

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESPESORES DE LOSAS DE CONCRETO PARA
TRONCALES DE TRANSMILENIO CON CONFIGURACIONES ALTERNATIVAS
DE EJES DE BUSES ARTICULADOS**

**BERNARDO JEREMÍAS SALAS RODRÍGUEZ
LARRY ALEXANDER DURÁN BONILLA**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA
BOGOTÁ D.C.
2017**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESPESORES DE LOSAS DE CONCRETO PARA
TRONCALES DE TRANSMILENIO CON CONFIGURACIONES ALTERNATIVAS
DE EJES DE BUSES ARTICULADOS**

**BERNARDO JEREMÍAS SALAS RODRÍGUEZ
LARRY ALEXANDER DURÁN BONILLA**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
JUAN MIGUEL SÁNCHEZ DURÁN
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA
BOGOTÁ D.C.
2017**

Nota de aceptación

Director de Investigación
Ing. Juan Miguel Sánchez Durán

Jurado

Jurado

Bogotá D.C., 6 de julio de 2017

Antes que todo quisiera agradecer a DIOS por permitirme alcanzar una meta más en mi vida y por guiar mi camino.

También quiero agradecer infinitamente a mis padres: Jeremías Salas e Hilda María Rodríguez, a mis hermanos y demás familiares, incluso aquellos que siempre desearon verme alcanzar esta meta, pero que hoy lastimosamente ya no están con nosotros. Gracias a todos ustedes, son mi más grande apoyo e inspiración para cada día ser alguien mejor.

Un agradecimiento especial al Ing. Juan Miguel Sánchez Durán quien amablemente estuvo brindándome su apoyo y colaboración en la elaboración de este trabajo.

Bernardo Jeremías Salas Rodríguez

Este proyecto se lo quiero dedicar especialmente a DIOS. Con su ayuda he logrado llegar donde me he propuesto, él ha sido quién me ha guiado y quién me ha abierto caminos.

Quiero agradecer a mis padres, Miryam Bonilla Sachica y Marcel Durán Gamba, quienes no dejaron de creer en mí, apoyarme, aconsejarme, motivarme y guiarme hasta la culminación de esta etapa de mi vida.

Y al ingeniero Juan Miguel Sanchez Durán, quien compartió sus conocimientos con nosotros y nos acompañó brindándonos su sabiduría en este proyecto.

Gracias totales.

Larry Alexander Durán Bonilla

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto expresan sus agradecimientos a:

A Dios, Quien nos guio y permitió alcanzar una meta más en sus vidas.

Sus padres, hermanos y familiares de los cuales fueron un constante apoyo en todo este proceso.

Sus amigos, compañeros y docentes que siempre estuvieron dispuestos a brindarles de algún modo su apoyo.

Al Ing. Juan Miguel Sanchez Durán, que siempre estuvo dispuesto a colaborarnos y a compartir sus conocimientos con el fin de sacar adelante este proyecto.

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
GLOSARIO.....	2
INTRODUCCION.....	5
1. OBJETIVOS.....	6
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	6
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. METODO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS RIGIDOS DE LA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA).....	7
2.1.1. Consideraciones básicas del diseño.....	7
2.1.2. Procedimiento de diseño.....	10
2.1.3. Programa BS-PCA.....	15
2.2. ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	15
2.2.1. Esfuerzos por alabeo.....	15
2.2.2. Esfuerzos y deflexiones debidos a las cargas externas.....	20
2.2.3. Esfuerzos debidos a la fricción.....	26
2.3. DISEÑO PAVIMENTOS RÍGIDOS METODOLOGÍA DE AUSTRROADS.....	28
2.3.1. Factores utilizados en la determinación del espesor de la losa de concreto.....	28
2.3.1.2. Resistencia del hormigón para las losas de concreto.....	29
2.3.1.3. Diseño de tráfico.....	29
2.3.2. Diseño de espesor de la losa.....	29
2.4. PROGRAMA EVERFE 2.24.....	33
2.4.1. Geometría.....	33
2.4.2. Material.....	34
2.4.3. Carga.....	34
2.4.4. Pasadores de transferencia de carga.....	35
2.5. Correlaciones entre el módulo de reacción ($K_{\text{COMBINADO}}$) y el CBR.....	36
3. METODOLOGIA.....	39
3.1. RECOLECCIÓN DE DATOS, METODOS Y PROGRAMAS.....	39
3.1.1. Datos.....	39

3.1.2. Métodos	40
3.1.3. Programas.....	40
3.2. CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE REACCIÓN ($K_{COMBINADO}$) Y EL CBR. 41	
3.3. CARGAS POR EJE	41
3.4. CONFIGURACIONES PROPUESTAS PARA LOS GRUPOS DE EJES..	41
3.4.1. Configuración bus actual.....	41
3.4.2. Configuración 1	42
3.4.3. Configuración 2	43
3.4.4. Configuración 3	43
3.4.5. Configuración 4	44
3.5. MODELACION DE LAS ESTRUCTURAS METODOLOGIA PCA	44
3.6. ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS POR METODOLOGÍA DE AUSTROADS.....	46
3.7. COMPARACIÓN DE RESULTADOS METODOLOGÍA PCA CON LA METODOLOGÍA DE AUSTROADS	48
3.8. MODELACION DE LAS ESTRUCTURAS POR EL PROGRAMA EVERFE 2.24	49
3.8.1. Análisis de esfuerzos y deflexiones máximas según posición del eje	50
4. RESULTADOS Y ANALISIS	51
4.1. CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE REACCIÓN ($K_{COMBINADO}$) Y EL CBR 51	
4.2. ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS POR LA METODOLOGÍA DE LA PCA. 53	
4.3. ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS POR METODOLOGÍA DE AUSTROADS.....	55
4.3.1. Dimensionamiento de losas de concreto.....	55
4.3.2. Dimensionamiento por fatiga.....	58
4.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS METODOLOGÍA PCA CON LA METODOLOGÍA DE AUSTROADS	60
4.5. MODELACION DE LAS ESTRUCTURAS POR EL PROGRAMA EVERFE 2.24	62
4.5.1. Análisis de esfuerzos y deflexiones máximas según posición del eje	62
4.5.2. Reducción de los esfuerzos y disminución de las deflexiones con y sin berma. 64	

4.5.3. Reducción de los esfuerzos y disminución de las deflexiones con y sin pasadores.....	70
4.5.4. Comparación de daños por eje	77
5. CONCLUSIONES	80
6. BIBLIOGRAFIA.....	81

LITA DE TABAS

Tabla 1. Efecto de la subbase granular sobre los valores de K	8
Tabla 2. Efecto de la subbase tratada con cemento sobre los valores de K.....	8
Tabla 3. Coeficientes para predicción de esfuerzos equivalentes.	31
Tabla 4. Coeficientes para la predicción de erosión sin pasadores	32
Tabla 5. Coeficientes para la predicción de erosión con pasadores	32
Tabla 6 Relación entre la clasificación del suelo y los valores de CBR y K	37
Tabla 7 Datos sobre dimensionamiento de las losas de pavimento rigido de las troncales de TransMilenio	39
Tabla 8. Parámetros de modelación metodología de la PCA.....	45
Tabla 9. Parámetros para la metodología de Austroads.....	47
Tabla 10. Parámetros para la comparación.	48
Tabla 11. Geometría y materiales de la losa.	49
Tabla 12. Especificaciones de las dovelas	49
Tabla 13. Geometría de cada tipo de eje.....	49
Tabla 14 tendencia de correlación entre CBR Y $K_{COMBINADO}$	51
Tabla 15 correlación CBR y $K_{COMBINADO}$ metodología de la PCA	51
Tabla 16 correlación CBR y $K_{COMBINADO}$ formulas	51
Tabla 17 correlación CBR y $K_{COMBINADO}$ graficas O'flaherty	52
Tabla 18. Espesores hallados por troncal con configuraciones de eje.	53
Tabla 19. Espesores actuales por troncal con configuración por grupo de ejes. ...	53
Tabla 20. Comparación de espesores hallados con espesores actuales por troncal.	53
Tabla 21. Porcentaje de disminución de espesores losa actual versus calculadas.	54
Tabla 22. Espesores calculados.	55
Tabla 23. Espesores de losas actuales versus espesores calculados según configuración de grupos de ejes.	56
Tabla 24. Espesores calculados.	58

Tabla 25. Espesores de losas actuales versus espesores calculados según configuración de grupos de ejes.	59
Tabla 26. Esfuerzos equivalentes y factores de erosión por metodología de Austroads.....	60
Tabla 27. Esfuerzos equivalentes y factores de erosión por metodología PCA.	61
Tabla 28. Espesores de losas actuales versus espesores calculados según configuración de grupos de ejes.	61
Tabla 29. Esfuerzos y deflexiones máximas sin berma	62
Tabla 30. Esfuerzos y deflexiones máximas con berma	62
Tabla 31. Esfuerzos producidos por Eje Simple de Llanta sencilla.....	64
Tabla 32. Esfuerzos producidos por Eje Doble de Llanta sencilla.	65
Tabla 33. Esfuerzos producidos por Eje Tándem de Llanta sencilla.....	65
Tabla 34. Esfuerzos producidos por Eje Tándem de Llanta Doble.	65
Tabla 35. Porcentaje de esfuerzos producidos por Eje Simple de Llanta Sencilla.	66
Tabla 36. Porcentaje de esfuerzos producidos por Eje Simple de Llanta Doble....	66
Tabla 37. Porcentaje de esfuerzos producidos por Eje Tándem de Llanta Sencilla.	66
Tabla 38. Porcentaje de esfuerzos producidos por Eje Tándem de Llanta Doble.	67
Tabla 39. Deflexiones producidos por Eje Simple de Llanta Sencilla.	68
Tabla 40. Deflexiones producidos por Eje Simple de Llanta Doble.....	68
Tabla 41. Deflexiones producidos por Eje Tándem de Llanta Sencilla.	68
Tabla 42. Deflexiones producidos por Eje Tándem de Llanta Doble.	68
Tabla 43. Porcentaje de deflexiones producidos por Eje Simple de Llanta Sencilla.	69
Tabla 44. Porcentaje de deflexiones producidos por Eje Simple de Llanta Doble.	69
Tabla 45. Porcentaje de deflexiones producidos por Eje Tándem de Llanta Sencilla.	69
Tabla 46. Porcentaje de deflexiones producidos por Eje Tándem de Llanta Doble.	69
Tabla 47. Esfuerzos producidos por Eje Simple de Llanta Sencilla.	71

Tabla 48. Esfuerzos producidos por Eje Doble de Llanta Sencilla.....	71
Tabla 49. Esfuerzos producidos por Eje Tándem de Llanta Sencilla.	71
Tabla 50. Esfuerzos producidos por Eje Tándem de Llanta Doble.	72
Tabla 51. Porcentaje de esfuerzos producidos por Eje Simple de Llanta Sencilla.	72
Tabla 52. Porcentaje de esfuerzos producidos por Eje Simple de Llanta Doble....	73
Tabla 53. Porcentaje de esfuerzos producidos por Eje Tándem de Llanta Sencilla.	73
Tabla 54. Porcentaje de esfuerzos producidos por Eje Tándem de Llanta Doble.	73
Tabla 55. Deflexiones producidos por Eje Simple de Llanta Sencilla.	74
Tabla 56. Deflexiones producidos por Eje Simple de Llanta Doble.....	75
Tabla 57. Deflexiones producidos por Eje Tándem de Llanta Sencilla.	75
Tabla 58. Deflexiones producidos por Eje Tándem de Llanta Doble.	75
Tabla 59. Porcentaje de deflexiones producidos por Eje Simple de Llanta Sencilla.	76
Tabla 60. Porcentaje de deflexiones producidos por Eje Simple de Llanta Doble.	76
Tabla 61. Porcentaje de deflexiones producidos por Eje Tándem de Llanta Sencilla	76
Tabla 62. Porcentaje de deflexiones producidos por Eje Tándem de Llanta Doble.	76
Tabla 63. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads (configuración bus actual).	105
Tabla 64. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads (configuración 1).....	105
Tabla 65. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads (configuración 2).....	106
Tabla 66. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads (configuración 3).....	106
Tabla 67. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads (configuración 4).....	107

Tabla 68. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads (configuración bus actual).....	107
Tabla 69. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads (configuración 1).....	108
Tabla 70. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads (configuración 2).....	108
Tabla 71. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads (configuración 3).....	109
Tabla 72. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads (configuración 4).....	109
Tabla 73. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads (configuración bus actual).....	110
Tabla 74. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads (configuración 1).....	110
Tabla 75. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads (configuración 2).....	111
Tabla 76 . Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads (configuración 3).....	111
Tabla 77. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads (configuración 4).....	112
Tabla 78. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads (configuración bus actual).....	112
Tabla 79. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads (configuración 1).....	113
Tabla 80. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads (configuración 2).....	113
Tabla 81. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads (configuración 3).....	114
Tabla 82. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads (configuración 4).....	114

Tabla 83. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración bus actual).....	115
Tabla 84. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 1).	115
Tabla 85. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 2).	116
Tabla 86. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 3).	116
Tabla 87. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 4)	117
Tabla 88. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración bus actual).	117
Tabla 89. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 1).....	118
Tabla 90. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 2).....	118
Tabla 91. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 3).....	119
Tabla 92. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 4).....	119
Tabla 93. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración bus actual).....	120
Tabla 94. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 1).	120
Tabla 95. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 2).	121
Tabla 96. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 3).	121
Tabla 97. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 4).	122

Tabla 98. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración bus actual).....	122
Tabla 99. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 1).	123
Tabla 100. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 2).....	123
Tabla 101. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 3).....	124
Tabla 102. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 4).....	124

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Análisis de fatiga: Repeticiones admisibles en función de la relación de esfuerzos en pavimentos con y sin berma de concreto.	12
Gráfica 2. Análisis de erosión sin berma de concreto. Repeticiones admisibles en función del factor de erosión en pavimentos sin berma de concreto.	13
Gráfica 3. Análisis de erosión con berma de concreto. Repeticiones admisibles en función del factor de erosión en pavimentos con berma de concreto.	14
Gráfica 4. Factor de corrección de esfuerzos para losas finitas.....	20
Gráfica 5. Relación entre el CBR y el módulo de reacción de la subrasante.....	38
Gráfica 6 comparación entre las correlaciones.....	52
Gráfica 7. Comparación de espesores de losa de pavimento rígido según configuración de grupos de ejes por troncal.	54
Gráfica 8. Comparación de espesores de losa de pavimento rígido según configuración de grupos de ejes.	57
Gráfica 9. Comparación de espesores de losa de pavimento rígido según configuración de grupos de ejes.	59
Gráfica 10 Esfuerzos máximos versus posición del eje.	63
Gráfica 11. Deflexiones máximas versus posición del eje.	63
Gráfica 12. Análisis de daño según esfuerzos por tipo de eje.	78
Gráfica 13. Análisis de daño según esfuerzos por tipo de eje.	78

LISTA DE IMAGENES

Imagen 1. Alabeo por temperatura.	16
Imagen 2. Gradiente de temperatura en la losa de concreto	17
Imagen 3. Losa finita.....	18
Imagen 4. Losa sujeta a una carga en la esquina.....	21
Imagen 5. Método para convertir un sistema doble a un área circular.....	26
Imagen 6. Esfuerzos debidos a la fricción.	27
Imagen 7. Panel geometría EverFE 2.24.....	33
Imagen 8. Panel material EverFE 2.24.	34
Imagen 9. Panel material EverFE 2.24.	35
Imagen 10. Panel material EverFE 2.24.	36
Imagen 11. Configuración bus actual.....	42
Imagen 12. Configuración 1.....	42
Imagen 13. Configuración 2.....	43
Imagen 14. Configuración 3.....	43
Imagen 15. Configuración 4.....	44
Imagen 16. Pantalla principal BS-PCA	45
Imagen 17. Posición del eje sobre el conjunto de losas.	50
Imagen 18. Cálculos de troncal Américas, metodología de la PCA. Programa BS-PCA (eje direccional: simple, eje intermedio: simple, eje trasero: tándem).	101
Imagen 19. Cálculos de troncal Américas, metodología de la PCA. Programa BS-PCA (eje direccional: simple, eje intermedio: tándem, eje trasero: tándem).....	101
Imagen 20. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de la PCA. Programa BS-PCA (eje direccional: simple, eje intermedio: simple, eje trasero: tándem). ..	102
Imagen 21. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de la PCA. Programa BS-PCA (eje direccional: simple, eje intermedio: tándem, eje trasero: tándem). .	102
Imagen 22. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de la PCA. Programa BS-PCA (eje direccional: simple, eje intermedio: simple, eje trasero: tándem).	103

Imagen 23. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de la PCA. Programa BS-PCA (eje direccional: simple, eje intermedio: tándem, eje trasero: tándem)103

Imagen 24. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de la PCA. Programa BS-PCA (eje direccional: simple, eje intermedio: sencillo, eje trasero: tándem). .104

Imagen 25. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de la PCA. Programa BS-PCA (eje direccional: simple, eje intermedio: tándem, eje trasero: tándem). .104

LISTA DE FUENTES

Fuente 1. : PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p. 6.a...8	
Fuente 2. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p. 6.....8	
Fuente 3. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p. 15..12	
Fuente 4. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p. 17..13	
Fuente 5. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p. 19..14	
Fuente 6. HUANG. Yang H. Pavement analysis and desing. University of Kentucky. Second edition. University of Kentucky Prentice Hall. New Jersey, 2004. P. 148.16	16
Fuente 7. HUANG. Yang H. Pavement analysis and desing. University of Kentucky. Second edition. University of Kentucky Prentice Hall. New Jersey, 2004. P. 149.17	17
Fuente 8. HUANG. Yang H. Pavement analysis and desing. University of Kentucky. Second edition. University of Kentucky Prentice Hall. New Jersey, 2004. P. 150.20	20
Fuente 9. HUANG. Yang H. Pavement analysis and desing. University of Kentucky. Second edition. University of Kentucky Prentice Hall. New Jersey, 2004. P. 154.21	21
Fuente 10. HUANG. Yang H. Pavement analysis and desing. University of Kentucky. Second edition. University of Kentucky Prentice Hall. New Jersey, 2004. P. 159.26	26

Fuente 11. HUANG. Yang H. Pavement analysis and desing. University of Kentucky. Second edition. University of Kentucky Prentice Hall. New Jersey, 2004. P. 166	27
Fuente 12. AUSTROADS. Guide to paviment technology. 2a ED, Sidney Australia. 2012, p. 136.....	31
Fuente 13. AUSTROADS. Guide to paviment technology. 2a ED, Sydney Australia. 2012, p. 136.....	32
Fuente 14. AUSTROADS. Guide to paviments technology. 2a ED, Sídney Australia. 2012, p. 137.....	32
Fuente 15. Programa EverFE 2.24.....	33
Fuente 16. Programa EverFE 2.24.....	34
Fuente 17. Programa EverFE 2.24.....	35
Fuente 18. Programa EverFE 2.24.....	36
Fuente 19. INVIAS. Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. ICPC. Colombia, 2008. P. 77.....	37
Fuente 20. HIGUERA, Carlos Hernando. Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. 1a ED. COLOMBIA: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2010, p 150.....	38
Fuente 21. Autoría propia.....	42
Fuente 22. Autoría propia.....	42
Fuente 23. Autoría propia.....	43
Fuente 24. Autoría propia.....	43
Fuente 25. Autoría propia.....	44
Fuente 26. Programa EverFE 2.24.....	45
Fuente 27. Autoría propia.....	50
Fuente 28. Programa BS-PCA.....	101
Fuente 29. Programa BS-PCA.....	101
Fuente 30. Programa BS-PCA.....	102
Fuente 31. Programa BS-PCA.....	102
Fuente 32. Programa BS-PCA.....	103

Fuente 33. Programa BS-PCA.....103
Fuente 34. Programa BS-PCA.....104
Fuente 35. Programa BS-PCA.....104

RESUMEN

Este trabajo consiste en un análisis comparativo de los esfuerzos producidos por los buses articulados de TransMilenio con la configuración de ejes existente y buses articulados de TransMilenio con una nueva configuración de ejes propuestos en este proyecto de grado,

El proyecto permite realizar unos análisis de los esfuerzos y deflexiones producidos por los buses articulados de TransMilenio con una configuración actual de ejes simples con una nueva configuración de ejes simples y tándem propuesto, las cuales son las que actúan sobre las losas de pavimento rígido de las troncales.

Comparar el análisis obtenido de cada modelación con cada una de las configuraciones reales y propuestas, verificando sus espesores y durabilidad.

GLOSARIO

PAVIMENTO: Un pavimento se puede considerar como una estructura, constituida por varias capas de materiales seleccionados, diseñada y construida técnicamente con el objeto de brindar el tránsito de vehículos de una manera rápida, cómoda, segura, eficiente y económica.

MÓDULO ROTURA: Resistencia o esfuerzo máximo a la flexión en la fibra cuando se produce el fallo en la losa de concreto. Se determina por medio de un ensayo de laboratorio.

PAVIMENTOS RÍGIDO: Estructura conformada por una losa de hormigón o concreto, se caracteriza por ser más resistente que el pavimento flexible, transmitir en forma directa el esfuerzo al suelo. Esta puede estar construida sobre la capa natural del suelo directamente ya que su resistencia es alta.

TRÁNSITO: Está conformado por una mezcla de vehículos de distinta forma geométrica, composición y variada configuración de ejes, que se mueven a lo largo de una vía con distintas velocidades y peso, aplicando sobre la estructura de pavimento cargas transitorias y dinámicas que le inducen diferentes tipos de esfuerzos y deformaciones.

ESPECIFICACIONES: Documentos en los cuales se definen las normas, exigencias y procedimientos a ser empleados y aplicados.

INGENIERÍA CIVIL: es la rama de la ingeniería que aplica los conocimientos de: matemáticas, física, química, entre otras para la elaboración de infraestructuras de cualquier tipo. Se dice que tiene sus orígenes en la ingeniería militar.

BASE GRANULAR: Su función principal es resistir los esfuerzos inducidos por los vehículos y dar un soporte homogéneo a la carpeta de rodadura, transmitiendo a las capas inferiores que las soportan (sub-base y sub-rasante) una mínima porción de la carga. Es una capa semirrígida, que puede ser granular, granular estabilizada o asfáltica.

SUBBASE GRANULAR: Se construye con materiales más económicos que las dos anteriores para que, a su turno, los espesores de las dos capas anteriores sean menores. También homogeniza la transferencia de carga a la subrasante.

SUBRASANTE: La subrasante es la parte de la corteza terrestre que sirve de cimiento a una estructura del pavimento. La subrasante comprende por lo general los últimos 50 cm del relleno o el corte proveniente del movimiento de tierras, que sirve de soporte a una estructura de pavimento.

TPD: También conocido por Transito Promedio Diario, es la cantidad de vehículos que pasan en una calzada en un día. Está compuesto por buses, camiones y autos.

IDU: Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá, entidad pública descentralizada, destinada a ejecutar obras viales y de espacio público para el desarrollo urbano de Bogotá D.C.

K_{COMBINADO}: Módulo de reacción del suelo que corresponde a la capacidad portante que tiene el terreno natural en donde se soportará la estructura de pavimento.

CBR: Es un índice que permite medir la capacidad de carga o resistencia de los suelos al momento de aplicarle una carga, es medido mediante un ensayo de laboratorio que consiste en medir el esfuerzo necesario para hacer penetrar un pistón en una muestra de suelo.

PASADOR: También conocido como dovelas, son varillas o barras de acero cortas y lisas con el fin de transferir la carga entre las losas, su límite de fluencia (f_y) mínimo de 280 MPa (2800 kg/cm² o 60000 psi).

BERMA: Estructura de confinamiento longitudinal de concreto o asfalto ubicado al borde la losa, que le aporta apoyo al pavimento logrando una reducción de esfuerzos y deflexiones en este.

JUNTA: Es una parte vital de los pavimentos de concreto hidráulico ya que tienen la función de controlar los esfuerzos que se dan en la losa como resultado de la circulación del tráfico sobre esta, generando esfuerzos de contracción y de

dilatación del material, o por agentes externos a las cargas como lo son los cambios de temperatura y humedad, entre la cara superficial y la de soporte.

EJE: Hacen parte de mecanismo del vehículo; se encarga de tener unidas las ruedas entre sí y estas al chasis del mismo. En los buses tradicionales las ruedas son la única parte que toca el suelo y los ejes deben soportar el peso del vehículo y su carga adicional. Los ejes deben cumplir una de las siguientes funciones dependiendo del diseño del vehículo: transmisión, freno y guía.

SAST: En inglés de Single Axles Single Tires son las siglas utilizadas por la metodología Austroads, que en español traduce que es un Eje Simple de Llanta Simple.

SADT: En inglés de Single Axles Dual Tires son las siglas utilizadas por la metodología Austroads, que en español traduce que es un Eje Simple de Llanta Doble.

TAST: En inglés de Tandem Axles Single Tires son las siglas utilizadas por la metodología Austroads, que en español traduce que es un Eje Tándem de Llanta Simple.

TADT: En inglés de Tandem Axles Dual Tires son las siglas utilizadas por la metodología Austroads, que en español traduce que es un Eje Tándem de Llanta Doble.

INTRODUCCION

El siguiente trabajo se enfoca en la modelación de las losas rígidas de TransMilenio (TM), cambiando la configuración de los buses articulados y colocando las cargas reglamentarias. Este proyecto busca realizar dimensionamientos de las losas del sistema de transporte masivo TransMilenio proponiendo configuraciones de ejes para los buses articulados.

Teniendo en cuenta que el objetivo es un dimensionamiento y análisis comparativo de las losas de TransMilenio que se realizará cambiando la configuración de los ejes simples a tándem con las cargas reglamentarias, con lo cual se espera obtener dimensiones menores a las existentes, esto basándose en la teoría que dice que los ejes simples a comparación de los ejes tándem causan mayores daños en los pavimentos.

La investigación realizada en este proyecto es con un interés académico, para rebatir los planteamientos teóricos de algunos autores sobre temas relacionados con los efectos causados por los esfuerzos producidos por las cargas en los pavimentos rígidos, evitando sobredimensionamiento de las losas de pavimento rígido.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Dimensionar por diferentes metodologías y analizar comparativamente los espesores de losas de concreto hidráulico requeridos para los carriles de uso exclusivo del Sistema de Transporte Masivo TransMilenio, cambiando la configuración de ejes simples a ejes tándem.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Análisis de esfuerzos y deflexiones producidos por las cargas que representan los buses de TransMilenio de eje simple contra los buses con eje tándem.
- Comparación de cada diseño de pavimento rígido dependiente de la variación de configuración de los ejes, para la definición de una modelación adecuada.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. METODO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS RIGIDOS DE LA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA)

El método fue inicialmente publicado en 1966, sin embargo, con el fin de considerar otros aspectos de relevancia en el diseño, en 1984 se presentó una nueva versión para el diseño de espesores de pavimentos e concreto para carreteras y calles.¹

2.1.1. Consideraciones básicas del diseño

El procedimiento de diseño de la PCA incluye los siguientes aspectos:

- a. Implementación o no de bermas de concreto en el pavimento.
- b. El efecto en juntas.
- c. Fatiga.
- d. Erosión.
- e. Tipo de ejes (sencillos, tándem y Trídem).
- f. Módulo de rotura (S_c).
- g. Resistencia de la subrasante o del conjunto subrasante y subbase (K).
- h. Frecuencia, pesos y tipo de carga por eje dependiendo del vehículo.
- i. Periodo de diseño.
- j. Tránsito de diseño.

2.1.1.1. Resistencia del concreto a la flexión o módulo de rotura (S_c)

Es fundamental para el procedimiento de diseño por el criterio de fatiga, el diseño por el criterio por causa de la fatiga regula el agrietamiento que experimenta el pavimento por efectos de las repeticiones de los ejes, ecuación (1).

$$S_c = k\sqrt{f'c} \quad (1)$$

S_c : Módulo de rotura (MPa).

K : Constante 0,7 para cantos rodados y 0,8 material triturado

$f'c$: Resistencia a la compresión (MPa)

¹ PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, Boletín publicado por Robert G. Packard

2.1.1.2. Capacidad de soporte de la subrasante y de la subbase

La capacidad de soporte se mide en términos del módulo de reacción (K), determinando por medio de la prueba de placa. El valor del módulo de reacción se puede estimar también de forma indirecta por correlaciones con el CBR.²

Tabla 1. Efecto de la subbase granular sobre los valores de K

VALOR DE K PARA LA SUBRASANTE		VALOR DE K PARA LA SUBBASE					
		150 mm		225 mm		300 mm	
MPa/m	Lb/pulg ³	MPa/m	Lb/pulg ³	MPa/m	Lb/pulg ³	MPa/m	Lb/pulg ³
20	73	26	96	32	117	38	140
40	14	49	180	57	210	66	245
60	220	66	245	76	280	90	330
80	295	90	330	100	370	117	430

Fuente 1. : PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p. 6.a

Tabla 2. Efecto de la subbase tratada con cemento sobre los valores de K

VALOR DE K PARA LA SUBRASANTE		VALOR DE K PARA LA SUBBASE TRATADA CON CEMENTO					
		150 mm		225 mm		300 mm	
MPa/m	Lb/pulg ³	MPa/m	Lb/pulg ³	MPa/m	Lb/pulg ³	MPa/m	Lb/pulg ³
20	73	80	300	105	117	38	140
40	14	130	500	185	210	66	245
60	220	190	700	245	280	90	330

Fuente 2. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p. 6.

2.1.1.3. Periodo de diseño

La vida útil de un pavimento rígido depende de las deficiencias que éste sufre, por lo general si no presenta es de hasta más de 40 años, pero para aquellos que tienen deficiencias por diseño o por construcción el periodo de diseño es menor de 20 años éste último siendo el más utilizado comúnmente.

² HIGUERA, Carlos Hernando. Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. 1a ED. COLOMBIA: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2010, p 282.

2.1.1.4. Tránsito de diseño

Uno de los criterios más importantes es el tránsito de diseño, ya que el volumen o número de ejes que circulan por la vía a diseñar en dicho periodo de diseño y dimensiones de los vehículos influyen en su diseño geométrico, el número y el peso de los ejes de éstos son factores determinantes en el diseño de la estructura del pavimento.

2.1.1.4.1. Proyección de tránsito

Para la proyección del tránsito se determina el factor de proyección (Fp), ecuación (2)

$$Fp = \frac{(1 + r)^n - 1}{\ln(1 + r)} \quad (2)$$

Donde:

n: Periodo de diseño (años)

r: Tasa de crecimiento anual del tránsito (%)

El tránsito de diseño para un periodo de tiempo determinado (periodo de diseño), ecuación (3):

$$NVC: (365) \times (TPDo) \times (\%Vc) \times (Fd) \times (Fca) \times (Fp) \quad (3)$$

Donde:

NVC: Número de vehículos comerciales en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

TPDo: Tránsito de vehículo comerciales.

%Vc: Porcentaje de vehículos comerciales.

Fd: Factor de distribución o distribución direccional por sentido.

Fca: Factor de distribución por carril.

Fp: Factor de proyección.

2.1.1.5. Factores de seguridad de carga

La Portland Cement Association exige que sean mayores las cargas reales esperadas, esto se logra multiplicando las cargas por un factor de seguridad de carga (Fsc), donde se recomienda los siguientes valores según la condición:

- Para vías de carriles múltiples, en los cuales se espera un flujo de tránsito interrumpido con un elevado volumen de tránsito pesado, Fsc=1,2.
- Para carreteras y vías urbanas arterias, en las que se espera un volumen moderado de tránsito de vehículos pesados, Fsc=1,1.
- Para calles residenciales y otras vías que vayan a soportar bajos volúmenes de tránsito de camiones, Fsc=1,0.
- En casos especiales, se podrá justificar el empleo de un FSC=1,3.

2.1.2. Procedimiento de diseño

Los parámetros a tener en cuenta en el procedimiento en caso que se tenga información acerca de la distribución de cargas por eje son los siguientes:

- Tipo de juntas y bermas
- Módulo de rotura del concreto
- Resistencia de la subrasante o del conjunto subrasante y subbase (K)
- Factor de seguridad de carga (Fsc).
- Distribución de cargas por eje
- Número esperado de repeticiones en el carril de diseño en el periodo de diseño

2.1.2.1. Análisis por fatiga

La cantidad admisible de repeticiones de carga está en función de la relación: entre el esfuerzo a flexión que está actuando en la losa de concreto y la resistencia de esta a la flexión, dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Relación de esfuerzos} = \frac{\text{Esfuerzo equivalente}}{\text{Módulo de rotura (Sc)}} \quad (4)$$

Se acepta que si un grupo de carga no consume la totalidad de fatiga permisible, el remanente estará disponible para los demás grupos. La sumatoria de todos los consumos de fatiga nunca deberá ser mayor al 100%.³

El análisis por fatiga depende a las siguientes condiciones:

- Para diseños de pavimentos sin tener en cuenta las bermas, tomar como referencia la tabla 6 (Anexo A) y 8 (Anexo C) y la gráfica 1.
- Para diseños de pavimentos donde se tiene en cuenta las bermas, tomar como referencia la tabla 7 (Anexo B) y 8 (Anexo C) y la gráfica 1.

2.1.2.2. Análisis por erosión

Este análisis depende de las siguientes condiciones:

a. Pavimento sin berma de concreto:

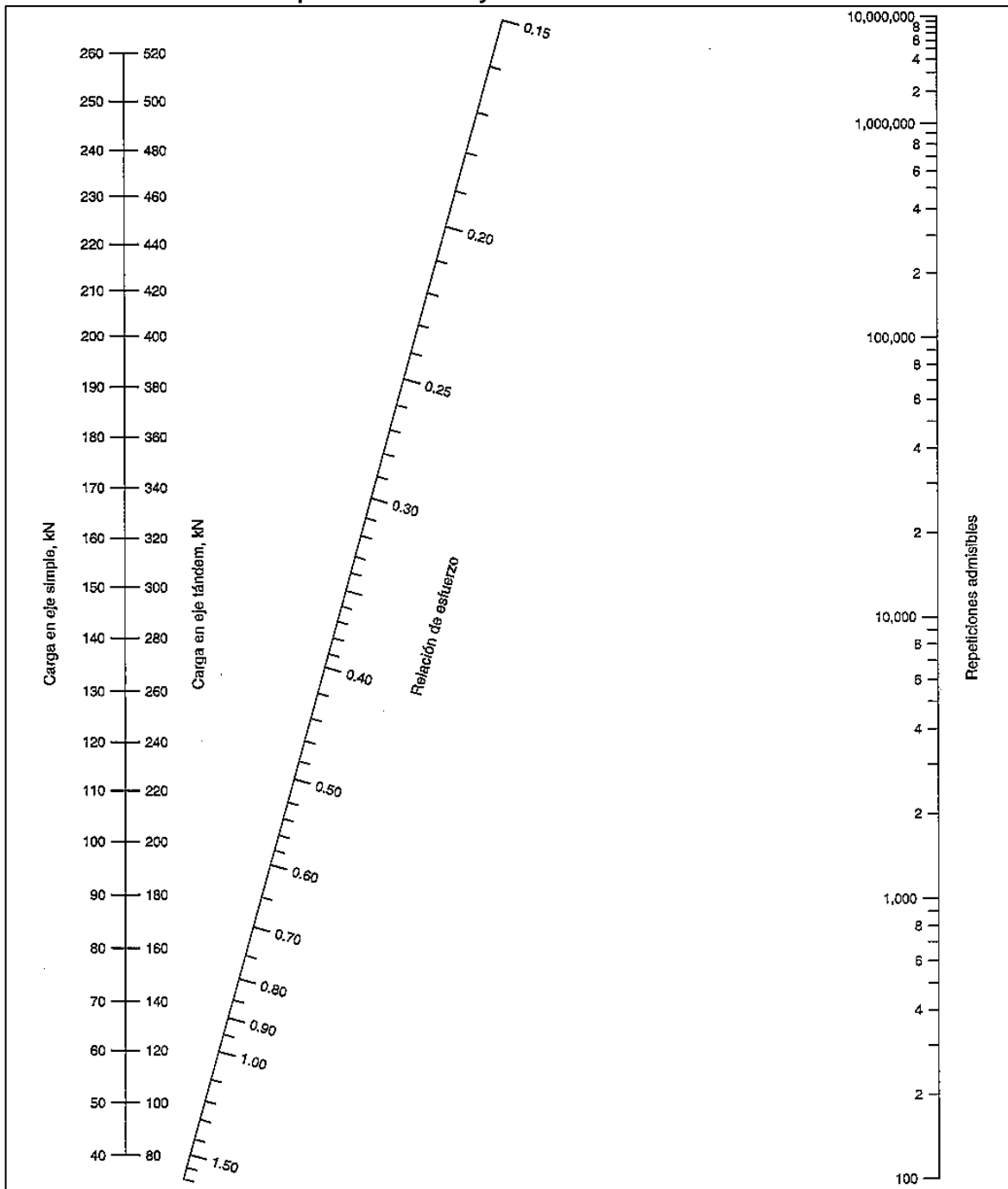
- Usar las tablas 9 (Anexo D), 13 (Anexo H) y 14 (Anexo I) y la gráfica 2, para pavimentos con pasadores en las juntas o con refuerzo continuo.
- Usar las tablas 10 (Anexo E), 13 (Anexo H) y 14 (Anexo I) y la gráfica 2, para pavimentos con juntas del tipo de trabazón de agregados.

b. Pavimento con berma de concreto

- Usar las tablas 11 (Anexo F), 13 (Anexo H) y 14 (Anexo I) y la gráfica 3, para pavimentos con pasadores en las juntas o con refuerzo continuo.
- Usar las tablas 12 (Anexo G), 13 (Anexo H) y 14 (Anexo I) y la gráfica 3, para pavimentos con juntas del tipo de trabazón de agregados.

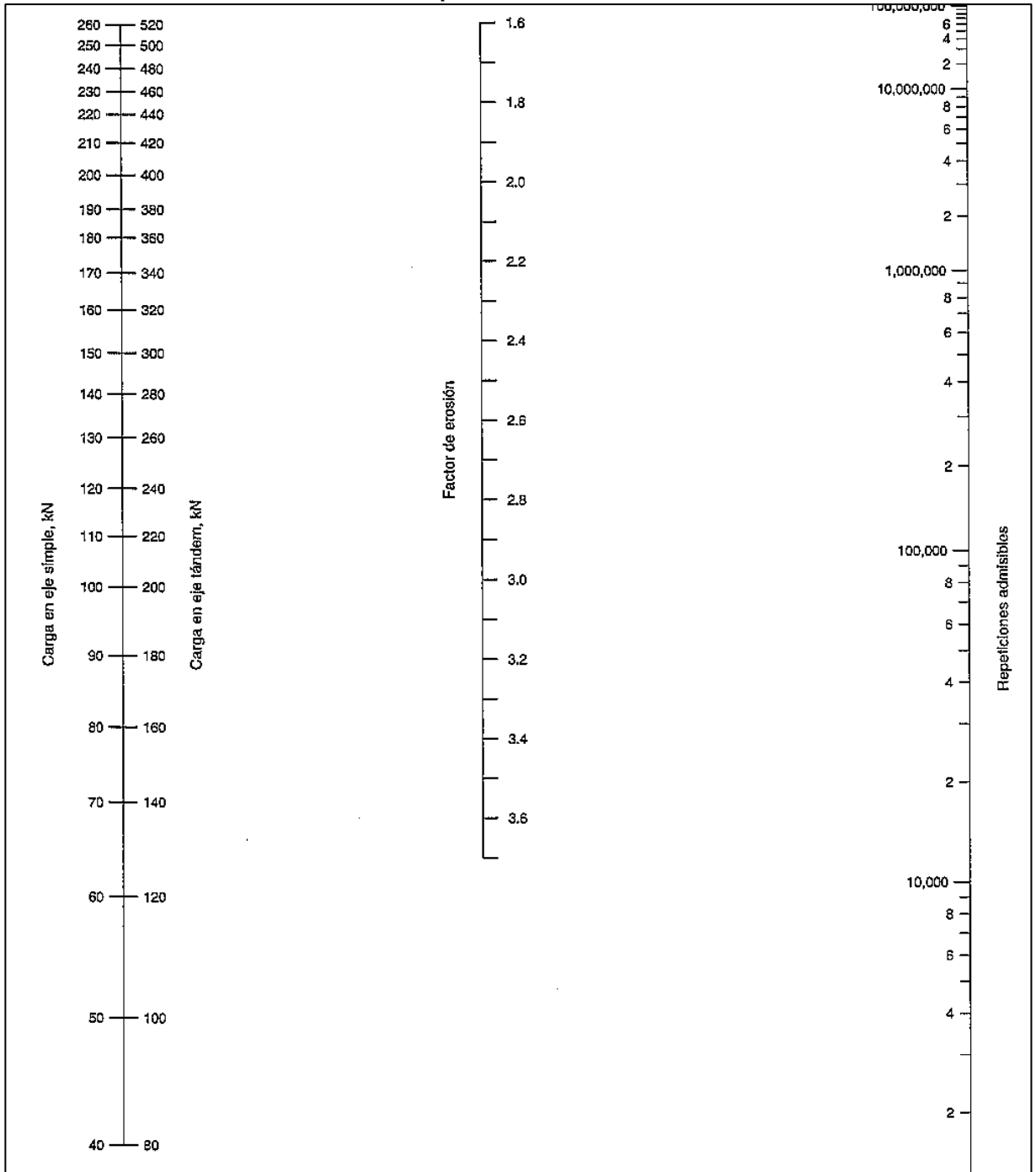
³ HIGUERA, Carlos Hernando. Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. 1a ED. COLOMBIA: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2010, p 287.

Gráfica 1. Análisis de fatiga: Repeticiones admisibles en función de la relación de esfuerzos en pavimentos con y sin berma de concreto.



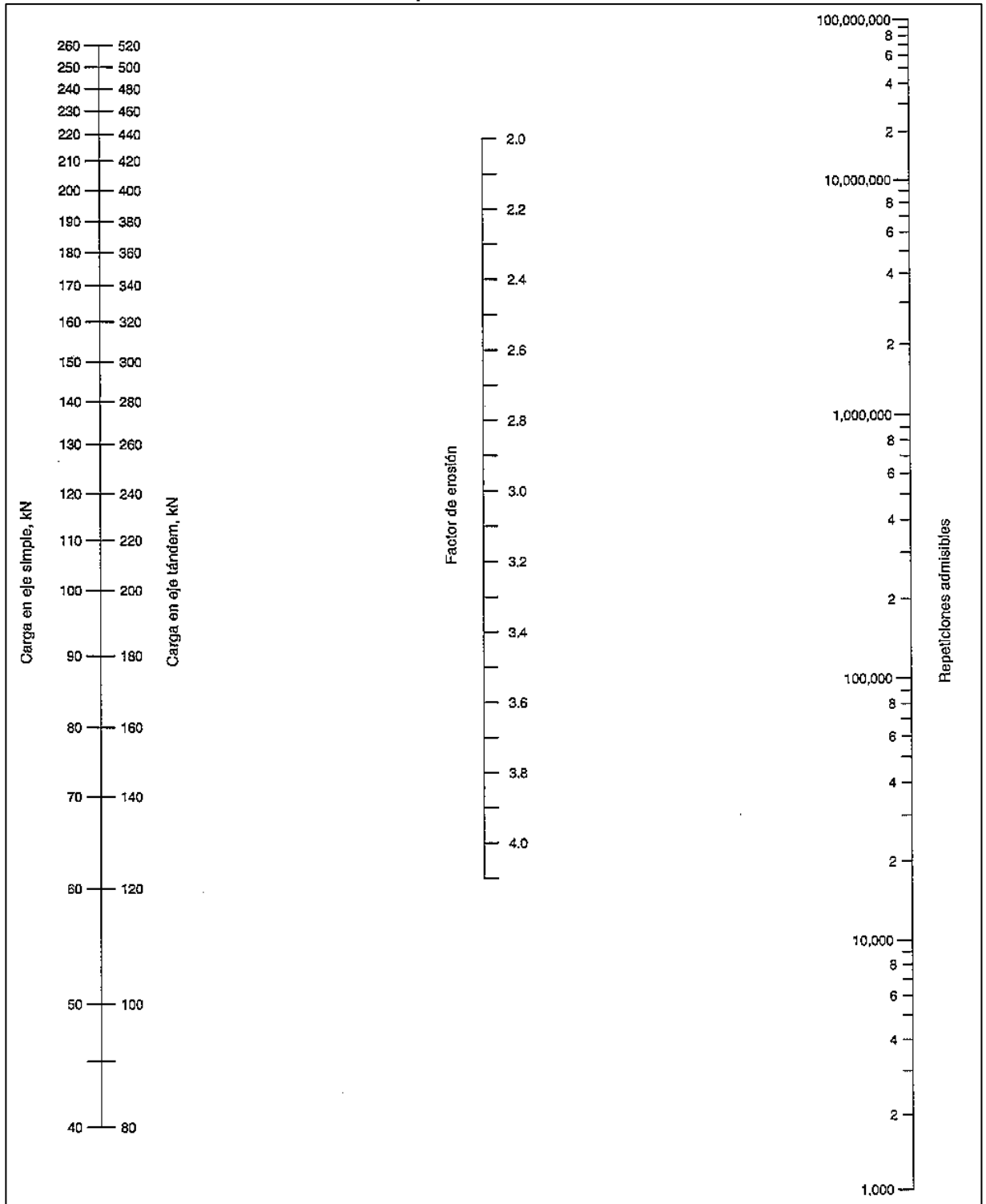
Fuente 3. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p. 15.

Gráfica 2. Análisis de erosión sin berma de concreto. Repeticiones admisibles en función del factor de erosión en pavimentos sin berma de concreto.



Fuente 4. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p. 17.

Gráfica 3. Análisis de erosión con berma de concreto. Repeticiones admisibles en función del factor de erosión en pavimentos con berma de concreto.



Fuente 5. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p. 19.

2.1.3. Programa BS-PCA

Este software sirve para el cálculo de pavimentos rígidos basado en el método de la PCA del 84, este programa se realizó utilizando las ecuaciones del cálculo de pavimentos de la PCA, por lo cual se presenta una gran precisión al utilizar comparativamente los monogramas y los cálculos realizados por el programa. El programa BS-PCA es compatible con las últimas versiones del sistema operativo de Windows.

Para su ejecución es necesario tener los siguientes datos:

- Módulo de rotura del concreto (MR)
- Módulo de reacción ($K_{\text{COMBINADO}}$).
- Repeticiones Esperadas de los ejes de 7,5 y 12,5 t.
- Factor de Seguridad de Carga (FSC)
- Factor de Mayoración de repeticiones (FMR)
- Criterios del consumo de erosión y de fatiga (%)
- Si tiene o no pasadores
- Si tiene o no berma

Con los datos nombrados, este método permite realizar cálculos rápidos de los consumos tanto de fatiga como de erosión, su licencia es abierta y de uso libre.

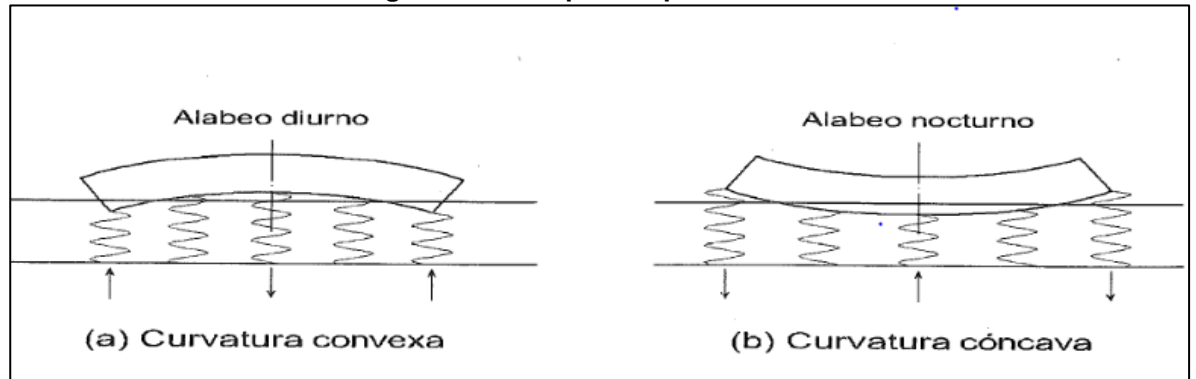
2.2. ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

2.2.1. Esfuerzos por alabeo

Es la tendencia de la losa de concreto a arquearse, tomando una curvatura cóncava o convexa, donde esto sucede debido a la variación de temperatura entre la cara superior y la inferior.

Existen dos tipos de alabeo: el diurno y el nocturno, el alabeo diurno se da cuando la temperatura de la parte superior de la losa es mayor que el de la parte inferior, esto genera que la parte superior se expanda y la inferior se comprima formando una curvatura convexa, provocando esfuerzos a tensión en la parte superior y a compresión en la parte inferior. Y el alabeo nocturno se da cuando la temperatura en la parte superior de la losa de concreto es menor que en la parte inferior, esto genera que la cara superior se contraiga y que la cara inferior se expanda, formando una curvatura cóncava, provocando esfuerzos a compresión en la parte superior y de tensión en la parte inferior.

Imagen 1. Alabeo por temperatura.



Fuente 6. HUANG. Yang H. Pavement analysis and desing. University of Kentucky. Second edition. University of Kentucky Prentice Hall. New Jersey, 2004. P. 148.

2.2.1.1. Doblamiento de un plato infinito.

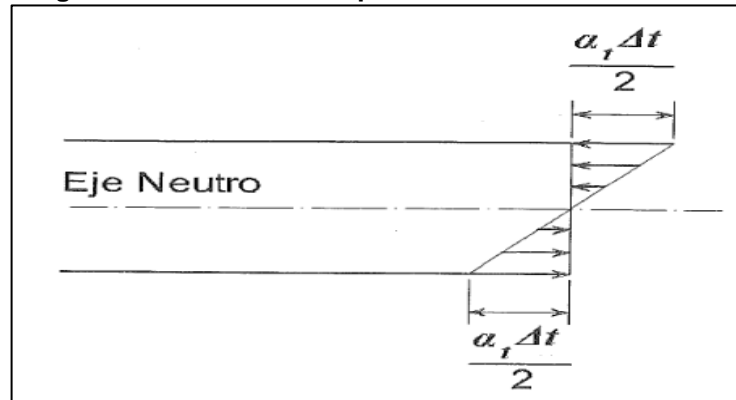
La diferencia entre la viga y un plato radica en que la viga es forzada en una sola dirección mientras que el plato es esforzado en dos direcciones.

Cuando la losa sufre un doblamiento simultaneo en ambas direcciones X y Y, los esfuerzos se superponen para calcular el esfuerzo total por alabeo, el cual se determina asumiendo que la losa está restringida al movimiento en ambas direcciones X y Y.

Teniendo una losa libre al movimiento, donde la temperatura en la cara superior sea mayor que en la inferior, la parte superior se expandirá con una deformación de $\alpha_t \Delta t / 2$ y la cara inferior se contraerá con una deformación similar, como lo muestra la imagen 2, si la losa está completamente restringida y controlada al movimiento, se genera una fuerza de compresión en la cara superior y una de tensión en la inferior, y la deformación máxima será:

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \frac{\alpha_t \Delta t}{2} \quad (5)$$

Imagen 2. Gradiente de temperatura en la losa de concreto



Fuente 7. HUANG. Yang H. Pavement analysis and desing. University of Kentucky. Second edition. University of Kentucky Prentice Hall. New Jersey, 2004. P. 149.

El esfuerzo total por alabeo es:

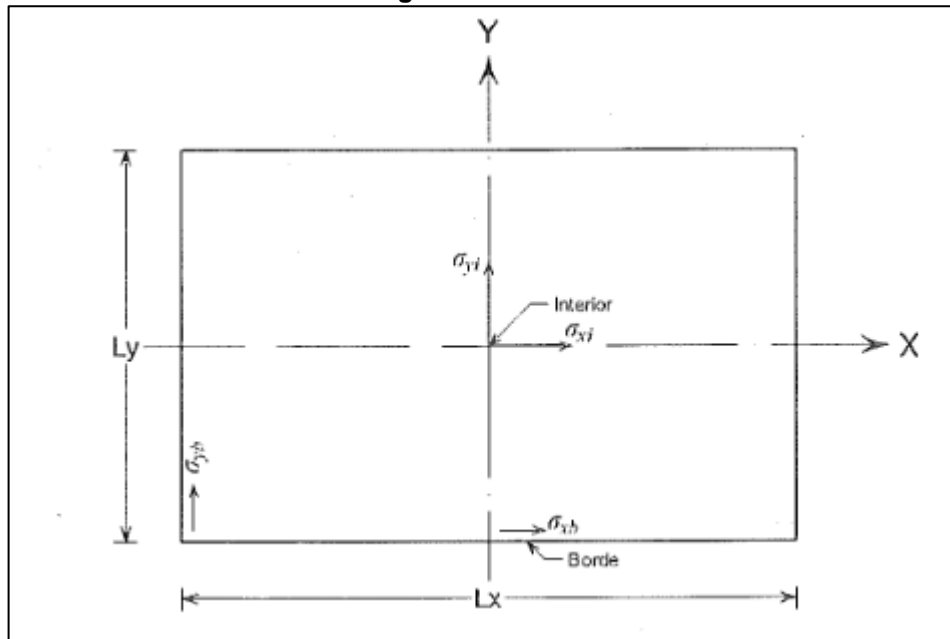
$$\sigma_x = \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1 - \mu)} \quad (6)$$

Donde:

- σ_x : Es el esfuerzo total por alabeo en libras/pulgada².
- E : Es el módulo elástico del concreto en libras/pulgada².
- α_t : Es el coeficiente de expansión térmica del concreto en pulg/pulg/°F.
- Δt : La diferencia de temperatura entre la cara superior y la inferior de la losa.
- μ : Es la relación de Poisson del concreto.

2.2.1.2. Esfuerzos por alabeo en una losa finita.

Imagen 3. Losa finita



Asumiendo una losa de longitud L_x y ancho L_y , como lo muestra la imagen 3. Westergaard propuso las siguientes soluciones para el esfuerzo interior máximo en el centro de la losa en ambas direcciones:

$$\sigma_x = \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1 - \mu^2)} (C_x + \mu C_y) \quad (7)$$

$$\sigma_y = \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1 - \mu^2)} (C_x + \mu C_x) \quad (8)$$

Donde:

σ_x : Es el esfuerzo interior máximo por alabeo en la dirección X, en libras/pulgada²

σ_y : Es el esfuerzo interior máximo por alabeo en la dirección Y, en libras/pulgadas²

E: Es el módulo elástico del concreto en libras/pulgada²

α_t : Es el coeficiente de expansión térmica del concreto en pulg/pulg/°F

Δt : Es la diferencia de temperatura entre la cara superior y la inferior de la losa

μ : Es la relación de Poisson del concreto.

C_x y C_y son factores de corrección por losa finita. Basado en este análisis, Bradbury desarrolló una curva para determinar C_x y C_y , que muestra en la gráfica 4; el factor de corrección C_x depende de la relación L_x/l y C_y de la relación L_y/l , donde l es el radio de rigidez relativa, definido como:

$$l = \left[\frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)k} \right]^{0.25} \quad (9)$$

Donde:

- l : Es el radio de rigidez relativa en pulgadas.
- E : Es el módulo de elasticidad del concreto en libras/pulgadas².
- h : El espesor de la losa en pulgadas, ν la relación de Poisson del concreto.
- k : El módulo de reacción de la subrasante en libras/pulgadas³.

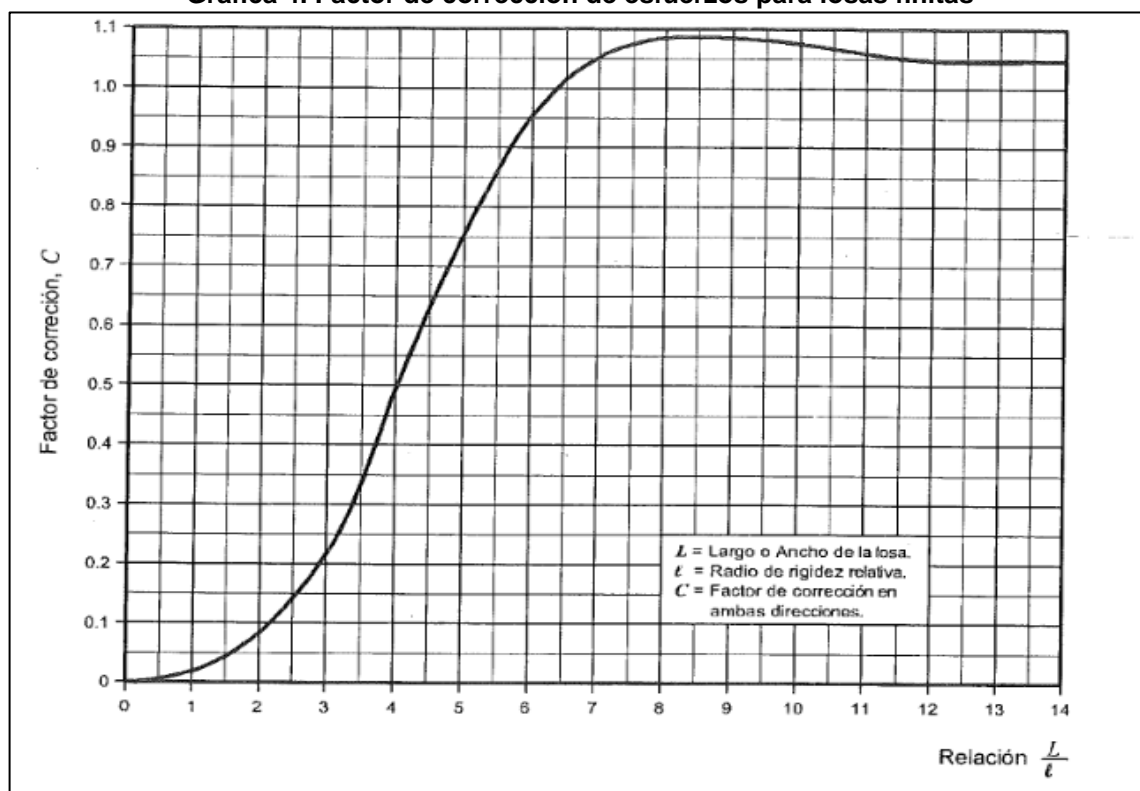
El esfuerzo en el borde a la mitad de la losa es:

$$\sigma = \frac{C E \alpha_t \Delta t}{2} \quad (10)$$

Donde:

- σ y C : Dependen de la dirección X o Y.
- α_t : Es el coeficiente de expansión térmica del concreto en pulg/pulg/°F.
- E : Es el módulo de elasticidad del concreto en libras/pulgadas².
- Δt : Es la diferencia de temperatura entre la cara superior y la inferior de la losa.

Gráfica 4. Factor de corrección de esfuerzos para losas finitas



Fuente 8. HUANG. Yang H. Pavement analysis and desing. University of Kentucky. Second edition. University of Kentucky Prentice Hall. New Jersey, 2004. P. 150.

2.2.2. Esfuerzos y deflexiones debidos a las cargas externas.

Se pueden utilizar tres métodos para determinar los esfuerzos y las deflexiones en pavimentos de hormigón, los cuales son: formulas o métodos empíricos mecanístico, cartas de diseño y programas computacionales de elementos finitos.

Las fórmulas fueron creadas originalmente por Westergaard pueden aplicarse solamente a una carga de una sola rueda con un área de contacto circular, semicircular, elíptica, o semielíptica. Las gráficas de influencia desarrolladas por Pickett y Ray 1951, se pueden aplicar a cargas de múltiples ruedas de cualquier configuración. Ambos métodos son aplicables en una losa sobre una base liquida.

Las cargas se aplican a losas múltiples sobre una base liquida, solida o de capa con transferencia de carga a través de las juntas, se debe usar el método de elementos finitos.

2.2.2.1. Fórmulas o método empírico mecánico

El método se puede usar con una losa totalmente libre que soporte una carga por rueda simple aplicada cerca de la esquina, en el interior de la losa, a una distancia considerable de cualquier borde, y en el borde de la losa, lejos de cualquier esquina.

2.2.2.1.1. Carga en la esquina de la losa de concreto.

La fórmula Goldbeck (1919) y (1924) ofrece una solución exacta cuando la carga se concentra muy cerca de la esquina como se ve en la imagen 4. Cuando el soporte de la subrasante es deficiente se considera que la losa trabaja como una viga en voladizo; el esfuerzo de tensión en la cara superior de la losa es:

$$\sigma_e = \frac{3P}{h^2} \quad (11)$$

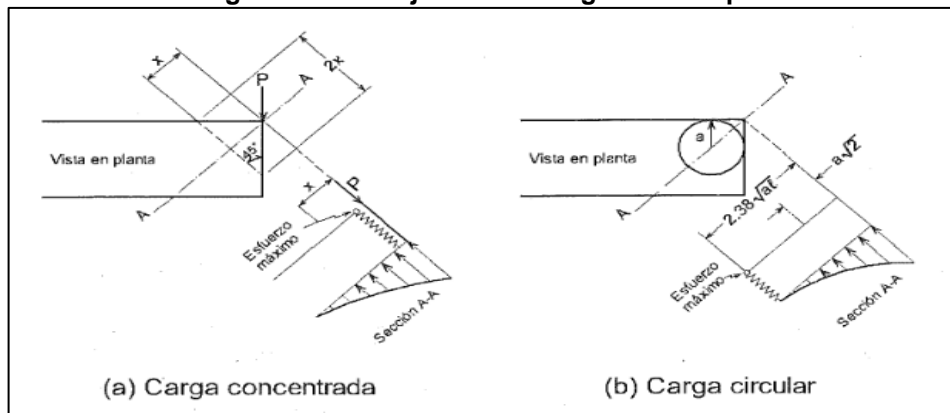
Donde:

σ_e : es el esfuerzo de tensión en la cara superior de la losa en libras/pulgada².

P : es la carga en libras.

h : es el espesor de la losa en pulgadas.

Imagen 4. Losa sujeta a una carga en la esquina



Fuente 9. HUANG. Yang H. Pavement analysis and desing. University of Kentucky. Second edition. University of Kentucky Prentice Hall. New Jersey, 2004. P. 154.

Para un área de contacto circular cerca de la esquina de una losa debido a que la sección de máximo esfuerzo no está cerca de la esquina, la fuerza de reacción de la subrasante baja hacia el interior de la losa. Westergaard 1926 aplico un método de aproximaciones sucesivas y obtuvo las siguientes formulas:

$$\sigma_e = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right] \quad (12)$$

$$\Delta_e = \frac{P}{k l^2} \left[1.1 - 0.88 \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right) \right] \quad (13)$$

Donde:

- σ_e : Es el esfuerzo de tensión en la cara superior de la losa en libras/pulgada²
- Δ_e : La deflexión en la esquina en pulgadas
- k : Módulo de reacción de la subrasante en libras/ pulgada³
- l : El radio de rigidez relativa en pulgadas.

Se encontró que el momento máximo se ocurre a una distancia $2.38 \sqrt{al}$

Loannides y otros (1985) aplicaron elementos finitos para evaluar las soluciones anteriores y sugirieron el uso de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_e = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{c}{l} \right)^{0.72} \right] \quad (14)$$

$$\Delta_e = \frac{P}{k l^2} \left[1.205 - 0.69 \left(\frac{c}{l} \right) \right] \quad (15)$$

Donde:

- c : Es la longitud del lado de un área de contacto cuadrada. Se encontró que el momento máximo se ocurre a una distancia $1.80 c^{0.32} l^{0.59}$

Si la carga es aplicada sobre un área circular; el valor c debe seleccionarse de tal manera que el área del cuadrado sea equivalente a la del círculo:

$$C = 1.772 a \quad (16)$$

a : El radio del área de contacto en pulgadas.

2.2.2.1.2. Cargas en el interior de la losa de concreto.

La fórmula desarrollada por Westergaard para el esfuerzo en el interior de la losa bajo un área circular de radio a es:

$$\sigma_i = \frac{3(1 + \mu)P}{2\pi h^2} \left[\ln\left(\frac{l}{b}\right) + 0.6159 \right] \quad (17)$$

Donde:

- σ_i : Es el esfuerzo en el interior de la losa en libras/pulgada².
- μ : La relación de Poisson del concreto.
- P : La carga en libras.
- h : El espesor de la losa en pulgadas.
- l : El radio de rigidez relativa en pulgadas. Y:

$$b = a \text{ cuando } a \geq 1.724h$$

$$b = \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675 \text{ cuando } a < 1.724h$$

Donde:

- a : Es el radio del área circular de carga en pulgadas.

La deflexión debidamente a la carga interior está dada por:

$$\Delta_i = \frac{P}{8kl^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{a}{2l}\right) - 0.673 \right] \left(\frac{a}{l}\right)^2 \right\} \quad (18)$$

Donde:

- Δ_i : Es la deflexión en el interior de la losa en pulgadas.
 a : El radio del área circular de carga en pulgadas
 k : El módulo de reacción de la subrasante en libras/ pulgadas³.
 l : El radio de rigidez relativa en pulgadas.

2.2.2.1.3. Cargas en el borde de la losa de concreto

La solución fue presentada por Westergaard donde presentó soluciones generales para esfuerzos máximos y la deflexión producida por áreas de carga elípticas y semielíptica colocadas en el borde de la losa:

$$\sigma_{b(circulo)} = \frac{3(1 + \mu)P}{\pi(3 + \mu)h^2} \left[\ln\left(\frac{Eh^3}{100ka^4}\right) + 3.84 - \frac{4\pi}{3} + \frac{1 - \mu}{2} + \frac{1.18(1 + 2\mu)a}{2l} \right] \quad (19)$$

$$\sigma_{b(semicirculo)} = \frac{3(1 + \mu)P}{\pi(3 + \mu)h^2} \left[\ln\left(\frac{Eh^3}{100ka^4}\right) + 3.84 - \frac{4\pi}{3} + \frac{(1 + 2\mu)a}{2l} \right] \quad (20)$$

$$\Delta_{b(circulo)} = \frac{\sqrt{2 + 1.2\mu}P}{\sqrt{Eh^3k}} \left[1 - \frac{(0.76 + 0.4\mu)a}{l} \right] \quad (21)$$

$\Delta_{b(semicirculo)}$

$$= \frac{\sqrt{2 + 1.2\mu}P}{\sqrt{Eh^3}} \left[1 - \frac{(0.323 + 0.17\mu)a}{l} \right] \quad (22)$$

Donde:

- σ_b : Esfuerzo en el borde de la losa en libras/pulgadas²
 Δ_b : La deflexión en el borde de la losa en pulgadas
 μ : La relación de Poisson del concreto.
 h : El espesor de la losa en pulgadas.
 a : El radio del área circular de la carga en pulgadas
 P : La carga en libras.

l: El radio de rigidez relativa en pulgadas
k: El módulo de reacción de la subrasante en libras/pulgadas³.
E: Es el módulo de elasticidad del concreto en libras/ pulgadas².
 Westergaard presenta la siguiente ecuación para determinar el esfuerzo en el borde de la losa:

$$\sigma_b = \frac{0.572P}{h^2} \left[4 \log \left(\frac{l}{a} \right) + 0.359 \right] \quad (23)$$

Donde:

σ_b: Es el esfuerzo en el borde de la losa en libras/pulgadas².
h: El espesor de la losa en pulgadas.
a: El radio del área circular de carga en pulgadas.
P: La carga en libras.
l: El radio de rigidez relativa en pulgadas.

2.2.2.1.4. Cargas por llantas dobles:

Cuando la carga es aplicada por un conjunto de llantas dobles es necesario convertirlo a un área circular equivalente, de tal manera que las ecuaciones basadas en un área de carga circular puedan ser aplicadas.

En la imagen 5 muestra un juego de llantas dobles: en la práctica se obtienen resultados satisfactorios si el círculo equivalente tiene un área igual al área de contacto del sistema doble más el área entre ruedas, como lo indica el área sombreada de la figura; para el caso de una rueda cargada, su área de contacto será:

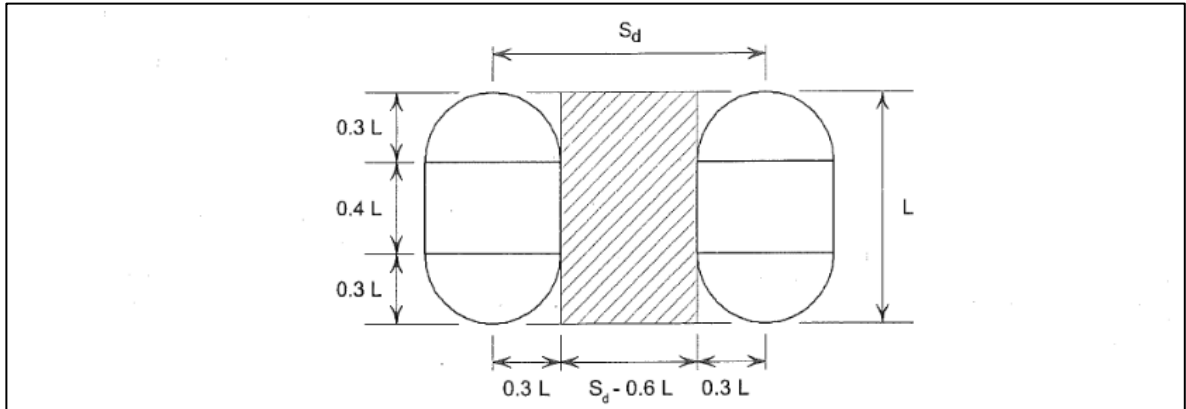
$$\frac{P_d}{q} = \pi(0.3L)^2 + (0.4L)(0.6L) = 0.5227 L^2 \quad (24)$$

$$L = \sqrt{\frac{P_d}{0.5227q}} \quad (25)$$

Donde:

- P_d : Es la carga sobre una rueda en libras.
 q : La presión de contacto en libras/pulgadas².
 L : La longitud calculada en pulgadas.

Imagen 5. Método para convertir un sistema doble a un área circular.



Fuente 10. HUANG. Yang H. Pavement analysis and desing. University of Kentucky. Second edition. University of Kentucky Prentice Hall. New Jersey, 2004. P. 159.

El radio del área circular a equivalente al sistema doble se determina por:

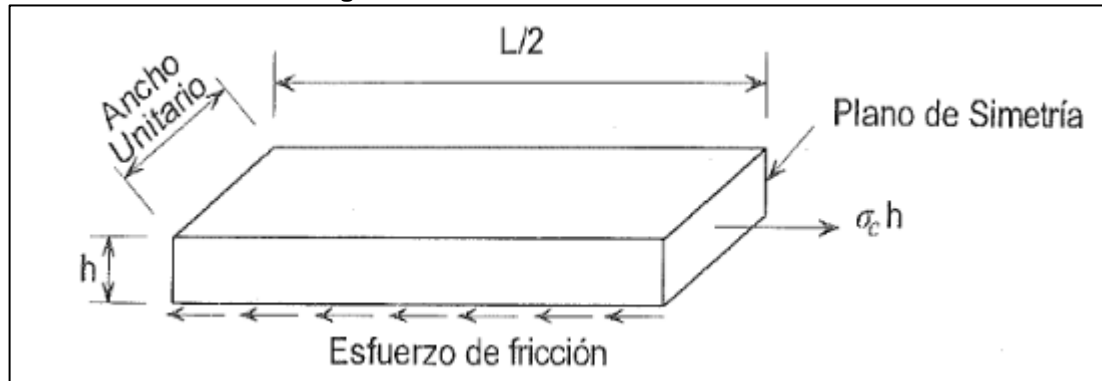
$$a = \sqrt{\frac{0.8521P_d}{q\pi} + \frac{S_d}{\pi} \left(\frac{P_d}{0.5227q}\right)^{1/2}} \quad (26)$$

Donde:

- a : Es el radio del área circular equivalente al área del sistema doble en pulgadas.
 P_d : La carga sobre una rueda en libras.
 S_d : La distancia entre centros de rueda en pulgadas.
 q : La presión de contacto en libras/ pulgadas².

2.2.3. Esfuerzos debidos a la fricción

Imagen 6. Esfuerzos debidos a la fricción.



Fuente 11. HUANG. Yang H. Pavement analysis and desing. University of Kentucky. Second edition. University of Kentucky Prentice Hall. New Jersey, 2004. P. 166

El cambio de temperatura en los pavimentos rígidos ocasiona que la losa de concreto se contraiga y se expanda; debido a la fricción entre la losa y la fundación se generan esfuerzos de tensión en el concreto, en el acero de refuerzo y en las barras de unión. Para pavimentos planos el espacio entre juntas de contracción debe ser tal que los esfuerzos debidos a la fricción no causen la figuración del concreto.

2.2.3.1. Efectos del cambio de volumen del concreto

Los cambios de temperatura, causan cambios de volumen en el concreto, y esto provoca efectos importantes como son: esfuerzos de tensión y causan la figuración del concreto, segundo causa abertura de las juntas y disminuye la eficiencia de transferencia de carga.

El esfuerzo de tensión es mayor en el centro y se determina por:

$$\sigma_c = \frac{\gamma_c L f_a}{2} \quad (27)$$

Donde:

- σ_c : Es el esfuerzo de concreto en libras/ pulgada²
- γ_c : El peso unitario de concreto en libras/pulgada²
- L : La longitud de la losa en pies
- f_a : Coeficiente de fricción entre la losa y la subrasante

Las juntas se diseñan teniendo en cuenta la expansión del concreto, según Darter y Barenberg se puede calcular aproximadamente de la siguiente manera:

$$\Delta L = CL(\alpha_t \Delta T + \epsilon)$$

(28)

Donde:

- ΔL : Es la abertura de la junta causada por el cambio de temperatura (pulgadas).
- C : El factor de ajuste por fricción entre la losa y la subrasante (0.8 Base granular y 0.65 para base estabilizada).
- L : La longitud de la losa (pulgadas).
- α_t : Es el coeficiente de expansión térmica del concreto en (pulg/pulg/°F, $5^a 6 \times 10^{-6}$ o de 9 a 10.8×10^{-4} °c).
- ΔT : Es el rango de temperatura.
- ϵ : El coeficiente de drenado del concreto (0.5 a 0.25×10^{-4}).

2.3. DISEÑO PAVIMENTOS RÍGIDOS METODOLOGÍA DE AUSTRROADS

Este método de diseño de espesor de la base se basa en la Portland Cement Association EE. UU (PCA 1984, Método Packard 1984) con modificaciones.

El método de diseño de espesor se basa en la evolución de:

- Volumen de tráfico proyectado y la composición durante el periodo de diseño.
- Fuerza de la subbase en términos de su Relación de Soporte de California.
- Resistencia a la flexión de la base de concreto.

El diseño de las losas de concreto se basa en modelos analíticos y de campo las pruebas de pavimentos con esparcimientos de las juntas típicas y rango de espesor para carretera.

2.3.1. Factores utilizados en la determinación del espesor de la losa de concreto

2.3.1.1. Resistencia de la subrasante

Para el diseño de espesor de los pavimentos rígidos, la fuerza de la subbase se puede evaluar en términos de CBR. Métodos de evaluación de CBR diseño de la subbase.

2.3.1.2. Resistencia del hormigón para las losas de concreto

El módulo de resistencia del hormigón para pavimentos rígidos es de 4.5 MPa a los 28 días.

2.3.1.3. Diseño de tráfico.

Para los diseños de pavimentos rígidos se debe considerar que las magnitudes de carga por eje (como sobrecargas) pero son relativamente insensibles a las repeticiones de carga por eje (volúmenes).

2.3.1.4. Bermas de concreto

Las bermas de concreto mejoran el comportamiento del pavimento y permiten adoptar un menor espesor de las losas de concreto que se adopten.

2.3.2. Diseño de espesor de la losa

2.3.2.1. General

Este procedimiento para determinar el espesor de pavimentos rígidos se basa en la metodología de la PCA de 1984.

Los dos tipos de daño considerados en el procedimiento son:

- Agrietamiento por fatiga debido a la flexión de las losas de concreto.
- La erosión de la subrasante y la subbase las cuales se presentan debido a las deflexiones por repeticiones en las juntas y grietas presentes.

Se tiene en cuenta la presencia o ausencia de pasadores y bermas para fines de diseño, se requiere información de los tipos de grupos de ejes, y la distribución del grupo de eje y el número de repeticiones de cada combinación de carga, el tipo de eje que se ingresa es el que se espera para usar en el tipo de pavimentos durante su vida de diseño.

2.3.2.2. Procedimiento del espesor de la losa de diseño

Para el espesor de diseño se selecciona el daño total por fatiga y erosión producido por el volumen de tráfico y la composición durante el periodo de diseño. Los daños por fatiga o erosión deben ser menores o iguales al 100%.

2.3.2.2.1. Repeticiones de carga admisibles (Nf) de grupos de cargas por ejes.

- **Análisis por fatiga**

Para el cálculo de repeticiones admisibles se puede determinar a partir de la siguiente ecuación.

$$\log(N_f) = \left[\frac{0.9719 - S_r}{0.0828} \right] \text{ si } S_r > 0.55 \quad (29)$$

$$N_f = \left[\frac{4.258}{S_r - 0.4325} \right]^{3.268} \text{ si } 0.45 \leq S_r \leq 0.55 \quad (30)$$

$$S_r = \frac{S_e}{0.944 f_{cf}} \left[\frac{PL_{SF}}{4.45 F_1} \right]^{0.94} \quad (31)$$

Donde:

- S_e : Esfuerzo de hormigón equivalente (MPa)
- f_{cf} : Diseñar características resistencia a la flexión a los 28 días (MPa)
- P : Carga por grupos de ejes.
- F_1 : Ajustes de carga para fatiga debido a grupos de ejes.
 - = 9 para un eje simple llanta sencilla (SAST)
 - = 18 para un eje simple llanta doble (SADT)
 - = 18 para un eje tándem llanta doble (TAST)
 - = 36 para un eje tándem con llantas gemelos (TADT)
 - = 54 para un eje tridem con llantas dobles (TRDT)
 - = 72 para un eje quad con llantas dobles (QADT)

Si N_f tiende a infinito si $S_r < 0.45$

Para calcular el esfuerzo equivalente (S_e) y el factor de erosión (F_3) se determina apartr de la siguiente ecuación.

$$S_e o F_3 = a + \frac{b}{D} + c \ln(E_f) + \frac{d}{D^2} + e [\ln(E_f)]^2 + f \frac{\ln(E_f)}{D} + \frac{g}{D^3} + h [\ln(E_f)]^3 + i \frac{[\ln(E_f)]^2}{D} + j \frac{\ln(E_f)}{D^2} \quad (32)$$

Donde:

- a,b,c,d,e,f,g,h,i,j: Son coeficientes que se encuentran en la tabla 3 y 5.
- D: Espesor de l losa de concreto en (mm)
- E_f : CBR efectivo de diseño(%)

• **Análisis por erosión**

Repeticiones de carga admisibles (N_e) se calculan con la siguiente ecuación.

$$\log(F_2 N_e) = 14.524 - 6.777 \left[\max \left(0, \left(\frac{P * L_{sf}}{4.45 * F_4} \right)^2 \frac{10^{F_3}}{41.35} - 9.0 \right) \right]^{0.103} \quad (33)$$

Donde:

- F_2 : Ajustes para efectos en el borde de la losa
=0.06 para losas sin bermas
=0.94 para losas con bermas
- F_3 : Factor de erosión
- F_4 : Ajustes de la carga de la erosión debido al grupo de ejes
= 9 para un eje simple llanta sencilla (SAST)
=18 para un eje simple llanta doble (SADT)
=18 para un eje tándem llanta doble (TAST)
=36 para un eje tándem con llantas gemelos (TADT)
=54 para un eje tridem con llantas dobles (TRDT)
=54 para un eje quad con llantas dobles (QADT)

Para el cálculo del factor de erosión (F_3) se calcula utilizando los factores de la tabla 4.

Tabla 3. Coeficientes para predicción de esfuerzos equivalentes.

COEFICIENTE	SIN BERMA				CON BERMA			
	TIPOS DE GRUPOS POR EJES				TIPOS DE GRUPOS POR EJES			
	SAST Y TAST	SADT	TADT	TRDT y QADT	SAST Y TAST	SADT	TADT	TRDT y QADT
a	0,118	0,56	0,219	0,089	-0,051	0,33	0,088	-0,145
b	125,4	184,4	399,6	336,4	26	206,5	301,5	258,6
c	-0,2396	-0,6663	-0,3742	-0,134	0,0899	-0,4684	-0,1846	0,008
d	26969	44405	-38	-10007	35774	28661	4418	1408
e	0,0896	0,2254	0,168	0,083	-0,0376	0,165	0,0939	0,0312
f	0,19	19,75	-71,09	-83,14	14,57	2,82	-59,93	-61,25
g	-352174	-942585	681381	1215750	-861548	-686510	280297	488079
h	-0,0104	-0,0248	-0,0218	-0,012	0,0031	-0,0186	-0,0128	-0,0058
i	-1,2536	-4,6657	3,6501	5,2724	1,3098	-1,9606	4,1791	4,7428
j	-1709	-4082	2003	4400	-4009	-2717	1768	2564

Fuente 12. AUSTROADS. Guide to pavement technology. 2a ED, Sidney Australia. 2012, p. 136.

Tabla 4. Coeficientes para la predicción de erosión sin pasadores

COEFICIENTE	SIN BERMA				CON BERMA			
	TIPOS DE GRUPOS POR EJES				TIPOS DE GRUPOS POR EJES			
	SAST	SADT	TADT y TAST	TRDT y QADT	SAST	SADT	TADT y TAST	TRDT y QADT
A	0,745	1,33	1,907	2,034	0,345	0,914	1,564	2,104
B	533,8	537,5	448,3	440,3	534,6	539,8	404,1	245,4
C	-0,2071	-0,1929	-0,1749	-0,2776	-0,1711	-0,1416	-0,1226	-0,2473
D	-42419	-43035	-35827	-36194	-44908	-44900	-32024	-15007
E	0,0405	0,0365	0,0382	0,0673	0,0347	0,0275	0,0256	0,0469
F	27,27	26,44	0,64	15,77	20,49	16,37	-9,79	8,86
G	1547570	1586100	1291870	1315330	1676710	1654590	1150280	518916
H	-0,0044	-0,0039	-0,006	-0,0084	-0,0038	-0,0032	-0,0052	-0,0075
I	-1,4656	-1,4547	1,0741	-1,02068	-1,3829	-0,9584	2,1997	1,5517
J	-1384	-1344	50	-625	-913	-765	469	-599

Fuente 13. AUSTROADS. Guide to pavement technology. 2a ED, Sydney Australia. 2012, p. 136.

Tabla 5. Coeficientes para la predicción de erosión con pasadores

COEFICIENTE	SIN BERMA				CON BERMA			
	TIPOS DE GRUPOS POR EJES				TIPOS DE GRUPOS POR EJES			
	SAST	SADT	TADT y TAST	TRDT y QADT	SAST	SADT	TADT y TAST	TRDT y QADT
a	0,072	0,643	1,41	2,089	-0,184	0,44	0,952	1,65
b	679,9	684,5	498,9	351,3	602,3	609,8	544,9	359,4
c	-0,0789	-0,0576	-0,168	-0,3343	-0,0085	-0,0484	-0,0404	-0,1765
d	-58342	-58371	-39430	-25576	-50996	-52519	-47500	-28901
e	-0,0179	0,0128	0,0322	0,0723	-0,0122	0,0017	0,0179	0,0435
f	6,7	4,61	13,8	29,58	8,99	9,62	-31,54	-15,97
g	2139330	2131390	1437580	923081	1874370	1949350	1719950	1085800
h	-0,0021	-0,0017	-0,0044	-0,0086	0,0008	-0,0007	-0,0051	-0,0084
i	-0,5199	-0,2056	-0,038	-1,6301	-0,4759	-0,6314	3,3789	3,2908
j	-187	-185	-697	-1327	-374	-326	1675	758

Fuente 14. AUSTROADS. Guide to paviments technology. 2a ED, Sidney Australia. 2012, p. 137.

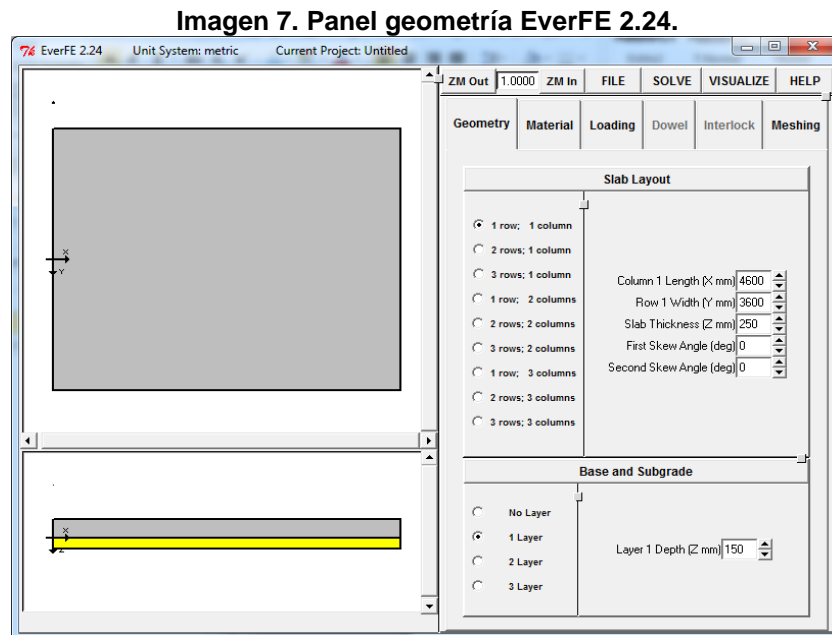
2.4. PROGRAMA EVERFE 2.24

Es una herramienta de análisis de elementos finitos en 3D para simular el comportamiento de los sistemas de pavimentos de rígidos simplemente unidos a las cargas de los ejes y a los efectos ambientales. EverFE es útil para los diseñadores que deben llevar a cabo análisis complejos de tensiones lineales no lineales o simples de sistemas de pavimentos de rígidos simplemente unidos. Las Universidades de Maine y Washington desarrollaron conjuntamente. EverFE está disponible gratuitamente desde el sitio web a cualquier usuario interesado, y se instala fácilmente en cualquier computadora con Windows NT4.0, Windows 2000 o XP.

2.4.1. Geometría

Este panel permite definir la geometría básica del sistema de pavimento rígido, y se divide en dos sub-paneles:

- **Disposición de la losa** donde se especifica la geometría de las losas de concreto
- **Base/Subgrado** donde se especifica la geometría de las bases subyacentes.

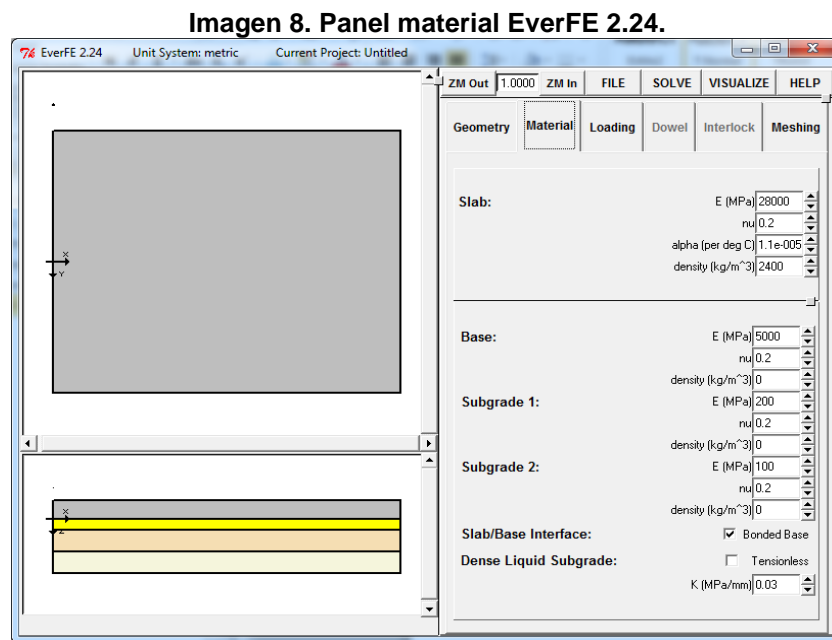


Fuente 15. Programa EverFE 2.24.

2.4.2. Material

El panel de material controla la especificación de las propiedades del material para las losas, clavijas, capas elásticas base / capa de fondo, la base líquida densa y la interfase de losa-base.

Aquí se definen las propiedades físicas del sistema de pavimento de rígido simplemente unido, de las bases subyacentes y de los pasadores de transferencia de carga.

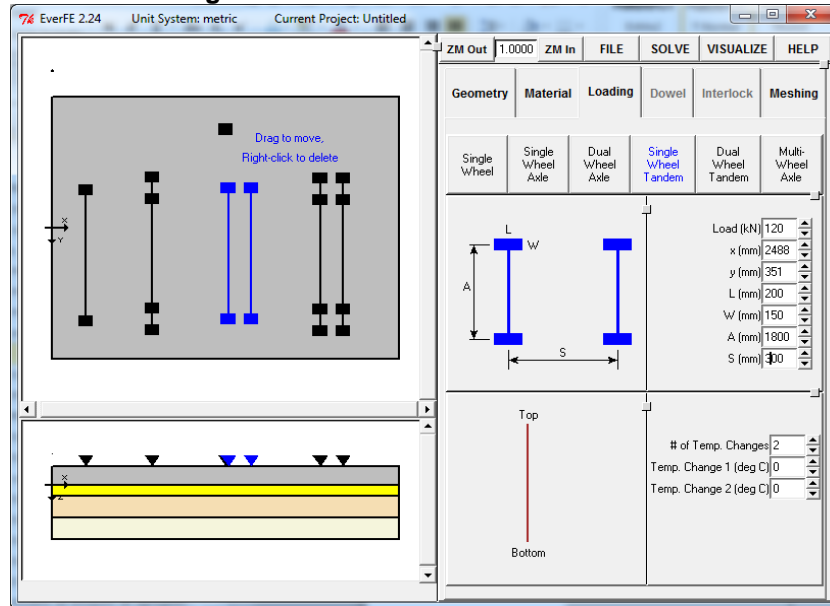


Fuente 16. Programa EverFE 2.24.

2.4.3. Carga

Aquí se pueden especificar las cargas de rueda / eje y los efectos térmicos. Las cargas de rueda / eje proporcionadas incluyen una sola rueda, eje simple de una rueda, eje simple de doble rueda, tándem de una sola rueda, tándem de doble rueda y eje genérico de varias ruedas. Todas las áreas de contacto de los neumáticos son tratadas como rectangulares. Aquí se define la carga y la geometría de cada tipo de eje.

Imagen 9. Panel material EverFE 2.24.

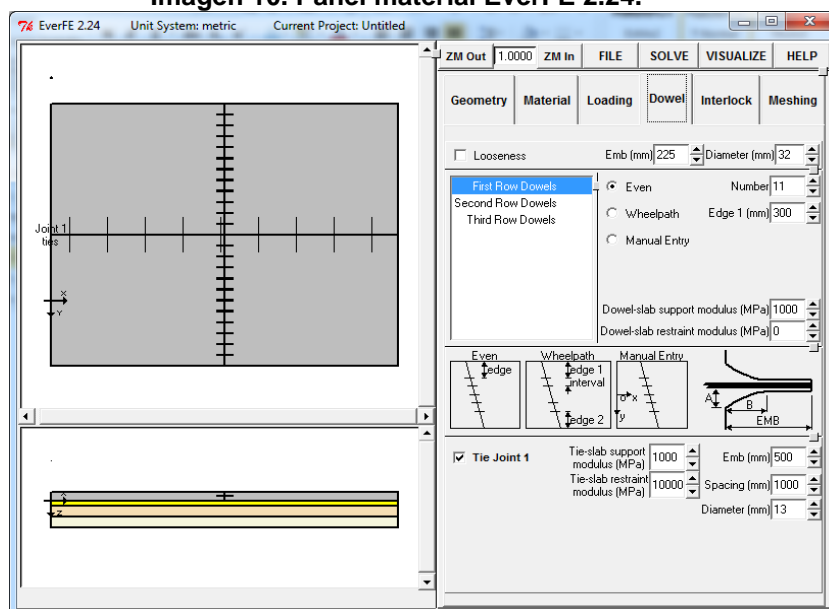


Fuente 17. Programa EverFE 2.24.

2.4.4. Pasadores de transferencia de carga

Los pasadores se pueden especificar en las juntas transversales de tres maneras: uniformemente espaciadas a través de una junta transversal, ubicadas en los recorridos de las ruedas o ubicadas manualmente mediante la introducción de coordenadas (x, y, z). Los parámetros de desalineación de los pasadores pueden especificarse en una base de pasador por pasador por el usuario. Además, los empalmes se pueden especificar en las juntas longitudinales. Para maximizar la flexibilidad de EverFE, cualquier fila individual de losas puede ser doblada o sin doblamiento, y cada unión longitudinal puede ser atada o desatada. El parámetro **Emb** controla el empotramiento de cada pasador en la losa de cada lado de la articulación y, por tanto, es la mitad de la longitud total del pasador; se define el diámetro, la cantidad de pasadores en una junta y el espaciamiento entre estos.

Imagen 10. Panel material EverFE 2.24.



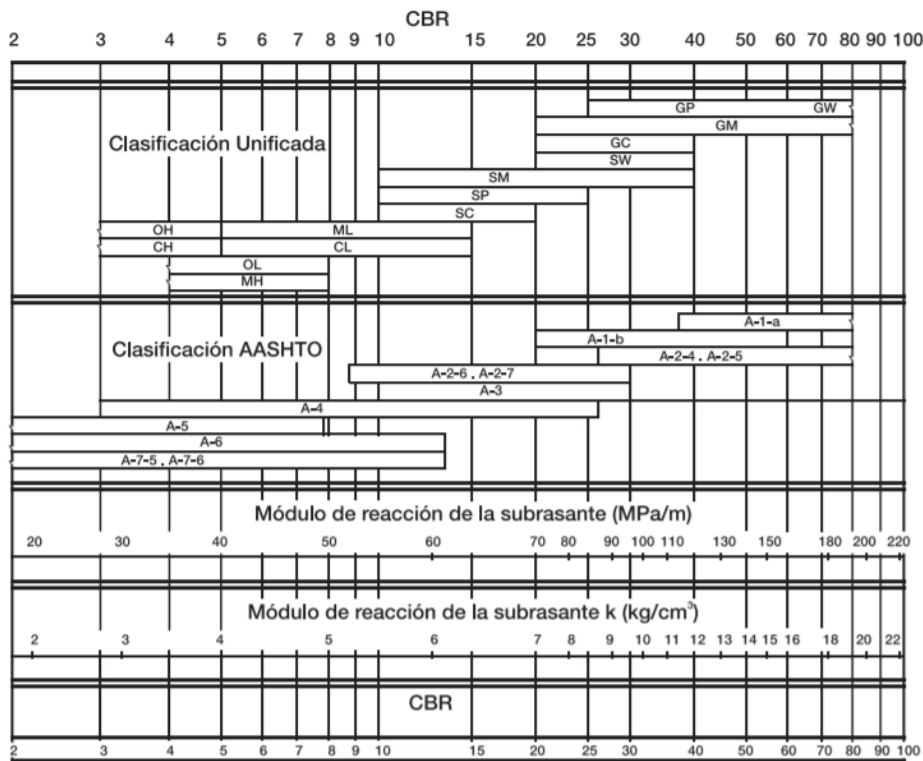
Fuente 18. Programa EverFE 2.24.

2.5. Correlaciones entre el módulo de reacción ($K_{\text{COMBINADO}}$) y el CBR.

Ya que representa dificultada y es costoso el ensayo de placa directa, el cual sirve para la determinación del módulo de reacción K . Se admiten para el diseño de pavimentos rígidos las siguientes correlaciones entre el CBR y el módulo de reacción K :

- **Correlación ábaco de la metodología de la PCA:** esta correlación es desarrollada por la PCA y se encuentra descrita en el libro “Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito” del INVIAS (ver tabla 6).

Tabla 6 Relación entre la clasificación del suelo y los valores de CBR y K



Fuente 19. INVIAS. Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. ICPC. Colombia, 2008. P. 77.

- **Formulas:** a través de las siguientes formulas se hallan las correlaciones entre el módulo de reacción K y el CBR, las formulas se tomaron del libro "Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras, volumen 1" de Carlos Hernando Higuera Sandoval. Las formulas son las siguientes:

Para valores de CBR < 10%:

$$K\left(\frac{MPa}{m}\right) = 2,55 + 52,5 \log(CBR) \quad \text{Ó} \quad K\left(\frac{kg}{cm^3}\right) = 0,255 + 5,15 \log(CBR)$$

Para valores de CBR > 10%:

$$K\left(\frac{MPa}{m}\right) = 46 + 9,08[\log(CBR)]^{4,34} \quad \text{Ó} \quad K\left(\frac{kg}{cm^3}\right) = 4,51 + 0,89[\log(CBR)]^{4,34}$$

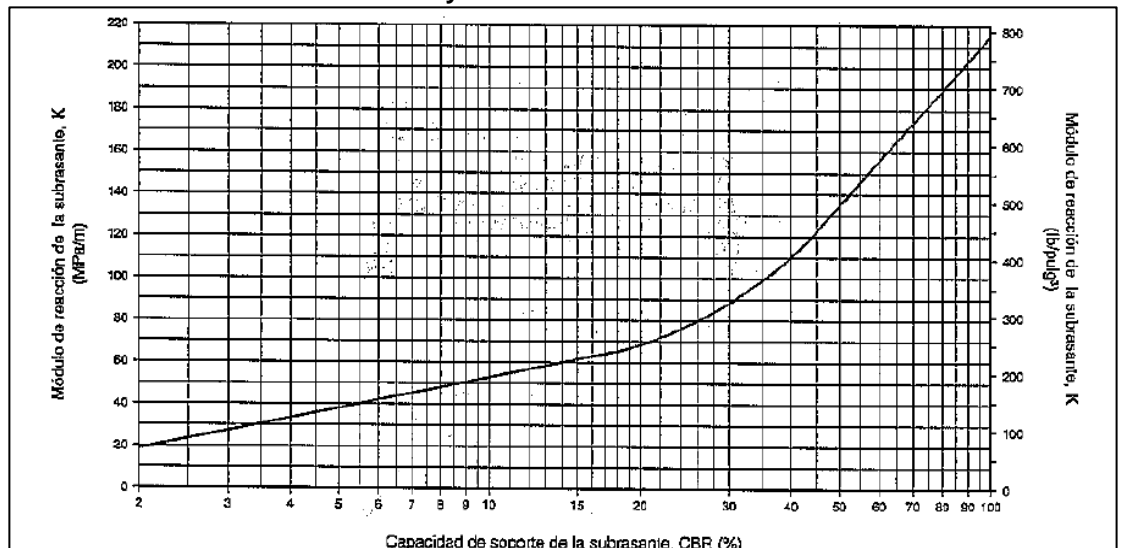
Donde:

K: módulo de reacción de la subrasante

CBR: capacidad de soporte de la subrasante (%)

- **Gráfica O'flaherty:** por medio de la **gráfica 5** se hallan las correlaciones entre el módulo de reacción K y el CBR, la gráfica se tomó del libro “Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras, volumen 1” de Carlos Hernando Higuera Sandoval.

Gráfica 5. Relación entre el CBR y el módulo de reacción de la subrasante



Fuente 20. HIGUERA, Carlos Hernando. Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. 1a ED. COLOMBIA: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2010, p 150

3. METODOLOGIA

3.1. RECOLECCIÓN DE DATOS, METODOS Y PROGRAMAS

Para el desarrollo del proyecto fue necesaria la recolección el siguiente tipo de información:

3.1.1. Datos

3.1.1.1. Transito promedio diario (TPD)

Estos datos fueron solicitados directamente a la empresa de transporte masivo TransMilenio por medio de una carta que fue radicada en las oficinas de dicha empresa (ver ANEXO J).

3.1.1.2. Parámetros de diseño troncales

Estos datos fueron consultados y descargados directamente de la página del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). [Bibliografía](#)

Los datos obtenidos de los informes de diseño de las troncales del sistema de transportes masivo TransMilenio fueron los siguientes (ver tabla 7):

Tabla 7 Datos sobre dimensionamiento de las losas de pavimento rigido de las troncales de TransMilenio

			TRONCAL				
			AMÉRICAS	CARRERA DECIMA	CALLE SEXTA	AVENIDA SUBA	
1. CARACTERÍSTICAS SUBRASANTE-SUBBASE	KCOMBINADO (MPa/m)		MÁXIMO	80	91	115	123
			MÍNIMO	80	60	110	90
2. TRANSITO	REPETICIONES ESPERADAS	CARGAS POR EJE	7,5 t	20.074.079	21.004.759	23.040.288	18.365.543
			12,5 t	40.148.157	42.009.518	48.591.375	36.731.086
3. PARÁMETROS DE DISEÑO	FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGA			1,2	1,2	1,2	1,2
	FACTOR DE MAYORACIÓN DE REPETICIONES			1,0	1,1	1,1	1,0
	MR (MPa)			5,0	4,5	4,5	5,0
	BERMA			SI	NO	NO	NO
	PASADORES			SI	SI	SI	SI
	CONSUMO MÁXIMO ADMISIBLE		FATIGA (%)	100	100	100	100
EROSIÓN (%)			500	150	100	500	
ESPESORES DE LA LOSA DE PAVIMENTO RÍGIDO ACTUAL (cm)				23,5	31	32	27

Para las troncales estudiadas los espesores de las losas de pavimento rígido actuales, fueron calculados por medio de la metodología de la PCA.

En el desarrollo del proyecto solo se tendrán en cuenta los valores tanto de $K_{\text{COMBINADO}}$ y repeticiones esperadas con los cuales se hallan los espesores máximos de las losas, esto para un mejor análisis comparativo.

3.1.2. Métodos

3.1.2.1. Guide to pavement technology Part 2 Pavement Structural Design

Este método fue solicitado a Austroads (Organización de pico de las agencias de transporte por carreteras y del tráfico de Australia) quienes son los desarrolladores del mismo, con fines de uso educativo. **Bibliografía**

Este método contiene procedimientos para el diseño de pavimentos rígidos que consisten en materiales, como el hormigón, proporciona orientación sobre cómo diseñar proyectos para una fiabilidad deseada de durar más que el tráfico de diseño y comprende la evaluación de los parámetros de entrada necesarios para el diseño, métodos de diseño de pavimentos rígido.

3.1.3. Programas

3.1.3.1. EverFE

Este programa se solicitado a la Universidad de Maine quienes son los desarrolladores del mismo, con fines educativos.

Es un programa de análisis de elementos finitos 3D, para simular la respuesta de los sistemas de pavimento rígidos simplemente unidos (JPCP) a las cargas de los ejes ya los efectos ambientales. EverFE es útil tanto para los investigadores de pavimento rígido y diseñadores que deben realizar ya sea complejo no lineal o esfuerzo lineal simple análisis de JPCP. EverFE está disponible gratuitamente en este sitio web a aquellos usuarios interesados, y se instala fácilmente en cualquier equipo con Windows NT4.0, Windows 2000 o XP.

3.2. CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE REACCIÓN ($K_{\text{COMBINADO}}$) Y EL CBR.

Para el proyecto se realiza este tipo de correlación puesto que en la metodología de Austroads es necesario trabajar con el CBR.

Ya que en la recolección de datos y parámetros no se encontraron los correspondientes al CBR, entonces se realiza una correlación con la cual se calcula el BCR partir del Módulo de reacción ($K_{\text{COMBINADO}}$). Para ello se determinan cuál de las tres correlaciones descritas en el numeral 2.5 da valores los valores más aproximados tanto para el esfuerzo equivalente como para el factor de erosión.

Para determinar la correlación que más se ajuste a las metodologías se realizó una comparación entre los valores de los esfuerzos equivalentes y los factores de erosión de la metodología de la PCA y Austroads, y plantando así una línea de tendencia, se procede a realizar los tres tipos de cálculos de las correlaciones y se hace una comparación con resultados de obtenidos por cada tipo de correlación propuesta. Con los calculados entre la metodología de la PCA y Austroads.

3.3. CARGAS POR EJE

Se tomaron cargas por ejes descritas en la resolución 005411 del 2007 del ministerio de transportes, en la cual se establecen las distribuciones de cargas para vehículos articulados del sistema de transporte masivo TransMilenio, son:

- Eje direccional: 7,5 t
- Eje intermedio: 12,5 t
- Eje trasero: 12,5 t

3.4. CONFIGURACIONES PROPUESTAS PARA LOS GRUPOS DE EJES

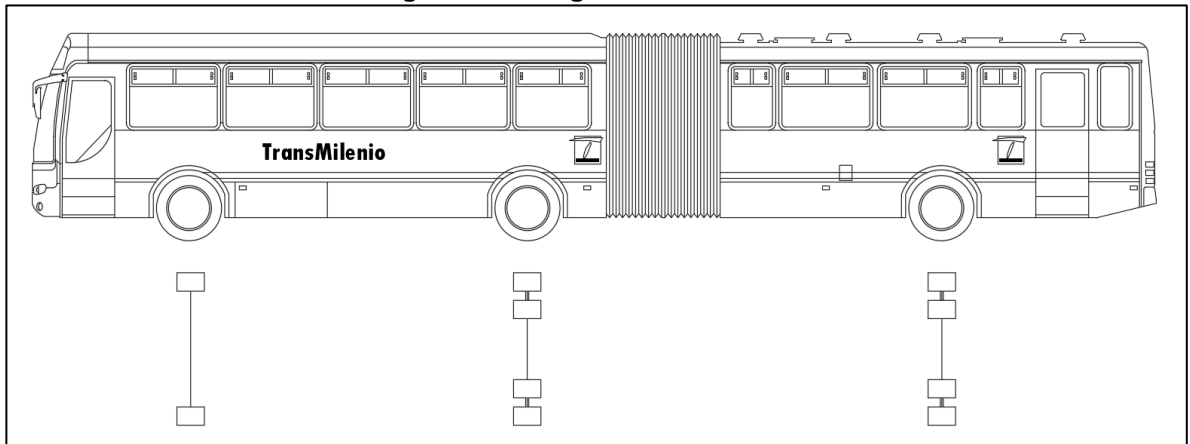
Para realizar los dimensionamientos de las losas de pavimento rígido, se plantean las siguientes configuraciones de grupos de ejes:

3.4.1. Configuración bus actual

El bus actual presenta la siguiente configuración de grupos de ejes descrito a continuación (ver Imagen 13):

- Eje direccional: Eje simple de llanta sencilla.
- Eje intermedio: Eje simple de llanta doble.
- Eje trasero: Eje simple de llanta doble.

Imagen 11. Configuración bus actual.



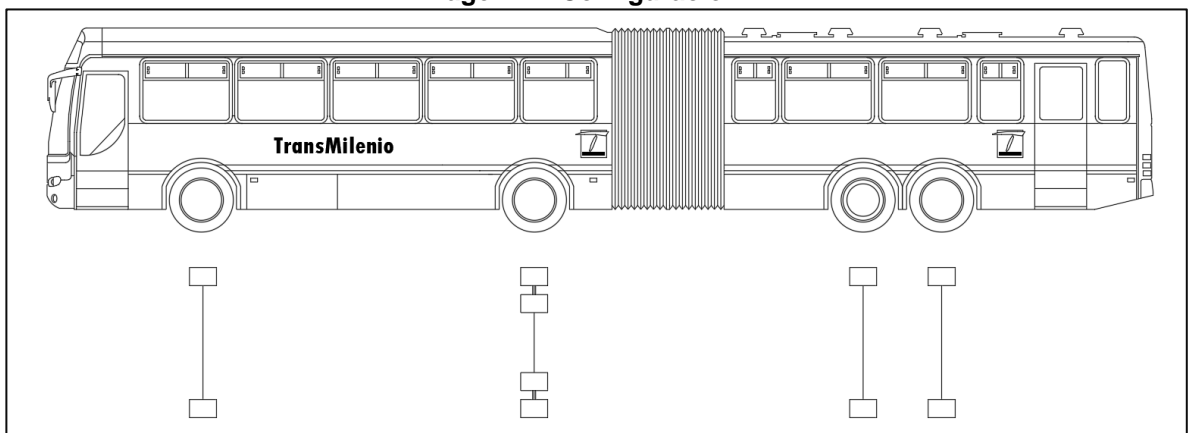
Fuente 21. Autoría propia.

3.4.2. Configuración 1

Presenta la siguiente configuración de grupos de ejes descrito a continuación (ver Imagen 14):

- Eje direccional: Eje simple de llanta sencilla.
- Eje intermedio: Eje simple de llanta doble.
- Eje trasero: Eje tándem de llanta sencilla.

Imagen 12. Configuración 1.



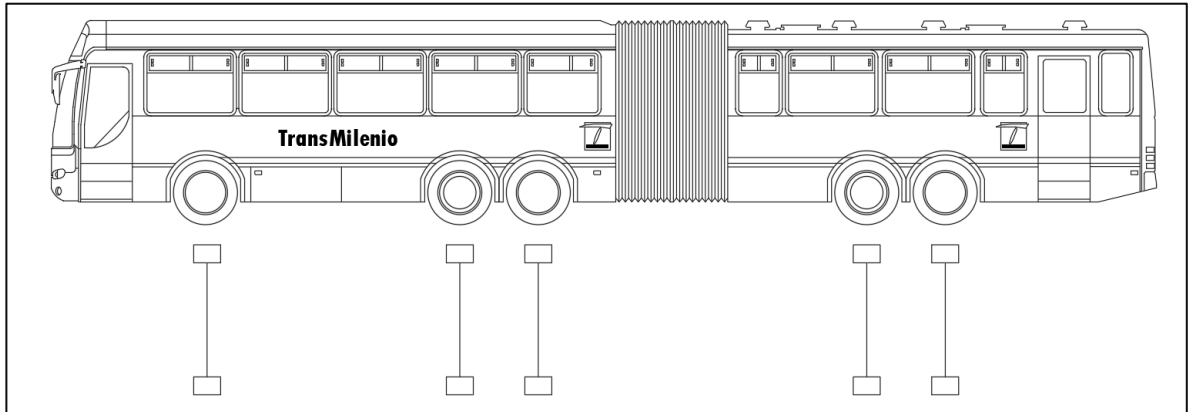
Fuente 22. Autoría propia.

3.4.3. Configuración 2

Presenta la siguiente configuración de grupos de ejes descrito a continuación (ver Imagen 15):

- Eje direccional: Eje simple de llanta sencilla.
- Eje intermedio: Eje tándem llanta sencilla.
- Eje trasero: Eje tándem llanta sencilla.

Imagen 13. Configuración 2.



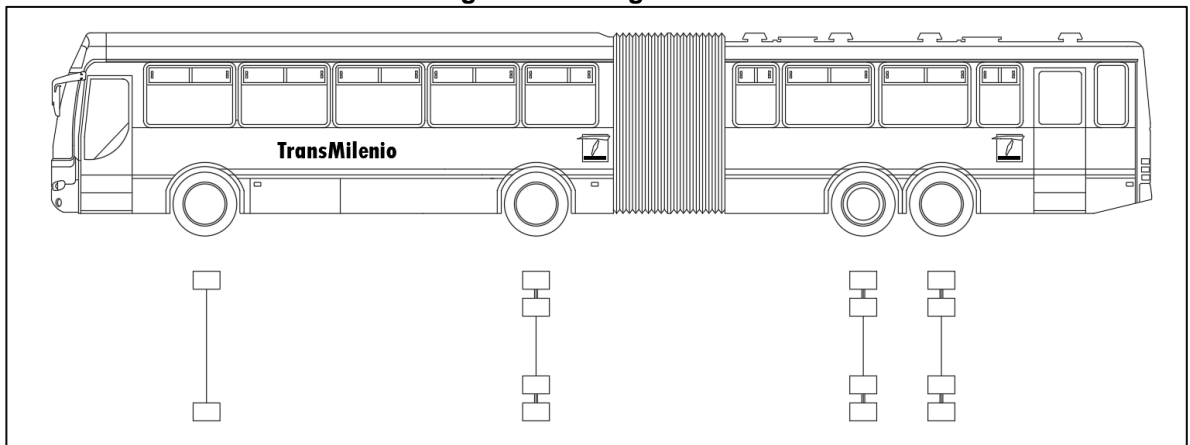
Fuente 23. Autoría propia.

3.4.4. Configuración 3

Presenta la siguiente configuración de grupos de ejes descrito a continuación (ver Imagen 16):

- Eje direccional: Eje simple de llanta simple.
- Eje intermedio: Eje simple llanta doble.
- Eje trasero: Eje tándem llanta doble.

Imagen 14. Configuración 3.



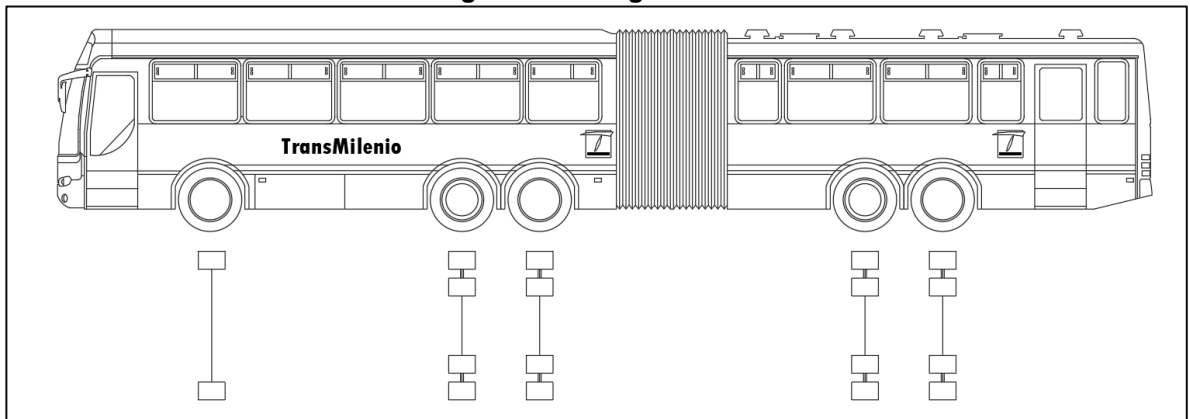
Fuente 24. Autoría propia.

3.4.5. Configuración 4

Presenta la siguiente configuración de grupos de ejes descrito a continuación (ver Imagen 17):

- Eje direccional: Eje simple de llanta sencilla.
- Eje intermedio: Eje tándem de llanta doble.
- Eje trasero: Eje tándem de llanta doble.

Imagen 15. Configuración 4.



Fuente 25. Autoría propia.

3.5. MODELACION DE LAS ESTRUCTURAS METODOLOGIA PCA

La estructura del pavimento se modeló con el programa BS-PCA que se basa en la metodología de la Portland Cement Association (PCA).

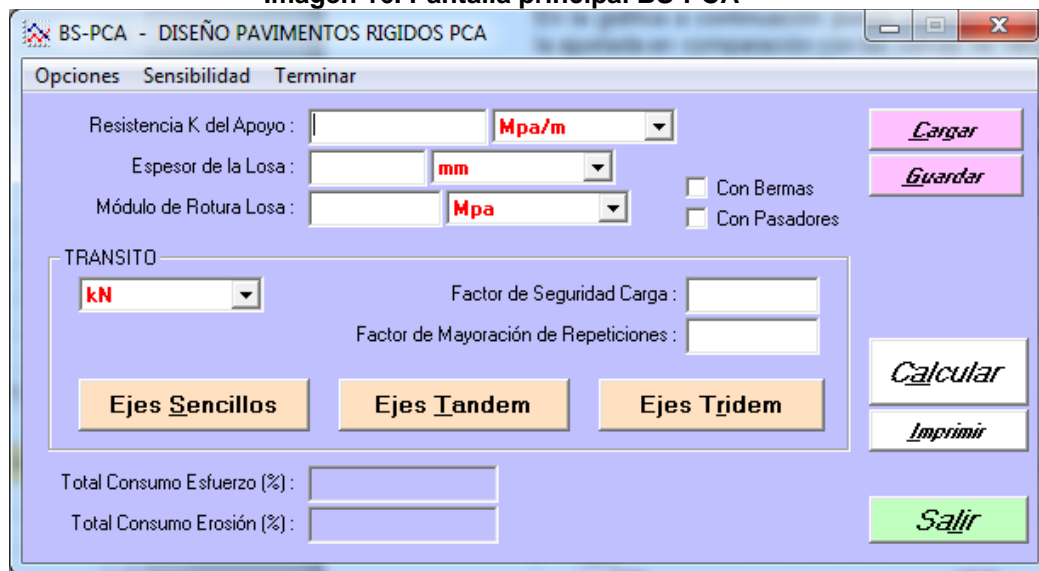
Para la modelar las estructuras de pavimento con ayuda del programa BS-PCA se utilizan los siguientes parámetros definidos:

- Repeticiones Esperadas de los ejes de 7,5 y 12,5 t
- Módulo de Rotura del concreto(MR)
- Módulo de reacción ($K_{\text{COMBINADO}}$).
- Factor de Seguridad de Carga (FSC)
- Factor de Mayoración de repeticiones (FMR)
- Si la estructura tiene o no Berma
- Si la estructura tiene o no Pasadores.
- Criterios del consumo de erosión y de fatiga (%)

Tabla 8. Parámetros de modelación metodología de la PCA.

				TRONCAL			
				AMÉRICAS	CARRERA DECIMA	CALLE SEXTA	AVENIDA SUBA
1. CARACTERÍSTICAS SUBRASANTE-SUBBASE	$K_{COMBINADO}$ (MPa/m)			80	63	110	90
2. TRANSITO	REPETICIONES ESPERADAS	CARGAS POR EJE	7,5 t	20.074.079	21.004.759	23.040.288	18.365.543
			12,5 t	40.148.157	42.009.518	48.591.375	36.731.086
3. PARÁMETROS DE DISEÑO	FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGA			1,2	1,2	1,2	1,2
	FACTOR DE MAYORACION DE REPETICIONES			1,0	1,1	1,1	1,0
	MÓDULO DE ROTURA (MPa)			5,0	4,5	4,5	5,0
	BERMA			SI	NO	NO	NO
	PASADORES			SI	SI	SI	SI
	CONSUMO MÁXIMO ADMISIBLE		FATIGA (%)	100	100	100	100
EROSIÓN (%)			500	150	100	500	

Imagen 16. Pantalla principal BS-PCA



Fuente 26. Programa EverFE 2.24.

Se abre el programa y se ingresan los valores en las casillas correspondientes a cada dato solicitado (ver tabla 9), una vez ingresados los datos, se ingresa de manera iterativa los espesores de la losa de diseño y se calcula, una vez corrido el programa se verifican los criterios de consumo de erosión y de fatiga no superen los máximos admitidos. Cuando el espesor ingresado cumpla con los parámetros de erosión y de fatiga, entonces dicho valor será el utilizado como espesor de diseño de la troncal.

Para el análisis por la metodología de la PCA se realizan las corridas con las siguientes configuraciones de grupos de ejes:

1.

- Eje direccional: sencilla
- Eje intermedio: sencilla
- Eje trasero: tándem

2.

- Eje direccional: sencilla
- Eje intermedio: tándem
- Eje trasero: tándem

3.6. ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS POR METODOLOGÍA DE AUSTRROADS

Este método empírico se realiza a través de iteraciones, las cuales se hacen cambiando los espesores de la losa y verificando que los parámetros tanto de fatiga como de erosión no sobrepasen los máximos permitidos.

Para el desarrollo de esta metodología se deben tener presentes los siguientes parámetros y datos:

- Si la estructura tiene o no pasadores.
- Si la estructura tiene o no bermas.
- Factor de seguridad de carga (FSC).
- Factor de mayoración de repetición (FMR).
- CBR efectivo.
- Espesor de la losa.
- Módulo de rotura del concreto (MR).
- Grupo de ejes de los vehículos (eje simple de llanta sencilla, eje simple llanta doble, eje tándem de llanta sencilla, eje tándem de llanta doble).
- Carga por eje.
- Repeticiones esperadas.

A continuación, se presentan los datos y parámetros obtenidos para el análisis por cada troncal seleccionada.

Tabla 9. Parámetros para la metodología de Austroads.

				TRONCAL			
				AMÉRICAS	CARRERA DECIMA	CALLE SEXTA	AVENIDA SUBA
1. CARACTERÍSTICAS SUBRASANTE-SUBBASE	CBR (%)			24	14	36	27
2. TRANSITO	REPETICIONES ESPERADAS	CARGAS POR EJE	7,5 t	20.074.079	21.004.759	23.040.288	18.365.543
			12,5 t	40.148.157	42.009.518	48.591.375	36.731.086
3. PARÁMETROS DE DISEÑO	FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGA			1,2	1,2	1,2	1,2
	FACTOR DE MAYORACIÓN DE REPETICIONES			1,0	1,1	1,1	1,0
	MR (MPA)			5,0	4,5	4,5	5,0
	BERMA			SI	NO	NO	NO
	PASADORES			SI	SI	SI	SI
	CONSUMO MÁXIMO ADMISIBLE		FATIGA (%)	100	100	100	100
EROSIÓN (%)			500	150	100	500	

Se programa una hoja de cálculo con las formulas dadas en la guía de pavimentos rígidos de Austroads en el programa Excel, para los análisis se toman los datos y parámetros respectivos a cada troncal descritos anteriormente en la tabla 7. Con los datos ingresados se realiza un cálculo de espesores variando la configuración de los ejes de tal manera como se describen en el numeral 3.3. A continuación, se presentan las configuraciones utilizadas para los cálculos de espesores por esta metodología:

- Configuración bus actual
- Configuración 1
- Configuración 2
- Configuración 3
- Configuración 4

Posteriormente, se iteran los espesores de tal manera que los consumos de erosión y fatiga no sobrepasen los máximos permítios, si esto se cumple entonces el espesor ingresado será el espesor de diseño.

Para este análisis se diseñan dos espesores uno de ellos se diseña verificando solo los consumos por erosión y el otro se realiza verificando solo los consumos por fatiga. Esto para realizar un análisis comparativo entre los dos tipos de consumo y verificar que tipo de configuración de ejes es el más y menos favorable para cada consumo. Esto es posible ya que esta metodología nos permite discriminar entre configuración de ejes es decir si los ejes son: simples de llanta sencilla, simple de llanta doble, tándem de llanta sencilla, y tándem de llanta doble.

NOTA: Ya que la metodología Austroads utiliza CBR se realiza las combinaciones del Kcombinado esta conversión se realiza por medio de los ábacos presentados por la metodología de la PCA (ver numeral 3.2.). Y aunque Austroads no utiliza factor mayoración se ingresa debido a que los diseños de las distintas troncales poseen uno y lo que se quiere es realizar una comparación tomando los mismos parámetros tanto para PCA como para Austroads.

3.7. COMPARACIÓN DE RESULTADOS METODOLOGÍA PCA CON LA METODOLOGÍA DE AUSTROADS

Se realiza una comparación de los esfuerzos equivalentes y los factores de erosión entre los datos arrojados por la metodología PCA y la metodología de Austroads.

Para ello, se realiza un análisis por las dos metodologías utilizando únicamente los datos descritos en la tabla 8, con los datos obtenidos se procede a realizar el análisis correspondiente a cada metodología siguiendo los pasos descritos en los numerales 3.5 y 3.6 respectivamente, a diferencia de los cálculos realizados en los numerales mencionados se da un espesor y no se verificaron consumos de erosión, fatiga, no se tienen en cuenta las cargas por ejes y repeticiones máximas admisibles.

Con los resultados obtenidos se realiza una comparación donde se verifica que tanto los esfuerzos equivalente y factor de erosión sean semejantes entre las dos metodologías tanto de la PCA, como Austroads.

NOTA: Los valores en la tabla 8, se toman a manera de ejemplo, estos se pueden variar según lo que se desee mas no pueden variar de un análisis a otro a otro únicamente varia de CBR a $K_{COMBINADO}$ o viceversa, teniendo en cuenta que será su correlación.

Tabla 10. Parámetros para la comparación.

PASADORES	SI
BERMA	SI
FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGA	1,2
MÓDULO DE ROTURA DEL CONCRETO(MPA)	5,0
CBR EFECTIVO (%)	5
$K_{COMBINADO}$ (MPa/m)	40
ESPESOR DE LA LOSA (cm)	20

3.8. MODELACION DE LAS ESTRUCTURAS POR EL PROGRAMA EVERFE 2.24

Para la modelización de las estructuras de pavimento se utilizan los siguientes parámetros definidos por la geometría de las losas de concreto hidráulico, el módulo del concreto, módulo de rotura, la relación de Poisson, la resistencia combinada de suelo ($K_{COMBINADO}$), geometría de cada tipo de eje, carga por eje y especificaciones de las dovelas.

Tabla 11. Geometría y materiales de la losa.

LARGO (mm)	3.600	4.500
ANCHO (mm)	3.600	3.600
ESPESOR (mm)	280	280
MÓDULO DE ROTURA(MPa)	4,41	4,41
MÓDULO RIGIDEZ (MPa)	29.787,70	29.787,70
POISSON (μ)	0,15	0,15
$K_{COMBINADO}$ (MPa/m)	90	90

Tabla 12. Especificaciones de las dovelas

CANTIDAD DE DOVELAS	12
DIÁMETRO (mm)	35
LONGITUD (mm)	450
SEPARACIÓN (mm)	300
MÓDULO DE RIGIDEZ (MPa)	210.000
POISSON (μ)	0,30

Tabla 13. Geometría de cada tipo de eje.

	EJE SIMPLE		EJE TANDEM	
	SAST	SADT	TAST	TADT
Carga (KN)	74	123	123	123
L (mm)	450	450	450	450
w (mm)	300	300	300	300
A (mm)	2.100	1.200	2.100	1.200
B (mm)	-	450	-	450
S (mm)	-	-	1.350	1.350

Con la información de las tablas anteriores, se realizó las modelaciones de cada losa con y sin dovelas y con las distintas configuraciones de eje y los datos pertinentes para cada uno.

Para la modelación de las losas de concreto hidráulico en el programa EverFE se ingresaron todos los valores necesarios que están discriminados en las tablas No. 11, 12 y 13. Una vez realizado esto, se ejecutó el programa y se obtuvieron los siguientes resultados:

- Esfuerzos máximos en la fibra superior e inferior de la losa de concreto.
- Deflexiones máximas medidas en la fibra superior de la losa.

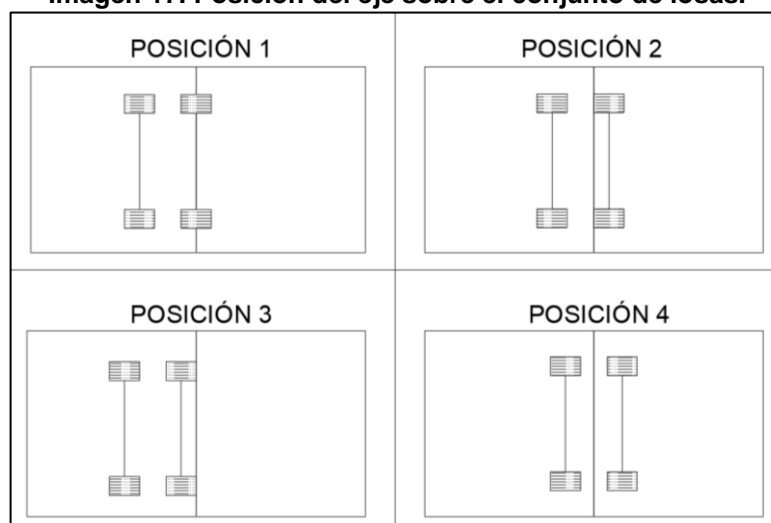
Con los resultados anteriores se procede a hacer una comparación del comportamiento de cada tipo:

- Configuración de eje
- De losas
- De si tiene o no tiene dovelas.

Con ello se entrará a determinar que configuración de ejes causa más daño en la losa, como se ve afectada la losa por su geometría o forma y como es el comportamiento de las losas con o sin dovelas.

3.8.1. Análisis de esfuerzos y deflexiones máximas según posición del eje

Imagen 17. Posición del eje sobre el conjunto de losas.



Fuente 27. Autoría propia.

4. RESULTADOS Y ANALISIS

4.1. CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE REACCIÓN ($K_{\text{COMBINADO}}$) Y EL CBR

Se presentan las correlaciones obtenidas a través de la comparación de esfuerzos equivalentes y factores de erosión, entre las dos metodologías.

Tabla 14 tendencia de correlación entre CBR Y $K_{\text{COMBINADO}}$

CBR (%)	$K_{\text{COMBINADO}}$ (MPa/m)
2	20
6	40
11	60
22	80
46	140
75	180

Los valores hallados a través de las correlaciones son:

- **ábacos de la Metodología de la PCA:**

Tabla 15 correlación CBR y $K_{\text{COMBINADO}}$ metodología de la PCA

CBR (%)	$K_{\text{COMBINADO}}$ (MPa/m)
2	19
5	40
8	50
20	70
50	140
70	179
90	210

- **Formulas:**

Tabla 16 correlación CBR y $K_{\text{COMBINADO}}$ formulas

CBR (%)	$K_{\text{COMBINADO}}$ (MPa/m)
2,06	19
5,17	40
8,01	50
18	70
52	140
72	180
90	213

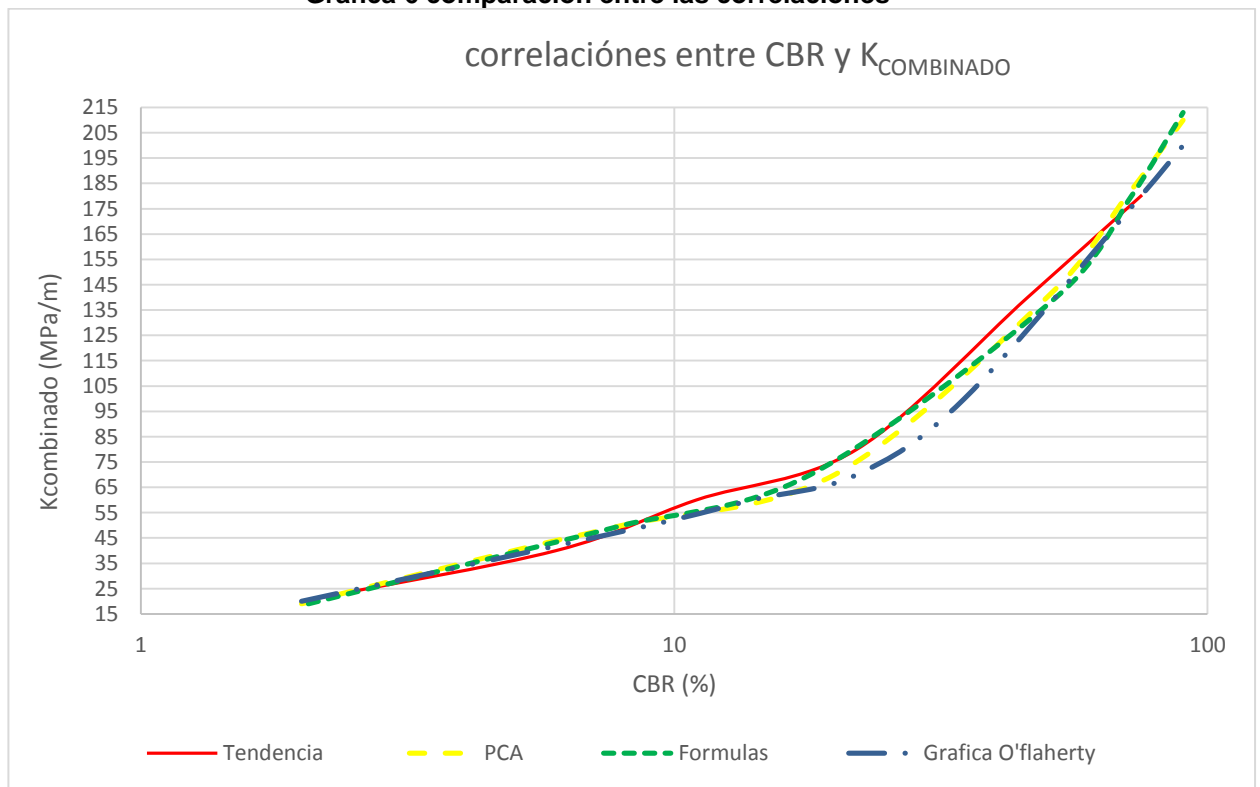
- **Grafica O'flaherty:**

Tabla 17 correlación CBR y $K_{COMBINADO}$ graficas O'flaherty

CBR (%)	$K_{COMBINADO}$ (MPa/m)
2	20
9	50
14	60
22	70
35	100
75	180
90	200

Se presentan los resultados obtenidos de las correlaciones de manera gráfica para una mejor comprensión y un mejor análisis.

Gráfica 6 comparación entre las correlaciones



Se realiza un análisis de los resultados y se concluye que de los tres tipos de correlaciones las que arrojan los datos más cercanos son la metodología de la PCA y las formulas, ya que la variación es pequeña se puede optar por cualquiera de las dos para hallar las correlaciones de CBR y $K_{COMBINADO}$. Y se descarta la

correlación de las gráficas de O'flaherty puesto que los valores varían bastante con respecto a la tendencia.

Para el desarrollo del proyecto se toma la correlación de los ábacos de la PCA.

4.2. ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS POR LA METODOLOGÍA DE LA PCA.

Se realiza la modelación de los espesores de diseño con los grupos de ejes descritos en la tabla 18. (ver ANEXO J)

Tabla 18. Espesores hallados por troncal con configuraciones de eje.

GRUPOS DE EJES	TRONCALES			
	AMÉRICAS	CARRERA DECIMA	CALLE SEXTA	AVENIDA SUBA
	ESPEORES DE LA LOSA DE PAVIMENTO RÍGIDO CALCULADA (cm)			
<ul style="list-style-type: none"> • Eje direccional: simple • Eje intermedio: simple • Eje trasero: tándem 	23	29	30	25
<ul style="list-style-type: none"> • Eje direccional: simple • Eje intermedio: tándem • Eje trasero: tándem 	16	22	23	19

- Espesores actuales de las troncales analizadas.

Tabla 19. Espesores actuales por troncal con configuración por grupo de ejes.

GRUPOS DE EJES	TRONCALES			
	AMÉRICAS	CARRERA DECIMA	CALLE SEXTA	AVENIDA SUBA
	ESPEORES DE LA LOSA DE PAVIMENTO RÍGIDO CALCULADA (cm)			
<ul style="list-style-type: none"> • Eje direccional: simple • Eje intermedio: simple • Eje trasero: simple 	23,5	31	32	27

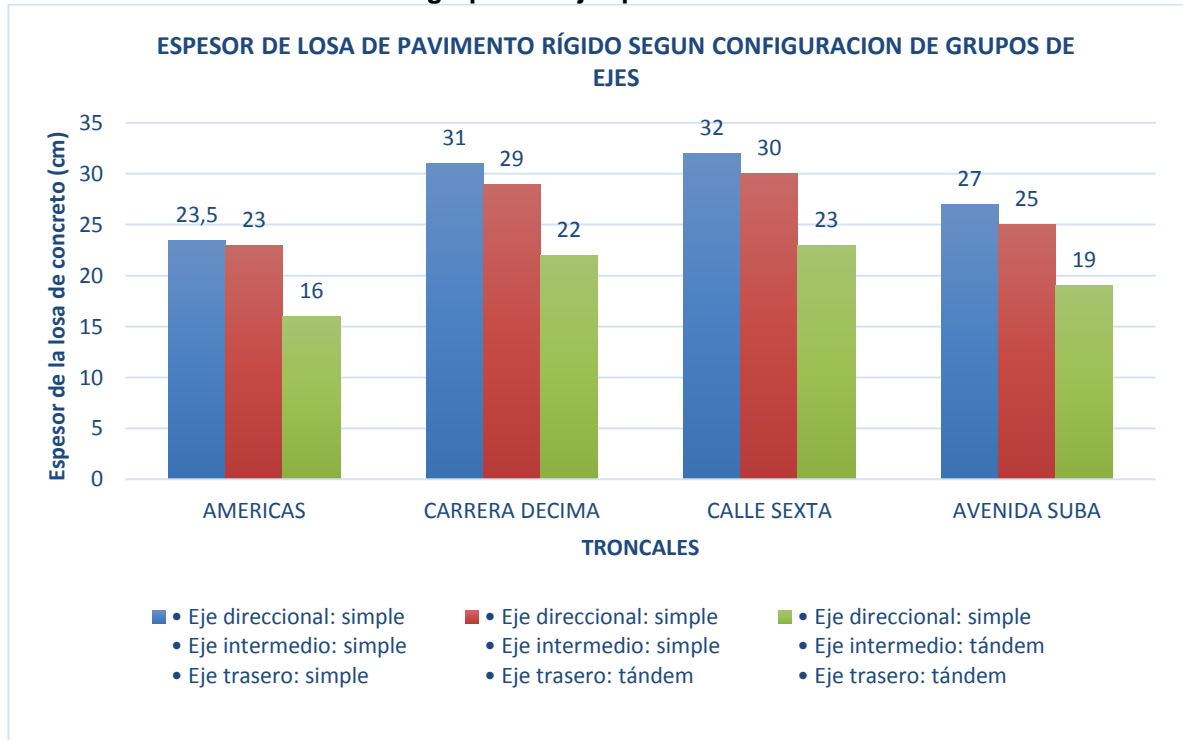
- Se realiza el análisis comparativo entre los espesores actuales y los espesores obtenidos con la variación de los ejes presentes en las configuraciones descritas.

Tabla 20. Comparación de espesores hallados con espesores actuales por troncal.

GRUPOS DE EJES	TRONCALES			
	AMÉRICAS	CARRERA DECIMA	CALLE SEXTA	AVENIDA SUBA
	ESPEORES DE LA LOSA DE PAVIMENTO RÍGIDO CALCULADA (cm)			
<ul style="list-style-type: none"> • Eje direccional: simple • Eje intermedio: simple • Eje trasero: simple 	23,5	31	32	27
<ul style="list-style-type: none"> • Eje direccional: simple • Eje intermedio: simple • Eje trasero: tándem 	23	29	30	25
<ul style="list-style-type: none"> • Eje direccional: simple • Eje intermedio: tándem • Eje trasero: tándem 	16	22	23	19

En la siguiente imagen se presentan los datos obtenidos de manera gráfica para una mejor comprensión y comparación de los resultados

Gráfica 7. Comparación de espesores de losa de pavimento rígido según configuración de grupos de ejes por troncal.



Se realizó el análisis de los resultados obtenidos y se observó que se presentan variaciones decrecientes de los espesores de la losa según cada tipo de configuración de ejes: ver tabla 21.

Tabla 21. Porcentaje de disminución de espesores losa actual versus calculadas.

	% de disminución de espesores			
	AMÉRICAS	CARRERA DÉCIMA	CALLE SEXTA	AVENIDA SUBA
LOSA ACTUAL/ LOSA CALCULA 1	2,2	6,9	6,7	8,0
LOSA ACTUAL/ LOSA CALCULA 2	46,9	40,9	39,1	42,1

- Se observó que con la modelación realizada con la configuración de ejes: simple/simple/tándem la variación de espesores es baja y que esta alternativa no presenta mayores beneficios para las losas de concreto.


- Con la modelación realizada con la configuración de grupo de ejes: simple/tándem/tándem la variación de espesores es alta y que esta alternativa presenta grandes beneficios en cuanto a disminución de esfuerzos y por ello de deflexiones de las losas.

4.3. ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS POR METODOLOGÍA DE AUSTROADS

4.3.1. Dimensionamiento de losas de concreto.


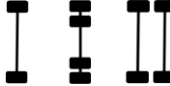
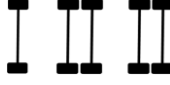
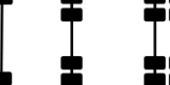
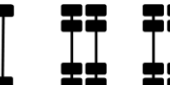
A continuación, se presentan en la tabla 16 los espesores de diseño calculados con las configuraciones descritas en el numeral 3.4, donde se presentan los resultados obtenidos de las modelaciones controlando los consumos tanto de esfuerzo y como los de fatiga, es decir que los valores no sean mayores a los establecidos. (ver ANEXO K)

Tabla 22. Espesores calculados.

	ESPESORES DE LA LOSA DE PAVIMENTO RÍGIDO CALCULADA (cm)			
	ÁMERICAS	CARRERA DECIMA	CALLE SEXTA	AVENIDA SUBA
CONFIGURACIÓN BUS ACTUAL 	24	31	31	27
CONFIGURACIÓN 1 	25	35	35	29
CONFIGURACIÓN 2 	26	37	37	31
CONFIGURACIÓN 3 	23	29	30	25
CONFIGURACIÓN 4 	18	22	21	20

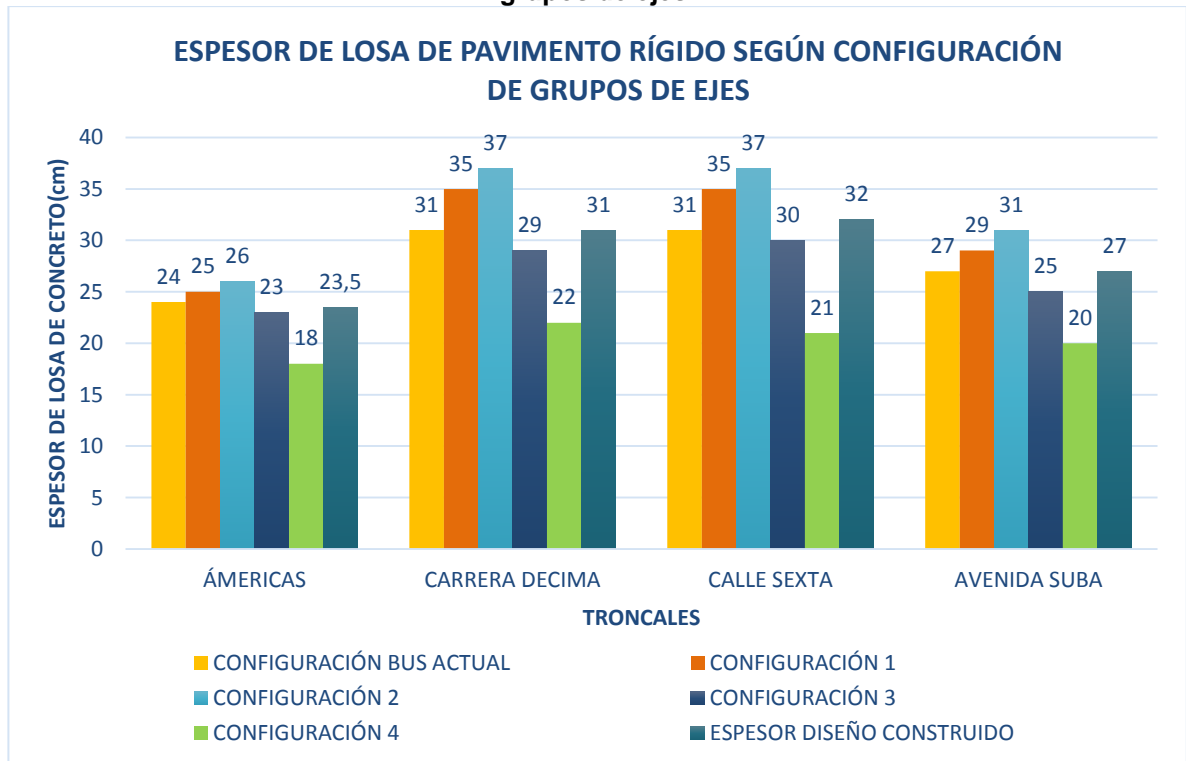
Se realiza una comparación con los espesores de las losas actuales para cada troncal, esto para realizar el análisis comparativo de la mejor configuración por medio de la metodología de Austroads y la losa actual de las troncales:

Tabla 23. Espesores de losas actuales versus espesores calculados según configuración de grupos de ejes.

	ESPESORES DE LA LOSA DE PAVIMENTO RÍGIDO CALCULADA (cm)			
	ÁMERICAS	CARRERA DECIMA	CALLE SEXTA	AVENIDA SUBA
CONFIGURACIÓN BUS ACTUAL 	24	31	31	27
CONFIGURACIÓN 1 	25	35	35	29
CONFIGURACIÓN 2 	26	37	37	31
CONFIGURACIÓN 3 	23	29	30	25
CONFIGURACIÓN 4 	18	22	21	20
ESPESOR DISEÑO CONSTRUIDO	23,5	31	32	27

En la gráfica 6, se presentan los datos obtenidos de manera gráfica para una mejor comprensión y comparación de los resultados.

Gráfica 8. Comparación de espesores de losa de pavimento rígido según configuración de grupos de ejes.



Para el análisis se realiza una comparación con el espesor de diseño construido, ya que el objetivo del proyecto es buscar una configuración de grupos de ejes con la cual se disminuyan los espesores de la losa de pavimento rígido.

Se puede observar que los espesores calculados tanto con configuración 1 y 2 dan espesores mayores por lo cual no se consideran configuraciones viables para el diseño de pavimentos rígidos. Por otro lado, se puede observar que las configuraciones: bus actual, 3 y 4, los espesores obtenidos son menores que los espesores actuales por lo cual se consideran como configuraciones favorables para el diseño de los pavimentos.

Entonces con el análisis se observa que las configuraciones en las cuales se presentan mayores espesores de la losa de pavimento rígido son aquellas en las cuales se encuentran con ejes tándem de llanta sencilla como lo son las configuraciones 1 y 2. Y se determina que en aquellas en donde la disminución de espesores es significativa es en aquellas donde se presentan configuraciones con ejes tándem de llanta doble.

De las configuraciones finalmente se concluye que la configuración más favorable es la configuración 4 pues presenta mayor disminución de espesores de la losa de pavimento rígido.

4.3.2. Dimensionamiento por fatiga.

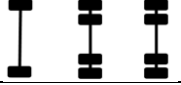
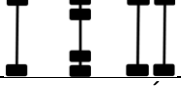


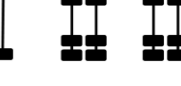
Esta verificación se realizó controlando solo los consumos de fatiga, aunque se conoce que los diseños son gobernados por los consumos de erosión, esto se realizó para comparar la diferencia de espesores. (ver ANEXO L)

Tabla 24. Espesores calculados.

	ESPEORES DE LA LOSA DE PAVIMENTO RÍGIDO CALCULADA (cm)			
	ÁMERICAS	CARRERA DECIMA	CALLE SEXTA	AVENIDA SUBA
CONFIGURACIÓN BUS ACTUAL 	22	28	26	25
CONFIGURACIÓN 1 	22	27	26	25
CONFIGURACIÓN 2 	18	22	21	20
CONFIGURACIÓN 3 	22	27	26	25
CONFIGURACIÓN 4 	18	22	21	20

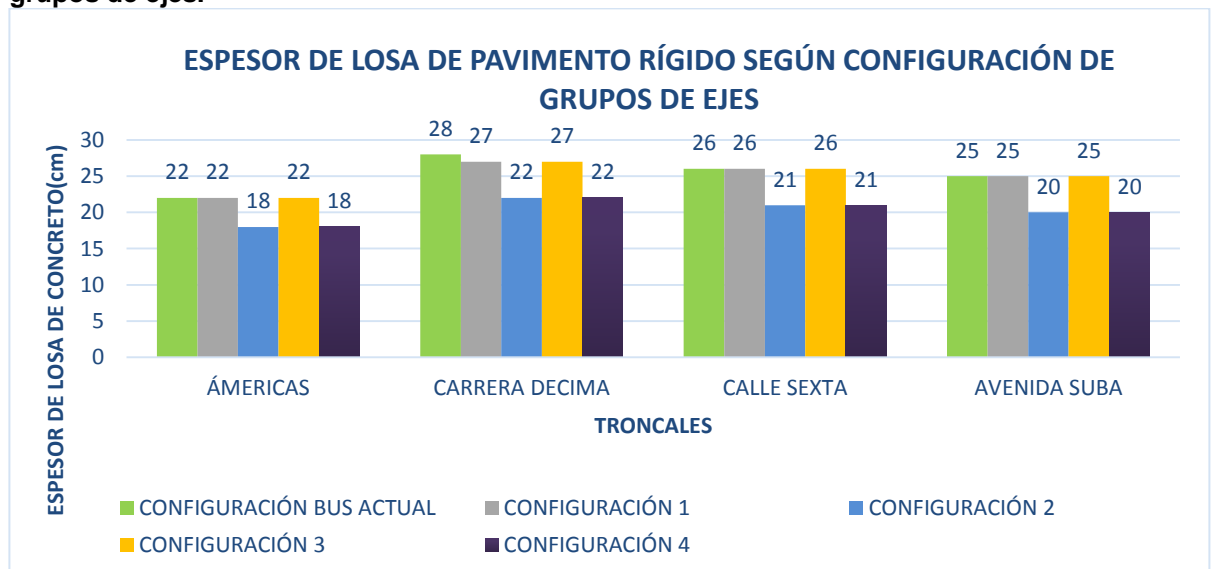
Se realiza una comparación con los espesores de las losas actuales para cada troncal, esto para realizar el análisis comparativo de la mejor configuración por medio de la metodología de Austroads y la losa actual de las troncales:

Tabla 25. Espesores de losas actuales versus espesores calculados según configuración de grupos de ejes.

	ESPESORES DE LA LOSA DE PAVIMENTO RÍGIDO CALCULADA (cm)			
	AMÉRICAS	CARRERA DECIMA	CALLE SEXTA	AVENIDA SUBA
CONFIGURACIÓN BUS ACTUAL 	22	28	26	25
CONFIGURACIÓN 1 	22	27	26	25
CONFIGURACIÓN 2 	18	22	21	20
CONFIGURACIÓN 3 	22	27	26	25
CONFIGURACIÓN 4 	18	22	21	20

En la gráfica 9, se presentan los datos obtenidos de manera gráfica para una mejor comprensión y comparación de los resultados.

Gráfica 9. Comparación de espesores de losa de pavimento rígido según configuración de grupos de ejes.



De lo anterior se observa que todas las modelaciones realizadas con las configuraciones propuestas dan espesores bajos.

Se puede determinar que los espesores diseñados con las configuraciones 1 y 3 dan espesores iguales, al igual que los espesores hallados con las configuraciones 2 y 4, al observar las configuraciones se puede concluir que, para los análisis por fatiga la configuración de las llantas es decir si los ejes son de llanta doble o de llanta sencilla, no es significativo puesto que en las configuraciones donde los resultados de espesores son iguales están compuestas de los mismos grupos de ejes pero diferentes configuraciones de grupos de llantas.

4.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS METODOLOGÍA PCA CON LA METODOLOGÍA DE AUSTRROADS

Se obtuvieron los siguientes resultados.

- Metodología de Austroads: esta metodología nos permite discriminar entre tipo de configuración de grupos de ejes y de llanta es decir si es de llanta sencilla o doble. Así con cada eje hasta llegar al eje Trídém que solo es de configuración de llanta doble. Ver tabla 26.

Tabla 26. Esfuerzos equivalentes y factores de erosión por metodología de Austroads.

CONFIGURACIÓN DE GRUPOS DE EJE	ESFUERZO EQUIVALENTE	FACTORES DE EROSIÓN
SIMPLE LLANTA SENCILLA	0,90	1,80
SIMPLE LLANTA DOBLE	1,48	2,40
TÁNDEM LLANTA SENCILLA	0,90	2,52
TÁNDEM LLANTA DOBLE	1,28	2,52
TRÍDEM LLANTA DOBLE	0,99	2,60

- Metodología de la PCA: A diferencia de la anterior en esta metodología solo permite ingresar la configuración de los ejes simples, tándem y Trídém sin especificar la configuración de llantas que posee cada uno. Ver tabla 27.

Tabla 27. Esfuerzos equivalentes y factores de erosión por metodología PCA.

CONFIGURACIÓN DE GRUPOS DE EJE	ESFUERZO EQUIVALENTE	FACTORES DE EROSIÓN
SIMPLE	1,50	2,40
TÁNDEM	1,30	2,59
TRÍDEM	1,00	2,59

Con resultados presentados se procede a realizar una comparación verificando el tipo de eje y ver si es de llanta doble o llanta sencilla. Ver tabla 22, la comparación se realiza verificando que tanto esfuerzo equivalente como factores de erosión cumplan.

Tabla 28. Espesores de losas actuales versus espesores calculados según configuración de grupos de ejes.

CONFIGURACIÓN DE EJE	METODOLOGÍA DE AUSTRROADS		METODOLOGÍA DE LA PCA	
	ESFUERZO EQUIVALENTE	FACTORES DE EROSIÓN	ESFUERZO EQUIVALENTE	FACTORES DE EROSIÓN
SIMPLE LLANTA SENCILLA	0,90	1,80	-	-
SIMPLE LLANTA DOBLE	1,48	2,40	1,50	2,40
TÁNDEM LLANTA SENCILLA	0,90	2,52	-	-
TÁNDEM LLANTA DOBLE	1,28	2,52	1,30	2,59
TRÍDEM LLANTA DOBLE	0,99	2,60	1,00	2,59

De la tabla anterior se obtiene que la configuración de llantas por grupos de ejes usada para las modelaciones por la metodología de la PCA, son:

- Simple de llanta doble.
- Tándem de llanta doble.
- Trídem de llanta doble.

Esto se concluye ya que tanto los valores de esfuerzo equivalente y factor de erosión son similares y para efectos prácticos las modelaciones tanto por metodología de la PCA y Austroads da el mismo espesor de la losa.

4.5. MODELACION DE LAS ESTRUCTURAS POR EL PROGRAMA EVERFE 2.24

4.5.1. Análisis de esfuerzos y deflexiones máximas según posición del eje

Se hace un análisis del comportamiento de un conjunto de losas de concreto conectadas entre sí por pasadores de transferencia de carga cuando es sometida a una carga ejercida por un Eje Tándem de Llanta sencilla (TAST) en diferentes posiciones con el fin de evidenciar en qué lugar de las dos losas el eje causa mayores esfuerzos y deflexiones.

Para poder demostrar estos efectos, se ubicó el eje en cuatro posiciones diferentes con la finalidad de hallar cuál de estas es la más crítica para la losa.

A continuación, se resumen los esfuerzos y deflexiones que son generados por el eje sobre la losa y obtenidos de la modelación en el programa EverFE.

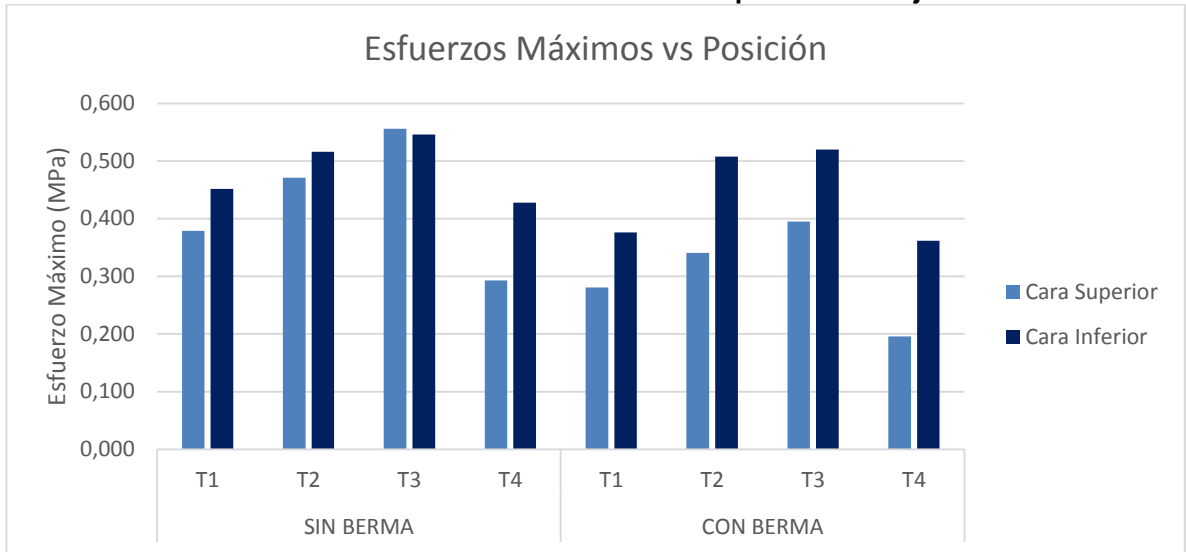
Tabla 29. Esfuerzos y deflexiones máximas sin berma

Ubicación		SIN BERMA			
		Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4
Cara Superior	Esfuerzo Máximo (MPa)	0,379	0,471	0,556	0,293
Cara Inferior	Esfuerzo Máximo (MPa)	0,452	0,516	0,546	0,428
Deflexión Máxima (mm)		0,376	0,404	0,421	0,335

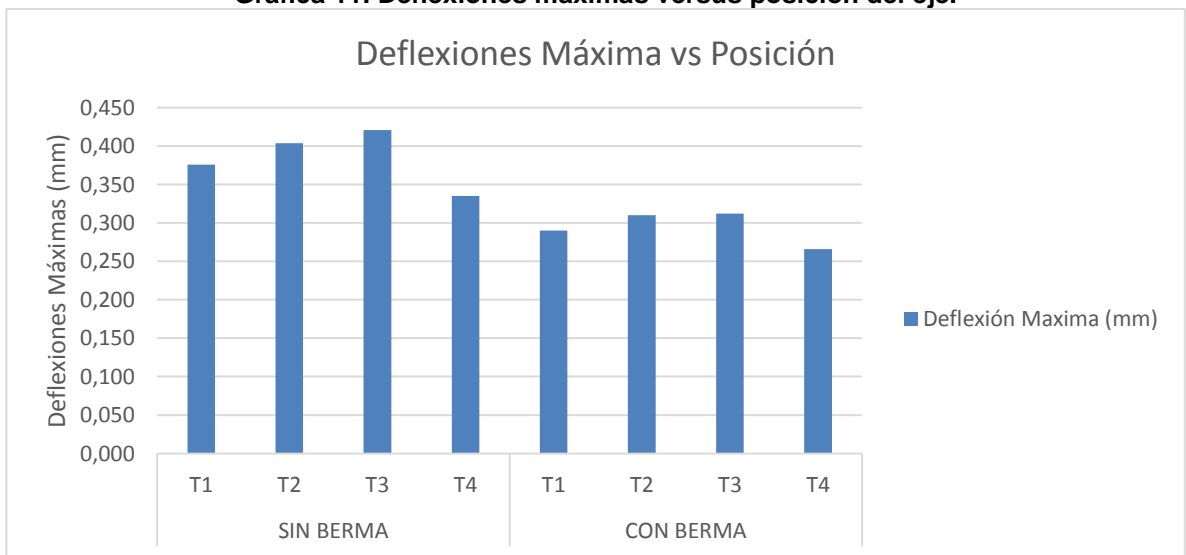
Tabla 30. Esfuerzos y deflexiones máximas con berma

Ubicación		CON BERMA			
		Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4
Cara Superior	Esfuerzo Máximo (MPa)	0,281	0,341	0,395	0,196
Cara Inferior	Esfuerzo Máximo (MPa)	0,376	0,508	0,520	0,362
Deflexión Máxima (mm)		0,290	0,310	0,312	0,266

Gráfica 10 Esfuerzos máximos versus posición del eje.



Gráfica 11. Deflexiones máximas versus posición del eje.



Como se puede observar en las tablas, los valores que están resaltados son los esfuerzos y deflexiones máximas que experimenta la losa de concreto al modelarla con las diferentes posiciones y Eje Tándem de Llanta sencilla (TAST), estos esfuerzos y deflexiones se pueden observar en los diagramas generados por el programa (ver ANEXO M).

El análisis nos lleva a concluir que cuando la carga ejercida por el eje está estática y ubicada en todo el borde de la junta de las dos losas, genera mayores esfuerzos y deflexiones ya que todo el peso está concentrado en una sola losa.

4.5.2. Reducción de los esfuerzos y disminución de las deflexiones con y sin berma.

Se hizo una demostración del comportamiento de una losa de concreto que contiene berma dentro de su estructura versus una sin berma, con el fin de evidenciar los efectos positivos que conlleva tener en cuenta ésta en una estructura de pavimento rígido.

Para poder demostrar estos efectos, se hizo una comparación de los esfuerzos y deflexiones de una losa de concreto generados por un eje dejando la llanta a una distancia de 45 cm del borde de la losa de concreto (con berma) o dejando la llanta a una distancia de 15 cm del borde de la losa de concreto (sin berma). Para esto, se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: una losa cuadrada de 3,6 metros de lado y una losa rectangular de 3,6 metros de ancho por 4,5 metros de largo, la existencia de los pasadores y la variación de cada tipo de eje.

A continuación, se resumen los esfuerzos y deflexiones que son generados por cada tipo de eje sobre la losa y obtenidos de la modelación en el programa EverFE.

4.5.2.1. Reducción de esfuerzos

En las tablas 31 a 34, se presentan los esfuerzos máximos actuantes sobre la losa, generados por los tipos de ejes que fueron tenidos en cuenta para este proyecto.

Tabla 31. Esfuerzos producidos por Eje Simple de Llanta sencilla.

		LOSA CUADRADA				LOSA RECTANGULAR			
		SIN PASADORES		CON PASADORES		SIN PASADORES		CON PASADORES	
Distancias del borde (mm)		150	450	150	450	150	450	150	450
CARA SUPERIOR	Esfuerzo máximo (MPa)	0,637	0,472	0,560	0,413	0,652	0,489	0,552	0,409
CARA INFERIOR	Esfuerzo máximo (MPa)	0,645	0,644	0,628	0,606	0,655	0,654	0,637	0,605

Tabla 32. Esfuerzos producidos por Eje Doble de Llanta sencilla.

		LOSA CUADRADA				LOSA RECTANGULAR			
		SIN PASADORES		CON PASADORES		SIN PASADORES		CON PASADORES	
Distancias del borde (mm)		150	450	150	450	150	450	150	450
CARA SUPERIOR	Esfuerzo máximo (MPa)	0,887	0,734	0,549	0,422	0,912	0,761	0,577	0,449
CARA INFERIOR	Esfuerzo máximo (MPa)	0,718	0,678	0,634	0,608	0,727	0,670	0,642	0,609

Tabla 33. Esfuerzos producidos por Eje Tándem de Llanta sencilla.

		LOSA CUADRADA				LOSA RECTANGULAR			
		SIN PASADORES		CON PASADORES		SIN PASADORES		CON PASADORES	
Distancias del borde (mm)		150	450	150	450	150	450	150	450
CARA SUPERIOR	Esfuerzo máximo (MPa)	0,565	0,385	0,556	0,395	0,561	0,381	0,544	0,390
CARA INFERIOR	Esfuerzo máximo (MPa)	0,556	0,551	0,546	0,520	0,564	0,560	0,555	0,518

Tabla 34. Esfuerzos producidos por Eje Tándem de Llanta Doble.

		LOSA CUADRADA				LOSA RECTANGULAR			
		SIN PASADORES		CON PASADORES		SIN PASADORES		CON PASADORES	
Distancias del borde (mm)		150	450	150	450	150	450	150	450
CARA SUPERIOR	Esfuerzo máximo (MPa)	0,278	0,233	0,244	0,180	0,288	0,245	0,240	0,182
CARA INFERIOR	Esfuerzo máximo (MPa)	0,375	0,371	0,333	0,333	0,375	0,365	0,329	0,330

Como se puede observar en las tablas, los valores que están resaltados en amarillo son los esfuerzos máximos que experimenta la losa de concreto al modelarla con los tipos de ejes considerados. Los esfuerzos máximos en el programa EverFE son esfuerzos a tracción que están dados en la mayoría de veces en la cara inferior de la losa, algunos esfuerzos máximos se dan en la cara superior por motivos de la composición del eje ya que la carga está distribuida de manera diferente dependiendo del tipo de eje, estos esfuerzos se pueden observar en los resultados generados por el programa (ver ANEXO N).

4.5.2.1.1. Porcentaje de reducción de esfuerzos

A continuación, en las tablas 35 a 38, se presenta la reducción en porcentaje de los esfuerzos en cada cara de la losa, con el fin de tener una mejor comparación del comportamiento de la berma y la importancia de la existencia de ésta en una losa de concreto. Ésta reducción se logra evidenciar haciendo una relación del mínimo esfuerzo dado por la losa con berma versus el esfuerzo máximo dado por la losa sin berma.

Tabla 35. Porcentaje de esfuerzos producidos por Eje Simple de Llanta Sencilla.

		Porcentaje de reducción de esfuerzo con berma vs sin berma	
		SIN PASADORES	CON PASADORES
CARA SUPERIOR	LOSA CUADRADA	25,9%	26,3%
	LOSA RECTANGULAR	25,0%	25,9%
CARA INFERIOR	LOSA CUADRADA	0,2%	3,5%
	LOSA RECTANGULAR	0,2%	5,0%

Tabla 36. Porcentaje de esfuerzos producidos por Eje Simple de Llanta Doble.

		Porcentaje de reducción de esfuerzo con berma vs sin berma	
		SIN PASADORES	CON PASADORES
CARA SUPERIOR	LOSA CUADRADA	17,2%	23,1%
	LOSA RECTANGULAR	16,6%	22,2%
CARA INFERIOR	LOSA CUADRADA	5,6%	4,1%
	LOSA RECTANGULAR	7,8%	5,1%

Tabla 37. Porcentaje de esfuerzos producidos por Eje Tándem de Llanta Sencilla.

		Porcentaje de reducción de esfuerzo con berma vs sin berma	
		SIN PASADORES	CON PASADORES
CARA SUPERIOR	LOSA CUADRADA	31,9%	29,0%
	LOSA RECTANGULAR	32,1%	28,3%
CARA INFERIOR	LOSA CUADRADA	0,9%	4,8%
	LOSA RECTANGULAR	0,7%	6,7%

Tabla 38. Porcentaje de esfuerzos producidos por Eje Tándem de Llanta Doble.

		Porcentaje de reducción de esfuerzo con berma vs sin berma	
		SIN PASADORES	CON PASADORES
CARA SUPERIOR	LOSA CUADRADA	16,2%	26,2%
	LOSA RECTANGULAR	14,9%	24,2%
CARA INFERIOR	LOSA CUADRADA	1,1%	0,0%
	LOSA RECTANGULAR	2,7%	0,0%

Podemos observar que se da una reducción del 16% al 32% del esfuerzo que se es producido en todo el borde de la losa a comparación de una distancia de 45 centímetros de la llanta al borde ya sea en la losa cuadrada o rectangular, esto sucede puesto que la función estructural de la berma es proveer soporte de borde a la calzada del pavimento generando disminuciones significativas de esfuerzos.

Como una losa más gruesa exhibe esfuerzos y deflexiones menores que una losa delgada, esto si se asume que todas las demás variables estructurales se mantienen constantes, entonces podemos concluir que la existencia de la berma en la estructura de pavimento rígido nos permite hacer una disminución significativa del espesor de la losa de concreto guardando las mismas proporciones de esfuerzos generados por la misma estructura sin berma.

Aparte de la reducción de los espesores, tener en cuenta la existencia de la berma contrarresta el efecto por fatiga en la estructura, efecto que es causado por el bajo número de repeticiones de los ejes y cargas altas donde el esfuerzo actuante sobrepasa el esfuerzo admisible y puede generar fracturas transversales, longitudinales y/o en los bordes de la losa y deterioros en ésta.

4.5.2.2. Disminución de deflexiones

En las tablas 39 a 42, se presentan las deflexiones máximas actuantes sobre la losa, generadas por los tipos de ejes que fueron tenidos en cuenta para este proyecto.

Tabla 39. Deflexiones producidos por Eje Simple de Llanta Sencilla.

	LOSA CUADRADA				LOSA RECTANGULAR			
	SIN PASADORES		CON PASADORES		SIN PASADORES		CON PASADORES	
Distancias del borde (mm)	150	450	150	450	150	450	150	450
Deflexión máxima (mm)	0,556	0,432	0,421	0,319	0,552	0,428	0,419	0,316

Tabla 40. Deflexiones producidos por Eje Simple de Llanta Doble.

	LOSA CUADRADA				LOSA RECTANGULAR			
	SIN PASADORES		CON PASADORES		SIN PASADORES		CON PASADORES	
Distancias del borde (mm)	150	450	150	450	150	450	150	450
Deflexión máxima (mm)	0,780	0,637	0,559	0,437	0,773	0,631	0,555	0,434

Tabla 41. Deflexiones producidos por Eje Tándem de Llanta Sencilla.

	LOSA CUADRADA				LOSA RECTANGULAR			
	SIN PASADORES		CON PASADORES		SIN PASADORES		CON PASADORES	
Distancias del borde (mm)	150	450	150	450	150	450	150	450
Deflexión máxima (mm)	0,550	0,419	0,422	0,312	0,544	0,413	0,418	0,309

Tabla 42. Deflexiones producidos por Eje Tándem de Llanta Doble.

	LOSA CUADRADA				LOSA RECTANGULAR			
	SIN PASADORES		CON PASADORES		SIN PASADORES		CON PASADORES	
Distancias del borde (mm)	150	450	150	450	150	450	150	450
Deflexión máxima (mm)	0,489	0,390	0,362	0,279	0,483	0,386	0,358	0,276

Ahora, con base en los valores de deflexión de las tablas 33 a 36, que están respaldados por los resultados generados por el programa EverFE (ver ANEXO N), podemos deducir que a medida que se aleja la llanta del borde de la losa, las deflexiones van disminuyendo ya que esta funciona como una viga en voladizo donde a medida se va acercando la carga al borde las deflexiones irán aumentando hasta llegar al borde de la viga donde la deflexión es máxima.

4.5.2.2.1. Porcentaje de disminución de deflexiones

A continuación, en las tablas 43 a 46, se presenta la disminución en porcentaje de las deflexiones, con el fin de demostrar de una mejor manera el comportamiento y la importancia de la existencia de la berma en una losa de concreto. Esta disminución se logra evidenciar haciendo una relación de la deflexión máxima contemplando la losa con berma versus la deflexión máxima de la losa sin berma.

Tabla 43. Porcentaje de deflexiones producidos por Eje Simple de Llanta Sencilla.

	Porcentaje de disminución de las deflexiones con berma vs sin berma	
	SIN PASADORES	CON PASADORES
LOSA CUADRADA	22,3%	24,2%
LOSA RECTANGULAR	22,5%	24,6%

Tabla 44. Porcentaje de deflexiones producidos por Eje Simple de Llanta Doble.

	Porcentaje de disminución de las deflexiones con berma vs sin berma	
	SIN PASADORES	CON PASADORES
LOSA CUADRADA	18,3%	21,8%
LOSA RECTANGULAR	18,4%	21,8%

Tabla 45. Porcentaje de deflexiones producidos por Eje Tándem de Llanta Sencilla.

	Porcentaje de disminución de las deflexiones con berma vs sin berma	
	SIN PASADORES	CON PASADORES
LOSA CUADRADA	23,8%	26,1%
LOSA RECTANGULAR	24,1%	26,1%

Tabla 46. Porcentaje de deflexiones producidos por Eje Tándem de Llanta Doble.

	Porcentaje de disminución de las deflexiones con berma vs sin berma	
	SIN PASADORES	CON PASADORES
LOSA CUADRADA	20,2%	22,9%
LOSA RECTANGULAR	20,1%	22,9%

Podemos observar que, así como en los esfuerzos, las deflexiones que son producidas en todo el borde de la losa a comparación de una distancia de 45 centímetros de la llanta al borde ya sea en la losa cuadrada o rectangular presentan un rango del 18% al 26% de disminución.

Como una losa más gruesa exhibe esfuerzos y deflexiones menores que una losa delgada, esto si se asume que todas las demás variables estructurales se mantienen constantes, entonces podemos concluir que la existencia de la berma en la estructura de pavimento rígido nos permite hacer una disminución significativa del espesor de la losa de concreto guardando las mismas proporciones de esfuerzos exhibidos por la misma estructura sin berma.

Aparte de la reducción de los espesores, tener en cuenta la existencia de la berma contrarresta el efecto por erosión en la base subyacente de la estructura, efecto que es causado por el alto número repeticiones de los ejes y altas cargas en la vía y puede generar fracturas en los bordes de la losa y deterioros en ésta.

4.5.3. Reducción de los esfuerzos y disminución de las deflexiones con y sin pasadores.

Se hizo una demostración del comportamiento de una losa de concreto que contiene pasadores de transferencia de carga dentro de un conjunto de losas con uno que no contiene pasadores, con el fin de evidenciar los efectos positivos que conlleva tener en cuenta éstos en una estructura de pavimento rígido.

Para poder demostrar estos efectos positivos, se hizo una comparación de los esfuerzos y deflexiones en un conjunto de losas de concreto dejando los pasadores incorporados contra el conjunto sin pasadores. Para esto, se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: una losa cuadrada de 3,6 metros de cada lado y una losa rectangular de 3,6 metros de ancho por 4,5 metros de largo, la llanta a una distancia de 45 cm del borde de la losa de concreto (con berma) o dejando la llanta a una distancia de 15 cm del borde de la losa de concreto (sin berma) y la variación de cada tipo de eje.

A continuación, se resumen los esfuerzos y deflexiones que son generados por cada tipo de eje sobre la losa y obtenidos de la modelación en el programa EverFE.

4.5.3.1. Reducción de esfuerzos

En las tablas 47 a 50, se presentan los esfuerzos máximos actuantes sobre la losa, generados por los tipos de ejes que fueron tenidos en cuenta para este proyecto.

Tabla 47. Esfuerzos producidos por Eje Simple de Llanta Sencilla.

		LOSA CUADRADA				LOSA RECTANGULAR			
		SIN PASADORES		CON PASADORES		SIN PASADORES		CON PASADORES	
Distancias del borde (mm)		150	450	150	450	150	450	150	450
CARA SUPERIOR	Esfuerzo máximo (MPa)	0,637	0,472	0,560	0,413	0,652	0,489	0,552	0,409
CARA INFERIOR	Esfuerzo máximo (MPa)	0,645	0,644	0,628	0,606	0,655	0,654	0,637	0,605

Tabla 48. Esfuerzos producidos por Eje Doble de Llanta Sencilla.

		LOSA CUADRADA				LOSA RECTANGULAR			
		SIN PASADORES		CON PASADORES		SIN PASADORES		CON PASADORES	
Distancias del borde (mm)		150	450	150	450	150	450	150	450
CARA SUPERIOR	Esfuerzo máximo (MPa)	0,887	0,734	0,549	0,422	0,912	0,761	0,577	0,449
CARA INFERIOR	Esfuerzo máximo (MPa)	0,718	0,678	0,634	0,608	0,727	0,670	0,642	0,609

Tabla 49. Esfuerzos producidos por Eje Tándem de Llanta Sencilla.

		LOSA CUADRADA				LOSA RECTANGULAR			
		SIN PASADORES		CON PASADORES		SIN PASADORES		CON PASADORES	
Distancias del borde (mm)		150	450	150	450	150	450	150	450
CARA SUPERIOR	Esfuerzo máximo (MPa)	0,565	0,385	0,556	0,395	0,561	0,381	0,544	0,390
CARA INFERIOR	Esfuerzo máximo (MPa)	0,556	0,551	0,546	0,520	0,564	0,560	0,555	0,518

Tabla 50. Esfuerzos producidos por Eje Tándem de Llanta Doble.

		LOSA CUADRADA				LOSA RECTANGULAR			
		SIN PASADORES		CON PASADORES		SIN PASADORES		CON PASADORES	
Distancias del borde (mm)		150	450	150	450	150	450	150	450
CARA SUPERIOR	Esfuerzo máximo (MPa)	0,278	0,233	0,244	0,180	0,288	0,245	0,240	0,182
CARA INFERIOR	Esfuerzo máximo (MPa)	0,375	0,371	0,333	0,333	0,375	0,365	0,329	0,330

Como se puede observar en las tablas, los valores que están resaltados en amarillo son los esfuerzos que experimenta la losa de concreto sin pasadores al modelarla con los tipos de ejes mostrados. Estos esfuerzos son mayores a los que experimenta la losa de concreto donde se encuentra presente los pasadores de transferencia de carga, debido a que el pasador transfiere la carga a la siguiente losa haciendo que las dos trabajen conjuntamente, algunos esfuerzos máximos se dan en la losa que tiene los pasadores por motivos de la composición del eje ya que la carga está distribuida de manera diferente dependiendo de cada tipo de eje, estos esfuerzos se pueden observar en los resultados generados por el programa (ver ANEXO O).

4.5.3.1.1. Porcentaje de reducción de esfuerzos

A continuación, en las tablas 51 a 54, se presenta la reducción en porcentaje de los esfuerzos en cada cara de la losa, con el fin de tener una mejor comparación del comportamiento del pasador y la importancia de la presencia de este en un conjunto de losas de concreto. Esta reducción se logra evidenciar haciendo una relación del esfuerzo dado por la losa con pasador versus el esfuerzo dado por la losa sin pasador.

Tabla 51. Porcentaje de esfuerzos producidos por Eje Simple de Llanta Sencilla.

Distancias del borde (mm)		Porcentaje de reducción de esfuerzo con pasador vs sin pasadores	
		150	450
CARA SUPERIOR	LOSA CUADRADA	12,1%	12,5%
	LOSA RECTANGULAR	15,3%	16,4%
CARA INFERIOR	LOSA CUADRADA	2,6%	5,9%
	LOSA RECTANGULAR	2,7%	7,5%

Tabla 52. Porcentaje de esfuerzos producidos por Eje Simple de Llanta Doble.

Distancias del borde (mm)		Porcentaje de reducción de esfuerzo con pasador vs sin pasadores	
		150	450
CARA SUPERIOR	LOSA CUADRADA	38,1%	42,5%
	LOSA RECTANGULAR	36,7%	41,0%
CARA INFERIOR	LOSA CUADRADA	11,7%	10,3%
	LOSA RECTANGULAR	11,7%	9,1%

Tabla 53. Porcentaje de esfuerzos producidos por Eje Tándem de Llanta Sencilla.

Distancias del borde (mm)		Porcentaje de reducción de esfuerzo con pasador vs sin pasadores	
		150	450
CARA SUPERIOR	LOSA CUADRADA	1,6%	-2,6%
	LOSA RECTANGULAR	3,0%	-2,4%
CARA INFERIOR	LOSA CUADRADA	1,8%	5,6%
	LOSA RECTANGULAR	1,6%	7,5%

Tabla 54. Porcentaje de esfuerzos producidos por Eje Tándem de Llanta Doble.

Distancias del borde (mm)		Porcentaje de reducción de esfuerzo con pasador vs sin pasadores	
		150	450
CARA SUPERIOR	LOSA CUADRADA	12,2%	22,7%
	LOSA RECTANGULAR	16,7%	25,7%
CARA INFERIOR	LOSA CUADRADA	11,2%	10,2%
	LOSA RECTANGULAR	12,3%	9,6%

Podemos observar que las reducciones varían incluso hay un aumento de esfuerzos dependiendo del tipo de eje, aun así se puede ver que la presencia de los pasadores en un conjunto de losas representa reducción en los esfuerzos, con respecto a los esfuerzos generados por el eje tándem de llanta Sencilla (TAST), teniendo en cuenta que en la estructura hay pasadores, se da un aumento en la cara superior en la losa rectangular de 2,4% y en la losa

cuadrada de 2,6% esto debido a la forma en la que se defleca la losa por motivos de la configuración del eje y sus cargas.

Estas reducciones suceden puesto que la función estructural de los pasadores es de transferir la carga generada por el tránsito de forma eficiente de una losa a otra, es decir que los esfuerzos que inicialmente son causados por una carga en una sola losa serán mayores que los esfuerzos causados por la misma carga a un conjunto de losas conectadas entre sí por medio de pasadores.

Como una losa más gruesa exhibe esfuerzos y deflexiones menores que una losa delgada, esto si se asume que todas las demás variables estructurales se mantienen constantes, entonces podemos concluir que la presencia de pasadores en la estructura de pavimento rígido nos permite hacer una disminución del espesor de la losa de concreto guardando las mismas proporciones de esfuerzos generados por la misma estructura sin pasadores, esto teniendo en cuenta con qué tipo de eje se va a diseñar la losa.

Aparte de la reducción de los espesores, tener en cuenta la existencia de los pasadores contrarresta el efecto por fatiga en la estructura, efecto que es causado por el bajo número de repeticiones de los ejes y cargas altas donde el esfuerzo actuante sobrepasa el esfuerzo admisible.

4.5.3.2. Disminución de deflexiones

En las tablas 55 a 58, se presentan las deflexiones máximas actuantes sobre la losa, generadas por los tipos de ejes que fueron tenidos en cuenta para este proyecto.

Tabla 55. Deflexiones producidos por Eje Simple de Llanta Sencilla.

	LOSA CUADRADA				LOSA RECTANGULAR			
	SIN PASADORES		CON PASADORES		SIN PASADORES		CON PASADORES	
Distancias del borde (mm)	150	450	150	450	150	450	150	450
Deflexión máxima (mm)	0,556	0,432	0,421	0,319	0,552	0,428	0,419	0,316

Tabla 56. Deflexiones producidos por Eje Simple de Llanta Doble.

	LOSA CUADRADA				LOSA RECTANGULAR			
	SIN PASADORES		CON PASADORES		SIN PASADORES		CON PASADORES	
Distancias del borde (mm)	150	450	150	450	150	450	150	450
Deflexión máxima (mm)	0,780	0,637	0,559	0,437	0,773	0,631	0,555	0,434

Tabla 57. Deflexiones producidos por Eje Tándem de Llanta Sencilla.

	LOSA CUADRADA				LOSA RECTANGULAR			
	SIN PASADORES		CON PASADORES		SIN PASADORES		CON PASADORES	
Distancias del borde (mm)	150	450	150	450	150	450	150	450
Deflexión máxima (mm)	0,550	0,419	0,422	0,312	0,544	0,413	0,418	0,309

Tabla 58. Deflexiones producidos por Eje Tándem de Llanta Doble.

	LOSA CUADRADA				LOSA RECTANGULAR			
	SIN PASADORES		CON PASADORES		SIN PASADORES		CON PASADORES	
Distancias del borde (mm)	150	450	150	450	150	450	150	450
Deflexión máxima (mm)	0,489	0,390	0,362	0,279	0,483	0,386	0,358	0,276

Ahora, con base en los valores de deflexión de la tabla 49 a 52, que están respaldados por los resultados generados por el programa EverFE (ver ANEXO O), podemos concluir que con los pasadores las deflexiones disminuyen, ya que una sola losa funciona como una viga en voladizo donde las deflexiones máximas están situadas en todo el borde de la viga en cambio con los pasadores habrá un estilo de empotramiento con la siguiente losa generando menos deflexión en este punto.

4.5.3.2.1. Porcentaje de disminución de deflexiones

A continuación, en las tablas 59 a 62, se presenta la reducción en porcentaje de las deflexiones, con el fin de tener una mejor comparación del comportamiento del pasador y la importancia de la presencia de este en un conjunto de losas de concreto. Esta reducción se logra evidenciar haciendo una relación del esfuerzo dado por la losa con pasador versus el esfuerzo dado por la losa sin pasador.

Tabla 59. Porcentaje de deflexiones producidos por Eje Simple de Llanta Sencilla.

	Porcentaje de reducción de deflexión con pasador vs sin pasadores	
	SIN BERMA	CON BERMA
LOSA CUADRADA	24,3%	26,2%
LOSA RECTANGULAR	24,1%	26,2%

Tabla 60. Porcentaje de deflexiones producidos por Eje Simple de Llanta Doble.

	Porcentaje de reducción de deflexión con pasador vs sin pasadores	
	SIN BERMA	CON BERMA
LOSA CUADRADA	28,3%	31,4%
LOSA RECTANGULAR	28,2%	31,2%

Tabla 61. Porcentaje de deflexiones producidos por Eje Tándem de Llanta Sencilla

	Porcentaje de reducción de deflexión con pasador vs sin pasadores	
	SIN BERMA	CON BERMA
LOSA CUADRADA	23,3%	25,5%
LOSA RECTANGULAR	23,2%	25,2%

Tabla 62. Porcentaje de deflexiones producidos por Eje Tándem de Llanta Doble.

	Porcentaje de reducción de deflexión con pasador vs sin pasadores	
	SIN BERMA	CON BERMA
LOSA CUADRADA	26,0%	28,5%
LOSA RECTANGULAR	25,9%	28,5%

Podemos observar que a comparación del comportamiento de los pasadores con respecto a los esfuerzos donde estos varían incluso presentan aumento de esfuerzos en algunos casos, las deflexiones, tienen un alto grado de disminución ya que este rango oscila entre 23% y un 32% con respecto a la deflexión sin pasadores.

Como una losa más gruesa exhibe esfuerzos y deflexiones menores que una losa delgada, esto si se asume que todas las demás variables estructurales se mantienen constantes, entonces podemos concluir que la presencia de pasadores en la estructura de pavimento rígido nos permite hacer una disminución significativa del espesor de la losa de concreto guardando las mismas proporciones de deflexiones generadas por la misma estructura sin pasadores que serían las admisibles, esto teniendo en cuenta con qué tipo de eje se va a diseñar la losa.

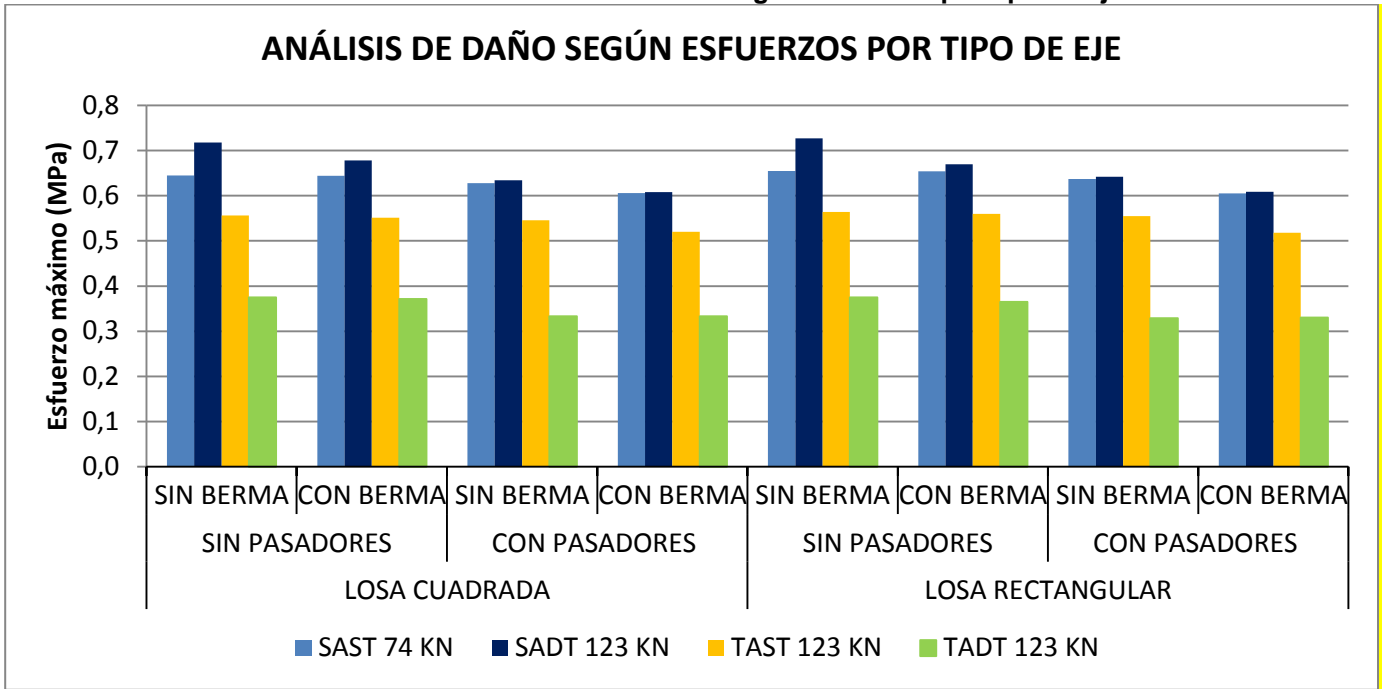
Estas reducciones suceden puesto que la función estructural de los pasadores es de transferir la carga generada por el tránsito de forma eficiente de una losa a otra, es decir que las deflexiones que inicialmente son causado por una carga en una sola losa serán mayores que las deflexiones causados por la misma carga a un conjunto de losas conectadas entre sí por medio de pasadores

Aparte de la reducción de los espesores, tener en cuenta la existencia de los pasadores contrarresta el efecto por erosión en la estructura, efecto que es causado por el alto número de repeticiones de los ejes y cargas altas donde las deflexiones actuantes sobrepasan los admisibles, causando que el pavimento falle por bombeo, por erosión en la base subyacente de la losa o por escalonamiento de las juntas.

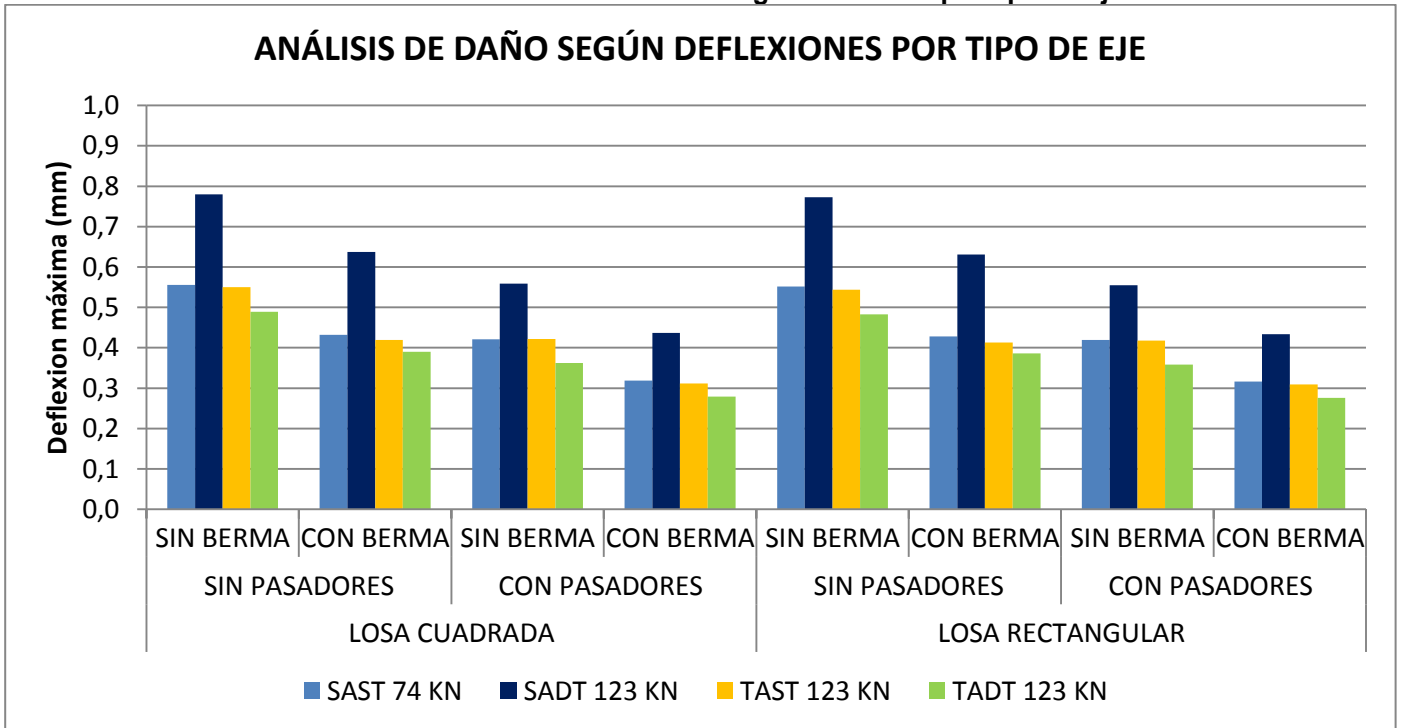
4.5.4. Comparación de daños por eje

En las gráficas 12 y 13, se presenta la comparación de esfuerzo y deflexiones generadas por los diferentes tipos de ejes, con el fin de evidenciar cual es el tipo de eje más favorable en el momento de diseñar la losa de concreto con base en el daño que es causado en esta.

Gráfica 12. Análisis de daño según esfuerzos por tipo de eje.



Gráfica 13. Análisis de daño según esfuerzos por tipo de eje.



De acuerdo con lo mostrado, puede concluirse que las estructuras de pavimento rígido se ven gobernadas a la hora de diseñarse por el Eje Simple de Lanta Doble (SADT) siendo este el eje intermedio y trasero en la configuración actual del bus articulado de TransMilenio (ver numeral x), ya que este eje es el que más esfuerzos y deflexiones causa en un losa generando más daño, esto sin importar si la estructura cuenta con o sin pasadores, con y sin berma, si es una losa rectangular o cuadrada, ya que se presenta la misma proporcionalidad de daños en cada una de la anteriores combinaciones de estructuras.

Por otra parte, basándose en las gráficas 10 a 11, el segundo eje con mayor daño causado en una losa de concreto es el Eje Simple de Lanta Sencilla (SAST) siendo el eje direccional en la configuración actual del bus articulado de TransMilenio (ver numeral 3.4), ya que este produce los segundos esfuerzos más grandes a comparación de los otros ejes (ver grafica 10), y las segundas deflexiones más grandes pero similares a las producidas por el Eje Tándem de Lanta Sencilla (TAST). Concluyendo que el eje SAST es uno de los menos favorable para el pavimento rígido, pero de los más importante a tener en cuenta al momento de evaluar y diseñar.

En cuanto al Eje Tándem de Lanta Sencilla (TAST) que está presente en la configuración uno y dos descritos en el numeral 3.4, podemos concluir que es el penúltimo que produce menos esfuerzos y deflexiones sobre la losa de concreto apoyándonos con las gráficas.

Por último, está el Eje Tándem de Lanta Doble (TADT), que está presente en la configuración tres y cuatro descritos en el numeral 3.4, este siendo el eje que menos daños produce sobre la losa ya que la carga está mejor distribuida que en el resto de ejes ya que este tiene ocho llantas de soporte.

A lo largo de los planteamientos hechos anteriormente, se puede inferir que los ejes tenidos en cuenta en este proyecto más favorables a la hora de analizar los daños que menos detrimento causan en la losa de concretos están dado por el Eje Tándem de Lanta Doble (TADT) y el Eje Tándem de Lanta Sencilla (TAST), por otro lado estos no son los más importantes a tener en cuenta ya que el diseño de pavimentos rígidos está gobernado por los Eje Simple de Lanta Doble (SADT) y el Eje Simple de Lanta Sencilla (SAST) que son los que causan más daño.

5. CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta que la metodología de Austroads discrimina entre el tipo de llanta (sencilla o doble) en cada uno de los ejes, y de acuerdo al análisis comparativo entre los resultados obtenidos por la metodología de la PCA y la metodología de Austroads, se infiere que la metodología de la PCA toma los ejes: simple, tándem y Trídem de llanta doble.
- La configuración de grupos de ejes: simple/tándem/tándem, es la más adecuada para los cálculos de las losas de pavimento rígido con respecto a la metodología de la PCA, por medio de la cual se presenta disminuciones significativas de los espesores comprándolo con la configuración de grupos de ejes que tienen más de uno que sea simple.
- La metodología de la PCA fue descartada en este proyecto ya que no permite discriminar el tipo de configuración de las llantas (sencilla o doble), puesto que esta metodología no deja hacer un análisis más profundo de la influencia de las llantas en el cálculo de espesores de las losas de pavimento rígido de las troncales del sistema de transporte masivo TransMilenio.
- Con base al análisis de los esfuerzos y deflexiones generados por un eje tándem de llanta Sencilla en un conjunto de losas, se puede concluir que la posición 3 que muestra las cuatro llantas del eje sobre una sola losa, genera los mayores esfuerzos y deflexiones al momento de la carga estática.
- De acuerdo al análisis, la presencia de la berma en un conjunto de losas disminuye significativamente los efectos que causa la erosión y la fatiga sobre la estructura de pavimento rígido, logrando un diseño de espesores de losa de pavimento rígidos menor a comparación de un conjunto de losas sin la presencia de esta.
- De acuerdo al análisis, la presencia de los pasadores en un conjunto de losas disminuye significativamente los efectos que causa la erosión sobre la estructura de pavimento rígido, logrando un diseño de espesores de losa de pavimento rígidos menor a comparación de un conjunto de losas sin la presencia de esta.
- Podemos observar que el Eje Tándem de Llanta Doble (TADT) es el más favorable para la estructura de pavimento rígido ya que es el que menos daños causa sobre esta, por lo dicho anteriormente podemos concluir que la configuración 4 propuesta en este proyecto (ver numeral 3.4.5.) es la más favorable para las troncales de TransMilenio.

6. BIBLIOGRAFIA

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS AASHTO. Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol.
- EL TIEMPO. Seis de cada diez pasajeros usan el sistema integrado de Transporte {En línea}. 17 de Noviembre de 2014. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-14840755>
- SANDOVAL, Higuera. Mecánica de pavimentos, principios básicos. Bogotá: UPTC, 2011, 298p.
- HUANG. Yang H. Pavement analysis and desing. Second edition. New Jersey: University of Kentucky Prentice Hall., 2004. 775p.
- INSTITUTO BOLIVIANO DEL CEMENTO Y EL HORMIGÓN. Diseño de espesores para pavimentos de hormigón en carreteras y calles método de la portland cement association. Bolivia: Instituto Boliviano del cemento y el hormigón, 1995, 60p.
- LONDOÑO NARANJO, C., Alvarez Pabón, J. A., & Cemento, I. C. Manual de diseño de pavimentos de concreto. Medellín: ICPC, 2008, 114p.
- SANCHEZ SABOGAL, F. Manual para el diseño de pavimentos rígidos. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 1973.
- SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTE; Instituto mexicano del transporte. MECÁNICA DE MATERIALES. En P. Garnica Anguas, J. A. Gómez López, & J. A. Sesma Martínez. Ciudad de México: Sanfandila, 2002.
- UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Informe preliminar, determinación del peso por eje de los buses articulados y buses alimentadores del sistema de transmilenio. Bogotá: Universidad de lo Andes, 2004.
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. ILLINOIS: PCA EB209P, 1984.
- AUSTRROADS. Guide to pavement technology. 2a ED, Sidney Australia. 2012, 136p.
- INVIAS. Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Colombia: ICPC, 2008, 77p.

ANEXO A

**Tabla 3. Esfuerzo equivalente en el pavimento sin berma de concreto
(eje sencillo y tándem)**

EJE SENCILLO						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	5,42	4,75	4,38	4,13	3,66	3,45
110	4,74	4,16	3,85	3,63	3,23	3,06
120	4,19	3,69	3,41	3,23	2,88	2,73
130	3,75	3,30	3,06	2,89	2,59	2,46
140	3,37	2,97	2,76	2,61	2,34	2,23
150	3,06	2,70	2,51	2,37	2,13	2,03
160	2,79	2,47	2,29	2,17	1,95	1,86
170	2,56	2,26	2,10	1,99	1,80	1,71
180	2,37	2,09	1,94	1,84	1,66	1,58
190	2,19	1,94	1,80	1,71	1,54	1,47
200	2,04	1,80	1,67	1,59	1,43	1,37
210	1,91	1,68	1,56	1,48	1,34	1,28
220	1,79	1,57	1,46	1,39	1,26	1,20
230	1,68	1,48	1,38	1,31	1,18	1,13
240	1,58	1,39	1,30	1,23	1,11	1,06
250	1,49	1,32	1,22	1,16	1,05	1,00
260	1,41	1,25	1,16	1,10	0,99	0,95
270	1,34	1,18	1,10	1,04	0,94	0,90
280	1,28	1,12	1,04	0,99	0,89	0,86
290	1,22	1,07	0,99	0,94	0,85	0,81
300	1,16	1,02	0,95	0,90	0,81	0,78
310	1,11	0,97	0,90	0,86	0,77	0,74
320	1,06	0,93	0,86	0,82	0,74	0,71
330	1,02	0,89	0,83	0,78	0,71	0,68
340	0,98	0,85	0,79	0,75	0,68	0,65
350	0,94	0,82	0,76	0,72	0,65	0,62

EJE TÁNDEM						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	4,39	3,83	3,59	3,44	3,22	3,15
110	3,88	3,35	3,12	2,97	2,76	2,68
120	3,47	2,98	2,76	2,62	2,40	2,33
130	3,14	2,68	2,46	2,33	2,13	2,06
140	2,87	2,43	2,23	2,10	1,90	1,83
150	2,64	2,23	2,04	1,92	1,72	1,65
160	2,45	2,06	1,87	1,76	1,67	1,50
170	2,28	1,91	1,74	1,63	1,45	1,38
180	2,14	1,79	1,62	1,51	1,34	1,27
190	2,01	1,67	1,51	1,41	1,25	1,18
200	1,90	1,58	1,42	1,33	1,17	1,11
210	1,79	1,49	1,34	1,25	1,10	1,04
220	1,70	1,41	1,27	1,18	1,03	0,98
230	1,62	1,34	1,21	1,12	0,98	0,92
240	1,55	1,28	1,15	1,06	0,93	0,97
250	1,48	1,22	1,09	1,01	0,88	0,83
260	1,41	1,17	1,05	0,97	0,84	0,79
270	1,36	1,12	1,00	0,93	0,80	0,75
280	1,30	1,07	0,96	0,89	0,77	0,72
290	1,25	1,03	0,92	0,85	0,74	0,69
300	1,21	0,99	0,89	0,82	0,71	0,66
310	1,16	0,96	0,86	0,79	0,68	0,64
320	1,12	0,92	0,83	0,76	0,66	0,62
330	1,09	0,89	0,80	0,74	0,63	0,59
340	1,05	0,86	0,77	0,71	0,61	0,57
350	1,02	0,84	0,75	0,69	0,59	0,55

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p.14.

ANEXO B

**Tabla 4. Esfuerzo equivalente en el pavimento con berma de concreto
(eje sencillo y tándem)**

EJE SENCILLO						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	4,18	3,65	3,37	3,19	2,85	2,72
110	3,68	3,23	2,99	2,83	2,55	2,43
120	3,28	2,88	2,67	2,54	2,29	2,19
130	2,95	2,60	2,41	2,29	2,07	1,99
140	2,68	2,36	2,19	2,08	2,89	1,81
150	2,44	2,16	2,00	1,90	1,73	1,66
160	2,24	1,97	1,84	1,75	1,59	1,53
170	2,06	1,82	1,70	1,62	1,48	1,42
180	1,91	1,69	1,57	1,50	1,37	1,32
190	1,77	1,57	1,46	1,40	1,28	1,23
200	1,65	1,46	1,37	1,30	1,19	1,15
210	1,55	1,37	1,28	1,22	1,12	1,08
220	1,45	1,29	1,20	1,15	1,05	1,01
230	1,37	1,21	1,13	1,08	0,99	0,96
240	1,29	1,15	1,07	1,02	0,94	0,90
250	1,22	1,08	1,01	0,97	0,89	0,86
260	1,16	1,03	0,98	0,92	0,84	0,81
270	1,10	0,98	0,91	0,87	0,80	0,77
280	1,06	0,93	0,87	0,93	0,76	0,74
290	1,00	0,89	0,83	0,79	0,73	0,70
300	0,95	0,85	0,79	0,76	0,70	0,67
310	0,91	0,81	0,76	0,72	0,67	0,64
320	0,87	0,78	0,73	0,69	0,64	0,62
330	0,84	0,74	0,70	0,67	0,61	0,59
340	0,80	0,71	0,67	0,64	0,59	0,57
350	0,77	0,69	0,64	0,61	0,57	0,55

EJE TÁNDEM						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	3,48	3,10	2,94	2,85	2,74	2,72
110	3,07	2,71	2,56	2,47	2,35	2,32
120	2,75	2,41	2,26	2,17	2,05	2,02
130	2,49	2,17	2,02	1,94	1,82	1,78
140	2,27	1,97	1,83	1,75	1,63	1,59
150	2,08	1,80	1,67	1,59	1,48	1,44
160	1,93	1,66	1,53	1,46	1,35	1,31
170	1,79	1,54	1,42	1,35	1,24	1,20
180	1,67	1,43	1,32	1,25	1,15	1,11
190	1,57	1,34	1,23	1,17	1,07	1,03
200	1,48	1,26	1,16	1,10	1,00	0,96
210	1,40	1,19	1,09	1,03	0,93	0,90
220	1,32	1,12	1,03	0,97	0,88	0,85
230	1,26	1,07	0,98	0,92	0,83	0,80
240	1,20	1,01	0,93	0,87	0,79	0,76
250	1,14	0,97	0,88	0,83	0,75	0,72
260	1,09	0,92	0,84	0,79	0,71	0,68
270	1,04	0,88	0,81	0,76	0,68	0,65
280	1,00	0,85	0,77	0,73	0,65	0,62
290	0,96	0,81	0,74	0,70	0,62	0,60
300	0,93	0,78	0,71	0,67	0,60	0,57
310	0,89	0,75	0,69	0,64	0,58	0,55
320	0,86	0,73	0,66	0,62	0,55	0,53
330	0,83	0,70	0,64	0,60	0,53	0,51
340	0,80	0,68	0,62	0,58	0,52	0,49
350	0,78	0,66	0,60	0,56	0,50	0,47

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p.14.

ANEXO C

**Tabla 5. Esfuerzo equivalente en el pavimento sin berma o con berma de concreto
(eje Trídem)**

EJE TRIDEM						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	3,36	3,10	3,02	2,68	2,94	2,93
110	2,92	2,64	2,55	2,60	2,45	2,44
120	2,60	2,30	2,20	2,14	2,08	2,07
130	2,35	2,04	1,93	1,87	1,80	1,78
140	2,15	1,83	1,72	1,65	1,68	1,65
150	1,99	1,67	1,55	1,48	1,40	1,37
160	1,86	1,54	1,41	1,34	1,25	1,23
170	1,73	1,43	1,30	1,23	1,14	1,11
180	1,62	1,34	1,21	1,14	1,04	1,01
190	1,53	1,26	1,13	1,06	0,96	0,92
200	1,45	1,19	1,07	0,99	0,89	0,85
210	1,37	1,13	1,01	0,93	0,83	0,79
220	1,30	1,07	0,95	0,88	0,78	0,74
230	1,24	1,02	0,91	0,84	0,73	0,70
240	1,18	0,97	0,87	0,80	0,89	0,66
250	1,13	0,93	0,83	0,76	0,66	0,62
260	1,07	0,89	0,79	0,73	0,63	0,59
270	1,02	0,86	0,76	0,70	0,60	0,57
280	0,98	0,82	0,73	0,67	0,58	0,54
290	0,93	0,79	0,71	0,65	0,55	0,52
300	0,89	0,76	0,68	0,63	0,53	0,50
310	0,85	0,73	0,66	0,60	0,51	0,48
320	0,81	0,70	0,63	0,58	0,50	0,46
330	0,77	0,68	0,61	0,56	0,48	0,45
340	0,73	0,65	0,59	0,55	0,46	0,43
350	0,70	0,63	0,57	0,53	0,43	0,42

EJE TRIDEM						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	2,87	2,67	2,60	2,57	2,56	2,57
110	2,50	2,29	2,22	2,18	2,16	2,16
120	2,20	2,00	1,93	1,89	1,85	1,85
130	1,97	1,78	1,70	1,66	1,61	1,61
140	1,78	1,59	1,52	1,48	1,43	1,42
150	1,62	1,44	1,37	1,33	1,27	1,26
160	1,49	1,32	1,24	1,20	1,15	1,13
170	1,38	1,21	1,14	1,10	1,04	1,03
180	1,28	1,12	1,05	1,01	0,96	0,94
190	1,19	1,04	0,98	0,94	0,88	0,86
200	1,12	0,98	0,91	0,87	0,82	0,80
210	1,05	0,92	0,85	0,81	0,76	0,74
220	0,99	0,86	0,80	0,76	0,71	0,69
230	0,93	0,81	0,76	0,72	0,67	0,65
240	0,88	0,77	0,71	0,68	0,63	0,61
250	0,84	0,73	0,68	0,64	0,59	0,57
260	0,79	0,70	0,64	0,61	0,56	0,54
270	0,75	0,66	0,61	0,58	0,53	0,52
280	0,72	0,63	0,59	0,56	0,51	0,49
290	0,68	0,60	0,56	0,53	0,49	0,47
300	0,65	0,58	0,54	0,51	0,46	0,45
310	0,62	0,55	0,51	0,49	0,44	0,43
320	0,59	0,53	0,49	0,47	0,43	0,41
330	0,57	0,51	0,47	0,45	0,41	0,39
340	0,54	0,49	0,46	0,43	0,39	0,38
350	0,52	0,47	0,44	0,42	0,38	0,36

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p.40.

ANEXO D

Tabla 6. Factor de erosión para ejes sencillos y tándem en pavimentos de concreto con dovelas y sin berma de concreto.

EJE SENCILLO						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	3,76	3,75	3,74	3,74	3,72	3,70
110	3,63	3,65	3,61	3,61	3,59	3,58
120	3,52	3,50	3,49	3,49	3,47	3,46
130	3,41	3,39	3,39	3,38	3,37	3,35
140	3,31	3,30	3,29	3,28	3,27	3,26
150	3,22	3,21	3,20	3,19	3,17	3,16
160	3,14	3,12	3,11	3,10	3,09	3,08
170	3,06	3,04	3,03	3,02	3,01	3,00
180	2,99	2,97	2,96	2,95	2,93	2,92
190	2,92	2,90	2,88	2,88	2,86	2,85
200	2,85	2,83	2,82	2,81	2,79	2,78
210	2,79	2,77	2,75	2,75	2,73	2,72
220	2,73	2,71	2,69	2,69	2,67	2,66
230	2,67	2,65	2,64	2,63	2,61	2,60
240	2,62	2,60	2,58	2,57	2,55	2,54
250	2,57	2,54	2,53	2,52	2,50	2,49
260	2,52	2,49	2,48	2,47	2,45	2,44
270	2,47	2,44	2,43	2,42	2,40	2,39
280	2,42	2,40	2,38	2,37	2,35	2,34
290	2,38	2,35	2,34	2,33	2,31	2,30
300	2,34	2,31	2,30	2,29	2,26	2,26
310	2,29	2,27	2,25	2,24	2,22	2,21
320	2,25	2,23	2,21	2,20	2,18	2,17
330	2,21	2,19	2,17	2,16	2,14	2,13
340	2,18	2,15	2,14	2,12	2,10	2,09
350	2,14	2,11	2,10	2,09	2,07	2,06

EJE TÁNDEM						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	3,83	3,79	3,77	3,76	3,72	3,70
110	3,71	3,67	3,65	3,63	3,60	3,58
120	3,61	3,56	3,54	3,52	3,49	3,47
130	3,52	3,47	3,44	3,43	3,39	3,37
140	3,43	3,38	3,35	3,33	3,30	3,28
150	3,36	3,30	3,27	3,25	3,21	3,19
160	3,28	3,22	3,19	3,17	3,13	3,12
170	3,22	3,15	3,12	3,10	3,06	3,04
180	3,16	3,09	3,06	3,03	2,99	2,97
190	3,10	3,03	2,99	2,97	2,93	2,91
200	3,05	2,97	2,94	2,91	2,87	2,85
210	2,99	2,92	2,88	2,86	2,81	2,79
220	2,95	2,87	2,83	2,80	2,76	2,73
230	2,90	2,82	2,78	2,75	2,70	2,68
240	2,86	2,78	2,73	2,71	2,66	2,63
250	2,82	2,73	2,69	2,66	2,61	2,59
260	2,78	2,69	2,65	2,62	2,56	2,54
270	2,74	2,65	2,61	2,58	2,52	2,50
280	2,71	2,62	2,57	2,54	2,48	2,46
290	2,67	2,58	2,53	2,50	2,44	2,42
300	2,64	2,55	2,50	2,46	2,41	2,38
310	2,61	2,51	2,46	2,43	2,37	2,34
320	2,58	2,48	2,43	2,40	2,33	2,31
330	2,55	2,45	2,40	2,36	2,30	2,28
340	2,52	2,42	2,37	2,33	2,27	2,24
350	2,49	2,39	2,34	2,30	2,24	2,21

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p. 16.

ANEXO E

Tabla 7. Factor de erosión para ejes sencillos y tándem en pavimentos de concreto sin dovelas y sin berma de concreto.

EJE SENCILLO						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	3,94	3,92	3,90	3,88	3,84	3,80
110	3,82	3,79	3,75	3,76	3,72	3,69
120	3,71	3,68	3,67	3,65	3,62	3,59
130	3,61	3,58	3,56	3,55	3,52	3,50
140	3,52	3,49	3,47	3,46	3,43	3,41
150	3,43	3,40	3,38	3,37	3,34	3,32
160	3,35	3,32	3,30	3,29	3,26	3,24
170	3,28	3,24	3,22	3,21	3,18	3,17
180	3,21	3,17	3,15	3,14	3,11	3,10
190	3,15	3,11	3,08	3,07	3,04	3,03
200	3,09	3,04	3,02	3,01	2,98	2,96
210	3,04	2,99	2,96	2,95	2,92	2,90
220	2,98	2,93	2,90	2,89	2,86	2,85
230	2,93	2,88	2,85	2,83	2,80	2,79
240	2,89	2,83	2,80	2,76	2,75	2,74
250	2,84	2,78	2,75	2,73	2,70	2,69
260	2,80	2,73	2,70	2,69	2,65	2,64
270	2,76	2,69	2,66	2,64	2,61	2,59
280	2,72	2,65	2,62	2,60	2,56	2,55
290	2,68	2,61	2,58	2,56	2,52	2,50
300	2,65	2,57	2,54	2,52	2,48	2,46
310	2,61	2,54	2,50	2,48	2,44	2,42
320	2,58	2,50	2,47	2,44	2,40	2,38
330	2,55	2,47	2,43	2,41	2,36	2,35
340	2,52	2,44	2,40	2,37	2,33	2,31
350	2,49	2,41	2,37	2,34	2,29	2,28

EJE TÁNDEM						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	4,00	3,93	3,90	3,88	3,84	3,82
110	3,90	3,82	3,79	3,76	3,72	3,70
120	3,81	3,73	3,69	3,66	3,62	3,59
130	3,73	3,65	3,60	3,57	3,52	3,49
140	3,66	3,57	3,52	3,49	3,43	3,41
150	3,59	3,50	3,45	3,42	3,36	3,33
160	3,53	3,42	3,38	3,35	3,28	3,26
170	3,48	3,37	3,32	3,28	3,22	3,19
180	3,42	3,32	3,26	3,23	3,16	3,13
190	3,37	3,27	3,21	3,17	3,10	3,07
200	3,33	3,22	3,16	3,12	3,05	3,01
210	3,28	3,17	3,11	3,07	3,00	2,96
220	3,24	3,13	3,07	3,03	2,95	2,92
230	3,20	3,09	3,03	2,98	2,91	2,87
240	3,16	3,05	2,99	2,94	2,86	2,83
250	3,13	3,01	2,95	2,91	2,82	2,79
260	3,09	2,98	2,91	2,87	2,79	2,75
270	3,06	2,94	2,88	2,83	2,75	2,71
280	3,03	2,91	2,84	2,80	2,71	2,68
290	3,00	2,88	2,81	2,77	2,68	2,64
300	2,97	2,85	2,78	2,74	2,65	2,61
310	2,94	2,82	2,75	2,71	2,62	2,58
320	2,91	2,79	2,72	2,68	2,59	2,55
330	2,89	2,77	2,70	2,65	2,56	2,52
340	2,86	2,74	2,67	2,62	2,53	2,49
350	2,84	2,71	2,65	2,60	2,51	2,47

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p.18.

ANEXO F

Tabla 8. Factor de erosión para ejes sencillos y tándem en pavimentos de concreto con dovelas y con berma de concreto.

EJE SENCILLO						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	3,27	3,24	3,22	3,21	3,17	3,15
110	3,16	3,12	3,10	3,09	3,06	3,09
120	3,05	3,01	2,99	2,98	2,94	2,92
130	2,96	2,92	2,89	2,88	2,84	2,82
140	2,87	2,82	2,80	2,78	2,75	2,73
150	2,79	2,74	2,72	2,70	2,67	2,65
160	2,71	2,66	2,64	2,62	2,59	2,57
170	2,64	2,59	2,57	2,55	2,51	2,49
180	2,57	2,52	2,50	2,48	2,44	2,42
190	2,51	2,46	2,43	2,41	2,38	2,36
200	2,45	2,40	2,37	2,35	2,31	2,30
210	2,39	2,34	2,31	2,29	2,26	2,24
220	2,34	2,29	2,26	2,24	2,20	2,18
230	2,29	2,23	2,21	2,19	2,15	2,13
240	2,24	2,18	2,16	2,13	2,10	2,08
250	2,19	2,14	2,11	2,09	2,05	2,03
260	2,15	2,09	2,06	2,04	2,00	1,98
270	2,10	2,05	2,02	2,00	1,96	1,94
280	2,06	2,01	1,98	1,95	1,91	1,89
290	2,02	1,97	1,93	1,91	1,87	1,85
300	1,98	1,93	1,90	1,87	1,83	1,81
310	1,95	1,89	1,86	1,84	1,79	1,77
320	1,91	1,85	1,82	1,80	1,76	1,74
330	1,87	1,82	1,78	1,76	1,72	1,70
340	1,84	1,78	1,75	1,73	1,69	1,67
350	1,82	1,75	1,72	1,69	1,65	1,63

EJE TÁNDEM						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	3,25	3,17	3,14	3,12	3,11	3,11
110	3,16	3,07	3,03	3,00	2,98	2,97
120	3,08	2,98	2,93	2,90	2,86	2,84
130	3,01	2,90	2,85	2,81	2,76	2,74
140	2,94	2,83	2,77	2,74	2,67	2,65
150	2,88	2,77	2,71	2,67	2,60	2,57
160	2,82	2,71	2,65	2,60	2,53	2,50
170	2,77	2,65	2,59	2,55	2,46	2,43
180	2,72	2,60	2,54	2,49	2,41	2,37
190	2,67	2,56	2,49	2,44	2,35	2,32
200	2,63	2,51	2,44	2,40	2,31	2,27
210	2,58	2,47	2,40	2,35	2,26	2,22
220	2,54	2,43	2,36	2,31	2,22	2,18
230	2,50	2,39	2,32	2,27	2,18	2,13
240	2,46	2,35	2,28	2,23	2,14	2,10
250	2,43	2,31	2,24	2,20	2,10	2,06
260	2,39	2,28	2,21	2,16	2,07	2,02
270	2,35	2,24	2,18	2,13	2,03	1,99
280	2,32	2,21	2,14	2,10	2,00	1,96
290	2,29	2,18	2,11	2,06	1,97	1,93
300	2,26	2,15	2,08	2,03	1,94	1,90
310	2,23	2,12	2,05	2,00	1,91	1,87
320	2,20	2,09	2,03	1,98	1,88	1,84
330	2,17	2,06	2,00	1,95	1,86	1,81
340	2,15	2,04	1,97	1,92	1,83	1,79
350	2,12	2,01	1,96	1,90	1,80	1,76

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p.40.

ANEXO G

Tabla 9. Factor de erosión para ejes sencillos y tándem en pavimentos de concreto sin dovelas y con berma de concreto.

EJE SENCILLO						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	3,45	3,41	3,39	3,38	3,34	3,31
110	3,34	3,30	3,28	3,27	3,23	3,20
120	3,24	3,20	3,18	3,16	3,13	3,11
130	3,15	3,11	3,08	3,07	3,04	3,02
140	3,07	3,02	3,00	2,98	2,95	2,93
150	2,99	2,94	2,92	2,90	2,87	2,85
160	2,91	2,87	2,84	2,83	2,80	2,78
170	2,85	2,80	2,77	2,76	2,73	2,71
180	2,78	2,73	2,71	2,69	2,66	2,64
190	2,73	2,67	2,64	2,63	2,60	2,58
200	2,67	2,61	2,59	2,57	2,54	2,52
210	2,62	2,56	2,53	2,51	2,48	2,47
220	2,57	2,51	2,48	2,46	2,43	2,41
230	2,52	2,46	2,43	2,41	2,38	2,36
240	2,47	2,41	2,38	2,36	2,33	2,31
250	2,43	2,37	2,34	2,32	2,28	2,27
260	2,39	2,33	2,29	2,27	2,24	2,22
270	2,35	2,28	2,25	2,23	2,20	2,18
280	2,31	2,25	2,21	2,19	2,16	2,14
290	2,28	2,21	2,17	2,15	2,12	2,10
300	2,24	2,17	2,14	2,12	2,08	2,06
310	2,21	2,14	2,10	2,08	2,04	2,02
320	2,18	2,11	2,07	2,05	2,01	1,99
330	2,15	2,07	2,04	2,01	1,97	1,95
340	2,12	2,04	2,01	1,98	1,94	1,92
350	2,09	2,01	1,97	1,95	1,91	1,89

EJE TÁNDEM						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	3,45	3,36	3,33	3,31	3,28	3,27
110	3,36	3,27	3,22	3,20	3,16	3,15
120	3,28	3,18	3,13	3,11	3,06	3,04
130	3,21	3,11	3,05	3,02	2,97	2,95
140	3,15	3,04	2,98	2,95	2,89	2,86
150	3,09	2,98	2,92	2,88	2,82	2,79
160	3,04	2,92	2,85	2,82	2,75	2,72
170	2,99	2,87	2,81	2,77	2,69	2,66
180	2,94	2,82	2,76	2,71	2,64	2,61
190	2,90	2,77	2,71	2,67	2,59	2,55
200	2,87	2,73	2,67	2,62	2,54	2,51
210	2,82	2,69	2,63	2,58	2,50	2,46
220	2,78	2,66	2,59	2,54	2,46	2,42
230	2,75	2,62	2,55	2,50	2,42	2,38
240	2,72	2,59	2,52	2,47	2,38	2,34
250	2,69	2,55	2,48	2,43	2,35	2,31
260	2,66	2,52	2,45	2,40	2,31	2,27
270	2,63	2,49	2,42	2,37	2,25	2,24
280	2,60	2,47	2,39	2,34	2,23	2,21
290	2,58	2,44	2,37	2,32	2,22	2,18
300	2,55	2,41	2,34	2,29	2,19	2,15
310	2,53	2,39	2,31	2,26	2,17	2,13
320	2,50	2,36	2,29	2,24	2,14	2,10
330	2,48	2,34	2,27	2,21	2,12	2,07
340	2,46	2,32	2,24	2,19	2,09	2,05
350	2,44	2,30	2,22	2,17	2,07	2,03

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p.18.

ANEXO H

Tabla 10. Factor de erosión para ejes Trídem en pavimentos de concreto sin dovelas, sin berma y con berma de concreto.

EJE TRIDEM						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	4,03	3,93	3,88	3,84	3,75	3,70
110	3,93	3,84	3,78	3,74	3,66	3,61
120	3,85	3,75	3,70	3,66	3,57	3,53
130	3,77	3,68	3,62	3,56	3,50	3,45
140	3,70	3,60	3,55	3,51	3,42	3,38
150	3,64	3,54	3,48	3,44	3,36	3,32
160	3,58	3,47	3,42	3,38	3,29	3,25
170	3,52	3,42	3,36	3,32	3,23	3,19
180	3,47	3,36	3,30	3,26	3,18	3,14
190	3,42	3,31	3,25	3,21	3,13	3,09
200	3,37	3,26	3,20	3,16	3,08	3,04
210	3,33	3,22	3,16	3,11	3,03	2,99
220	3,29	3,18	3,11	3,07	2,99	2,95
230	3,25	3,13	3,07	3,03	2,94	2,91
240	3,21	3,10	3,03	2,99	2,90	2,86
250	3,17	3,06	2,99	2,95	2,87	2,83
260	3,14	3,02	2,96	2,91	2,83	2,79
270	3,10	2,99	2,92	2,88	2,79	2,75
280	3,07	2,96	2,89	2,85	2,76	2,72
290	3,04	2,92	2,86	2,81	2,73	2,69
300	3,01	2,89	2,83	2,78	2,69	2,65
310	2,98	2,87	2,80	2,75	2,66	2,62
320	2,96	2,84	2,77	2,71	2,63	2,59
330	2,93	2,81	2,74	2,70	2,61	2,57
340	2,91	2,78	2,72	2,67	2,58	2,54
350	2,88	2,76	2,69	2,64	2,55	2,51

EJE TRIDEM						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	3,44	3,35	3,30	3,27	3,22	3,19
110	3,36	3,26	3,20	3,17	3,12	3,09
120	3,33	3,18	3,12	3,09	3,02	2,99
130	3,23	3,11	3,05	3,01	2,94	2,91
140	3,17	3,04	2,98	2,94	2,87	2,83
150	3,12	2,99	2,92	2,88	2,80	2,77
160	3,08	2,94	2,87	2,82	2,74	2,70
170	3,03	2,89	2,82	2,77	2,69	2,65
180	2,99	2,85	2,77	2,72	2,63	2,60
190	2,96	2,81	2,73	2,68	2,59	2,55
200	2,93	2,77	2,69	2,64	2,54	2,50
210	2,89	2,74	2,65	2,60	2,50	2,46
220	2,87	2,71	2,62	2,56	2,47	2,42
230	2,84	2,68	2,59	2,53	2,43	2,38
240	2,81	2,65	2,56	2,50	2,40	2,35
250	2,79	2,62	2,53	2,47	2,37	2,32
260	2,77	2,60	2,50	2,44	2,34	2,29
270	2,74	2,57	2,48	2,42	2,31	2,26
280	2,72	2,55	2,46	2,39	2,28	2,23
290	2,70	2,53	2,43	2,37	2,26	2,20
300	2,68	2,51	2,41	2,35	2,23	2,18
310	2,67	2,49	2,39	2,33	2,21	2,16
320	2,65	2,47	2,37	2,31	2,19	2,13
330	2,63	2,45	2,35	2,29	2,17	2,11
340	2,61	2,43	2,33	2,27	2,15	2,09
350	2,60	2,42	2,32	2,25	2,13	2,07

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p.41.

ANEXO I

Tabla 11. Factor de erosión para ejes Trídem en pavimentos de concreto con dovelas, sin berma y con berma de concreto.

EJE TRIDEM						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	3,86	3,80	3,75	3,71	3,62	3,56
110	3,76	3,68	3,65	3,62	3,53	3,48
120	3,68	3,60	3,56	3,52	3,45	3,40
130	3,60	3,51	3,47	3,44	3,37	3,33
140	3,53	3,43	3,39	3,36	3,29	3,26
150	3,47	3,36	3,31	3,28	3,22	3,19
160	3,41	3,30	3,25	3,21	3,15	3,12
170	3,35	3,24	3,19	3,15	3,08	3,05
180	3,30	3,19	3,13	3,09	3,02	2,99
190	3,25	3,14	3,08	3,04	2,96	2,93
200	3,21	3,09	3,03	2,99	2,91	2,88
210	3,16	3,05	2,99	2,94	2,86	2,83
220	3,12	3,01	2,94	2,90	2,82	2,78
230	3,08	2,97	2,90	2,86	2,77	2,74
240	3,05	2,93	2,86	2,82	2,73	2,69
250	3,01	2,89	2,83	2,78	2,69	2,65
260	2,98	2,86	2,79	2,74	2,66	2,62
270	2,94	2,82	2,76	2,71	2,62	2,58
280	2,91	2,79	2,72	2,68	2,59	2,55
290	2,88	2,76	2,69	2,65	2,55	2,51
300	2,85	2,73	2,66	2,62	2,52	2,48
310	2,82	2,70	2,63	2,59	2,49	2,45
320	2,80	2,68	2,61	2,56	2,46	2,42
330	2,77	2,65	2,58	2,53	2,44	2,40
340	2,74	2,62	2,55	2,50	2,41	2,37
350	2,72	2,60	2,53	2,48	2,38	2,34

EJE TRIDEM						
ESPESOR DE LA LOSA (mm)	K DEL CONJUNTO SUBRASANTE/SUBBASE					
	20	40	60	80	140	180
100	3,27	3,17	3,13	3,12	3,07	3,03
110	3,19	3,07	3,02	3,00	2,95	2,92
120	3,12	2,99	2,93	2,90	2,85	2,82
130	3,06	2,92	2,85	2,81	2,76	2,73
140	3,00	2,86	2,78	2,74	2,67	2,64
150	2,95	2,80	2,73	2,67	2,59	2,56
160	2,91	2,76	2,67	2,62	2,52	2,49
170	2,86	2,71	2,62	2,57	2,47	2,43
180	2,82	2,67	2,58	2,52	2,41	2,37
190	2,79	2,63	2,54	2,48	2,37	2,32
200	2,75	2,59	2,50	2,44	2,32	2,28
210	2,72	2,56	2,47	2,40	2,28	2,23
220	2,68	2,53	2,43	2,37	2,23	2,20
230	2,65	2,49	2,40	2,34	2,21	2,16
240	2,62	2,46	2,37	2,31	2,18	2,13
250	2,59	2,44	2,34	2,28	2,15	2,10
260	2,57	2,41	2,32	2,25	2,12	2,07
270	2,54	2,38	2,29	2,22	2,10	2,04
280	2,51	2,36	2,26	2,20	2,07	2,01
290	2,49	2,33	2,24	2,17	2,04	1,99
300	2,47	2,31	2,22	2,15	2,02	1,96
310	2,44	2,29	2,19	2,13	2,00	1,94
320	2,42	2,26	2,17	2,10	1,97	1,92
330	2,40	2,24	2,15	2,08	1,95	1,89
340	2,38	2,22	2,13	2,06	1,93	1,87
350	2,36	2,20	2,11	2,04	1,91	1,85

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. PCA EB209P. SKOKIE (ILLINOIS), 1984, p.41.

ANEXO J

Imagen 18. Cálculos de troncal Américas, metodología de la PCA. Programa BS-PCA (eje direccional: simple, eje intermedio: simple, eje trasero: tándem).

Datos :TRONCAL AMERICAS, ALTERNATIVA 1

Resistencia K del Apoyo : 80 Mpa/m
 Espesor Losa : 230 mm
 Modulo de Rotura : 5 Mpa
 Bermas : SI
 Pasadores : SI
 Factor de Seguridad Cargas : 1.2
 Factor de Mayoración Repeticiones : 1

Resultados :

Carga kN	Carga FS kN	Repeticiones Esperadas	Repeticiones Admisib_Fatiga	Consumo Fatiga %	Repeticiones Admisi_Erosion	Consumo Erosion %
EJES SIMPLES						
Esfuerzo Equivalente: 1,1		Factor Esfuerzo: 0,2160		Factor Erosion: 2,1900		
74,00	88,80	20.074.079	Inf	0,00	Inf	0,00
123,00	147,60	20.074.079	Inf	0,00	6.557.344	306,13
EJES TANDEM						
Esfuerzo Equivalente: 0,9		Factor Esfuerzo: 0,1840		Factor Erosion: 2,2700		
123,00	147,60	20.074.079	Inf	0,00	Inf	0,00
EJES TRIDEM						
Esfuerzo Equivalente: 0,7		Factor Esfuerzo: 0,1440		Factor Erosion: 2,3400		
Total :				0,00	306,13	

Fuente 28. Programa BS-PCA.

Imagen 19. Cálculos de troncal Américas, metodología de la PCA. Programa BS-PCA (eje direccional: simple, eje intermedio: tándem, eje trasero: tándem)

Datos :TRONCAL AMERICAS, ALTERNATIVA 2

Resistencia K del Apoyo : 80 Mpa/m
 Espesor Losa : 160 mm
 Modulo de Rotura : 5 Mpa
 Bermas : SI
 Pasadores : SI
 Factor de Seguridad Cargas : 1.2
 Factor de Mayoración Repeticiones : 1

Resultados :

Carga kN	Carga FS kN	Repeticiones Esperadas	Repeticiones Admisib_Fatiga	Consumo Fatiga %	Repeticiones Admisi_Erosion	Consumo Erosion %
EJES SIMPLES						
Esfuerzo Equivalente: 1,8		Factor Esfuerzo: 0,3500		Factor Erosion: 2,6200		
74,00	88,80	20.074.079	Inf	0,00	7.108.045	282,41
EJES TANDEM						
Esfuerzo Equivalente: 1,5		Factor Esfuerzo: 0,2920		Factor Erosion: 2,6000		
123,00	147,60	40.148.157	Inf	0,00	Inf	0,00
EJES TRIDEM						
Esfuerzo Equivalente: 1,2		Factor Esfuerzo: 0,2400		Factor Erosion: 2,6200		
Total :				0,00	282,41	

Fuente 29. Programa BS-PCA.

Imagen 20. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de la PCA. Programa BS-PCA (eje direccional: simple, eje intermedio: simple, eje trasero: tándem).

Datos :CALZADA OCCIDENTAL TRANSMILENIO SECTOR 6 SOBRE ASFALTO

Resistencia K del Apoyo : 63 Mpa/m
 Espesor Losa : 290 mm
 Modulo de Rotura : 45 Mpa
 Bermas : NO
 Pasadores : SI
 Factor de Seguridad Cargas : 1.2
 Factor de Mayoración Repeticiones : 1,1

Resultados :

Carga Tn	Carga FS kN	Repeticiones Esperadas	Repeticiones Admisib_Fatiga	Consumo Fatiga %	Repeticiones Admisi_Erosion	Consumo Erosion %
EJES SIMPLES						
Esfuerzo Equivalente: 1,0 Factor Esfuerzo: 0,0218 Factor Erosion: 2,3385						
7,50	88,20	23.105.235	Inf	0,00	Inf	0,00
12,50	147,00	23.105.235	Inf	0,00	18.797.793	122,91
EJES TANDEM						
Esfuerzo Equivalente: 0,9 Factor Esfuerzo: 0,0202 Factor Erosion: 2,5255						
12,50	147,00	23.105.235	Inf	0,00	Inf	0,00
EJES TRIDEM						
Esfuerzo Equivalente: 0,7 Factor Esfuerzo: 0,0156 Factor Erosion: 2,6840						
				Total :	0,00	122,91

Fuente 30. Programa BS-PCA.

Imagen 21. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de la PCA. Programa BS-PCA (eje direccional: simple, eje intermedio: tándem, eje trasero: tándem).

Datos :CALZADA OCCIDENTAL TRANSMILENIO SECTOR 6 SOBRE ASFALTO

Resistencia K del Apoyo : 63 Mpa/m
 Espesor Losa : 220 mm
 Modulo de Rotura : 45 Mpa
 Bermas : NO
 Pasadores : SI
 Factor de Seguridad Cargas : 1.2
 Factor de Mayoración Repeticiones : 1,1

Resultados :

Carga Tn	Carga FS kN	Repeticiones Esperadas	Repeticiones Admisib_Fatiga	Consumo Fatiga %	Repeticiones Admisi_Erosion	Consumo Erosion %
EJES SIMPLES						
Esfuerzo Equivalente: 1,4 Factor Esfuerzo: 0,0322 Factor Erosion: 2,6900						
7,50	88,20	23.105.235	Inf	0,00	46.874.847	49,29
EJES TANDEM						
Esfuerzo Equivalente: 1,3 Factor Esfuerzo: 0,0279 Factor Erosion: 2,8255						
12,50	147,00	46.210.470	Inf	0,00	62.866.473	73,51
EJES TRIDEM						
Esfuerzo Equivalente: 0,9 Factor Esfuerzo: 0,0209 Factor Erosion: 2,9340						
				Total :	0,00	122,80

Fuente 31. Programa BS-PCA.

Imagen 22. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de la PCA. Programa BS-PCA (eje direccional: simple, eje intermedio: simple, eje trasero: tándem).

troncal calle 6ta, calzada sur, alternativa 1: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

DISEÑO PAVIMENTOS RIGIDOS - METODO PCA
UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
Software : BS-PCA

Datos : troncal calle 6ta, calzada sur, alternativa 1.

Resistencia K del Apoyo : 110 Mpa/m
Espesor Losa : 300 mm
Modulo de Rotura : 4.5 Mpa
Bermas : NO
Pasadores : SI
Factor de Seguridad Cargas : 1.2
Factor de Mayoración Repeticiones : 1,1

Resultados :

Carga kN	Carga FS kN	Repeticiones Esperadas	Repeticiones Admisib_Fatiga	Consumo Fatiga %	Repeticiones Admisi_Erosion	Consumo Erosion %
EJES SIMPLES						
Esfuerzo Equivalente: 0,9 Factor Esfuerzo: 0,1900 Factor Erosion: 2,2750						
75,00	90,00	25.344.317	Inf	0,00	Inf	0,00
125,00	150,00	25.344.317	Inf	0,00	29.525.751	85,84
EJES TANDEM						
Esfuerzo Equivalente: 0,8 Factor Esfuerzo: 0,1700 Factor Erosion: 2,4350						
125,00	150,00	25.344.317	Inf	0,00	Inf	0,00
EJES TRIDEM						
Esfuerzo Equivalente: 0,6 Factor Esfuerzo: 0,1289 Factor Erosion: 2,5700						
				Total :	0,00	85,84

Fuente 32. Programa BS-PCA.

Imagen 23. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de la PCA. Programa BS-PCA (eje direccional: simple, eje intermedio: tándem, eje trasero: tándem)

troncal calle 6ta, calzada sur, alternativa 2: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

DISEÑO PAVIMENTOS RIGIDOS - METODO PCA
UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
Software : BS-PCA

Datos : troncal calle 6ta, calzada sur, alternativa 2.

Resistencia K del Apoyo : 110 Mpa/m
Espesor Losa : 230 mm
Modulo de Rotura : 4.5 Mpa
Bermas : NO
Pasadores : SI
Factor de Seguridad Cargas : 1.2
Factor de Mayoración Repeticiones : 1,1

Resultados :

Carga kN	Carga FS kN	Repeticiones Esperadas	Repeticiones Admisib_Fatiga	Consumo Fatiga %	Repeticiones Admisi_Erosion	Consumo Erosion %
EJES SIMPLES						
Esfuerzo Equivalente: 1,2 Factor Esfuerzo: 0,2767 Factor Erosion: 2,6200						
75,00	90,00	25.344.317	Inf	0,00	99.309.129	25,52
EJES TANDEM						
Esfuerzo Equivalente: 1,1 Factor Esfuerzo: 0,2333 Factor Erosion: 2,7250						
125,00	150,00	53.450.513	Inf	0,00	225.363.140	23,72
EJES TRIDEM						
Esfuerzo Equivalente: 0,8 Factor Esfuerzo: 0,1744 Factor Erosion: 2,8150						
				Total :	0,00	49,24

Fuente 33. Programa BS-PCA.

Imagen 24. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de la PCA. Programa BS-PCA (eje direccional: simple, eje intermedio: sencillo, eje trasero: tándem).

S: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

DISEÑO PAVIMENTOS RIGIDOS - METODO PCA
UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
Software : BS-PCA

Datos :AV SUBA, SECTOR 5 OCCIDENTAL, ALTERNATIVA 1, ESTRUCTURA REHABILITADA.

Resistencia K del Apoyo : 90 Mpa/m
Espesor Losa : 250 mm
Modulo de Rotura : 5 Mpa
Bermas : NO
Pasadores : SI
Factor de Seguridad Cargas : 1.2
Factor de Mayoración Repeticiones : 1

Resultados :

Carga kN	Carga FS kN	Repeticiones Esperadas	Repeticiones Admisib_Fatiga	Consumo Fatiga %	Repeticiones Admisi_Erosion	Consumo Erosion %
EJES SIMPLES						
Esfuerzo Equivalente: 1,1 Factor Esfuerzo: 0,2283 Factor Erosion: 2,5167						
74,00	88,80	18.365.543	Inf	0,00	1.425.657.566	1,29
123,00	147,60	18.365.543	Inf	0,00	4.169.031	440,52
EJES TANDEM						
Esfuerzo Equivalente: 1,0 Factor Esfuerzo: 0,1977 Factor Erosion: 2,6517						
123,00	147,60	18.365.543	Inf	0,00	8.837.901.999	0,21
EJES TRIDEM						
Esfuerzo Equivalente: 0,7 Factor Esfuerzo: 0,1487 Factor Erosion: 2,7650						
Total :				0,00	442,02	

Fuente 34. Programa BS-PCA.

Imagen 25. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de la PCA. Programa BS-PCA (eje direccional: simple, eje intermedio: tándem, eje trasero: tándem).

S: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

DISEÑO PAVIMENTOS RIGIDOS - METODO PCA
UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
Software : BS-PCA

Datos :AV SUBA, SECTOR 5 OCCIDENTAL, ALTERNATIVA 2, ESTRUCTURA REHABILITADA.

Resistencia K del Apoyo : 90 Mpa/m
Espesor Losa : 190 mm
Modulo de Rotura : 5 Mpa
Bermas : NO
Pasadores : SI
Factor de Seguridad Cargas : 1.2
Factor de Mayoración Repeticiones : 1

Resultados :

Carga kN	Carga FS kN	Repeticiones Esperadas	Repeticiones Admisib_Fatiga	Consumo Fatiga %	Repeticiones Admisi_Erosion	Consumo Erosion %
EJES SIMPLES						
Esfuerzo Equivalente: 1,7 Factor Esfuerzo: 0,3363 Factor Erosion: 2,8767						
74,00	88,80	18.365.543	Inf	0,00	7.997.292	229,65
EJES TANDEM						
Esfuerzo Equivalente: 1,4 Factor Esfuerzo: 0,2767 Factor Erosion: 2,9633						
123,00	147,60	36.731.086	Inf	0,00	14.542.818	252,57
EJES TRIDEM						
Esfuerzo Equivalente: 1,0 Factor Esfuerzo: 0,2087 Factor Erosion: 3,0267						
Total :				0,00	482,22	

Fuente 35. Programa BS-PCA.

ANEXO K

Tabla 63. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads (configuración bus actual).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI						
Factor de mayoracion	1,0			CBR efectivo(%)	24		
Factor de seguridad de carga f_s (MPA)	5,0			Espesor de la losa (mm)	240		
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		SAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,65	factor de erosión		1,53
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	20.074.079	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/		SADT					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,02	factor de erosión		2,1338
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	20.074.079	Infinito	0,00	16.203.188	123,89	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/		SADT					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,02	factor de erosión		2,13
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	20.074.079	Infinito	0,00	16.203.188	123,89	
			Total (Fatiga)		Total (Erosión)		
			0,00		247,78		

Tabla 64. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads (configuración 1).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI						
Factor de mayoracion	1,0			CBR efectivo(%)	24		
Factor de seguridad de carga f_s (MPA)	5,0			Espesor de la losa (mm)	250		
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		SAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,61	factor de erosión		1,48
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	20.074.079	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/		SADT					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,37	factor de erosión		2,0847
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	20.074.079	Infinito	0,00	61.265.548	32,77	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		TAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,61	factor de erosión		2,19
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	20.074.079	Infinito	0,00	6.099.609	329,10	
			Total (Fatiga)		Total (Erosión)		
			0,00		361,87		

Tabla 65. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads (configuración 2).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores		SI					
Berma		SI					
factor de mayoracion		1.0	CBR efectivo(%)		24		
Factor de seguridad de carga		1.2	Espesor de la losa (mm)		260		
$f_{st}(MPa)$		5.0					

UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		SAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,58	factor de erosión	1,43	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	20.074.079	Infinito	0,00	infinito	0,00	

EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		TAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,58	factor de erosión	2,1561	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	20.074.079	Infinito	0,00	10.606.504	189,26	

EJE TANDEM LLANTA SIMPLE								
Grupo de ejes/		TAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,58	factor de erosión	2,16		
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión			
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)		
123	147,6	20.074.079	Infinito	0,00	10.606.504	189,26		
			Total (Fatiga)	0,00			Total (Erosión)	378,52

Tabla 66. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads (configuración 3)

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores		SI					
Berma		SI					
factor de mayoracion		1.0	CBR efectivo(%)		24		
Factor de seguridad de carga		1.2	Espesor de la losa (mm)		230		
$f_{st}(MPa)$		5.0					

UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		SAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,69	factor de erosión	1,58	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	20.074.079	Infinito	0,00	infinito	0,00	

UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/		SADT					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,08	factor de erosión	2,1852	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	20.074.079	Infinito	0,00	6.648.052	301,95	

EJE TANDEM LLANTA DOBLE								
Grupo de ejes/		TADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,92	factor de erosión	2,27		
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión			
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)		
123	147,6	20.074.079	Infinito	0,00	infinito	0,00		
			Total (Fatiga)	0,00			Total (Erosión)	301,95

Tabla 67. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads (configuración 4).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI						
Factor de mayoracion	1,0			CBR efectivo(%)	24		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	180		
$f_{st}(19\%_a)$	5,0						

Grupo de ejes/		UN EJE LLANTA SIMPLE					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,99	factor de erosión	1,88	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	20.074.079	Infinito	0,00	7.984.135.682	0,25	

Grupo de ejes/		EJE TANDEM LLANTA DOBLE					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,25	factor de erosión	2,4938	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	20.074.079	Infinito	0,00	infinito	0,00	

Grupo de ejes/		EJE TANDEM LLANTA DOBLE					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,25	factor de erosión	2,49	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	20.074.079	Infinito	0,00	infinito	0,00	

Total (Fatiga) 0,00 Total (Erosión) 0,25

Tabla 68. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads (configuración bus actual)

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI						
Factor de mayoracion	1,1			CBR efectivo(%)	14		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	310		
$f_{st}(19\%_a)$	4,5						

Grupo de ejes/		UN EJE LLANTA SIMPLE					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,52	factor de erosión	1,40	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	21.004.759	Infinito	0,00	infinito	0,00	

Grupo de ejes/		UN EJE LLANTA DOBLE					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,89	factor de erosión	2,2506	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004.759	Infinito	0,00	44.604.161	51,80	

Grupo de ejes/		UN EJE LLANTA DOBLE					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,89	factor de erosión	2,25	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004.759	Infinito	0,00	44.604.161	51,80	

Total (Fatiga) 0,00 Total (Erosión) 103,60

Tabla 69. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads (configuración 1).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI						
	NO						
Factor de mayoracion	1,1			CBR efectivo(%)	14		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	350		
$f_{st}(MPa)$	4,5						
Grupo de ejes/		SAST	UN EJE LLANTA SIMPLE				
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,43	factor de erosión	1,25	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	21.004.759	Infinito	0,00	infinito	0,00	
Grupo de ejes/		SADT	UN EJE LLANTA DOBLE				
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,75	factor de erosión	2,1045	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004.759	Infinito	0,00	508.312.041	4,54	
Grupo de ejes/		TAST	EJE TANDEM LLANTA SIMPLE				
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,43	factor de erosión	2,34	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004.759	Infinito	0,00	18.611.357	124,15	
Total (Fatiga)				0,00	Total (Erosión)		128,69

Tabla 70. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads (configuración 2).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI						
	NO						
Factor de mayoracion	1,1			CBR efectivo(%)	14		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	370		
$f_{st}(MPa)$	4,5						
Grupo de ejes/		SAST	UN EJE LLANTA SIMPLE				
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,39	factor de erosión	1,19	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	21.004.759	Infinito	0,00	infinito	0,00	
Grupo de ejes/		TAST	EJE TANDEM LLANTA SIMPLE				
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,39	factor de erosión	2,2830	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004.759	Infinito	0,00	31.255.090	73,92	
Grupo de ejes/		TAST	EJE TANDEM LLANTA SIMPLE				
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,39	factor de erosión	2,28	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004.759	Infinito	0,00	31.255.090	73,92	
Total (Fatiga)				0,00	Total (Erosión)		147,85

Tabla 71. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads (configuración 3).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores	SI						
Berma	NO						
Factor de mayoracion	1,1			CBR efectivo(%)	14		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	290		
$f_{sd}(MPa)$	4,5						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,58	factor de erosión	1,48	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	21.004.759	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	SADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,96	factor de erosión	2,3338	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004.759	Infinito	0,00	18.896.645	122,27	
EJE TANDEM LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	TADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,91	factor de erosión	2,52	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004.759	Infinito	0,00	infinito	0,00	
				Total (Fatiga)	0,00	Total (Erosión)	122,27

Tabla 72. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads (configuración 4).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores	SI						
Berma	NO						
Factor de mayoracion	1,1			CBR efectivo(%)	14		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	220		
$f_{sd}(MPa)$	4,5						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,88	factor de erosión	1,84	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	21.004.759	Infinito	0,00	infinito	0,00	
EJE TANDEM LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	TADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,25	factor de erosión	2,8244	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004.759	Infinito	0,00	62.706.013	36,85	
EJE TANDEM LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	TADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,25	factor de erosión	2,82	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004.759	Infinito	0,00	62.706.013	36,85	
				Total (Fatiga)	0,00	Total (Erosión)	73,69

Tabla 73. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads (configuración bus actual).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI NO						
Factor de mayoracion	1,1			CBR efectivo(%)	36		
Factor de seguridad de carga $f_{sf}(0,95)$	1,2 4,5			Espesor de la losa (mm)	310		
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,49	factor de erosión	1,17	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	23.040.288	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	SADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,83	factor de erosión	2,2328	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040.288	Infinito	0,00	55.078.956	46,01	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	SADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,83	factor de erosión	2,23	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040.288	Infinito	0,00	55.078.956	46,01	
				Total (Fatiga)	0,00	Total (Erosión)	92,03

Tabla 74. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads (configuración 1).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI NO						
Factor de mayoracion	1,1			CBR efectivo(%)	36		
Factor de seguridad de carga $f_{sf}(0,95)$	1,2 4,5			Espesor de la losa (mm)	350		
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,41	factor de erosión	1,02	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	23.040.288	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	SADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,70	factor de erosión	2,0859	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040.288	Infinito	0,00	919.317.775	2,76	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	TAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,41	factor de erosión	2,28	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040.288	Infinito	0,00	33.830.918	74,91	
				Total (Fatiga)	0,00	Total (Erosión)	77,67

Tabla 75. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads (configuración 2).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores	SI						
Berma	NO						
Factor de mayoracion	1,1			CBR efectivo(%)	36		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	370		
$f_{sd}(MPa)$	4,5						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,37	factor de erosión	0,96	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	23.040.288	Infinito	0,00	infinito	0,00	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	TAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,37	factor de erosión	2,2218	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040.288	Infinito	0,00	63.142.651	40,14	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	TAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,37	factor de erosión	2,22	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040.288	Infinito	0,00	63.142.651	40,14	
				Total (Fatiga)	0,00	Total (Erosión)	80,28

Tabla 76 . Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads (configuración 3).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores	SI						
Berma	NO						
Factor de mayoracion	1,1			CBR efectivo(%)	36		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	300		
$f_{sd}(MPa)$	4,5						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,52	factor de erosión	1,21	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	23.040.288	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	SADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,87	factor de erosión	2,2737	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040.288	Infinito	0,00	34.530.959	73,40	
EJE TANDEM LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	TADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,78	factor de erosión	2,43	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040.288	Infinito	0,00	infinito	0,00	
				Total (Fatiga)	0,00	Total (Erosión)	73,40

Tabla 77. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads (configuración 4).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI						
	NO						
Factor de mayoracion	1,1			CBR efectivo(%)	36		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	210		
$f_{sd}(11\%v)$	4,5						

Grupo de ejes/		UN EJE LLANTA SIMPLE					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,83	factor de erosión	1,68	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	23.040.288	Infinito	0,00	infinito	0,00	

Grupo de ejes/		EJE TANDEM LLANTA DOBLE					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,18	factor de erosión	2,8324	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040.288	Infinito	0,00	56.804.827	44,62	

Grupo de ejes/		EJE TANDEM LLANTA DOBLE					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,18	factor de erosión	2,83	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040.288	Infinito	0,00	56.804.827	44,62	

Total (Fatiga)	0,00	Total (Erosión)	89,23
----------------	------	-----------------	-------

Tabla 78. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads (configuración bus actual).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI						
	NO						
Factor de mayoracion	1,0			CBR efectivo(%)	27		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	270		
$f_{sd}(11\%v)$	5,0						

Grupo de ejes/		UN EJE LLANTA SIMPLE					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,62	factor de erosión	1,42	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	18.365.543	Infinito	0,00	infinito	0,00	

Grupo de ejes/		UN EJE LLANTA DOBLE					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,04	factor de erosión	2,4137	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	3.344.304	196,54	

Grupo de ejes/		UN EJE LLANTA DOBLE					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,04	factor de erosión	2,41	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	3.344.304	196,54	

Total (Fatiga)	0,00	Total (Erosión)	393,09
----------------	------	-----------------	--------

Tabla 79. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads (configuración 1).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores	SI						
Berma	NO						
Factor de mayoracion	1,0			CBR efectivo(%)	27		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	290		
$f_{d(10^6)}$	5,0						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,56	factor de erosión	1,33	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	18.365.543	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	SADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,34	factor de erosión	2,3224	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	21.044.250	87,27	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	TAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,56	factor de erosión	2,49	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	5.210.868	352,45	
				Total (Fatiga)	0,00	Total (Erosión)	439,72

Tabla 80. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads (configuración 2).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores	SI						
Berma	NO						
Factor de mayoracion	1,0			CBR efectivo(%)	27		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	310		
$f_{d(10^6)}$	5,0						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,50	factor de erosión	1,25	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	18.365.543	Infinito	0,00	infinito	0,00	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	TAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,50	factor de erosión	2,4173	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	3.070.457	202,48	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	TAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,50	factor de erosión	2,42	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	3.070.457	202,48	
				Total (Fatiga)	0,00	Total (Erosión)	404,95

Tabla 81. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads (configuración 3).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)								
Pasadores	SI							
Berma	NO							
Factor de mayoracion	1,0			CBR efectivo(%)	27			
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	250			
$f_{st}(10^4)$	5,0							
UN EJE LLANTA SIMPLE								
Grupo de ejes/		SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,70	factor de erosión	1,52		
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión			
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)		
74	88,8	18.365.543	Infinito	0,00	infinito	0,00		
UN EJE LLANTA DOBLE								
Grupo de ejes/		SADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,15	factor de erosión	2,5139		
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión			
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)		
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	4.252.650	431,86		
EJE TANDEM LLANTA DOBLE								
Grupo de ejes/		TADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,00	factor de erosión	2,65		
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión			
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)		
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	15.573.065.200	0,12		
Total (Fatiga)				0,00	Total (Erosión)			431,98

Tabla 82. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads (configuración 4).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)								
Pasadores	SI							
Berma	NO							
Factor de mayoracion	1,0			CBR efectivo(%)	27			
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	200			
$f_{st}(10^4)$	5,0							
UN EJE LLANTA SIMPLE								
Grupo de ejes/		SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,98	factor de erosión	1,82		
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión			
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)		
74	88,8	18.365.543	Infinito	0,00	infinito	0,00		
EJE TANDEM LLANTA DOBLE								
Grupo de ejes/		TADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,30	factor de erosión	2,9043		
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión			
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)		
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	25.506.720	72,00		
EJE TANDEM LLANTA DOBLE								
Grupo de ejes/		TADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,30	factor de erosión	2,90		
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión			
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)		
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	25.506.720	72,00		
Total (Fatiga)				0,00	Total (Erosión)			144,01

ANEXO L

Tabla 83. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración bus actual).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores	SI			CBR efectivo(%)	24		
Berma	SI			Espesor de la losa (mm)	220		
Factor de mayoracion	1,0						
Factor de seguridad de carga	1,2						
$f_{st} (MPa)$	5,0						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,74	factor de erosión	1,64	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	18.365.543	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	SADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,15	factor de erosión	2,2392	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	3.253.616	564,47	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	SADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,15	factor de erosión	2,24	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	3.253.616	564,47	
			Total (Fatiga) <u>0,00</u>		Total (Erosión) <u>1128,93</u>		

Tabla 84. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 1).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores	SI			CBR efectivo(%)	24		
Berma	SI			Espesor de la losa (mm)	220		
Factor de mayoracion	1,0						
Factor de seguridad de carga	1,2						
$f_{st} (MPa)$	5,0						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,74	factor de erosión	1,64	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	18.365.543	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	SADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,15	factor de erosión	2,2392	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	3.253.616	564,47	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	TAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,74	factor de erosión	2,31	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	1.560.166	1177,15	
			Total (Fatiga) <u>0,00</u>		Total (Erosión) <u>1741,62</u>		

Tabla 85. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 2).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores	SI						
Berma	SI						
Factor de mayoracion	1,0			CBR efectivo(%)	24		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	180		
$f_{st}(0,99-0)$	5,0						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		SAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,99	factor de erosión	1,88	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	18.365,543	Infinito	0,00	7.984.135,682	0,23	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		TAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,99	factor de erosión	2,4938	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365,543	Infinito	0,00	315.946	5812,87	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		TAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,99	factor de erosión	2,49	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365,543	Infinito	0,00	315.946	5812,87	
Total (Fatiga)				0,00	Total (Erosión)		11625,97

Tabla 86. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 3).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores	SI						
Berma	SI						
Factor de mayoracion	1,0			CBR efectivo(%)	24		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	220		
$f_{st}(0,99-0)$	5,0						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		SAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,74	factor de erosión	1,64	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	18.365,543	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/		SADT					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,15	factor de erosión	2,2392	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365,543	Infinito	0,00	3.253.616	564,47	
EJE TANDEM LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/		TADT					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,97	factor de erosión	2,31	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365,543	Infinito	0,00	infinito	0,00	
Total (Fatiga)				0,00	Total (Erosión)		564,47

Tabla 87. Cálculos de troncal Américas, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 4) .

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores	SI						
Berma	SI						
Factor de mayoracion	1,0			CBR efectivo(%)	24		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	180		
$f_{st}(MPa)$	5,0						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		SAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,99	factor de erosión	1,88	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	18.365.543	Infinito	0,00	7.984.135.682	0,23	
EJE TANDEM LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/		TADT					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,25	factor de erosión	2,4938	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	infinito	0,00	
EJE TANDEM LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/		TADT					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,25	factor de erosión	2,49	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	infinito	0,00	
			Total (Fatiga)		Total (Erosión)		
			0,00		0,23		

Tabla 88. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración bus actual).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores	SI						
Berma	NO						
Factor de mayoracion	1,1			CBR efectivo(%)	14		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	280		
$f_{st}(MPa)$	4,5						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		SAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,61	factor de erosión	1,53	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	21.004.759	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/		SADT					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,03	factor de erosión	2,3782	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004.759	Infinito	0,00	12.641.571	182,77	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/		SADT					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,03	factor de erosión	2,38	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004.759	Infinito	0,00	12.641.571	182,77	
			Total (Fatiga)		Total (Erosión)		
			0,00		365,54		

Tabla 89. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 1).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI						
	NO						
Factor de mayoracion	1.1			CBR efectivo(%)	14		
Factor de seguridad de carga $f_{sf}(0.95)$	1.2			Espesor de la losa (mm)	270		
	4.5						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		SAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,64	factor de erosión	1,57	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	21.004,759	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/		SADT					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,08	factor de erosión	2,4247	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004,759	34.169,919	67,62	8.535,983	270,68	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		TAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,64	factor de erosión	2,60	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004,759	Infinito	0,00	2.296,270	1006,21	
Total (Fatiga)				67,62	Total (Erosión)		1276,89

Tabla 90. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 2).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI						
	NO						
Factor de mayoracion	1.1			CBR efectivo(%)	14		
Factor de seguridad de carga $f_{sf}(0.95)$	1.2			Espesor de la losa (mm)	220		
	4.5						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		SAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,88	factor de erosión	1,84	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	21.004,759	Infinito	0,00	infinito	0,00	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		TAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,88	factor de erosión	2,8244	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004,759	Infinito	0,00	437,735	4642,08	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		TAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,88	factor de erosión	2,82	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004,759	Infinito	0,00	437,735	4642,08	
Total (Fatiga)				0,00	Total (Erosión)		9284,15

Tabla 91. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 3).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI NO						
Factor de mayoracion	1,1			CBR efectivo(%)	14		
Factor de seguridad de carga $f_{sf}(0,95)$	1,2 4,5			Espesor de la losa (mm)	270		
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,64	factor de erosión	1,57	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	21.004.753	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	SADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,08	factor de erosión	2,4247	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004.753	34.163.919	67,62	8.535.383	270,68	
EJE TANDEM LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	TADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,99	factor de erosión	2,60	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004.753	Infinito	0,00	infinito	0,00	
Total (Fatiga)				67,62	Total (Erosión)		270,68

Tabla 92. Cálculos de troncal Carrera décima, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 4).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI NO						
Factor de mayoracion	1,1			CBR efectivo(%)	14		
Factor de seguridad de carga $f_{sf}(0,95)$	1,2 4,5			Espesor de la losa (mm)	220		
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,88	factor de erosión	1,84	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	21.004.753	Infinito	0,00	infinito	0,00	
EJE TANDEM LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	TADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,25	factor de erosión	2,8244	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004.753	Infinito	0,00	62.706.013	36,85	
EJE TANDEM LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	TADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,25	factor de erosión	2,82	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	21.004.753	Infinito	0,00	62.706.013	36,85	
Total (Fatiga)				0,00	Total (Erosión)		73,69

Tabla 93. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración bus actual).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI NO						
Factor de mayoracion	1,1			CBR efectivo(%)	36		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	260		
$f_{sd}(0,95)$	4,5						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		SAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,64	factor de erosión	1,39	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	23.040.288	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/		SADT					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,06	factor de erosión	2,4568	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040.288	Infinito	0,00	6.536.070	384,23	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/		SADT					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,06	factor de erosión	2,46	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040.288	Infinito	0,00	6.536.070	384,23	
			Total (Fatiga)	0,00	Total (Erosión)	768,47	

Tabla 94. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 1).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI NO						
Factor de mayoracion	1,1			CBR efectivo(%)	36		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	260		
$f_{sd}(0,95)$	4,5						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		SAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,64	factor de erosión	1,39	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	23.040.288	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/		SADT					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,06	factor de erosión	2,4568	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040.288	Infinito	0,00	6.536.070	384,23	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		TAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,64	factor de erosión	2,59	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040.288	Infinito	0,00	2.481.381	1021,38	
			Total (Fatiga)	0,00	Total (Erosión)	1405,61	

Tabla 95. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 2).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI NO						
Factor de mayoración	1,1			CBR efectivo(%)	36		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	210		
$f_{st}(0,95)$	4,5						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		SAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,89	factor de erosión	1,68	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	23.040,288	Infinito	0,00	infinito	0,00	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		TAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,89	factor de erosión	2,8324	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040,288	Infinito	0,00	472.506	5363,81	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		TAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,89	factor de erosión	2,83	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040,288	Infinito	0,00	472.506	5363,81	
			Total (Fatiga)	0,00	Total (Erosión)	10727,62	

Tabla 96. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 3).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI NO						
Factor de mayoración	1,1			CBR efectivo(%)	36		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	260		
$f_{st}(0,95)$	4,5						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/		SAST					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,64	factor de erosión	1,39	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	23.040,288	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/		SADT					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,06	factor de erosión	2,4568	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040,288	Infinito	0,00	6.596,070	384,23	
EJE TANDEM LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/		TADT					
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,31	factor de erosión	2,59	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040,288	Infinito	0,00	infinito	0,00	
			Total (Fatiga)	0,00	Total (Erosión)	384,23	

Tabla 97. Cálculos de troncal Calle sexta, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 4).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI						
	NO						
Factor de mayoracion	1,1			CBR efectivo(%)	36		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	210		
$f_{s(0.99)}$	4,5						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,89	factor de erosión	1,68	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	23.040,288	Infinito	0,00	infinito	0,00	
EJE TANDEM LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	TADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,18	factor de erosión	2,8324	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040,288	Infinito	0,00	56.804,827	44,62	
EJE TANDEM LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	TADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,18	factor de erosión	2,83	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	23.040,288	Infinito	0,00	56.804,827	44,62	
				Total (Fatiga)	0,00	Total (Erosión)	89,23

Tabla 98. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración bus actual).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores Berma	SI						
	NO						
Factor de mayoracion	1,0			CBR efectivo(%)	27		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	250		
$f_{s(0.99)}$	5,0						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,70	factor de erosión	1,52	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	18.365,543	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	SADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,15	factor de erosión	2,5139	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365,543	Infinito	0,00	4.252,650	431,86	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	SADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,15	factor de erosión	2,51	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365,543	Infinito	0,00	4.252,650	431,86	
				Total (Fatiga)	0,00	Total (Erosión)	863,72

Tabla 99. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 1).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores	SI						
Berma	NO						
Factor de mayoración	1,0		CBR efectivo(%)	27			
Factor de seguridad de carga	1,2		Espesor de la losa (mm)	250			
$f_{st}(0,994)$	5,0						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,70	factor de erosión	1,52	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	18.365.543	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	SADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,15	factor de erosión	2,5139	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	4.252.650	431,86	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	TAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,70	factor de erosión	2,65	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	1.617.112	1135,70	
Total (Fatiga)				0,00	Total (Erosión)		1567,56

Tabla 100. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 2).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores	SI						
Berma	NO						
Factor de mayoración	1,0		CBR efectivo(%)	27			
Factor de seguridad de carga	1,2		Espesor de la losa (mm)	200			
$f_{st}(0,994)$	5,0						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,98	factor de erosión	1,82	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	18.365.543	Infinito	0,00	infinito	0,00	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	TAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,98	factor de erosión	2,3049	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	294.296	6240,50	
EJE TANDEM LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	TAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,98	factor de erosión	2,30	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	294.296	6240,50	
Total (Fatiga)				0,00	Total (Erosión)		12480,99

Tabla 101. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 3).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores	SI						
Berma	NO						
Factor de mayoracion	1,0			CBR efectivo(%)	27		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	250		
$f_{d(0.99)}$	5,0						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,70	factor de erosión	1,52	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	18.365.543	Infinito	0,00	infinito	0,00	
UN EJE LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	SADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,15	factor de erosión	2,5139	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	4.252.650	431,86	
EJE TANDEM LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	TADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,00	factor de erosión	2,65	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	15.573.065.200	0,12	
Total (Fatiga)				0,00	Total (Erosión)		431,98

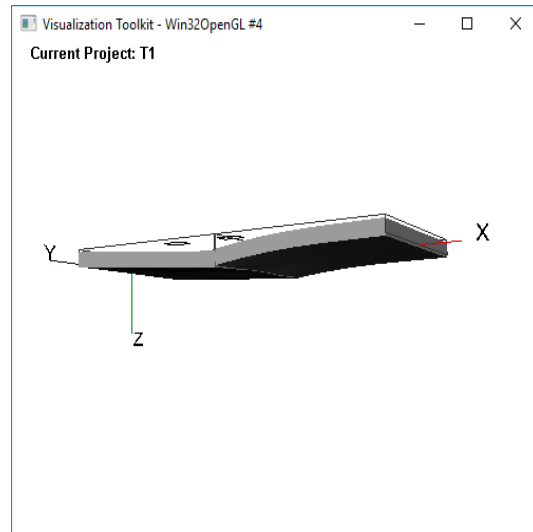
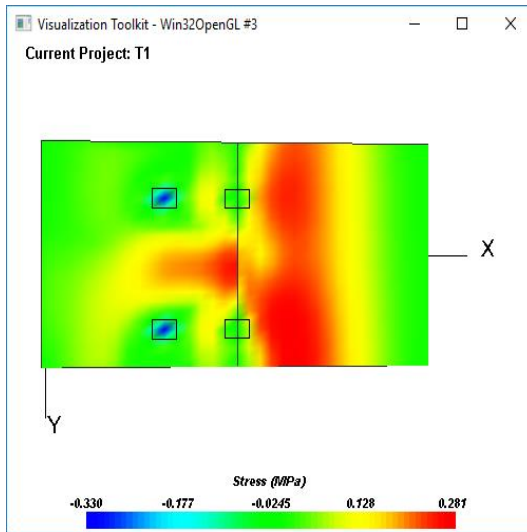
Tabla 102. Cálculos de troncal Avenida suba, metodología de Austroads verificando consumos por fatiga (configuración 4).

MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS (AUSTRROADS)							
Pasadores	SI						
Berma	NO						
Factor de mayoracion	1,0			CBR efectivo(%)	27		
Factor de seguridad de carga	1,2			Espesor de la losa (mm)	200		
$f_{d(0.99)}$	5,0						
UN EJE LLANTA SIMPLE							
Grupo de ejes/	SAST						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	0,98	factor de erosión	1,82	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
74	88,8	18.365.543	Infinito	0,00	infinito	0,00	
EJE TANDEM LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	TADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,30	factor de erosión	2,9049	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	25.506.720	72,00	
EJE TANDEM LLANTA DOBLE							
Grupo de ejes/	TADT						
Carga (kN)	Carga de diseño (kN)	Repeticiones esperadas	Esfuerzo equivalente	1,30	factor de erosión	2,90	
			Análisis por fatiga		Análisis por erosión		
			Repeticiones admisibles	Daño (%)	Repeticiones admisibles	Daño (%)	
123	147,6	18.365.543	Infinito	0,00	25.506.720	72,00	
Total (Fatiga)				0,00	Total (Erosión)		144,01

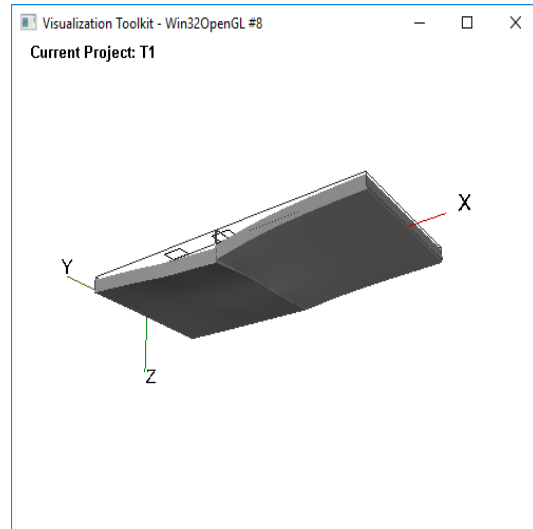
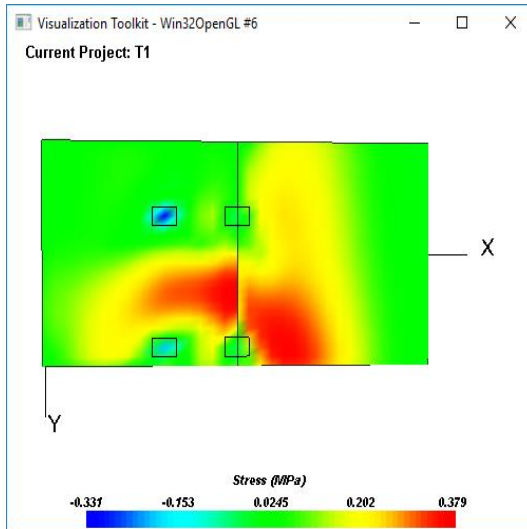
ANEXO M

- **Posición T1**

- **Con berma**

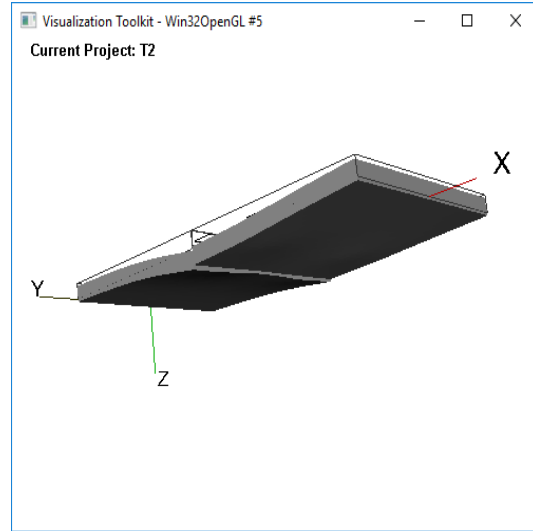
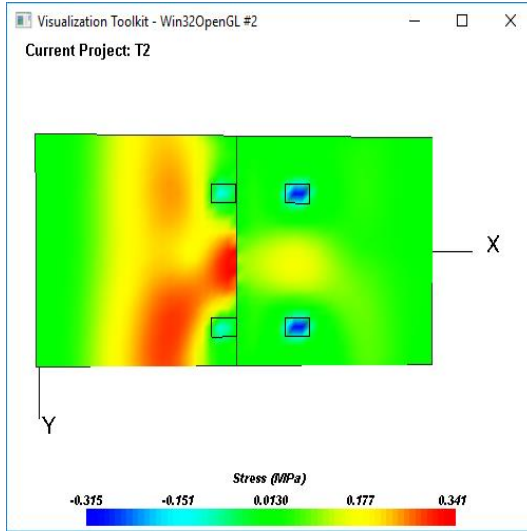


- **Sin berma**

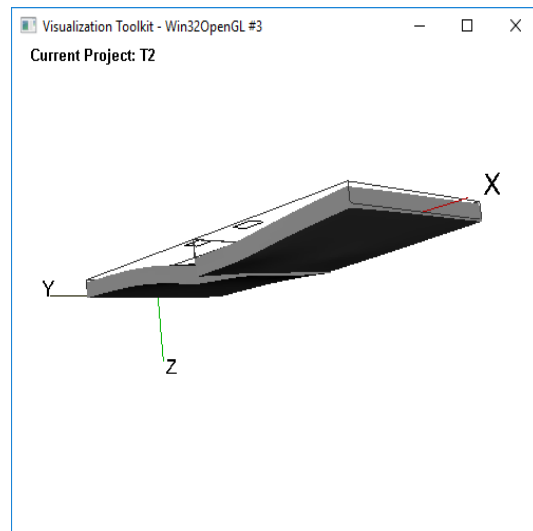
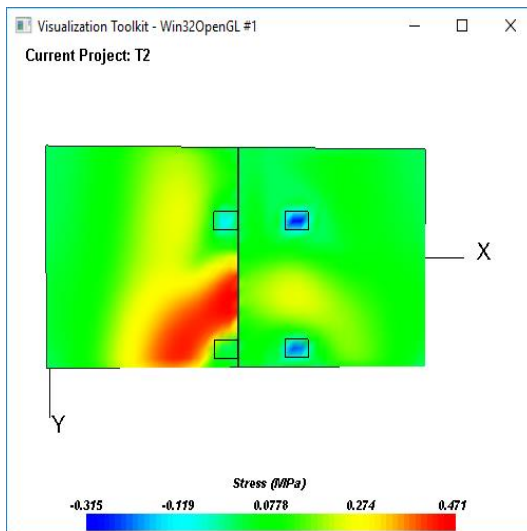


- **Posición T2**

- **Con berma**

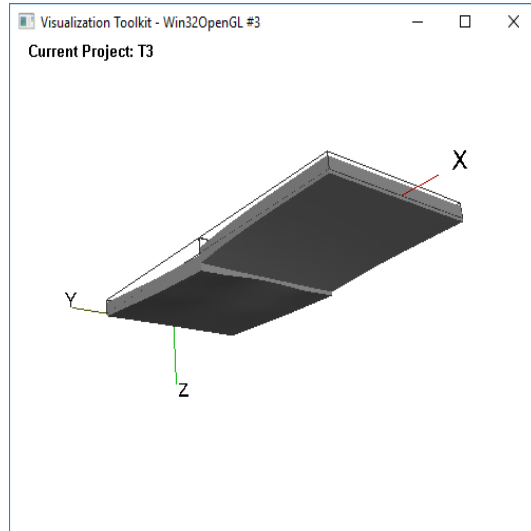
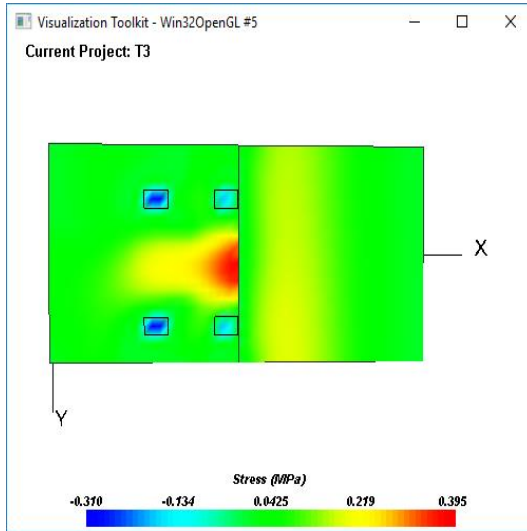


- **Sin berma**

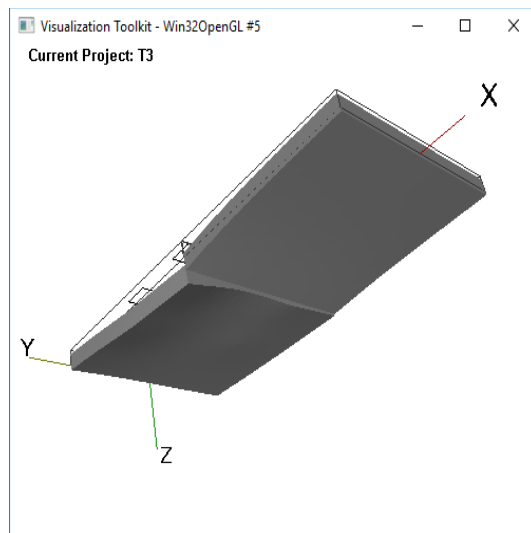
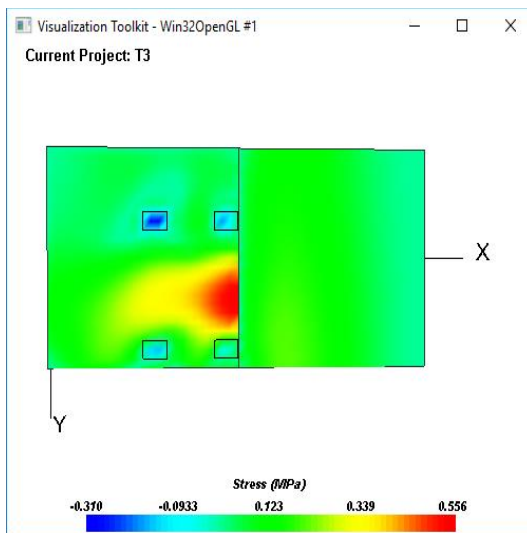


- **Posición T3**

➤ **Con berma**

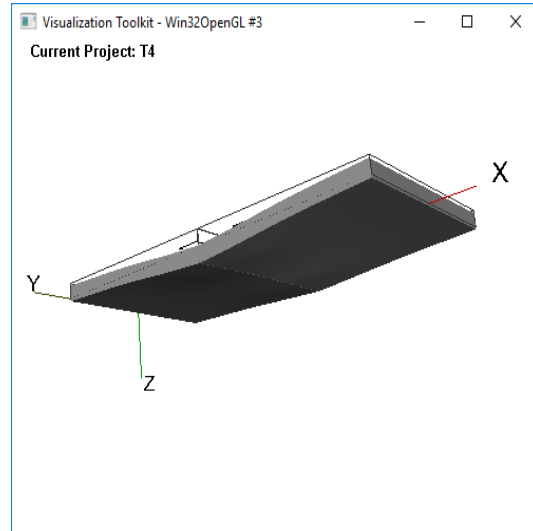
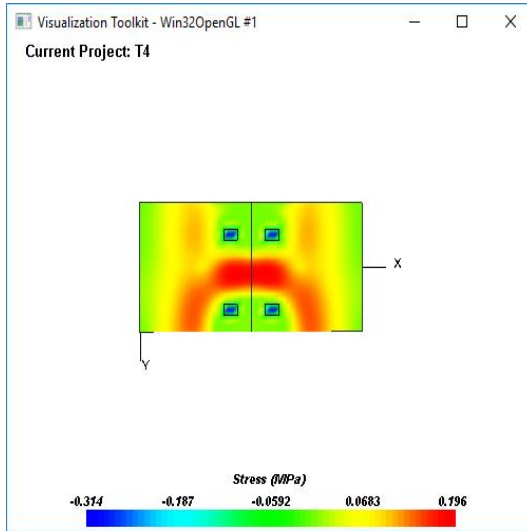


➤ **Sin berma**

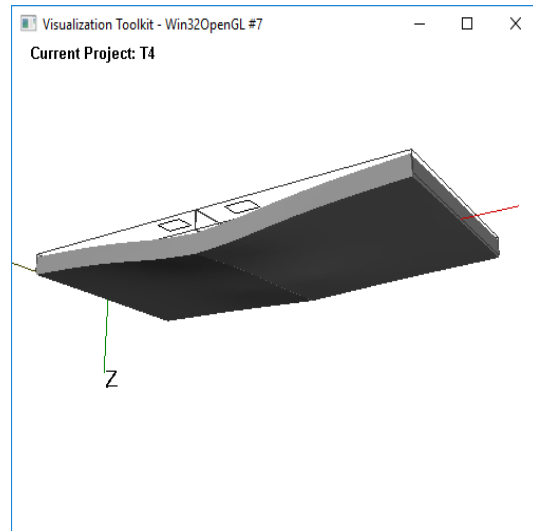
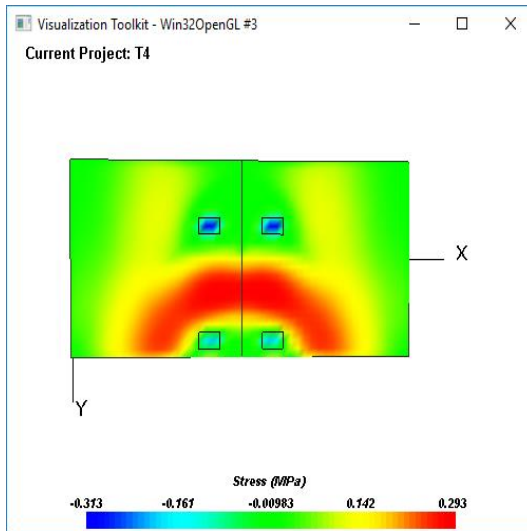


- **Posición T4**

➤ **Con berma**



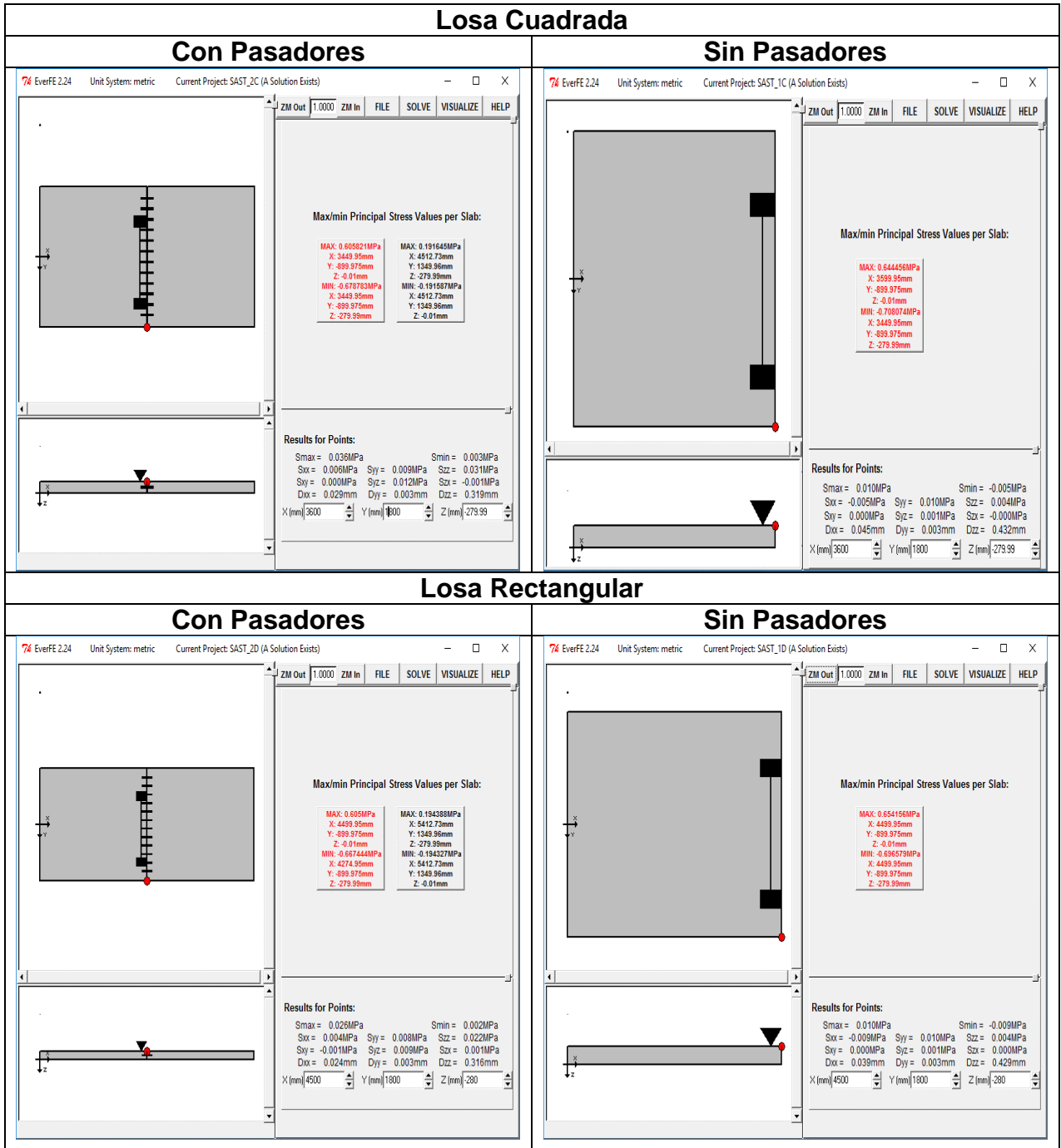
➤ **Sin berma**



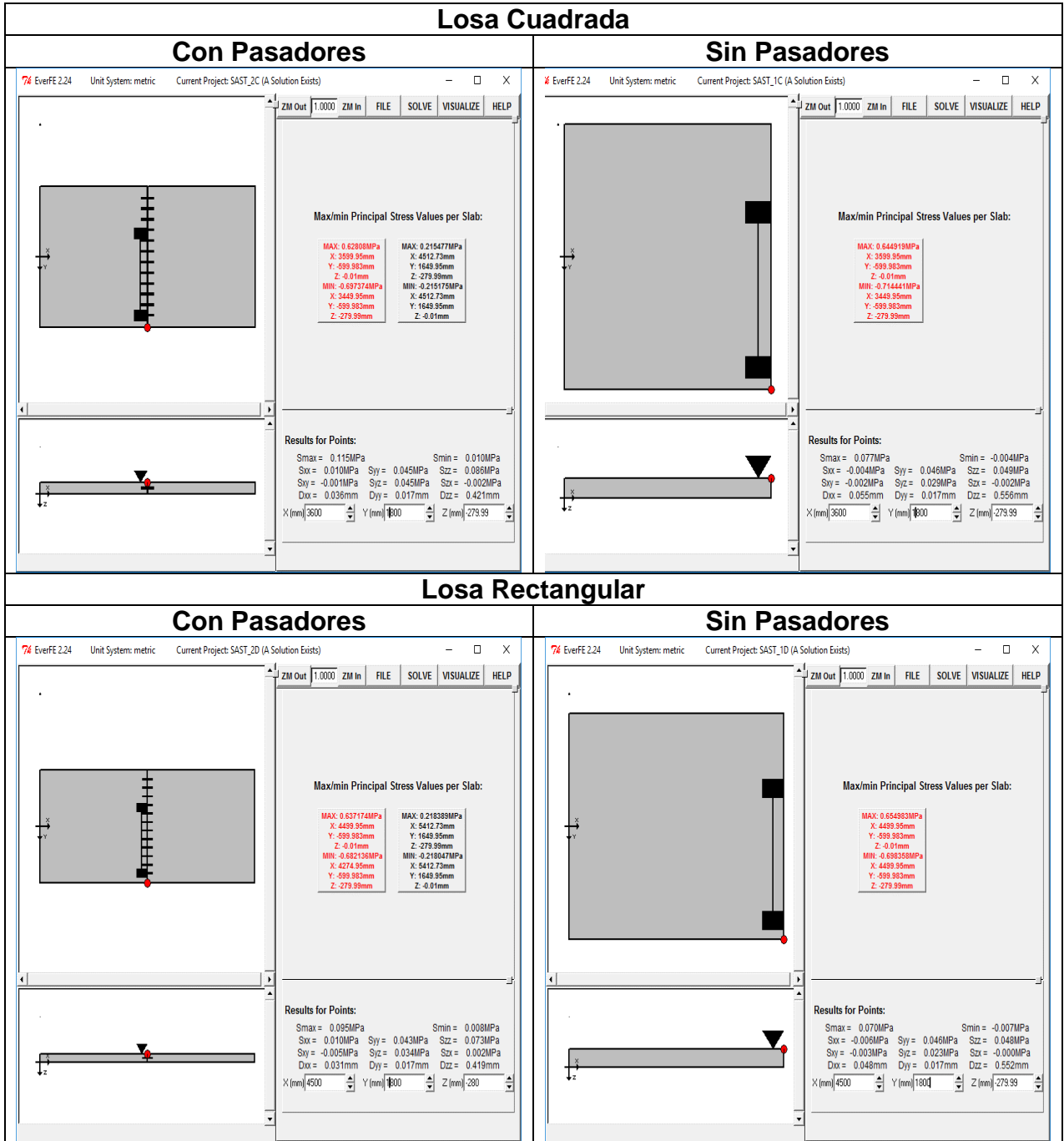
ANEXO N

- **SAST**

➤ Con berma

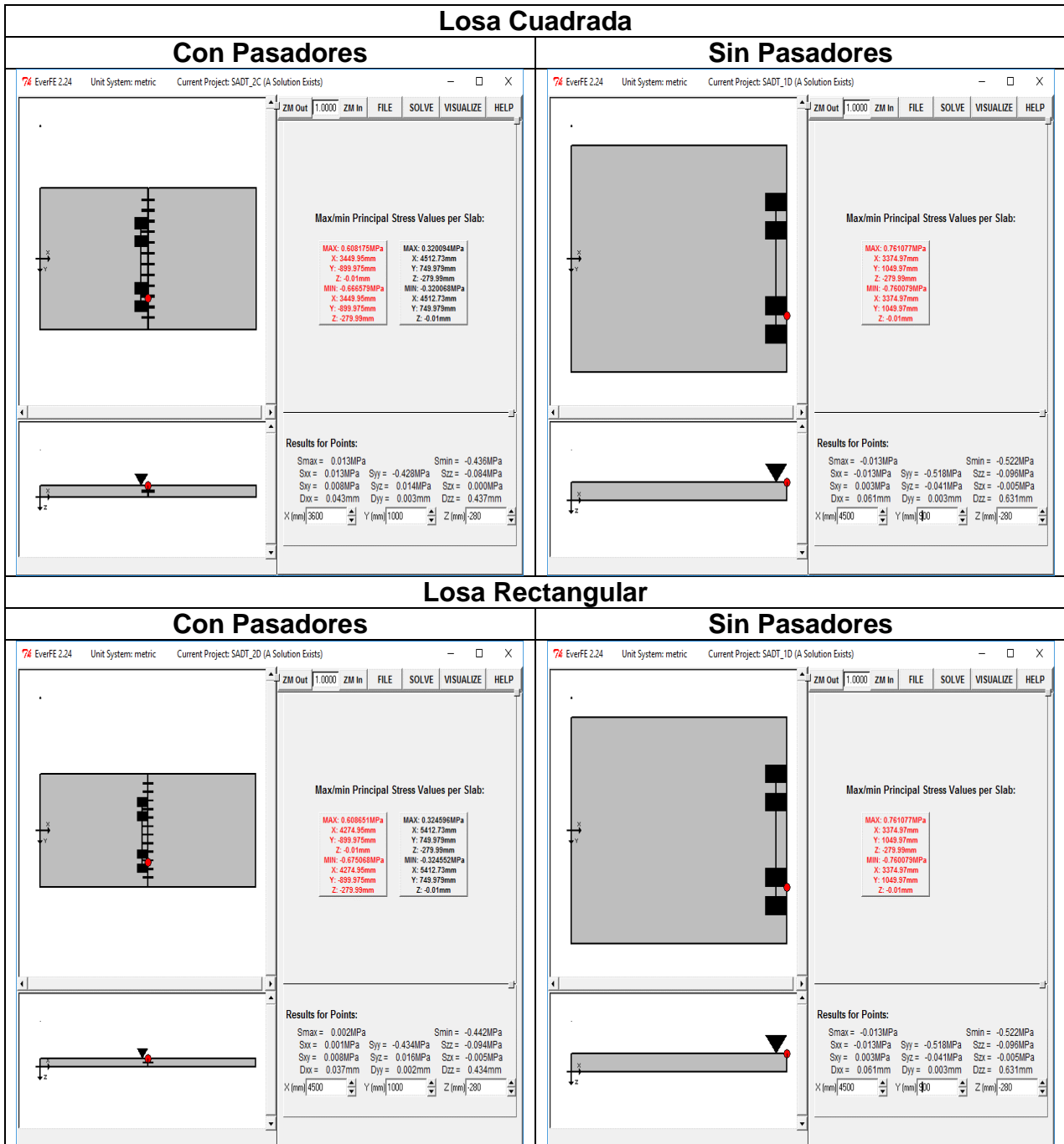


➤ Sin berma

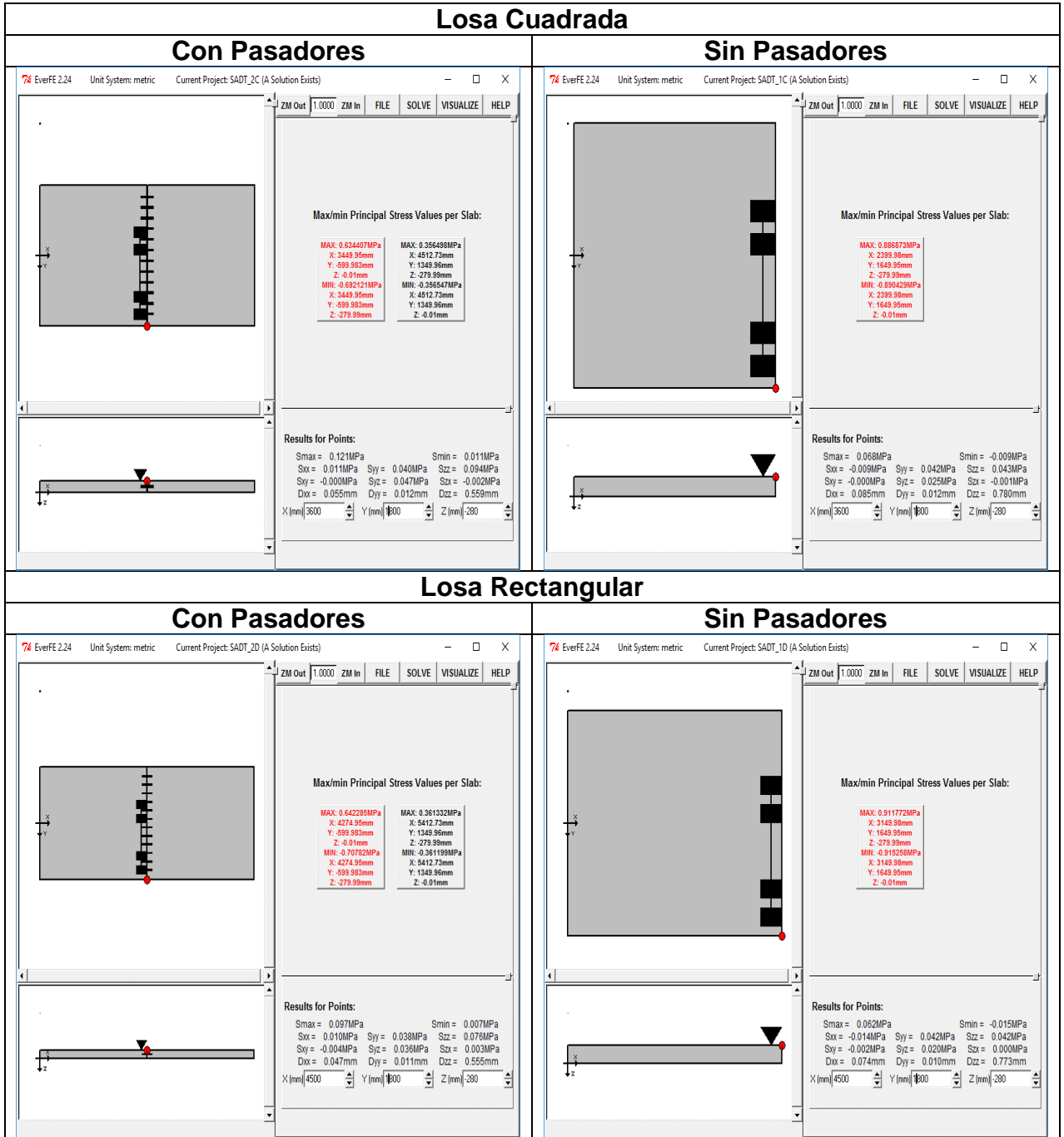


- SADT

- Con berma

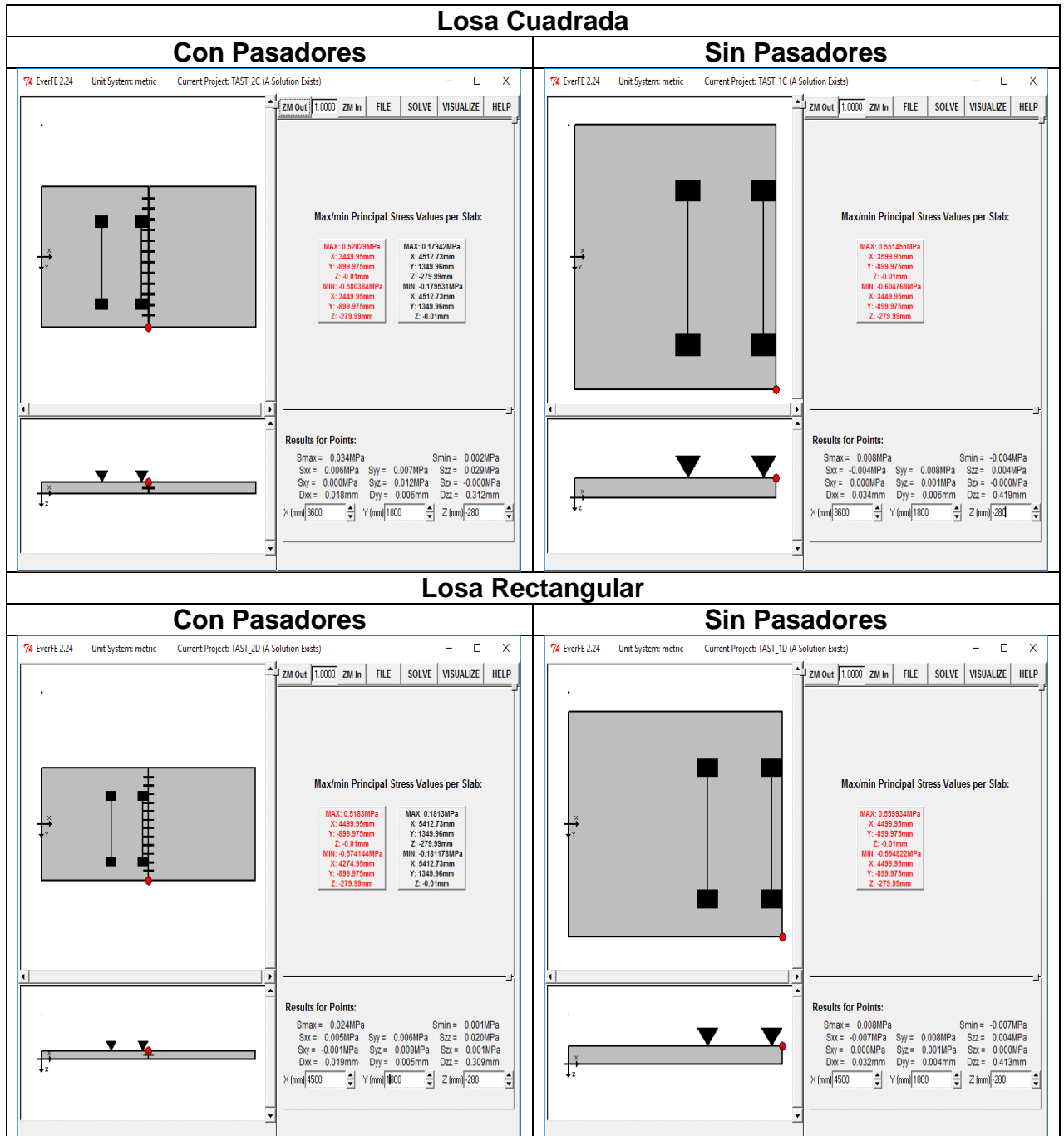


➤ Sin berma

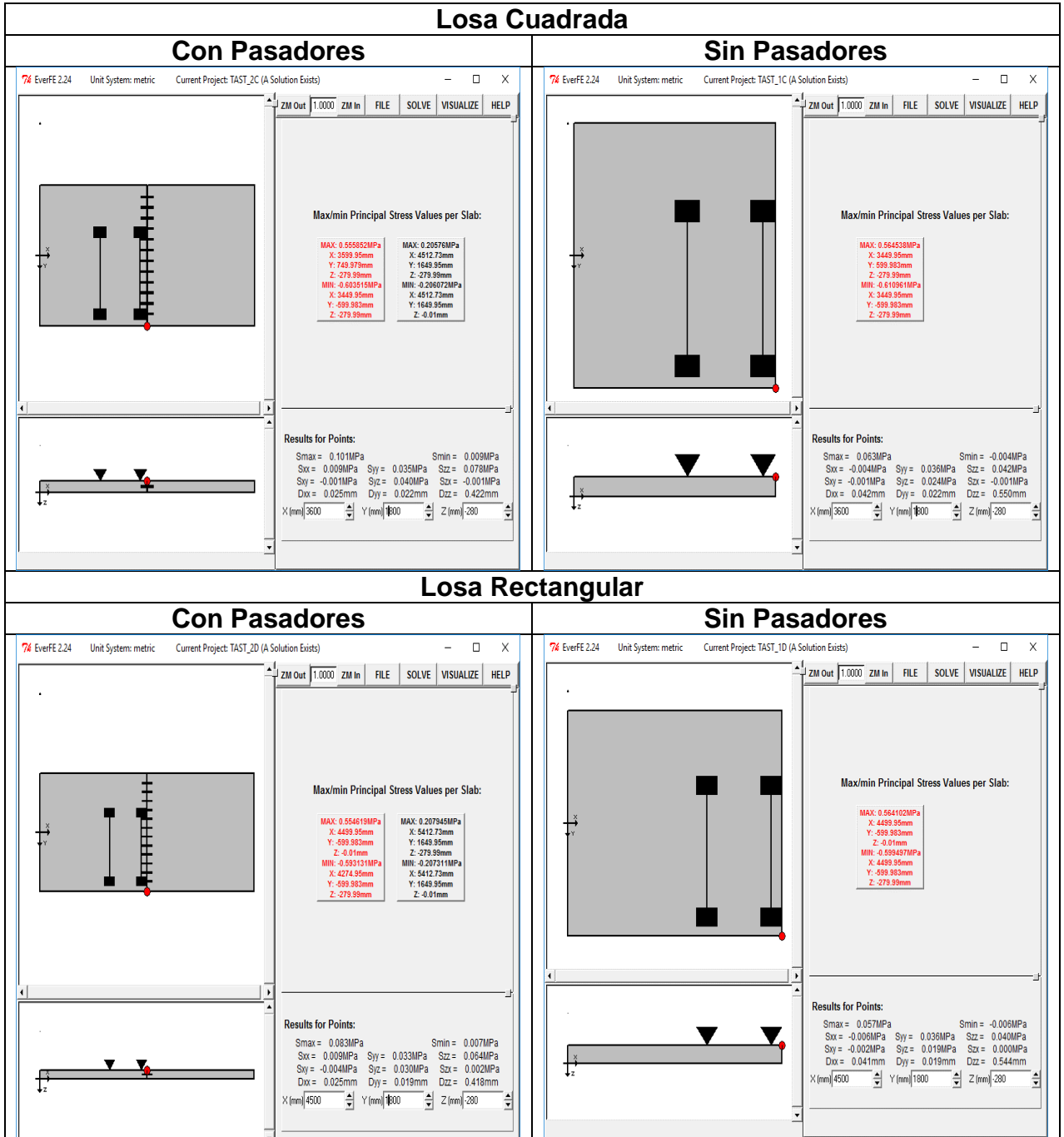


- TAST

- Con berma

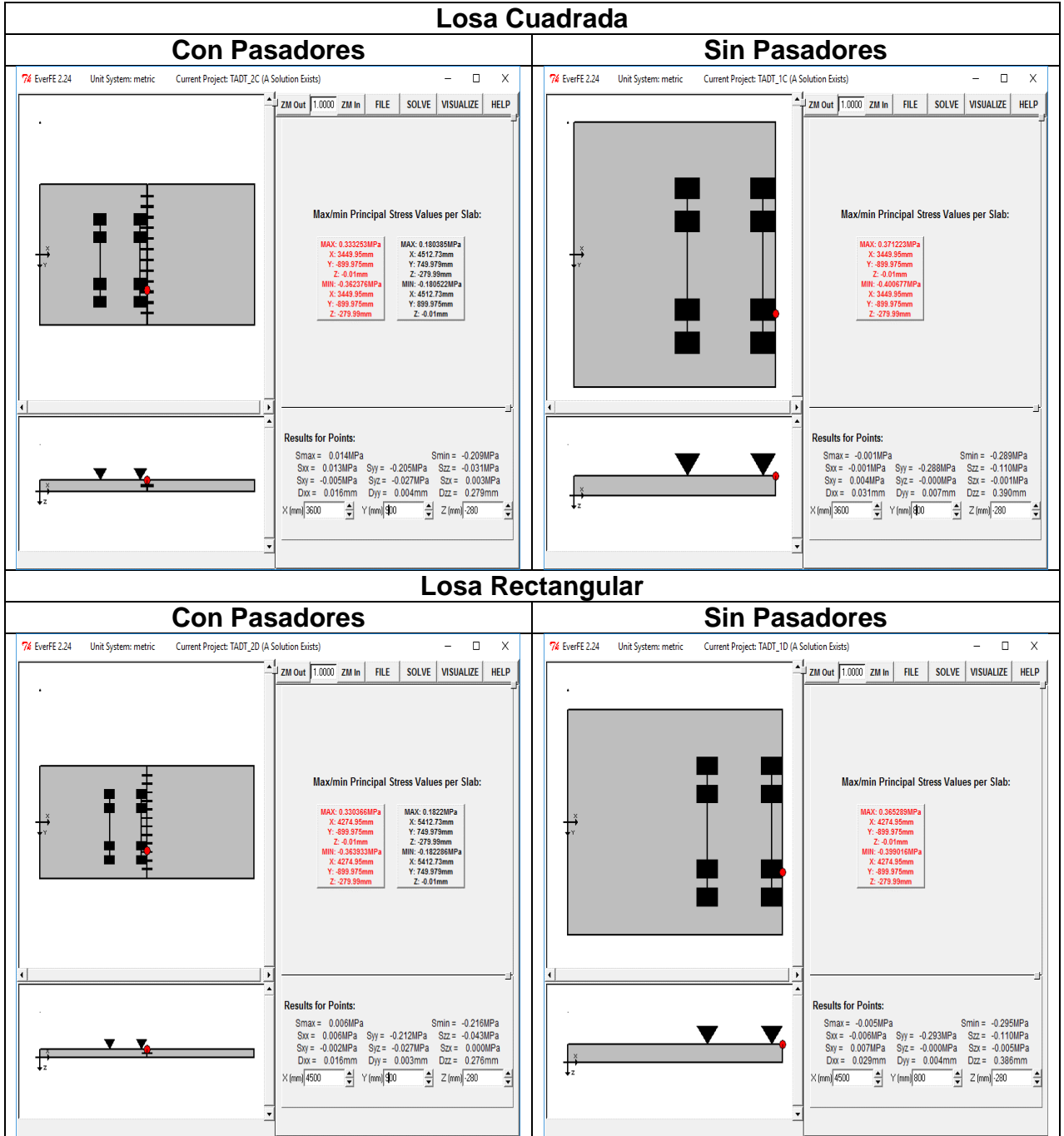


➤ Sin berma

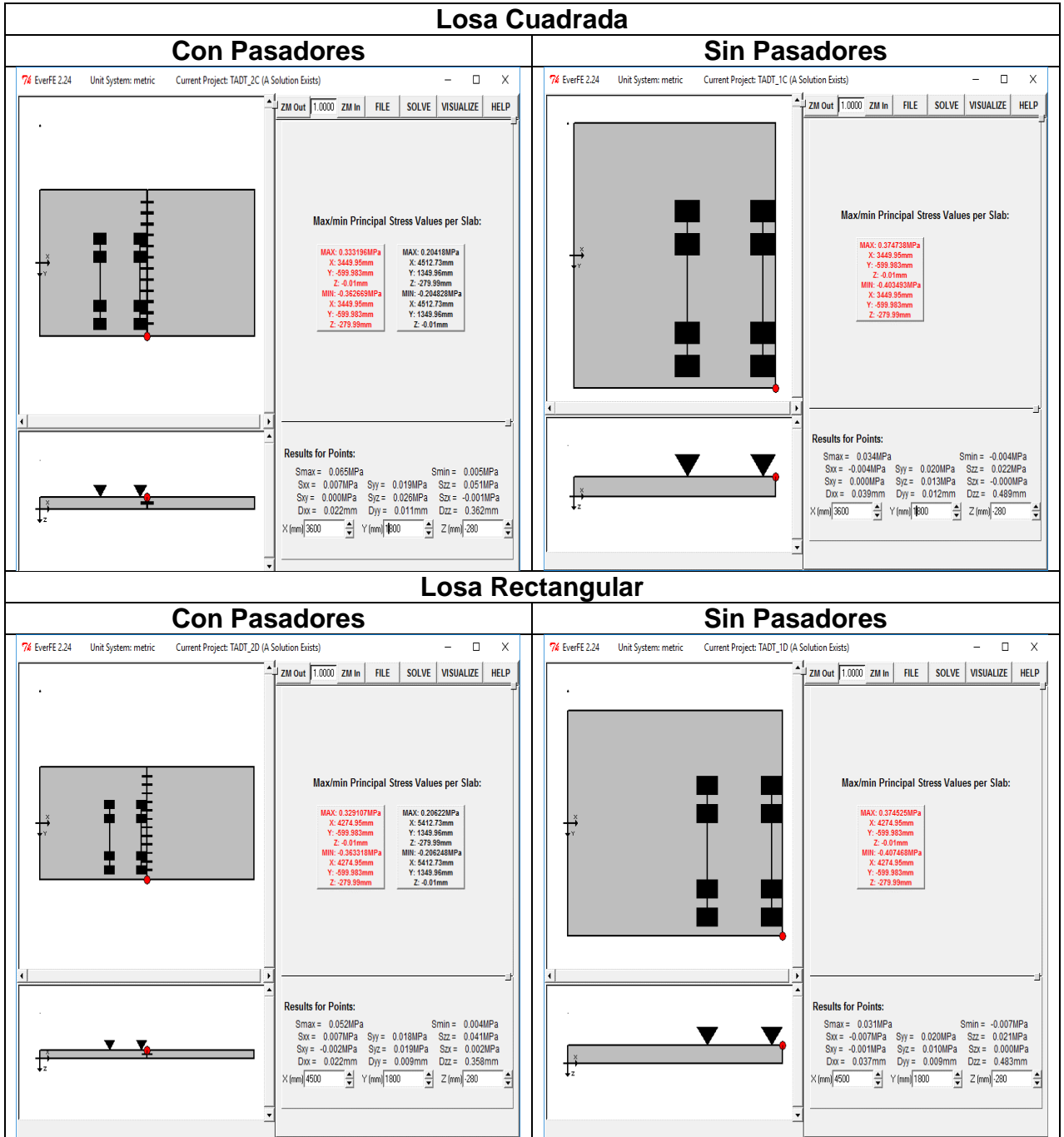


- TADT

- Con berma



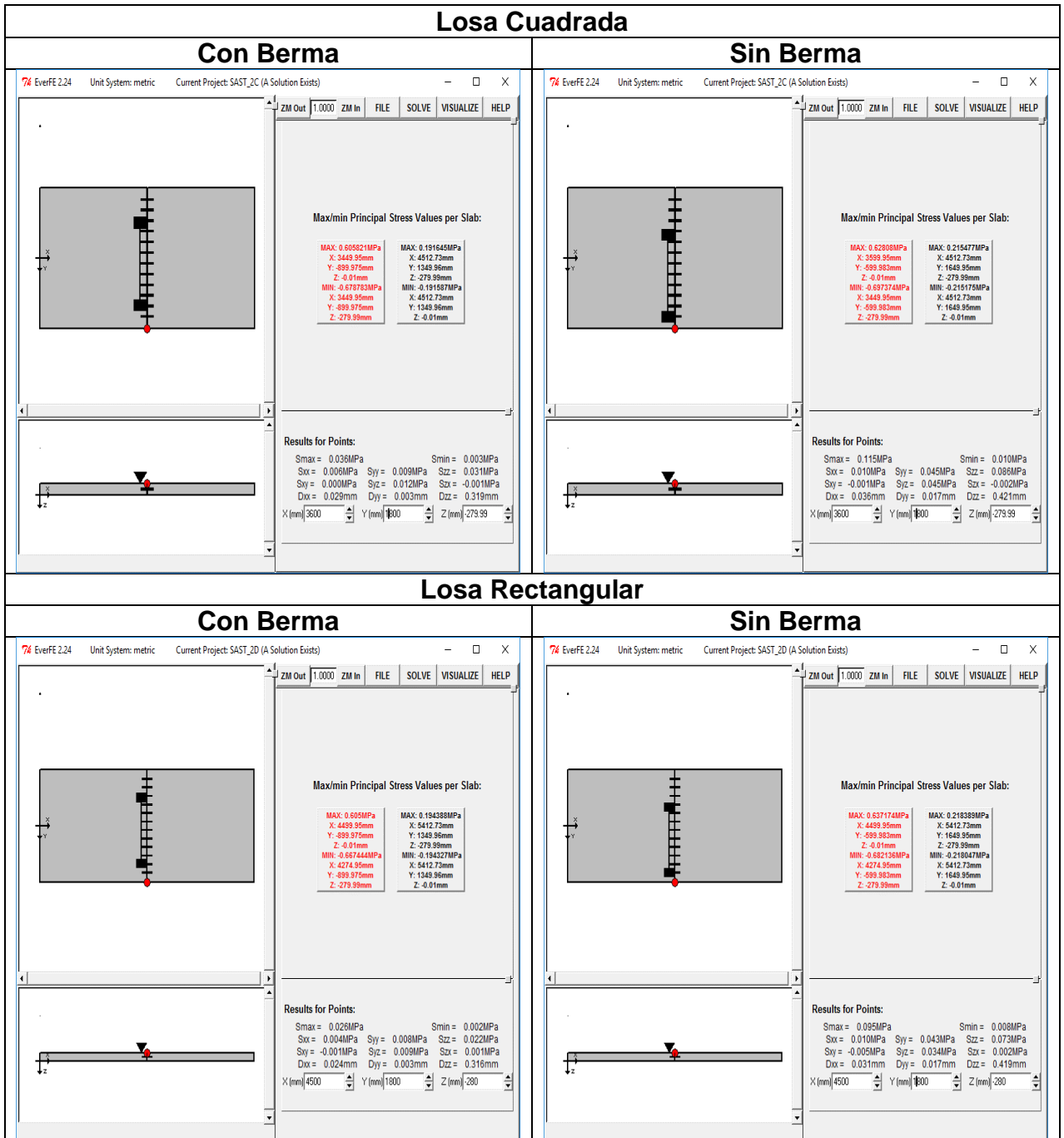
➤ Sin bermá



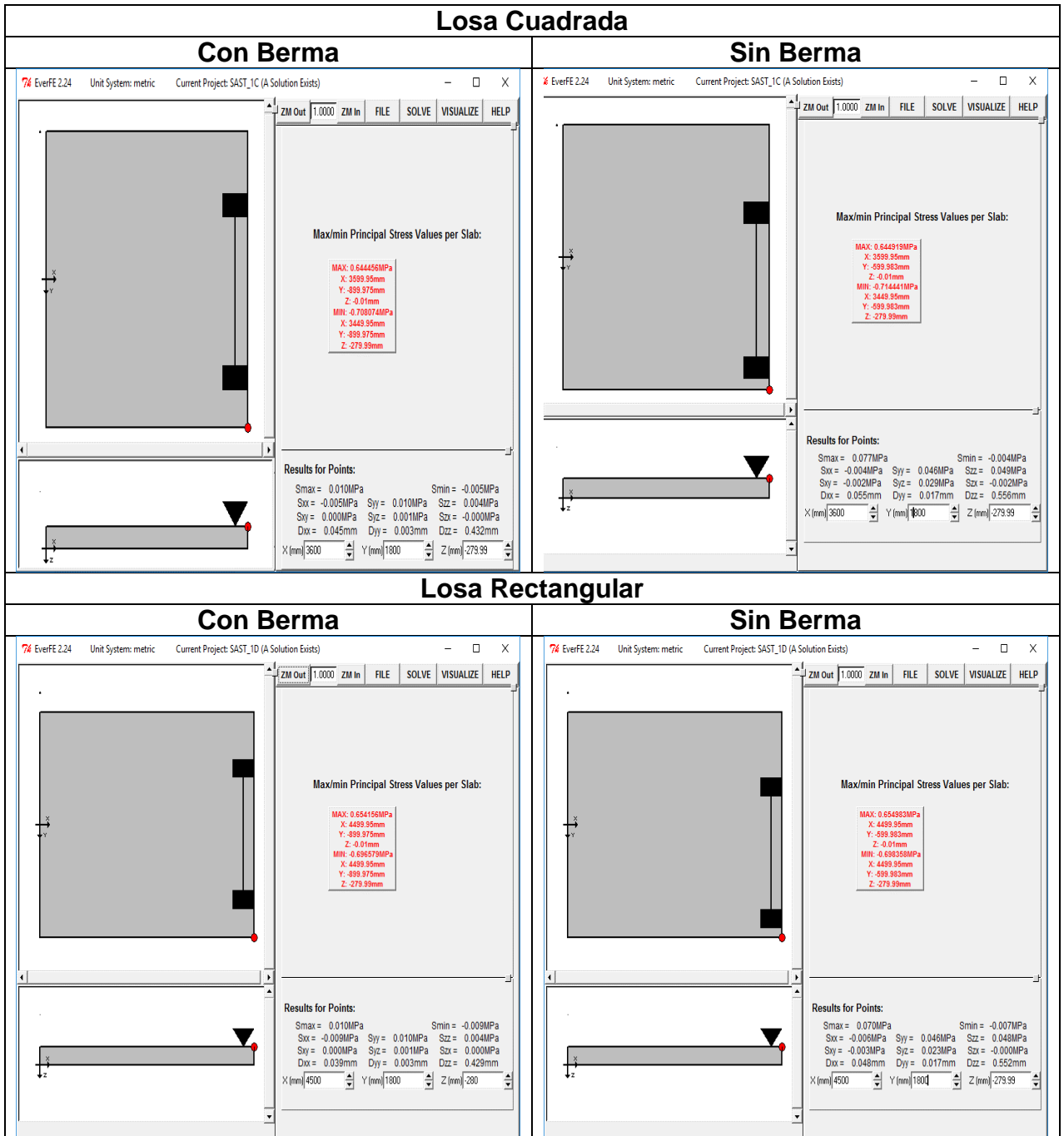
ANEXO O

- SAST

- Con pasadores

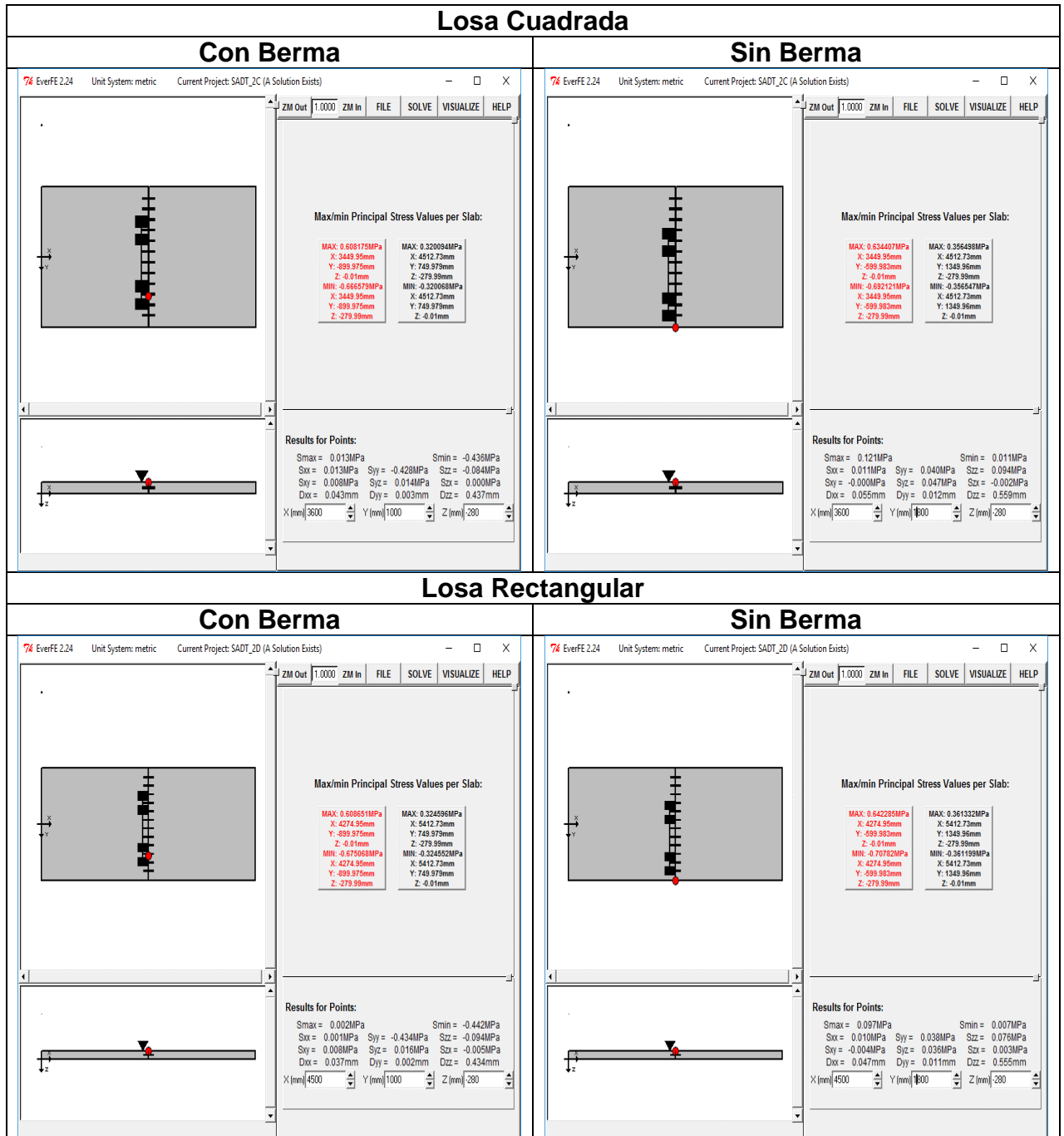


➤ Sin Pasadores

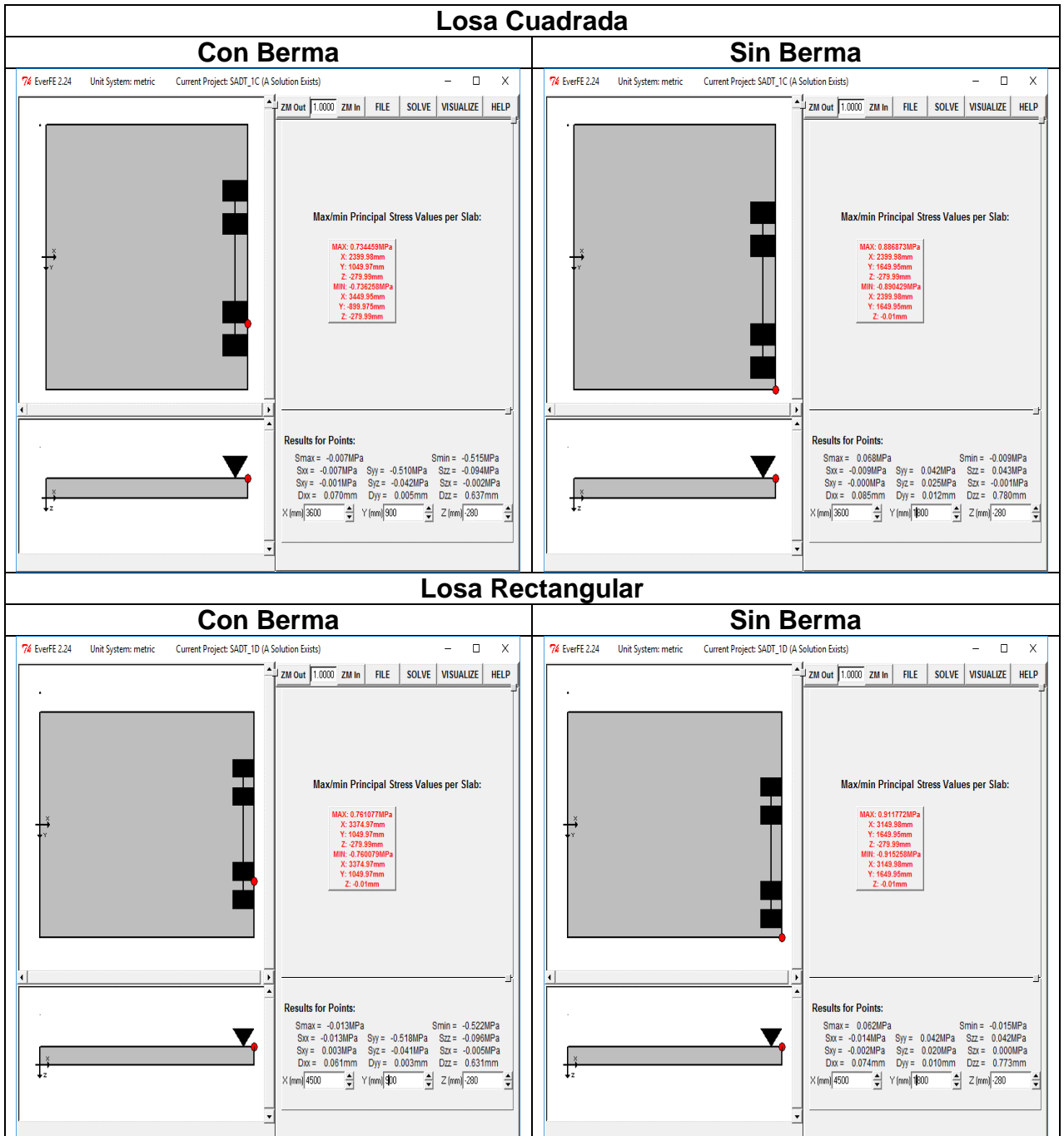


- SADT

- Con pasadores

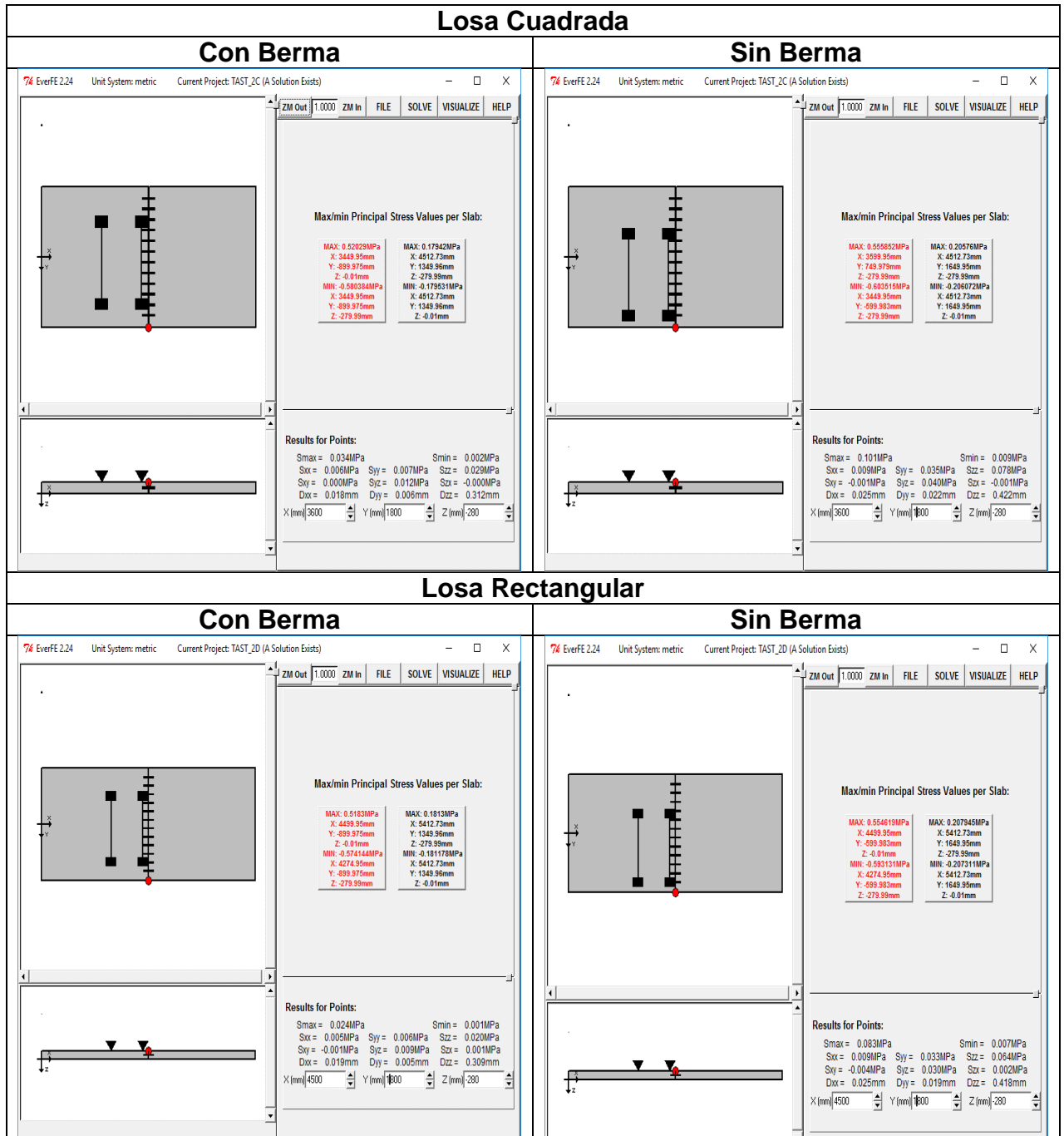


➤ Sin Pasadores

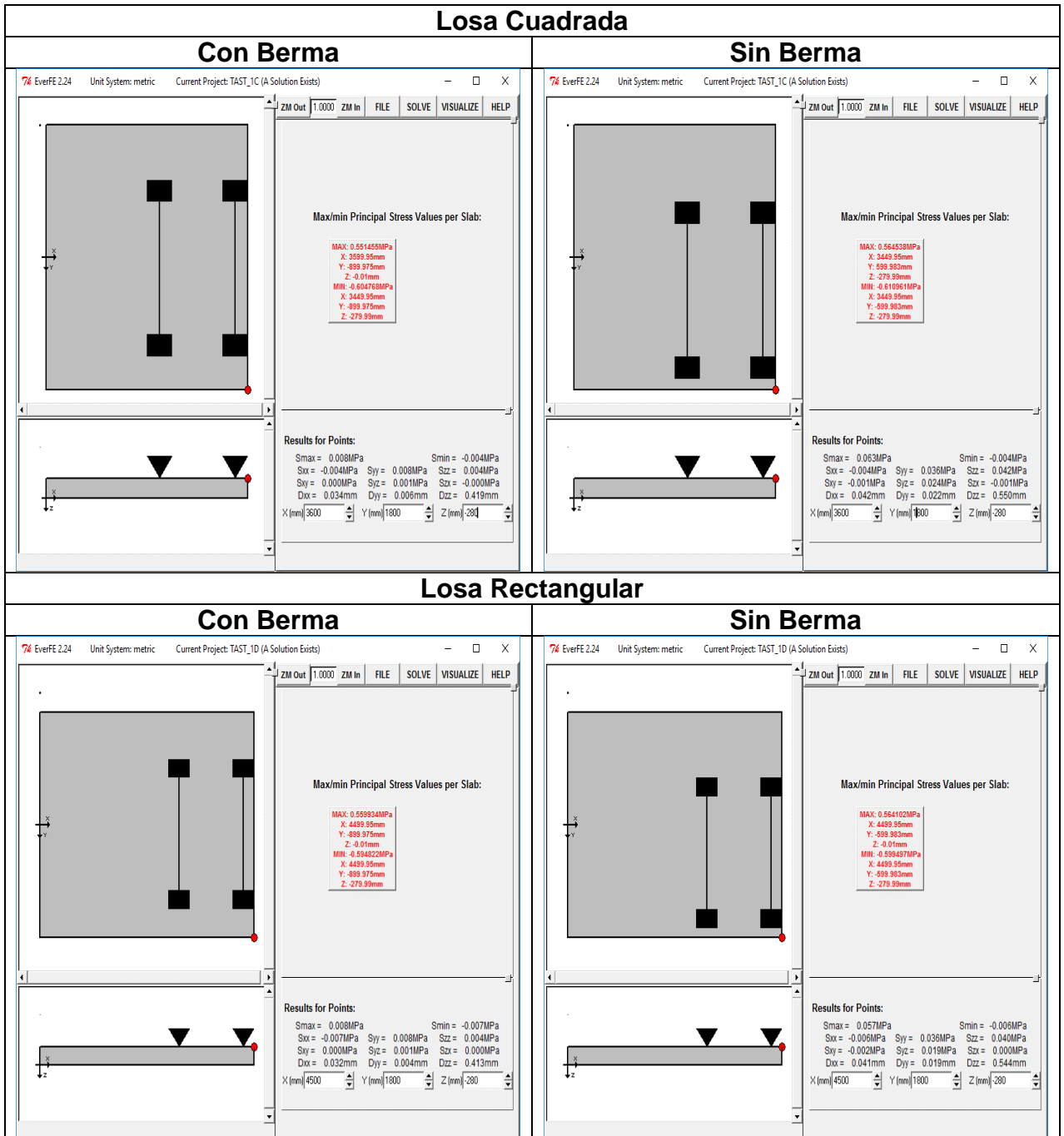


- TAST

- Con pasadores

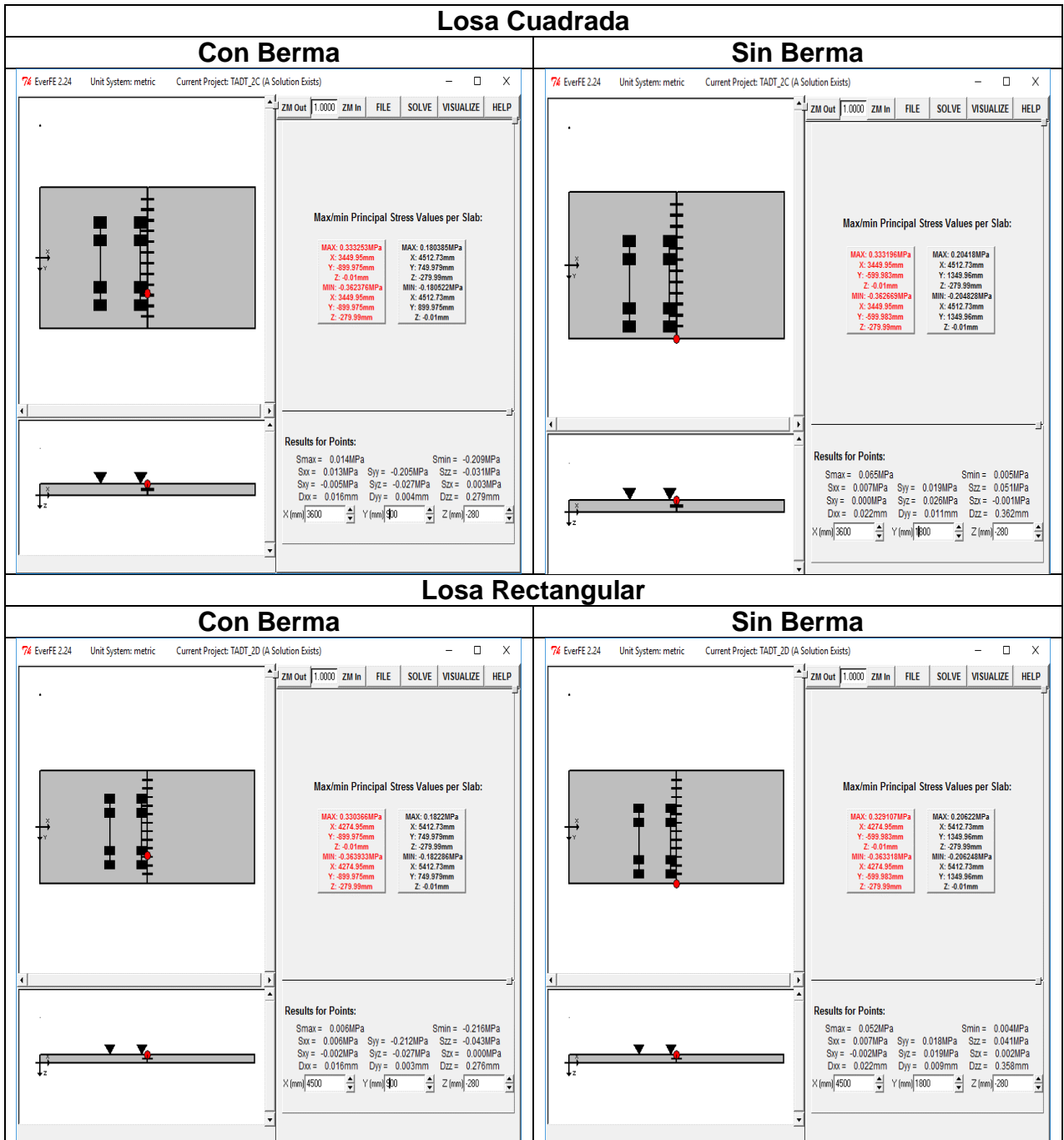


➤ Sin Pasadores



- TADT

- Con pasadores



➤ Sin Pasadores

