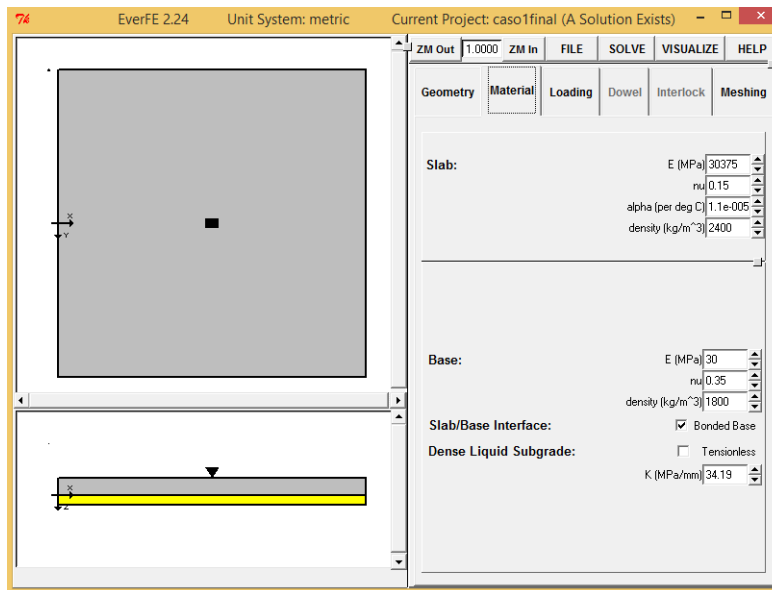


Figura 20: Modelación de materiales.

En la figura 21 se ingresa la carga puntual (Load) a ser aplicada en el paño de pavimento rígido así como también el diferencial de temperatura (temp change) para considerar las tensiones producidas en la losa de pavimento rígido por condiciones ambientales.

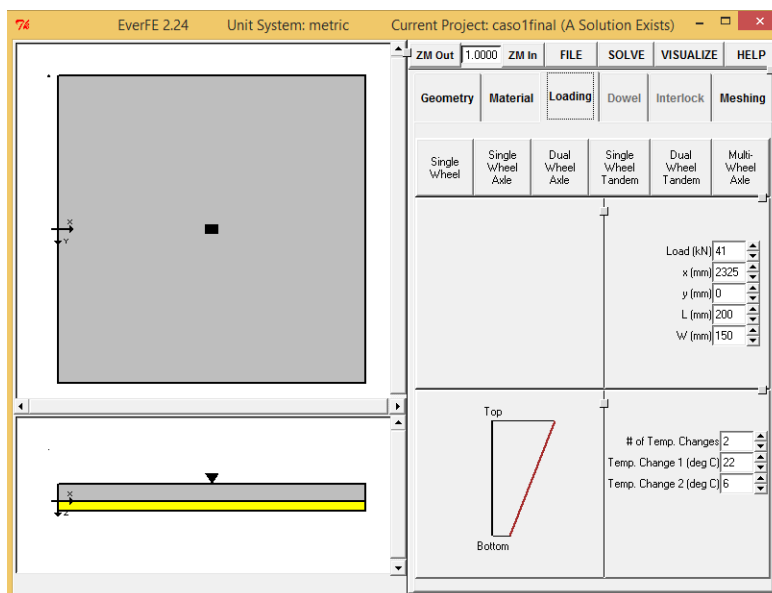


Figura 21: Modelación de cargas.

En la figura 22 se puede apreciar el resultado de los esfuerzos al aplicar una carga puntual en el centro de la losa, en el punto de aplicación de la carga se concentra un esfuerzo considerable de compresión posterior a esto se verifican esfuerzos de tracción los mismos que son repartidos a lo largo de todo el elemento, este resultado es coincidente con el funcionamiento de las losas de pavimento rígido las mismas que reparten el esfuerzo y no se transfiere en gran parte a la subrasante.

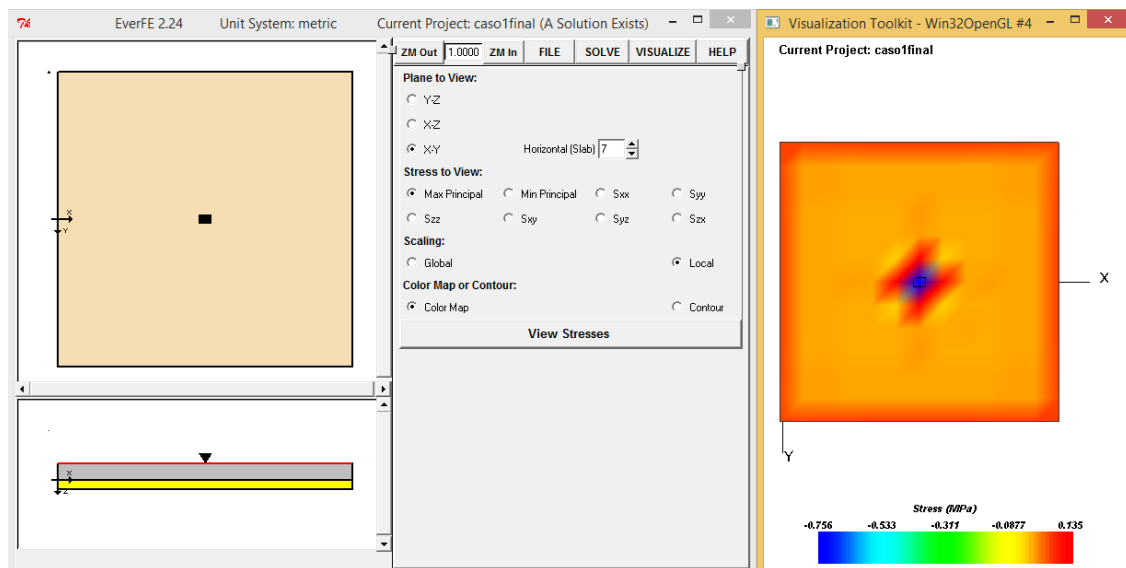


Figura 22: Esfuerzos en la superficie de la losa.

En las figuras en donde se indican los esfuerzos se considerarán los esfuerzos principales absolutos que se darán en cualquier parte de la losa de acuerdo al resultado de la modelación realizada en el programa. EverFe puede exponer otros resultados en diferentes planos de la losa (S_{xx} , S_{yy} , S_{zz} , S_{xy} , S_{yz} , S_{zx}) sin embargo para obtener conclusiones con respecto a la acción de las cargas y la geometría de la losa se considerarán los esfuerzos principales máximos y mínimos.

En la figura 23 se pueden apreciar esfuerzos tanto de compresión como de tracción, los esfuerzos de tracción van aumentando en magnitud con un comportamiento singular puntual alrededor del punto de aplicación de la carga, los esfuerzos de compresión van disminuyendo.

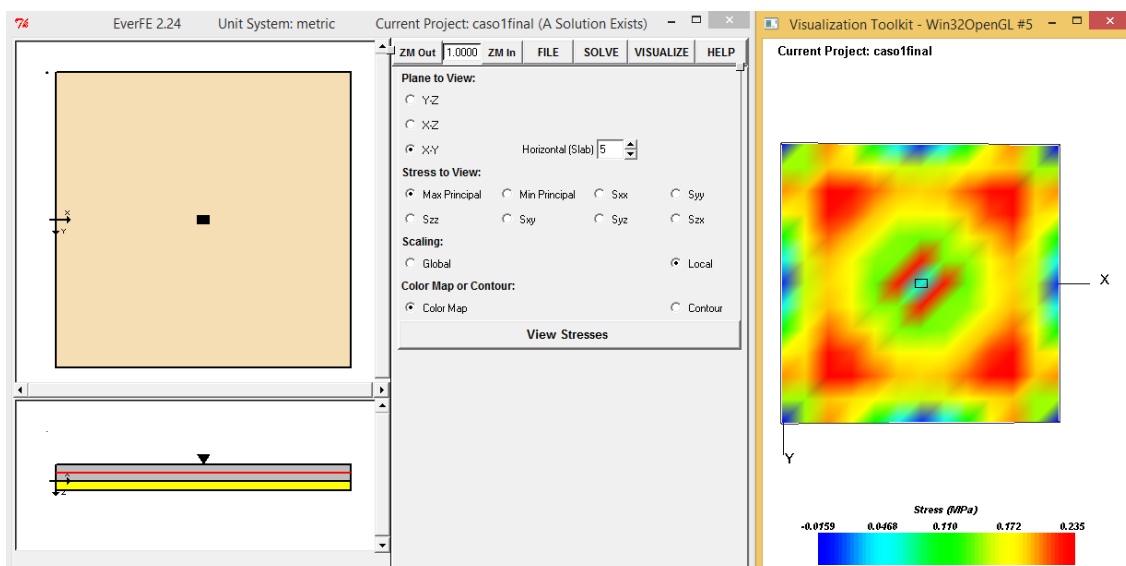


Figura 23: Esfuerzos en el interior de la losa.

En la figura 24 se aprecia un esfuerzo crítico en la base de la losa (subrasante) producido en el lugar de aplicación de la carga, solo se producen esfuerzos de tracción los mismos que

se han incrementado en magnitud y se dispersan acorde se alejan del punto de aplicación. La repartición de esfuerzos es más homogénea.

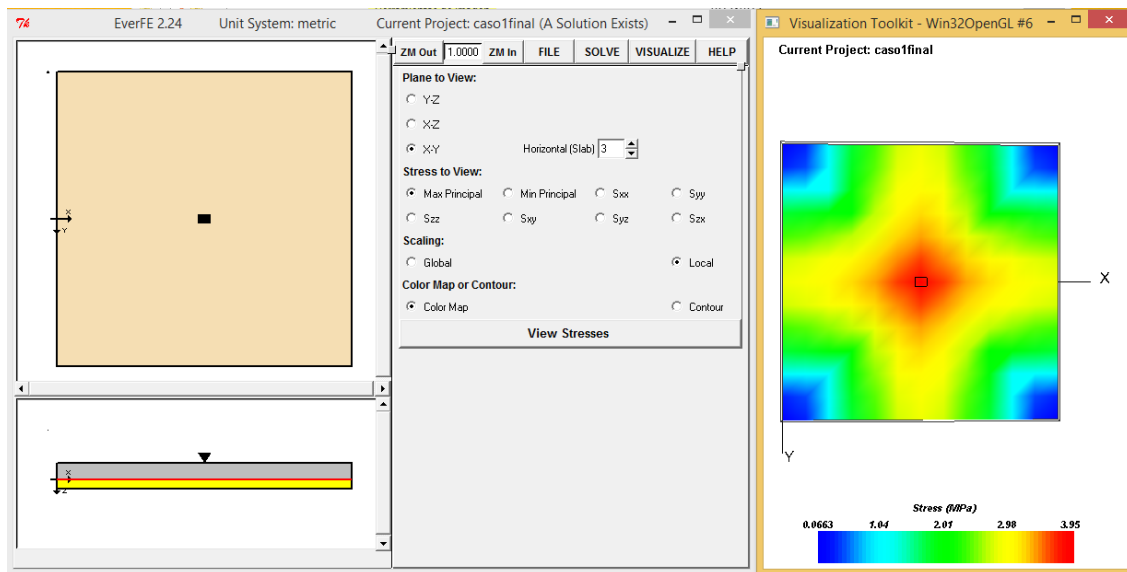


Figura 24: Esfuerzos en la base de la losa.

En la figura 25 se puede ver la deformación de la losa producida principalmente por los esfuerzos de alabeo los mismos que son superiores a los esfuerzos debidos a la carga aplicada (cuadro 9).

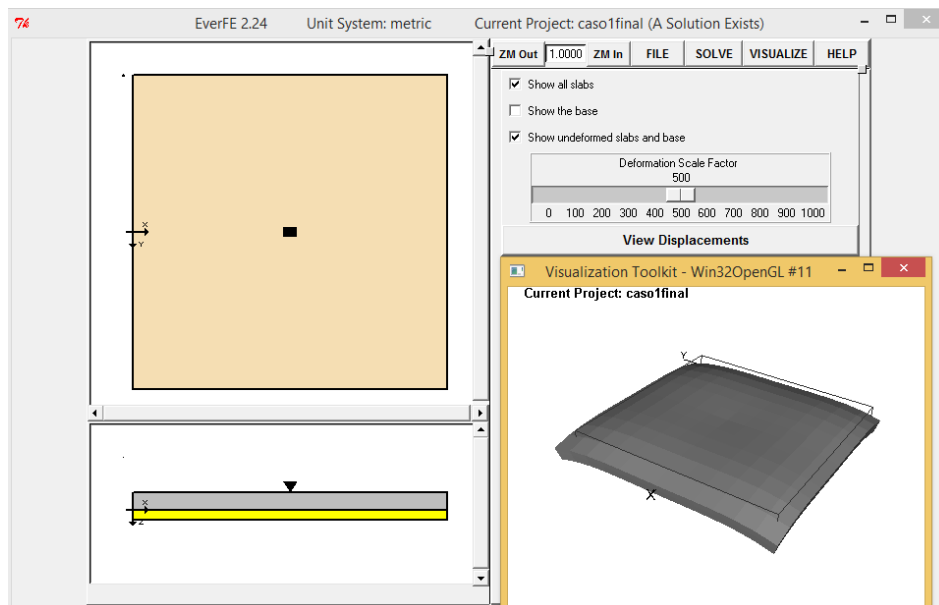


Figura 25: Deformación de la losa.

En la figura 26 se resaltan los valores de los esfuerzos y deformaciones máximas producidas en la losa de pavimento rígido. Con la finalidad de entender el comportamiento de diferentes losas se analizarán diversos elementos que tendrán anchos variables con el fin de simular el comportamiento en cada una de las losas de la cuña del sobreancho.

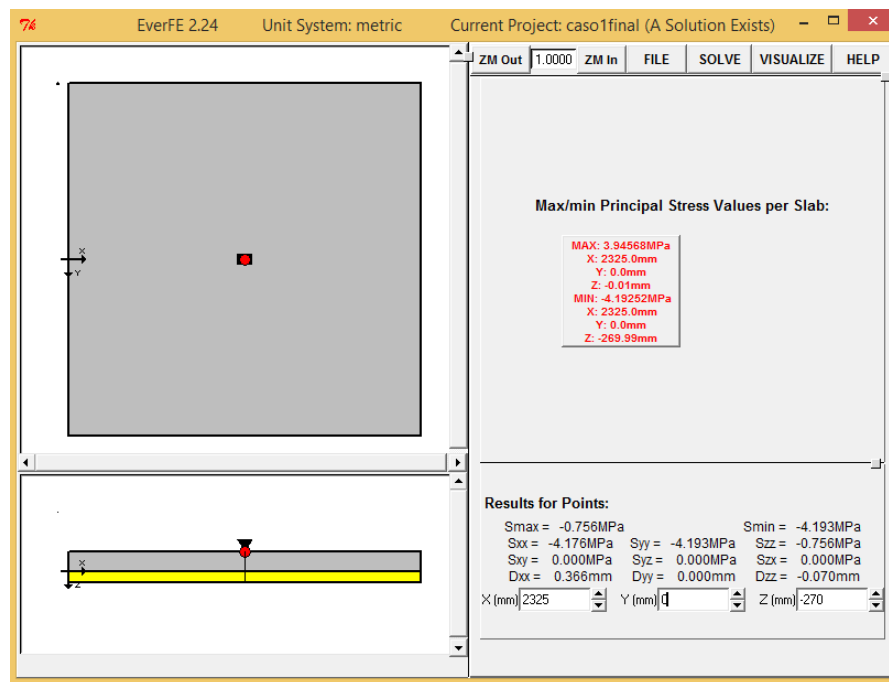


Figura 26: Esfuerzos Máximos Absolutos.

REPETICIONES ADMISIBLES

Para determinar el número de repeticiones admisibles se utilizará el método de diseño AASHTO, se utilizará el programa AASHTO 93, la base teórica y el método de diseño se describe en detalle en [22]. Los datos a ser ingresados en el programa se visualizan en la figura 27 en donde está la interfaz del programa.



The screenshot shows the Ecuación AASHTO 93 interface with the following input parameters:

Tipo de Pavimento: ☒ Pavimento flexible ☐ Pavimento rígido

Confianza (R) y Desviación estándar (So): 90 % Zr=-1.282, So = 0.35

Serviciabilidad inicial y final: PSI inicial = 4.5, PSI final = 2.5

Módulo de reacción de la subrasante: k = 4958.84 pci

Información adicional para pavimentos rígidos:

Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi)	4405529.25	Coefficiente de transmisión de carga - (J)	3.8
Módulo de rotura del concreto - Sc (psi)	652.671	Coefficiente de drenaje - (Cd)	1

Tipo de Análisis: ☐ Calcular D, ☒ Calcular W18

Ejes de 18 kips: W18 = 57435250

Buttons: Calcular, Salir

Figura 27: Número de Repeticiones Admisibles.

En la figura 27 dentro de la interfaz del programa AASHTO93 se especifica el tipo de pavimento, se ingresa un valor de confiabilidad, de acuerdo a [22] para carreteras interestatales y autopistas se utiliza un valor entre 80 % y 99.9 % en este caso se aplicará un nivel de confiabilidad del 90 % con una desviación estándar $S_0 = 0,35$, el índice de serviciabilidad se ha considerado entre $P_0 = 4,5$ y $P_t = 2,5$, con un módulo de reacción de la subrasante $k = 34,19$ MPa equivalente a 4958.85 psi teniendo en cuenta el módulo de balasto, el módulo de elasticidad del concreto $E_c = 4405529,25$ en psi, el módulo de rotura $M_r = 652,67$ psi, se considera un coeficiente de drenaje $Cd = 1$, el coeficiente de transmisión de cargas de acuerdo a [22] en una estructura de pavimento rígido sin bermas que no tiene un refuerzo o su refuerzo es con juntas su valor oscila entre 3.6 y 4.2 por lo tanto se aplicará un coeficiente $J = 3,8$, de igual forma se ingresa el valor del espesor de la losa de pavimento rígido de $D = 10,63$ pulg. (27cm), todos estos datos con el fin de determinar el número de repeticiones admisibles en este caso $W18 = 57'435,250$ ejes equivalentes.

ANÁLISIS DE FATIGA Y EROSIÓN

Para determinar el esfuerzo de carga y erosión se utilizará el método de diseño de la Portland Cement Association (PCA) , se utilizará el programa BS-PCA, la base teórica y el método de diseño se describe en detalle en [23].

En la figura 28 se puede apreciar la interfaz el programa BS-PCA, en la misma se ingresan los datos a ser analizados, en este caso la respuesta k de la subrasante en MPa/m, el espesor de la losa e en cm., el módulo de rotura de la losa M_r en MPa, se especifica el tipo de carga del tránsito en KN, se ingresa un factor de seguridad de carga que para casos de estudio se considerará 1.2. Se utilizará la misma composición de cargas para todos los casos de análisis posteriormente.

Una vez realizados los cálculos correspondientes se determina que en una losa de dimensiones 4.65 x 4.65 m, el porcentaje de consumo de esfuerzos es 0 y el porcentaje de consumo de erosión es 10.35, valor que al ser menor que el 100 % cumple con las exigencias del tránsito, de hecho se podría considerar que para el tren de cargas utilizado la losa está sobredimensionada.

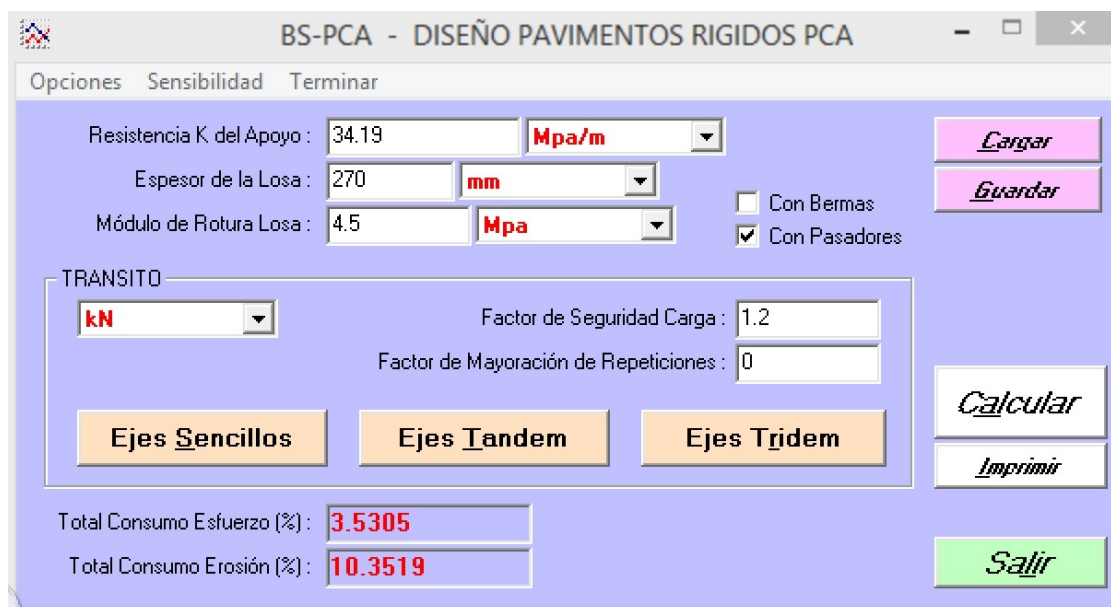


Figura 28: Porcentaje de Consumo Esfuerzos.

El tren de cargas que se utiliza para este caso y todos los posteriores se puede verificar en el cuadro 10

Esfuerzo Equivalente	1.2265	Esfuerzo Equivalente	1.1897	Esfuerzo Equivalente	0.9065
Factor de Esfuerzo	0.2726	Factor de Esfuerzo	0.2644	Factor de Esfuerzo	0.2014
Factor de Erosion	2.4487	Factor de Erosion	2.6761	Factor de Erosion	2.8549
Transito Ejes Simple		Transito Ejes Dobles		Transito Ejes Tridem	
Carga Eje (KN)	Repeticiones Esperadas	Carga Eje (KN)	Repeticiones Esperadas	Carga Eje (KN)	Repeticiones Esperadas
133	6310	231	10000	0	0
125	14690	213	42870	0	0
115	30130	195	124900	0	0
107	64380	178	372900	0	0
98	106900	160	300000	0	0
89	235700	142	300000	0	0
80	307200	125	300000	0	0

Cuadro 10: tren de cargas.

Es importante notar que este tren de cargas hace que el diseño del pavimento rígido utilizado en la vía Zhud-Cochancay-El Triunfo para una sección de paño de 4,65x4,65 m. no sobrepase porcentajes de fatiga y erosión del 100 %.

3.2.2. Sección de sobreancho 4,65x1,00 m

Dentro de la curva de estudio el sobreancho mayor es de un metro en su sección máxima reduciendo progresivamente el ancho hasta llegar a cero.

De los análisis realizados empleando el mismo procedimiento anteriormente descrito se tienen los siguientes resultados:

Corrección de la subrasante:

$$k_s = 15,85 \quad MPa \quad (35)$$

Análisis Tensional

Tipos de Esfuerzos	Esfuerzos Obtenidos (kg/cm ²)		
	Esquina	Borde	Interior
Alabeo	8.59	27.89	28.54
Carga	14.72	11.73	7.75
Fricción	0.837	0.837	0.837
Totales	24.15	40.46	37.13

Cuadro 11: Resumen de esfuerzos losa 4.65x1.00.

Análisis por elementos finitos

Sección	Superficie		Interior		Base	
	Trac	Comp	Trac	Comp	Trac	Comp
4,65x1,00	0.242	0.997	0.232	0.004	3.63	0.006

Cuadro 12: Resumen de tensiones losa 4,65x1,00.

Esfuerzos Máximos

Esfuerzos Máximos Principales Absolutos		
Sección	Máximo	Mínimo
4,65x1,00	3.63	4.02

Cuadro 13: Resumen esfuerzos máximos .

Número de repeticiones admisibles

$$N = 27'925,011 \quad (36)$$

Porcentajes de consumo por esfuerzos

Sección	ks	% Consumo Esfuerzo	% Consumo Erosión
4,65 x 1,00	15.85	74.28	22.19

Cuadro 14: Porcentajes de consumo losa 4,65x1,00.

3.2.3. Sección de sobreancho 4,65x0,50 m

De los análisis realizados se sintetizan los siguientes resultados:

Corrección de la subrasante:

$$k_s = 11,21 \quad MPa \quad (37)$$

Análisis Tensional

Tipos de Esfuerzos	Esfuerzos Obtenidos (kg/cm ²)		
	Esquina	Borde	Interior
Alabeo	8.23	25.76	26.35
Carga	14.93	12.21	8.02
Fricción	0.837	0.837	0.837
Totales	24.00	38.81	35.20

Cuadro 15: Resumen de esfuerzos losa 4.65x0.50.

Análisis por elementos finitos

Sección	Superficie		Interior		Base	
	Trac	Comp	Trac	Comp	Trac	Comp
4,65x1,00	0.21	0.70	0.248	0.008	4.22	0.03

Cuadro 16: Resumen de esfuerzos losa 4,65x0,50.

Esfuerzos Máximos

Esfuerzos Máximos Principales Absolutos		
Sección	Máximo	Mínimo
4,65x1,00	4.22	4.55

Cuadro 17: Resumen esfuerzos máximos .

Número de repeticiones admisibles

$$N = 21'846,405 \quad (38)$$

Porcentajes de consumo por esfuerzos

Sección	ks	% Consumo Esfuerzo	% Consumo Erosión
4,65 x 1,00	11.21	308.90	31.85

Cuadro 18: Porcentajes de consumo losa 4,65x0,50.

3.2.4. Sección de sobreancho 4,65x0,25 m

De los análisis realizados se sintetizan los siguientes resultados:

Corrección de la subrasante:

$$k_s = 7,93 \quad MPa \quad (39)$$

Análisis Tensional

Tipos de Esfuerzos	Esfuerzos Obtenidos (kg/cm ²)		
	Esquina	Borde	Interior
Alabeo	7.88	23.27	23.81
Carga	15.12	12.70	8.28
Fricción	0.837	0.837	0.837
Totales	23.84	36.81	32.93

Cuadro 19: Resumen de esfuerzos losa 4.65x0.25.

Análisis por elementos finitos

Sección	Superficie		Interior		Base	
	Trac	Comp	Trac	Comp	Trac	Comp
4,65x1,00	0.188	0.416	0.459	0.007	5.61	0.012

Cuadro 20: Resumen de esfuerzos losa 4,65x0,25.

Esfuerzos Máximos

Esfuerzos Máximos Principales Absolutos		
Sección	Máximo	Mínimo
4,65x1,00	5.61	5.88

Cuadro 21: Resumen esfuerzos máximos

Número de repeticiones admisibles

$$N = 17'699,640 \quad (40)$$

Porcentajes de consumo por esfuerzos

Sección	ks	% Consumo Esfuerzo	% Consumo Erosión
4,65 x 1,00	11.21	1000	46.18

Cuadro 22: Porcentajes de consumo losa 4,65x0,25.

3.2.5. Sección de sobreancho 4,65x0,10 m

De los análisis realizados se sintetizan los siguientes resultados:

Corrección de la subrasante:

$$k_s = 5,01 \quad MPa \quad (41)$$

Análisis Tensional

Tipos de Esfuerzos	Esfuerzos Obtenidos (kg/cm ²)		
	Esquina	Borde	Interior
Alabeo	7.44	19.64	20.09
Carga	15.34	13.34	8.64
Fricción	0.837	0.837	0.837
Totales	24.91	20.89	22.42

Cuadro 23: Resumen de esfuerzos losa 4.65x0.10.

Análisis por elementos finitos

Sección	Superficie		Interior		Base	
	Trac	Comp	Trac	Comp	Trac	Comp
4,65x1,00	1.18	0.03	1.10	0.019	10.3	0.003

Cuadro 24: Resumen de esfuerzos losa 4,65x0,10.

Esfuerzos Máximos

Esfuerzos Máximos Principales Absolutos		
Sección	Máximo	Mínimo
4,65x1,00	10.32	11.33

Cuadro 25: Resumen esfuerzos máximos .

Número de repeticiones admisibles

$$N = 13'970,816 \quad (42)$$

Porcentajes de consumo por esfuerzos

Sección	ks	% Consumo Esfuerzo	% Consumo Erosión
4,65 x 1,00	11.21	1000	76.94

Cuadro 26: Porcentajes de consumo losa 4,65x0,10.

3.2.6. Comparación de resultados

Del análisis tensional de cada una de las secciones del sobreancho realizadas anteriormente se pueden obtener varios criterios importantes que definirán el comportamiento de una cuña de sobreancho.

El análisis por medio del método de elementos finitos proporciona los estados tensionales expuestos en el cuadro 27, estos esfuerzos corresponden a la superficie de la losa de pavimento rígido. Como se puede ver existen esfuerzos negativos y positivos (compresión y tracción), los esfuerzos de compresión sufren un aumento entre una losa de dimensiones normales y una losa de sobreancho máximo posiblemente a que los esfuerzos de alabeo aun son considerables como para influir en un incremento entre esfuerzos de alabeo y carga, sin embargo a medida que la losa reduce de dimensión estos esfuerzos disminuyen dado que los esfuerzos de alabeo van disminuyendo a medida que la sección es menor, no así los esfuerzos de tracción que presentan un comportamiento lineal con excepción de la losa de ancho mínimo en donde estos esfuerzos se incrementan considerablemente, dado que esta sección es demasiado esbelta los resultados pueden demostrar una falla inmediata del elemento. Esta comparación puede observarse en la figura 29.

Esfuerzos en la superficie (MPa)		
Dimensión	Tracción	compresión
4,65x4,65	0.135	0.756
4,65x1,00	0.242	0.997
4,65x0,50	0.210	0.696
4,65x0,25	0.188	0.416
4,65x0,10	1.180	0.038

Cuadro 27: Comparación Análisis Tensional: Superficie de la losa.

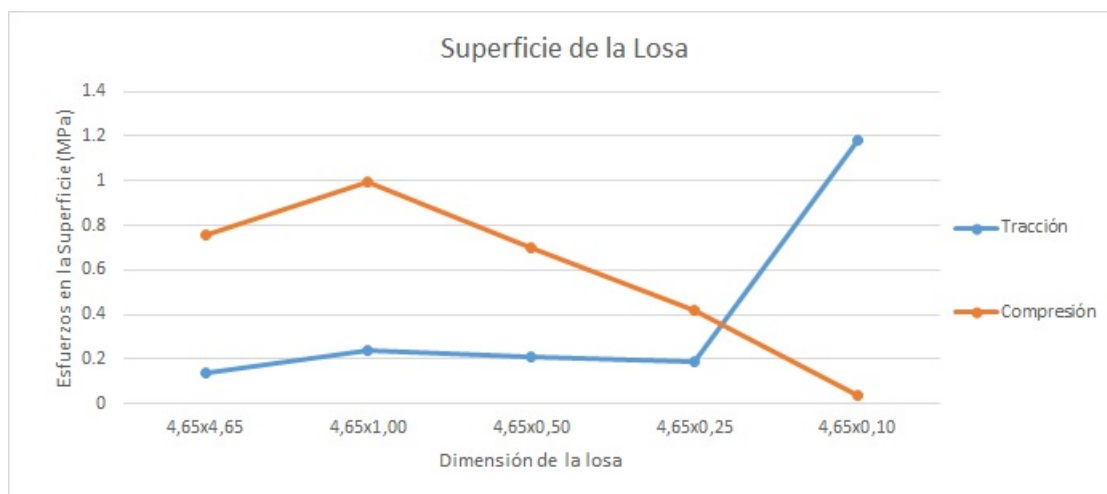


Figura 29: Comparación de esfuerzos en la superficie de la losa.

Del análisis tensional en el interior de la losa (cuadro 28) se observa que los esfuerzos de tracción aumentan gradualmente entre las losas de diferente tamaño. Una vez más la losa de ancho mínimo presenta un comportamiento bastante peculiar en donde los esfuerzos por tracción suben drásticamente no así los esfuerzos de compresión que se mantienen constantes y casi nulos, la variabilidad de este esfuerzo no es considerable. Comportamiento mostrado en la figura 30.

Esfuerzos en el Interior		
Dimensión	Tracción	compresión
4,65x4,65	0.235	0.016
4,65x1,00	0.232	0.004
4,65x0,50	0.284	0.009
4,65x0,25	0.459	0.008
4,65x0,10	1.1	0.0192

Cuadro 28: Comparación Análisis Tensional: Interior de la losa.

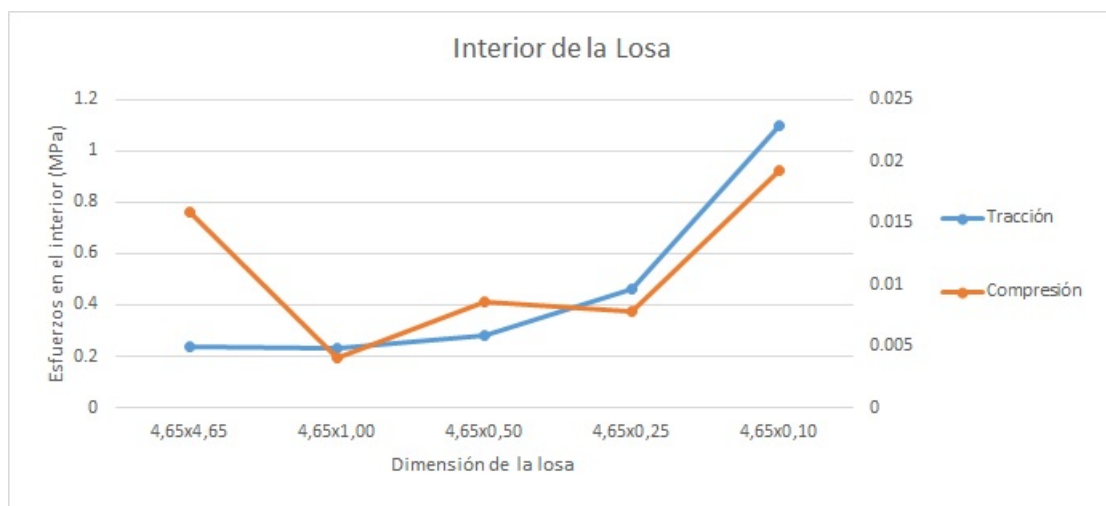


Figura 30: Comparación de esfuerzos en el interior de la losa.

Realizando la comparación de los esfuerzos en la base de la losa (cuadro 29) se puede encontrar un comportamiento similar al interior de la losa con unos esfuerzos por tracción ascendentes presentando un pico en la sección más esbelta y con esfuerzos de compresión prácticamente nulos cuya variabilidad se encuentra nuevamente en rangos pequeños que no son considerables. Este comportamiento puede verse en la figura 31.

Esfuerzos en la base		
Dimensión	Tracción	Compresión
4,65x4,65	3.95	0.066
4,65x1,00	3.63	0.006
4,65x0,50	4.22	0.030
4,65x0,25	5.61	0.012
4,65x0,10	10.3	0.003

Cuadro 29: Comparación Análisis Tensional: Base de la losa.

Se puede observar claramente que los esfuerzos de tracción aumentan en el caso de que el ancho de la losa de pavimento rígido reduce su sección, en el caso de la base y del interior, en el caso de la superficie, los esfuerzos de tracción se mantienen constantes y bajos hasta que por la sección misma de la losa este valor aumenta en gran medida y los valores de compresión parten de valores considerables y se reducen a medida que el elemento reduce en su ancho. Mientras es menor el ancho del elemento el estado tensional disminuye cuando se tienen esfuerzos por

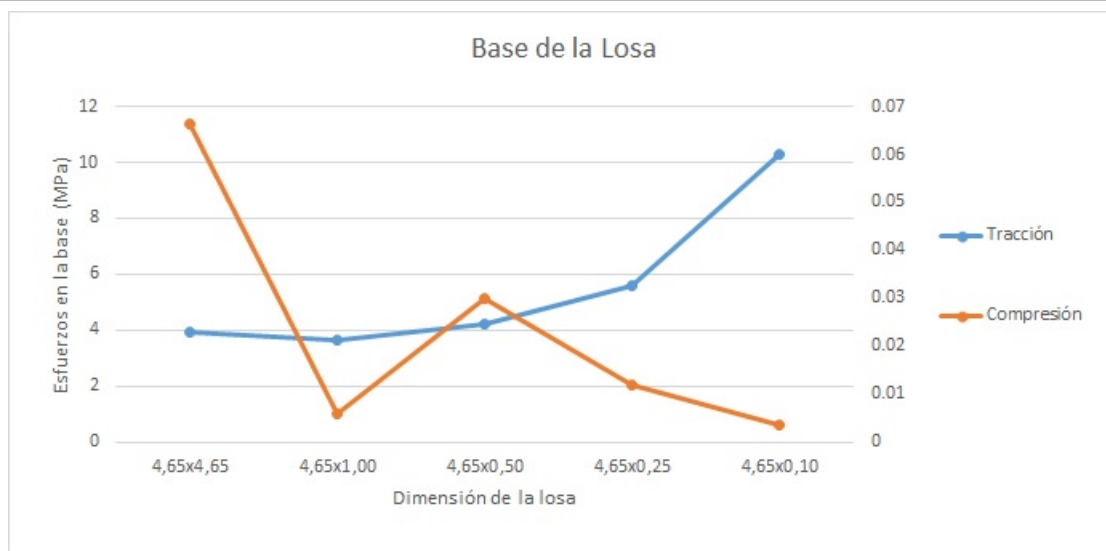


Figura 31: Comparación de esfuerzos en la base de la losa.

alabeo, mientras que en la misma situación los esfuerzos por cargas aumentan. Estos resultados evaluados con el método de elementos finitos serán comparados con los valores analíticos, sin embargo de acuerdo a [24] las comparaciones no entre los dos métodos no pueden ser directas puesto que los esfuerzos obtenidos en el programa EverFe para ser convertidos y comparados se hace uso de una ecuación de un modelo lineal de tensión tridimensional que incluye el efecto de el coeficiente de Poisson, en la investigación citada [24] se realiza la validación de los resultados del programa comparándolas con mediciones en losas construidas y que tienen sensores, las comparaciones entre los resultados analíticos y la modelación por elementos finitos se la realiza considerando efectos individuales (tráfico, temperatura, fricción) y no de forma global como es el procedimiento en la presente investigación, en la que, los resultados obtenidos servirán para obtener conclusiones con respecto al comportamiento de los esfuerzos ante la disminución de las secciones de la losa.

Considerando los resultados analíticos (cuadro 30) se observa que los esfuerzos en el interior, borde y en la esquina de la losa presentan una tendencia descendente, si es que se realiza un análisis por separado entre los esfuerzos por alabeo y por el efecto de las cargas de tráfico se validarán los conceptos utilizados en la presente investigación y que se ha estudiado en otros artículos científicos en la que los efectos producidos en las losas más esbeltas por efecto de la temperatura son menores a medida que se reduce la sección, mientras que los esfuerzos por carga son ascendentes. EL resultado de la sumatoria de los esfuerzos de alabeo, cargas y fricción se puede observar en las figuras 32 - 34.

DIMENSIÓN	INTERIOR	BORDE	ESQUINA
4,65x4,65	50.25	53.36	26.92
4,65x1,00	37.99	42.02	26.06
4,65x0,50	33.06	36.01	25.69
4,65x0,25	28.97	29.65	25.34
4,65x0,10	22.42	20.89	24.91

Cuadro 30: Comparación Análisis Analítico Tensional.

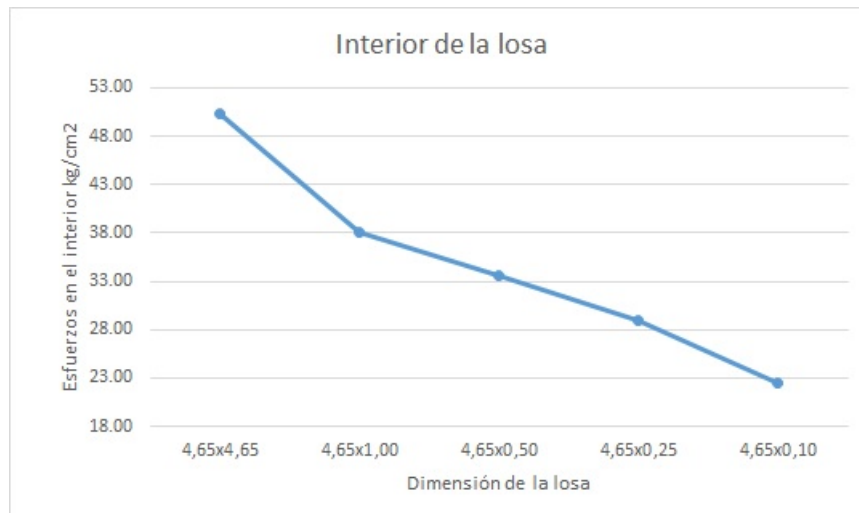


Figura 32: Comparación de esfuerzos en el interior de la losa.

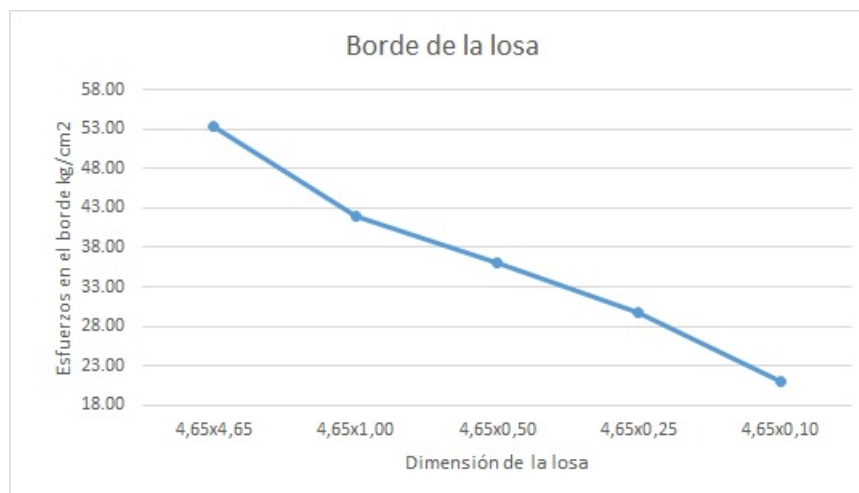


Figura 33: Comparación de esfuerzos en el borde de la losa.

Una vez realizado el análisis tensional de las losas de pavimento rígido, comprobado el comportamiento de las mismas por medio del método de elementos finitos y analíticamente, se procede a realizar las comparaciones de los porcentajes de consumo por esfuerzos y erosión así como también el número de repeticiones admisibles que se dan con las mismas condiciones ambientales y de carga para cada uno de los elementos de pavimento rígido estudiados anteriormente.

En el cuadro 31 se puede observar los porcentajes de consumo por fatiga y erosión en donde a medida que el ancho de las losas de pavimento rígido disminuyen, los porcentajes de consumo por esfuerzo y por erosión aumentan, es importante recalcar que desde la primera disminución en donde el sobreancho es máximo ya hay un porcentaje de consumo mayor al 100 % lo que demostraría que un elemento aislado de pavimento rígido esbelto no soporta los esfuerzos producidos de la misma manera que un paño de pavimento rígido de dimensiones normales (losa cuadrada) y que obviamente la vida útil del elemento será menor a medida que se reduce su tamaño. Gráficamente este comportamiento se puede verificar en la figura 35.



Figura 34: Comparación de esfuerzos en la esquina de la losa.

Dimensiones	% Consumo Esfuerzo	% Consumo Erosión
4.65 x 4.65	3.53	10.35
4.65 x 1.00	74.29	22.19
4.65 x 0.50	308.9	31.85
4.65 x 0.25	1000.00	46.19
4.65 x 0.10	1000.00	76.94

Cuadro 31: Resultados de consumo por el método PCA.

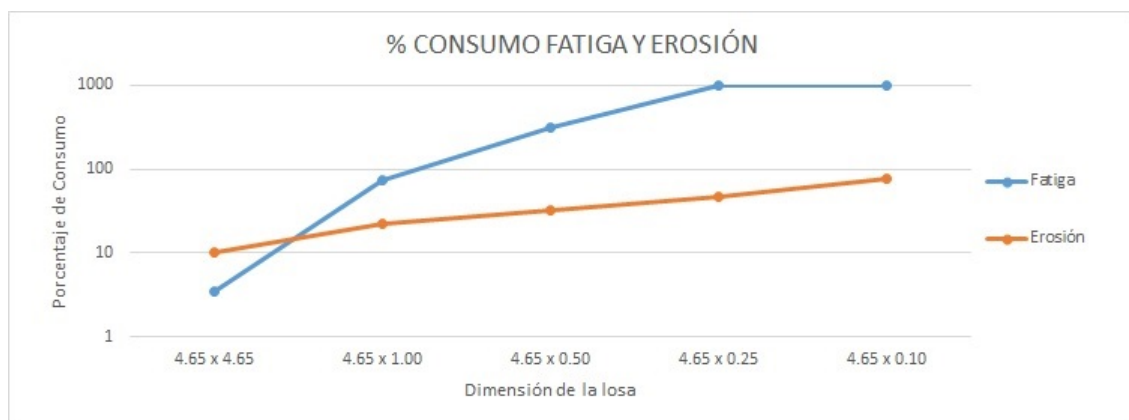


Figura 35: Comparación de porcentajes de consumo PCA.

Se debe especificar que los valores en la figura 35 se encuentran en escala logarítmica por la diferencia entre los consumos por fatiga y por erosión.

Los esfuerzos producidos por la misma carga puntual y por la misma variabilidad en la temperatura se ven incrementados de acuerdo al tamaño de la losa. A mayores esfuerzos producidos

menor vida útil de la estructura en estudio, estos resultados pueden verificarse en el cuadro 27, en el cual el número de repeticiones admisibles disminuye a medida que la sección se reduce esto es coincidente con el aumento de esfuerzos en las mismas condiciones, un aumento en el consumo de esfuerzos implica repeticiones menores y una vida útil también menor.



Figura 36: Número de repeticiones admisibles según sección .

Se puede concluir entonces que no se podría utilizar el mismo diseño de losa cuadrada de dimensiones de 4,65x4,65 para la construcción del sobreancho, posteriormente se analizarán alternativas de acuerdo a los resultados de los posteriores análisis.

3.3. CASO 2: Sobreancho dentro de cuneta

En algunas vías construidas en el país se puede verificar que el sobreancho se ha construido de tal forma que el mismo quede dentro de la cuneta, la cual tiene una resistencia mucho menor (210 kg/cm^2) que el hormigón utilizado en las losas de calzada en donde la resistencia del hormigón hidráulico es de 420 kg/cm^2 , es decir el sobreancho necesario en esa sección y la cuneta formarán una estructura monolítica (figura 37). Generalmente, y con el fin de mantener la relación de esbeltez, las cunetas se dividen en tres secciones puesto que el ancho promedio de las mismas es de 1 metro en tangentes (figura 38), las juntas en las cunetas también son coincidentes con las juntas transversales de la calzada, en conclusión las cunetas generalmente pueden considerarse como losas de hormigón casi cuadradas.

Los ejemplos mostrados corresponden a dos curvas construidas en la vía Zhud-Cochancay-El Triunfo, en donde la calzada está compuesta por paños de pavimento rígido de dimensiones: 4,65x4,65 m. Las juntas transversales en las cunetas son coincidentes con las juntas de la calzada, sin embargo, éstas están divididas en 3 secciones en donde: $4,65/3 = 1,55 \text{ m}$ de longitud



Figura 37: Disposición de juntas transversales en tangentes.

entre juntas.

Una vez definida la sección de estudio se procede a verificar la respuesta de la subrasante, el análisis tensional del elemento, el porcentaje de consumo por fatiga y erosión así como el número de repeticiones admisibles de la misma manera en la que se ha desarrollado en el caso 1. Se validarán los resultados con un análisis por medio del método de elementos finitos.

3.3.1. Corrección de respuesta de subrasante

Datos de entrada:

B	1.00	m
L	1.55	m
k	30	MPa/m

Obteniendo el factor de forma de la cimentación de acuerdo a (11):

$$I = \frac{m^{1/2}}{T_m} = \frac{\sqrt{\frac{1.55}{1.00}}}{\frac{1.55}{1.00}} = 0,8032$$

Por lo tanto el k_s corregido de acuerdo a (10) es:

$$k_s = 27,46 \quad \text{Mpa}$$



Figura 38: Disposición de juntas transversales en curvas.

Análisis Tensional del Elemento

Los datos a utilizarse para el análisis se especifican en el cuadro 33.

DATOS			
Mr	27.46	kg/cm ³	Módulo de reacción de la subbase
Lx	155	cm	Longitud x
Ly	100	cm	Longitud y
Ec	218883.15	kg/cm ²	Módulo elástico del concreto
Sc	32.43	kg/cm ²	Módulo de ruptura
μ	0.15		Coefficiente de Poisson
Δt	22	$\Delta ^\circ C$	Diferencial de temperatura
α	0.000009	cm/ $\Delta ^\circ C$	Coefficiente de expansión térmica
h	27	cm	Espesor de la losa
f	1.5		Coefficiente de fricción
w	24	kg/m ²	Peso de la losa

Cuadro 32: Datos de entrada para análisis tensional.

■ Tensiones por Alabeo

Radio de rigidez relativa.- De acuerdo a (19):

$$Lr = \sqrt[4]{\frac{EH^3}{12(1-\mu^2)k}} = 60,47 \text{ cm}$$

De esta forma al dividir el largo y el ancho de la losa de estudio para el radio de rigidez relativa se obtiene un valor, el mismo que se compara con la figura 18 para encontrar los coeficientes de bradbury.

$$\begin{aligned} lx/Lr &= 2,56 & C1 &= 0,0595 = Cx \\ ly/Lr &= 1,65 & C2 &= 0,0055 = Cy \end{aligned}$$

Esfuerzos en el borde longitudinal.- De acuerdo a (30):

$$\sigma_{tb} = \frac{CE\alpha\Delta t}{2} = 1,29 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en el interior de la losa.- De acuerdo a (31):

$$\sigma_{ti} = \frac{E\alpha\Delta t}{2} \left[\frac{C_x + uC_y}{1-u^2} \right] = 1,34 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en la esquina de la losa.- De acuerdo a (32):

$$\sigma_e = \frac{E\alpha\Delta t}{3(1-u)} \left[\sqrt{\frac{a}{Lr}} \right] = 6,79 \text{ kg/cm}^2$$

■ Esfuerzos por efectos del tráfico

Para realizar el análisis por efectos del tráfico se utilizará una carga puntual equivalente a un neumático de un camión tipo, esto es una carga de 4100 kg, la presión de inflado del neumático utilizada para todos los casos de estudio es de 14 kg/cm².

- 1) *Carga Aplicada:* $P = 4100 \text{ kg}$.
- 2) *Número de ruedas:* 1
- 3) *Presión de ruedas:* 14 kg/cm²
- 4) *Carga por rueda:* 4100 kg.
- 5) *Area de contacto por rueda:* $(4)/(3) = 292,85 \text{ cm}^2$

Radio de contacto equivalente

De la ecuación 16 se tiene:

$$a = \sqrt[2]{\frac{AT}{\pi}} = 9,66$$

Radio ficticio de la distribución de carga, b

De la ecuación 17 y 18 se tiene:

$$b = \sqrt[2]{1,6a^2 + h^2} - 0,675h \quad \text{si} \quad a < 1,724h$$

$$b = a \quad \text{si} \quad a > 1,724h$$

$$b=11.41$$

Relaciones para obtener coeficientes de Westergard

$$L/b = 5.430$$

$$a/L = 0.156$$

Esfuerzos en el interior de la losa

De acuerdo a la ecuación 20 se tiene:

$$\sigma_t = 0,31625 \frac{P}{H^2} \left(4 \log_{10} \frac{L_r}{b} + 1,0693 \right) = 8,61 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en el borde de la losa

De acuerdo a la ecuación 26 se tiene:

$$\sigma_t = 0,57185 \frac{P}{2H^2} \left(4 \log_{10} \frac{L_r}{b} + 0,3593 \right) = 13,29 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en la esquina de la losa

De acuerdo a la ecuación 24 se tiene:

$$\sigma_e = \frac{3P}{H^2} \left[1 - \left(\frac{1,414a}{L_r} \right)^{1,2} \right] = 15,96 \text{ kg/cm}^2$$

- Esfuerzos por efectos de la fricción

De la ecuación 33 se tiene:

$$\sigma_t = \frac{wfL}{2} = 3,96 \text{ psi} = 0,279 \text{ kg/cm}^2$$

Un resumen de las tensiones obtenidas se encuentra en el cuadro 34.

Tipos de esfuerzos	Esfuerzos obtenidos (kg/cm2)		
	Esquina	Borde	Interior
Alabeo	6.79	1.29	1.34
Carga	15.96	13.29	8.61
Fricción	0.279	0.279	0.279
Totales	23.03	14.86	10.23

Cuadro 33: Resumen de tensiones losa 1.55x1.00.

Análisis de la losa por el método de Elementos Finitos:

En la figura 39 se define la geometría de la sección de la losa de estudio. En este caso se trata de una losa rectangular cuya relación de esbeltez es $L/B = 1,55$, nuevamente sobrepasa el recomendable máximo de 1,4.

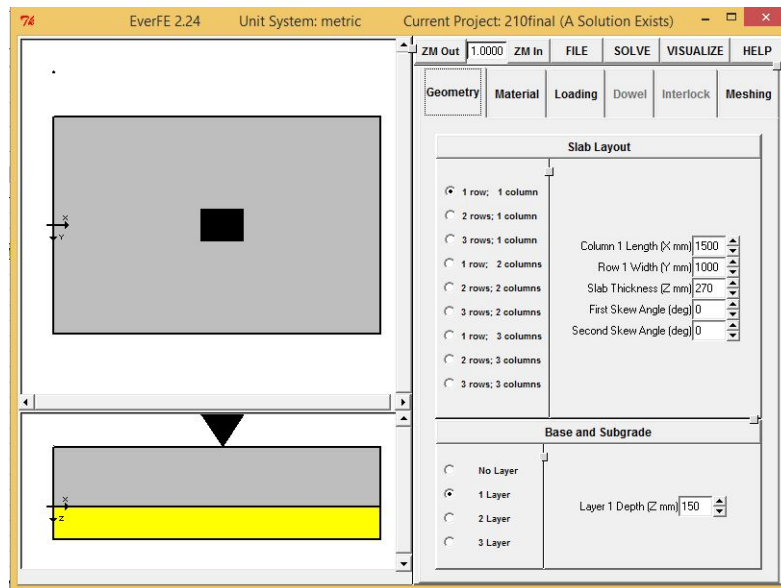


Figura 39: Modelación del elemento.

En la figura 40 se describen las propiedades de los materiales modelados. Está claro que se ingresan las características correspondientes a un hormigón de resistencia a la compresión de $f'_c : 210 \text{ kg/cm}^2$ puesto que las cunetas se han construido de esta manera, la resistencia es mucho menor puesto que la cuneta no es una zona de tránsito.

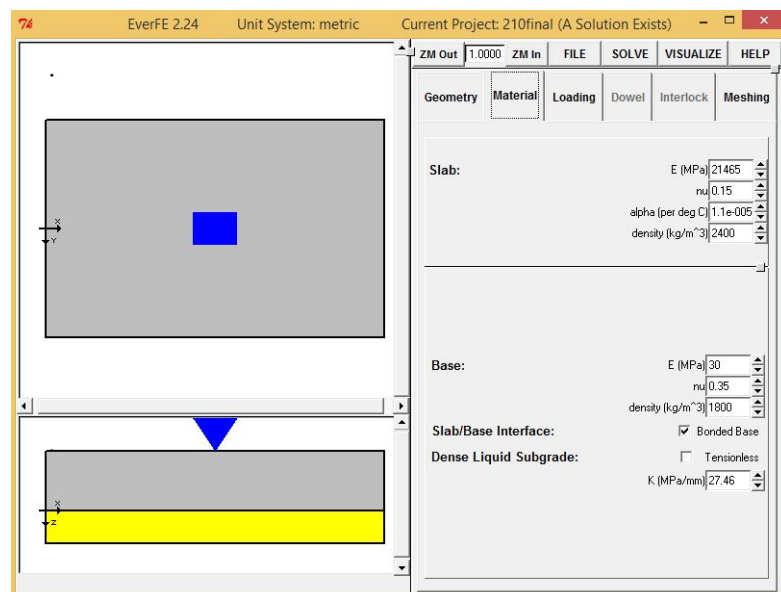


Figura 40: Modelación de materiales.

En la figura 41 se ingresa la carga puntual a ser aplicada en el paño de pavimento rígido así como también el diferencial de temperatura para considerar las tensiones producidas en la losa de pavimento rígido por condiciones ambientales. La carga ingresada es la misma que en los casos anteriores con el fin de establecer las diferencias entre una losa de pavimento rígido de 4,5 MPa y 3,18 MPa.

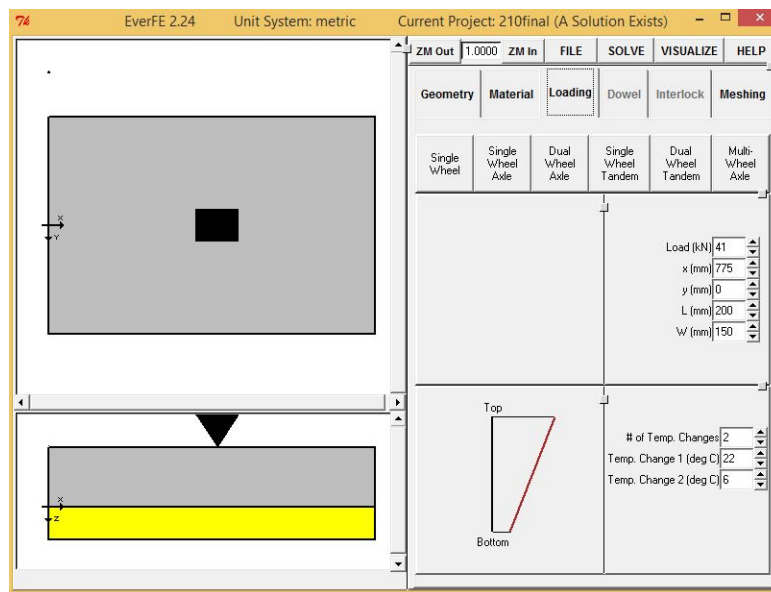


Figura 41: Modelación de cargas.

En la figura 42 se puede apreciar el resultado de los esfuerzos en la superficie de la losa al aplicar una carga puntual en el centro de la losa, en el punto de aplicación de la carga se concentra un esfuerzo considerable de compresión posterior a esto se verifican esfuerzos de tracción los mismos que son repartidos a lo largo de todo el elemento, este esfuerzo es mayor que en el caso anterior, obviamente se debe considerar que el resultado es la suma de todos los esfuerzos por carga, alabeo y fricción. Estos resultados coinciden con los casos anteriores, sin embargo, la magnitud varía en gran parte por la respuesta de la subrasante y también por la resistencia del hormigón utilizado.

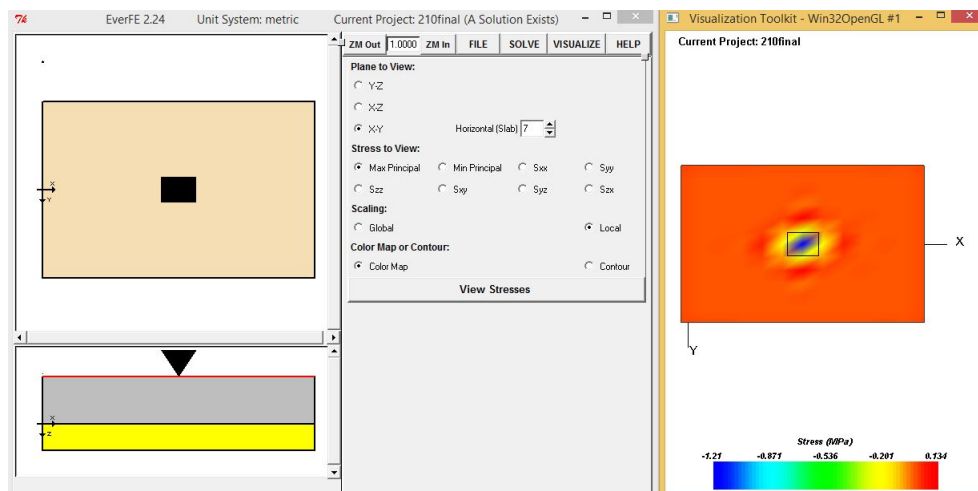


Figura 42: Esfuerzos en la superficie de la losa.

En la figura 43 estableciendo el análisis en el interior de la losa se pueden apreciar esfuerzos máximos concentrados en el centro de la losa en el punto de aplicación, a medida que se realiza el análisis alejándose del punto de aplicación estos esfuerzos se disipan hasta que en los extremos estos esfuerzos se vuelven casi nulos.

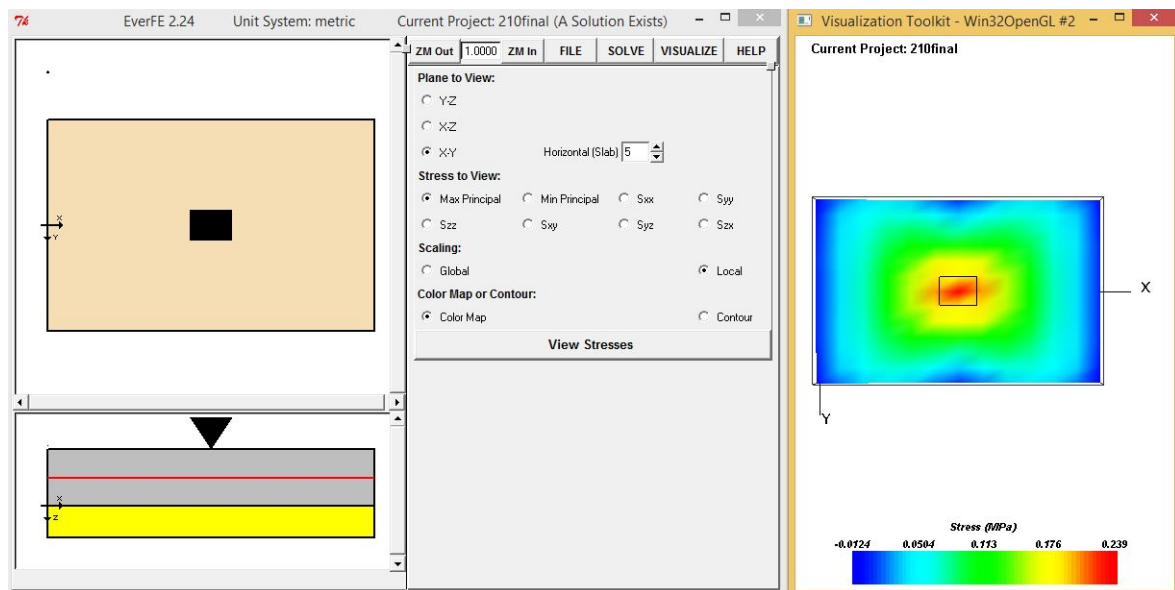


Figura 43: Esfuerzos en el interior de la losa.

En la figura 44, en donde se analizan los esfuerzos en la base de la losa, se aprecia un esfuerzo nulo en los bordes distribuido con respecto al centro de la losa de manera simétrica y los esfuerzos aumentan simétricamente con respecto al centro de la losa en el punto de aplicación.

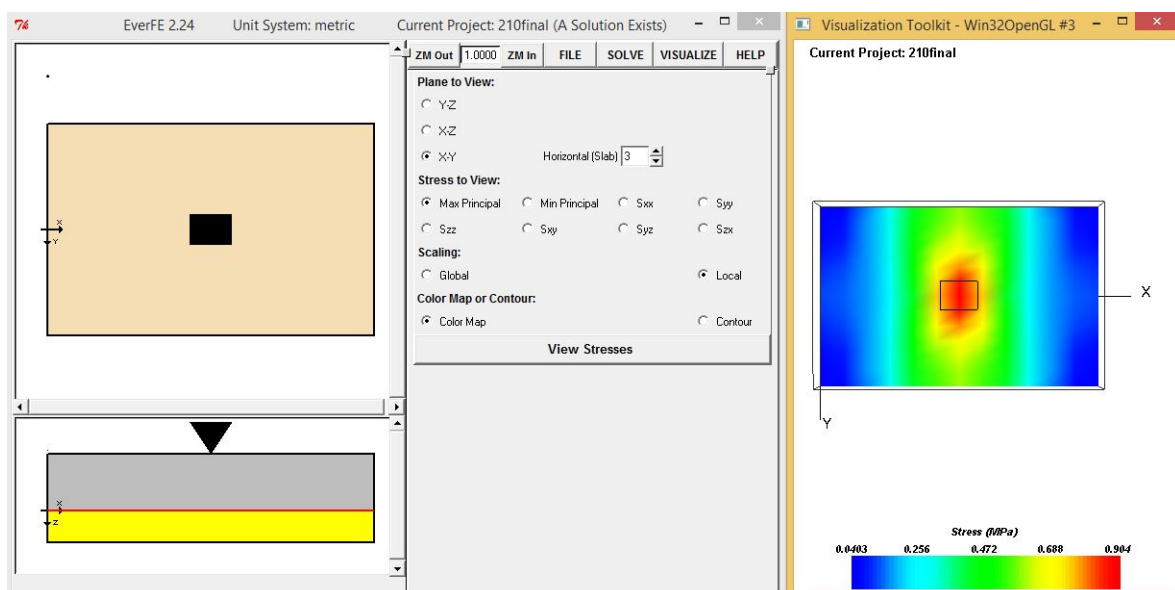


Figura 44: Esfuerzos en la base de la losa.

En la figura 45 se puede observar que la deformación de la losa es producida principalmente por los esfuerzos de alabeo ya que la sección de la misma es considerablemente menor y los esfuerzos por alabeo son menores a los esfuerzos debidos a la carga aplicada (cuadro 34).

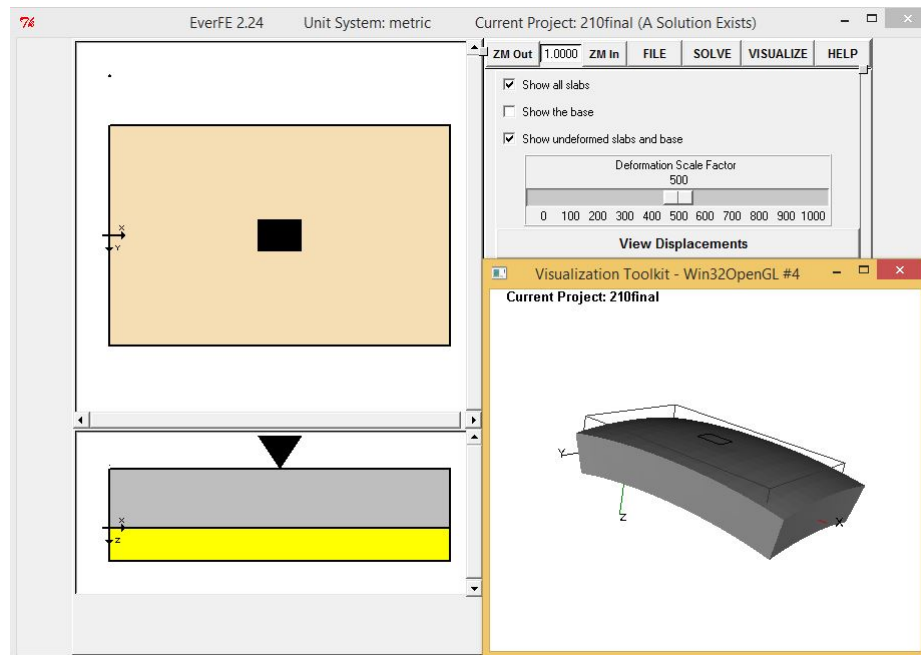


Figura 45: Deformación de la losa.

En la figura 46 se resaltan los valores de los esfuerzos y deformaciones máximas producidas en la losa de pavimento rígido.

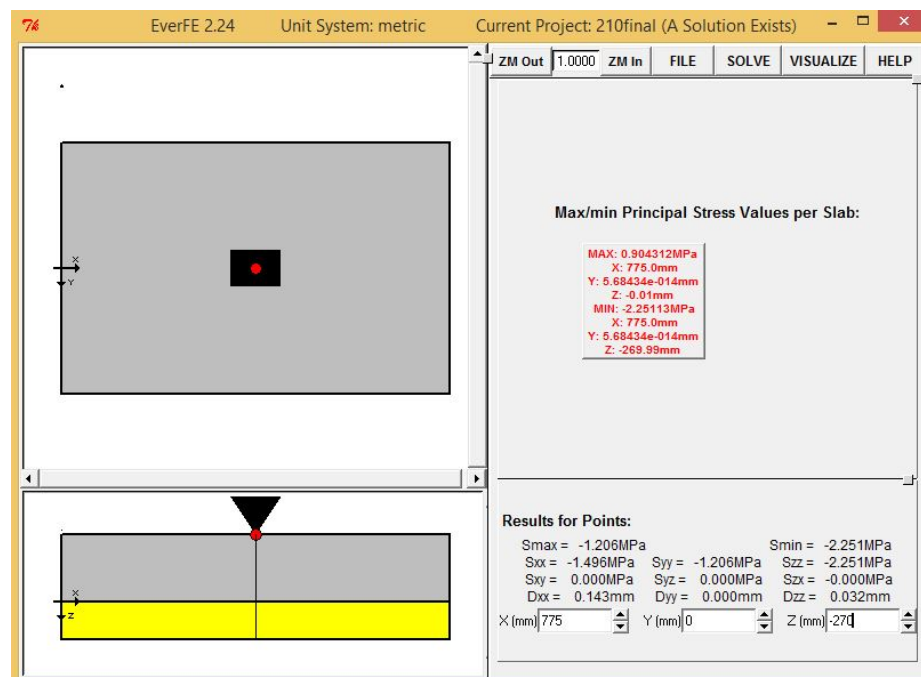


Figura 46: Esfuerzos Máximos .

Repeticiones Admisibles

En la fig. 47 se visualiza la interfaz de la hoja electrónica programada con el fin de obtener el número de repeticiones admisibles considerando las características de el hormigón de resis-

tencia menor con el que son construidas las cunetas. Se realiza una nueva comparación de este resultado con los análisis anteriores y con la modelación de los casos anteriores en las que se analiza el sobreancho como cuña de pavimento rígido.



Figura 47: Número de Repeticiones Admisibles.

De acuerdo a lo expuesto el resultado final son 397875 repeticiones, resultado que es menor al número de ejes equivalentes obtenido con las mismas condiciones en los casos anteriores en donde la losa de pavimento rígido tenía un resistencia superior. Es importante notar el considerable descenso de repeticiones admisibles considerando el hormigón de resistencia $f'c : 210 \text{ kg/cm}^2$.

Fatiga Y Erosión

Se utiliza el programa BS-PCA, cuya interfaz está expuesta en la figura 52, en donde se puede apreciar que las condiciones ingresadas son las correspondientes a la resistencia correspondiente de la corrección de la respuesta de la subrasante y al módulo de rotura del hormigón.

Una vez realizados los cálculos correspondientes se determina que en una losa de dimensiones $1.55 \times 1.00 \text{ m}$, el porcentaje de consumo de fatiga es 1000 y el porcentaje de consumo de erosión es 12.79. Como se puede apreciar la erosión en este caso es menor que la fatiga en parte porque al tener una sección considerablemente rectangular, no esbelta, la respuesta de la subrasante es mejor que la obtenida con una losa esbelta cargada puntualmente con la misma fuerza, sin embargo, el porcentaje de consumo por esfuerzos es muy superior, se valida entonces que la resistencia del hormigón juega un papel importante en la vida útil de las vías indistintamente de la corrección de la respuesta de la subrasante.

3.4. CASO 3: Sobreancho en el eje

En el Ecuador no existe una forma específica de construir el sobreancho en las carreteras, las técnicas más comunes son las estudiadas en los dos casos anteriores, ambos han demostrado ser

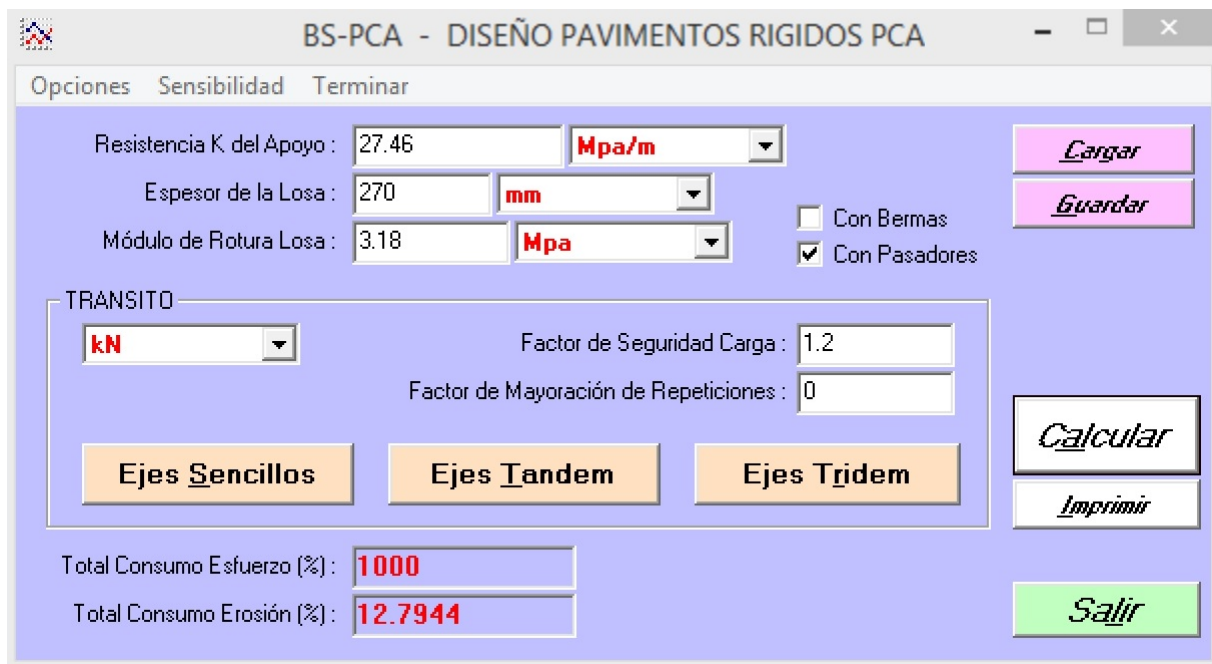


Figura 48: Porcentaje de Consumo Esfuerzos.

ineficientes para soportar las cargas del tránsito y brindar la seguridad que debe tener el diseño de la vía. Un tercer caso se estudiará considerando la construcción del sobreancho en el eje de la vía asumiendo la forma constructiva puesto que no hay un caso práctico de construcción de sobreancho de este tipo en el país. Es conocido que las pavimentadoras pueden modificar el ancho de pavimentación pero durante diferentes etapas de construcción de una vía o diferentes tramos de cierta longitud, mas, nunca en la marcha tal como lo hace la terminadora en el pavimento flexible.

De acuerdo al Insituto Boliviano del Cemento y el Hormigón [10] se puede construir el sobreancho en el eje de la vía, sin embargo, no se especifica en mayor detalle del proceso constructivo.

Para realizar el análisis de este caso se propone la siguiente metodología de trabajo:

- Replanteo con topografía de media calzada en cada curva, considerando la cuña del sobreancho colocada en el eje de la vía. Esto quiere decir que mientras se realiza el levantamiento topográfico y se colocan los puntos de referencia de construcción de cada media vía estos puntos deben indicar en que parte va la calzada y en que parte va el sobreancho.
- Construcción del primer carril de calzada, colocando varillas de anclaje para que exista la repartición de cargas.
- Construcción del segundo carril de manera normal, una vez que el primer carril ha alcanzado la resistencia adecuada para ser cargada por el paso de la pavimentadora, considerando el espacio libre en el eje para la construcción del sobreancho.
- Una vez que se ha alcanzado el 70 % de la resistencia en el hormigón del segundo carril, construir el sobreancho, esto con el fin de que se pueda transitar libremente por el segundo carril con maquinaria menor, herramienta, personal.
- Realizar el corte de las juntas acorde a la calzada. De esta manera se tendrán secciones similares a las obtenidas y estudiadas en el caso de estudio uno, en donde el sobreancho

es una cuña de hormigón.

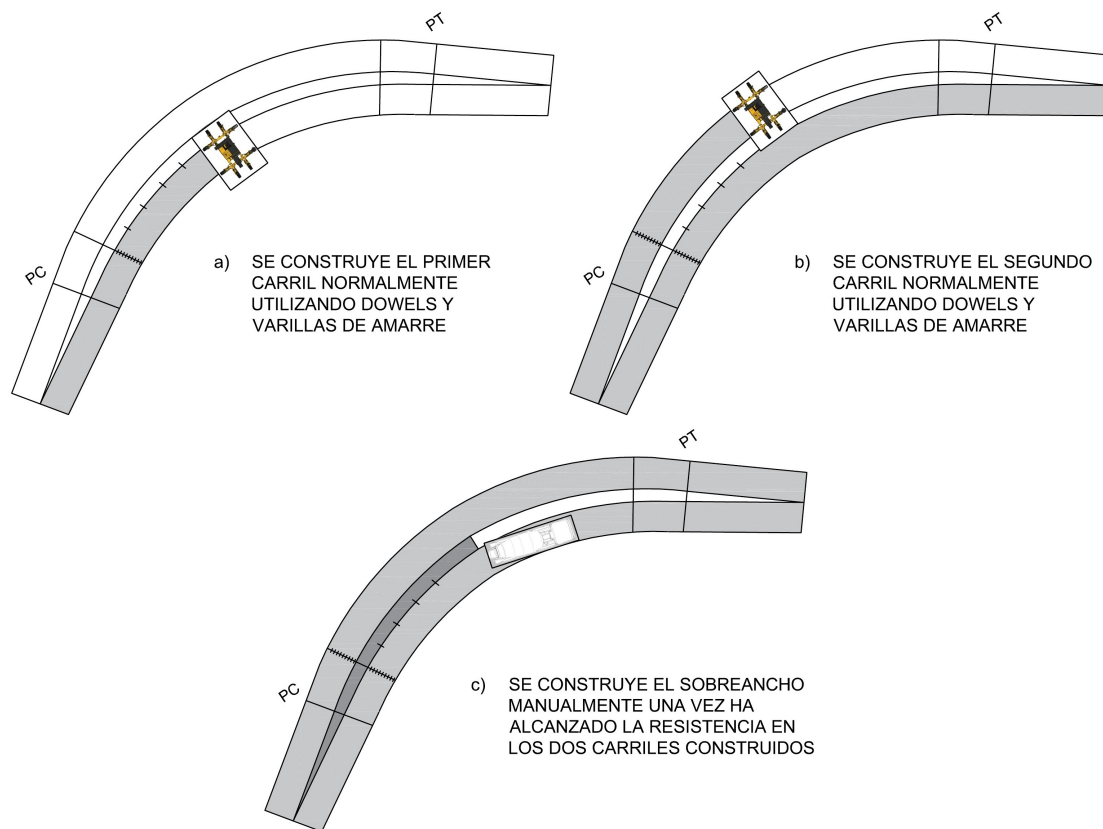


Figura 49: Pasos de construcción caso 3.

Es importante recalcar que este proceso sería funcional para sobreebanchos que tengan una sección considerable, esto con el fin de evitar tener elementos muy esbeltos, otro factor importante a tomar en cuenta que en este procedimiento, las dos calzadas y el sobreebancho son elementos individuales cuya fundición se la realiza en diferentes momentos en el tiempo. En este análisis se evaluará el comportamiento de las losas construidas con varillas de anclaje que de una u otra manera contribuirán para compartir el esfuerzo en la calzada de sección normal, en el caso de estudio de 4.65 x 4.65 m.

Análisis Tensional del Elemento

De acuerdo a la manera constructiva propuesta no es posible analizar el estado tensional del elemento de manera manual, puesto que existe una distribución de carga por los pasadores utilizados, que si bien es cierto, los mismos son de anclaje, más no estructurales, de igual forma comparten cierto esfuerzo. Por esta razón, el análisis se lo realizará por medio del método de elementos finitos mediante el programa EverFE.

El análisis de la respuesta k de la subrasante debe ser considerado como la cuña de pavimento rígido como un elemento independiente por tal motivo la respuesta de la subrasante deberá ser calculada de acuerdo a la geometría de dicha cuña, puesto que, bajo ningún concepto la estructura es monolítica y al ser construido el sobreebancho en un momento posterior a la construcción de la losa de calzada no cumplirá con las relaciones de esbeltez sugeridas en varios estudios.

Corrección de subrasante

Datos de entrada:

B	1.00	m
L	4.65	m
k	30	MPa/m

Obteniendo el factor de forma de la cimentación de acuerdo a (11):

$$I = \frac{m^{1/2}}{T_m} = \frac{\sqrt{\frac{1,55}{1,00}}}{\frac{1,55}{1,00}} = 0,463$$

Por lo tanto el k_s corregido de acuerdo a (10) es:

$$k_s = 15,85 \quad \text{Mpa}$$

A continuación se realizará la modelación y análisis en el programa EverFe.

En la figura 50 se puede apreciar la modelación geométrica del elemento considerando el acero de anclaje del sobreancho al eje de la vía, se considera también el acero para el dowel pero en vista de que se analiza una sola losa este acero no se modela. Dado que la cuña de pavimento rígido se localiza en el eje de la vía, va a ser anclada a la losa normal de calzada, por esta razón se modela con los pasadores, esto considerando que las dos losas ya están construidas. La modelación de los materiales utilizados, en este caso el sobreancho al ser parte de la losa de calzada en el eje se construirá con un hormigón cuyo módulo de rotura es $M_r = 4,5 \text{ MPa}$ o de resistencia $f'_c = 420 \text{ kg/cm}^2$. Además se tiene la modelación de cargas incluyendo los efectos climáticos importantes en la descripción de los esfuerzos por alabeo y se detalla el material utilizado para el anclaje entre la losa de calzada y la cuña de sobreancho, este elemento si bien es cierto no se considera estructural distribuye parte de los esfuerzos a las losas contiguas de donde se produce la carga.

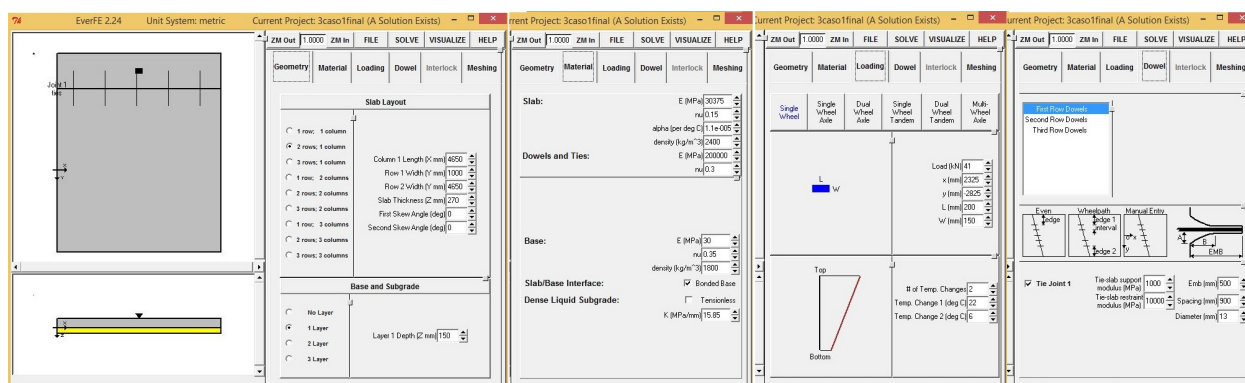


Figura 50: Modelación del elemento.

En la figura 51 se puede apreciar que los esfuerzos producidos en la losa de sobreancho son repartidos también a la losa de calzada de pavimento rígido. A su vez se generan esfuerzos importantes en la unión entre el sobreancho y la calzada principalmente en las ubicaciones

en donde están colocadas las varillas de anclaje. Esto demuestra que dichas varillas trabajan considerablemente transmitiendo los esfuerzos entre los elementos.

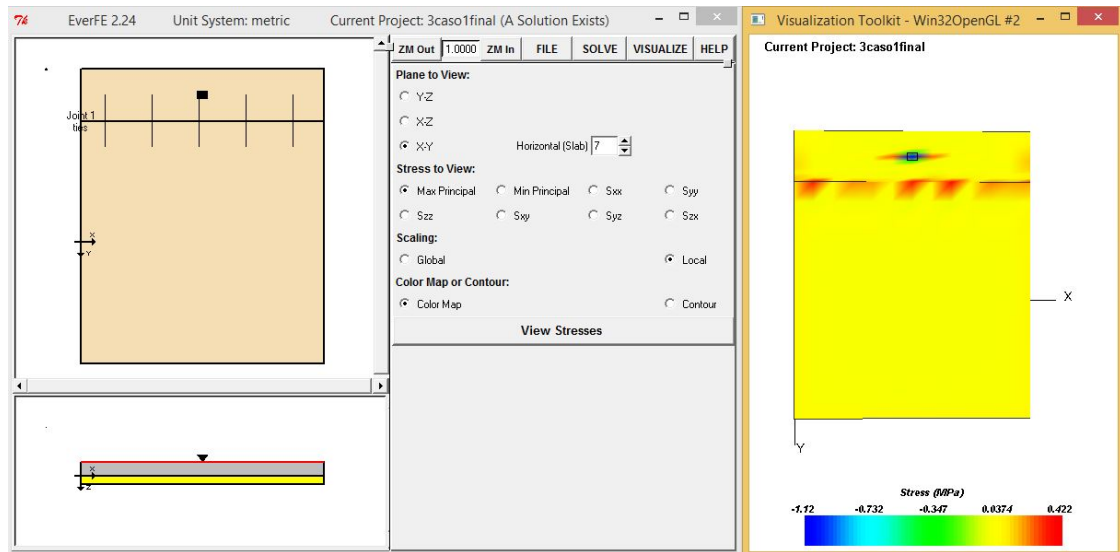


Figura 51: Esfuerzos en la superficie de la losa.

En la figura 52 se pueden apreciar los esfuerzos producidos en el interior de la losa los mismos que en el centro son casi nulos tanto para la cuña de sobreancho como para la losa de calzada, sin embargo, en la unión de las mismas en las zonas donde se ubican las varillas de anclaje se producen esfuerzos.

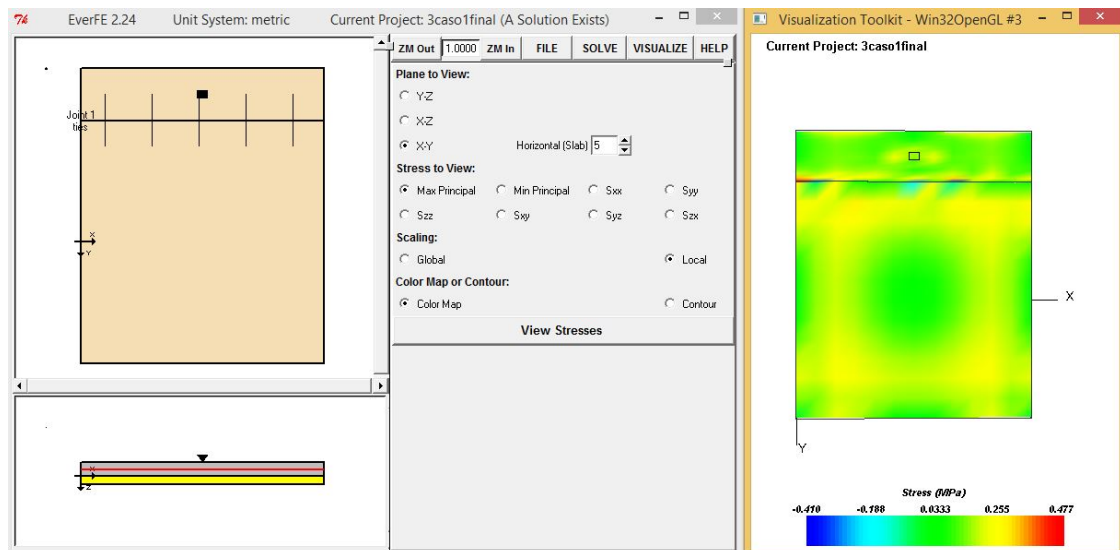


Figura 52: Esfuerzos en el interior de la losa.

En la figura 53 se aprecian los esfuerzos en la base de las losas de sobreancho y de calzada, en el punto de aplicación de la carga se aprecia un esfuerzo puntual considerable el mismo que se va disipando a lo largo de las losas, en esta figura se puede apreciar además la transmisión de los esfuerzos desde el punto de aplicación de la carga hacia el resto de la cuña y la losa de calzada como una continuación de los esfuerzos.

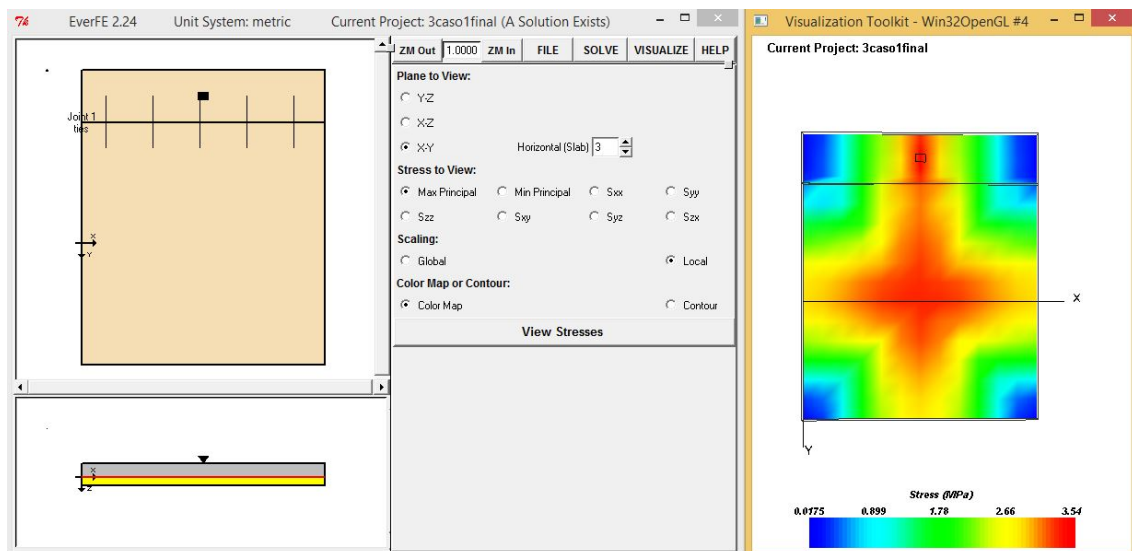


Figura 53: Esfuerzos en la base de la losa.

En la figura 54 se muestra la deformación de las losas con la particularidad de que la losa de mayor sección sin estar cargada puntualmente presente las deformaciones por alabeo las mismas que son mayores a las deformaciones que se dan en la cuña de sobreancho. Como se ha demostrado en cálculos anteriores los esfuerzos por alabeo disminuyen a medida que las secciones de pavimento rígido se vuelven más cortas.

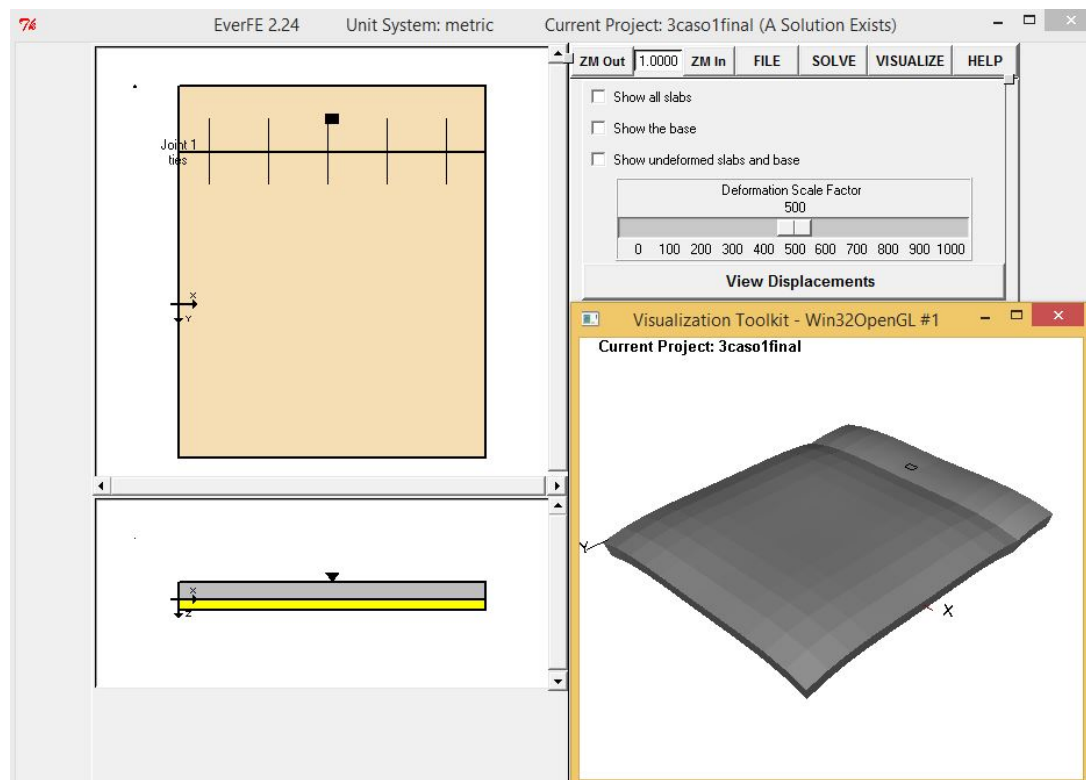


Figura 54: Deformación de la losa.

En la figura 55 se puede verificar el resumen de esfuerzos máximos producidos en las losas de pavimento rígido.

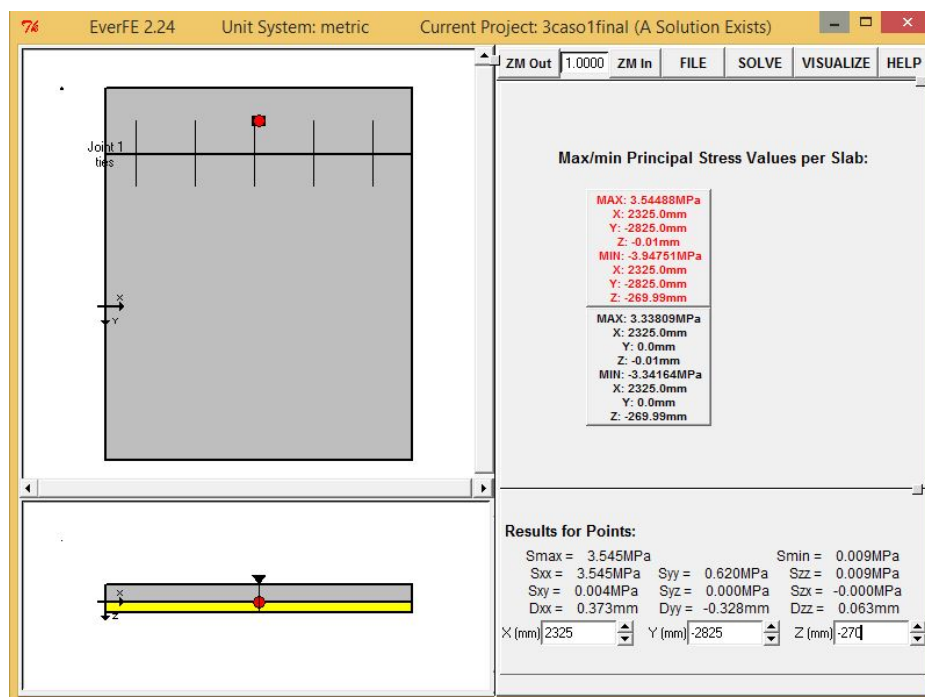


Figura 55: Esfuerzos Máximos .

Dado que las condiciones constructivas son similares y el sobreancho seguirá siendo el mismo tanto en el borde como en el eje no se analizarán las repeticiones admisibles ni los porcentajes de consumos por medio del método PCA dado que dependen de la respuesta de la subrasante que para los dos casos seguirá siendo la misma. Se realizarán las modelaciones de cada una de las secciones reducidas con el fin de evaluar el comportamiento al estar influenciadas por el anclaje al paño de pavimento rígido de sección normal.

De las modelaciones realizadas se tienen los siguientes resultados:

En el cuadro 35 se pueden observar los esfuerzos producidos en la superficie de la losa, estos esfuerzos son ligeramente mayores que los esfuerzos obtenidos en los resultados de la cuña de hormigón construida en el borde la calzada, esto generalmente puede deberse a los esfuerzos por alabeo que presenta la losa de pavimento rígido de sección siendo estos mayores que la cuña de pavimento construida en el eje. La variación de los esfuerzos conforme se va reduciendo la sección puede apreciarse en la figura 56.

Superficie		
Dimensión	Tracción	Compresión
4,65x1,00	0.42	1.12
4,65x0,50	0.43	0.90
4,65x0,25	0.48	0.40
4,65x0,10	1.24	0.15

Cuadro 34: Comparación Análisis Tensional: Superficie de la losa.

En el cuadro 36 se verifican los esfuerzos en el interior de la losa, nuevamente el incremento

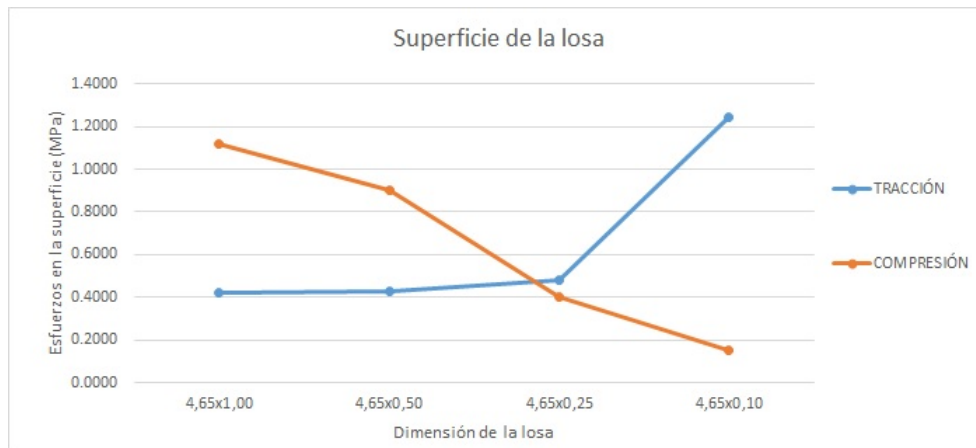


Figura 56: Comparación de esfuerzos en la superficie de la losa.

de los mismos con respecto a los esfuerzos producidos en la cuña construida en el borde de la calzada no es muy significativo, a pesar de que hay transmisión de esfuerzos hacia la losa de pavimento de calzada, esta transmisión es recíproca con respecto a los esfuerzos por alabeo generados en la losa de mayor sección. Mientras los esfuerzos de tracción máximos incrementan los de tracción disminuyen a medida que la sección se hace menor, un incremento en los esfuerzos representa un porcentaje de consumo superior (fatiga), una vez mas la vida útil del elemento disminuye a medida que los esfuerzos se incrementan. Este comportamiento se puede verificar en la figura 57.

Interior		
Dimensión	Tracción	Compresión
4,65x1,00	0.48	0.41
4,65x0,50	0.43	0.30
4,65x0,25	0.58	0.26
4,65x0,10	1.07	0.06

Cuadro 35: Comparación Análisis Tensional: Interior de la losa.

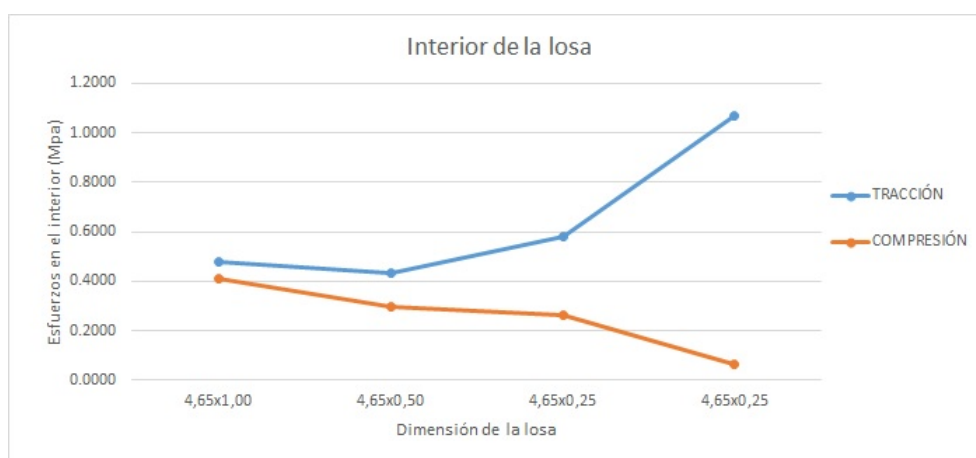


Figura 57: Comparación de esfuerzos en el interior de la losa.

En el cuadro 37 al analizar los esfuerzos realizados en la base de la losa, se encuentra la gran diferencia entre los esfuerzos producidos tanto de la losa construida en el eje como la losa construida en el borde. Recordando que la losa en el borde de la calzada, es decir, en el interior de la curva no se colocan pasadores que anclan el sobreancho los esfuerzos no se transmiten, no así la cuña construida en el eje que si tienen estos pasadores. Como resultado, los esfuerzos son mucho menores en el sobreancho, la reducción es considerable aplicando la misma carga en ambos casos. El comportamiento descrito se puede visualizar gráficamente en la figura 61 que muestra el comportamiento de los esfuerzos a medida que se reduce la sección.

Base		
Dimensión	Tracción	Compresión
4,65x1,00	3.54	0.02
4,65x0,50	3.81	0.03
4,65x0,25	4.29	0.009
4,65x0,10	4.86	0.008

Cuadro 36: Comparación Análisis Tensional: Base de la losa.

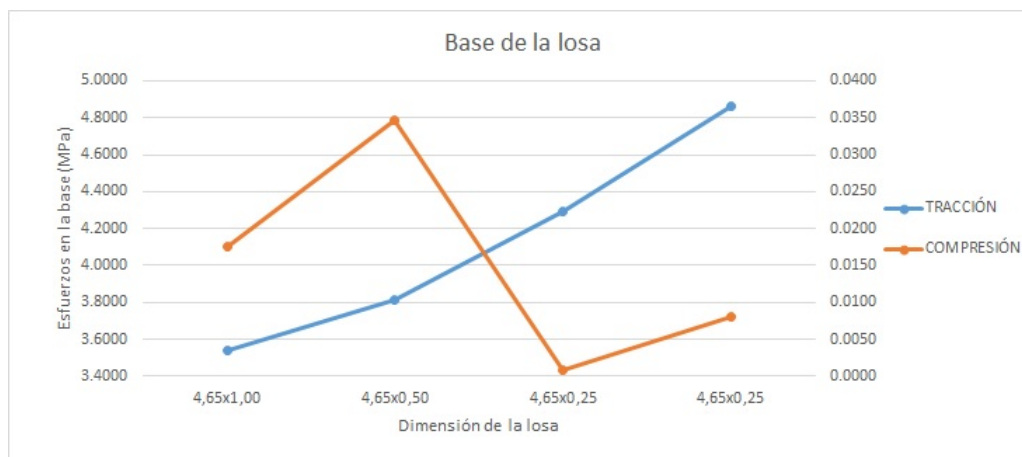


Figura 58: Comparación de esfuerzos en la base de la losa.

De los resultados se puede verificar que un anclaje bien realizado en la construcción de carreteras influye en la transmisión y resistencia a los esfuerzos producidos en los elementos de la carretera construidos, tanto con las losas de pavimento rígido como con las cuñas de sobreancho, el mismo tratamiento se regirá para espaldones o cunetas que se encuentren anclados a la losa de calzada. Si bien es cierto que los esfuerzos encontrados dentro de esta modelación son inferiores, las repeticiones admisibles y los porcentajes de consumo de esfuerzos serán similares al primer caso de estudio, pero aún existe la disminución de repeticiones admisibles a medida que se reduce la sección del sobreancho, haciendo que la construcción de este elemento nuevamente presente variación de la vía útil con respecto a la calzada, en el tiempo seguramente se tendrá que dar el mantenimiento correspondiente a estas secciones.

3.5. Comparación de resultados

De acuerdo a los resultados obtenidos de las modelaciones de carga se puede indicar que los métodos constructivos utilizados actualmente en nuestro país no son recomendables, puesto que si se construye una carretera con un sobreancho como cuña de pavimento rígido a medida que se disminuye la sección del mismo, los esfuerzos producidos en estos elementos aumentan y las

repeticiones admisibles disminuyen lo que se traduce en una menor vida útil. De igual forma, el número de repeticiones admisibles construyendo el sobreancho dentro de la cuneta es aún mucho menor debido a la baja resistencia del hormigón utilizado a pesar de que la respuesta de la subrasante es mejor y los esfuerzos por alabeo no son considerables validando los nuevos métodos de construcción por medio de losas cortas que es la técnica recomendada.

Considerando una cuña de pavimento rígido construida en el eje de la vía, al ser cargada, se puede determinar que los esfuerzos producidos serán menores a los esfuerzos producidos de la cuña construida en el borde y las repeticiones admisibles serán las mismas dado que la resistencia del hormigón es de 4.5 MPa, similar a la cuña construida en el borde, eso si, con la consideración de que los vehículos en una curva trazan trayectorias que tienden a buscar el lado interior de las curvas mas no el exterior. De esta manera el número de pasadas de vehículos en el sobreancho construido en el eje de la vía serán mucho menor al número de pasadas por el lado interior de la misma. Si bien esto puede traducirse en una vida útil mayor, el método constructivo tiene las mismas deficiencias en el caso de que el número de repeticiones de carga fueran las mismas que en el caso de cuña en el borde.

Definidas las respuestas de la subrasante es entonces importante recalcar que a medida que la sección se encuentra cerca de la relación de esbeltez ($L/B = 1 - 1,4$) la respuesta de la subrasante es mejor. Se realiza un promedio de la respuesta de las subrasantes para los casos 1 y 3 que serán los mismos dado que las secciones son iguales y se comparan con la respuesta teniendo el sobreancho en la cuneta, obviamente la diferencia entre el primer caso y el segundo es que los esfuerzos son transmitidos en el caso 3 por medio de las varillas de anclaje que de alguna manera contribuye a una mejor distribución de esfuerzos entre los elementos. Lo descrito se expresa en el cuadro 38.

Caso	f'c (MPa)	Respuesta k (MPa)
Paño 4,65x4,65	4.50	34.19
Sobreancho en el borde	4.50	10.00
Sobreancho en la cuneta	3.18	27.46
Sobreancho en el eje	4.50	10.00

Cuadro 37: Respuestas de la subrasante en cada caso de estudio.

Gráficamente la respuesta de la subrasante en cada caso de estudio se puede encontrar en la figura 59.

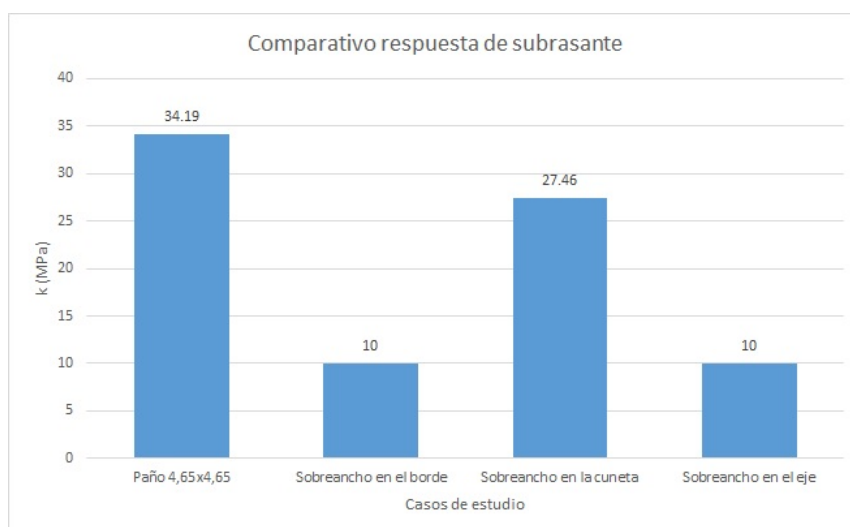


Figura 59: Comparación respuesta de subrasante en cada caso de estudio.

Analizando los esfuerzos producidos en cada uno de los casos, el promedio de esfuerzos se describe en el cuadro 39.

Esfuerzos Máximos	Tracción	Compresión
Paño 4.65x4.65	3.95	4.19
Sobreancho en el borde	5.54	5.99
Sobreancho en la cuneta	0.90	2.25
Sobreancho en el eje	4.12	5.37

Cuadro 38: Esfuerzos promedio de cada caso de estudio.

Gráficamente se pueden visualizar estas comparaciones en la figura 60.

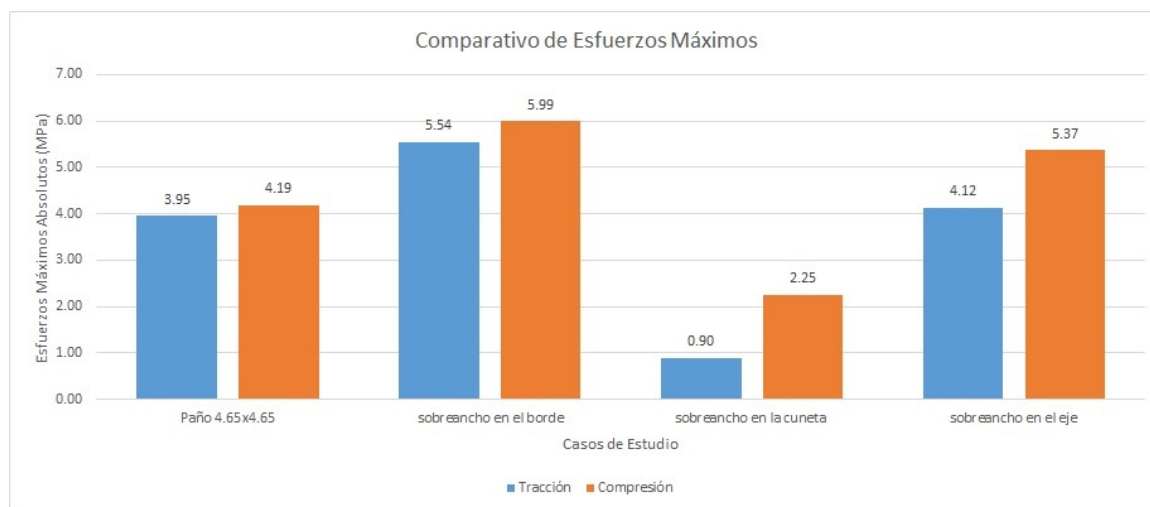


Figura 60: Comparación de esfuerzos máximos producidos en cada caso de estudio.

De acuerdo a los resultados obteniendo el promedio de repeticiones admisibles de cada uno de los casos de estudio se ha determinado que la resistencia del hormigón juega un papel importante en la determinación de un número de repeticiones admisibles, esto quiere decir que un sobreancho construido en la cuneta con una resistencia menor obviamente tendrá una vida útil menor, además se recalca que por esta sección transitarán los vehículos pesados que realicen la maniobra en la curva. El hormigón utilizado para construir el sobreancho construido en el borde y en el eje tiene una resistencia a la compresión $f'_c = 420 \text{ kg/cm}^2$, mientras que el hormigón utilizado en la cuneta y obviamente en la construcción del sobreancho (caso 2) tienen una resistencia a la compresión de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$. El número de repeticiones admisibles para cada caso de estudio se detalla en el cuadro 40.

Caso	Promedio de repeticiones
Sobreancho en el borde	27,775,424
Sobreancho en la cuneta	20,407,257
Sobreancho en el eje	27,775,424

Cuadro 39: Repeticiones admisibles de cada caso de estudio.

Gráficamente se puede visualizar dicho comportamiento en la figura 61.

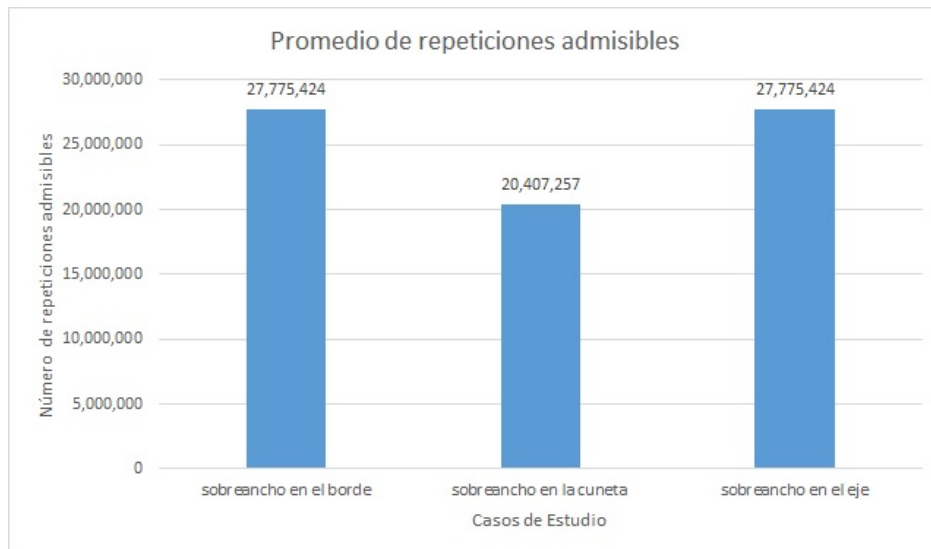


Figura 61: Comparación de repeticiones admisibles producidos en cada caso de estudio.

Definiendo los porcentajes de fatiga y erosión por medio del método PCA se determina la diferencia entre cada uno de los casos de estudio, estos porcentajes en promedio se definen en el cuadro 41 y gráficamente en la figura 62.

Sección	% Consumo esfuerzo	% Consumo erosión
Sobrealcho en el borde	477.34	37.50
Sobrealcho en la cuneta	1000	12.79
Sobrealcho en el eje	477.34	37.50

Cuadro 40: Promedio de porcentajes de consumo de cada caso de estudio.

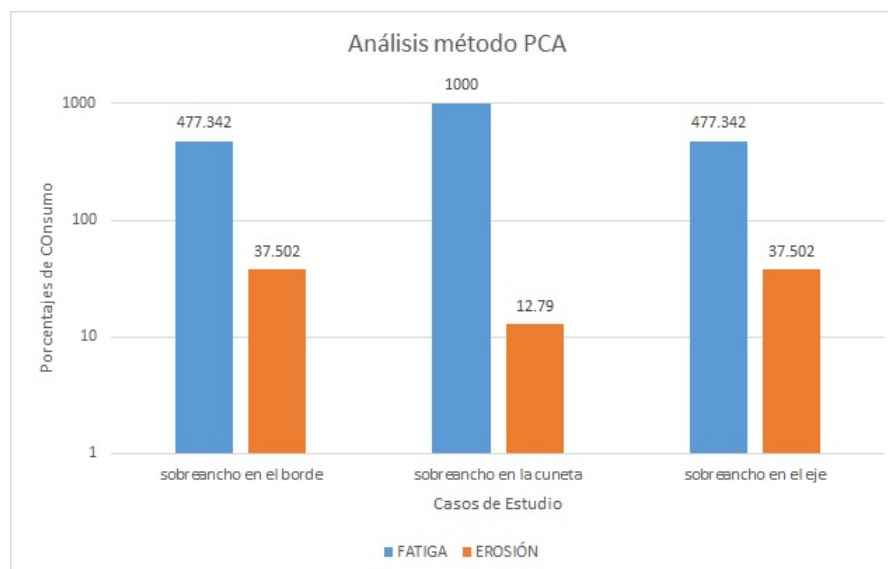


Figura 62: Comparación porcentajes de consumo en cada caso de estudio.

4. Metodología recomendada

De los análisis expuestos y una vez realizadas las comparaciones de cada uno de los métodos constructivos se puede recomendar lo siguiente:

El método de construcción del sobreancho en el eje de la vía es el que mejor respuesta tiene ante las solicitaciones de carga, considerando que en una curva derecha los vehículos trazan su recorrido más cerca del borde antes que del eje de la vía entonces a pesar de que las respuestas y esfuerzos analizados son los mismos, en la práctica un sobreancho construido en el eje podrá tener una vida útil relativamente mayor que el sobreancho construido en el borde, sin embargo, de los resultados obtenidos se demuestra que este método constructivo presenta deficiencias en su comportamiento al tratarse de una cuña construida independientemente y considerada como un elemento individual.

Es importante recordar que las cuñas de pavimento rígido de 4,5 MPa construidas actualmente se encuentran en el borde de la calzada y son demasiado esbeltas dado que los cortes que se hacen en estas cuñas coinciden con la longitud de los paños (figura 63). Lo recomendable de acuerdo a lo estudiado anteriormente es buscar realizar cortes de tal forma que la relación de esbeltez se mantenga entre 1 y 1,4.



Figura 63: Fotos de sobreanchos demasiado largos.

En la figura 63 se puede observar que se podría extender el corte de la junta realizada en la cuneta hacia el sobreancho de tal manera que los elementos sean más cortos y cuya realación de esbeltez se encuentre dentro de lo recomendado. En esta sección se realizará este análisis con el fin de determinar el número de repeticiones admisibles de acuerdo a la respuesta de la subrasante generada por la sección menor.

4.1. Análisis caso 1

De acuerdo a los procedimientos utilizados en los casos anteriores se puede determinar que los esfuerzos producidos en las losas de sobreancho más cortas son mucho menores que los esfuerzos producidos en las cuñas de sobreancho de mayor longitud, de igual forma, las repeticiones admisibles, si bien es cierto, tienden a disminuir a medida que la sección también disminuye son comparables con el primer caso de estudio. Las respuestas de la subrasante en cada caso es mejor y los porcentajes de fatiga y erosión verificados por el método PCA a pesar de ser elevados son menores que los porcentajes de consumo estudiados en el primer caso. Los cálculos se pueden verificar en la sección 10.4 de los anexos presentados en esta investigación. Los resultados obtenidos se describen en el cuadro 42 en donde por medio de la modelación en el programa EverFe se consideran los esfuerzos tanto en la superficie como en el interior y la base de la losa del pavimento. Estos esfuerzos resultan considerablemente menores en las losas que son más cortas que las que son largas y esbeltas principalmente en la base donde los esfuerzos de tracción son elevados.

Superficie			Interior		Base	
Dimensión	Tracción	Compresión	Tracción	Compresión	Tracción	Compresión
1,55 x 1,00	0.134	1.21	0.239	0.01	0.918	0.04
1,55 x 0,50	0.097	0.912	0.252	0.012	1.330	0.040
1,55 x 0,25	0.07	0.60	0.42	0.02	2.41	0.05
1,55 x 0.10	0.56	0.15	1.17	0.03	5.93	0.06

Cuadro 41: Esfuerzos mediante modelación elementos finitos.

En el cuadro 43 se puede verificar este comportamiento puesto que de los análisis realizados analíticamente se desprende que los esfuerzos también reducen, tanto en el interior y en el borde de la losa en un porcentaje aproximado del 100 % estas partes de las losas son las que se consideran más críticas.

Dimensión	Esquina	Borde	Interior
1,55 x 1,00	9.20	15.39	10.78
1,55 x 0,50	25.05	10.98	8.06
1,55 x 0,25	24.68	6.69	5.50
1,55 x 0,10	24.21	1.18	2.27

Cuadro 42: Esfuerzos obtenidos analíticamente .

En el cuadro 44 se verifica el número de repeticiones admisibles para cada uno de las secciones analizadas, se comprueba que a medida que reduce la sección el número de repeticiones admisibles disminuye sin embargo en un porcentaje pequeño

Número de repeticiones				
	1.55x1.00	1.55x0.5	1.55x0.25	1.55x0.10
k (MPa)	27.46	19.42	13.73	8.68
REPET	45,339,894	32,891,806	25,103,591	18,644,326

Cuadro 43: Número de repeticiones admisibles.

Finalmente, en el cuadro 45 se observan los porcentajes de fatiga y erosión obtenidos, los mismos que a medida que se reduce la sección del elemento aumentan, por lo que a pesar de obtener mejores rendimientos con este método aún así hay una variación entre las respuestas a los esfuerzos de cada una de las losas. Este análisis se realizó en las mismas condiciones (sin

bermas, con pasadores) que los casos anteriores.

Dimensiones	% Consumo Esfuerzo	% Consumo Erosión
1.55x1.00	8.54	12.79
1.55x0.50	32.98	18.05
1.55x0.25	132.87	25.75
1.55x0.10	916.46	41.87

Cuadro 44: Porcentajes de fatiga y erosión .

Se puede verificar que la alternativa recomendada es menos desfavorable que las que actualmente se utilizan en el Ecuador, incluso es mejor que la propuesta de construir el sobreancho en el eje como un elemento independiente puesto que incluso una sección de 50 cm aún tiene respuestas aceptables dentro de los porcentajes admisibles, cuando los elementos son mas esbeltos no soportan las cargas impuestas aún teniendo una resistencia bastante buena. Con este antecedente y con los resultados obtenidos se sugiere una metodología constructiva que involucre a la construcción del sobreancho como un elemento monolítico con la calzada de pavimento rígido considerando que el esfuerzo y la utilización de recursos se compensarán con una mayor vida útil en una carretera, esta metodología sugerida será el caso 2 recomendado.

El procedimiento propuesto para construir el sobreancho en las carreteras de pavimento rígido construidas con pavimentadora de encofrado deslizante se puede observar en la figura 64 el mismo que se detalla:

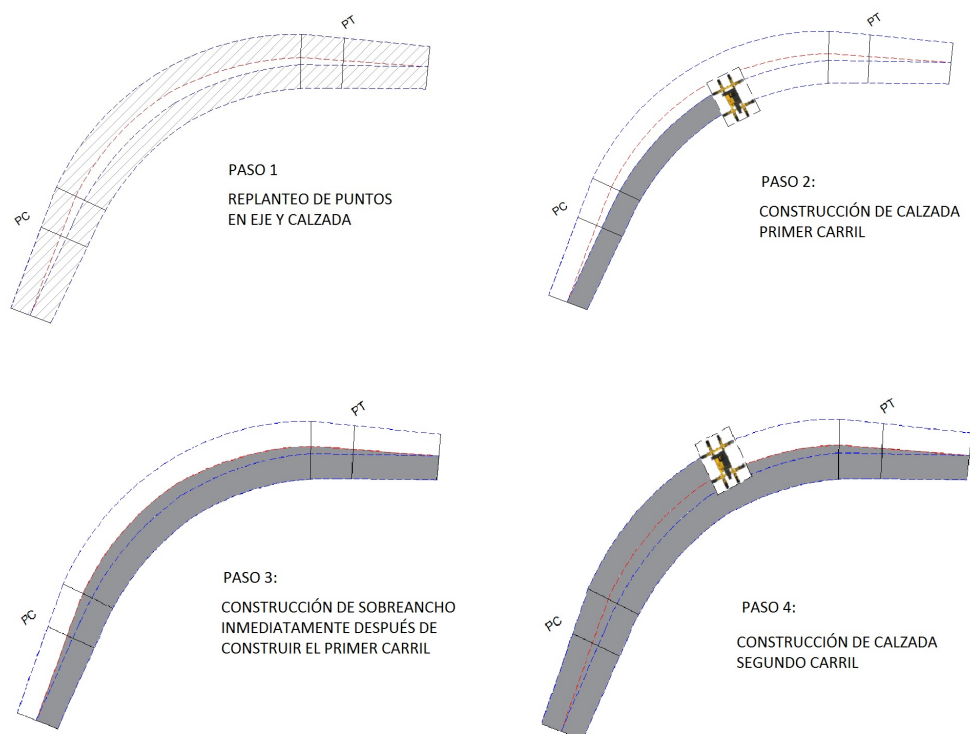


Figura 64: Pasos de construcción de sobreancho caso 2a.

- Definir cada curva si es circular o espiral puesto que en cada caso la dimensión del sobreancho es variable, en curvas circulares todo el sobreancho se traslada al borde interno de la curva, mientras que en curvas espirales el sobreancho se reparte en ambos carriles.
- Replanteo y colocación de puntos para la colocación de la losas de pavimento rígido considerando el sobreancho.
- Construcción de la losa de calzada, primer carril.
- Inmediatamente después de haber pasado la pavimentadora realizar un encofrado provisional considerando el sobreancho para la fundición del mismo y fundir el sobreancho con el equipo necesario para poder lograr un elemento monolítico entre calzada y sobreancho. Una vez realizada esta acción se utilizarán dowels de transmisión y varillas de anclaje.
- Construir el segundo carril normalmente con la pavimentadora luego de que el primer carril ha alcanzado la resistencia necesaria.
- Es importante recalcar que el sobreancho se construye en el eje de la vía.
- El corte y sellado de juntas deberá seguir las recomendaciones sugeridas en [20] descritas en la sección 2.8.

En el caso de construir en primer lugar el carril que no tiene el sobreancho, el procedimiento a seguir se puede observar en la figura 65 y se describe de la siguiente manera:

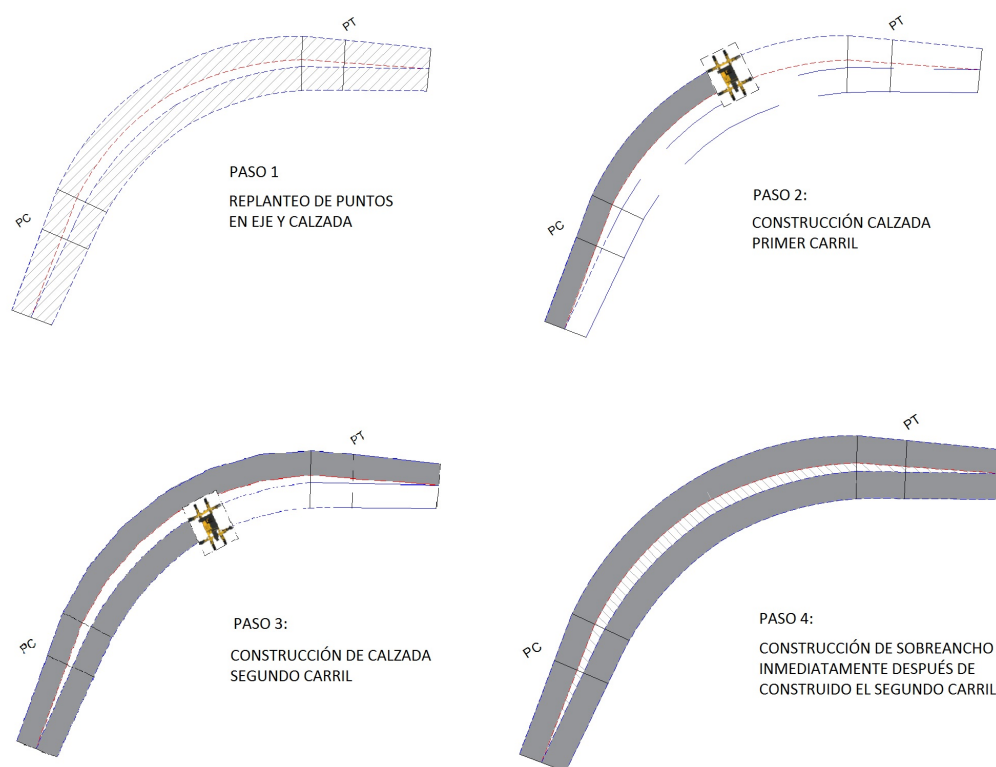


Figura 65: Pasos de construcción de sobreancho caso 2b.

- Definir cada curva si es circular o espiral.
- Replanteo y colocación de puntos para la colocación de la losas de pavimento rígido considerando el sobreancho.

- Construcción de la losa de calzada normalmente con dowels de transmisión, primer carril (que no incluye el sobreancho). En este caso aquí se utilizarán las varillas de anclaje.
- Una vez alcanzada la resistencia necesaria para cargar el carril ya fundido se debe construir normalmente el segundo carril con la pavimentadora pero considerando la separación entre el primer y el segundo carril correspondiente al sobreancho.
- Inmediatamente después de construir el segundo carril y de que ha pasado la pavimentadora, manualmente fundir el sobreancho con el fin de construir un elemento monolítico entre la losa de calzada y el sobreancho.
- El corte y sellado de juntas deberá seguir las recomendaciones sugeridas en [20] descritas en la sección 2.8.

En el caso de que se tengan curvas espirales se realizará un procedimiento mixto entre el caso 2a y el caso 2b siempre buscando construir un único elemento monolítico. Además, utilizando esta técnica constructiva es posible utilizar adecuadamente las barras de amarre entre losas de calzada y de cunetas. Lo importante de esta técnica es que la losa construida será monolítica con el sobreancho en ambos casos.

De acuerdo a esta metodología constructiva la losa de sección mayor tendrá las dimensiones de 5,65 m de ancho por 4,65 m de largo, en donde la relación de esbeltez $L/B = 1,215$, relación que se encuentra dentro de los parámetros recomendables de construcción. A continuación se evaluará el comportamiento de esta losa de pavimento rígido.

Dentro del caso 1 se debe observar que el número de juntas aumenta, es decir, el caso 1 sugiere que se corte la cuña de sobreancho monolítica en varias partes las mismas que buscan mantener la relación $L/B=1.4$, de esta forma se tendrán que realizar diferentes cortes en las juntas transversales de la cuña de sobreancho, además se tendrá una junta longitudinal adicional entre la cuneta y la losa de pavimento rígido en cada una de las curvas de la carretera. En el caso 2 en cambio se sugiere una metodología constructiva que evita la construcción de una junta adicional, dado que se procura realizar un elemento monolítico entre la losa de calzada y el sobreancho, la junta desaparece, manteniéndose las juntas longitudinales en tres: una en el eje, y dos en cada uno de los lados de la carretera.

4.2. Análisis caso 2

Una vez más utilizando la metodología y parámetros anteriores se puede verificar que la respuesta de la subrasante es mucho mejor puesto que el área en la que se distribuye la presión es mayor, sin embargo los esfuerzos en la losa por efecto del alabeo aumentará.

4.2.1. Corrección de subrasante

Datos de entrada:

B	5.65	m
L	4.65	m
k	30	MPa/m

Por lo tanto el k_s corregido es:

$$k_s = 37,69 \quad \text{MPa}$$

4.2.2. Análisis tensional del elemento

En el cuadro 46 se presenta el estado tensional del elemento. Se verifica que los esfuerzos producidos son muy similares a los obtenidos en el estado tensional de una losa de pavimento rígido de dimensiones de 4,65x4,65 m, esto quiere decir que el metro adicional de sobreancho no afecta negativamente con respecto a los esfuerzos de alabeo que son los generalmente mayores debido a la sección mayor.

Tipos de Esfuerzos	Tensiones Obtenidas (kg/cm^2)		
	Esquina	Borde	Interior
Alabeo	9.57	30.89	36.53
Carga	14.08	10.52	7.08
Fricción	0.837	0.837	0.837
Totales	24.49	42.25	44.45

Cuadro 45: Esfuerzos producidos en una losa de 4,65x5,65 m.

4.2.3. Análisis por medio de elementos finitos

En el cuadro 47 se observan los esfuerzos producidos tanto en la superficie como en el interior y la base de la losa de pavimento rígido cuyas magnitudes nuevamente son similares a una losa de dimensiones normales que se utilizan en la losa de calzada de dimensiones de 4,65x4,65 m. En este caso al tener una estructura monolítica la longitud de la losa se mantendrá en 4.65 m sin embargo su ancho será en este caso de 5.65 m con el sobreancho dentro de la calzada.

Dimensión	Superficie		Interior		Base	
	Tracción	Compresión	Tracción	Compresión	Tracción	Compresión
4.65x5.65	0.12	0.662	0.23	0.014	4.07	0.064

Cuadro 46: Esfuerzos obtenidos por métodos de elementos finitos losa de 4.65x5.65.

En el cuadro 48 se puede verificar los esfuerzos máximos y mínimos registrados, éstos son pequeños en comparación de los esfuerzos máximos producidos en las secciones reducidas que son esbeltas. Un nivel de fatiga menor debido a esfuerzos pequeños se traduce en una vida útil superior. A continuación se realizará el análisis de las repeticiones admisibles que esta losa de pavimento rígido puede soportar.

Esfuerzos Máximos		
Dimensión	Max	Min
4.65x5.65	4.07	4.27

Cuadro 47: Esfuerzos máximos obtenidos por métodos de elementos finitos losa de 4.65x5.65 m.

4.2.4. Repeticiones Admisibles

De acuerdo a las condiciones presentadas y las respuestas de la subrasante obtenidas se calculan las repeticiones admisibles en el programa AASHTO 93.

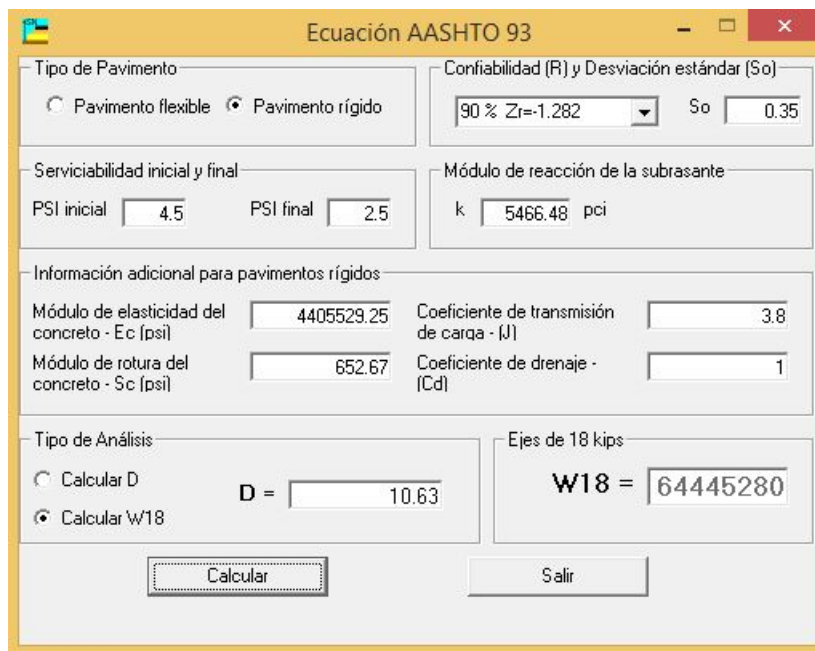


Figura 66: Número de Repeticiones Admisibles.

De la figura 66 se puede desprender que el número de repeticiones admisibles es de 64'445,280 ejes equivalentes.

4.2.5. Porcentajes de fatiga y erosión

Finalmente de acuerdo a los porcentajes de consumo por medio del método PCA, los mismos que se pueden verificar en la figura 67 se obtienen porcentajes de consumo mucho menores por efecto del mismo tren de cargas utilizado en todos los casos anteriores, los mismos que son 2.26 para la fatiga y 9.44 para la erosión los que no sobrepasan al 100 %.

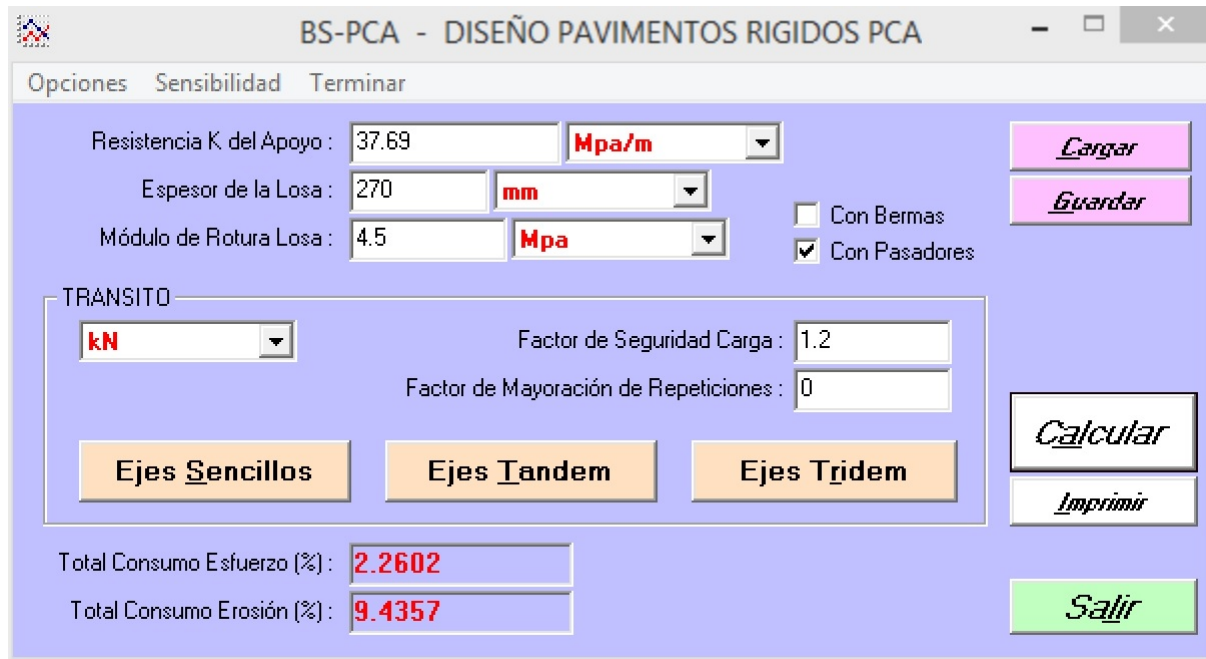


Figura 67: Porcentaje de fatiga y erosión .

4.3. Comparación Final

Una vez analizadas todas las alternativas constructivas para los sobreanchos de carreteras de pavimento rígido construidos con pavimentadora con encofrado deslizante, se realiza una comparación de las mismas con el fin de definir la mejor alternativa y obtener las conclusiones que se esperan de esta investigación.

De acuerdo a la respuesta de la subrasante, se ha podido verificar que efectivamente la misma es mejor a medida que el elemento tiene una sección mayor, esto, como se ha definido anteriormente, tiene coherencia con las teorías de cimentaciones puesto que la distribución de los esfuerzos transmitidos hacia la subrasante se reparten sobre un área más grande, esto sumado a que en una carretera de pavimento rígido cada paño soporta los esfuerzos en su superficie a diferencia del pavimento flexible que trasmite casi la totalidad de los esfuerzos a la subrasante.

En la figura 68 se pueden observar los resultados obtenidos de los análisis del comportamiento de la subrasante en cada caso de estudio. En la alternativa 2 en donde la sección de la losa de pavimento rígido es mayor, la respuesta es mejor. Es importante notar que a medida que la relación de esbeltez es cercana a 1 la respuesta de la subrasante mejora.

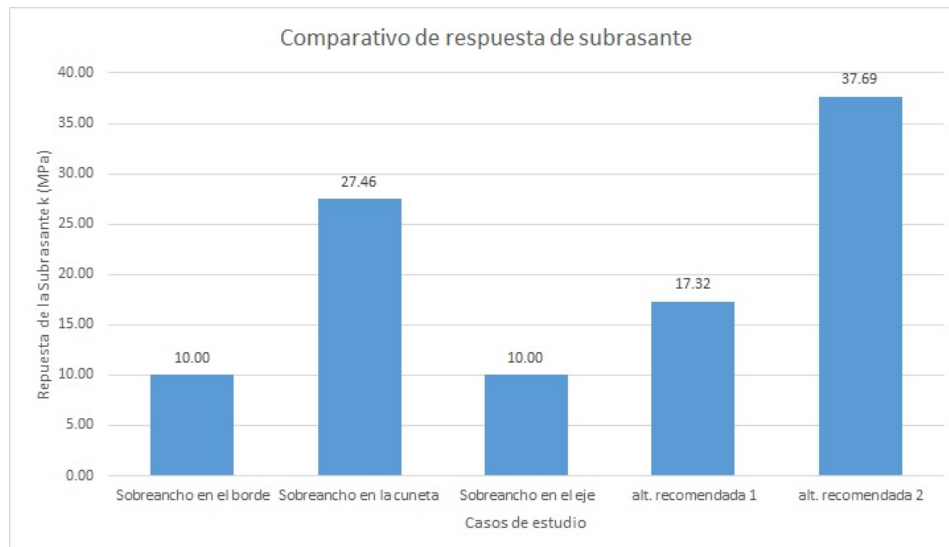


Figura 68: Comparación de respuesta de subrasante todos los casos.

La diferencia del promedio de los esfuerzos máximos producidos en cada caso son un indicador de la fatiga a la que puede estar sometido cada losa de pavimento rígido una vez más las secciones menores son la que mayores esfuerzos registran de acuerdo a los análisis realizados por medio de elementos finitos. A medida que los esfuerzos aumentan el crecimiento de las deformaciones totales también lo hacen, estas deformaciones producen fisuras o microfisuras que en lo posterior y ante la repetición de las cargas producirán la fractura del elemento. Estos esfuerzos están representados gráficamente en la figura 69.

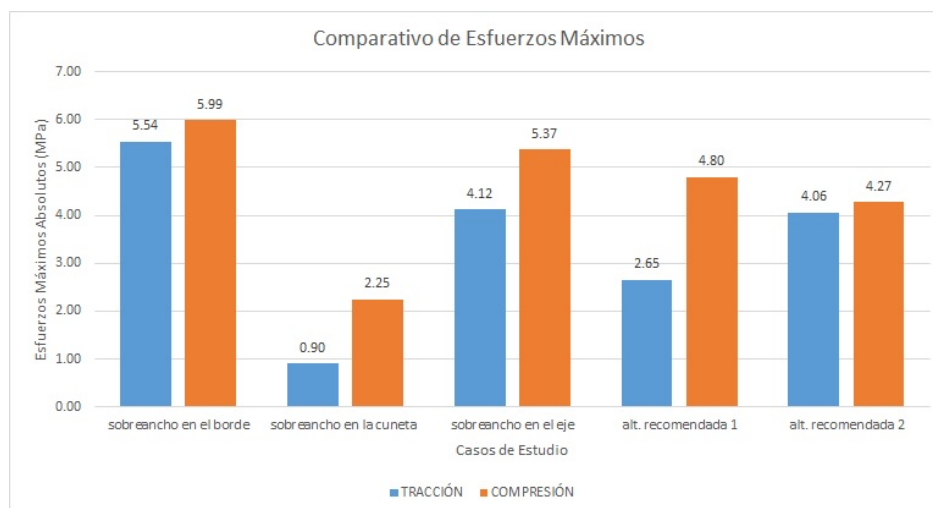


Figura 69: Comparación de esfuerzos máximos en el elemento todos los casos.

Todo diseño de carreteras tiene que garantizar una vida útil de acuerdo a la proyección estimada por el diseñador, sin embargo, no se ha analizado el caso en el que un hormigón que tiene una misma resistencia y espesor tiene la vida misma útil que un hormigón construido de diferentes maneras, en la figura 70 se puede observar el número de repeticiones admisibles en cada caso de estudio, hay diferencias considerables cuando se trata de resistencia del hormigón pero a la vez también existen diferencias cuando las secciones de losa de pavimento rígido disminuyen.

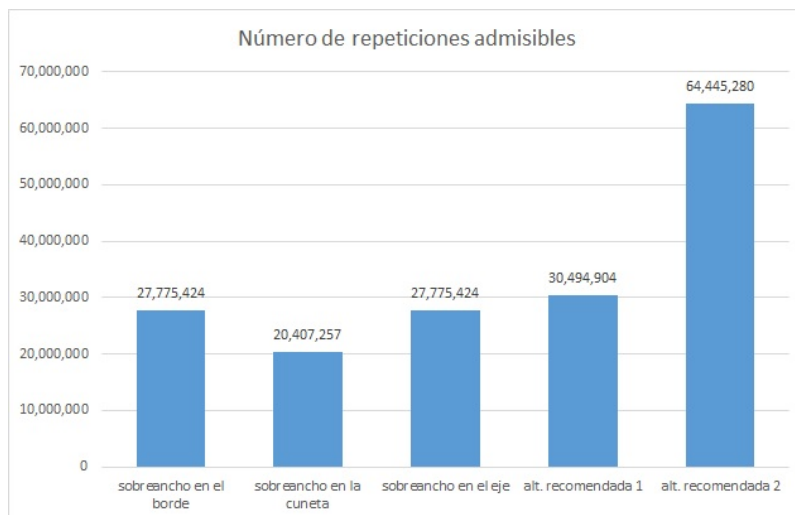


Figura 70: Comparación de número de repeticiones admisibles todos los casos.

De acuerdo al método PCA se analizan dos situaciones: la fatiga (para prevenir el agrietamiento debido a las cargas) y la erosión (para limitar la deflexión en los bordes de la losa) en la figura 71 se puede analizar el porcentaje de consumo por estas consideraciones en cada uno de los casos de estudio. Al hablar de fisuras por las cargas inmediatamente se hace referencia a la resistencia del hormigón y cuando se habla de erosión podemos implicar a la subrasante en el proceso. En la figura se tienen los esfuerzos suscitados en cada caso, si bien es cierto en ciertas condiciones o en ciertas secciones de estudio los porcentajes han sido menores a 100 % el proceso constructivo como tal en su conjunto presenta porcentajes elevados únicamente la alternativa recomendada 2 se mantiene dentro de los porcentajes admisibles.

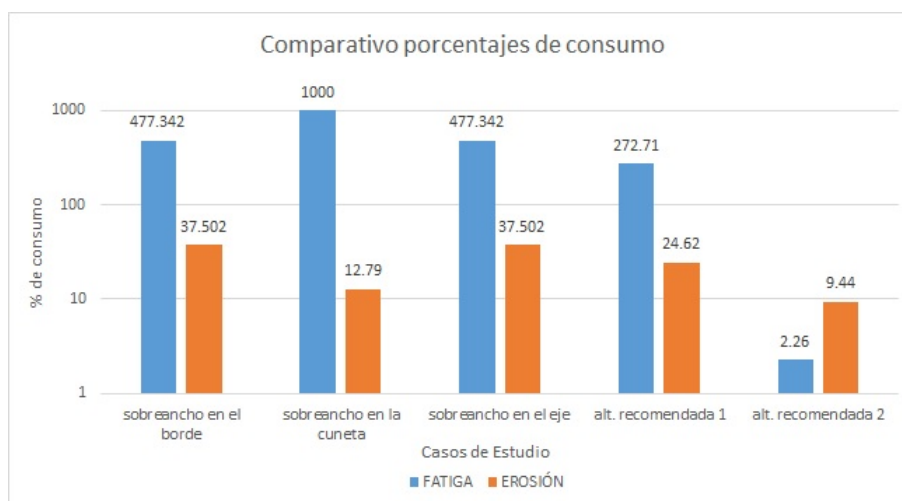


Figura 71: Comparación de número de repeticiones admisibles todos los casos.

5. Conclusiones

Hay varios factores que inciden en un diseño de pavimento rígido, si bien es cierto que los métodos de diseño utilizados actualmente establecen aproximaciones bastante buenas para una losa común de pavimento rígido de calzada, hay situaciones especialmente en la construcción



de sobreanchos que no son consideradas dentro de éstos. La sección de la losa construida directamente ligada a la relación de esbeltez, la ubicación del sobreancho, la forma en la que se construye, son factores que afectan principalmente a la vida útil de una carretera. La tecnología actual propone alternativas de construcción que no dan solución al problema de construcción del sobreancho siendo éste un tema muy poco estudiado.

La respuesta de la subrasante k_s mejora a medida que la sección de la losa se acerca a la relación de esbeltez $L/B = 1 - 1,4$, la ventaja de tener losas de secciones grandes es que las mismas reparten en toda la losa el esfuerzo haciendo que la transferencia hacia la subrasante sea mínima. Por esta razón, las secciones que tiendan a mantener la relación de esbeltez entre 1 y 1.4 tendrán respuestas de subrasante mejores.

Los esfuerzos de alabeo generados por los cambios de temperatura se vuelven considerables a medida que la sección es mayor, sin embargo, nuevamente la relación de esbeltez juega un papel importante en los esfuerzos máximos producidos por la aplicación de cargas estos esfuerzos máximos principalmente se dan en la base de los elementos estudiados. Un factor que influye en el desarrollo de los esfuerzos es que la transmisión de los mismos por medio de dowells o barras de anclaje disminuye considerablemente la concentración en los puntos de aplicación y aparte de transmitirse esfuerzos en el elemento esbelto también lo hace hacia los elementos anclados, generando puntos de concentración de esfuerzos en la ubicación de las barras.

El número de repeticiones admisibles en cada uno de los elementos admisibles debido a una carga y a las respuestas de la subrasante presenta variaciones dependiendo de la relación de esbeltez pero la resistencia del hormigón utilizado para la construcción del sobreancho juega un papel fundamental con respecto a la vida útil de los elementos de pavimento rígido construidos.

Los porcentajes de consumo calculados mediante el método de la Portland Cement Association (PCA) dependen también de la sección del elemento estudiado, es claro que mientras las relaciones de esbeltez son superiores a 1.4 los porcentajes de consumo aumentan principalmente por fatiga dado que la forma del elemento actúa directamente en la repuesta de la subrasante, en cambio si la resistencia del hormigón con el que se ha construido el sobreancho va disminuyendo, los porcentajes de fatiga por esfuerzo aumentan considerablemente.

Considerando todos estos antecedentes se puede concluir que la falta de estudios y de normativas constructivas de las secciones de sobreancho han dado lugar a la construcción de sobreanchos en las carreteras de maneras poco recomendables, los distintos métodos constructivos no han sido analizados de una manera técnica, por el contrario, se han cometido errores constructivos que podrían llamarse “de buena fe” en búsqueda de un método que garantice la calidad de las vías, los resultados demuestran que la construcción de sobreanchos como cuñas de pavimento construídos de manera aislada generan esfuerzos y porcentajes de consumo considerables, esto sumado a que la reducción de la sección implica una menor vida útil y muy posiblemente la falla del elemento esbelto. La segunda metodología utilizada para la construcción del sobreancho dentro de la cuneta implica un paño de sección rectangular cuya relación de esbeltez está dentro de los parámetros recomendados, sin embargo, la baja resistencia de este hormigón (puesto que no está diseñado para la circulación vehicular) hace que el tránsito por este elemento disminuya muy considerablemente la vida útil en este caso de la cuneta que al fisurarse provocará infiltraciones hacia la subrasante en la cual se asienta la vía. Esta alternativa se constituye en la más desfavorable para la construcción del sobreancho coincidentalmente esta metodología es popular entre los constructores, generalmente, estos efectos no se verán inmediatamente sino después de haber permitido la circulación vehicular.

Dentro de la tercera opción constructiva se puede verificar que utilizando varillas de anclaje un porcentaje considerable de esfuerzos es transmitido a las losas contiguas lo que implica que una construcción del sobreancho en el eje de la vía de cualquier manera resulta menos perjudicial, sin embargo, los elementos continúan siendo esbeltos haciendo que los esfuerzos en cada sección sean considerables y que la vida útil de igual forma sea menor.

Como alternativa constructiva se puede indicar que la construcción del sobreancho como una cuña de pavimento rígido en el borde de la calzada puede mejorar considerablemente en relación a los esfuerzos y deformaciones producidas en el mismo únicamente haciendo coincidir las juntas de las cunetas con el sobreancho, el resultado de esta acción generará una vida útil mayor y esfuerzos menores. Obtenido este resultado, se recomienda realizar esta acción en las vías actualmente construidas con este proceso constructivo realizando un correcto mantenimiento de sellado de juntas.

Como conclusión de todas las alternativas, la fundición monolítica entre la calzada y el sobreancho se constituye en el proceso constructivo más recomendable desde todos los puntos de vista, desde los esfuerzos, las deformaciones, la vida útil y los porcentajes de consumo de fatiga y erosión. Los requerimientos para realizar este tipo de fundición cuando se construye una vía con una pavimentadora de encofrado deslizante no se comparan con los beneficios de construir elementos monolíticos. Este tipo de procedimiento se encamina a ser el adecuado para optimizar recursos y representar ahorros considerables tanto en la construcción como en el mantenimiento de las carreteras. Las mismas hasta el día de hoy se presentan como estructuras viales que agilitan el proceso de desarrollo de nuestro país que experimenta cada día una mejor comunicación terrestre por este tipo de obras.

6. Recomendaciones

Después de analizar la problemática y los resultados de la presente investigación se puede recomendar lo siguiente:

- Dado que esta investigación aborda un tema poco estudiado, se recomienda validar los resultados obtenidos con ensayos de campo en losas de prueba, o por medio de evaluaciones en secciones de sobreancho construidas en las diferentes vías.
- Al determinarse que las secciones que cuya relación de esbeltez se encuentre entre $L/B = 1 - 1,4$, es recomendable identificar las vías construidas con un sobreancho en forma de cuña en el borde de la calzada, esto con el fin de continuar las juntas en estas secciones coincidentes con las juntas en las cunetas y realizar el correspondiente sellado de las mismas. Aplicando esta recomendación se garantizará una mejor respuesta de la subrasante en estas secciones, esfuerzos menores y por consiguiente una mayor vida útil de estos elementos.
- Se sugiere continuar con la investigación considerando sistemas de losas unidas con dowels para analizar esta transferencia, recordando que esta investigación realiza análisis de paños de hormigón individuales.
- Se recomienda analizar la posibilidad de preparar una metodología constructiva adecuada que deberá ser incluida en las normativas de construcción nacionales con el fin de evitar diferentes criterios, esta investigación recomienda la segunda alternativa en donde se procura construir el sobreancho y la losa de calzada al mismo tiempo con el fin de obtener una estructura (calzada + sobreancho) monolítica.

7. ANEXOS

7.1. Cálculos cuñas de hormigón en el borde 4,5 MPa

7.1.1. Sección de sobreancho máxima 4,65X1,00 m

Corrección de subrasante

Datos de entrada:

B	1.00	m
L	4.65	m
k	30	MPa/m

De la ecuación 10 se tiene:

$$k_s = \frac{E_s}{1-\nu^2} I$$

I es el factor que depende de la forma de la cimentación. De la ecuación 11 se tiene:

$$I = \frac{m^{1/2}}{T_m} = 0,46$$

Por lo tanto el k corregido es:

$$k_s = 15,85 \text{ MPa}$$

Análisis Tensional del Elemento

Dentro del análisis tensional del elemento se analizan 3 esfuerzos puntuales:

- Por alabeo
- Por cargas y,
- Por fricción.

Los datos a utilizarse para el análisis se especifican en el cuadro 49.

- Esfuerzos por Alabeo

Radio de rigidez relativa.- De acuerdo a (19):

$$Lr = \sqrt[4]{\frac{EH^3}{12(1-\nu^2)k}} = 75,67 \text{ cm}$$

De esta forma al dividir el largo y el ancho de la losa de estudio para el radio de rigidez relativa se obtiene un valor, el mismo que se compara con la figura 18 para encontrar los coeficientes de bradbury.



DATOS			
Mr	15.85	kg/cm ³	Módulo de reacción de la subbase
Lx	465	cm	Longitud x
Ly	100	cm	Longitud y
Ec	309740.30	kg/cm ²	Módulo elástico del concreto
Sc	45.89	kg/cm ²	Módulo de ruptura
μ	0.15		Coefficiente de Poisson
Δt	22	$\Delta ^\circ\text{C}$	Diferencial de temperatura
α	0.000009	cm/ $\Delta ^\circ\text{C}$	Coefficiente de expansión térmica
h	27	cm	Espesor de la losa
f	1.5		Coefficiente de fricción
w	0.0024	kg/cm ³	Peso de la losa

Cuadro 48: Datos de entrada para análisis tensional.

$$\begin{aligned} l_x/L_r &= 6,15 & C1 &= 0,91 = C_x \\ l_y/L_r &= 1,32 & C2 &= 0,001 = C_y \end{aligned}$$

Esfuerzos en el borde longitudinal.- De acuerdo a (30):

$$\sigma_{tb} = \frac{CE\alpha\Delta t}{2} = 27,89 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en el interior de la losa.- De acuerdo a (31):

$$\sigma_{ti} = \frac{E\alpha\Delta t}{2} \left[\frac{C_x + uC_y}{1-u^2} \right] = 28,54 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en la esquina de la losa.- De acuerdo a (32):

$$\sigma_e = \frac{E\alpha\Delta t}{3(1-u)} \left[\sqrt{\frac{a}{L_r}} \right] = 8,59 \text{ kg/cm}^2$$

■ Esfuerzos por efectos del tráfico

Para realizar el análisis por efectos del tráfico se utilizará una carga puntual equivalente a un neumático de un camión tipo, esto es una carga de 4100 kg, la presión de inflado del neumático utilizada para todos los casos de estudio es de 14 kg/cm².

- 1) *Carga Aplicada:* $P = 4100 \text{ kg}$.
- 2) *Número de ruedas:* 1
- 3) *Presión de ruedas:* 14 kg/cm²
- 4) *Carga por rueda:* 4100 kg.
- 5) *Area de contacto por rueda:* $(4)/(3) = 292,85 \text{ cm}^2$

Radio de contacto equivalente

De la ecuación 16 se tiene:

$$a = \sqrt[2]{\frac{A_T}{\pi}} = 9,66$$

Radio ficticio de la distribución de carga, b

De la ecuación 17 y 18 se tiene:

$$b = \sqrt[3]{1,6a^2 + h^2} - 0,675h \quad \text{si} \quad a < 1,724h$$

$$b = a \quad \text{si} \quad a > 1,724h$$

$$b=11.41$$

Relaciones para obtener coeficientes de Westergard

$$L/b = 6.63$$

$$a/L = 0.13$$

Esfuerzos en el interior de la losa

De acuerdo a la ecuación 20 se tiene:

$$\sigma_t = 0,31625 \frac{P}{H^2} \left(4 \log_{10} \frac{L_r}{b} + 1,0693 \right) = 8,61 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en el borde de la losa

De acuerdo a la ecuación 26 se tiene:

$$\sigma_t = 0,57185 \frac{P}{2H^2} \left(4 \log_{10} \frac{L_r}{b} + 0,3593 \right) = 13,29 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en la esquina de la losa

De acuerdo a la ecuación 24 se tiene:

$$\sigma_e = \frac{3P}{H^2} \left[1 - \left(\frac{1,414a}{L_r} \right)^{1,2} \right] = 16,63 \text{ kg/cm}^2$$

- Esfuerzos por efectos de la fricción

De la ecuación 33 se tiene:

$$\sigma_t = \frac{wfL}{2} = 11,92 \text{ psi} = 0,837 \text{ kg/cm}^2$$

Un resumen de las tensiones obtenidas se encuentra en el cuadro 50.

Tipos de esfuerzos	Esfuerzos obtenidos (kg/cm2)		
	Esquina	Borde	Interior
Alabeo	8.59	27.89	28.54
Carga	16.63	13.29	8.61
Fricción	0.837	0.837	0.837
Totales	26.06	42.02	37.99

Cuadro 49: Resumen de tensiones losa 4.65x1.00.

Análisis por elementos finitos:

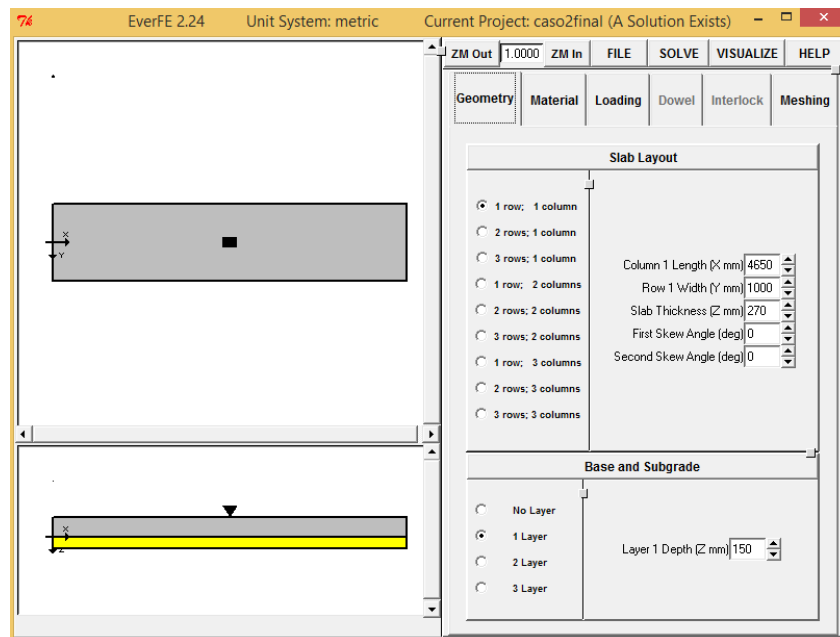


Figura 72: Modelación del elemento.

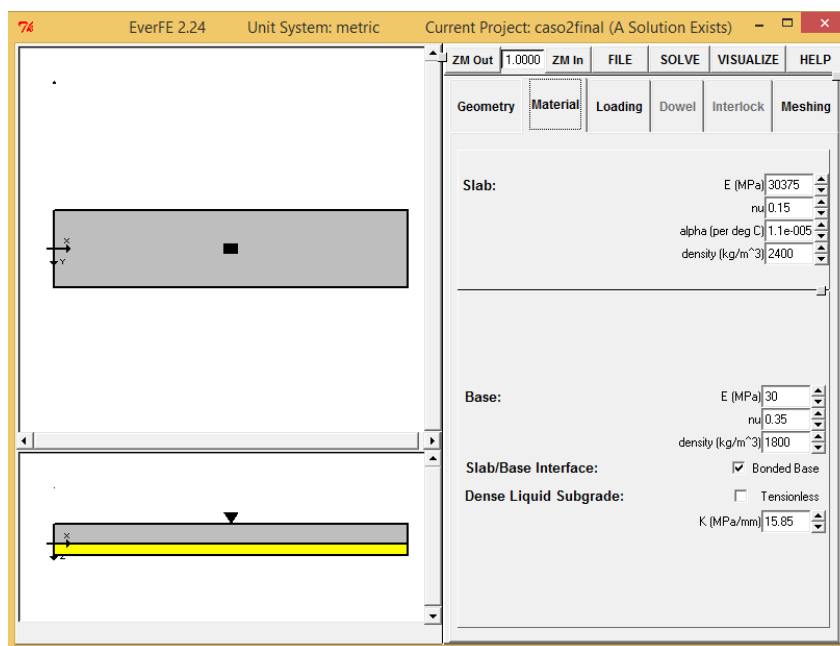


Figura 73: Modelación de materiales.

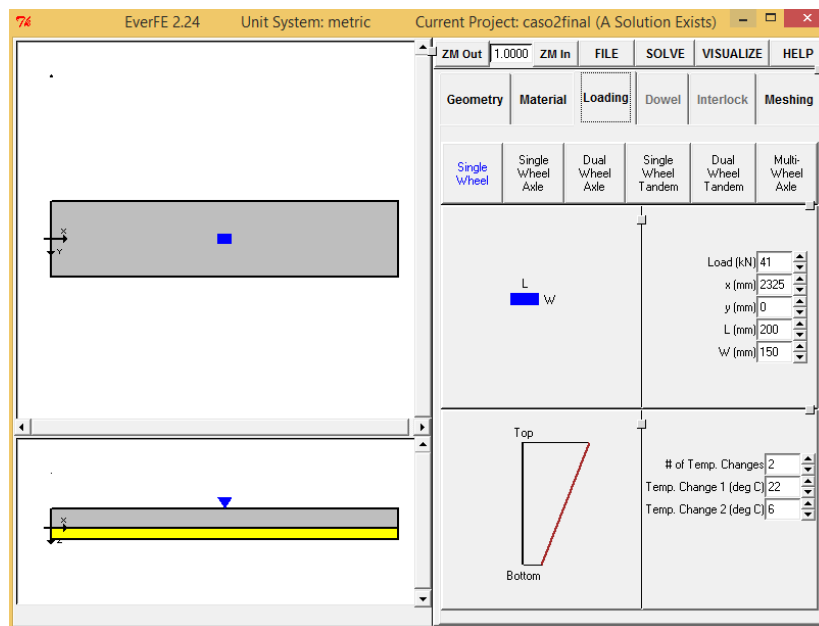


Figura 74: Modelación de cargas.

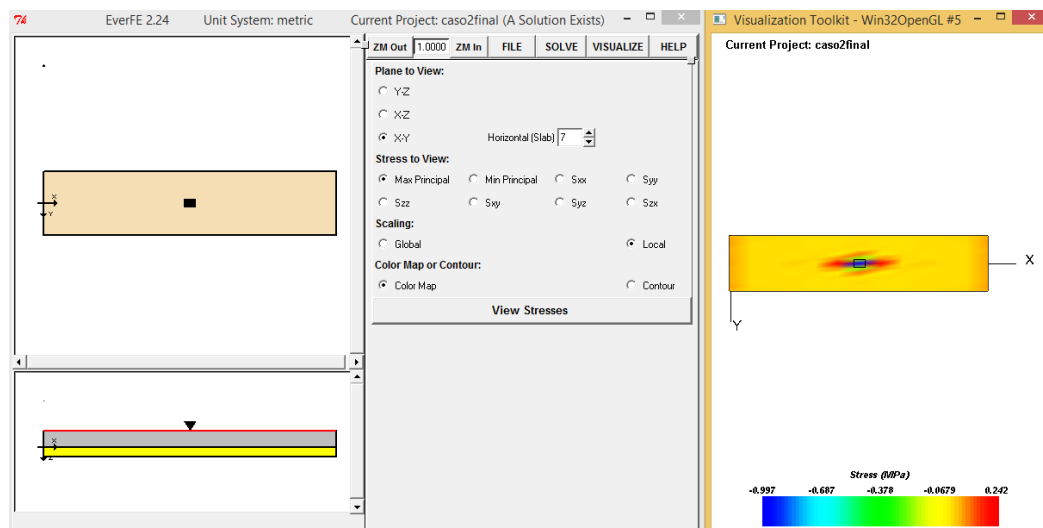


Figura 75: Esfuerzos en la superficie de la losa.

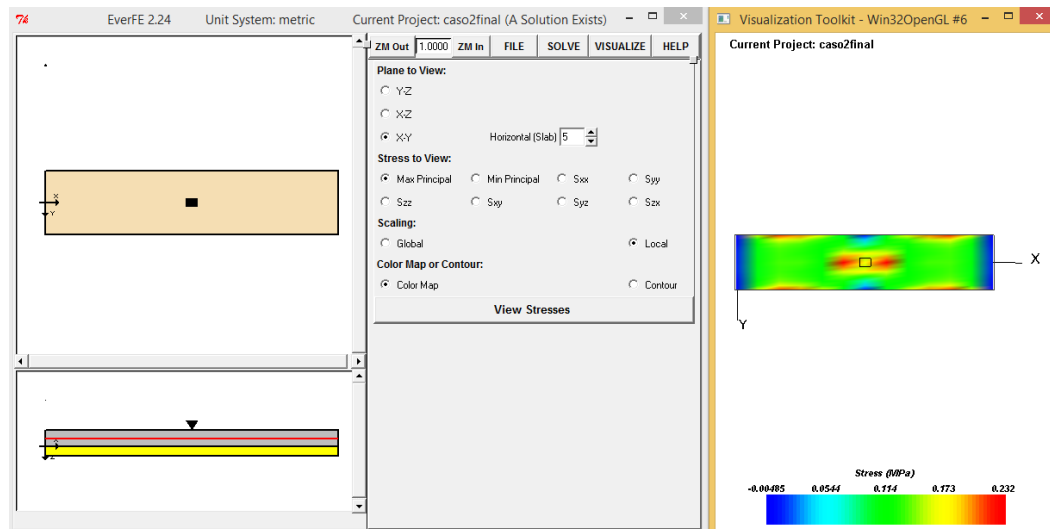


Figura 76: Esfuerzos en el interior de la losa.

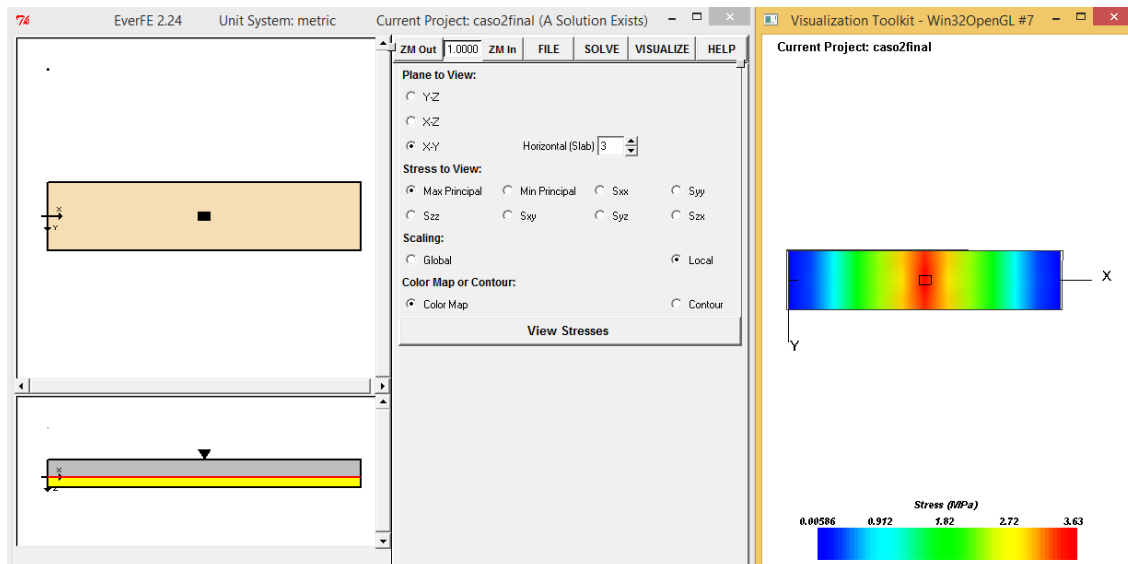


Figura 77: Esfuerzos en la base de la losa.

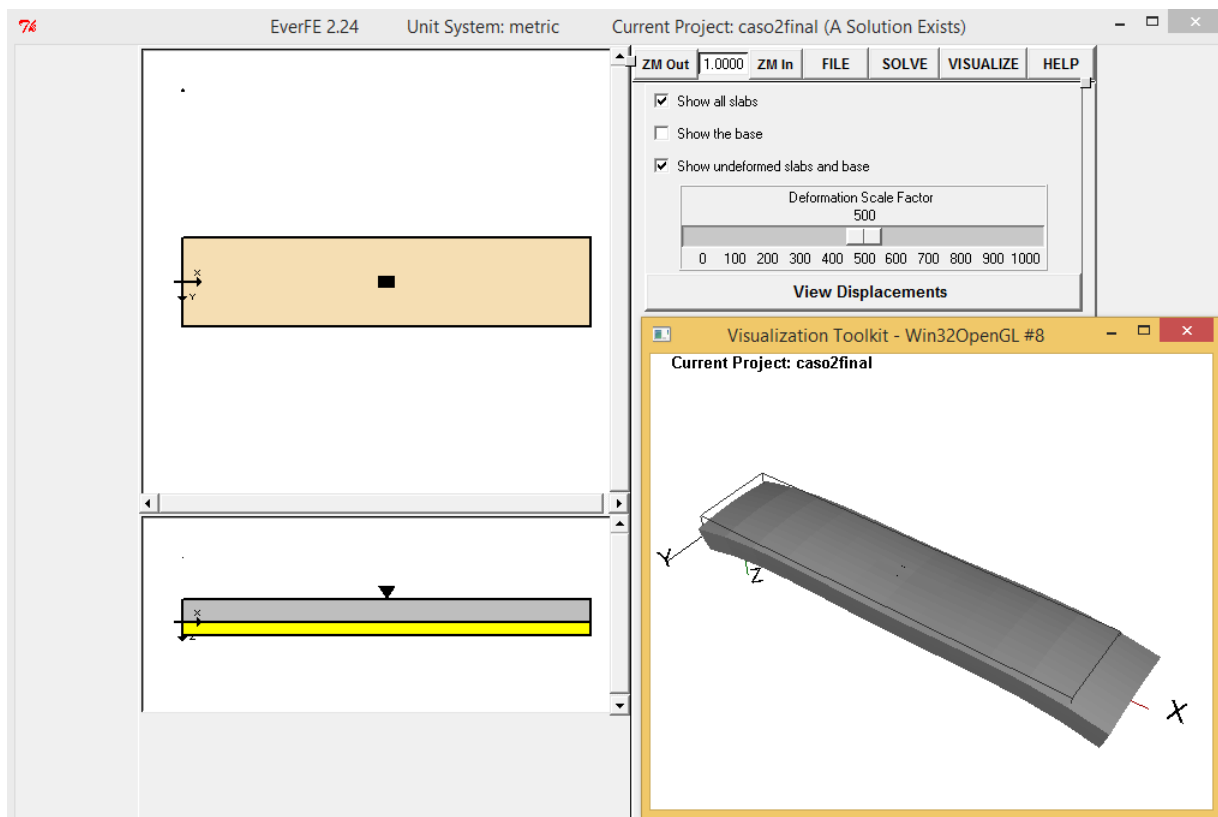


Figura 78: Deformación de la losa.

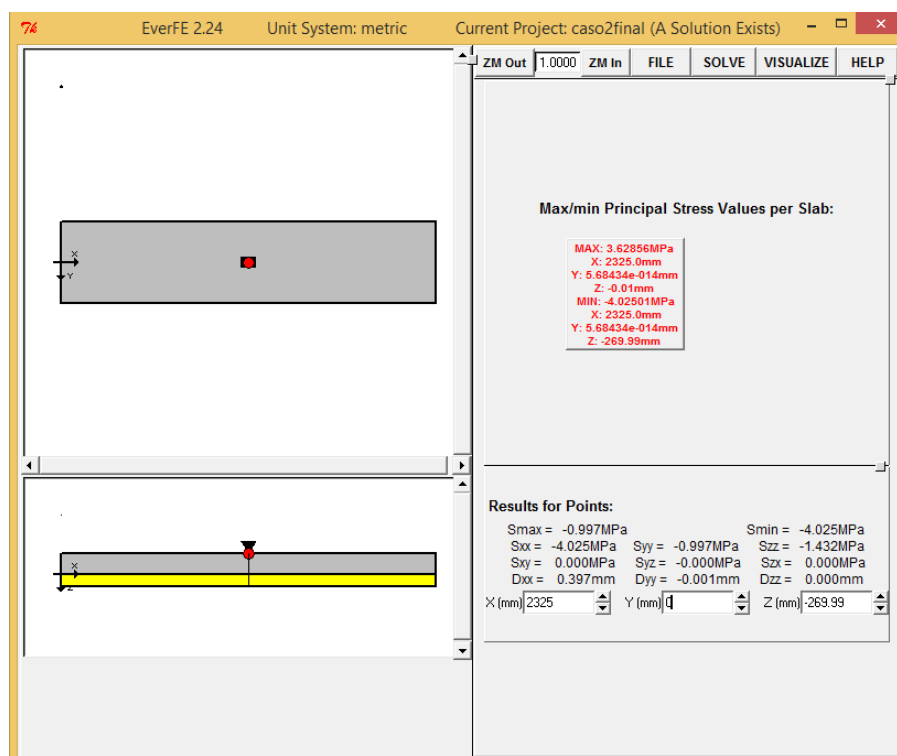


Figura 79: Esfuerzos Máximos .

REPETICIONES ADMISIBLES



Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento:
☐ Pavimento flexible ☒ Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So):
 90 % $Z_r = -1.282$ So: 0.35

Serviciabilidad inicial y final:
 PSI inicial: 4.5 PSI final: 2.5

Módulo de reacción de la subrasante:
 k: 2298.85 pci

Información adicional para pavimentos rígidos:

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi):	4405529.25	Coeficiente de transmisión de carga - (J):	3.8
Módulo de rotura del concreto - S_c (psi):	652.671	Coeficiente de drenaje - (Cd):	1

Tipo de Análisis:
☐ Calcular D ☒ Calcular W18

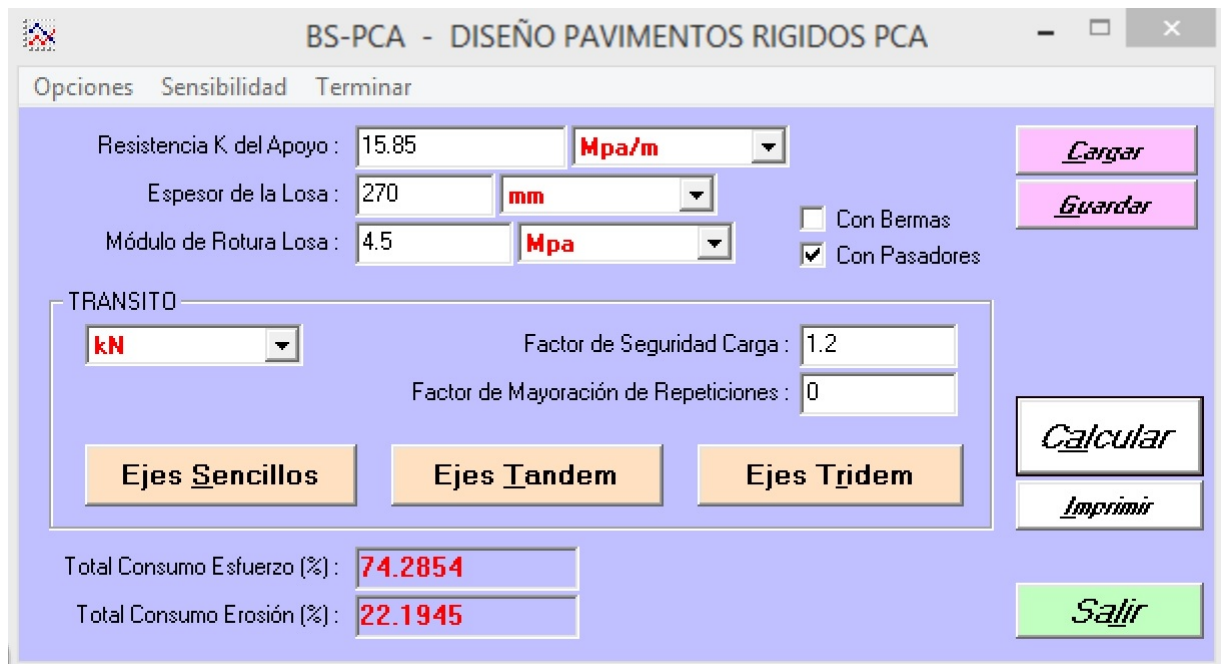
D = 10.63

Ejes de 18 kips:
W18 = 27925011

Calcular Salir

Figura 80: Número de Repeticiones Admisibles.

ESFUERZO DE FATIGA Y EROSIÓN



BS-PCA - DISEÑO PAVIMENTOS RIGIDOS PCA

Opciones Sensibilidad Terminar

Resistencia K del Apoyo: 15.85 Mpa/m

Espesor de la Losa: 270 mm

Módulo de Rotura Losa: 4.5 Mpa

☐ Con Bermas ☒ Con Pasadores

TRANSITO: kN

Factor de Seguridad Carga: 1.2

Factor de Mayoración de Repeticiones: 0

Ejes Sencillos Ejes Tandem Ejes Tridem

Total Consumo Esfuerzo (%): 74.2854

Total Consumo Erosión (%): 22.1945

Calcular Imprimir Salir

Figura 81: Porcentaje de Consumo Esfuerzos.

7.1.2. Sección de sobreancho reducida 4,65X0,50 m

Corrección de subrasante

Datos de entrada:

B	0.50	m
L	4.65	m
k	30	MPa/m

De la ecuación 10 se tiene:

$$k_s = \frac{E_s}{1-\nu^2} I$$

I es el factor que depende de la forma de la cimentación. De la ecuación 11 se tiene:

$$I = \frac{m^{1/2}}{T_m} = 0,33$$

Por lo tanto el k corregido es:

$$k_s = 11,21 \text{ MPa}$$

Análisis Tensional del Elemento

Dentro del análisis tensional del elemento se analizan 3 esfuerzos puntuales:

- Por alabeo
- Por cargas y,
- Por fricción.

Los datos a utilizarse para el análisis se especifican en el cuadro 51.

DATOS			
Mr	11.21	kg/cm3	Módulo de reacción de la subbase
Lx	465	cm	Longitud x
Ly	50	cm	Longitud y
Ec	309740.30	kg/cm2	Módulo elástico del concreto
Sc	45.89	kg/cm2	Módulo de ruptura
μ	0.15		Coefficiente de Poisson
Δt	22	$\Delta ^\circ\text{C}$	Diferencial de temperatura
α	0.000009	cm/ $\Delta ^\circ\text{C}$	Coefficiente de expansión térmica
h	27	cm	Espesor de la losa
f	1.5		Coefficiente de fricción
w	0.0024	kg/cm3	Peso de la losa

Cuadro 50: Datos de entrada para análisis tensional.



■ Esfuerzos por Alabeo

Radio de rigidez relativa.- De acuerdo a (19):

$$Lr = \sqrt[4]{\frac{EH^3}{12(1-u^2)k}} = 82,52 \text{ cm}$$

De esta forma al dividir el largo y el ancho de la losa de estudio para el radio de rigidez relativa se obtiene un valor, el mismo que se compara con la figura 18 para encontrar los coeficientes de bradbury.

$$\begin{aligned} lx/Lr &= 5,64 & C1 &= 0,84 = Cx \\ ly/Lr &= 0,61 & C2 &= 0,00 = Cy \end{aligned}$$

Esfuerzos en el borde longitudinal.- De acuerdo a (30):

$$\sigma_{tb} = \frac{CE\alpha\Delta t}{2} = 25,75 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en el interior de la losa.- De acuerdo a (31):

$$\sigma_{ti} = \frac{E\alpha\Delta t}{2} \left[\frac{Cx+uCy}{1-u^2} \right] = 26,35 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en la esquina de la losa.- De acuerdo a (32):

$$\sigma_e = \frac{E\alpha\Delta t}{3(1-u)} \left[\sqrt{\frac{a}{Lr}} \right] = 8,22 \text{ kg/cm}^2$$

■ Esfuerzos por efectos del tráfico

Para realizar el análisis por efectos del tráfico se utilizará una carga puntual equivalente a un neumático de un camión tipo, esto es una carga de 4100 kg, la presión de inflado del neumático utilizada para todos los casos de estudio es de 14 kg/cm².

- 1) *Carga Aplicada:* $P = 4100 \text{ kg}$.
- 2) *Número de ruedas:* 1
- 3) *Presión de ruedas:* 14 kg/cm²
- 4) *Carga por rueda:* 4100 kg.
- 5) *Area de contacto por rueda:* $(4)/(3) = 292,85 \text{ cm}^2$

Radio de contacto equivalente

De la ecuación 16 se tiene:

$$a = \sqrt[2]{\frac{AT}{\pi}} = 9,66$$

Radio ficticio de la distribución de carga, b

De la ecuación 17 y 18 se tiene:



$$b = \sqrt[2]{1,6a^2 + h^2} - 0,675h \quad \text{si} \quad a < 1,724h$$

$$b = a \quad \text{si} \quad a > 1,724h$$

$$b=11.41$$

Relaciones para obtener coeficientes de Westergard

$$L/b = 7.23$$

$$a/L = 0.12$$

Esfuerzos en el interior de la losa

De acuerdo a la ecuación 20 se tiene:

$$\sigma_t = 0,31625 \frac{P}{H^2} \left(4 \log_{10} \frac{L_r}{b} + 1,0693 \right) = 8,02 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en el borde de la losa

De acuerdo a la ecuación 26 se tiene:

$$\sigma_t = 0,57185 \frac{P}{2H^2} \left(4 \log_{10} \frac{L_r}{b} + 0,3593 \right) = 12,21 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en la esquina de la losa

De acuerdo a la ecuación 24 se tiene:

$$\sigma_e = \frac{3P}{H^2} \left[1 - \left(\frac{1,414a}{L_r} \right)^{1,2} \right] = 14,93 \text{ kg/cm}^2$$

- Esfuerzos por efectos de la fricción

De la ecuación 33 se tiene:

$$\sigma_t = \frac{wfL}{2} = 11,92 \text{ psi} = 0,837 \text{ kg/cm}^2$$

Un resumen de las tensiones obtenidas se encuentra en el cuadro 52.

Tipos de esfuerzos	Esfuerzos obtenidos (kg/cm2)		
	Esquina	Borde	Interior
Alabeo	8.23	25.76	26.35
Carga	14.93	12.21	8.02
Fricción	0.837	0.837	0.837
Totales	24.00	38.81	35.20

Cuadro 51: Resumen de tensiones losa 4.65x0.50.

Análisis de la losa por el método de Elementos Finitos:

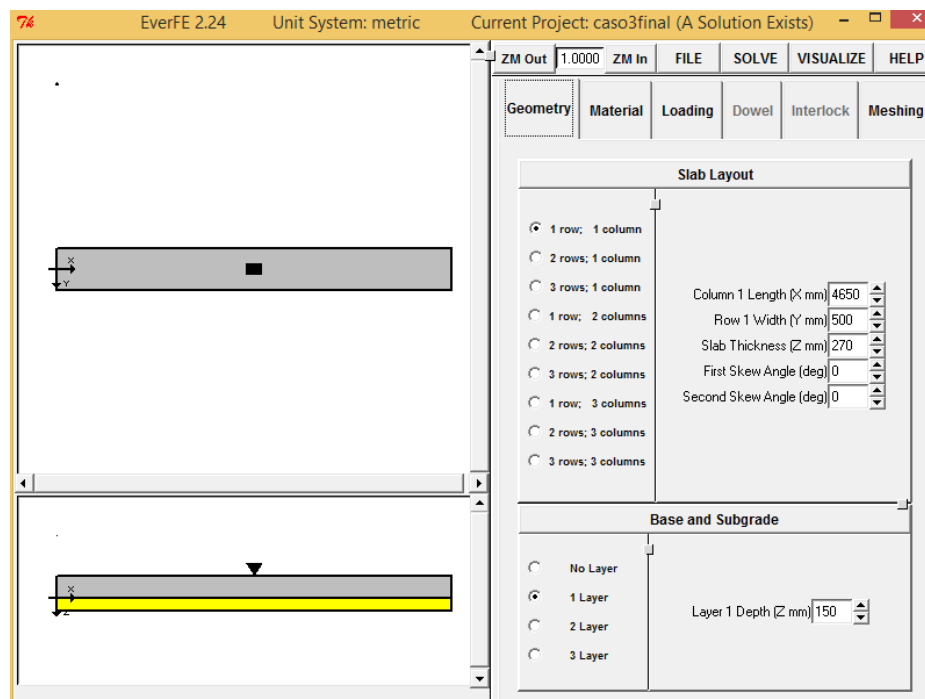


Figura 82: Modelación del elemento.

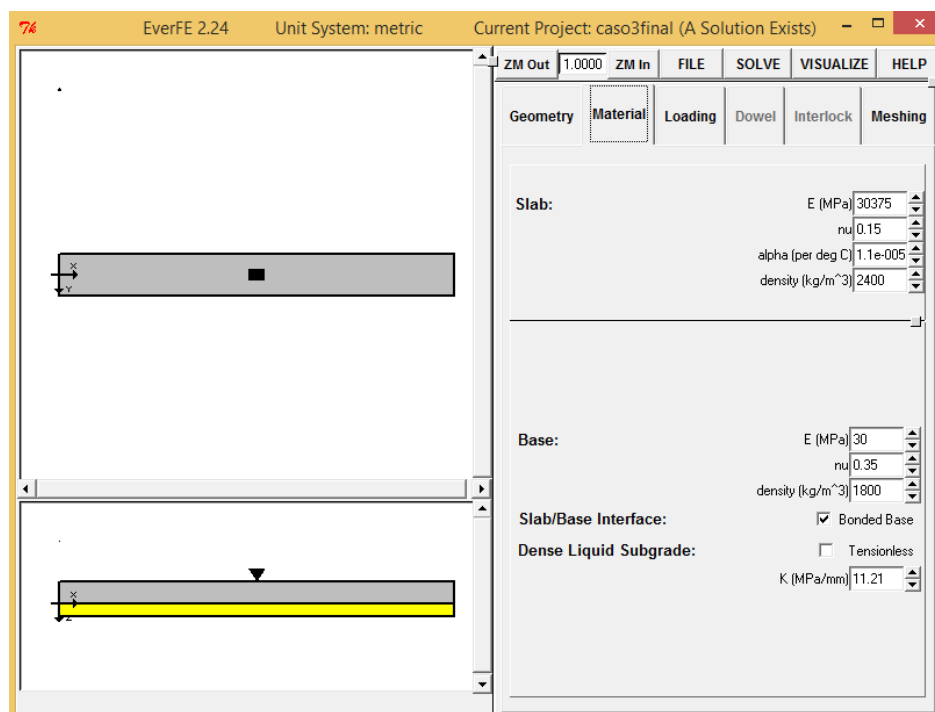


Figura 83: Modelación de materiales.

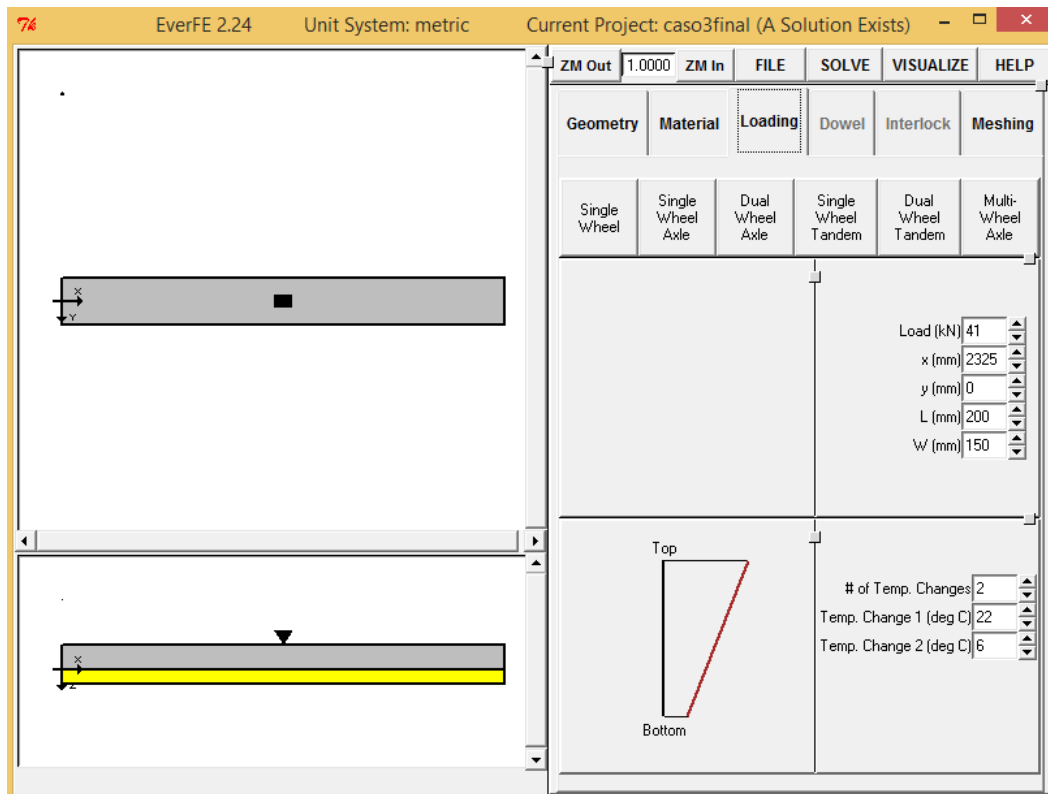


Figura 84: Modelación de cargas.

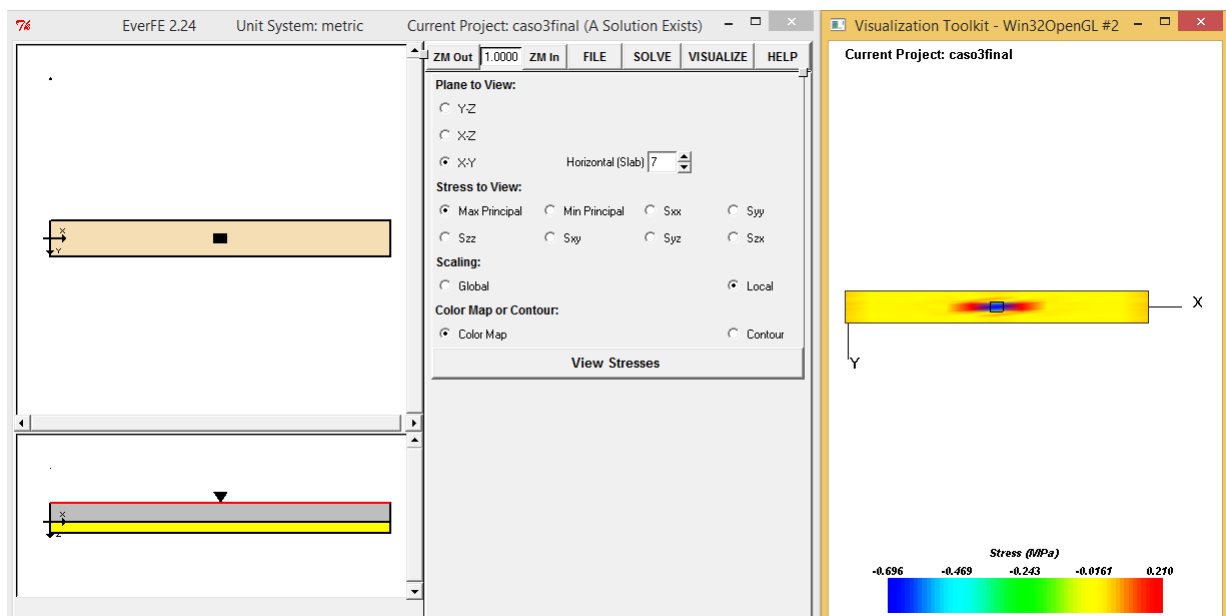


Figura 85: Esfuerzos en la superficie de la losa.

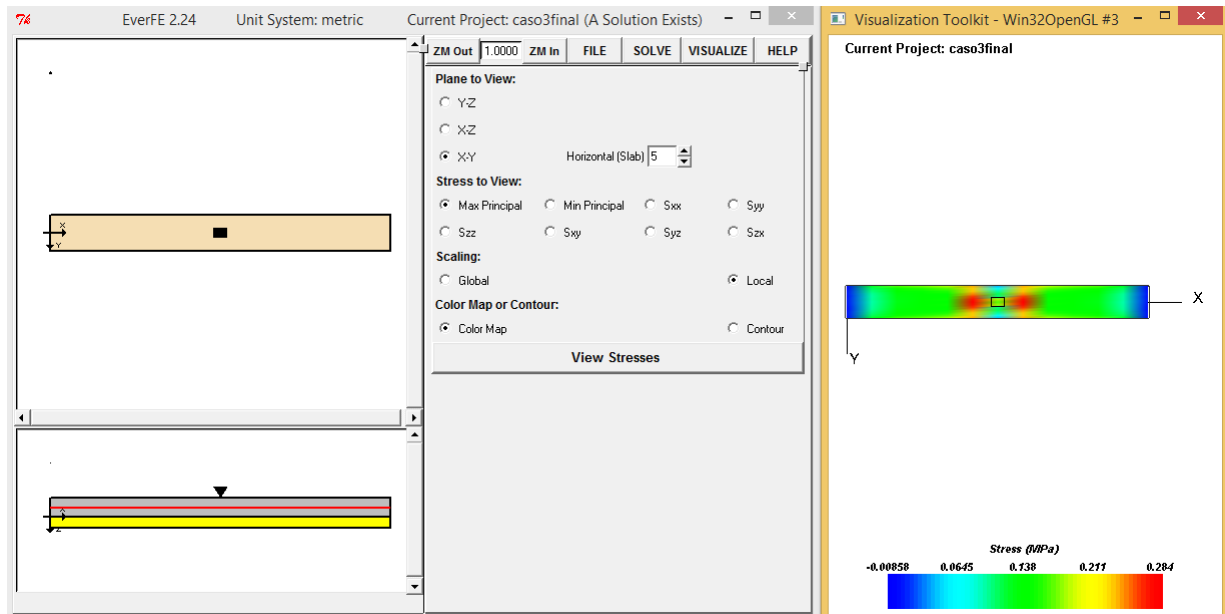


Figura 86: Esfuerzos en el interior de la losa.

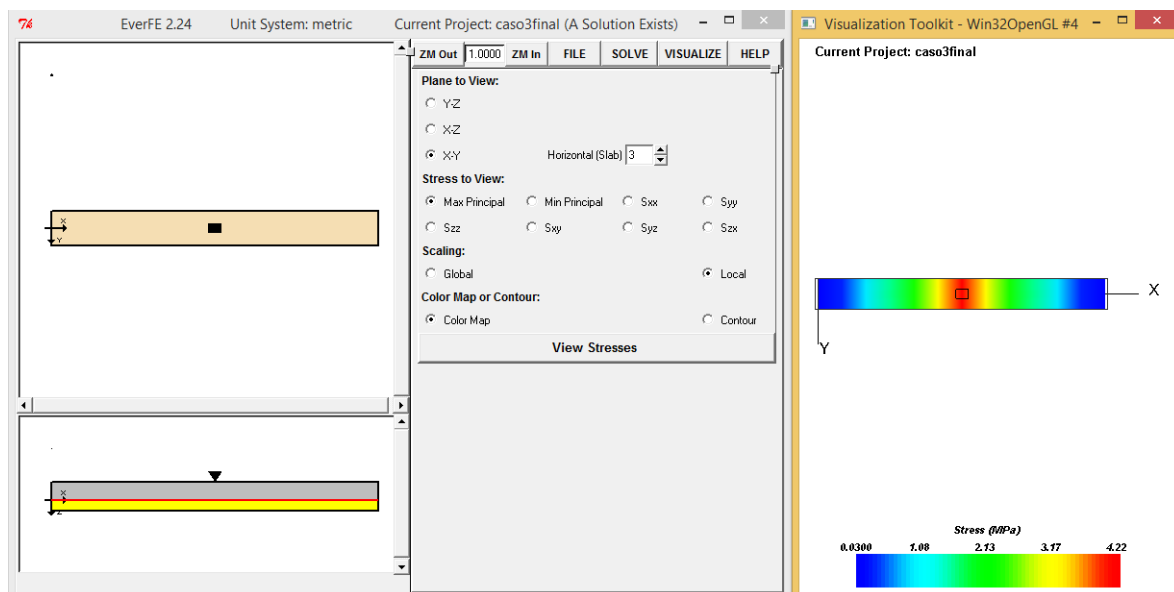


Figura 87: Esfuerzos en la base de la losa.

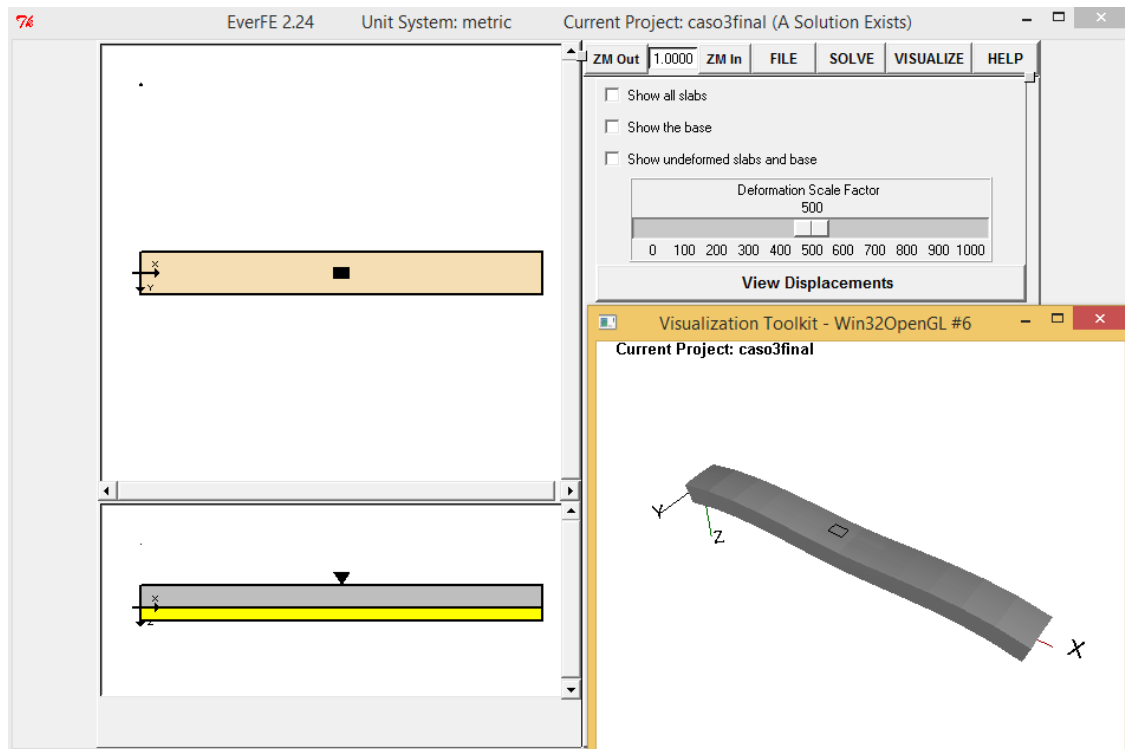


Figura 88: Deformación de la losa.

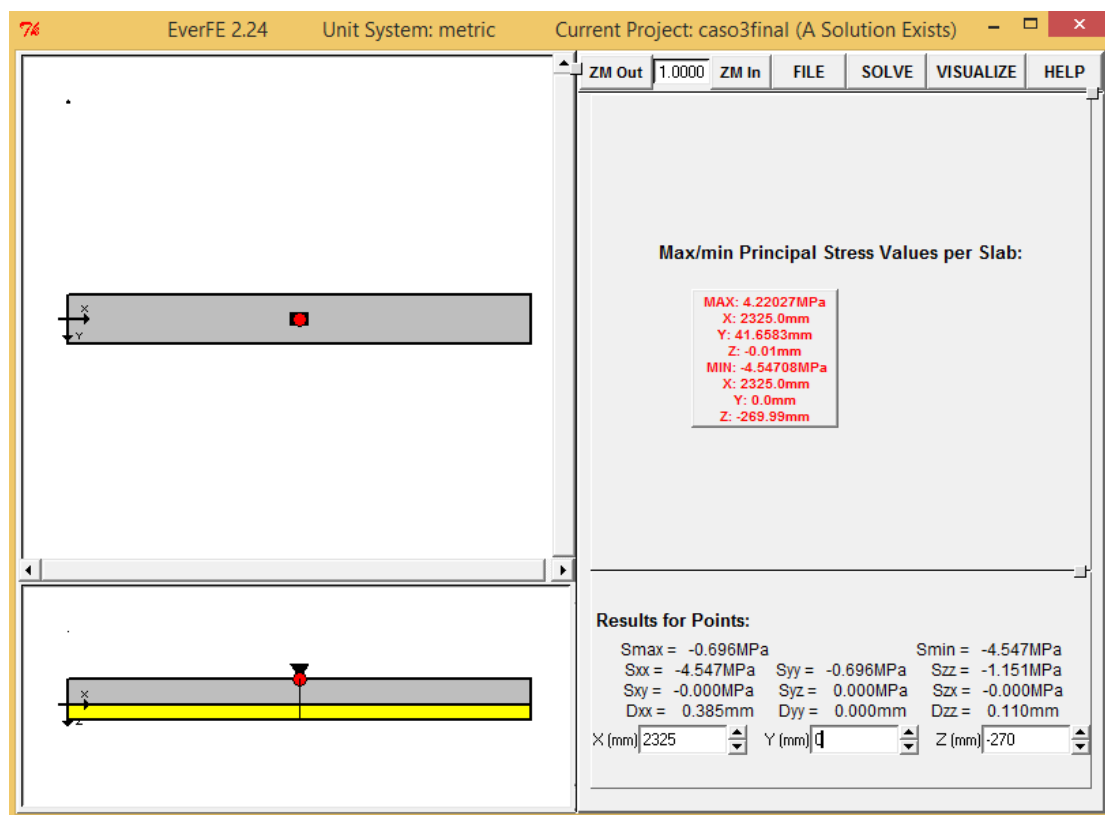
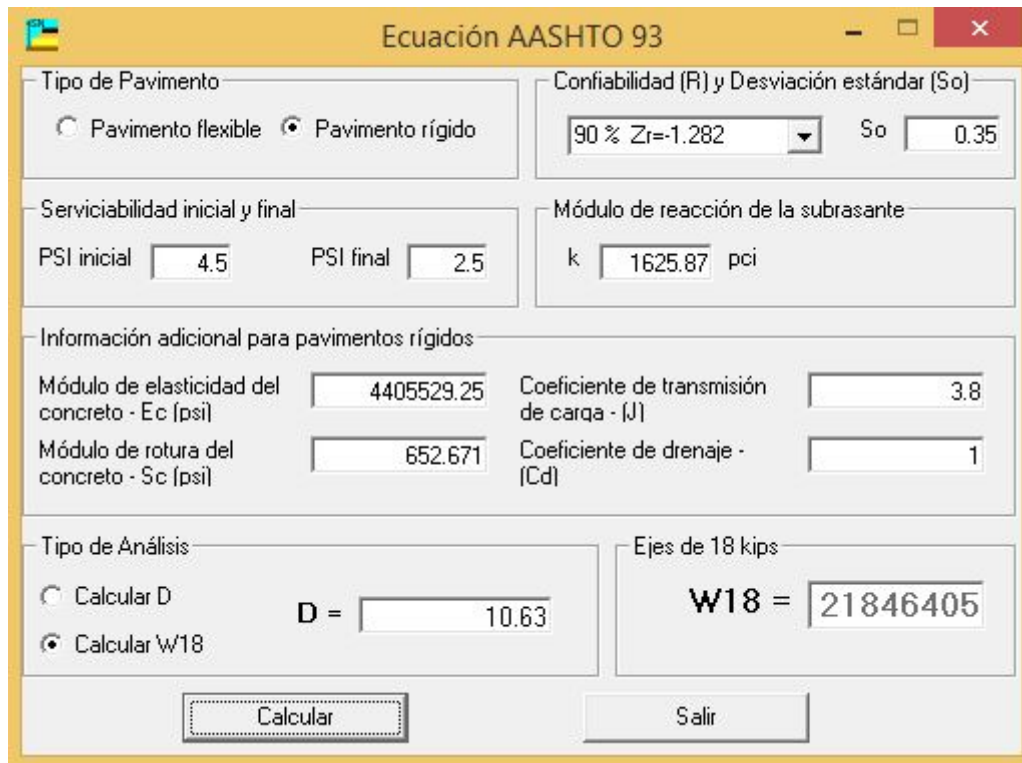


Figura 89: Esfuerzos Máximos .

REPETICIONES ADMISIBLES



Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento:
☐ Pavimento flexible ☒ Pavimento rígido

Confiability (R) y Desviación estándar (So):
 90 % $Z_r = -1.282$ So: 0.35

Serviciabilidad inicial y final:
 PSI inicial: 4.5 PSI final: 2.5

Módulo de reacción de la subrasante:
 k: 1625.87 pci

Información adicional para pavimentos rígidos:

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi):	4405529.25	Coefficiente de transmisión de carga - (J):	3.8
Módulo de rotura del concreto - S_c (psi):	652.671	Coefficiente de drenaje - (Cd):	1

Tipo de Análisis:
☐ Calcular D ☒ Calcular W18

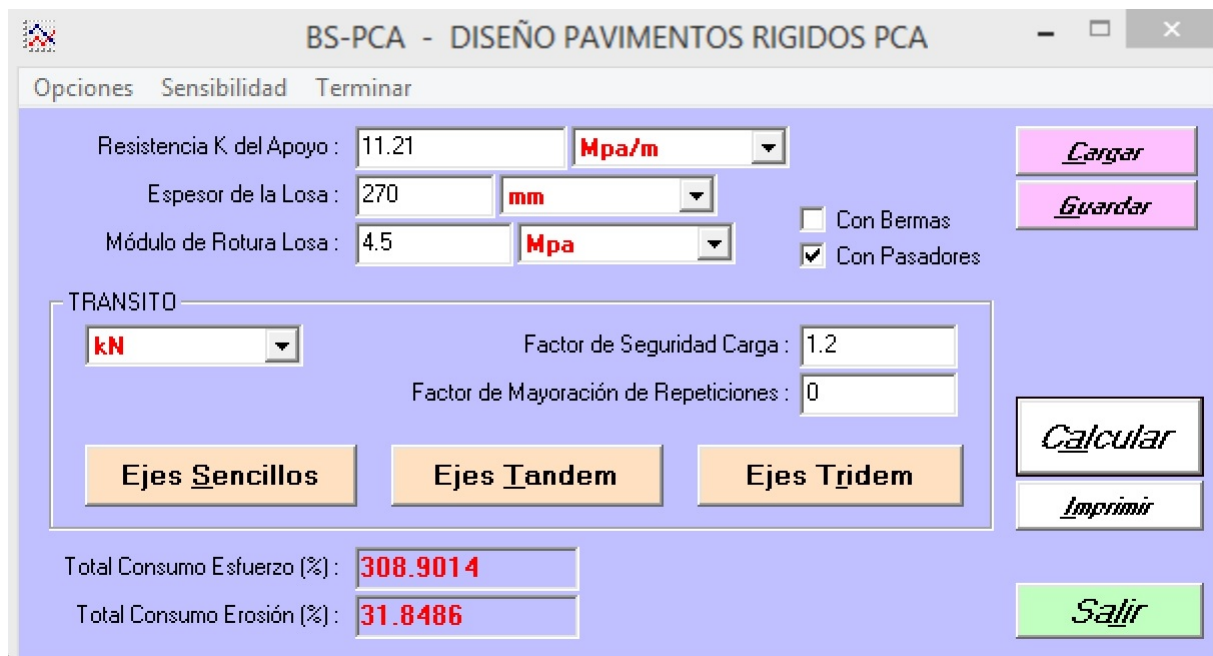
D = 10.63

Ejes de 18 kips:
W18 = 21846405

Calcular Salir

Figura 90: Número de Repeticiones Admisibles.

ESFUERZO DE FATIGA Y EROSIÓN



BS-PCA - DISEÑO PAVIMENTOS RIGIDOS PCA

Opciones Sensibilidad Terminar

Resistencia K del Apoyo: 11.21 Mpa/m

Espesor de la Losa: 270 mm

Módulo de Rotura Losa: 4.5 Mpa

☐ Con Bermas ☒ Con Pasadores

TRANSITO
 kN

Factor de Seguridad Carga: 1.2

Factor de Mayoración de Repeticiones: 0

Ejes Sencillos Ejes Tandem Ejes Tridem

Total Consumo Esfuerzo (%): 308.9014

Total Consumo Erosión (%): 31.8486

Cargar Guardar Calcular Imprimir Salir

Figura 91: Porcentaje de Consumo Esfuerzos.

7.1.3. Sección de sobreancho menor 4,65X0,25 m

Corrección de subrasante

Datos de entrada:

B	0.25	m
L	4.65	m
k	30	MPa/m

De la ecuación 10 se tiene:

$$k_s = \frac{E_s}{1-\nu^2} I$$

I es el factor que depende de la forma de la cimentación. De la ecuación 11 se tiene:

$$I = \frac{m^{1/2}}{T_m} = 0,23$$

Por lo tanto el k corregido es:

$$k_s = 7,93 \text{ MPa}$$

Análisis Tensional del Elemento

Dentro del análisis tensional del elemento se analizan 3 esfuerzos puntuales:

- Por alabeo
- Por cargas y,
- Por fricción.

Los datos a utilizarse para el análisis se especifican en el cuadro 53.

DATOS			
Mr	7.93	kg/cm3	Módulo de reacción de la subbase
Lx	465	cm	Longitud x
Ly	25	cm	Longitud y
Ec	309740.30	kg/cm2	Módulo elástico del concreto
Sc	45.89	kg/cm2	Módulo de ruptura
μ	0.15		Coefficiente de Poisson
Δt	22	$\Delta ^\circ\text{C}$	Diferencial de temperatura
α	0.000009	cm/ $\Delta ^\circ\text{C}$	Coefficiente de expansión térmica
h	27	cm	Espesor de la losa
f	1.5		Coefficiente de fricción
w	0.0024	kg/cm3	Peso de la losa

Cuadro 52: Datos de entrada para análisis tensional.



■ Esfuerzos por Alabeo

Radio de rigidez relativa.- De acuerdo a (19):

$$Lr = \sqrt[4]{\frac{EH^3}{12(1-u^2)k}} = 88,98 \text{ cm}$$

De esta forma al dividir el largo y el ancho de la losa de estudio para el radio de rigidez relativa se obtiene un valor, el mismo que se compara con la figura 18 para encontrar los coeficientes de bradbury.

$$\begin{aligned} lx/Lr &= 5,17 & C1 &= 0,76 = Cx \\ ly/Lr &= 0,28 & C2 &= 0,00 = Cy \end{aligned}$$

Esfuerzos en el borde longitudinal.- De acuerdo a (30):

$$\sigma_{tb} = \frac{CE\alpha\Delta t}{2} = 23,27 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en el interior de la losa.- De acuerdo a (31):

$$\sigma_{ti} = \frac{E\alpha\Delta t}{2} \left[\frac{C_x + uC_y}{1-u^2} \right] = 23,81 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en la esquina de la losa.- De acuerdo a (32):

$$\sigma_e = \frac{E\alpha\Delta t}{3(1-u)} \left[\sqrt{\frac{a}{Lr}} \right] = 7,88 \text{ kg/cm}^2$$

■ Esfuerzos por efectos del tráfico

Para realizar el análisis por efectos del tráfico se utilizará una carga puntual equivalente a un neumático de un camión tipo, esto es una carga de 4100 kg, la presión de inflado del neumático utilizada para todos los casos de estudio es de 14 kg/cm².

- 1) *Carga Aplicada:* $P = 4100 \text{ kg}$.
- 2) *Número de ruedas:* 1
- 3) *Presión de ruedas:* 14 kg/cm²
- 4) *Carga por rueda:* 4100 kg.
- 5) *Area de contacto por rueda:* (4)/(3) = 292,85 cm²

Radio de contacto equivalente

De la ecuación 16 se tiene:

$$a = \sqrt[2]{\frac{A_T}{\pi}} = 9,66$$

Radio ficticio de la distribución de carga, b

De la ecuación 17 y 18 se tiene:



$$b = \sqrt[2]{1,6a^2 + h^2} - 0,675h \quad \text{si} \quad a < 1,724h$$

$$b = a \quad \text{si} \quad a > 1,724h$$

$$b=11.41$$

Relaciones para obtener coeficientes de Westergard

$$L/b = 7.89$$

$$a/L = 0.11$$

Esfuerzos en el interior de la losa

De acuerdo a la ecuación 20 se tiene:

$$\sigma_t = 0,31625 \frac{P}{H^2} \left(4 \log_{10} \frac{L_r}{b} + 1,0693 \right) = 8,28 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en el borde de la losa

De acuerdo a la ecuación 26 se tiene:

$$\sigma_t = 0,57185 \frac{P}{2H^2} \left(4 \log_{10} \frac{L_r}{b} + 0,3593 \right) = 12,70 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en la esquina de la losa

De acuerdo a la ecuación 24 se tiene:

$$\sigma_e = \frac{3P}{H^2} \left[1 - \left(\frac{1,414a}{L_r} \right)^{1,2} \right] = 15,12 \text{ kg/cm}^2$$

- Esfuerzos por efectos de la fricción

De la ecuación 33 se tiene:

$$\sigma_t = \frac{wfL}{2} = 11,92 \text{ psi} = 0,837 \text{ kg/cm}^2$$

Un resumen de las tensiones obtenidas se encuentra en el cuadro 54.

Tipos de esfuerzos	Esfuerzos obtenidos (kg/cm2)		
	Esquina	Borde	Interior
Alabeo	7.88	23.27	23.81
Carga	15.12	12.70	8.28
Fricción	0.837	0.837	0.837
Totales	23.84	36.81	32.93

Cuadro 53: Resumen de tensiones losa 4.65x0.25.

Análisis de la losa por el método de Elementos Finitos:

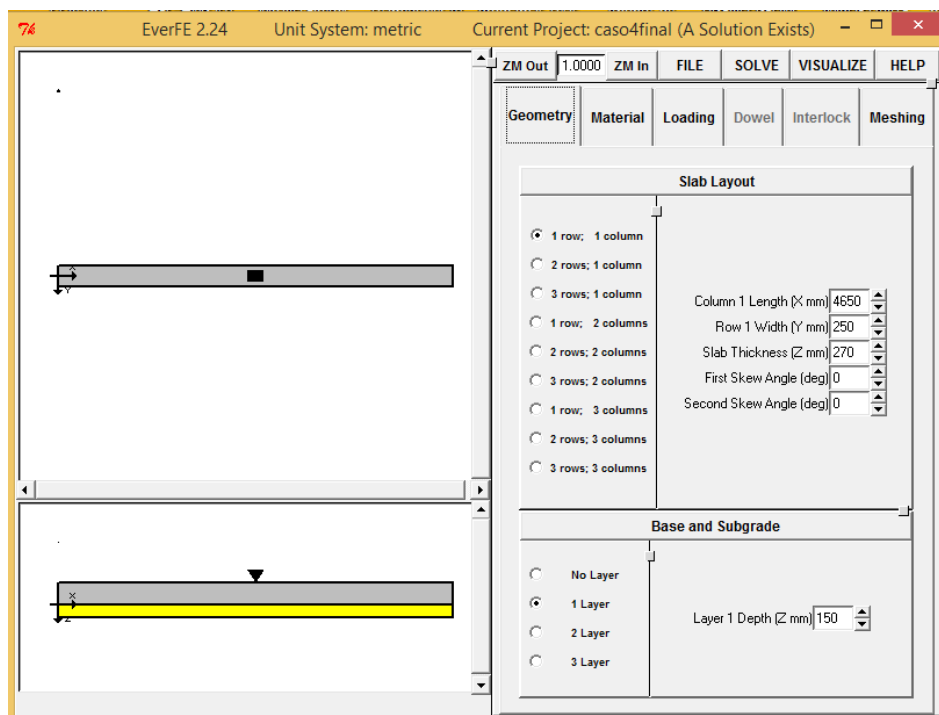


Figura 92: Modelación del elemento.

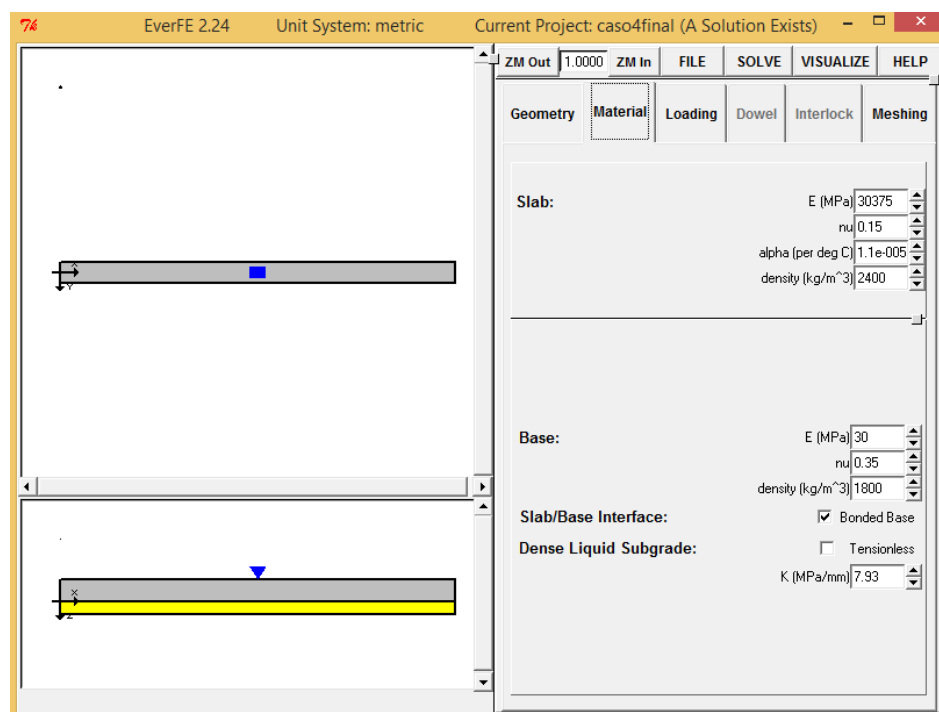


Figura 93: Modelación de materiales.

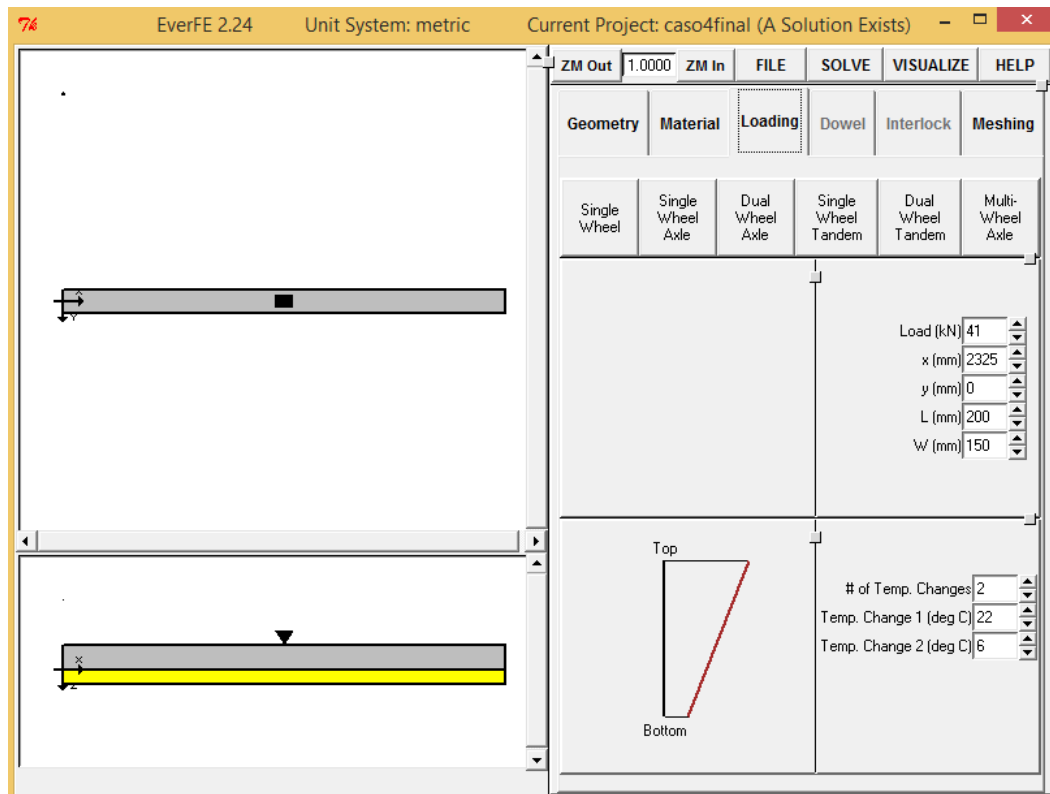


Figura 94: Modelación de cargas.

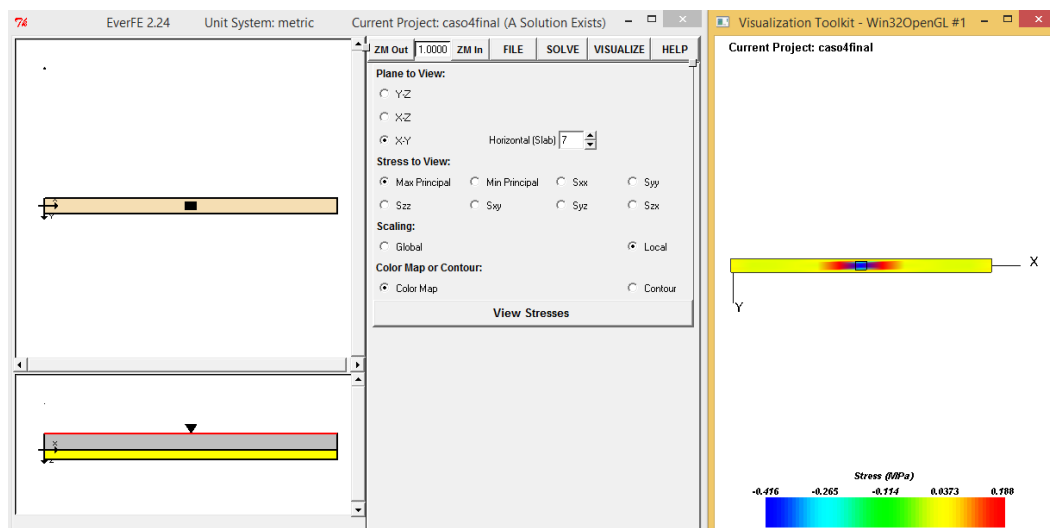


Figura 95: Esfuerzos en la superficie de la losa.

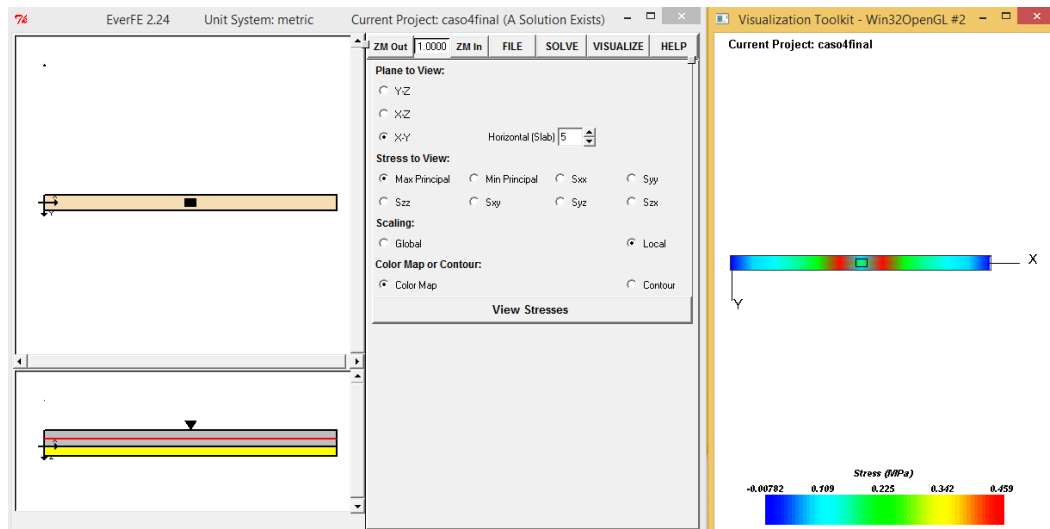


Figura 96: Esfuerzos en el interior de la losa.

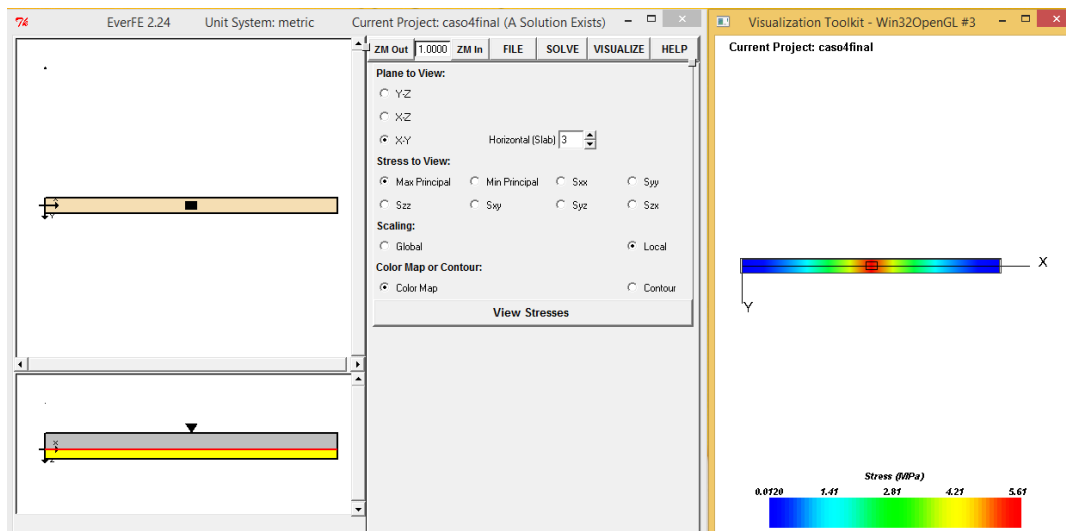


Figura 97: Esfuerzos en la base de la losa.

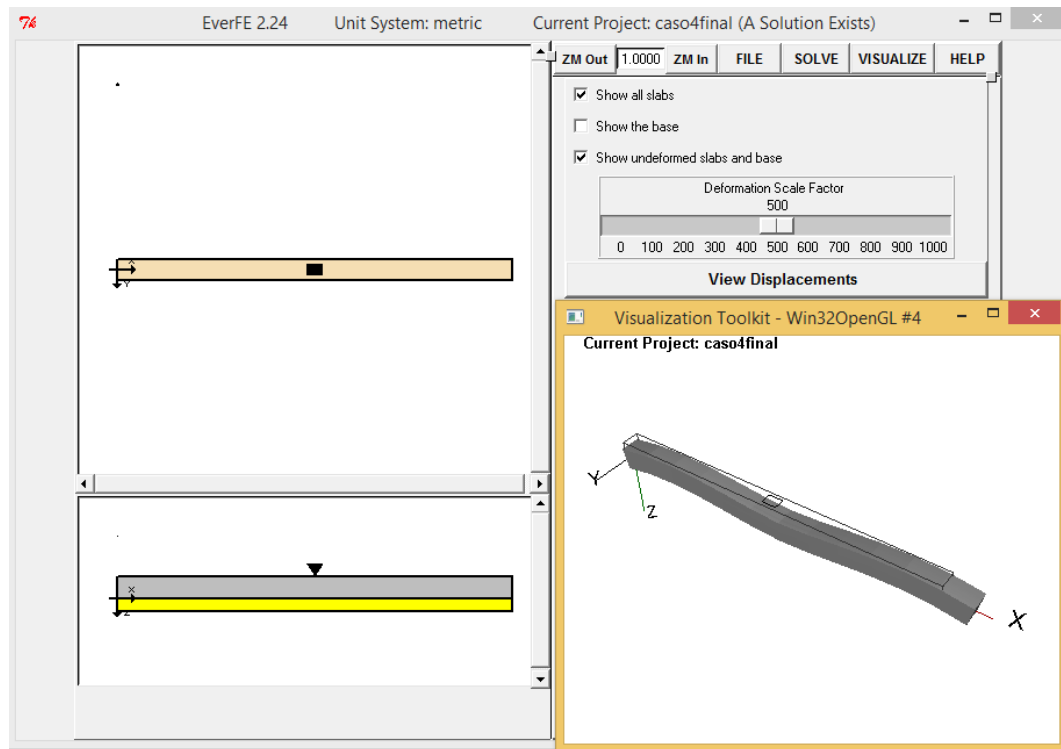


Figura 98: Deformación de la losa.

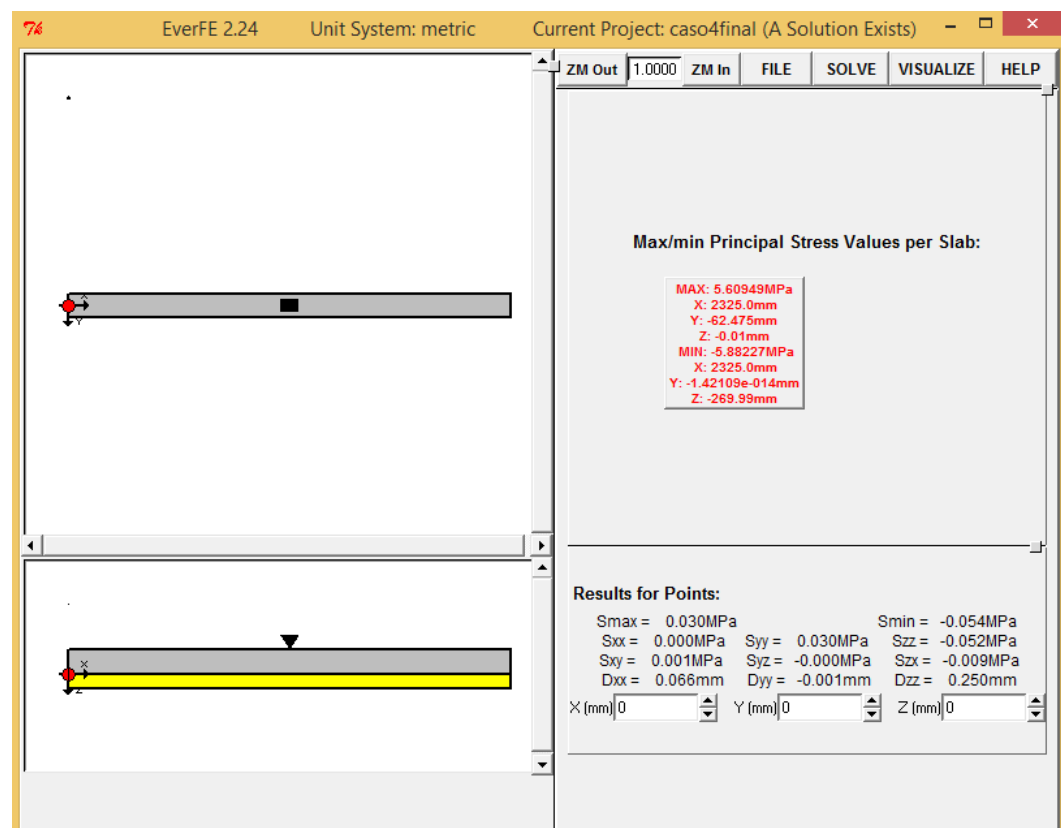


Figura 99: Esfuerzos Máximos .

REPETICIONES ADMISIBLES



Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento:
☐ Pavimento flexible ☒ Pavimento rígido

Confianza (R) y Desviación estándar (So):
 90 % $Z_r = -1.282$ So: 0.35

Serviciabilidad inicial y final:
 PSI inicial: 4.5 PSI final: 2.5

Módulo de reacción de la subrasante:
 k: 1150.15 pci

Información adicional para pavimentos rígidos:

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi): 4405529.25
 Coeficiente de transmisión de carga - (J): 3.8

Módulo de rotura del concreto - S_c (psi): 652.671
 Coeficiente de drenaje - (Cd): 1

Tipo de Análisis:
☐ Calcular D ☒ Calcular W18

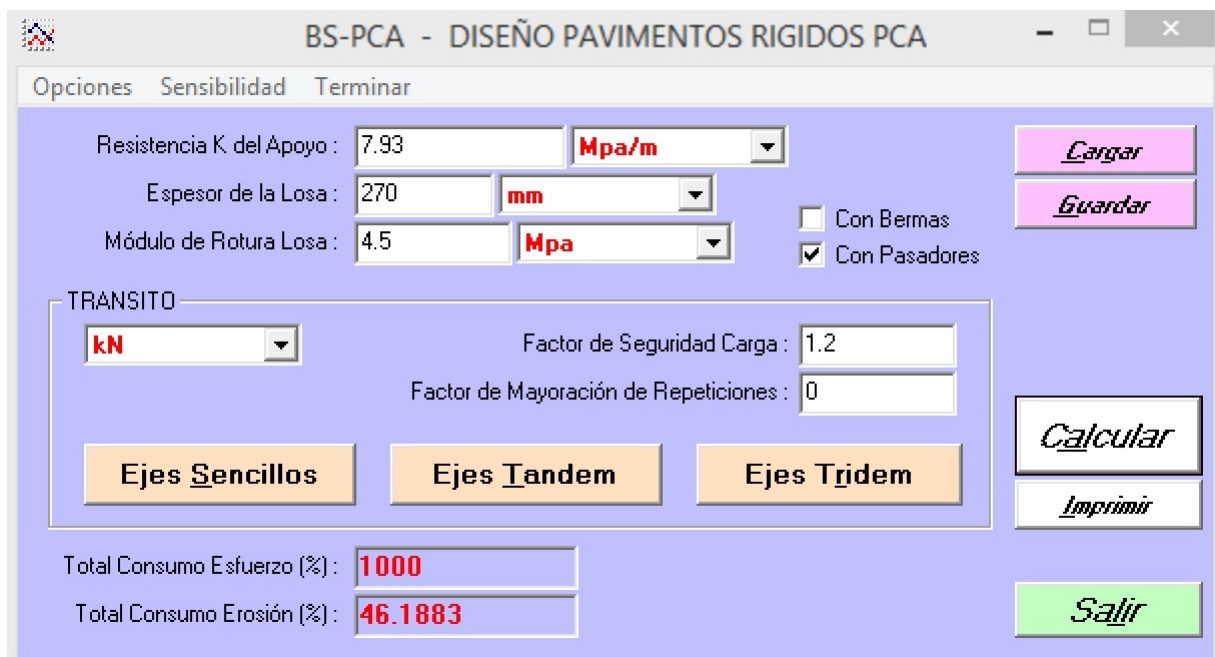
D = 10.63

Ejes de 18 kips:
 W18 = 17699640

Calcular Salir

Figura 100: Número de Repeticiones Admisibles.

ESFUERZO DE FATIGA Y EROSIÓN



BS-PCA - DISEÑO PAVIMENTOS RIGIDOS PCA

Opciones Sensibilidad Terminar

Resistencia K del Apoyo: 7.93 Mpa/m

Espesor de la Losa: 270 mm

Módulo de Rotura Losa: 4.5 Mpa

☐ Con Bermas
☒ Con Pasadores

TRANSITO
 kN

Factor de Seguridad Carga: 1.2
 Factor de Mayoración de Repeticiones: 0

Ejes Sencillos Ejes Tandem Ejes Tridem

Calcular

Imprimir

Salir

Total Consumo Esfuerzo (%): 1000
 Total Consumo Erosión (%): 46.1883

Figura 101: Porcentaje de Consumo Esfuerzos.

7.1.4. Sección de sobreancho menor 4,65X0,10 m

Corrección de subrasante

Datos de entrada:

B	0.10	m
L	4.65	m
k	30	MPa/m

De la ecuación 10 se tiene:

$$k_s = \frac{E_s}{1-\nu^2} I$$

I es el factor que depende de la forma de la cimentación. De la ecuación 11 se tiene:

$$I = \frac{m^{1/2}}{T_m} = 0,15$$

Por lo tanto el k corregido es:

$$k_s = 5,01 \text{ MPa}$$

Análisis Tensional del Elemento

Dentro del análisis tensional del elemento se analizan 3 esfuerzos puntuales:

- Por alabeo
- Por cargas y,
- Por fricción.

Los datos a utilizarse para el análisis se especifican en el cuadro 55.

DATOS			
Mr	5.01	kg/cm3	Módulo de reacción de la subbase
Lx	465	cm	Longitud x
Ly	10	cm	Longitud y
Ec	309740.30	kg/cm2	Módulo elástico del concreto
Sc	45.89	kg/cm2	Módulo de ruptura
μ	0.15		Coefficiente de Poisson
Δt	22	$\Delta ^\circ\text{C}$	Diferencial de temperatura
α	0.000009	cm/ $\Delta ^\circ\text{C}$	Coefficiente de expansión térmica
h	27	cm	Espesor de la losa
f	1.5		Coefficiente de fricción
w	0.0024	kg/cm3	Peso de la losa

Cuadro 54: Datos de entrada para análisis tensional.

■ Esfuerzos por Alabeo

Radio de rigidez relativa.- De acuerdo a (19):

$$Lr = \sqrt[4]{\frac{EH^3}{12(1-u^2)k}} = 100,90 \text{ cm}$$

De esta forma al dividir el largo y el ancho de la losa de estudio para el radio de rigidez relativa se obtiene un valor, el mismo que se compara con la figura 18 para encontrar los coeficientes de bradbury.

$$\begin{aligned} lx/Lr &= 4,61 & C1 &= 0,64 = Cx \\ ly/Lr &= 0,10 & C2 &= 0,00 = Cy \end{aligned}$$

Esfuerzos en el borde longitudinal.- De acuerdo a (30):

$$\sigma_{tb} = \frac{CE\alpha\Delta t}{2} = 19,63 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en el interior de la losa.- De acuerdo a (31):

$$\sigma_{ti} = \frac{E\alpha\Delta t}{2} \left[\frac{C_x + uC_y}{1-u^2} \right] = 20,09 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en la esquina de la losa.- De acuerdo a (32):

$$\sigma_e = \frac{E\alpha\Delta t}{3(1-u)} \left[\sqrt{\frac{a}{Lr}} \right] = 7,44 \text{ kg/cm}^2$$

■ Esfuerzos por efectos del tráfico

Para realizar el análisis por efectos del tráfico se utilizará una carga puntual equivalente a un neumático de un camión tipo, esto es una carga de 4100 kg, la presión de inflado del neumático utilizada para todos los casos de estudio es de 14 kg/cm².

- 1) *Carga Aplicada:* $P = 4100 \text{ kg}$.
- 2) *Número de ruedas:* 1
- 3) *Presión de ruedas:* 14 kg/cm²
- 4) *Carga por rueda:* 4100 kg.
- 5) *Area de contacto por rueda:* $(4)/(3) = 292,85 \text{ cm}^2$

Radio de contacto equivalente

De la ecuación 16 se tiene:

$$a = \sqrt[2]{\frac{A_T}{\pi}} = 9,66$$

Radio ficticio de la distribución de carga, b

De la ecuación 17 y 18 se tiene:



$$b = \sqrt[3]{1,6a^2 + h^2} - 0,675h \quad \text{si} \quad a < 1,724h$$

$$b = a \quad \text{si} \quad a > 1,724h$$

$$b=11.41$$

Relaciones para obtener coeficientes de Westergard

$$L/b = 8.85$$

$$a/L = 0.09$$

Esfuerzos en el interior de la losa

De acuerdo a la ecuación 20 se tiene:

$$\sigma_t = 0,31625 \frac{P}{H^2} \left(4 \log_{10} \frac{L_r}{b} + 1,0693 \right) = 8,64 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en el borde de la losa

De acuerdo a la ecuación 26 se tiene:

$$\sigma_t = 0,57185 \frac{P}{2H^2} \left(4 \log_{10} \frac{L_r}{b} + 0,3593 \right) = 13,34 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en la esquina de la losa

De acuerdo a la ecuación 24 se tiene:

$$\sigma_e = \frac{3P}{H^2} \left[1 - \left(\frac{1,414a}{L_r} \right)^{1,2} \right] = 15,35 \text{ kg/cm}^2$$

- Esfuerzos por efectos de la fricción

De la ecuación 33 se tiene:

$$\sigma_t = \frac{wfL}{2} = 11,92 \text{ psi} = 0,837 \text{ kg/cm}^2$$

Un resumen de las tensiones obtenidas se encuentra en el cuadro 56.

Tipos de esfuerzos	Esfuerzos obtenidos (kg/cm2)		
	Esquina	Borde	Interior
Alabeo	7.44	19.64	20.09
Carga	15.35	13.34	8.64
Fricción	0.837	0.837	0.837
Totales	23.62	33.81	29.56

Cuadro 55: Resumen de tensiones losa 4.65x0.10.

Análisis de la losa por el método de Elementos Finitos:

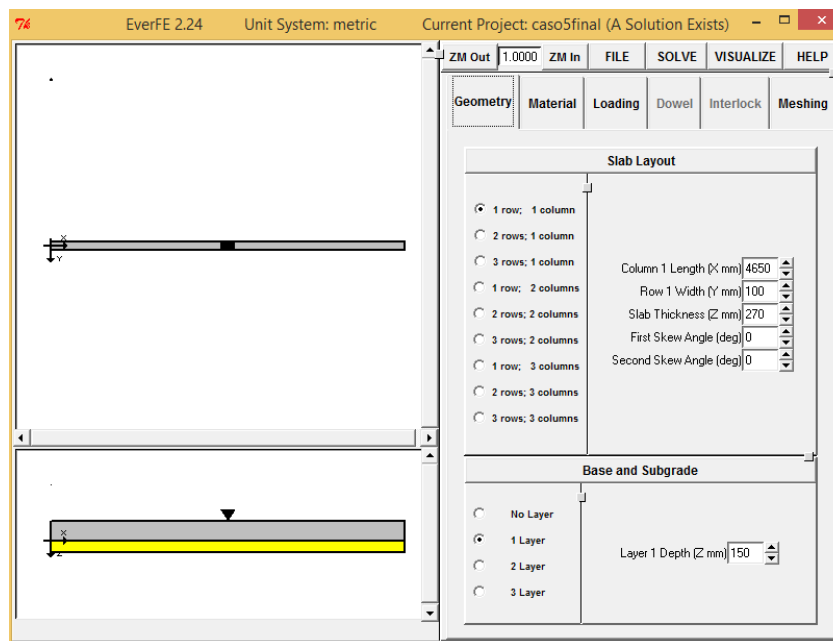


Figura 102: Modelación del elemento.

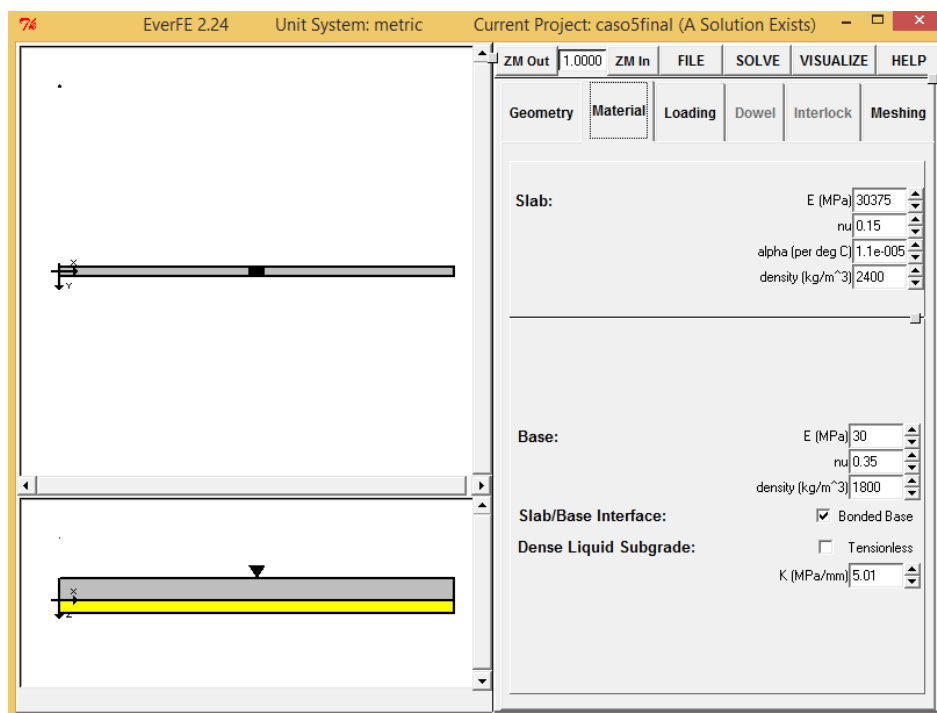


Figura 103: Modelación de materiales.

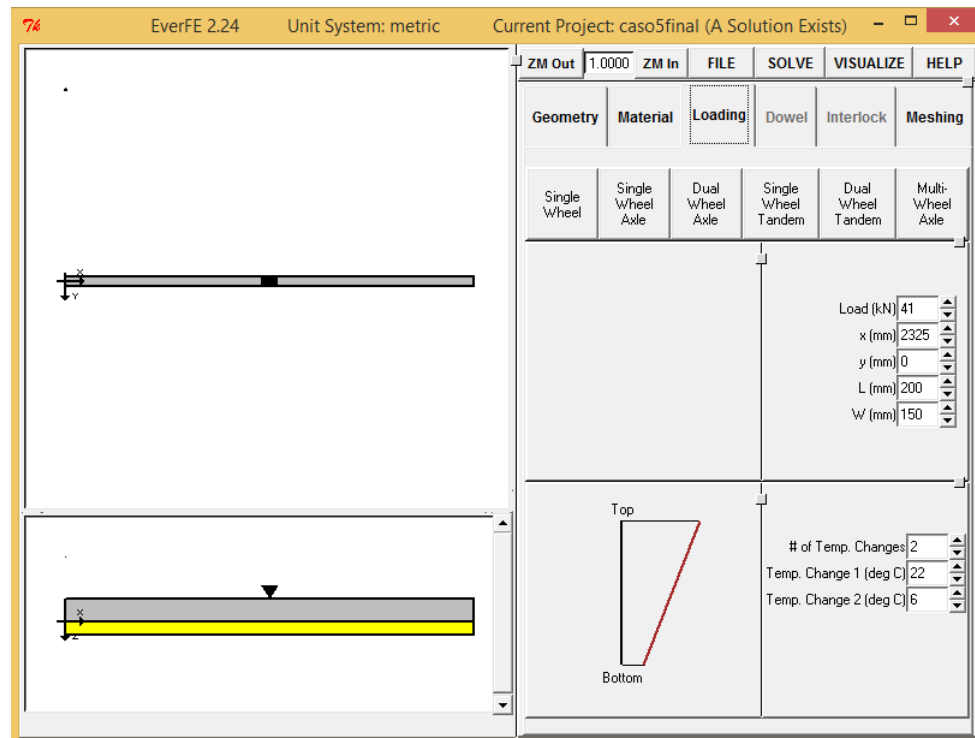


Figura 104: Modelación de cargas.

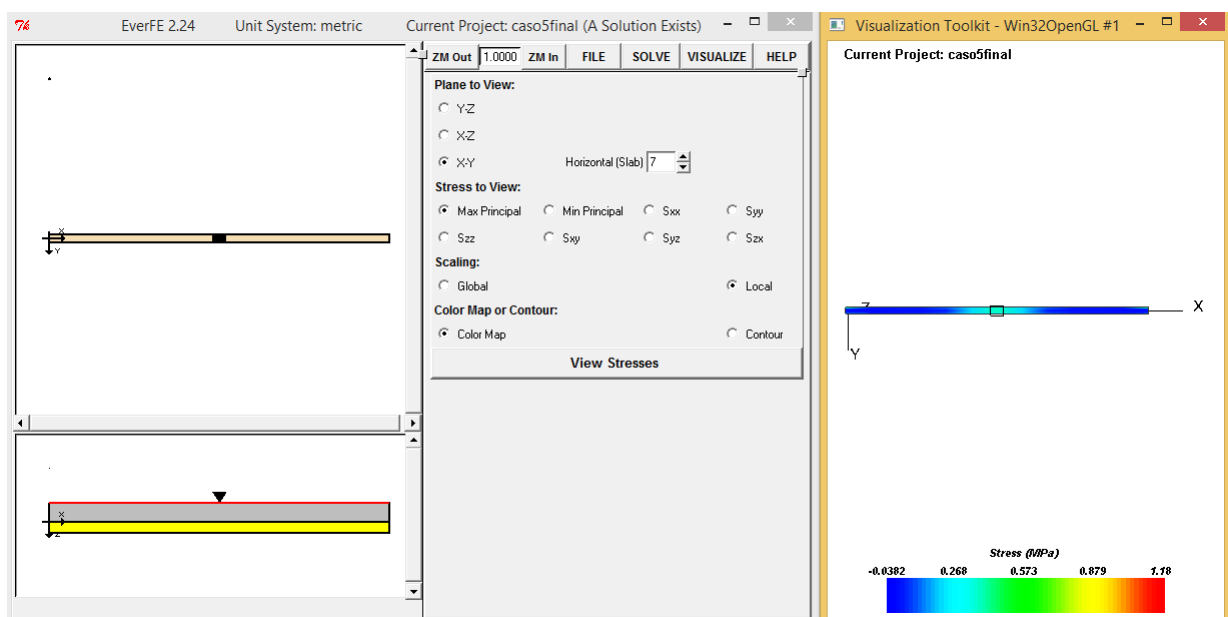


Figura 105: Esfuerzos en la superficie de la losa.

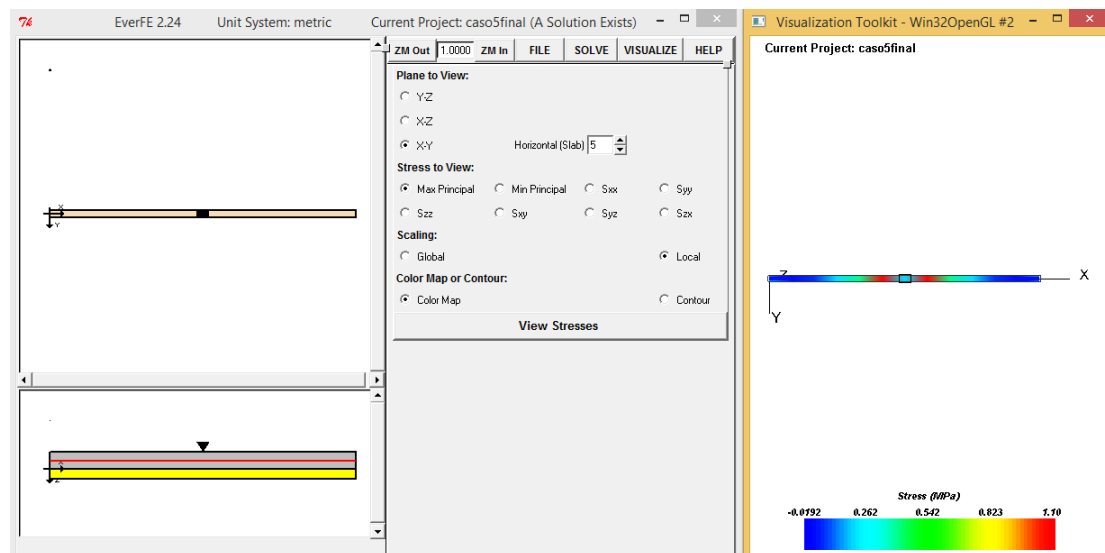


Figura 106: Esfuerzos en el interior de la losa.

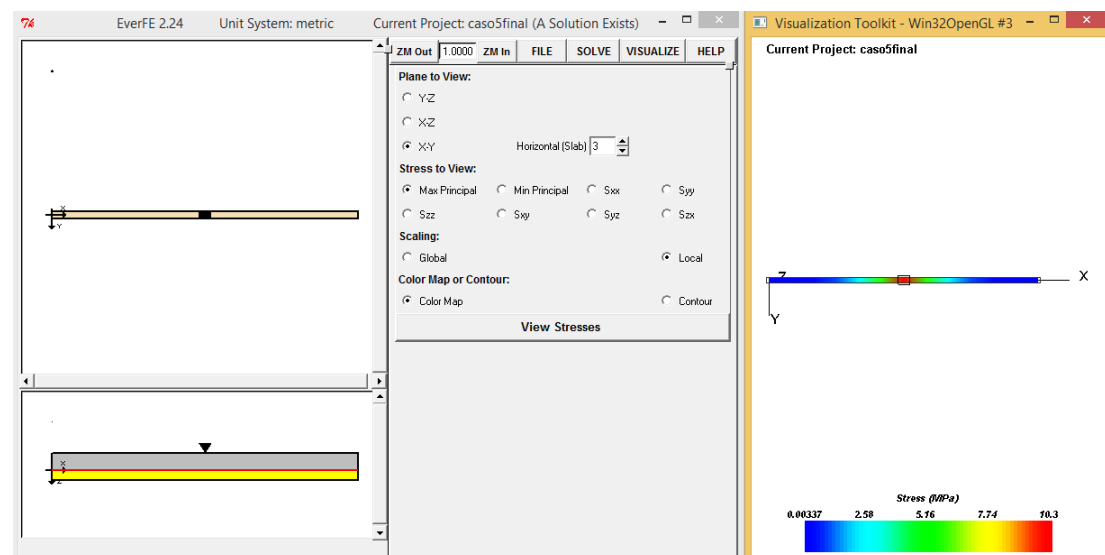


Figura 107: Esfuerzos en la base de la losa.

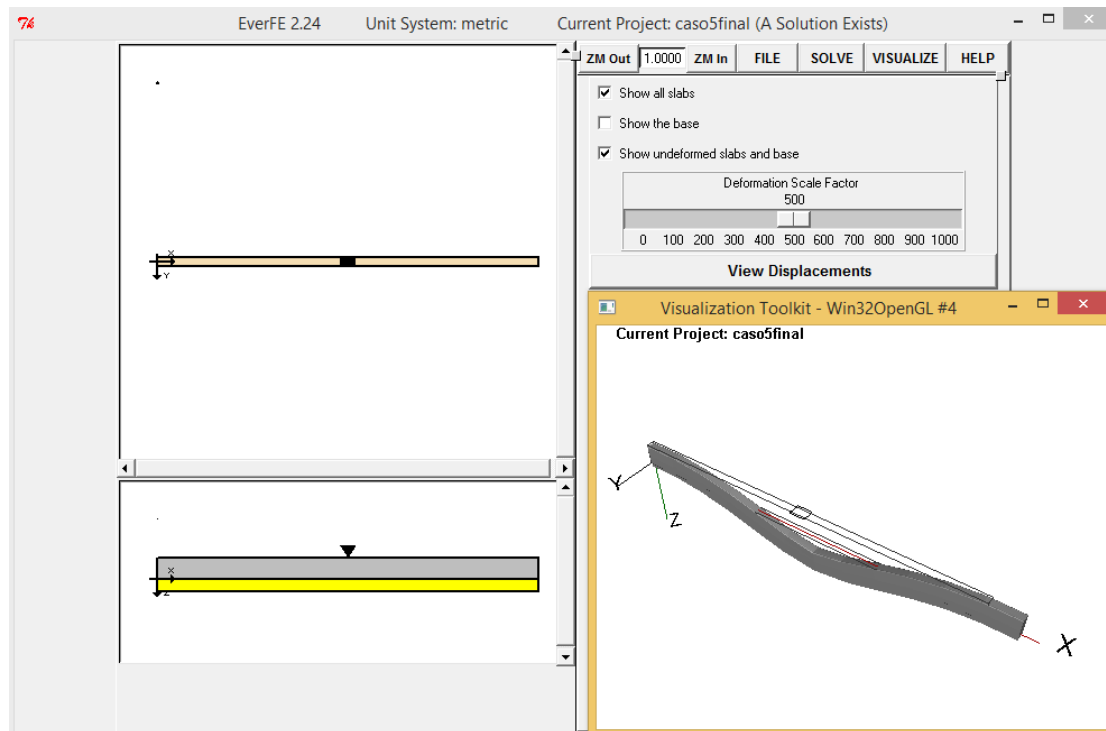


Figura 108: Deformación de la losa.

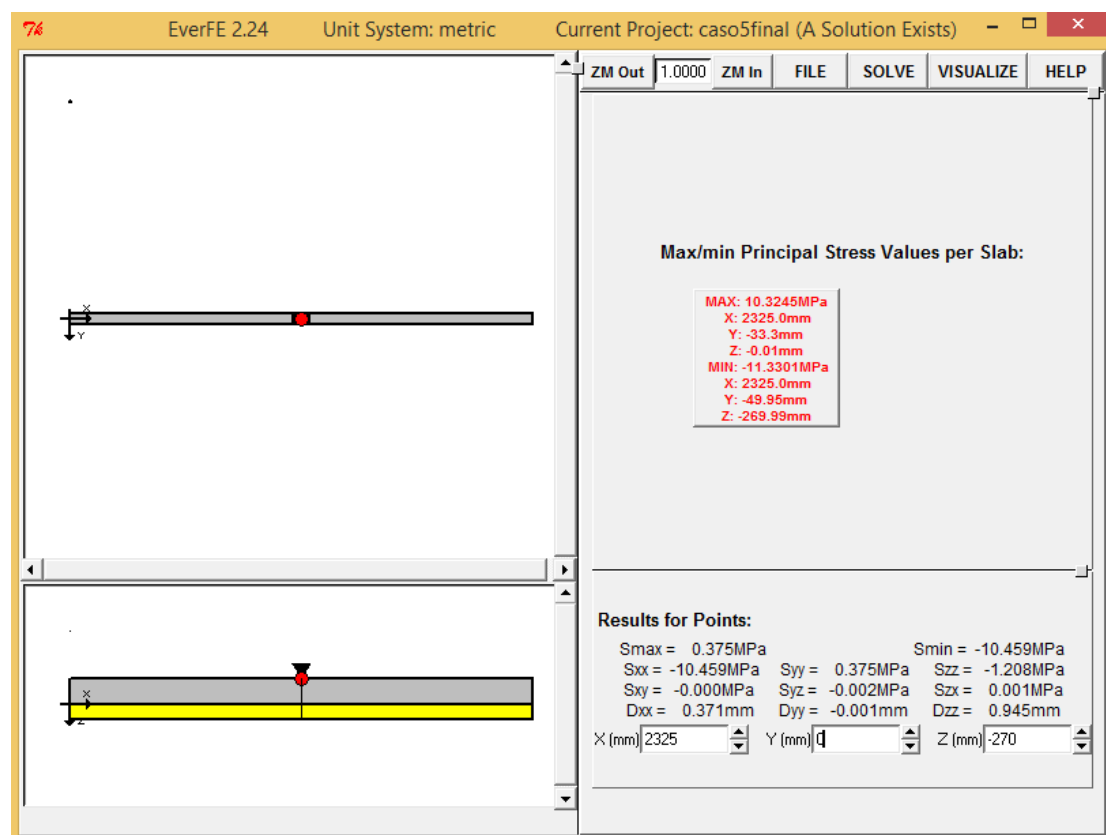
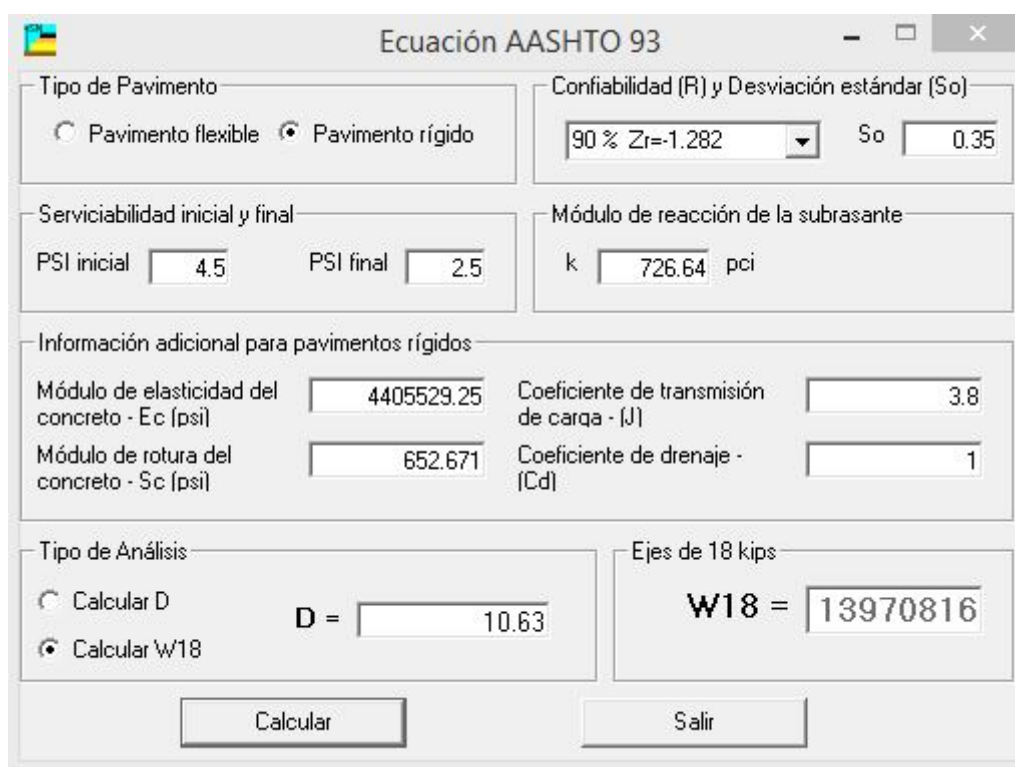


Figura 109: Esfuerzos Máximos .

REPETICIONES ADMISIBLES



Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento:
☐ Pavimento flexible ☒ Pavimento rígido

Confiability (R) y Desviación estándar (So):
 90 % $Z_r = -1.282$ So: 0.35

Serviciabilidad inicial y final:
 PSI inicial: 4.5 PSI final: 2.5

Módulo de reacción de la subrasante:
 k: 726.64 pci

Información adicional para pavimentos rígidos:
 Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi): 4405529.25
 Módulo de rotura del concreto - S_c (psi): 652.671
 Coeficiente de transmisión de carga - (J): 3.8
 Coeficiente de drenaje - (Cd): 1

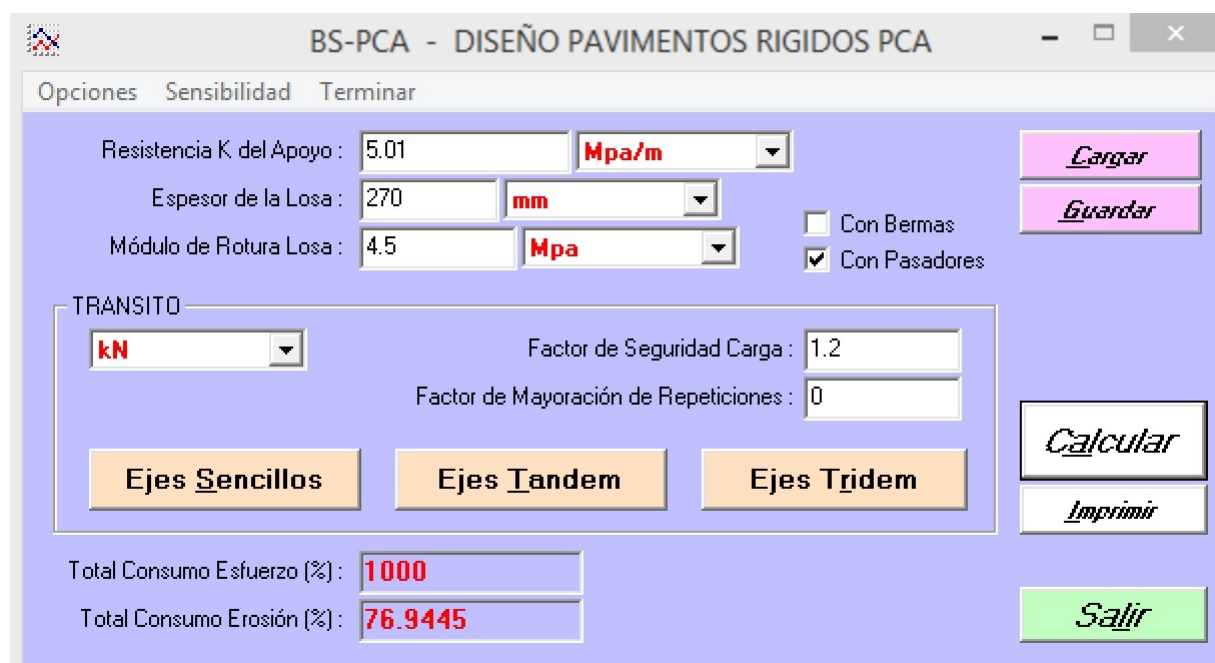
Tipo de Análisis:
☐ Calcular D ☒ Calcular W18

Ejes de 18 kips:
 W18 = 13970816

Buttons: Calcular, Salir

Figura 110: Número de Repeticiones Admisibles.

ESFUERZO DE FATIGA Y EROSIÓN



BS-PCA - DISEÑO PAVIMENTOS RIGIDOS PCA

Opciones Sensibilidad Terminar

Resistencia K del Apoyo: 5.01 Mpa/m

Espesor de la Losa: 270 mm

Módulo de Rotura Losa: 4.5 Mpa

Con Bermas ☐ Con Pasadores ☒

TRANSITO: kN

Factor de Seguridad Carga: 1.2

Factor de Mayoración de Repeticiones: 0

Ejes Sencillos Ejes Tandem Ejes Tridem

Buttons: Cargar, Guardar, Calcular, Imprimir, Salir

Total Consumo Esfuerzo (%): 1000

Total Consumo Erosión (%): 76.9445

Figura 111: Porcentaje de Consumo Esfuerzos.

7.2. Cálculos modelación en el eje

No se utilizan las fórmulas utilizadas para encontrar el análisis tensional puesto que la situación implica una transmisión de esfuerzos que ha sido modelada por el método de elementos finitos reduciendo la sección de la cuña del sobreancho.

7.2.1. Sección 4,65x1,00 m

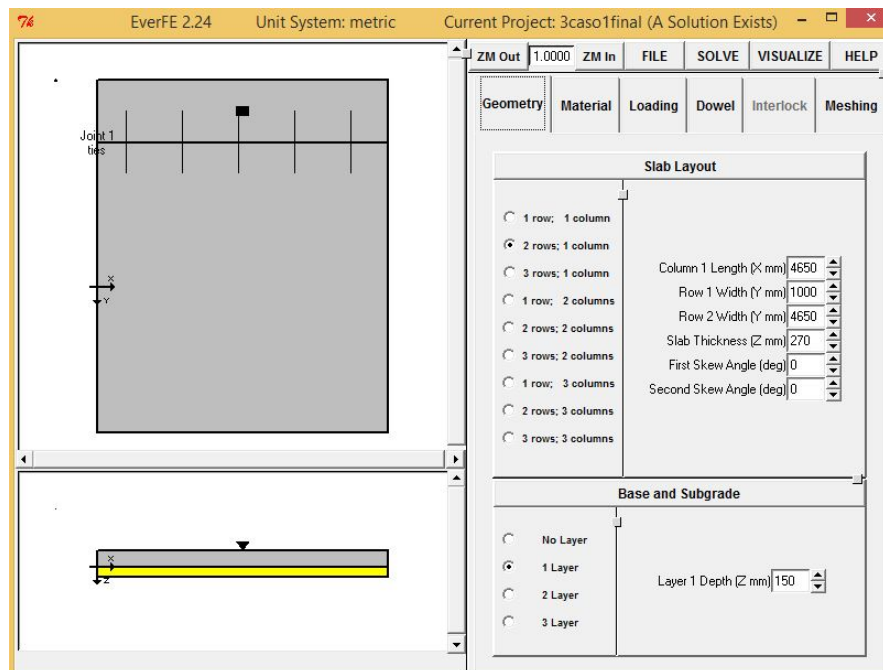


Figura 112: Modelación del elemento.

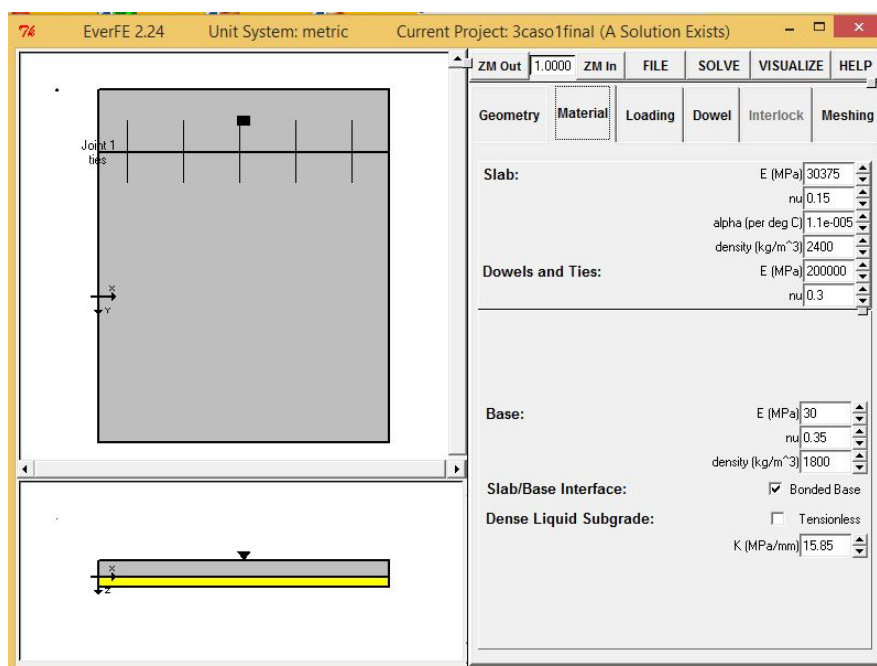


Figura 113: Modelación del elemento.

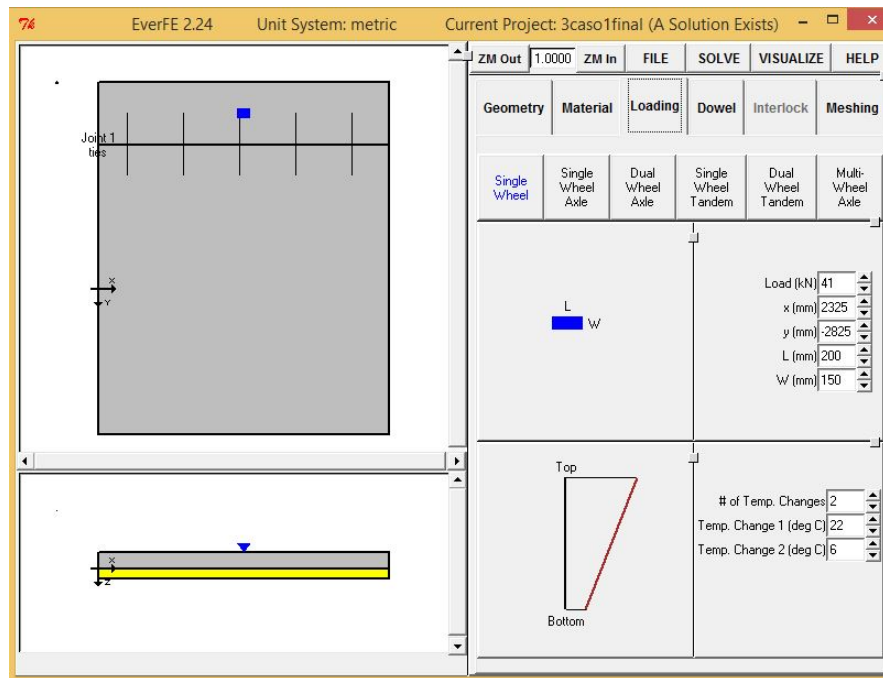


Figura 114: Modelación del elemento.

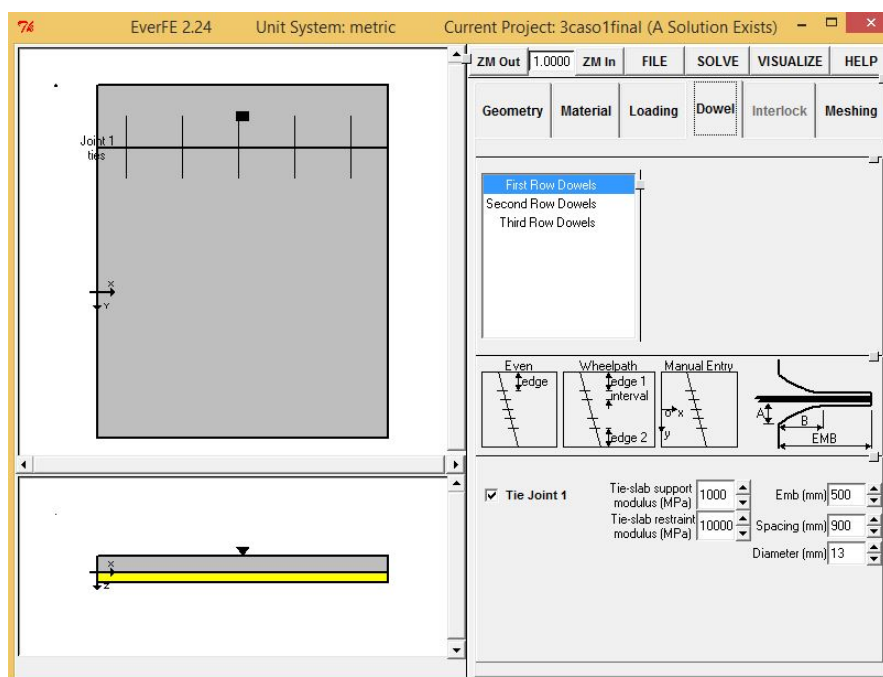


Figura 115: Modelación del elemento.

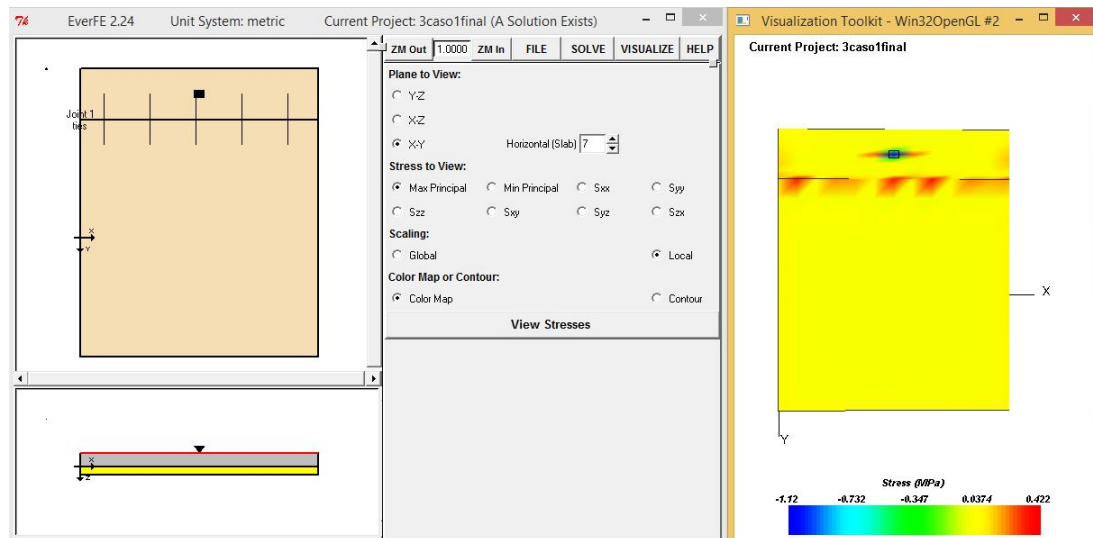


Figura 116: Esfuerzos producidos en el elemento.

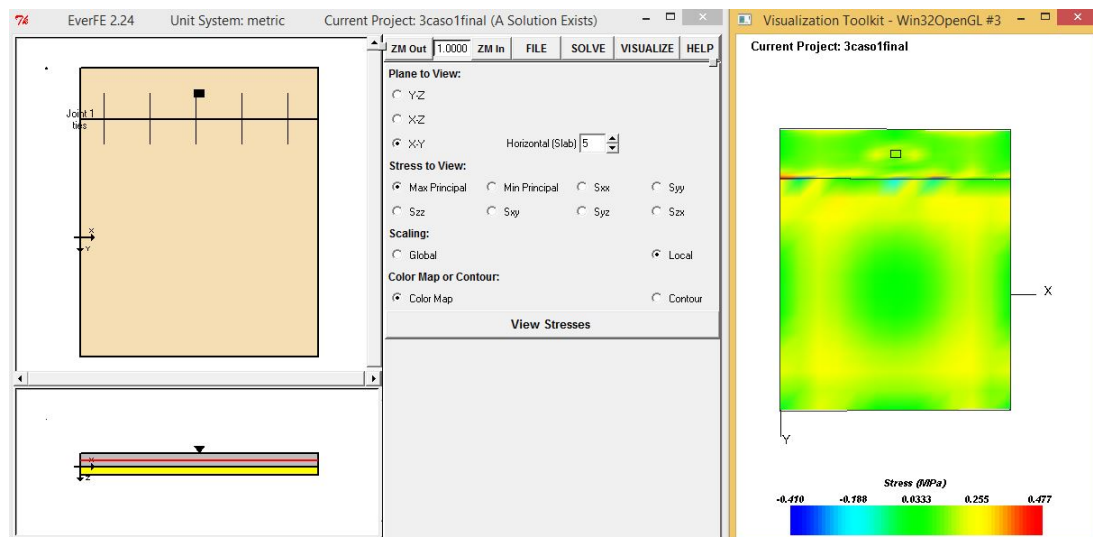


Figura 117: Esfuerzos producidos en el elemento.

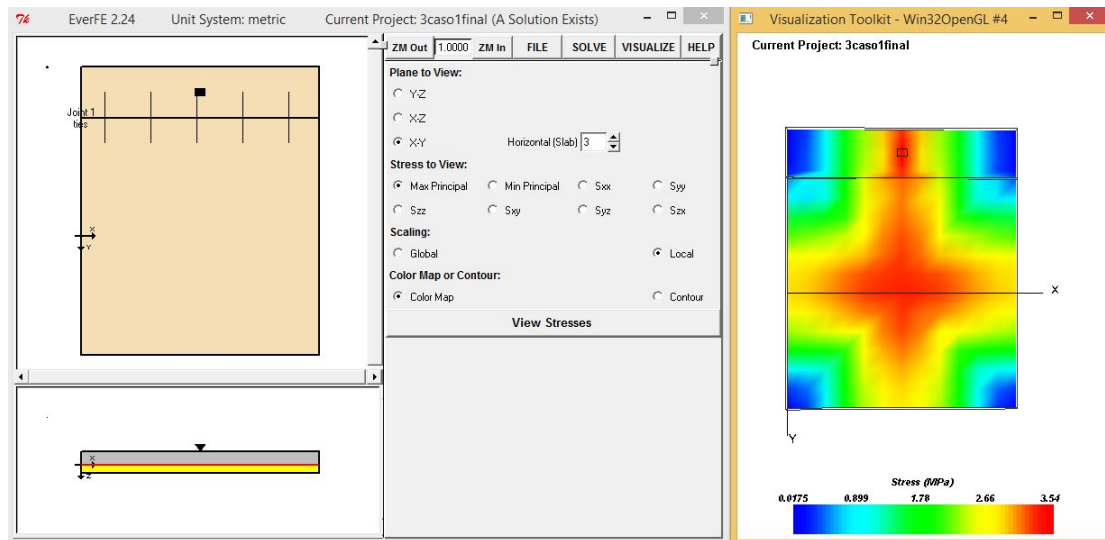


Figura 118: Esfuerzos producidos en el elemento.

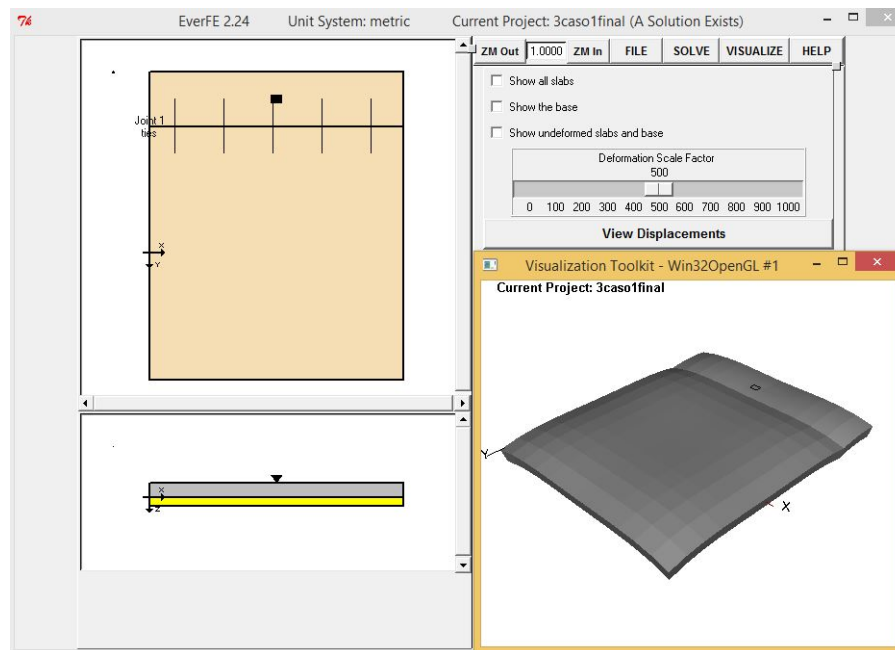


Figura 119: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.

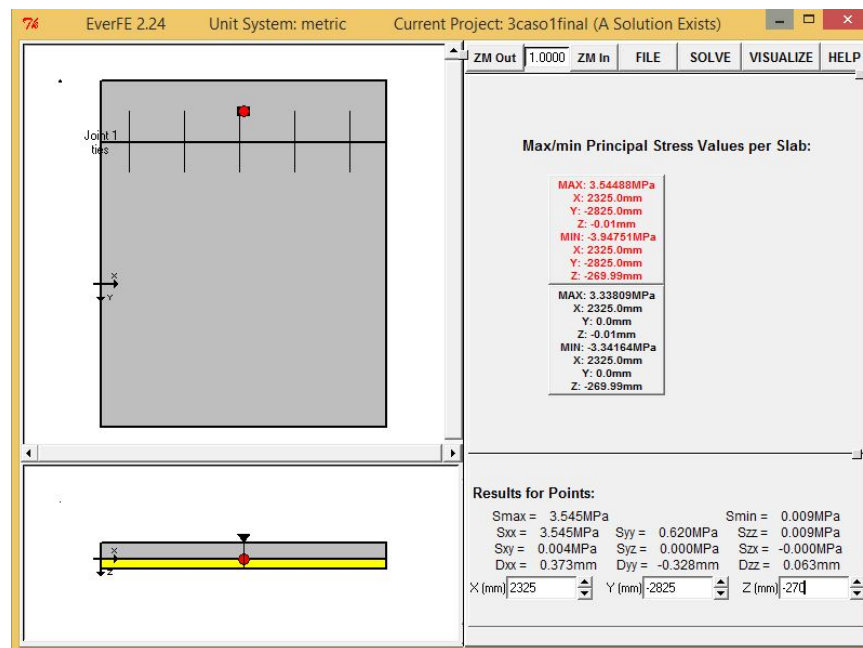


Figura 120: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.

7.2.2. Sección 4,65x0,50 m

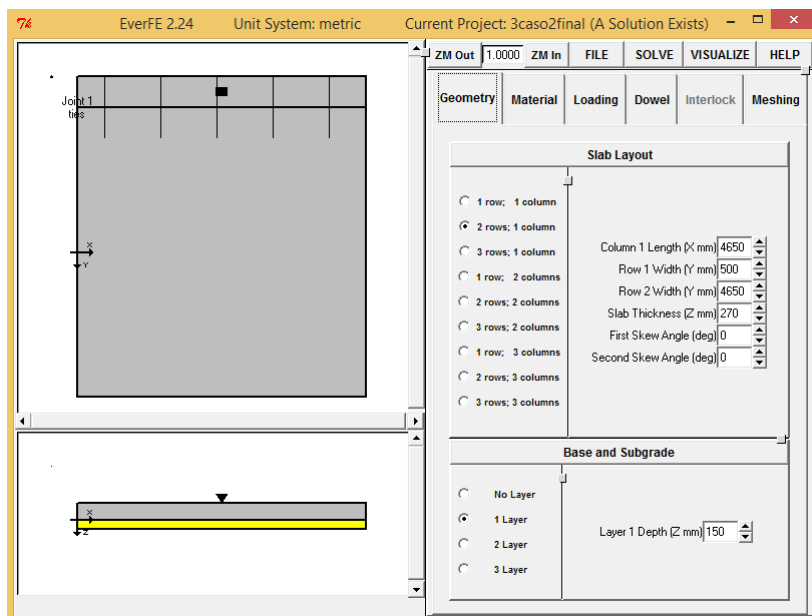


Figura 121: Modelación del elemento.

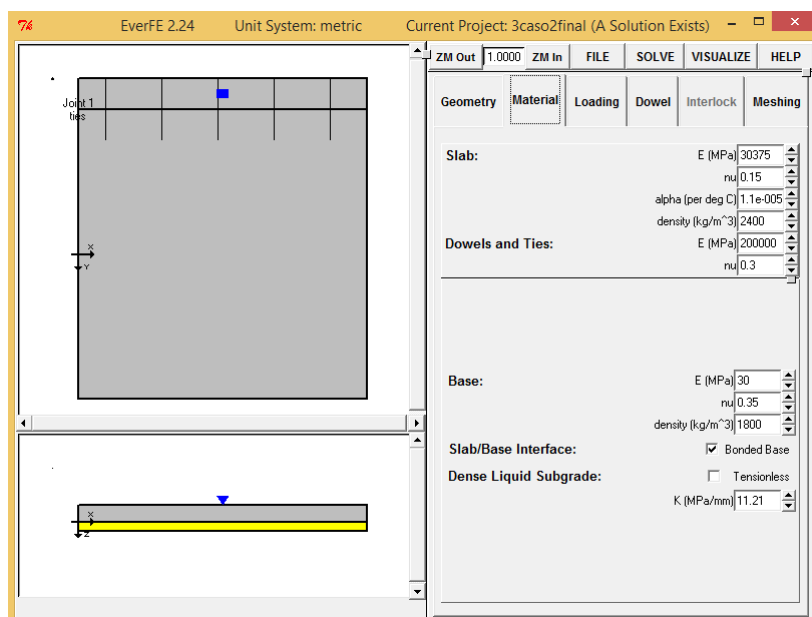


Figura 122: Modelación del elemento.

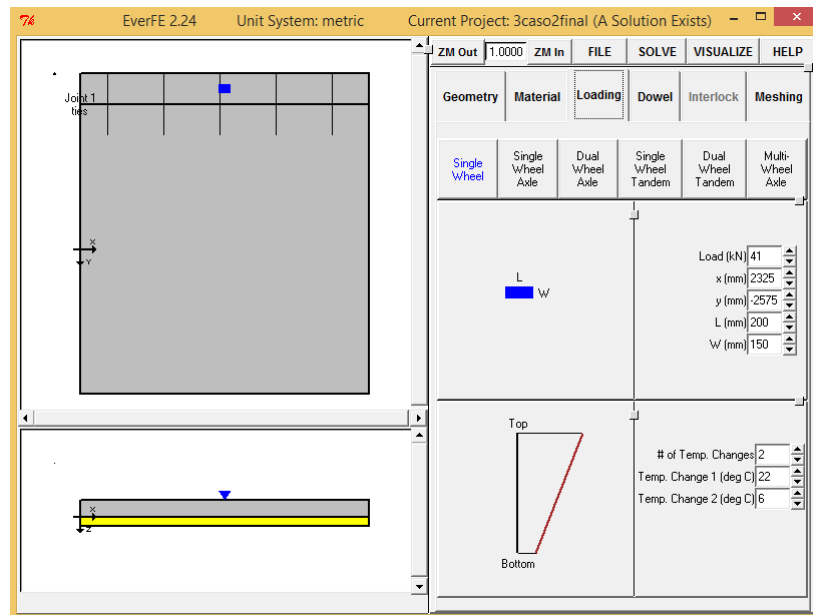


Figura 123: Modelación del elemento.

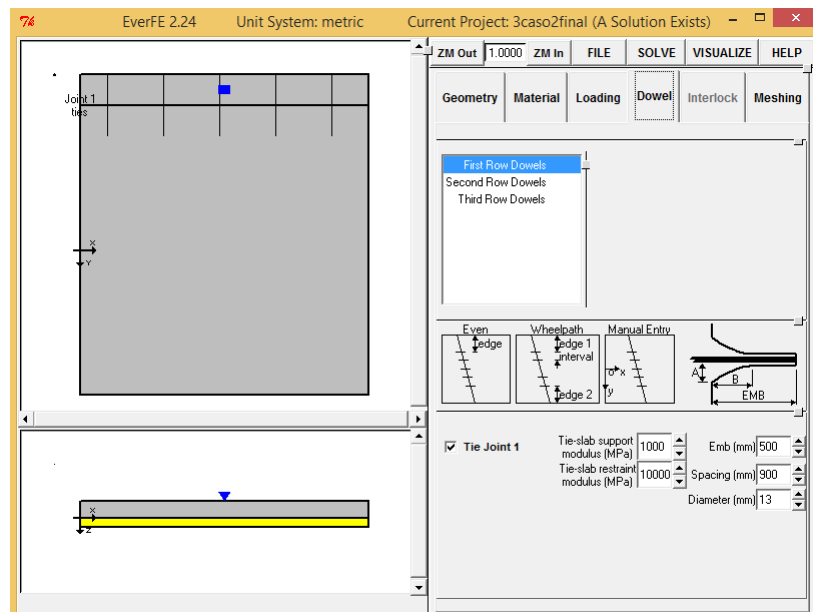


Figura 124: Modelación del elemento.

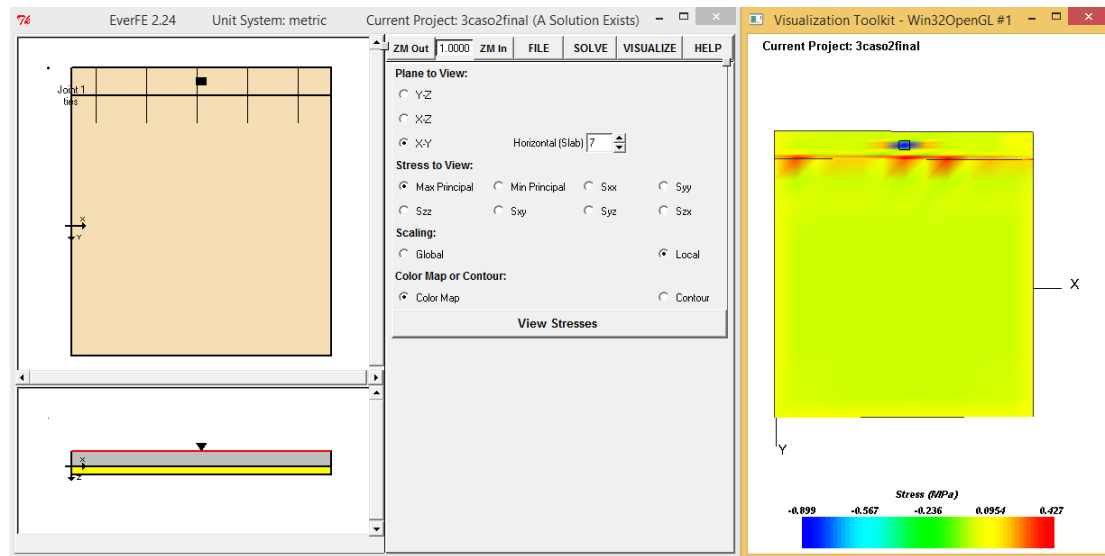


Figura 125: Esfuerzos producidos en el elemento.

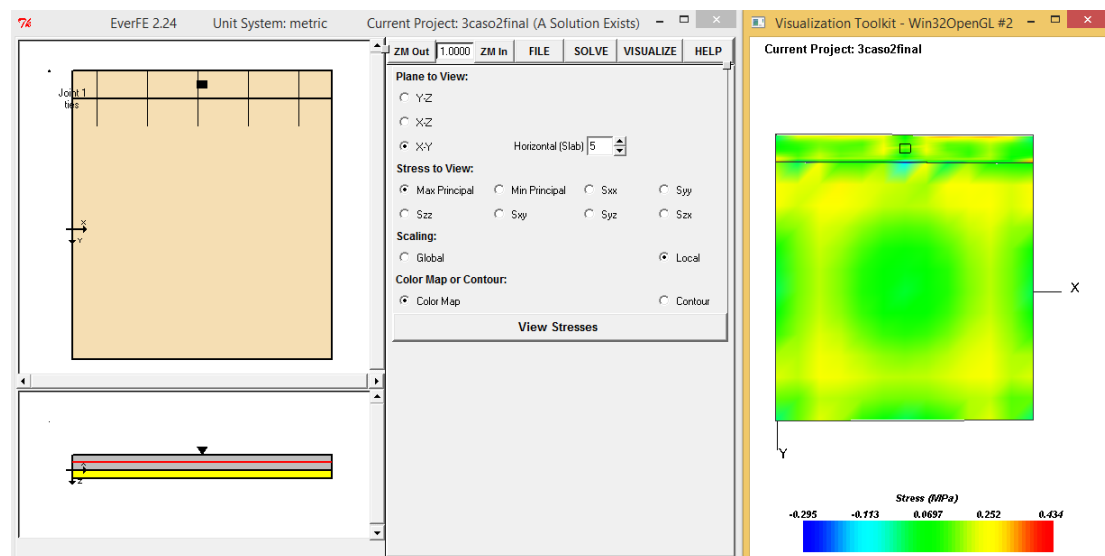


Figura 126: Esfuerzos producidos en el elemento.

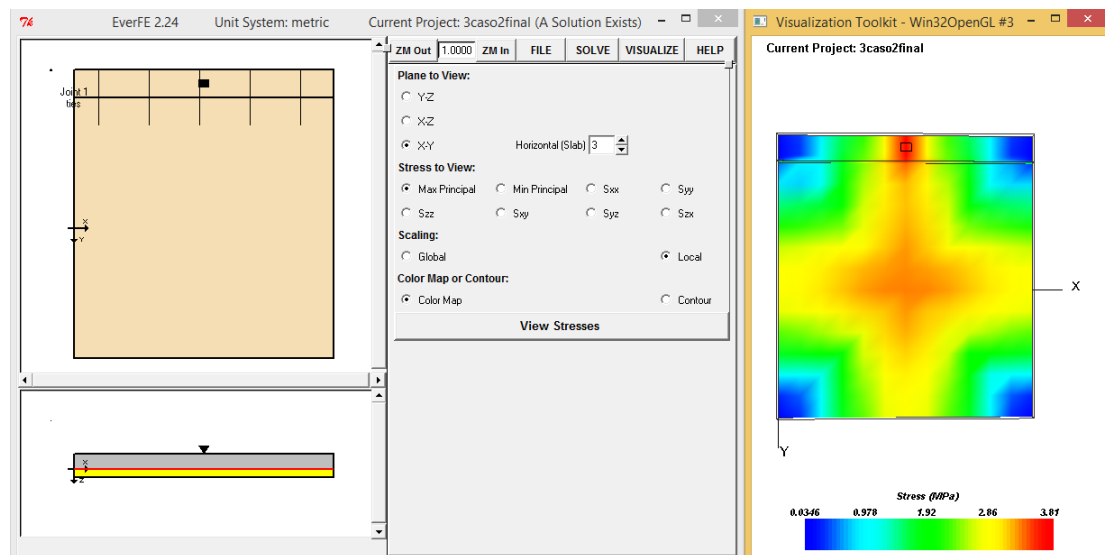


Figura 127: Esfuerzos producidos en el elemento.

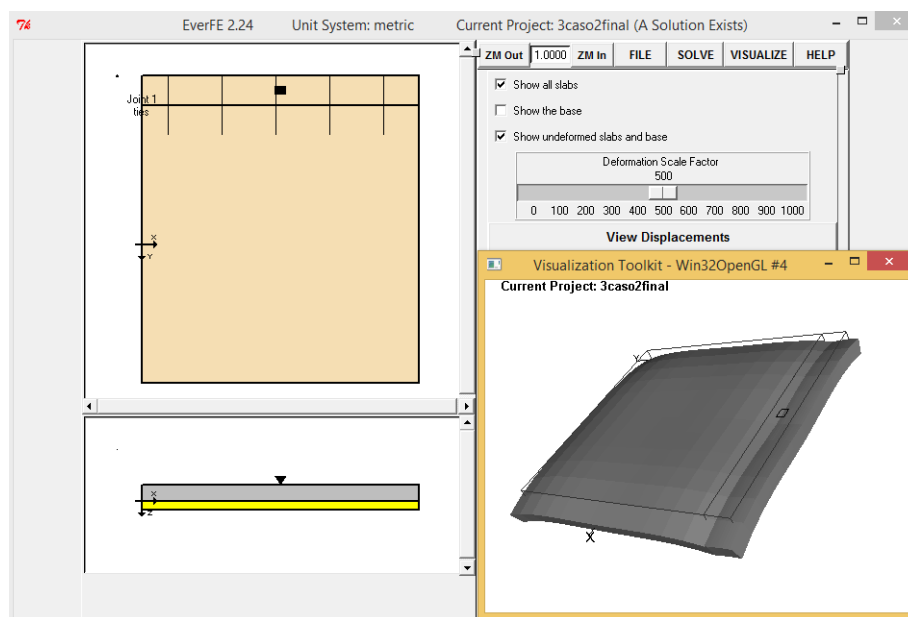


Figura 128: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.

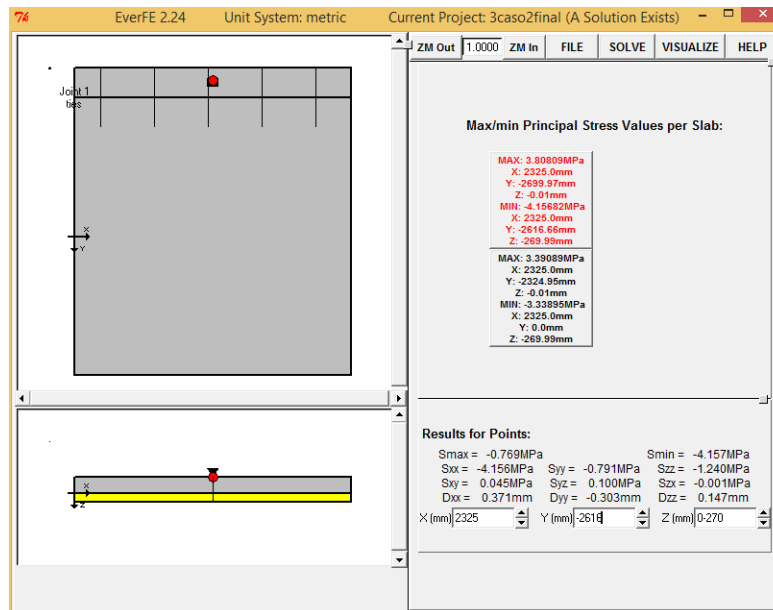


Figura 129: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.

7.2.3. Sección 4,65x0,25 m

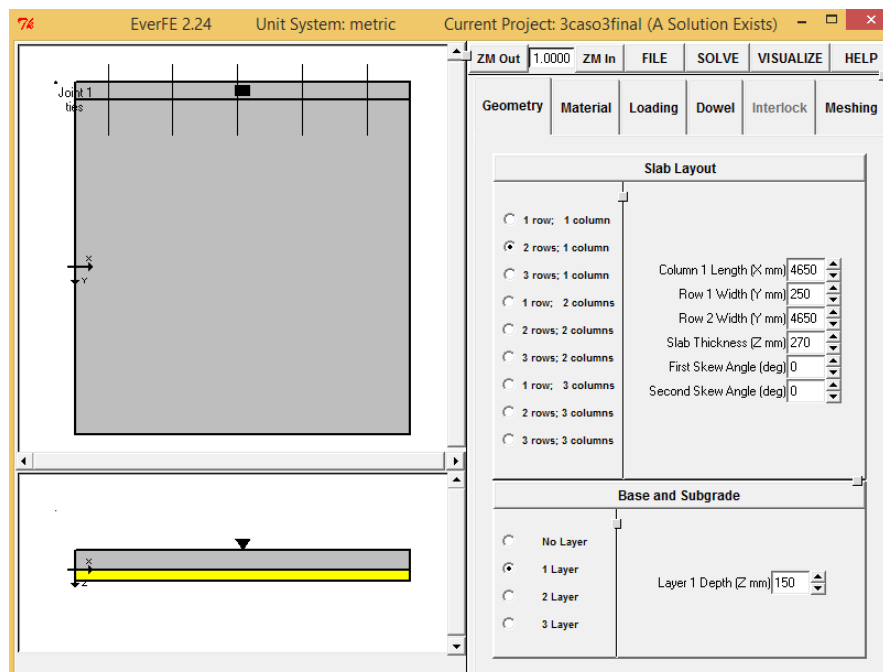


Figura 130: Modelación del elemento.

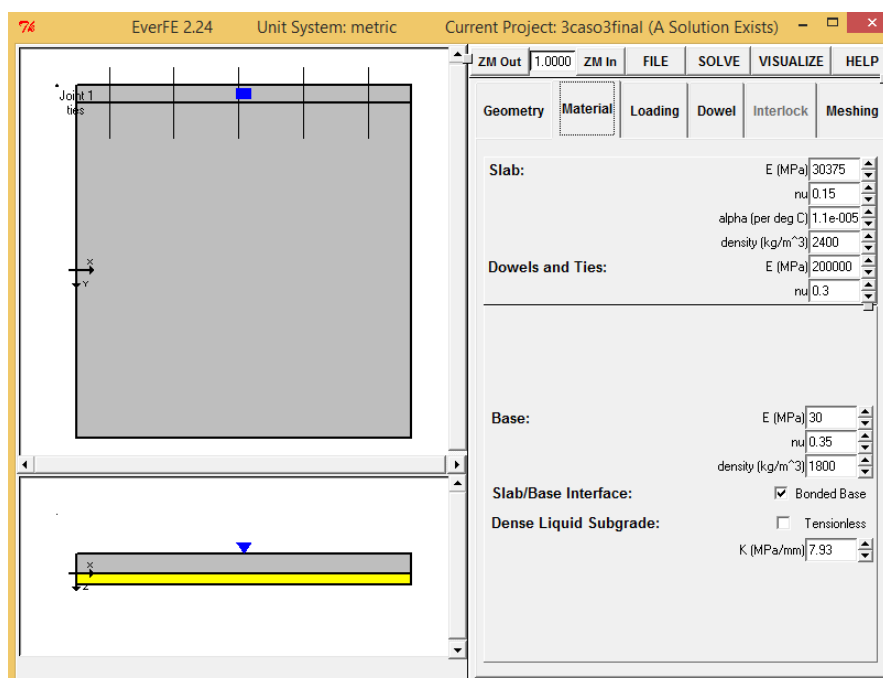


Figura 131: Modelación del elemento.

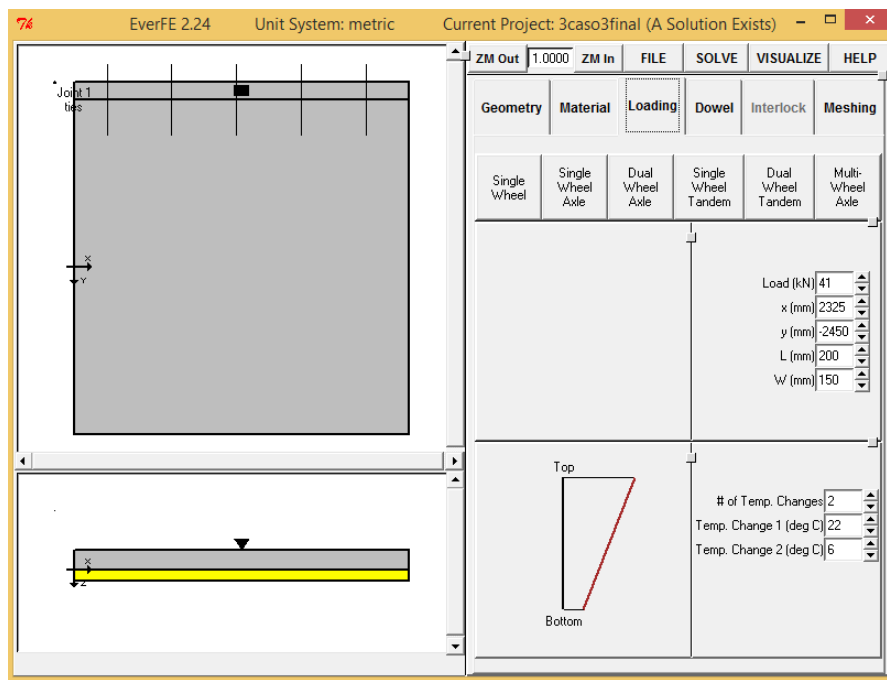


Figura 132: Modelación del elemento.

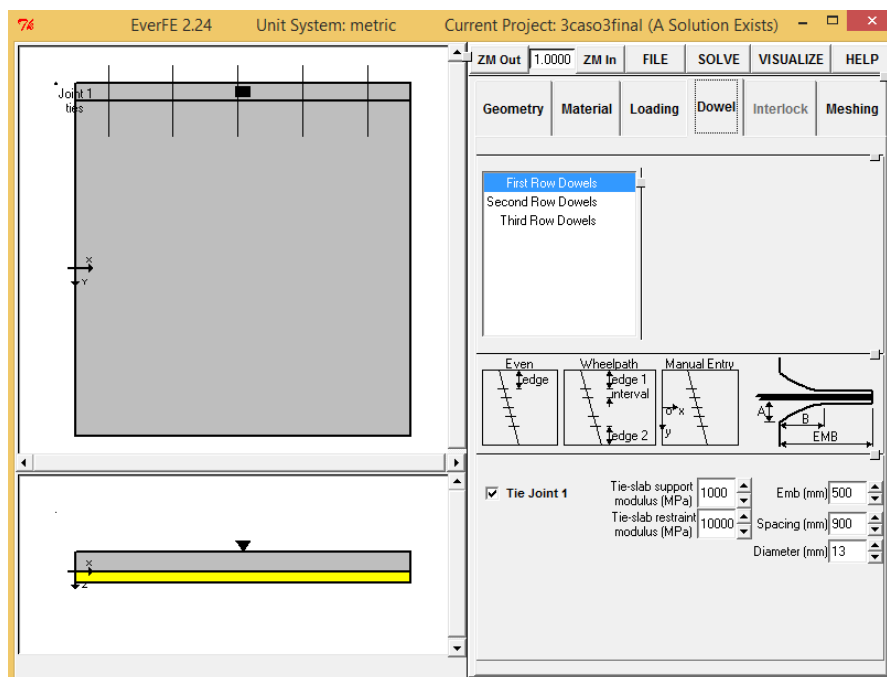


Figura 133: Modelación del elemento.

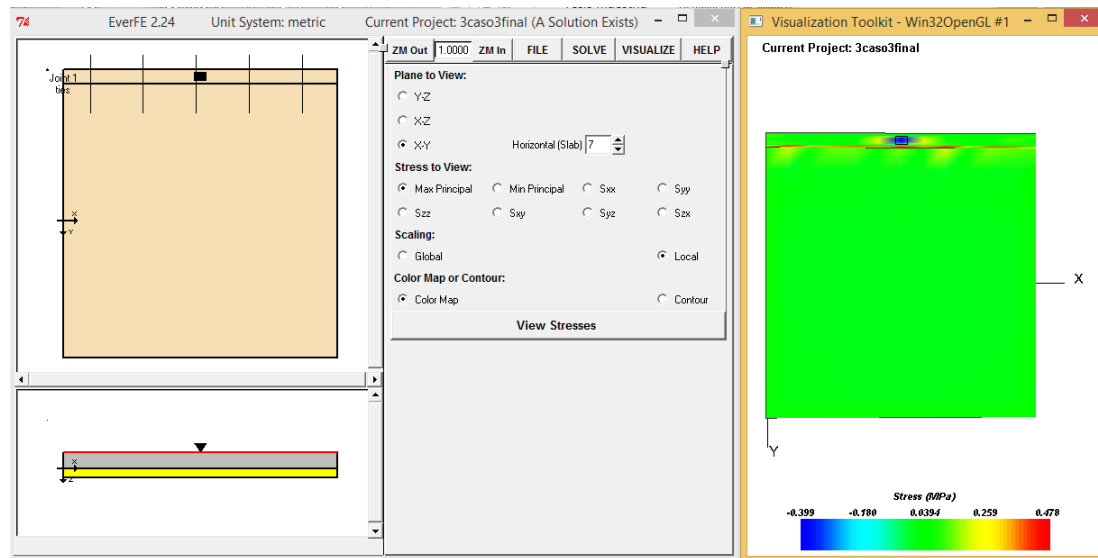


Figura 134: Esfuerzos producidos en el elemento.

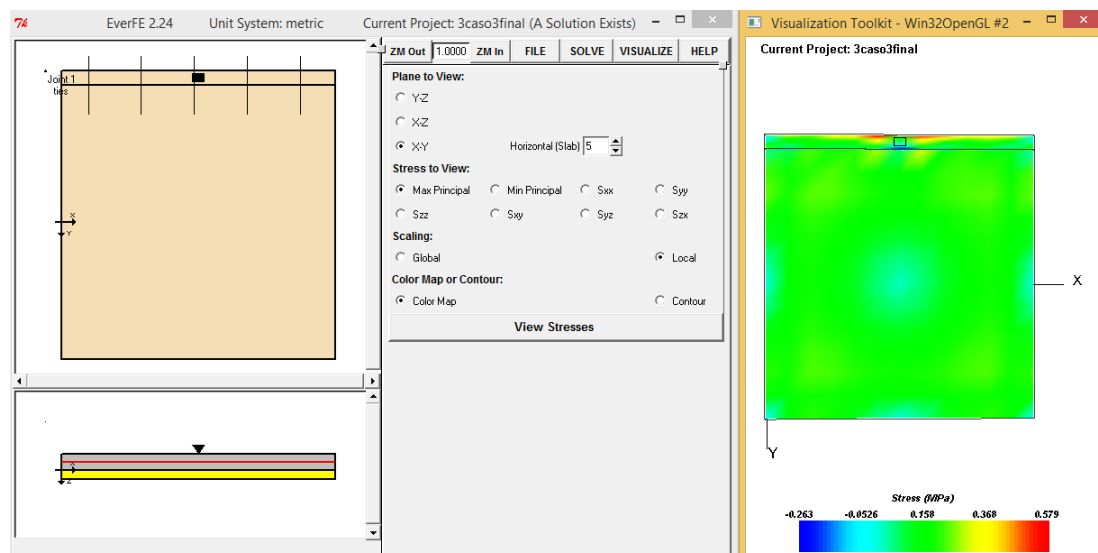


Figura 135: Esfuerzos producidos en el elemento.

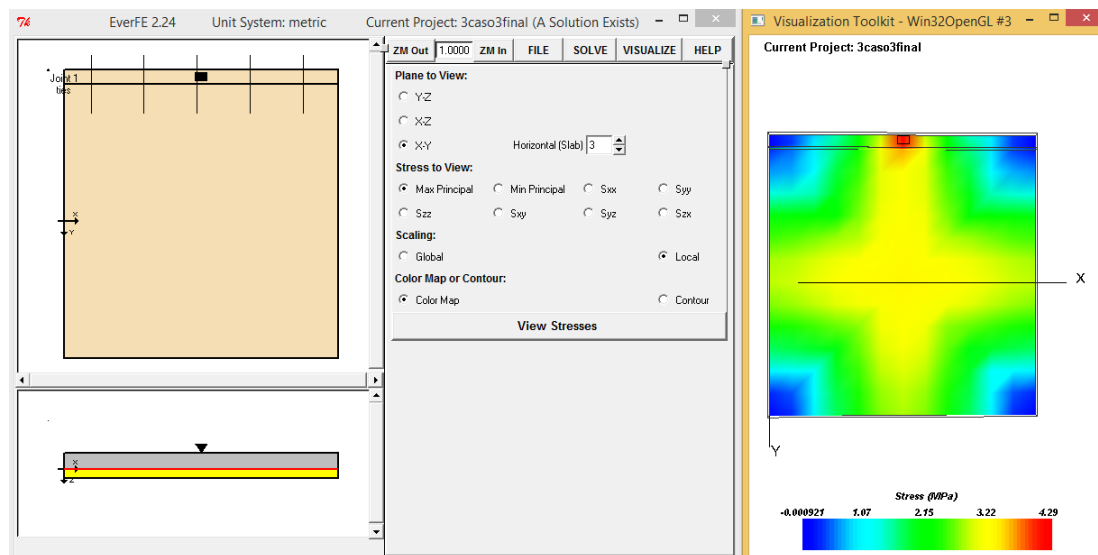


Figura 136: Esfuerzos producidos en el elemento.

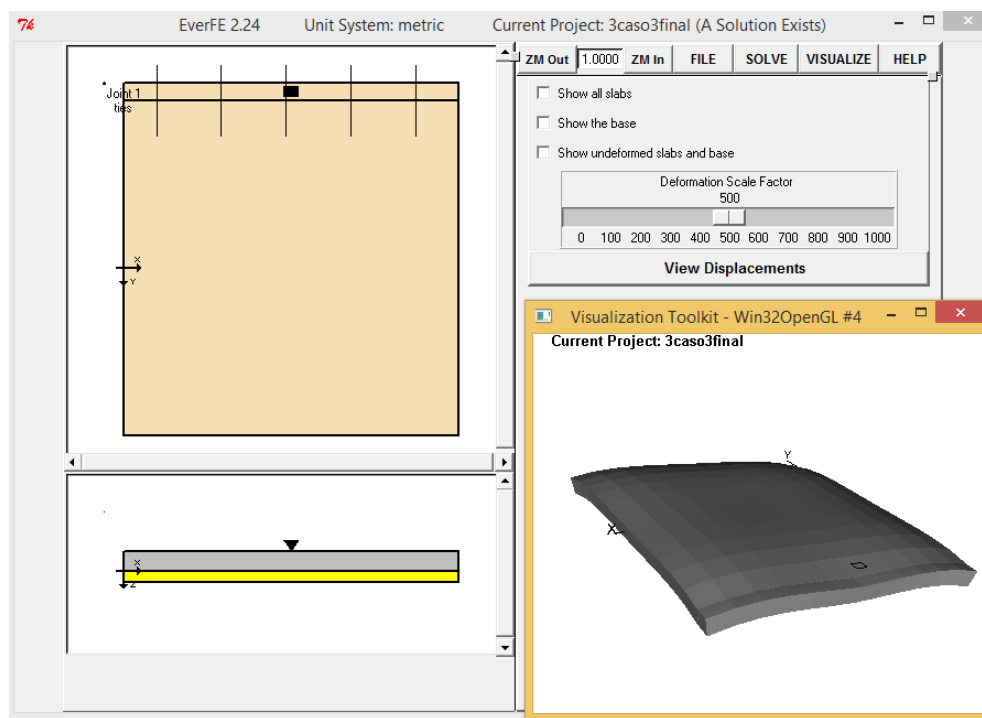


Figura 137: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.

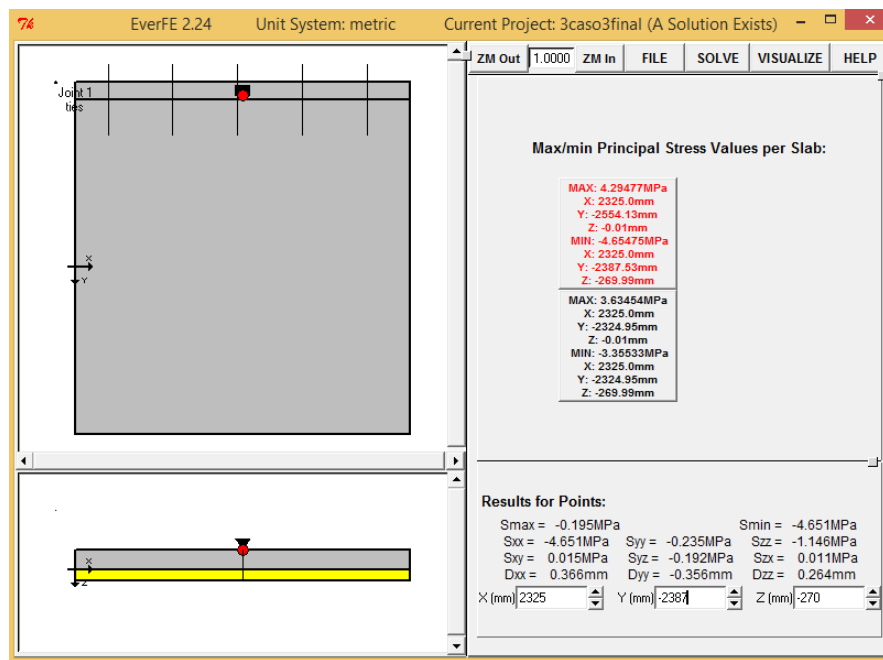


Figura 138: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.

7.2.4. Sección 4,65x0,10 m

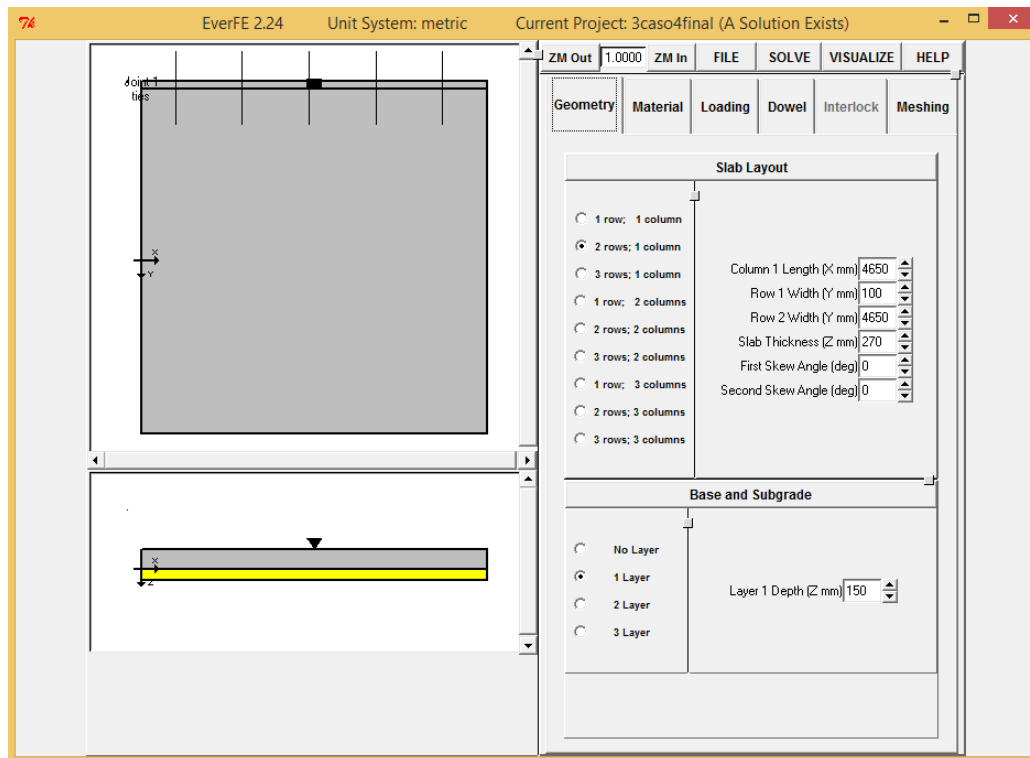


Figura 139: Modelación del elemento.

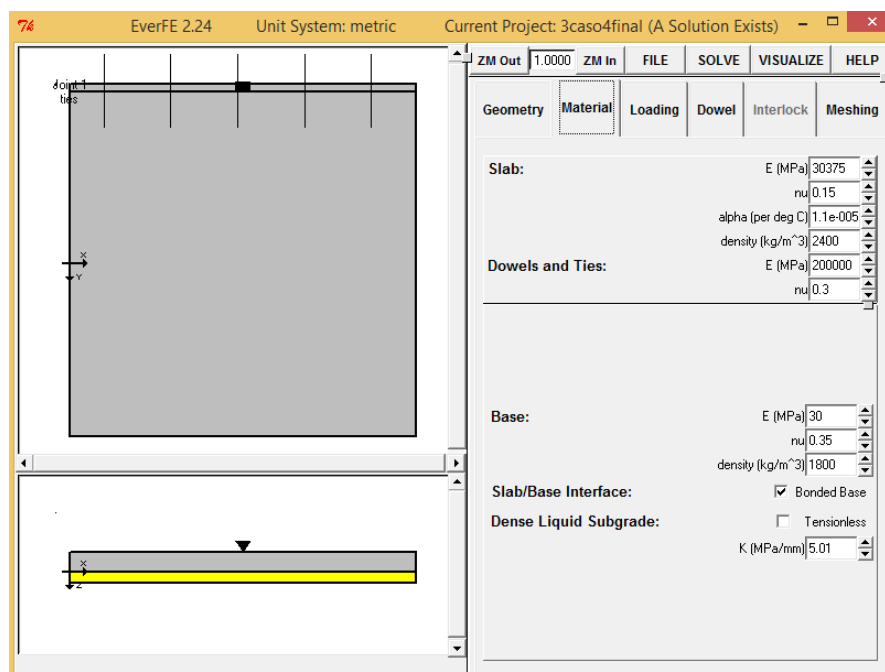


Figura 140: Modelación del elemento.

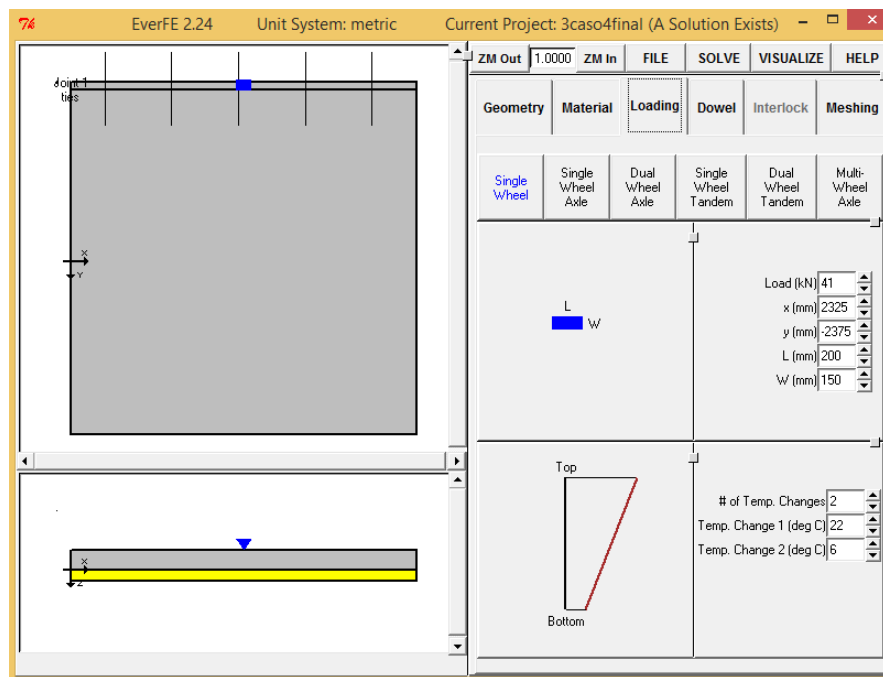


Figura 141: Modelación del elemento.

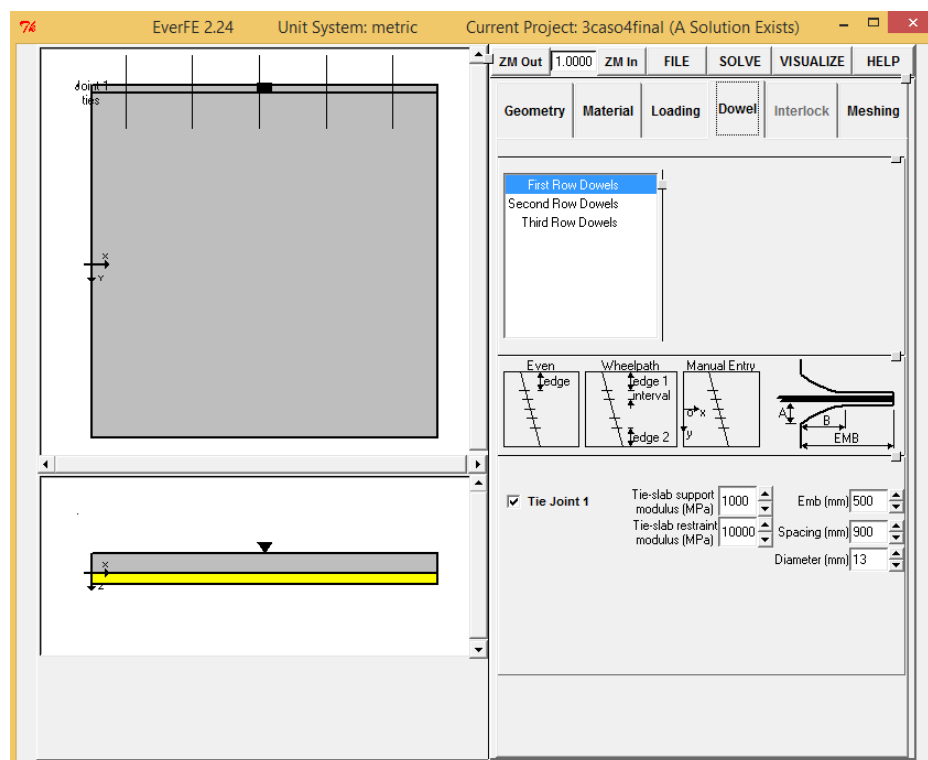


Figura 142: Modelación del elemento.

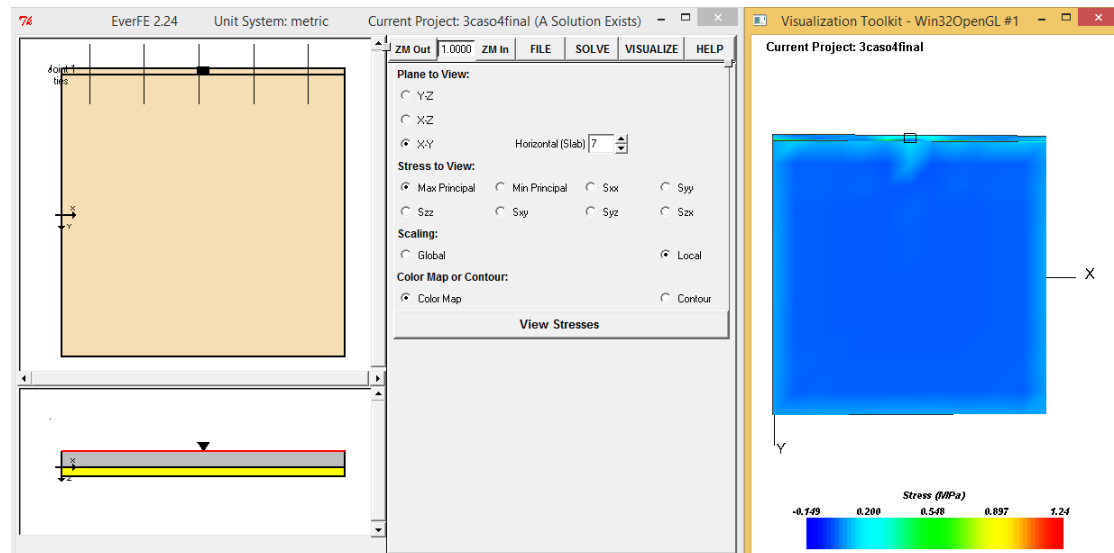


Figura 143: Esfuerzos producidos en el elemento.

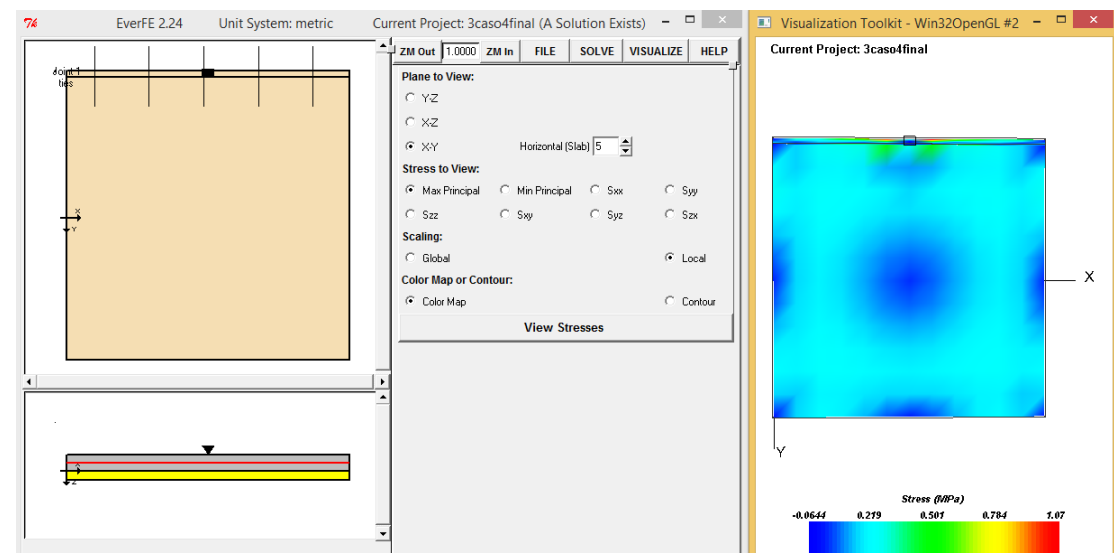


Figura 144: Esfuerzos producidos en el elemento.

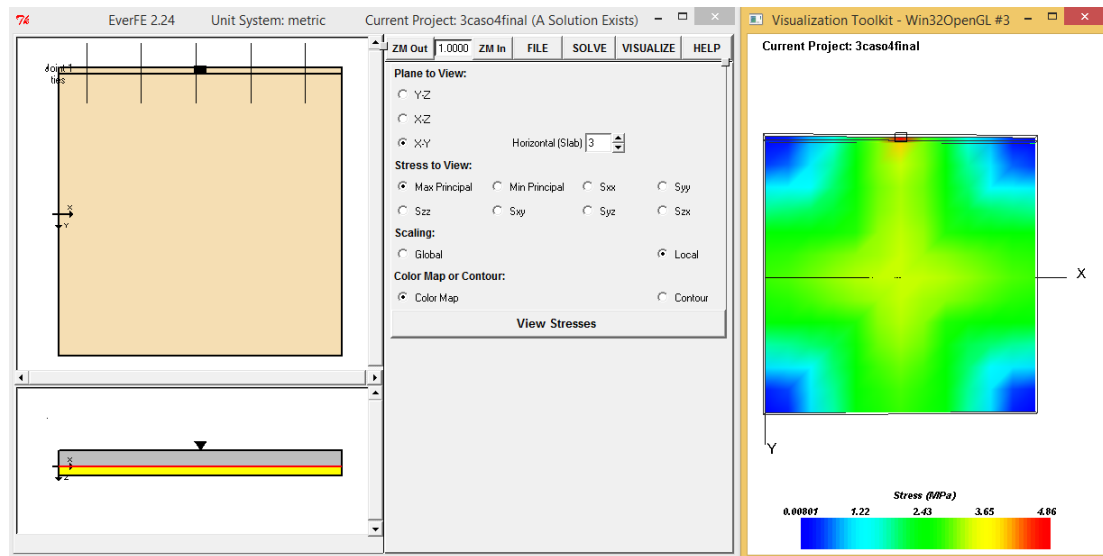


Figura 145: Esfuerzos producidos en el elemento.

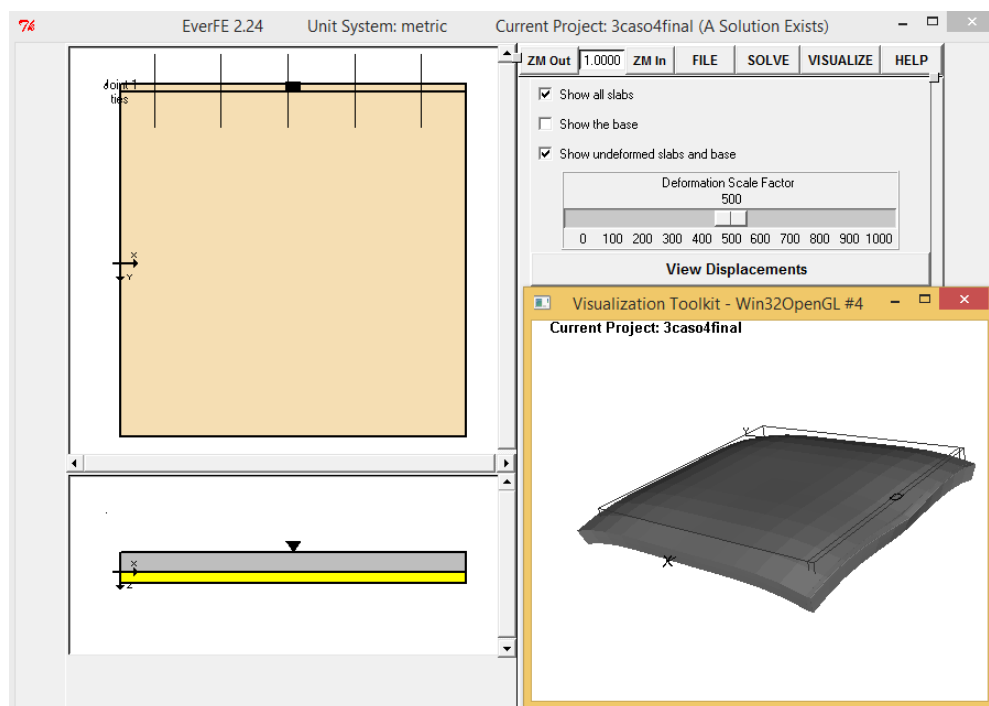


Figura 146: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.

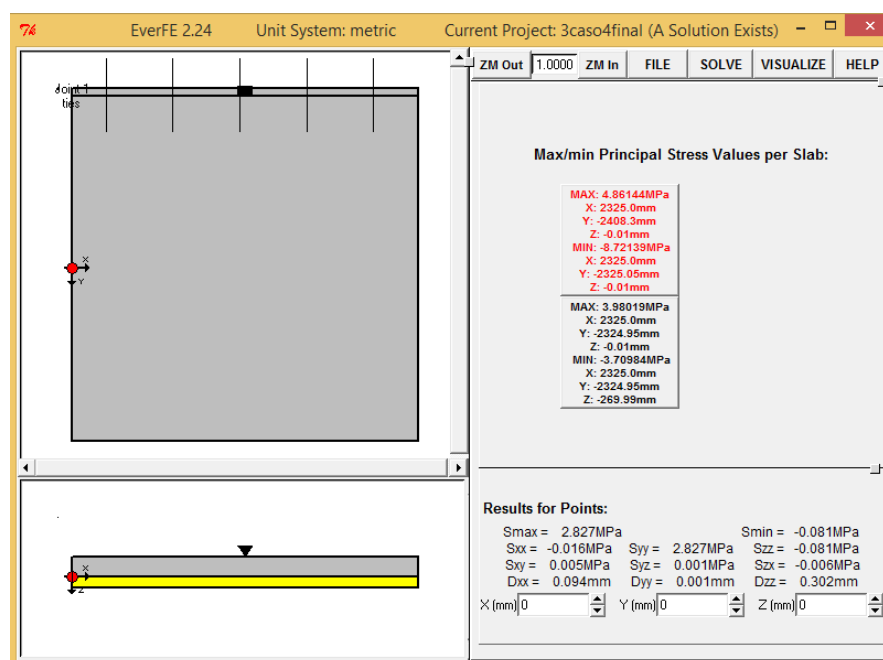


Figura 147: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.

7.3. Cálculos metodología recomendada

7.3.1. Alternativa Recomendada 1

La metodología recomendada 1 implica cortes en la cuña de pavimento rígido coincidentes con las juntas construidas en las cunetas. Así se obtienen elementos más cortos en donde los esfuerzos serán menores y con unas mejores respuestas de la subrasante.

Sección 1,55x1,00 m

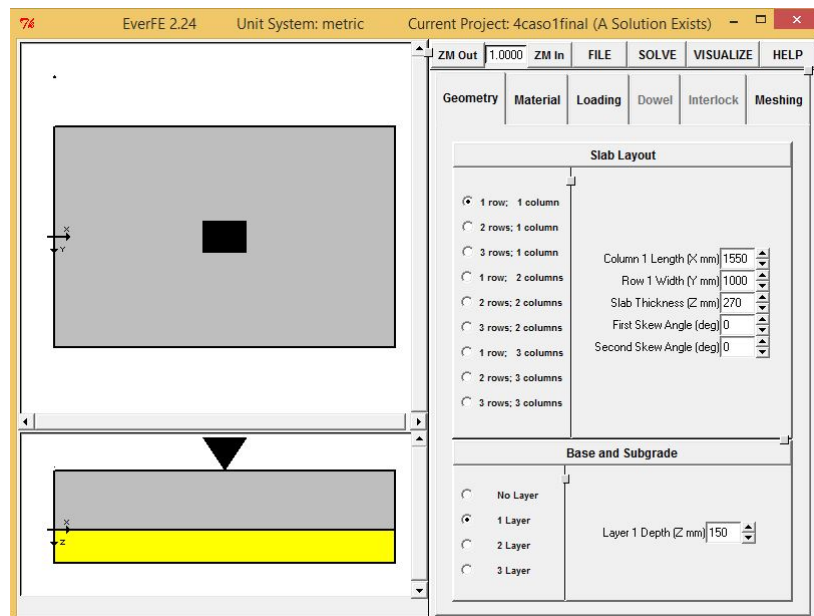


Figura 148: Modelación del elemento.

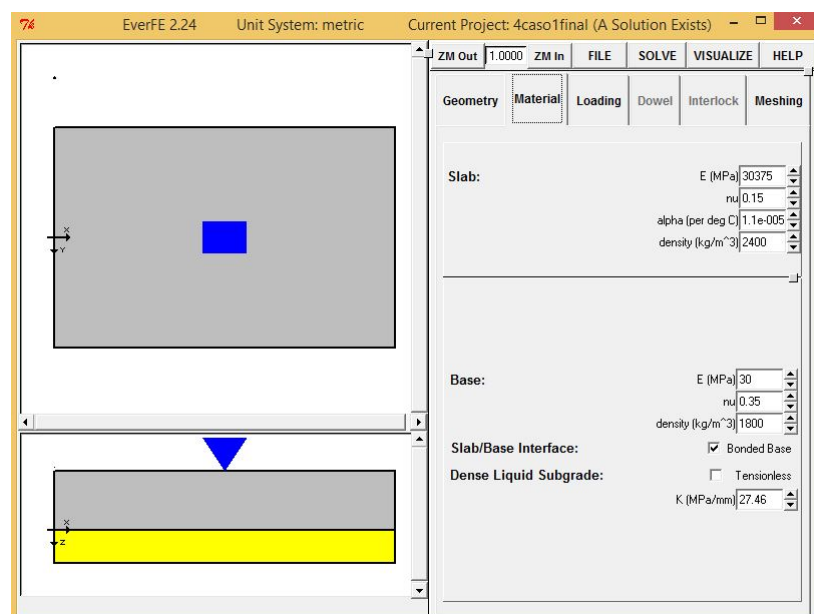


Figura 149: Modelación del elemento.

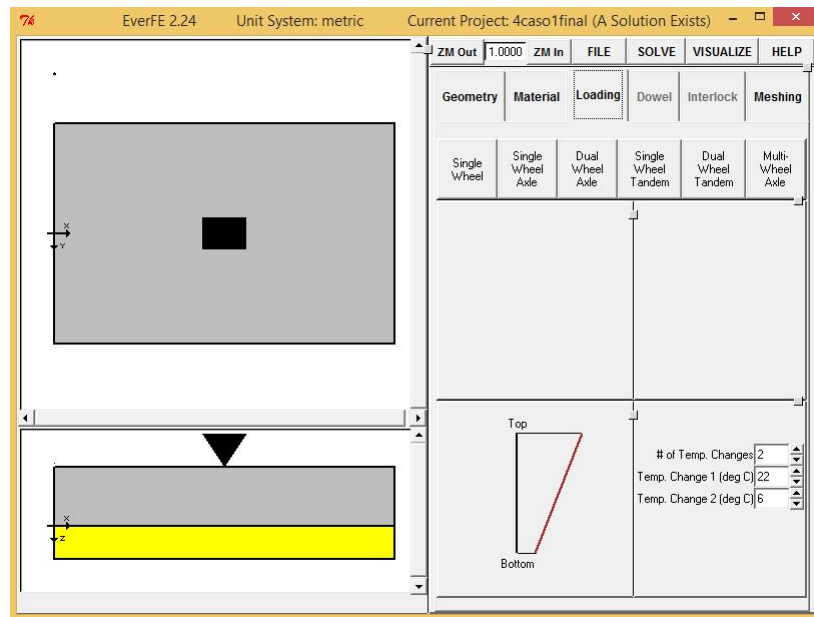


Figura 150: Modelación del elemento.

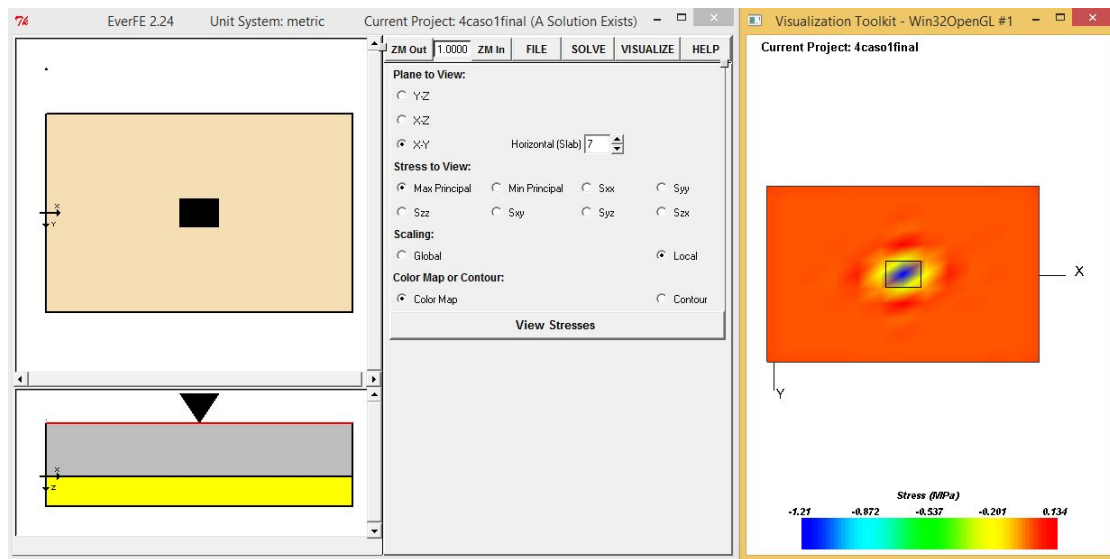


Figura 151: Esfuerzos producidos en el elemento.

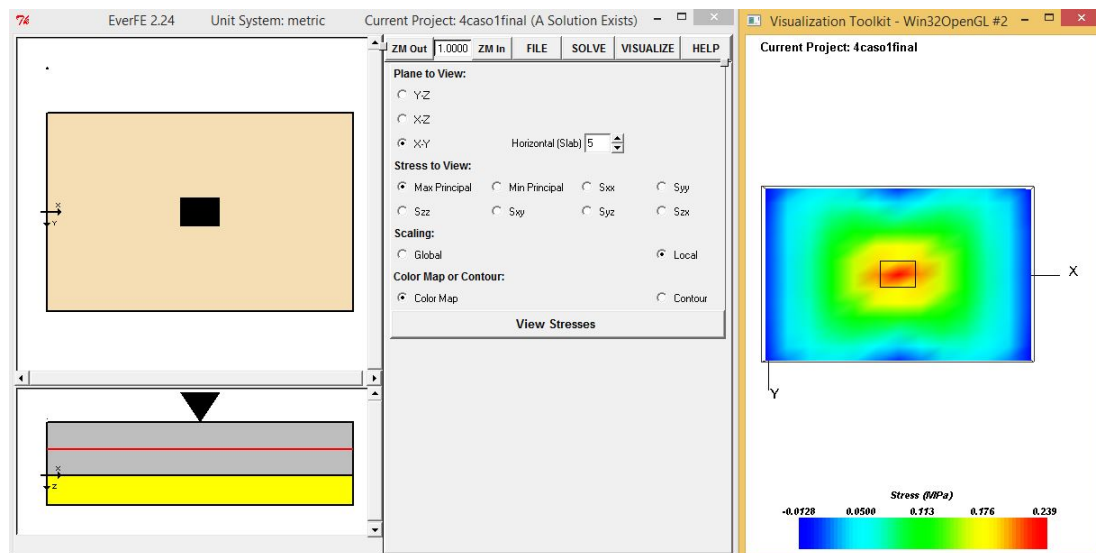


Figura 152: Esfuerzos producidos en el elemento.

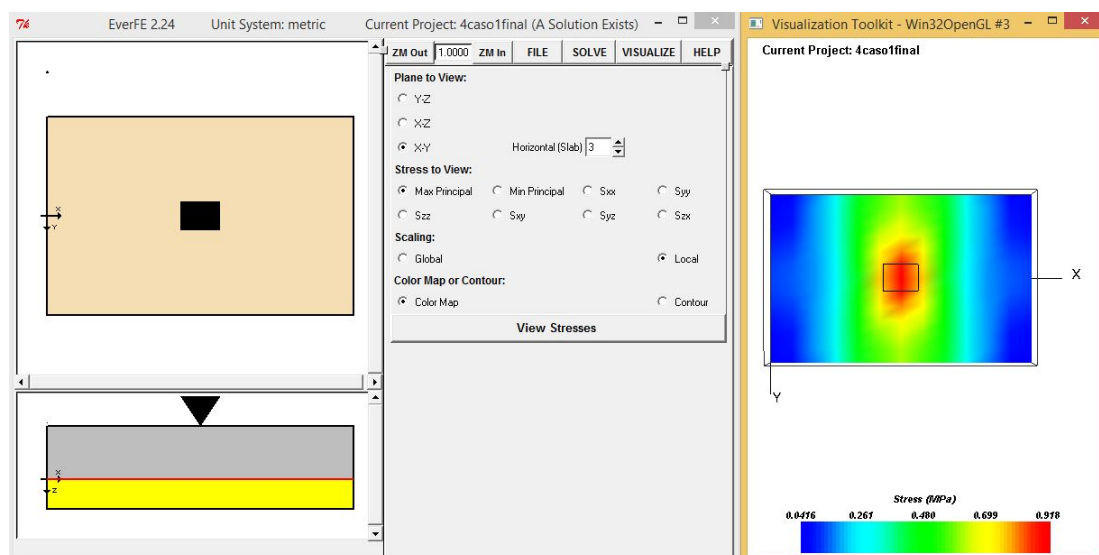


Figura 153: Esfuerzos producidos en el elemento.

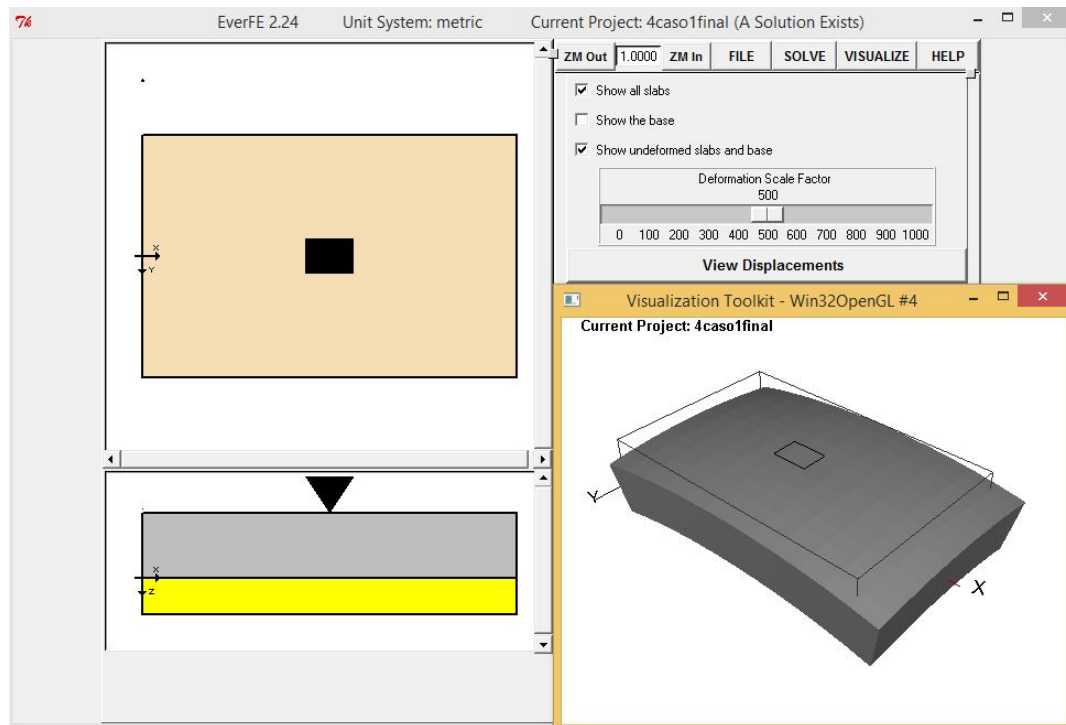


Figura 154: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.

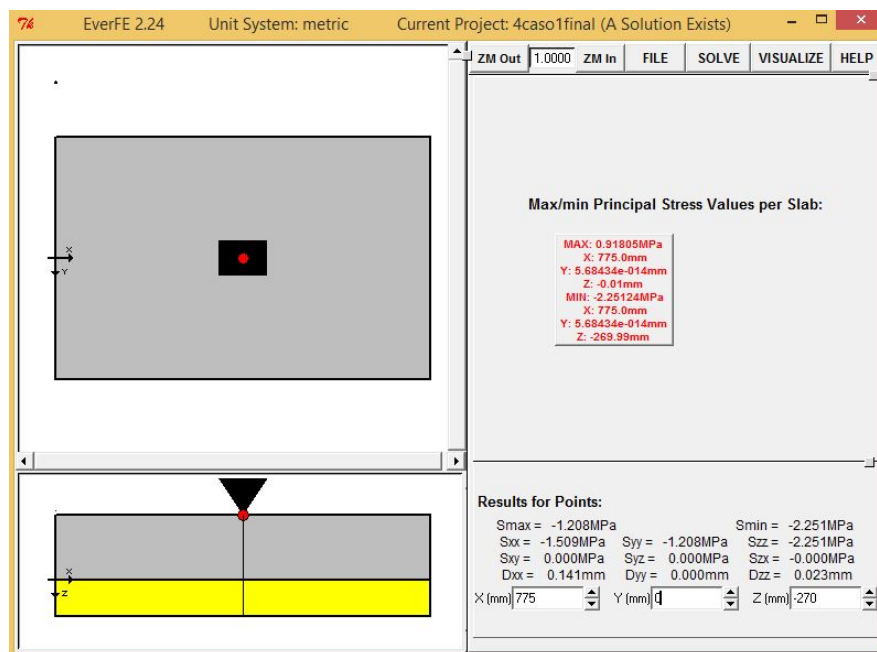


Figura 155: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.

Sección 1,55x0,50 m

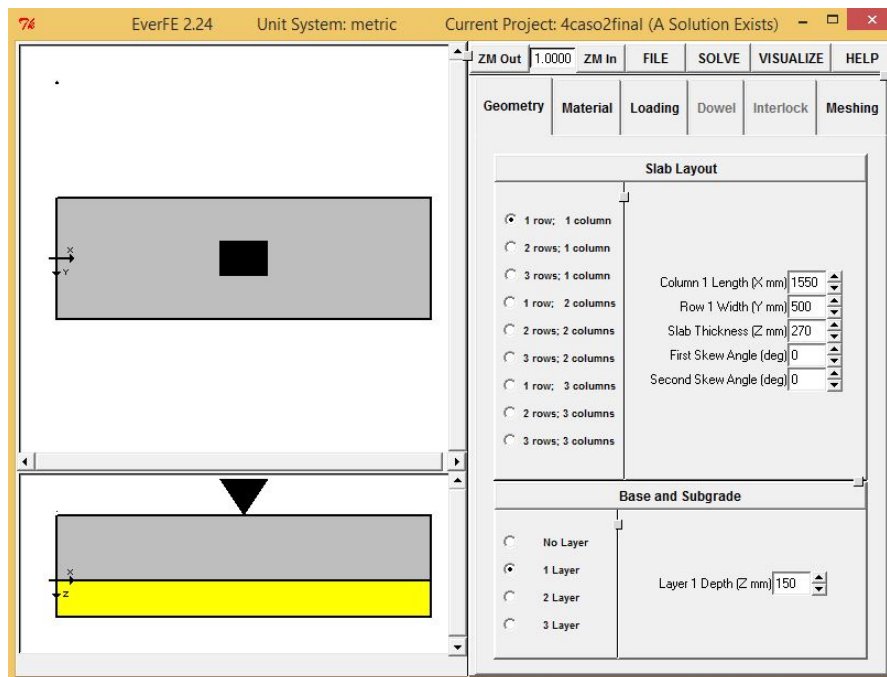


Figura 156: Modelación del elemento.

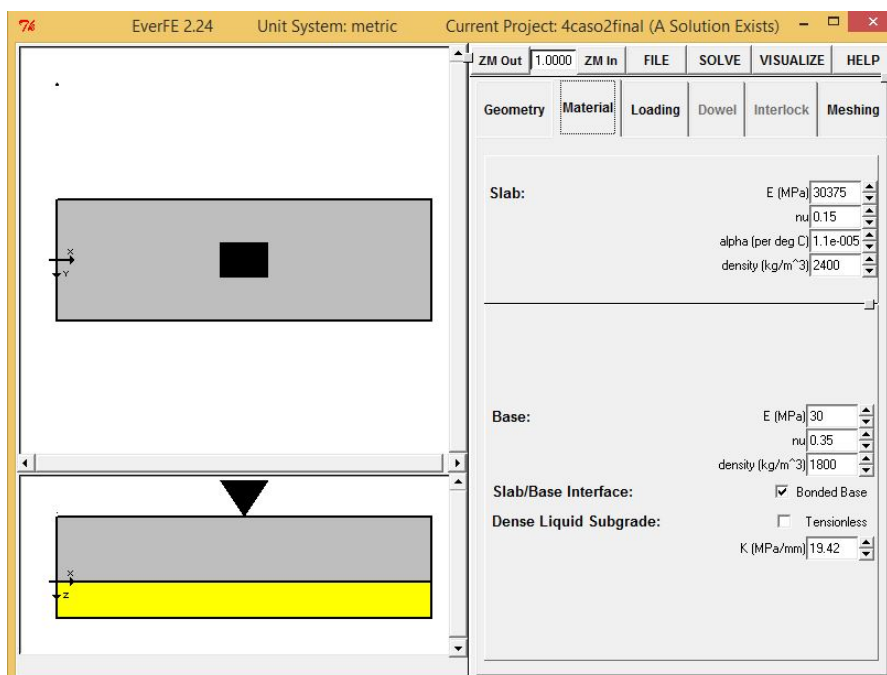


Figura 157: Modelación del elemento.

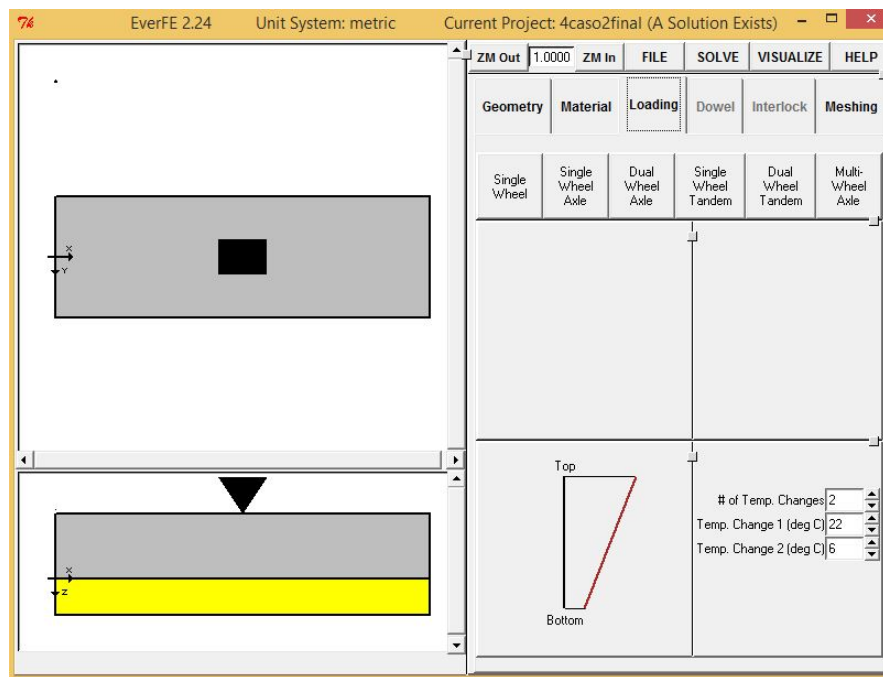


Figura 158: Modelación del elemento.

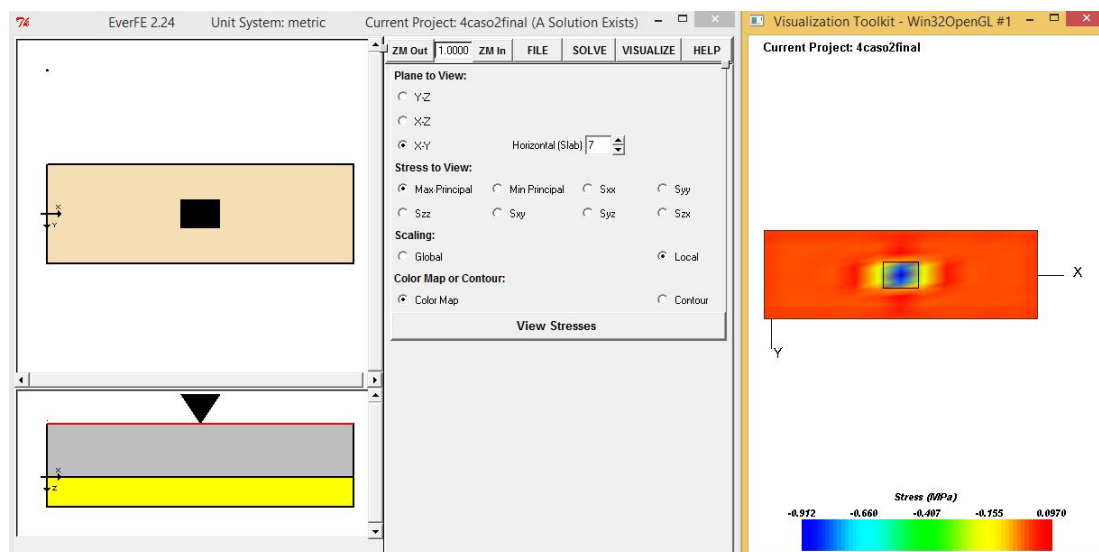


Figura 159: Esfuerzos producidos en el elemento.

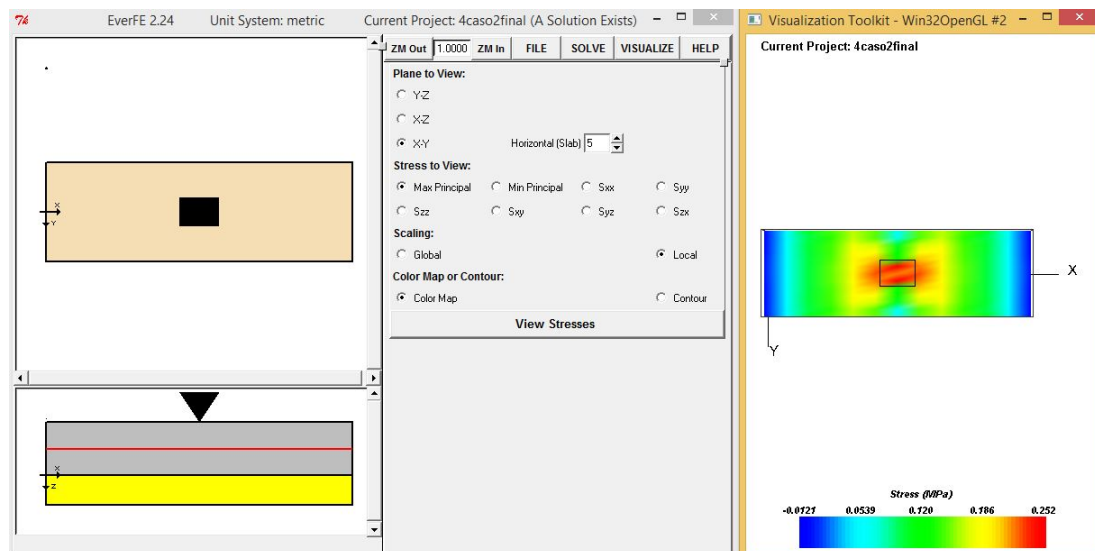


Figura 160: Esfuerzos producidos en el elemento.

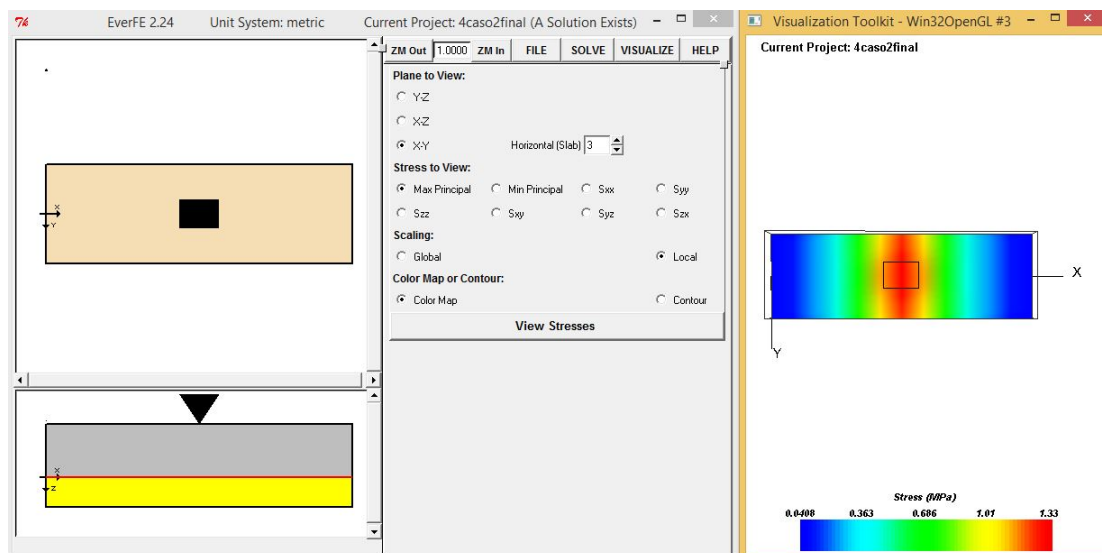


Figura 161: Esfuerzos producidos en el elemento.

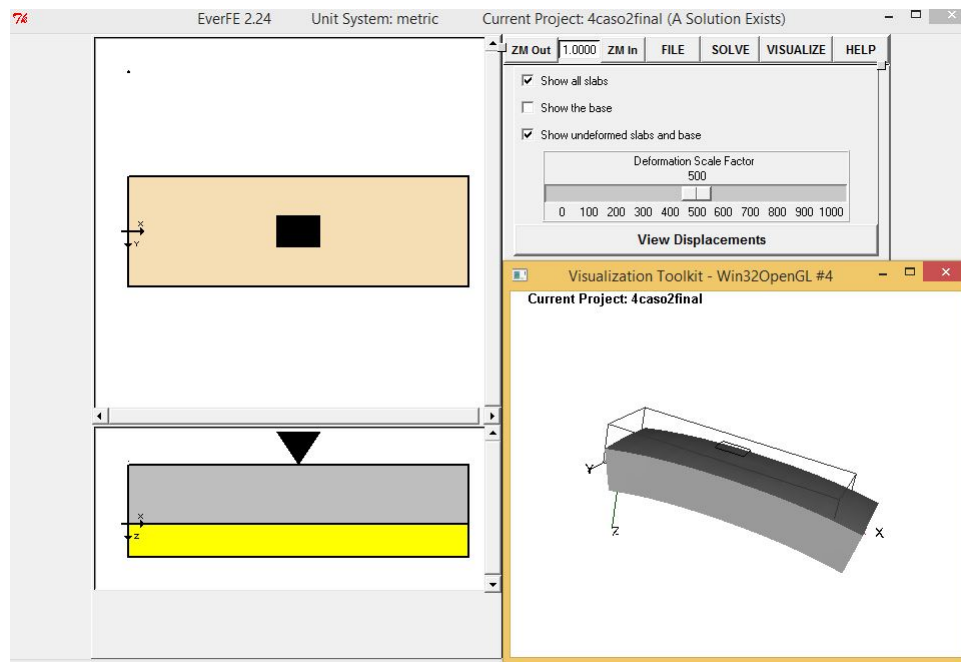


Figura 162: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.

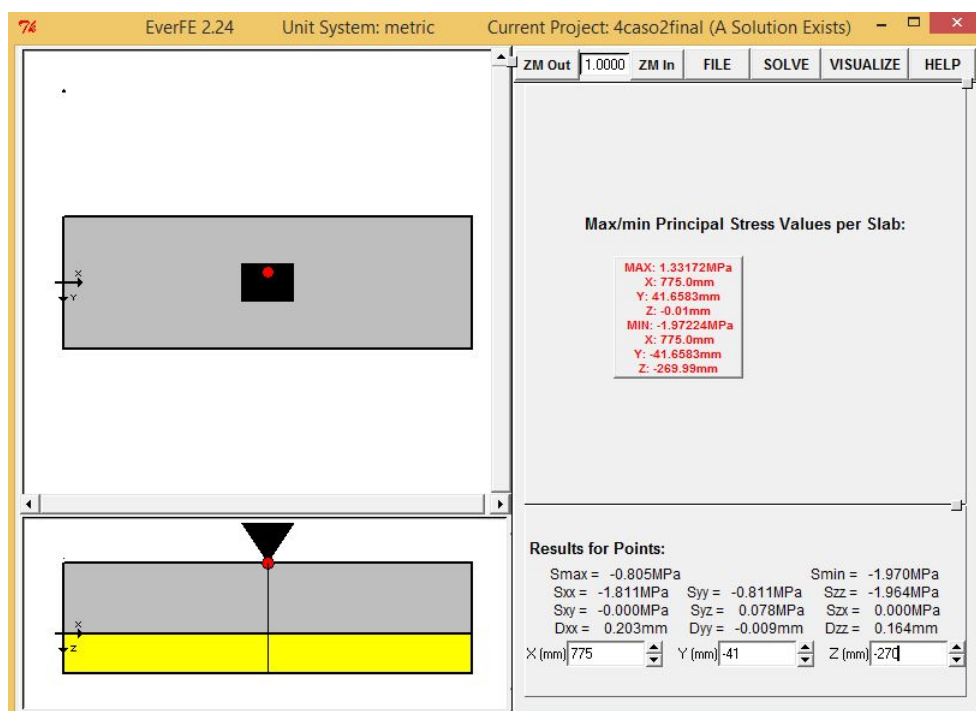


Figura 163: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.

Sección 1,55x0,25 m

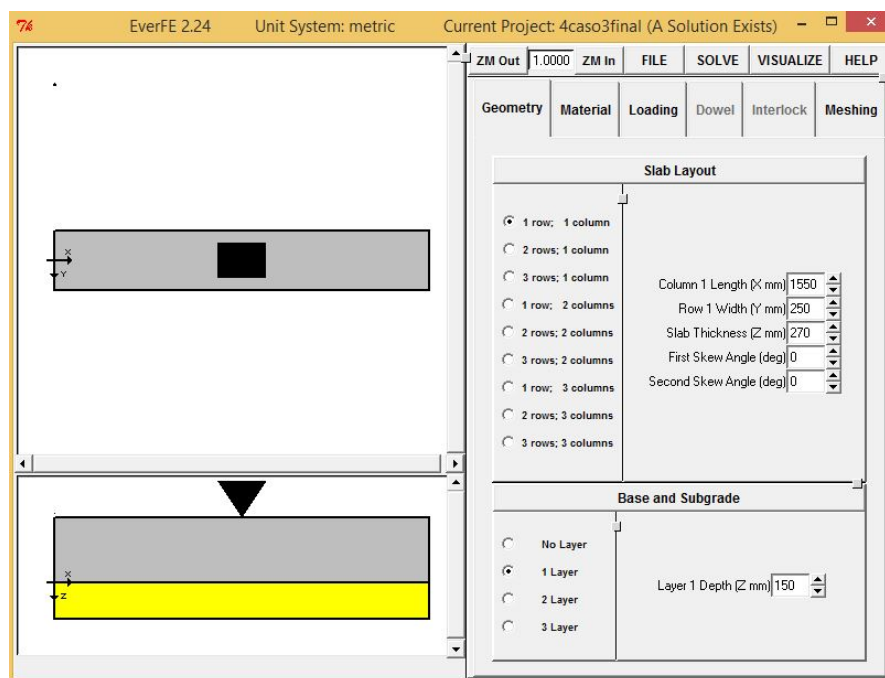


Figura 164: Modelación del elemento.

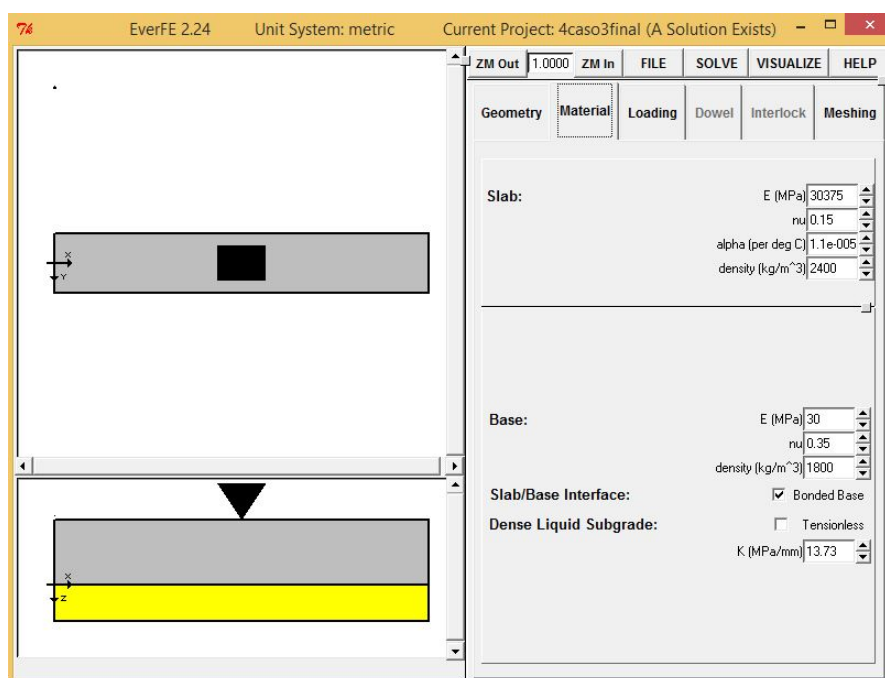


Figura 165: Modelación del elemento.

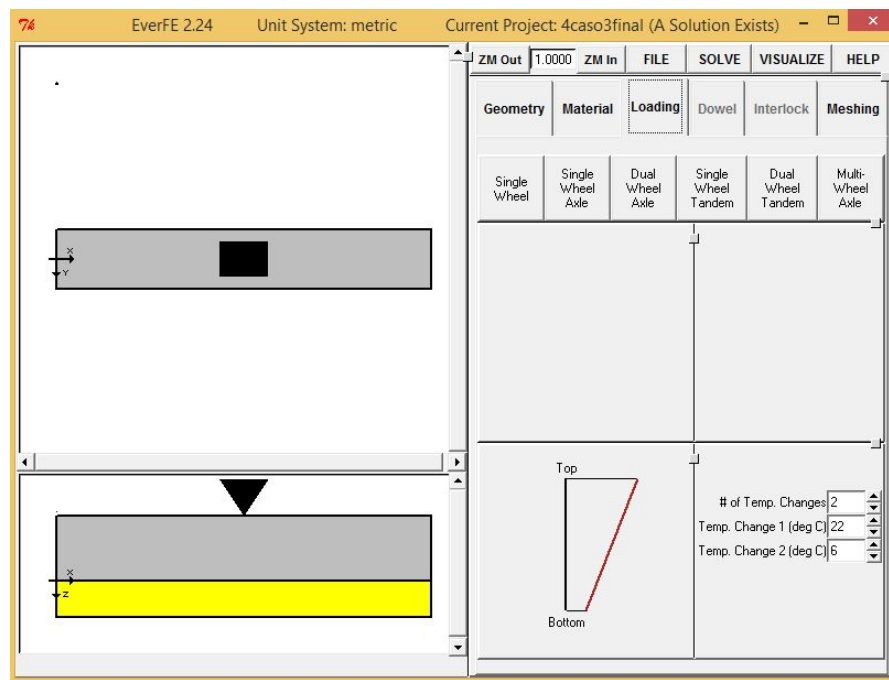


Figura 166: Modelación del elemento.

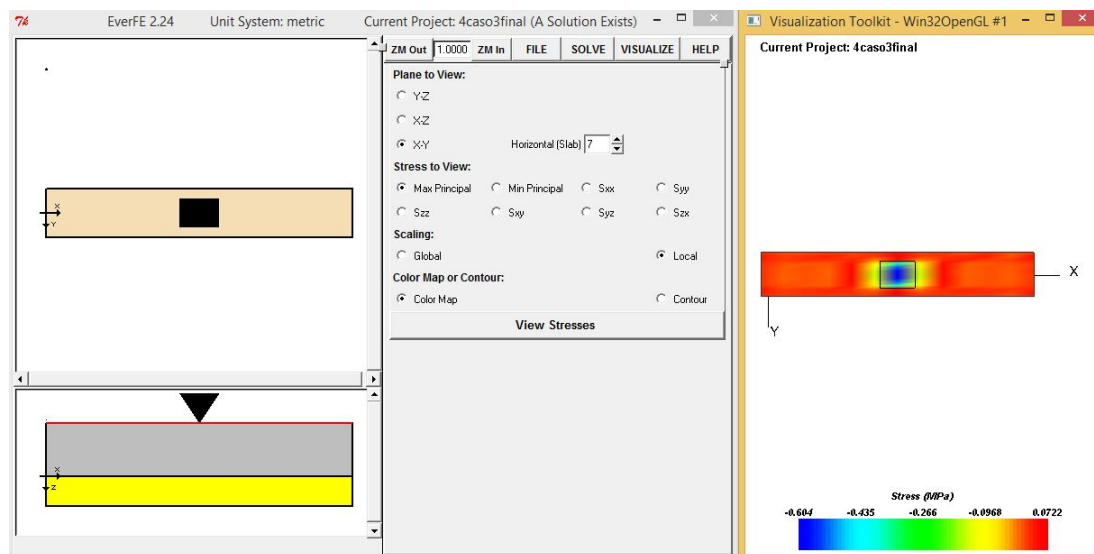


Figura 167: Esfuerzos producidos en el elemento.

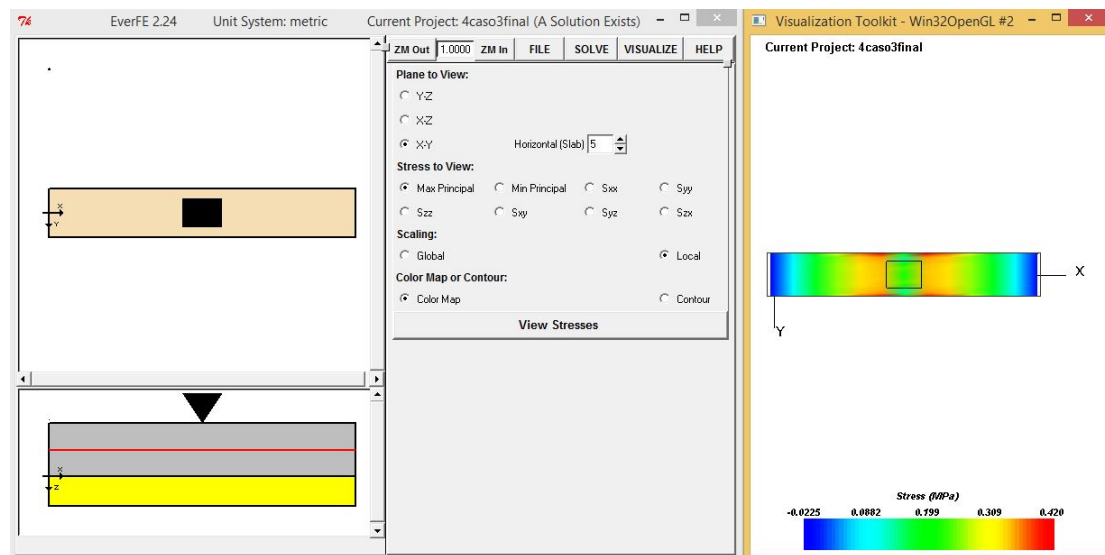


Figura 168: Esfuerzos producidos en el elemento.

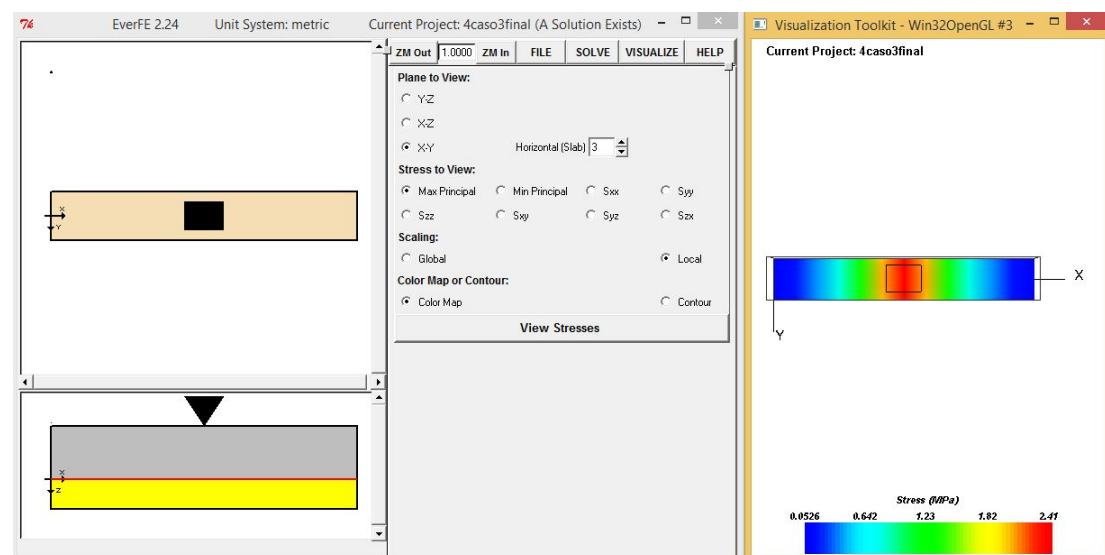


Figura 169: Esfuerzos producidos en el elemento.

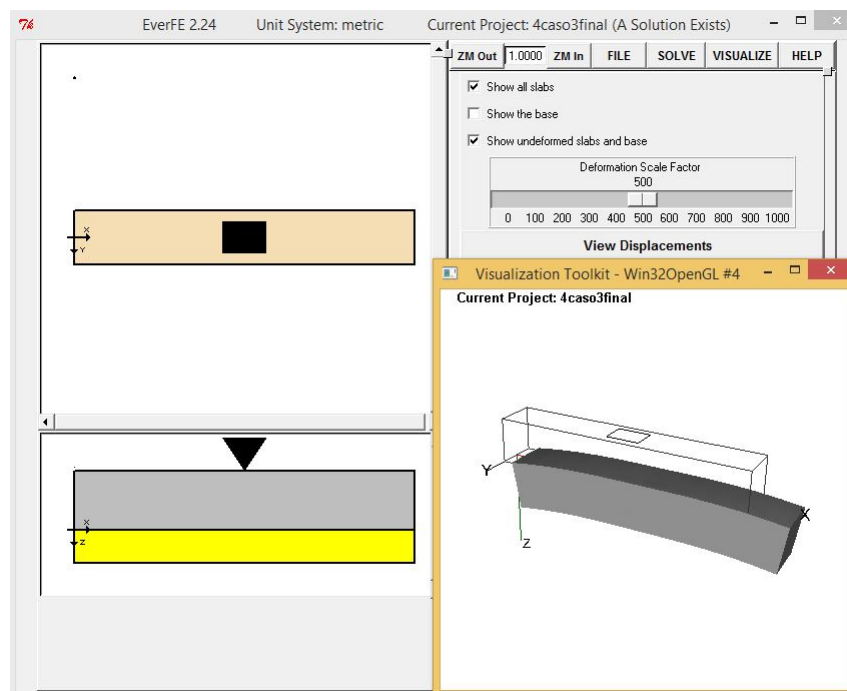


Figura 170: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.

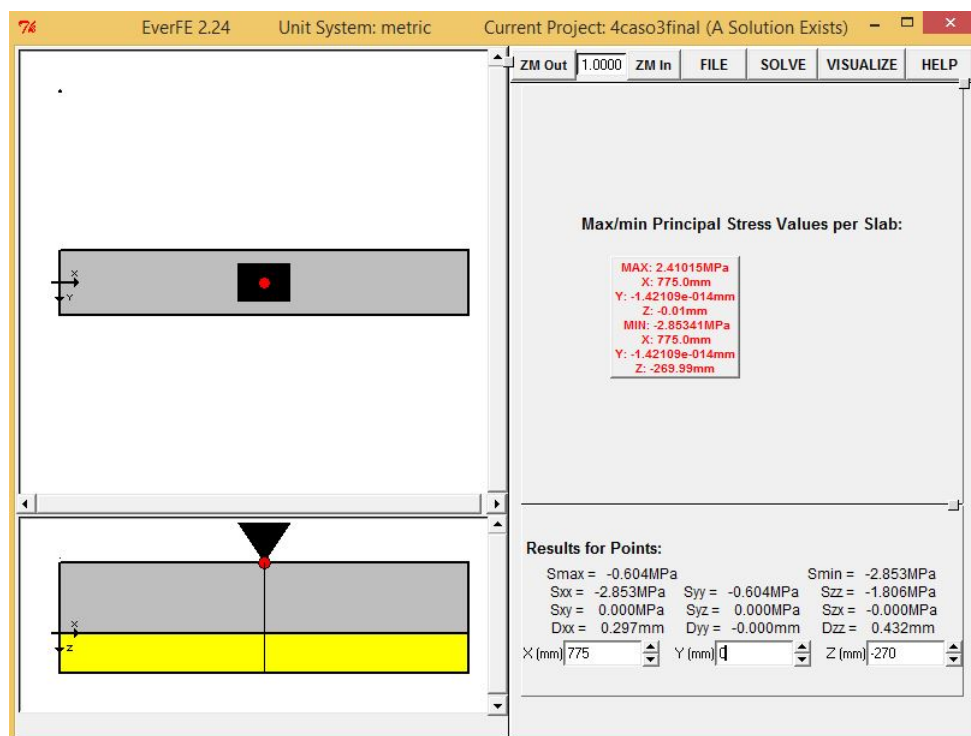


Figura 171: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.

Sección 1,55x0,10 m

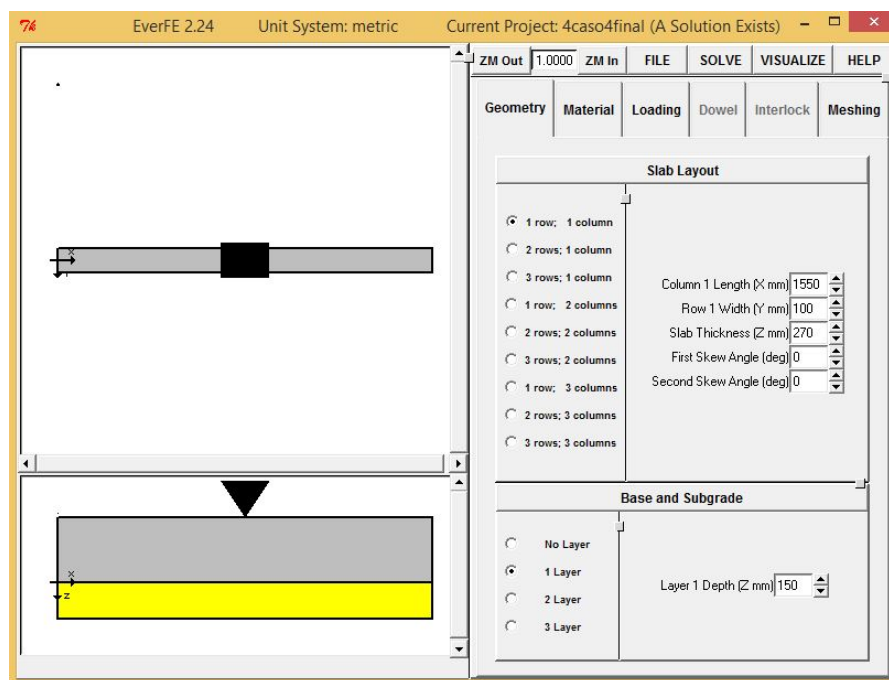


Figura 172: Modelación del elemento.

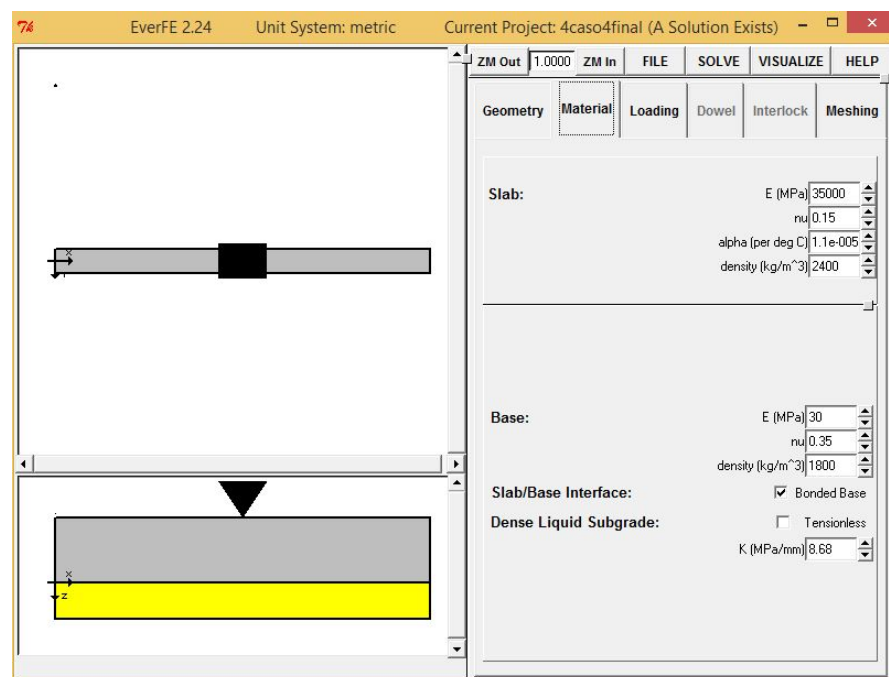


Figura 173: Modelación del elemento.

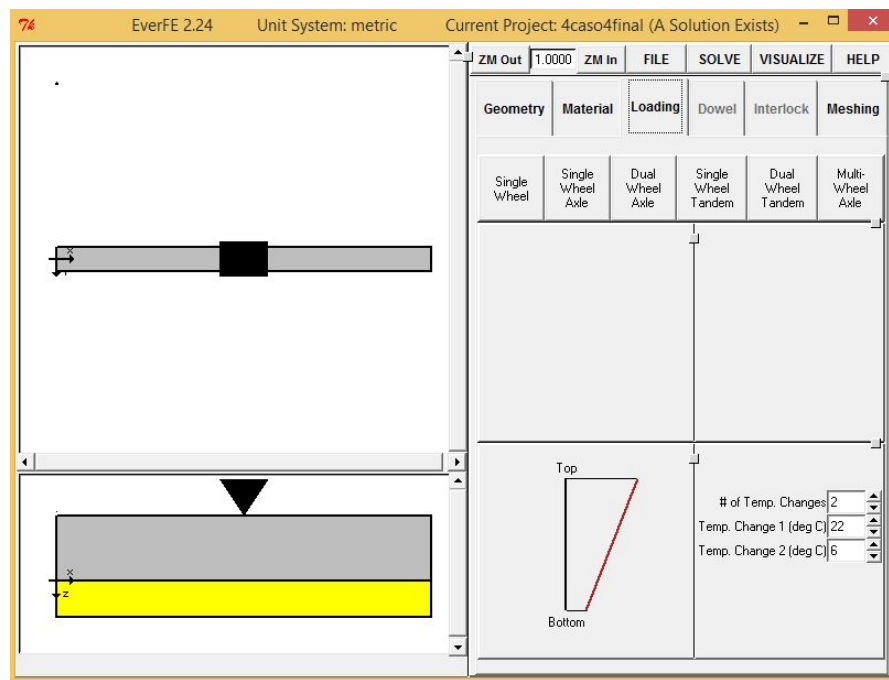


Figura 174: Modelación del elemento.

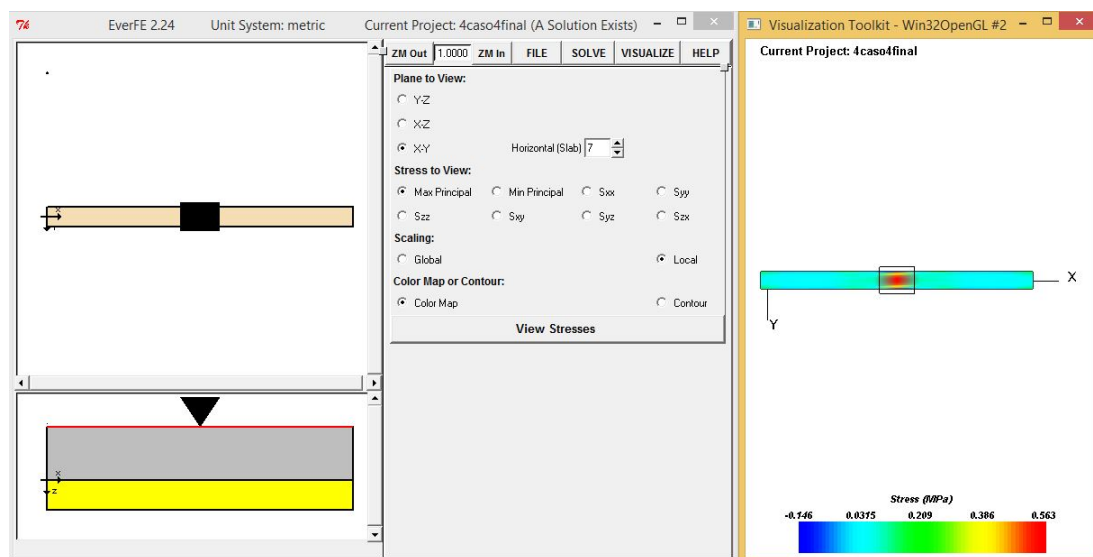


Figura 175: Esfuerzos producidos en el elemento.

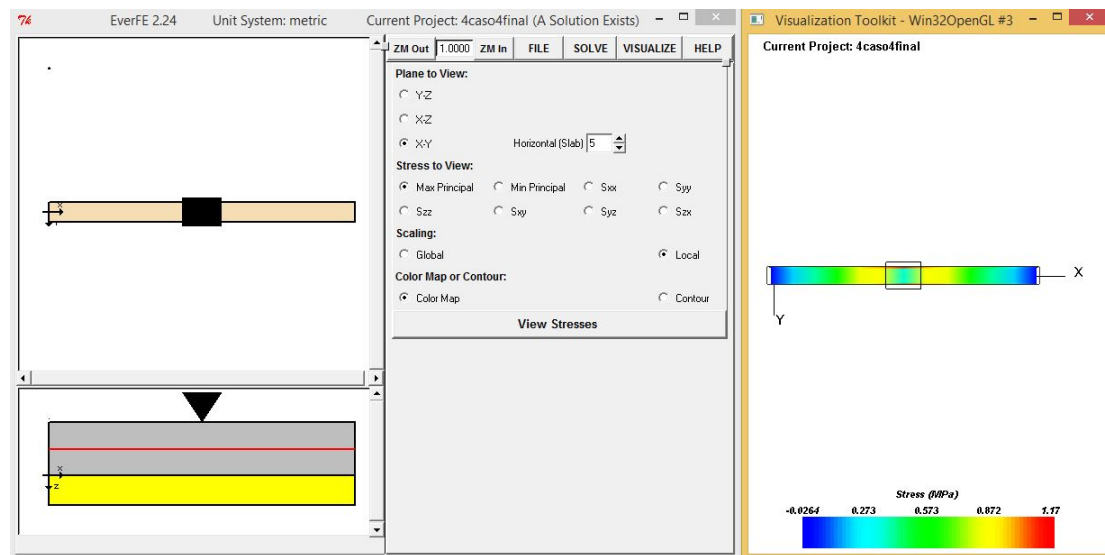


Figura 176: Esfuerzos producidos en el elemento.

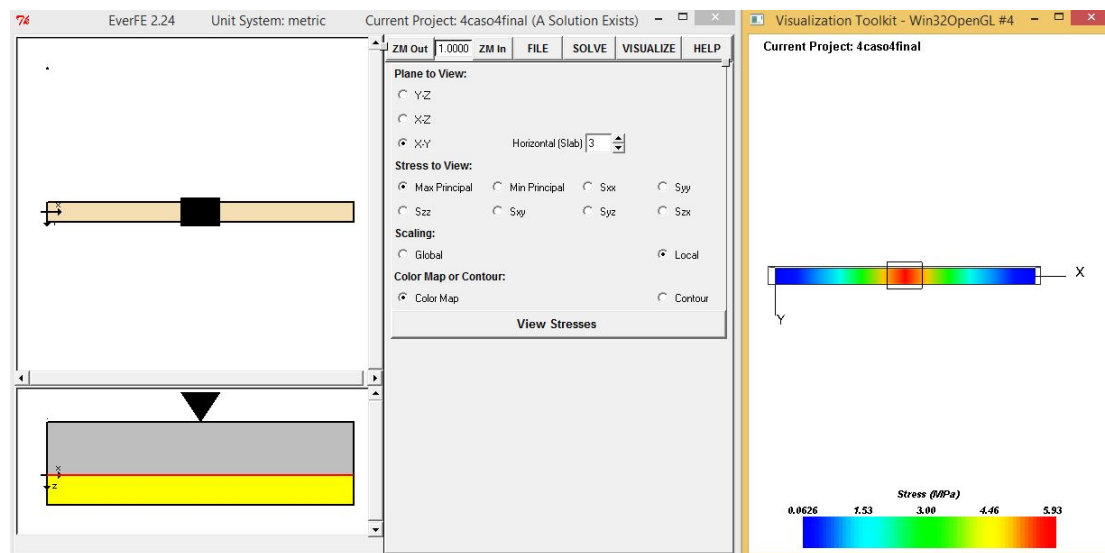


Figura 177: Esfuerzos producidos en el elemento.

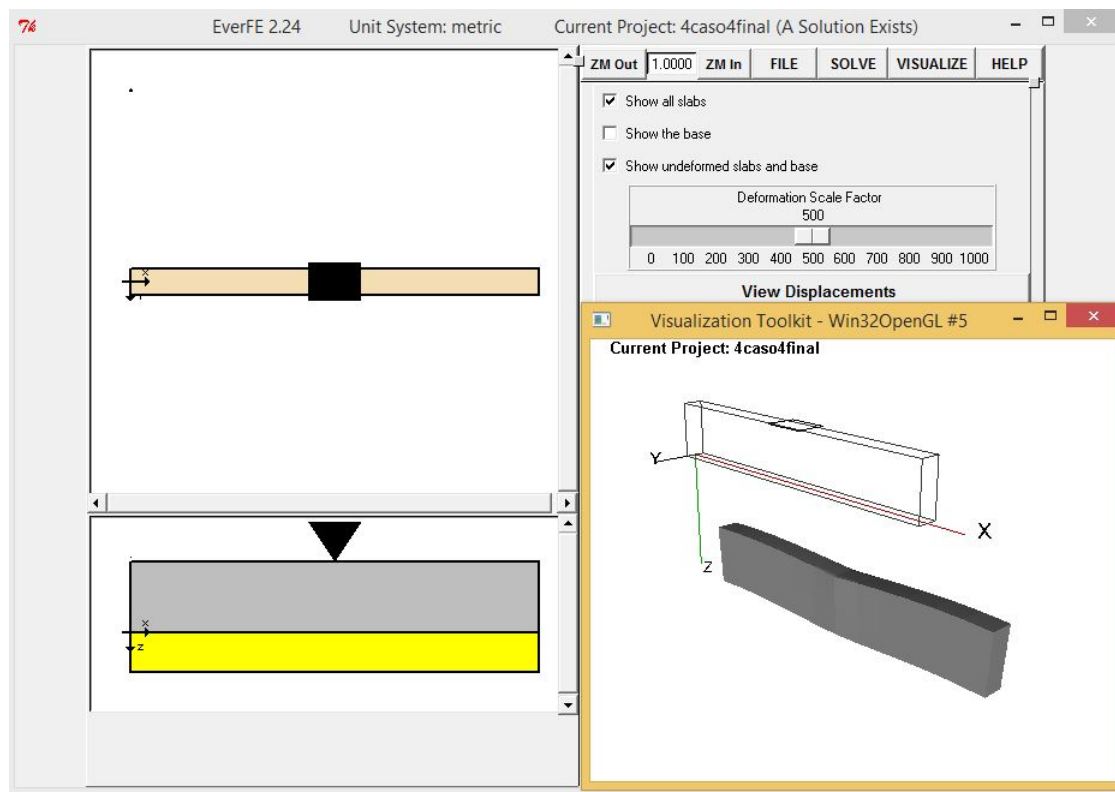


Figura 178: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.

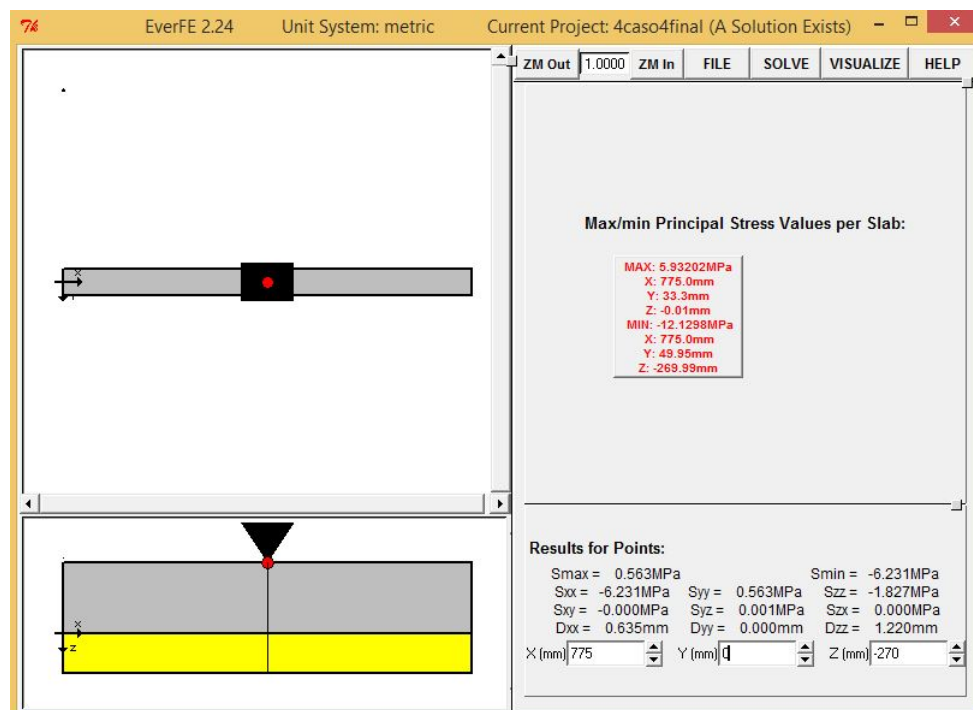


Figura 179: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.



7.3.2. Alternativa Recomendada 2

Corrección de subrasante

Datos de entrada:

B	5.65	m
L	4.65	m
k	30	MPa/m

De la ecuación 10 se tiene:

$$k_s = \frac{E_s}{1-\nu^2} I$$

I es el factor que depende de la forma de la cimentación. De la ecuación 11 se tiene:

$$I = \frac{m^{1/2}}{T_m} = 1,10$$

Por lo tanto el k corregido es:

$$k_s = 37,69 \text{ MPa}$$

Análisis Tensional del Elemento

Dentro del análisis tensional del elemento se analizan 3 esfuerzos puntuales:

- Por alabeo
- Por cargas y,
- Por fricción.

Los datos a utilizarse para el análisis se especifican en el cuadro 57.

DATOS			
Mr	37.69	kg/cm3	Módulo de reacción de la subbase
Lx	465	cm	Longitud x
Ly	565	cm	Longitud y
Ec	309740.30	kg/cm2	Módulo elástico del concreto
Sc	45.89	kg/cm2	Módulo de ruptura
μ	0.15		Coefficiente de Poisson
Δt	22	$\Delta ^\circ\text{C}$	Diferencial de temperatura
α	0.000009	cm/ $\Delta ^\circ\text{C}$	Coefficiente de expansión térmica
h	27	cm	Espesor de la losa
f	1.5		Coefficiente de fricción
w	0.0024	kg/cm3	Peso de la losa

Cuadro 56: Datos de entrada para análisis tensional.

■ Esfuerzos por Alabeo

Radio de rigidez relativa.- De acuerdo a (19):

$$Lr = \sqrt[4]{\frac{EH^3}{12(1-u^2)k}} = 60,94 \text{ cm}$$

De esta forma al dividir el largo y el ancho de la losa de estudio para el radio de rigidez relativa se obtiene un valor, el mismo que se compara con la figura 18 para encontrar los coeficientes de bradbury.

$$\begin{aligned} lx/Lr &= 7,63 & C1 &= 1,007 = Cx \\ ly/Lr &= 9,27 & C2 &= 1,048 = Cy \end{aligned}$$

Esfuerzos en el borde longitudinal.- De acuerdo a (30):

$$\sigma_{tb} = \frac{CE\alpha\Delta t}{2} = 30,89 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en el interior de la losa.- De acuerdo a (31):

$$\sigma_{ti} = \frac{E\alpha\Delta t}{2} \left[\frac{C_x + uC_y}{1-u^2} \right] = 36,53 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en la esquina de la losa.- De acuerdo a (32):

$$\sigma_e = \frac{E\alpha\Delta t}{3(1-u)} \left[\sqrt{\frac{a}{Lr}} \right] = 9,57 \text{ kg/cm}^2$$

■ Esfuerzos por efectos del tráfico

Para realizar el análisis por efectos del tráfico se utilizará una carga puntual equivalente a un neumático de un camión tipo, esto es una carga de 4100 kg, la presión de inflado del neumático utilizada para todos los casos de estudio es de 14 kg/cm².

- 1) *Carga Aplicada:* $P = 4100 \text{ kg}$.
- 2) *Número de ruedas:* 1
- 3) *Presión de ruedas:* 14 kg/cm²
- 4) *Carga por rueda:* 4100 kg.
- 5) *Area de contacto por rueda:* $(4)/(3) = 292,85 \text{ cm}^2$

Radio de contacto equivalente

De la ecuación 16 se tiene:

$$a = \sqrt[2]{\frac{A_T}{\pi}} = 9,66$$

Radio ficticio de la distribución de carga, b

De la ecuación 17 y 18 se tiene:



$$b = \sqrt[2]{1,6a^2 + h^2} - 0,675h \quad \text{si} \quad a < 1,724h$$

$$b = a \quad \text{si} \quad a > 1,724h$$

$$b=11.41$$

Relaciones para obtener coeficientes de Westergard

$$L/b = 5.34$$

$$a/L = 0.16$$

Esfuerzos en el interior de la losa

De acuerdo a la ecuación 20 se tiene:

$$\sigma_t = 0,31625 \frac{P}{H^2} \left(4 \log_{10} \frac{L_r}{b} + 1,0693 \right) = 7,08 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en el borde de la losa

De acuerdo a la ecuación 26 se tiene:

$$\sigma_t = 0,57185 \frac{P}{2H^2} \left(4 \log_{10} \frac{L_r}{b} + 0,3593 \right) = 10,52 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzos en la esquina de la losa

De acuerdo a la ecuación 24 se tiene:

$$\sigma_e = \frac{3P}{H^2} \left[1 - \left(\frac{1,414a}{L_r} \right)^{1,2} \right] = 14,08 \text{ kg/cm}^2$$

- Esfuerzos por efectos de la fricción

De la ecuación 33 se tiene:

$$\sigma_t = \frac{wfL}{2} = 11,92 \text{ psi} = 0,837 \text{ kg/cm}^2$$

Un resumen de las tensiones obtenidas se encuentra en el cuadro 58.

Tipos de esfuerzos	Esfuerzos obtenidos (kg/cm2)		
	Esquina	Borde	Interior
Alabeo	9.57	30.89	36.53
Carga	14.08	10.52	7.08
Fricción	0.837	0.837	0.837
Totales	24.49	42.25	44.45

Cuadro 57: Resumen de tensiones losa 4.65x1.00.

Análisis por elementos finitos

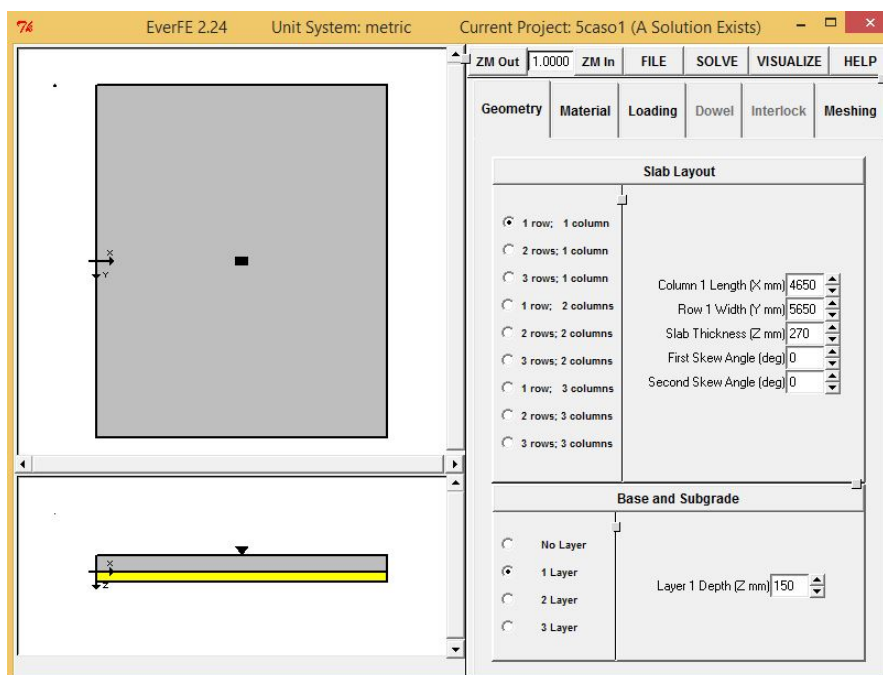


Figura 180: Modelación del elemento.

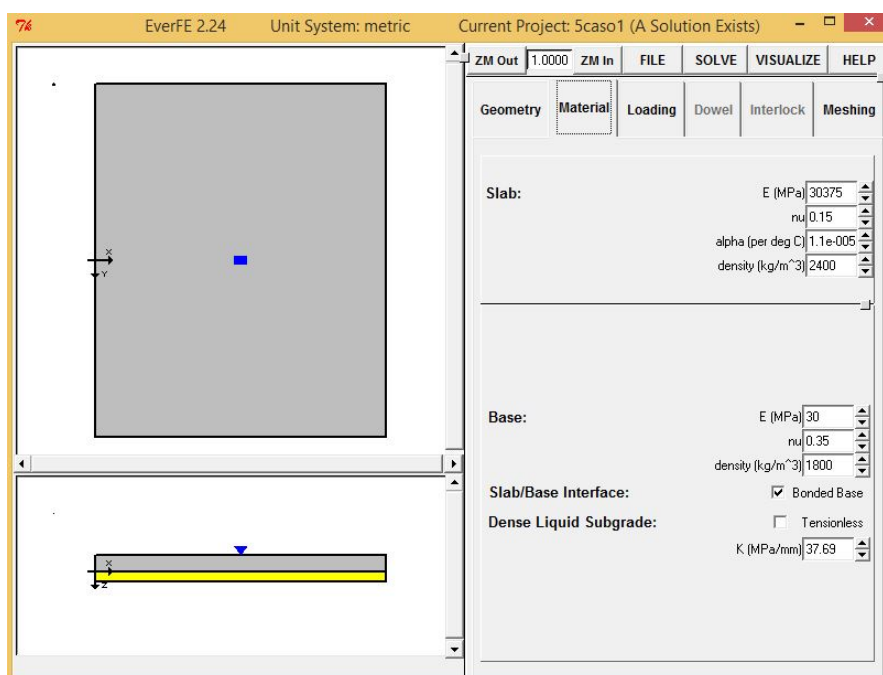


Figura 181: Modelación del elemento.

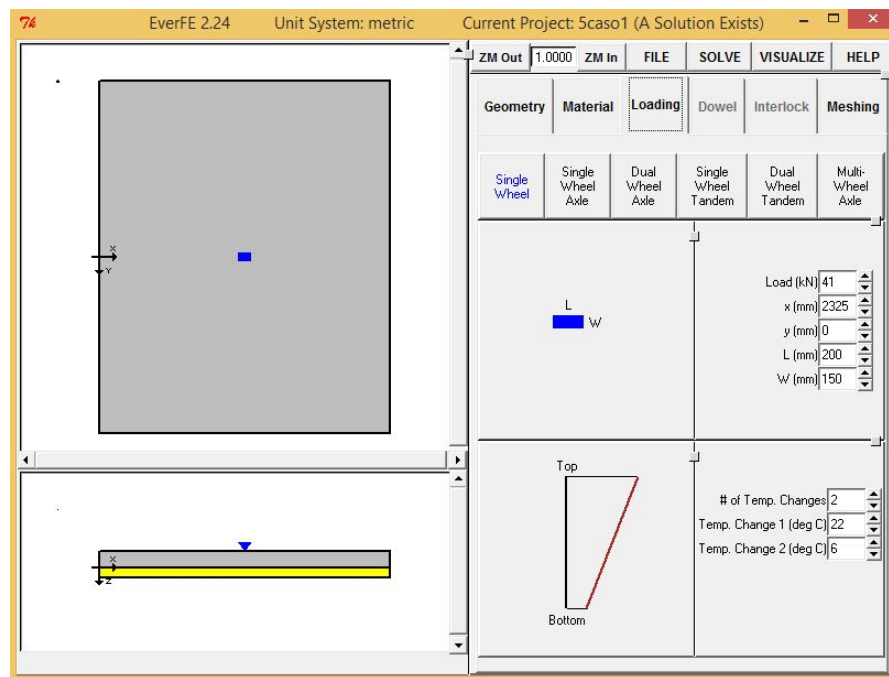


Figura 182: Modelación del elemento.

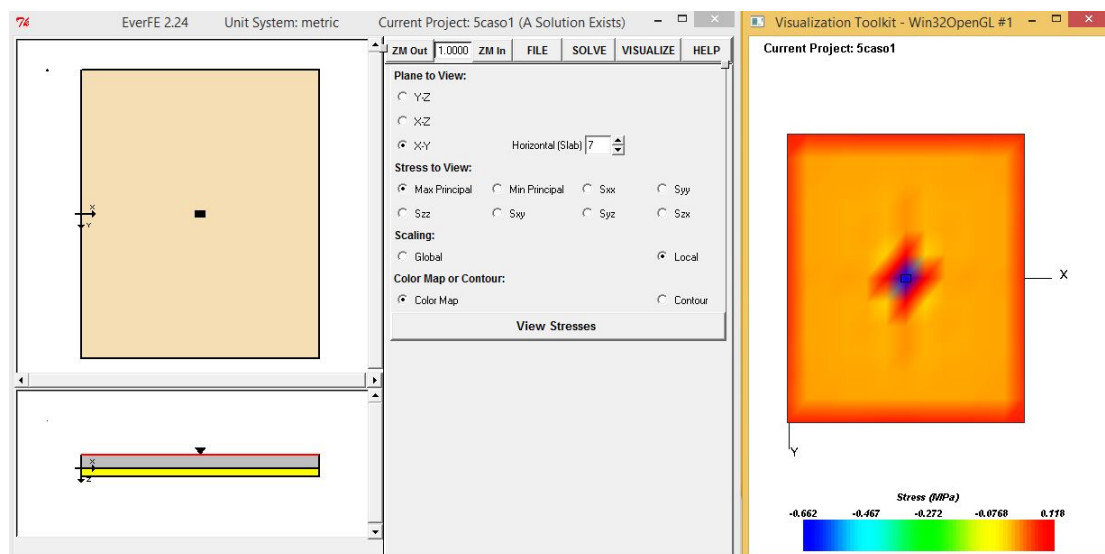


Figura 183: Esfuerzos producidos en el elemento.

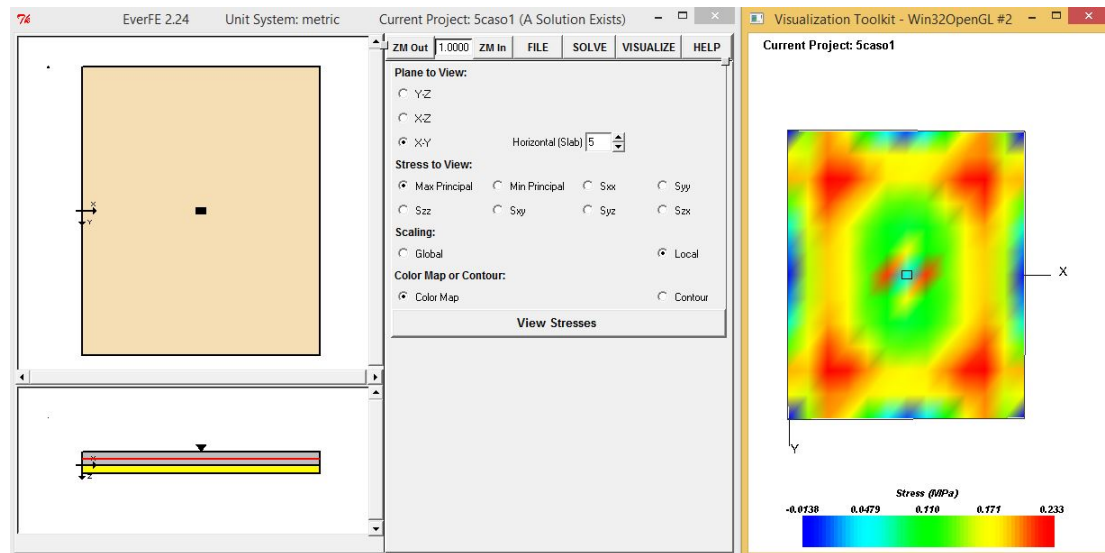


Figura 184: Esfuerzos producidos en el elemento.

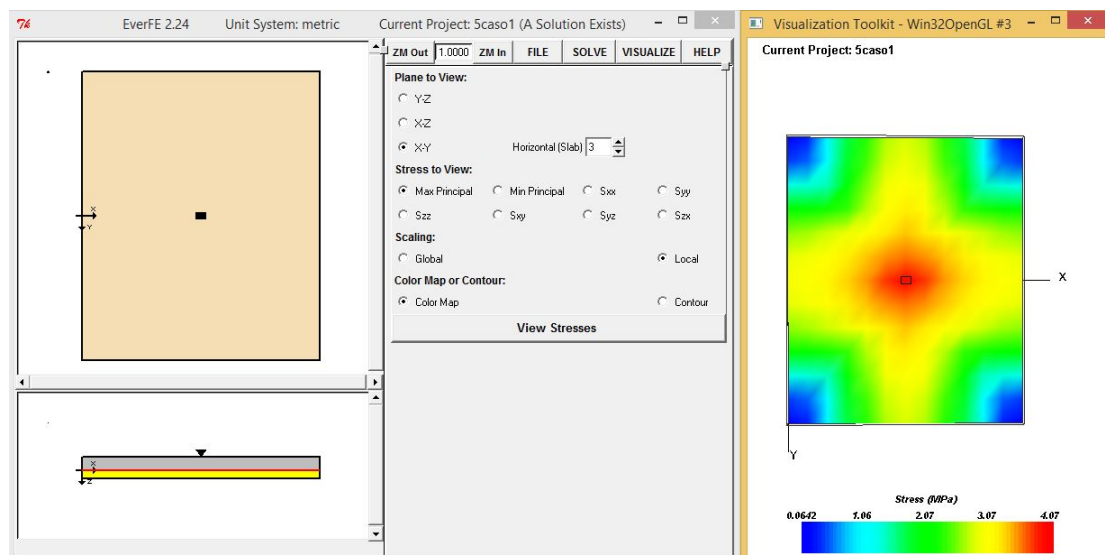


Figura 185: Esfuerzos producidos en el elemento.

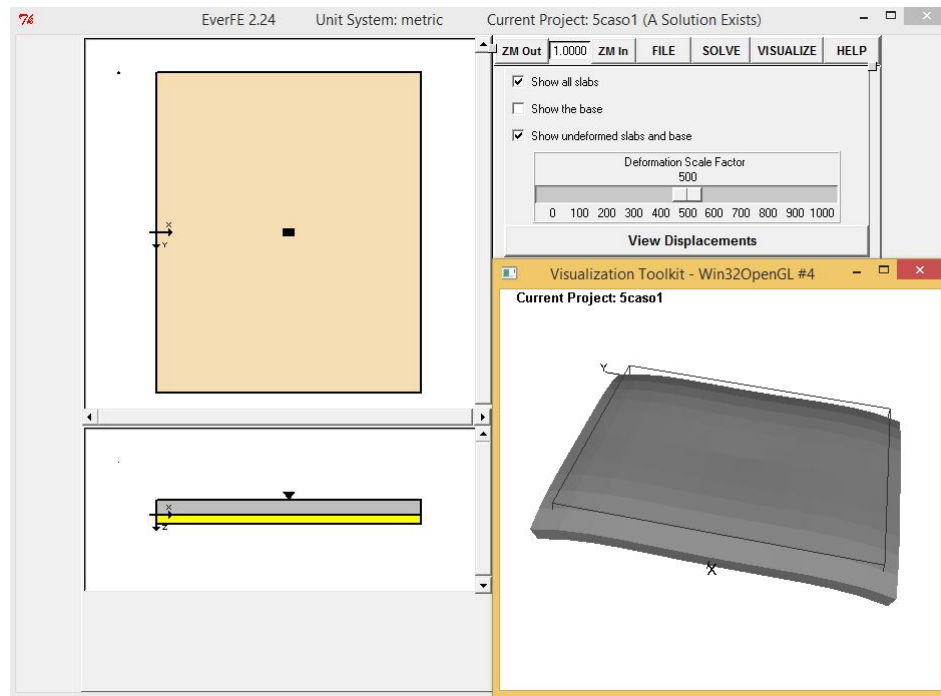


Figura 186: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.

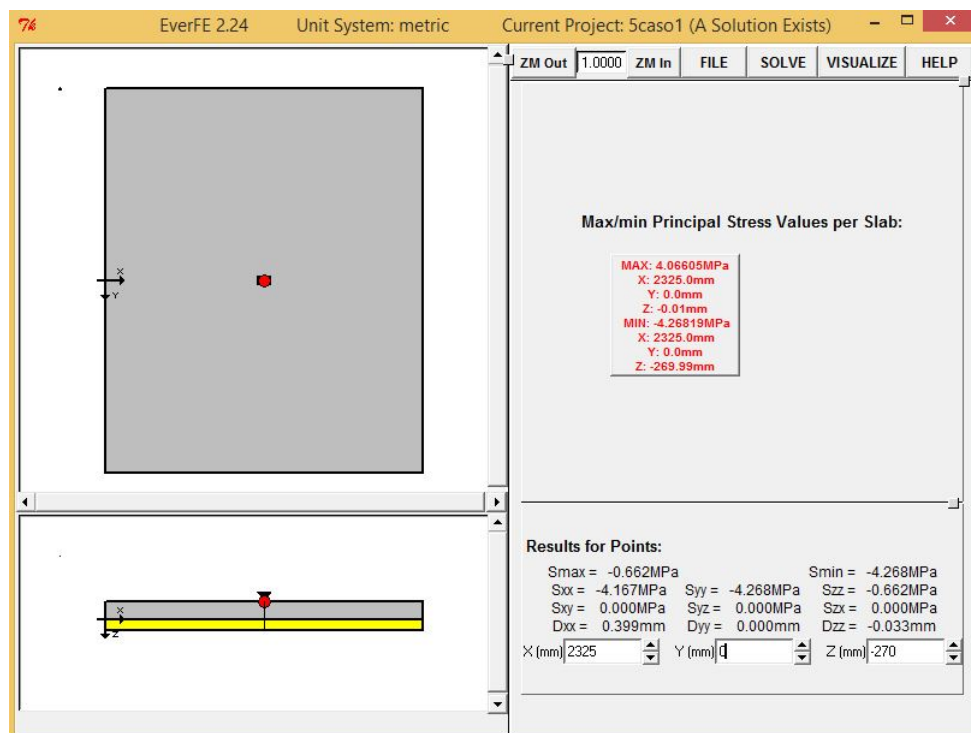
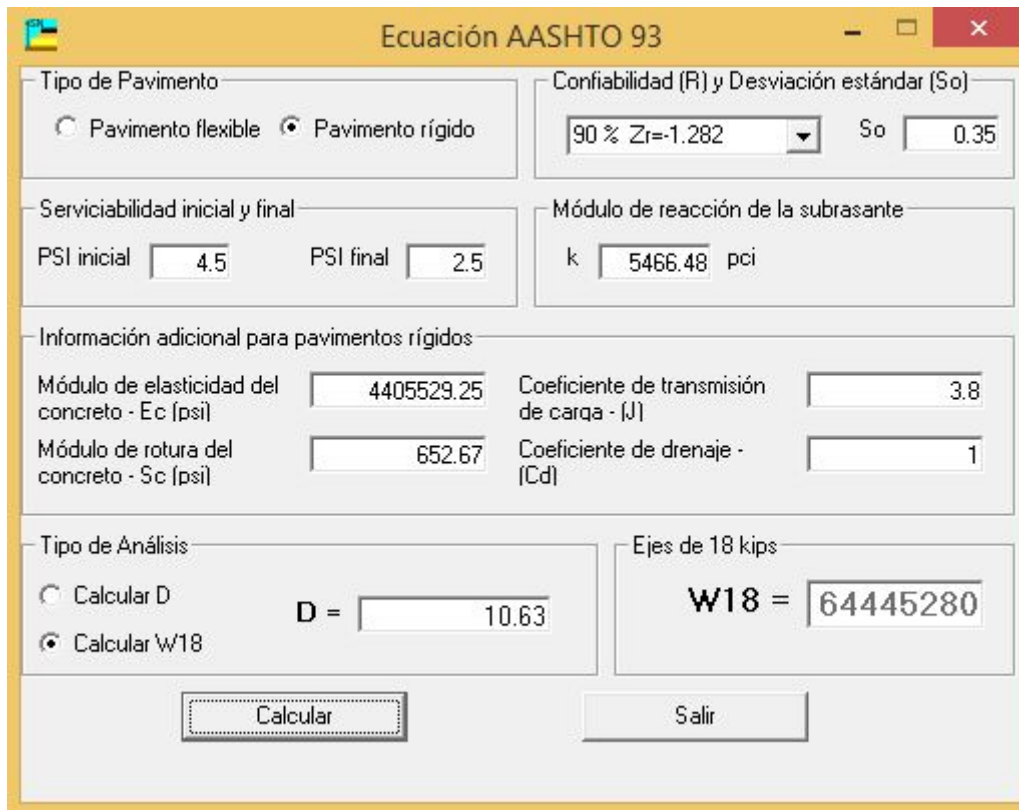


Figura 187: Deformación y esfuerzos máximos del elemento.



Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento:
☐ Pavimento flexible ☒ Pavimento rígido

Confiability (R) y Desviación estándar (So):
 90 % $Z_r = -1.282$ So: 0.35

Serviciabilidad inicial y final:
 PSI inicial: 4.5 PSI final: 2.5

Módulo de reacción de la subrasante:
 k: 5466.48 pci

Información adicional para pavimentos rígidos:
 Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi): 4405529.25
 Módulo de rotura del concreto - S_c (psi): 652.67
 Coeficiente de transmisión de carga - (J): 3.8
 Coeficiente de drenaje - (Cd): 1

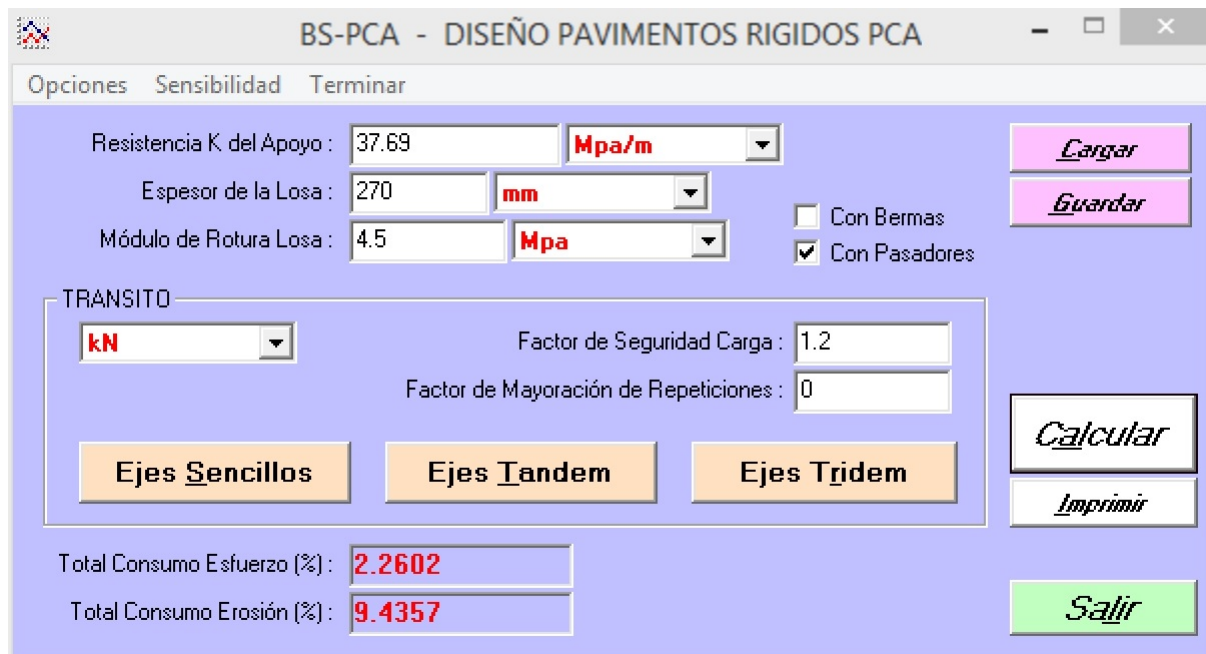
Tipo de Análisis:
☐ Calcular D ☒ Calcular W18

D = 10.63

Ejes de 18 kips:
W18 = 64445280

Calcular Salir

Figura 188: Número de repeticiones admisibles.



BS-PCA - DISEÑO PAVIMENTOS RIGIDOS PCA

Opciones Sensibilidad Terminar

Resistencia K del Apoyo: 37.69 Mpa/m

Espesor de la Losa: 270 mm

Módulo de Rotura Losa: 4.5 Mpa

Con Bermas ☐
 Con Pasadores ☒

TRANSITO:
 kN

Factor de Seguridad Carga: 1.2

Factor de Mayoración de Repeticiones: 0

Ejes Sencillos Ejes Tandem Ejes Tridem

Total Consumo Esfuerzo (%): 2.2602

Total Consumo Erosión (%): 9.4357

Cargar Guardar Calcular Imprimir Salir

Figura 189: Porcentajes de consumo.



Referencias

- [1] A. Montejo, "Ingeniería de pavimentos," *Fundamentos, Estudios Básicos y Diseño*, vol. 1, 2004.
- [2] A. A. of State Highway and T. Officials, *AASHTO guidelines for pavement management systems*. Washington, D.C. : American Association of State Highway and Transportation Officials, c1990., 1990.
- [3] R. Haas and W. Hudson, *Pavement management systems*. McGraw-Hill Book Company, 1978. [Online]. Available: <http://books.google.com.ec/books?id=sjNSAAAAMAAJ>
- [4] M. W. W. E. J. Yoder, *Principles of Pavement Design*. John Wiley & Sons Canada, Limited, 1959. [Online]. Available: https://books.google.com.ec/books?id=QO_dnQEACAAJ
- [5] A. A. of State Highway and T. Officials, *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. AASHTO, 1984. [Online]. Available: <https://books.google.com.ec/books?id=7QzRoQEACAAJ>
- [6] W. S. D. of Transportation, Ed., *Standard Specifications for Road, Bridge, and Municipal Construction*. Washington State Department of Transportation, 2012.
- [7] C. S. de Ministros de Transporte de Centroamérica, Ed., *Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales*. Laboratorio Nacional de Materiales y de Modelos Estructurales, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, 2001.
- [8] F. D. of Transportation, *Rigid Pavement Design Manual*, Florida Department of Transportation, <http://www.dot.state.fl.us/mapsandpublications>.
- [9] *Norma Ecuatoriana Vial*, 2012.
- [10] I. B. del Cemento y Hormigón *Recomendaciones constructivas para Pavimentos Rígidos*, Instituto Boliviano del Cemento y Hormigón 2005.
- [11] I. F. OTÁLVARO and F. J. NANCLARES, "Elementos para obtener el módulo de reacción de subrasante elements to estimate subgrade reaction coefficients," *Dyna*, vol. 157, p. 83, 2009.
- [12] J. Morales Olivares *et al.*, "Técnicas de rehabilitación de pavimentos de concreto utilizando sobrecapas de refuerzo," *Fundación de Investigadores de Pavimentos Innovadores*, 2012.
- [13] L. Altamirano, "Deterioro de pavimentos rígidos," *Universidad Nacional de Ingeniería*, pp. 13–23, 2007.
- [14] J. Coronado, *Manual Centroamericano para diseño de pavimentos*, 2002.
- [15] *Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD*, 2004.
- [16] E. T. Piusseaut, "Estado tensional en pavimentos rígidos," in *Pavimentos de Hormigón*, 2015.
- [17] Y. H. Huang, *Pavement Analysis and Design*, I. Pearson Education, Ed. Prentice Hall; 2nd Edition, 2004.
- [18] L. S. A. Ramos, "Modelación numérica de pisos industriales considerando la variabilidad en la sollicitación de cargas," Universidad Católica de Colombia, Tech. Rep., 2014.



- [19] A. Salazar, *Guía para el diseño y construcción de pavimentos rígidos*, instituto mexicano del cemento y del concreto ed. Instituto Mexicano del cemento y del concreto, 1998.
- [20] A. C. P. Association, “Design and construction of joints for concrete streets,” American Concrete Pavement Association, Tech. Rep., 1992.
- [21] B. Das, *Fundamentals of geotechnical engineering*. Cengage Learning, 2012.
- [22] A. A. of State Highway and T. Officials, *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993*. AASHTO, 1993, vol. 1.
- [23] P. C. Association, *Thickness design for concrete pavements*. Portland Cement Association, 1966.
- [24] A. Q. Fekrat, “Calibration and validation of everfe2. 24: A finite element analysis program for jointed plain concrete pavements,” Ph.D. dissertation, Ohio University, 2010.