



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

**DESARROLLO DE UN SISTEMA CONSTRUCTIVO DE REPARACIÓN DE
PAVIMENTOS DE HORMIGÓN CON LOSAS PREFABRICADAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DANIEL GUSTAVO THÖNE MIRANDA

**PROFESOR GUÍA:
FEDERICO DELFIN ARIZTIA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DAVID CAMPUSANO BROWN
MIGUEL FIGUEROA NEICUN**

**SANTIAGO DE CHILE
OCTUBRE 2012**

RESUMEN

El trabajo consistió en un estudio de carácter exploratorio sobre sistemas constructivos para pavimentos utilizando losas prefabricadas de hormigón.

Como primera etapa se investigó acerca de las soluciones implementadas fuera del país y respaldadas por parte de Departamentos de Transporte o Centros Universitarios Norteamericanos principalmente, para dar paso a la definición de dos soluciones que fueron evaluadas para su implementación como alternativa para la reposición de paños de pavimento agrietados en vías urbanas, y puesta en servicio, con pocas horas de interrupción de la vía.

En una segunda etapa, se trabajó en el diseño estructural y modelación de las dos soluciones definidas. La modelación se efectuó utilizando el programa ANSYS de elementos finitos, para verificar el comportamiento de los sistemas diseñados en cuanto a niveles de tensiones y deformaciones del conjunto de paneles ensamblados ante el paso de un eje vehicular simulado como un tren de carga.

Con los modelos de losas y con la participación de la empresa Constructora Pehuenche que impulsó esta investigación a través de un Proyecto Corfo junto a IDIEM como centro de investigación, se comenzó con la etapa 3, fabricando los moldajes que dieron forma a los distintos paneles con los que se probaron los paneles con los dos tipos de conexión. El lugar en donde se montaron los moldajes lo facilitó IDIEM, disponiendo de sus dependencias en Cerrillos, donde se confeccionaron las ocho losas que darían forma posteriormente al tramo de prueba.

La etapa 4, que consistió en construir un tramo de prueba para poder instalar las losas en él y así testear el comportamiento de los sistemas bajo altas cargas de uso, derivó en una serie de observaciones que llevaron a recomendar modificaciones al sistema, especialmente en el método de conexión machihembrado, puntos que se deberán tener presentes para un próximo trabajo.

Como resultado de estas experiencias se pudo constatar que el sistema barra-ranura fue el que arrojó los resultados más auspiciosos a la hora de realizar la modelación, obteniéndose un mejor traspaso de carga entre paneles que otorga mejor continuidad en el tramo, lo cual no quita que no pueda presentar alguna falla en las juntas debido a ciclos de carga. Durante la instalación, hubo losas que presentaron en algunos casos problemáticas para el ensamblaje, esencialmente por un tema de falta de compatibilidad en las dimensiones respecto al tramo de prueba construido, pero a la vez hubo losas cuyo montaje resultó sin contratiempos, llegando a instalarse en tiempos de alrededor de 3 minutos.

La reparación de pavimentos de hormigón mediante las losas prefabricadas estudiadas requiere de la estandarización del proceso de fabricación y a un cierto grado de experiencia en lo que a montaje e instalación refiere. Si bien el estudio tuvo un carácter de exploración, se pudieron materializar dos soluciones que deberán perfeccionarse a futuro, pero que demostraron que es factible analizar esta solución a la hora de definir una metodología de trabajo de reparación de pavimentos rígidos.

*Este trabajo va dedicado a todos los que me apoyaron en este camino,
especialmente a mis viejos...
Para ti Mamá, para ti Papá, este es su proyecto finalizado...
los amo viejitos!*

AGRADECIMIENTOS

Para comenzar, le tengo que agradecer enormemente a mi familia, por el apoyo incondicional y la oportunidad que me dieron al haber apechugado en darmel una educación envidiable, la persona que soy hoy es fruto de todo su esfuerzo, les estaré eternamente agradecido, los amo!

Agradecer a mis grandes amigos y amigas... aquellas eternas amistades del colegio, junto a quienes he crecido a lo largo de mi vida... y a todas mis amistades nacidas durante esta etapa, a todos los que tienen un espacio en el corazón de este osornino...

Muchas gracias por todos esos buenos momentos que compartí con todos ustedes, pasajes que pretendo seguir escribiendo durante mi vida junto a su compañía...

Inmensamente feliz y agradecido,

su Figo, Tene, Lucho, Tenedor, y otros...

INDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	13
1.1 MOTIVACIÓN	13
1.2 ALCANCE	13
1.3 METODOLOGÍA	14
1.3.1 Revisión de la literatura	14
1.3.2 Diseño	14
1.3.3 Modelación	14
1.3.4 Fabricación de losas	14
1.3.5 Construcción tramo de prueba	15
1.3.6 Análisis de la solución propuesta	15
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LA LITERATURA	15
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PREFABRICADOS PARA CONSTRUCCIÓN O REPARACIÓN DE PAVIMENTOS	16
2.2 MÉTODO MICHIGAN	16
2.2.1 Nivelación usando espuma de poliuretano de alta densidad	20
2.2.2 Nivelación usando relleno fluido	21
2.3 FORT MILLER SUPER-SLAB	21
2.4 MÉTODO URETEK	25
2.5 MÉTODO KWIK	28
2.6 PAVIMENTO PREFABRICADO DE HORMIGÓN PRETENSADO (TEXAS)	30
2.6.1 Panel Intermedio	30
2.6.2 Panel de Borde	31
2.6.3 Paneles Centrales	32
2.7 PAVIMENTOS URBANOS REMOVIBLES (PUR)	36
2.8 TABLA RESUMEN	39
CAPÍTULO III: DISEÑO	40
3.1 PREDISEÑO	40
3.1.1 Paneles con sistema de barras de traspaso	40
3.1.2 Paneles con sistema machihembrado	43
3.2 DISEÑO MEDIANTE MÉTODO AASHTO	46
3.2.1 Resistencia de Diseño.	49
3.2.2 Suelo.	49
3.3 TRÁFICO ACUMULADO	52
3.4 DISEÑO A IZAJE	54

3.5 ARMADO DE LOSAS	58
3.6 COMENTARIOS	59
CAPÍTULO IV: MODELACIÓN DE LOS SISTEMAS PROPUESTOS.....	60
4.1 DISEÑO PROTOTIPOS MEDIANTE SOFTWARE SOLIDWORKS.....	61
4.1.1 Piezas.....	62
4.2 SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE ANSYS v.13	64
4.2.1 Teorías de falla.....	65
4.2.2 Propiedades de los materiales	66
4.2.3 Sistema barra-ranura	67
4.2.4 Sistema machihembrado	85
4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	105
CAPÍTULO V: FABRICACIÓN PANELES DE HORMIGÓN PREFABRICADO.....	106
5.1 MODELO MACHIHEMBRADO	106
5.2 MODELO BARRAS – RANURAS	107
CAPÍTULO VI: CONSTRUCCIÓN TRAMO DE PRUEBA	113
6.1 PROCEDIMIENTO CONSTRUCCIÓN TRAMO DE PRUEBA Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	115
6.1.1 Trazado y excavación	115
6.1.2 Remoción de pavimentos de hormigón	116
6.1.3 Preparación de la subrasante.....	117
6.1.4 Subbase granular, CBR ≥ 50%.....	117
6.1.5 Hormigonado de bermas y losas de extremos, y colocación de arena.....	118
6.1.6 Inserción de barras de traspaso	120
6.1.7 Colocación de arena.....	120
6.1.8 Procedimiento montaje paneles prefabricados	121
CAPÍTULO VII: ANÁLISIS DE SOLUCIÓN.....	123
7.1 TIEMPO	123
7.2 COSTOS	123
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES.....	126
CAPÍTULO IX: BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	128
CAPÍTULO X: ANEXOS	132
10.1 ANEXO A: DISEÑO DE ARMADURA A FLEXIÓN POR IZAJE	132
10.2 ANEXO B: ARMADURA EN PANELES	135
10.3 ANEXO C: IMÁGENES CONSTRUCCIÓN TRAMO DE PRUEBA Y MONTAJE DE LOSAS.....	139
10.4 ANEXO D: INFORME CARACTERIZACIÓN BASE Y SUBBASE GRANULAR TRAMO DE PRUEBA	147

INDICE DE FIGURAS

Figura II.1. A la izquierda moldaje con armadura y dowel bars, y a la derecha fijación de barras de transferencia.....	17
Figura II.2. A la izquierda hormigonado, y a la derecha aplicación textura superficial..	17
Figura II.3. Curado con arpillerías.	17
Figura II.4. A la izquierda: corte de losa a remover. A la derecha: cortes en la losa. ...	18
Figura II.5. Extracción losa dañada.	18
Figura II.6. Preparación base que recibirá al panel de hormigón prefabricado.	19
Figura II.7. Extracción de hormigón (ranuras).	19
Figura II.8. Limpieza de ranuras mediante aire comprimido y chorro de arena.	19
Figura II.9. Estructura de unión entre paneles mediante barras de transferencia.	20
Figura II.10. Inyección de espuma de poliuretano para nivelación	20
Figura II.11. A la izquierda: vaciado de relleno fluido. A la derecha: relleno de ranuras con grout.	21
Figura II.12. A la izquierda: panel Super-Slab cara con ranuras. A la derecha: panel Super-Slab cara con barras.....	22
Figura II.13. A la izquierda: Perforación agujeros para barras de transferencia. A la derecha: Inserción de barras de transferencia en pavimento existente.	22
Figura II.14. Montaje de paneles sistema Fort Miller Super-Slab.	23
Figura II.15. Esquema reparación intermitente mediante método Super-Slab.	23
Figura II.16. Esquema reparación continua mediante sistema Super-Slab.	24
Figura II.17. Sellado de ranuras con grout de alta resistencia.....	24
Figura II.18. A la izquierda: Remoción pavimento dañado. A la derecha: Limpieza de base y secado de pavimento.....	25
Figura II.19. A la izquierda: montaje panel. A la derecha: perforación agujeros de nivelación.	26
Figura II.20. A la izquierda: corte de ranuras y juntas. A la derecha: ranuras y junta transversal.....	26
Figura II.21. A la izquierda: placas y ranuras. A la derecha: placa y clip que asegura separación.....	27
Figura II.22. A la izquierda: colocación placa. A la derecha: detalle clip separando placa de paredes.	27
Figura II.23. A la izquierda: sellado de ranuras. A la derecha: unión finalizada.....	27
Figura II.24. Esquema panel sistema Kwik Slab.....	28
Figura II.25. Sistema de ensamblaje método Kwik.	28

Figura II.26. Sistema de acople método Kwik.....	29
Figura II.27. Esquema unión entre pavimento existente y panel Kwik Slab.	29
Figura II.28. Sellado de uniones mediante grout.	30
Figura II.29. Montaje completo de paneles.....	30
Figura II.30. Esquema de panel base.....	31
Figura II.31. Esquema de panel de borde.	31
Figura II.32. Esquema de panel central.....	32
Figura II.33. A la izquierda: capa de asfalto para base. A la derecha: colocación de material reductor de fricción.	33
Figura II.34. A la izquierda: colocación material epóxico. A la derecha: llave de corte (machihembrado).	34
Figura II.35. Junta de expansión empleada en pavimentos rígidos.....	34
Figura II.36. Montaje de paneles sobre material reducidor de fricción.	35
Figura II.37. A la izquierda: panel hexagonal de D=154 cm. A la derecha: estructura con sus capas respectivas.	36
Figura II.38. Estructura de paneles hexagonales independientes.	37
Figura II.39. Ensayo de cargas cíclicas mediante el LCPC Accelerated Load Testing Facility.	37
Figura II.40. Panel hexagonal con lengüeta para acople y transferencia de carga.	38
Figura III.1. Panel ranuras – barras vista cara A-D con barras.....	41
Figura III.2. Panel ranuras – barras vista cara B-C con detalle de ranuras.	41
Figura III.3. Panel ranuras – barras vista cara A-D.....	42
Figura III.4. Panel ranuras – ranuras.	42
Figura III.5. Panel ranuras – conexión macho.	43
Figura III.6. Panel conexión hembra – conexión macho.	44
Figura III.7. Panel conexión hembra - barras.....	45
Figura III.8. Correlación entre CBR y el Módulo de reacción de la sub-rasante (K).	51
Figura III.9. Ábaco aumento de K en relación al espesor de la sub-base.....	52
Figura III.10. Mallado de la losa con detalle de nodos y punto de apoyo.	54
Figura III.11. Distribución de momento en la dirección 11.....	55
Figura III.12. Distribución de momento en la dirección 22.	56
Figura III.13. Panel con posición de puntos de apoyo (anclajes) propuesta.....	57
Figura III.14. Losa de sistema machihembrado con conexión tipo hembra y tipo macho.	58

Figura III.15. Izquierda: corte eje A (conexión tipo macho). Derecha: corte eje B (conexión tipo macho).....	59
Figura III.16. Izquierda: corte eje A (conexión tipo hembra). Derecha: corte eje B (conexión tipo hembra).....	59
Figura IV.1. Esquema resumen etapas y funciones programas computacionales utilizados.	60
Figura IV.2. Panel sistema machihembrado con huellas en su superficie de rodado...	61
Figura IV.3. Barra de transferencia (1), lamina de teflón (2), grout relleno de ranura (3), panel ranura-macho (4), panel ranura-ranura (5), panel hembra-macho (6), panel barra-ranura (7), panel hembra-barra (8).....	62
Figura IV.4. Tramo sistema barra-ranura conformado por 4 losas prefabricadas. Existen dos secciones de pavimento existente (1 y 6), 3 paneles barra-ranura (2, 3 y 4), y un panel ranura-ranura (5).....	63
Figura IV.5. Tramo sistema machihembrado conformado por 5 losas prefabricadas. Numeración ascendente en la dirección del tránsito: sección de pavimento existente (1 y 7), panel ranura-macho (2), panel hembra-macho (3 y 4), panel hembra-barra (5) y panel ranura-ranura (6)	63
Figura IV.6. Sistema ranuras - barras de paneles prefabricados.....	67
Figura IV.7. Mallado de sistema de paneles ranuras - barras.	68
Figura IV.8. Detalle mallado de barras y grout.	69
Figura IV.9. Soporte elástico aplicado en la base del sistema (color morado).....	70
Figura IV.10. Soporte de tipo fixed en bordes de losas correspondientes al pavimento existente.	70
Figura IV.11. Secuencia avance de cargas, desde la primera carga a la cuarta, desde izquierda a derecha.....	71
Figura IV.12. Gráfico tiempo (pasos) v/s Presión	72
Figura IV.13. Ubicación carga en el momento de máximo esfuerzo de Von Mises.	73
Figura IV.14. Ubicación esfuerzo de Von Mises máximo.	73
Figura IV.15. Esfuerzo de Von Mises máximo en barra de traspaso.....	74
Figura IV.16. Close-up esfuerzo de Von Mises máximo en barra de traspaso.....	74
Figura IV.17. Gráfico esfuerzos máximos de Von-Mises por paso a lo largo del tramo.	75
Figura IV.18. Ubicación de carga al momento de producirse el máximo esfuerzo normal.	76
Figura IV.19. Ubicación esfuerzo normal máximo.	76
Figura IV.20. Máximo esfuerzo normal en grout.....	77
Figura IV.21. Close-up que muestra máximo esfuerzo normal ubicado en el grout.	77
Figura IV.22. Gráfico de máximos esfuerzos normales por paso a lo largo del tramo..	78

Figura IV.23. Ubicación de carga al momento de producirse la máxima deformación unitaria.....	78
Figura IV.24. Ubicación máxima deformación unitaria en el tramo.....	79
Figura IV.25. Máxima deformación unitaria desarrollada en el grout.....	79
Figura IV.26. Close-up a ubicación de máxima deformación unitaria desarrollada en el grout.....	80
Figura IV.27. Gráfico de esfuerzos máximos por paso (y tiempo) a lo largo del tramo.80	
Figura IV.28. Ubicación de carga al momento de producirse la deformación total máxima.....	81
Figura IV.29. Ubicación deformación total máxima en el tramo.....	81
Figura IV.30. Close-up punto del panel donde se genera la deformación máxima.....	82
Figura IV.31. Gráfico de deformación máxima por paso y tiempo a lo largo del tramo.82	
Figura IV.32. Deformada en pavimentos rígidos convencionales.....	83
Figura IV.33. Ubicación de esfuerzo de corte máximo en el tramo.	83
Figura IV.34. Esfuerzo de corte máximo del tramo ubicado en la barra.	84
Figura IV.35. Close-up a barra con esfuerzo de corte máximo.....	84
Figura IV.36. Gráfico de esfuerzo de corte máximo por paso (y tiempo) a lo largo del tramo.	85
Figura IV.37. Sistema machihembrado de paneles prefabricados.	85
Figura IV.38. Mallado de paneles y refinado en sus bordes.	86
Figura IV.39. Mallado de barras de traspaso de carga.	87
Figura IV.40. Mallado de grout.	87
Figura IV.41. Mallado de placas de contacto conexión machihembrada.....	88
Figura IV.42. Soporte fijo asignado a cara transversal de paneles extremos (pavimento existente).....	89
Figura IV.43. Soporte fijo asignado a caras laterales de paneles extremos (pavimento existente).....	89
Figura IV.44. Soporte elástico en la base del sistema machihembrado.	90
Figura IV.45. Aplicación de presión en área rectangular correspondiente al apoyo del eje de ruedas, realizado tanto para el sistema machihembrado como para el sistema barra-ranura.	91
Figura IV.46. Gráfico tiempo (pasos) v/s Presión	91
Figura IV.47. Ubicación de carga al momento de producirse el máximo esfuerzo de Von Mises.....	92
Figura IV.48. Ubicación máximo esfuerzo de Von Mises en el tramo.....	92
Figura IV.49. Máximo esfuerzo de Von-Mises ubicado en la barra de transferencia....	93

Figura IV.50. Close-up a barra de traspaso donde se produce el máximo esfuerzo de Von-Mises.....	93
Figura IV.51. Gráfico de máximos esfuerzos de Von-Mises por paso a lo largo del tramo.....	94
Figura IV.52. Ubicación carga al momento de producirse el esfuerzo normal máximo.	94
Figura IV.53. Ubicación dentro del tramo del esfuerzo normal máximo.	95
Figura IV.54. Esfuerzo normal máximo ubicado en el grout.	95
Figura IV.55. Close-up a pieza de grout donde se ubica el esfuerzo normal máximo.	96
Figura IV.56. Gráfico esfuerzos normales máximos por paso (tiempo).	96
Figura IV.57. Ubicación de la carga al momento de generarse la máxima deformación unitaria.	97
Figura IV.58. Ubicación en el tramo del lugar donde se desarrolla la máxima deformación unitaria.	97
Figura IV.59. Máxima deformación unitaria producida en el teflón.	98
Figura IV.60. Close-up a placa de teflón donde ocurre la máxima deformación unitaria.	98
Figura IV.61. Gráfico de deformaciones máximas en cada paso a lo largo del tramo..	99
Figura IV.62. Ubicación de carga al momento de producirse la mayor deformación....	99
Figura IV.63. Ubicación de deformación total máxima en el tramo.....	100
Figura IV.64. Máxima deformación total ubicada en la placa de teflón.....	100
Figura IV.65. Close-up máxima deformación en la placa de teflón.....	101
Figura IV.66. Gráfico deformaciones totales máximas por paso a lo largo del tramo.	101
Figura IV.67. Escalonamiento en junta transversal de pavimento tradicional producto del bombeo.....	102
Figura IV.68. Ubicación de la carga al momento de producirse el máximo esfuerzo de corte.	102
Figura IV.69. Ubicación del máximo esfuerzo de corte en el tramo.....	103
Figura IV.70. Máximo esfuerzo de corte ubicado en la barra de transferencia.....	103
Figura IV.71. Close-up sobre la barra que presenta el máximo esfuerzo de corte.	104
Figura IV.72. Gráfico esfuerzos de corte máximos por paso a lo largo del tramo.	104
Figura V.1. Pieza de moldaje correspondiente a la conexión tipo hembra.	108
Figura V.2. Pieza de moldaje que da forma a la conexión tipo macho.	108
Figura V.3. Pavimento de prueba en IDIEM Cerrillos utilizado como base.	109
Figura V.4. Ensanche de radier para cubrir el ancho de las losas prefabricadas.	109
Figura V.5. Ubicación de moldajes fijados a la base.	110

Figura V.6. Colocación de polietileno en la base, armadura y tubos para la inyección de grout	110
Figura V.7. Hormigonado de losas, hormigón que posteriormente fue vibrado y enrazado	111
Figura V.8. Losa hormigonada y siendo cubierta con polietileno para su mejor curado. Posteriormente se le aplicó adicionalmente una membrana de curado.	111
Figura V.9. Losa descimbrada con sistema machihembrado.	112
Figura V.10. Losa sistema barra-ranura con prácticamente la totalidad de moldaje retirado.	112
Figura VI.1. Vista en planta de la construcción en terreno que acogió al sistema de losas prefabricadas.	113
Figura VI.2. Corte en eje A de la Figura 7.1.	113
Figura VI.3. Corte en el eje B de la Figura 7.1.....	114
Figura VI.4. Tramo de prueba, que contempla los dos sistemas propuestos.	114

INDICE DE TABLAS

Tabla II.1. Características de los diferentes métodos presentados.....	39
Tabla III.1. Factores de Equivalencia AASHTO para ejes simples de rueda doble con un espesor de losa de $e= 23\text{cm}$	47
Tabla III.2. Factores de Equivalencia AASHTO para ejes tandem de rueda doble con un espesor de losa de $e=23\text{cm}$	47
Tabla III.3. Factores de Equivalencia AASHTO para ejes tridem de rueda doble con un espesor de losa de $e=23\text{cm}$	48
Tabla III.4. Requisitos subbase para pavimentos rígidos.....	50
Tabla III.5. Bandas granulométricas cerradas.....	50
Tabla III.6. Momentos máximos.....	57
Tabla IV.1. Propiedades de los distintos materiales utilizados.....	66
Tabla IV.2. Tamaño elementos finitos de cada elemento.	68
Tabla IV.3. Tamaño elementos finitos de cada elemento	86
Tabla V.1. Cantidad de paneles a fabricar por cada uno de los 5 tipos.	107
Tabla VII.1. Comparación en tiempo de desarrollo para 50m^2 de reparación de calzada.	123
Tabla VII.2. Comparación de costos entre el método de hormigonado in-situ y el de losas prefabricadas para un metro cuadrado de losa de espesor 20cm.	124

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Hoy en día, y a medida que los medios de masas, en específico el transporte vehicular, se ven incrementados, los requerimientos impuestos para el buen desarrollo y mantenimiento de las vías se vuelven cada vez más exigentes. Es por esto que se deben desarrollar nuevas tecnologías que puedan sustentar en plenitud la prestación de los servicios de reparación de vías en forma eficiente.

Las reparaciones de pavimentos utilizando losas de hormigón prefabricado representan una alternativa a las reparaciones convencionales con hormigón in situ, especialmente en situaciones donde el volumen de tráfico es importante y donde la consideración de los costos asociados al cierre de las vías, es muy relevante.

La tecnología de pavimentos prefabricados es un proceso innovador que se ha demostrado puede satisfacer la necesidad de efectuar reparaciones y rehabilitaciones rápidas de pavimentos de hormigón, tanto urbanos como en carreteras. Las losas de hormigón prefabricadas, como su nombre lo indica, se construyen en plantas de fabricación especializadas, se transportan al lugar de la obra y se instalan en una fundación preparada (existente). Los componentes del sistema necesitan de muy poco tiempo para que el trabajo pueda ser habilitado al tránsito, ya que desarrollan resistencias tempranas y necesitan de muy poco o ningún curado, y es aquí donde se expresa la gran ventaja sobre otros tipos de sistemas constructivos: la pronta reparación del pavimento dañado y a la vez pronta apertura al tránsito regular, reduciendo así costos asociados al tema de seguridad vial y los peligros que conlleva el tener cerrada una o más pistas en una carretera, así como reducir las molestias por tránsito de maquinaria pesada, cierre de calles y los ruidos molestos que afectan a los vecinos de la obra.

1.2 Alcance

El alcance del estudio es poder realizar una revisión acabada a la literatura en lo que a pavimentos de hormigón con losas prefabricadas refiere, a partir de la cual se planteen prototipos de losas prefabricadas que puedan ser adoptados para poder estudiarlos y posteriormente probarlos en terreno.

Este desarrollo considera el análisis teórico, que implica el diseño estructural de las piezas, además de la modelación de los sistemas propuestos sometiéndolos a altas cargas de uso. Posteriormente se materializarán y se redactarán las especificaciones técnicas a tener presente al momento de querer llevar a cabo un trabajo de ésta índole. Analizar la factibilidad de poder efectuar un trabajo de reposición utilizando losas prefabricadas, estudiando sus ventajas y desventajas.

1.3 Metodología

La metodología empleada para poder llevar a cabo el estudio exploratorio de desarrollo de un sistema de reparación de pavimentos de hormigón mediante losas prefabricadas se basa en 6 etapas de investigación y desarrollo: la revisión de la literatura, la elaboración de los diseños de prototipos, la modelación de los prototipos, la fabricación de los tipos de losas seleccionadas para la puesta en prueba, la construcción de un tramo de prueba en donde se puedan probar las soluciones propuestas y la etapa de redacción de las especificaciones técnicas con el procedimiento de trabajo a seguir al momento de querer implementar la solución. Importante señalar que para poder llevar a cabo el presente estudio, se contó con el constante apoyo de IDIEM como centro de investigación, y de la Constructora Pehuenche Ltda. para la ejecución de los distintos trabajos considerados en la implementación de las soluciones constructivas.

1.3.1 Revisión de la literatura

Como primera etapa del estudio, se realizó una revisión a la literatura internacional, recopilando toda la información acerca de estudios académicos, proyectos que se están estudiando y que se hayan materializado, material que maneje la empresa privada, normativa relacionada acerca de las exigencias mínimas de calidad que estos elementos deben tener, y así sucesivamente.

1.3.2 Diseño

En base a la información recopilada, se plantearon dos soluciones de losas prefabricadas para poder diseñarlas, definiendo sus dimensiones, los tipos de conexión entre losas que se implementaron, el armado que deben llevar acorde a las solicitudes a las cuales serán expuestos, y durabilidad en lo que concierne a ejes equivalentes que podrán transitar durante su vida útil (ESAL).

1.3.3 Modelación

Los diseños de sistema de paneles elaborados se evaluaron mediante un programa de modelación por elementos finitos, siendo en este caso ANSYS el software elegido. La idea es poder analizar aspectos de resistencia, capacidad de carga, dimensionamiento, sistemas de unión y durabilidad de las soluciones, al ser los paneles sometidos a cargas de uso generadas por ejes de vehículos pesados.

1.3.4 Fabricación de losas

Se fabricaron las losas con los sistemas de conexión seleccionados, y acorde a una cierta configuración de paneles que se deseó probar en terreno. Se detallan las especificaciones a considerar al momento de confeccionarlas, como tipos de material, armadura considerada, tolerancias entre otros.

1.3.5 Construcción tramo de prueba

Después de la implementación del sistema de prefabricado, se puso a prueba el sistema de losas prefabricadas en un tramo de prueba, tramo facilitado para el estudio por parte de la planta de hormigones Sobarzo en la comuna de lo Espejo, en donde fueron sometidas las losas a altas exigencias de carga por parte de los camiones y maquinarias que transitan dentro de las dependencias de la planta. La etapa consideró la construcción del tramo de prueba dentro del que posteriormente se instalaron las losas, y el montaje de ellas. Se redactaron las especificaciones técnicas a tener presentes al momento de querer realizar un trabajo de reparación de pavimento rígido mediante la instalación de paneles prefabricados.

1.3.6 Análisis de la solución propuesta

Se realizó una comparación entre la reparación de pavimentos mediante losas prefabricadas y mediante hormigonado in-situ, donde se detallan las diferencias que presentan ambas soluciones en factores relevantes como lo son el tiempo y los costos.

CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LA LITERATURA

La finalidad de esta etapa, es poder indagar acerca del estudio, desarrollo e implementación de sistemas de reparación y/o construcción de pavimentos de hormigón mediante losas prefabricadas (del mismo material) en otros países, para poder informarse y comenzar a forjarse una idea acerca de los distintos diseños que puedan tener las losas, además de los procedimientos a seguir al momento de tener que montar estos paneles prefabricados en terreno, con todas las consideraciones que esto contempla.

Durante esta etapa se realizó una exhaustiva revisión a documentos que se manejan en el exterior respecto a este sistema constructivo, como por ejemplo, el material que tiene a disposición del público general la AASHTO y la FHWA (Federal Highway Administration), así como también los documentos de los cuales disponen las distintas Administraciones de Transporte y Autopistas de Estados en Estados Unidos y Canadá, y el Laboratorio Central de Puentes y Caminos en París, Francia. Todos ellos han venido empleando novedosos sistemas constructivos desde ya hace más de 10 años en distintas reparaciones y construcciones de vías, tanto de carácter urbano como autopistas de alta velocidad.

En el presente capítulo se dan a conocer seis métodos de reparación en base a losas prefabricadas para pavimentos de hormigón, detallando sus principales características. Estos métodos han sido comparados, considerando las siguientes variables: detalles de fabricación, procedimientos de colocación, tratamiento de la base, sistema de nivelación, moldaje, juntas y controles.

2.1 Descripción general de los sistemas constructivos prefabricados para construcción o reparación de pavimentos

En la actualidad, las prácticas constructivas en Estados Unidos, Canadá y Francia han incorporado distintos métodos de montaje de paneles prefabricados de hormigón, cada uno con un tipo de panel característico y una modalidad de montaje propia, como solución para la rehabilitación de pavimentos de hormigón e incluso para la construcción.

En esta sección se detallarán 6 métodos constructivos, especificando el tipo de panel que utilizan con sus respectivas características y el procedimiento para su instalación considerando material y equipo para ello.

Los 6 métodos que se presentan para su posterior discusión y evaluación son:

- Método Michigan
- Método Fort Miller Super-Slab
- Método Uretek
- Método Kwik
- Pavimento prefabricado de hormigón pretensado (Texas)
- Pavimentos urbanos removibles (PUR)

2.2 Método Michigan

Éste método, el cual se encuentra para su uso general, consiste en la instalación de paneles prefabricados de hormigón armado, los cuales poseen unas barras de transferencia, conocidas también como dowel bars, las cuales sobresalen un 50% fuera del panel prefabricado, para insertarse en otro panel prefabricado o en una losa de pavimento existente. A continuación se detalla la metodología empleada para poder llevar a cabo éste método de montaje de paneles prefabricados.

Antes de fabricar los paneles, es necesario saber cuáles son las medidas de los paneles que se removerán. Conociendo lo anterior, se prepara el moldaje para poder instalar después la armadura y las dowel bars. Luego se hormigona la losa de forma convencional, cuidando de compactar como corresponda, de tal forma que se logre la uniformidad y compacidad del hormigón. Al término de la exudación del hormigón se le debe dar la textura requerida en la superficie. Posteriormente se curan los paneles con arpillerías saturadas de agua para mantener la humedad.



Figura II.1. A la izquierda moldaje con armadura y dowel bars, y a la derecha fijación de barras de transferencia.



Figura II.2. A la izquierda hormigonado, y a la derecha aplicación textura superficial.



Figura II.3. Curado con arpillerías.

Luego de identificada la sección de pavimento que se desea remover, y de contar ya con el o los paneles que se montarán, se deben generar los cortes con sierra en el perímetro de la sección a remover. Luego de removida la sección, se inserta los ganchos de izaje en la sección de pavimento, para poder ser sacada mediante algún sistema de grúa. Posteriormente a extraer el panel de pavimento y haber preparado la base de apoyo del panel, se deben aserrar en el en el pavimento adyacente las ranuras en las que se insertarán las barras de transferencia de carga. Estas secciones una vez que se cortan perimetralmente deben ser talladas mediante un martillo neumático.



Figura II.4. A la izquierda: corte de losa a remover. A la derecha: cortes en la losa.



Figura II.5. Extracción losa dañada.

Para todos los paneles, las bases deben ser tratadas de tal forma de que el panel al ser instalado no quede sobre el nivel superior del pavimento existente. A éste punto, debe haber sido limpiada la base de todo tipo de escombros que haya dejado la extracción de la pieza removida. Puede que no sea necesario humedecer la base.



Figura II.6. Preparación base que recibirá al panel de hormigón prefabricado.

Luego de remover el concreto se deben limpiar las zonas, esto se realiza con aire comprimido y, a continuación, para dar por finiquitada la limpieza, se aplica a cada sacado un chorro de arena. Cabe destacar que las ranuras se encuentran siempre en la zona de tránsito, por donde se desplazan los neumáticos (áreas externas de la pista). En las imágenes y figura a continuación se detalla el proceso de extracción y limpieza del sector, y el esquema de unión por medio de dowel bars.



Figura II.7. Extracción de hormigón (ranuras).



Figura II.8. Limpieza de ranuras mediante aire comprimido y chorro de arena.

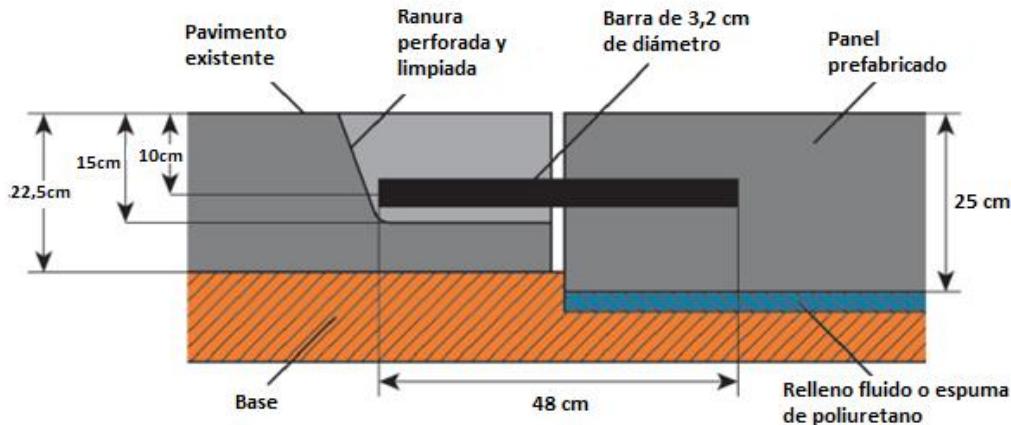


Figura II.9. Estructura de unión entre paneles mediante barras de transferencia.

La instalación y la nivelación final de paneles prefabricados se puede lograr de dos modos: por el método de nivelación mediante espuma de poliuretano (HDP), o por el método de nivelación mediante relleno fluido.

2.2.1 Nivelación usando espuma de poliuretano de alta densidad

Una vez que las ranuras han sido preparadas para recibir a los paneles, y los paneles han sido montados en la excavación, se debe nivelar la losa tapando todos los vacíos que puedan existir bajo ésta. Para esto las losas prefabricadas deben ser perforadas en 4 puntos como mínimo (va a depender del tamaño de ésta) para poder inyectar espuma de poliuretano. La espuma de poliuretano está hecha de dos líquidos químicos que combinados bajo calor forman una resistente y liviana sustancia espumosa. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, la espuma de poliuretano desarrolla en 15 minutos un 90% de su resistencia a la compresión, por lo que en pocos minutos el panel prefabricado puede someterse a cargas. Esta espuma desarrolla densidades del orden de 64kg/m^3 con una resistencia a la compresión de 414 a 1000kPa.



Figura II.10. Inyección de espuma de poliuretano para nivelación

2.2.2 Nivelación usando relleno fluido

Una vez preparada la base, excavando unos 25mm por debajo de la cota inferior del panel prefabricado que irá montado, se vacía el relleno fluido en la excavación. La idea es llegar a una cota tal que sumándole el espesor de la losa prefabricada se alcance la cota de superficie. Por experiencias en pruebas en el estado de Michigan, USA, la dosificación empleada para este relleno fluido fue de 1020,6kg de arena, 56,7kg de cemento, 136,1kg de agua, y 118ml de aditivo incorporador de aire. Una vez que se verifica la elevación de la losa y se considera aceptable, las ranuras de los dowels son llenadas con grout y las juntas son selladas.



Figura II.11. A la izquierda: vaciado de relleno fluido. A la derecha: relleno de ranuras con grout.

2.3 Fort Miller Super-Slab

Este método constructivo, patentado por la empresa The Fort Miller Co. se basa en paneles prefabricados en cuyos dos extremos (los dos en la dirección del tránsito) contiene un sistema de unión de dowels y ranuras. Es una conexión macho-hembra, en donde las ranuras se encuentran en la parte inferior del panel. A la vez, estos paneles se construyen con ganchos de izaje al igual que el método anterior.



Figura II.12. A la izquierda: panel Super-Slab cara con ranuras. A la derecha: panel Super-Slab cara con barras.

La secuencia de construcción consiste en remover el pavimento existente, limpiar y nivelar la base que recibirá el panel prefabricado, montaje del panel, grouting del panel, y sellado de las juntas.

Luego de haber removido el pavimento se prepara la base: para esto se utiliza una regla emparejadora con la cual se debe lograr una tolerancia de 3 mm entre la profundidad de la excavación y el espesor del panel prefabricado.

Antes de montar el panel, la base es humedecida con un fino spray de agua para poder facilitar el posterior grouting de las losas. Además de lo anterior, se debe perforar uno de los pavimentos adyacentes para luego insertar los dowels (fijados mediante grout) que recibirán al panel y se acoplarán a las ranuras de éste.



Figura II.13. A la izquierda: Perforación agujeros para barras de transferencia. A la derecha: Inserción de barras de transferencia en pavimento existente.

El montaje se realiza colocando los paneles desde el pavimento adyacente con dowels, hasta el final del tramo en reparación, en donde se conectan los paneles al pavimento existente en buen estado, en cuya cara se insertan, al igual que en la losa del inicio del tramo, unos dowels en los sectores por donde ejercen presión los neumáticos (partes

externas de las pistas), por lo que el esto conlleva a que el último panel prefabricado debe poseer ranuras en ambos extremos.

Los paneles al ir siendo montados se deben separar mediante un antiadherente, por lo que se coloca una espuma en pequeñas cantidades para prevenir daños al momento de ensamblarse los paneles, donde se suelen rozar.



Figura II.14. Montaje de paneles sistema Fort Miller Super-Slab.

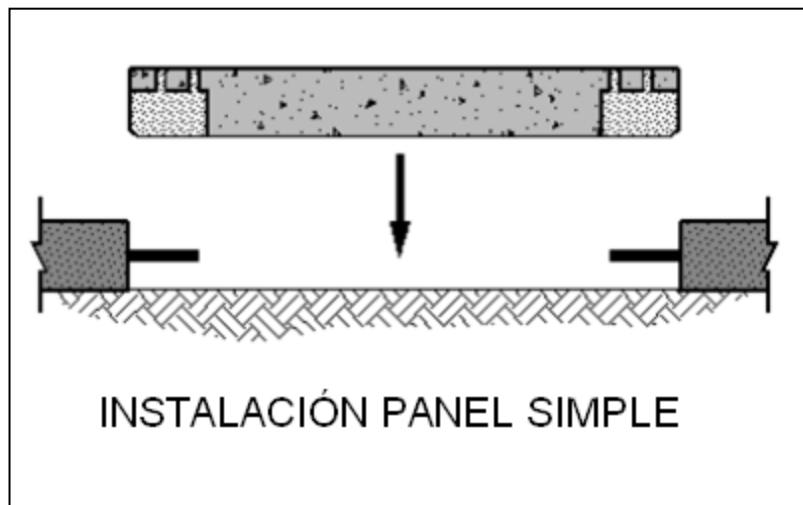


Figura II.15. Esquema reparación intermitente mediante método Super-Slab.

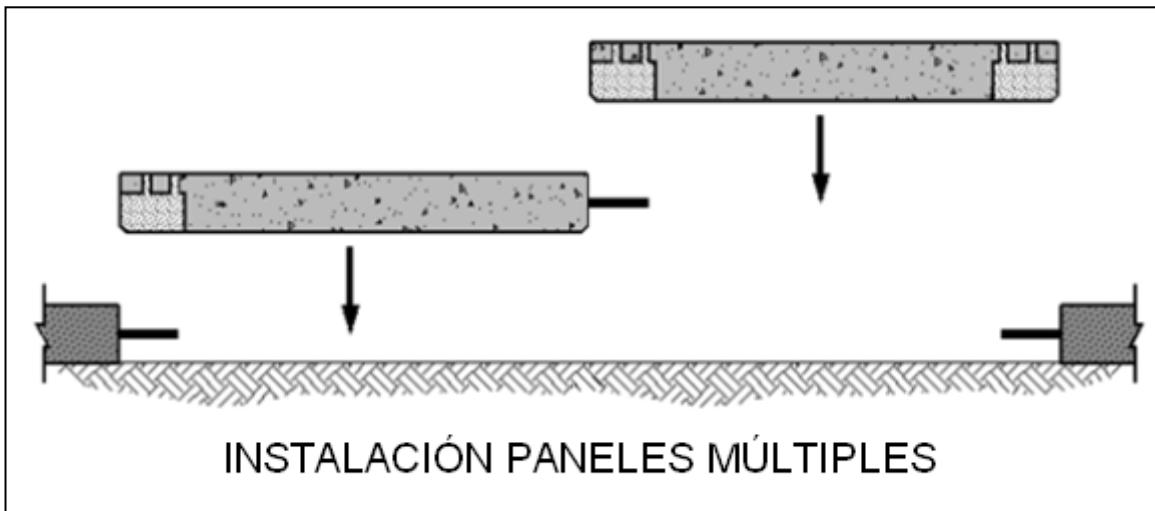


Figura II.16. Esquema reparación continua mediante sistema Super-Slab.

Luego de ser puesto el último panel, las ranuras de unión son selladas con grout de rápida colocación, contando con aproximadamente 10 minutos para el sellado de una junta. Por especificación técnica, se requiere que el grout pueda alcanzar una resistencia a la compresión de aproximadamente 17MPa en un lapso de 8 hrs.



Figura II.17. Sellado de ranuras con grout de alta resistencia.

Después de sellar todas las ranuras, se procede a inyectar el grout de nivelación por medio de los agujeros de inyección, bombeándose hasta que emerja por el agujero en el lado opuesto del panel. La idea es ir inyectando de forma lenta el grout para de esta forma tener controlada la suspensión que puede llegar a sufrir el panel.

Para finalizar se sellan las juntas y si es necesario se coloca material bituminoso en las bermas para poder parcharlas.

2.4 Método Uretek

Método patentado por la empresa Uretek, en donde como primera etapa, al igual que las anteriores, los paneles dañados deben ser cortados mediante sierra en su perímetro para posteriormente ser demolidos o removidos por grúa. Una vez hecho esto, la base expuesta se limpia mediante aire comprimido y, además, se aplica aire caliente para secar las caras que quedan expuestas en el pavimento para eliminar los rastros de humedad. Adicionalmente se puede sellar la base con un producto denominado Uretek 486, creando una capa de espesor 25 mm con este material.



Figura II.18. A la izquierda: Remoción pavimento dañado. A la derecha: Limpieza de base y secado de pavimento.

Los paneles prefabricados son transportados al lugar de trabajo, para luego ser montados sobre la excavación preparada. Con un taladro para concreto se perforan los agujeros por donde se inyectará la espuma de poliuretano.

La espuma de poliuretano es inyectada para poder nivelar el panel con respecto al pavimento adyacente existente, de tal manera también de poder eliminar cualquier vacío que se pueda producir entre la base y el panel. Una vez alcanzada la cota se sellan los agujeros con grout de alta resistencia.



Figura II.19. A la izquierda: montaje panel. A la derecha: perforación agujeros de nivelación.

Para la preparación de la junta, se debe aserrar el hormigón para generar ranuras de aproximadamente 19 mm de espesor que puedan cobijar las placas de fibra de vidrio, cuyas dimensiones son 0,9 m de largo, 127 mm de ancho y 6 mm de espesor.



Figura II.20. A la izquierda: corte de ranuras y juntas. A la derecha: ranuras y junta transversal.

Luego de hechas las ranuras mediante sierra, se les aplica un chorro de arena para poder limpiarlas y se les aplica aire caliente para eliminar rastros de humedad, de tal manera de prevenir algún tipo de reacción con el producto Uretek 600.

Posteriormente a la limpieza de la ranura, se insertan las placas de fibra de vidrio, que vienen con unos clips que sirven de soporte para que las placas no queden apoyadas a las paredes del pavimento. Una vez insertadas las placas, las ranuras se llenan con arena y Uretek 600. Finalmente las juntas se sellan con material compuesto por caucho en migas junto con un producto denominado Uretek 700.



Figura II.21. A la izquierda: placas y ranuras. A la derecha: placa y clip que asegura separación.



Figura II.22. A la izquierda: colocación placa. A la derecha: detalle clip separando placa de paredes.



Figura II.23. A la izquierda: sellado de ranuras. A la derecha: unión finalizada.

2.5 Método Kwik

El sistema Kwik Slab es un sistema patentado de construcción por medio de losas de hormigón prefabricado ideal para utilizar en áreas donde la interrupción del tránsito es muy perjudicial.

Este sistema puede ser utilizado para construcciones nuevas, extensiones y reparaciones de vías pavimentadas, paraderos de buses, losas para puentes, estacionamientos, pistas de aterrizaje, muelles, etc.

Este tipo de paneles posee una unión de acero con un sistema de acople, otorgándole mayor continuidad a los paneles, dado que permite ir uniéndolos por sus armaduras.

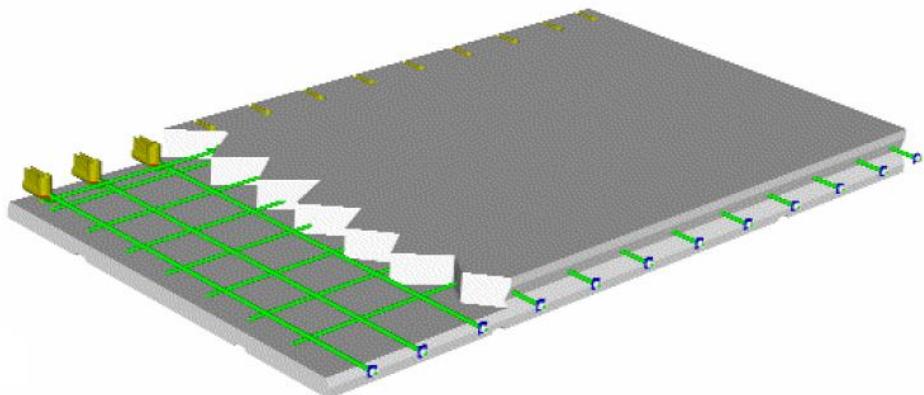


Figura II.24. Esquema panel sistema Kwik Slab.



Figura II.25. Sistema de ensamblaje método Kwik.



Figura II.26. Sistema de acople método Kwik.

Lo primero que se debe hacer es remover el paño de losa dañada, para así poder montar el panel prefabricado. Estos paneles vienen listos para ensamblarse, los agujeros los hacen en la planta, por lo que una vez montado sobre la base se les inyecta a través de los agujeros de nivelación el grout. Para el caso de las uniones prefabricado-existente, se detalla un esquema con el tipo de unión que se emplea. Simplemente se une mediante un grout de alta resistencia.

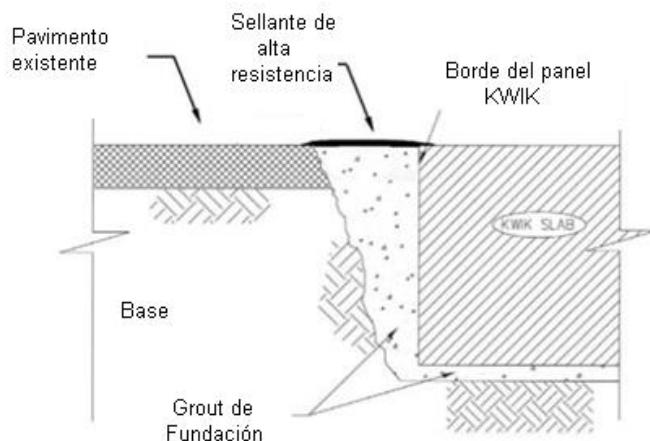


Figura II.27. Esquema unión entre pavimento existente y panel Kwik Slab.

Al igual que las uniones prefabricado-existente, las uniones de acople se rellenan con grout de alta resistencia, y para evitar el desplazamiento vertical entre paneles, éstos cuentan con llaves de corte para un mejor ensamblaje.



Figura II.28. Sellado de uniones mediante grout.

2.6 Pavimento prefabricado de hormigón pretensado (Texas)

Este método, al igual que el sistema constructivo Michigan, no se encuentra patentado, y se rige por el concepto básico de pavimento pretensado prefabricado, el que consiste en el ensamblado de paneles o losas prefabricadas, sistema que es postensado en su dirección longitudinal una vez colocados los paneles en su lugar. Los paneles son pretensados en su dirección transversal (eje más largo del panel) durante su fabricación, y los ductos para el postensado longitudinal vienen puestos en cada uno de los paneles. El layout básico de paneles contempla tres tipos de paneles: panel intermedio, panel central y panel de borde.

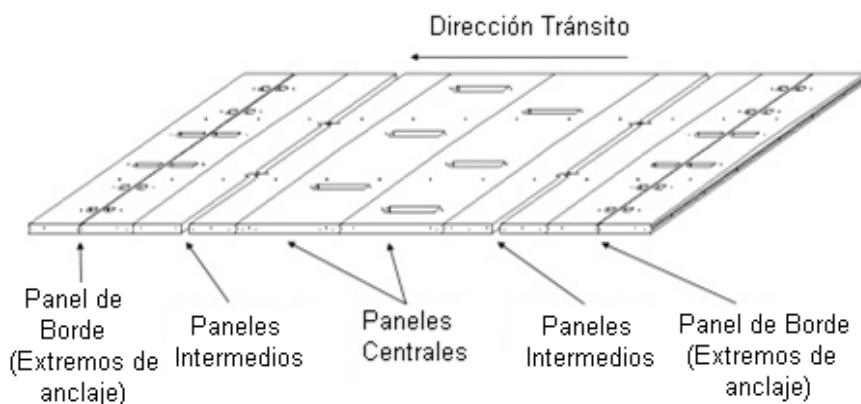


Figura II.29. Montaje completo de paneles.

2.6.1 Panel Intermedio

Los paneles intermedios representan la mayor sección dentro del tramo de pavimento, y se colocan a partir de los paneles de borde, y se van instalando hacia los centrales. Todos los paneles poseen un sistema para materializar uniones transversales machihembradas para el correcto posicionamiento y para evitar el deslizamiento entre

paneles. La armadura pretensada se extiende según el eje mayor del panel, y los ductos de postensado están orientados según el ancho o eje corto del panel.

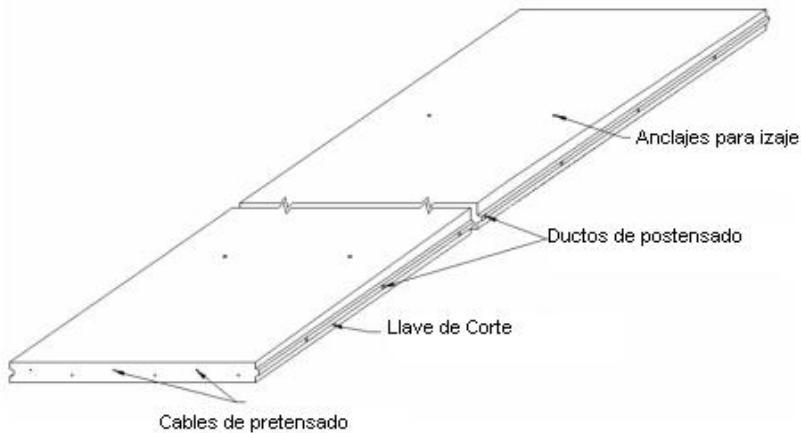


Figura II.30. Esquema de panel base.

2.6.2 Panel de Borde

Los paneles de borde están localizados en los extremos de cada sección postensada de pavimento. Estos paneles contienen uniones enclavijadas de dilatación las cuales absorben los movimientos de dilatación y contracción de las secciones postensadas. Ambas mitades del panel de borde se encuentran ligadas por medio de la junta de dilatación. Los paneles de borde también contienen el anclaje del sistema de postensado para las barras longitudinales. Los anclajes son moldeados en los paneles a cada lado de la junta de expansión. Los orificios en la parte superior de este tipo de panel, proporcionan acceso a los anclajes del sistema de postensado.

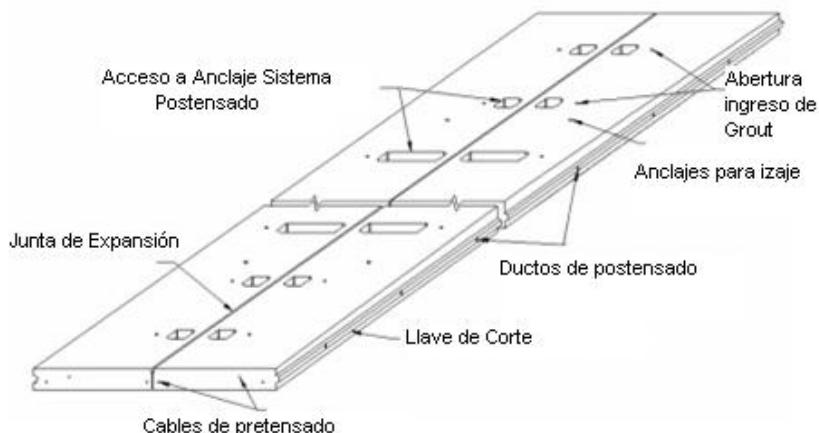


Figura II.31. Esquema de panel de borde.

2.6.3 Paneles Centrales

El postensado se completa en los paneles centrales. Las barras de postensado son colocadas dentro de los ductos a través de los grandes orificios de postensado que poseen los paneles centrales en su superficie. Los cables son instalados en cada dirección, desde los orificios de postensado de los paneles centrales, atravesando por los ductos de postensado de los paneles intermedios, hasta el anclaje de cada panel de borde. Los cables que son colocados en ambas direcciones longitudinales, son posteriormente tensados desde los paneles centrales.

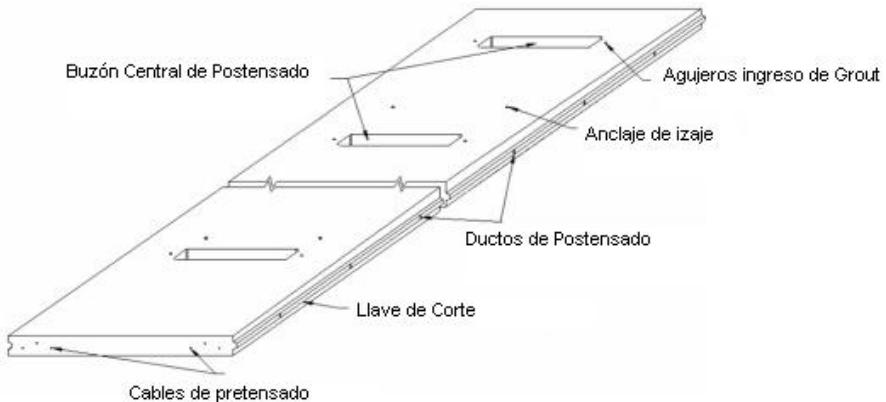


Figura II.32. Esquema de panel central.

Hoy en día han sido implementadas variaciones en el procedimiento del postensado en proyectos de demostración. Una variación hecha al procedimiento en un proyecto de demostración en Missouri contempló la eliminación del panel central, generando el tensionado de las cadenas desde los orificios de anclaje (accesos a los ductos de cadenas de postensado) presentes en los paneles de junta.

2.6.3.1 Preparación de la base

El proveer una superficie plana y una plataforma estable para el montaje de los paneles prefabricados, es muy importante. A pesar de que los paneles tienen la habilidad de abarcar más vacíos con materiales “blandos” de base, es ideal proveer de un completo soporte bajo los paneles. Hasta el momento, se han utilizado como materiales de base, mezclas de asfalto en caliente y concreto. Los paneles prefabricados se tienden a montar sobre materiales más “blandos” como los son las mezclas asfálticas en caliente o los rellenos fluidos, para así reducir el potencial de formación de vacíos bajo el pavimento.

Independiente del material que se utilice como base, es necesaria la existencia de un material reducidor de fricción entre el pavimento prefabricado y la base. Debido a que el sistema de pavimento prefabricado consiste en largas secciones de pavimento postensado, esto significa que ocurrirán movimientos de dilatación y contracción con

los cambios de temperatura. El material reductor de fricción previene que se vinculen entre sí (base y losa), y reduce la restricción al movimiento de las losas.



Figura II.33. A la izquierda: capa de asfalto para base. A la derecha: colocación de material reductor de fricción.

2.6.3.2 *Unión de paneles*

Una lengua continua y ranura son moldeadas en los bordes de los paneles prefabricados. Estas llaves de corte ayudan a asegurar un alineamiento vertical entre los paneles cuando éstos son montados. Las llaves de corte además proporcionan transferencia temporal de carga entre los paneles antes del postensado. Se debe tener presente que los paneles no son moldeados a la medida. Las tolerancias de las dimensiones de las llaves de corte son de tal forma de que los paneles pueden ser fabricados en un extenso lecho de colada sin la necesidad de moldear a la medida. Lo que es más, el moldaje a la medida requiere que los paneles sean instalados en una secuencia muy específica, mientras que los paneles “estándar” pueden ser utilizados para extensas líneas de fabricación.

Un epóxico de alta viscosidad es aplicado normalmente sobre las llaves de corte antes de que se unan los paneles. El epóxico actúa como lubricante durante la instalación del panel y también sella la junta entre paneles evitando así el ingreso de agua. El epóxico además une los paneles de tal forma de que éstos actúen como una losa continua después de su post-tensado.



Figura II.34. A la izquierda: colocación material epóxico. A la derecha: llave de corte (machihembrado).

2.6.3.3 Juntas de Expansión

Los paneles de junta contienen juntas de expansión al final de cada sección de pavimento postensado. Hasta 4" de desplazamiento se puede esperar en las juntas de expansión, por lo que debe ser robusto y capaz de soportar cargas cíclicas de tráfico pesado. Ambas juntas armadas (similares a aquellas utilizadas en losas de puentes) y las juntas enclavijadas (dowelled joints) han sido utilizadas en proyectos hasta el día de hoy. El tipo de unión dependerá de la magnitud de carga por tráfico y del desplazamiento de la losa de pavimento. Independiente del tipo de junta utilizada, las clavijas (dowels) puestas de forma transversal a la junta son esenciales para la transferencia de carga.

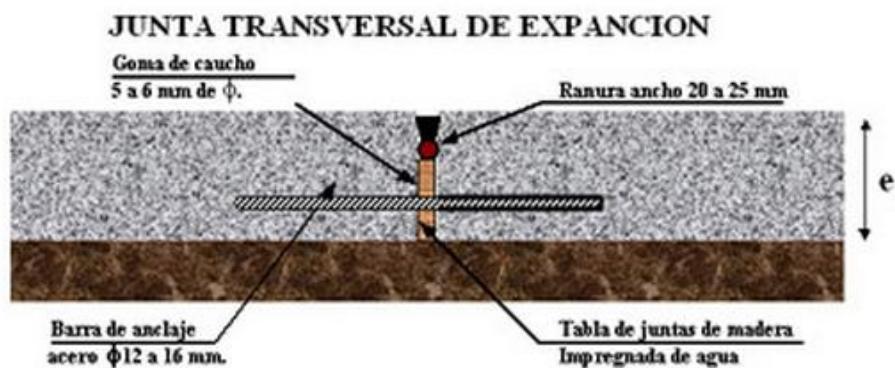


Figura II.35. Junta de expansión empleada en pavimentos rígidos.

2.6.3.4 *Instalación*

El proceso de instalación va a variar con cada trabajo. Se puede llegar a usar un post-tensionado temporal para de esta forma mantener afiatados los paneles al momento de estarse instalando las losas. Tanto construcciones de ancho parcial como total han sido implementadas hasta el día de hoy. Los paneles de ancho total abarcan todo el ancho de la vía y pueden llegar a tener integrados bermas laterales. La construcción de ancho parcial (*lane-by-lane construction*) puede llegar a requerir adicionalmente de un post-tensado transversal para afianzar las dos mitades del pavimento.



Figura II.36. Montaje de paneles sobre material reducidor de fricción.

2.6.3.5 *Postensado*

Después de que los paneles son instalados, los cables de postensado son enroscados a través de los paneles, anclados y tensados. Los cables postensados utilizados hasta hoy han sido de diámetro igual a 0.6 pulgadas (1,5 cm) compuesto por 7 hebras. Generalmente, los cables son tensados a un 75% de su resistencia a la tracción garantizada. Una vez que han sido tensados, se procede a llenar los agujeros que permiten el postensado de los cables con un mortero que cumpla con las solicitudes a la que será sometido.

Cabe destacar que no es necesario completar el postensado antes de la apertura al tránsito. Si bien es conveniente completar el post-tensado tan pronto como sea posible, a veces las limitaciones de tiempo en la construcción no lo permiten.

2.6.3.6 *Grouting*

El sistema de post-tensado usado para pavimentos pretensados prefabricados es un sistema post-tensado de ligazón. El grouting no solo actúa como una capa de protección a la corrosión que pueden sufrir los cables, sino también proporciona adhesión entre los cables y el pavimento, de tal manera que si en un futuro fuese necesario remover un panel prefabricado, el sistema de postensado permanece intacto.

A parte del grouting usado para el sistema de postensado, también se necesita un grouting que se aplica bajo la losa, el cual rellena todos los vacíos que puedan producirse por debajo del pavimento. Los buzones o agujeros para la inserción del grout pueden venir hechos en los paneles, o pueden ser perforados en el lugar. El grouting bajo la losa es esencialmente un proceso donde se somete la losa a presiones que provocan la “elevación” del pavimento.

El pavimento prefabricado puede ser abierto al tránsito una vez que los paneles han sido instalados. El postensado y grouting puede ser completado posteriormente si fuese necesario. La superficie estará lo suficientemente lisa para abrir el tramo al tráfico, y si no, puede ser alisada (nivelada) en una operación posterior.

2.7 Pavimentos urbanos removibles (PUR)

En Francia, el Laboratorio Central des Ponts et Chaussées desarrolló un sistema constructivo de pavimentación, destinado a calles dentro de una ciudad, parques de estacionamientos, boulevards, áreas residenciales, y otros espacios dentro de una urbe.

El sistema se basa en paneles hexagonales de hormigón prefabricado, de longitud de lado 77 cm y de un espesor de 20 cm, los cuales se montan sobre una base de material granular de 6 a 10 mm con espesor igual a 3 cm, la cual a su vez va sobre una capa de relleno fluido o base estabilizada con cemento de espesor 60 cm, y esta última se coloca sobre la sub-base.

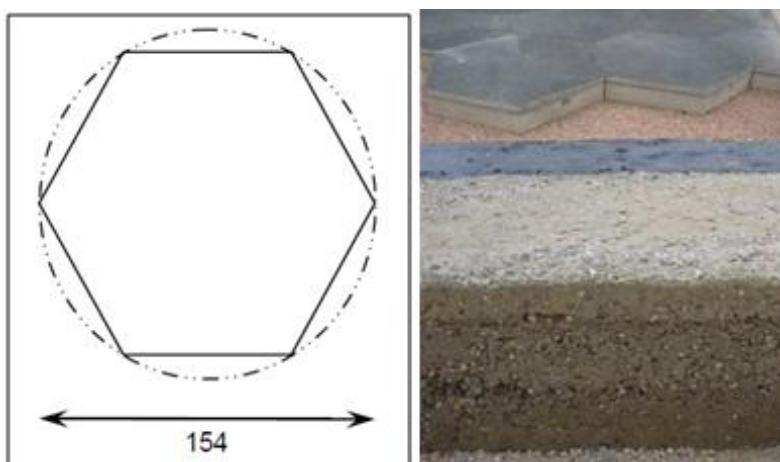


Figura II.37. A la izquierda: panel hexagonal de D=154 cm. A la derecha: estructura con sus capas respectivas.

Existen 2 tipos de paneles. El primero es un sistema de paneles en donde cada uno actúa de forma mecánicamente independiente, uniéndose entre ellos por medio de una junta polimérica para evitar el ingreso de agua o algún otro material. Este sistema ha sido testeado aplicándole cargas cíclicas (un total de 120.000) a una serie de paneles

con el método LCPC Accelerated Load Testing Facility que aparece en las Figura II.39., obteniéndose resultados satisfactorios.

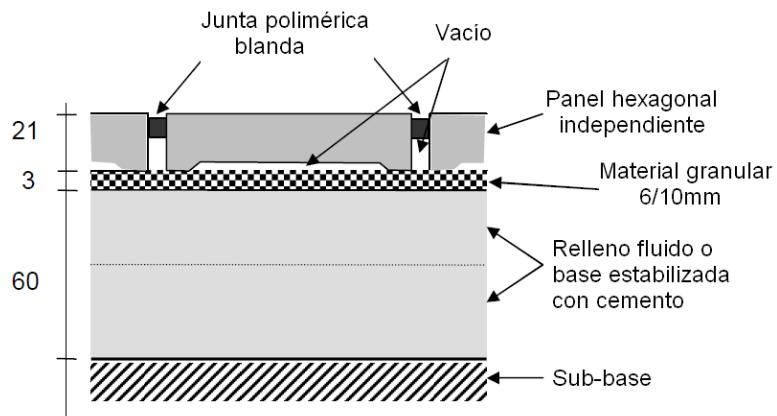


Figura II.38. Estructura de paneles hexagonales independientes.

La estructura, como se detalla en la Figura II.38., consta en su parte superior por los paneles hexagonales que deben ir separados por unos 10 mm de tal forma de poder evitar posibles daños provocados por expansiones del material debido a altas temperaturas, y entre ellos van unidos mediante juntas poliméricas de tal forma de impedir el ingreso de agua u otros materiales por el espacio entre paneles. Estos paneles van montados sobre una capa de base granular (6 a 10 mm de tamaño) de pequeño espesor (3 cm como se indica en la figura superior), la cual a su vez se coloca sobre una capa de relleno fluido o una base estabilizada con cemento que posee propiedades que facilitan la colocación al ser autonivelante y autocompactable, y otorga también la ventaja de poder excavarse con facilidad al momento de tener que realizarse alguna mantención a algún sistema de ductos que se encuentren bajo el pavimento.



Figura II.39. Ensayo de cargas cíclicas mediante el LCPC Accelerated Load Testing Facility.

El segundo sistema de pavimentos urbanos removible, consta de paneles conformados por dos piezas, un hexágono regular de ángulos internos iguales a 120° como el método anterior, y otro hexágono conformado por lados de dos largos distintos y de ángulos internos iguales a 120° : el detalle del panel se entrega en la Figura II.40. La idea es poder contar con uniones entre paneles de tipo llave de corte, para un mejor traspaso de carga, efecto que no sucede con el sistema de paneles independientes. Los distintos paneles, independiente del método, se montan a través de una grúa con un sistema de tipo ventosa que utiliza el principio de succión para evitar la concentración de cargas en el izaje y para no instalarle un sistema de anclaje a cada panel.

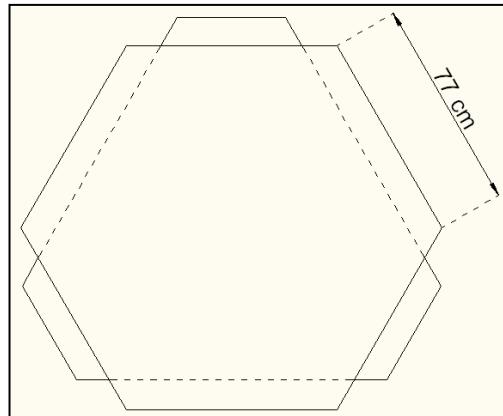


Figura II.40. Panel hexagonal con lengüeta para acople y transferencia de carga.

2.8 Tabla resumen

En la siguiente tabla se hace una comparación entre los diferentes métodos presentados anteriormente, mostrando aquellas características que establecen la diferenciación de unos con otros.

Tabla II.1. Características de los diferentes métodos presentados.

PATENTE	MICHIGAN	SUPER-SLAB	KWIK SLAB	URETEK	TEXAS PRETENSADO	PUR
TIPO REPARACIÓN	PAÑOS AISLADOS	CONTINUA Y PAÑOS AISLADOS	CONTINUA Y PAÑOS AISLADOS	CONTINUA Y PAÑOS AISLADOS	CONTINUA	CONTINUA Y PAÑOS AISLADOS
TRATAMIENTO DE BASE	TODOS REQUIEREN DE LIMPIEZA Y COMPACTACIÓN DE SER NECESARIO					
SISTEMA DE NIVELACIÓN	RELLENO FLUIDO O INYECCIÓN DE GROUT	SE INYECTA GROUT	SE INYECTA GROUT	SE INYECTA GROUT	SE INYECTA GROUT	NO REQUIERE
MOLDAJE	CON BARRAS DE TRANSFERENCIA	MAYOR COMPLEJIDAD	ARMADURA Y CUIDADO RANURA	SIMPLE	MAYOR COMPLEJIDAD	SIMPLE
JUNTA LONGITUDINAL	GROUTING	CON DOWELS + GROUTING	GROUTING + DOWELS (ENTRE KWIK SLABS)	PLACAS DE FIBRA DE VIDRIO CON SELLANTE	GROUTING	JUNTAS POLIMÉRICAS O LLAVES DE CORTE
JUNTA TRANSVERSAL	DOWELS + GROUTING	DOWELS + GROUTING	MACHIHEMBRADO METALICO + SELLADO	PLACAS FIBRA DE VIDRIO + SELLANTE	LLAVE DE CORTE CON EPÓXICO/ CABLE POSTENSADO	
PISTAS UTILIZADAS	SOLO UNA	UNA O DOS, DEPENDE DE GRÚA	SOLO UNA	SOLO UNA	DOS (OTRA PARA GRÚA Y CAMIONES)	SOLO UNA
EQUIPAMIENTO ESPECIAL	MARTILLO CINCÉL, INYECTOR DE GROUT	EQUIPO PERFORADOR (DOWELS), INYECTOR DE GROUT	INYECTOR GROUT	INYECTOR, FABRICACIÓN PLACAS	EQUIPO DE POSTENSADO, INYECTOR DE GROUT	SISTEMA DE SUCCIÓN PARA GRÚA
PUEDE SER REEMPLAZADO UN PANEL	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
CONTROLES, ENSAYOS	FWD, CARGAS CÍCLICAS	FWD, CARGAS CÍCLICAS	FWD, CARGAS CÍCLICAS	FWD, CARGAS CÍCLICAS	FWD, CARGAS CÍCLICAS	CARGAS CÍCLICAS

*FWD: ensayo de deflexión mediante deflectómetro de impacto.

CAPÍTULO III: DISEÑO

Lo que se busca con el diseño, y en base a un prototipo de losa previamente definido, es poder saber si responderá de buena forma acorde a las distintas solicitudes a las cuales será sometida durante su vida de uso, que son las cargas asociadas al tránsito y las involucradas al izaje de las losas durante su montaje.

Para el presente proyecto el procedimiento de diseño se basó primero en realizar un prediseño de las losas prefabricadas, para posteriormente poder definir su tráfico acumulado (descartando conocer su vida de uso ya que esto dependerá de la vía en la que se instalen), respuesta al tránsito y al izaje de las losas propuestas, y su armado.

3.1 Prediseño

A partir de lo que se pudo rescatar de la revisión del estado del arte, y del alcance del estudio que contempla reparación de tramos considerando una calzada (lo cual acota inmediatamente características de dimensiones de los paneles) se llegó a dos modelos de sistemas de losas, cada una con un sistema de conexión particular, pero con dimensiones de losa similares: uno que posee conexiones mediante barras de traspaso y otro tipo de paneles que se conectan mediante juntas machihembradas.

El prediseño propone losas cuyas dimensiones son de 1,8m de largo, 3,5m de ancho (ancho de calzada) y 0,23m de espesor, espesor que puede ser bastante conservador al considerar que integran una malla de armadura, tema que claramente puede optimizarse al conocer el tipo de tránsito al cual serán sometidas las losas.

3.1.1 *Paneles con sistema de barras de traspaso*

Este sistema consideró el diseño de dos tipos de paneles: un panel con ranuras por un lado y barras de traspaso insertas por el otro, y un panel con ranuras en ambos lados.

3.1.1.1 *Panel ranuras – barras*

Este panel como se mencionó anteriormente, posee ranuras en una de sus caras transversales, las cuales se ubican por debajo del panel, de tal forma que no estén expuestas al rodado. Cada una posee dos ductos hacia la superficie de la rasante por donde una vez montados los paneles se inyecta un grout de alta resistencia para poder sellar la ranura con la barra acoplada y así materializar la conexión. En la otra cara transversal van insertas 6 barras de transferencia a media altura del espesor, ubicadas 3 bajo cada huella, en una posición tal que coincida con la ranura y permita la conexión.

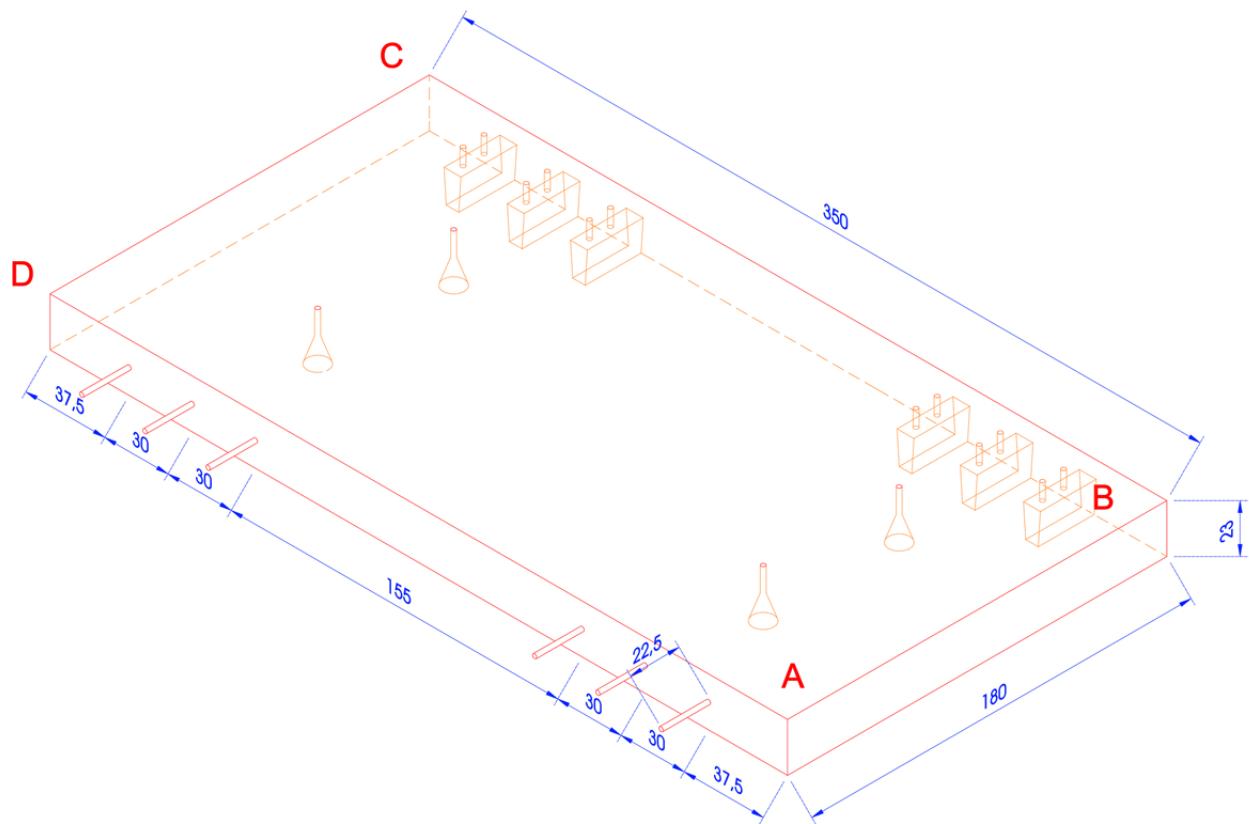


Figura III.1. Panel ranuras – barras vista cara A-D con barras.

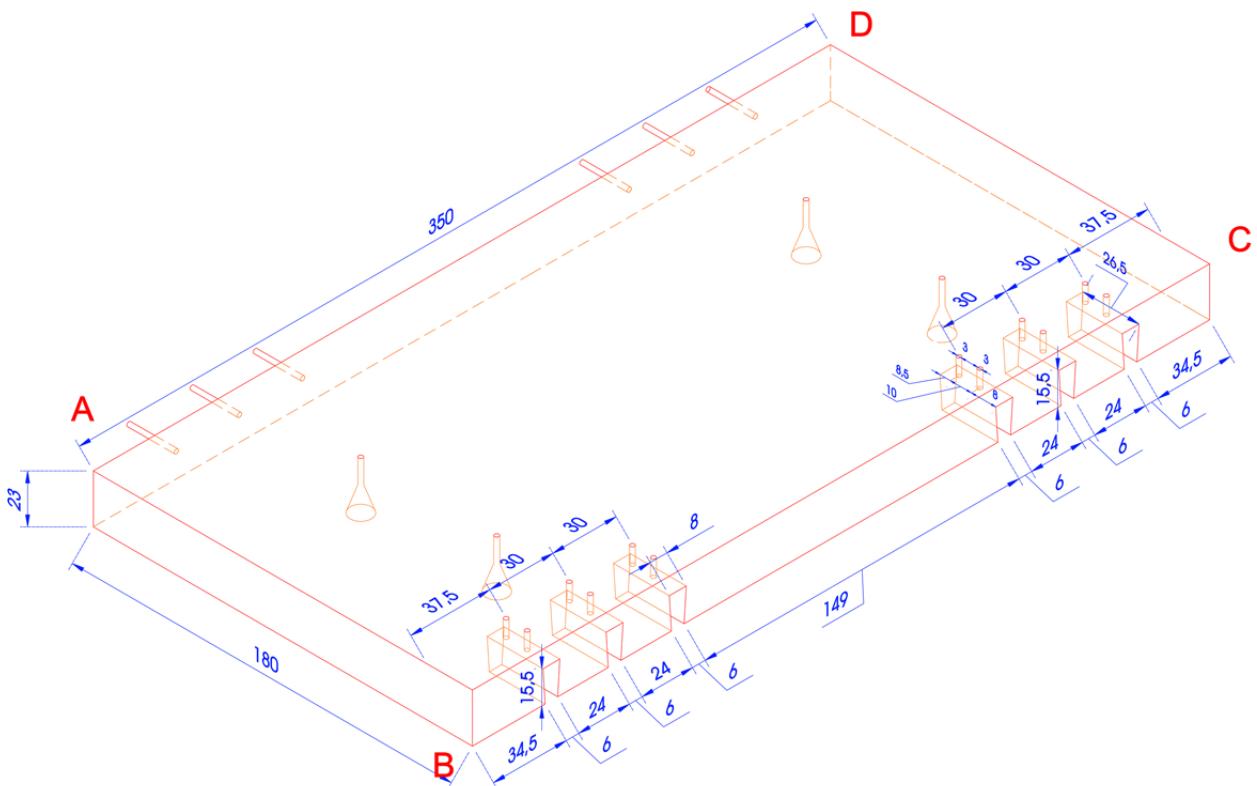


Figura III.2. Panel ranuras – barras vista cara B-C con detalle de ranuras.

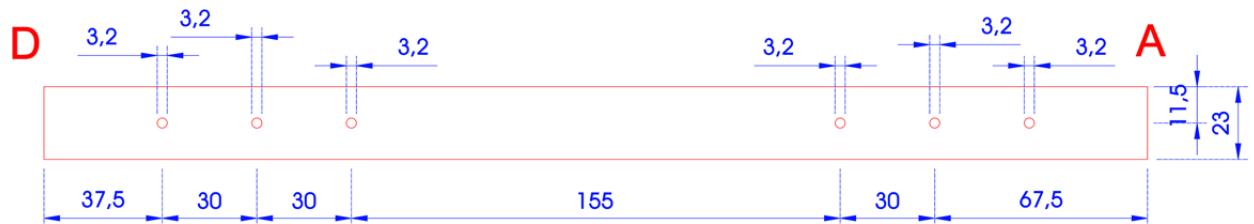


Figura III.3. Panel ranuras – barras vista cara A-D.

3.1.1.2 *Panel ranura – ranura*

Este panel posee ranuras en ambos extremos, y su finalidad es poder concretar el cierre del tramo mediante un movimiento de montaje vertical, evitando así complejidades en la maniobra de instalación. Las dos caras transversales del panel presentan ranuras, y son exactamente iguales al extremo con ranuras (cara B-C) del panel ranura – barra detallado anteriormente, detallándose en la Figura III.4. el panel de cierre, que conecta las barras del penúltimo panel con las barras de traspaso insertas en el pavimento existente.

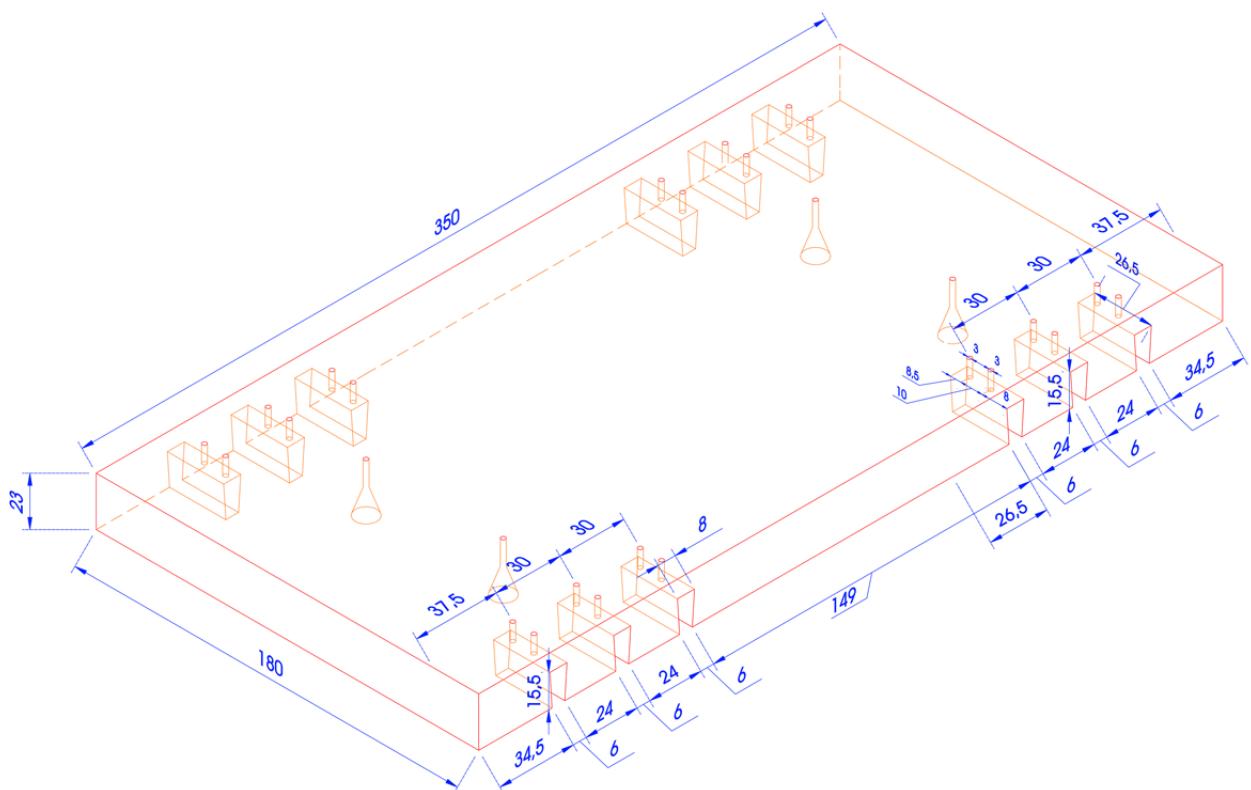


Figura III.4. Panel ranuras – ranuras.

3.1.2 *Paneles con sistema machihembrado*

Para poder materializar este sistema, se debieron diseñar 4 tipos de losas: una losa inicial que consta por un lado con ranuras y por el otro con una conexión tipo macho, losas intermedias que poseen una conexión tipo hembra y otra tipo macho, un panel que considera una conexión tipo hembra y barras de traspaso por el otro lado, y para poder cerrar el tramo un panel con ranuras a ambos lados, el mismo que se utiliza en el sistema de barras y ranuras anteriormente descrito, que se acoplen a las barras del anterior panel y a las barras insertas en el panel existente.

3.1.2.1 *Panel ranuras y conexión tipo macho*

Este panel es el primero en montarse al inicio del tramo, conectando el panel existente (que posee barras de traspaso insertas) con el segundo panel prefabricado del tramo. Se contempla que vayan adheridas a los dientes unas placas de teflón que permitan un mejor acople entre los dientes de la conexión tipo macho y las ranuras de la conexión tipo hembra, y así evitar el contacto hormigón-hormigón que pueda provocar fisuras durante el montaje y su vida de uso. Cabe mencionar que este panel se presenta sólo una vez por tramo de reparación al ser solamente el inicial.

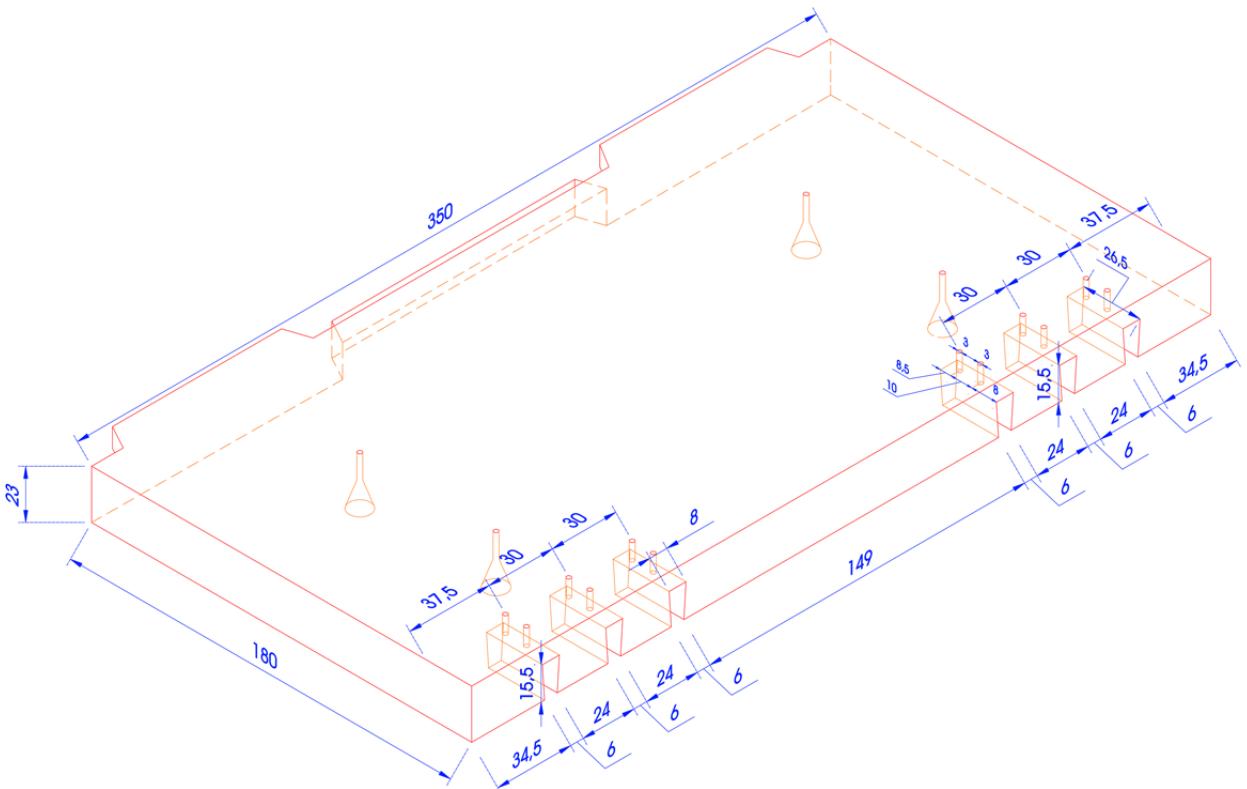


Figura III.5. Panel ranuras – conexión macho.

3.1.2.2 Panel conexión tipo hembra y tipo macho

Panel que posee en un extremo ranuras de conexión tipo hembra y en el otro extremo dientes de conexión tipo macho, los cuales llevan adheridos placas de teflón que favorecen el contacto que se producen en la junta transversal. El número de paneles de este tipo empleados en la reparación del tramo dependerá de la longitud de éste, ya que son los paneles intermedios.

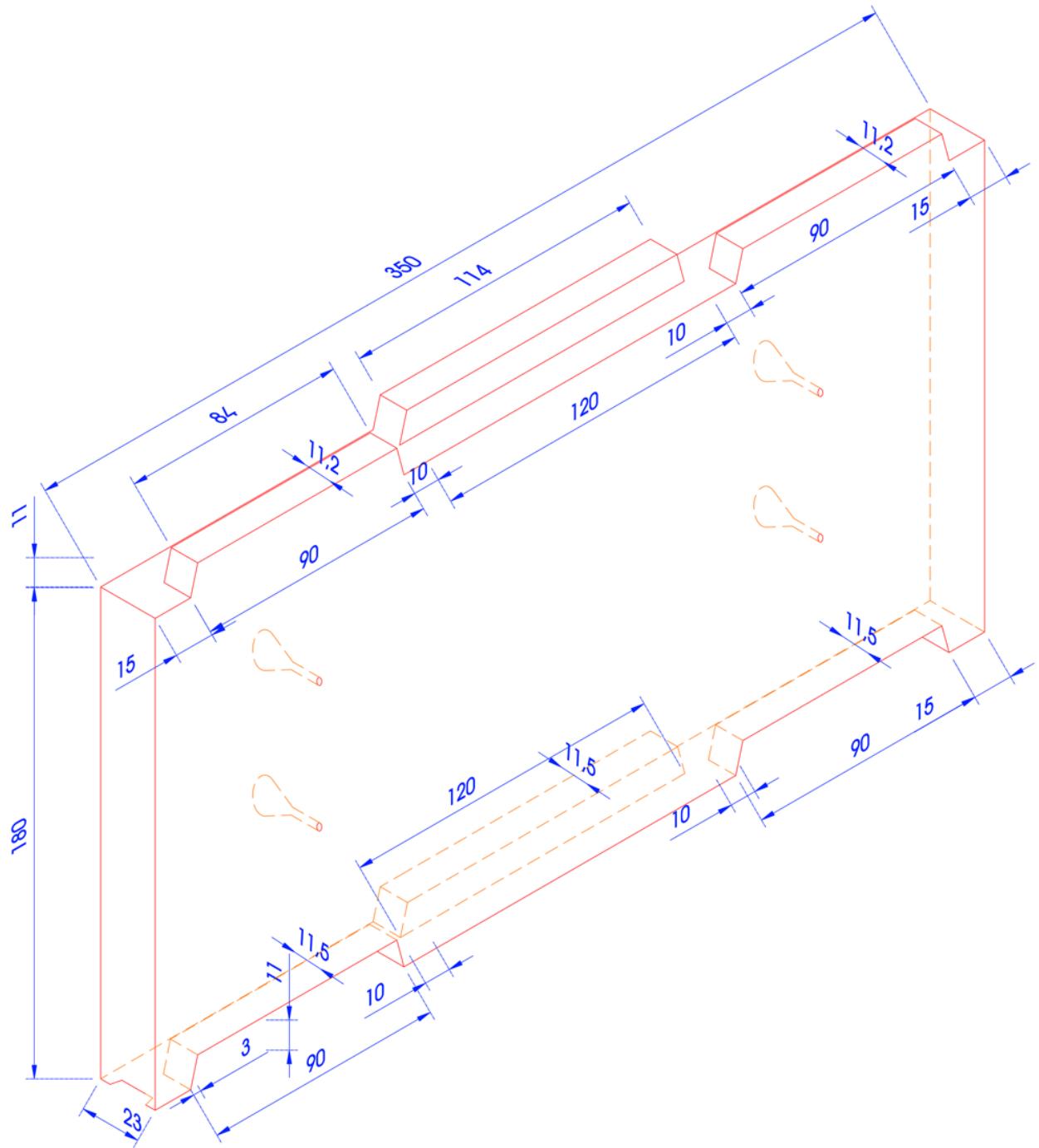


Figura III.6. Panel conexión hembra – conexión macho.

3.1.2.3 Panel conexión tipo hembra y barras

Este panel corresponde al penúltimo panel montado en el tramo, contando con un extremo con ranuras de conexión tipo hembra y en el otro extremo con barras de traspaso, para de esta forma necesitar como panel de cierre uno de tipo ranura-ranura que se acople a las barras del penúltimo panel y a las barras del pavimento existente.

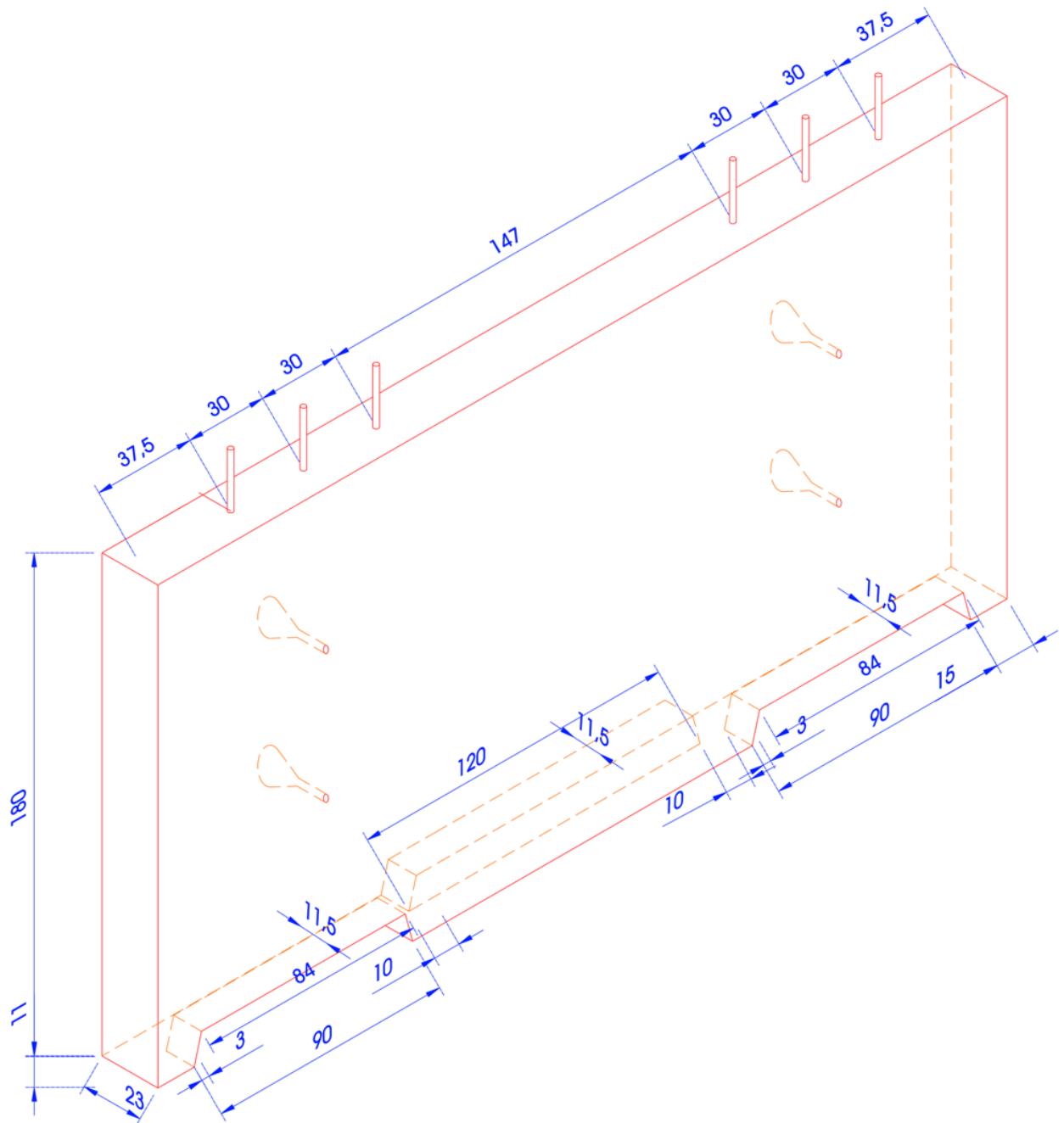


Figura III.7. Panel conexión hembra - barras.

3.2 Diseño mediante método AASHTO

El procedimiento de diseño mediante el método AASHTO que se expone en el Manual de Carreteras de 1981, establece una relación entre el espesor de la losa de hormigón y el tráfico total solicitante, reducido a ejes equivalentes, para dos valores del índice de serviciabilidad final, resistencia de diseño del hormigón, y módulo de reacción de la subrasante.

El tráfico solicitante es el tráfico acumulado, expresado en ejes equivalentes de 8.15 ton, necesario para que el pavimento pase de un índice de serviciabilidad inicial de 4.5 a uno final de p_t (siendo el índice de serviciabilidad final no menor a 2,5 en vías urbanas y autopistas).

Para llevar el sistema de cargas a números de ejes normalizados de 8,15 ton se utilizaron los factores de equivalencia.

Los factores de equivalencia corresponden a los coeficientes que transforman el daño que produciría en la estructura de pavimento un determinado peso por eje, en el número de veces el daño que produce un eje de 8,15 ton en esa misma estructura.

Las fórmulas AASHTO permiten determinar factores para ejes simples de rueda doble, ejes doble (tándem) de ruedas doble y ejes triples (tridem) de rueda doble (no se incluyen procedimientos para los ejes con ruedas simples). El Factor de Ejes Equivalentes se expresa conceptualmente como sigue:

$$\text{Factor } EE_x = \frac{(\text{Número de ejes de } X \text{ peso (kN) que causan cierta pérdida de serviciabilidad})}{(\text{Número de ejes de 80 kN que causan la misma pérdida de serviciabilidad})}$$

Lo anterior es sólo el concepto, para obtener el valor de los factores de equivalencia en pavimentos rígidos tanto para ejes simples de rueda doble, ejes tandem de rueda doble y ejes tridem de rueda doble, se utiliza la siguiente expresión:

$$\log F = -4,62 \log(18+1) + 4,62 \log(L_x + L_2) - 3,28 \log(L_2) - \frac{G_t}{\beta_x} + \frac{G_t}{\beta_{18}}$$

Donde:

L_x :Carga Total en el Eje (kip)

L_2 :Código de Eje 1:Simple 2:Tandem 3:Tridem

β_{18} :Valor de β_x para $L_x=18$ kip y $L_2=1$

$$G_t = \log \frac{4,5-p_t}{4,5-1,5}$$

p_t =índice de serviciabilidad final

$$\beta_x = 1,00 + \frac{3,63 (L_x + L_2)^{5,20}}{(D+1)^{8,46} L_2^{3,52}}$$

D=Espesor de losa en pulgadas

Tabla III.1. Factores de Equivalencia AASHTO para ejes simples de rueda doble con un espesor de losa de e= 23cm.

Rango Tonf	$p_t = 2,0$	$p_t = 2,5$
< 3	0,008	0,008
3 - 4	0,030	0,030
4 - 5	0,085	0,086
5 - 6	0,198	0,200
6 - 7	0,406	0,409
7 - 8	0,753	0,756
8 - 9	1,300	1,290
9 - 10	2,100	2,070
10 - 11	3,230	3,140
11 - 12	4,800	4,600
12 - 13	6,800	6,400
13 - 14	9,400	8,700
14 - 15	12,800	11,500
15 - 16	17,000	15,000

Tabla III.2. Factores de Equivalencia AASHTO para ejes tandem de rueda doble con un espesor de losa de e=23cm.

Rango Tonf	$p_t = 2,0$	$p_t = 2,5$
<5	0,008	0,008
5 - 6	0,029	0,029
6 - 7	0,060	0,060
7 - 8	0,100	0,100
8 - 9	0,170	0,170
9 - 10	0,270	0,270
10 - 11	0,410	0,410
11 - 12	0,600	0,610
12 - 13	0,860	0,860
13 - 14	1,200	1,190
14 - 15	1,630	1,610
15 - 16	2,160	2,130
16 - 17	2,800	2,700
17 - 18	3,600	3,500
18 - 19	4,600	4,400
19 - 20	5,700	5,400
20 - 21	7,100	6,600
21 - 22	8,600	7,900
22 - 23	10,500	9,500
23 - 24	12,600	11,300
24 - 25	15,000	13,300

Tabla III.3. Factores de Equivalencia AASHTO para ejes tridem de rueda doble con un espesor de losa de e=23cm.

Rango Tonf	pt = 2,0	pt = 2,5
<6	0,007	0,007
6 - 7	0,019	0,020
7 - 8	0,034	0,034
8 - 9	0,055	0,056
9 - 10	0,087	0,087
10 - 11	0,130	0,131
11 - 12	0,189	0,191
12 - 13	0,270	0,270
13 - 14	0,370	0,370
14 - 15	0,500	0,500
15 - 16	0,660	0,660
16 - 17	0,860	0,860
17 - 18	1,100	1,100
18 - 19	1,390	1,380
19 - 20	1,740	1,720
20 - 21	2,150	2,110
21 - 22	2,630	2,560
22 - 23	3,190	3,080
23 - 24	3,830	3,670
24 - 25	4,600	4,300
25 - 26	5,400	5,100
26 - 27	6,300	5,900
27 - 28	7,400	6,800
28 - 29	8,600	7,900
29 - 30	9,900	9,000
30 - 31	11,400	10,200
31 - 32	13,100	11,600
32 - 33	14,900	13,200

El tráfico solicitante se calcula multiplicando el factor de equivalencia por el número de ejes que presumiblemente pasará por cada rango de carga y sumando los parciales correspondientes. La información acerca del volumen de tránsito (TMDA: tránsito medio diario anual) se puede obtener de la publicación “Volúmenes de Tránsito en los Caminos de Chile” de la Dirección de Vialidad u otras publicaciones oficiales. Con la tabulación de pesos por eje y el volumen presente de tráfico se obtiene la Estratificación de las cargas de tráfico.

Para el presente proyecto no se posee con certeza cuál será el tránsito al cual serán sometidos los paneles, o si realmente responden los sistemas propuestos a las mismas variables que los pavimentos rígidos convencionales, como para poder emplear los métodos de diseño de la AASHTO, por lo que en éste estudio sólo se da a conocer la forma con la cual se obtiene una estratificación del tránsito solicitante además de cómo obtener una estimación del tránsito acumulado que deberá tener en cuenta el diseñador al momento de querer determinar espesores de losa.

3.2.1 Resistencia de Diseño.

La resistencia mecánica del hormigón es un factor de primera importancia en el diseño, para establecer esta resistencia se utiliza el ensayo de flexotracción con carga a los tercios, como señala el manual AASHTO T-97. La resistencia de diseño se relaciona con las resistencias obtenidas en obra, mediante la expresión:

$$R_c = R_m \times (1 - 0,84 \times v) \geq R_d$$

R_c =Resistencia característica en obra

R_m =Resistencia media en obra

R_d =Resistencia de diseño seleccionada por el proyectista

v =Coeficiente de variación del conjunto de muestras y testigos

Para este caso, como el hormigonado se realiza en una planta prefabricadora de hormigón, se obtendrán muestras de hormigón en el lugar de confección de las losas, y posteriormente se ensayarán a flexotracción además de realizarle ensayos de compresión, para poder comprobar que el hormigón utilizado cumple con la resistencia mínima especificada en el Manual de Carretera en su volumen V, sub-sección 5.401.302.

El valor de resistencia del hormigón que se empleó en este método de diseño se denomina tensión de trabajo del hormigón, la cual corresponde al 75% de la resistencia de diseño.

3.2.2 Suelo.

Las características contempladas para el diseño y posterior modelación de las losas vienen a ser las de una base estabilizada, considerando una capa de espesor 30cm bajo la losa. Según lo que estipula el Manual de Carreteras, bajo condiciones normales, donde prácticamente no existen ciclos de hielo y deshielo, la banda granulométrica de la subbase para pavimentos rígidos es cerrada, y deberá ajustarse a la banda granulométrica TM-50b, TM-50c o TM-25, según lo establecido en la tabla 8.101.1.B de la Especificación descrita en 8.101.1 del Manual de Carreteras Volumen N°8 y que se detalla en la Tabla III.5. Además en la Tabla III.4. se detallan los requisitos a contemplar dentro de la caracterización de la subbase para pavimentos rígidos, especificación extraída del Volumen 5 del Manual de Carreteras, tabla 5.301.202.A.

Tabla III.4. Requisitos subbase para pavimentos rígidos.

ENSAYE	EXIGENCIA	MÉTODO
Límite Líquido	Máx. 25%	8.102.3 (LNV 89)
Índice de Plasticidad	Máx. 6%	8.102.4 (LNV 90)
Desgaste Los Angeles	Máx. 35%	8.202.11 (LNV 75)
Sales Solubles	Máx. 4%	8.202.18 (LNV 76)
Poder de Soporte (CBR) (1)	Min. 50%, Medido al 95% de la D.M.C.S. (LNV 95)	8.102.11 (LNV 92)

Tabla III.5. Bandas granulométricas cerradas.

Tamiz (mm)	TM - 50b	TM - 50c	TM - 25
50	100	100	
40	70 - 100	-	
25	55 - 85	70 - 100	100
20	45 - 75	60 - 90	70 - 100
10	35 - 65	40 - 75	50 - 80
5	25 - 55	30 - 60	35 - 65
2,5	-	-	-
2	15 - 45	15 - 45	25 - 50
0,5	5 - 25	10 - 30	10 - 30
0,08	0 - 10	0 - 15	0 - 15

Para el diseño de pavimentos rígidos la capacidad de soporte del suelo, se mide a través del módulo de reacción de la subrasante (K).

Este parámetro asocia la tensión transmitida al terreno por una placa rígida con la deformación o la penetración de la misma en el suelo, mediante la relación entre la tensión aplicada por la placa "q" y la penetración o asentamiento de la misma "y". La relación queda definida de la siguiente forma:

$$k = \frac{q}{y}$$

Este representa la carga en kgf/cm² de superficie cargada, dividida por la deflexión en cm. Al no realizarse los ensayos de placa para obtener de K, este valor se puede estimar en forma aproximada para suelos homogéneos mediante la correlación con el ensayo CBR que se muestra en la Figura III.8.

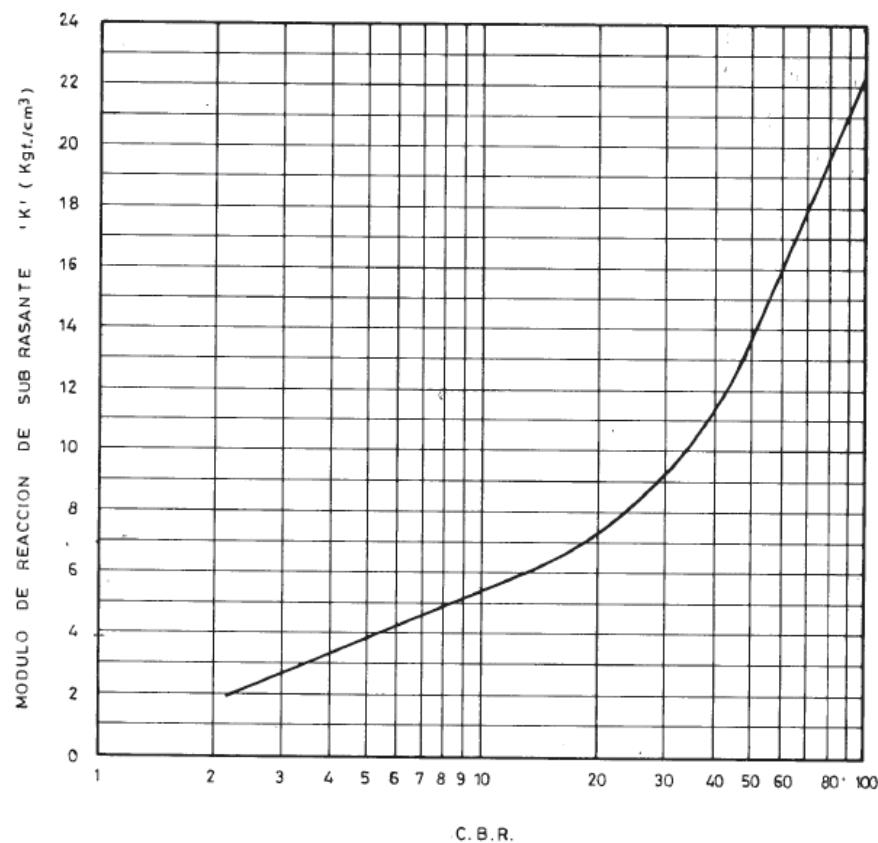


Figura III.8. Correlación entre CBR y el Módulo de reacción de la sub-rasante (K).

Al conocer el valor del módulo de reacción de la subrasante, y conocer cuál será el espesor de la sub-base granular, se utiliza el ábaco que se muestra en la Figura III.9. en donde a partir de un cierto valor de espesor de sub-base y el valor del módulo de reacción de la subrasante se obtiene el valor del módulo de reacción modificado debido a la presencia de una capa granular con un CBR $\geq 50\%$, según se detalla en 5.301.201(1) del Manual de Carreteras Volumen N°5.

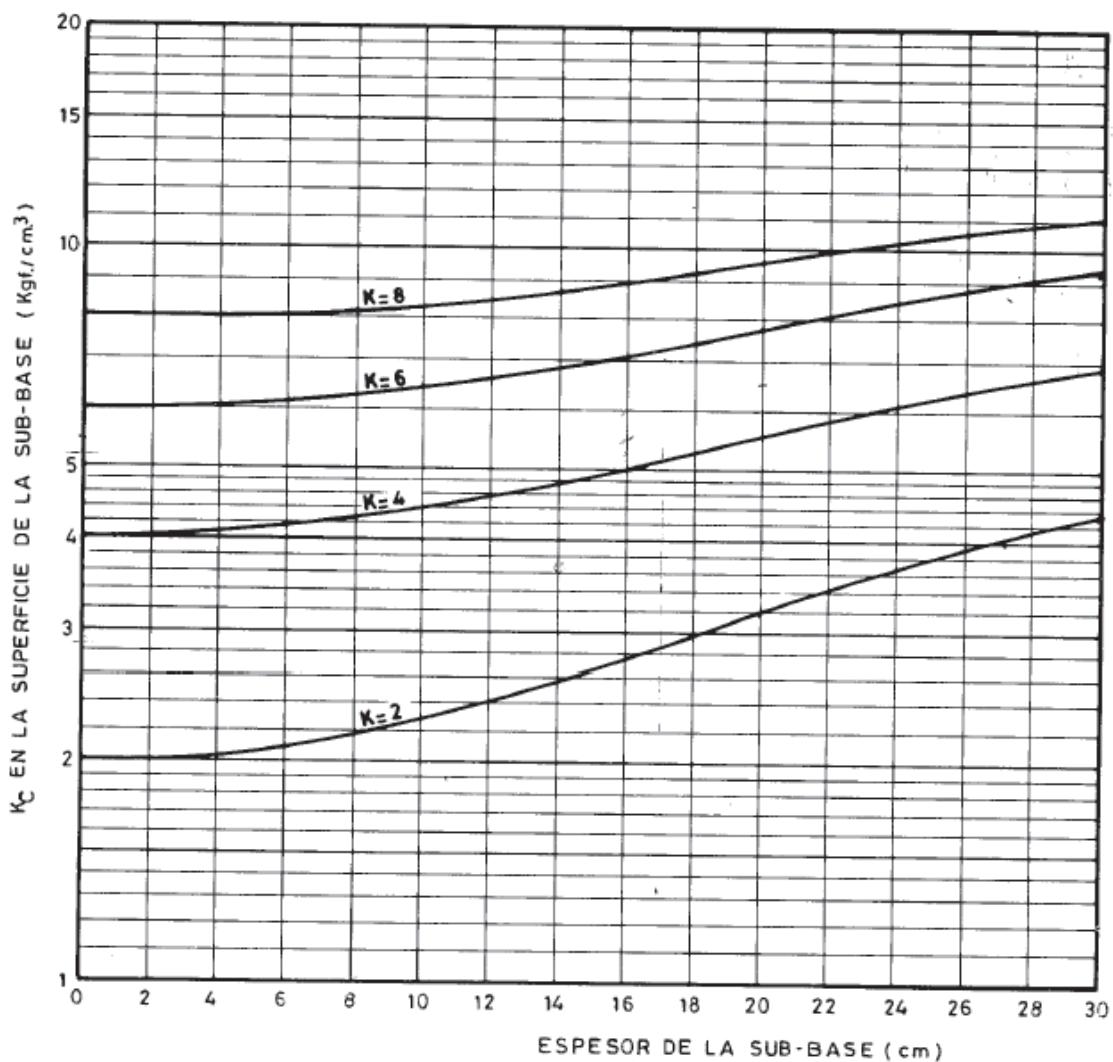


Figura III.9. Ábaco aumento de K en relación al espesor de la sub-base.

Considerando un valor de CBR igual a 50%, se obtiene un coeficiente de balasto de aproximadamente $13 \text{ kg}/\text{cm}^3$, valor que no posee curva en la Figura III.9. por lo que a modo de ser conservador en el diseño, no se somete a modificación por espesor de capa.

3.3 Tráfico acumulado

Al conocer cómo se obtiene el tráfico solicitante mediante la estratigrafía de vehículos, sólo falta por conocer cómo obtener el número de ejes equivalentes (solicitud) que pueden transitar sobre el pavimento durante su vida útil, a lo cual se le llama tráfico acumulado del pavimento.

El tráfico acumulado corresponde al total de ejes equivalentes simples de 8,15 ton que requiere el pavimento que transiten sobre él, para poder pasar de un índice de serviciabilidad inicial de 4,5, a uno de valor p_t , que toma un valor de 2,5 para el presente diseño. La expresión para obtener el tráfico acumulado es la siguiente:

$$T_t = \frac{(H+2,54)^{7,35}}{1081} \left(\frac{4,5-p_t}{3} \right)^\alpha \left[\frac{\sigma}{48,51} \times \frac{H^{0,75}-2,28}{H^{0,75}-2K^{0,25}} \right]^{(2,75+\frac{4,5-p_t}{3})}$$

$$\alpha = \frac{1}{\frac{18078}{1+(H+2,54)}^{8,45}}$$

Donde:

T_t = Tráfico acumulado, expresado en ejes simples equivalentes de 8,15ton, necesario para que el pavimento pase de un índice de serviciabilidad inicial de 4,5 a un valor p_t .

H = Espesor de la losa de hormigón de cemento en cm.

σ = Tensión de trabajo del hormigón en kgf/cm² = 0,75 R_d

K= Módulo de reacción de la subrasante o el módulo corregido por la sub-base expresado en kgf/cm³.

La anterior expresión forma parte del diseño estructural de un pavimento rígido según se detalla en el Manual de Carreteras edición 1981 en su sección 5.603.503 “Método de diseño AASHTO para pavimentos rígidos”, método adoptado para este proyecto debido a que facilita el diseño a la hora de determinar el valor de las variables involucradas en la estimación de la vida útil que poseerá el sistema de paneles prefabricados, conociendo el tráfico acumulado y la estratificación del tránsito del lugar.

El diseño adoptó desde un comienzo un espesor de losa igual a 23cm. La resistencia de diseño es de 35MPa, valor requerido al momento de pavimentar con hormigón, especificación señalada en el Manual de Carretera en su Volumen Nº5, sección 5.410.302, donde habla acerca de la dosificación definiendo el uso de un hormigón que debe alcanzar los 35MPa de resistencia a la compresión y 4,6MPa a la flexotracción como mínimo, a una edad de 90 días.

Con los datos de diseño contemplados, se determina el número de ejes equivalentes que deben transitar sobre la losa para pasar de un índice de serviciabilidad de 4,5 a uno de 2,5.

$$T_t = \frac{(23+2,54)^{7,35}}{1081} \left(\frac{4,5-2,5}{3} \right)^{8,28E-25} \left[\frac{46 \times 0,75}{48,51} \times \frac{23^{0,75}-2,28}{23^{0,75}-(2 \times 13^{0,25})} \right]^{(2,75+\frac{4,5-2,5}{3})} = 12.773.369 \text{ EE}$$

El valor obtenido es solo una estimación, ya que el método AASHTO no contempla el armado de las losas ni los sistemas de conexión propuestos que provocan un comportamiento distinto al convencional, y que suman variables al cálculo del tráfico acumulado.

Lo recomendado a la hora de querer estimar la vida útil de un pavimento no convencional, que probablemente puede no ser representado por la metodología de diseño implantada por la AASHTO, es realizar un ensayo acelerado de tráfico que mediante cargas cíclicas pueda entregar resultados que determinen la respuesta a la fatiga de materiales que se pueda dar en el sistema.

3.4 Diseño a izaje

Para el diseño a izaje se contempló una losa tipo, de dimensiones 1,8m de largo, 3,5m de ancho y 0,23m de espesor, y se dispuso una malla enfierradura Ø8@20 en el centro del espesor. El izaje se contempla realizarlo mediante una grúa o un camión pluma, que levantará el panel prefabricado por medio de eslingas o cadenas que posean algún sistema de gancho que pueda conectarse a los tres anclajes del panel, ubicados en su cara superior.

El diseño se realizó empleando la herramienta SAP2000, tomando esta losa tipo, asignando 3 puntos de apoyos correspondientes a los tres puntos donde se ubicarían los anclajes, sometiéndola a su propio peso (carga muerta) y estudiando los momentos máximos, tanto positivos como negativos, para la dirección longitudinal y transversal de la losa.

La losa se modela como un elemento Shell de espesor 23cm, despreciando el efecto de deformaciones por corte debido a lo delgado del elemento (Shell thin). El mesh o mallado se detalla en la Figura III.10. mostrándose además los tres puntos de apoyo.

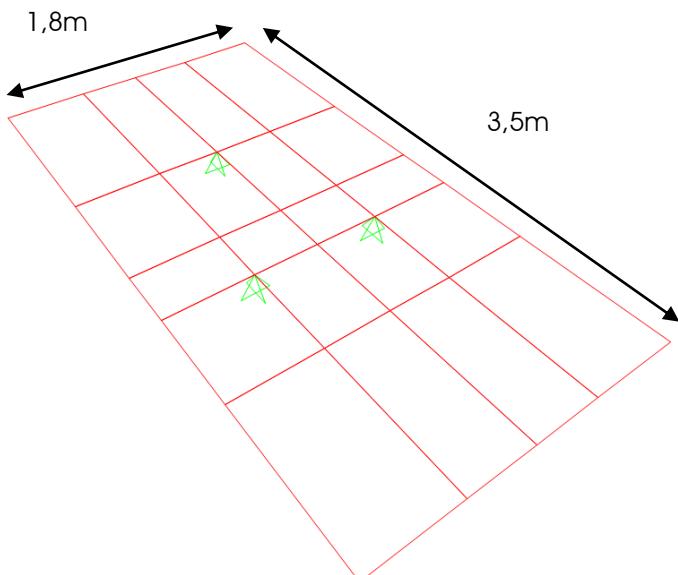


Figura III.10. Mallado de la losa con detalle de nodos y punto de apoyo.

Al ser sometida la losa al análisis por acción del peso propio, arroja que los máximos momentos positivos aparecen en los bordes, mientras que los máximos momentos negativos aparecen en los puntos de apoyo, resultado que se obtiene para el análisis de flexión en ambas direcciones. En la Figura III.11. se muestra la distribución de momentos en la losa en la dirección 11, obteniéndose los máximos momentos en los apoyos, siendo estos negativos. Mientras que en la Figura III.12. se detalla la distribución de momentos en la losa para la dirección 22, dándose nuevamente que los mayores momentos ocurren en los apoyos, siendo estos negativos.

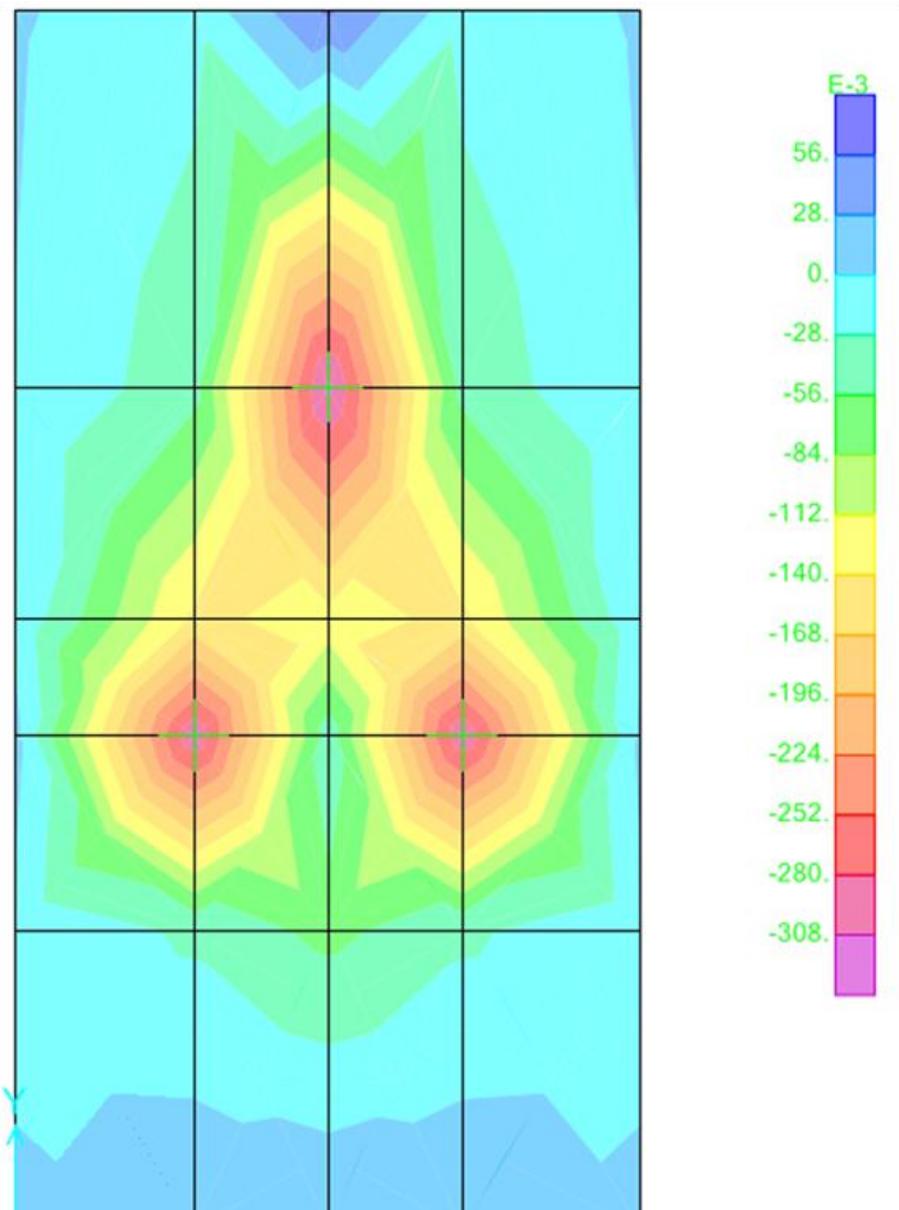


Figura III.11. Distribución de momento en la dirección 11.

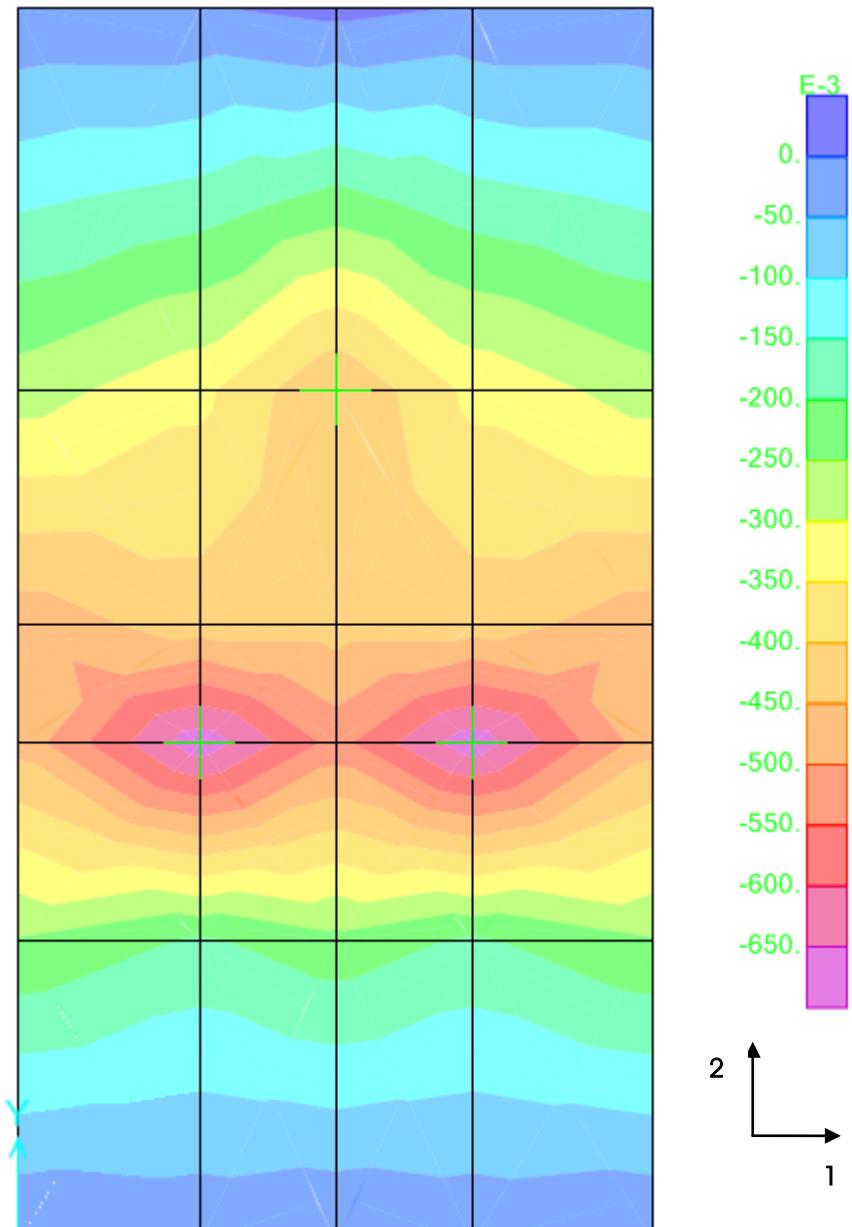


Figura III.12. Distribución de momento en la dirección 22.

Como recomendación, luego de ver los resultados arrojados por la modelación mediante elementos finitos, es ideal poder definir los puntos de apoyo en una posición óptima que reduzca los momentos máximos que ocurren en ellos, para ello, y demostrando que los máximos momentos ocurren en la luz de mayor largo, lo ideal es poder distribuir los puntos para tres alturas distintas en la dirección 22, como se muestra en la Figura III.12., para así poder distribuir de mejor forma el momento en los apoyos.

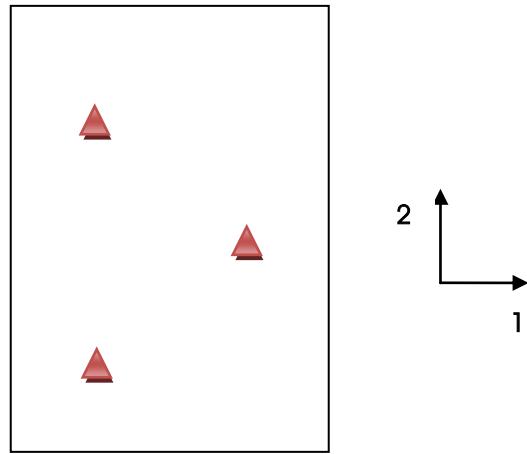


Figura III.13. Panel con posición de puntos de apoyo (anclajes) propuesta.

Conociendo los máximos momentos solicitantes en la losa, se toma el mayor de los cuatro para poder verificar mediante diseño a flexión si el prediseño de losa antes definido cumple con los requerimientos mínimos de resistencia para las solicitudes a las que será expuesta.

Tabla III.6. Momentos máximos.

	Momento [tonf-m]
M11max positivo	0,061
M11 max negativo	0,315
M22 max positivo	0,015
M22 max negativo	0,682

Obtenidos los momentos máximos se verifica mediante el método de diseño LRFD, con factor de mayoración 1,4 para cargas muertas, si el armado propuesto, su disposición, y el dimensionamiento de losa, cumplen con los requerimientos de resistencia ante el izaje del elemento. El análisis por metro lineal de losa se entrega en el Anexo A, y demuestra que el diseño propuesto cumple con los criterios de la ACI 318-08 al verificar cuantía, espaciamiento y resistencia, y que cumple también con los criterios impuestos por la ACI 318 para evitar la fisuración.

3.5 Armado de losas

Los pavimentos rígidos convencionales no suelen llevar una malla de armadura, pero los paneles deben llevar debido a que éstos están expuestos a flexiones producto del izaje al momento de trasladar los paneles dentro de la planta prefabricadora, al montarlos sobre los camiones que los trasladarán a la obra, y al momento de tener que descargarlos e instalarlos en terreno. El armado de los distintos tipos de losa se muestra en las Figuras B.1., B.2., B.3., B.4. y B.5. del Anexo B. El análisis hecho para la verificación de la armadura impuesta en un prediseño se muestra en el Anexo A.

Además las conexiones del sistema machihembrado deben llevar un armado especial, tanto en sus dientes como en las ranuras tipo hembra. El diseño de armado de dientes y ranuras se efectuó tomando en cuenta que éstos actúan de una forma similar a las ménsulas ubicadas en pilares sosteniendo elementos como vigas y losas. El detalle del armado de los dientes se puede observar en las Figuras III.14., III.15. y III.16. y, así como también en las Figuras B.6., B.7. y B.8. del Anexo B.

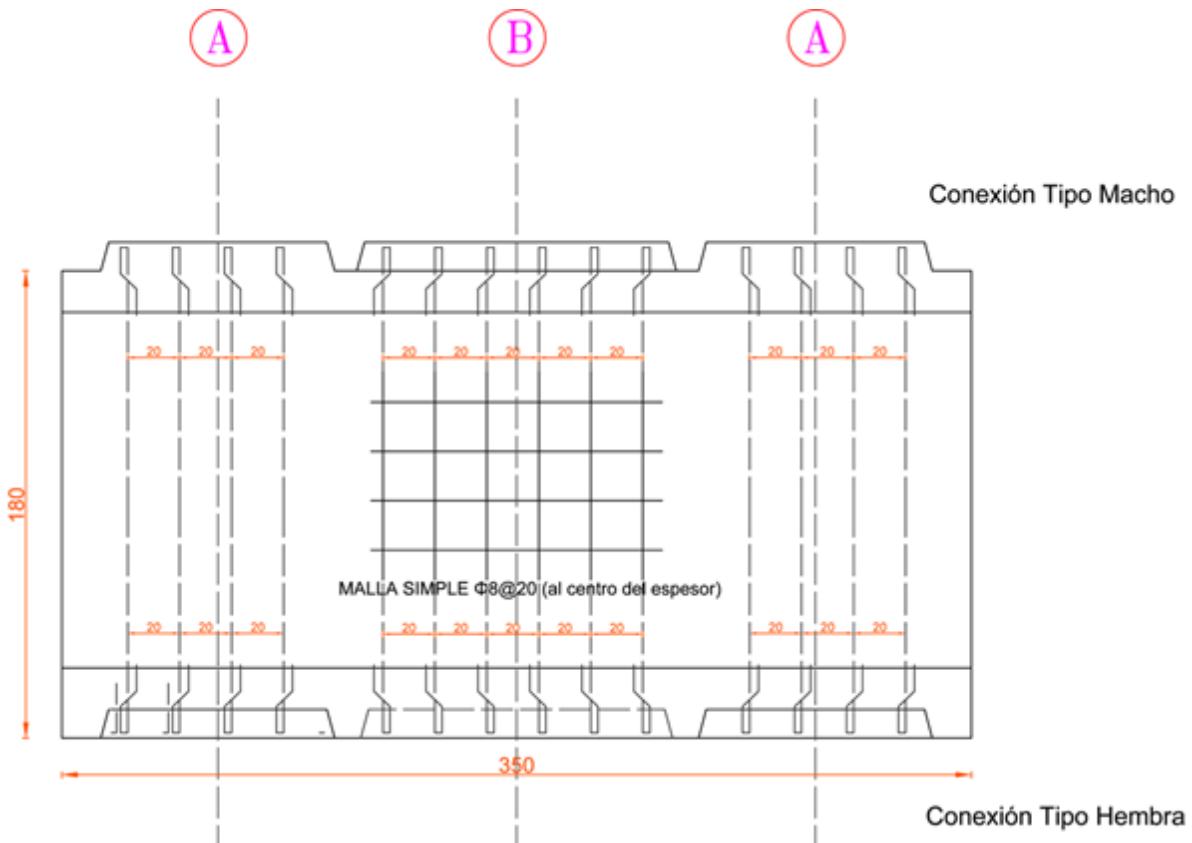


Figura III.14. Losa de sistema machihembrado con conexión tipo hembra y tipo macho.

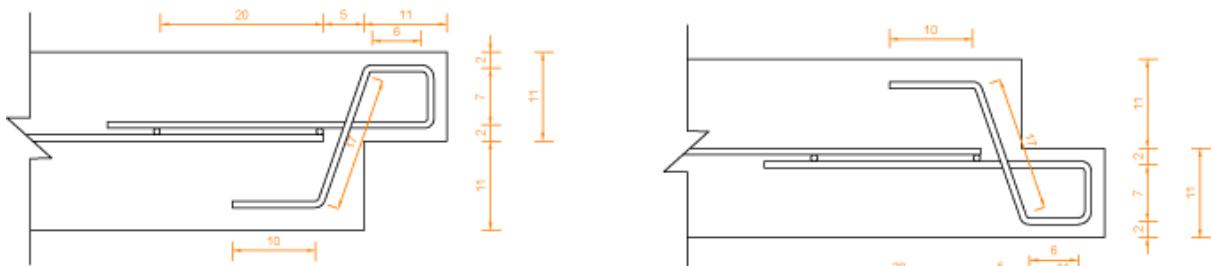


Figura III.15. Izquierda: corte eje A (conexión tipo macho). Derecha: corte eje B (conexión tipo macho).

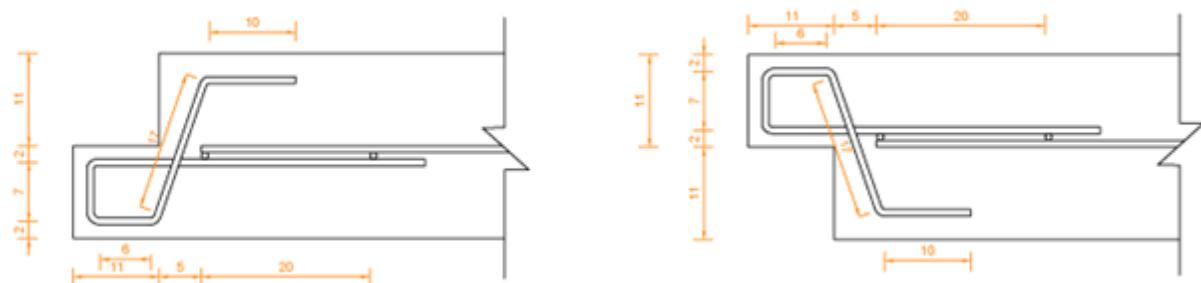


Figura III.16. Izquierda: corte eje A (conexión tipo hembra). Derecha: corte eje B (conexión tipo hembra).

3.6 Comentarios

El diseño de los paneles se encuentra hecho para que estos posean una alta durabilidad bajo un tránsito a nivel de ciudad y en carreteras y autopistas, debido al espesor de losa con el que cuentan (tránsito medio a alto), y al armado de las losas que aumenta la capacidad estructural de ellas, y con ello el número de ejes equivalentes que pueden transitar durante su vida de uso. El número de ejes equivalentes obtenidos en el diseño (12 millones aproximadamente), lleva a clasificar ambos sistemas de losa como pavimentos rígidos de vías principales, autopistas y carreteras de dos direcciones, considerando un flujo de 2500 a 5000 vehículos pesados semanales, con una vida útil de 20 años. Hay que considerar que los criterios adoptados y que señala el Manual de Carreteras 1981 en su volumen 3, no consideran la existencia de armadura al momento de obtener los ejes equivalentes, por lo que se da a entender que la vida útil de las losas es mayor a la obtenida por medio del método de diseño AASHTO por el cual se guía el MC1981 vol.3.

Otro punto a considerar relativo a la durabilidad de estos sistemas de paneles, es saber cómo responderán las conexiones al uso que se le dé al tramo, ya que éstas le otorgan variabilidad a la estimación de la vida útil de los paneles, lo cual requiere un estudio mediante una modelación de los sistemas en donde se les exija a solicitudes a las cuales se verán sometidos durante su vida útil, además claro de pruebas en terreno que entreguen prueba fehaciente de los resultados que se obtendrán aplicándolo estas soluciones en tramos de vías de tránsito vehicular reales.

CAPÍTULO IV: MODELACIÓN DE LOS SISTEMAS PROPUESTOS

La simulación se llevó a cabo mediante el software ANSYS, desarrollado para funcionar bajo la teoría de elementos finitos para modelos estructurales y volúmenes finitos para modelación de fluidos. Se decidió por éste programa al presentarse como una herramienta sofisticada, que cumple con el alcance del estudio para la modelación de la interacción entre piezas producto de cargas solicitantes asociadas a un cierto tiempo de aplicación.

El bosquejo con el diseño de los paneles y piezas conformantes del sistema, se realizó mediante el software SolidWorks, que en éste se utilizó para generar las distintas piezas, que fueron los paneles de hormigón, barras de transferencia, cuerpo de grout y placas de teflón. Con este programa se diseñan las piezas por separado y posteriormente se ensamblan creando los sistemas de pavimentación a estudiar. Estos archivos de ensamblaje son los que se terminan cargando o importando como geometría en ANSYS.



Figura IV.1. Esquema resumen etapas y funciones programas computacionales utilizados.

4.1 Diseño prototipos mediante software SolidWorks

Se bosquejó cada tipo de pieza conforme de los sistemas a evaluar. A los paneles se les dibujó una huella en la cara superior (superficie de rodado) mediante la creación de pequeñas áreas rectangulares de 0,1m x 0,5m, como se muestran en la Figura IV.2.

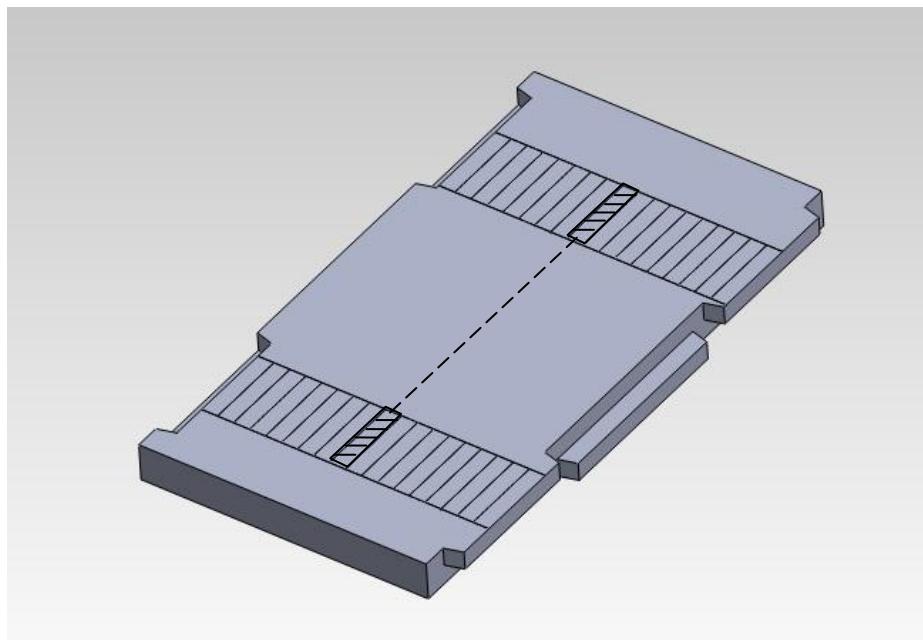


Figura IV.2. Panel sistema machihembrado con huellas en su superficie de rodado.

Estas huellas de vehículo corresponden a un eje simple de rueda doble, simulando cada par de ruedas como una serie de rectángulos de 0,1m x 0,5m como se señaló anteriormente.

Áreas aplicación de cargas: se asumió que el área correspondiente a la presión que ejerce una sola rueda de camión sobre el pavimento corresponde a un rectángulo de lados 25cm de ancho y 10cm de largo. El estado de tensiones se obtendrá a cada 10cm de desplazamiento del eje de ruedas.

El distanciamiento en un eje, entre las ruedas de los extremos, debe ser como máximo 2,6m por reglamentación, por lo que el borde externo de cada rectángulo de aplicación va a estar a 2,6m del otro. El borde externo de la huella izquierda (en sentido del tránsito) quedó a 0,5m del borde de la losa, y el borde externo de la huella derecha a 0,4m, puesto que el ahuecamiento es poco probable que se produzca simétrico al eje central de la calzada.

4.1.1 Piezas

Todo elemento de un material específico debió bosquejarse, con la idea de posteriormente ensamblarse entre ellos y dar forma a los dos sistemas de paneles prefabricados que se modelaron. El ensamblaje de piezas se realiza mediante el mismo programa, creando uno que considerara sólo el sistema de conexión barra-ranura, y otro ensamblaje considerando el sistema de conexión machihembrado, el cual necesariamente también considera conexiones mediante barras de traspaso por un tema de factibilidad constructiva, ya que el último panel que se coloca debe montarse con un movimiento vertical, para lo cual debe tener ranuras a ambos lados el último panel.

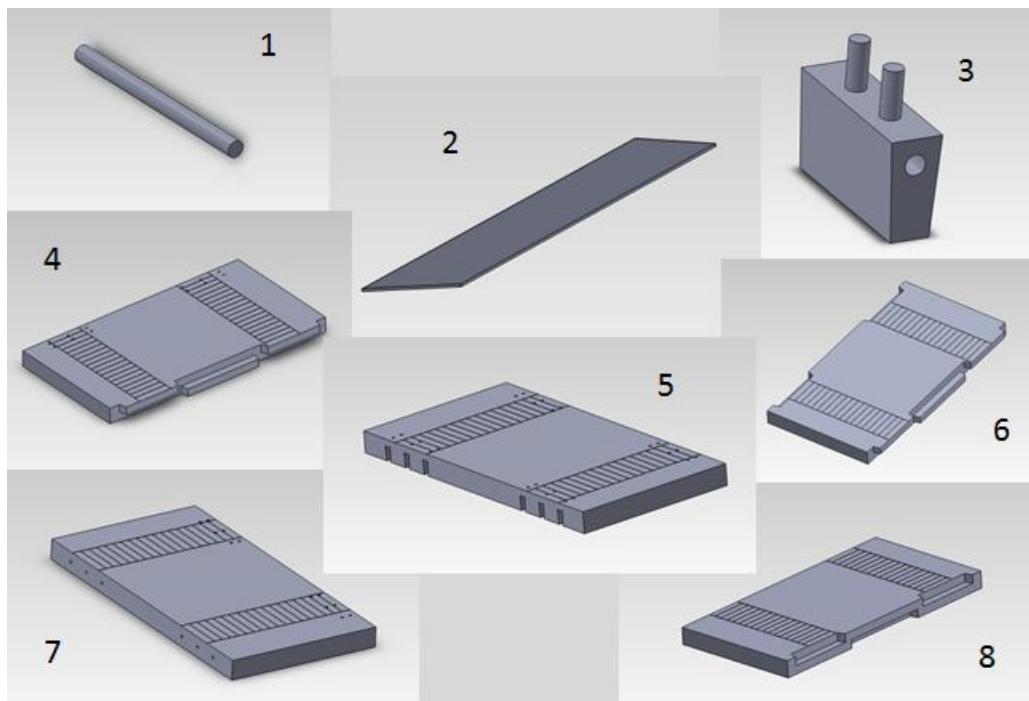


Figura IV.3. Barra de transferencia (1), lamina de teflón (2), grout relleno de ranura (3), panel ranura-macho (4), panel ranura-ranura (5), panel hembra-macho (6), panel barra-ranura (7), panel hembra-hembra (8).

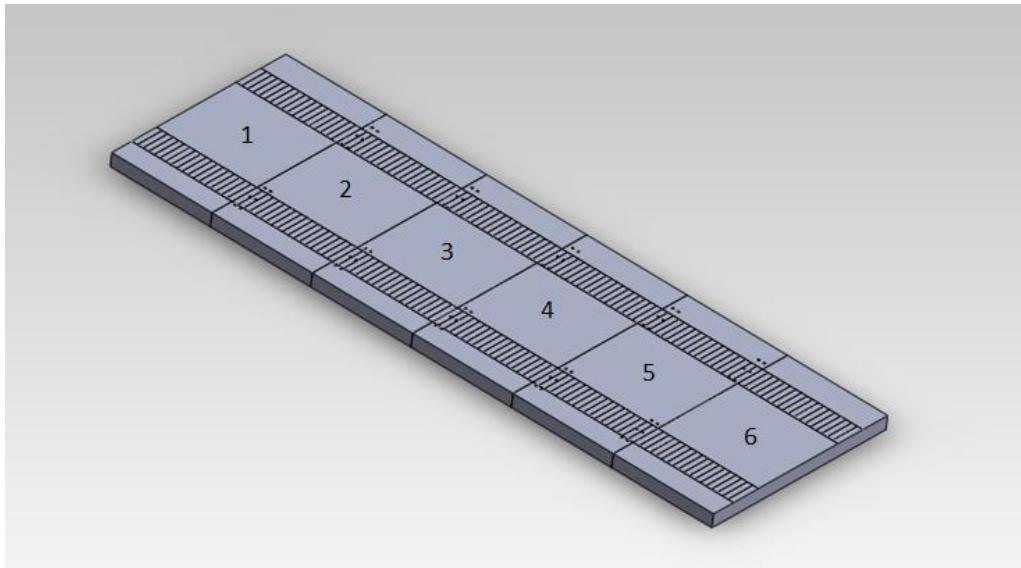


Figura IV.4. Tramo sistema barra-ranura conformado por 4 losas prefabricadas. Existen dos secciones de pavimento existente (1 y 6), 3 paneles barra-ranura (2, 3 y 4), y un panel ranura-ranura (5).

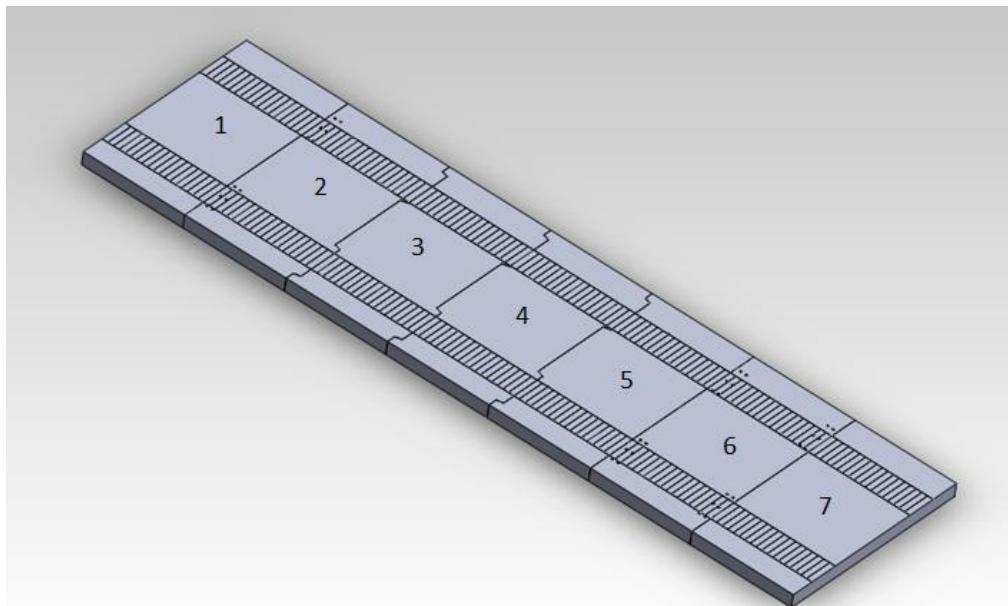


Figura IV.5. Tramo sistema machihembrado conformado por 5 losas prefabricadas. Numeración ascendente en la dirección del tránsito: sección de pavimento existente (1 y 7), panel ranura-macho (2), panel hembra-macho (3 y 4), panel hembra-barra (5) y panel ranura-ranura (6).

4.2 Simulación mediante el software ANSYS v.13

El objetivo es simular el paso de un vehículo, de características predeterminadas, sobre dos tramos de pavimento rígido, uno conformado por losas prefabricadas que utilizan el sistema barra-ranura y otro tramo utilizando una configuración de losas con el sistema de conexión tipo machihembrado, y así poder prever cómo reaccionarían ambos sistemas de lasas prefabricadas frente a las solicitudes a las cuales estarán sometidas en su vida de uso.

Se utilizó una configuración de posicionamiento de lasas para cada sistema propuesto, considerando un cierto número de lasas conformantes de cada sistema que puedan abarcar todos los comportamientos y conexiones posibles a desarrollarse en la realidad, estudiando tanto la conexión de los paneles con el pavimento existente, como el comportamiento de los paneles prefabricados entre sí. El tipo de eje a modelar, será un eje simple de rueda doble, correspondiente al eje estándar manejado por la AASHTO, con un peso de 11ton, que viene siendo el peso máximo definido por el Ministerio de Obras Públicas para un eje simple rodado doble (Texto actualizado a Decreto Supremo MOP N°1910 de fecha 31 de octubre de 2002, Publicado en el Diario Oficial del 04/02/2003). Al poseer cuatro ruedas el eje utilizado en el estudio, cada una adquiere, para efectos prácticos, una carga de 2,75ton, pero si se desprecia la separación que existe entre las dos ruedas conjuntas, la carga total que ejerce el eje equivale a dos presiones aplicadas sobre la superficie de pavimento de carga 5,5ton con un área de aplicación de 0,1m de longitud por 0,5m de ancho (1,1MPa).

La idea de la simulación es poder aplicar sobre cada par de rectángulos opuestos una presión de 1,1MPa, la cual vaya avanzando a lo largo del tramo de pavimentación. Para ello, a la aplicación de esta presión sobre cada par de rectángulos se le asigna un tiempo igual a 0,005 segundos, recorriendo una distancia de 0,1m en este tiempo, lo que nos arroja una velocidad de 72km/h de transitar del eje.

Lo que se pretende es poder obtener el estado tensional en los paneles y en sus conexiones, además de analizar los desplazamientos y deformaciones que pueda sufrir el pavimento a la hora de transitar un vehículo de alto tonelaje sobre él.

Para poder generar estados de carga que varíen en el tiempo se trabajó con el módulo transiente de Workbench Ansys v13, que permite definir pasos dentro de la simulación, con un cierto tiempo asignado, en donde se definen las condiciones a las que estará sujeto el modelo mientras dure el paso. En el caso de la modelación realizada, dentro de un paso siempre existe solo un par de rectángulos (superficie de apoyo de las ruedas) que se encuentran sometidos a una presión constante de 1,1MPa durante un tiempo igual a 0,005s, para una vez transcurridos los 0,005s pasar a un nuevo paso en donde los rectángulos que le siguen a los que se encontraban sometidos a presión en el paso anterior pasen ahora a ser cargados con la presión de 1,1MPa en cada área del eje. Destacar que la variación de la presión es gradual, alcanzando su máximo valor (1,1MPa) en la mitad del paso, hasta hacerse cero cuando se alcanza el máximo en el paso siguiente.

4.2.1 Teorías de falla

Antes de entregar los resultados obtenidos mediante la modelación, es bueno aclarar cuáles son los criterios de falla para los materiales adoptados al momento de estudiar los esfuerzos máximos en los sistemas de pavimentación que entrega la simulación. Se separan en dos categorías, teorías de falla para materiales frágiles, que en este caso la utilizada fue el criterio de Von Mises, y teorías para materiales dúctiles, donde está el criterio de Rankine y de Mohr.

4.2.1.1 Teoría de la máxima energía de distorsión (Criterio de Von Mises)

Este criterio puede considerarse un refinamiento del criterio de Tresca. El criterio de la máxima energía de distorsión fue formulado primeramente por Maxwell en 1865 y más tarde también mencionado por Huber (1904). Sin embargo, fue con el trabajo de Richard Edler von Mises (1913) que el criterio alcanzó notoriedad, a veces se conoce a esta teoría de fallo elástico basada en la tensión de Von Mises como teoría de Maxwell-Huber-Hencky-Von Mises. La expresión propuesta por Von Mises y H. Hencky, de acuerdo con este criterio una pieza resistente o elemento estructural falla cuando en alguno de sus puntos la energía de distorsión por unidad de volumen rebasa un cierto umbral:

$$e_{dist} \geq \frac{\sigma_y}{2E}$$

En términos de tensiones este criterio puede escribirse sencillamente en términos de la llamada tensión de von Mises como:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \geq \sigma_y$$

Donde:

$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, son las tensiones principales de en el punto considerado.

4.2.1.2 Teoría del máximo esfuerzo de corte

Este criterio fue propuesto por primera vez por Coulomb (1736-1806), y posteriormente descrito por Tresca en 1864.

Establece que la falla ocurre cuando el esfuerzo de corte en la pieza excede la mitad del esfuerzo de fluencia del material. Este es un límite más conservador que el de Von-Mises.

$$\tau_{ys} = 0.5\sigma_y$$

4.2.1.3 Teoría del máximo esfuerzo normal

Propuesta por Rankine, bajo este criterio un material frágil fallará si en alguno de sus puntos sucede que la tensión normal máxima en un punto supera la tensión admisible obtenida del ensayo de tracción o si la tensión normal mínima es menor a la tensión admisible del ensayo de compresión del material. De esta manera, la falla se produciría cuando se cumpliese alguno de los dos criterios siguientes:

$$\max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \geq S_{ut}, \text{ cuando } |\max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)| > |\min(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)|$$

$$\min(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \geq S_{uc}, \text{ cuando } |\min(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)| > |\max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)|$$

4.2.1.4 Criterio de falla de Mohr

En laboratorio una muestra del material se conforma como una viga en rotación a la cual se aplica un momento flector puro, de forma que el esfuerzo varía de tensión máxima a compresión máxima.

4.2.2 Propiedades de los materiales

Para la modelación se definieron cuatro tipos de materiales de los cuales se componen las diferentes piezas. Estos cuatro materiales son hormigón H35 (paneles), grout de alta resistencia (grout para sellar las conexiones transversales), acero A44-28H (barras de transferencia) y teflón (placas unidas de dientes de sistema machihembrado), cuyas propiedades se detallan en la Tabla IV.1.

Tabla IV.1. Propiedades de los distintos materiales utilizados.

Hormigón H35	Acero A44-28H
Densidad	2400 [kg/m ³]
Módulo de Young	26000 [Mpa]
Coeficiente de Poisson	0,2
Módulo de Corte	10833 [Mpa]
Módulo de Elasticidad Volumétrico	14445 [Mpa]
Tensión última a la compresión	30 [Mpa]
Tensión última a la tracción	3 [Mpa]
Densidad	7800 [kg/m ³]
Módulo de Young	200000 [Mpa]
Coeficiente de Poisson	0,29
Módulo de Corte	77519 [Mpa]
Módulo de Elasticidad Volumétrico	158730 [Mpa]
Tensión última a la compresión	- [Mpa]
Tensión última a la tracción	440 [Mpa]
Límite de Fluencia	280 [Mpa]

Grout Alta Resistencia	Teflón (Politetrafluoretileno)
Densidad	2300 [kg/m ³]
Módulo de Young	37000 [Mpa]
Coeficiente de Poisson	0,35
Módulo de Corte	13704 [Mpa]
Módulo de Elasticidad Volumétrico	41111 [Mpa]
Tensión última a la compresión	50 [Mpa]
Tensión última a la tracción	5 [Mpa]
Densidad	2200 [kg/m ³]
Módulo de Young	500 [Mpa]
Coeficiente de Poisson	0,46
Módulo de Corte	171,23 [Mpa]
Módulo de Elasticidad Volumétrico	2083,33 [Mpa]
Tensión última a la compresión	15 [Mpa]
Tensión última a la tracción	20 [Mpa]

4.2.3 Sistema barra-ranura

La configuración de paneles que se modeló consta de tres paneles tipo ranuras – barras, y uno de tipo ranuras – ranuras, además claro de los dos paneles que cumplen la función de simular lo que viene siendo el pavimento existente.

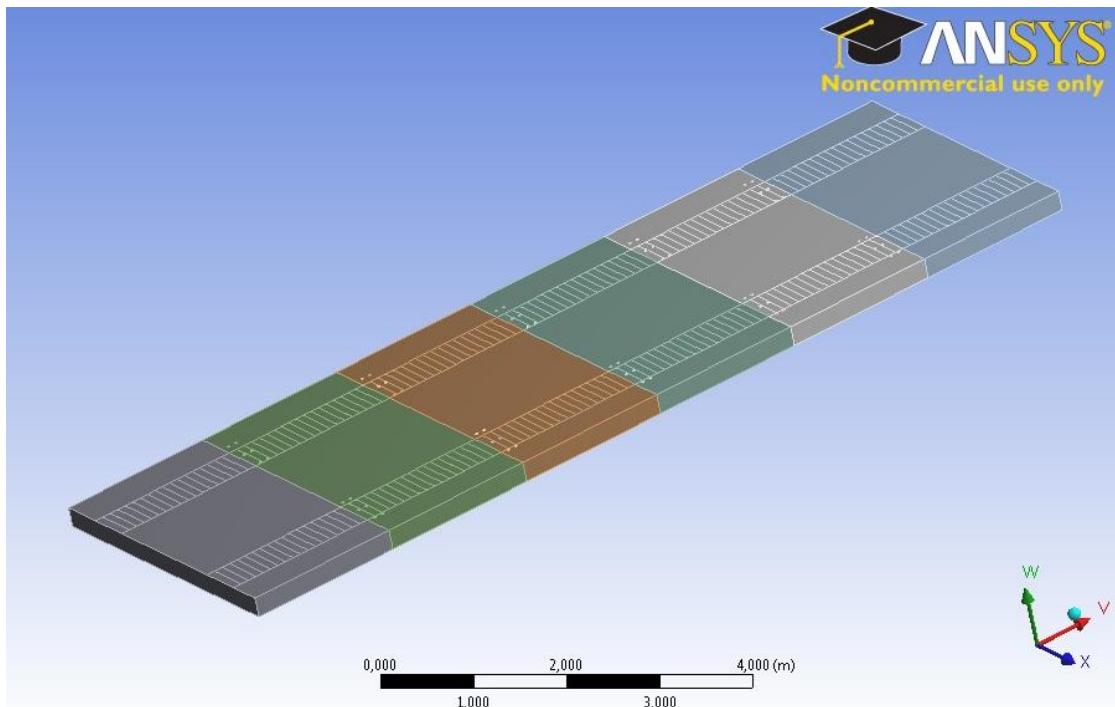


Figura IV.6. Sistema ranuras - barras de paneles prefabricados.

Tanto éste modelo como para el modelo machihembrado, que se explica más adelante, considera un análisis altamente no lineal (adherencia entre materiales y contacto entre piezas) por lo que el proceso de convergencia se torna complicado. Debido a esto, el análisis se realizó en pequeñas deformaciones, ya que las grandes deformaciones suelen complicar enormemente la convergencia del cálculo, además las deformaciones de los elementos suelen ser pequeñas por la propia naturaleza del hormigón y grout.

4.2.3.1 Mallado

Cada elemento conformante del sistema posee un mallado particular, variando los tamaños de los elementos finitos en relación al tamaño de la pieza, siendo el mallado de la barra el con una arista de tetraedro de menor largo, como se muestra en la Tabla IV.2.

Tabla IV.2. Tamaño elementos finitos de cada elemento.

Elemento o superficie	Arista tetraedro [m]
Mesh element size	0,15
Body sizing barras barras	0,02
Body sizing grout	0,04
Face sizing borde paneles	0,1

Lo ideal es poder generar un mallado lo más fino posible con el fin de poder obtener con mayor precisión y continuidad los valores de esfuerzos y deformaciones unitarias y totales que arrojará el modelo, y así poder realizar una simulación que se asemeje lo más posible al cómo debiesen de reaccionar los elementos en la realidad. Pero al incrementar el número de elementos finitos incrementa el tiempo de cálculo, haciéndose más tediosa la convergencia entre los diferentes pasos, y requiriendo un equipo sofisticado para poder hacer correr el programa de simulación.

De acuerdo a lo anterior, y probando con una serie de combinaciones de tamaño, se llegó a unos valores óptimos de tamaño de elemento, considerando una correcta convergencia y continuidad en la solución, y un tiempo moderado de convergencia del modelo, teniendo en cuenta que al existir numerosos elementos que forman parte del sistema, es muy alta la no linealidad de la solución debido a la gran cantidad de superficies de contacto que se producen entre las piezas ensambladas, lo cual también repercute en el tiempo requerido para hacer correr el modelo completo.

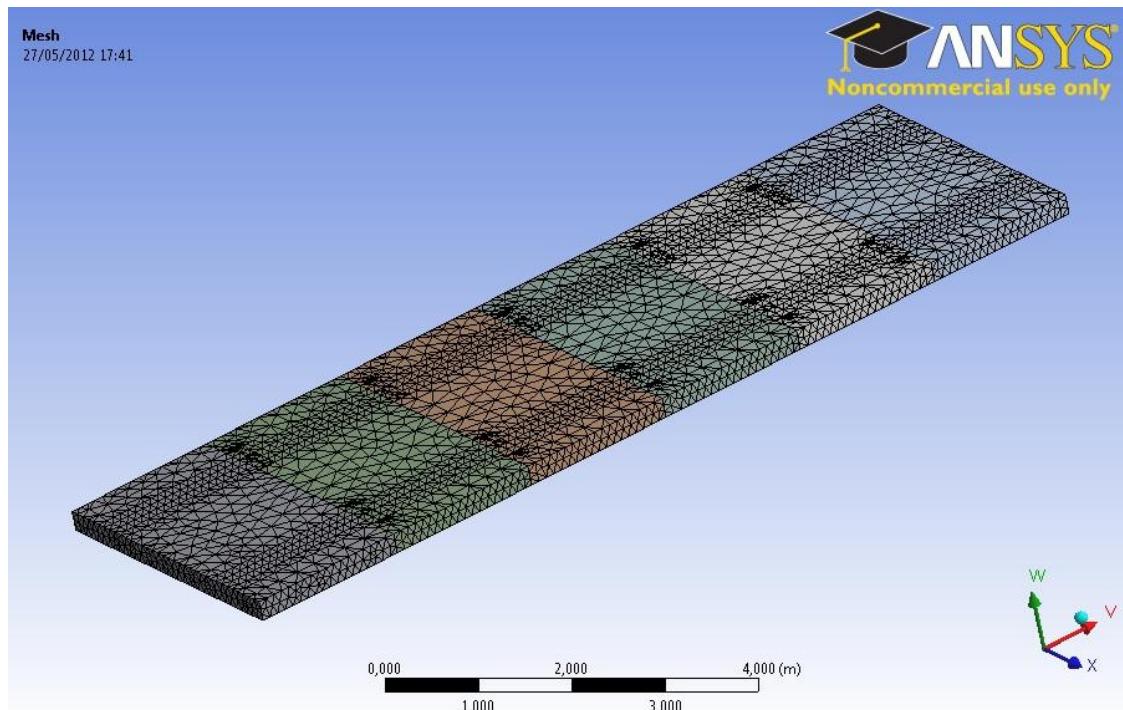


Figura IV.7. Mallado de sistema de paneles ranuras - barras.

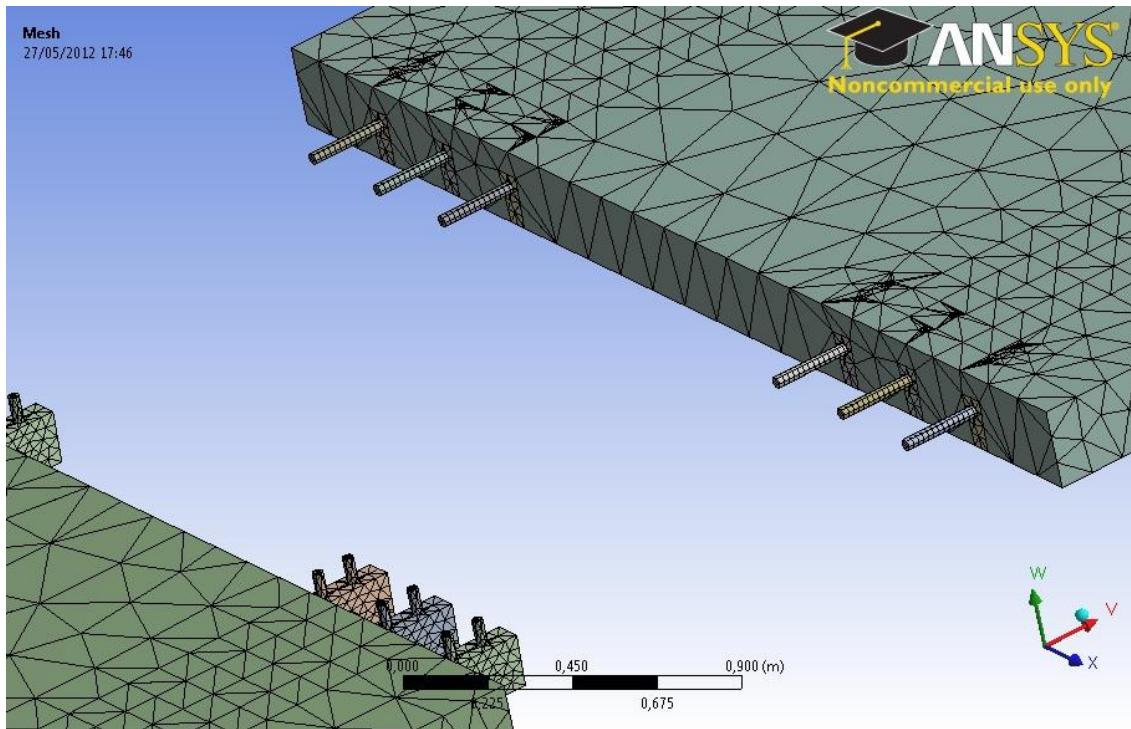


Figura IV.8. Detalle mallado de barras y grout.

4.2.3.2 Contacto entre piezas

Se debieron definir los tipos de contactos entre las piezas, definiéndose los contactos entre superficies como bonded, no separation o frictionless. Para el contacto entre panel y barras, al estar éstas últimas embebidas, se le asignó un contacto de tipo bonded, ya que no permite desplazamientos y separaciones entre superficies. Suponiendo que el grout se adhiere de forma perfecta al hormigón, asumimos un tipo de contacto bonded para simular esta interacción de superficies. El contacto entre barras y grout se definió de tipo no separation, que es similar a la bonded, ya que no permite separación entre superficies, pero si pueden existir pequeños deslizamientos ausentes de fricción. Los paneles no están unidos entre sus caras, permitiéndose el desplazamiento entre sus caras transversales (únicas caras que pueden estar en contacto), por lo que a este contacto se les asignó un tipo de contacto frictionless.

4.2.3.3 Condiciones de contorno (soportes) y cargas solicitantes

Los soportes definidos para el modelo vienen siendo el soporte que le otorga el suelo a los paneles, definiendo un módulo de reacción del suelo o coeficiente de balasto, que en el programa se simula con un soporte elástico de valor $1,3 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ aplicado en las caras inferiores de los paneles como se detalla en la Figura IV.9. en donde aparece con color morado el área al que se le aplica el soporte elástico.

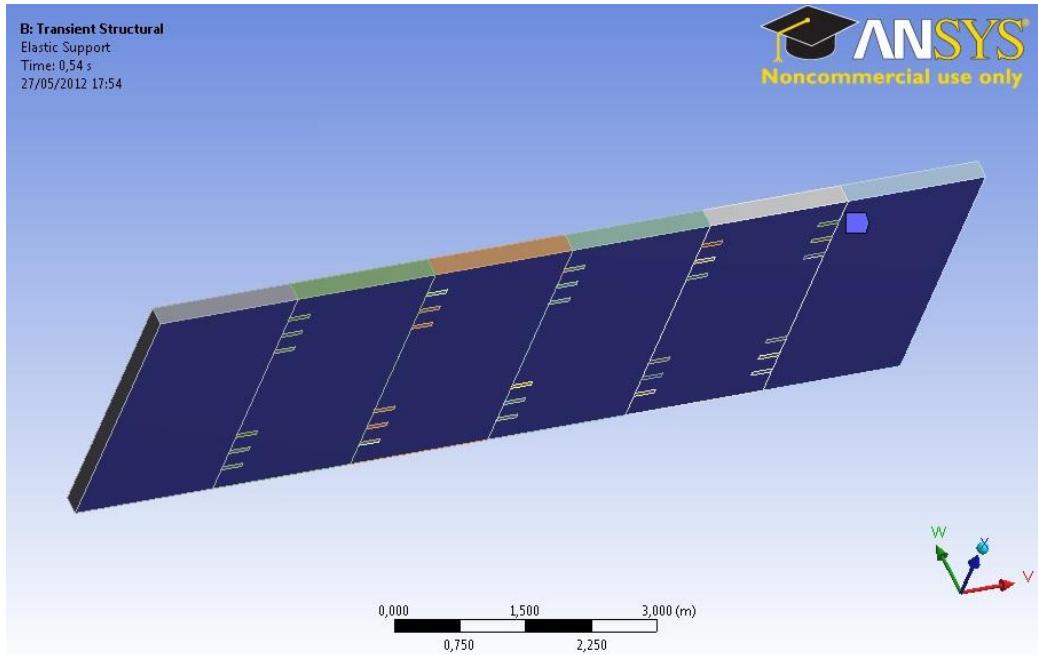


Figura IV.9. Soporte elástico aplicado en la base del sistema (color morado).

Además de la aplicación del soporte elástico en la base del sistema, se aplicó un soporte de tipo fixed en los bordes o caras laterales de los paneles extremos correspondientes a las losas de pavimento existente, que fijan a los paneles extremos impidiendo el desplazamiento de ellos en el plano de tránsito, simulando el confinamiento que le otorga la(s) calzada(s) y/o la berma que posee a sus costados el pavimento existente.

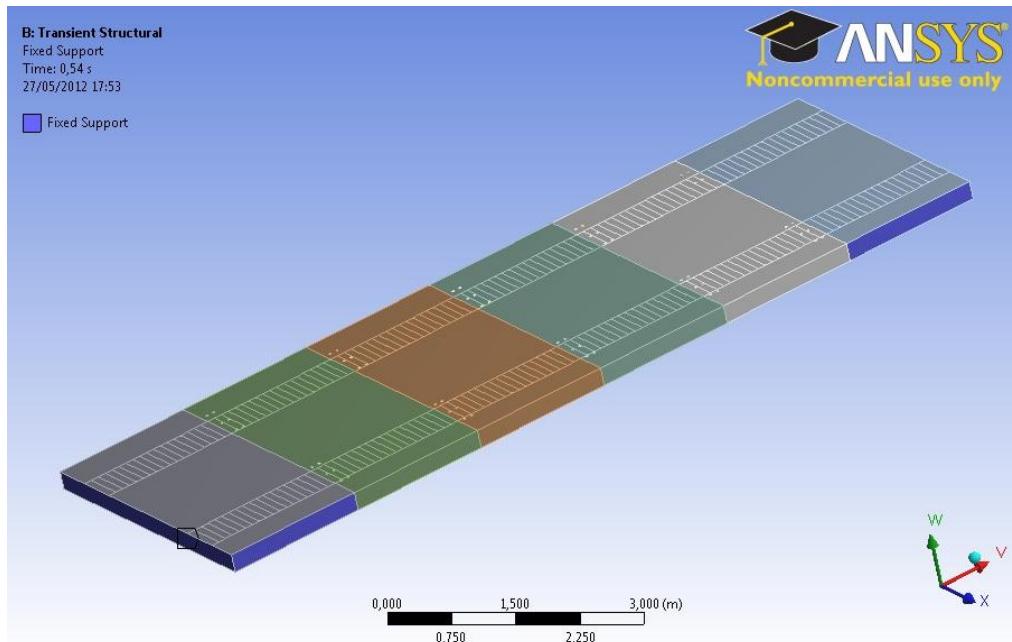


Figura IV.10. Soporte de tipo fixed en bordes de losas correspondientes al pavimento existente.

Posterior a la asignación de los soportes, se prosiguió con la aplicación de las cargas ejercidas por el eje simple doble que transitará a lo largo del tramo. Estas presiones, como se mencionó previamente, se asignaron a cada paso del modelo transiente, presión cuya magnitud es de 1,1MPa. En la Figura IV.11. se muestran las primeras cuatro cargas (presiones) aplicadas sobre el sistema de losas, ilustrando el avanzar de ellas que simula el avance de las ruedas del eje simple doble sobre el pavimento.

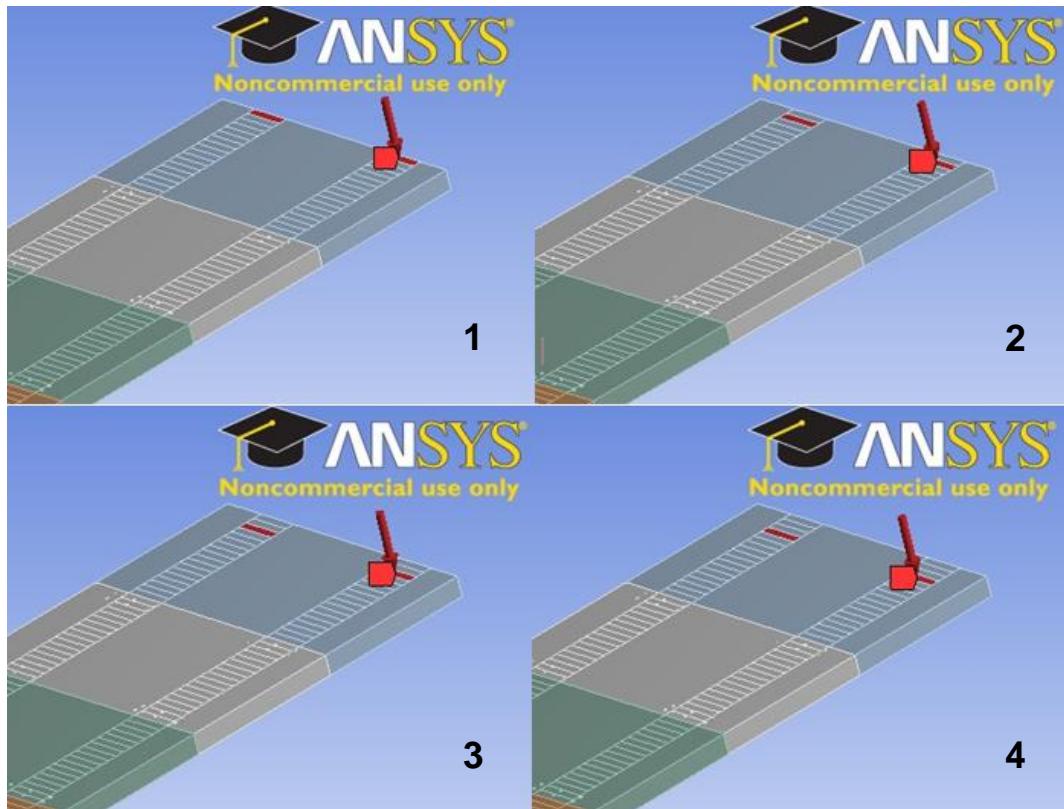


Figura IV.11. Secuencia avance de cargas, desde la primera carga a la cuarta, desde izquierda a derecha.

Una vez asignadas las cargas a cada paso del modelo transiente, se hace correr el modelo, esperando obtener el esfuerzo equivalente o de Von Mises máximo, el esfuerzo de corte máximo, la deformación unitaria máxima, deformación total y esfuerzo principal máximo.

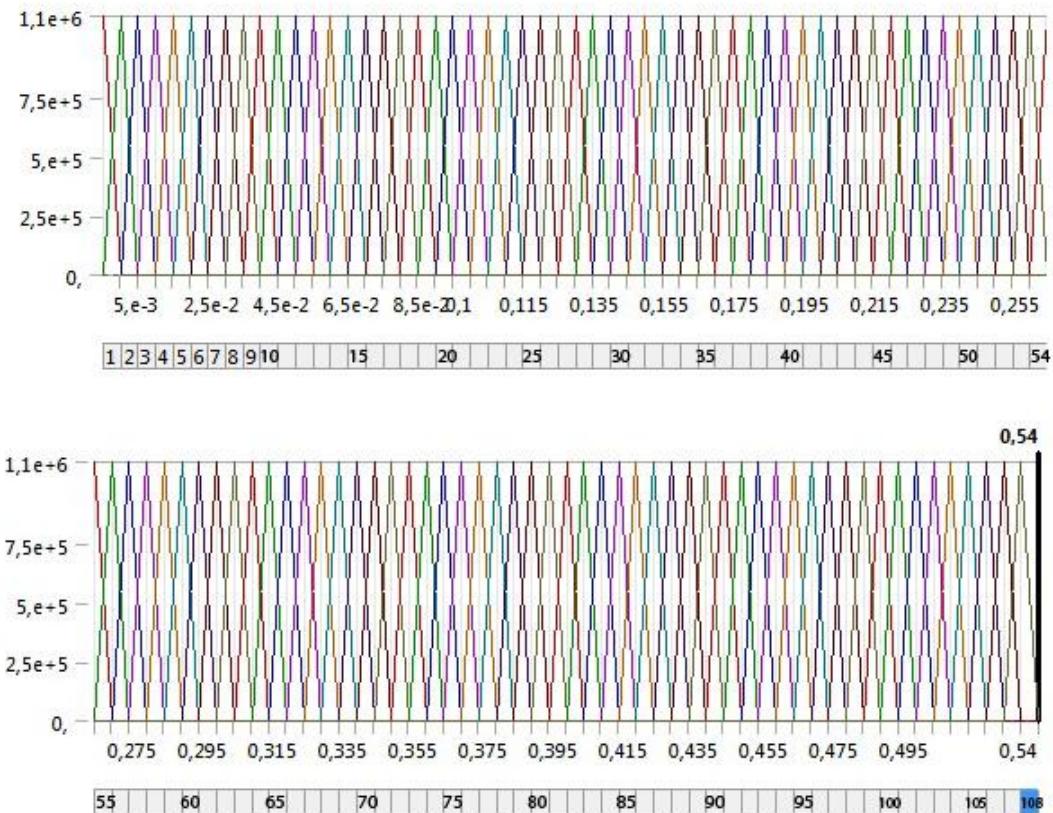


Figura IV.12. Gráfico tiempo (pasos) v/s Presión

Se puede ver la Figura IV.12. que los pasos se traslapan de modo tal que favorecen la continuidad del modelo, lo cual ayuda a la convergencia de la iteración. Al momento de llegar la carga a su peak, comienza a aplicarse la carga del siguiente paso con la misma pendiente de la anterior, existiendo en todo momento una magnitud de carga de 1,1MPa en cada una de las dos huellas, que se distribuye en los rectángulos contiguos de forma gradual a medida que avanza el neumático por la huella.

4.2.3.4 Esfuerzo Equivalente de Von Mises

El esfuerzo máximo de Von Mises, se desarrolla cuando la carga se ubica sobre el panel barras-ranuras, justo después de la junta transversal entre el panel barras-ranuras y el panel ranuras-ranuras, como se ve en la Figura IV.13. En la Figura IV.14. se observa el estado tensional del sistema completo en el momento en el que se produce el máximo esfuerzo de Von Mises.

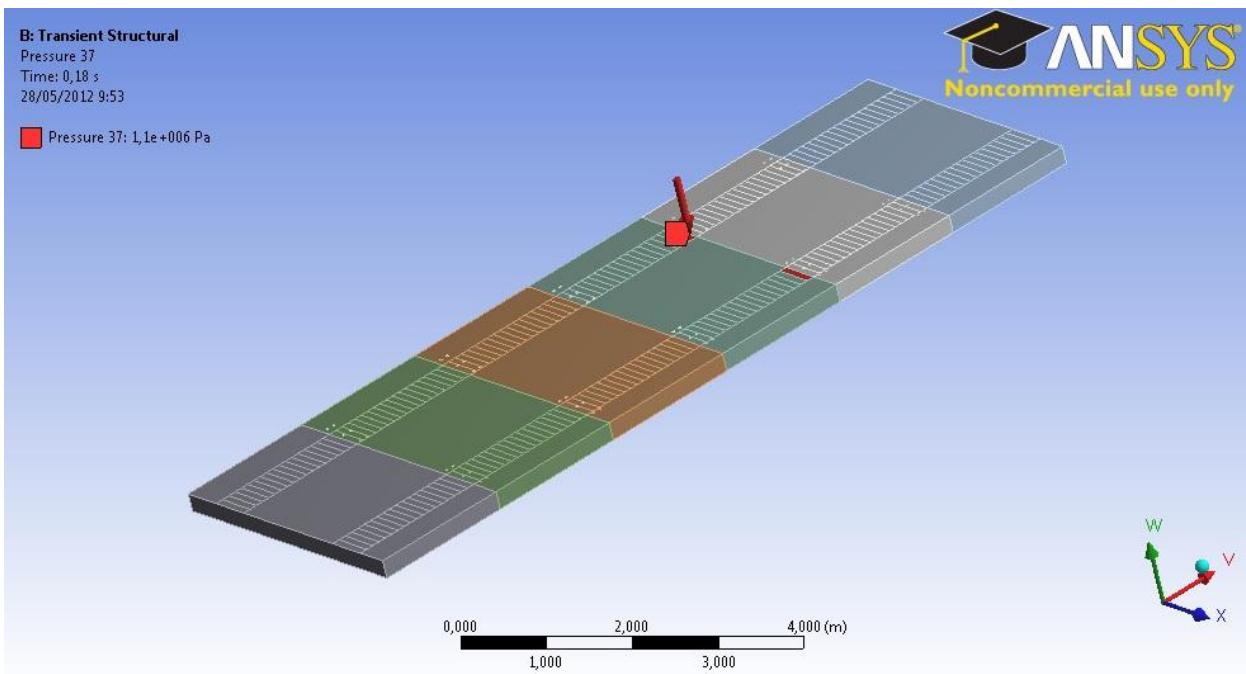


Figura IV.13. Ubicación carga en el momento de máximo esfuerzo de Von Mises.

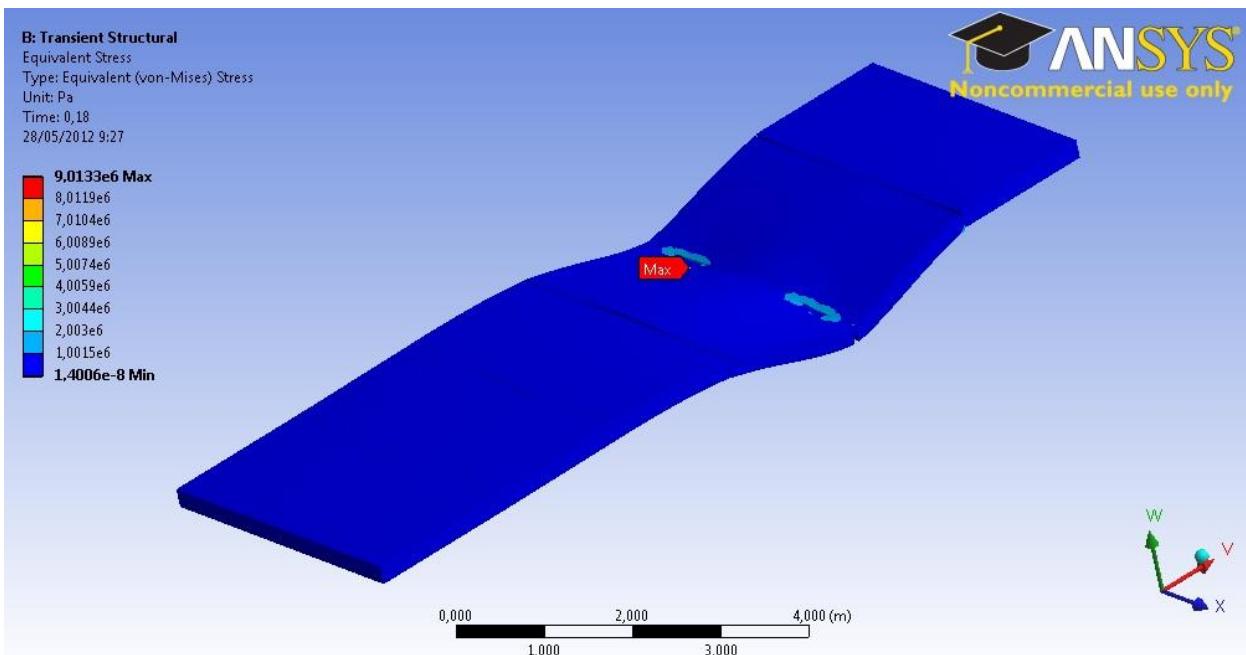


Figura IV.14. Ubicación esfuerzo de Von Mises máximo.

Para poder analizar mejor el lugar en donde se produce el máximo, se procede a ocultar el panel tipo barras-ranuras que conecta con el panel ranuras-ranuras. De esta forma se da con que el máximo esfuerzo de Von Mises se desarrolla prácticamente en el centro de la barra, pero inclinado hacia el lado del panel barras-ranuras, panel en el cual la barra se encuentra embebida.

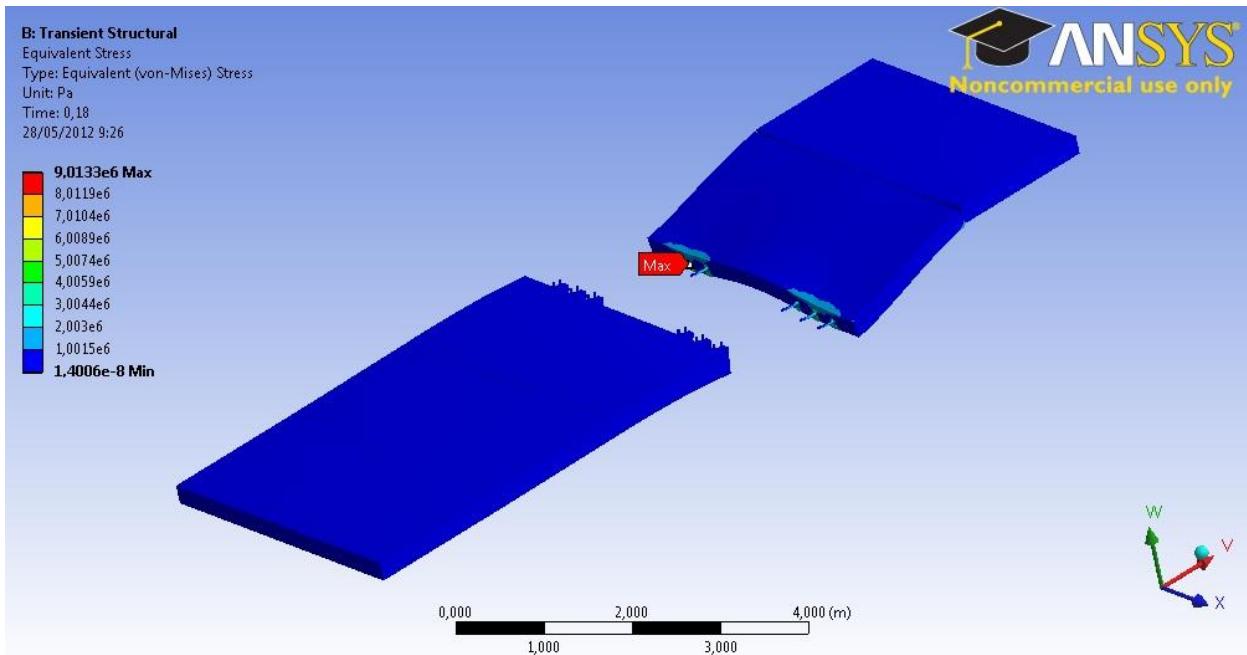


Figura IV.15. Esfuerzo de Von Mises máximo en barra de traspaso.

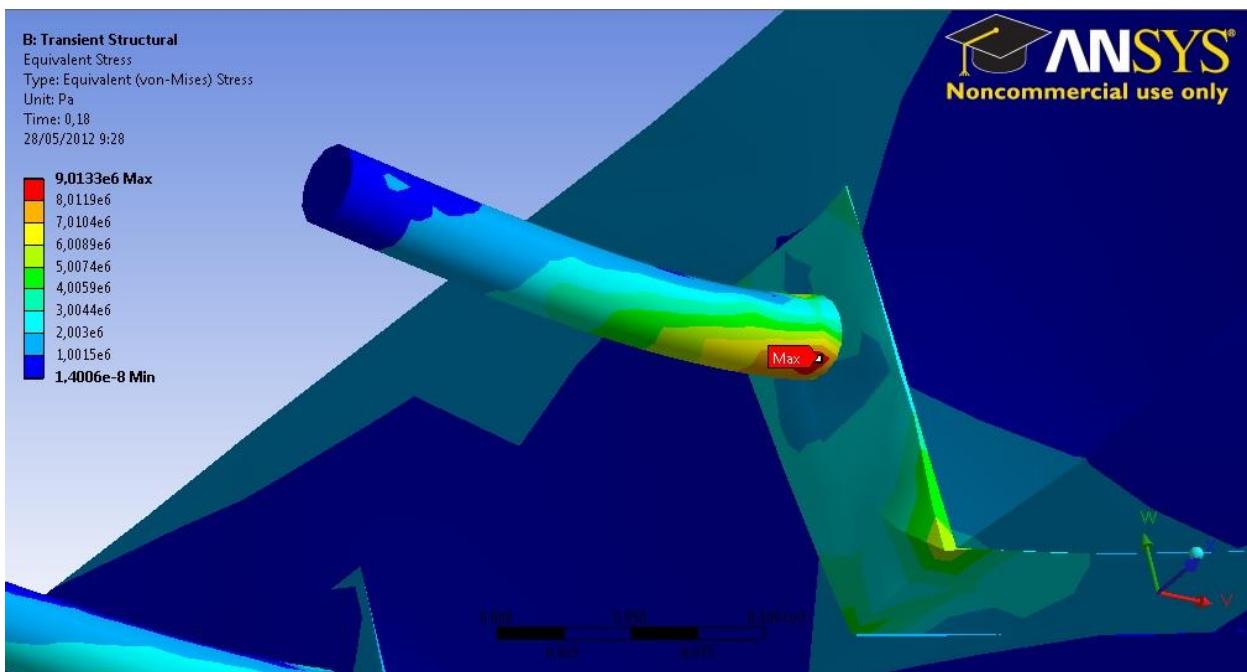


Figura IV.16. Close-up esfuerzo de Von Mises máximo en barra de traspaso.

Como se observa en la Figura IV.16, el valor máximo de tensión de Von Mises que se alcanza en el sistema, es de 9,013MPa, que equivale a un 3,2% del esfuerzo de fluencia, descartando completamente algún tipo de falla en las barras por sobre exigencia mecánica con el transitar de un eje simple doble con el tonelaje máximo permitido por normativa vial.

Como era de esperar se observa que la distribución de esfuerzos máximos alcanza sus máximos valores al pasar el eje sobre las 3 juntas transversales centrales, mientras que en las juntas transversales de los extremos (conexión panel prefabricado con pavimento existente) se alcanzan valores de alrededor un 15% menor, pero tiende a mantenerse un valor alto en un rango de unos 15 pasos, mientras que en las juntas transversales centrales se alcanzan los peaks de forma abrupta, así como también decaen rápidamente. En la Figura IV.17. se puede observar lo anteriormente señalado, destacando también la simetría que se produce a lo largo del tramo en lo que respecta a la distribución de tensiones máximas de Von-Mises en los elementos dúctiles (barras de acero).

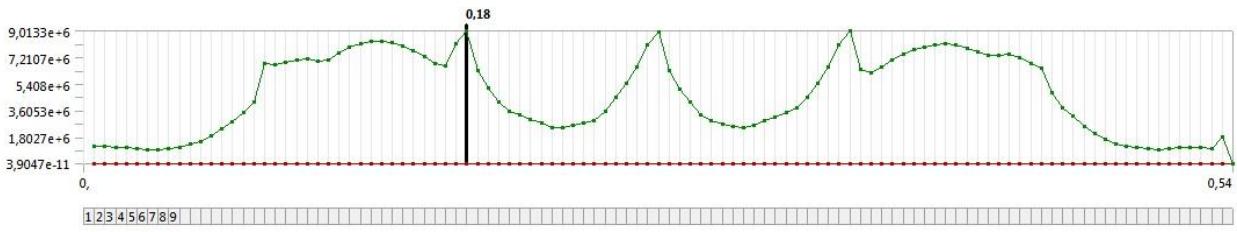


Figura IV.17. Gráfico esfuerzos máximos de Von-Mises por paso a lo largo del tramo.

4.2.3.5 Esfuerzo normal máximo

Al igual que para el caso del máximo esfuerzo de Von Mises, la ubicación de la carga al momento de generarse el esfuerzo normal máximo es sobre la junta transversal entre el panel barras-ranuras y el panel ranuras-ranuras. En este caso la carga se ubica en el panel ranuras-ranuras justo antes de la junta. Al despejar la visual para poder determinar el lugar exacto en el que se produce el esfuerzo normal máximo, detallándose en la Figura IV.18. que el esfuerzo normal máximo se desarrolla en el grout, en uno de sus vértices inferiores. Analizando en qué dirección se obtenía el máximo esfuerzo normal, que comprobó que éste ocurría en el eje X, siendo mayor la magnitud del esfuerzo normal positivo en comparación a la magnitud del esfuerzo normal negativo, por lo que para el análisis rige el esfuerzo de tracción que puede desarrollarse en el hormigón y el grout.

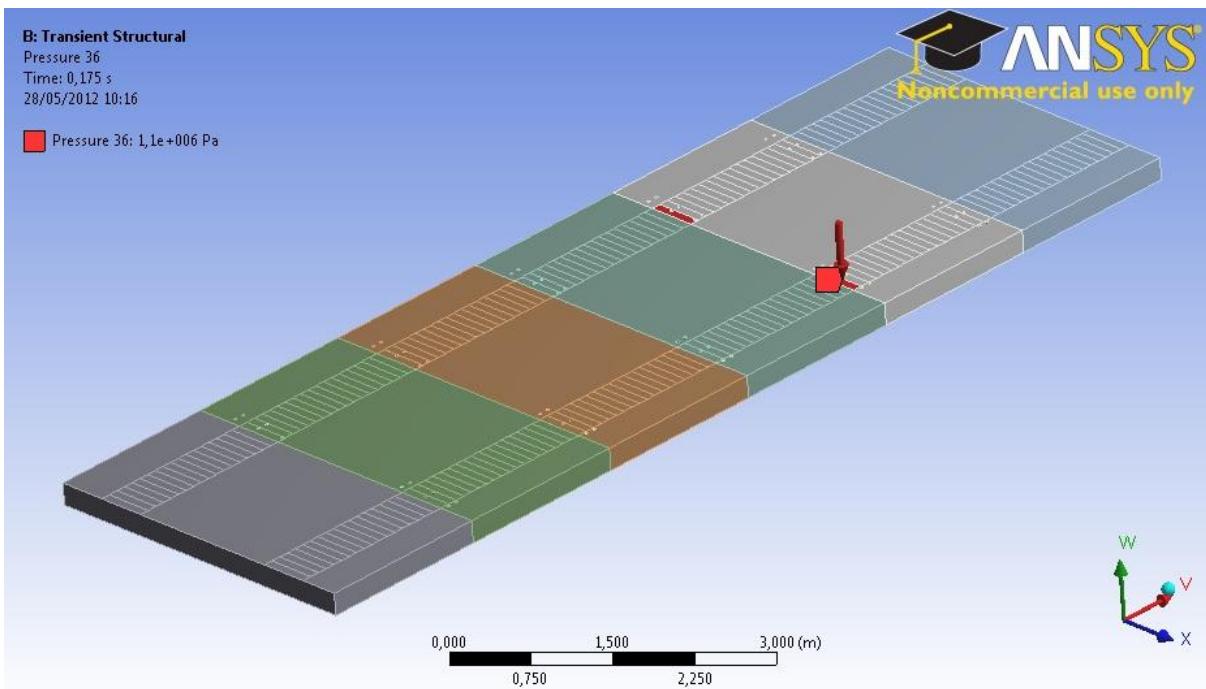


Figura IV.18. Ubicación de carga al momento de producirse el máximo esfuerzo normal.

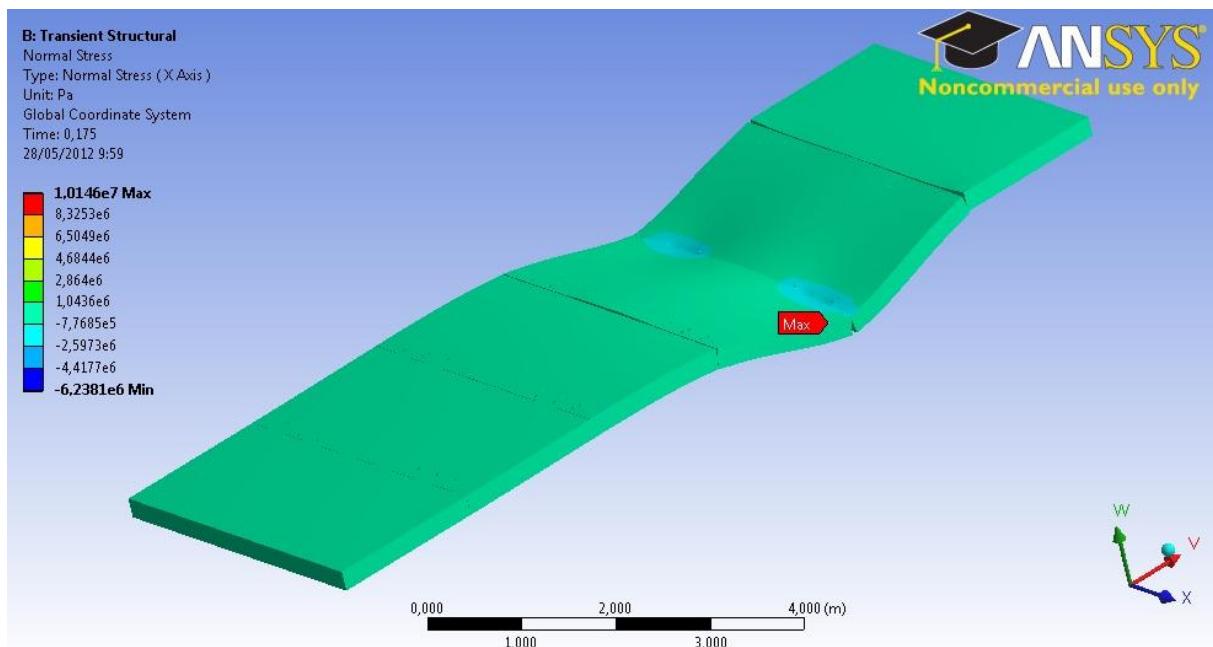


Figura IV.19. Ubicación esfuerzo normal máximo.

Destacar que la tensión se desarrolla en el eje X (eje axial o longitudinal del sistema de pavimentación), rigiéndose los máximos esfuerzos normales por la deformada de la luz de todo el sistema (eje longitudinal) y no por la mayor luz de la losa (eje transversal), esto gracias a la buena continuidad que le otorga al sistema el tipo de conexión mediante barras de traspaso, llegando a desarrollarse mayores curvas de deformación en el eje longitudinal que en el eje transversal de la losa.

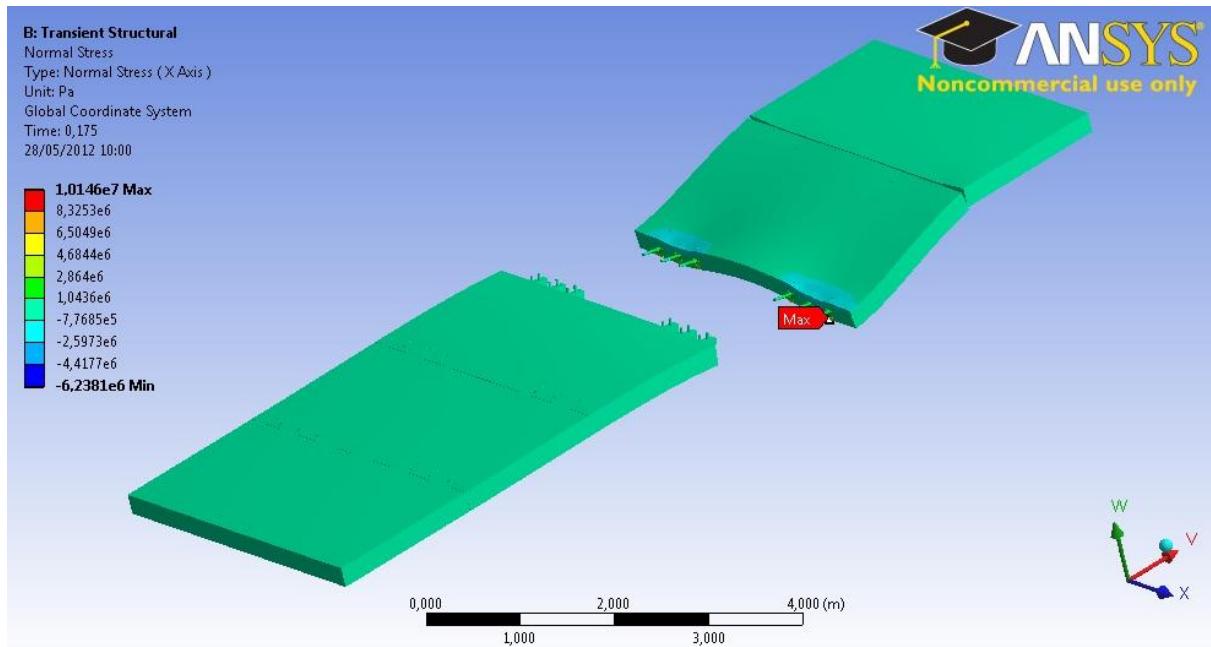


Figura IV.20. Máximo esfuerzo normal en grout.

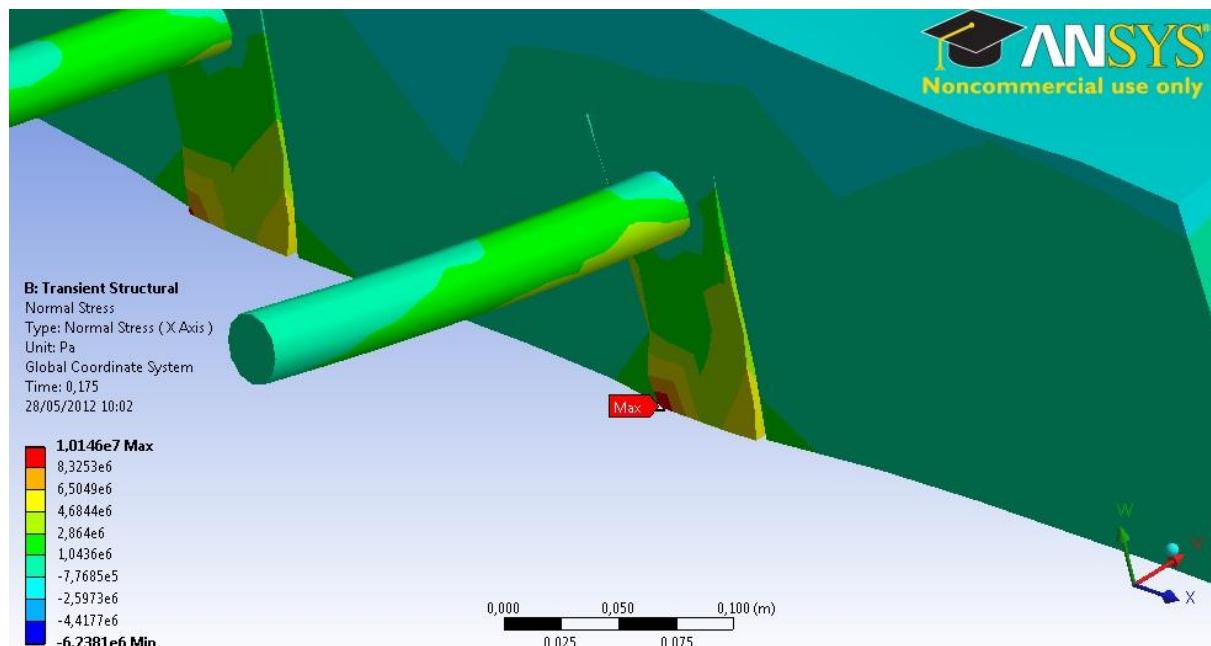


Figura IV.21. Close-up que muestra máximo esfuerzo normal ubicado en el grout.

El máximo esfuerzo normal se desarrolla en el eje X (eje V de las coordenadas en las figuras) y tiene un valor de 10,146 MPa, siendo un esfuerzo de tracción al ser positivo, que equivale a aproximadamente dos veces la tensión última que soporta el grout en tracción, por lo que por el criterio de falla de Rankine podría generarse daño en la pieza de grout al flectarse la pieza. Es necesario corroborar el anterior resultado mediante alguna prueba en terreno que pueda confirmar o descartar la teoría. Comentar que según se señala en la bibliografía internacional, estos sistemas suelen presentar

problemas de desprendimiento de material sellante con el paso del tiempo, por lo que puede que no se aleje el resultado del análisis de esfuerzos normales a la realidad.

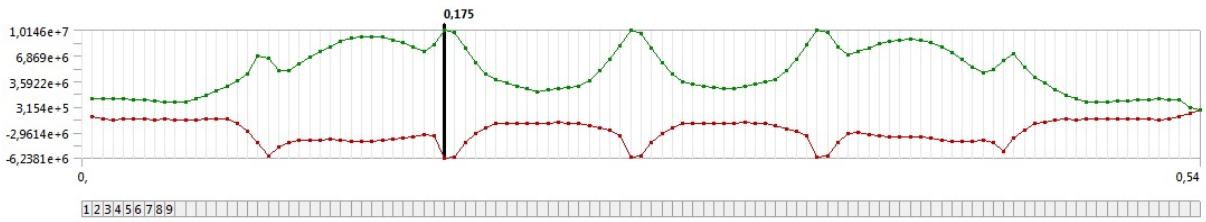


Figura IV.22. Gráfico de máximos esfuerzos normales por paso a lo largo del tramo.

Como se puede ver en el gráfico de la Figura IV.22. los peaks se desarrollan en las tres juntas transversales del centro, en un vértice de la parte inferior de los grouts. Al igual que para el caso de los esfuerzos de Von Mises, el desarrollo de los máximos esfuerzos normales con el transitar del eje, sigue un patrón simétrico entre los extremos y el centro del tramo, lo cual se encuentra dentro de lo lógico al poseer el sistema el mismo tipo de conexión a lo largo de todo el tramo.

4.2.3.6 Deformación unitaria

Los resultados obtenidos demuestran nuevamente que la ubicación de la carga, donde se da en este caso la situación de máxima deformación unitaria, es sobre la junta transversal (Figura IV.23.).

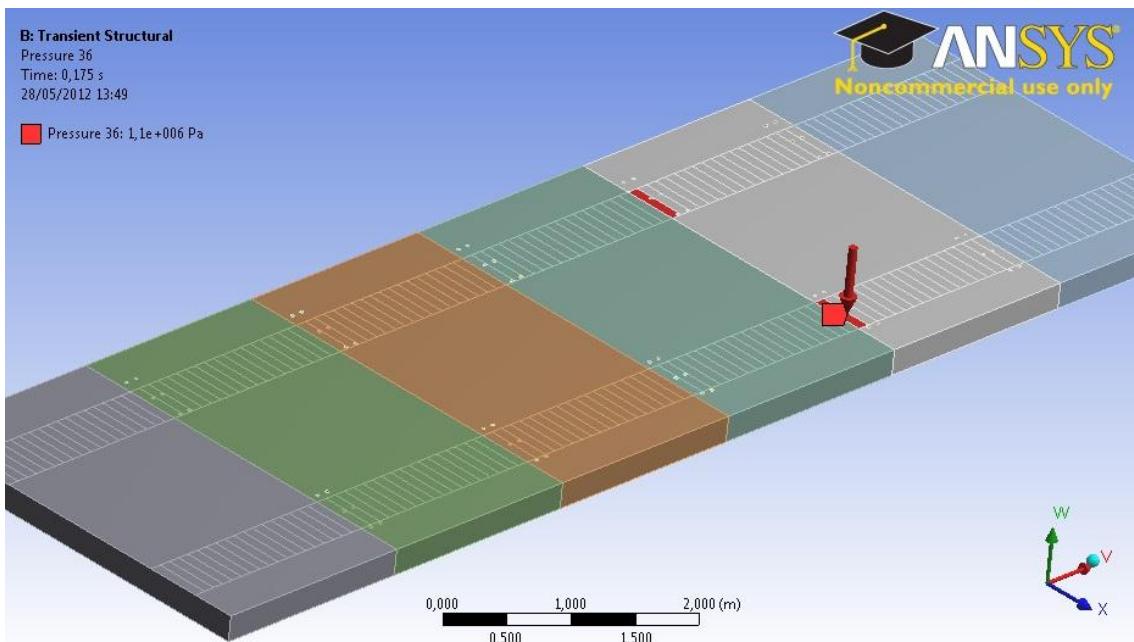


Figura IV.23. Ubicación de carga al momento de producirse la máxima deformación unitaria.

La máxima deformación unitaria obtenida fue de 0,000237%, por lo que prácticamente no sufren deformación las piezas del modelo, ubicándose la deformación máxima en el grout, en el mismo lugar donde se llega al mayor esfuerzo normal en el sistema. En las Figuras IV.24., IV.25. y IV.26. se muestra el sector donde se genera la máxima deformación unitaria, siendo éste el vértice inferior del grout, a la altura de la junta transversal.

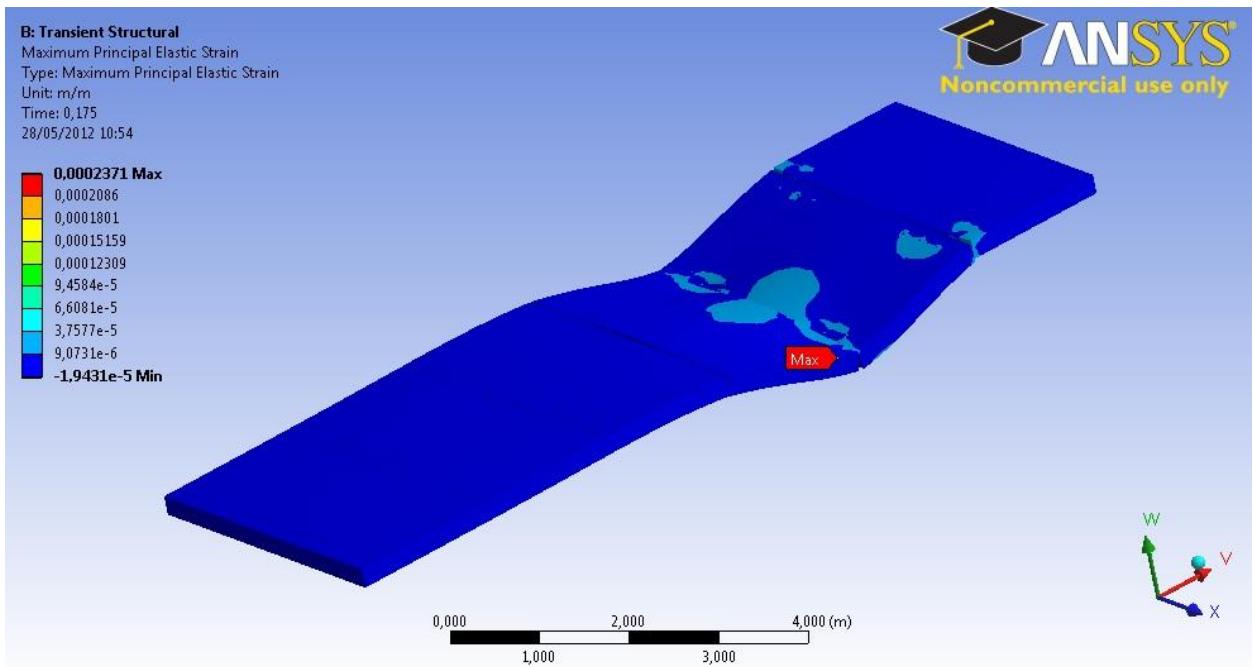


Figura IV.24. Ubicación máxima deformación unitaria en el tramo.

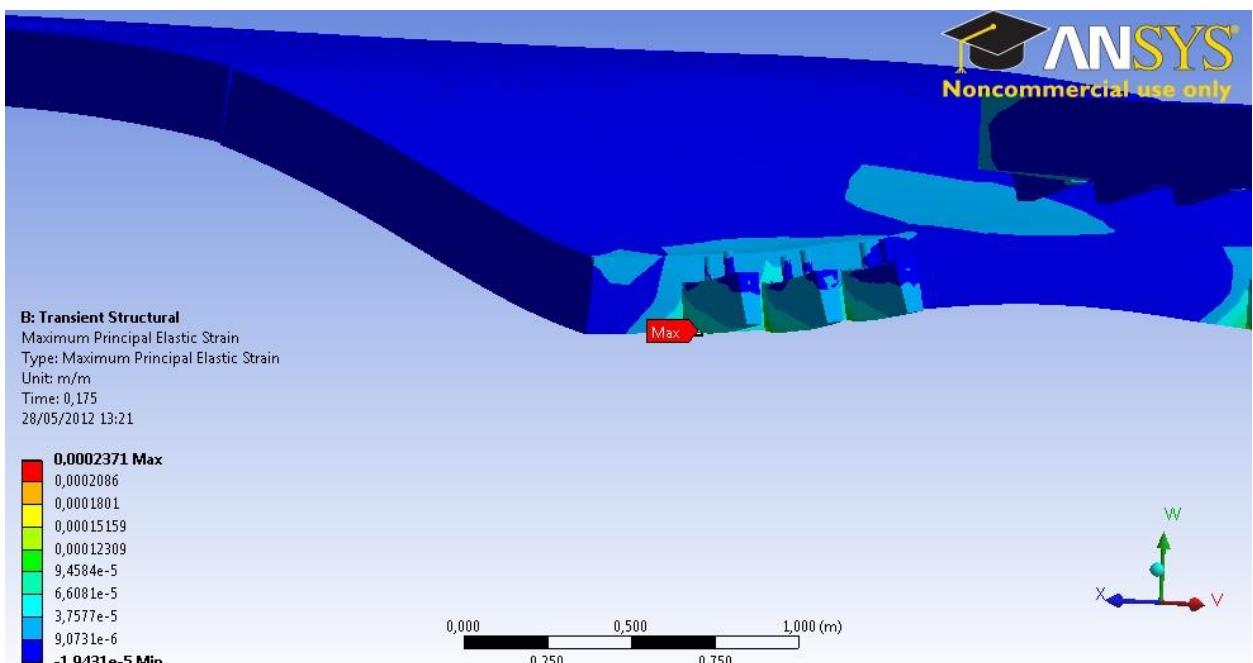


Figura IV.25. Máxima deformación unitaria desarrollada en el grout.

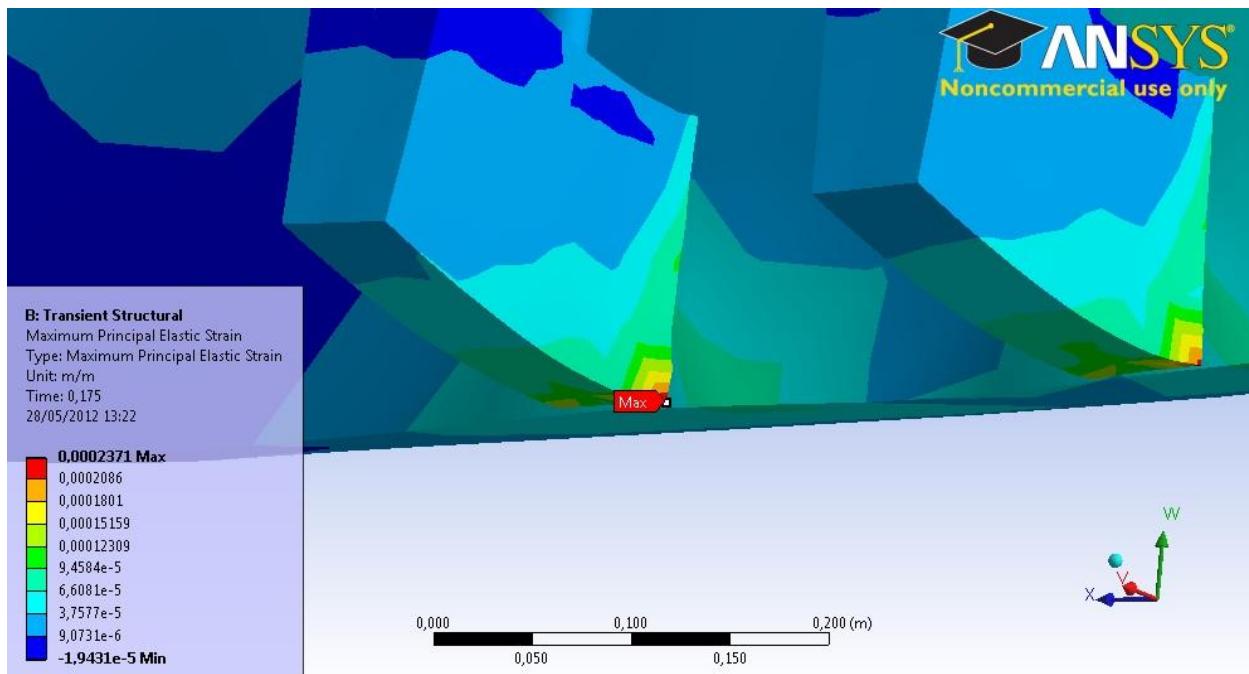
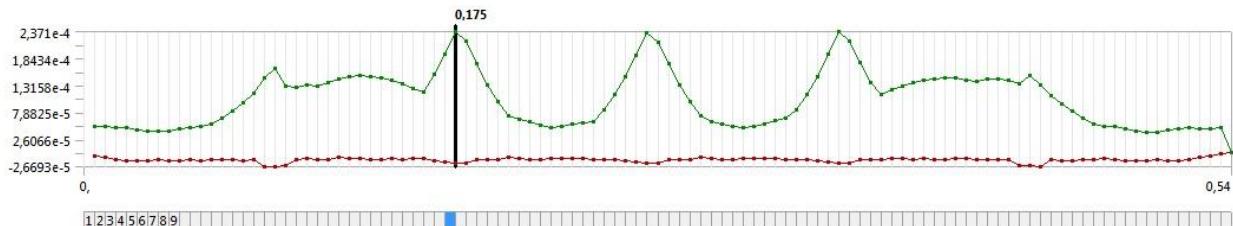


Figura IV.26. Close-up a ubicación de máxima deformación unitaria desarrollada en el grout.



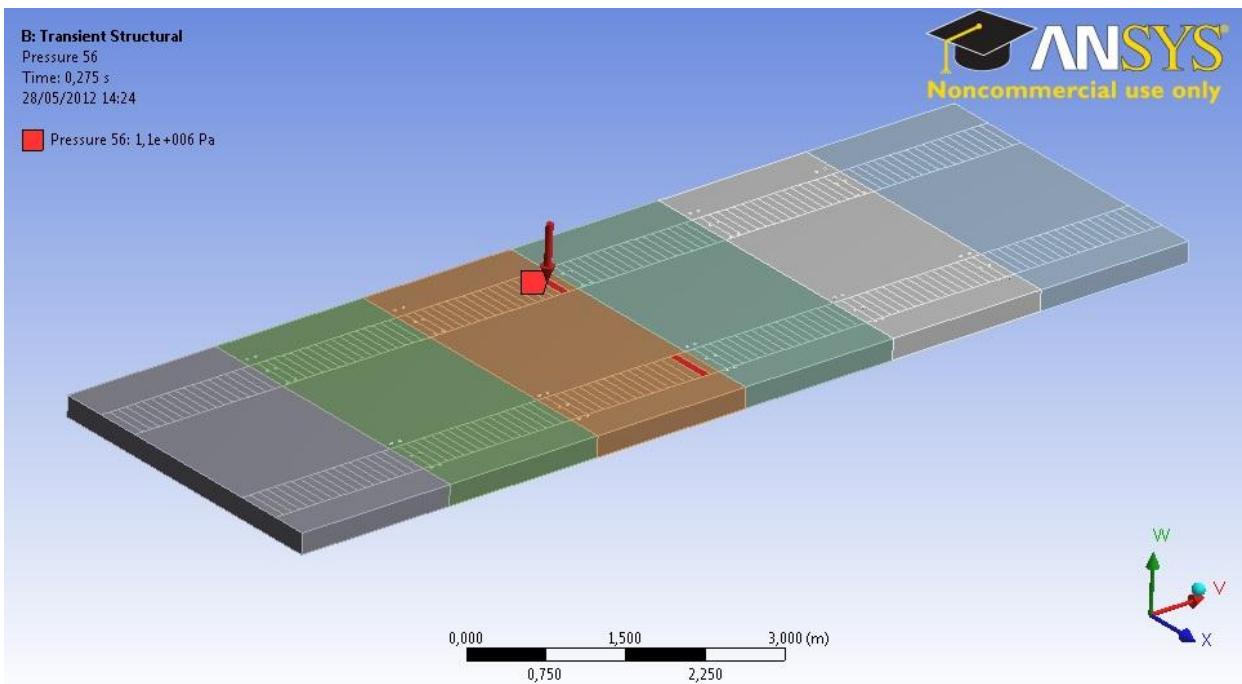


Figura IV.28. Ubicación de carga al momento de producirse la deformación total máxima.

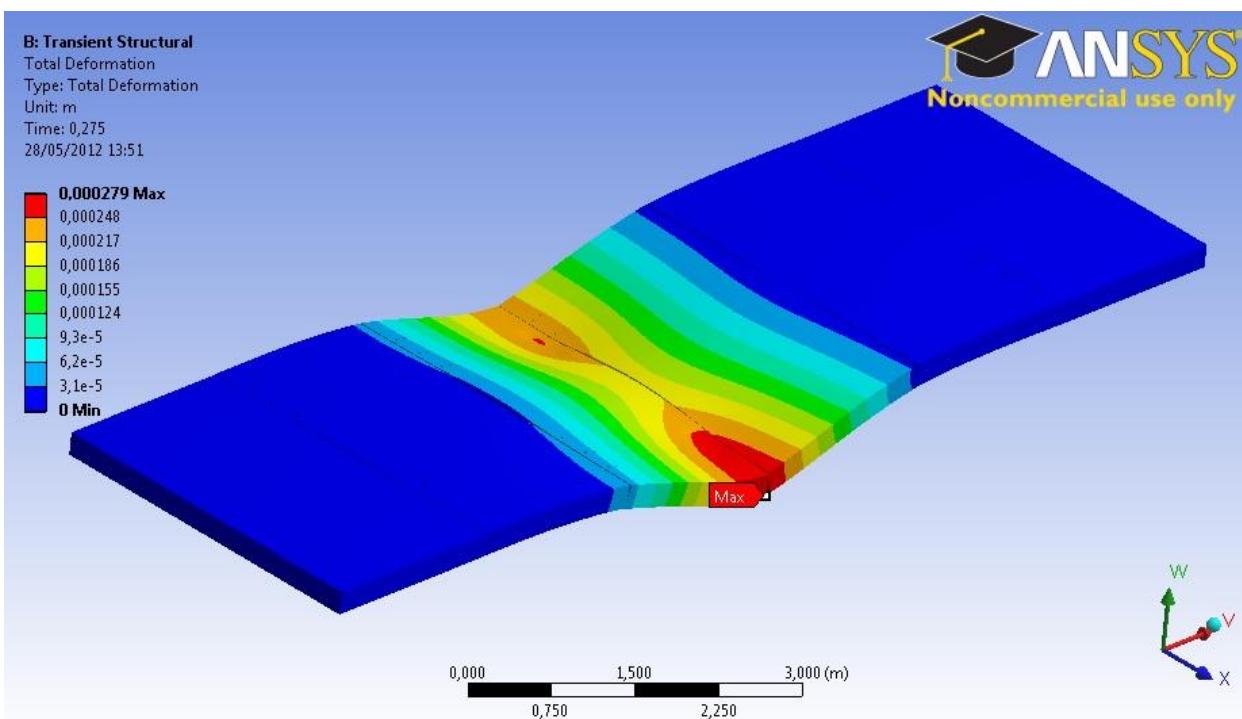


Figura IV.29. Ubicación deformación total máxima en el tramo.

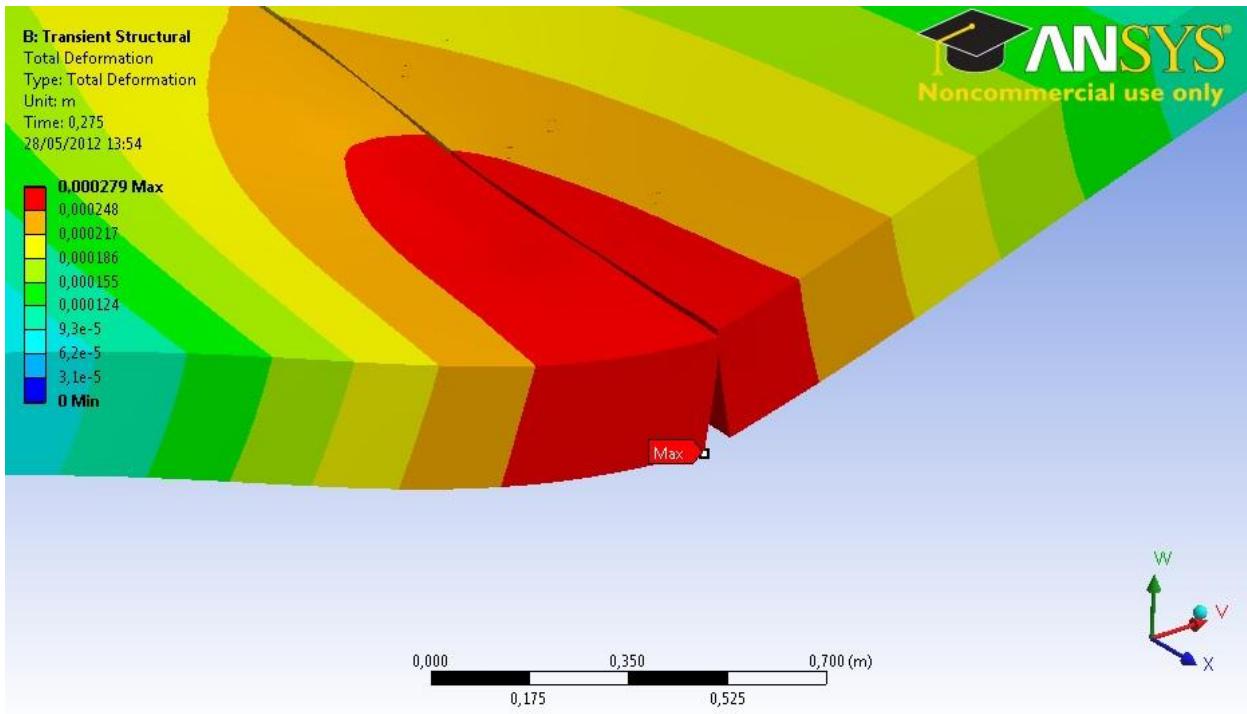


Figura IV.30. Close-up punto del panel donde se genera la deformación máxima.

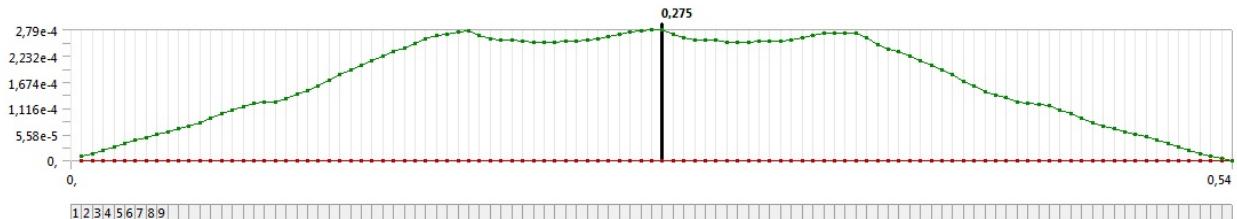


Figura IV.31. Gráfico de deformación máxima por paso y tiempo a lo largo del tramo.

Las deformaciones máximas se producen en el hormigón a la altura de las juntas transversales centrales, correspondientes a las conexiones entre paneles ranuras-barras. La deformación máxima al pasar un eje simple de rueda doble de 11ton sobre el sistema de paneles, alcanza una magnitud de 0,000279m ($\approx 0,28\text{mm}$).

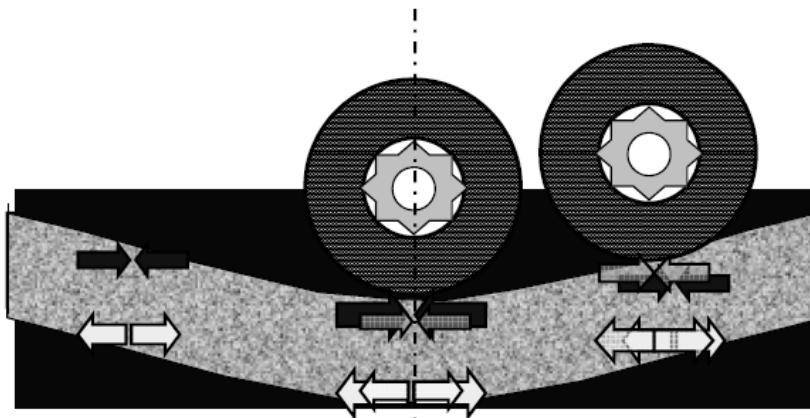


Figura IV.32. Deformada en pavimentos rígidos convencionales.

Lo rescatable es el comprobar que la deformada sigue la misma curva que la obtenida en pavimentos de hormigón convencionales (hormigonados in-situ), como se detalla en la Figura IV.32., demostrando que las barras de transferencia cumplen su función de otorgar continuidad al sistema.

4.2.3.8 Esfuerzo de corte máximo

Al generarse el máximo esfuerzo de corte, la carga se ubica sobre la junta transversal, como se ha dado para los casos anteriores. La zona en donde ocurre el corte máximo se ubica en las barras de transferencia de carga, aproximadamente a la altura de la junta transversal, inclinada hacia el lado de barra embebido (opuesto al lado grouteado).

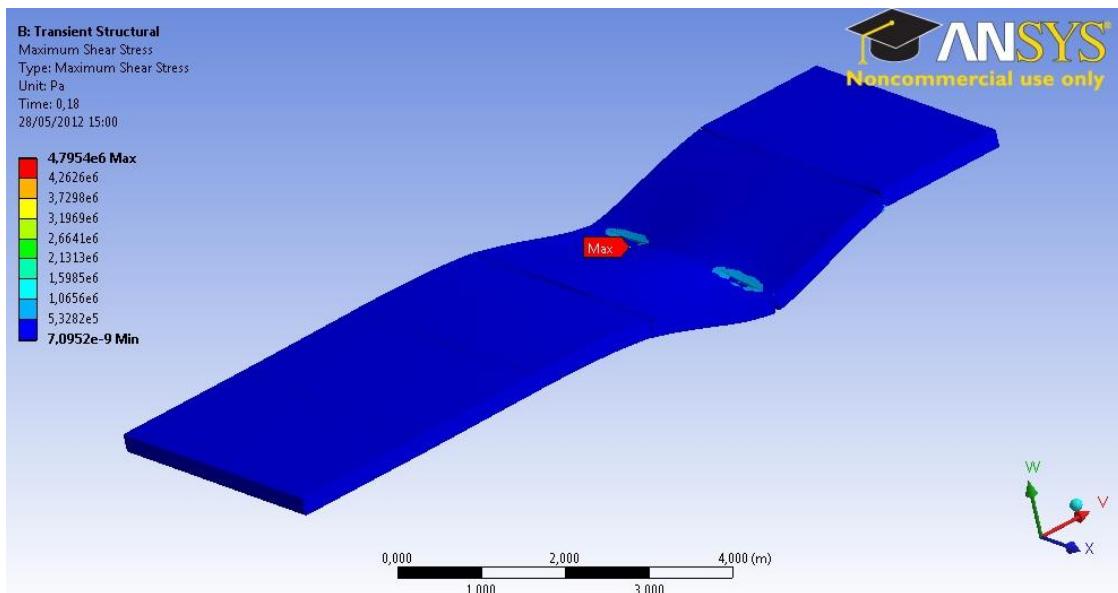


Figura IV.33. Ubicación de esfuerzo de corte máximo en el tramo.

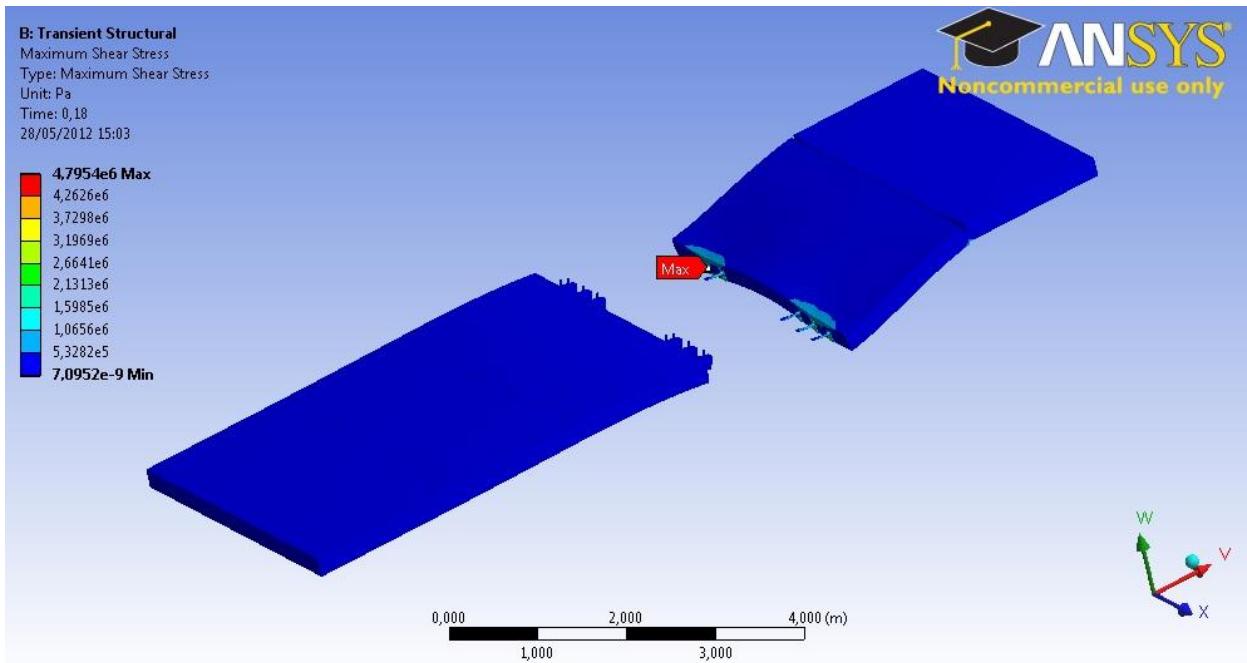


Figura IV.34. Esfuerzo de corte máximo del tramo ubicado en la barra.

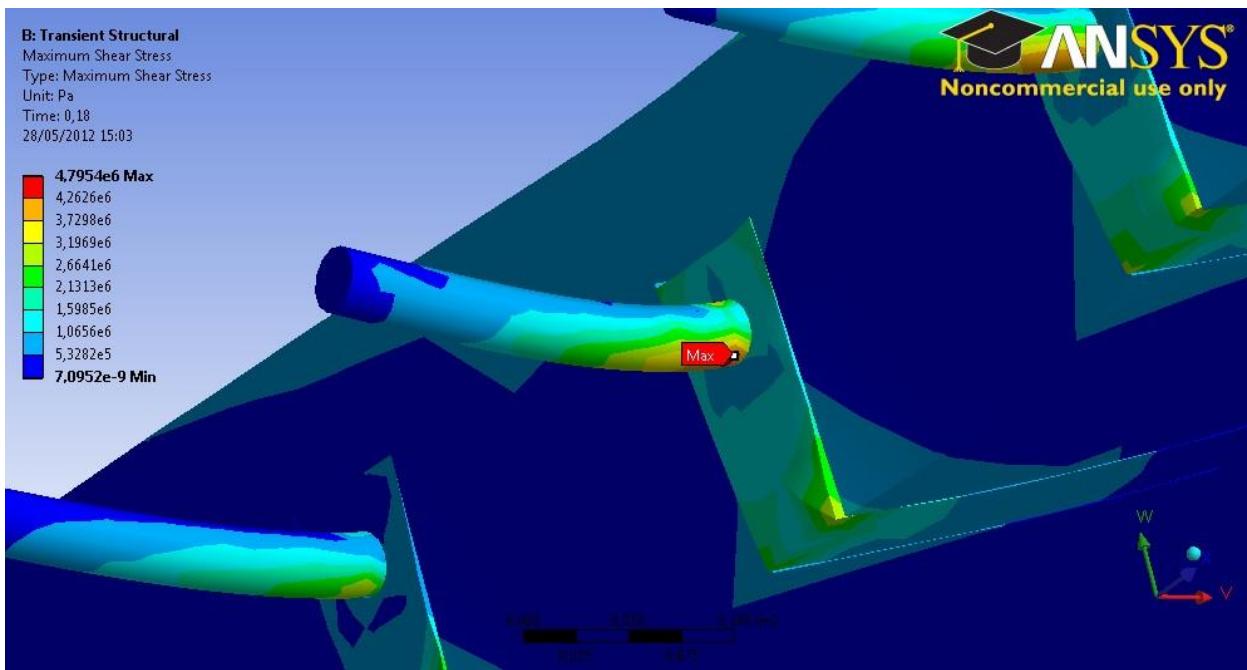


Figura IV.35. Close-up a barra con esfuerzo de corte máximo.

La función que tienen las barras de transferencia es la de poder traspasar los esfuerzos, generados por las cargas producto del tránsito de vehículos, de una losa a otra con el motivo de disminuir la magnitud de las presiones sobre la capa base, evitando que se concetren las tensiones en la losa sobre la cual se ubica el eje de ruedas.

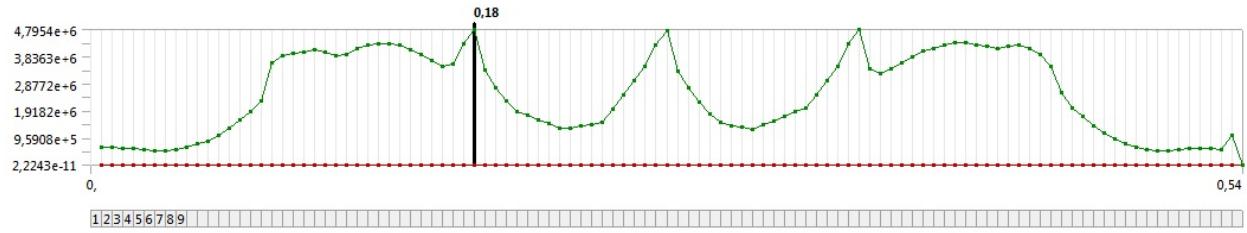


Figura IV.36. Gráfico de esfuerzo de corte máximo por paso (y tiempo) a lo largo del tramo.

Como se señala en el gráfico de la Figura IV.36, los esfuerzos de corte máximos se producen al encontrarse la carga sobre las juntas transversales, ubicándose en las barras las zonas donde ocurren los valores máximos. Esto debido a que al encontrarse el eje de ruedas sobre la junta, ésta carga genera esfuerzos cortantes que actúan de forma directa en la zona de la junta, ocurriendo los máximos valores en las barras al existir una disminución de sección en aquel sector del sistema.

4.2.4 Sistema machihembrado

La configuración de paneles que se utilizó para modelar el sistema machihembrado consideró un panel con conexión ranuras-macho, dos paneles con conexión hembra-macho, un panel con conexión tipo hembra-barras, y un último panel ranuras-ranuras para cerrar el tramo, correspondiendo pavimento existente las dos losas en los bordes.

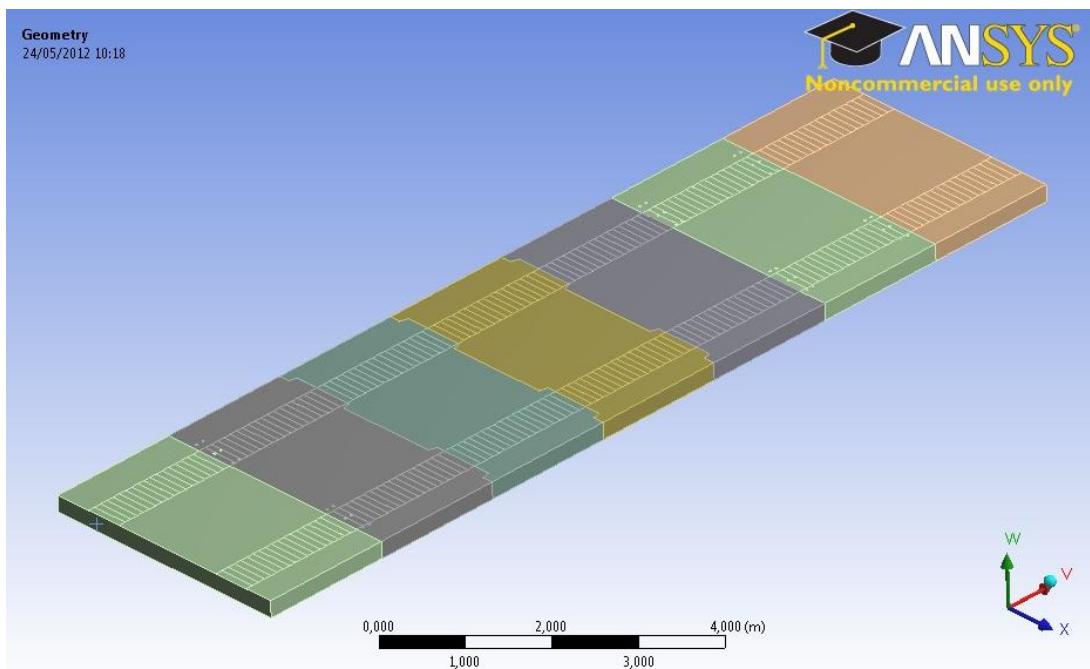


Figura IV.37. Sistema machihembrado de paneles prefabricados.

4.2.4.1 *Mallado*

Se le asignó un determinado mallado a cada uno de los elementos conformantes del sistema, poseyendo el elemento un mallado más fino mientras menor sea su tamaño.

Tabla IV.3. Tamaño elementos finitos de cada elemento

Elemento o superficie	Arista tetraedro [m]
Mesh element size	0,15
Body sizing barras	0,02
Body sizing grout	0,04
Body sizing laminas	0,05
Face sizing borde paneles	0,10

Para los paneles se utilizó un tamaño de elemento de 0,15m, siendo el tamaño de los elementos menor en los sectores de los bordes, para así contar con un mayor número de elementos en el espesor de la losa. La Figura IV.38. muestra el mallado realizado a los paneles ensamblados.

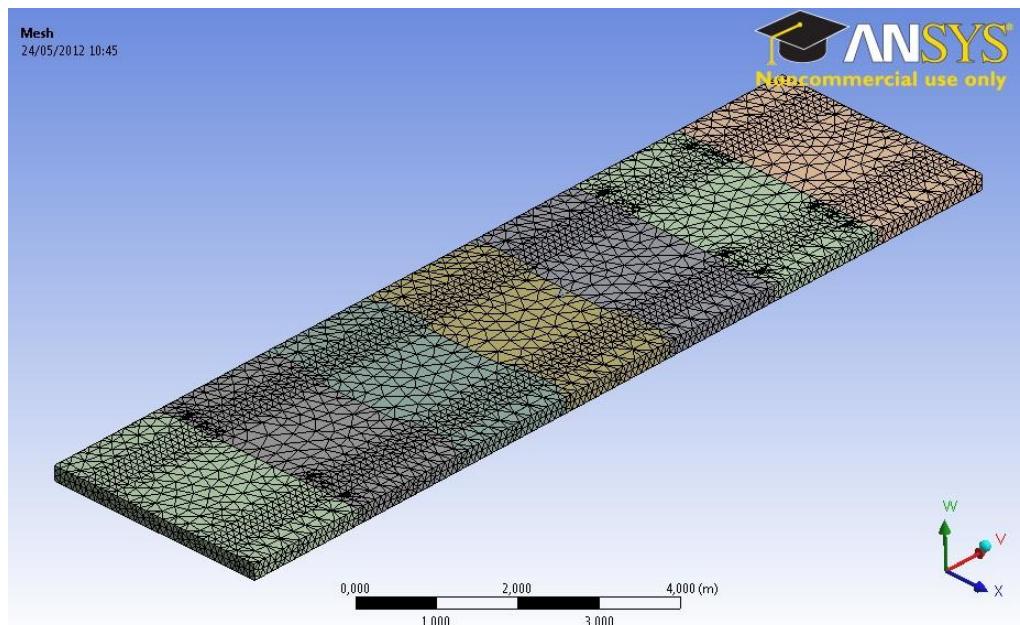


Figura IV.38. Mallado de paneles y refinado en sus bordes.

Las barras de transferencia, al ser los elementos de menor tamaño y elementos donde debiesen de existir altas concentraciones de tensiones, se les asignó un tamaño de elemento menor al resto de los elementos, teniendo un tamaño de arista igual a 0,02m, como se muestra en la Figura IV.39.

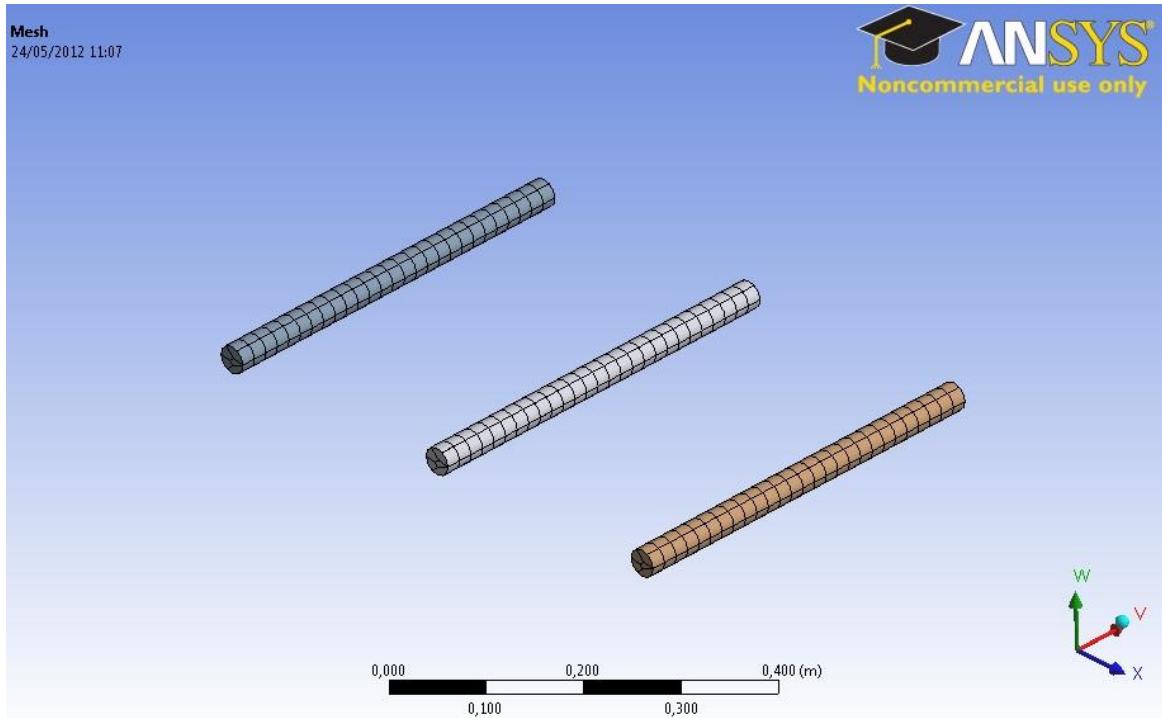


Figura IV.39. Mallado de barras de traspaso de carga.

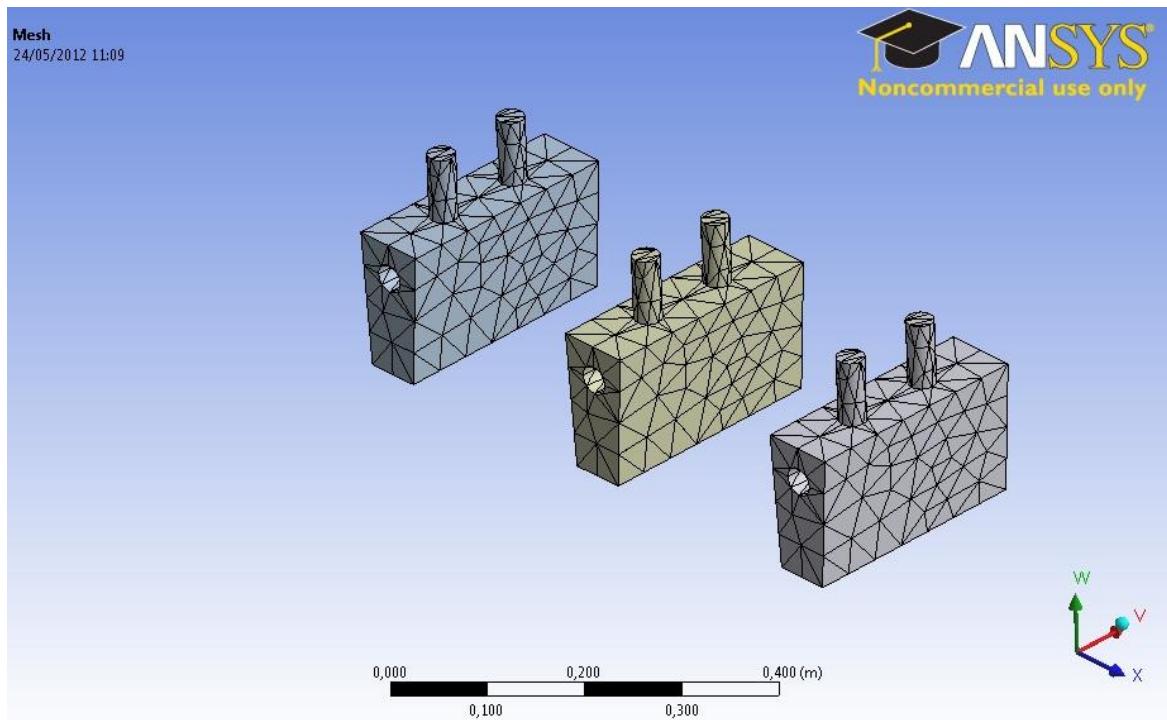


Figura IV.40. Mallado de grout.

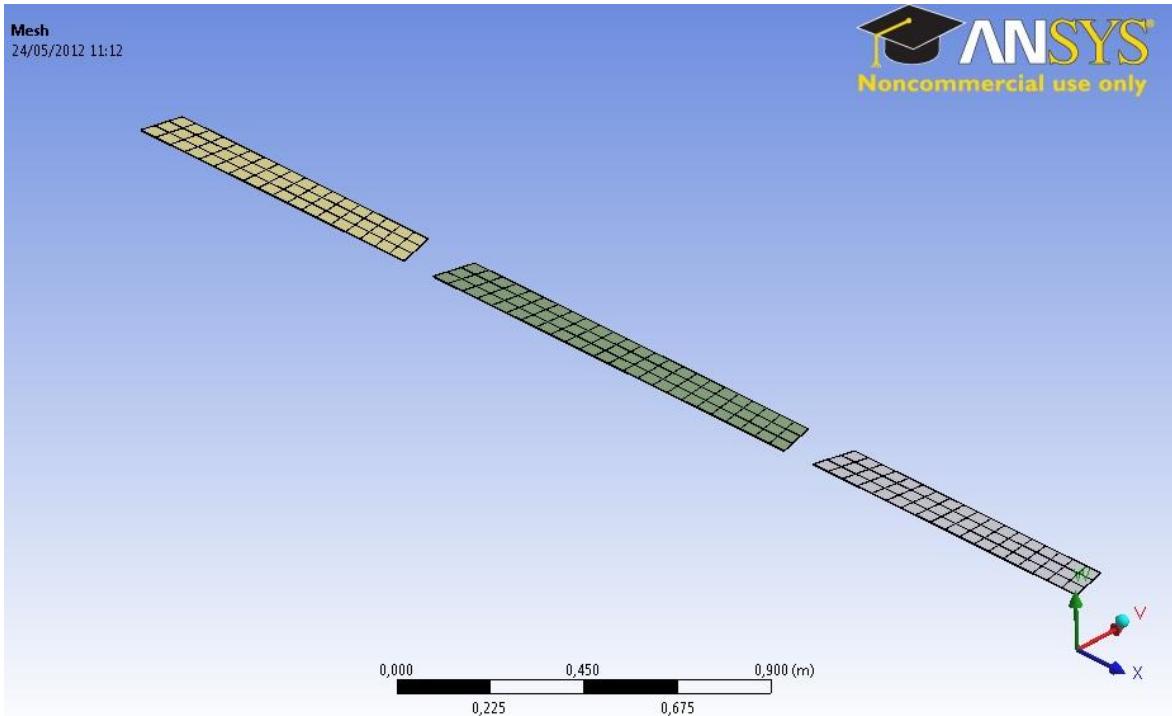


Figura IV.41. Mallado de placas de contacto conexión machihembrada.

4.2.4.2 Contacto entre piezas

Se debieron definir los tipos de contactos entre las piezas, definiéndose los contactos entre superficies como bonded, no separation o frictionless. Para el contacto entre panel y barras, al estar éstas últimas embebidas, se le asignó un contacto de tipo bonded, ya que no permite desplazamientos y separaciones entre superficies. Suponiendo que el grout se adhiere de forma perfecta al hormigón, asumimos un tipo de contacto bonded para simular esta interacción de superficies. El contacto entre barras y grout se definió de tipo no separation, que es similar a la bonded, ya que no permite separación entre superficies, pero si pueden existir pequeños deslizamientos ausentes de fricción. Los dientes de la cara transversal con conexión tipo macho lleva en sus dientes unas placas de teflón adheridas, para así ser montados los dientes dentro de las ranuras de la conexión tipo hembra, adherencia que se modeló como un contacto de tipo bonded. Los paneles no están unidos entre sus caras, permitiéndose el desplazamiento entre sus caras transversales (únicas caras que pueden estar en contacto), por lo que a este contacto se les asignó un tipo de contacto frictionless.

4.2.4.3 Condiciones de contorno (soportes) y cargas solicitantes

Las condiciones de borde aplicadas consistieron en darle inmovilidad a los paneles de borde en sus caras laterales, fijándolos en el plano X-Y (V-X en la Figura IV.42.). Los paneles prefabricados no se encuentran sometidos a alguna condición de borde que no les permita desplazarse, sino que lo que trata de mantenerlos fijos son el soporte generado por la base sobre la cual están montados, y la interacción entre paneles en sus conexiones transversales. Durante su aplicación en terreno deberá existir también un confinamiento de los paneles prefabricados que los incapacite a desplazarse en sentido transversal, no siendo necesario en la presente modelación al obtener que era prácticamente nulo el desplazamiento en esa dirección.

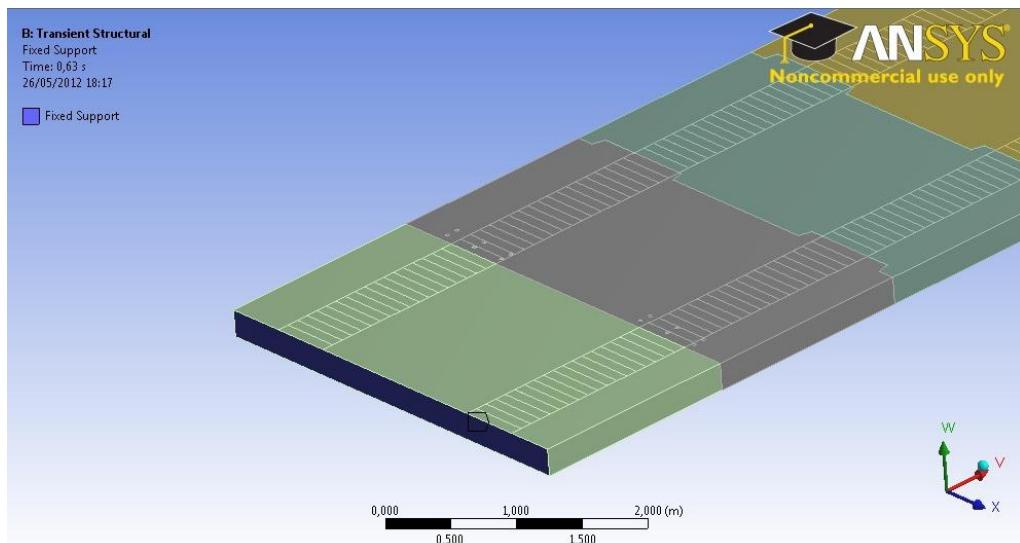


Figura IV.42. Soporte fijo asignado a cara transversal de paneles extremos (pavimento existente).

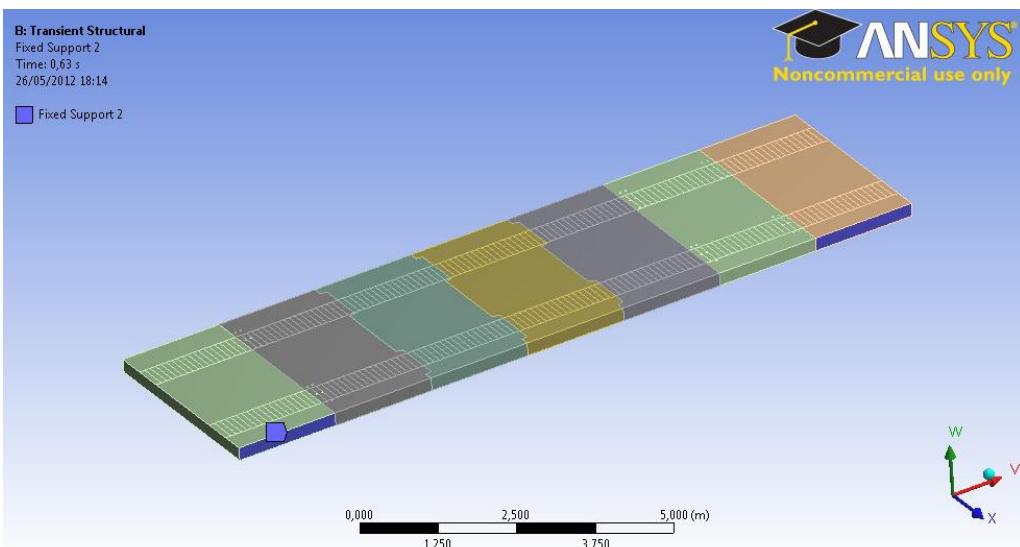


Figura IV.43. Soporte fijo asignado a caras laterales de paneles extremos (pavimento existente).

El otro soporte que actúa sobre el modelo es el soporte elástico que ejerce la subbase sobre el pavimento, y cuya magnitud se obtuvo en la etapa de diseño mediante ábacos de correlación. El diseño arrojó un módulo de reacción (coeficiente de balasto) de la subrasante igual a $13,0e+7$ N/m³, esto sin considerar el factor de corrección acorde al espesor de la subbase, debiendo ser levemente mayor, lo cual no afecta de mayor forma el resultado que arrojará la simulación. Este soporte se aplicó bajo los siete paneles (incluyendo paneles losa existente) que conforman el sistema machihembrado modelado. La aplicación se detalla en la Figura IV.44.

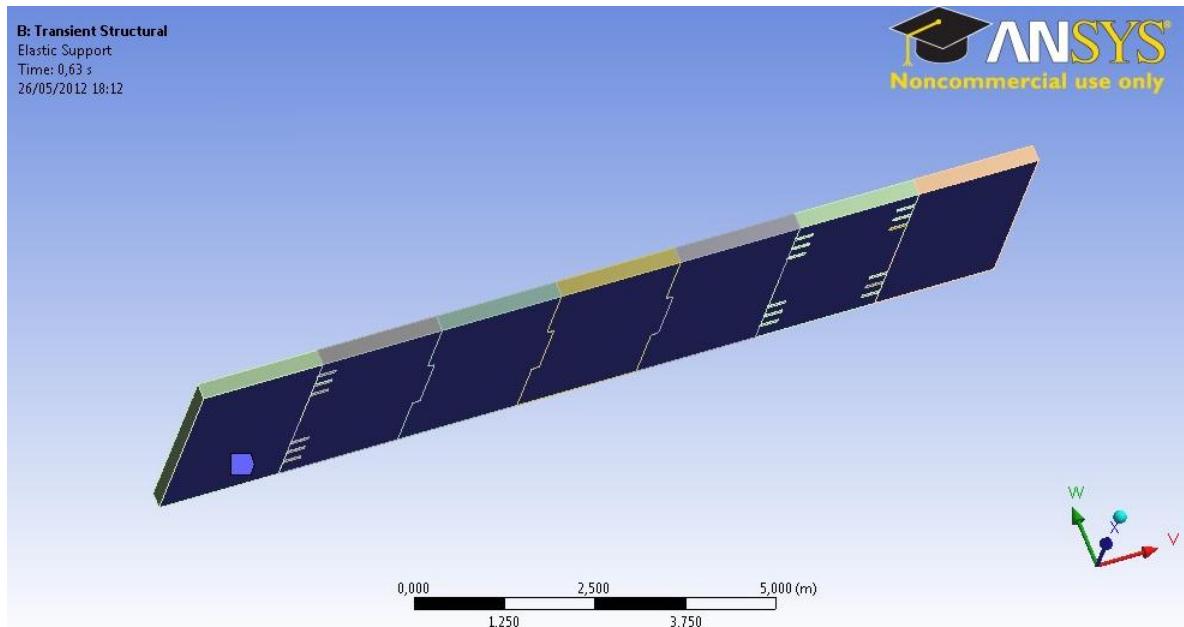


Figura IV.44. Soporte elástico en la base del sistema machihembrado.

Posterior a definir las condiciones de borde, se definieron los diferentes pasos asignándole a cada uno un tiempo de 0,005 segundos y una carga correspondiente a la solicitud ejercida por el tránsito de un eje simple doble, de un peso de 11 toneladas, sobre la superficie de rodado del sistema de paneles. La secuencia con los primeros 4 pasos del modelo transiente se puede ver en la Figura IV.45., además de poder observar en la Figura IV.46. el desarrollo de las cargas en función de los 126 pasos que tiene como total el modelo, relacionados estos pasos de forma directa al tiempo transcurrido.

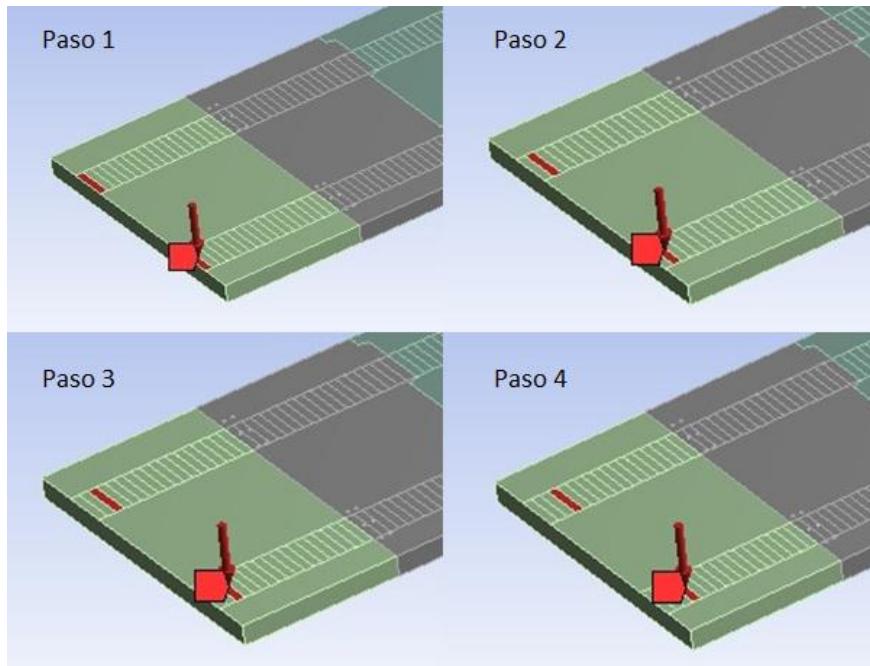


Figura IV.45. Aplicación de presión en área rectangular correspondiente al apoyo del eje de ruedas, realizado tanto para el sistema machihembrado como para el sistema barra-ranura.

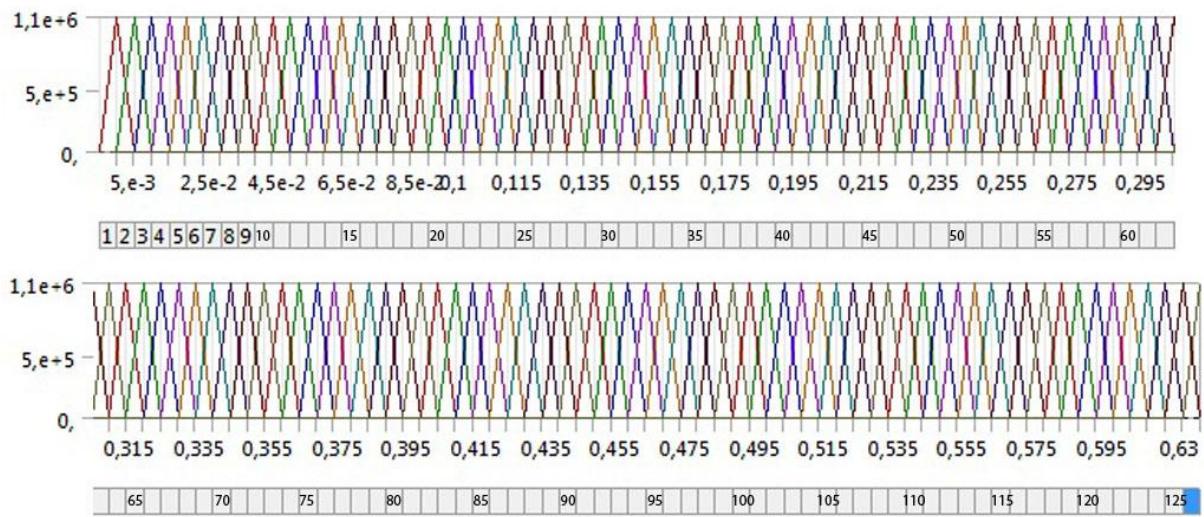


Figura IV.46. Gráfico tiempo (pasos) v/s Presión

Al igual que para el sistema anterior de ranuras-barras, los pasos se traslapan de modo tal que favorecen la continuidad del modelo, ayudando a la convergencia de la iteración. Al momento de llegar la carga a su peak, comienza a aplicarse la carga del siguiente paso con la misma pendiente de la anterior, existiendo en todo momento una magnitud de carga de 1,1 MPa en cada una de las dos huellas, que se distribuye en los rectángulos contiguos de forma gradual a medida que avanza el neumático por la huella.

4.2.4.4 Esfuerzo equivalente Von Mises

Esfuerzo relacionado a teoría de falla en materiales dúctiles, en éste caso, utilizado para el análisis de esfuerzos en las barras de transferencia. En el caso del tránsito del eje simple sobre el sistema de paneles machihembrado, el máximo se da al momento de transitar la carga sobre la junta de tipo barra ranura, que conecta el panel hembra – barras con el panel ranura-ranura.

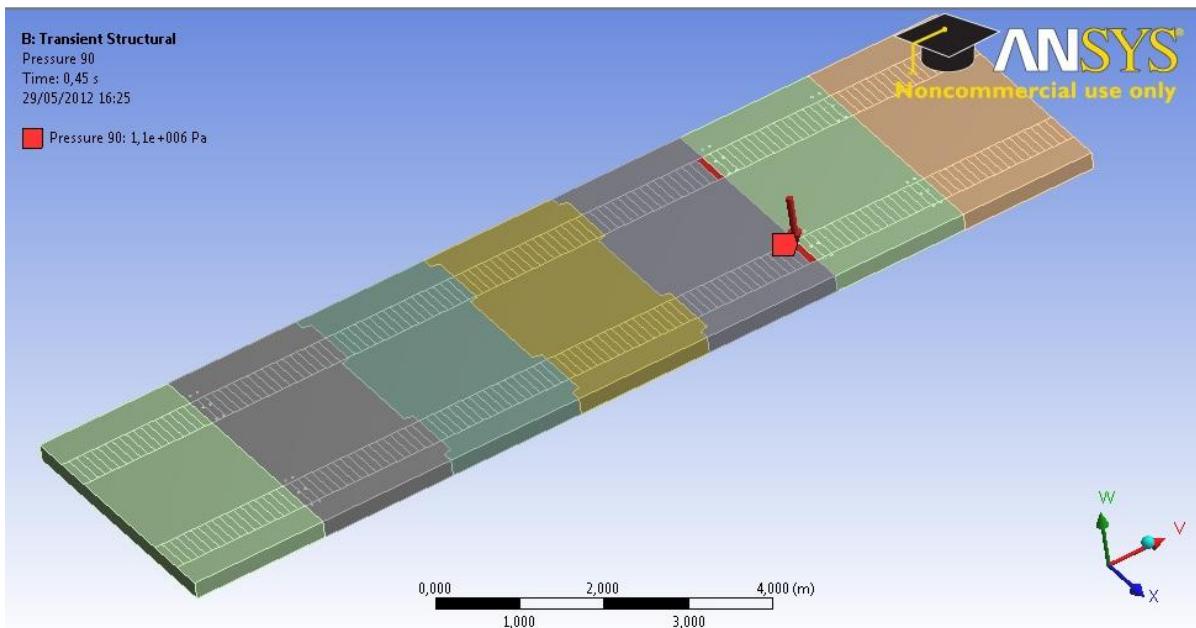


Figura IV.47. Ubicación de carga al momento de producirse el máximo esfuerzo de Von Mises.

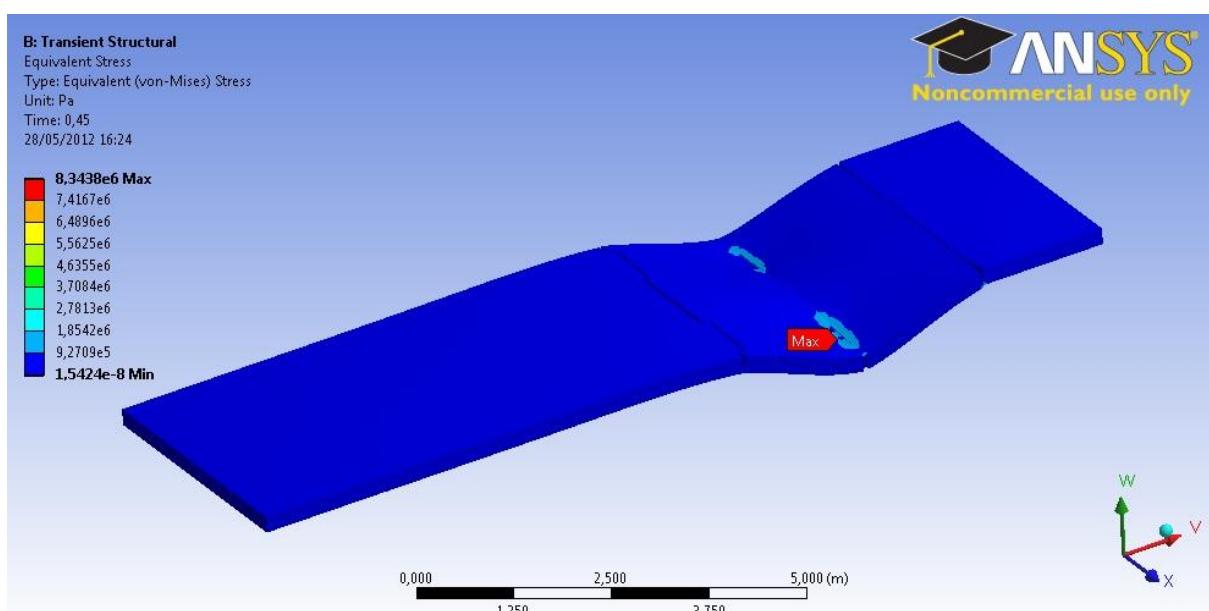


Figura IV.48. Ubicación máximo esfuerzo de Von Mises en el tramo.

Realizando un acercamiento a la zona en donde se produce el máximo esfuerzo de Von Mises, y ocultando uno de los paneles, se comprueba que el máximo esfuerzo se ubica en una de las barras de transferencia, en el centro de ella inclinándose hacia el lado del panel hembra-barras, panel en el que se encuentra embebida la mitad de la barra.

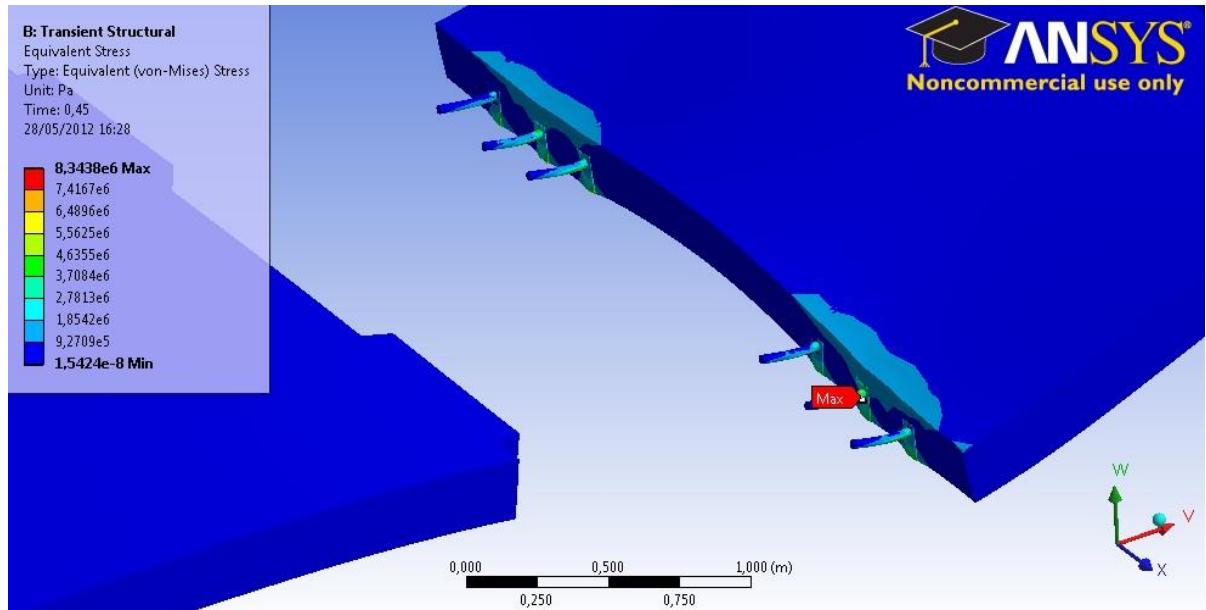


Figura IV.49. Máximo esfuerzo de Von-Mises ubicado en la barra de transferencia.

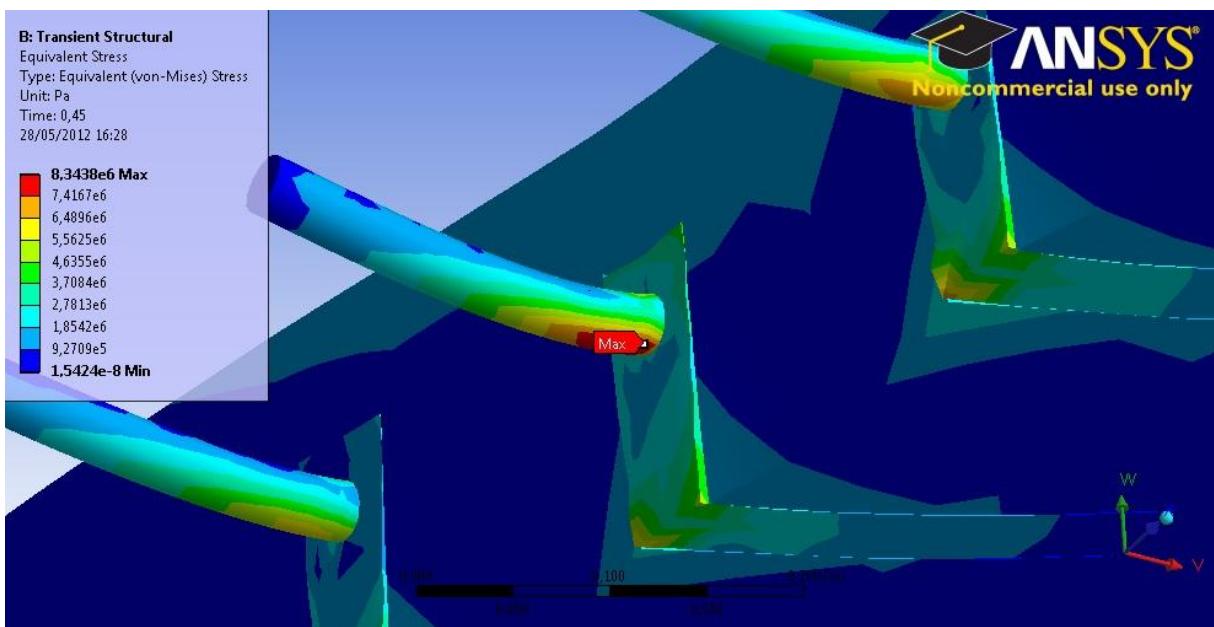


Figura IV.50. Close-up a barra de traspaso donde se produce el máximo esfuerzo de Von-Mises.



Figura IV.51. Gráfico de máximos esfuerzos de Von-Mises por paso a lo largo del tramo.

La gráfica de la Figura IV.51. demuestra que en los sectores en donde se ubican las juntas de tipo barra-ranura es donde se dan las mayores tensiones de Von Mises, llegando a un máximo de 8,344MPa, magnitud que corresponde a un 2,98% del esfuerzo de fluencia, no generándose ninguna falla por energía de distorsión en las barras de transferencia.

4.2.4.5 Esfuerzo normal máximo

La dirección en la cual se produce el esfuerzo normal máximo es en el eje X, correspondiente al eje de tránsito vehicular (eje V en la imagen). En la Figura IV.52. se muestra el lugar donde se ubica la carga al momento de producirse el máximo esfuerzo normal, siendo en la junta transversal entre el panel hembra-barra y el panel ranuras-ranuras donde ocurre esto. La conexión que se desarrolla ahí es una de tipo barra de traspaso y ranura, siendo sellada la conexión mediante el grout de alta resistencia.

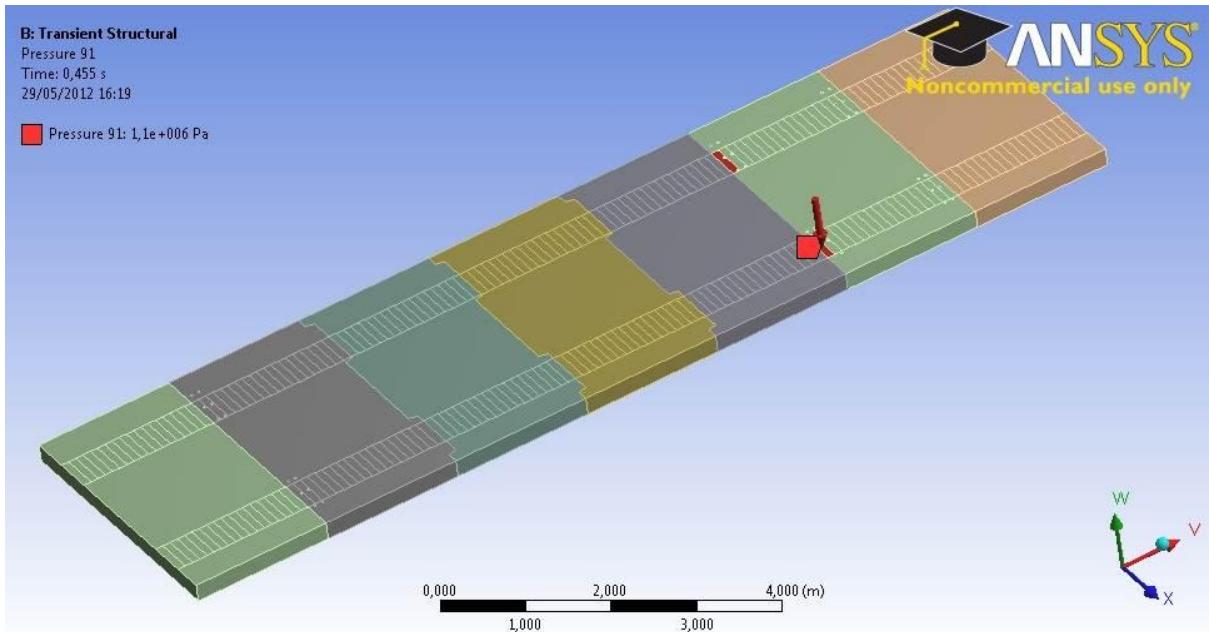


Figura IV.52. Ubicación carga al momento de producirse el esfuerzo normal máximo.

En la Figura IV.53. se da a conocer la distribución de esfuerzos normales en el eje X en todo el sistema de paneles prefabricados, detallándose la ubicación en donde ocurre el

máximo esfuerzo. Para ubicar de mejor forma el punto en donde ocurre el máximo y poder identificar en que elemento se desarrolla, se procede a ocultar un panel, lo que se muestra en la Figura IV.54.

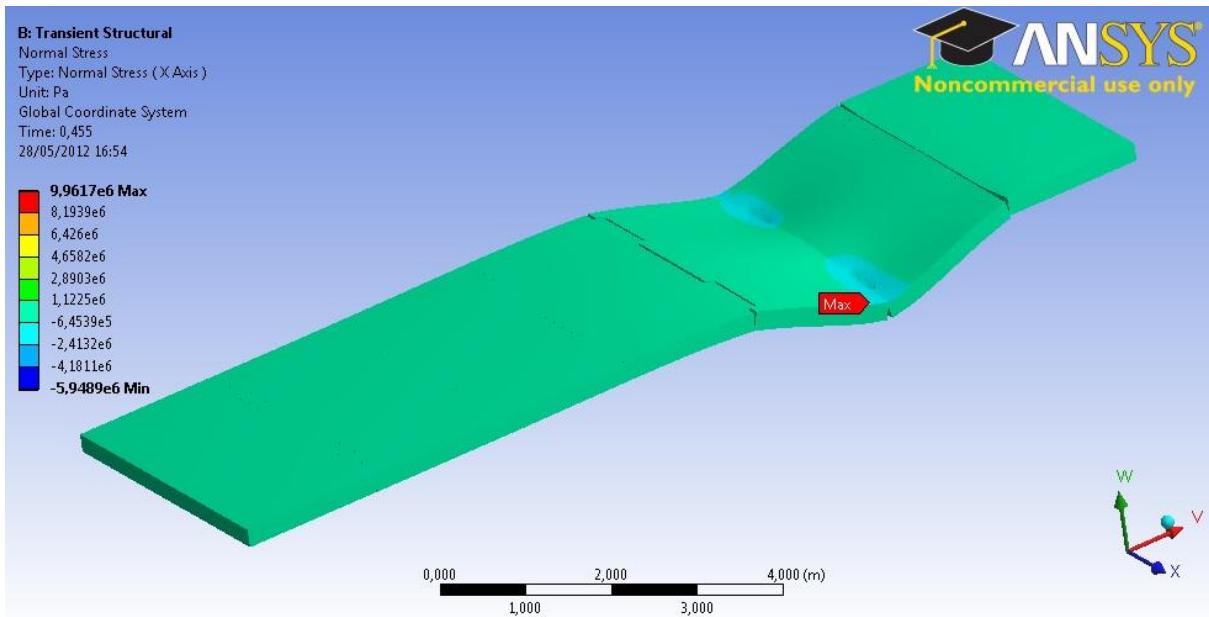


Figura IV.53. Ubicación dentro del tramo del esfuerzo normal máximo.

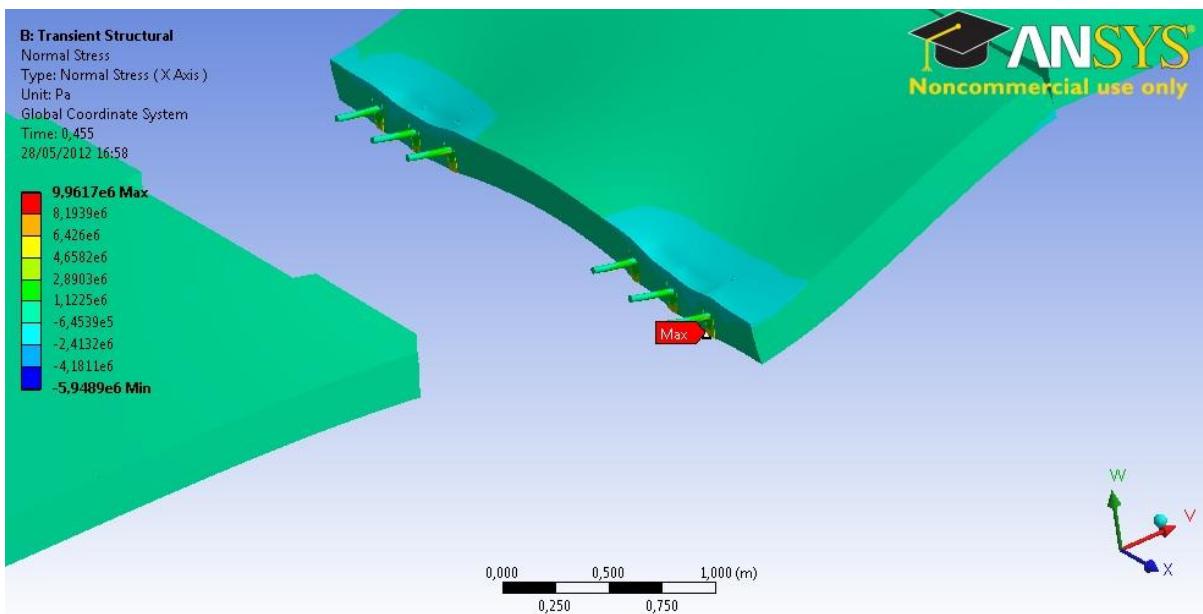


Figura IV.54. Esfuerzo normal máximo ubicado en el grout.

Realizando un acercamiento al la junta transversal en observación, lo cual se muestra en la Figura IV.55. se demuestra que el máximo esfuerzo normal, en el eje X, ocurre en el vértice del grout, en zona de contacto con el panel de hormigón.

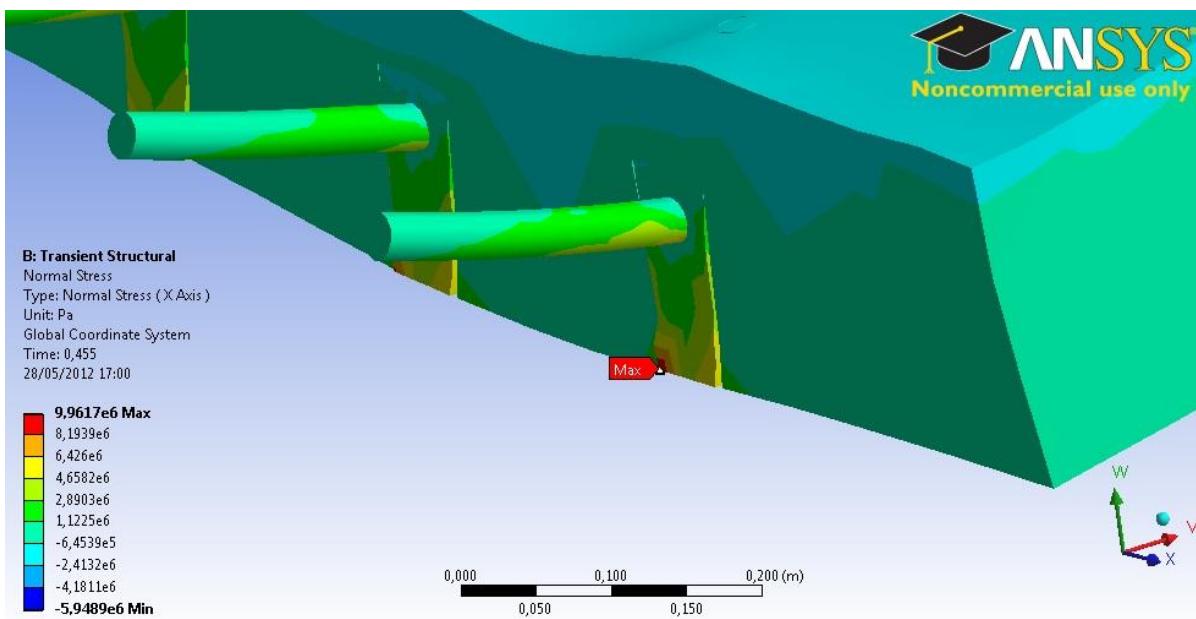


Figura IV.55. Close-up a pieza de grout donde se ubica el esfuerzo normal máximo.

El máximo esfuerzo normal obtenido, considerando la magnitud, es el esfuerzo positivo que viene a ser el de tracción, con un valor de 9,962MPa, que es prácticamente dos veces el valor máximo a tracción que soporta el grout. Por el criterio de Rankine, el grout debiese de fallar ante ésta magnitud de esfuerzo normal positivo, por lo que se requiere de resultados empíricos para corroborar o descartar lo entregado por la teoría.

A modo de dar a conocer cómo se desarrolla el esfuerzo normal, el gráfico que aparece en la Figura IV.56. muestra los máximos esfuerzos normales a lo largo del paso del eje simple doble sobre la configuración de paneles, siendo cada punto el máximo esfuerzo normal desarrollado en cada paso.

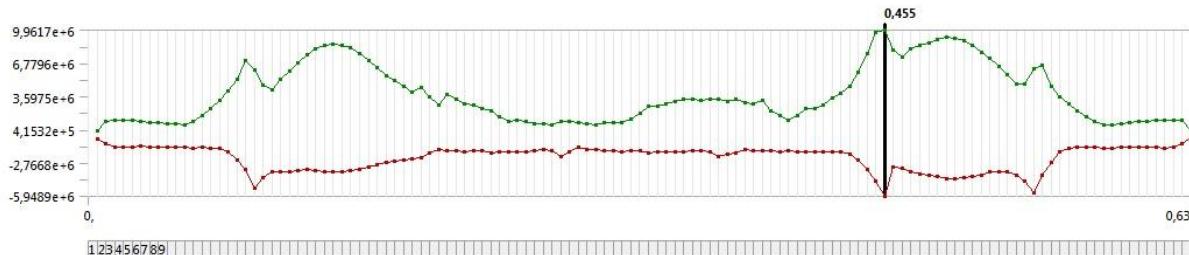


Figura IV.56. Gráfico esfuerzos normales máximos por paso (tiempo).

4.2.4.6 Deformación unitaria

La máxima deformación unitaria ocurre en la junta transversal de tipo conexión machihembrado, que conecta los paneles macho-ranura y macho-hembra, y se produce en el momento en que la carga se encuentra ubicada sobre esta junta transversal, ver Figura IV.57.

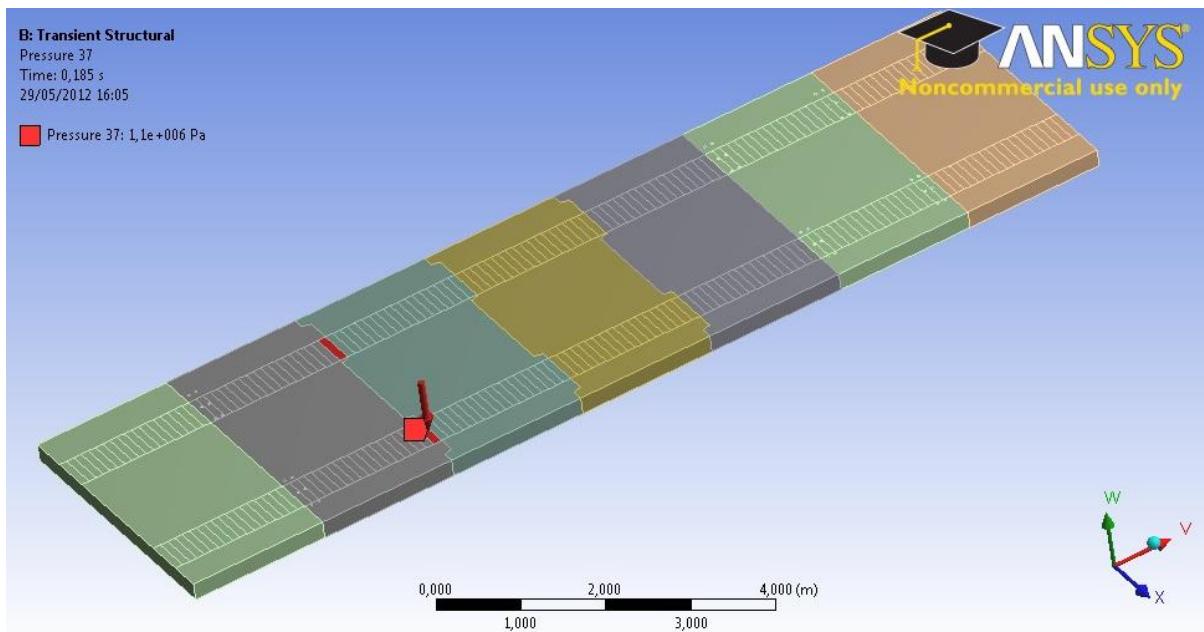


Figura IV.57. Ubicación de la carga al momento de generarse la máxima deformación unitaria.

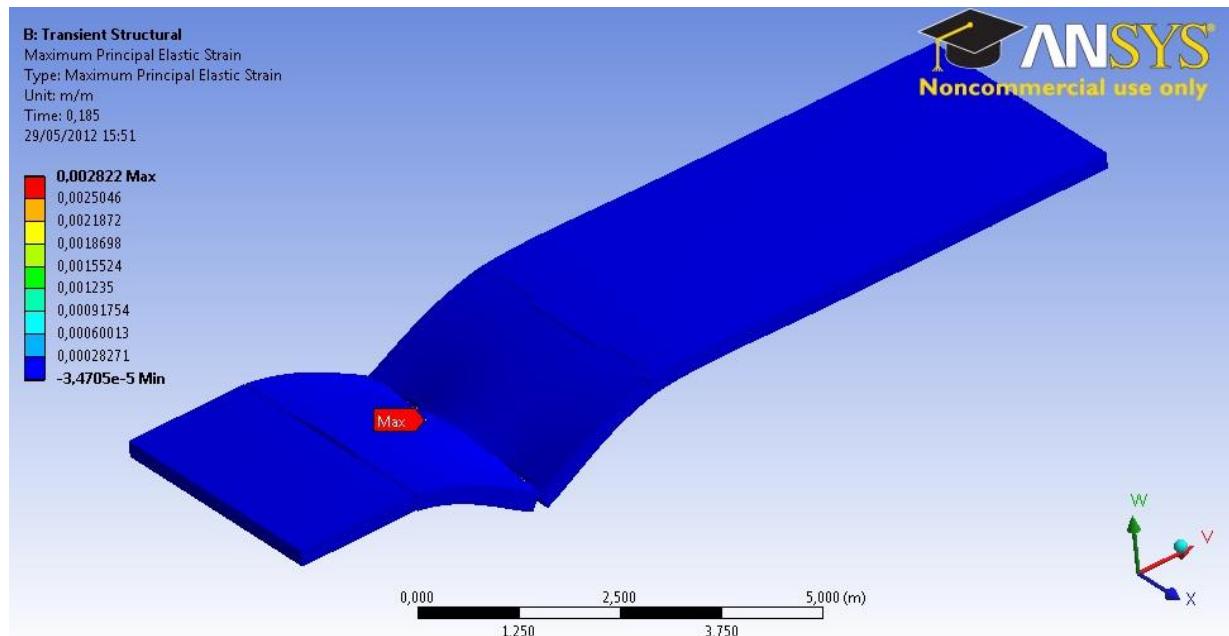


Figura IV.58. Ubicación en el tramo del lugar donde se desarrolla la máxima deformación unitaria.

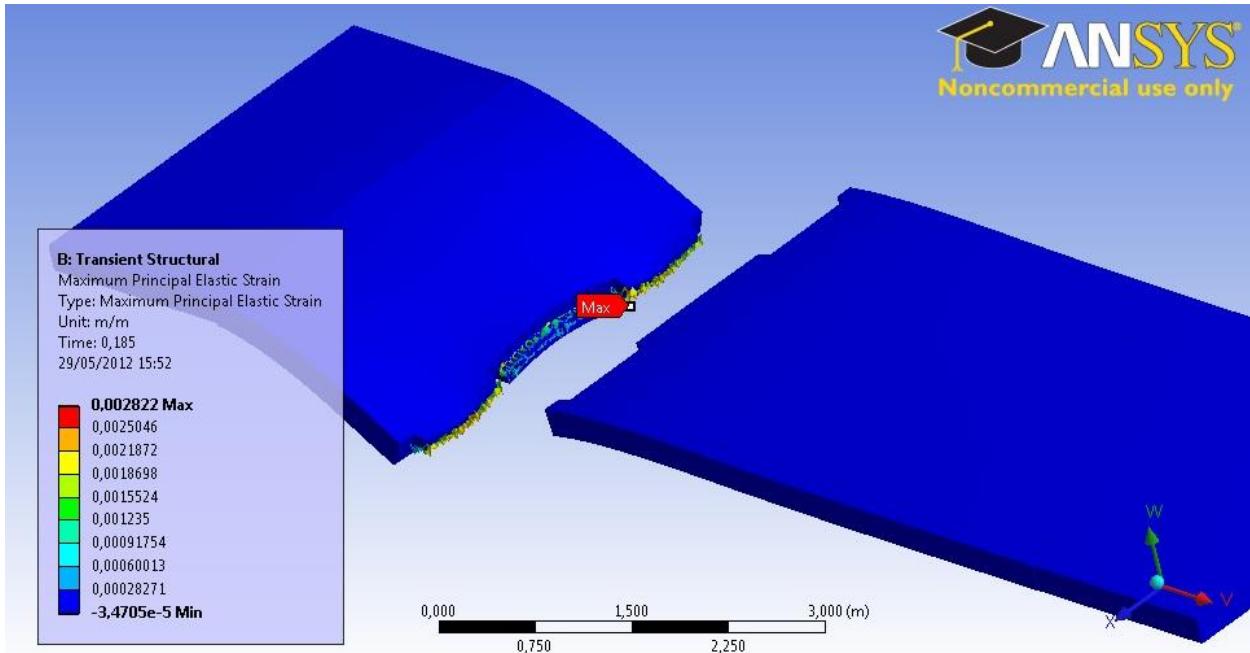


Figura IV.59. Máxima deformación unitaria producida en el teflón.

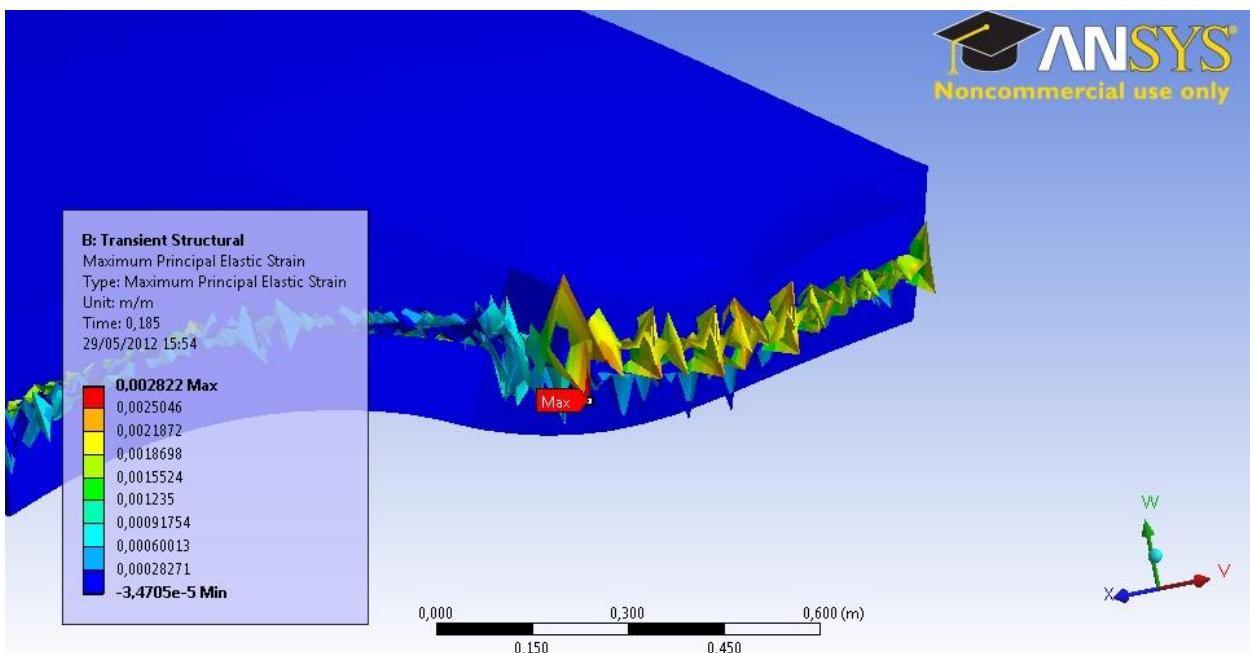


Figura IV.60. Close-up a placa de teflón donde ocurre la máxima deformación unitaria.

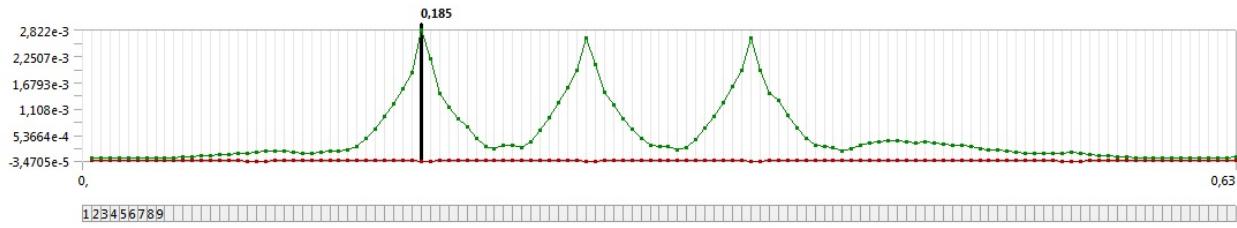


Figura IV.61. Gráfico de deformaciones máximas en cada paso a lo largo del tramo.

La máxima deformación obtenida fue de un 0,0028% y se produjo en la placa de teflón, que tiene como límite de deformación elástica un valor entre 1,7% – 6%, dependiendo de su composición. Viendo además el gráfico de la Figura IV.61. donde se dan a conocer las máximas deformaciones para cada paso (con un tiempo y carga designados), se observa que las placas de teflón son los elementos que presentan los más altos porcentajes de deformación, generándose los máximos en el borde exterior de la placa, lo que demuestra que el diente toma la deformación de una viga empotrada con una carga en su extremo libre. Sería bueno poder observar si basta con una placa de teflón para poder generar una buena conexión y transferencia de carga entre paneles, ya que puede que sea necesario utilizar un material de mayor rigidez que se oponga de mayor manera a la deformación.

4.2.4.7 Deformación total

La máxima deformación se da al momento de ubicarse la carga sobre la junta de tipo macho-hembra, como se aprecia en la Figura IV.62. Como se podrá ver más adelante en el gráfico de la Figura IV.66., las máximas deformaciones se dan en el sector de las juntas transversales, ubicándose las deformaciones en las placas de teflón como se observa en la Figura IV.64. y IV.65.

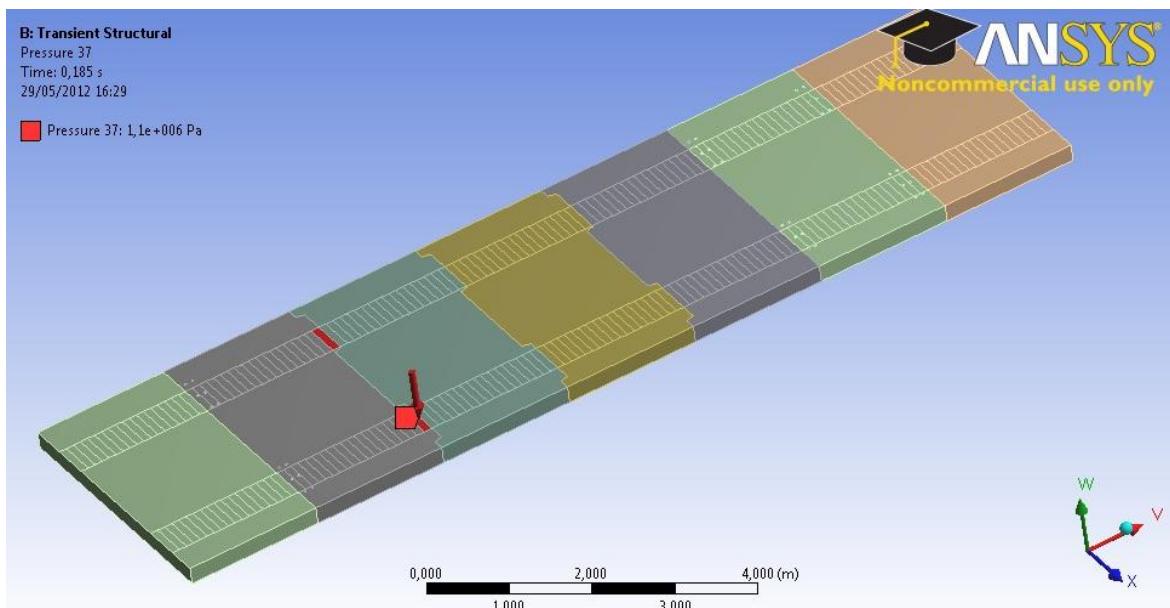


Figura IV.62. Ubicación de carga al momento de producirse la mayor deformación.

La máxima deformación del sistema al transitar un eje de 11ton, equivalente a aproximadamente 3,8EE, es de 0,00043m (0,43mm), valor bajo pero que puede llegar a ser importante al considerar que se pueden desarrollar deformaciones permanentes con el tiempo, provocando separación entre paneles en los sectores de las juntas transversales con conexión machihembrada.

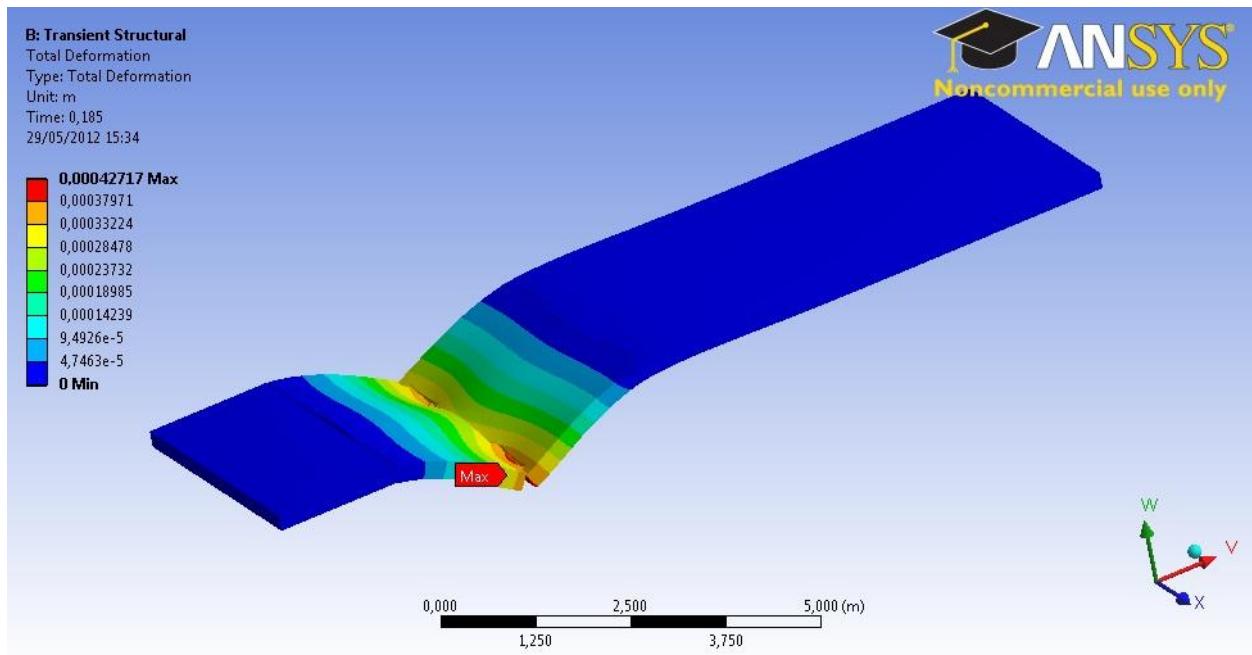


Figura IV.63. Ubicación de deformación total máxima en el tramo.

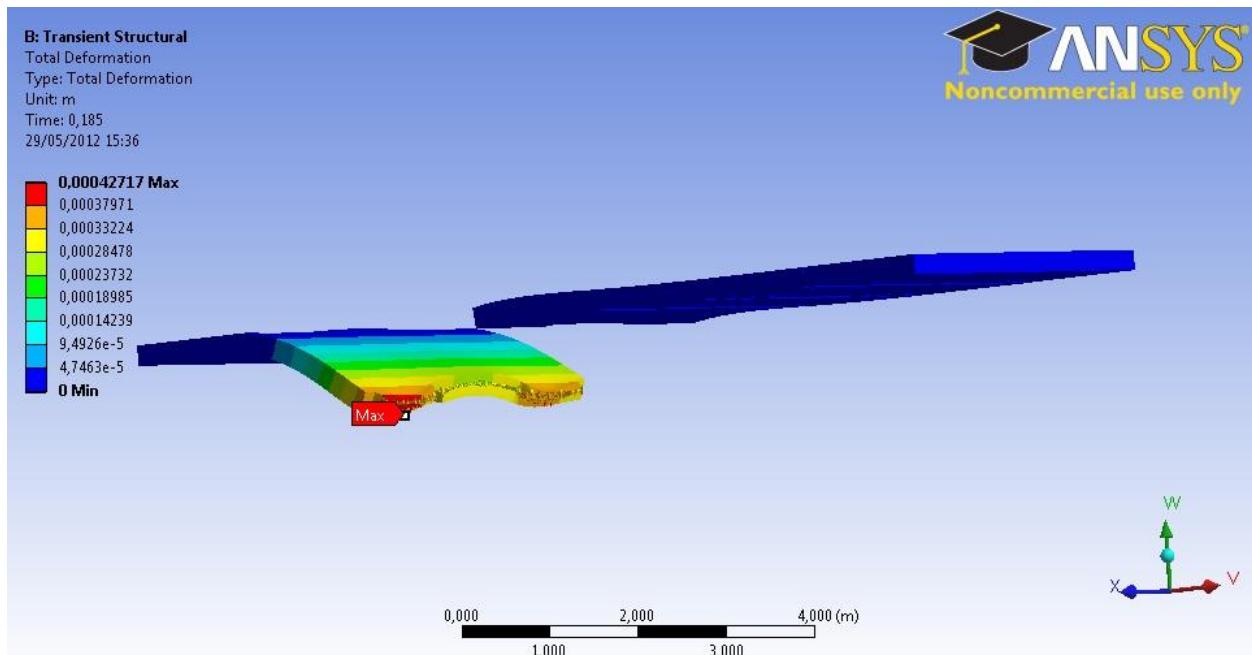


Figura IV.64. Máxima deformación total ubicada en la placa de teflón.

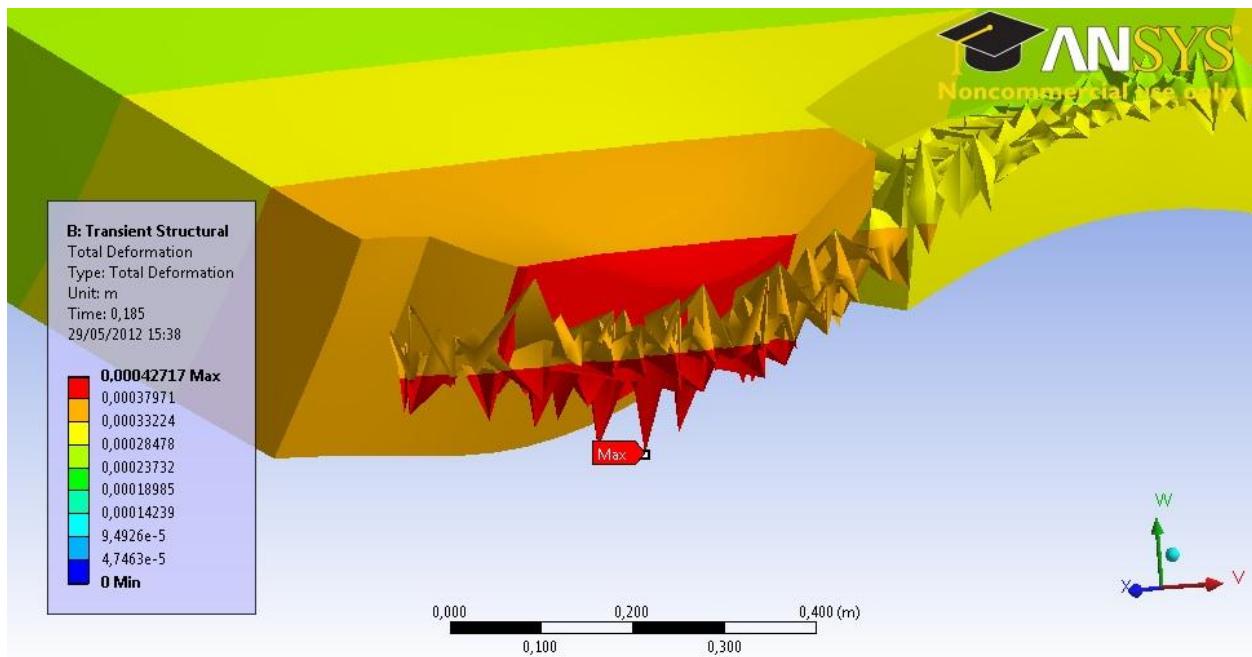


Figura IV.65. Close-up máxima deformación en la placa de teflón.

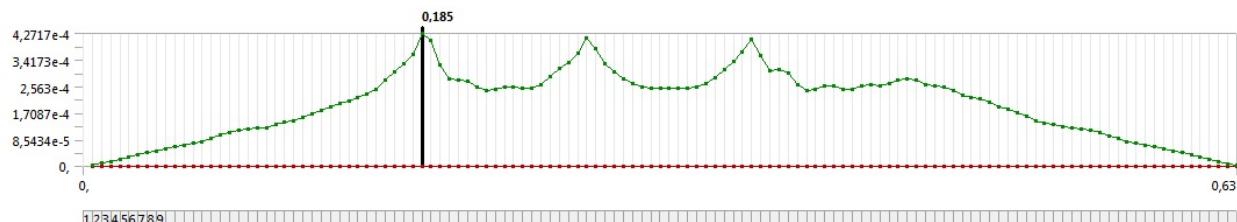


Figura IV.66. Gráfico deformaciones totales máximas por paso a lo largo del tramo.

Como se puede observar, la deformada que toma el sistema en sus conexiones de tipo machihembrado, demuestra una menor continuidad que para la conexión de tipo ranura-barra. De todas formas la deformación es baja, tomando la máxima deformación total un valor de 0,00043m, pero augura como tenderá a deformarse en el tiempo. Un punto importante es que si existe filtración de agua por la junta (que seguramente existirá entre la ranura y el diente), y conociendo el tipo de deformación que sufre en las conexiones machihembradas, se puede generar bombeo y un posterior escalonamiento en las losas (Figura IV.67.).

Cabe mencionar que el programa de modelación lo que hace es sobredimensionar las deformaciones obtenidas, para así facilitar gráficamente la determinación de las formas en las que se deforma el cuerpo.

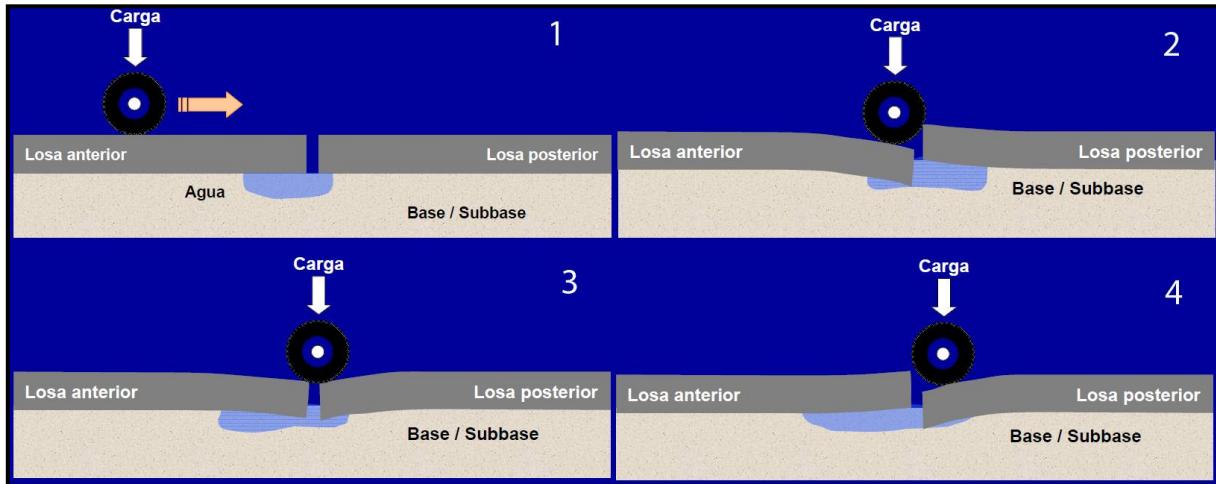


Figura IV.67. Escalonamiento en junta transversal de pavimento tradicional producto del bombeo.

4.2.4.8 Esfuerzo de corte máximo

El máximo esfuerzo de corte ocurre cuando la carga se ubica sobre la junta transversal de tipo conexión mediante barras de traspaso de carga, entre el panel hembra-barra y el panel ranura-ranura, como se muestra en la Figura IV.68.

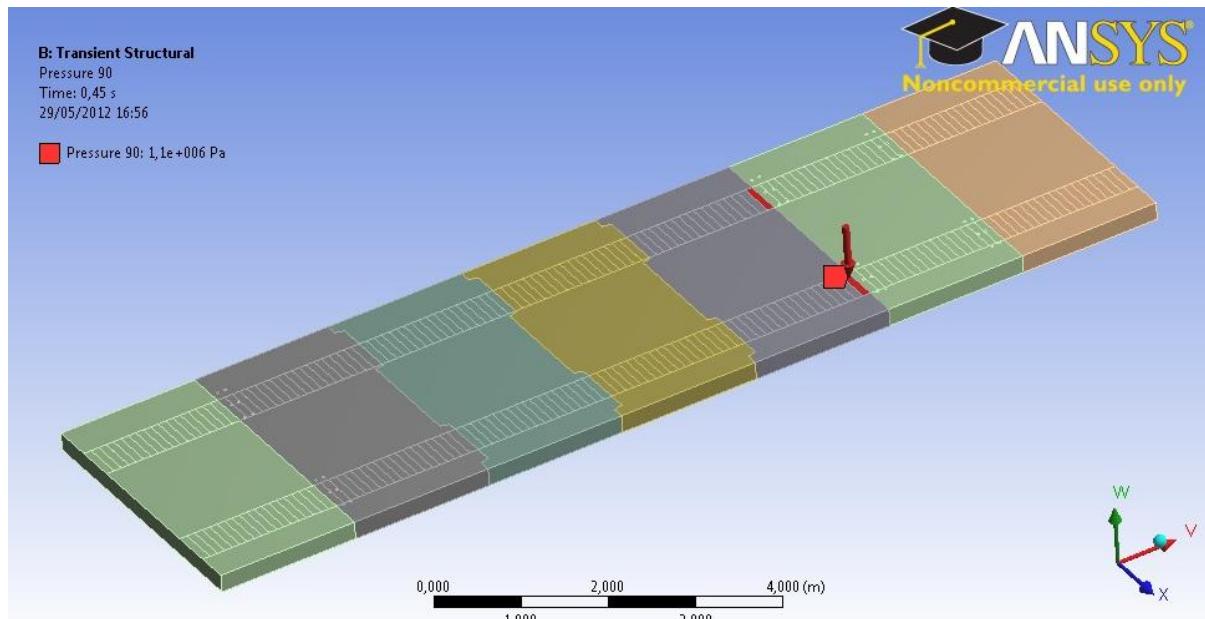


Figura IV.68. Ubicación de la carga al momento de producirse el máximo esfuerzo de corte.

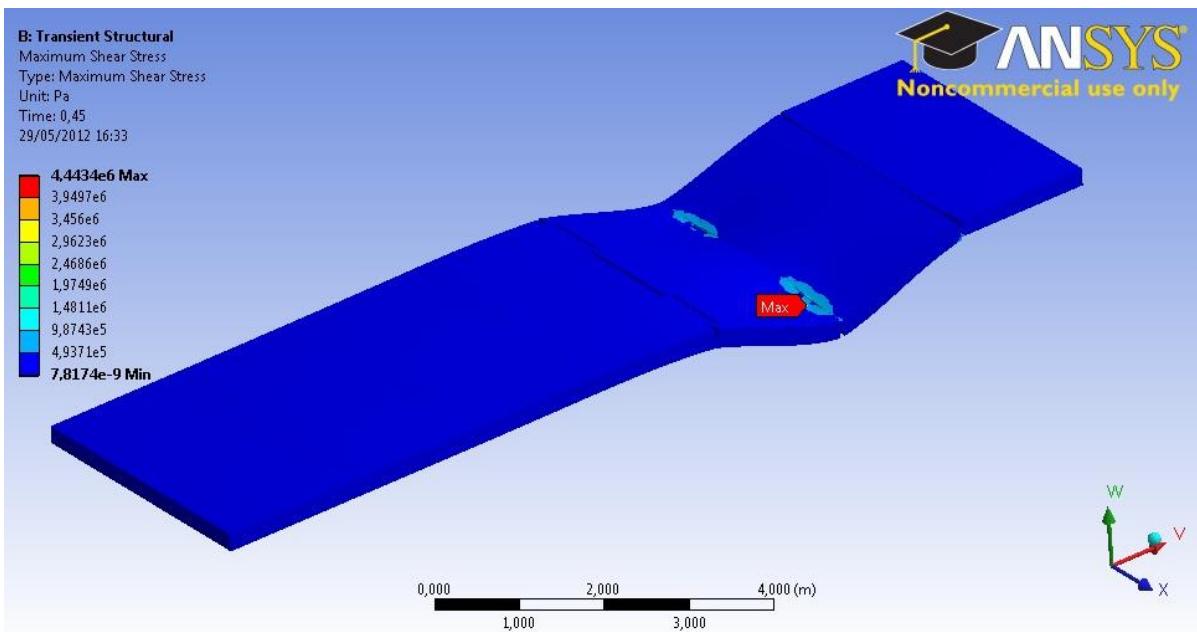


Figura IV.69. Ubicación del máximo esfuerzo de corte en el tramo.

Escondiendo el panel hembra-barra se puede tener un detalle de la ubicación exacta en a cual ocurre el máximo esfuerzo de corte, ubicándose el máximo en una de las barras de traspaso como se muestra en las Figura IV.70. y IV.71.

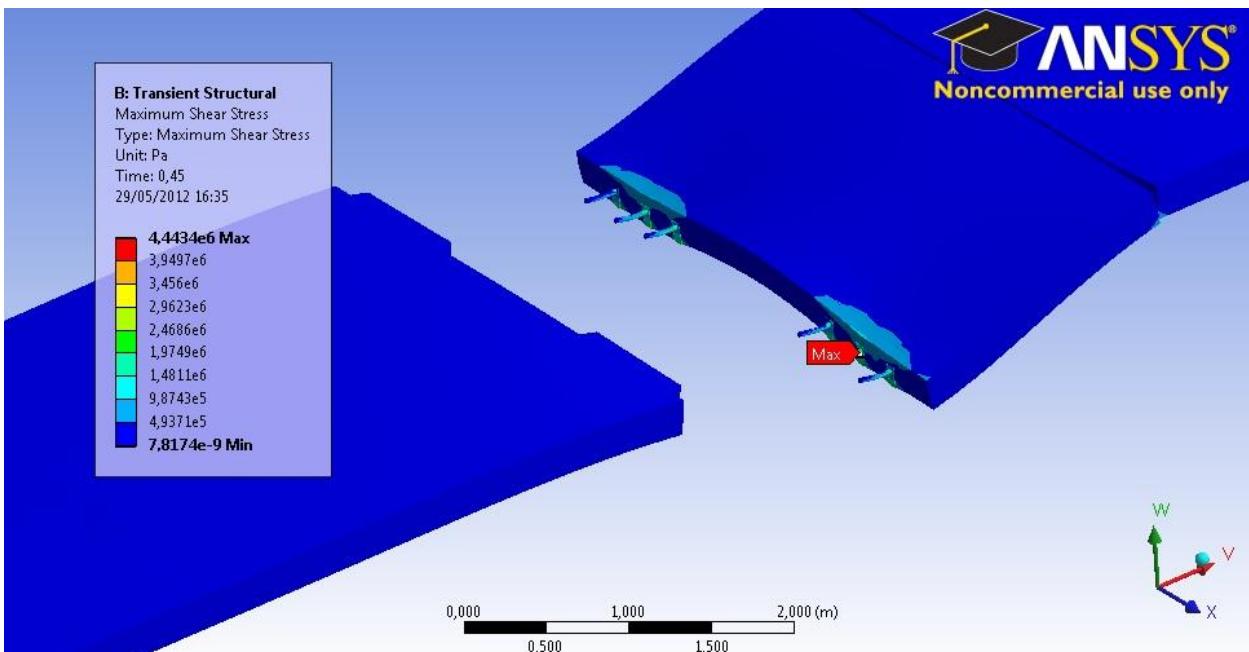


Figura IV.70. Máximo esfuerzo de corte ubicado en la barra de transferencia.

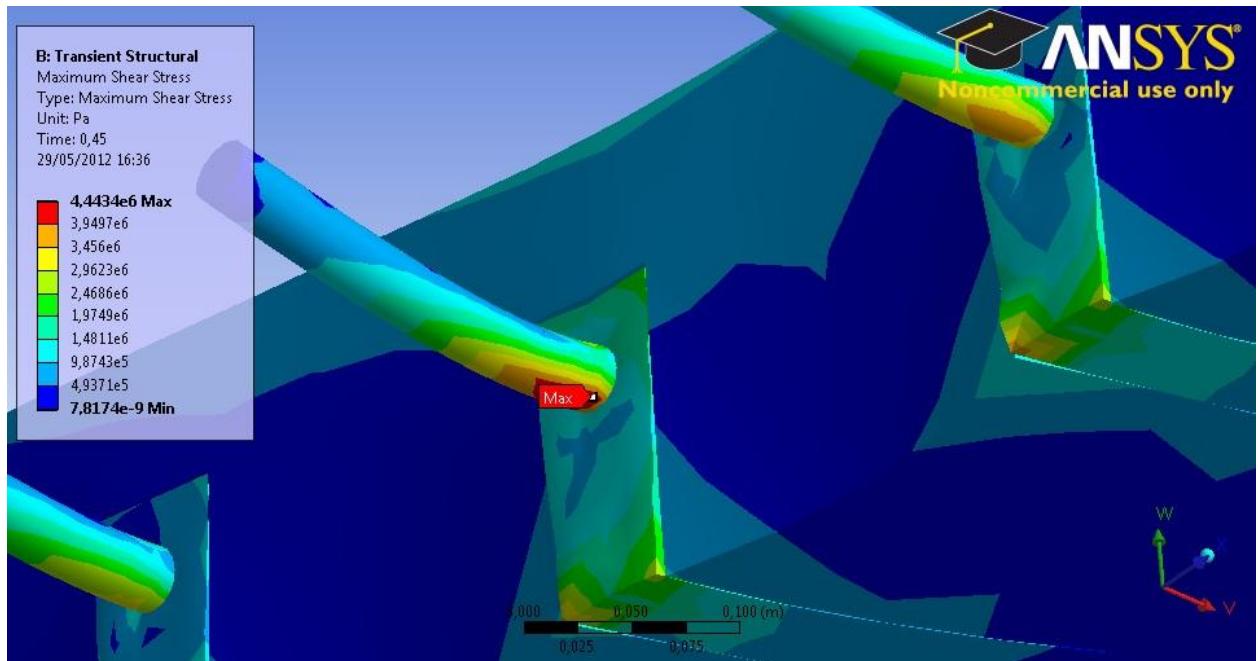


Figura IV.71. Close-up sobre la barra que presenta el máximo esfuerzo de corte.



Figura IV.72. Gráfico esfuerzos de corte máximos por paso a lo largo del tramo.

Analizando la forma que toma el gráfico, se puede observar que en los primeros 25 pasos, y los últimos 25 pasos, existe una simetría, y ambas zonas del gráfico reúnen los más altos valores de esfuerzos de corte. Teniendo en cuenta lo anterior, y sabiendo que ambas zonas antes mencionadas presentan solo conexiones de paneles mediante barras de transferencia (lo cual se ve al tener como referencia el peak que se ubica en la antepenúltima conexión), esto lleva a concluir que las barras de traspaso son las que se llevan el más alto esfuerzo de corte, siendo el máximo esfuerzo de corte igual a 4,443MPa.

Conociendo el valor máximo, y por la teoría de falla del máximo esfuerzo de corte, se concluye que la carga aplicada se encuentra lejos de poder generar algún tipo de falla en el elemento, siendo el máximo esfuerzo de corte menor a la mitad del esfuerzo de fluencia, $\tau_{\text{máx}} < 140 \text{ MPa}$.

4.3 Análisis de resultados y conclusiones del capítulo

A partir de los resultados obtenidos del diseño y modelación de los paneles prefabricados, se puede concluir que:

- El prediseño de losas hecho cumple sin problemas con los requisitos que impone la ACI 318 para lo que serán las maniobras a las cuales serán sometidas, así como también se comprueba que, según los criterios de las teorías de falla, los materiales de los que se componen los paneles responden de buena forma al paso de un vehículo pesado.
- De la modelación se puede concluir que el sector de las conexiones es donde podrían llegar a producirse con el tiempo problemas de fisuración y desprendimiento de materiales, así como desplazamiento entre las piezas, debido a las altas exigencias a las cuales puede estar sometido el sistema de losas. Los materiales más probables a presentar estos problemas son el grout (sistema barra-ranura y sistema machihembrado) y el teflón (sistema machihembrado), mientras que las piezas que pueden presentar un mayor desplazamiento entre ellas son los paneles que generan una conexión tipo macho-hembra entre sí.
- Acorde a los resultados obtenidos en las dos soluciones estudiadas, la que augura una mejor respuesta a las solicitudes de uso es el sistema con conexiones de tipo barra-ranura, ya que muestra una mejor continuidad entre paneles, obteniéndose un mejor traspaso de carga.
- Se aconsejaría a modo de mejorar el diseño y evitar posibles fallas que se pudiesen generar con el tiempo, adoptar dentro de las especificaciones un grout de mayor resistencia a la tracción, ya que por la teoría de falla de Rankine, ésta pieza pudiese presentar problemas en un mediano plazo.
- Un problema que puede ocurrir en el sistema de conexión barra-ranura es que la barra de transferencia puede quedar vulnerable, a la altura de la junta transversal, a la acción del agua que puede filtrarse por el sello superficial, pudiendo generarse algún ataque por oxidación en la barra.

Si bien la modelación no permite estimar cuándo pudiese producirse alguna falla en el sistema, nos muestra como se comportarán las losas con el paso de los vehículos pesados, comprobando la eficacia del traspaso de carga en los dos tipos de conexión propuestas, y detectando los materiales y sectores que seguramente se verán antes perjudicados con el paso del tiempo.

CAPÍTULO V: FABRICACIÓN PANELES DE HORMIGÓN PREFABRICADO

Al momento de querer confeccionar los paneles prefabricados, se deben tener en cuenta una serie de requerimientos. En el presente capítulo se darán a conocer las diferentes especificaciones a considerar a la hora de tener que materializar los dos diseños que se propusieron estudiar luego de la revisión de la literatura y del estudio de factibilidad estructural (diseño y modelación).

5.1 Modelo machihembrado

Las características de los paneles a tener presentes son:

- Dimensiones: 1,8m x 3,5m x 0,23m.
- Material: H35-(90)-40 con un cono de 8. Se especifica una resistencia a la compresión mínima a los 90 días de 35MPa, y de 4,6MPa a la flexotracción en 90 días también.
- Tolerancias: Tolerancias de 3mm como máximo (lo que se estipula en el Manual de Carreteras 5.410.306.).
- Armadura: Se contempla una malla central simple, a media altura del espesor, que deberá ser Phi 8mm con 20cm de espaciamiento, con acero A63-42H, barras corrugadas. En el caso del modelo machihembrado, éste deberá poseer armadura Phi 8mm A63-42H en sus dientes (conexión tipo macho) y ranuras (conexión tipo hembra). El armado se detalla en el material anexado. Aclarar que las conexiones tipo hembra y tipo macho, para los distintos paneles, son iguales.
- A los dos dientes superiores en las conexiones tipo macho se les debe adherir una placa de teflón de 3mm de espesor, con la forma trapecial de los dientes, la cual va pegada por debajo del dientes (dentro de la sección transversal del panel), y que entrega un mejor acople a la conexión, evitando el contacto hormigón-hormigón entre paneles. El diente inferior (y de mayor ancho) debe ir también con una placa de teflón de 3mm de espesor, con la forma trapecial de la superficie, pero adherida a la cara superior del diente (dentro de la sección transversal del panel).

5.2 Modelo Barras – Ranuras

Las características a considerar al momento de tener que fabricar una losa con el modelo de conexión tipo barra-ranura son:

- Dimensiones: 1,8m x 3,5m x 0,23m.
- Material: H35-(90)-40 con un cono de 8. Se especifica una resistencia a la compresión mínima a los 90 días de 35MPa, y de 4,6MPa a la flexotracción en 90 días también.
- Tolerancias: Tolerancias de 3mm como máximo (lo que se estipula en el Manual de Carreteras 5.410.306.).
- Armadura: Se contempla una malla central simple, a media altura del espesor, que deberá ser Phi 8mm con 20cm de espaciamiento, con acero A63-42H, barras corrugadas.
- Los paneles que posean barras de traspaso, consideran 6 barras de acero por conexión, tipo A44-28H, lisas, de largo 45cm y diámetro 32mm, embebidas una distancia de 22,5cm, a media altura del espesor en la posición que se detalla en las figuras anexas.

Todos los paneles deberán contemplar 3 o 4 anclajes embebidos (de largo menor a 20cm) dentro del espesor del panel, por medio de los cuales se pueda tomar mediante algún sistema de mordazas que posean las eslingas de la grúa con la cual se izarán los paneles.

A modo de resumen, el número de paneles a considerar de cada uno de los 5 tipos de losa, para lo que vendrá a ser el tramo de prueba que se proyectó efectuar y se realizó, se señala en la Tabla V.1.

Tabla V.1. Cantidad de paneles a fabricar por cada uno de los 5 tipos.

Nº de Paneles	Tipo de Panel Prefabricado
1	Panel Ranura - Macho
2	Panel Macho - Hembra
1	Panel Hembra - Barras
3	Panel Barra - Ranura
1	Panel Ranura - Ranura

Los moldajes se compusieron en su mayoría por elementos de madera, contando con perfiles metálicos para los perímetros de las losas. En las Figuras V.1. y V.2. se muestran piezas de madera correspondiente a los moldajes de la conexión

machihembrada, fabricadas durante el proyecto previas a ser ensambladas para el posterior hormigonado de las losas.



Figura V.1. Pieza de moldaje correspondiente a la conexión tipo hembra.

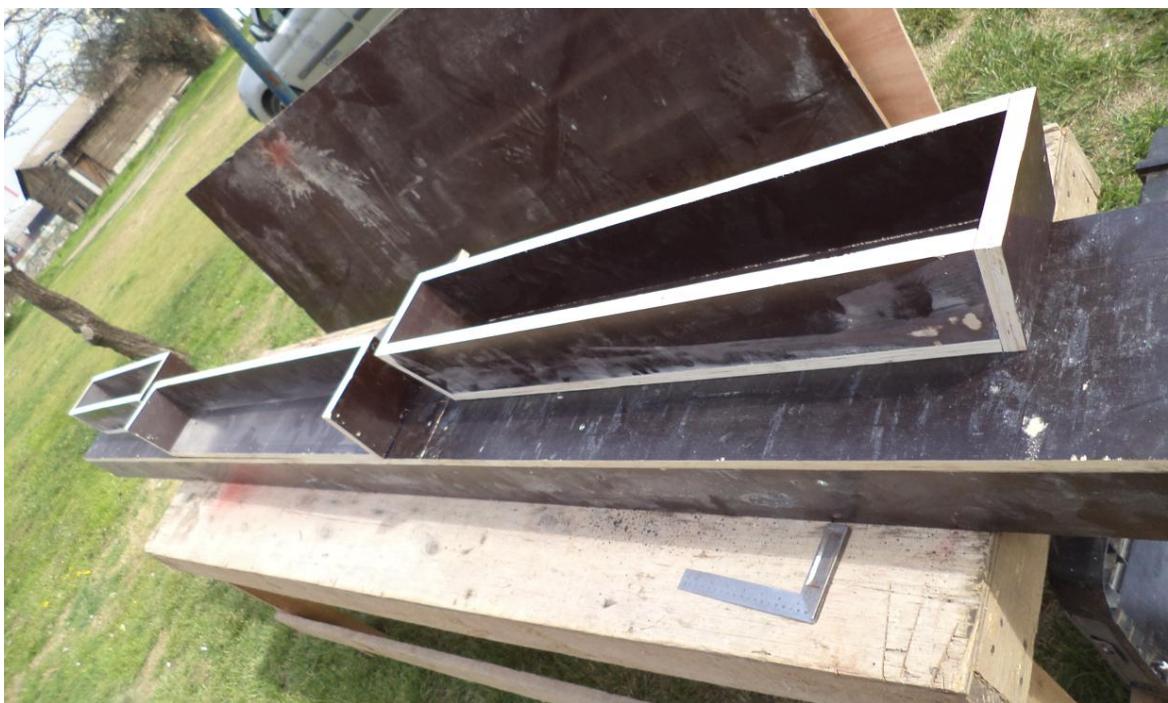


Figura V.2. Pieza de moldaje que da forma a la conexión tipo macho.

Para la fabricación de las losas se debió contar con una base nivelada sobre la cual hormigonar los paneles, de tal forma de contar con una pieza que no posea variaciones en su espesor.



Figura V.3. Pavimento de prueba en IDIEM Cerrillos utilizado como base.



Figura V.4. Ensanche de radier para cubrir el ancho de las losas prefabricadas.

En las siguientes figuras se muestran imágenes con la secuencia de fabricación de las losas empleada en el proyecto.



Figura V.5. Ubicación de moldajes fijados a la base.

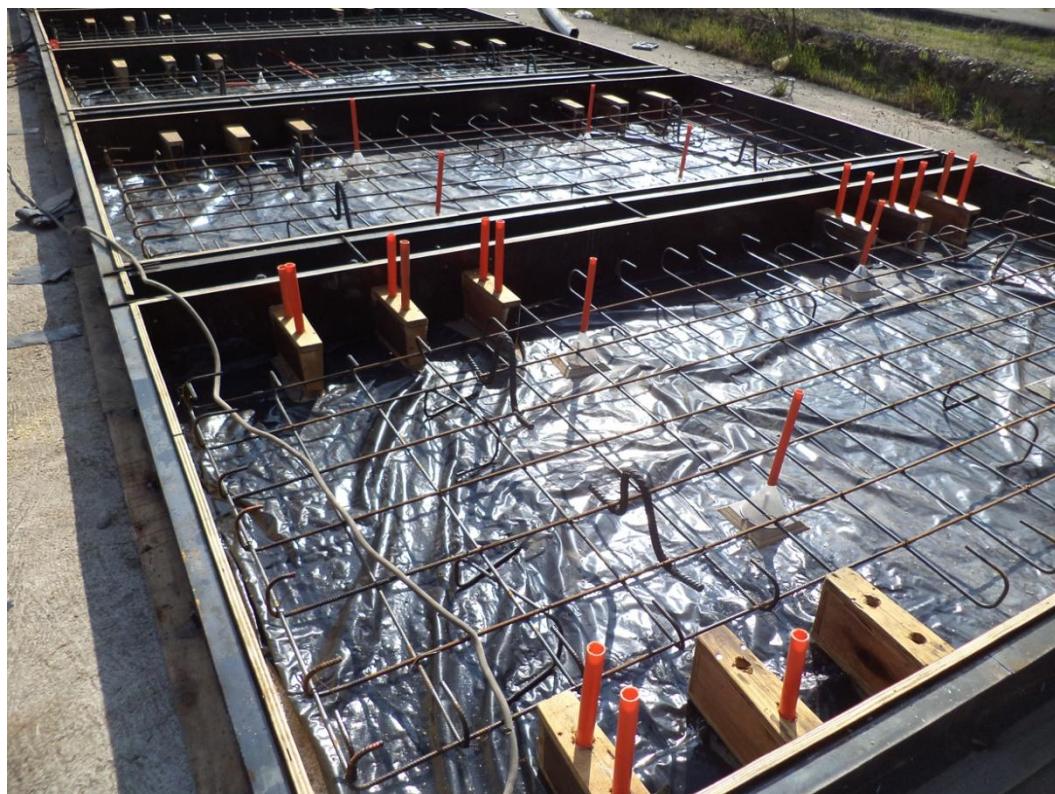


Figura V.6. Colocación de polietileno en la base, armadura y tubos para la inyección de grout.



Figura V.7. Hormigonado de losas, hormigón que posteriormente fue vibrado y enrazado.



Figura V.8. Losa hormigonada y siendo cubierta con polietileno para su mejor curado.
Posteriormente se le aplicó adicionalmente una membrana de curado.



Figura V.9. Losa descimbrada con sistema machihembrado.



Figura V.10. Losa sistema barra-ranura con prácticamente la totalidad de moldaje retirado.

CAPÍTULO VI: CONSTRUCCIÓN TRAMO DE PRUEBA

Con la idea de poder estudiar en terreno el sistema constructivo, es que se construyó un tramo de prueba en las dependencias de una planta de hormigones ubicada en la comuna de Lo Espejo. El tramo alcanzó a finiquitarse justo antes de la fecha límite del presente proyecto, por lo que sólo se detallará la planificación que se tuvo presente al momento de llevar a cabo la instalación de las losas prefabricadas, no pudiendo realizar un seguimiento de más de una semana al tramo.

El tramo de prueba tiene un largo de 14,4m, equivalente a 8 paneles de longitud 1,8m c/u. Estas dimensiones corresponden a los largos exactos, por lo que debemos sumarle a ellos una cierta holgura de 1cm por junta transversal, lo que entrega finalmente un largo de aproximadamente 14,50m para el tramo sobre el que se montarán los paneles prefabricados.

En cada borde se construyó una losa de 2m de longitud por 3,5m de ancho y 0,23m de espesor, que simularan el pavimento existente.

Por los costados a lo largo de la pista, se construyeron bermas de un metro de ancho, y de 0,10m de espesor, para simular de mejor forma la realidad de una calzada, que otorgarle un mayor confinamiento a los paneles prefabricados.

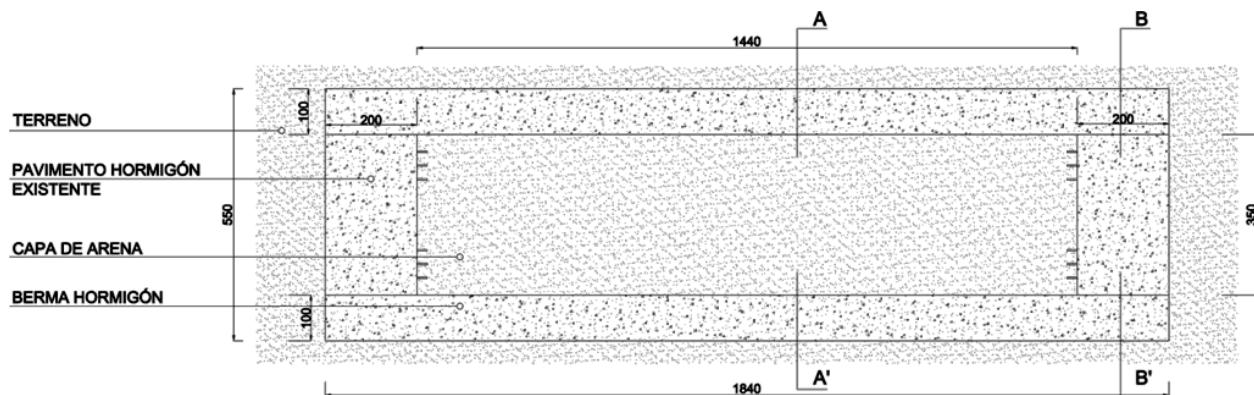


Figura VI.1. Vista en planta de la construcción en terreno que acogió al sistema de losas prefabricadas.

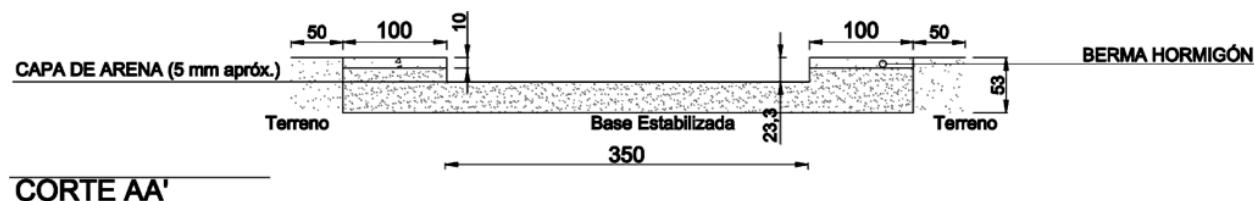
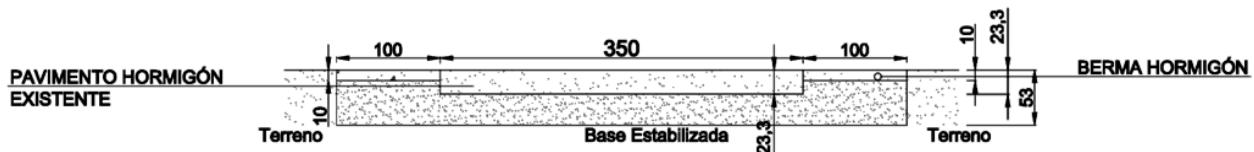


Figura VI.2. Corte en eje A de la Figura 7.1.



CORTE BB'

Figura VI.3. Corte en el eje B de la Figura 7.1.

Como se aprecia en las Figuras VI.2. y VI.3. se pensaba instalar una subbase de 30cm de espesor bajo las zonas donde se confeccionarán las losas que simulan el pavimento existente y también bajo la zona donde irán posteriormente montados los paneles prefabricados, pero finalmente, y al contar con un sello fundación con un CBR de un 80%, se decidió excavar sólo 15cm, para luego compactar bien el sello hasta alcanzar una densidad de compactación superior a 95%, y posterior a ello se colocó una capa de 15cm de base estabilizada (la caracterización de ambos materiales se detalla en el Anexo D). A los costados a la capa de base estabilizada se le dió un espesor de 28cm, sobre la cual se hormigonó lo que son las bermas. Como se mencionó, las capas granulares se controlaron en terreno mediante un densímetro nuclear hasta poder alcanzar un porcentaje de compactación de un 95% o más. Se aconseja que vaya una capa de aproximadamente 5mm de arena sobre la capa de subbase que ayude a obtener un soporte mejor distribuido bajo la losa, y así evitar concentración de tensiones que puedan afectar al elemento.

La configuración de losas conformantes del tramo de prueba se detalla en la Figura VI.4., donde los paneles en los extremos vienen a ser las losas prefabricadas.

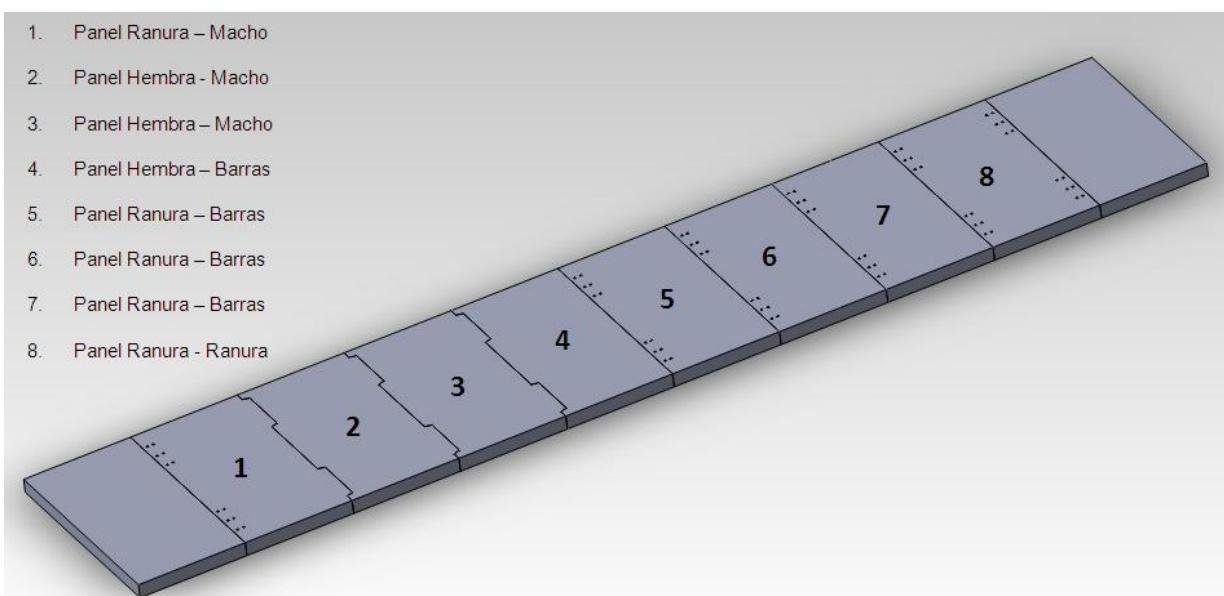


Figura VI.4. Tramo de prueba, que contempla los dos sistemas propuestos.

A continuación se detalla el procedimiento de construcción y las especificaciones a tener presentes, sección que se complementa con las imágenes del Anexo C.

6.1 Procedimiento construcción tramo de prueba y especificaciones técnicas

Habrá que diferenciar el procedimiento a seguir para lo que será el tramo de prueba y el procedimiento para la reparación (reposición) de pavimentos rígidos.

Las tareas a llevar a cabo para lo que será el tramo de prueba son:

- Trazado y excavación
- Subbase granular (confección, colocación, compactación y terminaciones)
- Hormigonado de bermas y losas de extremos
- Colocación de arena
- Inserción de barras de traspaso
- Montaje de paneles prefabricados

Para un trabajo de reposición de pavimento las tareas a considerar son:

- Remoción de pavimentos de hormigón
- Preparación de la subrasante
- Colocación de arena
- Inserción de barras de traspaso
- Montaje de paneles prefabricados

6.1.1 *Trazado y excavación*

6.1.1.1 *Descripción y alcances*

Esta partida se refiere a lo que viene siendo el trazado del tramo mediante topografía, definiendo las 4 aristas externas del plano de trabajo, y a las excavaciones requeridas para conformar la plataforma del camino a nivel de subrasante que se realizará en conformidad con lo dispuesto en la Sección 5.201 del MC-V5.

6.1.1.2 *Materiales*

Los trabajos especificados en esta partida no requieren el uso de materiales.

6.1.1.3 *Procedimiento de trabajo*

El trazado se realizará mediante la definición de 4 estaciones, correspondientes a las cuatro aristas externas que definen la plataforma a excavar y posteriormente llenar con base estabilizada.

Los trabajos de excavación se ejecutarán en conformidad con lo estipulado en el Tópico 5.201.3 del MC-V5, en los anchos y longitudes establecidos en el proyecto (21,4m x 6,5m).

6.1.1.4 Unidad de medida

La partida comprende las excavaciones de los suelos clasificados como “Terreno de Cualquier Naturaleza”, según su definición en el Numeral 5.201.304(7). Se incluyen el carguío y transporte del material excavado a terraplén o escombreras autorizadas, y demás trabajos o actividades necesarios para dar cumplimiento a lo especificado en esta Sección. Se cuantificará por metro cúbico de excavación de corte de terreno de cualquier naturaleza.

6.1.2 Remoción de pavimentos de hormigón

6.1.2.1 Descripción y alcances

Esta partida se refiere a la demolición y remoción de pavimento de hormigón, en el espesor total de la actual estructura de pavimento.

Los trabajos deberán ejecutarse en conformidad con lo dispuesto en la sección 5.101.1 del MC-V5.

6.1.2.2 Materiales

Las obras a que se refiere este ítem no requieren el uso de materiales.

6.1.2.3 Procedimientos de trabajo

Los trabajos se ejecutarán en conformidad con lo estipulado en el Tópico 5.101.303 del MC-V5.

Los materiales resultantes, serán transportados y descargados en botaderos autorizados. El tratamiento en el botadero se ajustará a lo dispuesto en las Consideraciones Ambientales Generales.

6.1.2.4 Unidad de medida

La partida incluye el corte de pavimento, demolición, remoción y transporte a terraplén o escombrera autorizada, de losas de pavimentos de hormigón, con o sin armadura y de cualquier espesor y composición.

Para efectos de medición de avances de obras, la unidad de medida será el metro cuadrado (m²) de pavimento de hormigón removido en conformidad con lo dispuesto en el Tópico 5.101.4 del MC-V5.

6.1.3 Preparación de la subrasante

6.1.3.1 Descripción y alcances

Esta partida se refiere a los trabajos requeridos para conformar la plataforma del camino a nivel de subrasante que se realizará en conformidad con lo dispuesto en la Sección 5.209 del MC-V5.

6.1.3.2 Materiales

Los materiales que eventualmente sea necesario incorporar deberán cumplir con lo señalado en el Tópico 5.209.2 del MC-V5.

6.1.3.3 Procedimiento de trabajo

Los trabajos se ejecutarán en conformidad con lo estipulado en el Tópico 5.209.3 del MC-V5, en los anchos y longitudes establecidos en el proyecto.

6.1.3.4 Unidad de medida

Para efectos de medición de avances de obras, la unidad de medida será el metro cuadrado (m^2) de preparación de subrasante, en conformidad con lo dispuesto en el tópico 5.209.4 del MC-V5.

6.1.4 Subbase granular, $CBR \geq 50\%$

6.1.4.1 Descripción y alcances

Esta partida se refiere a la confección, colocación, compactación y terminación de subbase granular, $CBR \geq 50\%$ (por Manual de Carreteras, ya que el SERVIU especifica un $CBR \geq 60\%$), que se ejecutará en conformidad con lo dispuesto en la Sección 5.302 del MC-V5, y se tendrá que tener en cuenta en la situación de que se tenga que colocar una nueva base granular en el tramo a pavimentar.

6.1.4.2 Materiales

Los materiales a emplear deberán cumplir con los requisitos de calidad y graduación según lo establecido en el Tópico 5.302.2 del MC-V5 para bases granulares de graduación cerrada y poder de soporte igual o mayor a 50% CBR, debiendo ajustarse a la banda TM 50c. El presente proyecto contempla utilizar base estabilizada, que cumpla con las características antes mencionadas.

La capa de base de espesor 300 mm ubicado sobre la subrasante, se construirá con suelo granular (según la clasificación AASHTO), con poder de soporte CBR superior a 50% (que en este caso será mayor al contemplarse como soporte una base

estabilizada), determinado según el método 8.102.11 del MC-V8 y medido al 95% de la D.M.C.S., según método 8.102.7 del MC-V8. El tamaño máximo será de 37,50mm (1 1/2"). La colocación se hará en dos capas de 150mm cada una, cada una siendo compactada hasta alcanzar las especificaciones.

6.1.4.3 Procedimiento de trabajo

Los trabajos se ejecutarán en conformidad con lo estipulado en el Tópico 5.302.3 del MC-V5, en los anchos, espesores y longitudes establecidos en el Proyecto.

Los áridos deberán transportarse en camiones encarpados, sin perjuicio de las prescripciones establecidas en las Especificaciones Ambientales del Proyecto.

Se colocará la base granular en dos capas de 150mm, compactándose cada una con rodillo o placa compactadora. Para el caso del tramo de prueba, la capa bajo las bermas de espesor 130mm (con ella se completan los 430mm de espesor de base bajo las bermas) deberá colocarse y ser compactada posterior a la compactación de la segunda capa de 150mm.

El relleno alcanzará al menos el 95% de la D.M.C.S. o el 80% de la Densidad Relativa según método 8.102.8 del MC-V8.

El material existente alcanza la cota de subrasante, por lo que deberá ajustarse a todos los requerimientos de pendiente longitudinal, bombeos, peraltes y otras condiciones geométricas del tramo. Para este caso particular, interesa que no exista una variación de nivel en el corte transversal, y sólo deberá tenerse presente el bombeo en la segunda capa de material puesto bajo las bermas.

El control de espesor se efectuará topográficamente.

6.1.4.4 Unidad de medida

Para efectos de medición de avances de obras, la unidad de medida será el metro cúbico (m^3) de base granular de graduación cerrada y de poder de soporte igual o mayor a 80%, en conformidad con lo dispuesto en el Tópico 5.302.4, acápite 302-1 del MC-V5.

6.1.5 Hormigonado de bermas y losas de extremos, y colocación de arena

6.1.5.1 Descripción y alcances

La operación refiere a la construcción del tramo de prueba, a la confección de bermas por ambos lados de la calzada y a lo largo de todo tramo, y a la confección de dos losas en los extremos del tramo (que simulan el pavimento existente) con cemento hidráulico Grado H35. La construcción de bermas contempla lo que es hormigonado de una capa de 100mm de espesor en dos secciones de 1m de ancho por 18,4m de

longitud sobre la base estabilizada compactada, mientras que las losas en los extremos poseen 230mm de espesor y una superficie en planta de 2m x 3,5m.

6.1.5.2 *Materiales*

Los hormigones se ajustarán en todos sus términos a lo estipulado en el Tópico 5.401.2 de la Sección 5.410, Pavimentos de Hormigón, del MC-V5.

El hormigón a utilizar será un H35(90)40-08, Se especifica una resistencia a la compresión mínima a los 90 días de 35MPa, y de 4,6MPa a la flexotracción en 90 días también.

6.1.5.3 *Procedimiento de trabajo*

1. Hormigonado. Se utilizará el mismo tipo de hormigón especificado para pavimentos en la Sección 5.410 del MC-V5, salvo que se requiera el empleo de hormigón para entrega acelerada al tránsito, en cuyo caso se deberá proceder como se especifica en la Operación 7.305.3, Reparación en todo el Espesor para Puesta en Servicio Acelerada, de MC-V7.

Si se decide por hormigonar todo con una partida, se deberá contar con el moldaje suficiente para confeccionar las dos losas extremo y ambas bermas. De considerarse dos partidas de hormigón, dependerá del moldaje disponible el que se decida por hormigonar una losa y una berma primero, o dos losas primero, para luego hormigonar el resto con una segunda colada. La nivelación debe constatarse mediante una regla de una longitud igual a la de la zona a hormigonar más 1 m. La experiencia indica que los mejores resultados se logran colocando la cercha vibradora paralela al eje del camino. No debe olvidarse dar la textura final a la superficie. El curado se ajustará a lo señalado en la Sección 5.410 del MC-V5 o en la Operación 7.305.3 de este Volumen, si el hormigón es para entrega acelerada al tránsito.

2. Terminaciones. Los bordes deben quedar lisos, de tal forma de que exista un espaciamiento mínimo entre los bordes del tramo de prueba construido y los bordes de las losas prefabricadas que se montarán sobre la capa de arena.
3. Recepción y Controles. Los hormigones deberán tener una resistencia característica de compresión a los 28 días de 35MPa, considerando una fracción defectuosa del 20%. Se controlarán de acuerdo con lo dispuesto en el Párrafo 5.501.313 de la Sección 5.501, Hormigón, del MC-V5. La recepción y la aplicación de multas, cuando corresponda, se regirán por lo dispuesto en el Párrafo 5.501.314 de la misma Sección.
4. Disposiciones adicionales. Los trabajos se ejecutarán en conformidad con lo estipulado en el Tópico 5.410.3 del MC-V5 en cuanto a lo pertinente a su dosificación, fabricación, transporte, preparación de la capa subyacente,

colocación, esparcido, compactación, terminaciones, curado y proyección, juntas, sellado de juntas, protección del pavimento, así como a la apertura al tránsito.

6.1.5.4 Unidad de medida

Para efectos de medición de avances de obras, la unidad de medida será el metro cúbico (m^3) tanto para el pavimento de hormigón, como para la arena. Las partidas incluyen la preparación de la capa subyacente para recibir el pavimento de hormigón. También incluyen el suministro, colocación y retiro de los moldes si corresponde, la fabricación, transporte, colocación, terminación y curado del hormigón, acero, la construcción y sellado de las juntas y todas las operaciones y materiales necesarios para cumplir totalmente con lo especificado en dicha Sección.

6.1.6 Inserción de barras de traspaso

6.1.6.1 Descripción y alcances

Tarea que contempla la inserción de barras de traspaso de carga en el borde cortado del pavimento existente en ambos extremos del tramo de reparación.

6.1.6.2 Materiales

Por cada junta transversal entre el pavimento existente y un panel prefabricado, se necesitan 6 barras de acero A44-28H, lisas, de largo 45 cm y diámetro 32 mm.

6.1.6.3 Procedimiento de trabajo

Realizar 6 (tres inclinadas al lado derecho y las otras tres hacia el lado izquierdo) perforaciones a media altura en el pavimento existente, en la cara transversal aserrada, perforaciones a realizar mediante un taladro con broca de diámetro 32mm. Se realizan las 3 perforaciones a la altura de las huellas del vehículo (en la Figura III.3. se detalla la ubicación de cada perforación). La profundidad de cada perforación debe ser de 22,5cm. Posteriormente se introducen las barras en las perforaciones, y se sellan las perforaciones mediante algún material epóxico, fijando las barras al pavimento.

6.1.7 Colocación de arena

6.1.7.1 Descripción y alcances

Tarea referente a la colocación de una capa de aproximadamente 5mm de espesor sobre la superficie en la cual se depositarán los paneles prefabricados, con el fin de generar un mejor apoyo, distribuyéndose la carga de forma uniforme y sin concentraciones puntuales de tensiones.

6.1.7.2 *Materiales*

Arena, de clasificación fina, cuya banda cumpla con que pase por el tamiz N°60 el 100% del material.

6.1.7.3 *Procedimiento de trabajo*

La arena se debe colocar sobre la base compactada, en el sector donde se montarán las losas prefabricadas, una capa de aproximadamente de no más de 5mm de arena para así facilitar el acomodo de las losas y otorgar una mejor distribución de soporte. Se colocará y distribuirá de forma manual mediante pala y regla, compactando posteriormente mediante placa compactadora.

6.1.7.4 *Unidad de medida*

Para efectos de medición de avances de obras, la unidad de medida será el metro cúbico (m^3) de arena.

6.1.8 *Procedimiento montaje paneles prefabricados*

6.1.8.1 *Posicionamiento de equipo*

El camión que transporta los paneles deberá ubicarse a un costado del tramo de prueba, en dirección paralela al eje longitudinal del tramo. El camión pluma se ubicará detrás del camión de transporte, a un costado del tramo de prueba y paralelo al eje longitudinal de éste, de tal forma de simular que sólo se utilizará una calzada o la berma con la disposición de la maquinaria, de tal forma de interferir en el menor grado posible el tránsito vehicular.

6.1.8.2 *Sistema de amarre*

Los paneles vienen con tres o cuatro anclajes metálicos embebidos que sobresalen como azas en la superficie de rodado, del cual se debe enganchar la cadena o eslinga dispuesta en la pluma del equipo de izaje (grúa o camión pluma) utilizada para el izaje de la pieza.

6.1.8.3 *Izaje y montaje*

Para realizar el izaje se requiere de una grúa o camión pluma que puedaizar una losa de hormigón de 5 toneladas de peso. Siempre hay que considerar realizar las maniobras de tal forma de no interferir en otras calzadas de la vía, o no interferir en más de una calzada a parte de la que se está interviniendo. Tener presente que la capacidad máxima de izaje de la grúa podrá variar dependiendo de la prolongación que se le desee dar a la pluma si se tiene pronosticado realizar la mayor cantidad de montajes de losas desde una misma posición, tema que dependerá de las condiciones

existentes en terreno para las cuales se deberá adecuar el procedimiento de la maniobra.

6.1.8.4 *Sellado*

El sellado corre solo para los paneles que poseen el sistema de conexión barra ranura, y se realiza con un grout de alta resistencia, el cual mediante un inyector se introduce por uno de los dos agujeros que posee en su parte superior cada una de las ranuras, revisando por medio del otro agujero el nivel de grout al interior de la ranura. Para poder asegurar un buen sellado de las de las ranuras, sin que se fugue el grout por la junta transversal, es recomendable utilizar unas placas plásticas delgadas (de igual espesor a la separación entre paneles) que se inserten en las barras de transferencia y cubran la ranura sellándola y permitiendo que el grout sólo pueda evacuar la ranura por medio de los agujeros de revisión e inyección.

6.1.8.5 *Nivelación*

Los paneles prefabricados cuentan con agujeros de inyección de grout, a parte de los agujeros de inyección para el sellado de ranuras, cuya finalidad es poder nivelar la losa inyectando grout a través de ellos, llenando el vacío que pueda generarse entre el panel y la subbase granular, y quedando de esta forma completamente apoyada a la base, como apoyo a la colocación de la cama de arena colocada sobre la base o subbase granular.

La tarea se realiza mediante un equipo inyector al igual que el sellado de ranuras en la conexión de tipo barra-ranura.

CAPÍTULO VII: ANÁLISIS DE SOLUCIÓN

7.1 Tiempo

La gran ventaja del sistema de reparación de pavimentos rígidos mediante lasas prefabricadas es el ahorro en tiempo que entrega ésta solución, dando la posibilidad de poder entregar el tramo y abrirlo nuevamente al tránsito.

Tabla VII.1. Comparación en tiempo de desarrollo para 50m² de reparación de calzada.

ITEM	PROCEDIMIENTO ACTUAL	TIEMPO DE DESARROLLO	PROCEDIMIENTO PROPUESTO	TIEMPO DE DESARROLLO
	DESCRIPCION DE TAREA	HORAS	DESCRIPCION DE TAREA	HORAS
1	CORTE DE PAVIMENTO POR LOS BORDES	1	CORTE DE PAVIMENTO POR LOS BORDES	1
2	DEMOLICION DE PAVIMENTO	2	DEMOLICION DE PAVIMENTO	2
3	TRANSPORTE A BOTADERO	1	TRANSPORTE A BOTADERO	1
4	PREPARACION DE SUPERFICIE BASE	1,5	PREPARACION DE SUPERFICIE BASE	1,5
5	TRANSPORTE DE HORMIGON PRE MEZCLADO	0	TRANSPORTE DE LASAS PREFABRICADAS	0
6	COLOCACION DE HORMIGON	1	INSTALACION DE LASAS	2,5
7	TIEMPO DE FRAGUE DE HORMIGON (R-1)	24	INYECCIÓN GROUT Y SELLO DE JUNTAS	5
8	CORTE Y SELLO DE JUNTAS	4		
	TIEMPO TOTAL DE PUESTA EN MARCHA	34,5	TIEMPO TOTAL DE PUESTA EN MARCHA	13

La solución de pavimentar con lasas prefabricadas es conveniente en reparaciones de no mucha extensión, ya que si la reparación se desea hacer de forma continua y el tramo a reparar presenta una vasta longitud, puesto que el instalar las lasas requiere de mayor tiempo al que necesita la colocación de hormigón in-situ, y la relación entre el tiempo de frague del hormigón y el tiempo total de puesta marcha disminuye a medida que aumenta la longitud del tramo.

Pero como se mencionó, el caso anterior es para cuando se solicita realizar un trabajo de forma continua, ya que si el trabajo pudiese realizarse en ventanas de trabajo, esencialmente nocturnas donde disminuye considerablemente el tránsito en la gran mayoría de las vías, la solución mediante lasas prefabricadas conviene, ya que por más que requiera mayor tiempo en realizarse la reparación del trabajo completo en un tramo de gran longitud, impacta de forma mucho menos negativa al servicio que se le entrega a los usuarios.

7.2 Costos

Para poder realizar una comparación económica entre el método convencional de reposición de pavimentos rígidos que se realiza mediante hormigonado in-situ y el método de pavimentación mediante lasas prefabricadas, se asumió un espesor de losa de 0,2m, y se estimó el costo por m² de pavimento rígido.

Tabla VII.2. Comparación de costos entre el método de hormigonado in-situ y el de losas prefabricadas para un metro cuadrado de losa de espesor 20cm.

TRADICIONAL							PREFABRICADA								
ITEM	RECURSO	UNID	CANT.	CANT. UNIT.	P. UNIT	TOTAL	UNID	CANT.	CANT. UNIT.	P. UNIT	TOTAL				
1 Maquinaria	Cortadora de Pavimento	día	1,00	0,0077	\$ 5.800	\$ 44	día	1,00	0,0077	\$ 18.000	\$ 138				
	Minicargador	hr	8,00	0,1224	\$ 7.800	\$ 955	hr		0,0000	\$ 7.800	-				
	Martillo	día	1,00	0,0204	\$ 35.000	\$ 714	día		0,0000	\$ 35.000	-				
	Vibrador de inmersión	día	1,00	0,0816	\$ 4.000	\$ 327	día	1,00	0,0816	\$ 4.000	\$ 327				
	Placa Compactadora DPU 2950	día	1,00	0,0153	\$ 8.200	\$ 126	día	1,00	0,0153	\$ 8.200	\$ 126				
	Esmeril angular 9"	día	1,00	0,0077	\$ 1.100	\$ 8	día		0,0000	\$ 1.100	-				
	Grupo Generador	día	1,00	0,0077	\$ 4.650	\$ 36	día		0,0000	\$ 4.650	-				
	Fumigadora manual	un	1,00	0,0008	\$ 21.000	\$ 17	un	1,00	0,0008	\$ 21.000	\$ 17				
	Taladro	un			\$ 8.200	-	día	1,00	0,0208	\$ 9.000	\$ 188				
	Grua Pluma	día		0,0000	\$ 90.000	-	día	1,00	0,0208	\$ 90.000	\$ 1.875				
Subtotal						\$ 2.227					\$ 2.671				
2 Materiales	Subtotal														
	Hormigón Calzada H35 (80) 40-05/06 R3	m3	0,20	0,2080	\$ 53.375	\$ 11.102	m3	0,20	0,2080	\$ 53.375	\$ 11.102				
	Carga Incompleta	m3		0,0000	\$ 8.540	-	m3		0,0000	\$ 8.540	-				
	Membrana de curado	lts	0,30	0,3060	\$ 750	\$ 230	lts	0,30	0,3060	\$ 750	\$ 230				
	Bencina	lts	58.050,00	0,0421	\$ 560	\$ 24	lts	108000,00	0,0230	\$ 560	\$ 13				
	Petroleo	lts	377.600,00	0,7347	\$ 450	\$ 331	lts	65600,00	0,1224	\$ 450	\$ 55				
	Disco Diamantador 14"	un	1,00	0,0008	\$ 98.000	\$ 80	un	1,00	0,0008	\$ 98.000	\$ 80				
	Disco especial	un				-	un	1,00	0,0010	\$ 300.000	\$ 300				
	Disco de desbaste hormigón	un	1,00	0,0068	\$ 1.540	\$ 10	un		0,0000	\$ 1.540	-				
	Barreras Plasticas Tipo Legos	un	14,00	0,0200	\$ 13.000	\$ 260	un		0,0000	\$ 13.000	-				
	Letrero Hombres Trabajando	un	2,00	0,0016	\$ 28.500	\$ 47	un		0,0000	\$ 28.500	-				
	Letrero Angostamiento	un	1,00	0,0008	\$ 28.500	\$ 23	un		0,0000	\$ 28.500	-				
	Letrero paso obligado	un	2,00	0,0016	\$ 22.000	\$ 36	un		0,0000	\$ 22.000	-				
	Preferencia sentido contrario	un	1,00	0,0004	\$ 28.500	\$ 12	un		0,0000	\$ 28.500	-				
	Lampara destellante con batería y base	un	2,00	0,0016	\$ 12.000	\$ 20	un		0,0000	\$ 12.000	-				
	Grout de alta resistencia	m3			\$ 660.000	-	m3	0,0023	0,0024	\$ 660.000	\$ 1.579				
	Fierro estriado 8mm	ml			\$ 800	-	ml	8,3200	8,3200	\$ 800	\$ 6.656				
Subtotal						\$ 12.175					\$ 20.015				
3 Mano de Obra	Subtotal														
	Maestro 1°	hd	1,00	0,0408	\$ 15.800	\$ 645	hd	1,00	0,0408	\$ 15.800	\$ 645				
	Maestro 2°	hd	1,00	0,0408	\$ 14.800	\$ 604	hd	1,00	0,0408	\$ 14.800	\$ 604				
	Ayudante	hd	4,00	0,1633	\$ 13.400	\$ 2.188	hd	4,00	0,1633	\$ 13.400	\$ 2.188				
	Leyes Sociales	%	45,00	0,4500	\$ 3.437	\$ 1.547	%	45,00	0,4500	\$ 3.437	\$ 1.547				
Subtotal						\$ 4.984					\$ 4.984				
4 Subcontratos o Servicios	Subtotal														
	S/C Retiro de escombros sin carguío	m3	0,20	0,3160	\$ 3.100	\$ 980	m3	0,20	0,3160	\$ 3.100	\$ 980				
	S/C Sello de juntas	ml	1,00	0,0476	\$ 1.100	\$ 52	ml	1,00	0,0495	\$ 1.100	\$ 54				
	Subtotal					\$ 1.032					\$ 1.034				
COSTO DIRECTO							\$ 20.418								
							\$ 28.704								

* Costos por m²

* Valores en moneda chilena

Como se puede ver en la Tabla VII.2. el costo de la solución mediante losas prefabricadas es aproximadamente un 40% superior al medirse por metro cuadrado, elevando el costo de esta solución el uso de grout de alta resistencia para el sellado de conexiones tipo barra-ranura además de la armadura que hay que considerar. No se considera la confección de moldajes, ya que una vez hechos estos sirven para un sin número de paneles, ajustándose a los diferentes tramos por reponer al poder variar la

longitud manteniendo el ancho de 3,5m y el espesor. El análisis fue hecho considerando que la fabricación de los moldajes es un gasto en el que se incurre una sola vez.

El hormigón utilizado en las losas puede variar, considerando uno de menor costo que alcance la resistencia especificada en un mayor tiempo si se programa la operación con un tiempo considerable de programación que permita poder fabricar las losas considerando un hormigón R28 lo cual reduce el costo de confección.

Aclarar que la Tabla VII.2. es una estimación de los costos por cada una de la soluciones, en base a los costos que maneja una empresa constructora dedicada a las obras de vialidad.

CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES

Para poder en un futuro cercano comenzar a desarrollar ésta solución de rehabilitación de pavimentos rígidos, será importante adquirir un importante grado de experiencia en el procedimiento, y poder estandarizarlo para así poder contar con un ahorro importante en el tiempo de rehabilitación de un tramo y de esta forma competir con el sistema convencional de hormigonado in-situ atacando la falencia de éste último: el tiempo considerado para la entrega del tramo desde que se interfiere la vía.

Además del ahorro en tiempo, la idea es poder generar la menor interferencia durante la realización del trabajo, por lo que para lograr esto es importante tener en cuenta el utilizar idealmente sólo una o a lo más dos calzadas durante la operación, y poder realizar los trabajos en horarios de bajo tránsito vehicular como lo es durante la noche. Es importante poder lograr los puntos anteriores para poder obtener ganancias en la calidad de servicio entregado, ya que en cuanto a los costos estas soluciones se ven en desventaja frente al método tradicional.

Se redactaron las especificaciones técnicas a considerar para la construcción de un tramo de prueba, similares a las que deberán considerarse al momento de implementar las soluciones en una vía real. Éstas podrán tomarse en cuenta al momento de construir el tramo de prueba, quedando además como especificaciones base para la ejecución de trabajos de rehabilitación utilizando el sistema de paneles prefabricados.

De los resultados de la modelación mediante elementos finitos hecha, se rescata que:

- El sistema barra-ranura tiende a fallar en el grout con el que se rellena la ranura para materializar la conexión entre paneles, provocando seguramente el desprendimiento del material en el sector de contacto con el hormigón de la losa.
- Para el sistema machihembrado se deberá considerar una placa de contacto entre diente y ranura que posea una rigidez mayor a la del teflón, para evitar así que se comporte el diente como un voladizo, otorgando un mejor apoyo.
- El sistema barra-ranura augura un mejor traspaso de carga entre paneles en comparación al sistema machihembrado, lo cual deriva en una mayor continuidad del tramo.

Al término de la etapa de fabricación de las losas, se presentaron imprevistos con las piezas de madera del moldaje, ya que hubo piezas que se adhirieron en demasía al hormigón, por lo que se deberá contemplar el uso de piezas de poliestireno expandido que puedan ser retiradas incluso mediante incineración.

A partir del análisis hecho a lo que fue la instalación de las losas, se concluye lo siguiente:

- El sistema barra-ranura tomó ventaja sobre el machihembrado al presentar éste último trabazón en el ensamblaje de los paneles, por lo que se debió realizar un rebaje en los sectores conflictivos, derivando en la necesidad de tener que llenar la separación para que se genere apoyo entre las losas, obligando a buscar alguna otra alternativa geométrica del diente y la ranura para así evitar el tener que llenar la junta.
- Se deberá contemplar una mayor holgura en las dimensiones del plano en planta, especialmente si las losas son confeccionadas en terreno sin las condiciones idóneas y las pequeñas tolerancias que se pueden alcanzar en una planta de prefabricado.
- Para el sellado de ranuras del sistema barra-ranura, tarea que se realiza mediante grout de alta resistencia, se deberá tener presente colocar una placa plástica inserta en la barra de traspaso que tape la ranura al momento de acoplar las losas, no permitiendo que fluya grout hacia la junta transversal, o colocar arena húmeda a lo largo de la junta transversal antes de grouter las ranuras otorgando confinamiento al grout al momento de ser inyectado dentro de la ranura que cobija a la barra de traspaso.

La rehabilitación de pavimentos rígidos mediante la instalación de losas prefabricadas demuestra ser una interesante y buena opción al momento de definir la metodología de reparación de un tramo vial, y a medida que se comience a implementar de forma más frecuente, ésta se irá perfeccionando, y la operación se tenderá a industrializarse, llevando con ello tanto una reducción en los costos y en tiempos de confección, como en la mejoría de los estándares de calidad de su fabricación (certificación).

CAPÍTULO IX: BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] **Buch, N.**, "Precast Concrete Panel Systems for Full-Depth Pavement Repairs: Field Trials". (No. FHWA-HIF-07-019). Federal Highway Administration, Washington, DC. 2007
- [2] **Lane, R., Kazmierowski T.**, "Use of Innovative Pre-Cast Concrete Slab Repair Technology in Canada." Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Pavements, Colorado Springs, CO, 2005, pp. 771–789.
- [3] **Simonsen, J. E.**, "Concrete Pavement Joint Repair With Pre-cast Slabs, Progress Report". Research project 68 F-102, Research report R-762. Michigan State Highway Commission, Lansing. 1971.
- [4] **Simonsen, J. E.**, "Concrete Pavement Joint Repair With Pre-cast Slabs, Construction Report". Research Project 668F-102, Research report R-804, Michigan State Highway Commission, Lansing. Febrero 1972.
- [5] **Tyson, S.**, "Full-depth Repair of Jointed PCC Pavements Cast-in-place and Precast Procedures". Virginia Highway and Transportation Research Council, VHTRC 76-R44, Charlottesville. 1976
- [6] **Ministry of Transportation Ontario**, SDO-90-01, "Pavement Design and Rehabilitation Manual". Queen's Printer for Ontario, 1990. 278 p.
- [7] **Ministry of Transportation Ontario**, SP-026, "Manual for Condition Rating of Rigid Pavements". Queen's Printer for Ontario, 1995. 142 p.
- [8] **Bull, J. W.**, "The Use of Precast Concrete Raft Units for Roads." Highways, vol. 56, no.1936, London, England, U.K., April, 1988. p.35–36.
- [9] **Correa, A. L., Wong B.**, "Concrete pavement rehabilitation guide for full-depth repairs". Federal Highway Administration, FHWA-RC Atlanta 1/10-03 (5M), Agosto 2003.
- [10] **Davids, B.**, EverFE Theory Manual. University of Maine, Orono, 2003.

- [11] **Federal Highway Administration, FHWA**, Accelerated Rigid Paving Techniques, State-of-the-Art Report, Special Project 201. (FHWA-SA-94-080). Federal Highway Administration, Washington, DC, 1994.
- [12] **Federal Highway Administration, FHWA**, LTPP Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program (FHWA-RD-03-031). Federal Highway Administration, Washington, DC, 2003.
- [13] **Grimsley, R. F., Morris B. G.**, An Approach to Concrete Pavement Replacement That Minimizes Disruption of Traffic. Special Report 153. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1975. p.107–110.
- [14] **Hachiya, Y., Akamine, F., Takahashi, O., Miyaji. Y.**, “Rapid Repair With Precast Prestressed Concrete Slab Pavements Using Compression Joint System.” Proceedings of 7th International Conference on Concrete Pavements. International Society for Concrete Pavements, Orlando, FL, 2001. p.891–905.
- [15] **Merritt, D. K., McCullough, B. F., Burns, N. H.**, “Precast Prestressed Concrete Pavement Pilot Project Near Georgetown, Texas.” Transportation Research Record 1823. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 2003. p.11–17.
- [16] **Meyer, A. H., McCullough, B. F.**, “Precast Repair of CRC Pavement.” Journal of Transportation Engineering, vol. 109, no. 5, American Society of Civil Engineers, New York, NY, 1983. p.615–630.
- [17] **Overacker, J. W.**, “Thruway Repairs Concrete Slabs Overnight.” Public Works, vol. 105, no. 3, New York, NY, 1974. p.63.
- [18] **Sharma, A. K.**, “Experimental Rehabilitation of Jointed Portland Cement Concrete Pavement.” Transportation Research Record 1272. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1990. p.27–34.

- [19] **Speir, R. H., Tayabji, S. D., Rada, G. R., Chen, Y. S., Murrell, S.**, “Feasibility Study for the Use of Precast Portland Cement Concrete Panels for Rehabilitation of Airfield Pavements”. Proceedings of 7th International Conference on Concrete Pavements, International Society for Concrete Pavements, Orlando, FL, 2001. p.907–922.
- [20] **Kwik Slab Brochure**; 1217 Palolo Avenue, Honolulu, Hawaii USA;
www.kwikslab.com
- [21] **Ferrand, J., Duffait, J., Josserand, L., De Lerrard, F.**, “Les Chaussées urbaines démontables – Etude bibliographique”. Internal LCPC report, 2003. p.39
- [22] **American Concrete Institute, ACI**; ACI 318S-08; Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural”
- [23] **Ministerio de Obras Públicas de Chile, MOP**, Manual de Carreteras Volumen Nº3: “Instrucciones y Criterios de Diseño”, 2010
- [24] **Ministerio de Obras Públicas de Chile, MOP**, Manual de Carreteras Volumen Nº5: “Especificaciones Técnicas Generales Construcción”, 2010
- [25] **Ministerio de Obras Públicas de Chile, MOP**, Manual de Carreteras Volumen Nº8: “Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensayo y Control”, 2010
- [26] **Ministerio de Obras Públicas de Chile, MOP**, Manual de Carreteras Volumen Nº3: “Diseño”, Sección 3.603 Diseño de la Superestructura, 1981
- [27] **ARA, Inc.**, Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, “Appendix QQ: Structural Response Models For Rigid Pavements”; National Cooperative Highway Research Program (NCHRP); Eres Division 505 West University Avenue Champaign, Illinois 61820; 2003.
- [28] **Davids, W. G., Turkiyyah, G. M., Mahoney, J. P.**, Modeling of Rigid Pavements: Joint Shear Transfer Mechanisms and Finite Element Solution Strategies; Department of Civil and Environmental Engineering University Of Washington, Seattle, Washington 98195-2700, 1998.

- [29] CALAVERA Ruiz, José., Capítulo 60: Tirantes. Ménsulas Cortas. Macizos de Apoyo. En su: Proyecto y Cálculo de estructuras de hormigón, 2^a Edición. España, INFOPRINT, S.A., 2008. p.639-657.
- [30] Ministerio de Obras Públicas de Chile, MOP, Decreto Supremo N°158/80, actualizado por el Decreto N°1910/03 del mismo ministerio, 1980 y 2003.

CAPÍTULO X: ANEXOS

10.1 ANEXO A: Diseño de armadura a flexión por izaje

LOSA TIPO

$$b := 100\text{cm} \quad \text{ancho}$$

$$h := 23\text{cm} \quad \text{alto}$$

$$d := \frac{h}{2} \quad \begin{matrix} \text{recubrimiento altura útil} \\ \text{malla} \end{matrix}$$

$$db := 8\text{mm} \quad esp := 20\text{cm}$$

$$fy := 420\text{MPa} \quad Es := 200000\text{MPa} \quad tonf := 1000\text{kgf}$$

$$fc := 30\text{MPa} \quad eu := 0.003$$

Solicitudes

$$M_{maxpos11} := 0.061\text{tonf}\cdot\text{m} \quad M_{maxpos22} := 0.015\text{tonf}\cdot\text{m}$$

$$M_{maxneg11} := 0.315\text{tonf}\cdot\text{m} \quad M_{maxneg22} := 0.682\text{tonf}\cdot\text{m}$$

$$\text{Momento} := 1.4 \cdot (\max(M_{maxpos11}, M_{maxneg11}, M_{maxpos22}, M_{maxneg22}))$$

$$(\text{mayorado por } 1.4) \quad \text{Momento} = 0.955 \cdot \text{tonf}\cdot\text{m}$$

Factor de reducción de resistencia

$$\phi(\varepsilon) := \begin{cases} 0.65 & \text{if } \varepsilon \leq 0.002 \\ 0.65 + (\varepsilon - 0.002) \cdot \left(\frac{250}{3} \right) & \text{if } 0.002 < \varepsilon \leq 0.005 \\ 0.9 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$a(As) := \frac{As \cdot fy}{0.85 \cdot fc \cdot b}$$

$$M_n(As) := As \cdot fy \cdot \left(d - \frac{a(As)}{2} \right)$$

$$c(As) := \frac{a(As)}{0.85}$$

Área requerida para flexión

$$As_{req} := \text{root}\left[\phi\left[\frac{\epsilon_u \cdot (d - c(As))}{c(As)}\right] \cdot M_n(As) - \text{Momento}, As\right]$$

$$As_{req} = 2.188 \cdot \text{cm}^2$$

Área adoptada

$$n := \left(\frac{1m}{esp} + 1\right) \quad As := n \cdot \left(\frac{\pi \cdot db^2}{4}\right) \quad As = 3.016 \cdot \text{cm}^2$$

Armadura a utilizar

$$n = 6$$

Verificación de cuantía considerando valor de armadura requerida

$$As_{min} := \max\left(0.25 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \frac{b \cdot d}{\frac{f_y}{\text{MPa}}}, 1.4 \cdot b \cdot \frac{d}{f_y} \cdot \text{MPa}, 0.0018 \cdot b \cdot d\right) \quad \text{Armadura mínima}$$

$$\text{verificap}(As, Asr) := \begin{cases} "ok" & \text{if } (\max(As_{min}, Asr) \leq As \leq 0.025 \cdot b \cdot d) \vee (1.33 \cdot Asr \leq As \leq 0.025 \cdot b \cdot d) \\ "mal" & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{verificap}(As, As_{req}) = "ok"$$

Verificación espaciamiento (sección crítica)

$$\text{verificaesp} := \text{if}(esp \leq 2 \cdot h \wedge esp \leq 450\text{mm}, "ok", "mal")$$

$$\text{verificaesp} = "ok"$$

Verificación de resistencia

$$f_i := \phi \left[\frac{e_u \cdot (d - c(As))}{c(As)} \right] \quad f_i = 0.9$$

$$f_i \cdot M_n(As) = 12.827 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Momento = 9.363 · kN · m

Momento solicitante mayorado es menor a la resistencia nominal al momento, por lo tanto cumple

Fisuración

$$\lambda := 1 \quad \text{Concreto de peso normal}$$

Tensión de cracking (fisuración)

$$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa}$$

Inercia de sección maciza

$$I_g := \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3$$

$$I_g = 1.014 \times 10^5 \cdot \text{cm}^4$$

Momento de fisuración

$$M_{cr} := \frac{f_r \cdot I_g}{\left(\frac{h}{2}\right)}$$

$$M_{cr} = 29.94 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Existencia de fisuración

$$\text{fisuracion} := \text{if}(M_{cr} \leq \text{Momento}, \text{"si"}, \text{"no"})$$

$$\text{fisuracion} = \text{"no"}$$

10.2 ANEXO B: Armadura en paneles

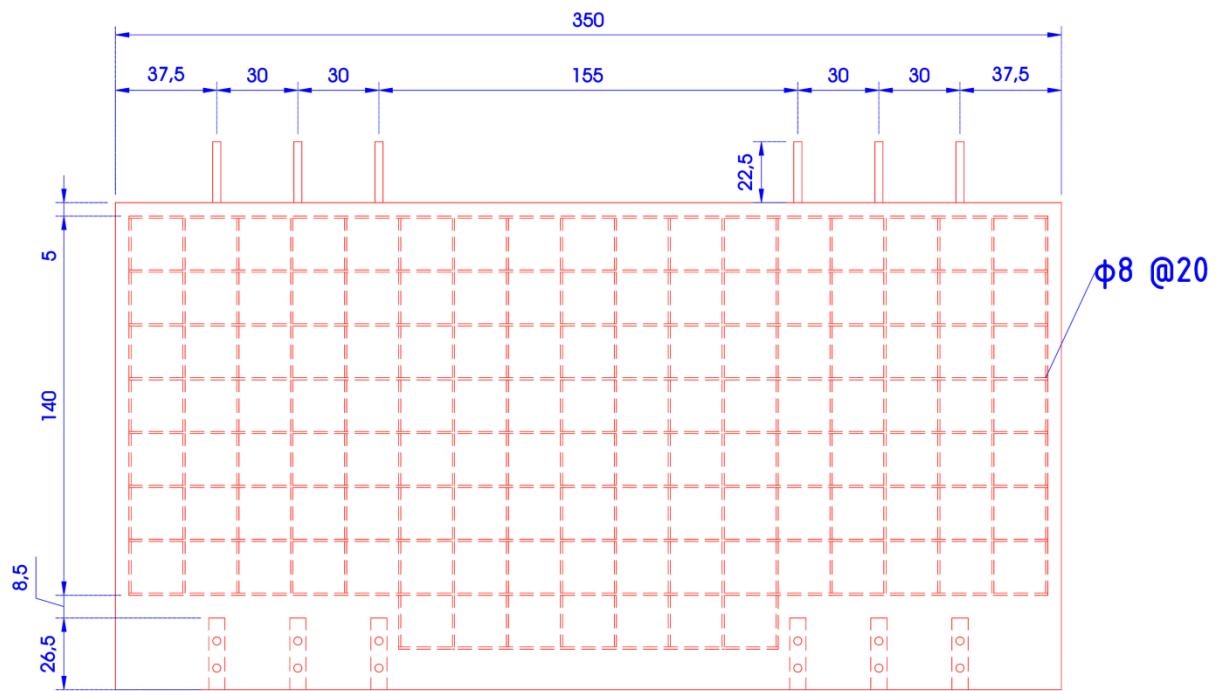


Figura B.1. Armadura panel barra-ranura.

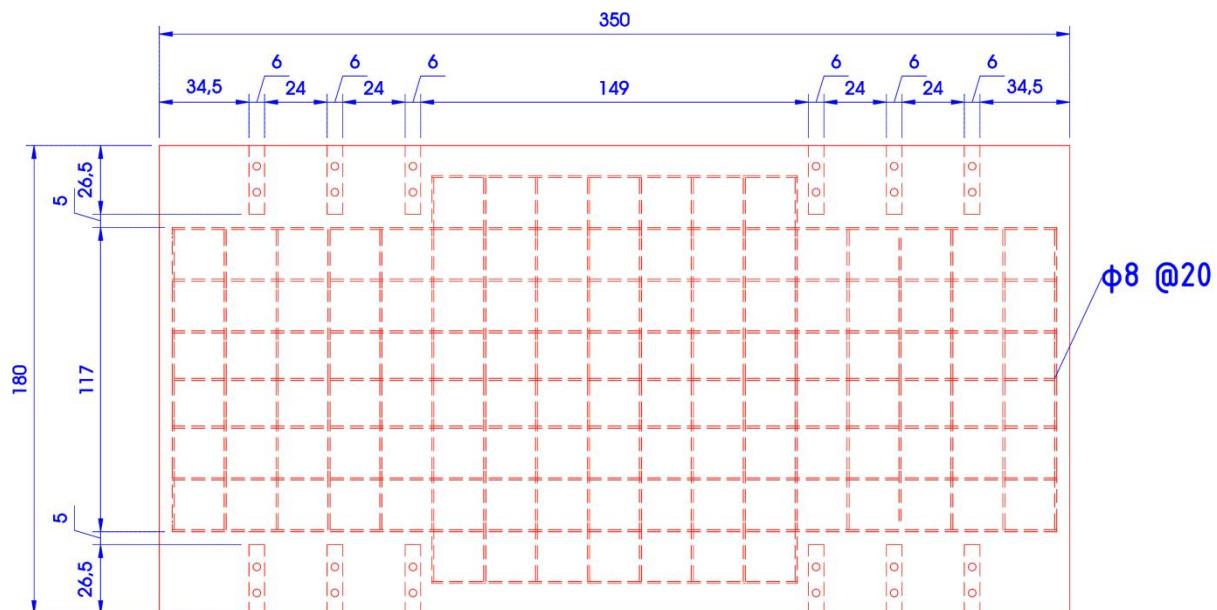


Figura B.2. Armadura panel ranura-ranura.

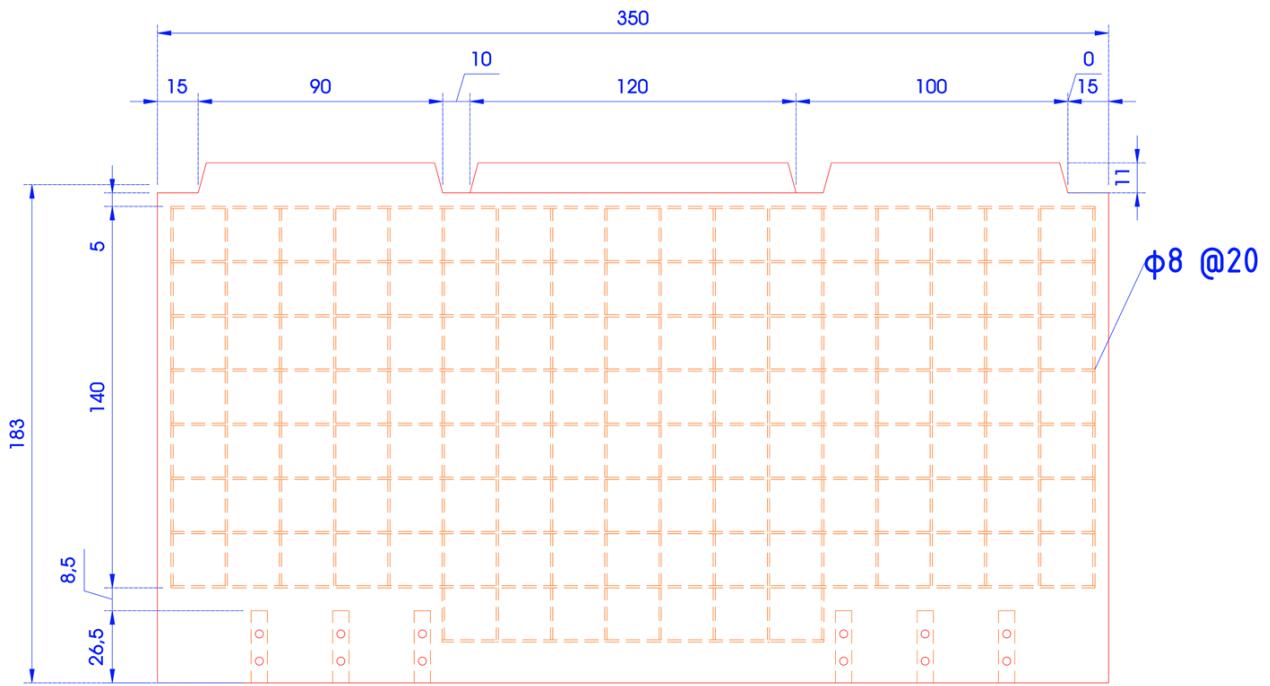


Figura B.3. Armadura panel macho-ranura.

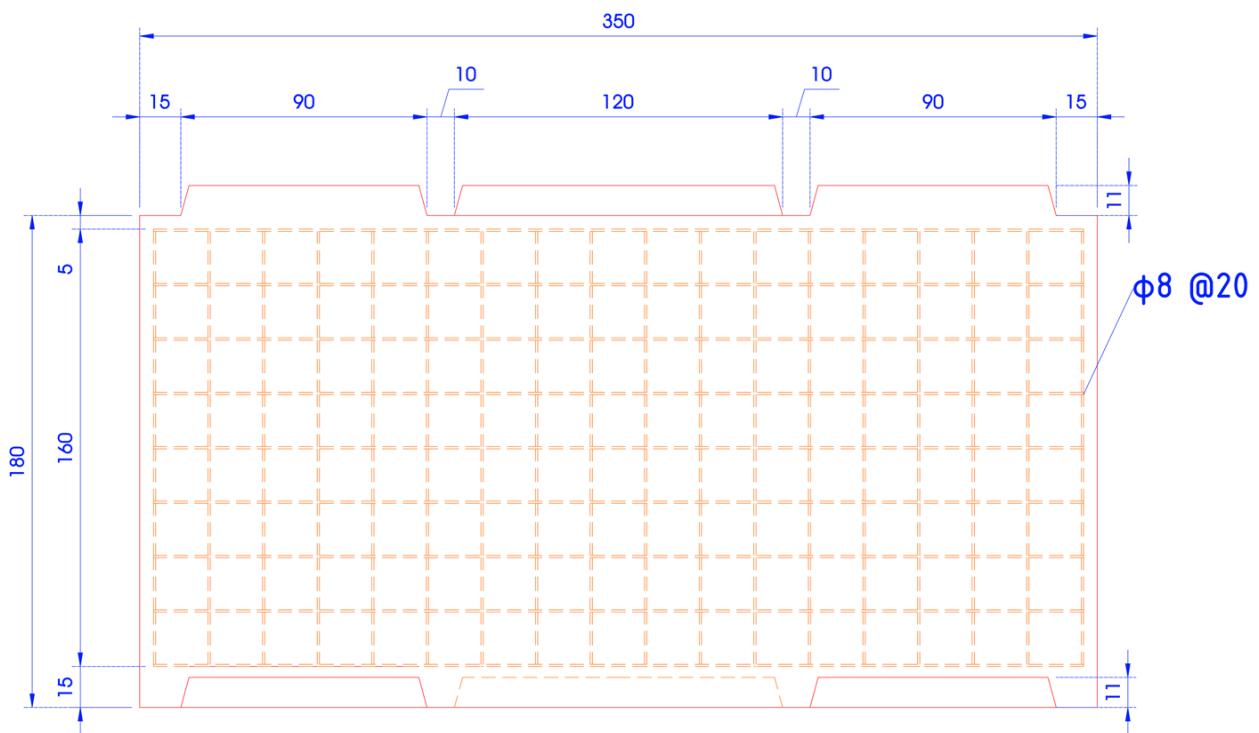


Figura B.4. Armadura panel macho-hembra.

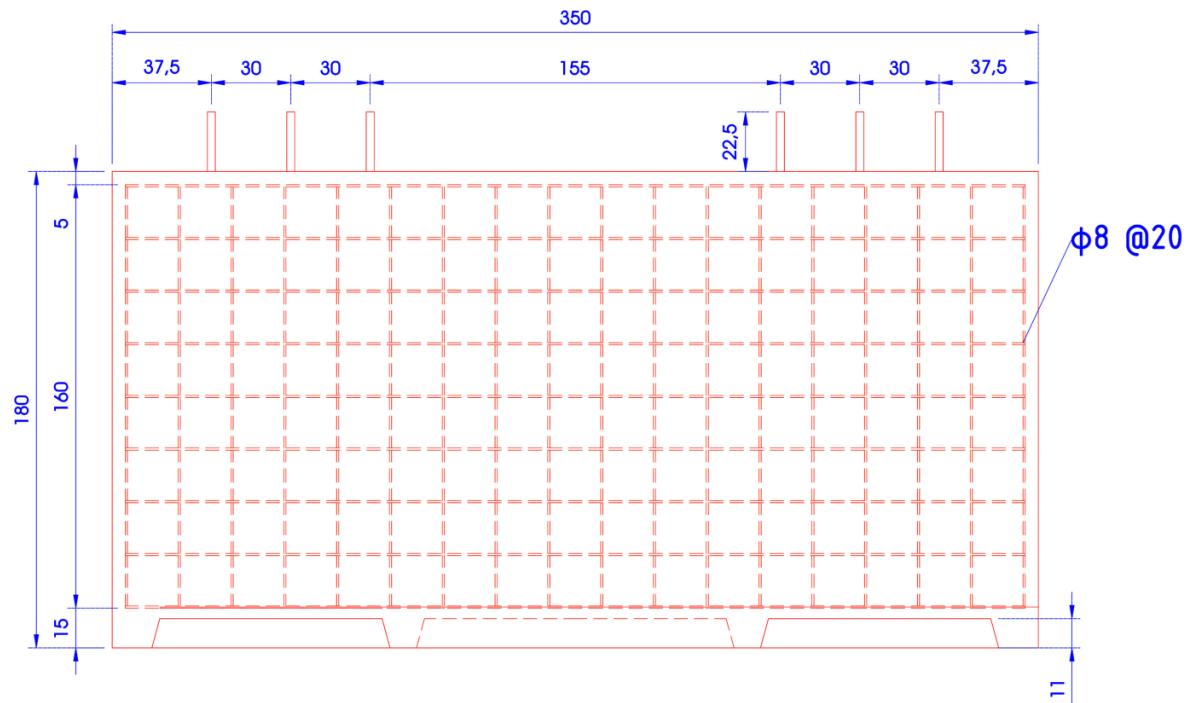


Figura B.5. Armadura panel hembra-barra.

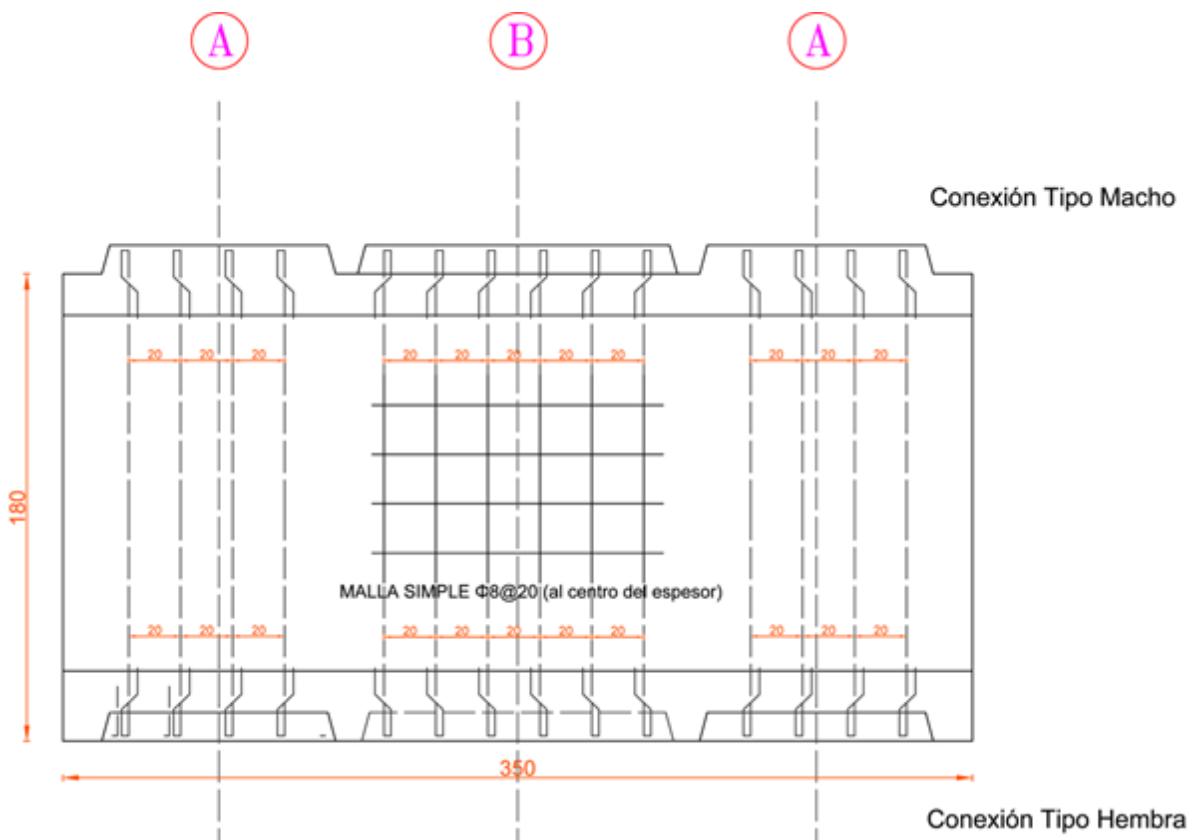


Figura B.6. Armadura dientes conexión tipo macho y ranuras conexión tipo hembra.

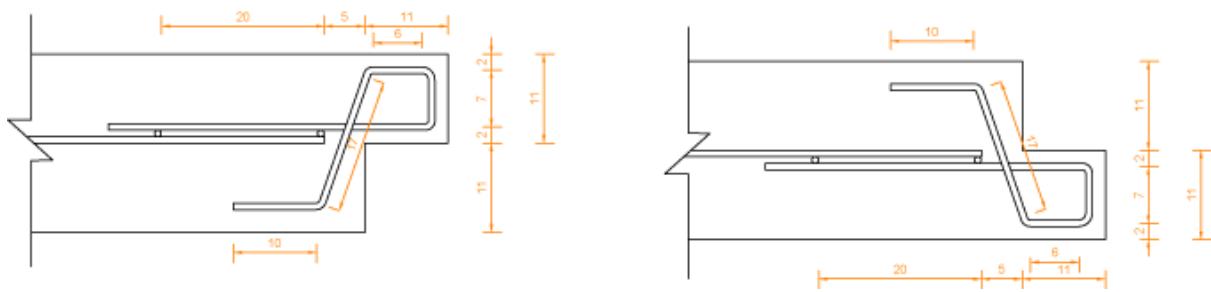


Figura B.7 Izquierda: corte eje A (conexión tipo macho). Derecha: corte eje B (conexión tipo macho).

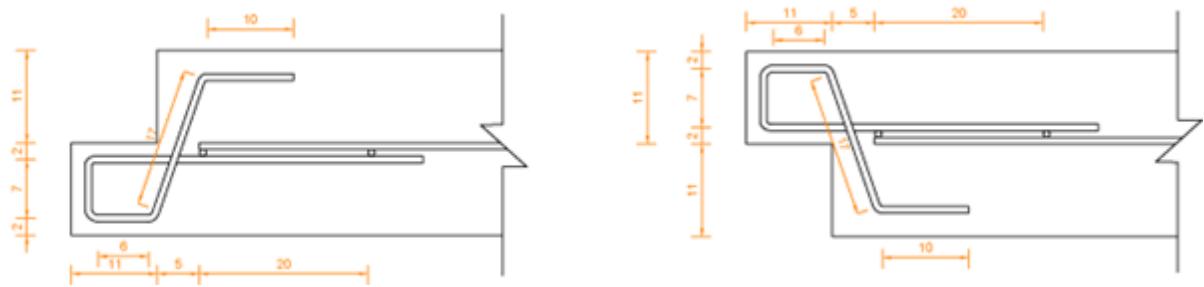


Figura B.8 Izquierda: corte eje A (conexión tipo hembra). Derecha: corte eje B (conexión tipo hembra).

10.3 ANEXO C: Imágenes construcción tramo de prueba y montaje de losas



Figura C.1. Remoción paño de hormigón existente en terreno.



Figura C.2. Excavación tramo de prueba.



Figura C.3. Colocación capa de base estabilizada..



Figura C.4. Compactación base estabilizada.



Figura C.5. Colocación de moldajes para bermas y losas de los extremos.



Figura C.6. Hormigonado de bermas y losas de los extremos.



Figura C.7. Tramo de prueba que albergará las losas prefabricadas.



Figura C.8. Traslado de losas desde IDIEM Cerrillos a Planta de Hormigones Sobarzo.



Figura C.9. Descarga de losas prefabricadas a un costado del tramo de prueba.



Figura C.10. Colación capa de arena sobre base estabilizada.



Figura C.11. Montaje de losas con sistema machihembrado.



Figura C.12. Montaje de losa con sistema barra-ranura.



Figura C.13. Corte de azas para finiquitar el montaje.



Figura C.14. Tramo de prueba con losas instaladas.



Figura C.15. Inyección de grout en ranuras sistemas barra-ranura.



Figura C.16. Terminación de gouteado para posterior apertura del tramo.

10.4 ANEXO D: Informe caracterización base y subbase granular tramo de prueba



FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



INFORME DE ENSAYO DE AUTOCONTROL N° 748.428				
Fecha de Emisión	Miércoles, 03 de Octubre de 2012.	Correlativo Obra N°	01	
Emitido / Elaborado por	IDIEM / Laboratorio Vila del Mar / Unidad Áridos y Suelos / Yenyfer Salinas A.			
Referencia	Área Mecánica de Suelos - Toma de muestras y ensayo físico-mecánico de suelos.			
Empresa Solicitante	UNIVERSIDAD DE CHILE			
Dirección Solicitante	Plaza cercilla N°883, Santiago.			
Destinatario	Daniel Thome.			
Obra	Planta Sobarzo Sección Hormigón.			
Dirección Obra	Plaza cercilla N°883, Santiago.			
EXTRACCIÓN Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS				
8.202.1 (MC Vol.8-2012)(LNV-64)	Agregados pétreos: Método para extraer y preparar muestras.			
8.202.2 (MC Vol.8-12)(LNV-1)	Agregados pétreos: Método para el cuantos de muestras.			
Nº Boleta de Muestreo	4134	Fecha de Muestreo	Viernes, 14 de Septiembre de 2012.	
Nº OT de la Muestra	2546	Muestreado por	IDIEM - Cristian Rojas.	
Lugar de Muestreo	Acopio en Obra.	Responsable ensayos	IDIEM - Jocelyn Solis.	
Identificación Muestra 1	Grava arenosa con limo - Sub-base.	Procedencia	Planta Sobarzo.	
Identificación Muestra 2	Grava con arcilla y arena - Base.	Procedencia	Planta Sobarzo.	
Identificación Muestra 3	-	Procedencia	-	
ENSAYOS				
GRANULOMETRÍA DE SUELOS				
8.102.1 (MC Vol.8-2012) (LNV-105)	Suelos : Método para determinar la granulometría.			
Fecha ensayo		25-sep-12	25-sep-12	-
Sobretamaño (%)		0	0	-
Tamaño máximo absoluto (mm)	40	40	-	-
ASTM (mm)		(% que pasa)		
3"	80	-	-	-
2 1/2"	63	-	-	-
2"	50	-	-	-
1 1/2"	40	100	100	-
1"	25	84	78	-
5/8"	20	74	61	-
3/8"	10	58	45	-
Nº 4	5	49	37	-
Nº 10	2	41	32	-
Nº 40	0,5	28	21	-
Nº 200	0,08	12	12	-



INFORME DE ENSAYO DE AUTOCONTROL N° 748.428

ENSAYOS	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	Especificación(*)
LIMITES DE CONSISTENCIA				
NCh1517/1.OH1979 Mecánica de suelos - Límites de consistencia Parte I: Determinación del límite líquido. NCh1517/2.OH1979 Mecánica de suelos - Límites de consistencia Parte II: Determinación del límite plástico.				
Fecha ensayo	26-sep-12	26-sep-12	-	-
Límite Líquido (%)	Indeterminable.	19	-	-
Acanalador	ASTM	ASTM	-	-
Método	Mecánico	Mecánico	-	-
Límite Plástico (%)	Indeterminable.	14	-	-
Índice de plasticidad (%)	No Plástico	5	-	-
CLASIFICACIÓN USCS				
ASTM D 2487-06 Standard classification of soil for engineering purposes (USCS).				
Símbolo de grupo	s(GP - GM)	(GW - GC)s	-	-
Descripción	Grava pobremente graduada arenosa con limo.	Grava bien graduada con arcilla y arena.	-	-
DENSIDAD DE PARCÍCULAS SÓLIDAS				
NCh1532.OH1980 Mecánica de suelos - Determinación de la densidad de partículas sólidas.				
Fecha ensayo	26-sep-12	26-sep-12	-	-
Densidad de partículas sólidas (g/cm³)	2,737	2,755	-	-
PROCTOR MODIFICADO				
NCh1536/2.OH1979 Mecánica de suelos - Relaciones humedad/tensión - Parte 2: Métodos de compactación con plato de 4,5 kg y 400 mm de caída.				
Fecha ensayo	27-sep-12	27-sep-12	-	-
Método	D	D	-	-
Humedad óptima (%)	5,7	5,6	-	-
Densidad seca máxima (g/cm³)	2,283	2,258	-	-
Material retenido en 20 mm (%)	26	39	-	-
Reemplazo (%)	26	39	-	-
Descarte (%)	0	0	-	-



INFORME DE ENSAYO DE AUTOCONTROL N° 748.428

ENSAYOS	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	Especificación(*)
RAZÓN DE SOPORTE DE SUELOS (CBR)				
NCh1852.OI1981 Mecánica de suelos - Determinación de la razón de soporte de suelos compactados en laboratorio.				
Fecha ensayo	28-sep-12	28-sep-12	-	-
Método	D	D	-	-
Inmersión	Si	Si	-	-
Nº de Golpes	56	25	10	-
Humedad antes de la compactación (%)	5,3	5,1	5,3	-
Humedad después de la compactación (%)	5,1	4,9	4,7	-
Capa superior Humedad a 25 mm después de inmersión (%)	5,9	6,2	7,3	-
Humedad promedio después de la inmersión (%)	5,6	5,9	6,1	-
Densidad seca antes de la inmersión (g/cm³)	2,30	2,22	2,12	-
Densidad seca después de la inmersión (g/cm³)	2,29	2,22	2,12	-
Sobregarga (kg)	5,1	5,1	5,1	-
Porcentaje de Expansión, al 95% de Densidad máxima seca compactada (%)	0,1	0,0	-	-
Porcentaje de CBR, al 95% de Densidad máxima seca compactada, para 0,2" de penetración (%)	80	71	-	-

Notas: (*) Especificaciones proporcionadas por solicitante, documento N° -.

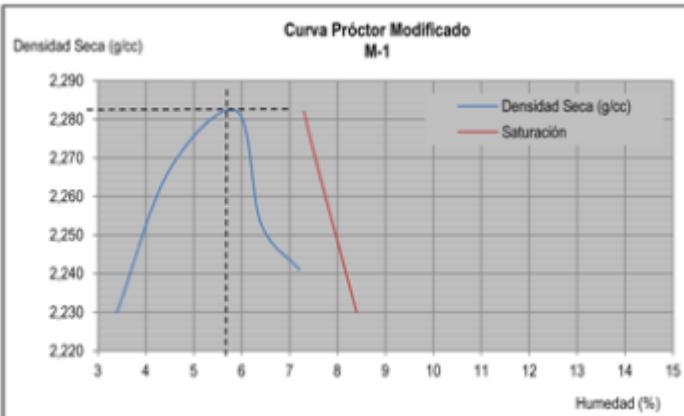
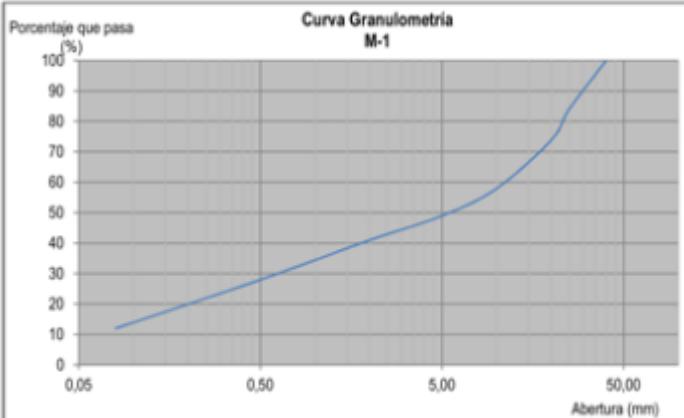
Observaciones: Sin observaciones

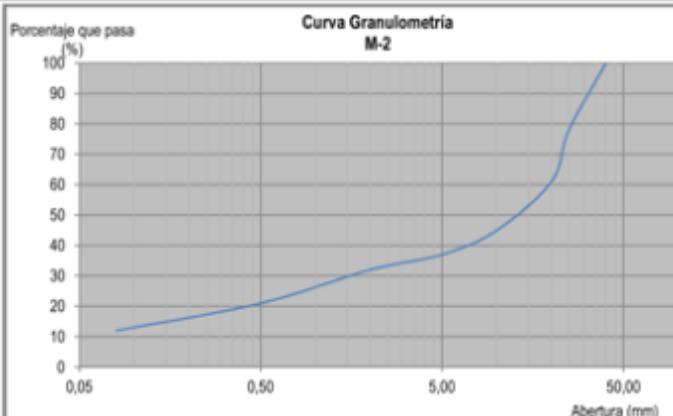
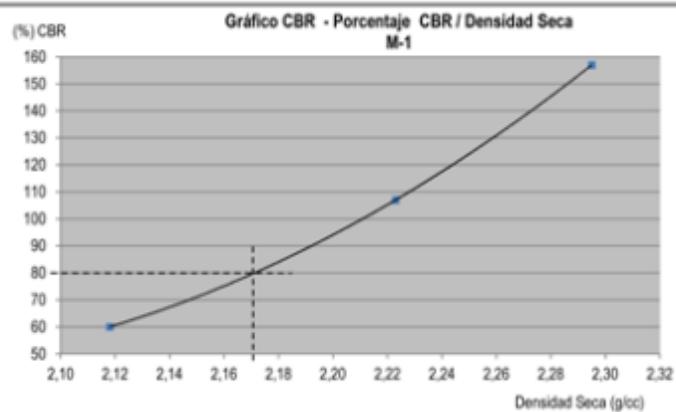



Jocelyn Solis González
 Jefe de Sala Unidad Áridos y Suelos
 IDIEM - Universidad de Chile



Cesar Cabrera Olivares
 Jefe Unidad Áridos y Suelos
 IDIEM - Universidad de Chile

INFORME DE ENSAYO DE AUTOCONTROL N° 748.428**ANEXO N°1 - GRÁFICOS**

INFORME DE ENSAYO DE AUTOCONTROL N° 748.428**ANEXO N°1 - GRÁFICOS**

**fcfm**FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE**INN - CHILE**
SISTEMA NACIONAL
DE ACREDITACIÓN
Acreditación LE 850**ldiem**
UN SÍGLO DE CONFIANZA Y RESPALDO**INFORME DE ENSAYO DE AUTOCONTROL N° 748.428****ANEXO N°1 - GRÁFICOS**