



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Análisis de la deformación y deterioros en pavimentos de
carreteras debido al tráfico de vehículos pesados
autónomos mediante modelos de elementos finitos.

Aplicación práctica a la ampliación de la A-7,
Circunvalación de Valencia (Provincia de Valencia).

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Transporte, Territorio y Urbanismo

AUTOR/A: Alonso Troyano, Carlos

Tutor/a: García García, Alfredo

Cotutor/a: Llopis Castelló, David

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Máster Universitario en Transporte, Territorio y Urbanismo

AUTOR/A: Alonso Troyano, Carlos

Tutor/a: García García, Alfredo

Cotutor/a: Llopis Castelló, David

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Análisis de la deformación y deterioros en pavimentos de carreteras debido al tráfico de vehículos pesados autónomos mediante modelos de elementos finitos. Aplicación práctica a la ampliación de la A-7, Circunvalación de Valencia (Provincia de Valencia).

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Transporte, Territorio y Urbanismo

AUTOR/A: Alonso Troyano, Carlos

Tutor/a: García García, Alfredo

Cotutor/a: Llopis Castelló, David

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



A/A: Comisión Académica del Master Universitario en Transportes, Territorio y Urbanismo

Valencia, a 2 de septiembre de 2022

Estimados Sres.:

Por la presente les informo, en mi calidad de tutor, mi CONFORMIDAD con la presentación del Trabajo de Fin de Master titulado: ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN Y DETERIOROS EN PAVIMENTOS DE CARRETERAS DEBIDO AL TRÁFICO DE VEHÍCULOS PESADOS AUTÓNOMOS MEDIANTE MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS. APLICACIÓN PRÁCTICA A LA AMPLIACIÓN DE LA A-7, CIRCUNVALACIÓN DE VALENCIA (PROVINCIA DE VALENCIA). Realizado por el/la alumno/a *CARLOS ALONSO TROYANO* como culminación de sus estudios del Master Universitario en Transportes, Territorio y Urbanismo

Atentamente,

Firmado: Alfredo García García



Contenido

Contenido	2
1. Introducción.....	13
2. Estado del arte	15
2.1 Platooning.....	15
2.2 Dimensionamiento de firmes.....	20
2.2.1 Dimensionamiento analítico	21
2.2.2 Modelos de elementos finitos.....	27
2.2.3 Propiedades de los materiales	31
2.2.4 Cálculo de la vida útil de los materiales del firme	35
3. Desarrollo	39
3.1 Definición del modelo	39
3.1.1 Tamaño del modelo	40
3.1.2 Densidad del mallado.....	40
3.1.3 Condiciones de contorno	43
3.2 Selección de secciones de firme.....	44
3.3 Datos de entrada	47
3.4 Carga aplicada.....	47
3.5 Definición de distribución de cargas	49
3.5.1 Vehículos centrados en el carril, platooning	49
3.5.2 Vehículos distribuidos sobre el carril	50
3.6 Validación del modelo.....	59
3.7 Refuerzo de firme mediante el empleo de geotextiles	61

4.	Objetivos e hipòtesis.....	65
5.	Metodología	67
6.	Análisis de datos y resultados	71
6.1	Resultados de las secciones estudiadas	71
6.1.1	Sección 0031	71
6.1.2	Sección 0032	72
6.1.3	Sección 031	74
6.1.4	Sección 032	75
6.2	Análisis comparativo	78
7.	Conclusiones	81
8.	Aplicación Práctica	83
8.1	Antecedentes	84
8.2	Tráfico	86
8.3	Firmes y Pavimentos	89
8.4	Sección reforzada.....	91
8.5	Dimensionamiento analítico del firme	93
8.6	Definición del modelo	94
8.7	Datos de entrada	95
8.8	Resultados	96
8.9	Beneficios del refuerzo de firme con geomalla	99
9.	Conclusión	100
10.	Bibliografía	102
11.	Anexos	105
11.1	Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	106



11.2 Resultados ANSYS sección 0031.....	108
11.3 Resultados ANSYS sección 0032.....	109
11.4 Resultados ANSYS sección 031.....	110
11.5 Resultados ANSYS sección 032.....	111
11.6 Resultados ANSYS 032 reforzada	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema platooning. Fuente: PSA and Ministry of Transport.....	16
Figura 2: Distribuciones laterales de vehículos propuestas. Fuente: F.Chen et al. (2020)	17
Figura 3: Guiado de la posición transversal de los platooning. Fuente: Gungor y Al-Qadi (2020).	18
Figura 4: Distribución de la posición de las ruedas. Fuente: Gungor y Al Qadi (2020). .	18
Figura 5: Puntos críticos. A Sección de firme semiflexible. B Sección de firme semirrígido. C Sección de firme flexible. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 8: Ejemplo de modelo de 10x10x10m. Sección sobre el eje de aplicación de cargas. Fuente: Elaboración propia.....	40
Figura 9: Ejemplo de modelo de 2x2x2 m. Sección sobre el eje de aplicación de cargas. Fuente: Elaboración propia.....	40
Figura 10: Mallado de resolución 1. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 11: Mallado de resolución 2. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 12: Mallado de resolución 3. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 13: Mallado de resolución 4. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 14: Mallado de resolución 5. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 15: Mallado de resolución 6. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 16: Mallado de resolución 7. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 17: Esquema sección 0031. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 18: Esquema sección 0032. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 19: Esquema sección 031. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 20: Esquema sección 032. Fuente: Elaboración propia.	46

Figura 21: Esquema de carga y sección tipo. Fuente: Norma de Secciones de Firme de la Comunidad Valenciana.	48
Figura 22: Diseño de modelo con carga centrada. Fuente: Elaboración propia	50
Figura 23: Detalle de superficie de aplicación de carga centrada. Fuente: Elaboración propia	50
Figura 24: Aplicación de presión de 900 kPa sobre superficie del modelo. Fuente: Elaboración propia.....	50
Figura 25: Esquema de la probabilidad de posición lateral de vehículos pesados conducidos por humanos. Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 26: Probabilidad para $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 27: Distribución de superficie. Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 28: Diseño de modelo con carga distribuida de $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia	53
Figura 29: Aplicación de presión sobre modelo con $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia	53
Figura 30: Detalle de superficie de aplicación de carga distribuida con $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 31: Probabilidad para $s=0,15$ m. Fuente: Elaboración propia.....	54
Figura 32: Diseño de modelo con carga distribuida de $s=0,15$ m. Fuente: Elaboración propia.	55
Figura 33: Aplicación de presión sobre modelo con $s=0,15$. Fuente: Elaboración propia.	55
Figura 34: Detalle de carga distribuida con $s=0,15$ m. Fuente: Elaboración propia.	55
Figura 35: Probabilidad para $s=0,1$ m. Fuente: Elaboración propia.....	56
Figura 36: Diseño de modelo con carga distribuida de $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia	57

Figura 37: Aplicación de presión sobre modelo con $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia	57
Figura 38: Detalle de carga distribuida con $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia	57
Figura 39: Distribución de vehículos para $s=0,1$ $s=0,15$ y $s=0,2$. Fuente: Elaboración propia	58
Figura 40: Resultados modelo ANSYS. Deformación radial a 25 cm de profundidad. Fuente: Elaboración propia.....	59
Figura 41: Deformación vertical a 50 cm de profundidad. Fuente: Elaboración propia	59
Figura 6: Gama de geosintéticos. Fuente: Estado del arte para el correcto uso de los geosintéticos en la rehabilitación de firmes de carretera.....	61
Figura 7: Metodología. Fuente: Elaboración propia.....	69
Figura 42: Resultados Sección 0031. Fuente: Elaboración propia.....	72
Figura 43: Resultados Sección 0032. Fuente: Elaboración propia.....	74
Figura 44: Resultados Sección 031. Fuente: Elaboración propia.....	75
Figura 45: Resultados Sección 032. Fuente: Elaboración propia.....	77
Figura 46: Resultados secciones semi flexibles. Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 47: Resultados secciones semi rígidas. Fuente: Elaboración propia.....	79
Figura 48: Zona de estudio caso práctico. Fuente: Proyecto Mejoras funcionales A-7.	84
Figura 49: Tramo de actuación en el que se pueden observar las calzadas laterales. Fuente: Proyecto Mejoras funcionales A-7.....	85
Figura 50: Esquema de sección de firme tipo 032 propuesta en el proyecto. Fuente: Elaboración propia.....	90
Figura 51: Malla de refuerzo. Fuente López-Bachiller, M. et al (2018).....	91
Figura 52: Esquema de sección de refuerzo GEO. Fuente: Elaboración propia.....	92

Figura 53: Esquema de posición en planta de Geomalla de Refuerzo. Fuente: Elaboración propia.	92
Figura 54: Modelo de Sección Reforzada con Geomalla. Fuente: Elaboración propia. .	94
Figura 55: Mallado de las secciones de la Aplicación Práctica. Fuente: Elaboración propia.	94
Figura 56: Resultados aplicación práctica. Fuente: Elaboración propia.	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características mecánicas de las mezclas bituminosas. Fuente: Norma de Secciones de Firmes de la Comunidad Valenciana (2009)	31
Tabla 2: Características mecánicas de los materiales tratados con cemento. Fuente: Norma de Secciones de Firme de la Comunidad Valenciana (2009).	32
Tabla 3: Características mecánicas de los materiales no tratados. Fuente: Norma de Secciones de Firme de la Comunidad Valenciana (2009).	33
Tabla 4: Categorías de tráfico pesado. Fuente: Norma 6.1 IC.	35
Tabla 5: Factores de equivalencia. Fuente: Elaboración propia.	36
Tabla 6: Número de aplicaciones de carga (N) por categorías de tráfico pesado. Fuente: Elaboración propia.....	36
Tabla 7: Secciones de firme. Fuente: Norma 6.1. IC.....	44
Tabla 8: Características de los materiales empleados en los modelos. Fuente: Elaboración propia.....	47
Tabla 9: Distribución para $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia.....	52
Tabla 10: Distribución para $s=0,15$ m. Fuente: Elaboración propia.....	54
Tabla 11: Distribución para $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia.....	56
Tabla 12: Resultados de cálculos ALIZE. Fuente: Bardesi, A. 2012.	59
Tabla 13: Resultados comparación modelo ANSYS con modelo ALIZE. Fuente: Elaboración propia.....	60
Tabla 14: Resultados Sección 0031. Fuente: Elaboración propia.	71
Tabla 15: Resultados Sección 0032. Fuente: Elaboración propia.	73
Tabla 16: Resultados Sección 031. Fuente: Elaboración propia.	74
Tabla 17: Resultados Sección 032. Fuente: Elaboración propia.	76
Tabla 18: IMD año de puesta en servicio. Fuente: Proyecto Mejoras funcionales A-7. .	86

Tabla 19: IMD y IMDP de tramos de nueva construcción. Fuente: Proyecto de Mejoras funcionales A-7.	87
Tabla 20: Categorías de tráfico pesado. Fuente: Norma 6.1. IC.	88
Tabla 21: Secciones tipo. Fuente: Proyecto Mejoras Funcionales A-7.	89
Tabla 22: Características sección de proyecto. Fuente: Elaboración propia.	90
Tabla 23: Propiedades mallas de refuerzo. Fuente: López-Bachiller et al. (2018).....	92
Tabla 24: Propiedades de los materiales empleados en la aplicación práctica. Fuente: Elaboración propia.....	95
Tabla 25: Resultados aplicación práctica. Fuente: Elaboración propia.	96
Tabla 26: Resumen de resultados aplicación práctica. Fuente: Elaboración propia.....	98

RESUMEN

Algunos de los beneficios de la aparición de los vehículos autónomos son el incremento de la seguridad vial, la mejora de la operación del tráfico y el ahorro de combustible, pero, por otro lado, provocarán efectos negativos sobre la infraestructura reduciendo su vida útil. Este agotamiento prematuro de la infraestructura se producirá debido a que los sistemas de guiado de los vehículos autónomos tratan de que estos se posicionen centrados sobre el carril. En el caso de los vehículos pesados, estos podrán circular como trenes de camiones enlazados o platooning, dando lugar a un tráfico canalizado y una concentración de cargas sobre el pavimento que harán que disminuya la vida útil del mismo. Para analizar este fenómeno, este trabajo tiene como objetivo principal estudiar el efecto de la concentración de cargas producida por el platooning frente a la conducción manual en la que son los conductores los que dirigen los vehículos sobre el carril, dando como resultado una distribución normal de cargas sobre el pavimento. Para ello, se han modelizado distintas secciones de firme y distintas distribuciones de cargas mediante el software de elementos finitos ANSYS con el fin de obtener las deformaciones y tensiones que sufren los distintos materiales que conforman las secciones de firme estudiadas. A partir de los resultados obtenidos se estimó la vida útil de las secciones, comprobando que cumplen con el número de ejes de la categoría de tráfico para las que están diseñadas y se comprobó, que las cargas centradas, equivalentes al paso de platooning, reducen la vida útil de las secciones estudiadas.

Por último, el desarrollo de la aplicación práctica permitió evaluar cómo influye la disposición de un refuerzo lineal basado en geomallas bajo la primera capa del firme en la vida útil del firme. Como conclusión, estos refuerzos permiten compensar, totalmente o en parte, la disminución de vida útil de las secciones de firme provocada por los platooning.

Palabras clave: Platooning, vehículos autónomos, elementos finitos, ANSYS, firmes, pavimentos.

ABSTRACT

Some of the benefits of the emergence of autonomous vehicles are increased road safety, improved traffic operation and fuel savings, but on the other hand, they will have negative effects on the infrastructure by reducing its lifespan. This premature damage to the infrastructure will occur because the guidance systems of autonomous vehicles try to position the vehicles in the centre of the lane. In the case of heavy vehicles, they may circulate as trains of linked trucks or platooning, resulting in channelled traffic and a concentration of loads on the pavement that will reduce the useful life of the pavement. In order to analyse this phenomenon, the main objective of this work is to study the effect of the concentration of loads produced by platooning compared to manual driving, in which it is the drivers who drive the vehicles on the lane, resulting in a normal distribution of loads on the pavement. For this purpose, different pavement sections and different load distributions have been modelled using ANSYS finite element software in order to obtain the deformations and stresses suffered by the different materials that constitute the pavement sections studied. Based on the results obtained, the lifespan of the sections was estimated, verifying that they satisfy the number of axles of the traffic category for which they are designed, and it was verified that the centred loads, equivalent to the platooning passage, reduce the lifespan of the sections studied. Finally, the development of the practical application made it possible to evaluate how the arrangement of a geogrid-based reinforcement under the first layer of the pavement influences the service life of the pavement. In conclusion, these reinforcements make it possible to compensate, totally or partially, for the reduced service life of pavement sections caused by platooning.

Keywords: Platooning, autonomous vehicles, finite elements, ANSYS, pavements, pavement.

1. Introducción

Este trabajo Final de Máster tiene como principal objetivo analizar, y comparar, la deformación y deterioros que se producirían en los pavimentos ante la circulación de vehículos pesados autónomos circulando como trenes de camiones, concepto conocido como “platooning”, frente a la conducción manual de camiones, en la que es el conductor quien controla la trayectoria de los vehículos. La conducción manual lleva a que la trazada de los vehículos dependa de los conductores, lo que provoca que las cargas que el tráfico trasmite sobre la superficie de la carretera se distribuyan transversalmente siguiendo una distribución normal. Con la aparición de los vehículos autónomos, especialmente con los vehículos capaces de circular en platooning, estas cargas se concentrarán en puntos concretos de la sección transversal de la carretera ya que estos vehículos circularán centrados en el carril, provocando mayores deformaciones y acortando la vida útil de la infraestructura. Para estudiar este fenómeno, se analizará el efecto sobre la infraestructura de este nuevo modelo de transporte de mercancías por carretera conocido como platooning y se estudiará el efecto de la concentración de cargas producida por estos vehículos pesados autónomos. Para ello, se modelizarán distintas secciones de firmes mediante el software de elementos finitos ANSYS y se analizará el comportamiento del firme ante cargas distribuidas y para cargas centradas sobre el pavimento. Las variables a estudiar son:

- La deformación vertical sobre la explanada;
- La deformación radial en la fibra inferior de las mezclas bituminosas;
- La tensión radial en los materiales tratados con cemento; y
- La vida útil de los distintos casos analizados.

Posteriormente mediante un caso práctico, se comprobará los efectos que podría provocar el fenómeno de platooning sobre una de las secciones de categoría T0 incluidas en el Proyecto de mejoras funcionales de la Autovía A-7, entre el enlace con la CV-32 y el enlace con la A-3 entre el PK 486+000 al PK 509+000. También se estudiará, siguiendo

la metodología empleada en este trabajo, una mejora estructural mediante el empleo de geomallas de refuerzo.

Los objetivos principales del trabajo son:

- Identificar la problemática asociada al deterioro de los firmes de carretera que presenta el platooning.
- Cuantificar las deformaciones y tensiones producidas por el fenómeno del platooning.
- Estimar la disminución de la vida útil de las carreteras.
- Analizar el uso de geotextiles como refuerzo para minorar el deterioro que produciría el platooning en los firmes.

2. Estado del arte

Entre otras ventajas, los vehículos autónomos tienen la capacidad de hacer que la conducción sea más segura, de mejorar la congestión del tráfico y de conseguir ahorros de combustible (Vahidi y Sciarretta, 2018).

Actualmente se están desarrollando constantemente mejoras relacionadas con la dinámica de los vehículos y el sistema de control. Por lo general, estos estudios se centran en los siguientes aspectos: seguridad vial, eficiencia del tráfico, camiones conectados o platooning, ahorro de combustible, reducción de la contaminación, comodidad de los usuarios y soluciones relacionadas con los aparcamientos (Fagnanty y Kockelman, 2015).

Este trabajo se centrará en uno de los aspectos menos investigados, el efecto de los vehículos autónomos pesados sobre el pavimento, en especial, en la reducción de su vida útil. Para ello, se modelizarán secciones de firme y mediante cálculo analítico de firmes se obtendrá el efecto que producirían los platooning sobre la carretera.

De este modo, en este epígrafe se presenta una revisión bibliográfica sobre los siguientes aspectos: (i) platooning, (ii) dimensionamiento de firmes y (iii) refuerzo de firmes.

2.1 Platooning

Se conoce por platooning al conjunto de camiones de transporte de mercancías que circulan unidos virtualmente y a poca separación entre ellos, circulando como un tren de mercancías, en el que el primer vehículo es el que desarrolla la conducción asistida con un nivel bajo de automatización y el resto de camiones le siguen sin ningún tipo de conducción manual. Según se vaya desarrollando el sistema, cada vez se necesitaría menos atención por parte de los conductores hasta el punto hacerlos innecesarios. (Janssen et al., 2015). En la Figura 1 se puede observar un esquema del sistema

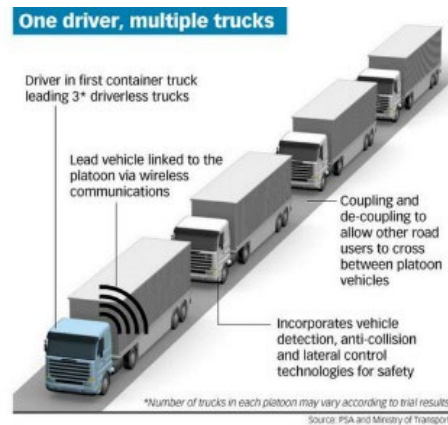


Figura 1: Esquema platooning. Fuente: PSA and Ministry of Transport

En el ámbito del transporte de mercancías por carretera, su uso y extensión podría ser de gran impacto, debido a la mayor eficiencia económica y ambiental, y al aumento de seguridad vial entre otras cuestiones. Uno de los mayores beneficios de esta tecnología sería la reducción del consumo de carburante gracias al efecto aerodinámico que se produce al poder circular, enlazados virtualmente a poca distancia. El ahorro en el consumo de combustible podría ser de hasta el 13% (Robinson, et al., 2010; Alam, 2015) y, por tanto, se disminuirían las emisiones de CO₂ que comporta esta actividad. Otros de los beneficios serían una conducción más eficiente y un aumento en la seguridad de los vehículos que forman parte del tren de vehículos pesados.

Además de estas ventajas, el platooning también podrían generar ciertos inconvenientes en cuanto a la disminución de visibilidad y aumento de deterioros en los firmes.

Por un lado, Pastor-Serrano y García (2021) estudiaron la problemática de la reducción de visibilidad en curvas a derechas por un efecto de apantallamiento cuando se implementa el platooning. En este sentido, se propone actuar sobre la infraestructura, la conectividad y la automatización.

Por otro lado, en cuanto al efecto del platooning sobre los firmes, a diferencia de los vehículos conducidos por humanos en los que sus trayectorias oscilan de forma natural dentro del carril, los vehículos autónomos se encuentran dirigidos por su sistema de control dinámico que hace que se posicionen centrados en el carril (Lee, 2021). Esta

nueva distribución de la posición lateral de los vehículos autónomos dará lugar a un tráfico canalizado y a una concentración de las cargas sobre el pavimento (Noorvand et al., 2017). Varios estudios sobre la trayectoria lateral de las ruedas de los vehículos conducidos por personas indicaron que el centrado de las cargas sin duda disminuiría la vida útil del pavimento, fomentando la aparición de roderas y grietas más rápidamente (Perraton et al., 2011; Wu et al., 2019).

Ya que los vehículos autónomos son capaces de seguir la trayectoria indicada, varios autores proponen programar la distribución de estos vehículos dentro del carril con el fin de repartir de la mejor forma posible las cargas sobre el pavimento y así aumentar su vida útil mediante un control de la posición lateral de los vehículos autónomos orientado a minimizar el daño por fatiga del pavimento (Chen et al., 2020).

F. Chen et al. / Journal of Cleaner Production 256 (2020) 120669

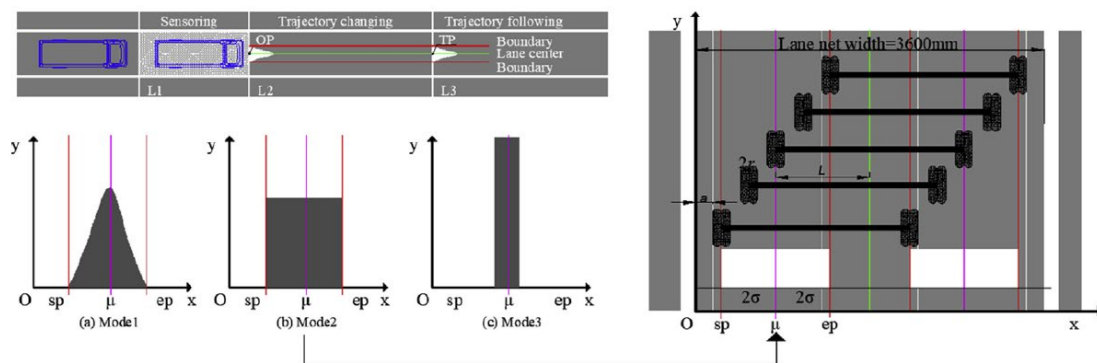


Fig. 1. The trajectory-oriented lateral distribution of vehicles and wheels.

Figura 2: Distribuciones laterales de vehículos propuestas. Fuente: F.Chen et al. (2020)

Otro de los efectos negativos del platooning sobre el firme es el aumento de la frecuencia de las cargas al circular varios camiones unidos a poca distancia. Reducir el hueco entre camiones, supone que el tiempo entre cargas consecutivas sea menor. Esto también afecta negativamente al comportamiento estructural del firme.

Gungor y Al-Qadi (2020) proponen que el paso de sucesivos platooning se vaya posicionando transversalmente de forma variable para así repartir las cargas. Además, se puede optimizar esta distribución de las cargas para reducir los esfuerzos, incluso

haciendo que el reparto de cargas impuesto sea menos agresivo para el firme que la distribución normal habitual en la conducción manual.

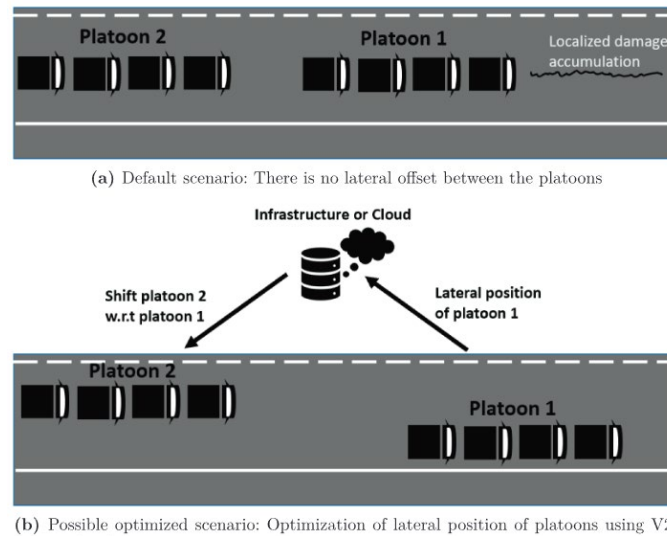


Figura 3: Guiado de la posición transversal de los platooning. Fuente: Gungor y Al-Qadi (2020).

Otros autores han estudiado la posición lateral de los vehículos pesados en la carretera y alertan de que, con la implantación de los vehículos autónomos, esta variable tendría que empezar a tenerse en cuenta en el dimensionamiento de firmes, ya que se modifica la distribución de cargas y por tanto la acumulación de daños en el pavimento (Chen et al., 2017; Chen, 2020; Gungor y Al-Qadi, 2022).

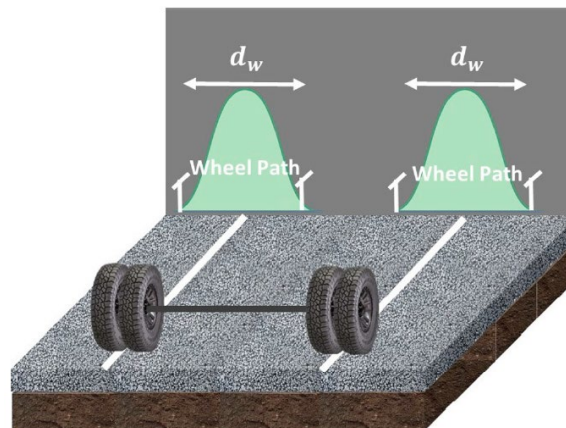


Figura 4: Distribución de la posición de las ruedas. Fuente: Gungor y Al Qadi (2020).

En cuanto a la situación de España, en lo que a transporte de mercancías por carretera se refiere, en 2021 se transportaron un total de más de 1.600.000 toneladas, de las cuales, más de 278.000 fueron con origen o destino la Comunidad Valenciana, (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2022).

Por tanto, la implantación de platooning podría tener un gran impacto en las carreteras españolas y valencianas, disminuyendo la vida útil de estas. Así pues, existe la posibilidad de conseguir grandes ahorros económicos y disminuir el impacto ambiental en forma de consumo de materias primas y emisión de gases de efecto invernadero, si se actuase de forma preventiva en minimizar el efecto negativo que produciría el platooning sobre los pavimentos.

2.2 Dimensionamiento de firmes

El dimensionamiento de firmes se trata de un proceso cuyo objetivo es definir las características y propiedades de los distintos elementos estructurales (capas de firme), así como los procedimientos constructivos, para garantizar que la estructura (el firme) preste adecuadamente el servicio para el que se proyecta y durante una determinada vida útil.

El objetivo del dimensionamiento de firmes es la definición de la naturaleza y espesor de cada capa del firme a partir de la consideración de una serie de factores básicos: tráfico, capacidad de soporte de la explanada, materiales disponibles, condiciones climáticas y otros factores que puedan tener relevancia. El dimensionamiento se puede acometer mediante métodos analíticos, que se basan directamente en el cálculo, o bien mediante métodos empíricos, basados fundamentalmente en la experiencia acumulada en un determinado ámbito sobre el comportamiento de los firmes.

Actualmente, los métodos analíticos y empíricos tienden a converger. Mientras que los primeros requieren de la experiencia para una adecuada modelación y para la interpretación de los resultados de cálculo, los segundos se apoyan a menudo en la realización de cálculos como contraste de la experiencia.

Existen varias tipologías de firmes en función de su rigidez. Habitualmente se dividen en 2 grandes grupos, los firmes rígidos y los firmes flexibles. Los firmes flexibles están compuestos por capas con materiales en los que la resistencia a la deformación va decreciendo con la profundidad y los firmes rígidos están formados por una capa superficial de hormigón que asegura la función resistente. Entre estas dos tipologías encontramos los firmes semirrígidos y los firmes semiflexibles, que según la Norma 6.1 IC quedan definidos de la siguiente forma:

- Firme flexible: Firme constituido por capas de mezcla bituminosa, de espesor total igual o superior a 15 cm, sobre capas granulares o tratadas.
- Firme semiflexible: Firme constituido por capas de mezcla bituminosa, de espesor total igual o superior a 15 cm, sobre capas granulares no tratadas.

- Firme semirrígido: Firme constituido por un pavimento bituminoso de cualquier espesor sobre una o más capas tratadas con conglomerantes hidráulicos, con espesor conjunto de éstas igual o superior a 20 cm.
- Firme rígido: Firme con pavimento de hormigón.

Los principios del dimensionamiento son aplicables tanto a los firmes flexibles como a los rígidos. Sin embargo, existen algunas diferencias entre unos y otros que condicionan la aplicación práctica de los métodos. Estructuralmente, en los firmes flexibles hay un reparto relativamente gradual de las tensiones provocadas por las cargas del tráfico. En los rígidos, el pavimento es una losa que trabaja a flexotracción y que absorbe la casi totalidad de dichas tensiones. En los firmes flexibles, la temperatura, principal variable climática a considerar, influye en la rigidez de los materiales bituminosos, mientras que en los firmes rígidos los gradientes térmicos provocan deformaciones que por sí solas son el origen de tensiones que pueden ser comparables en magnitud a las debidas a las cargas de tráfico.

2.2.1 Dimensionamiento analítico

Los modelos analíticos de dimensionamiento basan su funcionamiento en el cálculo de las tensiones y deformaciones que se producen en las distintas capas del firme y explanada mediante lo que se denomina un modelo de respuesta para, a continuación, comparar los valores críticos obtenidos con los máximos admisibles mediante lo que se denomina un modelo de fallo, de forma que se compruebe si la solución es admisible para las condiciones iniciales planteadas. El proceso se repite hasta obtener una solución que siendo válida no esté tampoco sobredimensionada.

Se podría resumir en los siguientes pasos:

- Recopilación de información: tráfico, terreno natural y explanada, materiales del firme, geometría del firme y climatología.
- Modelización de los datos de entrada: forma de las cargas, presiones aplicadas, módulos de elasticidad de los materiales, espesores, etc.

- Aplicación de un programa de cálculo que, a partir de los datos de entrada, determine las tensiones, deformaciones y, en su caso, movimientos de las capas de firme planteado.
- Análisis de los resultados para establecer los parámetros más desfavorables o críticos de cada capa de firme y explicada.
- Valoración de la vida útil que resulta de la configuración de firme planteada. En la mayoría de los métodos se suelen considerar dos formas de llegar al final de la vida útil:
 - Deformación permanente acumulada del firme debido a la deformación acumulada de la explicada
 - Fisuración por fatiga de los materiales tratados, sean bituminosos o hidráulicos.

Adicionalmente, existen otros factores a tener en cuenta para evaluar la vida útil del firme, como pueden ser:

- Deformación permanente de las capas bituminosas superiores
- Fisuración térmica y fisuración por fatiga térmica
- Fisuración por reflexión de juntas/fisuras de capas hidráulicas

Superados los criterios de fallo, la sección será aceptable. La vida útil asociada al firme diseñado se corresponderá con la capa de menor vida útil. Queda comprobar si el nivel de seguridad de la sección es excesivo, esto es, si la vida útil resultante es muy superior a la requerida y/o si alguna de las capas trabaja muy por debajo de sus posibilidades. En este caso, el criterio de optimización económica debería llevarnos a replantear la sección para buscar una de menor coste.

Modelos de respuesta

Los modelos de respuesta pueden clasificarse según diferentes criterios:

- Por su concepción general:
 - Probabilistas, basados en la teoría de la fiabilidad de sistemas.

- De regresión, a partir del análisis de mediciones realizadas en ensayos a escala real.
- Mecanicistas, basados en una modelación mecánica de la estructura y de las cargas y en el establecimiento subsiguiente de los correspondientes algoritmos de cálculo. Estos modelos son los habitualmente empleados.
 - Por las ecuaciones constitutivas de los materiales: elásticos, viscoelásticos, etc.
 - Por la configuración geométrica del firme: sistemas multicapa, placas, etc.
 - Por la forma de resolver las ecuaciones: clásicos (diferencias numéricas), elementos finitos, etc.

En su modelación geométrica, los firmes flexibles, si no están agrietados, pueden ser considerados indefinidos en el plano horizontal en relación con la superficie en que se aplican las cargas. En cambio, los firmes rígidos están formados por losas rectangulares en las que los fenómenos de borde adquieren singular importancia.

Para firmes flexibles y semirrígidos, los modelos más empleados en la práctica son los basados en hipótesis elásticas o viscoelásticas y macizos multicapa.

En la modelación basada en macizos multicapa, las hipótesis más habituales son las establecidas por Burmister. Estas hipótesis son, resumidamente las siguientes:

- La carga se representa mediante la presión vertical distribuida uniformemente sobre un círculo en la superficie del pavimento (carga estática), lo que permite establecer una simetría axial y trabajar en coordenadas cilíndricas.
- Cada capa actúa como un medio elástico lineal (definido por su módulo de elasticidad y su coeficiente de Poisson), homogéneo, isótropo, continuo, de espesor constante e indefinido horizontalmente. El cimiento es un macizo semiindefinido de Boussinesq (definido igualmente por su módulo de elasticidad y su coeficiente de Poisson).
- Cada capa se apoya sobre la subyacente de forma continua. Las condiciones de adherencia entre ellas (compatibilidad de deformaciones tangenciales en las interfaces) pueden presentarse mediante adherencia total o nula.

- No se considera el efecto de los gradientes térmicos. La influencia de las temperaturas en los módulos de los materiales sólo puede ser tomada en cuenta repitiendo el análisis para diferentes valores de dichos módulos.
- Se admite que los desplazamientos en el sistema son pequeños.

Estableciendo el equilibrio elástico en un macizo multicapa al que se aplican las hipótesis de Burmister, las ecuaciones pueden plantearse a partir de una función de tensiones, que es la solución de la ecuación biarmónica. La resolución mediante transformadas conduce a unas integrales definidas entre cero e infinito que no admiten una solución explícita y que requieren, por tanto, un tratamiento numérico (habitualmente mediante diferencias finitas).

Realizados los correspondientes cálculos, en cada capa de la sección estudiada hay que considerar la tensión, deformación o desplazamiento que defina críticamente el comportamiento de dicha capa. Este valor hay que compararlo con el admisible en ese caso, teniendo en cuenta el modelo de comportamiento adoptado para el material. Por ejemplo, bajo hipótesis elásticas, se puede considerar que el fallo de una sección se produce por fatiga de alguna de sus capas.

Ecuaciones constitutivas de las mezclas bituminosas

Las mezclas bituminosas son materiales viscoelásticos cuyas propiedades mecánicas dependen de la temperatura y del tiempo de aplicación de las cargas del tráfico. A bajas temperaturas estos materiales se pueden considerar como elásticos y lineales. En esta condición el comportamiento de estos se puede caracterizar mediante el módulo elástico. Sin embargo, en el dimensionamiento analítico de firmes suele emplearse el Módulo Complejo; es decir, el módulo obtenido a través de ensayos dinámicos en los que se somete a la muestra a una carga cíclica de compresión simple, que varía con el tiempo según una función senoidal y a diferentes temperaturas.

Modelos de comportamiento

Los modelos de comportamiento más utilizados, con gran diferencia, son los basados en leyes de fatiga. Sin embargo, en ocasiones se emplean modelos basados en la acumulación de deformaciones plásticas, en la evolución de las deflexiones, etc.

Las leyes de fatiga son expresiones matemáticas obtenidas por correlación de los resultados de numerosos ensayos de laboratorio y calibradas en estudios a escala real. Con ellas se determina el número N de aplicaciones de una carga tipo que puede soportar el material antes de llegar al agotamiento estructura, si cada aplicación individual de la carga produce unas determinadas tensiones σ o deformaciones ε .

Para determinar la vida útil de una sección de carretera, se debe tener en cuenta que, en función de la tipología del pavimento empleado, los puntos críticos pueden darse en capas y a profundidades distintas. En general, tendremos que comprobar cuál es el punto de la sección que admite un menor número de ejes equivalentes siendo este el punto crítico de la sección analizada y el que determina la vida útil de la sección de firme estudiada.

Puntos críticos

Según la tipología de sección de firme diseñada, los puntos críticos se suelen localizar en las siguientes capas (Figura 5):

- Secciones flexibles y semiflexibles:
 - Tráfico pesado medio o alto: deformación radial en la fibra inferior de la capa de la mezcla bituminosa inferior.
 - Tráfico pesado bajo: Deformación vertical en la explanada
- Secciones semirrígidas: tensión radial de tracción en la fibra inferior de los materiales tratados con cemento.

Por lo general, los firmes llegan al final de su vida útil por la repetición de cargas que provocan roturas por fatiga en los materiales tratados, o por acumulación de deformaciones en los suelos y otros materiales granulares.

En cada caso se tendrá que emplear la ley de fatiga del material que compone la capa que se est analizando y se tendrá en cuenta la deformación o tensión que lleva al fallo dicha capa de material.

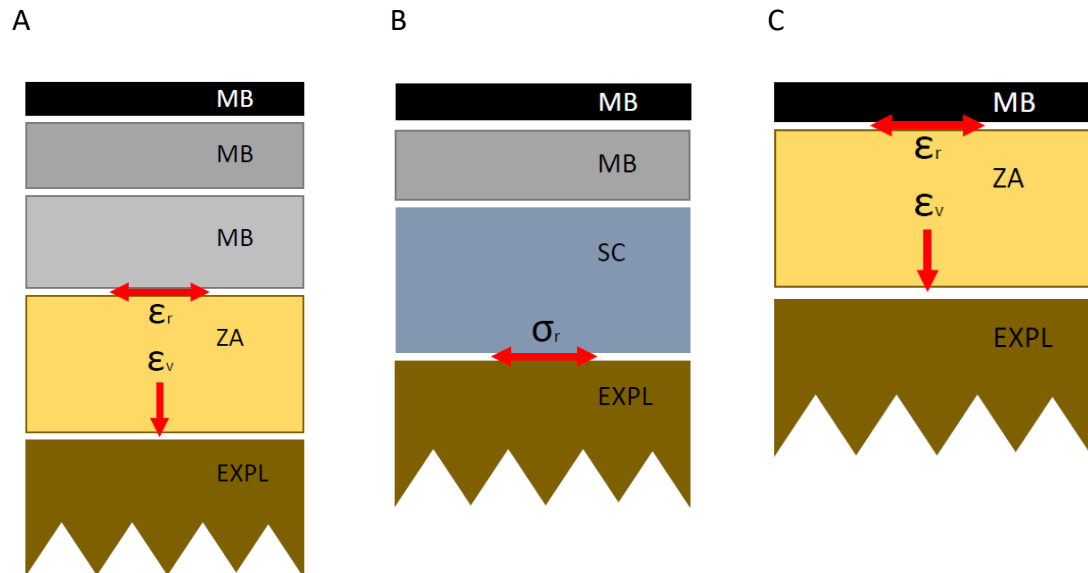


Figura 5: Puntos críticos. A Sección de firme semiflexible. B Sección de firme semirrígido. C Sección de firme flexible.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.2 Modelos de elementos finitos

Los modelos de elementos finitos se utilizan tanto para el dimensionamiento de los firmes flexibles como para el de los firmes rígidos, pasando por los semiflexibles y semirrígidos. Para ellos se divide el modelo creado en mallas, dividiendo los elementos en segmentos y nodos. El método consiste en buscar los desplazamientos de menor energía de deformación en el espacio vectorial creado. La obtención de resultados se basa en la resolución de un sistema de ecuaciones algebraicas expresadas de forma matricial, del que se obtienen los desplazamientos de los nodos a partir de las matrices de rigidez de cada elemento.

De esta manera, el sólido considerado se considera dividido en elementos constituyentes. Las matrices de rigidez de cada elemento se calculan teniendo en cuenta los grados de libertad del sólido. La construcción de las matrices de los elementos permite componer y resolver la matriz de rigidez del sólido, permitiendo obtener los desplazamientos de todos y cada uno de los nodos. Por último, estos desplazamientos se emplean para obtener los esfuerzos en cada elemento.

Uno de los principales inconvenientes de este método es que requiere de bastante tiempo para la definición del sistema y la resolución del problema. No obstante, permite una reproducción más exacta del problema y, en especial, de las condiciones de contorno. También admite las diferentes ecuaciones constitutivas de los materiales y definir las geometrías necesarias.

Programas de elementos finitos para el dimensionamiento de firmes

Estos programas emplean ecuaciones constitutivas para el cálculo de esfuerzos y deformaciones las cuales suponen que el material es un continuo, es decir, no se tiene en cuenta el comportamiento individual de los componentes del material, sino su comportamiento global a nivel macromecánico.

Para el caso de los pavimentos, algunas de las ventajas del empleo de programas de elementos finitos radican en que pueden llegar a tener en cuenta que los materiales

granulares no tratados que conforman pavimentos exhiben un comportamiento no lineal, dependiente de la condición de esfuerzos, y comportamiento viscoso en las capas asfálticas y en la subrasante. Además, permiten modelar diferentes geometrías, condiciones de frontera, criterios de fallo y carga cíclica.

Algunos modelos de comportamiento empleados en programas de elementos finitos para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en materiales granulares no tratados son: el modelo de acumulación de Bochum, Elastoplásticos, Hiperelásticos, Elásticos lineales y no lineales e Hipoplásticos. Para el caso de las capas asfálticas por lo general los modelos empleados son los elásticos lineales y los viscoelásticos.

En el mercado existen diversos programas de elementos finitos como ABAQUS, PLAXYS y ANSYS. También existen programas adaptados al dimensionamiento de firmes como el SENOL (University of Nottingham), FENLAP (University of Nottingham), ILLI-PAVE (University of Illinois), GT-PAVE (Georgia Institute of Technology) y el NOEL (Université de Nantes), y códigos como el DIANA (Delft University of technology) y el CESAR (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées).

Generalmente se han utilizado programas multicapa elásticos debido a su simplicidad de uso y menores requerimientos informáticos. En general, los programas de elementos finitos tienen más opciones a la hora de reproducir el comportamiento de los materiales que conforman un pavimento. Solo es necesario el desarrollo de ecuaciones constitutivas que predigan lo más fielmente posible el comportamiento de cada uno de los materiales que conforman estas estructuras.

A pesar de los avances en el área del desarrollo de programas y ecuaciones constitutivas, es difícil predecir la deformación que experimentan los materiales granulares principalmente por las siguientes razones:

- El comportamiento de estos materiales bajo carga cíclica es complejo y aún no ha sido totalmente definido. Bajo carga cíclica la respuesta de estos materiales es fuertemente no lineal. Además, bajo esfuerzos de corte exhiben dilatancia y deformación tanto plástica como elástica.

- La estructura del pavimento está compuesta por diferentes materiales que experimentan diferentes comportamientos bajo carga cíclica y condiciones ambientales.
- Las mezclas bituminosas presentan un comportamiento viscoso con componentes elásticas y plásticas.
- La temperatura y humedad de las capas granulares varía en el tiempo y por lo tanto su comportamiento con cada repetición de carga.
- El tipo y magnitud de la carga cíclica varía constantemente y no es conocida con exactitud previa a los ensayos de laboratorio y las simulaciones. Además, las trayectorias de esfuerzos en el laboratorio son limitadas y no reproducen exactamente las que se producen en el pavimento.
- A pesar de que los materiales granulares presentan anisotropía inherente por la geometría de las partículas, efectos de la compactación y la gravedad, muy pocas ecuaciones constitutivas tienen en cuenta esta consideración por su dificultad.
- El comportamiento de las muestras de laboratorio es diferente a las de campo.
- En laboratorio, por lo general, el efecto de la compactación y la historia de carga durante la construcción del pavimento no se tienen en cuenta.

Dimensionamiento de firmes con ANSYS

De todos los programas enunciados anteriormente, para el desarrollo de este trabajo se ha propuesto el uso de ANSYS. Para dimensionar un firme con este programa de elementos finitos, hay que seguir una serie de pasos que podrían dividirse en tres etapas:

- Preproceso. Preparación del modelo para el cálculo. En esta etapa se realizan las operaciones de:
 - Representación de la geometría del modelo.
 - Selección de las propiedades de los materiales.
 - Aplicación de cargas exteriores y condiciones de contorno.
 - Discretización del modelo en elementos finitos o mallado.

- Resolución. Etapa en la que se realizan todos los cálculos y se generan las soluciones. En ella se realizan las operaciones de:
 - Selección del tipo de cálculo a realizar.
 - Configuración de los parámetros de cálculo.
 - Transferencia de las cargas al modelo, generación de funciones de forma, ensamblaje de la matriz de rigidez, resolución de sistemas de ecuaciones y obtención de la solución.
- Postproceso. En esta etapa se realizará la representación gráfica de los resultados, así como la obtención de resultados indirectos operando las soluciones del modelo.

2.2.3 Propiedades de los materiales

Materiales empleados

Para el desarrollo de este trabajo se han tomado los datos de módulos elásticos y coeficientes de Poisson propuestos en la Norma de Secciones de Firmes de la Comunidad Valenciana (2009).

Mezclas bituminosas

Puesto que las características mecánicas de los materiales tratados con ligantes bituminosos dependen de la temperatura y la velocidad de aplicación de la carga, los cálculos deberán contemplar valores de temperatura representativos. En la Norma de Secciones de Firmes de la Comunidad Valenciana (2009) aparecen valores máximos, medios y mínimos (Tabla 1)

En lo referente al tiempo de aplicación de carga, se considera un valor de 10 Hz. Si la velocidad de los vehículos pesados es reducida, se considera un valor de 6,5 Hz.

Tabla 1: Características mecánicas de las mezclas bituminosas. Fuente: Norma de Secciones de Firmes de la Comunidad Valenciana (2009)

TIPO	E_{\min} [MPa]	E_{\max} [MPa]	E_{MED} [MPa]	ν	a	b
BBTM 11 B M BBTM 8 B M	2.500	3.250	3.000	0,35	-	-
BBTM 11 A F BBTM 8 A F	4.000	5.250	5.000	0,35	-	-
PA 11	2.500	3.250	3.000	0,35	-	-
AC 16 surf D AC 22 surf D AC 22 bin D	3.500	9.500	7.000	0,33	$6,920 \cdot 10^{-3}$	0,27243
AC 16 surf S AC 22 surf S AC 22 bin S AC 32 bin S	3.500	9.500	7.000	0,33	$6,920 \cdot 10^{-3}$	0,27243
AC 22 bin G AC 32 bin G AC 22 base G AC 32 base G	2.500	7.000	5.000	0,33	$6,443 \cdot 10^{-3}$	0,27243
AC 22 bin 15/25 AM AC 22 base 15/25 AM	10.000	14.000	11.000	0,30	$6,612 \cdot 10^{-3}$	0,27243

Materiales tratados con cemento

Las características mecánicas de los materiales con cemento evolucionan con el tiempo, por lo que en el dimensionamiento analítico del firme se debe de tener en cuenta:

- Las características a medio y largo plazo, de forma que sea posible valorar el comportamiento de la capa durante toda la vida útil del firme.
- Las características a corto plazo, de forma que sea posible la comprobación de la capacidad estructural de la capa para soportar los esfuerzos iniciales: tráfico de obra o tráfico durante el primer año tras la puesta en servicio.

La ley de fatiga de un material con cemento depende de la tensión horizontal de tracción máxima en la capa σ_h y de la resistencia a la flexotracción a largo plazo $R_{F,LP}$ del material. Las características de los materiales tratados con cemento propuestos en la Norma de Secciones de Firmes de la Comunidad Valenciana (2009), (Tabla 2).

Tabla 2: Características mecánicas de los materiales tratados con cemento. Fuente: Norma de Secciones de Firme de la Comunidad Valenciana (2009).

CATEGORÍA	TIPO	E_{\min} [MPa]	E_{\max} [MPa]	E_{MED} [MPa]	ν	a	$R_{F,LP}$
Hormigón	HF-4,5	30.000	38.000	35.000	0,25	0,065	5,50
	HF-4,0	27.000	35.000	32.000	0,25	0,065	4,80
	HF-3,5	25.000	35.000	29.000	0,25	0,065	4,20
Suelocemento	SC	2.000	8.000	6.000	0,25	0,065	0,90
Gravacemento	GC	18.000	22.000	20.000	0,25	0,065	1,60
Hormigón magro	HM	20.000	30.000	24.000	0,25	0,065	3,00
Suelo estabilizado in situ	S-EST1	100	300	150	0,35	-	-
	S-EST2	200	600	350	0,35	-	-
	S-EST3	1.000	3.000	1.500	0,25	0,065	0,45
Macizo semiindefinido	E4	280	400	300	0,30	-	-

Materiales no tratados

Puesto que las características mecánicas de los materiales no tratados (materiales granulares y suelos naturales) dependen de la humedad de la capa, los cálculos que se

realicen para el dimensionamiento de la sección deben contemplar valores de humedad representativos de las condiciones específicas del proyecto.

El control de las deformaciones permanentes acumuladas en los materiales no tratados se establece mediante la limitación de la máxima deformación vertical de compresión en la capa (que suele colocarse en su fibra superior):

Además, para evitar que se produzcan descompresiones en las capas constituidas por materiales no tratados, se debe cumplir la condición de que la tensión horizontal máxima en las mismas sea inferior a la suma de la tensión vertical máxima más el peso propio del firme sobre ellas, asumiendo una densidad simplificada de éste de 2,20 t/m³:

Cuando no se conozcan exactamente las características de las capas que forman el cimiento, las explanadas de categoría E1 y E2 se considerarán análogas a un material granular, independientemente de que su capa superior esté estabilizada con cal o con cemento.

El módulo de elasticidad de las zahorras depende de la capacidad de soporte de las capas subyacente y del espesor de la propia capa. Los valores recomendados por la Norma de Secciones de Firme de la Comunidad Valenciana (2009) son los que se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Características mecánicas de los materiales no tratados. Fuente: Norma de Secciones de Firme de la Comunidad Valenciana (2009).

CATEGORÍA	TIPO	E _{min} [MPa]	E _{MÁX} [MPa]	E _{MED} [MPa]	ν	a	b
Zahorra artificial ⁽¹⁾	ZA	80	600	$0,206 \cdot h^{0,45} \cdot E_s$	0,35	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25
Macizo semi-indefinido	E1	35	65	50	0,40	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25
	E2	70	105	85	0,40	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25
	E3	155	280	215	0,35	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25
Suelo natural	-	30	250	10·CBR	0,40	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25



2.2.4 Cálculo de la vida útil de los materiales del firme

La vida útil de la sección de firmes se obtiene a partir del menor número de repeticiones de carga (N), correspondientes a un eje de 13 toneladas, que puede soportar alguno de los puntos críticos de la sección, descritos anteriormente.

La obtención del número de repeticiones de carga admitidos se calcula de forma distinta en función del tipo de material sobre el que se quiera comprobar su vida útil.

Las distintas normativas marcan unos umbrales de números de repeticiones de cargas admitidas en función de la cantidad de tráfico pesado para la que están dimensionadas las carreteras. En el caso de la Norma 6.1 IC. Secciones de Firme, de la Instrucción de Carreteras (2003), en adelante Norma 6.1 IC, estos intervalos están definidos de acuerdo a la Tabla 4.

Tabla 4: Categorías de tráfico pesado. Fuente: Norma 6.1 IC.

IMDp (vehículos pesados/día)	T00	T0	T1	T2	T31	T32	T41	T42
Max		4000	2000	800	200	100	50	25
Min	4000	2000	800	200	100	50	25	

Para la obtención del número de repeticiones de cargas admitidas, se multiplica la intensidad media diaria de vehículos pesados por una serie de factores, empleando la siguiente expresión:

$$N = IMDV_p \cdot CE \cdot 365 \cdot \left((1 + r)^{n-1} - \frac{1}{r} \right)$$

donde $IMDV_p$ es la intensidad media diaria de V_p por carril en año puesta en servicio; CE es el factor de equivalencia, o agresividad, entre vehículo pesado y eje de 13 t; r es la tasa media de crecimiento del tráfico en el periodo de proyecto; y n es el número de años del periodo de proyecto considerado.

La Instrucción de Carreteras define los coeficientes de equivalencia (*CE*) como el cociente entre los espesores de dos capas de diferente naturaleza que se supone aportan una capacidad estructural semejante. La Tabla 5 presenta los valores de *CE* propuestos en la Norma 6.1. IC.

Tabla 5: Factores de equivalencia. Fuente: Elaboración propia.

	T00	T0	T1	T2	T31	T32	T41	T42
<i>CE</i> (flexible-semiflexible)	0,8	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3

Aplicando la expresión anterior y para una tasa media de crecimiento del tráfico de 0,04 y 20 años de periodo de proyecto, se obtienen, para las distintas categorías de tráfico pesado los umbrales de número de aplicaciones de carga (Tabla 6).

Tabla 6: Número de aplicaciones de carga (*N*) por categorías de tráfico pesado. Fuente: Elaboración propia.

N	T00	T0	T1	T2	T31	T32	T41	T42
Max		30433196	15216598	4347599	1086900	543450	217380	81517
Min	30433196	15216598	4347599	1086900	543450	217380	81517	

Una vez calculados los límites entre categorías de tráfico pesado, el siguiente paso es calcular el número de aplicaciones de carga que soportan los materiales que forman la sección de firmes a estudiar en cada uno de los puntos críticos descritos anteriormente.

Explanada. El cálculo del fin de la vida útil de la explanada se basa en modelos de acumulación de la deformación permanente. Normalmente se emplean leyes obtenidas experimentalmente que relacionan la deformación vertical (ϵ_v) con *N*. Las distintas leyes que suelen emplearse en el cálculo de la vida útil de la explanada son las siguientes:

- Shell $\epsilon_v = 2,10 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$ (85% confianza estadística)
- Asphalt Institute $\epsilon_v = 1,05 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,223}$ (deformación acumulada de ½")
- Brow y Pell $\epsilon_v = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$ (la más restrictiva)
- Com. Valenciana $\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$ (Shell reducida un 25%)

La Norma 6.1-IC establece para la Zahorra artificial:

- 6.1-IC (ZA) $\epsilon_v = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{0,28}$ (Brow y Pell)

Materiales tratados con cemento: Para el cálculo del agotamiento de los materiales tratados con cemento, suelo cemento (SC) o Grava Cemento (GC), se emplean leyes de fatiga que relacionan la tracción radial (σ_r) con la tensión de rotura a flexotracción (R_F).

La Norma 6.1 IC propone las siguientes:

- 6.1 IC (SC) $\sigma_r/R_F = 1-0,065 \cdot \log(N)$

La R_F puede estimarse en 1,3 MPa para T2 o superior

- 6.1 IC (GC) $\sigma_r/R_F = 1-0,08 \cdot \log(N)$

R_F puede estimarse en 1,3 MPa para T2 o superior.

Mezclas bituminosas: Basados en estudios experimentales. Relaciona la deformación radial a tracción (ϵ_r) con N . Pueden ser directas obtenidas mediante ensayos de laboratorio o en ensayos a escala real (CEDEX), o bien basadas en la composición y módulo de la mezcla (método Shell).

- Norma 6.1 IC:
 - o Mezclas AC tipo D, S y G $\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$
 - o Mezclas AC de alto módulo: $\epsilon_r = 6,917 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$

Acumulación de esfuerzos. Ley de Miner

En el caso de querer tener en cuenta condiciones variables a lo largo de la vida útil de la sección de firme, tal y como ocurre en la realidad, se tendrían que diseñar configuraciones distintas de cargas, condiciones de contorno y propiedades de los materiales (variables con la temperatura, humedad, envejecimiento, etc.). Para resolver este caso se propone la aplicación de la Ley de Miner que, de forma simplificada, nos indica que, para cada aplicación de carga en una configuración del firme, se agota una

parte de su vida útil que es inversamente proporcional al número de cargas máximas que soportaría para esa misma configuración. Cada carga acumula su efecto de forma que el agotamiento de una capa se produce cuando:

$$\sum_j d_{ij} = 1, \text{ siendo } d_{ij} = n_{ij}/N_{fij}$$

donde d_{ij} daño acumulado por la n_{ij} cargas j en la capa i ; n_{ij} número de aplicaciones de carga j que soporta la capa i ; y N_{fij} número máximo de aplicaciones de una carga j que soporta la capa i de módulo E_i .

3. Desarrollo

3.1 Definición del modelo

Para analizar el comportamiento de las secciones de firme propuestas en este trabajo, ante la carga de camiones circulando en platooning frente a la situación actual de carga transmitida por camiones conducidos por personas, se ha considerado necesario construir un modelo de elementos finitos 3D donde se puedan representar todos los elementos que forman parte del problema.

Mediante este modelo ha sido posible obtener las deformaciones radiales, deformaciones verticales y tensión radial en los puntos críticos de cada sección, ante distintas distribuciones de carga propuestas.

Previo a la construcción de un modelo de elementos finitos, hay que considerar varios aspectos para resolver adecuadamente el problema:

- Deben ser consideradas todas las simetrías presentes en el problema (geométricas, condiciones de contorno, solicitaciones) para reducir en la medida de lo posible el modelo.
- El tamaño de los elementos ha de ser proporcional a la precisión necesaria en los resultados, por lo que zonas más solicitadas han de estar mejor definidas que otras menos comprometidas.
- Se debe tener en cuenta el número de elementos utilizados, pues según aumenta su número lo hace también el tamaño de los sistemas matriciales, repercutiendo sobre el tiempo de cálculo.

Teniendo esto en cuenta, es necesario definir el tamaño del modelo, la densidad del mallado y las condiciones de contorno.

3.1.1 Tamaño del modelo

Para determinar el tamaño del modelo, se acotó la distancia a la que los efectos de tensión y deformación tras aplicar las cargas resultaron despreciables. Tras analizar modelos de distintas dimensiones con varios tipos de cargas, se determinó adecuado un tamaño de modelo de 4x4x4 m. En la Figura 8 puede observarse como un modelo de 10x10x10 m resulta demasiado grande, pues las deformaciones se producen muy lejos de los bordes del modelo, mientras que en un modelo de 2x2x2 m se observa como el modelo resulta demasiado pequeño, llegando las deformaciones hasta los bordes del modelo (Figura 9).

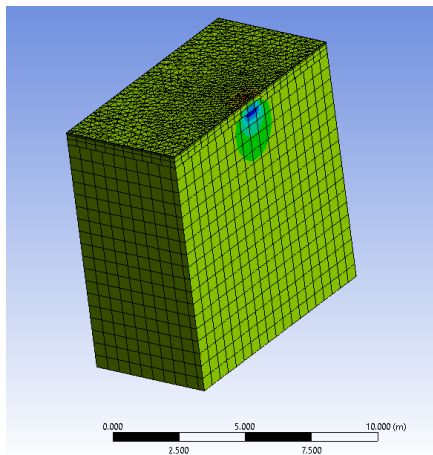


Figura 6: Ejemplo de modelo de 10x10x10m. Sección sobre el eje de aplicación de cargas. Fuente: Elaboración propia

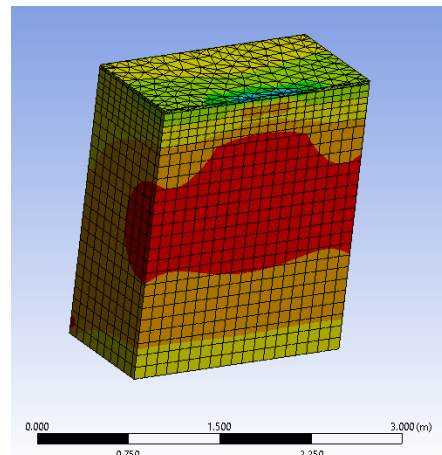
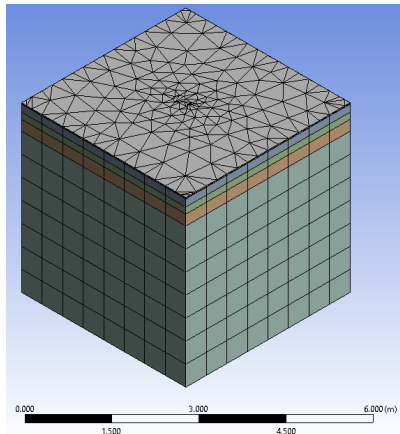


Figura 7: Ejemplo de modelo de 2x2x2 m. Sección sobre el eje de aplicación de cargas. Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Densidad del mallado

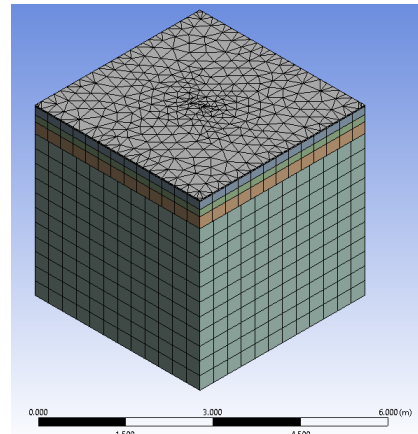
Para determinar la densidad del mallado, se calcularon modelos con mallados de diferente resolución, dando como resultado que, para los modelos utilizados, los valores obtenidos eran convergentes a partir del nivel 4 de resolución. Utilizar niveles de resolución superiores solo nos aportaría mayor tiempo de cálculo y mayor necesidad de recursos informáticos. En las Figuras 10-16 se muestran los distintos niveles de

resolución estudiados y la cantidad de elementos y nodos resultantes para cada nivel de resolución.



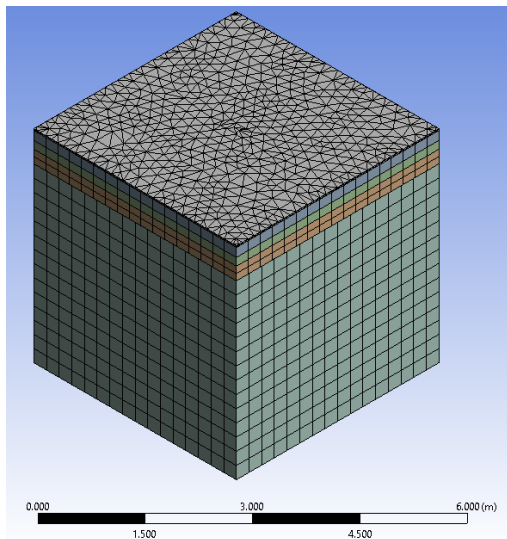
Statistics	
Nodes	5652
Elements	1378

Figura 8: Mallado de resolución 1. Fuente: Elaboración propia.



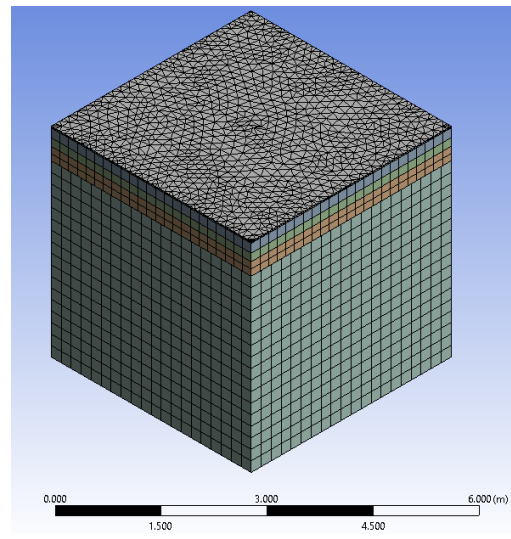
Statistics	
Nodes	15444
Elements	3849

Figura 9: Mallado de resolución 2. Fuente: Elaboración propia.



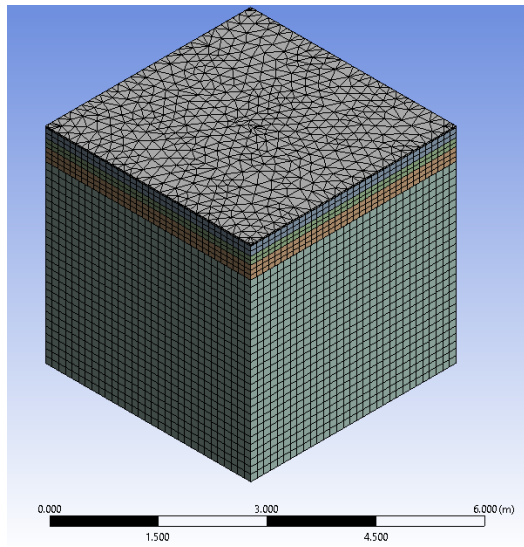
Statistics	
Nodes	30965
Elements	7816

Figura 10: Mallado de resolución 3. Fuente: Elaboración propia.



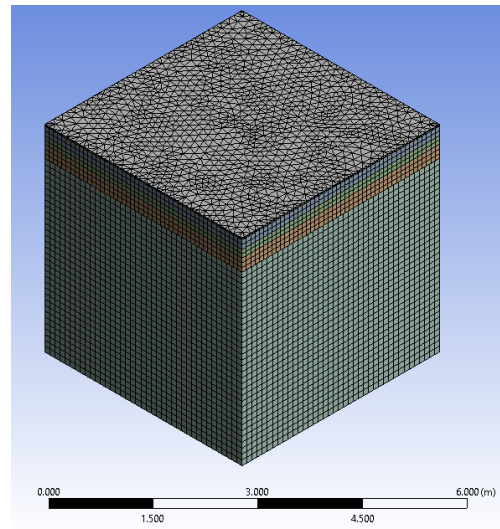
Statistics	
Nodes	56979
Elements	14800

Figura 11: Mallado de resolución 4. Fuente: Elaboración propia.



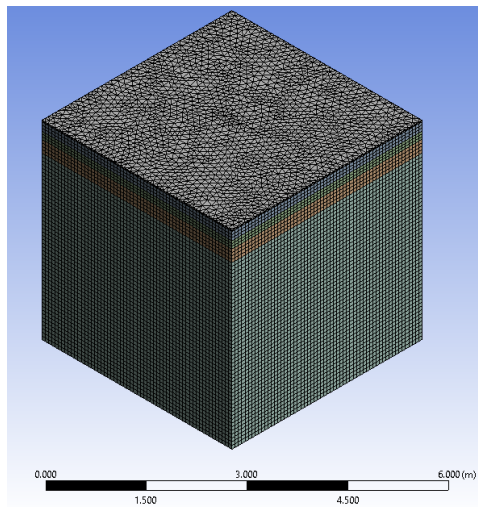
Statistics	
Nodes	163034
Elements	37094

Figura 12: Mallado de resolución 5. Fuente: Elaboración propia.



Statistics	
Nodes	307549
Elements	71453

Figura 13: Mallado de resolución 6. Fuente: Elaboración propia.



Statistics	
Nodes	890152
Elements	211731

Figura 14: Mallado de resolución 7. Fuente: Elaboración propia.

3.1.3 Condiciones de contorno

Otro aspecto fundamental a la hora de definir el modelo son las condiciones de contorno. En modelos de elementos finitos, estas condiciones se definen restringiendo movimientos o determinando coeficientes de fricción en nodos, áreas, líneas, superficies de contacto, etc. junto con la aplicación de las cargas a las que va a someterse el modelo.

La condición de contorno empleada ha sido la limitación de desplazamientos en el fondo del modelo. La última capa, la explanada, es de un espesor suficientemente grande como para no verse afectada por esta condición de contorno.

Además, en las secciones de firme semirrígido, para calcularlas en condiciones de semiadherencia, se ha realizado un modelo con adherencia total en todas las capas y otro combinando adherencia total con adherencia nula entre la capa de suelocemento y explanada.

3.2 Selección de secciones de firme

Se han analizado secciones de pavimento tipo semiflexible y semirrígido para categoría de tráfico T00 y para categoría de tráfico T0.

Para la selección de las secciones a estudiar, se han buscado, dentro de las secciones propuestas en la Norma 6.1 IC (Tabla 7), las secciones de mayor categoría de tráfico pesado por ser el tipo de sección por el que principalmente circulen los vehículos en platooning. Dentro de las secciones propuestas para estas categorías de tráfico, se han seleccionado las secciones de firme semiflexible 0031 y 031, y las secciones de firme semirrígido 0032 y 032.

Tabla 7: Secciones de firme. Fuente: Norma 6.1. IC

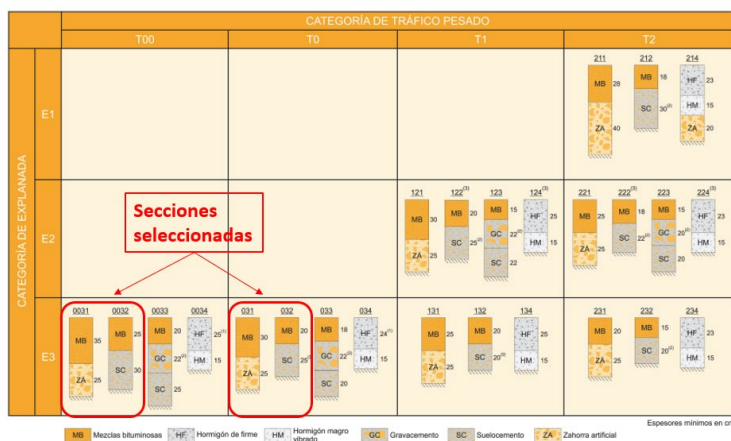


FIGURA 2.1. CATÁLOGO DE SECCIONES DE FIRME PARA LAS CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T00 A T2, EN FUNCIÓN DE LA CATEGORÍA DE EXPLANADA

Dentro de las categorías de tráfico T00 y T0, se han dejado fuera de este trabajo el estudio de las secciones 0033 y 033, por ser también firmes semirrígidos. En caso de querer obtener resultados para estas secciones, la metodología a seguir sería la misma que la que se describirá para las secciones 0032 y 032. También se ha dejado fuera de este trabajo las secciones 0034 y 034 por ser firmes rígidos, menos empleados en España.

Las Figuras 17-20 muestran los esquemas de las secciones estudiadas. En ellas se representan los tipos y espesores de capas de mezclas bituminosas empleadas para este trabajo.

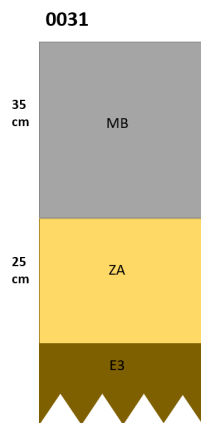


Figura 15: Esquema secció 0031.

Fuente: Elaboración propia.

0031:

Mezcla bituminosa:

- 3 cm BBTM
- 7 cm AC22 Bin S
- 10 cm AC22 Bin S
- 15 cm AC 32 Base G

Zahorra:

- 25 cm ZA

Explanada E3

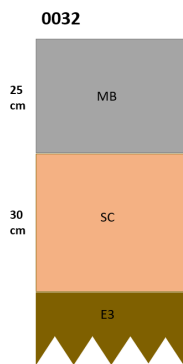


Figura 16: Esquema secció 0032.

Fuente: Elaboración propia.

0032:

Mezcla bituminosa:

- 3 cm BBTM
- 10 cm AC22 Bin S
- 12 cm AC32 Base G

Suelo cemento:

- 30 cm SC

Explanada E3

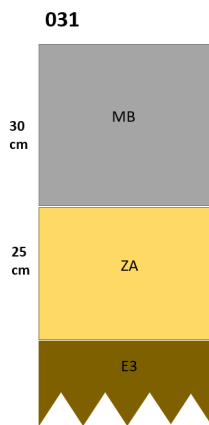


Figura 17: Esquema secció 031.

Fuente: Elaboración propia.

031:

Mezcla bituminosa:

- 3 cm BBTM,
- 7 cm AC22 Bin S
- 10 cm AC22 Bin S
- 10 cm AC 32 Base

Zahorra:

- 25 cm ZA

Explanada E3

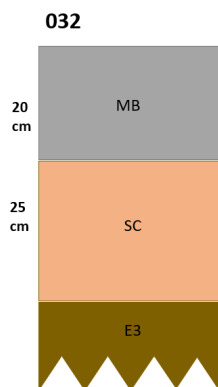


Figura 18: Esquema secció 032.

Fuente: Elaboración propia.

T032:

Mezcla bituminosa:

- 3 cm BBTM
- 7 cm AC22 Bin S
- 10 cm AC32 Base G

Suelo cemento:

- 25 cm SC

Explanada E3

3.3 Datos de entrada

Cada uno de los modelos de sección de firme creados está compuesto por varias capas de diferentes materiales. En el caso que nos ocupa, al hacer la hipótesis de que los materiales empleados se comportan de forma elástica lineal, los parámetros necesarios para definirlos son: el Módulo de Young y el Coeficiente de Poisson. Los parámetros utilizados en este trabajo, para los materiales bituminosos, suelo cemento (SC40) y zahorra artificial (ZA), son los propuestos por la Norma de Secciones de firmes de la Comunidad Valenciana (2009) (Tabla 8).

Tabla 8: Características de los materiales empleados en los modelos. Fuente: Elaboración propia.

Materiales	Módulo de Young (Mpa)	Coeficiente de Poisson
BBTM 11B	3000	0,35
AC22 Bin S	7000	0,33
AC32 Base G	5000	0,33
SC40	6000	0,25
ZA	526,6	0,35

3.4 Carga aplicada

Para definir la carga aplicada sobre el pavimento, se ha utilizado la carga propuesta por la Norma de Secciones de Firmes de la Comunidad Valenciana (2009). Como simplificación, se asume que la carga por rueda se aplica sobre un área circular y que la presión de contacto es igual a la presión de inflado del neumático.

La relación entre el radio de la superficie circular de contacto, la carga total por rueda y la presión de contacto es la siguiente:

$$P = q \cdot \pi \cdot R^2 \rightarrow R = \sqrt{\frac{P}{q \cdot \pi}}$$

donde P es la carga sobre la rueda (N); q la presión de contacto (aproximadamente igual a la de inflado) (Pa); y R el radio de la superficie circular de contacto (m).

Para un eje equivalente de 128 kN se tiene los siguientes valores en cada rueda:

- $P = 128.000/4 = 32.000 \text{ N}$

- $q = 900 \text{ kPa}$
- $R = 10,64 \text{ cm}$

A efectos de cálculo se emplea una carga de dos ruedas de 32.000 N cada una, con una separación entre sus respectivos centros igual a tres radios, es decir, 31,92cm, un radio entre bordes. El punto medio de la aplicación de las cargas está localizado a una distancia de 15,96 cm de cada uno de los centros de las ruedas (Figura 21).

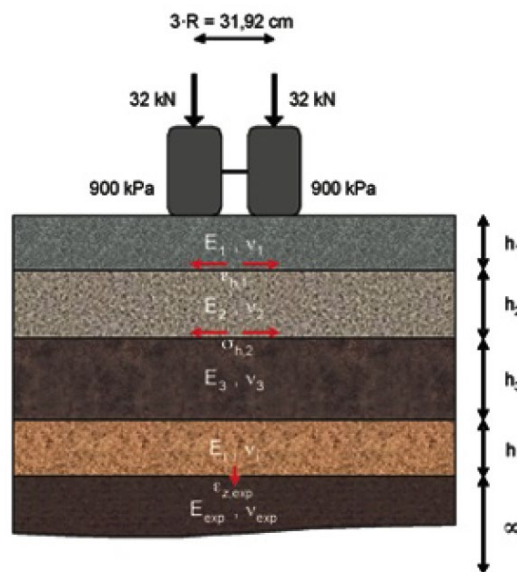


Figura 19: Esquema de carga y sección tipo. Fuente: Norma de Secciones de Firme de la Comunidad Valenciana.

3.5 Definición de distribución de cargas

A diferencia de los vehículos autónomos, que mantienen una posición centrada en el carril (Lee, 2012), los vehículos conducidos por humanos varían la posición lateral que ocupan en el carril y su distribución suele corresponderse con una distribución normal. Esta distribución varía en función del tipo de vía, trazado, sección transversal, condiciones atmosféricas, estado del pavimento, etc.

Para evaluar el efecto que producirían los vehículos pesados autónomos circulando en platooning frente a la situación actual de vehículos conducidos por humanos, se ha propuesto estudiar y comparar las deformaciones y tensiones provocadas en el pavimento cuando las cargas de los vehículos pesados están centradas y las que producen los vehículos distribuidos de forma normal sobre el carril.

3.5.1 Vehículos centrados en el carril, platooning

En primer lugar, se ha definido la situación de carga centrada equivalente a los vehículos pesados autónomos circulando en platooning.

Para ello se aplicará el modelo de cargas definido en la Norma de Secciones de Firmes de la Comunidad Valenciana (2009), en el que se emplea la carga de dos ruedas de 32kN cada una, sobre superficies circulares de 10,64 cm de radios (0,071 m² en total), con una separación entre sus respectivos centros igual a tres radios (Figuras 22-24).

Sobre la superficie creada en el modelo, se aplica una presión de 900 kPa, que equivale a la presión que transmite 32 kN sobre el área creada.

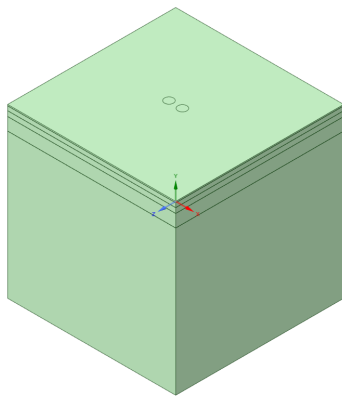


Figura 20: Diseño de modelo con carga centrada. Fuente: Elaboración propia

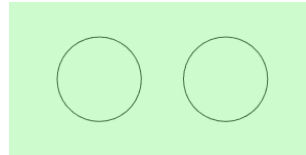


Figura 21: Detalle de superficie de aplicación de carga centrada. Fuente: Elaboración propia

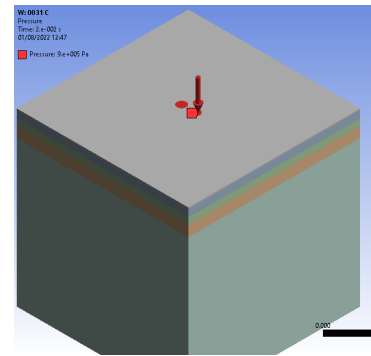


Figura 22: Aplicación de presión de 900 kPa sobre superficie del modelo. Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Vehículos distribuidos sobre el carril

Cuando los vehículos pesados circulan conducidos por humanos, siguen distintas trayectorias ocupando diferentes posiciones laterales a lo ancho del carril. Estas posiciones describen una distribución normal con mayor o menor desviación, dependiendo de varios factores.

Para definir la distribución de las cargas se ha tomado como ejemplo un carril del 3,5 m de ancho y un camión de ancho 2,6 m. Para este supuesto, cuando el camión se encuentra centrado, queda un espacio de 45 cm desde cada lado del camión hasta el borde del carril (Figura 25).

Para el trabajo realizado se han estudiado distribuciones normales con desviación típica (s) de 0,2 m, 0,15 m y 0,1 m.

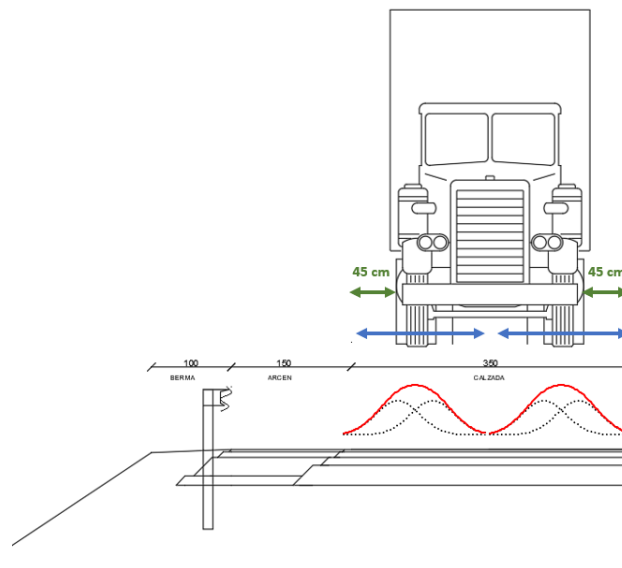


Figura 23: Esquema de la probabilidad de posición lateral de vehículos pesados conducidos por humanos. Fuente: Elaboración propia

- **Distribución normal con $s = 0,2$ m**

Se ha calculado la distribución normal considerando una desviación típica de 0,2 m para cada una de las ruedas de un semieje, dando como resultado la distribución que se muestra en la Figura 26.

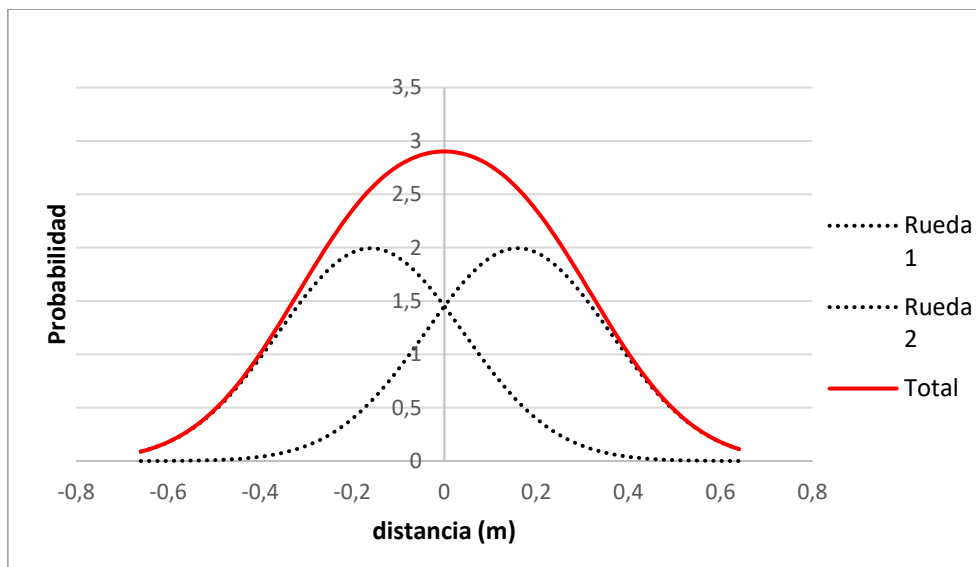


Figura 24: Probabilidad para $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia

A partir de la distribuci3n obtenida, se ha calculado la probabilidad para cada tramo de 0,106 m, es decir, un radio de la superficie circular utilizada para el c3lculo de los veh3culos centrados (Tabla 9).

Tabla 9: Distribuci3n para $s=0,2$ m. Fuente: Elaboraci3n propia

Inf	Sup	Conjunto	Área m ²
-0,798	-0,6916	0%	0,000114
-0,6916	-0,5852	1%	0,000457
-0,5852	-0,4788	4%	0,001393
-0,4788	-0,3724	9%	0,003258
-0,3724	-0,266	17%	0,005919
-0,266	-0,1596	24%	0,008576
-0,1596	-0,0532	29%	0,010349
-0,0532	0,0532	31%	0,01093
0,0532	0,1596	29%	0,010349
0,1596	0,266	24%	0,008576
0,266	0,3724	17%	0,005919
0,3724	0,4788	9%	0,003258
0,4788	0,5852	4%	0,001393
0,5852	0,6916	1%	0,000457
0,6916	0,798	0%	0,000114

Para poder comparar los resultados obtenidos con los de los veh3culos centrados, la carga total aplicada ha de ser igual en todos los casos. As3i pues, se reparte el 3rea total de 0,071 m², empleada para calcular las cargas centradas en funci3n de los porcentajes de distribuci3n obtenidos para cada tramo tal y como se presenta en la Figura 27.

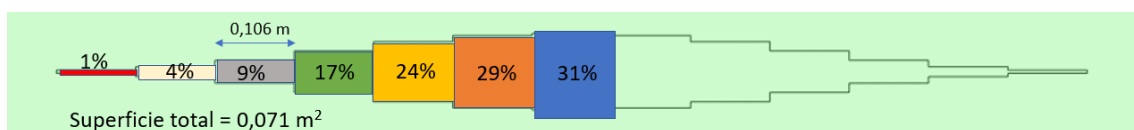


Figura 25: Distribuci3n de superficie. Fuente: Elaboraci3n propia.

Estos resultados, trasladados al modelo, dan lugar al modelo que se muestra en la Figura 29, donde se aplicar3a la presi3n de 900 kPa.

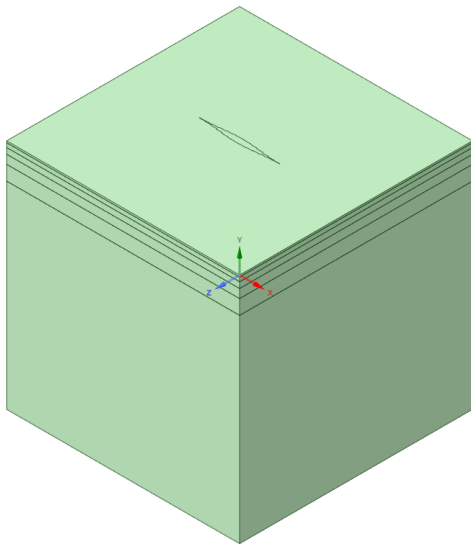


Figura 26: Diseño de modelo con carga distribuida de $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia

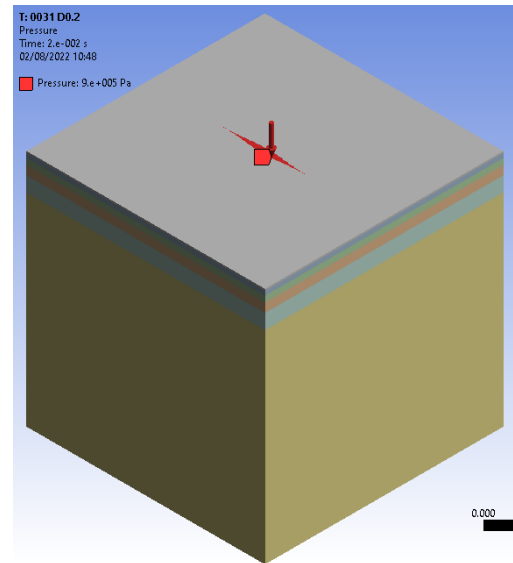


Figura 27: Aplicación de presión sobre modelo con $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia

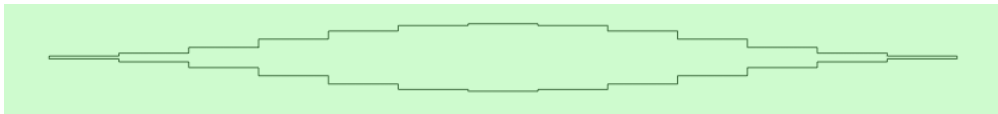


Figura 28: Detalle de superficie de aplicación de carga distribuida con $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia

- **Distribución normal con $s = 0,15$ m**

Se ha calculado la distribución normal considerando una desviación típica de $0,15$ m para cada una de las ruedas de un semieje, dando como resultado la distribución que se muestra en la Figura 31.

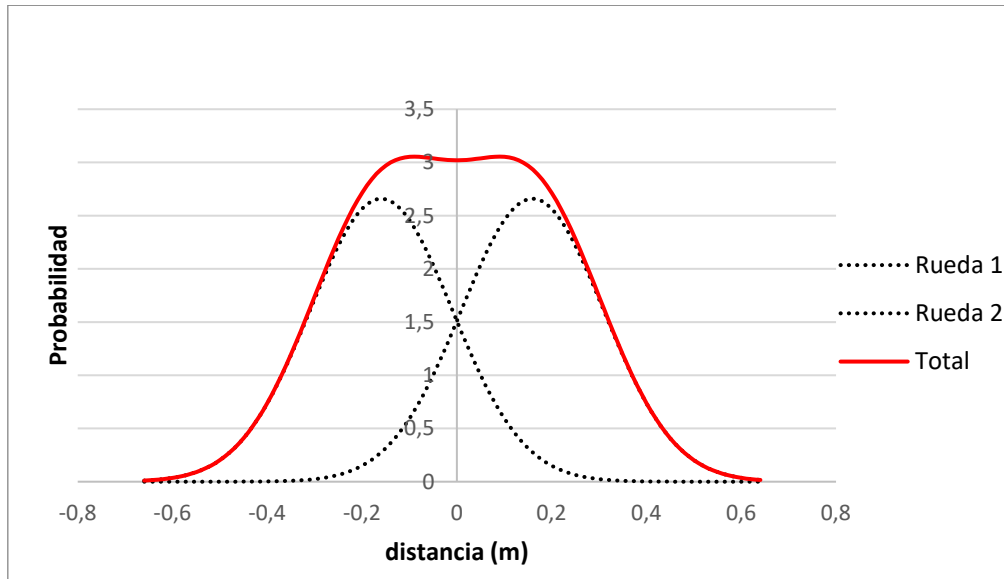


Figura 29: Probabilidad para $s=0,15$ m. Fuente: Elaboración propia

De igual forma que en el caso para $s = 0,2$ m, se ha obtenido la probabilidad en tramos de $0,106$ m para el conjunto de un semieje y repartiendo el área total de $0,071$ m² obtenemos la distribución para $s = 0,15$ m (Tabla 10).

Tabla 10: Distribución para $s=0,15$ m. Fuente: Elaboración propia

Inf	Sup	Conjunto	Área m2
-0,798	-0,6916	0%	0,00001
-0,6916	-0,5852	0%	0,00007
-0,5852	-0,4788	1%	0,00051
-0,4788	-0,3724	6%	0,00219
-0,3724	-0,266	16%	0,00580
-0,266	-0,1596	28%	0,00979
-0,1596	-0,0532	32%	0,01146
-0,0532	0,0532	32%	0,01145
0,0532	0,1596	32%	0,01146
0,1596	0,266	28%	0,00979
0,266	0,3724	16%	0,00580
0,3724	0,4788	6%	0,00219
0,4788	0,5852	1%	0,00051
0,5852	0,6916	0%	0,00007
0,6916	0,798	0%	0,00001

Estos resultados, trasladados al modelo, dan lugar al modelo que se presenta en la Figura 33, en el que se aplicará la presión de 900 kPa.

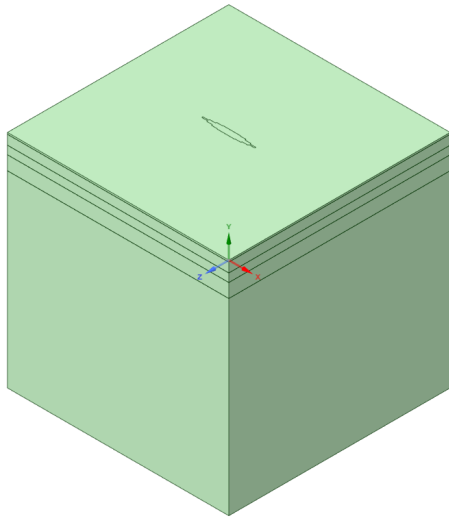


Figura 30: Diseño de modelo con carga distribuida de $s=0,15$ m. Fuente: Elaboración propia.

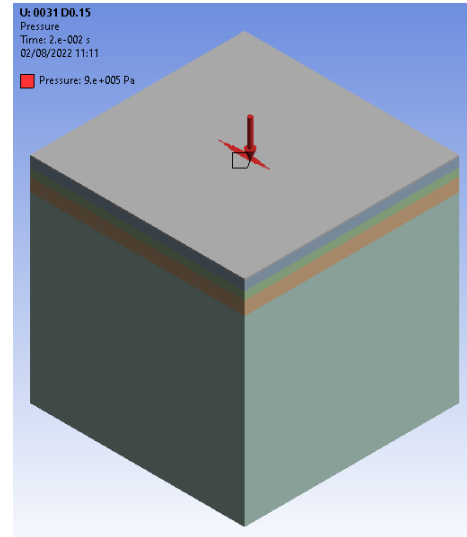


Figura 31: Aplicación de presión sobre modelo con $s=0,15$. Fuente: Elaboración propia.

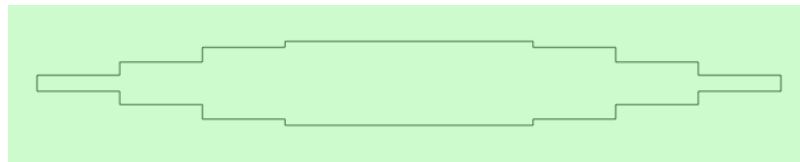


Figura 32: Detalle de carga distribuida con $s=0,15$ m. Fuente: Elaboración propia.

- **Distribución normal con $s = 0,1$ m**

Se ha calculado la distribución normal considerando una desviación típica de 0,1 m para cada una de las ruedas de un semieje, dando como resultado la distribución que se muestra en la Figura 35.

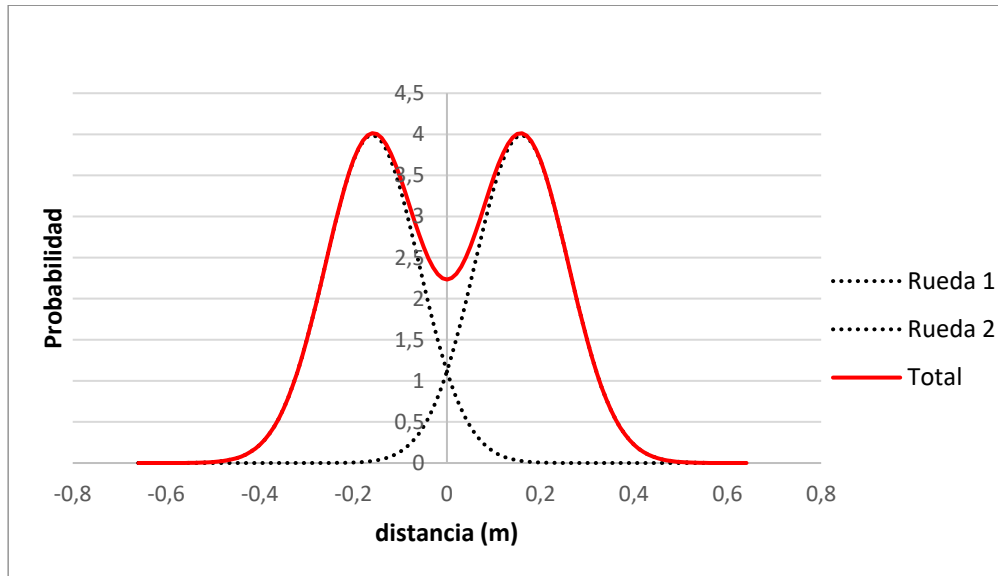


Figura 33: Probabilidad para $s=0,1$ m. Fuente: Elaboración propia

De la misma forma que en los casos anteriores, se ha obtenido la probabilidad en tramos de 0,106 m para el conjunto de un semieje y repartiendo el área total de $0,071 \text{ m}^2$ obtenemos la distribución de cargas de la Tabla 11: Distribución para $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11: Distribución para $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia

Inf	Sup	Conjunto	Área m2
-0,798	-0,6916	0%	0,000114
-0,6916	-0,5852	1%	0,000457
-0,5852	-0,4788	4%	0,001393
-0,4788	-0,3724	9%	0,003258
-0,3724	-0,266	17%	0,005919
-0,266	-0,1596	24%	0,008576
-0,1596	-0,0532	29%	0,010349
-0,0532	0,0532	31%	0,01093
0,0532	0,1596	29%	0,010349
0,1596	0,266	24%	0,008576
0,266	0,3724	17%	0,005919
0,3724	0,4788	9%	0,003258
0,4788	0,5852	4%	0,001393
0,5852	0,6916	1%	0,000457
0,6916	0,798	0%	0,000114

Estos resultados, trasladados al modelo, dan lugar a la siguiente superficie sobre la que se aplicará la presión de 900 kPa.

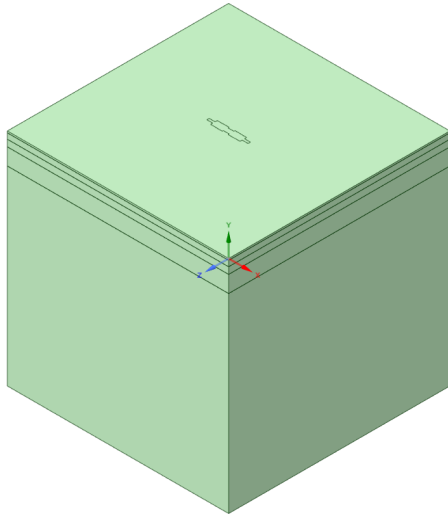


Figura 34: Diseño de modelo con carga distribuida de $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia

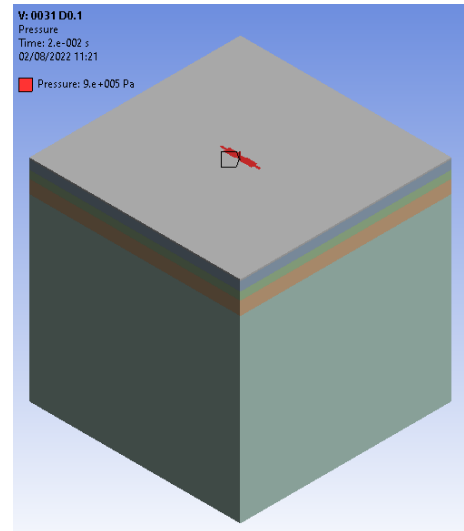


Figura 35: Aplicación de presión sobre modelo con $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia

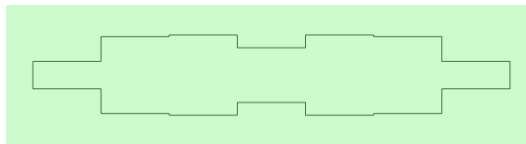


Figura 36: Detalle de carga distribuida con $s=0,2$ m. Fuente: Elaboración propia

En resumen, se han estudiado cuatro casos distintos, el primero con la carga centrada, perteneciente a la situación en la que los vehículos pesados autónomos circulen guiados por el centro del carril, y los tres casos restantes correspondiéndose a situaciones en la que cada vehículo sigue una trayectoria distinta, como ocurre actualmente con los vehículos conducidos por humanos. Estos casos de estudio siguen una distribución normal, de más centrada en el caso en el que la desviación típica es de 0,1 m, a más distribuida en el caso de una desviación típica igual a 0,2 m (Figura 39).

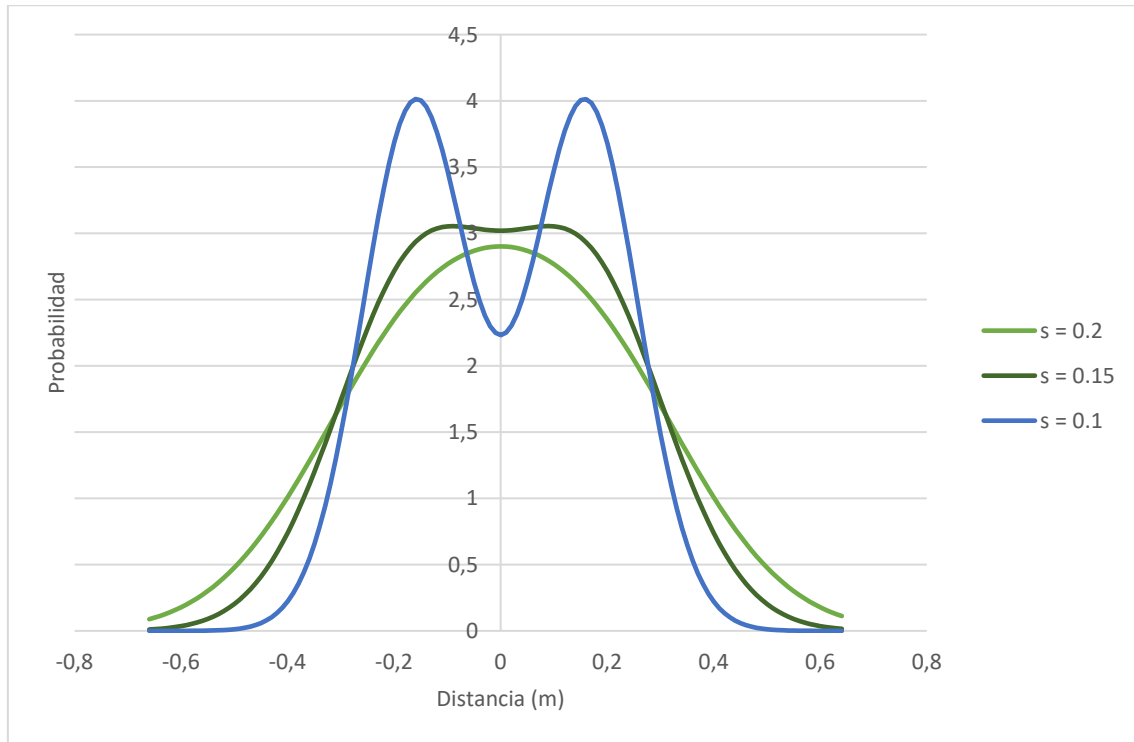


Figura 37: Distribución de vehículos para $s=0,1$ $s=0,15$ y $s=0,2$. Fuente: Elaboración propia

3.6 Validación del modelo

Para la validación del modelo se ha utilizado el ejemplo de cálculo analítico de firmes, realizado con el programa ALIZE y publicado por la Asociación Técnica de Carreteras (Bardesi, 2012). El programa de cálculo de firmes ALIZE es un programa basado en modelos multicapa elásticos y diseñado específicamente para el cálculo de firmes.

Para ello, se ha construido un modelo de ANSYS, siguiendo la metodología seguida en este trabajo, que replica el ejemplo calculado con ALIZE y se han comparado los resultados obtenidos con ambos programas.

Tabla 12: Resultados de cálculos ALIZE. Fuente: Bardesi, A. 2012.

```

131 BASE
POSITION DE LA VALEUR MAXIMALE POUR UN JUMELAGE
A SOUS UNE ROUE SIMPLE
B SOUS UNE DES ROUES DU JUMELAGE
C AU CENTRE DU JUMELAGE
* A= 12.500 D= 37.500 Q= 6.620
NOMBRE DE COUCHES 6
*****
* Z * * * * *
* * * * * EPSILONT * * * * * SIGMAT * * * * * EPSILONZ * * * * * SIGMAZ
*****
* 0.00* * * * * 0.905E-04B* 0.814E+01B*-0.515E-04C* 0.662E+01A*
* * * * * E= 40000. * * * * *
* * * * * NU=0.35 * * * * *
* * * * * HL= 3.00 * * * * *
* 3.00* * * * * 0.471E-04C* 0.598E+01B*-0.415E-04C* 0.644E+01B*
* * * * * OLLIE-----
* 3.00* * * * * 0.471E-04C* 0.746E+01B*-0.386E-04C* 0.644E+01B*
* * * * * E= 70000. * * * * *
* * * * * NU=0.33 * * * * *
* * * * * H2= 6.00 * * * * *
* 9.00* * * * * -0.142E-04A* 0.136E+01B*-0.620E-05C* 0.482E+01B*
* * * * * OLLIE-----
* 9.00* * * * * -0.142E-04A* 0.165E+01B*-0.203E-05C* 0.482E+01B*
* * * * * E= 50000. * * * * *
* * * * * NU=0.33 * * * * *
* * * * * H2= 8.00 * * * * *
* 17.00* * * * * -0.320E-04B*-0.121E+01C* 0.565E-04B* 0.222E+01B*
* * * * * OLLIE-----
* 17.00* * * * * -0.320E-04B*-0.121E+01C* 0.565E-04B* 0.222E+01B*
* * * * * E= 50000. * * * * *
* * * * * NU=0.33 * * * * *
* * * * * H2= 8.00 * * * * *
* 25.00* * * * * -0.708E-04C*-0.420E+01B* 0.671E-04B* 0.893E+00B*
* * * * * OLLIE-----
* 25.00* * * * * -0.708E-04C*-0.102E+00C* 0.152E-03B* 0.893E+00B*
* * * * * E= 6000. * * * * *
* * * * * NU=0.35 * * * * *
* * * * * H2= 25.00 * * * * *
* 50.00* * * * * -0.552E-04C*-0.270E+00C* 0.942E-04C* 0.394E+00C*
* * * * * OLLIE-----
* 50.00* * * * * -0.552E-04C*-0.452E-01C* 0.148E-03C* 0.394E+00C*
* * * * * E= 2850. * * * * *
* * * * * NU=0.30 * * * * *
* * * * * H2=INFINI * * * * *
*****
* D * * * * * 1E-6984/100 * * * * * R*D * * * * *
* R * * * * * 852.094 * * * * * 13480.80MM/1.00 * * * * *
*****
MODULES ET CONTRAINTES EN BARS

```

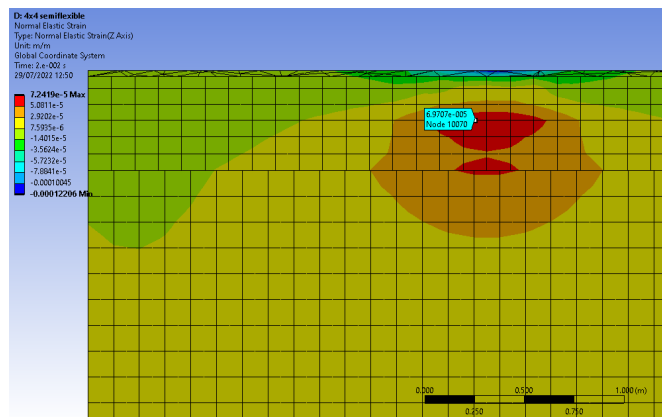


Figura 38: Resultados modelo ANSYS. Deformación radial a 25 cm de profundidad. Fuente: Elaboración propia

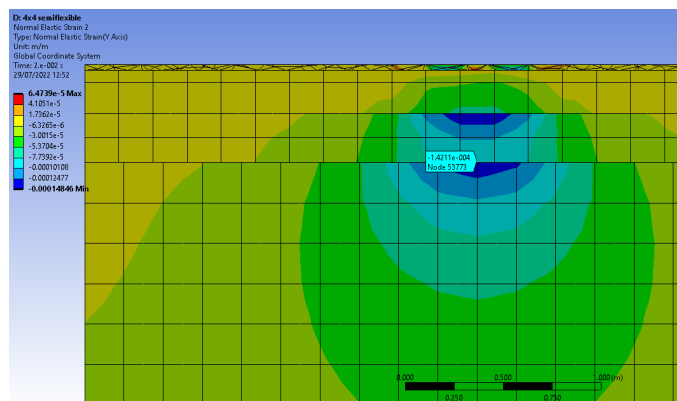


Figura 39: Deformación vertical a 50 cm de profundidad. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 40 y 41 y en la Tabla 12, la diferencia entre los resultados obtenidos con el modelo de ANSYS y los publicados, calculados con ALIZE, difieren en tan solo un 2% (Tabla 13).

Tabla 13: Resultados comparación modelo ANSYS con modelo ALIZE. Fuente: Elaboración propia.

	ANSYS	ALIZE	Diferencia
Def radial -25cm	6,97E-05	7,08E-05	2%
Def vertical -50 cm	-1,42E-04	-1,45E-04	2%

Tras esta validación, podemos concluir que la metodología utilizada con el programa ANSYS ofrece resultados adecuados.

3.7 Refuerzo de firme mediante el empleo de geotextiles

El artículo 290 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG3) define los geotextiles como el material textil plano, permeable y polimérico (sintético o natural) que se emplea en contacto con suelos u otros materiales en aplicaciones geotécnicas y de ingeniería civil, pudiendo ser tricotado, tejido o no tejido, de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 10318.

Se entiende como productos relacionados con los geotextiles, a aquellos que no se corresponden con la definición anterior, contemplándose la utilización de los siguientes: geomalla, georred, geomanta, geocelda, geotira y geoespaciador, definidos en la norma UNE-EN ISO 10319. En la Figura 6 se pueden ver varios ejemplos de geotextiles y productos relacionados con los geotextiles.

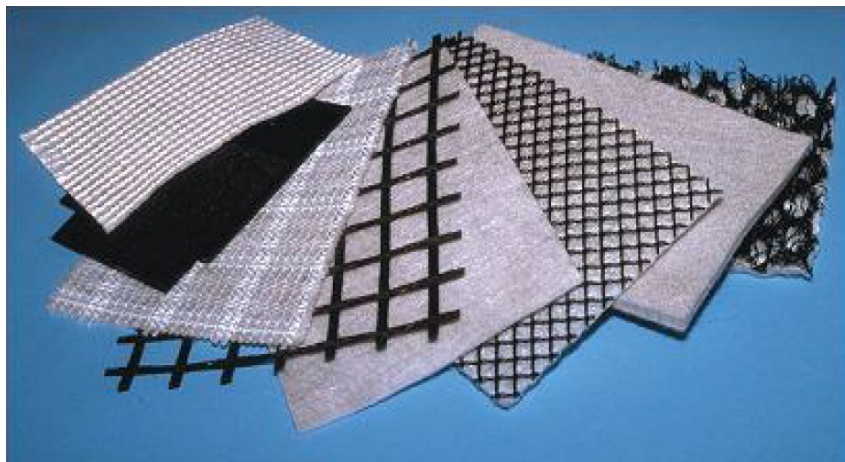


Figura 40: Gama de geosintéticos. Fuente: Estado del arte para el correcto uso de los geosintéticos en la rehabilitación de firmes de carretera.

Las principales funciones desempeñadas en obras de carretera por geotextiles y productos relacionados son: filtración, separación, refuerzo, drenaje, protección y relajación de tensiones.

En construcción y rehabilitación de firmes, las funciones más interesantes de los geotextiles son las de refuerzo, barrera intercapas y la relajación de tensiones.

- Función de refuerzo:

Para que pueda ser utilizado como refuerzo, se exige que el geosintético o malla de refuerzo tenga una elevada resistencia a tracción y una baja deformación, lo que implica un elevado módulo de elasticidad.

La función de refuerzo mediante la introducción de una geomalla permite armar a la mezcla bituminosa en las dos direcciones, dotándolas de mayor resistencia a tracción, de forma que pueda absorber los esfuerzos de fatiga y térmicos. Debido a esto, alguna de las aplicaciones de estos refuerzos es su aplicación para la reducción de espesores de las capas de firme.

En caso de recrecido de firmes en el que las capas inferiores presentan fisuración, la geomalla, al tener más rigidez que la mezcla bituminosa, absorberá la fisura y la redirigirá lateralmente, de forma que esta se propagará a lo largo del elemento de refuerzo hasta que su energía se disipe, mejorando el comportamiento del conjunto del firme, que retrasará la aparición de estas fisuras en la superficie, evitando que se cree una vía preferente de entrada de agua y el progresivo deterioro de la estructura.

- Función de barrera intercapa:

Esta función la aporta principalmente el betún que impregna el geotextil no tejido, bien de manera individual al saturarse el geotextil con el betún del riesgo de adherencia, bien formando parte de un geocompuesto como uno de los elementos que lo conforman. Estas actuaciones tienen una alta dotación de ligante bituminoso, lo que les permite proporcionar una elevada impermeabilidad al conjunto, evitando que el agua penetre hacia capas inferiores del paquete de firmes.

- Función de relajación de tensiones:

Establece una capa elástica entre el firme antiguo y la capa de recrecido que permite amortiguar y aliviar las tensiones que conlleva la propagación de fisuras. Esta función va asociada a la función barrera intercapa y la presentan los geotextiles no tejidos y geocompuestos, que constituyen una membrana de absorción de tensiones.

En la rehabilitación de firmes se emplean los siguientes tipos de geosintéticos:

- Geotextiles no tejidos. Saturando el geotextil con betún se confecciona una capa para impermeabilizar el firme y relajar las tensiones intercapa.
- Geomallas biaxiales para la función de refuerzo, complementadas con un elemento auxiliar para favorecer su instalación. Este elemento auxiliar puede ser:
 - Un geotextil no tejido ligero que aporte superficie específica que favorezca la adherencia al soporte y que pueda, o no, tener recubrimiento bituminoso. Este geotextil no cumple la función de barrera intercapa ya que no tiene la capacidad de retención de betún necesaria para cumplir esa función.
 - Un recubrimiento de la geomalla con betún oxidado, que favorezca la adherencia al soporte por termofusión de este durante su instalación.
- Geocompuestos formados por una geomalla biaxial y un geotextil no tejido, pudiendo estar el conjunto recubierto o no. La función que realiza es triple: Refuerzo + Relajación de tensiones + Barrera intercapas (impermeable por saturación con betún del geotextil no tejido).



4. Objetivos e hipótesis

El objetivo principal de este trabajo es el análisis de la deformación y deterioros en pavimentos de carreteras debido al tráfico de vehículos pesados autónomos circulando en platooning mediante modelos de elementos finitos.

Para ello se modelizarán, mediante el software de elementos finitos ANSYS, varias secciones de carreteras del tipo semiflexible y semirrígido y, sobre estas secciones, se analizará la influencia de la distribución espacial de cargas generadas por la circulación de los vehículos pesados. En total se modelizarán cuatro secciones de firme y, sobre cada uno de los modelos, se estudiarán cuatro distribuciones espaciales de cargas. De esta forma, se podrá evaluar la influencia de la concentración de cargas en la vida útil de las distintas secciones de firme modelizadas.

Se plantean los siguientes objetivos científico-técnicos:

- Definición de los parámetros empleados en el cálculo de la vida útil de las secciones de firme estudiadas.
- Definición de la carga tipo empleada en los cálculos, perteneciente al semieje de un vehículo pesado.
- Validación de los modelos creados, comparando los resultados obtenidos con resultados de dimensionamiento analítico de firmes obtenidos mediante el empleo de otros programas informáticos.
- Selección de distintas secciones de firme adecuadas para el estudio del fenómeno objeto del trabajo.
- Definición de la distribución espacial de las cargas que transmite el tráfico pesado en las secciones estudiadas y cómo esta distribución se traslada al modelo.
- Análisis de los resultados obtenidos

A continuación, se plantean las hipótesis de este trabajo. Dichas hipótesis se han dividido en dos grupos: hipótesis de partida, que son la base sobre la que se desarrolla el trabajo

pero que se consideran suficientemente validadas por otras investigaciones previas, y las hipótesis que serán contrastadas con el desarrollo del trabajo.

- Hipótesis de partida:
 - Se considera que todos los materiales empleados en los modelos tienen un comportamiento elástico lineal.
 - Se considera la adherencia total entre capas, excepto entre las capas tratadas con cemento y la explanada, donde se considera la adherencia parcial.
 - Las deformaciones y tensiones que se producen en condiciones de semiadherencia de las capas tratadas con cemento se pueden estimar como la media de las deformaciones y tensiones que se producen en condiciones de adherencia total y adherencia nula.

- Hipótesis a contrastar:
 - **H1.** El software de elementos finitos ANSYS, ofrece resultados adecuados para el cálculo de la vida útil en secciones de firme con tráfico centrado y distribuido.
 - **H2.** La concentración de cargas producidas por los vehículos pesados circulando en platooning acorta la vida útil de la sección del firme de la carretera.
 - **H3.** El fallo de los firmes semiflexibles, para categorías de tráfico altas, se produce por deformación radial en la fibra inferior de la capa de mezcla bituminosa inferior.
 - **H4.** El fallo de los firmes semirrígidos se produce por tensión radial de tracción en la fibra inferior de los materiales tratados con cemento.
 - **H5.** Las secciones de firme estudiadas superan los límites, de número de ejes soportados, de las categorías de tráfico para las que están diseñadas.

- **H6.** El refuerzo de la sección de firme mediante geotextiles permite incrementar su vida útil haciendo frente al efecto de la concentración de cargas que provoca el platooning.

5. Metodología

Durante este trabajo se ha analizado el efecto que produciría la concentración de cargas de los vehículos pesados circulando en platooning sobre las carreteras y, durante la aplicación práctica, se ha estudiado el efecto que provocaría el refuerzo con una lámina de geotextil para mejorar la respuesta del firme ante este efecto.

Para ello, se propone la metodología que se presenta en la Figura 7.

La metodología aplicada ha sido la siguiente:

Definición del modelo

Tamaño del modelo: Se ha verificado que el modelo no es demasiado pequeño para influir en los resultados ni demasiado grande para que afecten a las condiciones de contorno.

Densidad del mallado: Con el mallado se ha discretizado el modelo y se ha dividido el sólido creado en nodos y segmentos. Los nodos y segmentos tienen que ser de un número y tamaño acorde al tamaño de los elementos que incluye el modelo.

Condiciones de contorno: Se ha tenido en cuenta la adherencia entre capas y, la hipótesis de que la explanada tiene una profundidad infinita y que las capas también son también infinitas en el plano horizontal.

Datos de entrada

Propiedades de los materiales: Se han definido los materiales como elásticos lineales. Para ello, es necesario el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson, obtenidos de distintas publicaciones y normativas de firmes.

Carga aplicada: Se ha definido la carga aplicada. Para ello, se ha empleado la carga utilizada en la Norma de firmes de la Comunidad Valenciana.

Distribución de cargas: Se han estudiado distintas distribuciones de cargas. Cargas centradas para simular el paso de platooning y cargas distribuidas para simular la conducción manual.

Validación del modelo

Comparación de resultados de ANSYS con ALIZE: Para validar los resultados obtenidos se ha realizado un ejemplo, publicado por la Asociación Técnica de Carreteras, de cálculo de firmes realizado con el software de dimensionamiento de firmes ALIZE, utilizando la metodología utilizada en este trabajo con ANSYS y se han comparado los resultados obtenidos con los dos programas.

Ejecución de los modelos

Selección de resultados: El software de elementos finitos ANSYS proporciona multitud de resultados. Para el cálculo de la vida útil de las secciones de firme se ha necesitado obtener las tensiones y deformaciones en los puntos críticos de cada sección.

Ejecución del modelo: Se han ejecutado los modelos y se han seleccionado los resultados necesarios para el análisis de las secciones de firme estudiadas.

Análisis de datos y resultados

Cálculo de ejes equivalentes y vida útil: Con los datos obtenidos, se ha calculado el número de ejes equivalentes soportado por cada sección y el criterio de fallo de estas.

Aplicación práctica

Modelización sección A-7 de proyecto: Siguiendo la metodología descrita, se ha modelizado la sección del Proyecto de Mejoras Funcionales de la A-7.

Modelización sección reforzada: Se ha modelizado una sección de firmes reforzada con dos tipos de malla de refuerzo.

Análisis de resultados: Se han analizado y comparado las secciones del proyecto con la sección reforzada. Se ha obtenido la vida útil de las secciones propuestas y se ha

analizado el efecto del refuerzo frente al deterioro acelerado del firme que producirían los platooning.

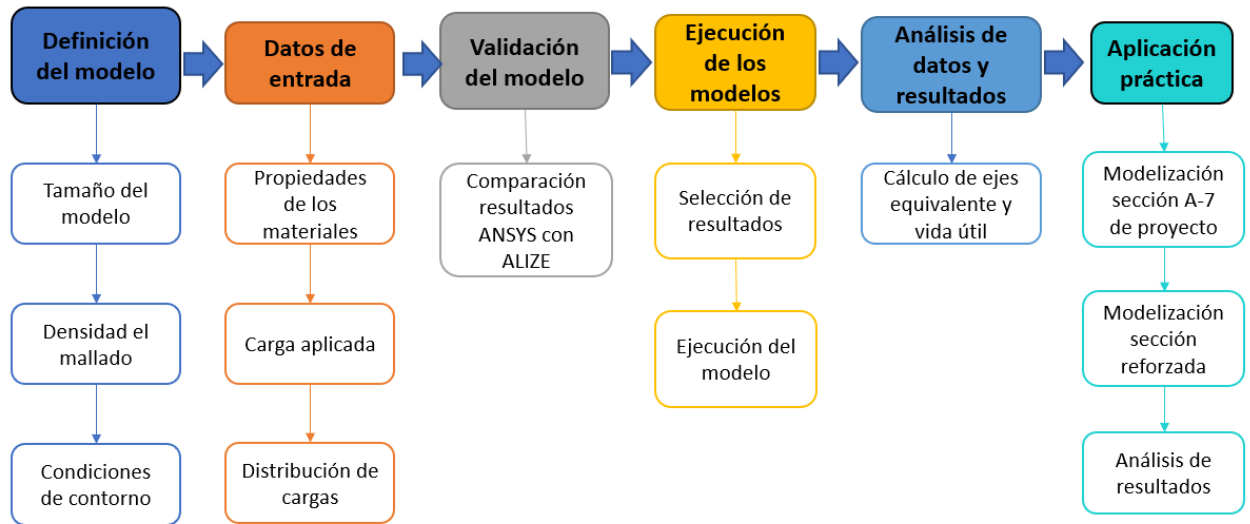


Figura 41: Metodología. Fuente: Elaboración propia



6. Análisis de datos y resultados

6.1 Resultados de las secciones estudiadas

6.1.1 Sección 0031

En la tabla siguiente se recogen los datos obtenidos para la sección 0031, utilizando los distintos modelos de cargas distribuidas (desviación típica igual a 0,2 m, 0,15 m y 0,1 m) y cargas centradas (desviación típica igual a 0 m).

Por ser una sección de firme semiflexible, se ha analizado el número de ejes admisibles (N) para el caso en el que falle la explanada y para el caso en que falle la mezcla bituminosa (MB). Para todos los casos analizados, el menor número de ejes admitidos se corresponde con la condición de fallo de la mezcla bituminosa (marcado en amarillo en la Tabla 14), siendo lo habitual para este tipo de secciones.

Tabla 14: Resultados Sección 0031. Fuente: Elaboración propia.

	Sección 0031 Desv. 0.2	Sección 0031 Desv. 0.15	Sección 0031 Desv. 0.1	Sección 0031 Desv. 0
EXPLANADA				
Def. Vertical	-1,05E-04	-1,07E-04	-1,10E-04	-1,12E-04
N	5,08E+08	4,61E+08	4,21E+08	3,93E+08
Cat. Tráfico	T00	T00	T00	T00
MB				
Def. Radial	4,26E-05	4,39E-05	4,50E-05	4,49E-05
N	1,31E+08	1,17E+08	1,07E+08	1,08E+08
Cat. Tráfico	T00	T00	T00	T00

A continuación, se representan los ejes admitidos de la sección para cada distribución de cargas propuesta y se compara con los valores mínimos exigidos para una categoría de tráfico T00 ($N = 3,48 \cdot 10^7$) (Figura 43). Como puede observarse, el número de ejes admitidos en cualquiera de los supuestos de carga calculados es muy superior al exigido para la categoría de tráfico T00.

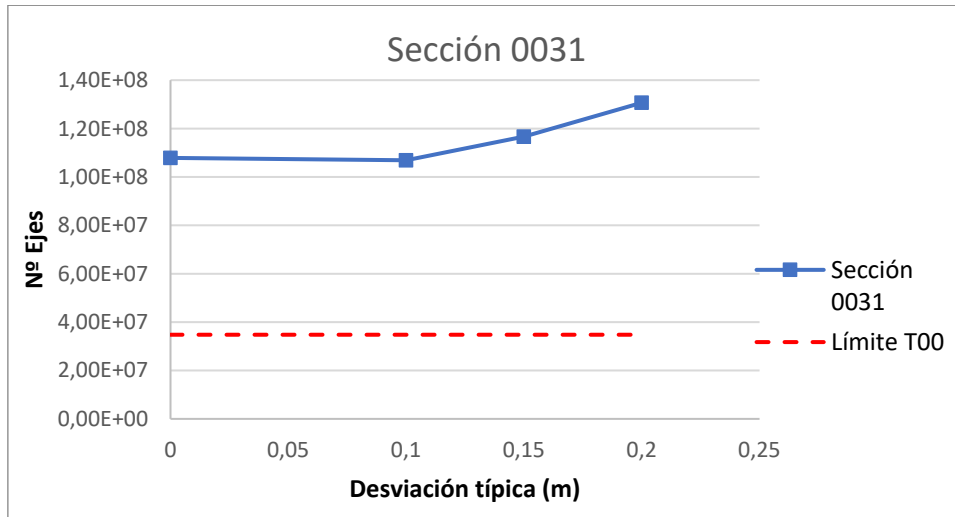


Figura 42: Resultados Sección 0031. Fuente: Elaboración propia.

6.1.2 Sección 0032

En la Tabla 15 se recogen los datos obtenidos para la sección 0032, utilizando los distintos modelos de cargas distribuidas y cargas centradas.

Por ser una sección de firme semirrígida, se ha analizado el número de ejes admisibles (N) para el caso en el que falle la explanada, para el caso en que falle la mezcla bituminosa (MB) y para el caso que falle la capa de materiales tratados en condiciones de semiadherencia. Para todos los casos analizados, el menor número de ejes admitidos se corresponde con la condición de fallo en la explanada (marcado en amarillo en la Tabla 15).

Para una sección semirrígida, lo esperado es que el fallo se dé en la capa de materiales tratados. No obstante, que el fallo se produzca en la explanada puede significar que la sección esté sobredimensionada.

Tabla 15: Resultados Sección 0032. Fuente: Elaboración propia.

	Sección 0032 Desv. 0.2	Sección 0032 Desv.0.15	Sección 0032 Desv.0.1	0032 Cargas Desv. 0
EXPLANADA				
Def. Vertical	-7,69E-05	-7,88E-05	-8,08E-05	-8,21E-05
N	1,76E+09	1,60E+09	1,44E+09	1,35E+09
Cat. Tráfico	T00	T00	T00	T00
MB				
Def. Radial	8,23E-06	8,84E-06	9,32E-06	8,90E-06
N	5,44E+10	4,19E+10	3,46E+10	4,09E+10
Cat. Tráfico	T00	T00	T00	T00
Materiales tratados				
σ unidas	1,88E+05	1,92E+05	1,96E+05	1,99E+05
σ sin adherencia	3,39E+05	3,48E+05	3,57E+05	3,61E+05
σ semiadherencia	2,64E+05	2,70E+05	2,77E+05	2,80E+05
N	2,07E+10	1,55E+10	1,15E+10	1,01E+10
Cat. Tráfico	T00	T00	T00	T00

A continuación, se representan los ejes admitidos de la sección para cada distribución de cargas propuesta y se compara con los valores mínimos exigidos para una categoría de tráfico T00 (Figura 44). Como puede observarse, el número de ejes admitidos en cualquiera de los supuestos de carga calculados es muy superior al mínimo exigido para la categoría de tráfico T00. Visto el tipo de fallo que se produce en esta sección y la cantidad de ejes soportados, podemos concluir que la sección 0032 está sobredimensionada.

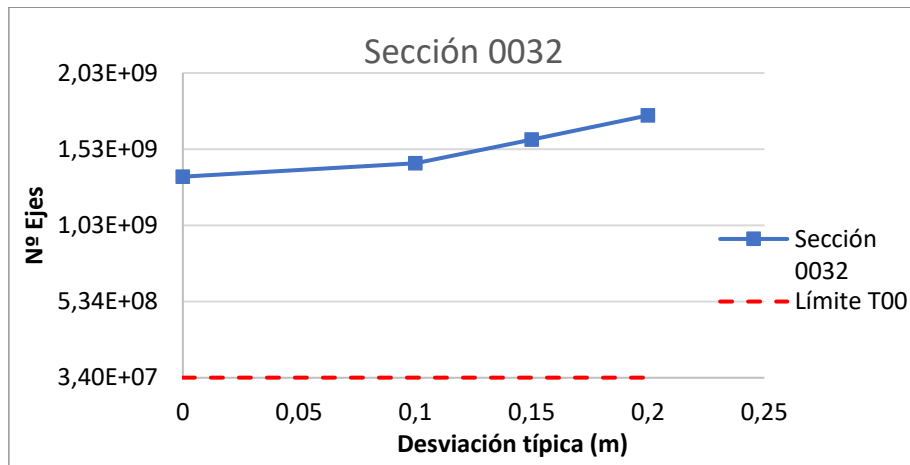


Figura 43: Resultados Sección 0032. Fuente: Elaboración propia.

6.1.3 Sección 031

En la Tabla 16: Resultados Sección 031. Fuente: Elaboración propia. se recogen los datos obtenidos para la sección 031, utilizando los distintos modelos de cargas distribuidas y cargas centradas.

Por ser una sección de firme semiflexible, se ha analizado el número de ejes admisibles (N) para el caso en el que falle la explanada y para el caso en que falle la mezcla bituminosa (MB). Para todos los casos analizados, el menor número de ejes admitidos se corresponde con la condición de fallo de la mezcla bituminosa (marcado en amarillo en la Tabla 16: Resultados Sección 031. Fuente: Elaboración propia.), siendo lo habitual para este tipo de secciones.

Tabla 16: Resultados Sección 031. Fuente: Elaboración propia.

	Sección 031 Desv. 0.2	Sección 031 Desv. 0.15	Sección 031 Desv. 0.1	031 Cargas Centradas. Desv. 0
EXPLANADA				
Def. Vertical	-1,26E-04	-1,23E-04	-1,33E-04	-1,35E-04
N	2,43E+08	2,70E+08	1,98E+08	1,85E+08
Cat. Tráfico	T00	T00	T00	T00
MB				
Def. Radial	5,31E-05	5,47E-05	5,62E-05	5,57E-05
N	5,83E+07	5,22E+07	4,72E+07	4,87E+07
Cat. Tráfico	T00	T00	T00	T00

A continuaci3n, se representan los ejes admitidos de la secci3n para cada distribuci3n de cargas propuesta y se compara con los valores m3nimos exigidos para una categor3a de tr3fico T0 ($N = 1,52 \cdot 10^7$) y T00 ($N = 3,48 \cdot 10^7$) (Figura 45). Como puede observarse, el n3mero de ejes admitidos en cualquiera de los supuestos de carga calculados es muy superior al exigido para la categor3a de tr3fico para la que est3 dise1ada, es decir, para T0. Tambi3n se puede ver que el n3mero de ejes admitidos es superior a los exigidos para una categor3a de tr3fico T00.

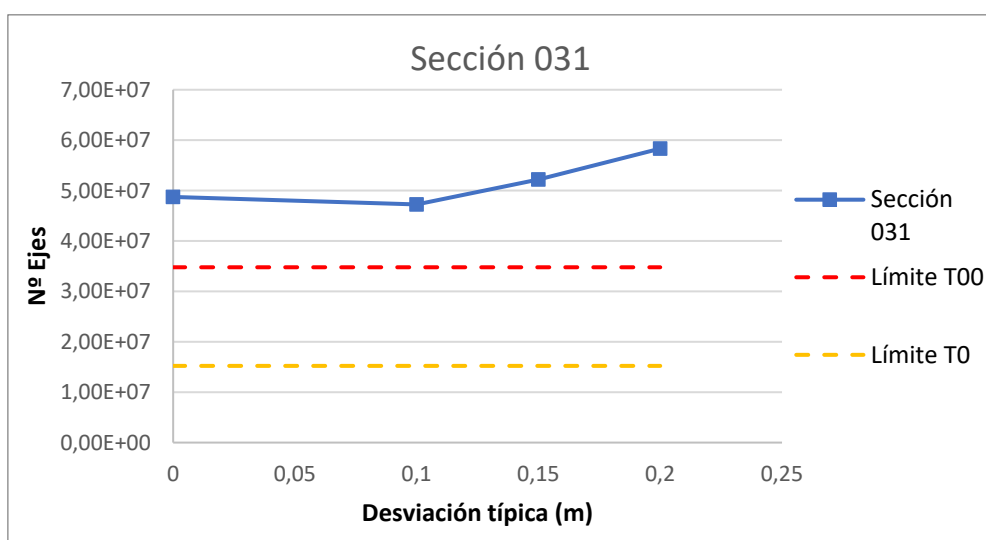


Figura 44: Resultados Secci3n 031. Fuente: Elaboraci3n propia.

6.1.4 Secci3n 032

En la Tabla 17 se recogen los datos obtenidos para la secci3n 032, utilizando los distintos modelos de cargas distribuidas y cargas centradas.

Por ser una secci3n de firme semir3gida, se ha analizado el n3mero de ejes admisibles (N) para el caso en el que falle la explanada, para el caso en que falle la mezcla bituminosa (MB) y para el caso que falle la capa de materiales tratados en condiciones

de semiadherencia. Para todos los casos analizados, el menor número de ejes admitidos se corresponde con la condición de fallo en la capa de materiales tratados (marcado en amarillo en la Tabla 17), siendo lo habitual para este tipo de secciones.

Tabla 17: Resultados Sección 032. Fuente: Elaboración propia.

	Sección 032. Desv. 0.2	Sección 032. Desv. 0.15	Sección 032. Desv. 0.1	031 Cargas Centradas. Desv. 0
EXPLANADA				
Def. Vertical	-1,06E-04	-1,10E-04	-1,13E-04	-1,15E-04
N	4,82E+08	4,25E+08	3,76E+08	3,55E+08
Cat. Tráfico	T00	T00	T00	T00
MB				
Def. Radial	7,76E-06	8,51E-06	9,03E-06	8,48E-06
N	6,77E+10	4,83E+10	3,88E+10	4,89E+10
Cat. Tráfico	T00	T00	T00	T00
Materiales tratados				
σ unidas	2,59E+05	2,66E+05	2,73E+05	2,76E+05
σ sin adherencia	5,05E+05	5,22E+05	5,38E+05	5,43E+05
σ semiadherencia	3,94E+05	3,94E+05	4,06E+05	4,10E+05
N	1,08E+08	6,41E+07	3,83E+07	3,22E+07
Cat. Tráfico	T00	T00	T00	T0

A continuación, se representan los ejes admitidos de la sección para cada distribución de cargas propuesta y se compara con los valores mínimos exigidos para una categoría de tráfico T0 (Figura 46). Como puede observarse, el número de ejes admitidos en cualquiera de los supuestos de carga calculados es muy superior al exigido para la categoría de tráfico T0 y, en algunos casos, incluso superior a los exigido para una categoría de tráfico T00.

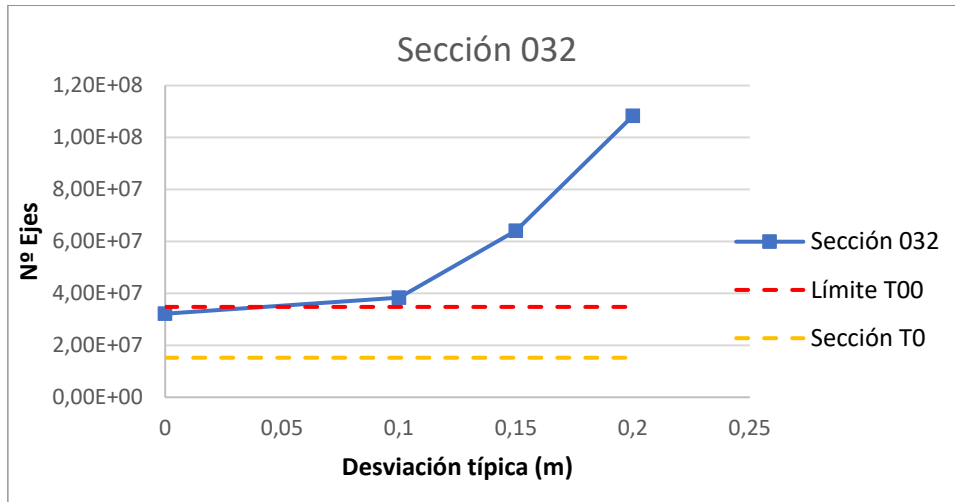


Figura 45: Resultados Sección 032. Fuente: Elaboración propia.

6.2 Anàlisis comparativo

En el epígrafe anterior se ha calculado el número de ejes soportado para cada una de las secciones propuestas y se ha comparado con el límite establecido para cada una de ellas.

Si analizamos las secciones estudiadas por su tipología, podemos ver en la Figura 46 que las mezclas semiflexibles se comportan de forma similar ante la distribución de cargas.

Además, podemos comprobar que ambas secciones soportarían un número de ejes superior al del límite a partir del cual la categoría de tráfico pesado se considera T00.

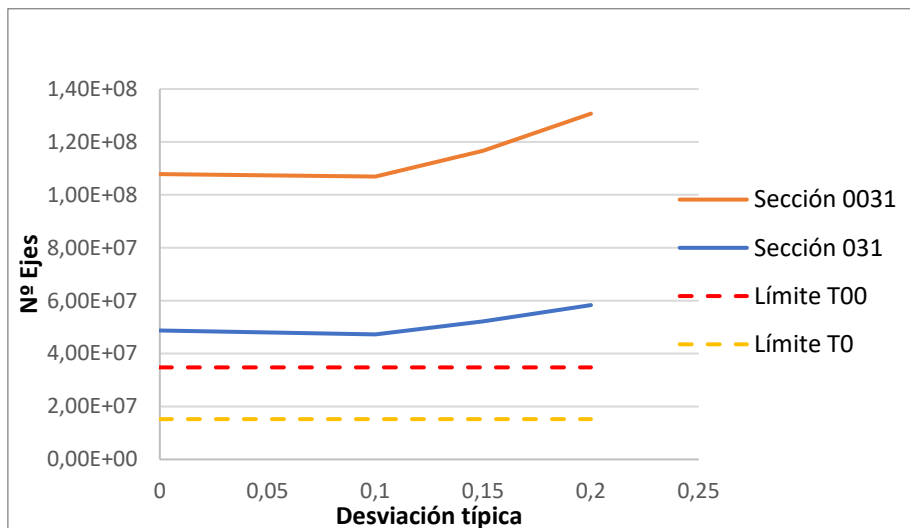


Figura 46: Resultados secciones semi flexibles. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las secciones semirrígidas, podemos ver en la Figura 47, que se comportan de forma diferente ya que la sección 0032 falla por un punto crítico distinto al esperado y distinto al de la sección 032.

También se puede observar que la sección 032, en el caso de cargas centradas, la sección soportaría un número de ejes dentro de la categoría T0 y proximo al inicio de la categoría de tráfico T00, mientras que en el resto de casos con cargas distribuidas, soportaría un tráfico pesado que se correspondería con una categoría T00. En cuanto a la sección

0032, se puede ver que soportaría un número de ejes muy superior al mínimo a partir del cual la categoría de tráfico pasa a ser T00 en todos los supuestos de carga analizados.

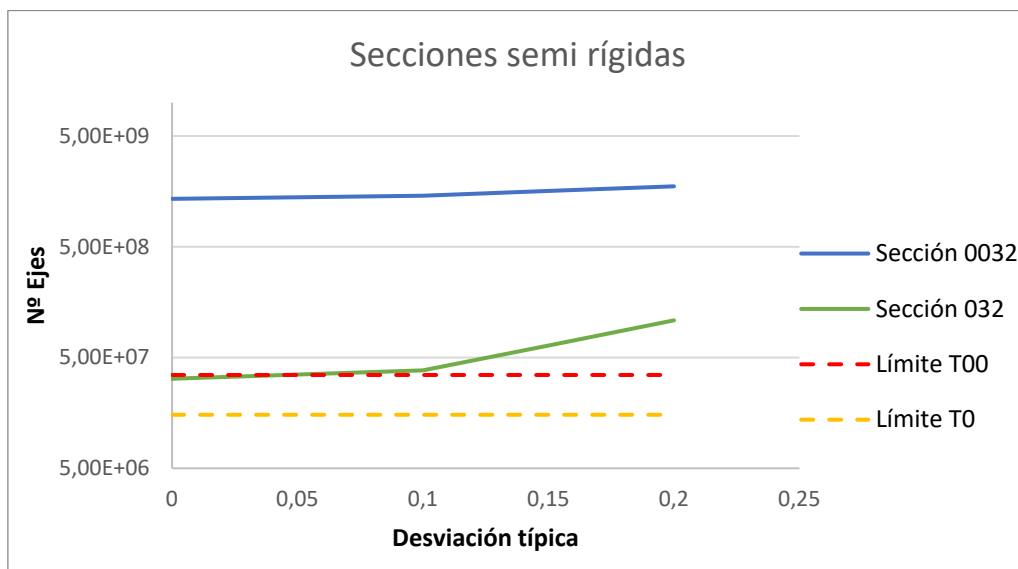


Figura 47: Resultados secciones semi rígidas. Fuente: Elaboración propia.



7. Conclusiones

Tras la realización de este trabajo, mediante la realización de modelos de secciones de firme con el software ANSYS, se ha podido estudiar la influencia de la concentración de cargas por efecto de los vehículos autónomos pesados sobre el agotamiento prematuro de la sección de firme. Con los resultados obtenidos se ha llegado a las siguientes conclusiones.

La metodología descrita para el dimensionamiento de firmes mediante el software de elementos finitos ANSYS ha sido validada mediante la comparación de resultados con ejemplos publicados realizados con el software de cálculo de firmes ALIZE, verificando la **hipótesis H1**. Además, todos los resultados obtenidos con ANSYS para las secciones analizadas con las distintas distribuciones de cargas han sido consistentes con el fenómeno estudiado.

Con los resultados obtenidos se ha podido comprobar que cuanto más distribuidas se encuentran las cargas a lo largo de la sección transversal de la carretera (mayor desviación típica de la trazada de los conductores), menores son los esfuerzos a los que se somete el firme y, consecuentemente, mayor es la vida útil del paquete de firmes. Así pues, se ha podido confirmar la **hipótesis H2**, al comprobarse que la concentración de cargas producidas por los vehículos pesados circulando en platooning acortará la vida útil de las carreteras.

Para el cálculo de la vida útil de los firmes, se han analizado los puntos críticos de cada sección. Para las secciones semiflexibles 0031 y 031 el punto de la sección que admite menor número de cargas de tráfico pesado es la fibra inferior de la capa bituminosa inferior, confirmándose la **hipótesis H3**.

Por otro lado, en cuanto a los firmes semirrígidos, la **hipótesis H4** se ha verificado únicamente para la sección 032, al identificarse el fallo de la sección por tensión radial de tracción en la fibra inferior de los materiales tratados con cemento. Por el contrario, para la sección 0032 no se cumple dicha hipótesis, donde se ha identificado que el fallo de la sección se producía en la explanada, asociado a secciones de firme semirrígido sobredimensionadas.

En cuanto a las secciones para categoría de tráfico T0 analizadas, se ha comprobado que la sección semiflexible 031, tanto con cargas centradas como distribuidas, supera el umbral establecido para la categoría de tráfico pesado T0 y se encontraría por encima del número de ejes que define la categoría de tráfico T00. La sección semirrígida 032, para el supuesto de cargas centradas, estaría dentro de los límites establecidos para una categoría de tráfico T0 mientras que en los casos de cargas distribuidas analizadas que simulan la conducción manual la sección estaría por encima de umbral mínimo que define la categoría T00.

Para las secciones de categoría de tráfico T00 analizadas, se ha comprobado que tanto la sección semiflexible 0031 como la semirrígida 0032 superan el valor de ejes mínimo que define una categoría de tráfico T00. Así pues, todas las secciones estudiadas superan la vida útil establecida para su categoría de tráfico, confirmándose la **hipótesis H5**. Esta categoría al ser la más alta, no contiene un límite superior, por lo que estarían más o menos sobredimensionadas en función del tráfico pesado de proyecto.

Cabe destacar que la **hipótesis H6** será contrastada a partir del desarrollo de la ampliación práctica que se presenta en el siguiente epígrafe del trabajo.

Como futuras líneas de estudio se propone analizar el efecto de utilizar refuerzos de geotextiles bajo la capa de binder y con distintas geometrías. También, mediante toma de datos, se podría caracterizar la trazada del tráfico pesado sobre el eje transversal para incluir la distribución en los modelos creados.

Por otro lado, se podría realizar un análisis de coste de ciclo de vida de la sección reforzada y comparar los resultados con la sección sin reforzar.

8. Aplicación Práctica

Para la aplicación práctica, se propone estudiar la sección de firme 032, para categoría de tráfico T0, propuesta en el proyecto de Mejoras Funcionales de la autovía A-7 entre los enlaces con la CV-32 y la CV-35. Para ello, se empleará el software ANSYS siguiendo la metodología propuesta durante este trabajo y se estudiará el efecto de utilizar un refuerzo que mejore la respuesta del firme ante el caso de que los vehículos pesados autónomos circulen en platooning, es decir, centrados sobre el carril.

Para ello, se propone la siguiente metodología:

- Modelización de la sección de firmes propuesta en el proyecto “MEJORAS FUNCIONALES Y DE SEGURIDAD VIAL Y MEDIDAS DE INTEGRACIÓN AMBIENTAL DE LA AUTOVÍA A-7. TRAMO: ENLACE CON LA CV-32 – ENLACE CON LA CV-35. P.K. 313 AL P.K. 324. PROVINCIA DE VALENCIA”
- Modelización de la sección con distintas soluciones de refuerzo. Concretamente, se propone el uso de una malla de refuerzo bajo la primera capa de mezcla bituminosa. Se modelizarán 2 secciones con dos tipos distintos de mallas de refuerzo.
- Cálculo de los ejes soportados por cada uno de los modelos, para los distintos casos de cargas: distribuidas con distintas desviaciones típicas y centradas atendiendo a las particularidades del platooning.
- Análisis del efecto de los refuerzos y su capacidad de absorber el aumento de deterioro provocado por el fenómeno de platooning.

8.1 Antecedentes

Para la aplicación práctica se ha utilizado una de las secciones propuestas en el proyecto de “MEJORAS FUNCIONALES Y DE SEGURIDAD VIAL Y MEDIDAS DE INTEGRACIÓN AMBIENTAL DE LA AUTOVÍA A-7. TRAMO: ENLACE CON LA CV-32 – ENLACE CON LA CV-35. P.K. 313 AL P.K. 324. PROVINCIA DE VALENCIA” (Figura 48).



Figura 48: Zona de estudio caso práctico. Fuente: Proyecto Mejoras funcionales A-7.

Esta mejora consiste en la construcción de dos nuevas calzadas laterales (una por sentido) proyectadas en paralelo y en general muy próximas o anexas a cada lado de la autovía A-7 actual. También se actuará en mayor o menor medida en todos los enlaces existentes en el tramo de estudio mediante modificación y mejora de su geometría y ramales.

La longitud total aproximada del tramo de actuación es de 10,61 km en la calzada lateral derecha y de 10,41 km en la calzada lateral izquierda. Las nuevas calzadas serán independientes de las calzadas centrales de la autovía A-7 y en cada caso tendrán dos o más carriles (Figura 49).

Para la construcción de las calzadas laterales será necesario la ampliación de los rellenos y desmontes existentes en el tronco de la autovía A-7, además de la ampliación de las numerosas estructuras actuales.

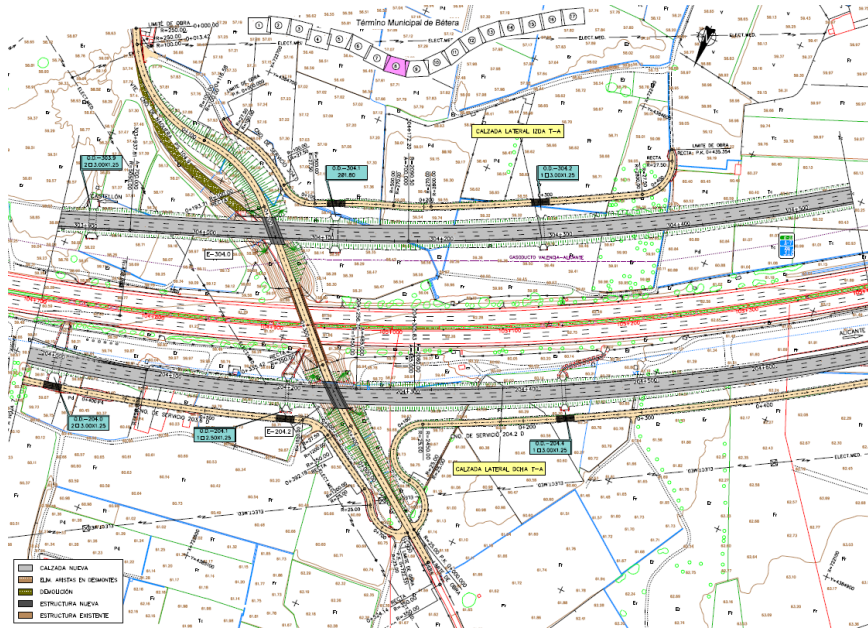


Figura 49: Tramo de actuación en el que se pueden observar las calzadas laterales. Fuente: Proyecto Mejoras funcionales A-7.

8.2 Tráfico

El esquema viario propuesto para la mejora de la seguridad vial dentro de los límites del proyecto en líneas generales es el siguiente:

- Las calzadas de largo recorrido tienen continuidad a lo largo de todo el tramo y conectan por medio de enlaces con la autovía V-30 y la A-3.
- Las calzadas laterales de nueva construcción encauzan el tráfico de medio recorrido manteniendo la conexión en los extremos con el de la A-7 y con todos los enlaces existentes.

Los valores de la intensidad media diaria (IMD) de tráfico obtenidos para el año de puesta en servicio se presentan en la Tabla 17.

Tabla 18: IMD año de puesta en servicio. Fuente: Proyecto Mejoras funcionales A-7.

Tramo	IMD 2021	INDUCCIÓN	IMD 2022
A-7	87.385	91.754	93.406
V-311-2 en Tramo C	55.426	58.197	59.245
CALZADAS DE LARGO RECORRIDO: CV-32 - V-30	42.359	44.477	45.278
A-7 CALZADA DERECHA EXISTENTE: CV-32 - V-30			22.639
A-7 CALZADA IZQUIERDA EXISTENTE: CV-32 - V-30			22.639
CALZADAS DE LARGO RECORRIDO: V-30 - Transfer	39.875	41.869	42.622
A-7 CALZADA DERECHA: V-30 - Transfer			21.311
A-7 CALZADA IZQUIERDA: V-30 - Transfer			21.311
CALZADAS LATERALES: CV-32 - CV-310	45.026	47.277	48.128
CALZADAS LATERALES: CV-310 - CV-35	50.419	52.940	53.893
CALZADAS LATERALES: CV-35 - V-30	54.320	57.036	58.063
CALZADAS LATERALES: V-30 - CV-370	32.847	34.489	35.110
CALZADAS LATERALES: CV-370 - A-3.	28.821	30.262	30.807
Tráfico en cada una de las calzadas laterales			
CV-32 - CV-310	22.512	23.638	24.063
CV-310 - CV-35	25.209	26.469	26.946
CV-35 - V-30	27.160	28.518	29.031
V-30 - CV-370	16.424	17.245	17.556
CV-370 - A-3	14.411	15.132	15.404

La IMD de las calzadas de nueva construcción para el año de puesta en servicio fijado en 2022, la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDP) y la categoría de tráfico son los indicados en la Tabla 18.

Tabla 19: IMD y IMDP de tramos de nueva construcción. Fuente: Proyecto de Mejoras funcionales A-7.

AMPLIACION CALZADA A7	IMD 2022	Ligeros	Pesados	Pesados por carril	Tráfico	Tráfico adoptado
EJE 1 TA	17.671	15.665	2.006		T0	
EJE 2 TA	17.671	15.665	2.006		T0	

ENLACE CV-32 EIX LA GOMBALDA	IMD 2022	Ligeros	Pesados	Pesados por carril	Tráfico	Tráfico adoptado
CALZADA LATERAL DERECHA (1)	17.671	15.612	2.059		T0	T0
CALZADA LATERAL DERECHA (2)	14.121	12.409	1.712		T1	
CALZADA LATERAL DERECHA (3)	18.703	16.544	2.159	1.835	T1	
CALZADA LATERAL DERECHA (4)	18.703	16.937	1.766		T1	
CALZADA LATERAL DERECHA (5)	24.065	21.687	2.378	2.021	T0	
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (1)	17.671	15.789	1.882		T1	
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (2)	16.156	14.444	1.712		T1	
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (3)	20.739	18.373	2.366	2.011	T0	
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (4)	18.703	16.937	1.766		T1	
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (5)	24.065	21.855	2.210	1.878	T1	

RAMAL 1 SEMIENLACE NORTE (Castellón CV-32)	1.516	1.346	170		T31	T2
RAMAL 3 SEMIENLACE SUR (Castellón CV-315)	2.037	1.830	207		T2	
RAMAL 1 SEMIENLACE NORTE (Castellón CV-32 y CV-315)	3.551	3.174	377		T2	
RAMAL 2 SEMIENLACE NORTE (CV-32 Alicante)	4.582	4.322	260		T2	
RAMAL 5 SEMIENLACE NORTE (CV-32 Castelló)	1.516	1.346	170		T31	
RAMAL 6 SEMIENLACE NORTE (Alicante CV-32)	4.582	4.322	260		T2	
RAMAL 4 SEMIENLACE SUR (CV-315 Alicante)	5.362	5.038	324		T2	
RAMAL 7 SEMIENLACE SUR (CV-315 Castellón)	2.037	1.830	207		T2	
RAMAL 8 SEMIENLACE SUR (Alicante CV-315)	5.362	5.038	324		T2	

ENLACE CV-310 GODELLA - BÉTERA - SERRA	IMD 2022	Ligeros	Pesados	Pesados por carril	Tráfico	Tráfico adoptado
CALZADA LATERAL DERECHA (1)	24.065	21.976	2.089	1.776	T1	T0
CALZADA LATERAL DERECHA (2)	21.196	19.340	1.856	1.578	T1	
CALZADA LATERAL DERECHA (3)	26.947	24.337	2.610	2.218	T0	
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (1)	24.065	21.976	2.089	1.776	T1	
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (2)	21.196	19.340	1.856	1.578	T1	
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (3)	26.947	24.337	2.610	2.218	T0	

RAMAL 1 (Castellón - CV-310)	2.869	2.636	233		T2	T2
RAMAL 2 (CV-310 - Alicante)	5.747	5.398	349		T2	
RAMAL 3 (CV-310 Castellón)	2.869	2.636	233		T2	
RAMAL 4 (Alicante - CV-310)	5.747	5.398	349		T2	

ENLACE CV-35 AUTOVIA DE LLIRIA	IMD 2022	Ligeros	Pesados	Pesados por carril	Tráfico	Tráfico adoptado
CALZADA LATERAL DERECHA (0)	26.947	24.337	2.610	2.218	T0	T0
CALZADA LATERAL DERECHA (1, 2 y 3)	9.770	8.936	834		T1	T1
CALZADA LATERAL DERECHA (4)	26.462	24.096	2.366	2.011	T0	T0
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (0)	26.947	24.418	2.529	2.150	T0	T0
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (1, 2 Y 3)	9.770	8.965	805		T1	T1
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (4)	26.462	24.096	2.366	2.011	T0	T0
COLECTORA DERECHA (1)	17.173	15.632	1.541		T1	T1
COLECTORA DERECHA (2) = Movimiento 8	2.619	2.395	224		T2	
COLECTORA DERECHA (3) = Movim 3+Movim 8	16.669	15.495	1.174		T1	
COLECTORA IZQUIERDA (1) = Movim 7 + Movim 4	17.173	15.632	1.541		T1	T1
COLECTORA IZQUIERDA (2) = Movim 4	7.486	6.772	714		T2	
COLECTORA IZQUIERDA (3) = Movim 5 + Movim 6	16.669	15.495	1.174		T1	
MOVIMIENTO 1: Castellón - Liria	6.106	5.523	583		T2	T1
MOVIMIENTO 2: Castellón - Valencia	11.067	10.112	955		T1	
MOVIMIENTO 3: Liria - Alicante	14.050	13.096	954		T1	
MOVIMIENTO 4: Liria - Castellón	6.106	5.523	583		T2	
MOVIMIENTO 5: Alicante - Valencia	2.619	2.395	224		T2	
MOVIMIENTO 6: Alicante - Liria	14.050	13.096	954		T1	
MOVIMIENTO 7: Valencia - Castellón	11.067	10.112	955		T1	
MOVIMIENTO 8: Valencia - Alicante	2.619	2.395	224		T2	

Algunos tramos de las calzadas laterales propuestas tendrán más de 2.000 vehículos pesados/día, y tal como viene recogido en la Tabla 1.A de la Norma 6.1 IC Secciones de Firme, de la Instrucción de Carreteras (2003) (Tabla 19), a estos tramos les corresponde la categoría de tráfico pesado T0.

Tabla 20: Categorías de tráfico pesado. Fuente: Norma 6.1. IC.

TABLA 1.A. CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T00 A T2

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	T00	T0	T1	T2
IMDp (vehículos pesados/día)	≥ 4 000	< 4 000 ≥ 2 000	< 2 000 ≥ 800	< 800 ≥ 200

Al ser T0 la mayor categoría de tráfico del proyecto, las secciones que se definan para esta categoría de tráfico serán el objeto de la aplicación práctica que se desarrollará en el presente capítulo.

8.3 Firmes y Pavimentos

En el proyecto se ha dimensionado el paquete de firme a disponer tanto en el tronco de la autovía como en ramales de enlace y resto de viales proyectados de acuerdo con la Norma 6.1 IC.

Las secciones tipo adoptadas en cada uno de los viales se presentan en la Tabla 20.

Tabla 21: Secciones tipo. Fuente: Proyecto Mejoras Funcionales A-7.

ENLACE CV-32 EIX LA GOMBALDA				
CALZADA LATERAL DERECHA (1)	T0	T0	032	20mb + 25sc
CALZADA LATERAL DERECHA (2)	T0			
CALZADA LATERAL DERECHA (3)	T0			
CALZADA LATERAL DERECHA (4)	T0			
CALZADA LATERAL DERECHA (5)	T0			
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (1)	T0			
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (2)	T0			
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (3)	T0			
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (4)	T0			
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (5)	T0			
RAMAL 1 SEMIENLACE NORTE		T2	232	15mb + 20sc
RAMAL 2 SEMIENLACE NORTE	T2			
RAMAL 5 SEMIENLACE NORTE	T2			
RAMAL 6 SEMIENLACE NORTE	T2			
Vía de enlace NORTE	T2			
RAMAL 3 SEMIENLACE SUR	T2			
RAMAL 4 SEMIENLACE SUR	T2			
RAMAL 7 SEMIENLACE SUR	T2			
RAMAL 8 SEMIENLACE SUR	T2			
Vía de enlace SUR	T2			
ENLACE CV-310 GODELLA - BETERA - SERRA				
CALZADA LATERAL DERECHA (1)	T0	T0	032	20mb + 25sc
CALZADA LATERAL DERECHA (2)	T1			
CALZADA LATERAL DERECHA (3)	T0			
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (1)	T0			
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (2)	T1			
CALZADA LATERAL IZQUIERDA (3)	T0			
RAMAL 1		T2	232	15mb + 20sc
RAMAL 2	T2			
RAMAL 3	T2			
RAMAL 4	T2			
Vía de enlace	T2			

De las secciones propuestas en el proyecto, se ha modelizado la sección 032, correspondiente a la categoría de tráfico T0, por ser la que está destinada a un mayor volumen de vehículos pesados.

Los espesores de las capas de firme y características de estas se resumen en la Tabla 21.

Tabla 22: Características sección de proyecto. Fuente: Elaboración propia.

CALZADAS LATERALES CON TRÁFICO T0	
Sección tipo: 032	20 MB + 25 SC
<i>Calzada lateral y arcén interior < 1,25 m</i>	
Capa de rodadura:	3 cm BBTM 11B PMB 45/80-65
Riego de adherencia:	Emulsión C60BP4 ADH, modificada con polímeros (antigua denominación ECR-2d-m)
Capa intermedia:	7 cm AC22 bin B50/70 S.
Riego de adherencia:	Emulsión C60BP4 ADH (antigua denominación ECR-1d)
Base bituminosa:	10 cm AC32 base B50/70 G.
Riego de adherencia:	Emulsión C60BP4 ADH (antigua denominación ECR-1d)
Riego de curado:	Emulsión C60BP4 CUR (antigua denominación ECR-1)
Base tratada con cemento:	25 cm de suelo-cemento tipo SC-40

La Figura 49 presenta el esquema de la sección propuesta en el proyecto.

SECCIONES CALZADA LATERAL T0

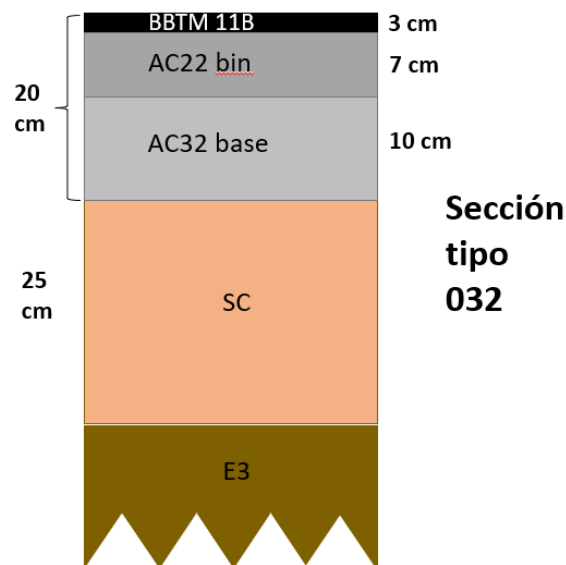


Figura 50: Esquema de sección de firme tipo 032 propuesta en el proyecto. Fuente: Elaboración propia.

8.4 Sección reforzada

Para la sección reforzada se va a modelizar la sección tipo 032 propuesta en el proyecto añadiendo una malla de refuerzo. Se modelizará la sección colocando esta malla bajo la capa de rodadura.

Para el refuerzo de un firme sobre el que vayan a circular vehículos pesados autónomos y, por tanto, las cargas pasen de estar distribuidas sobre la calzada a concentradas, la función que más nos interesa de los geotextiles es la de refuerzo.

Por ello, se han utilizado los datos de mallas de refuerzo de fibra de carbono y de fibra de vidrio, al ser estas las que tienen menos deformación y mayor módulo de elasticidad (López-Bachiller et al., 2018).



Figura 51: Malla de refuerzo. Fuente López-Bachiller, M. et al (2018).

Los módulos de elasticidad utilizados en los modelos creados son los que se presentan en la Tabla 22.

Tabla 23: Propiedades mallas de refuerzo. Fuente: López-Bachiller et al. (2018)

Tipo de fibra	Módulo – E (N/mm ²)	Extensión de rotura	Reciclabilidad de la fibra (no absorción de esfuerzo cortante)	Notas
Carbono (C-fibra)	240,000	1.7 %	Si	Apropiada para refuerzo de firmes
Vidrio (G-fibra)	65,000	3.5%	Sí	Apropiada para refuerzo de firmes
Poliéster (PES-fibra)	15,000	12.0%	No	No apropiada para refuerzo de firmes
Polipropileno (PP-fibra)	12,000	15.0%	Sí	Apropiada como SAMI no tejido
Acero (comparación)	210,000	~ 0.5%	No	No muy apropiada para refuerzo

Se modelizará la sección de refuerzo, colocando una malla de refuerzo de anchura 1 m y espesor 6 mm sobre el centro de cada semi eje pesado (Figura 51 y 52)

SECCIONE REFUERZO GEO

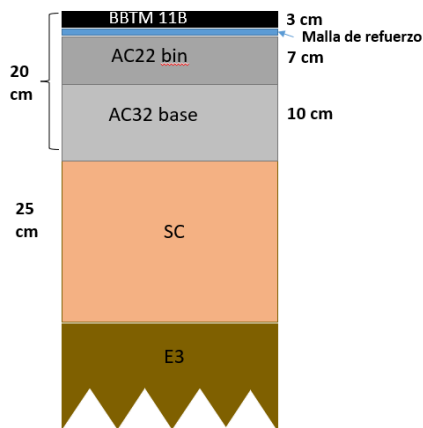


Figura 52: Esquema de sección de refuerzo GEO. Fuente: Elaboración propia.

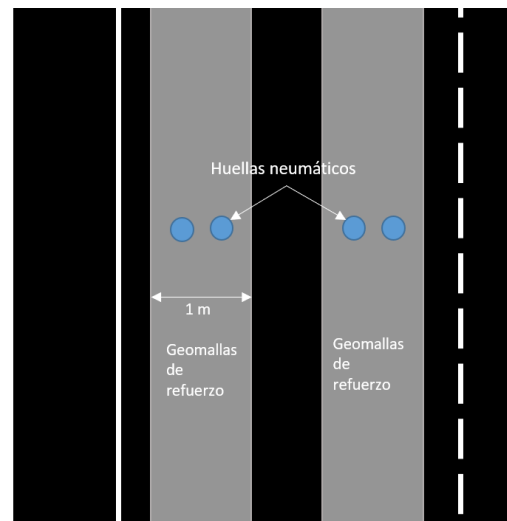


Figura 53: Esquema de posición en planta de Geomalla de Refuerzo. Fuente: Elaboración propia.

8.5 Dimensionamiento analítico del firme

Para el modelizado y cálculo de la sección de firme propuesto en el proyecto y de las secciones de firme reforzadas, se procederá de la forma descrita en el Capítulo 5:

- Definición del modelo
 - Tamaño del modelo
 - Densidad del mallado
 - Condiciones de contorno
- Datos de entrada
 - Propiedades de los materiales
 - Carga aplicada
 - Distribución de cargas
- Ejecución del modelo
 - Selección de los resultados necesarios
 - Ejecución del modelo
- Análisis de datos y resultados

8.6 Definición del modelo

Para el caso práctico se ha utilizado el tamaño de modelo y densidad de mallado utilizado durante la realización de este trabajo, es decir, un tamaño de 4x4x4 m para el modelo y una densidad de mallado de nivel 4 (Figura 53 y 54).

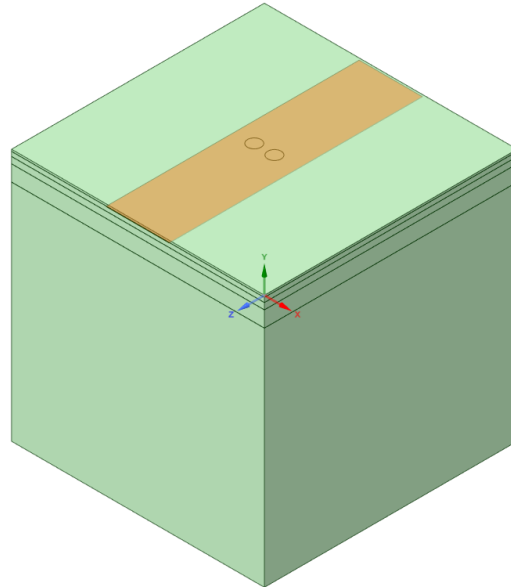


Figura 54: Modelo de Sección Reforzada con Geomalla. Fuente: Elaboración propia.

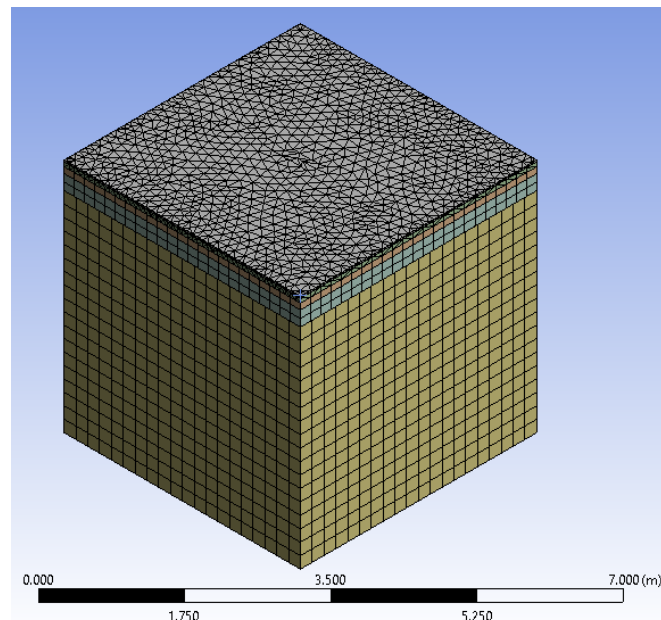


Figura 55: Mallado de las secciones de la Aplicación Práctica. Fuente: Elaboración propia.

8.7 Datos de entrada

Las propiedades utilizadas, en cuanto a Módulo de Young y Coeficiente de Poisson, para los materiales bituminosos, suelo cemento (SC40) y zahorra artificial (ZA), son los propuestos por la Norma de Secciones de firmes de la Comunidad Valenciana (2009). En cuanto a los parámetros utilizados para las geomallas de refuerzo, se han adoptado los parámetros publicados por López-Bachiller et al. (2018).

La Tabla 23 presenta un resumen de los datos de entrada del modelo.

Tabla 24: Propiedades de los materiales empleados en la aplicación práctica. Fuente: Elaboración propia.

Materiales	Módulo de Young (Mpa)	Coeficiente de Poisson
BBTM 11B	3000	0,35
AC22 Bin S	7000	0,33
AC32 Base G	5000	0,33
SC40	6000	0,25
ZA	526,6	0,35
Geomalla carbono (GEO 1)	240000	0,3
Geomalla vidrio (GEO 2)	65000	0,3

8.8 Resultados

En la Tabla 24 se recogen los datos obtenidos para la sección propuesta en el proyecto, con las distintas distribuciones de cargas y refuerzos. Concretamente, en las dos últimas columnas se muestran los resultados para las secciones reforzadas con la geomalla de fibra de carbono (GEO 1) y la geomalla de fibra de vidrio (GEO 2), considerando una distribución de cargas centradas.

Por ser una sección de firme semirrígido, se ha analizado el número de ejes admisibles (N) para el caso en el que falle la explanada, para el caso en que falle la mezcla bituminosa (MB) y para el caso que falle la capa de materiales tratados en condiciones de semiadherencia. Para todos los casos analizados, el menor número de ejes admitidos se corresponde con la condición de fallo en la capa de materiales tratados (marcado en amarillo en la tabla), siendo lo esperado para este tipo de secciones.

Tabla 25: Resultados aplicación práctica. Fuente: Elaboración propia.

	Sección 032 Desv. 0.2	Sección 032 Desv. 0.15	Sección 032 Desv. 0.1	Sección 032 Desv. 0	Sección 032 Desv. 0 GEO 1	Sección 032 Desv. 0 GEO 2
EXPLANADA						
Def. Vertical	-1,06E-04	-1,10E-04	-1,13E-04	-1,15E-04	-1,04E-04	-1,10E-04
N	4,82E+08	4,25E+08	3,76E+08	3,55E+08	5,20E+08	4,22E+08
Cat. Tráfico	T00	T00	T00	T00	T00	T00
MB						
Def. Radial	7,76E-06	8,51E-06	9,03E-06	8,48E-06	9,95E-06	8,49E-06
N	6,77E+10	4,83E+10	3,88E+10	4,89E+10	2,72E+10	4,87E+10
Cat. Tráfico	T00	T00	T00	T00	T00	T00
Materiales tratados						
σ unidas	2,59E+05	2,66E+05	2,73E+05	2,76E+05	2,58E+05	2,67E+05
σ sin adherencia	5,05E+05	5,22E+05	5,38E+05	5,43E+05	5,30E+05	5,31E+05
σ semiadherencia	3,94E+05	3,94E+05	4,06E+05	4,10E+05	3,94E+05	3,99E+05
N	1,08E+08	6,41E+07	3,83E+07	3,22E+07	6,52E+07	5,25E+07
Cat. Tráfico	T00	T00	T00	T0	T00	T00

La Figura 55 presenta los ejes admitidos de la sección propuesta en el proyecto, para cada distribución estudiada y se compara con los resultados obtenidos para las

secciones reforzadas con geomalla de fibra de carbono (GEO 1) y geomalla de fibra de vidrio (GEO 2). Como puede observarse en las secciones reforzadas con geomalla, mejora el comportamiento del firme, aumentando considerablemente el número de ejes soportados.

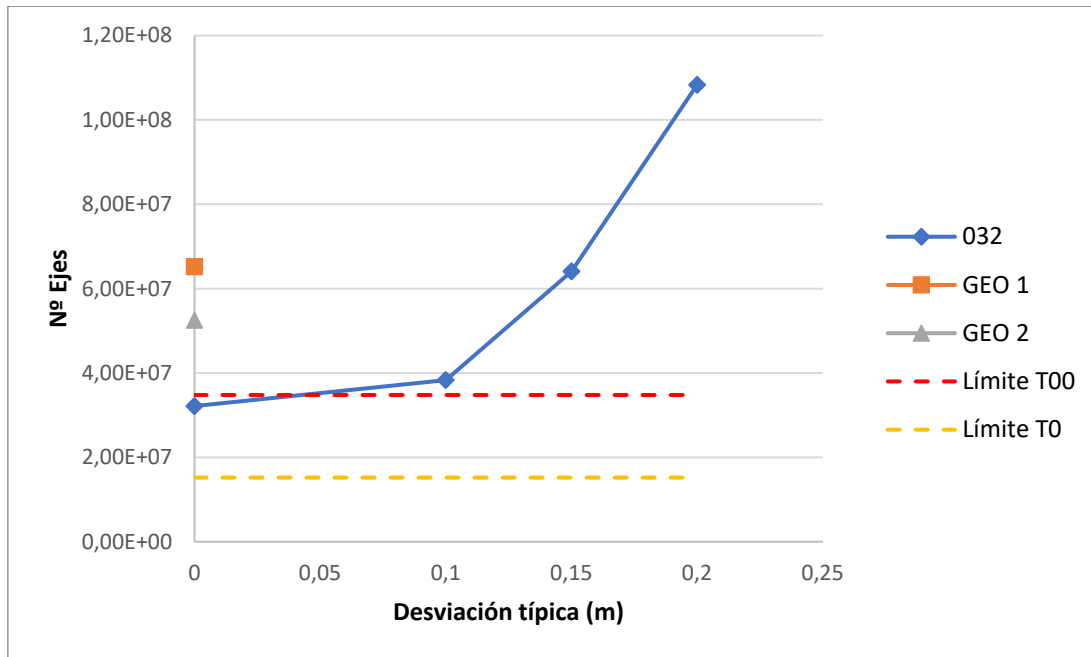


Figura 56: Resultados aplicación práctica. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 25 muestra cómo utilizando como refuerzo la geomalla de fibra de carbono (GEO 1), en el supuesto de que todas las cargas estén centradas por el fenómeno de platooning (Desv. Típica = 0), la cantidad de ejes soportados (N) es muy similar a los que se obtiene en la sección 032 sin reforzar aplicando una distribución de cargas con una desviación típica de 0,15 m. Por otro lado, en el supuesto de cargas centradas, la sección reforzada con geomalla de fibra de carbono (GEO 1) resistiría aproximadamente el doble de ejes equivalentes que la sección 032 sin reforzar. Por otra parte, la sección reforzada con geomalla de fibra de vidrio (GEO 2) es capaz de incrementar la vida útil del firme en un 63% con respecto a la sección 032 sin reforzar, para el supuesto en que todos los vehículos pesados circularan centrados.

Tabla 26: Resumen de resultados aplicación práctica. Fuente: Elaboración propia.

Sección	Desv. Típica	N	%
032	0,2	1,08E+08	337%
032	0,15	6,41E+07	199%
032	0,1	3,83E+07	119%
032	0	3,22E+07	100%
032 Refuerzo GEO 1	0	6,52E+07	203%
032 Refuerzo GEO 2	0	5,25E+07	163%

Así pues, resultaría efectivo el refuerzo localizado con geotextiles, en aquellas zonas en las que se fuesen a concentrar las cargas por el efecto de los platooning.

8.9 Beneficios del refuerzo de firme con geomalla

Tras analizar los resultados obtenidos tras la realización de la aplicación práctica, se ha podido observar que los refuerzos con geomalla propuestos en la sección objeto de estudio han aportado mayor resistencia y vida útil a la sección reforzada. Además, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- La sección 032 reforzada con malla de refuerzo de fibra de vidrio mejora un 63% frente a la sección 032 sin reforzar, en el caso de que las cargas estén centradas por efecto de los vehículos autónomos pesados.
- La sección 032 reforzada con malla de refuerzo de fibra de carbono mejora un 103% frente a la sección 032 sin reforzar, en el caso de que las cargas estén centradas por efecto de los vehículos autónomos pesados.
- Resultaría efectivo reforzar los pavimentos mediante el empleo de geotextiles, utilizando estos de forma localizada, solo en aquellas zonas en las que se van a producir las concentraciones de cargas producidas por los platooning

9. Conclusión

El presente Trabajo Fin de Master se puede dividir en cuatro partes. La primera correspondiente a la revisión del estado del arte, en la que se ha recopilado y analizado información de distintas fuentes bibliográficas, relacionadas con los platooning y su efecto sobre las carreteras, el dimensionamiento de firmes analítico empleando modelos de elementos finitos y los refuerzos de firmes empleando geotextiles. En la segunda parte se han definido los objetivos e hipótesis, se ha presentado la metodología seguida y el desarrollo del trabajo en sus distintas fases. En estos capítulos se expone el alcance del trabajo y se establecen los fundamentos para el posterior análisis. En la tercera parte se presenta el análisis de los resultados obtenidos y las conclusiones a las que se ha llegado tras la realización del trabajo. Por último, en la cuarta parte, siguiendo la metodología desarrollada, se ha realizado una aplicación práctica en la que, sobre un caso real de estudio, se ha propuesto una mejora para solucionar el problema estudiado a lo largo del trabajo.

Con este capítulo finaliza el presente trabajo dedicado al análisis de la deformación y deterioros en pavimentos de carreteras debido al tráfico de vehículos pesados autónomos mediante modelos de elementos finitos, enmarcado como Trabajo Fin de Máster del alumno Carlos Alonso Troyano.

Valencia, a 02 de septiembre de 2022,

Carlos Alonso Troyano



10. Bibliografía

- ALAM, A. 2014. Fuel Efficient Heavy-Duty Vehicle Platooning. Doctoral Thesis in Automatic Control presented at KTH, Stockholm.
- ALAM, A., BESSELINK, B., TURRI, V., MARTENSSON, J., JOHANSSON, K.H., 2015. Heavy-duty vehicle platooning for sustainable freight transportation: A cooperative method to enhance safety and efficiency. *IEEE Control Systems*, 35, 34-56
- BARDESI, A. 2012. Curso sobre los pavimentos de carreteras y sus materiales. Asociación Técnica de Carreteras.
- BURMISTER, D.M., 1945. The General Theory of Stresses dan Displacements in Layered Soil Systems, *Journal of Applied Physics*, vol. 16.
- BURMISTER, D.M., 1954. The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Application to the Design of Airport Runways, *Proceedings HRM*.
- CHEN, D., AHN, S., CHITTURI, M., NOYCE, D. 2017. Truck Platooning on Uphill Grades under Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC). *Transportation Reserch Procedia*, 23, pp. 1059-1078.
- CHEN, F., SONG, M., & MA, X., 2020. A lateral control scheme of autonomous vehicles considering pavement sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120669.
- FAGNANT, D.J., KOCKELMAN, K., 2015. Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations. *Transp. Res. A* 77, 167–181
- GUNGOR, O.E., AL-QADI, I.L., 2022. Wander 2D: a flexible pavement design framework for autonomous and connected trucks. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol 23, pp 121-136
- GUNGOR, O.E., AL-QADI, I.L., 2020. All for one: Centralized optimization of truck platoons to improve roadway infrastructure sustainability. *Tansportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol 114, pp 84-98.

- Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía, 2007. Consejería de Obras Públicas y Transportes.
- JANSSEN, R., ZWIJNENBERG, H., BLANKERS, I., DE KRUIJFF, J., 2015. Truck platooning: Driving the future of transportation. Tech. rep., TNO.
- KRAEMER, C., PARDILLO, J.M., ROCCI, S., ROMANA M.G., SÁNCHEZ V.S., DEL VAL M.A., 2004. Ingeniería de carreteras. Volumen II. Madrid: Mc Graw Hill.
- LEE, J. W. 2012. Model Based Predictive Control for Automated Lane Centering/ changing Control Systems. U.S. Patent No. 8,190,330. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- LÓPEZ-BACHILLER, M, FARAMIN, A. DOURADO, F., 2018. Refuerzo con mallas impregnadas de betún para pavimentos deteriorados. 24 Symposium Nacional de Vías y Obras de la Administración Local. Valencia.
- Norma de secciones de firme de la Comunitat Valenciana, 2009. Conselleria d'Infraestructures i Transport.
- Orden FOM 2525, 2014. Pliego de prescripciones técnicas generales par obras de carreteras y puentes, relativos a materiales básicos, a firmes y pavimentos, y a señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos.
- Orden FOM 3460, 2003. Norma 6.1 -IC Secciones de firme, de la Instrucción de Carreteras.
- PASTOR-SERRANO, D Y GARCÍA, A., 2021. Mitigación del impacto de la implementación del 'Platooning' de camiones en las visibilidades disponibles en autopistas. XIV Congreso de Ingeniería del Transporte. Universidad de Burgos. págs. 3031-3044
- PERRATON, D., DI BENEDETTO, H., SAUZ GRENFELL, J., 2011. Rutting of bituminous mixtures: wheel tracking tests campaign analysis. Mater. Struct. 44 (5), 969-986
- ROBINSON, T., CHAN, E. Y COELINGH, E., 2010. Operating Platoons On Public Motorways: An Introduction To The SARTRE Platooning Programme. En. 17th World Congress on Intelligent Transport Systems, p. 11.

VAHIDI, A., SCIARRETTA, A., 2018. Energy saving potentials of connected and automated vehicles. *Transp. Res. C* 95, 822–843

WU, G., CHEN, F., PAN, X., XU, M., ZHU, X., 2019. Using the visual intervention influence of pavement markings for rutting mitigation part I: preliminary experiments and field tests. *Int. J. Pavement Eng.* 20 (6), 734e746.

11. Anexos

11.1 Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Relación del TFM “Análisis de la deformación y deterioros en pavimentos de carreteras debido al tráfico de vehículos pesados autónomos mediante modelos de elementos finitos. Aplicación práctica a la ampliación de la A-7, Circunvalación de Valencia (Provincia de Valencia)” con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				•
ODS 2. Hambre cero.				•
ODS 3. Salud y bienestar.		•		
ODS 4. Educación de calidad.				•
ODS 5. Igualdad de género.				•
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				•
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.			•	
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.				•
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.	•			
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				•
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.			•	
ODS 12. Producción y consumo responsables.		•		
ODS 13. Acción por el clima.			•	
ODS 14. Vida submarina.				•
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.				•
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				•
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.				•

Descripción de la alineación del TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.

Este objetivo busca desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles y de calidad, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano. Dentro de este contexto, en el presente TFM se analizaron los deterioros que provocaría el platooning en los firmes de carreteras y se estudia una propuesta de mejora para contrarrestar estos deterioros.

ODS.3 Salud y bienestar.

El objetivo 3 tiene como meta en el punto 3.6, reducir a la mitad el número de muertes y lesiones causadas por accidentes de tráfico. Una de las principales aportaciones de los vehículos autónomos será la reducción de accidentes de tráfico. Estos vehículos necesitan que las infraestructuras reúnan ciertas características. En este TFM se analiza la interacción de estos vehículos sobre el pavimento.

ODS 12. Producción y consumo responsables.

El enfoque principal de este ODS es hacer más y mejor con menos, entre otras cosas, aumentando la eficiencia de recursos. Las mejoras propuestas para contrarrestar los deterioros producidos de los platooning están en línea con este objetivo, aumentando la vida útil de las secciones de firme.



11.2 Resultados ANSYS sección 0031

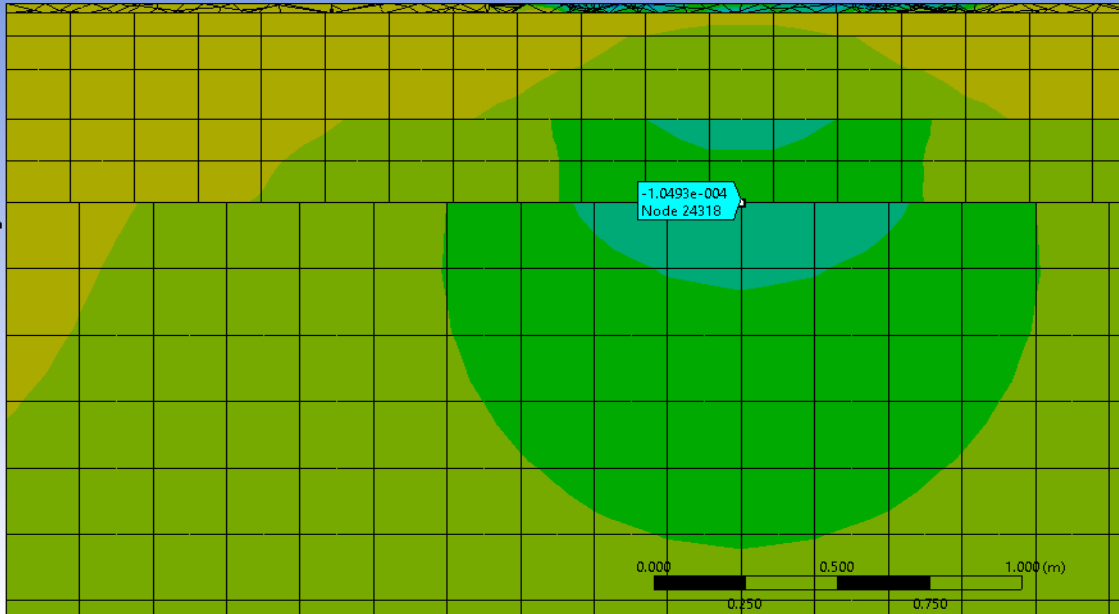
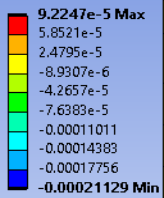
SECCIÓN 0031 D=0,2

PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

EV=	-1,05E-04	N	5,08E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

T: 0031 D0.2
 Normal Elastic Strain 2
 Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 14:01

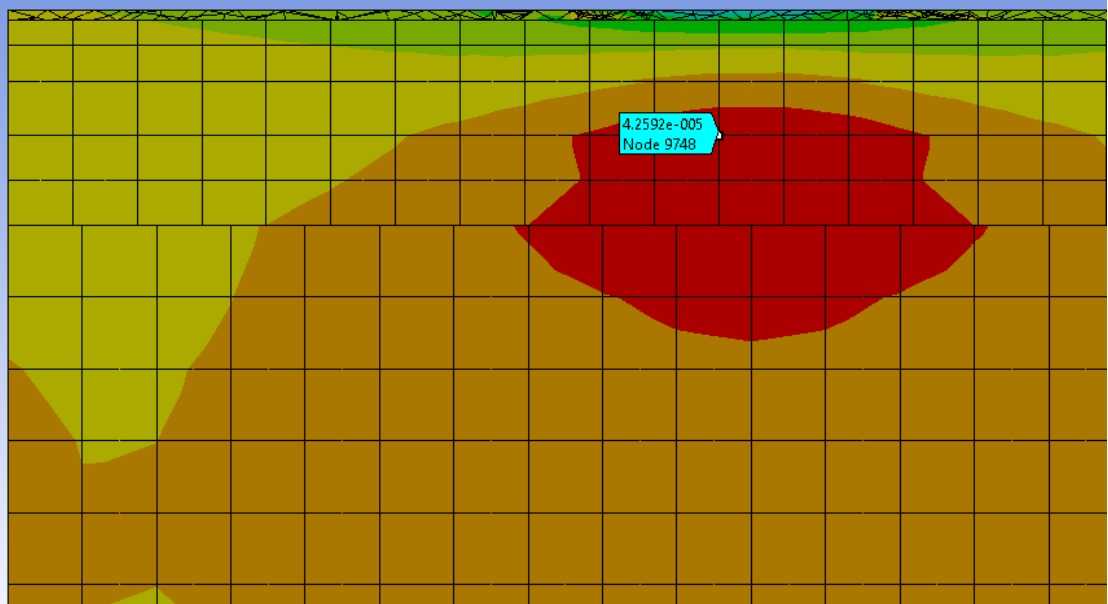
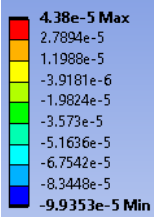


PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

ER=	4,26E-05	N	1,31E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	----------	---	----------	-----------------------------	-----

T: 0031 D0.2
 Normal Elastic Strain
 Type: Normal Elastic Strain(Z Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 14:00



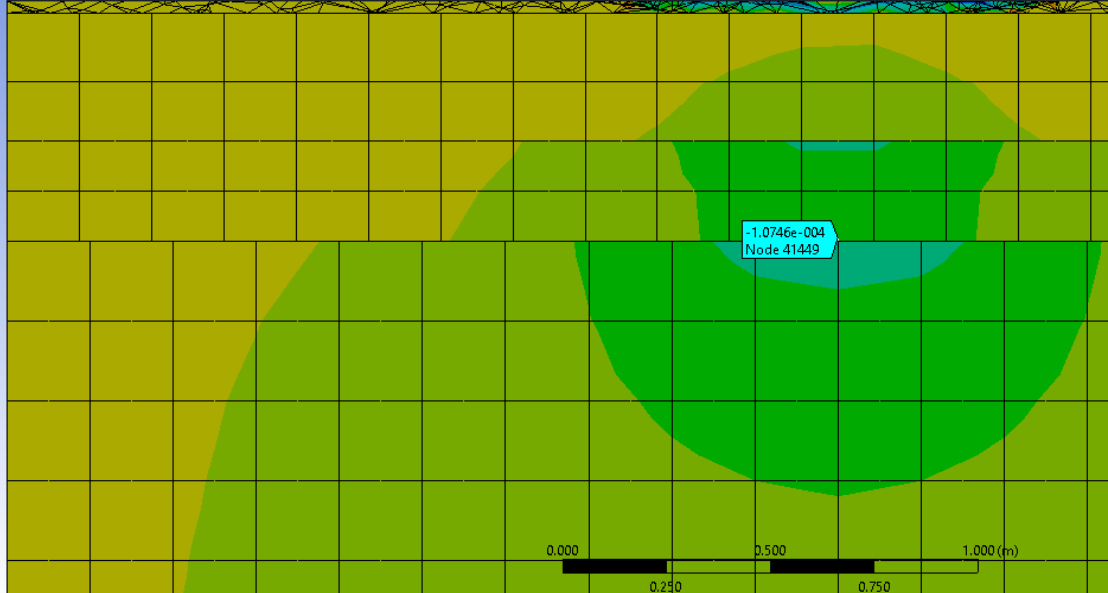
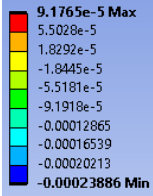
SECCIÓN 0031 D=0,15

PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

EV=	-1,07E-04	N	4,61E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

U: 0031 D0.15
 Normal Elastic Strain 2
 Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 14:05

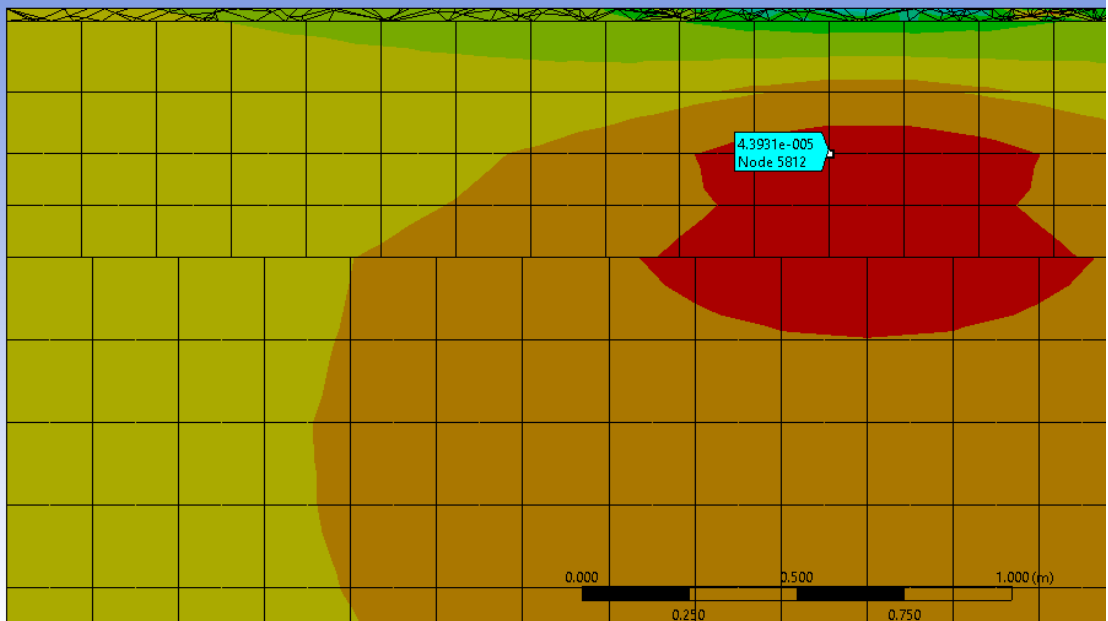
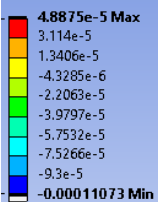


PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

EV=	-1,07E-04	N	4,61E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

U: 0031 D0.15
 Normal Elastic Strain
 Type: Normal Elastic Strain(Z Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 14:04



SECCIÓN 0031 D=0,1

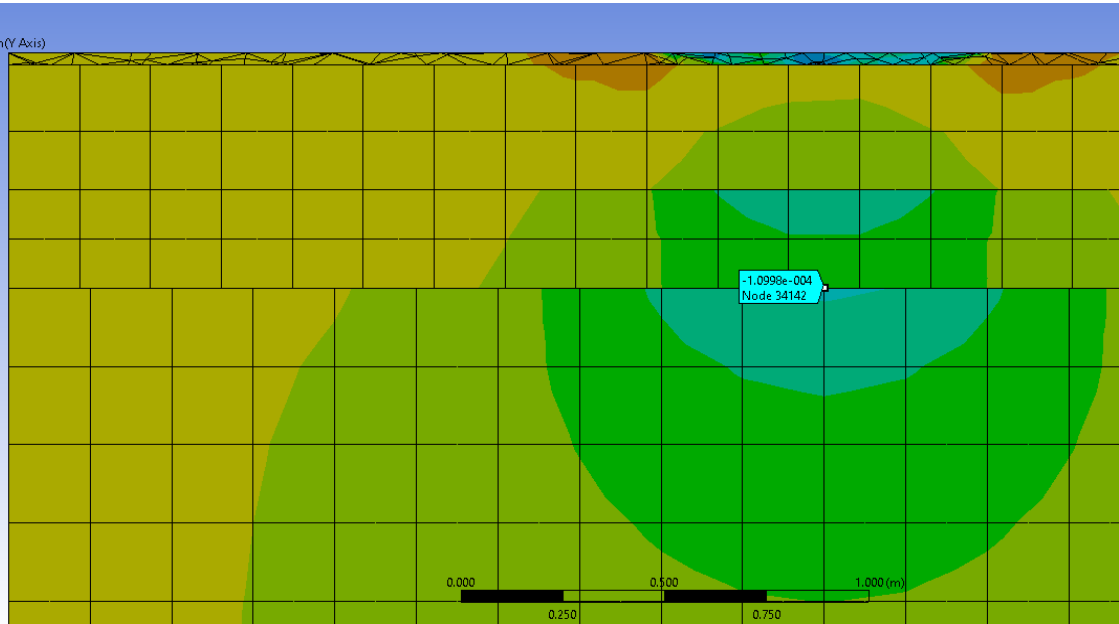
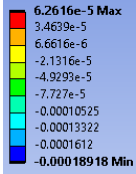
PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

EV=	-1,10E-04	N	4,21E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

V: 0031 D0.1

Normal Elastic Strain 2
Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)
Unit: m/m
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 14:07



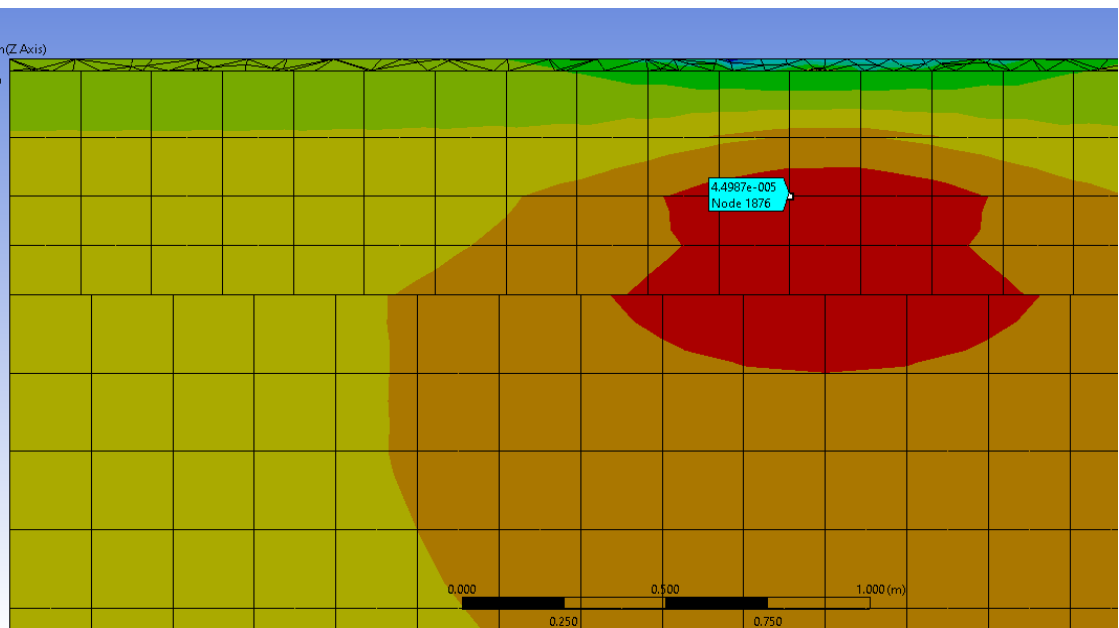
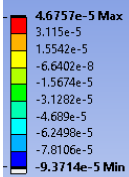
PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

ER=	4,50E-05	N	1,07E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	----------	---	----------	-----------------------------	-----

V: 0031 D0.1

Normal Elastic Strain
Type: Normal Elastic Strain(Z Axis)
Unit: m/m
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 14:07



SECCIÓN 0031 D=0

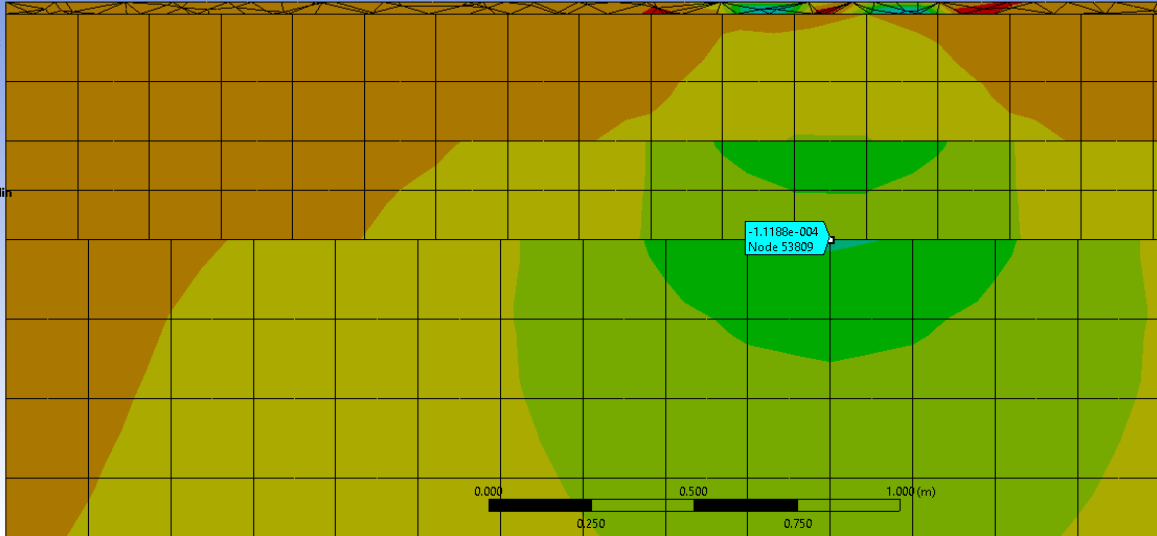
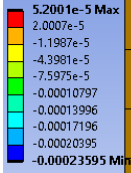
PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

EV=	-1,12E-04	N	3,93E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

W: 0031 C

Normal Elastic Strain 2
 Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 14:10



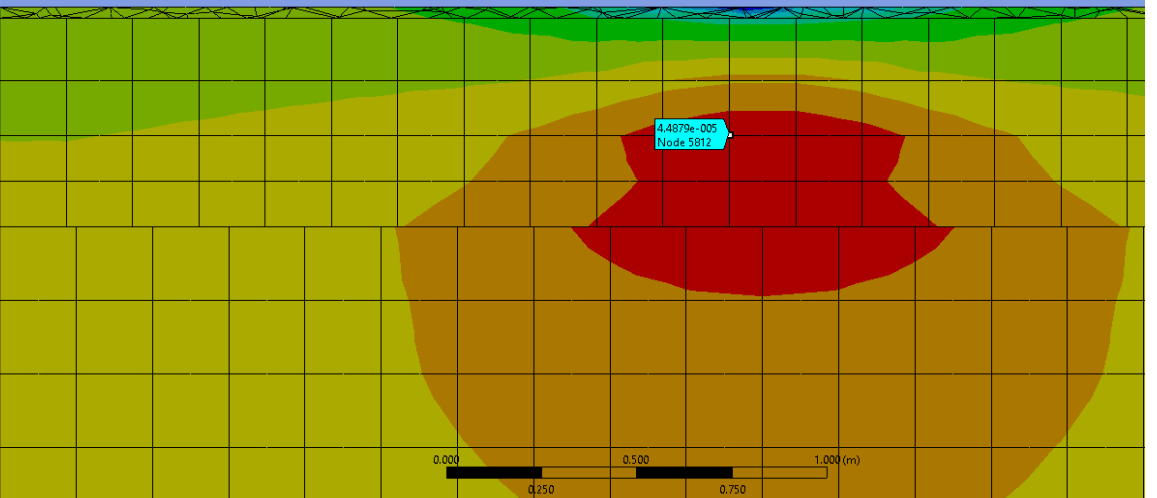
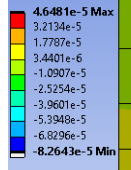
PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

ER=	4,49E-05	N	1,08E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	----------	---	----------	-----------------------------	-----

W: 0031 C

Normal Elastic Strain
 Type: Normal Elastic Strain(Z Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 14:09





11.3 Resultados ANSYS sección 0032

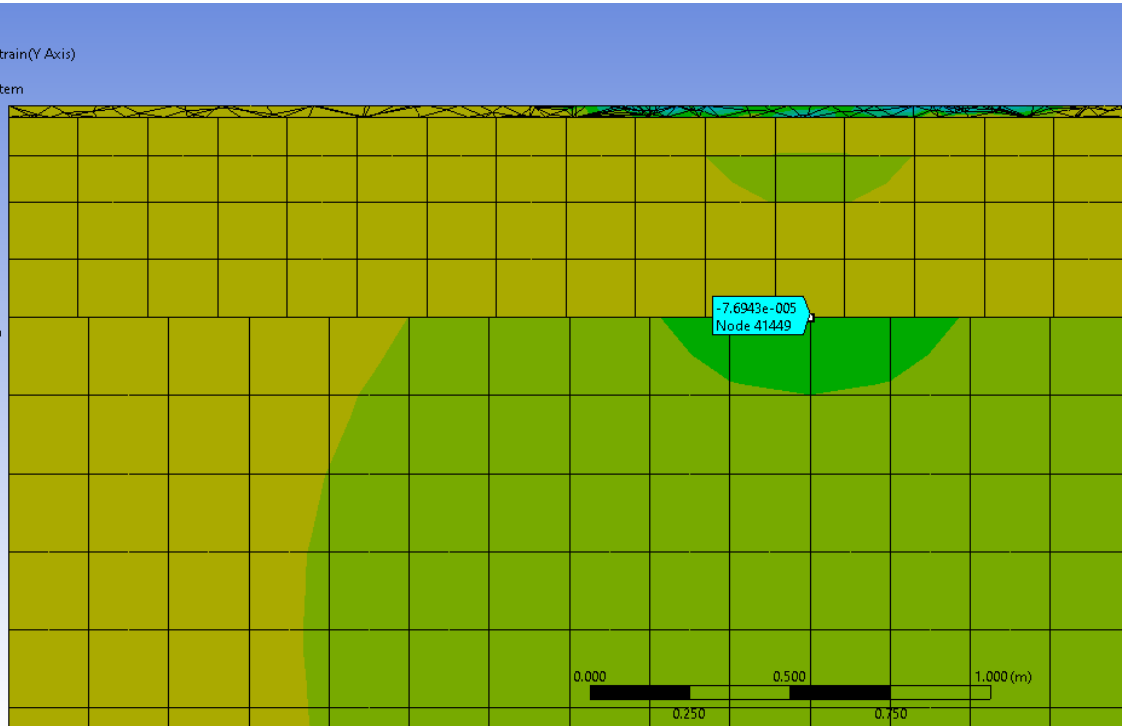
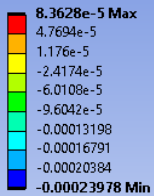
SECCIÓN 0032 D=0,2

PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

EV=	-7,69E-05	N	1,76E+09	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

X: 0032 D0.2
 Normal Elastic Strain 2
 Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 14:29

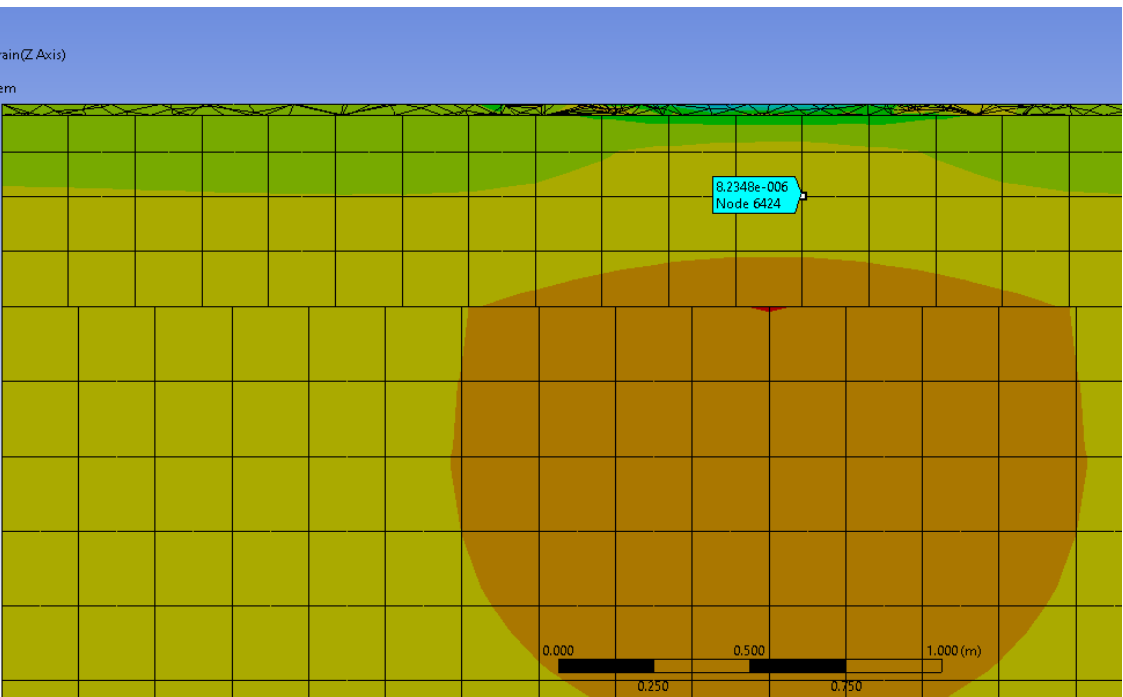
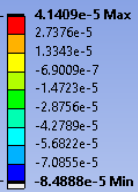


PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

ER=	8,23E-06	N	5,44E+10	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	----------	---	----------	-----------------------------	-----

X: 0032 D0.2
 Normal Elastic Strain
 Type: Normal Elastic Strain(Z Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 14:13



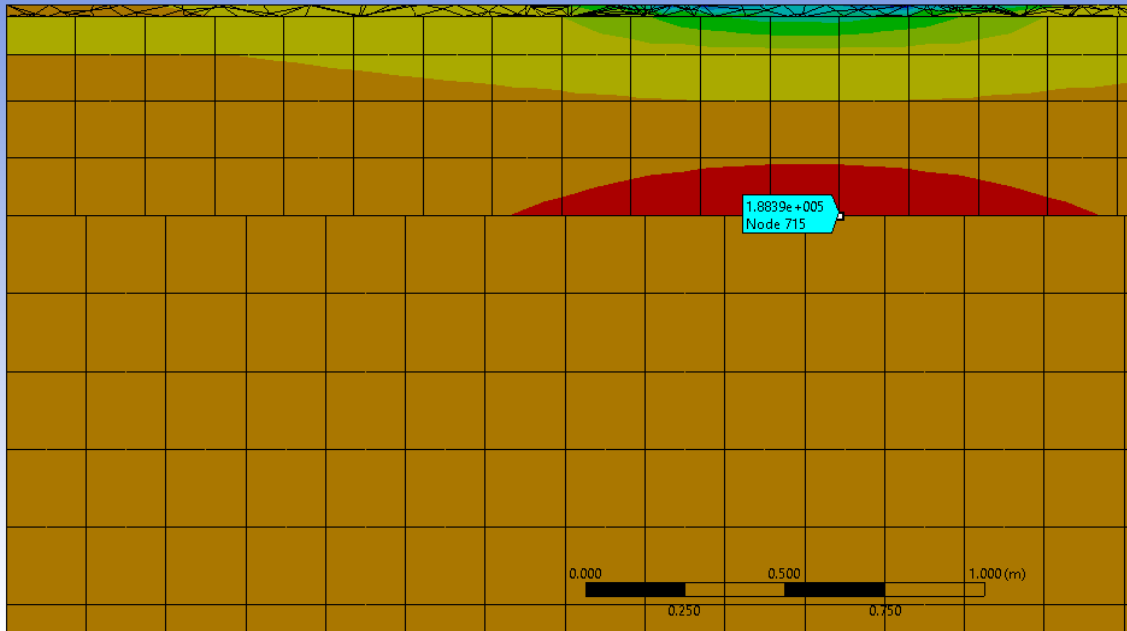
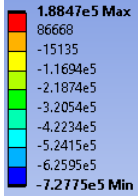
SECCIÓN 0032 D=0,2

PUNTRO CRÍTICO = MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO

$$\sigma_r/R_F = 1 - 0,065 \log N$$

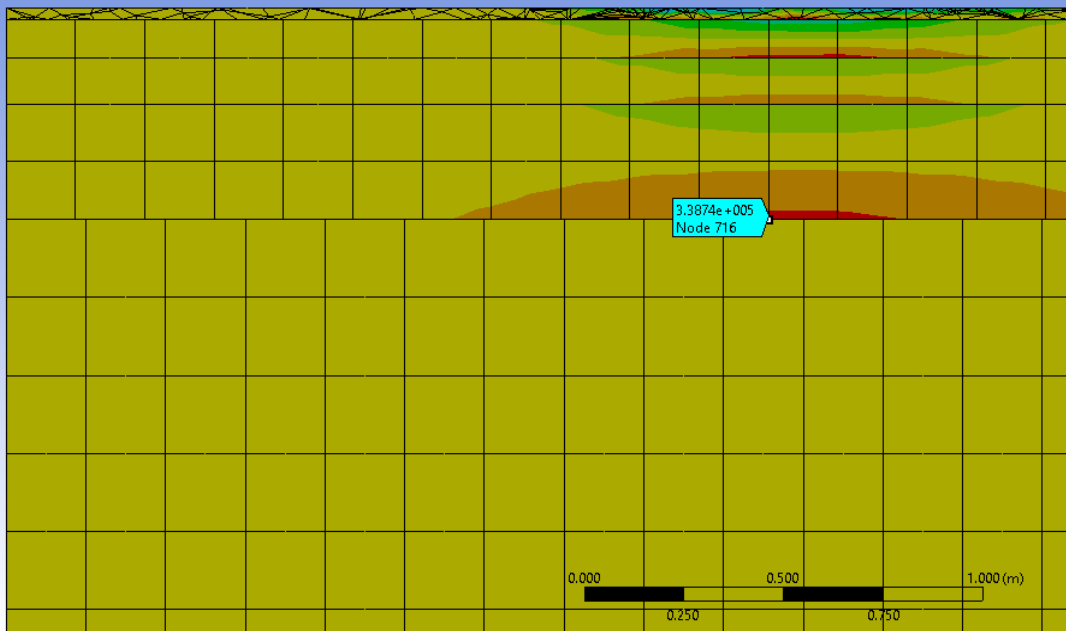
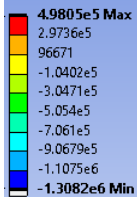
σ_r unidas 1,88E+05

X: 0032 D0.2
Normal Stress
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 14:30



σ_r sin adherencia 3,39E+05

X: 0032 D0.2
Normal Stress
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 14:32



σ_r semiadherencia 2,64E+05 N 2,07E+10 Categoría de tráfico pesado T00

SECCIÓN 0032 D=0,15

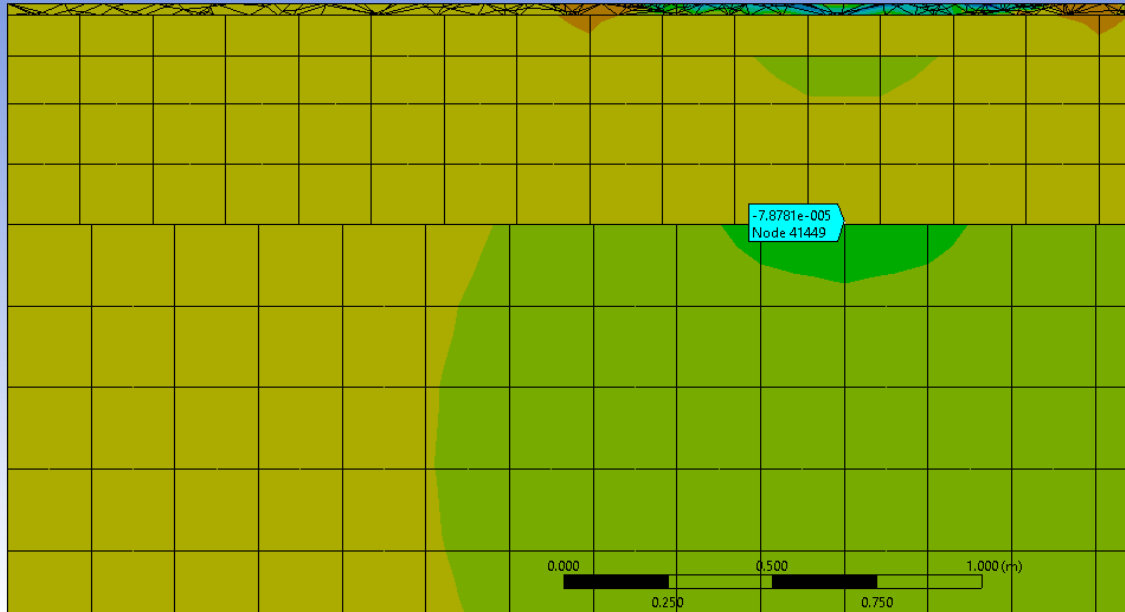
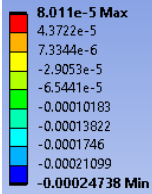
PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

EV=	-7,88E-05	N	1,60E+09	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

Y: 0032 D0.15

Normal Elastic Strain 2
 Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 14:40



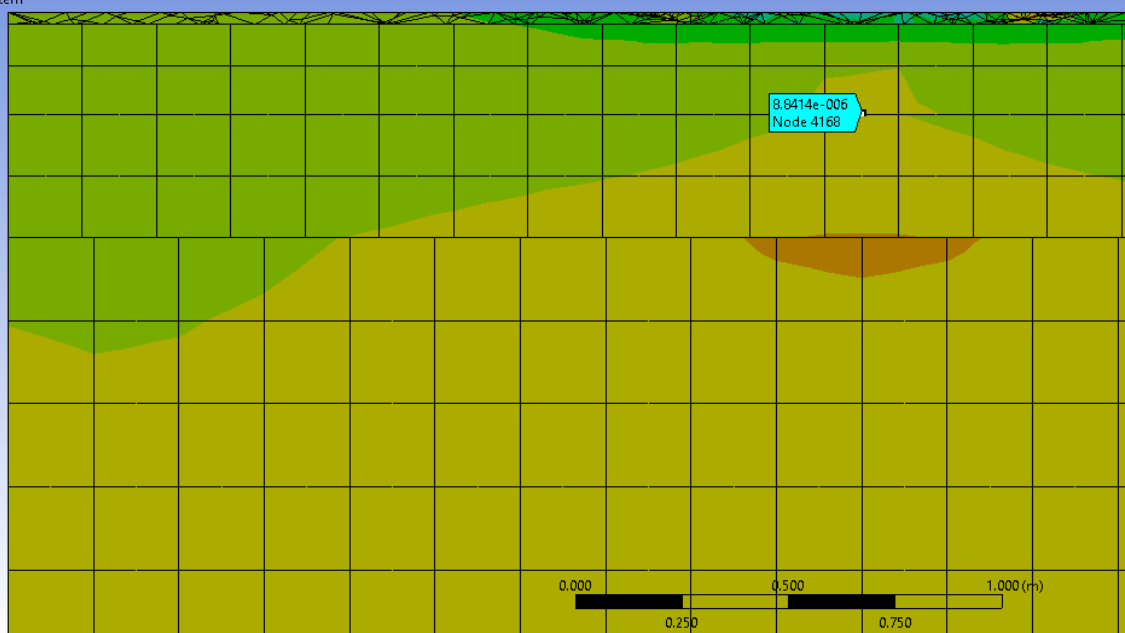
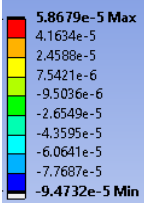
PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

EV=	8,84E-06	N	4,19E+10	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	----------	---	----------	-----------------------------	-----

Y: 0032 D0.15

Normal Elastic Strain
 Type: Normal Elastic Strain(Z Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 14:39



SECCIÓN 0032 D=0,15

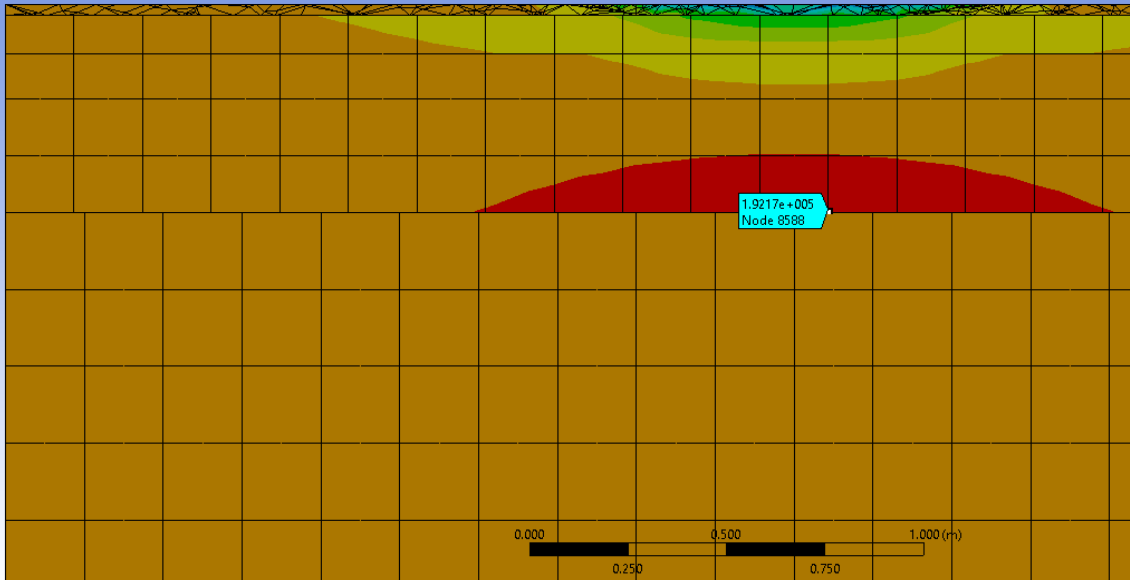
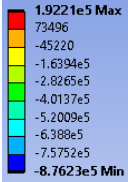
PUNTO CRÍTICO = MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO

$$\sigma_r/R_f = 1 - 0,065 \log N$$

σ_r unidas 1,92E+05

Y: 0032 D0.15

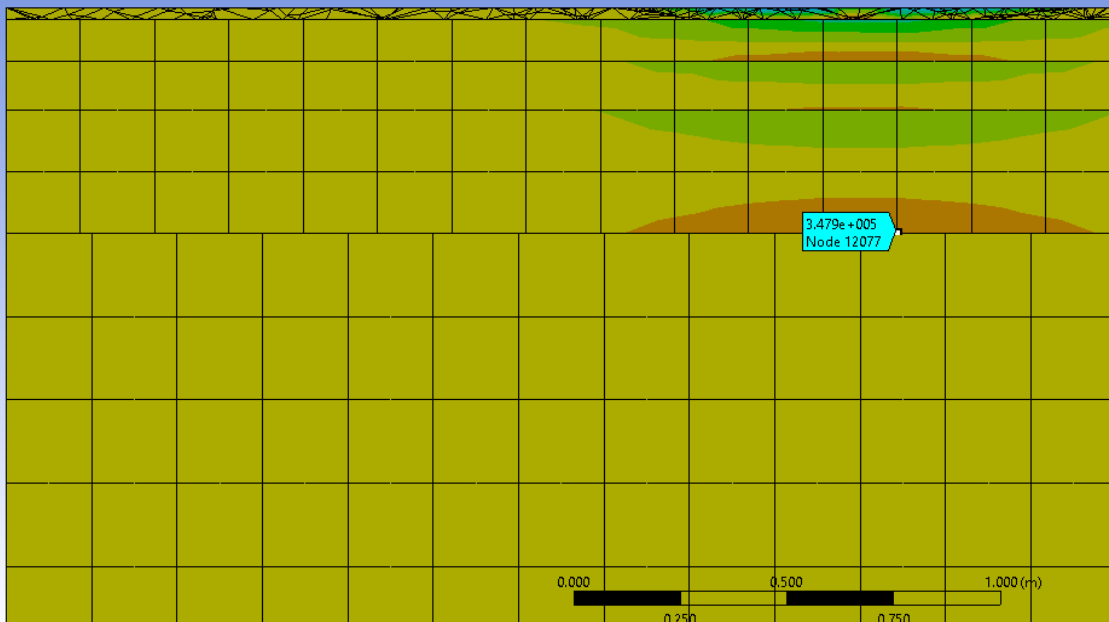
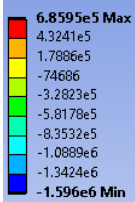
Normal Stress
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 14:41



σ_r sin adherencia 3,48E+05

Y: 0032 D0.15

Normal Stress
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 14:38



σ_r semiadherencia 2,70E+05 N

1,55E+10 Categoría de tráfico pesado T00

SECCIÓN 0032 D=0,1

PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

EV=	-8,08E-05	N	1,44E+09	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

Z: 0032 D0.1

Normal Elastic Strain 2

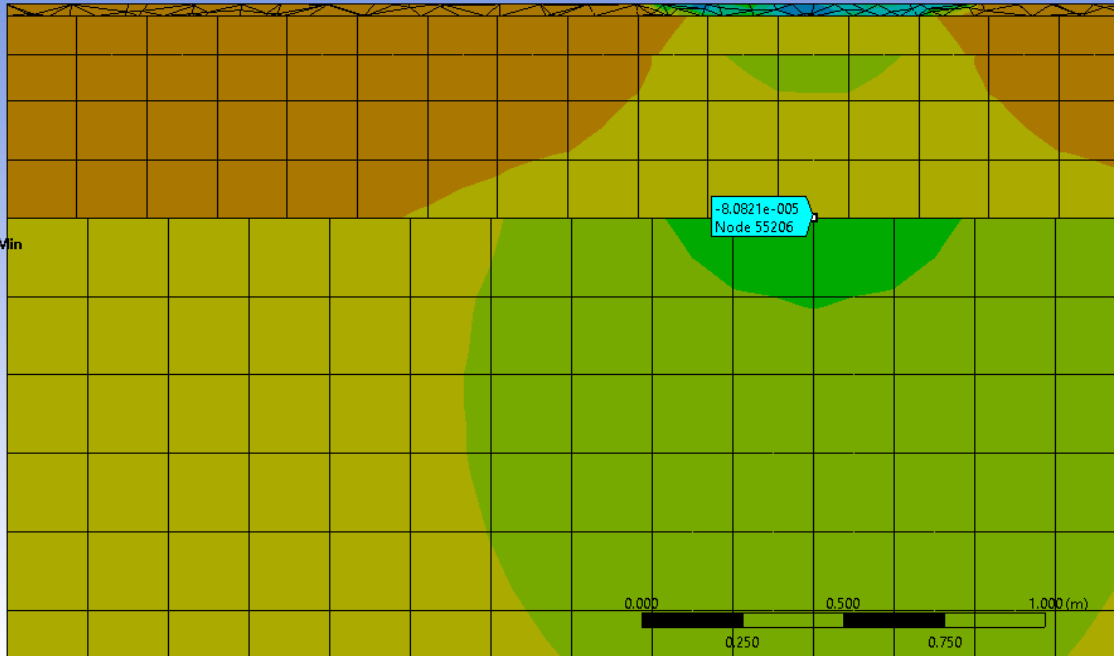
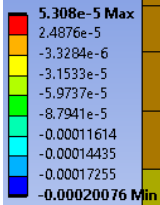
Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)

Unit: m/m

Global Coordinate System

Time: 2.e-002 s

27/07/2022 14:46



PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

EV=	9,32E-06	N	3,46E+10	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	----------	---	----------	-----------------------------	-----

Z: 0032 D0.1

Normal Elastic Strain

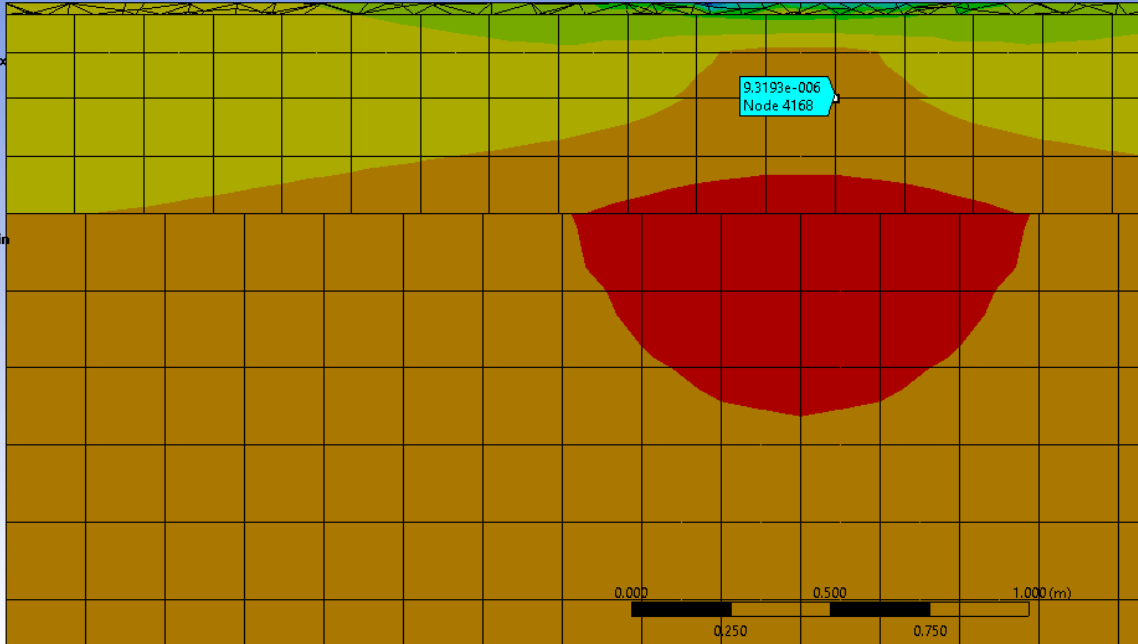
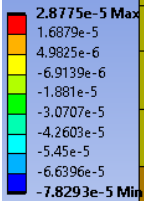
Type: Normal Elastic Strain(Z Axis)

Unit: m/m

Global Coordinate System

Time: 2.e-002 s

27/07/2022 14:45



SECCIÓN 0032 D=0,1

PUNTO CRÍTICO = MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO

$$\sigma_r/R_F = 1 - 0,065 \log N$$

σ_r unidas 1,96E+05

Z: 0032 D0.1

Normal Stress

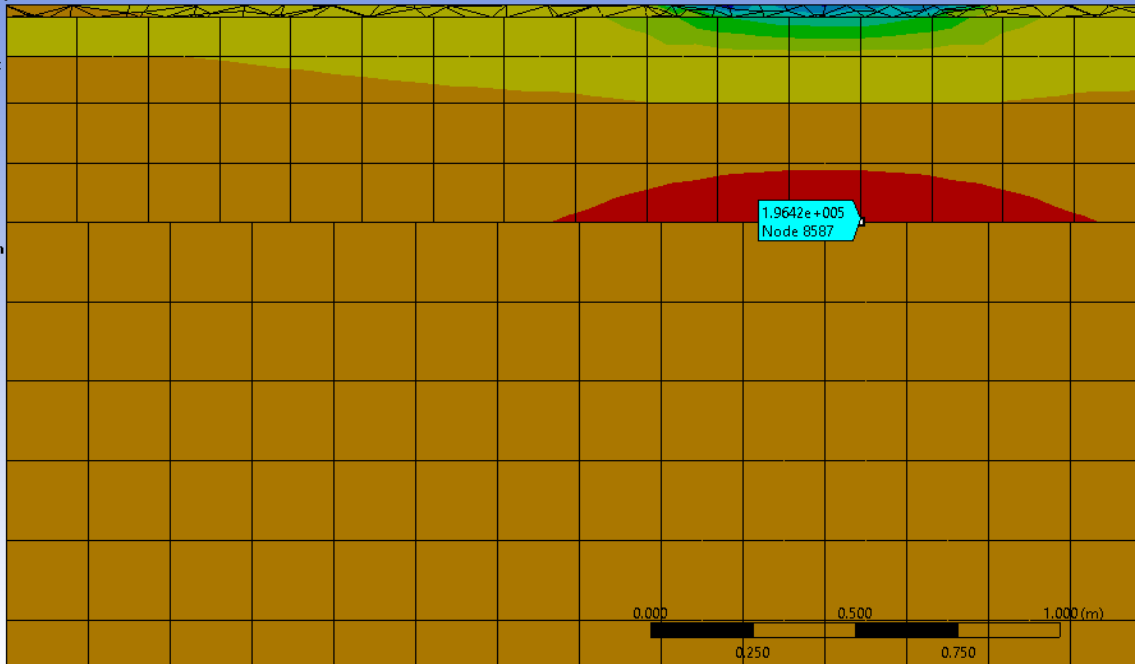
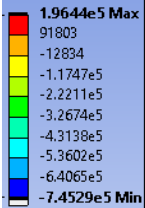
Type: Normal Stress(Z Axis)

Unit: Pa

Global Coordinate System

Time: 2.e-002 s

27/07/2022 14:47



σ_r sin adherencia 3,57E+05

Z: 0032 D0.1

Normal Stress

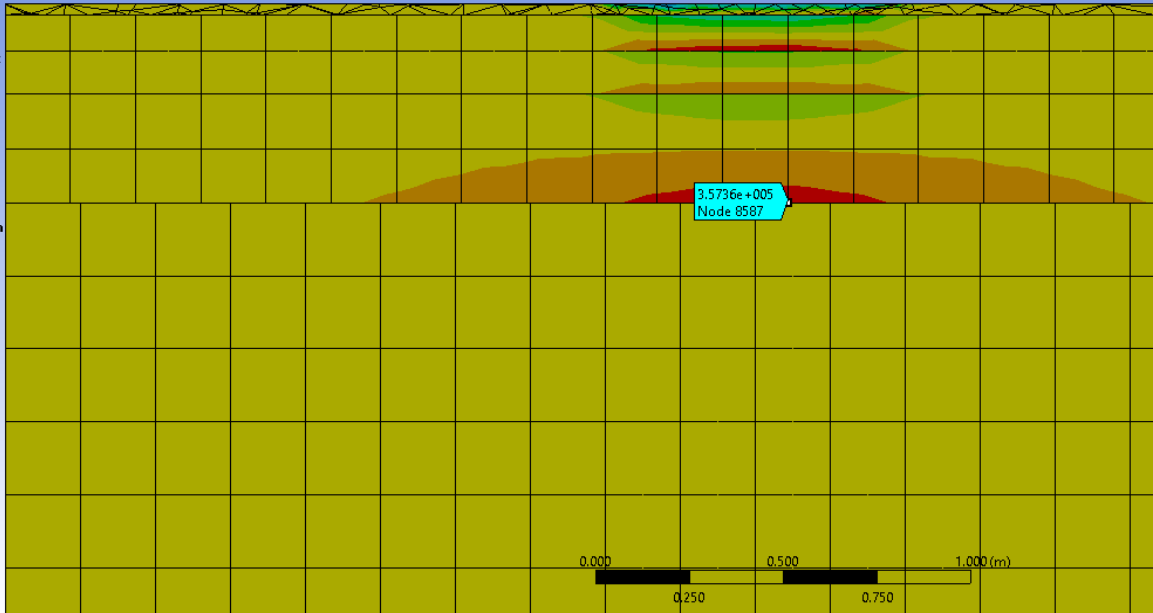
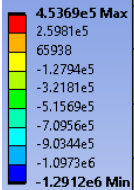
Type: Normal Stress(Z Axis)

Unit: Pa

Global Coordinate System

Time: 2.e-002 s

27/07/2022 14:43



σ_r semiadherencia 2,77E+05 N

1,15E+10 Categoría de tráfico pesado T00

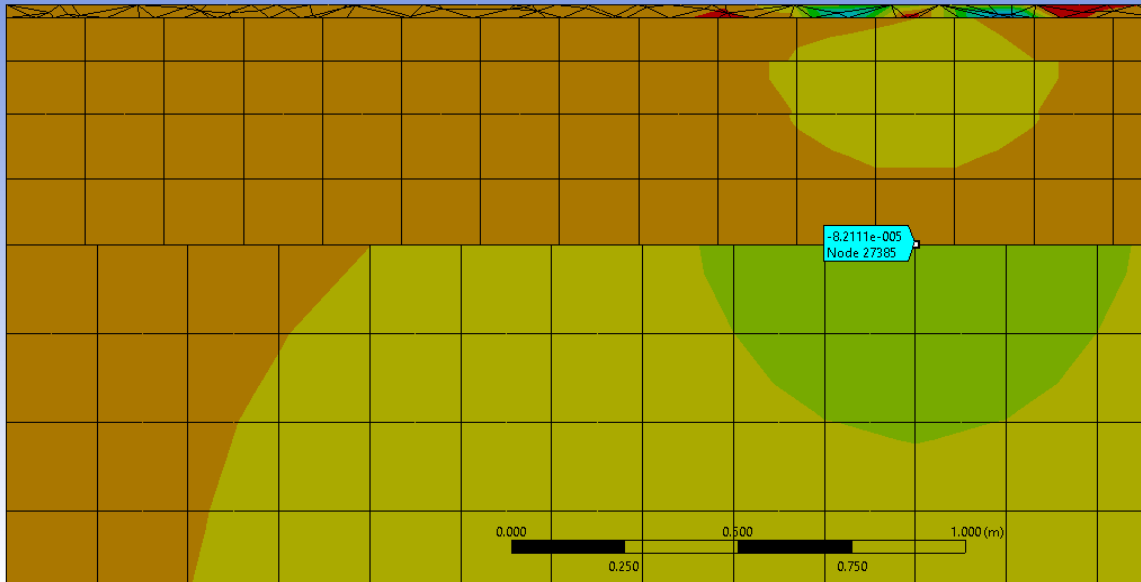
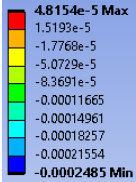
SECCIÓN 0032 D=0

PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

EV=	-8,21E-05	N	1,35E+09	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

AA: 0032 C
Normal Elastic Strain 2
Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)
Unit: m/m
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 14:52

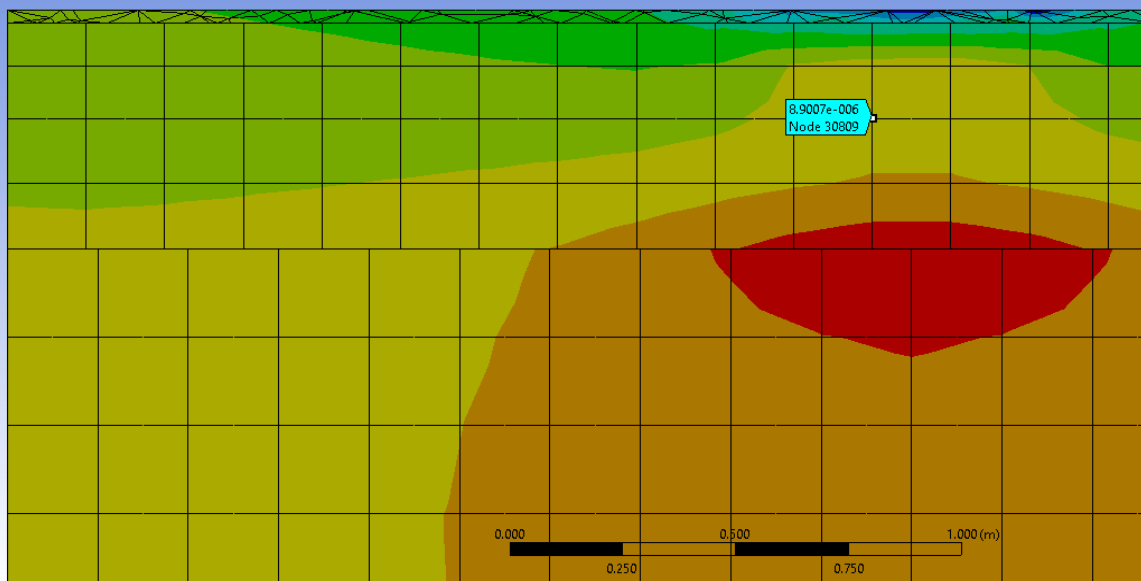
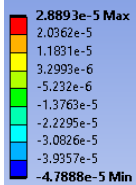


PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

ER=	8,90E-06	N	4,09E+10	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	----------	---	----------	-----------------------------	-----

AA: 0032 C
Normal Elastic Strain
Type: Normal Elastic Strain(Z Axis)
Unit: m/m
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 14:52



SECCIÓN 0032 D=0

PUNTO CRÍTICO = MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO

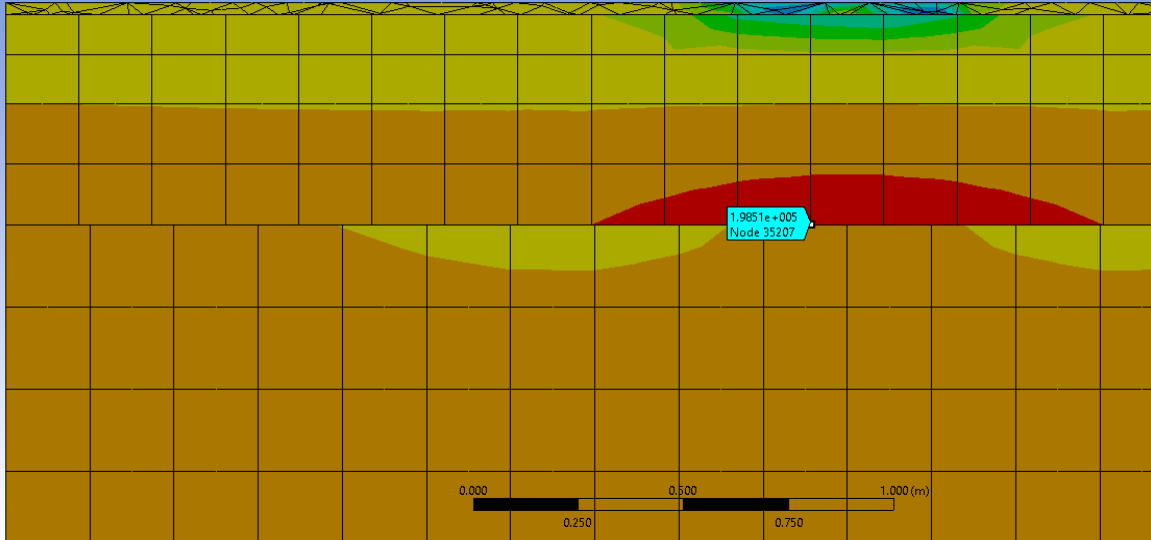
$$\sigma_r/R_f = 1 - 0,065 \log N$$

σ unidas

1,99E+05

AA: 0032 C
Normal Stress
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 14:53

1.9858e5 Max
98975
-625.54
-1.0023e5
-1.9963e5
-2.9943e5
-3.9903e5
-4.9863e5
-5.9823e5
-6.9783e5 Min

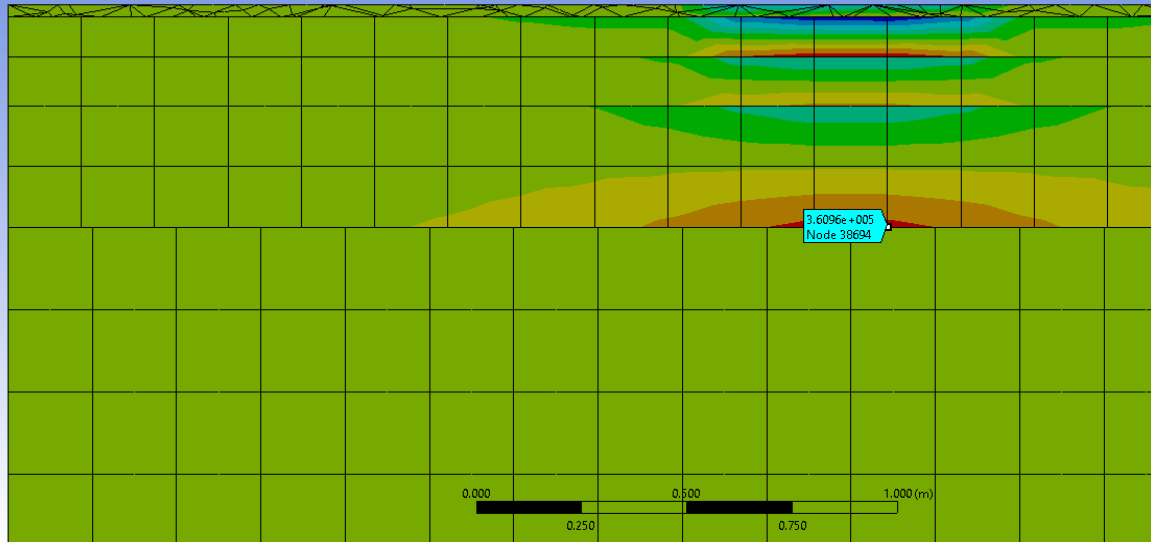


σ sin adherencia

3,61E+05

AA: 0032 C
Normal Stress
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 14:55

4.518e5 Max
3.2254e5
1.9927e5
64000
-65267
-1.9453e5
-3.238e5
-4.5307e5
-5.8234e5
-7.1161e5 Min



σ semiadherencia

2,80E+05

N

1,01E+10

Categoría de tráfico pesado

T00



11.4 Resultados ANSYS sección 031

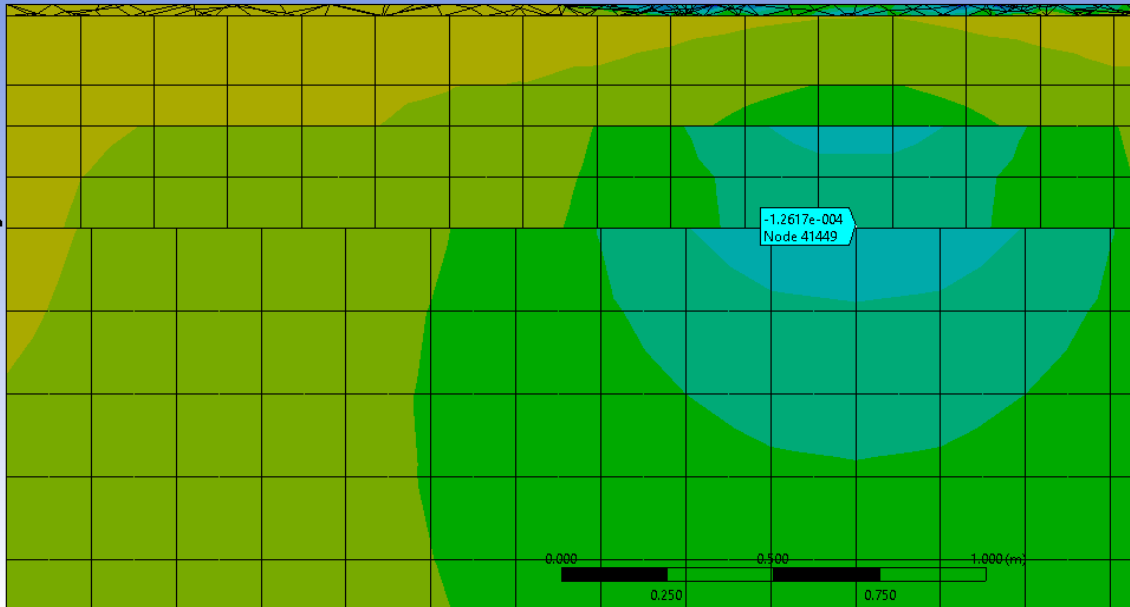
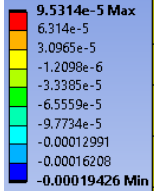
SECCIÓN 031 D=0,2

PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

EV=	-1,26E-04	N	2,43E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

AB: 031 D0.2
 Normal Elastic Strain 2
 Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 15:01

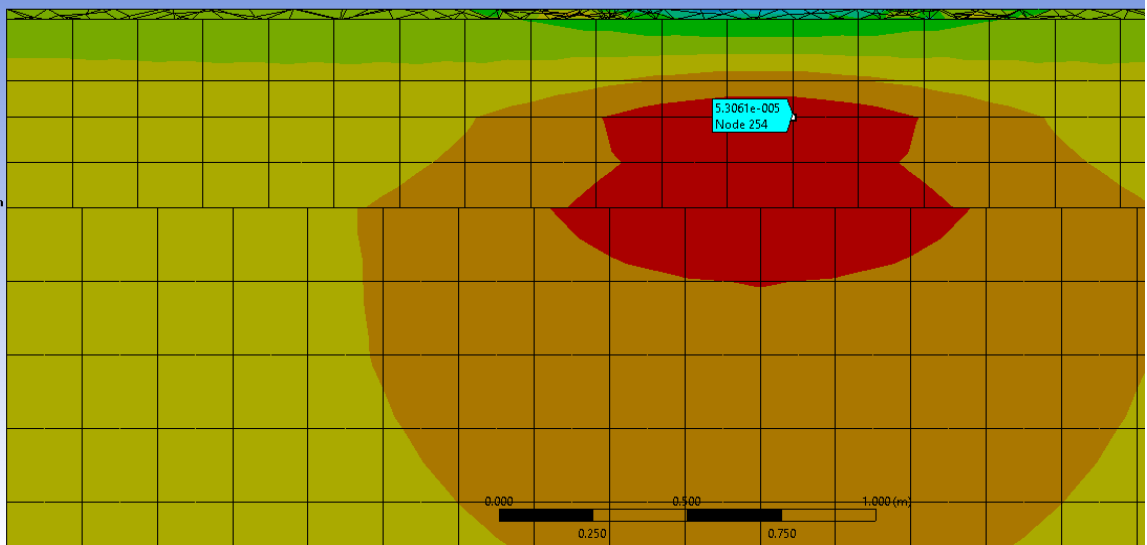
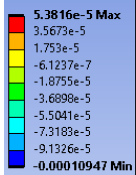


PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

ER=	5,31E-05	N	5,83E+07	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	----------	---	----------	-----------------------------	-----

AB: 031 D0.2
 Normal Elastic Strain
 Type: Normal Elastic Strain(Z Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 15:01



SECCIÓN 031 D=0,15

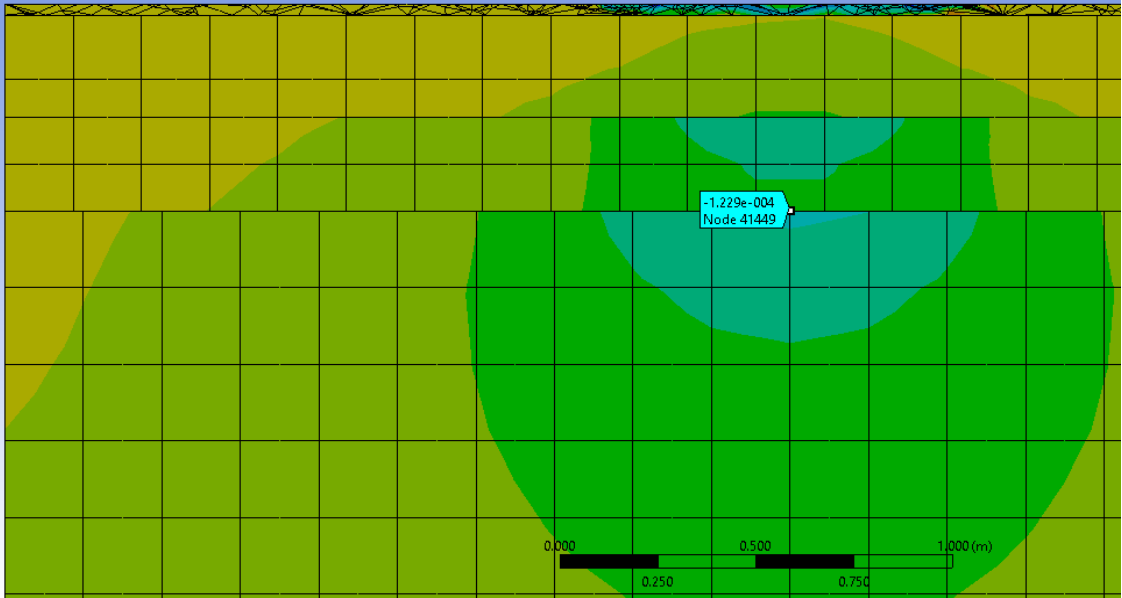
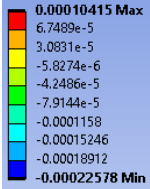
PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

EV=	-1,23E-04	N	2,70E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

AC: 031 D0.15

Normal Elastic Strain 2
 Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 26/07/2022 21:09



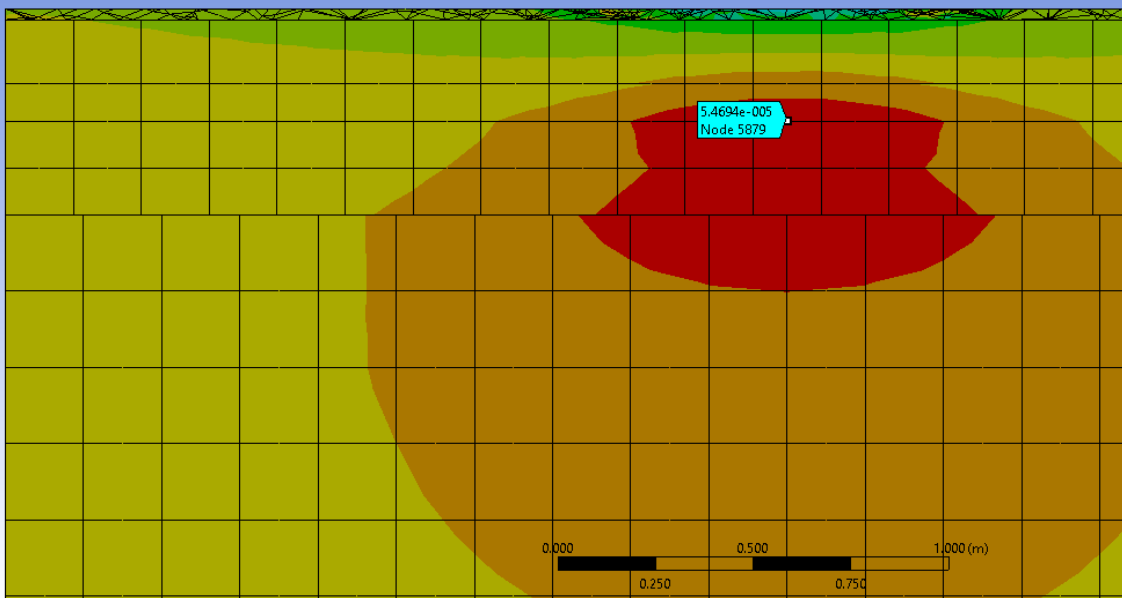
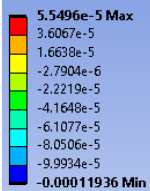
PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

EV=	5,47E-05	N	5,22E+07	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	----------	---	----------	-----------------------------	-----

AC: 031 D0.15

Normal Elastic Strain
 Type: Normal Elastic Strain(Z Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 15:03



SECCIÓN 031 D=0,1

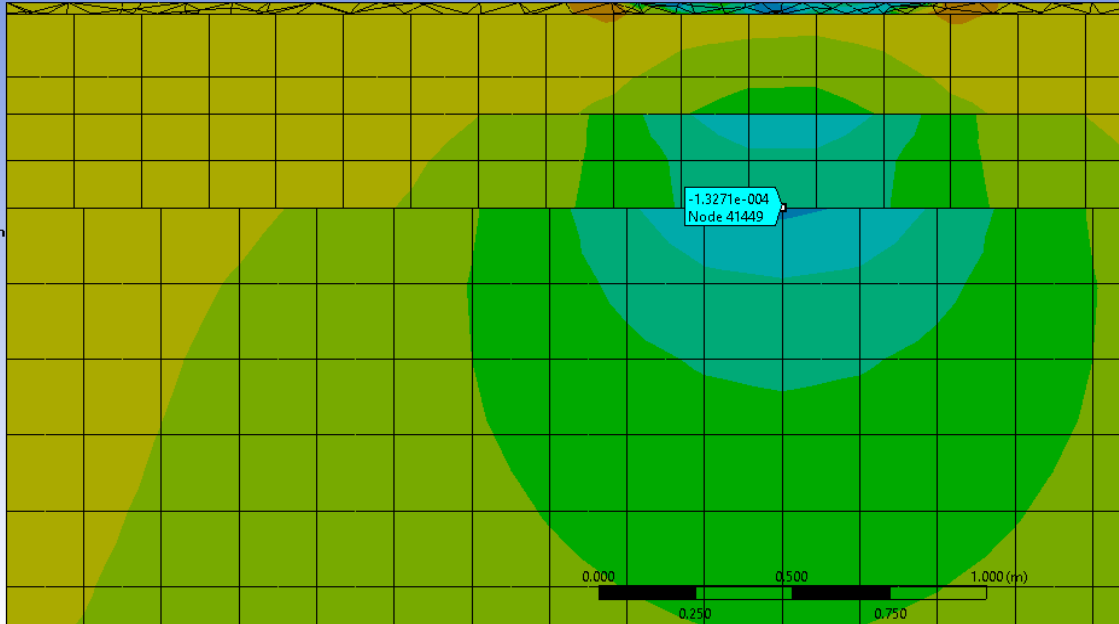
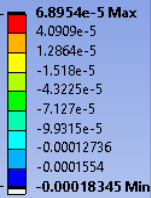
PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

EV=	-1,33E-04	N	1,98E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

AD: 031 D0.1

Normal Elastic Strain 2
 Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 15:20



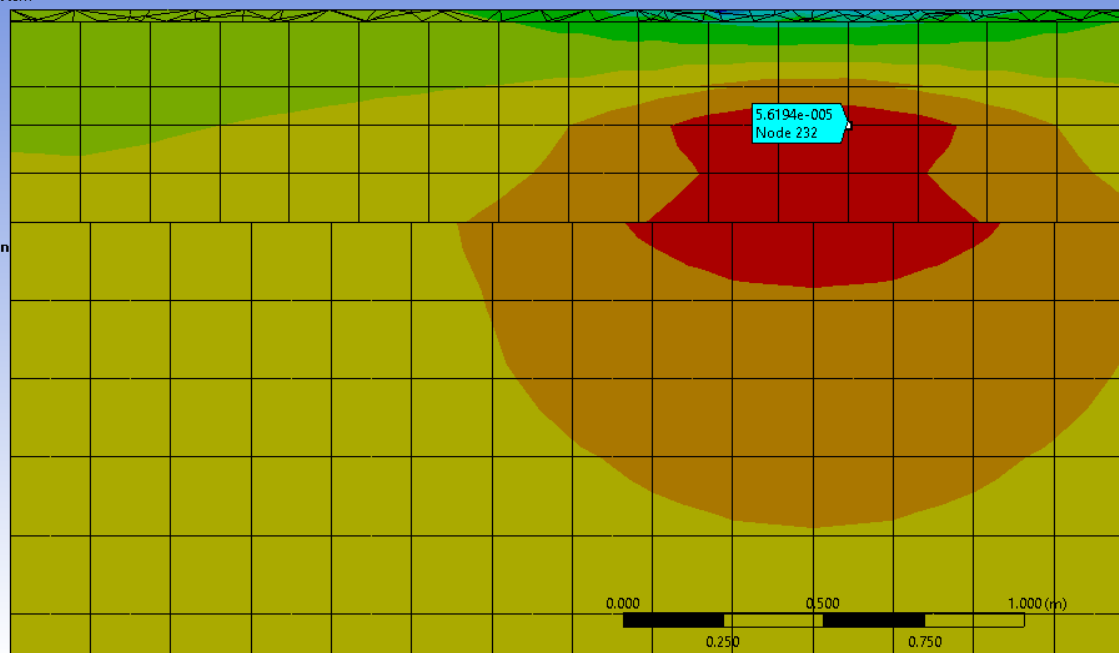
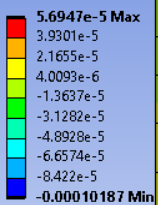
PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

EV=	5,62E-05	N	4,72E+07	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	----------	---	----------	-----------------------------	-----

AD: 031 D0.1

Normal Elastic Strain
 Type: Normal Elastic Strain(Z Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 15:19



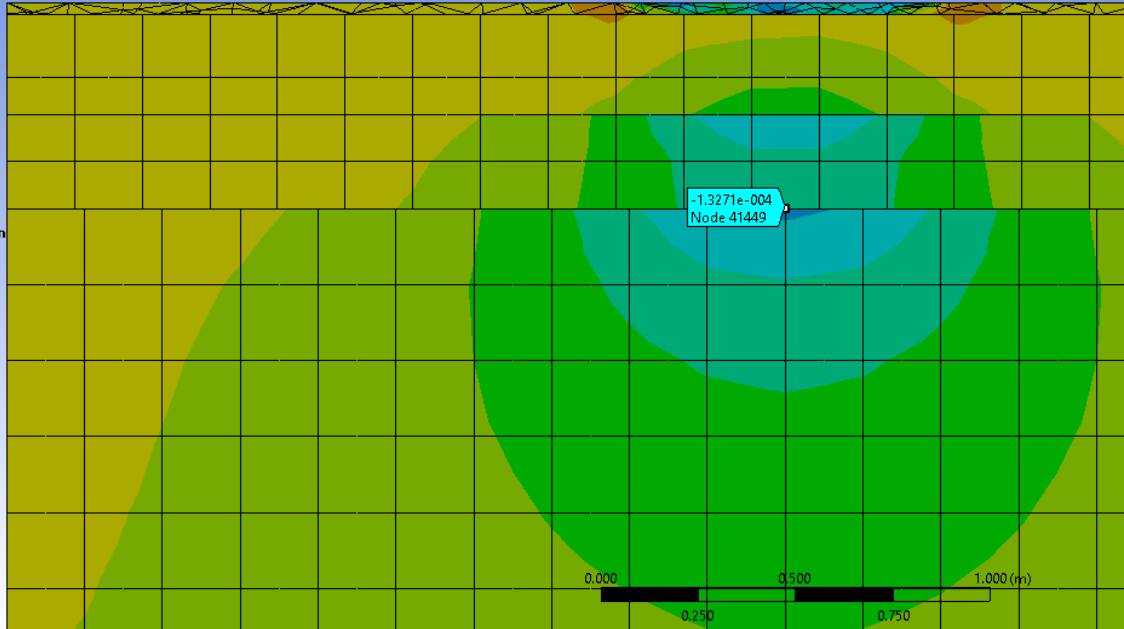
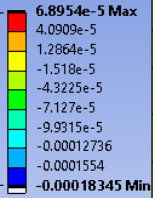
SECCIÓN 031 D=0

PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

EV=	-1,33E-04	N	1,98E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

AD: 031 D0.1
 Normal Elastic Strain 2
 Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 15:20

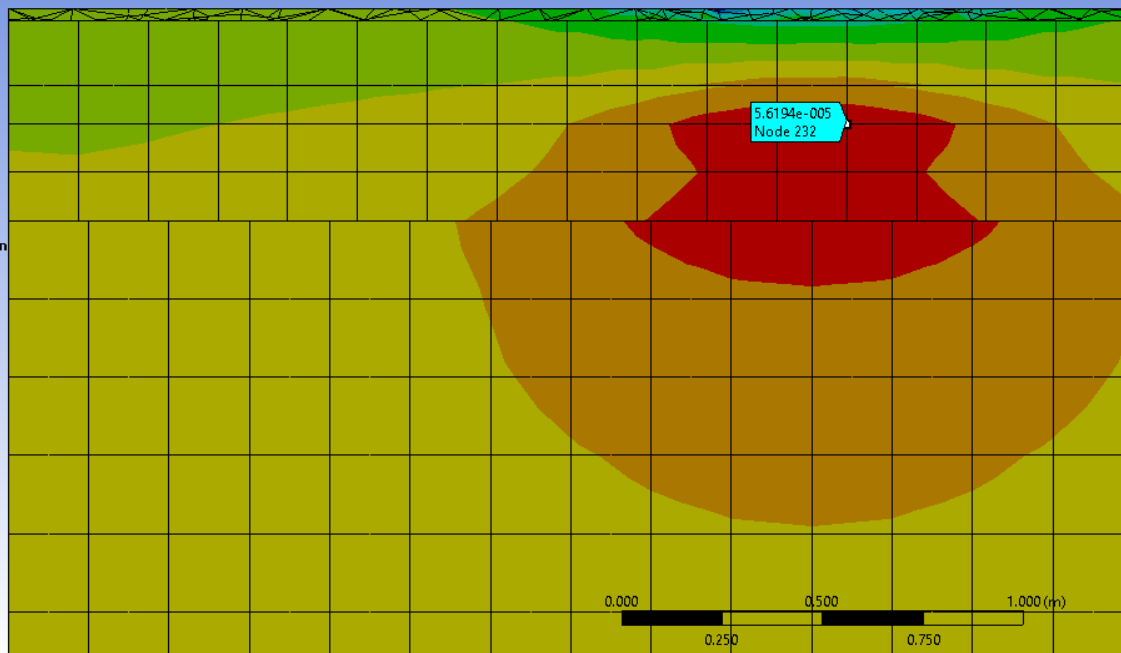
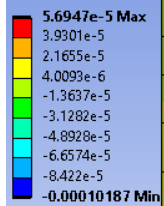


PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

ER=	5,62E-05	N	4,72E+07	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	----------	---	----------	-----------------------------	-----

AD: 031 D0.1
 Normal Elastic Strain
 Type: Normal Elastic Strain(Z Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 15:19





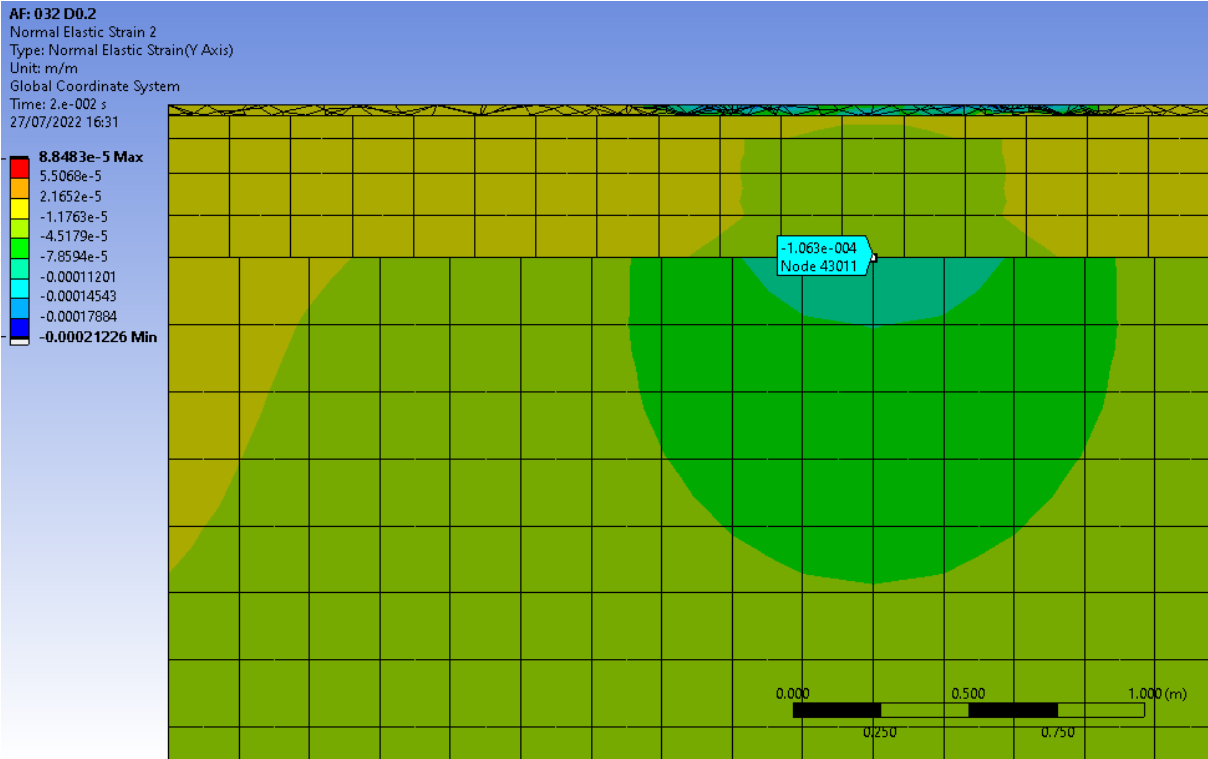
11.5 Resultados ANSYS sección 032

SECCIÓN 032 D=0,2

PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

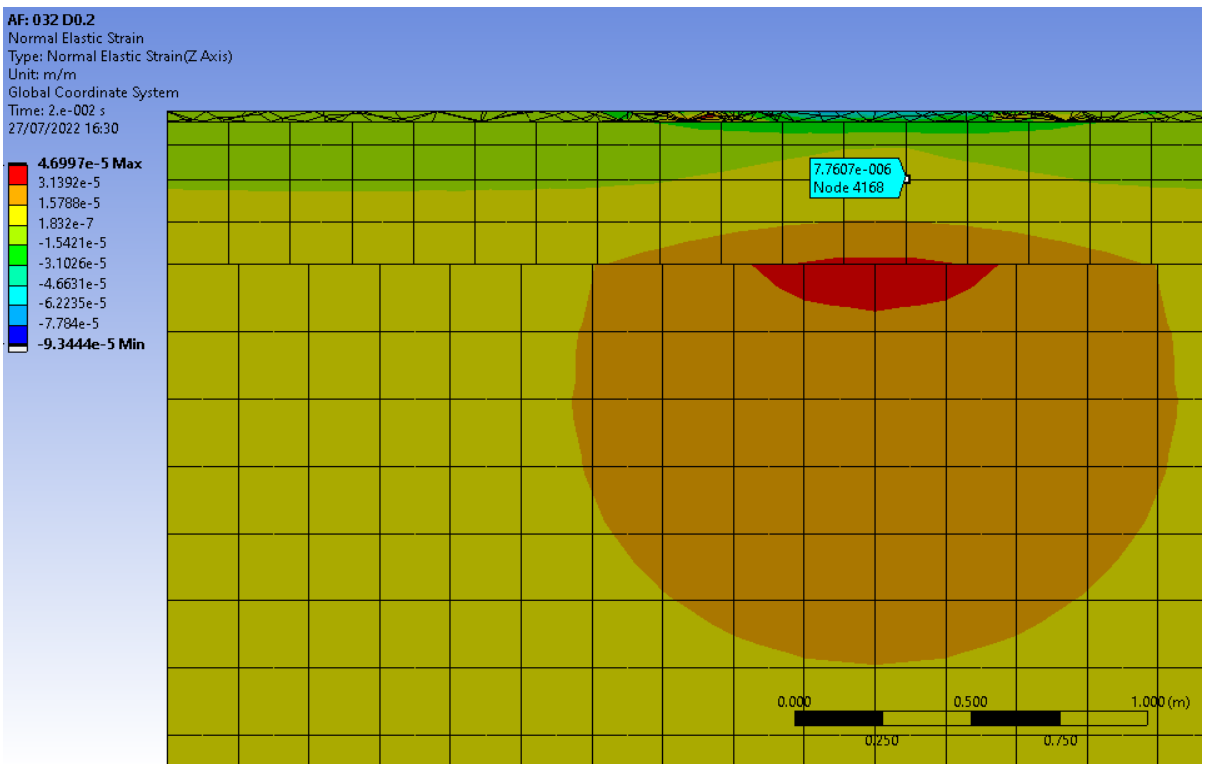
EV=	-1,06E-04	N	4,82E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----



PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

EV=	7,76E-06	N	6,77E+10	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	----------	---	----------	-----------------------------	-----

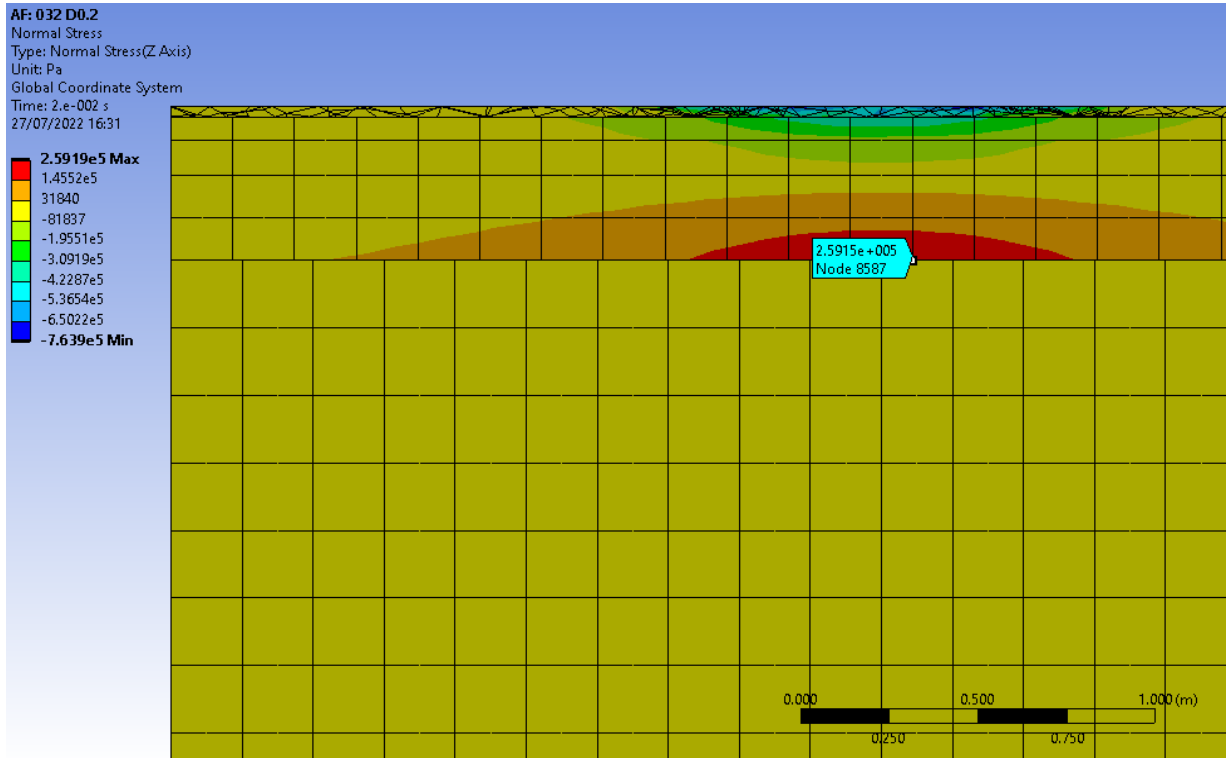


SECCIÓN 032 D=0,2

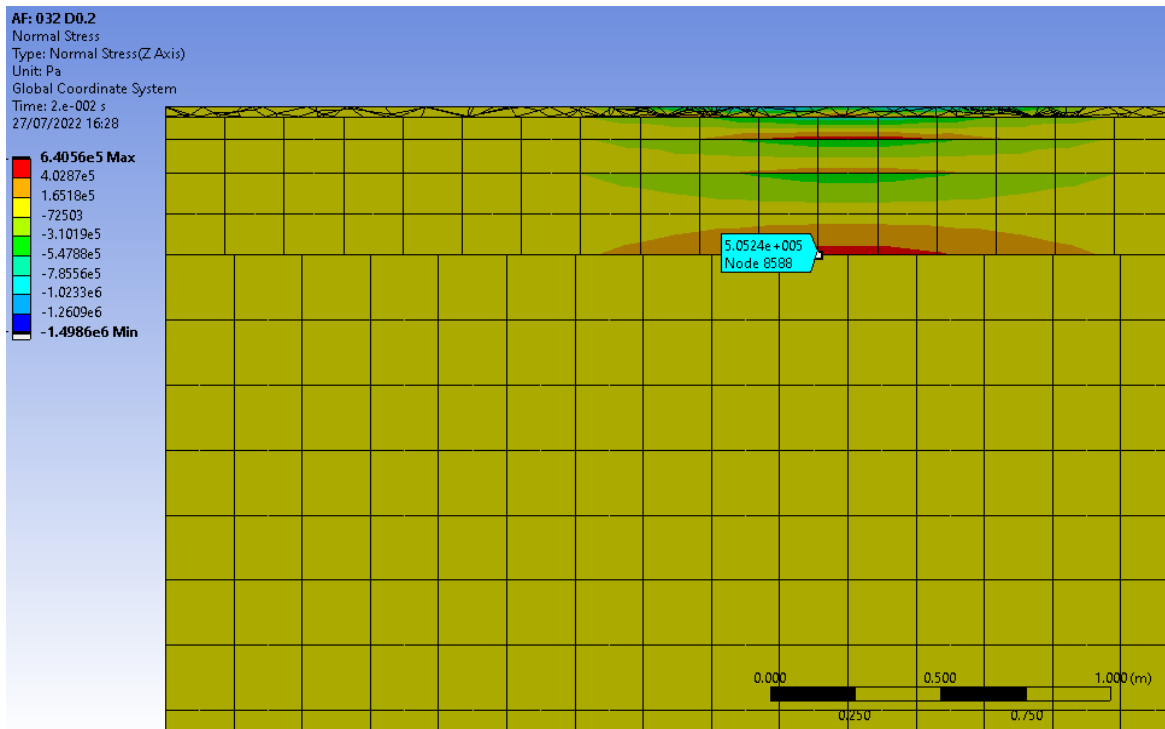
PUNTO CRÍTICO = MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO

$$\sigma_r/R_F = 1 - 0,065 \log N$$

σ_r unidas 2,59E+05



σ_r sin adherencia 5,05E+05



σ_r semiadherencia 3,82E+05 N 1,08E+08 Categoría de tráfico pesado T00

SECCIÓN 032 D=0,15

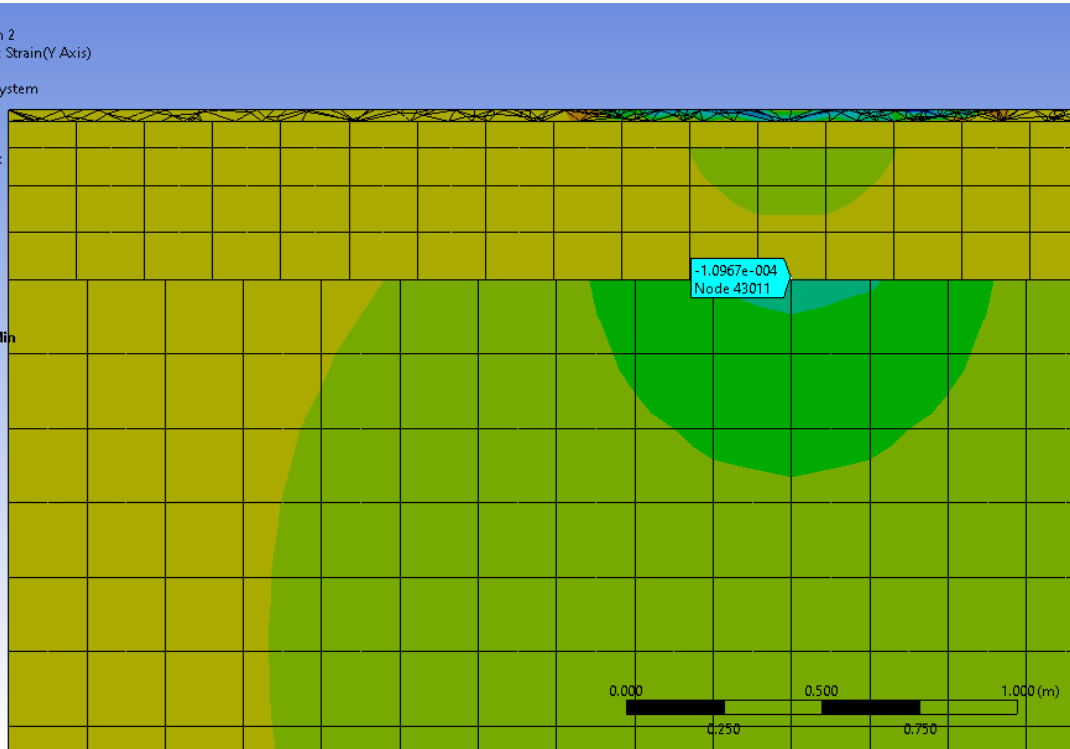
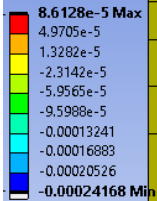
PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

EV=	-1,10E-04	N	4,25E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

AG: 032 D0.15

Normal Elastic Strain 2
 Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 16:45



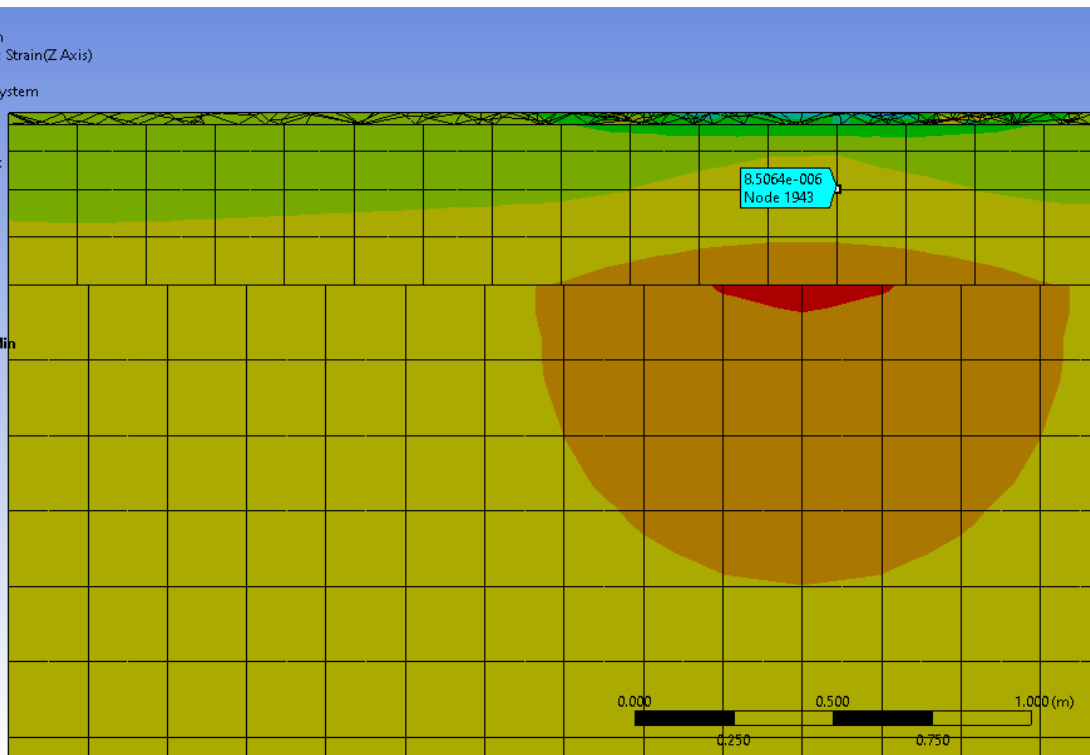
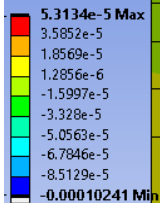
PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

EV=	8,51E-06	N	4,83E+10	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	----------	---	----------	-----------------------------	-----

AG: 032 D0.15

Normal Elastic Strain
 Type: Normal Elastic Strain(Z Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 27/07/2022 16:44



SECCIÓN 032 D=0,15

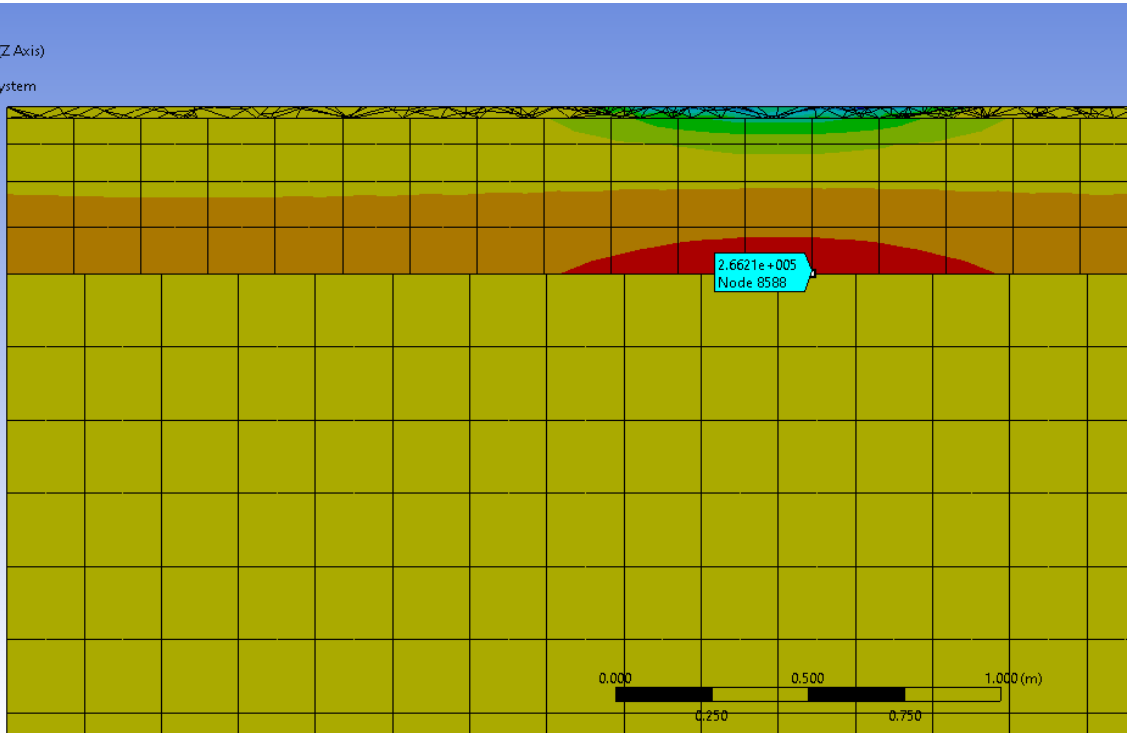
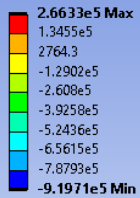
PUNTO CRÍTICO = MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO

$$\sigma_r/R_F = 1 - 0,065 \log N$$

σ unidas 2,66E+05

AG: 032 D0.15

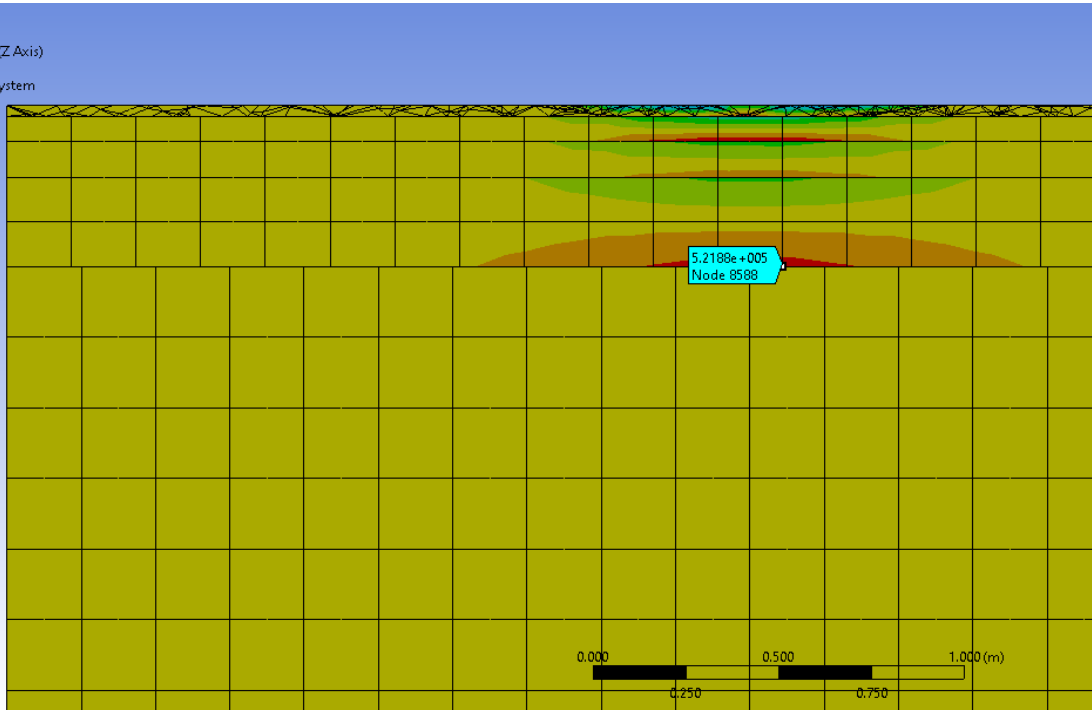
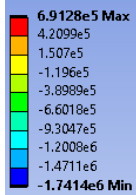
Normal Stress
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 16:46



σ sin adherencia 5,22E+05

AG: 032 D0.15

Normal Stress
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 16:42



σ semiadherencia 3,94E+05 N

6,41E+07 Categoría de tráfico pesado T00

SECCIÓN 032 D=0,1

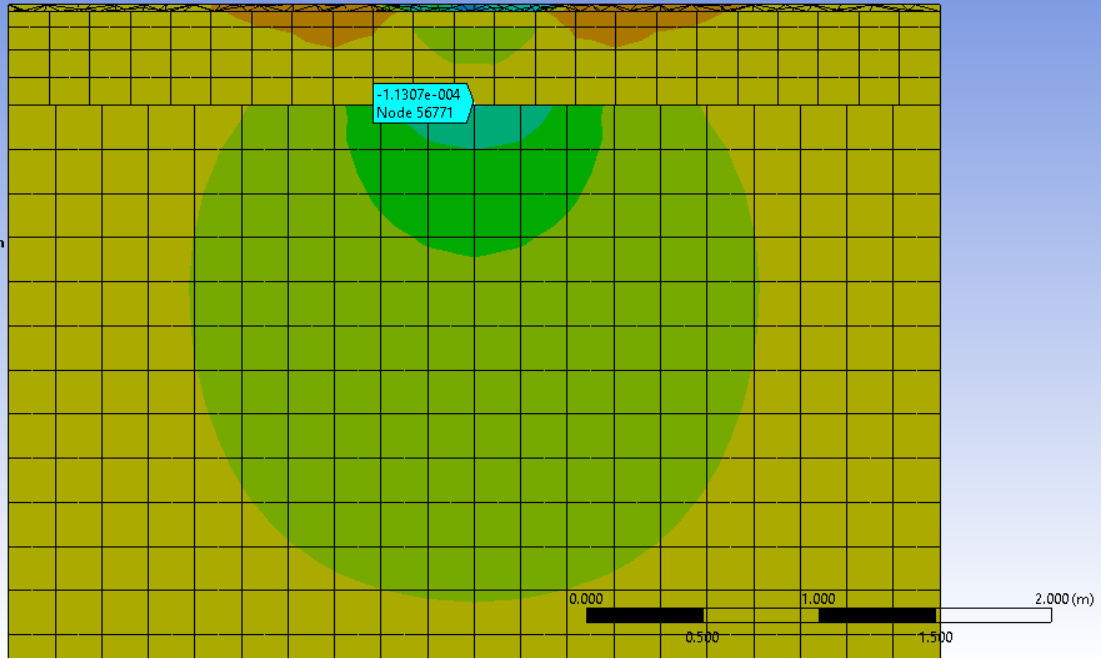
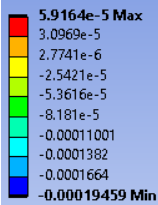
PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

EV=	-1,13E-04	N	3,76E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

AH: 032 D0.1

Normal Elastic Strain 2
Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)
Unit: m/m
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 16:56



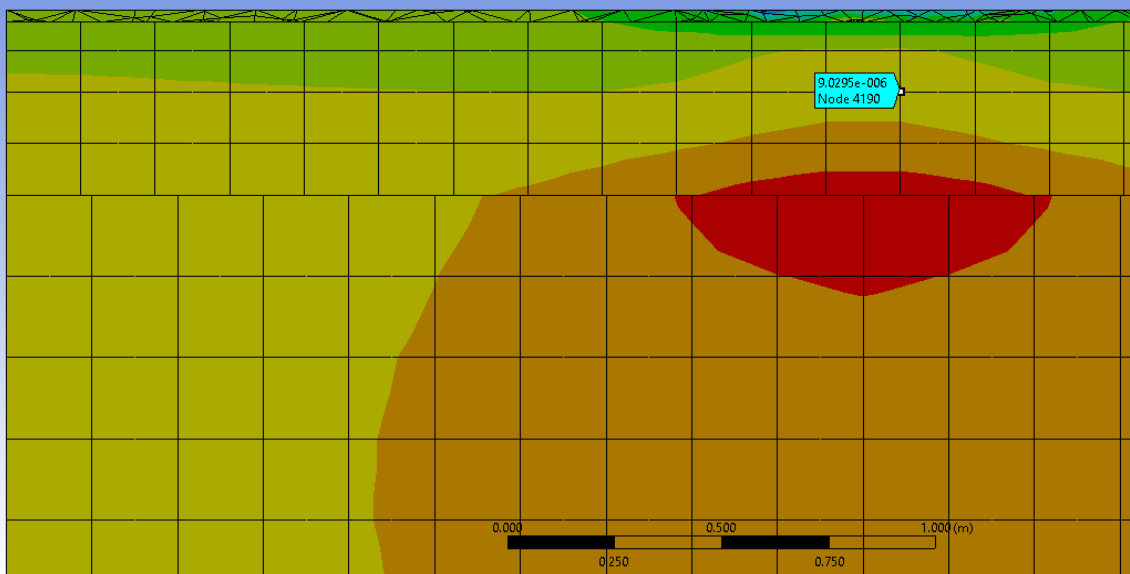
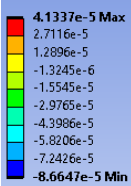
PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

ER=	9,03E-06	N	3,88E+10	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	----------	---	----------	-----------------------------	-----

AH: 032 D0.1

Normal Elastic Strain
Type: Normal Elastic Strain(Z Axis)
Unit: m/m
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 16:55



SECCIÓN 032 D=0,1

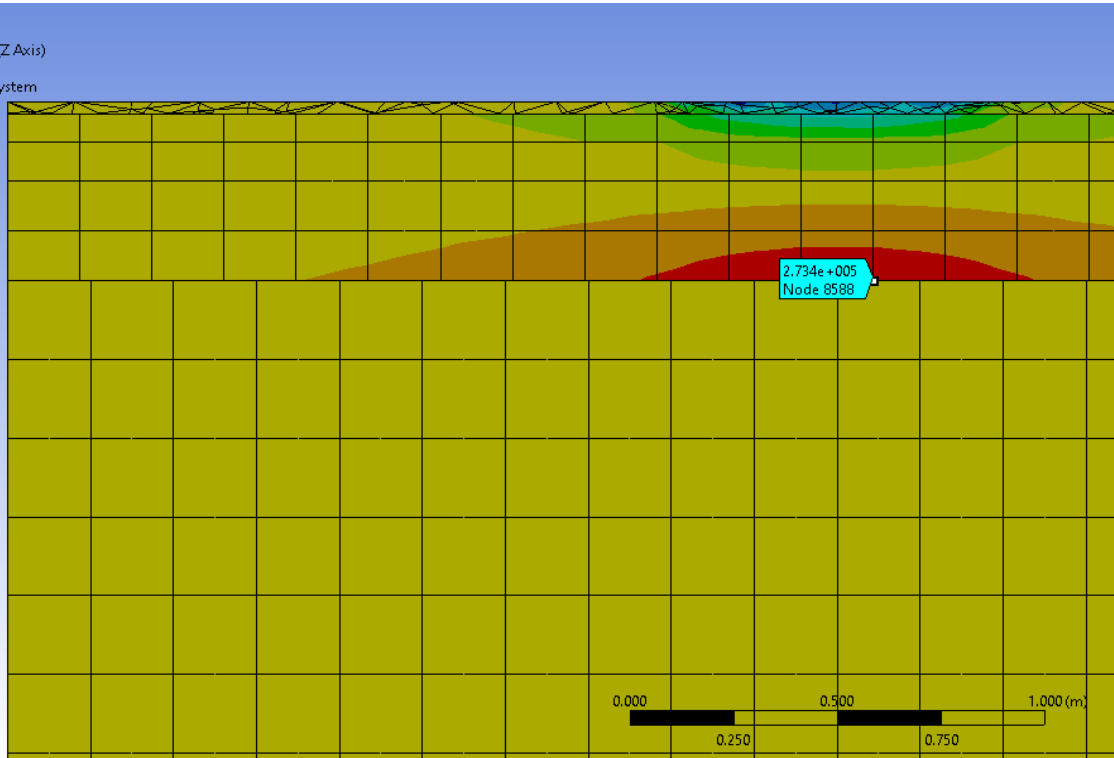
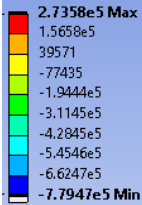
PUNTO CRÍTICO = MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO

$$\sigma_r/R_F = 1 - 0,065 \log N$$

σ_r unidas 2,73E+05

AH: 032 D0.1

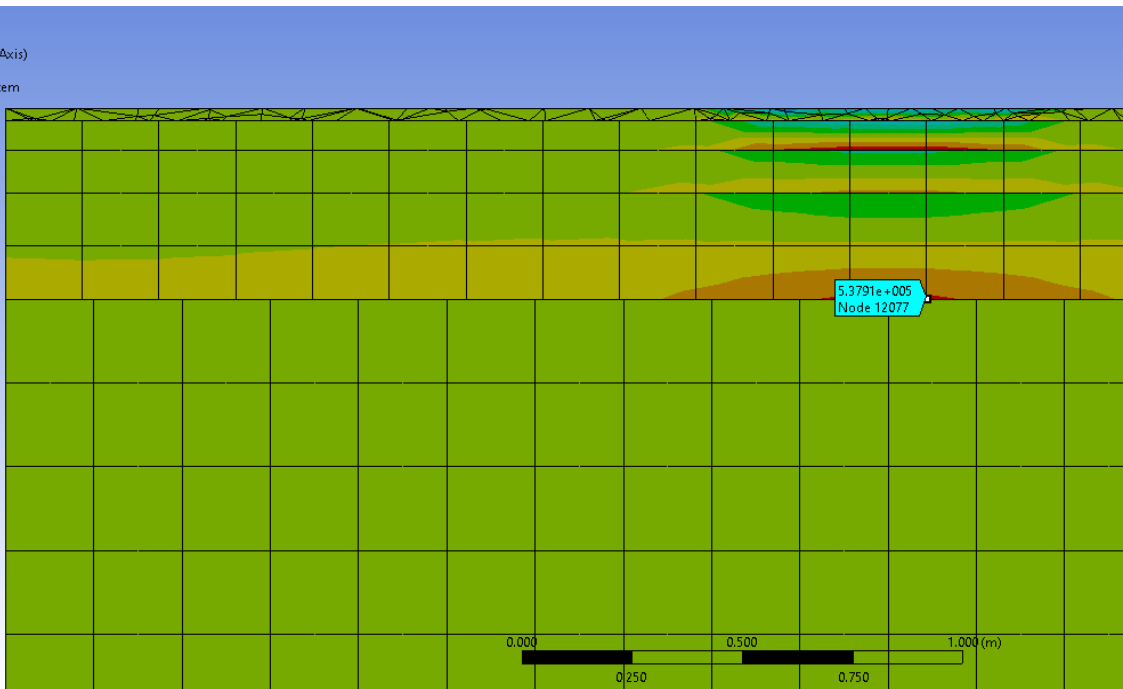
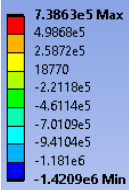
Normal Stress
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 16:57



σ_r sin adherencia 5,38E+05

AH: 032 D0.1

Normal Stress
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 16:53



σ_r semiadherencia 4,06E+05 N

3,83E+07 Categoría de tráfico pesado T00

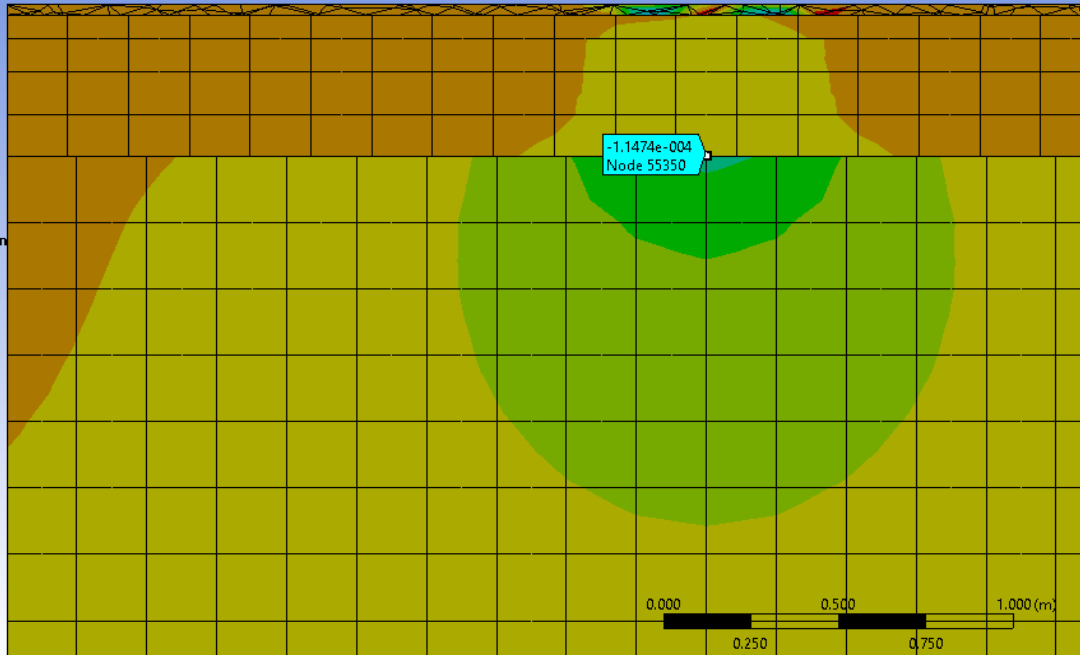
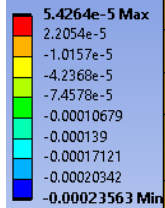
SECCIÓN 032 D=0

PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

EV=	-1,15E-04	N	3,55E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

At: 032 C
Normal Elastic Strain 2
Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)
Unit: m/m
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 17:03

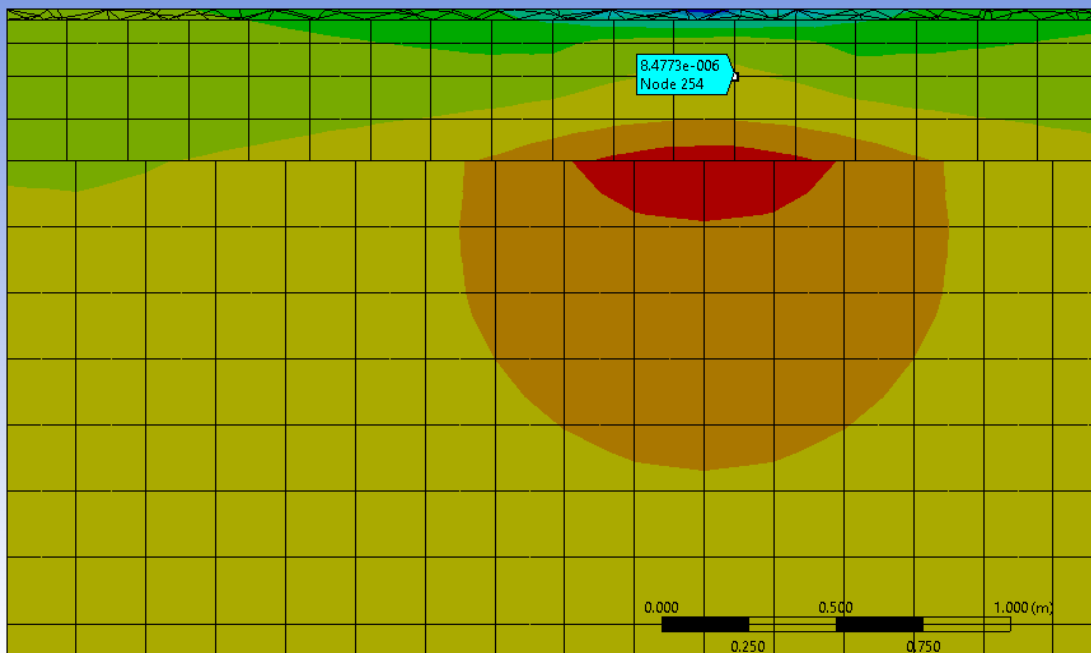
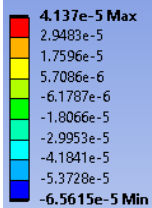


PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

EV=	8,48E-06	N	4,89E+10	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	----------	---	----------	-----------------------------	-----

At: 032 C
Normal Elastic Strain
Type: Normal Elastic Strain(Z Axis)
Unit: m/m
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
27/07/2022 17:02

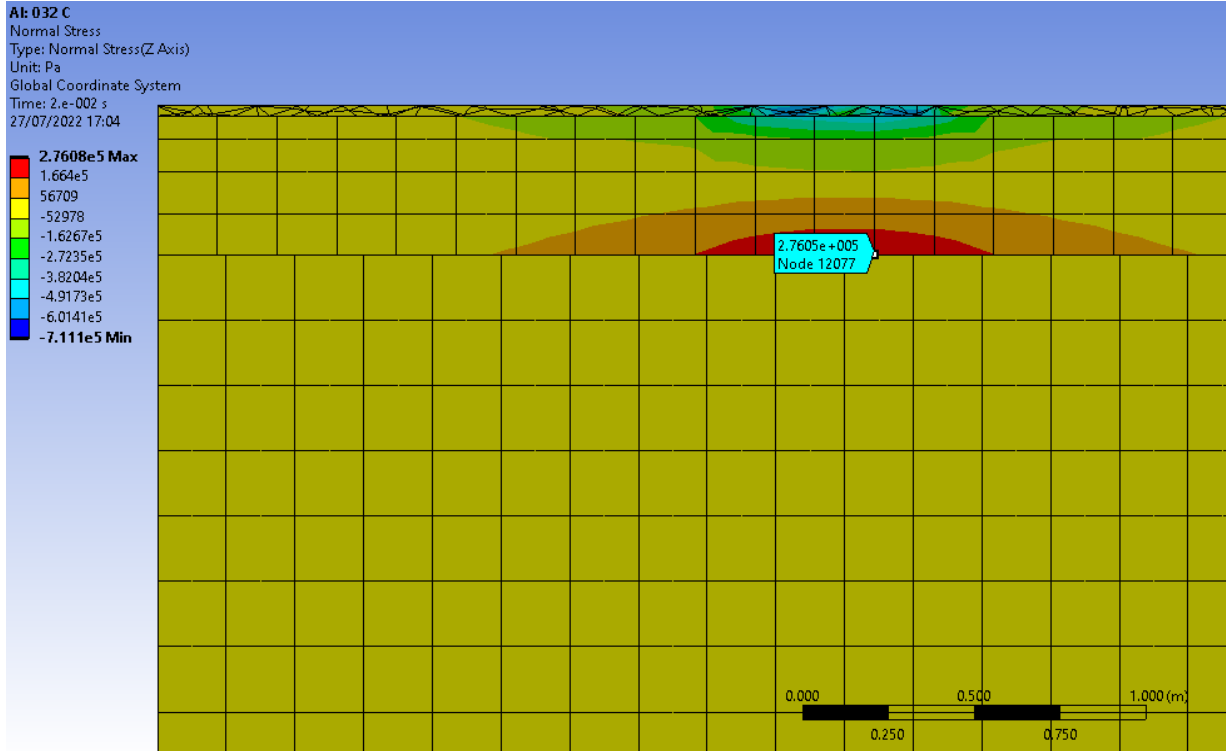


SECCIÓN 032 D=0

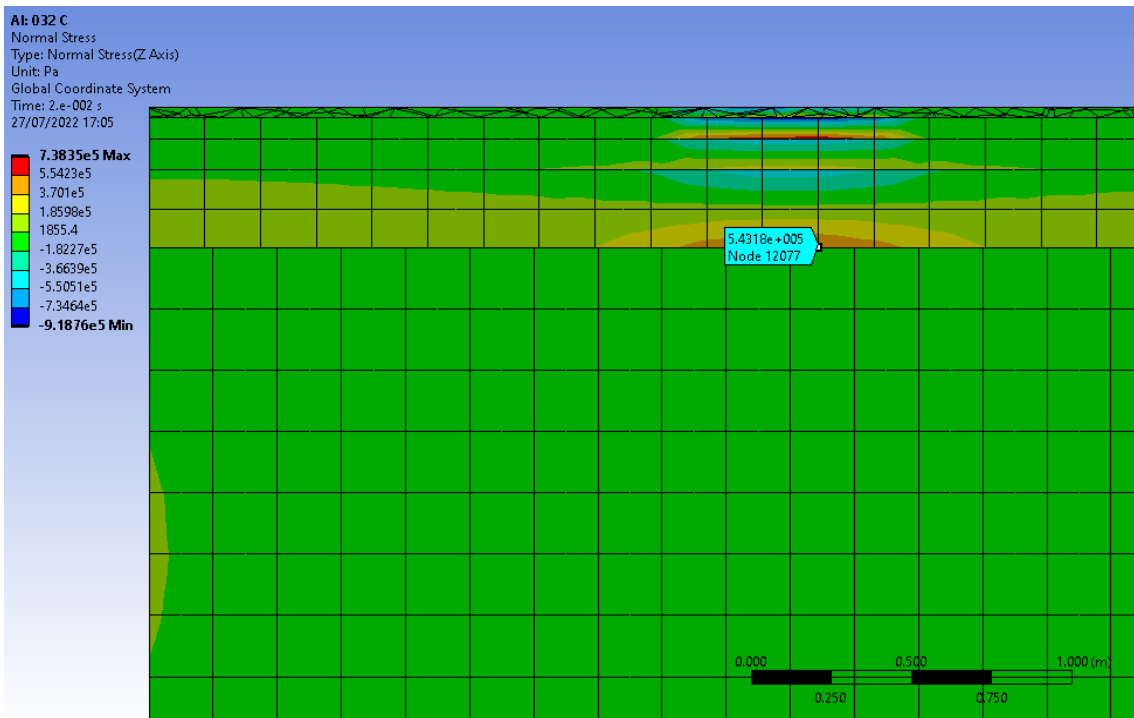
PUNTO CRÍTICO = MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO

$$\sigma_r/R_F = 1 - 0,065 \log N$$

σ_r unidas 2,76E+05



σ_r sin adherencia 5,43E+05



σ_r semiadherencia 4,10E+05 N 3,22E+07 Categoría de tráfico pesado T0



11.6 Resultados ANSYS 032 reforzada

SECCIÓN 032 D= 0, REFORZADA GEO1

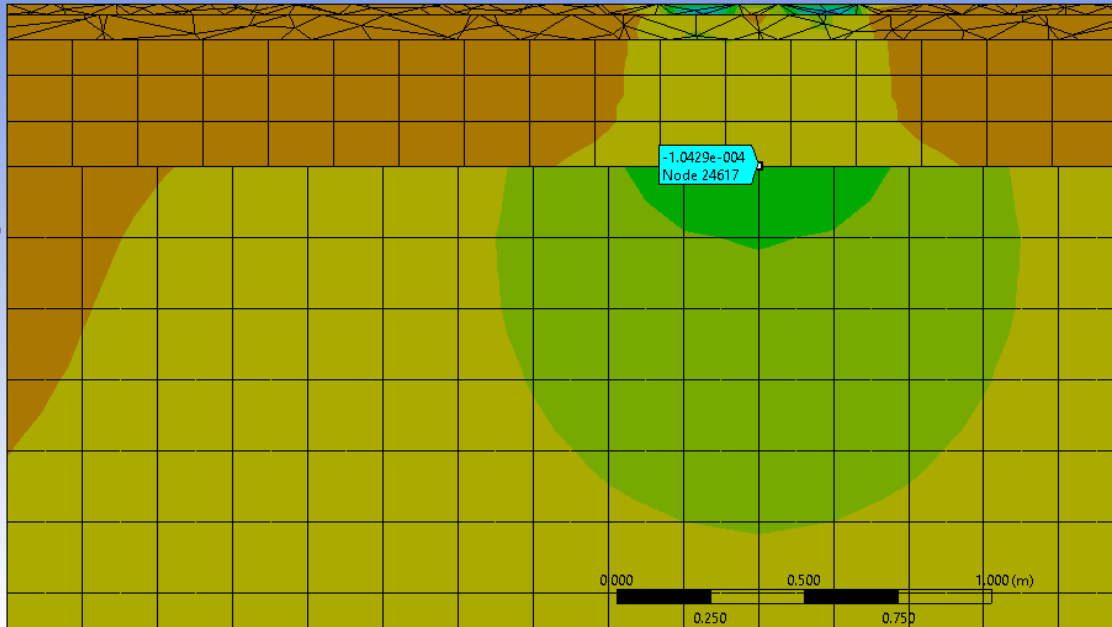
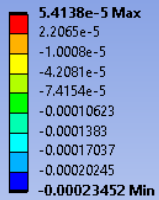
PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

EV=	-1,04E-04	N	5,20E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

AJ: Static Structural

Normal Elastic Strain 2
 Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 28/07/2022 9:52



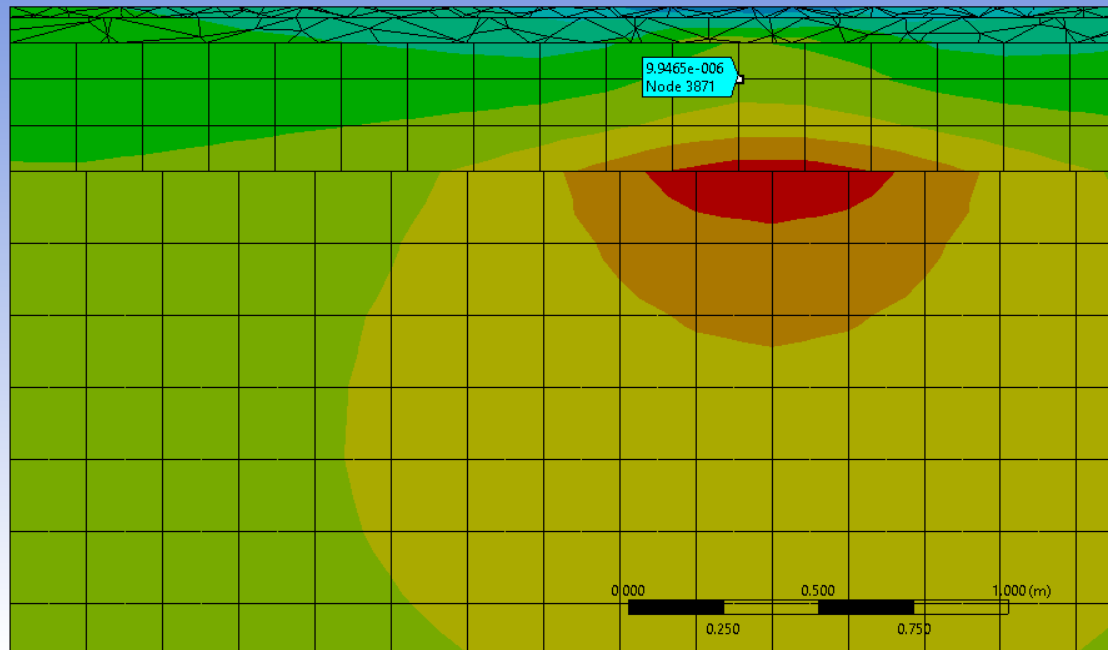
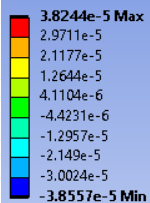
PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

ER=	9,95E-06	N	2,72E+10	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	----------	---	----------	-----------------------------	-----

AJ: Static Structural

Normal Elastic Strain
 Type: Normal Elastic Strain(Z Axis)
 Unit: m/m
 Global Coordinate System
 Time: 2.e-002 s
 28/07/2022 9:49



SECCIÓN 032 D= 0, REFORZADA GEO1

PUNTRO CRÍTICO = MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO

$$\sigma_r/R_f = 1 - 0,065 \log N$$

σ_r unidas 2,58E+05

AJ: Static Structural

Normal Stress

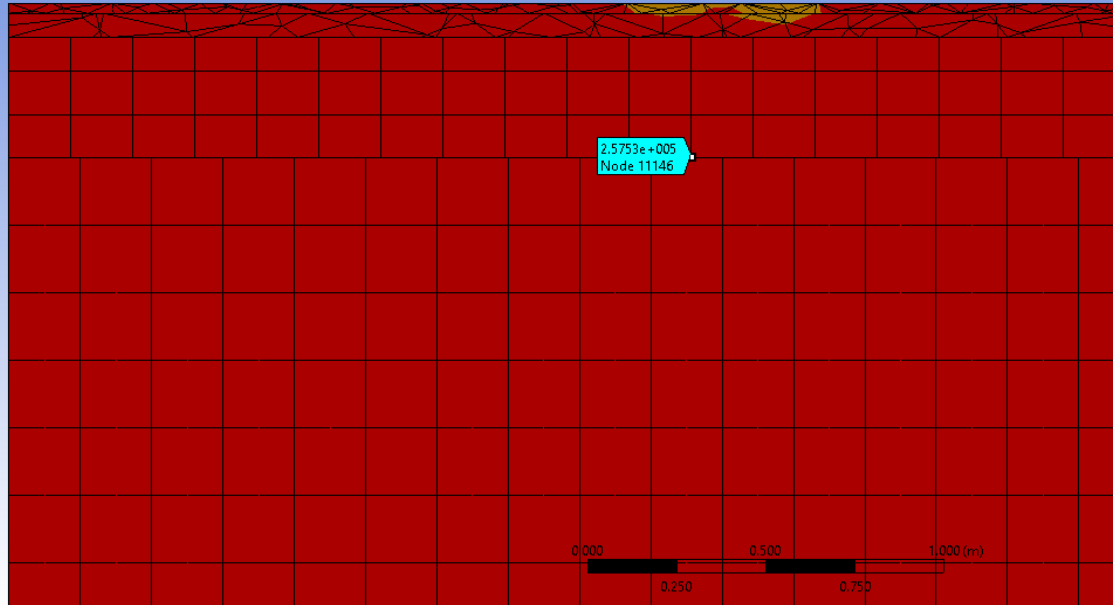
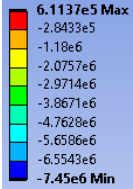
Type: Normal Stress(Z Axis)

Unit: Pa

Global Coordinate System

Time: 2.e-002 s

28/07/2022 9:53



σ_r sin adherencia 5,30E+05

AJ: Static Structural

Normal Stress

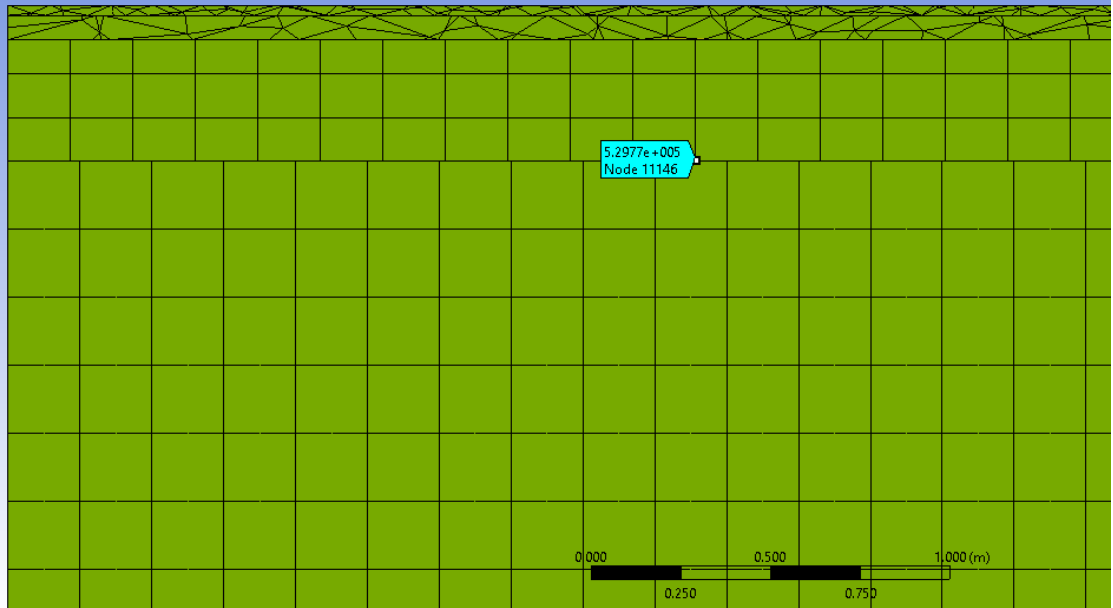
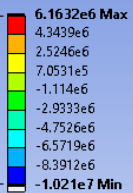
Type: Normal Stress(Z Axis)

Unit: Pa

Global Coordinate System

Time: 2.e-002 s

28/07/2022 9:55



σ_r semiadherencia 3,94E+05 N

6,52E+07 Categoría de tráfico pesado T00

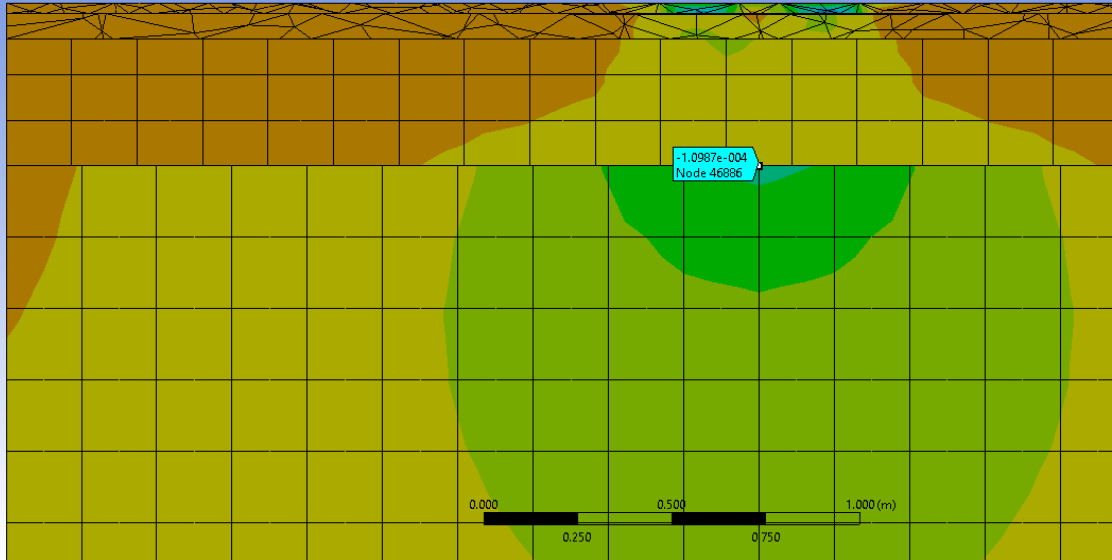
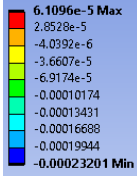
SECCIÓN 032 D= 0, REFORZADA GEO2

PUNTO CRÍTICO = EXPLANADA

$$\epsilon_v = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$$

EV=	-1,10E-04	N	4,22E+08	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	-----------	---	----------	-----------------------------	-----

AK: 032 GEO 2
Normal Elastic Strain 2
Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)
Unit: m/m
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
28/07/2022 10:08

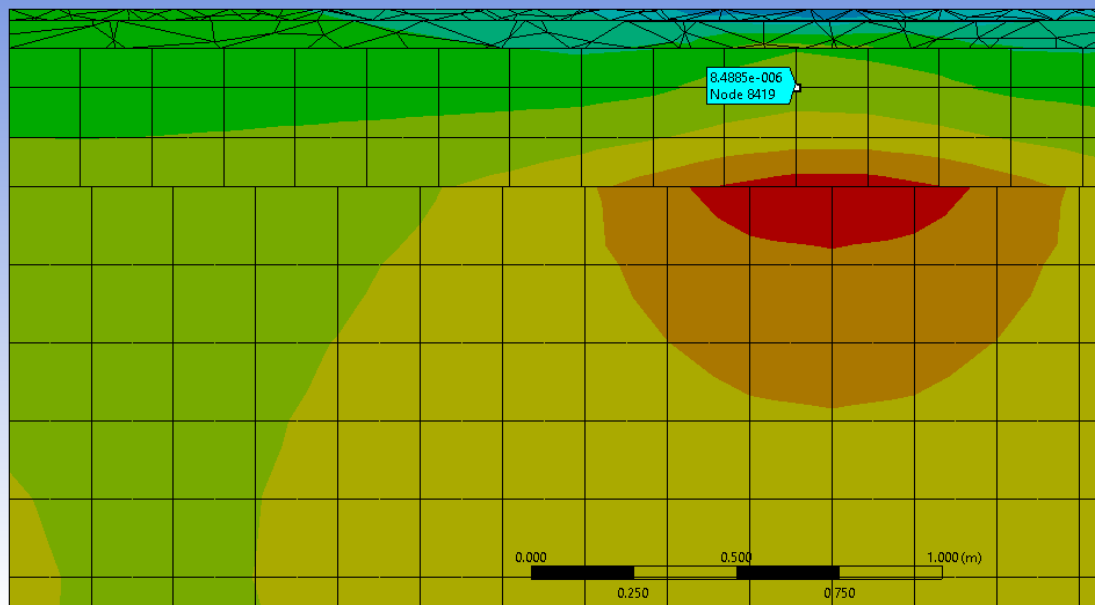
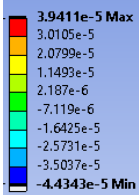


PUNTO CRÍTICO = MEZCLA BITUMINOSA

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

EV=	8,49E-06	N	4,87E+10	Categoría de tráfico pesado	T00
-----	----------	---	----------	-----------------------------	-----

AK: 032 GEO 2
Normal Elastic Strain
Type: Normal Elastic Strain(Z Axis)
Unit: m/m
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
28/07/2022 10:08



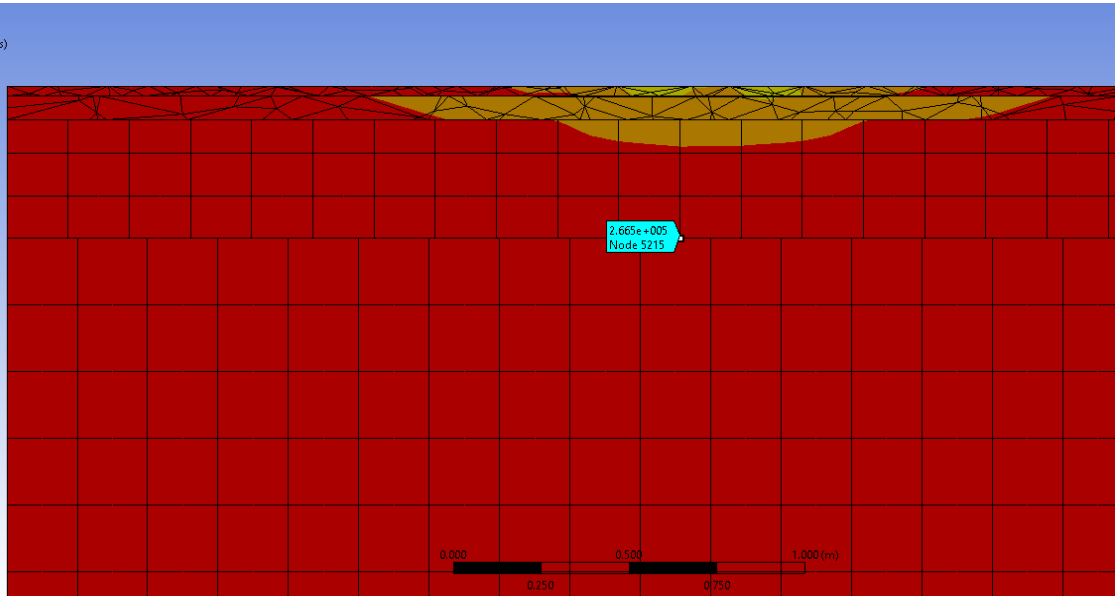
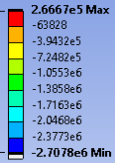
SECCIÓN 032 D= 0, REFORZADA GEO2

PUNTRO CRÍTICO = MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO

$$\sigma_r/R_F = 1 - 0,065 \log N$$

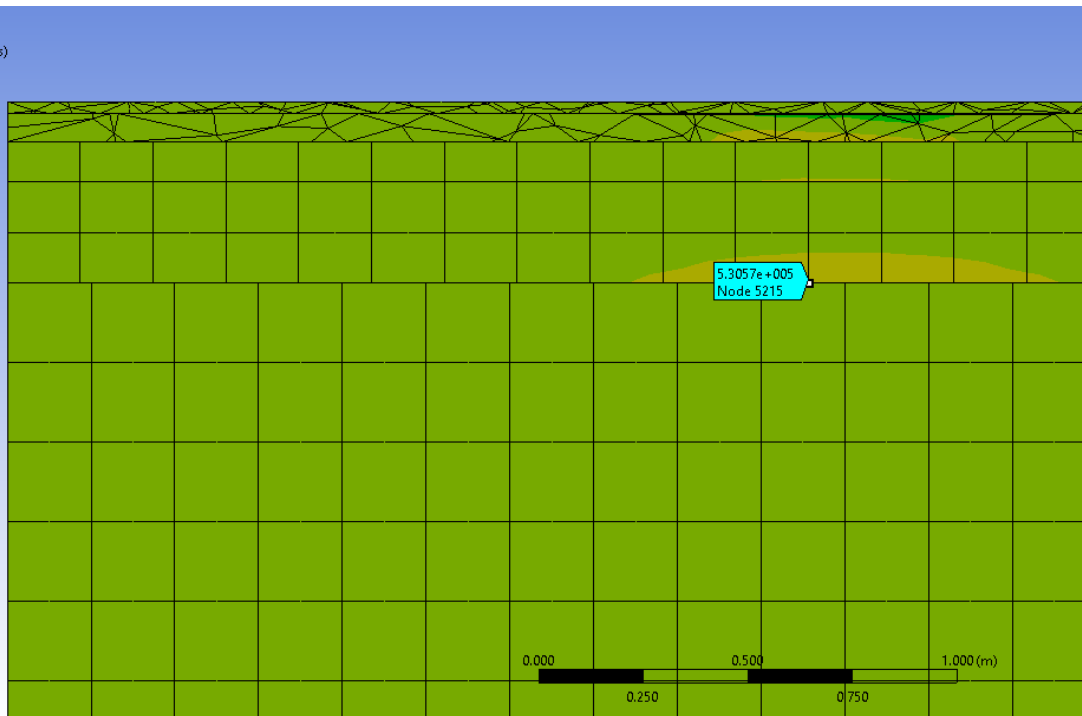
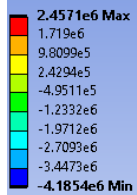
σ_r unidas 2,67E+05

AK: 032 GEO 2
Normal Stress
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
28/07/2022 10:09



σ_r sin adherencia 5,31E+05

AK: 032 GEO 2
Normal Stress
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 2.e-002 s
28/07/2022 10:11



σ_r semiadherencia 3,99E+05 N 5,25E+07 Categoría de tráfico pesado T00