

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



PROPUESTA METODOLOGICA PARA EL ANALISIS DE PUENTES VEHICULARES
CURVOS FORMADOS POR TRABES DE ACERO Y LOSA DE CONCRETO

Por

WALTER OMAR VELEZ RODRIGUEZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de MAESTRIA EN CIENCIAS con
especialidad en Ingeniería Estructural

OCTUBRE 2012

DEDICATORIA

Le doy gracias a Dios por haberme concedido finalizar una meta más en mi vida, a San Francisco de Asís quien ha sido pilar fundamental a lo largo de todos mis logros académicos. Agradezco a mis padres Hilario Vélez López y María Elena Rodríguez López, seres humanos extraordinarios de quien he recibido en todo momento un apoyo incondicional y gracias a ellos he podido desarrollarme en todos los aspectos de mi vida. A mis hermanas Karina y Crisanta que han permanecido constantemente a mi lado proporcionándome un apoyo moral.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente quiero externar un sincero agradecimiento al Dr. Ricardo Gonzales Alcorta quien fungió como asesor y director de tesis. Sus comentarios, aportaciones y facilidades en el ámbito laboral contribuyeron en gran medida a la realización y finalización del presente trabajo de tesis. Del mismo modo expreso un especial agradecimiento a mis dos evaluadores externos; el Dr. Guillermo Villareal Garza y el M.C. Fernando Medina Espinosa.

Adicionalmente agradezco a los Ingenieros Luis Alberto Goytia Lozano, Carlos Fernando Flores García, Bernardo Tadeo Terán Torres, y Jesús Emmanuel Mendiola González, por la colaboración brindada durante las pruebas experimentales de campo efectuadas en el puente Radial III. Extiendo este agradecimiento al Ing. José Román Villa Bárcenas quien estuvo a cargo de la supervisión e instrumentación de los dispositivos de medición, además de haber sido responsable del registro y organización de la información recopilada durante el desarrollo de la mencionada prueba de campo.

Finalmente agradezco al Instituto de Ingeniería Civil, institución que me dio la oportunidad de desarrollar el tema de tesis de una forma analítica convencional que se había contemplado inicialmente, al de un estudio analítico-experimental. Lo anterior permito que los resultados finales de estos dos procesos pudieran compararse logrando con esto, un mejor entendimiento del tema bajo estudio.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo	Página
DEDICATORIA.	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABLAS	xi
1. INTRODUCCION	1
1.1 Antecedentes	3
1.2 Objetivos	12
1.3 Alcance de investigación.	15
2. CARACTERISTICAS DE LOS PUENTES CURVOS	17
2.1 Descripción de un puente vehicular curvo	21
2.2 Ubicación de los puentes curvos	38
3. CLASIFICACION DE LOS METODOS DE ANALISIS PARA PUENTES CURVOS.	40
3.1 Método aproximado de análisis V-Load	41
3.2 Método aproximado de análisis M/R.	42
3.3 Método de análisis 2D	43

3.4	Método de análisis por medio del elemento finito	44
3.5	Limitantes de los métodos de análisis	45
4.	METODOLOGIA PROPUESTA DE MODELAJE PARA PUENTES CURVOS.	49
4.1	Sistema angular y coordenado de referencia	50
4.2	Definición de retícula por medio del programa computacional	56
4.3	Proceso de modelaje de la estructura	60
5.	APLICACION DE LA PROPUESTA METODOLOGIA A UN CASO DE ESTUDIO	85
5.1	Problemática de la estructura	89
5.2	Prueba experimental y su etapa de análisis	94
5.3	Comparación de resultados	100
5.4	Conclusión acerca de la comparación de resultados	105
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	107
7.	TEMAS DE INTERES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES.	115
	REFERENCIAS.	121
APENDICE A.	SISTEMA ANGULAR Y COORDENADO DE REFERENCIA DEL CASO DE ESTUDIO	124
APENDICE B.	ALGORITMO DE NIVELES Y ANGULOS	128
APENDICE C.	ALGORITMO DE CARGAS	133
APENDICE D.	PLANOS DE PROYECTO.	136
APENDICE E.	PUBLICACION DE LA RED	139
APENDICE F.	RESULTADOS DE PRUEBA EXPERIMENTAL DE CAMPO	141
APENDICE G.	ETAPAS DE ANALISIS	144
APENDICE H.	MODELAJE DE ETAPA DE ANALISIS D.	159

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Chuckanut Drive, Oyster Creek Bridge, Washington D.C. 1920	2
2. Oyster Creek Bridge, Washington D.C. en la actualidad	2
3. Pruebas de laboratorio a escala real en un sistema de traves curvas	12
4. Puente Radial III. Nuevo Laredo Tamaulipas. Estudio analítico-experimental	14
5. Coronado Bridge, San Diego, California	18
6. Interstate Highway 35W, Dallas /Fort Worth	19
7. Sistema de traves curvas y sección transversal tipo cajón	23
8. Pruebas experimentales de colisión en parapetos	24
9. Armado de refuerzo en losa de concreto	26
10. Sistema de traves curvas de acero	27
11. Sistema de diafragmas de sujeción	28
12. Alternativa de cabezales para definir la sobre elevación	30
13. Cabezal de sección T invertida	31
14. US Route 59 North, Houston, Texas. Complejo vial con el uso de marcos de concreto como Subestructura	33
15. Columna excéntrica respecto al sistema de traves y cabezal	34
16. Módulos de cimbra para los procesos de colado	35
17. Habilitado de acero de refuerzo en cimentación cuadrada	36

18. State Route 895, Richmond, Virginia	38
19. Interchange Interstate 10-Interstate 45, Houston, Texas	39
20. Polifitos Lake Bridge, Kozani, Dytiki Makedonia, Greece	39
21. Diagrama de flujo de la metodología propuesta de modelaje	49
22. Ejes principales del sistema angular y coordinado de referencia.	51
23. Modelo matemático de puente vehicular curvo en donde su eje principal se encuentra descrito por varios radios de curvatura	57
24. Determinación de la posición de las traveses curvas a través de los distintos radios de curvatura	58
25. Determinación de los bordes del ancho de calzada	59
26. Esquema para identificación y ubicación del sistema de traveses.	63
27. Secuencia del montaje de traveses en un arreglo de 5 traveses	63
28. Generación de traveses y comparación de coordenadas.	65
29. Conversión de elementos tipo barra a elementos tipo placa en modelo matemático y comparación de coordenadas	66
30. Primera etapa de modelaje ante la presencia de esviaje en sus apoyos. . . .	67
31. Segunda etapa de modelaje ante la presencia de esviaje en sus apoyos . . .	67
32. Sistema reticular del caso de estudio	68
33. Modelo matemático con la totalidad de traveses y diafragmas, así como la definición de los bordes extremos de losa	70
34. Generación de la superficie de rodadura.	73
35. Modelo matemático correspondiente a la Superestructura del puente propuesto como caso de estudio	76
36. Desglose de cargas por eje del camión IMT 66.5	77
37. Modelo matemático ante la acción de cargas vivas	79
38. Modelo matemático final de un puente vehicular curvo	80
39. Efectos de la variación de temperatura en un modelo matemático.	82
40. Estructuración y geometría del puente vehicular curvo utilizado para análisis de referencia	83

41.	Sistema de apoyos de neopreno que permiten un desplazamiento	84
42.	Puente Radial III. Nuevo Laredo Tamaulipas	86
43.	Superestructura del Puente Radial III	87
44.	Subestructura del Puente Radial III	87
45.	Concreto adicional para recuperar la sobre elevación original del proyecto	90
46.	Aligerantes en losa de concreto	91
47.	Rampas de acceso	92
48.	Montaje de traveses durante la construcción del Puente Radial III.	93
49.	Sistema de diafragmas correspondientes al Puente Radial III	94
50.	Camión de prueba C1.	95
51.	Camión de prueba C2.	95
52.	Determinación de la línea de ubicación de cargas.	96
53.	Proceso de instalación del dispositivo strain gauge	96
54.	Colocación e instalación de extensómetros	97
55.	Equipo de cómputo para registro de información	97
56.	Ubicación del camión de prueba C2	98
57.	Ubicación del camión de prueba C1	99
58.	Colocación de dispositivos de medición.	103
59.	Vehículo de diseño IMT 66.5 y HS-20	116
60.	Variación del radio de curvatura ante una longitud de curvatura establecida	117
61.	Variación de la longitud del claro ante un determinado radio de curvatura.	117
62.	Espaciamiento constante y variable a lo largo del sistema de traveses	118
63.	Configuración del sistema transversal de diafragmas	118

64.	Sección transversal de la Superestructura ante distintos porcentajes de sobre elevación	119
65.	Comportamiento de la Superestructura ante un sistema de diafragmas ubicados en la parte inferior de las trabes.	119
66.	Alineación de la configuración del sistema de los apoyos en la Superestructura	120
67.	Sistema angular y coordenado de referencia. Planta general	125
68.	Sistema angular y coordenado de referencia. Esviaje entre ejes 1-2	126
69.	Sistema angular y coordenado de referencia. Esviaje entre ejes 2-3	127
70.	Sección transversal de la Superestructura del puente Radial III	129
71.	Superestructura del puente Radial III	134
72.	Plano general del proyecto en planta	137
73.	Configuración geométrica de la Superestructura	138
74.	Etapa de análisis A correspondiente al claro comprendido entre los ejes 1 y 2 del puente Radial III	145
75.	Etapa de análisis B correspondiente al claro comprendido entre los ejes 1 y 2 del puente Radial III	146
76.	Etapa de análisis C correspondiente al claro comprendido entre los ejes 1 y 2 del puente Radial III	147
77.	Etapa de análisis D correspondiente al claro comprendido entre los ejes 1 y 2 del puente Radial III	148
78.	Etapa de análisis A correspondiente al claro comprendido entre los ejes 2 y 3 del puente Radial III	150
79.	Etapa de análisis B correspondiente al claro comprendido entre los ejes 2 y 3 del puente Radial III	151
80.	Etapa de análisis C correspondiente al claro comprendido entre los ejes 2 y 3 del puente Radial III	152
81.	Etapa de análisis D correspondiente al claro comprendido entre los ejes 2 y 3 del puente Radial III	153
82.	Etapa de análisis A correspondiente al claro comprendido entre los ejes 3 y 4 del puente Radial III	155

83.	Etapa de análisis B correspondiente al claro comprendido entre los ejes 3 y 4 del puente Radial III	156
84.	Etapa de análisis C correspondiente al claro comprendido entre los ejes 3 y 4 del puente Radial III	157
85.	Colocación de dispositivos de medición durante la primera prueba experimental de campo	160
86.	Deflexión en trabe externa de acuerdo al modelo matemático del primer claro	160
87.	Deflexión en trabe interna de acuerdo al modelo matemático del primer claro	161
88.	Esfuerzo en trabe externa de acuerdo al modelo matemático del primer claro	161
89.	Colocación de dispositivos de medición durante la segunda prueba experimental de campo.	162
90.	Deflexión en trabe externa de acuerdo al modelo matemático del segundo claro	162
91.	Deflexión en trabe interna de acuerdo al modelo matemático del segundo claro	163

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I.	Comparación de resultados. Primer claro de análisis.	101
II.	Comparación de resultados. Segundo claro de análisis.	102
III.	Comparación y ajuste de resultados para trabe externa. Primer claro de análisis.	105

CAPITULO I

INTRODUCCION

Desde los inicios de 1960 la presencia de puentes para resolver claros con una determinada curvatura en planta ha sido una característica estándar en gran parte de las autopistas, así como una alternativa de solución frecuentemente utilizada en los proyectos viales pertenecientes a las zonas urbanas de las grandes ciudades.

En el pasado el uso de puentes vehiculares curvos frecuentemente enfrentaba limitantes con algunas configuraciones geométricas de caminos, por lo que la utilización de estas estructuras era exclusivamente para proyectos en los que el radio de curvatura presentaba dimensiones considerablemente grandes como para poder utilizar segmentos de traveses o vigas rectas en la que los cambios de dirección prácticamente coincidían con la alineación del camino.

Un ejemplo de esta clase de estructuras se muestra en la figura 1 y corresponde al puente Oyster Creek, o también llamado Horseshoe el cual se encuentra ubicado en la ciudad de Bellingham en el estado de Washington, D.C. Este puente fue construido alrededor de los años 20's y debido a las características de su radio de curvatura, su

construcción se realizó considerando un marco continuo de tres claros formado por un sistema de vigas rectas de concreto reforzado.



Figura 1. Chuckanut Drive, Oyster Creek Bridge, Washington D.C. 1920

Actualmente este puente es transitable y forma parte de la red activa de caminos en los Estados Unidos como se puede apreciar en la figura 2.



Figura 2. Oyster Creek Bridge, Washington D.C. en la actualidad

Cuando ya no es posible el uso de estructuras que presenten elementos con una configuración recta por el grado de curvatura del proyecto o por las restricciones del

sitio de ubicación, deberán ser consideradas otras alternativas de optimización estructural económicamente competitivas en las que intervenga el uso de traveses de acero.

El proceso de análisis, diseño, fabricación y construcción de puentes vehiculares curvos presentarán una mayor complejidad respecto aquellos en los que su configuración fue concebida con un trazo geométrico recto, por lo tanto los costos generados por cualquiera de las cuatro etapas mencionadas anteriormente serán mayores.

Es importante mencionar que solo en algunas situaciones plenamente justificadas las cuestiones estéticas serán consideradas como una prioridad del proyecto, ya que de lo contrario se estarían ignorando algunos aspectos relevantes como resistencia, funcionalidad y servicio, los cuales son considerados como factores de gran importancia al momento de proyectar estas estructuras.

1.1 ANTECEDENTES

Durante la primera mitad del siglo XIX, en 1843 Saint-Venant publicaba los primeros registros sobre el análisis y diseño de traveses con una curvatura horizontal, con lo que lograba establecer el nacimiento de los estudios e investigaciones acerca del comportamiento de estas estructuras [22].

A pesar del considerable progreso el cual comenzó prácticamente hace 170 años, estudios más formales relacionados con el análisis y diseño de puentes curvos comenzaron hace tan solo 40 años, ya que los procesos constructivos de estas estructuras antes de 1960 se realizaban sin la ayuda de una metodología o algún soporte bibliográfico debido a que no se contaba con manuales o especificaciones de diseño que pudieran servir de referencia.

Estas razones y la necesidad de contar con estándares mínimos de seguridad en la práctica para esta clase de estructuras direccionaron todos los esfuerzos hasta entonces conocidos hacia el desarrollo de un procedimiento de diseño debidamente fundamentado. De esta forma, el organismo de la Federal Highway Administration (FHWA) en 1969 formaba el proyecto denominado Consortium of University Research Teams (CURT), un proyecto de investigación a gran escala formado por 25 estados de la Unión Americana así como por un conjunto de Universidades como: la Universidad de Carnegie-Mellon, la Universidad de Pennsylvania, la Universidad de Rhode Island, la Universidad de Syracuse y la Universidad de Maryland [12].

Este consorcio desarrolló principalmente las siguientes actividades:

- a) Revisó todas las publicaciones existentes acerca de puentes curvos.
- b) Reunió investigación analítica y experimental para aumentar la información existente relacionada con traveses curvos. También fueron realizadas una serie de pruebas de laboratorio en modelos a escala para examinar el comportamiento de traveses sencillos así como traveses en pares. Durante estas pruebas también se estudió el comportamiento del uso de diafragmas transversales en arreglos conformados por más de 2 traveses en sistemas de puentes curvos representativos.
- c) Incorporó resultados de proyectos de investigación que habían sido patrocinados.

- d) Desarrollaron métodos simplificados de análisis y diseño con la ayuda de programas de cómputo, realizando modelos empíricos para poder predecir el conjunto de fuerzas que se generaban al momento de que las traveses curvas trabajaban a flexión, el comportamiento de los patines por pandeo local y por último el comportamiento del alma.
- e) Finalmente realizaron una correlación de procedimientos así como métodos de análisis y diseño con la información experimental y analítica obtenida.

De toda aquella información matemática y experimental recopilada, el proyecto denominado CURT en conjunto con los resultados de proyectos que habían sido patrocinados y las investigaciones desarrolladas por las universidades, establecieron el inicio del criterio de diseño por esfuerzos de permisibles (ASD) así como unas especificaciones preliminares de diseño para puentes con traveses curvas en donde se incluía esta metodología [14].

En 1977 el comité de miembros a flexión formado por la American Society of Civil Engineers y la American Association of State Highway and Transportation Officials (ASCE-AASHTO) reunían los resultados de la mayoría de los esfuerzos de investigaciones realizadas antes de 1976 junto con los estudios analíticos y experimentales de puentes curvos con traveses de acero desarrollados por la CURT para dar como resultado una sencilla guía de especificaciones las cuales fueron aceptadas por la AASHTO ese mismo año.

El desarrollo del criterio del diseño por factor de carga (LFD) surgió en un periodo de tiempo muy corto y fue añadido a la guía de especificaciones emitida por el comité de miembros a flexión a través de un proyecto de investigación patrocinado por parte de la American Iron and Steel Institute (AISI) el cual había sido realizado a mediados de 1970. Este proyecto transformo el criterio ASD propuesto por la CURT al

criterio LFD, similar al que era encontrado en las especificaciones de la AASHTO en 1973 denominado como Standard Specifications for Highway Bridges.

Posteriormente en 1978 este mismo comité presentó un reporte del estado del arte respecto al tema de puentes curvos con traveses de acero sección cajón, el cual contenía información relacionada con la geometría, diseño, detalle, y construcción de estas estructuras en los Estados Unidos, Europa, Canadá y Japón [22].

En el año de 1980 aparecía por primera vez una guía de especificaciones para puentes curvos con traveses de acero llamada Guide Specifications for Horizontally Curved Highway Bridges que se caracterizaba por que en su contenido podía encontrarse tanto el criterio de diseño ASD con el LFD, el cual para entonces tenía poco tiempo de haber sido aprobado por parte de la AASHTO. Desde su primera publicación, la guía de especificaciones para puentes curvos sufrió 8 distintas revisiones en su contexto las cuales no representaron un cambio significativo respecto a su contenido inicial, hasta el surgimiento de segunda publicación en el año de 1993.

Varias investigaciones respecto al comportamiento de puentes curvos continuaron después de la primera guía de especificaciones; sin embargo, no fue hasta inicios de 1990 cuando se comenzó una serie de acciones para mejorarlas, después de que un reporte publicado por la Structural Stability Research Council (SSRC) señalará problemas asociados con las últimas especificaciones emitidas, proponiendo como una alternativa de solución la creación de algunas otras áreas de investigación. La publicación de este reporte generó que una gran cantidad de proyectos de investigación fueran direccionados hacia el mejoramiento de estas especificaciones y fomento la creación de nuevos organismos de investigación.

El primero de ellos inicio en el año 1992 con el nombre de Curved Steel Bridge Research Project (CSBRP) a cargo nuevamente de la FHWA, en donde los principales objetivos de este organismo radicaron en las siguientes actividades [14].

- a) Reunir y difundir todas las investigaciones acerca de puentes curvos dentro y fuera del territorio estadounidense.
- b) Direccionar los estudios analíticos y experimentales hasta entonces desarrollados hacia el comportamiento de las traves curvas de acero al considerar los efectos de flexión, cortante y una combinación de estas dos acciones mecánicas.
- c) Finalmente considero los distintos aspectos relacionados con la construcción de puentes curvos.

Este proyecto de investigación había probado una gran cantidad de traves curvas de acero a escala real así como también realizó una extensa cantidad de simulaciones matemáticas con sofisticados programas de cómputo, generando una gran cantidad de publicaciones desarrolladas por investigadores como Zuriack [21], Jung [19], White [19] y Linzell [13].

Por otra parte, la guía de especificaciones publicada por la AASHTO en 1993 referente al análisis y diseño de puentes curvos era un documento que presentaba con frecuencia un cierto grado de dificultad por parte del ingeniero diseñador al momento de su uso, lo anterior era resultado del complejo comportamiento asociado con estas estructuras. Estas especificaciones adicionalmente no consideraban aspectos de gran importancia durante los procesos de análisis y construcción como: métodos preliminares de análisis, cantidad y características de estabilidad que deberían presentar las traves al momento de su colocación y finalmente una metodología a seguir durante de los procesos de las etapas de montaje. La omisión de esta información junto con demandas y procesos legales por algunos problemas relacionados a proyectos anteriormente realizados, había llevado a varias ciudades de los Estados Unidos a que modificarán estas especificaciones o limitaran el uso de puentes curvos a ciertas longitudes de claros [14].

El segundo organismo de investigación con el nombre de National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) inicio un proyecto en el año 1993 denominado NCHRP 12-38 en donde era refinado el criterio de diseño LFD, así como los procesos de construcción en puentes curvos con traveses de acero realizados bajo prácticas y metodologías hasta entonces disponibles; sin embargo, en el alcance de este proyecto no se incluía la ejecución o incorporación de nuevas investigaciones. Los resultados obtenidos de este estudio fueron publicados en el reporte NCHRP 424 que lleva por título Improved Design Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges, destacando los siguientes puntos de interés en su contenido:

- a) Una revisión general de las investigaciones desarrolladas en el pasado así como aquellas que fueron realizadas en el periodo de tiempo comprendido hasta esa fecha.
- b) Una discusión de las prácticas de diseño y construcción de puentes curvos en los Estados Unidos.
- c) Una revisión general del criterio de diseño LFD para la construcción de puentes curvos con traveses de secciones cajón.
- d) Una propuesta de recomendaciones para futuras investigaciones.

El reporte NCHRP 12-38 señalaba y discutía los cambios más sobresalientes entre sus estudios realizados respecto a la guía de especificaciones de 1993, adicionalmente presentaba una serie de comentarios y ejemplos de diseño. Toda esta información así como algunas propuestas emitidas por este reporte serian aceptadas en el año de 1999 por el comité de puentes de la AASHTO el cual realizó solo algunas pequeñas modificaciones en su contenido para convertirse en la nueva guía de especificaciones para puentes curvos.

Un tercer proyecto de investigación surgió en 1999 en conjunto con la AISI y la FHWA, el cual continuó trabajando con los resultados de las pruebas experimentales

realizadas por la CURT y la CSBRP a través de análisis no lineales con un mayor grado de refinamiento por medio del método del elemento finito con el fin de desarrollar un sistema de ecuaciones estandarizadas para el diseño de puentes curvos y rectos formados por traves de acero a través del método LRFD. El resumen de estos trabajos se menciona a continuación:

- a) El reporte proporcionaba una extensa revisión y discusión de las ecuaciones por última resistencia para traves curvas que habían sido propuestas por todas las anteriores investigaciones, incluyendo ecuaciones desarrolladas en los Estados Unidos así como aquellas publicadas en especificaciones de diseño japonesas.
- b) Propusieron una serie de cambios en las especificaciones de diseño AASHTO LRFD 2001 para el diseño de puentes convencionales en donde extendían la aplicabilidad de las ecuaciones para traves rectas de acero hacia acciones mecánicas como la flexión vertical, flexión lateral, torsión y cortante en traves rectas y en aquellas con la presencia de alguna curvatura.
- c) Realizaron un correlación entra las ecuaciones de diseño recomendadas por los anteriores resultados experimentales así como con los resultados de una gran cantidad de estudios paramétricos en modelos matemáticos por medio del método del elemento finito.

Las ecuaciones propuestas por este reporte fueron desarrolladas bajo del concepto de considerar a los patines de las vigas como un elemento viga-columna al momento de determinar los esfuerzos de diseño en las traves de acero a través de un análisis elástico.

Un cuarto proyecto de investigación denominado NCHRP 12-52 fue realizado en el año 2003 y pertenece al reporte NCHRP 563 con el nombre de Development of LRFD Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Bridges, en donde se revisaba

y recalibraba la guía de especificaciones para el diseño de puentes curvos publicada el mismo año con la finalidad de que el criterio de diseño por el método LRFD pudiera ser utilizado. Este trabajo fue desarrollado con datos obtenidos por la CSBRP así como con información correspondiente al reporte NCHRP 12-38 en donde podía encontrarse procedimientos de análisis preliminar y final para el diseño de puentes curvos con traves de acero, información que no estaba presente en la guía de especificaciones publicada en el año de 1993.

La guía de especificaciones para puentes curvos emitida por la AASHTO es una de las dos especificaciones en el mundo para esta clase de estructuras, el otro documento es conocido como Guidelines for the Design of Horizontally Curved Girder Bridges o también conocido como Hanshin Guidelines, las cuales fueron publicadas por primera vez en un formato de borrador por Hanshin Expressway Public Corporation [10]. Los trabajos de investigación para el desarrollo de estas especificaciones fueron finalizados durante 1970 y comprendían trabajos analíticos y estudios experimentales en traves curvas de acero así como en sus componentes. Estas especificaciones fueron desarrolladas como parte de un anexo correspondiente a la Japan Road Association Specifications for Highway Bridges en 1988. Posteriormente una traducción de las Hanshin Guidelines fue realizada en 1993 con la colaboración de la FHWA.

El criterio de diseño por esfuerzos permisibles es el método usado por la Hanshin Guidelines al igual que las especificaciones de diseño japonesas para puentes rectos de acero convencionales. Sin embargo, algunos procedimientos dentro de estas especificaciones consideran la aplicación de un factor de seguridad al valor final de la resistencia del elemento, en lugar de aplicar este factor al esfuerzo de fluencia como sería el caso de realizar un procedimiento convencional por el método ASD.

Una desventaja que presenta esta guía consiste en que no contempla alguna diferencia entre el cuerpo de las especificaciones y los comentarios, caso contrario al formato que puede encontrarse en las especificaciones emitidas por la AASHTO. Sin embargo, la guía sugiere cuando utilizar traveses formados por tres palcas o por otra parte la utilización de traveses sección cajón, donde estas últimas secciones son clasificadas en tres distintas categorías: traveses sección cajón simple formado por 2 almas, múltiples traveses sección cajón simples formados por más de 2 almas y finalmente múltiples traveses sección cajón. La orientación del alma en todos los casos mencionados anteriormente presenta una posición vertical, secciones con almas inclinadas no son consideradas en esta guía.

Esta guía también discute aspectos relacionados con el arreglo de las traveses así como aspectos económicos. Recomienda también el uso de algún sistema de sujeción lateral en la parte superior e inferior de los patines para claros que presenten una longitud mayor de 80 ft o 24 metros aproximadamente. Los motivos de mantener la sujeción lateral en o cerca del plano de los patines son discutidos en este documento. Cuando por alguna razón no son utilizados estos dispositivos de sujeción las especificaciones proponen que las fuerzas de transferencia provocadas por este sistema sean consideradas en los patines.

El ancho efectivo de la sección compuesta es otro punto al que hace referencia, ya que generalmente un ancho efectivo mayor es utilizado en el diseño de puentes curvos en Japón respecto al considerado por las especificaciones AASHTO.

En el contenido de estas especificaciones también puede encontrarse una serie de comentarios respecto a la diferencia que existe entre puentes con un radio de curvatura pronunciado y aquellos en los que la curvatura es más ligera, por lo que ante la presencia de proyectos en donde intervienen curvaturas muy pronunciadas las especificaciones de esta guía requieren que los apoyos sean orientados de tal forma que

se permita un movimiento transversal en la dirección al desplazamiento que provocan los efectos de expansión y temperatura.

1.2 OBJETIVOS

En la actualidad existe una gran cantidad de información relacionada con el estudio de puentes vehiculares curvos la cual podrá ser encontrada en publicaciones, conferencias, revistas, etc. Estos documentos tratan algunos temas como la experimentación e instrumentación de sus distintos elementos en pruebas de laboratorio como se muestra en la figura 3, el uso y manejo de equipos de medición, comportamiento de los elementos bajo condiciones específicas de carga, métodos de análisis, etc.

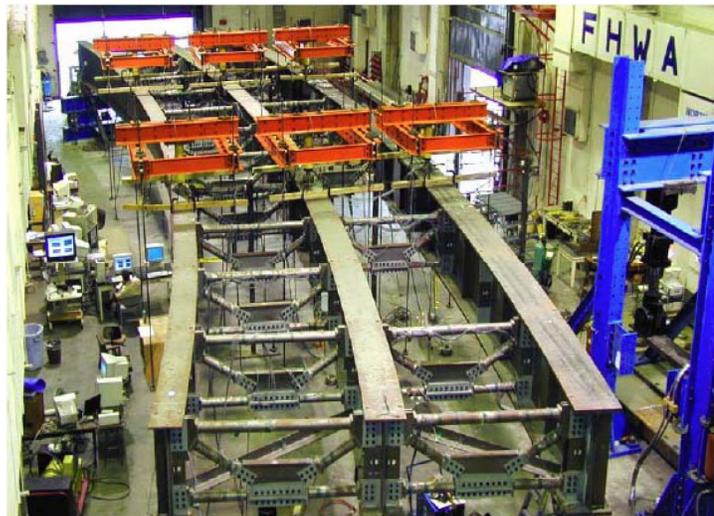


Figura 3. Pruebas de laboratorio a escala real en un sistema de traves curvas

Sin embargo, solo existen algunos documentos que hacen referencia a las técnicas de modelaje necesarias para la realización de un proceso de análisis completo así como el de un diseño adecuado.

Estas son solo algunas razones por las cuales este trabajo pretende ser una herramienta de ayuda durante la evaluación de esta clase de estructuras, adicionalmente un aspecto importante a considerar en el desarrollo de todos los estudios e investigaciones mencionados anteriormente se caracteriza por el hecho de que la mayoría de éstos son realizados por organizaciones e instituciones extranjeras, por lo tanto, las publicaciones emitidas por estos organismos estarán elaboradas bajo las normas, reglamentos y leyes de transporte del país en el cual sean desarrollados los estudios o investigaciones. También resulta conveniente considerar que factores como las condiciones climatológicas y geográficas de estos lugares en la mayoría de las ocasiones son completamente distintas a las que pueden ser encontradas en el territorio nacional, convirtiéndose en parámetros de gran importancia durante el proceso constructivo así como en el dimensionamiento final de la estructura.

El objetivo de este trabajo de tesis consiste en proponer una metodología de modelaje que contemple cinco distintas etapas para el análisis de los puentes vehiculares curvos formados por traveses de acero y losa de concreto contemplando aspectos relacionados con la reglamentación y normativa que aplica para nuestro país. Así mismo, será posible realizar una comparación entre los resultados obtenidos a través de los procesos de análisis con aquellos recopilados durante las pruebas realizadas a un caso de estudio, el cual corresponde al estudio del Puente Radial III ubicado en la Ciudad de Nuevo Laredo Tamaulipas, una imagen de la estructura en cuestión se muestra en la figura 4. Es importante mencionar que el trabajo de tesis a desarrollar contempla un estudio analítico-experimental.



Figura 4. Puente Radial III. Nuevo Laredo Tamaulipas. Estudio analítico-experimental

El proceso de modelaje propuesto será desarrollado por el método del elemento finito a través del programa computacional SAP 2000 debido a la familiaridad que se tiene con el mismo; sin embargo, dicho proceso podrá ser desarrollado en cualquier otro paquete de cómputo siempre y cuando las etapas de modelaje contemplen la secuencia aquí propuesta así como el uso del método de análisis mencionado anteriormente.

El considerar diferentes etapas en la propuesta metodología de análisis tiene como propósito el representar en lo mayor posible los procesos constructivos reales de estas estructuras, permitiendo llevar un estricto control en las magnitudes de las acciones mecánicas que experimentan los distintos elementos a lo largo del proceso de diseño, con la característica de que serán contemplados los lineamientos establecidos por la SCT considerada como el único organismo de carácter legal encargado de la reglamentación, conservación y estudio de la infraestructura carretera en México.

Adicionalmente será presentado en el apartado de conclusiones y recomendaciones algunas consideraciones, notas y recomendaciones de gran interés para algunas de las etapas del análisis, diseño y procesos constructivos.

Finalmente al hacer uso de éste procedimiento de análisis, es necesario que el diseñador cuente con un amplio conocimiento acerca del comportamiento de los puentes vehiculares, en especial de aquellos que presentan una determinada curvatura en planta, puesto que existirán situaciones especiales durante los procesos de modelaje relacionados con las distintas etapas contempladas en el análisis de estas estructuras que requerirán de planteamientos y soluciones debidamente justificadas, las cuales deberán ser emitidas por un ingeniero estrechamente relacionado y experimentado con el tema.

1.3 ALCANCE DE INVESTIGACION

Los estudios realizados en este trabajo de tesis referentes a la propuesta metodológica de modelaje que se plantea para el desarrollo de los procesos de análisis podrá ser aplicada a puentes vehiculares curvos formados por traveses de acero y losa de concreto, en donde ambos extremos de los claros que conformen un determinado proyecto se consideren como simplemente apoyados. Adicionalmente podrá ser posible extender la aplicabilidad de esta metodología a puentes con claros continuos.

Cuando la Superestructura del puente este comprendida por alguna otra estructuración transversal como podría ser el caso de un sistema de traveses sección cajón, deberá ser considerado otro procedimiento de análisis al descrito en este

documento, puesto que los resultados obtenidos bajo éste proceso quedarán fuera del alcance de la propuesta metodología planteada.

CAPITULO II

CARACTERISITCAS DE LOS PUENTES CURVOS

Un puente vehicular curvo es una obra ingenieril de gran importancia en el entorno urbano actual de las grandes ciudades, especialmente cuando se cuenta con vialidades las cuales fueron proyectadas para una densidad vehicular especifica y ésta se ve rebasada por el constante crecimiento de la mancha urbana, ocasionando a la población problemas de congestionamiento vehicular.

Existen numerosas circunstancias por las cuales estos sistemas estructurales son considerados como un requisito indispensable en las grandes ciudades; por ejemplo, ante la presencia de fallas geológicas del terreno, o cuando dos ciudades se encuentran incomunicadas por la trayectoria de un arrollo, rio o por la presencias de alguna pequeña ramificación de un océano.

Esta última situación puede ser ejemplificada claramente tomando como referencia el puente Coronado, el cual se encuentra ubicado en el estado de California y tiene como función principal la conexión de la Bahía de San Diego con la Isla de Coronado, la imagen de esta estructura se presenta en la figura 5.

Este puente presenta una losa de concreto como superficie de rodamiento y su estructuración fue por medio de una combinación de traveses curvos de acero así como por traveses de sección cajón, en donde estas últimas se encuentran localizadas aproximadamente en la parte central del puente. Todo este sistema será soportado por un conjunto de pilas formadas por marcos monolíticos de concreto de dos columnas a lo largo de una longitud de 3,407 metros.



Figura 5. Coronado Bridge, San Diego, California

Desde el punto de vista estructural, la principal función consiste en resistir cualquier acción mecánica provocada por la combinación de carga más desfavorable estipulada por el reglamento del cual se esté haciendo uso, así como contrarrestar cualquier condición de inestabilidad que pueda ocurrir por la acción de cargas externas generadas por algún fenómeno climático o geológico a las cuales pueden estar sometidos estos puentes a lo largo de cualquier etapa de su vida útil, como pudiera ser la presencia de grandes ráfagas de viento, el impacto constante del oleaje, cargas por efecto de sismos, etc.

Otro ejemplo de puentes en donde sus características geométricas principales corresponden al de una curvatura horizontal en planta será el caso de la autopista Interestatal 35W en la Ciudad de Fort Worth en su intersección con la autopista

interestatal 30 que conecta hacia el Este con la Ciudad de Dallas Texas, la imagen de esta estructura se muestra en la figura 6. Originalmente este complejo vial de cuatro niveles fue el primero en ser construido en el estado de Texas alrededor de los años 50's.



Figura 6. Interstate Highway 35W, Dallas /Fort Worth

Respecto a los requisitos de funcionalidad y servicio, los cuales son determinados a partir de un estudio de ingeniería de tránsito, deberán ser aquellos que garanticen en todo momento el correcto funcionamiento de la estructura ante la presencia de las máximas densidades de flujo vehicular que puedan presentarse, en especial en el lapso de tiempo correspondiente a las horas pico de tráfico en donde se requiere que la circulación de los vehículos sea de una forma rápida y fluida.

El planteamiento, realización y ejecución de estas obras es un trabajo muy complejo y una gran cantidad de decisiones por tomar, como son el tipo de solución estructural, el número de carriles necesarios, el dimensionamiento de la estructura y muchos otros aspectos de gran importancia, no son determinados únicamente por una

característica en particular del proyecto, sino es el resultado de un trabajo sincronizado de las distintas áreas de la ingeniería civil para la obtención de estructuras diseñadas eficazmente.

Otro aspecto importante a considerar son los procesos administrativos y económicos necesarios para la realización de este tipo de proyectos, debido a que la inversión de estas estructuras involucra generalmente montos económicos a gran escala, la cual en la mayor parte de las ocasiones será financiada por recursos del gobierno federal o estatal de la ciudad que requiera este tipo de infraestructura. Proyectos de esta magnitud generan concursos y licitaciones de obra pública por parte de las dependencias de gobierno encargadas del desarrollo urbano, en donde participarán empresas especializadas en el diseño y construcción las cuales compiten por la generación de presupuestos con el menor costo global. Todas las empresas que participen en este proceso de licitación deberán tener presente que en ningún momento se verá afectado cualquiera de los factores de seguridad que intervienen en su diseño respecto al monto económico presupuestado, lo anterior sin importar cuál de ellas sea la ganadora.

Estas obras además de ser sinónimo de una constante evolución y desarrollo de una ciudad, generan una gran cantidad de empleos así como la reactivación económica del sector de la industria de la construcción.

También es necesario que estos puentes cuenten con un estricto control geométrico durante todas las etapas de su proceso constructivo para lograr que las transiciones de los niveles finales de rasante sean de una forma prácticamente desapercibida por parte del conductor al momento de incorporarse a las rampas de acceso así como durante todo su recorrido, en especial la parte central del puente en donde se hacen presentes los mayores porcentajes de sobre elevación, con lo cual se minimiza el riesgo de alguna reacción inesperada o de inseguridad que pudieran

convertirse en posibles accidentes automovilísticos. La presencia de estos máximos niveles específicamente en la parte media de la curva horizontal tiene como función evitar que los vehículos salgan proyectados de forma tangencial hacia el exterior por efecto de la fuerza centrífuga.

Hay que enfatizar y tener presente que es responsabilidad del conductor respetar los límites máximos de velocidad señalados al hacer uso de estas estructuras puesto que la circulación a través de estas es distinta al de puentes vehiculares convencionales, en especial los vehículos de gran carga como son los camiones ya que desafortunadamente algunos de los accidentes ocurridos en estos puentes han sido por la falta de cultura vial.

2.1 DESCRIPCION DE UN PUENTE VEHICULAR CURVO

La descripción general de solo algunas de las características involucradas en el estudio de los puentes vehiculares curvos previamente mencionadas, servirá de referencia para poder adentrar con una mayor facilidad y mejor entendimiento el tema en cuestión; por lo tanto, resulta conveniente mencionar de una forma general los principales elementos estructurales que conforman un puente vehicular curvo, así como dividir la totalidad de sus elementos en dos componentes denominados como Superestructura y Subestructura, según lo establece el área de la ingeniería especializada en el tema.

La descripción de cada uno de estos componentes, así como los elementos que las conforman y sus principales características serán mencionados a continuación. Entre las cuales podremos mencionar algunas como los tipos de acero frecuentemente usados en las traveses, el comportamiento mecánico de los diafragmas, factores para el dimensionamiento final de los elementos principales, etc. Dicha descripción será realizada de una forma descendente respecto al posicionamiento de cada elemento estructural que conforme la totalidad del sistema correspondiente al puente vehicular curvo.

- *Superestructura*

Se considera como Superestructura del puente al conjunto de elementos estructurales localizados inmediatamente por encima del sistema de apoyos, por lo que dicho sistema quedara conformado por un tablero principal sobre el cual circularán los vehículos, las traveses principales y finalmente los diafragmas.

La Superestructura de un puente curvo podrá presentar principalmente y en la gran mayoría de los casos dos tipos de arreglos en su sección transversal, el primero corresponderá al de un sistema en base a traveses de acero y losa de concreto, en donde las traveses serán estables únicamente si están unidas por medio de diafragmas intermedios, particularmente este caso será el presentado en este documento como tema de estudio y trabajo de tesis, ya que este tipo de arreglo, es el más frecuentemente usado en puentes vehiculares curvos.

El segundo arreglo será aquel que contemple una sección transversal tipo cajón, la cual podrá estar conformada por una geometría rectangular o trapezoidal, en donde sus paredes en cualquiera de los dos casos estarán conformadas por placas de acero y

al igual que para el primer arreglo, presentará una losa de concreto como superficie de rodamiento, la figura 7 muestra la geometría de este tipo de traveses.

Particularmente este tipo de sección es capaz de resistir significantes efectos de torsión si su sección es mantenida con un adecuado sistema de diafragmas interiores, por tales razones adquirió una gran popularidad en los inicios de su aparición. Las primeras traveses cajón en puentes curvos tenían secciones completamente cerradas, en donde todo su perímetro estaba formado por placas de acero. Después de numerosos estudios se considero impráctico el uso de estas secciones par ser reemplazadas por aquellas en donde la parte superior presentaba un soporte lateral debidamente espaciado o en ocasiones la ausencia de este [14].



Figura 7. Sistema de traveses curvas y sección transversal tipo cajón

a) Guarniciones y parapetos

Estos elementos deberán estar ubicados en ambos extremos del ancho de calzada cuando los puentes se encuentren estructurados por 2 o 3 carriles de circulación con

el mismo flujo vehicular; sin embargo, al existir 4 o más carriles generalmente será necesario el uso de barreras centrales para dividir el sentido de la circulación. Al igual que la mayor parte de los elementos estructurales que conforman un puente vehicular, las guarniciones generalmente serán de concreto reforzado.

La geometría y dimensionamiento de estos elementos fueron establecidos en base a pruebas desarrolladas por la AASHTO a inicio de los años 60's, cuando surgió la necesidad de establecer procedimientos de evaluación relacionados con la seguridad de las autopistas debido al crecimiento acelerado del transporte terrestre y la serie de problemas que se generaban ante esta situación [16].

Las pruebas efectuadas consistieron en hacer circular un vehículo a una determinada velocidad, para posteriormente hacerlo impactar contra una barrera lateral; sin embargo, el procedimiento requería que la colisión fuera realizada con un determinado grado de inclinación respecto al eje longitudinal de estos elementos [15].

La figura 8 muestra a través de una secuencia fotográfica la realización de una simulación experimental de colapso desarrollada por parte del Departamento de Transporte del Estado de California [11].



Figura 8. Pruebas experimentales de colisión en parapetos

El dimensionamiento de cada parapeto deberá resistir satisfactoriamente la magnitud de cualquier impacto generado por un vehículo, evitando la presencia de daños de consideración así como garantizado en todo momento la integridad del mismo ante ésta o cualquier otra eventualidad a la que pudiera estar sujeto.

Los reglamentos de diseño actualmente presentan algunas configuraciones ya establecidas de estos elementos dependiendo el tipo de flujo vehicular que circulará a través del puente. Adicionalmente también son incluidos aquellos que contemplan banquetas cuando se requiere del tránsito de personas.

b) Losa de concreto armado

Este elemento estructural es considerado como un diafragma rígido de espesor constante una vez que el fraguado del concreto ha llegado a su etapa final. La metodología de análisis contempla una continuidad entre las traveses que conforman la sección transversal del puente, incluyendo los volados localizados hacia ambos extremos a partir de las traveses de borde.

El peralte de la losa y las características principales del armado de refuerzo se definen en función del espaciamiento entre traveses y del tipo de camión de diseño especificado por la normativa de la cual se haga uso, el cual estará directamente relacionado con la clasificación del camino.

El armado principal se encuentra localizado tanto en el lecho inferior como superior de la losa en el sentido perpendicular a la dirección del tránsito vehicular. La cantidad del acero de refuerzo y el espaciamiento del mismo, se determina en base a las mismas consideraciones de análisis establecidas para la determinación del peralte. La figura 9 muestra una imagen en donde puede apreciarse la distribución del armado de refuerzo.



Figura 9. Armado de refuerzo en losa de concreto

El acero por distribución se localiza en el lecho inferior de la losa en sentido paralelo a la dirección del tránsito vehicular y su cantidad es un porcentaje del acero principal a flexión.

Finalmente el acero por temperatura tiene como función evitar la presencia de agrietamientos por los gradientes de temperatura a los cuales pueda estar sometido este elemento estructural. Este acero deberá estar ubicado en el lecho superior de la losa en el mismo sentido que el acero por distribución y su cantidad se determina en función del peralte total de la losa.

c) Trabes de acero

Las trabes metálicas para este tipo de sistema estructural estarán formadas por una sección de tres placas por lo general de acero A-50 o en algunas ocasiones A-36. Este tipo de trabes generalmente presentarán una variación en el espesor de los patines siendo estos de mayores dimensiones para el caso de los patines inferiores en una determinada zona al centro del claro respecto aquellos localizados cerca de los

extremos. De forma análoga será la variación de los espesores para el caso de los patines superiores, lo cual resulta en una buena opción cuando se busca la optimización del dimensionamiento de la sección. El tipo de soldadura utilizada durante el proceso de fabricación de estos elementos corresponde al de penetración completa para el caso de cualquier empalme entre dos placas principales de la trabe, así como el uso de una soldadura longitudinal de chaflán en la unión de los dos patines con el alma. La figura 10 muestra un sistema de traveses pertenecientes a un puente curvo.



Figura 10. Sistema de traveses curvas de acero

Dependiendo de la clasificación a la cual pertenezca el perfil respecto a los parámetros ancho espesor tanto en patines como en el alma, su dimensionamiento deberá cumplir satisfactoriamente aspectos y requerimientos estipulados por los reglamentos para una correcta estabilidad y funcionamiento de la sección.

La determinación de la curvatura así como la longitud de cada trabe que formara parte de los distintos ejes del puente curvo, se establecen principalmente por las características del proyecto geométrico y las condiciones de sitio en donde estará presente la estructura.

d) Diafragmas

La colocación de diafragmas en un puente curvo espaciados uniformemente a lo largo de un arreglo específico en un sistema de traveses, proporcionan el medio por el cual dicho sistema puede mantenerse satisfactoriamente estable. Sin embargo, la característica principal de estos elementos estructurales será la de proporcionar estabilidad y la aportación de un cierto grado de rigidez torsional según el tipo, arreglo y cantidad de estos elementos. En la figura 11 se muestra un sistema de diafragmas con un arreglo en forma de “K”.



Figura 11. Sistema de diafragmas de sujeción

Estos diafragmas están conformados por perfiles de acero, generalmente ángulos de lados iguales los cuales presentan un arreglo en forma de “X”, “V” o “K” y su unión es por medio de placas de acero en los extremos y/o en la intersección de los perfiles. Su espaciamiento es determinado en base a expresiones emitidas por los reglamentos, en las cuales intervendrá información del proyecto geométrico y deberán permanecer dentro de algunos rangos de espaciamientos ya establecidos.

La utilización de estos elementos estructurales juega un papel fundamental en la determinación de parámetros de diseño como esfuerzos y deflexiones en el sistema de traveses de acero, especialmente durante las distintas etapas iniciales del proceso de montaje.

- *Subestructura*

La Subestructura consiste en todos los elementos estructurales requeridos para soportar la Superestructura del puente como lo son estribos, pilas, cabezales, cimentación, columnas, etc. Dicho sistema estructural deberá resistir cualquier acción mecánica generada por alguna carga de diseño o en su defecto por la combinación más desfavorable que pudiera contemplar el desarrollo del análisis.

Existirán acciones mecánicas permanentes y transitorias, en donde las primeras son generadas por el peso propio de la estructura y las cargas muertas adicionales. El segundo esquema contempla las cargas vivas móviles y su correspondiente factor de impacto, las cuales serán ubicadas en su posición más crítica para generar de esta forma las acciones mecánicas de mayor magnitud.

Adicionalmente deberá contemplarse en el cálculo una serie de cargas externas, las cuales se determinan en base a una serie de lineamientos establecidos por los reglamentos de diseño. La determinación de estas cargas es una función directa de las características geométricas del proyecto y el lugar de ubicación de la estructura en el territorio nacional. Algunos ejemplos de estas cargas pueden ser las cargas por viento, cargas por sismo, cargas vehiculares radiales o cargas por temperatura.

a) Cabezales

La geometría para este elemento estructural podrá presentar distintas secciones según las condiciones y requisitos de cada proyecto. Por lo tanto, con frecuencia son utilizados cabezales de sección rectangular los cuales podrán presentar una cierta inclinación de forma ascendente respecto al plano horizontal, o podrá ser lograda por medio del uso de bancos de apoyo en donde la altura para cada uno de estos elementos será de forma gradual. Estas dos alternativas para lograr una determinada elevación sobre el cabezal aparecen en la figura 12, donde se puede apreciar dos distintos cortes transversales de una pila intermedia perteneciente a un puente curvo.

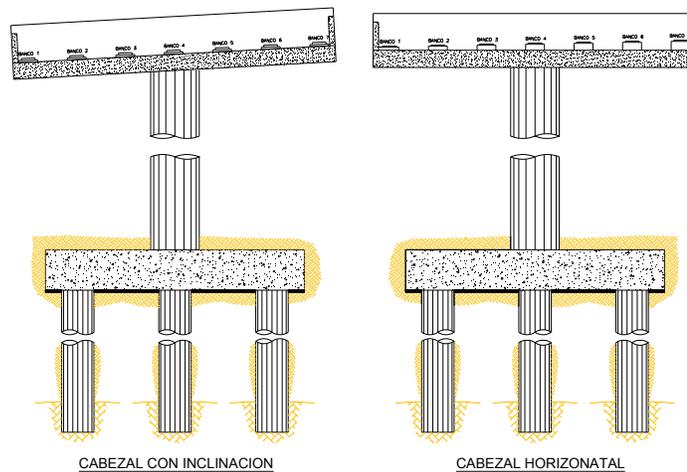


Figura 12. Alternativa de cabezales para definir la sobre elevación

El grado de sobre elevación presente en las pilas de un proyecto que contemple una curvatura horizontal en planta tiene como principal objetivo contrarrestar los efectos de la fuerza centrífuga que es generada por la circulación de los vehículos a través de la estructura.

El porcentaje de pendiente alcanzado ya sea por el cabezal o los bancos de apoyo, es determinada por el cálculo de la sobre elevación del proyecto en el que intervienen factores como el radio de curvatura, el tipo de carretera, velocidad del proyecto, etc.

El uso de cabezales de sección rectangular no es exclusivo para esta clase de puentes, sino que también son utilizados cabezales con una sección trapezoidal que al igual que los de sección rectangular deberán presentar una inclinación por cualquiera de las dos alternativas mencionadas anteriormente.

También podrán ser utilizados cabezales un poco más estéticos cuando este aspecto sea considerado como requisito del proyecto, lográndose por medio del uso de cabezales con una sección T invertida que al igual que los dos anteriores deberá contemplar una cierta inclinación. La diferencia del uso de esta clase de cabezales consiste en que las traveses de acero permanecerán alojadas dentro del propio cabezal por medio de una muesca que servirá de apoyo para el conjunto de traveses, por lo que el peralte del cabezal y la altura de las traveses prácticamente presentarán las mismas dimensiones. La figura 13 muestra una imagen de los cabezales de sección T invertida.



Figura 13. Cabezal de sección T invertida

Cuando sean utilizados cabezales de sección rectangular o trapezoidal, el ancho estará en función del diámetro de la columna y será necesario que presente una mayor dimensión para cumplir con los requisitos de recubrimiento y evitar que el acero que emerge de las columnas coincida con las caras laterales del cabezal o con el acero de refuerzo por cortante y/o de flexión, lo cual sucedería si el ancho del cabezal fuera menor o igual a las dimensiones de la columna.

Si se considera el uso de un cabezal de sección T invertida el ancho será determinado en función de la longitud de la muesca para el apoyo de las traveses de acero. Estas muescas podrán presentar peraltes con dimensiones similares o existe el caso en donde sean distintos, lo cual estará en función de las variaciones que presenten los claros del proyecto y el tipo de trabe AASHTO a utilizar.

Al igual que para el tipo de secciones rectangular y trapezoidal, la zona central rectangular del cabezal de sección T invertida deberá cumplir con los requisitos de espaciamiento mencionados previamente para evitar problemas de obstrucciones entre los distintos aceros de refuerzo.

Los cabezales de sección T invertida presentan acciones mecánicas adicionales que deberán ser consideradas por la geometría de la sección, estas acciones mecánicas corresponden a la torsión en especial cuando los dos claros adyacentes respecto a la pila de análisis presentan distintas longitudes, así como el cortante sobre la muesca que es generado por las condiciones de trabajo del sistema de traveses en las distintas etapas de servicio.

La determinación del dimensionamiento final del peralte así como la cantidad de acero de refuerzo, independientemente de la sección que pueda presentar el cabezal a ser usado en un puente vehicular curvo, deberán garantizar un perfecto funcionamiento ante la presencia de cualquier acción mecánica generada por alguna carga de diseño.

b) Columnas

Las columnas son los elementos estructurales que en conjunto con el cabezal tienen como función soportar la Superestructura del puente y distribuir las cargas hacia el estrato de suelo resistente a través de la cimentación. Las principales acciones mecánicas a resistir por estos elementos serán las cargas axiales, fuerzas cortantes y momentos flexionantes generadas por las cargas propias de la estructura, así como por algunas otras cargas externas.

Las columnas de sección circular y rectangular son frecuentemente utilizadas en los puentes vehiculares curvos; sin embargo, también será posible el uso de marcos de concreto reforzado para el soporte de la Superestructura cuando las condiciones del sitio demanden una solución que contemple esta clase de requerimientos. La solución en base a marcos de concreto es utilizada regularmente en complejos vehiculares que presentan distintos ejes y niveles de proyecto como se muestra en la figura 14.



Figura 14. US Route 59 North, Houston, Texas. Complejo vial con el uso de marcos de concreto como Subestructura

También es posible la colocación de columnas en donde su posición resulta excéntrica respecto al centro geométrico del arreglo de travesas así como del propio

cabezal. Esto se logra cuando la resultante de cargas de la Superestructura se hace coincidir con el eje de la columna, por lo tanto tomando como referencia el origen del radio de curvatura en un corte en elevación, la posición de la columna presentará un ligero desfase respecto al centroide horizontal de la sección del cabezal.

Con la ubicación de la columna en tales condiciones es posible disminuir los momentos flexionantes correspondientes únicamente al peso propio de la estructura y las cargas muertas adicionales. La figura 15 muestra ésta condición de excentricidad.



Figura 15. Columna excéntrica respecto al sistema de traveses y cabezal

Respecto a los procesos constructivos, en la mayoría de los casos resulta conveniente el uso de cimbra metálica para el colado de las columnas, debido a que su configuración por módulos permite definir perfectamente la sección y perímetro del elemento a ser construido. Estos módulos generalmente presentan alturas con dimensiones relativamente pequeñas respecto a la altura de la columna para facilitar los trabajos de manejo y transportación.

El considerar una cimbra que reúna condiciones específicas de altura para cada una de las columnas presentes en un proyecto, resulta una opción que difícilmente podrá ser considerada. Por lo tanto, utilizar una cimbra con las características

previamente mencionadas, brindará una serie de ventajas durante los procesos constructivos.

Debido a que los trabajos de campo requieren en todo momento de un avance constante y sin demoras, en ciertas ocasiones el colado de las columnas se realizará por tramos; esto es, una vez que el concreto haya fraguado en su totalidad dentro de cualquier modulo, la cimbra deberá ser deslizada de forma ascendente hasta el siguiente tramo de colado, repitiéndose este proceso hasta alcanzar la altura final de cada elemento. La figura 16 muestra el tipo de cimbra utilizada para el colado de las columnas.



Figura 16. Módulos de cimbra para los procesos de colado

Si el colado se realiza bajo este procedimiento y los trabajos de supervisión no son desarrollados correctamente para garantizar la perfecta unión del concreto antiguo con el concreto nuevo por medio de una junta fría, existe la posibilidad de formarse un plano de falla a nivel de cada modulo colado traduciéndose posiblemente en una articulación; por lo cual, se sugiere que la cantidad de módulos necesarios para el cimbrado de cada columna sean ensamblados verificando la perfecta nivelación

entre estos hasta formar un cilindro vertical con la altura especificada por el proyecto y realizar el colado monolíticamente.

c) Cimentación

La cimentación es el medio por el cual se logra la distribución de las cargas tanto de la Superestructura como de la Subestructura hacia el estrato de suelo más resistente. Cuando dicho estrato se encuentra a niveles relativamente cercanos respecto de la superficie del terreno natural, solo será necesario el uso de zapatas superficiales donde su configuración en planta generalmente atenderá al de una geometría cuadrada o rectangular. Sus dimensiones estarán directamente en función de la capacidad de carga del suelo y el cálculo del peralte deberá garantizar principalmente los requisitos de resistencia por flexión así como aquellos relacionados con el corte por penetración. La figura 17 muestra el acero de refuerzo de una cimentación rectangular.



Figura 17. Habilitado de acero de refuerzo en cimentación cuadrada

Cuando el suelo de soporte presente valores de capacidad de carga muy bajos o el nivel de aguas freáticas sea detectado muy cerca de la superficie, será necesario el

uso de una cimentación con pilotes, los cuales deberán estar desplantados hasta profundidades en donde sean localizados estratos de roca o lutita. Este tipo de cimentación estará conformada por una zapata de transferencia en donde su dimensionamiento final dependerá del número de pilotes a ser utilizados. La cantidad de estos elementos será determinada de acuerdo a las características mecánicas del estrato de suelo resistente, obteniendo en la mayoría de las ocasiones cimentaciones con una configuración en planta cuadrada o rectangular. Debemos recordar que el peso de una Superestructura conformada por traveses de acero presentará una menor cantidad de carga con respecto aquella formada por traveses AASHTO tipo IV o VI que son usualmente utilizadas en puentes rectos; por lo tanto, esta diferencia en los valores finales de carga se verán reflejados directamente en el número de pilotes que conformarán las cimentaciones para puentes vehiculares curvos.

El espesor de la zapata deberá también cumplir con los requisitos de flexión y cortante por penetración al igual que para zapatas aisladas, con la diferencia de que la revisión por penetración se realizará tanto para la columna como los pilotes, en donde estos últimos elementos podrán trabajar por punta, fricción o una combinación de estas dos condiciones de trabajo. Es importante mencionar que el factor de impacto relacionado con las cargas vivas no es considerado durante los procesos de análisis en cualquiera de las dos condiciones de cimentación mencionadas anteriormente.

Si la magnitud de esfuerzos generados por las distintas cargas de diseño fueran mayores que la capacidad de carga de suelo, independientemente si se tratara de una zapata aislada o con el uso de pilotes, existiría la posibilidad de que estos esfuerzos puedan ser reducidos en un determinado porcentaje según las cargas involucradas actuando de forma simultánea de acuerdo a la serie de combinaciones estipuladas por la SCT en su reglamentación. Generalmente estas cargas críticas corresponderán a las cargas por sismo en su dirección longitudinal y las cargas por frenaje, puesto que

dichas cargas son las que incrementarán en gran medida los esfuerzos en el suelo en la mayoría de las ocasiones.

2.2 UBICACION DE LOS PUENTES CURVOS

Los puentes curvos son aquellas obras de infraestructura vehicular necesarias ante la presencia de alguna de las siguientes problemáticas viales:

- a) Generalmente estas obras se encuentran ubicadas en grandes ciudades en donde se requiere de un flujo constante al momento de la incorporación del tráfico vehicular a una determinada vía de acceso. También son necesarias estas estructuras en intersecciones conflictivas o en sitios donde convergen distintos circuitos viales como se muestra en la figura 18.



Figura 18. State Route 895, Richmond, Virginia

b) Cuando se requiere de una circulación vehicular ininterrumpida como generalmente sucede en carreteras, autopistas, aeropuertos o complejos vehiculares por mencionar algunos. La figura 20 muestra éste último caso.



Figura 19. Interchange Interstate 10-Interstate 45, Houston, Texas

c) Ante cualquier obstrucción natural siempre y cuando exista una perfecta sincronía entre las características geométricas de esta clase de puentes y las condiciones del sitio de ubicación como lo muestra la figura 20.



Figura 20. Polifitos Lake Bridge, Kozani, Dytiki Makedonia, Greece

CAPITULO III

CLASIFICACION DE LOS METODOS DE ANALISIS PARA PUENTES CURVOS

Los métodos de análisis para puentes vehiculares curvos pueden ser clasificados en dos grandes categorías las cuales corresponden a los métodos aproximados y los métodos refinados.

La primera categoría requiere de mínimas técnicas de modelaje como parte del diseño de estas estructuras, por lo cual se considera que son adecuados para un análisis preliminar. Esta clase de métodos actualmente pueden ser programados en hojas de cálculo como Excel o Mathcad y desarrollar algoritmos que faciliten la programación de los procesos de cálculo, en especial cuando la metodología involucre rutinas con un comportamiento iterativo. Aunque sean utilizadas herramientas computacionales durante los procesos de análisis, estos métodos seguirán considerándose como procedimientos aproximados.

Algunos métodos que conforman esta categoría, han demostrado tener un grado de precisión adecuado durante el manejo de cargas muertas al considerar la sección

como no compuesta, así como ante la presencia de algún determinado grado de esviaje en la estructura; sin embargo, hay que tener en cuenta que existen puentes vehiculares curvos geométricamente complejos y el uso de algún método aproximado conducirá a resultados no satisfactorios debido principalmente a las limitantes del procedimiento de análisis.

La segunda categoría de análisis requiere de un proceso un tanto más refinado, el cual exige de cierta experiencia con el uso y manejo de algún programa especializado de cómputo. Este método de análisis adicionalmente contempla invertir una mayor cantidad de tiempo durante la elaboración de los distintos modelos matemáticos considerados en un determinado proyecto, en especial durante las etapas finales si se considera un análisis detallado [20].

3.1 METODO APROXIMADO DE ANALISIS V-LOAD

Este método aproximado y simplificado de análisis involucra dos etapas durante el desarrollo de su procedimiento, primeramente considera el uso de vigas rectas con dimensiones similares a las longitudes de cada una de las traveses que forman parte de un arreglo transversal en un claro que presenta una determinada curvatura en planta. La segunda etapa del proceso de análisis considera el uso de fuerzas cortantes verticales que serán colocadas en la posición de cada diafragma para tomar en consideración los efectos torsionantes de dicha curvatura. La determinación de estas

fuerzas estará en función de algunos factores como el radio de curvatura, cantidad de traveses, separación y número de diafragmas, etc.

Existen algunos otros métodos aproximados para el análisis de puentes curvos con traveses de acero como lo son: el método Plane-Grid, el método Space-Frame, y el método M/R el cual presenta una metodología muy similar al V-Load; sin embargo, su aplicación es exclusiva para puentes vehiculares curvos en donde las traveses de acero se encuentran conformadas por secciones tipo cajón [18].

3.2 METODO APROXIMADO DE ANALISIS M/R

El método aproximado de análisis M/R es otra alternativa de análisis desarrollada en los años 70's; sin embargo, este método es aplicable únicamente para vigas curvas que presentan una sección transversal tipo cajón. Este método presenta una característica similar con respecto al método V-Load la cual consiste en que ambos procedimientos presentan una técnica de análisis derivada de la estática simple [17].

Este método generalmente es usado en el análisis individual de traveses curvos tipo cajón, por lo que su metodología fácilmente podrá ser aplicada al análisis de puentes curvos en donde su sección transversal este definida por esta configuración geometría. Por otra parte, debido a que este método puede calcular las rotaciones que se generan en cada traveses, teóricamente será posible resolver sistemas de traveses múltiples; sin embargo, para propósitos prácticos, es preferible utilizar alguna herramienta

computacional ya que los sistemas de varias trabes presentan una gran complejidad al tratar de resolverlos por algún método aproximado [8].

3.3 METODO DE ANALISIS 2D

El uso de este método demanda el manejo de un programa computacional enfocado al análisis estructural; sin embargo no es requisito saber utilizar las técnicas de modelaje que requiere el análisis por medio del método del elemento finito.

El proceso de modelaje utiliza una retícula en 2D para definir cualquier elemento estructural que conforme la estructura a ser evaluada y los modelos realizados por medio de esta técnica podrán ser desarrollados en dos dimensiones o también será posible hacer uso de los comandos y herramientas utilizadas en un análisis refinado.

Es importante mencionar que todos los elementos estructurales como trabes, diafragmas y superficie de rodamiento estarán conformados por elementos tipo barra. Por lo tanto la representación de los diafragmas y su complejo comportamiento estructural en los modelos, deberán aproximarse en lo mayor posible a las propiedades de una sección transversal prismática conformada por un elemento tipo barra durante los procesos de modelaje. Lo mismo deberá realizarse con la cubierta del puente la cual en un proceso de modelaje habitual en 3D estaría conformada por elementos tipo placa, los cuales presentarían un desfase ascendente respecto al centroide geométrico

de las traveses y ahora durante un modelaje en dos dimensiones dicha cubierta deberá ser representada por medio de elementos tipo barra.

Finalmente el grado de modelaje involucrado durante estos procesos son considerablemente menores a los utilizados en un análisis 3D, por lo que la mayoría de los diseñadores consideran que este proceso de análisis presenta menores dificultades, ya que resulta más sencillo realizar modelos de cualquier estructura únicamente por medio de elementos tipo barra que con el uso de elementos tipo placa [8].

3.4 METODO DE ANALISIS POR MEDIO DEL ELEMENTO FINITO

Este método se caracteriza por que cada uno de los miembros principales que conforman un puente vehicular curvo como las traveses de acero o la losa de concreto, podrán ser divididos en una serie de elementos de menores dimensiones según el grado de precisión que requiera el análisis, de tal forma que cada elemento estructural que haya sido discretizado asemeje una retícula. Cada pequeño elemento generado se encontrará definido por una cantidad específica de nodos en cada una de sus aristas según el tipo de geometría que presenten, los cuales deberán coincidir perfectamente con el resto de los elementos creados, de lo contrario los modelos matemáticos que sean generados no proporcionarán resultados adecuados.

Este es uno de los métodos de análisis de mayor precisión en la actualidad, además de caracterizarse porque no presenta algún tipo de restricción respecto a la

geometría o tipos de cargas al momento de su aplicación. Debido a las numerosas ventajas que presenta esta metodología de análisis, el abanico de opciones relacionadas con los procesos de modelaje es casi ilimitado, pudiendo ser aplicado con facilidad en puentes vehiculares con arreglos transversales conformados por traveses formados por tres placas, así como aquellos que presentan traveses con una sección cajón.

Convencionalmente la aplicación de este método involucra la realización de análisis estáticos; sin embargo, también es posible extender su aplicabilidad al desarrollo de análisis dinámicos [15].

3.5 LIMITANTES DE LOS METODOS DE ANALISIS

- Método aproximado de análisis V-Load

El método aproximado V-Load presenta algunas limitantes respecto a los resultados obtenidos ya que para cargas muertas los resultados podrán variar en un rango menor a 10 % respecto aquellos obtenidos con algún programa de computo; sin embargo, al evaluar las cargas vivas, los resultados se encuentran directamente en función de los factores utilizados para la distribución de las cargas del vehículo de diseño respecto a cada traveses individual que conforma el arreglo transversal de la Superestructura. Los resultados para esta condición resultaron aceptables para las traveses exteriores y conservadores para las traveses interiores. También es importante

mencionar que el método V-Load no es aplicable para el análisis de secciones tipo cajón, o aquellos sistemas de traves de acero que presenten diafragmas de rigidez cerca o en el plano correspondiente a los patines inferiores de estos elementos. Ante la presencia de estas secciones transversales es recomendable utilizar algún otro método de análisis que considere secciones cerradas [4].

- Método aproximado de análisis M/R

El método M/R puede calcular la torsión debido a la curvatura que se genera en cada trabe de un determinado arreglo transversal; sin embargo, este procedimiento considera que la trabe no presenta alguna restricción contra rotación debido a la losa de concreto o por la sujeción de los diafragmas transversales entre traves, que la sección transversal de la trabe cajón no sufre alguna deformación y finalmente que ningún otro efecto de torsión es aplicable. Esta serie de condiciones tan específicas provocan que el uso de este método no siempre sea aplicable [15].

- Método de análisis 2D

Este método de análisis presenta ciertas limitantes relacionadas con los efectos localizados como el pandeo lateral de los patines o las deformaciones que experimenta la sección transversal de las traves. Otra limitante que presenta este método de análisis consiste en representar directamente las características de rigidez de algunas secciones transversales complejas como el caso de una trabe con distintos anchos de patín, secciones con dos almas, traves con cubreplacas que automáticamente transforman las propiedades en una sección compuesta, etc.

Por otra parte como se comento anteriormente, la cubierta en los procesos de modelaje se representa por medio de elementos tipo barra y es el medio principal para la distribución de las cargas vivas en un puente; por lo tanto, algunos diseñadores se cuestionan que tan precisos serán los resultados de dicha distribución de cargas sobre los elementos principales al considerar esta tipo de modelos simplificados [8].

Debido a la gran cantidad de desventajas que presenta este método de análisis, generalmente no se recomiendan para los siguientes casos:

1. Puentes con un pronunciado grado de curvatura o esviaje, donde las deflexiones, rotaciones y deflexiones presenten magnitudes significantes.
 2. Puentes con la presencia de traveses con grandes peraltes en donde la simplificación de las propiedades de la sección transversal de estos elementos con respecto a la representación de un elemento tipo barra provoquen resultados con grandes porcentajes de error.
 3. Puentes en donde las traveses presentan un peralte variable
 4. Puentes con grandes claros.
- Método refinado de análisis por medio del elemento finito

Por otra parte, como ha sido mencionado anteriormente el procedimiento de análisis por medio del elemento finito es considerado hasta el momento como el método de mayor exactitud con el que dispone la mayoría de los ingenieros calculistas durante la realización de algún modelo matemático en tres dimensiones en los trabajos referentes al diseño de puentes vehiculares curvos.

Sin embargo, existen algunos detalles asociados con este método de análisis, por ejemplo durante un análisis en tres dimensiones desarrollado bajo estas características, los diagramas de momentos y cortantes en las vigas no son obtenidos directamente,

debido a que el programa proporcionará esfuerzos en los patines, almas y en los elementos que conforman la losa de rodamiento; por lo tanto, si el diseñador requiere de estos resultados necesitará realizar alguna conversión para la obtención de estos valores.

Hasta el momento el reglamento AASHTO dentro de sus especificaciones no ha incorporado cuándo y cómo deberá ser usado un análisis refinado con el uso del método del elemento finito. La metodología estipulada por la AASHTO generalmente está basada en la consideración de esfuerzos nominales promedio calculados por métodos simplificados como el P/A o el MC/I y no para picos de esfuerzos obtenidos por medio de placas o elementos sólidos pertenecientes a modelos matemáticos tridimensionales [5].

CAPITULO IV

METODOLOGIA PROPUESTA DE MODELAJE PARA PUENTES CURVOS

A continuación serán presentados los distintos procedimientos que conforman la propuesta de modelaje para el análisis de puentes vehiculares curvos por medio del programa SAP2000. La figura 21 muestra un diagrama de flujo con las distintas etapas que contempla el modelaje de este tipo de estructuras.

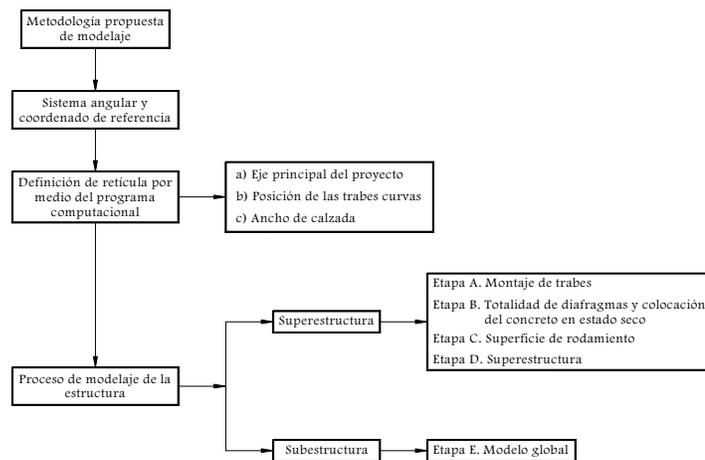


Figura 21. Diagrama de flujo de la metodología propuesta de modelaje

Es importante mencionar que este mismo procedimiento podrá ser realizado con la ayuda de cualquier otro programa de análisis estructural siempre y cuando los procesos involucrados en el modelaje de la estructura sean realizados a través del método del elemento finito. Adicionalmente deberán ser considerados los siguientes factores:

- a) Respetar en todo momento las distintas etapas que conforman la metodología propuesta.
- b) Tomar en cuenta la serie de recomendaciones emitidas para cada etapa del modelaje, en especial durante los procesos del montaje de trabes.

El programa SAP2000 se considera como una herramienta especializada de trabajo, la cual frecuentemente es elegida respecto algunos otros programas similares que existen en la actualidad. El uso de dicho programa no es exclusivo para empresas especializadas en el área del cálculo y diseño estructural, sino que también es utilizado durante el desarrollo de proyectos de investigación acerca del comportamiento de estas estructuras como lo reportan algunas publicaciones emitidas por la ASCE.

4.1 SISTEMA ANGULAR Y COORDENADO DE REFERENCIA

Antes de iniciar con cualquier proceso de modelaje a través de algún programa de análisis y diseño estructural, se requerirá de la elaboración del sistema angular y coordenado de referencia (SACR). Dicho sistema estará conformado por una plantilla

de trabajo a escala 1:1, la cual deberá presentar una perfecta orientación respecto a un determinado origen. Adicionalmente también será necesario definir dos sistemas de ejes que servirán para la perfecta ubicación de los elementos principales del puente vehicular curvo. La figura 22 muestra una representación grafica en 3D de estos dos sistemas de ejes.

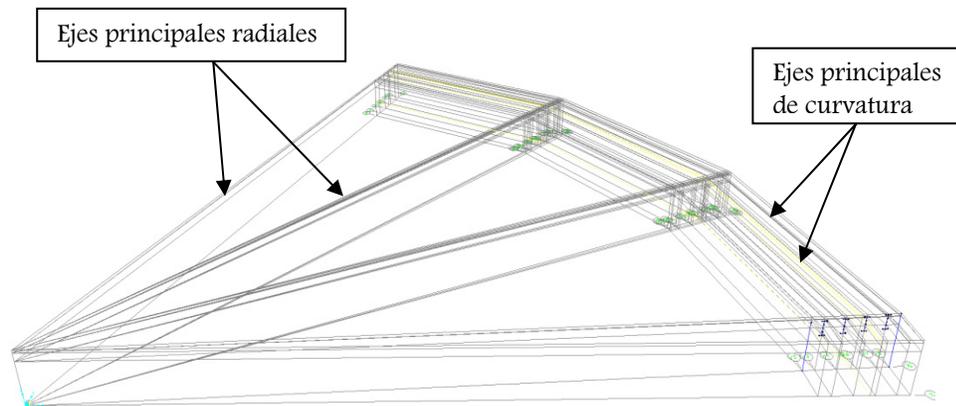


Figura 22. Ejes principales del sistema angular y coordenado de referencia

- a) Sistema de ejes principales radiales. Estos ejes corresponden a la posición de los distintos radios de curvatura que describen la ubicación exacta del conjunto de pilas conformadas por la columna, cabezal y cimentación a base de una zapata la cual en ocasiones podrá presentar pilotes de transferencia.
- b) Sistema de ejes principales de curvatura. Los cuales corresponden al centro de eje de todas las traveses y bordes exteriores que conforma el sistema trabe - losa de la sección transversal del puente.

Una característica importante del SACR consistirá en que el origen de sus ejes deberá encontrarse debidamente referenciado a un sistema de ejes coordenados, por lo cual se recomienda que su realización sea por medio del programa AutoCAD en cualquiera de sus versiones.

La configuración del SACR visto en planta deberá presentar los ángulos de esviaje que pudieran generarse a partir de la colocación de una línea horizontal sobre el centro geométrico de la columna y el cabezal. Ante la ausencia de esta característica, se considerará que la orientación geométrica de los elementos estructurales que conforman cada pila será de forma radial ó paralela respecto algún eje principal radial.

Adicionalmente este SACR deberá contener los ángulos descritos por los distintos claros del proyecto; sin embargo, estas dimensiones angulares deberán tomar en cuenta la distancia comprendida entre las dos líneas de bancos de apoyos que forman parte del cabezal, la cual generalmente es muy pequeña, pero reducirá la longitud efectiva del claro en estudio.

Por último y como parte de la información necesaria para los procesos de modelaje, el SACR deberá contar con cierta información ubicada generalmente cerca del extremo de los ejes principales radiales, así como en las zonas de esviaje en caso de existir esta condición, donde se identifiquen las coordenadas tanto del inicio como el final de los ejes principales de curvatura para cada claro del puente.

Deberá tenerse en mente que entre mayor información contenga el sistema angular y coordenado de referencia, menores serán las posibilidades de cometer algún error durante los distintos procesos que requiere el modelaje de un puente vehicular con estas características, además de que se tendrá la seguridad de que todos los elementos que formen parte de cada modelo matemático, contarán con un adecuado dimensionamiento.

En el apéndice A se presenta el sistema angular y coordenado de referencia del caso de estudio, el cual consta de tres planos de referencia elaborados con el programa AutoCAD en donde se puede apreciar el conjunto de información con la cual fue posible realizar los distintos modelos matemáticos para el caso de estudio propuesto. Se

recomienda ampliamente hacer uso de las figuras anteriormente mencionadas en los apartados subsecuentes a este capítulo, con la finalidad de proporcionar una mayor claridad y mejor entendimiento del contenido que se presenta a continuación.

- *Principales características del sistema angular y coordenado de referencia*

Es importante hacer mención que la realización del SACR perfectamente a escala, tiene la función de servir como ayuda para poder determinar si las coordenadas de un elemento en específico presenta la misma posición respecto al modelo matemático final que será generado por medio del programa SAP2000, ya que ambos deberán coincidir.

La diferencia que existe entre los niveles finales de rasante que presentan los estribos ubicados a cada extremo del puente, respecto a los niveles de cada eje principal radial, servirán para determinar las distintas alturas de columnas así como las pendientes que definen el trazo vertical del proyecto bajo estudio.

Una vez obtenida la información referente a las cotas de nivel de los ejes principales radiales así como el desnivel que existe entre cada uno de ellos, deberá establecerse un nuevo sistema de niveles a partir de la diferencia que resulte de estos valores. Este nuevo sistema deberá iniciar respecto al eje radial que presente la columna de mayor altura, a la cual definiremos como columna de referencia, y a partir de su nivel superior de cota, se generará la curvatura vertical del proyecto. El comportamiento de ésta curvatura vertical generalmente se describe hacia los extremos de la columna de referencia, ya que su posición se encontrará aproximadamente al centro de las pilas restantes. Esto significa que el resto de los elementos a modelar, deberán encontrarse por debajo del nivel superior de cota

respecto a la mencionada columna. Por último será necesario verificar que las alturas del resto de las columnas no presenten un nivel inferior de cota negativo respecto al nuevo sistema de ejes coordenados.

Otro aspecto de gran importancia consiste en llevar un registro detallado de los niveles transversales de sobre elevación presentes en el sistema trabe - losa para cualquier eje radial del proyecto así como a lo largo de cada uno de sus claros. Este registro tiene la función de servir como referencia, debido a la necesidad de comparar los niveles verticales de cada elemento que forme parte de los distintos modelos matemáticos a realizar, ya que una vez generada la posición final de alguna de las trabes o bordes de losa, estos elementos podrán presentar algún desfase respecto a las coordenadas del proyecto geométrico. Esto sucede cuando se introduce por algún descuido información de forma errónea, y de no contar con las coordenadas a las cuales cada elemento deberá estar situado, resulta prácticamente imposible determinar si cada uno de ellos presenta una posición correcta. Este tipo de situaciones generalmente suceden cuando los modelos matemáticos presentan un grado de complejidad relativamente alto o por la gran cantidad de información que se maneja de forma simultánea durante estos procesos. Hay que tener presente que el trazo geométrico de estos puentes se encuentran definidos tanto por la trayectoria de una curva vertical como de una horizontal.

El modelo a desarrollar podrá ser un modelo matemático convencional en donde las columnas, trabes y la losa presenten un mismo nivel, o también es posible la elaboración de modelos matemáticos en donde el grado de refinamiento prácticamente coincida con las condiciones reales de la estructura que se pretende diseñar. Esta condición puede ejemplificarse cuando es necesario modelar los distintos espesores de patines, la colocación de atiesadores a lo largo de las trabes, el grado de sobre

elevación presente en cada sección de la curvatura, los distintos niveles verticales de columnas, ubicación de diafragmas, etc.

Como generalmente sucede en la mayoría de los proyectos de ingeniería, los tiempos de ejecución son un factor de gran importancia independientemente de la etapa de diseño que se esté contemplando; sin embargo, frecuentemente estos tiempos son muy cortos para realizar un análisis estructural detallado, por lo que una obra de esta magnitud deberá contemplar un periodo de tiempo exclusivo para el desarrollo de un análisis estructural adecuado, debido a que durante este proceso se puede obtener información oportuna con la cual es posible minimizar la presencia de alguna complicación relacionada con los procesos constructivos, como sucede frecuentemente durante la determinación de los niveles geométricos finales del proyecto los cuales se encuentran directamente relacionados con los desplazamientos que sufre cada una de las trabes a lo largo de las distintas etapas contempladas en el análisis de estas de estructuras.

En el apéndice B se presenta el algoritmo de niveles y ángulos, con el cual fue posible la obtención de una gran cantidad de información numérica, además de haber podido determinar la siguiente serie de parámetros.

- a) Nuevo sistema discretizado de ejes verticales.
- b) Totalidad de los porcentajes de sobre elevación transversal a lo largo de los distintos claros.
- c) Ángulos que describen la posición de las pilas, esviajes e información de gran relevancia relacionada al caso de estudio propuesto.

4.2 DEFINICION DE RETICULA POR MEDIO DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL

Primeramente deberá seleccionarse el comando de retícula en su modalidad de coordenadas cilíndricas e introducir el número de líneas y sus correspondientes espaciamentos a lo largo de los ejes radiales, así como los ángulos que describirán los distintos claros del proyecto. El sistema angular y coordinado de referencia realizado previamente tiene como objetivo proporcionar ésta y cualquier otra información adicional que pudiera ser necesaria.

En seguida deberá establecerse en planta los distintos ejes principales de curvatura que definirán exactamente la ubicación del centro geométrico de los siguientes elementos estructurales:

- a) Eje principal del proyecto. La presencia de un solo radio de curvatura que describa la trayectoria en planta de un puente vehicular curvo, no es una característica que pudiéramos asociar a esta tipo de proyectos. En la mayoría de los casos, varios radios de curvatura describirán la trayectoria del eje principal como se muestra en la figura 23, incluso existirán situaciones en donde la presencia de tramos rectos formen parte del arreglo geométrico del proyecto, generando que los procesos de modelaje presenten un mayor grado de complejidad. Estos procesos de modelaje pueden ser incluso más

desafiantes, cuando el análisis del puente vehicular curvo a diseñar presenta un determinado grado de esviaje en el arreglo de sus apoyos con respecto a de una configuración radial convencional.

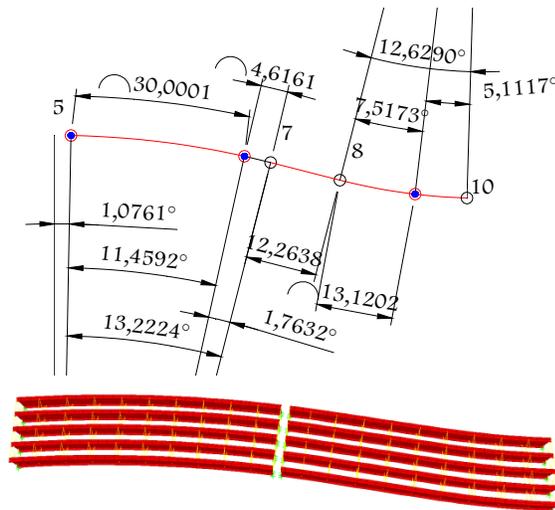


Figura 23. Modelo matemático de puente vehicular curvo en donde su eje principal se encuentra descrito por varios radios de curvatura

- b) Posición de las travesaños curvas. Debido a que las travesaños serán generadas por medio de una réplica continua de elementos, será necesario determinar los tres radios de curvatura que describan a cada trabe de acero formada por tres placas, estos puntos corresponderán al centro del alma y los dos bordes extremos del ancho de patín como se muestra en la figura 24. La posición de estos radios de curvatura deberán presentar una exacta localización respecto al eje de proyecto principal. En algunas ocasiones este eje coincidirá con el eje de la trabe central del arreglo propuesto, siempre y cuando la cantidad de estos elementos sea un número impar. Ante la presencia de dos o más radios que describan la curvatura de algún puente vehicular curvo, será necesaria la creación de retículas adicionales verificando que todos los ejes de curvatura a ser utilizados durante los procesos de modelaje presenten una perfecta orientación respecto a la posición del origen al cual pertenezcan.

Adicionalmente se deberá prestar atento cuidado al espaciamiento comprendido entre cada elemento, así como a los distintos desniveles que se presentarán a lo largo de cada trabe.

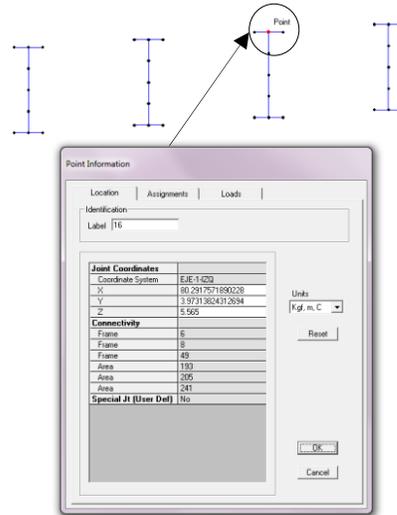


Figura 24. Determinación de la posición de las traveses curvas a través de los distintos radios de curvatura

- c) Ancho de calzada. Al igual que para el caso de las traveses curvas, deberán definirse los radios de curvatura que describan la trayectoria de los dos bordes de la losa de concreto a lo largo de los distintos claros del puente vehicular. No existirá gran complicación cuando este volado que surge a partir de las traveses exteriores presente una longitud constante como se muestra en la figura 25. Sin embargo, esta situación se complica un tanto cuando dicho contorno presenta ciertas variaciones las cuales alcanzan un valor máximo generalmente en la parte central de cualquier segmento de curva. Este sobre ancho adicional de calzada, el cual suele presentarse ante radios de curvatura relativamente pequeños, se genera por el pronunciado grado de sobre elevación requerido específicamente en la zona antes mencionada con el propósito de contrarrestar la fuerza centrífuga que actuará sobre los vehículos al momento de su circulación; sin embargo, esta

característica no siempre forma parte de la totalidad de los proyectos. Por otra parte la determinación de las distintas transiciones de los niveles de sobre elevación que se presentarán a lo largo de la trayectoria de cada claro, deberá ser un requisito indispensable a ser tomado en cuenta.

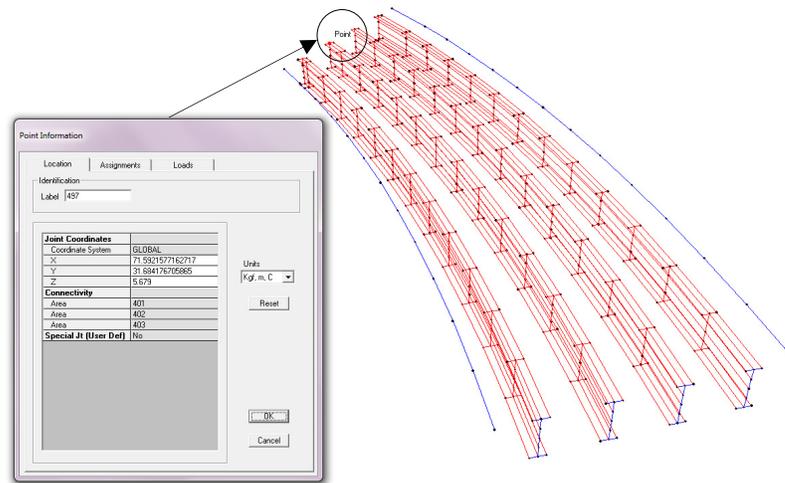


Figura 25. Determinación de los bordes del ancho de calzada

Una vez que se ha definido la totalidad del sistema de ejes principales de curvatura en planta, deberán establecerse adicionalmente los diferentes niveles de alturas en la retícula del programa computacional, este nuevo sistema de ejes verticales contemplará los siguientes elementos estructurales:

1. Nivel de desplante de pilotes en caso de contemplar una cimentación profunda.
2. Las alturas de las distintas columnas del proyecto.
3. Peralte de traveses ante la presencia de distintas dimensiones.
4. Finalmente el porcentaje de sobre elevación que presentará el arreglo de estos elementos estructurales.

Con esto finalmente se logra complementar la retícula de trabajo que permitirá una mejor eficiencia en el desarrollo de los procesos de modelaje.

4.3 PROCESO DE MODELAJE DE LA ESTRUCTURA

Una vez que se cuente con el registro de información detallada acerca de los niveles verticales y la totalidad de los ángulos horizontales en planta, será el momento de iniciar con los procesos del modelaje de la estructura, los cuales contemplarán como primer instancia la generación de todos los elementos estructurales que conforman la Superestructura del puente, en donde estos elementos deberán presentar una perfecta ubicación respecto a las coordenadas x, y, z del sistema angular y coordenado de referencia previamente realizado. Posteriormente se realizarán los procesos de modelaje de la Subestructura, los cuales relativamente presentarán menor complicación respecto aquellos realizados en la Superestructura.

El proceso de análisis para los elementos de la Superestructura se propone esté conformado por cuatro distintas etapas como se muestra en la figura 21, durante las cuales estos elementos deberán ser sometidos a condiciones de cargas específicas según la etapa de análisis a la cual pertenezcan. La obtención de las magnitudes de carga propias de cada etapa, formarán parte del conjunto de resultados parciales obtenidos con este programa especializado, los cuales deberán ser manejados con un perfecto orden y secuencia ya que la sumatoria de cada uno de estos valores individuales determinará las magnitudes de los esfuerzos y desplazamientos teóricos que experimentará cada una de las traveses que forman parte del arreglo transversal del

puente vehicular. Una quinta y última etapa que también es mostrada en la figura 21, contemplará la modelación del puente en su totalidad, así podrá realizarse el análisis y diseño tanto de cabezales, columnas y elementos que conforman la cimentación. Es en esta etapa donde se considera simultáneamente la Subestructura formada por el sistema de pilas, la Superestructura y las distintas combinaciones de carga a las cuales estará sometida la estructura en algún periodo de su vida útil. Este sistema de cargas corresponderá a las cargas por viento, cargas por sismo, cargas por frenaje, cargas por fuerza centrífuga, etc. Dichas cargas son establecidas de acuerdo al reglamento del cual se haga uso, siendo las normas establecidas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes las que aplicarán en nuestros procesos de análisis.

A continuación se presentan las cuatro etapas para el análisis de la Superestructura de cualquier puente vehicular curvo. Posteriormente se presentará la quinta etapa de análisis donde se contempla la realización de un solo modelo matemático con el cual se diseñará el resto de los elementos estructurales involucrados en un proyecto de estas características.

- *Etapa A. Montaje de traveses*

Procedimiento de ejecución en obra

El comportamiento de un puente vehicular curvo difiere radicalmente respecto aquellos otros pasos a desnivel en donde su trayectoria se encuentra descrita por un trazo geométrico recto en planta. Este mismo comportamiento se presenta durante los procesos constructivos, por lo que los trabajos relacionados con el arreglo y montaje de traveses requerirán de un procedimiento especial.

Los procesos de montaje podrán ser realizados considerando alguna de las siguientes tres alternativas.

- a) Utilizar únicamente arreglos conformados por dos traveses.
- b) Hacer uso de arreglos transversales formados por tres traveses.
- c) Contemplar el uso de una combinación de estos dos procesos mencionados anteriormente, lo cual estará directamente en función de la cantidad de traveses que conformen el arreglo transversal de cada proyecto.

Si el montaje de las traveses se realiza contemplando una secuencia en donde se involucre la colocación de estos elementos individualmente, las traveses experimentarán una serie de situaciones extraordinarias entre las cuales podremos mencionar:

- a) Inestabilidad del elemento por el efecto de la torsión, provocando que la travesa gire hacia la parte externa respecto al eje principal del proyecto tomando como referencia la curvatura del proyecto en planta.
- b) Deflexiones excesivas que generen deformaciones permanentes en las traveses, las cuales incluso puedan ser motivo para rechazar el uso de estos elementos estructurales.
- c) Esfuerzos adicionales de tensión y compresión en los patines de una magnitud considerable.

Respecto a la secuencia del montaje, cada travesa que forme parte de la sección transversal de la Superestructura estará sujeta a distintos niveles de esfuerzos y deformaciones, los cuales estarán en función de su ubicación, por lo tanto, las mayores magnitudes de estos valores se registrarán en los elementos que presenten la posición más alejada respecto al eje principal del proyecto en planta. La figura 26 servirá de referencia para poder identificar el sistema de traveses internas o externas respecto a la curvatura del proyecto geométrico en planta, así como también para poder determinar la secuencia de los procesos de montaje.

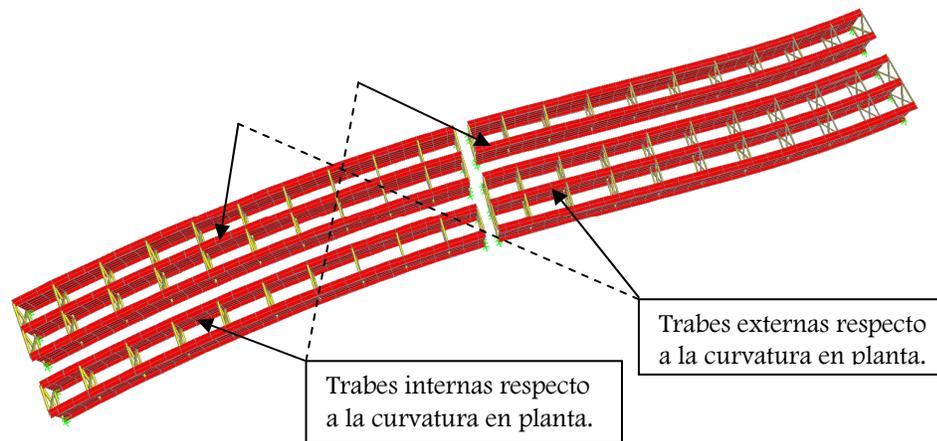


Figura 26. Esquema para identificación y ubicación del sistema de traveses

Para el caso de una sección transversal compuesta por 5 traveses, deberá colocarse primeramente el arreglo formado por las dos traveses internas respecto al eje principal del proyecto, posteriormente deberá realizarse el montaje de las tres traveses restantes ubicadas en la parte externa respecto al mismo eje de referencia como se puede apreciar en la figura 27.

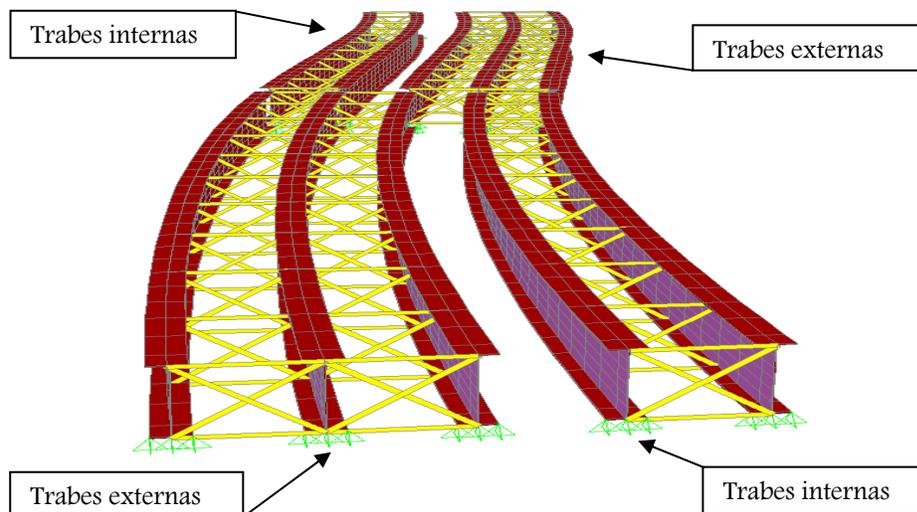


Figura 27. Secuencia del montaje de traveses en un arreglo de 5 traveses

Si la sección transversal estuviera compuesta por 6 traveses. La secuencia del montaje deberá realizarse en base a tres conjuntos que estén formados por un par de traveses, y la secuencia de colocación será a partir de la parte interna del eje principal del proyecto. También pudiera realizarse el montaje por medio de dos conjuntos de tres traveses, con la misma metodología respecto a la secuencia de colocación.

Las anteriores alternativas para los procesos de montaje se sugieren ya que los elementos más alejados respecto al eje principal del proyecto presentarán las acciones mecánicas con mayor magnitud como fue mencionado anteriormente, por lo cual si se coloca un conjunto de tres elementos en la parte externa respecto al eje mencionado, los efectos se verán disminuidos en un cierto porcentaje, ya que el sistema compuesto por tres traveses presentará una mayor rigidez contra los efectos de torsión respecto al de un arreglo compuesto por dos traveses que pudiera ser utilizado en la misma posición.

Finalmente para todos los casos anteriores de montaje y secuencia de colocación, se está considerando que las traveses se encuentran perfectamente sujetas por un sistema de diafragmas debidamente espaciados.

Fase de modelaje

La etapa de modelaje contempla como requisito fundamental, el haber definido con anterioridad el dimensionamiento de todas las traveses principales que conforman la Superestructura del puente vehicular. Por lo cual, durante esta primera etapa será necesario contar con el peralte de las traveses y los espesores tanto del alma como de los patines, debiéndose haber cumplido con requisitos como clasificación del perfil, relación ancho espesor para evitar efectos provocados por el pandeo lateral, el uso de atiesadores y sus respectivos espaciamientos en caso de ser necesarios, etc. Finalmente

el espaciamiento entre cada trabe que conforma la sección transversal, también será parte de la información con la cual se deberá contar.

Los procesos de modelaje correspondientes a la etapa A inician con la generación del conjunto de trabes. Como es sabido cada eje principal radial presentará sus correspondientes niveles verticales, por lo cual se recomienda iniciar la generación de las trabes a partir del primero de estos ejes, según el sentido del cadenamamiento en planta. De esta forma, con la totalidad de los niveles de la retícula previamente determinados y específicamente con los correspondientes al eje de arranque, el arreglo transversal de las trabes inicialmente será generado con elementos tipo barra que presenten la misma orientación, los cuales deberán ser divididos en base al criterio del diseñador o a las longitudes que considere más convenientes. Cada nodo que forme parte de cada una de las trabes presentará una determinada coordenada, la cual deberá ser comparada con el sistema angular y coordinado de referencia de la forma que aparece en la figura 28.

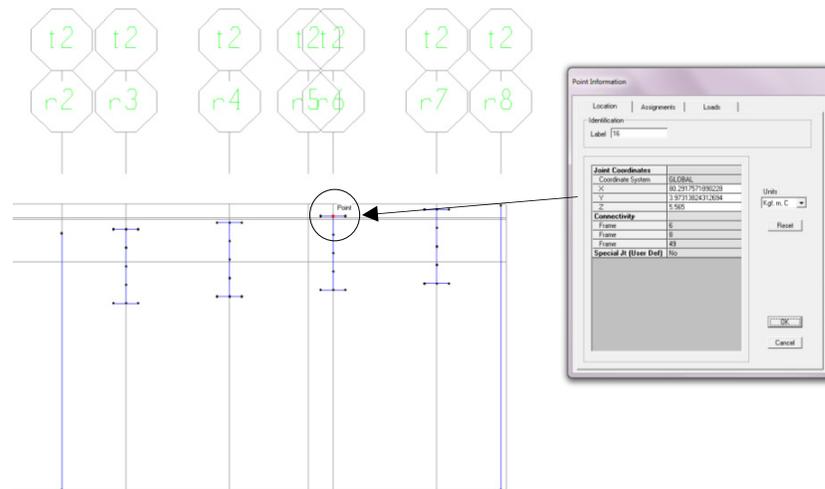


Figura 28. Generación de trabes y comparación de coordenadas

Como puede apreciarse, el conjunto de trabes formadas por la serie de elementos tipo barra presentan tanto su correspondiente espaciamiento como los niveles finales

de sobre elevación, ya que posteriormente las traves sufrarán una transición de elementos tipo barra a elementos tipo placa como puede apreciarse en la figura 29.

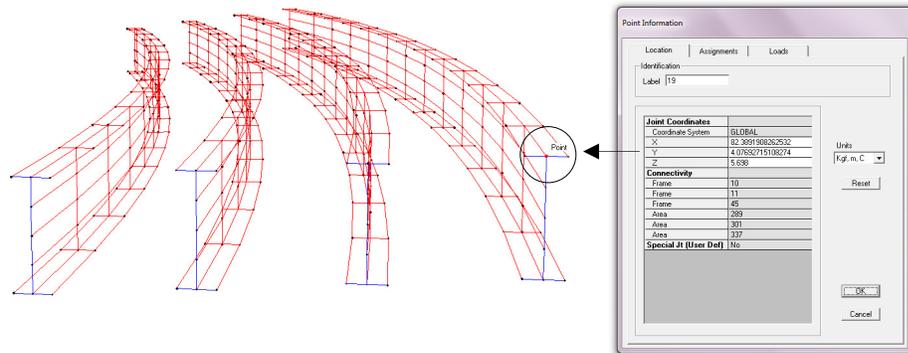


Figura 29. Conversión de elementos tipo barra a elementos tipo placa en modelo matemático y comparación de coordenadas

Generalmente el conjunto de traves presentará en su sección transversal un distinto grado de sobre elevación a lo largo de cada claro del puente, especialmente en la zona donde las transiciones se comportan de manera más pronunciada como es el caso de los claros centrales con respecto aquellos cercanos a las rampas de acceso. Sin embargo, también es posible que algunos de estos claros centrales presenten el mismo porcentaje de sobre elevación, tal como sucedió con el caso de estudio propuesto.

Por otra parte, ante la presencia de un claro que presente un cierto grado de esviaje, la modelación de las traves deberá realizarse por etapas, donde la primer etapa contemplará el modelado de las traves hasta donde el ángulo que describe el eje principal de curvatura en planta aún se considere radial respecto al origen, la segunda etapa contempla el resto del ángulo correspondiente al esviaje. Para esto será necesario utilizar los distintos planos de referencia elaborados que forman parte del SACR así como la toda la información que aparece en los mismos. La figura 30 y 31 muestran las dos etapas del modelaje que deberán contemplarse ante la presencia de un claro con un determinado grado de esviaje en sus apoyos.

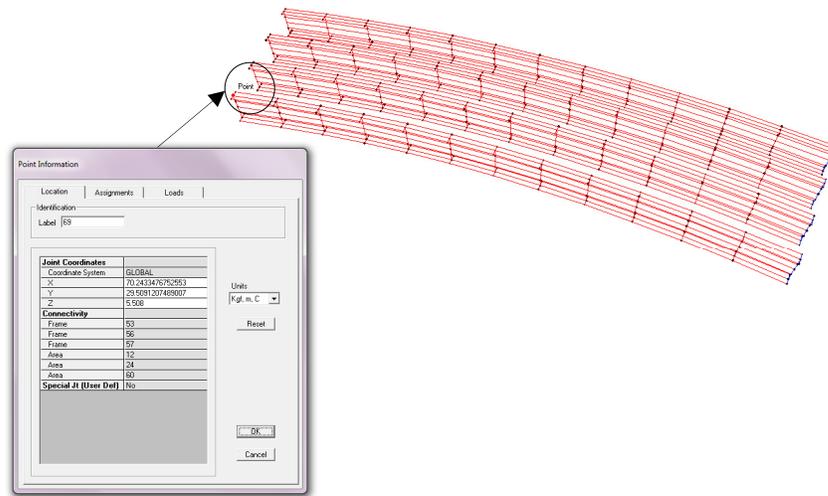


Figura 30. Primera etapa de modelaje ante la presencia de esviaje en sus apoyos

Al igual que para los casos anteriores, la verificación de coordenadas de los elementos una vez generados será fundamental y una pieza clave en todas las distintas etapas de los procesos de modelaje, ya que con esta medida el proyecto geométrico de cualquier puente vehicular curvo podrá ser controlado rigurosamente.

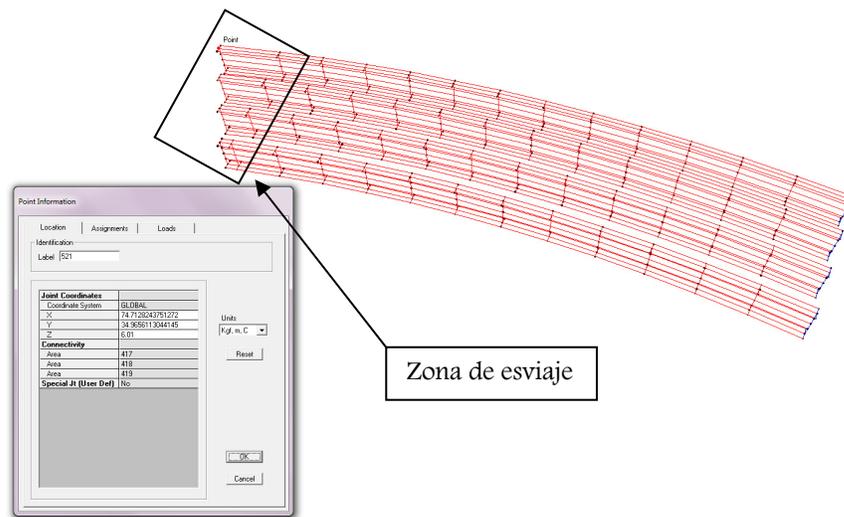


Figura 31. Segunda etapa de modelaje ante la presencia de esviaje en sus apoyos

Dependiendo del número de ejes principales radiales así como del número de ejes principales de curvatura, la retícula con la cual podrá ser posible el desarrollo de

los procesos de modelaje en su totalidad, lucirá muy similar a la imagen que se presenta en la figura 32, independientemente del programa que haya sido seleccionado para su elaboración.

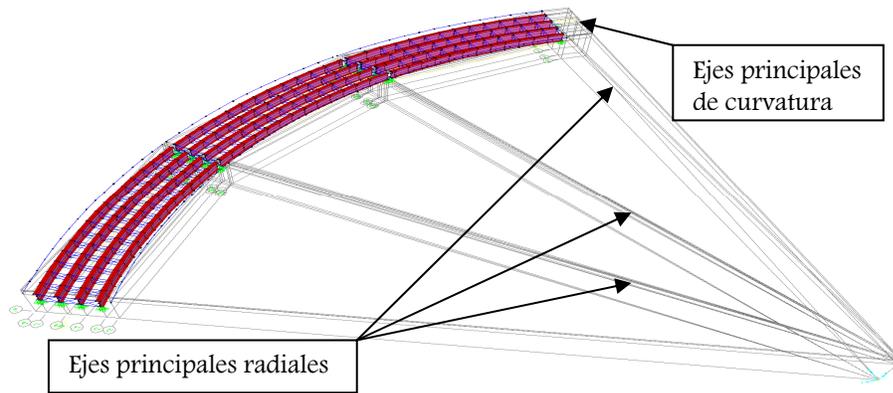


Figura 32. Sistema reticular del caso de estudio

Una vez que se cuente con la totalidad de las vigas debidamente modeladas de la sección transversal del puente, seguirá el turno de la colocación de diafragmas. Hay que tener presente que toda la información relacionada con estos elementos debe haber sido definida con anterioridad al igual que cuando fueron tomadas ciertas consideraciones para el caso de las trabes. La adición de diafragmas deberá realizarse con elementos tipo barra, los cuales generalmente corresponderán a secciones transversales formadas por ángulos simples o dobles de lados iguales. El arreglo de estos elementos presentará una configuración en “X”, “V” o “K” y en la mayoría de los casos su espaciamiento deberá ser constante, presentando una alineación de forma radial. Es importante mencionar que siempre deberán colocarse diafragmas horizontales a nivel de los patines superiores de las trabes para evitar cualquier distorsión provocada por los efectos de la curvatura. Finalmente, la colocación de estos elementos en sentido transversal y el número de trabes que sujetarán durante los procesos de montaje, seguirán la secuencia de las especificaciones hechas por el diseñador.

Los esfuerzos y deformaciones obtenidos en la etapa A corresponden exclusivamente al peso propio de los elementos, por lo tanto solo será considerado el peso de traveses y diafragmas. Debido a que no existe alguna sección adicional que pudiera cambiar las propiedades de la sección transversal en las traveses, estos elementos serán considerados como secciones simples.

- *Etapa B. Totalidad de diafragmas y colocación del concreto en estado fresco*

Fase de modelaje.

Hasta este punto la metodología propuesta para el análisis de puentes vehiculares curvos considera únicamente modelos matemáticos que presentan arreglos transversales de traveses compuestos por pares o triadas, la anterior consideración se debe básicamente a las condiciones que deben cumplirse para un correcto y adecuado proceso de montaje.

Ahora, los procesos de modelaje correspondientes a la etapa B contemplarán la colocación del resto de los diafragmas para que todo el sistema de traveses permanezca perfectamente unido, hay que recordar que la etapa anterior considera únicamente el análisis para un conjunto de traveses en pares o triadas.

Con la condición anterior se restringe cualquier posible inestabilidad o rotación individual de las traveses por los efectos de la torsión, condición característica de los puentes vehiculares con una curvatura en planta. Las condiciones de apoyo en los extremos durante esta etapa de análisis deberán contemplar las siguientes consideraciones:

1. Es necesario que uno de los extremos no presente alguna restricción contra deslizamiento en el plano horizontal, condición que permitirá una libre movilidad del conjunto de estos elementos asemejando un apoyo de rodillo.
2. El extremo restante deberá considerarse como simplemente apoyado, restringiendo cualquier deslizamiento pero permitiendo algunas rotaciones verticales, condición que se presenta cuando la travesa se sujeta al cabezal por medio de un conjunto de anclas metálicas.

Las condiciones de apoyo mencionadas anteriormente evitarán problemas en la Subestructura relacionados con la expansión o retracción de los materiales por efectos de los cambios por temperatura.

Aunque aún no es el momento de modelar la losa por medio de placas, resulta conveniente definir ambos bordes del volado para agilizar los procesos de modelaje correspondientes a la próxima etapa. La figura 33 muestra gráficamente esta etapa del modelaje.

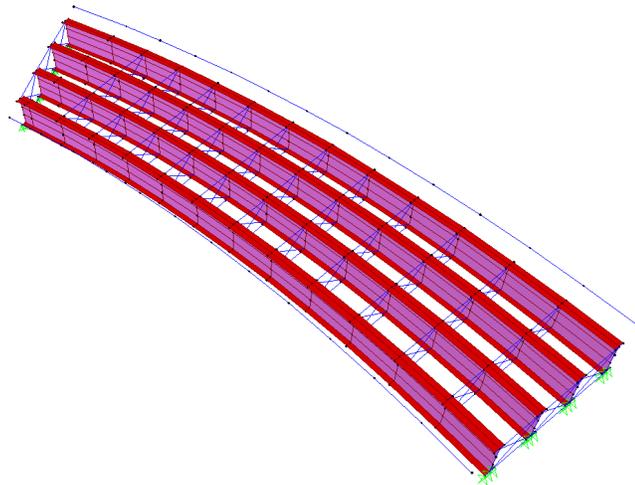


Figura 33. Modelo matemático con la totalidad de travesas y diafragmas, así como la definición de los bordes extremos de losa

Estos bordes deberán realizarse por medio de la réplica de un punto, el cual será convertido en elementos tipo barra. El anterior proceso de modelaje resulta

completamente similar a la generación de las traveses las cuales surgen a partir de elementos tipo barra que son transformados a elementos tipo placa.

Adicionalmente la etapa B deberá contemplar en el proceso de análisis una carga correspondiente al peso de la losa de rodamiento; sin embargo, esta carga requiere como condición especial que el concreto se encuentre en estado fresco y debido a la consistencia del material, será necesario que éste se encuentre contenido y delimitado por medio de una cimbra. Esto significa que las propiedades transversales de las traveses no se verán modificadas y el concreto correspondiente a dicha superficie de rodamiento, al menos bajo esta consideración, no estará trabajando aún como diafragma ya que no aporta ningún tipo de rigidez a las traveses.

Las cargas correspondientes al peso de la losa deberán ser colocadas de forma vertical a lo largo de los nodos ubicados en la parte central del patín superior, coincidiendo con la posición vertical del alma. Sin embargo, como cada trabe presentará una determinada longitud de acuerdo a su correspondiente eje principal de curvatura, este tipo de cargas deberán ser calculadas por áreas tributarias. Por ejemplo si fueran colocadas las cargas en la posición de los diafragmas, el área tributaria en planta correspondería al promedio de las dos separaciones transversales entre las traveses localizadas hacia ambos extremos de la trabe de aplicación de cargas, para multiplicarse por el promedio de las distancias entre diafragmas en el sentido longitudinal de tres traveses continuas incluyendo la trabe central de aplicación de cargas mencionada anteriormente.

El proceso de obtención del área tributaria descrita anteriormente, aplica exclusivamente para el caso de una trabe intermedia. Si por el contrario fuera necesaria la obtención del área tributaria para una trabe de borde, se aplicaría el mismo procedimiento, solo que en lugar de utilizar la longitud de dos traveses hacia cada extremo de la trabe de aplicación de cargas, sería substituida una de estas

longitudes por la longitud correspondiente al borde de la losa interior o exterior según sea el caso.

Hay que prestar especial cuidado a los extremos longitudinales de cada trabe ya que en esta posición la carga presentará un valor de un medio respecto a las cargas intermedias promedio aplicadas de forma nodal. También resulta conveniente mencionar que en trabes con un determinado grado de esviaje, las cargas también presentan un comportamiento especial. En el apéndice C se presenta el algoritmo de cargas y muestra información numérica con la cual fue posible determinar el peso del concreto en estado fresco para cada trabe.

Los esfuerzos y deflexiones obtenidos en la etapa B deben considerar al conjunto de trabes debidamente sujetas por medio de los diafragmas y únicamente el peso del concreto en estado fresco, ya que durante esta etapa el concreto con las características mencionadas anteriormente no modifican las propiedades de la sección transversal, estos elementos seguirán considerándose como secciones simples.

- *Etapa C. Superficie de rodamiento*

Fase de modelaje

La tercera etapa de análisis consiste en modelar la superficie de rodamiento contemplando que el concreto se encuentra totalmente solidificado, por lo tanto todo el sistema de losa deberá modelarse por medio de elementos tipo placa con un espesor constante, donde esta dimensión estará en función del espaciamiento entre trabes, así como del volado máximo que pudiera presentar el proyecto geométrico.

Es necesario que la generación de estos elementos tipo placa presenten la misma orientación de sus ejes y de ser posible será recomendable modelar figuras compuestas por rectángulos o cuadrados. Por otra parte se requiere como requisito asegurar que las aristas de todas las placas coincidan con un nodo, de lo contrario el modelo matemático presentará un determinado grado de error que difícilmente podrá ser evaluado. La división de las placas y el grado de precisión que requiera cada una de ellas será determinada por el diseñador.

Los bordes de losa creados en la etapa anterior por medio de elementos tipo barra deberán ser eliminados una vez definida en su totalidad la superficie de rodamiento y al igual que en las etapas anteriores será necesario revisar la posición de al menos un par de puntos pertenecientes a cada extremo de estos bordes, ahora conformados por elementos tipo placa con el fin de verificar los porcentajes de sobre elevación del proyecto. Este tipo de revisiones podrá realizarse sin ninguna dificultad con el uso de la tabla 7.2 o el sistema angular y coordenado de referencia.

A continuación se presenta en la figura 34 la propuesta de colocación de placas para modelar la losa de concreto con la ayuda de los bordes laterales.

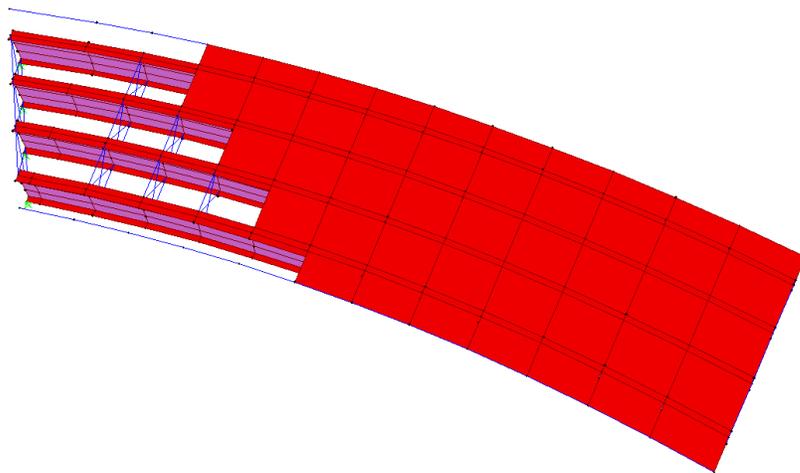


Figura 34. Generación de la superficie de rodamiento

La etapa C considera únicamente dos cargas de análisis, la primera de ellas corresponde al peso del asfalto que deberá aplicarse de forma distribuida sobre las placas, y por último la carga de guarniciones y parapetos que requiere sea calculada por metro lineal. La obtención de ésta última carga es un tanto similar al caso del concreto en estado fresco; sin embargo, el resultado de estos valores los cuales serán aplicados en ambos extremos de la superficie de rodamiento presentarán ligeras diferencias, registrándose las mayores magnitudes a lo largo del borde de losa más alejado respecto al eje principal del proyecto. En algunas ocasiones dependiendo del número de carriles propuestos, será necesario considerar el peso de la barrera central que tiene como función dividir la dirección del flujo vehicular.

Los esfuerzos y deflexiones obtenidos en la etapa C por la aplicación de las cargas del asfalto, guarniciones y parapetos serán considerados como el conjunto de acciones mecánicas que registren los menores valores en magnitud respecto a los obtenidos en el resto de las etapas contempladas durante el desarrollo de la metodología propuesta como análisis. Este comportamiento surge por la serie de cambios que experimenta el concreto durante la transición del estado semifluido al sólido. Algunas otras causas de gran importancia son mencionadas a continuación.

- a) La losa de concreto en esta etapa se considera como un diafragma rígido superior que mantiene al conjunto de travesaños restringidos ante cualquier deslizamiento por medio de conectores a cortante localizados en los patines superiores de todas las travesaños de acero.
- b) La magnitud de estas dos cargas generalmente presentarán un valor relativamente pequeño con respecto al resto de las cargas consideradas durante todo el proceso que requiere el análisis de esta clase de puentes.
- c) Dicho diafragma rígido distribuye el sistema de cargas uniformemente.

Adicionalmente es importante mencionar que el registro de valores obtenidos por medio del modelo matemático durante esta etapa corresponderá únicamente a los patines inferiores o de tensión, puesto que a diferencia de los patines superiores o de compresión, éstos estarán localizados dentro de la placa correspondiente a la losa de concreto, evitando algún tipo de inestabilidad por el efecto del pandeo local. Es en esta etapa donde se realiza la sumatoria final del total de las deflexiones, las cuales se relacionan directamente con las contraflechas por carga muerta que presentará cada una de las traveses según los resultados obtenidos durante las distintas etapas del análisis.

La condición real que experimenta el concreto durante este proceso modificará totalmente las propiedades de la sección transversal del conjunto de traveses, por lo que a partir de esta etapa, la conformación de este nuevo sistema será considerado como sección compuesta.

- *Etapa D. Superestructura*

Fase de modelaje.

Esta etapa es considerada como el final de la propuesta metodológica respecto a los procesos de modelaje, análisis y diseño que requiere la Superestructura de los puentes vehiculares curvos. La característica principal de la etapa D consiste en que todos modelos matemáticos realizados hasta este punto, deberán estar completamente finalizados y libres de errores. Debemos recordar que la precisión del sistema angular y coordinado de referencia, así como el de los algoritmos B y C anteriormente

mencionados, fueron redondeados a 1/10,000 en los distintos parámetros utilizados como longitudes o dimensiones angulares.

La figura 35 corresponde al caso de estudio propuesto y pretende dar una idea de cómo deberá lucir un modelo matemático perteneciente a la etapa D. Resulta fácil notar que la Superestructura del puente se encuentra completamente finalizada incluyendo el sistema de apoyos para cada claro.

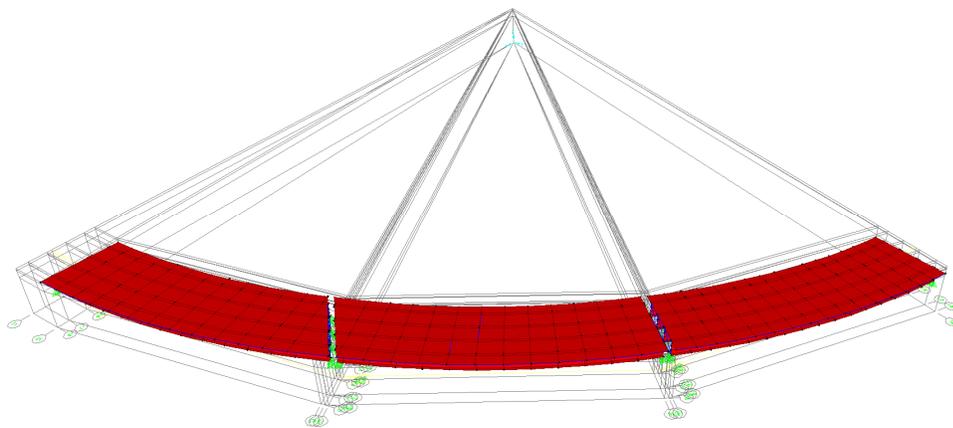


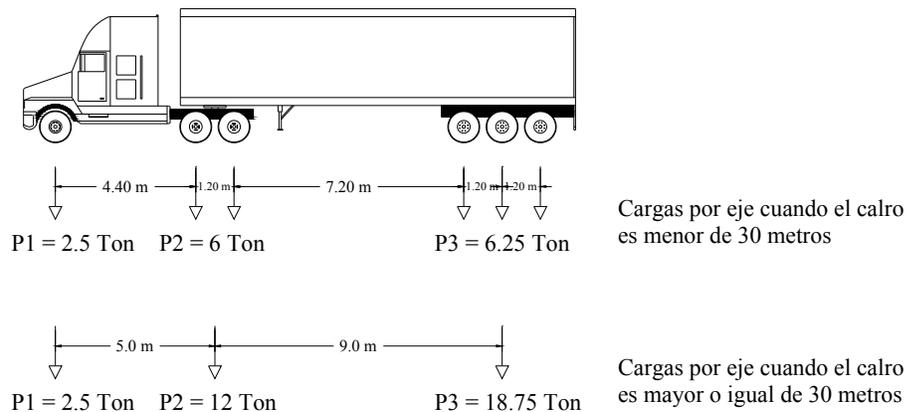
Figura 35. Modelo matemático correspondiente a la Superestructura del puente propuesto como caso de estudio

El tipo de cargas que intervienen durante la etapa D corresponderán únicamente a las cargas vivas, las cuales serán desglosadas de acuerdo al camión de diseño contemplado en el proyecto así como su correspondiente carga por impacto. La Secretaria de Comunicaciones y Transportes en México establece que la carga del camión de diseño a utilizar durante los procesos de modelaje estará en función del tipo de vialidad a proyectar, siendo utilizado el camión IMT 66.5 para carreteras o vialidades de gran flujo vehicular y el camión IMT 20.5 cuando estos flujos vehiculares presenten una menor escala. Sin embargo, en cualquiera de los dos casos anteriores, todas las cargas serán representadas por un modelo virtual el cual tiene

la función de desarrollar cualquier aspecto relacionado con el análisis estructural únicamente, pero en ningún caso representará a un vehículo real.

El modelo de cargas vivas vehiculares correspondiente al camión IMT 66.5 estará representado por 3 ejes de cargas concentradas cuando los claros de los puentes presenten una longitud mayor o igual de 30 metros. Cuando el claro presente una longitud menor de 30 metros, las cargas deberán ser descompuestas en 6 ejes de cargas concentradas.

La figura 36 muestra la magnitud de cargas y el espaciamiento entre ejes del camión IMT 66.5 para los dos casos mencionados anteriormente.



CARGAS POR EJE PARA EL CAMIÓN IMT 66.5

Figura 36. Desglose de cargas por eje del camión IMT 66.5

La carga por impacto corresponderá de un 25 a un 30 por ciento de la carga viva según el número de ejes que sean considerados en el análisis. Este mismo porcentaje será aplicado de manera uniformemente distribuido en un ancho de 3.0 metros cuando el ó los claros del proyecto presenten una longitud mayor o igual a 30 metros, la magnitud de la carga se encontrará directamente relacionada con la longitud y su obtención será por medio de una ecuación matemática.

Otro aspecto a considerar dentro de las cargas vivas es el número de carriles del proyecto, ya que dependiendo de la cantidad de estos, se podrán aplicar algunos factores de reducción en las combinaciones finales de carga para contemplar la baja probabilidad de que el momento máximo sea provocado por el modelo virtual de cargas en varios carriles de forma simultánea; sin embargo, estos factores solo aplican para el diseño de algunos elementos del puente, generalmente la Subestructura.

La posición de las cargas vivas deberá corresponder aquella que registre las mayores acciones mecánicas, la metodología para su obtención quedará a cargo del diseñador; sin embargo, el método de las líneas de influencia o un análisis de cargas móviles por medio de un programa computacional con el cual sea posible obtener la envolvente de mayor magnitud, pudieran considerarse como dos buenas alternativas. Hay que tener presente que la posición crítica del camión para el diseño del conjunto de traveses, no precisamente corresponderá aquella con la cual se desarrolla el diseño del puente en su totalidad. Por ejemplo, durante el análisis y diseño de las columnas en un puente vehicular curvo, es recomendable tomar en cuenta algunas consideraciones de gran importancia que se presentan durante la primer etapa de la metodología propuesta, dichas consideraciones, así como algunas recomendaciones adicionales acerca del tema, son abordadas en la sección de conclusiones. Es importante mencionar que la obtención de los esfuerzos de tensión en las traveses durante esta etapa, considera el uso de las cargas vivas más impacto sin factorizar, debido a que el diseño de estos elementos se desarrolla bajo la teoría de esfuerzos admisibles de trabajo.

Las deflexiones obtenidas en la etapa D por concepto de la aplicación del mismo sistema de cargas con el cual fue posible obtener los distintos esfuerzos anteriormente mencionados, deberán compararse con los límites establecidos de serviciabilidad estipulados por el reglamento del cual se haga uso, verificando en todo momento que

ninguna trabe presente un valor mayor al establecido. Es también durante esta etapa donde se realizará la sumatoria final de los esfuerzos parcialmente obtenidos en etapas anteriores, para luego comparar el registro de estos valores con los esfuerzos permisibles a flexión de acuerdo a los reglamentos de diseño, el resultado de aceptación o rechazo de las traves estará en función de la resistencia del acero estructural utilizado.

La figura 37 muestra un modelo matemático completamente finalizado ante la aplicación de cargas vivas correspondientes al camión IMT 66.5.

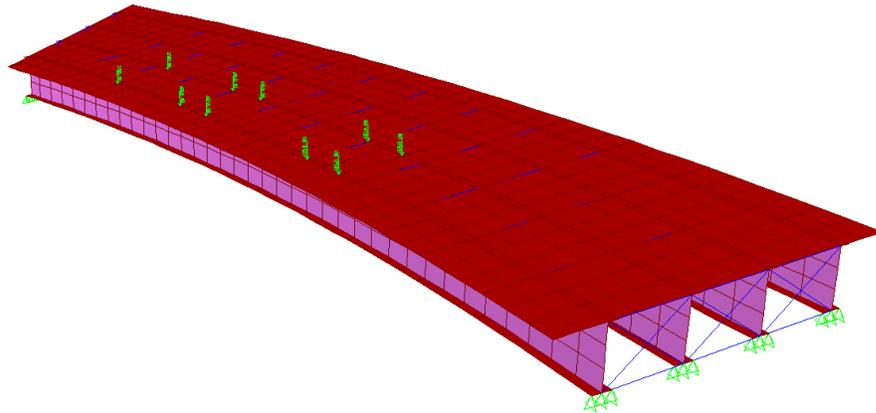


Figura 37. Modelo matemático ante la acción de cargas vivas

Finalmente resulta de gran utilidad contar con la programación de algún algoritmo para el diseño de las traves que contemple la transformación de una sección simple a una sección compuesta a partir de la etapa C, de acuerdo a la metodología de análisis propuesta. Es recomendable que la elaboración de estos algoritmos se realice preferentemente en hojas de cálculo como Excel o por medio de programas como Mathcad, con la finalidad de poder realizar una nueva revisión así como una comparación adicional de los esfuerzos y deflexiones obtenidos a través de los modelos matemáticos realizados en etapas anteriores.

- *Etapa E. Modelo global*

Fase de modelaje

Esta última etapa contempla la modelación de cualquier puente vehicular curvo en su totalidad, por lo que solo será necesario añadir algunos elementos estructurales como cabezales, columnas y en ciertos casos la cimentación que estará conformada por una losa de cimentación con o sin la presencia de pilotes de transferencia. Al igual que en etapas anteriores la orientación de los elementos es un aspecto de gran importancia durante los procesos de modelaje, por lo tanto, cada elemento que forme parte de un determinado grupo o categoría deberá presentar esta importante consideración.

Respecto a los cabezales, éstos deberán presentar el mismo porcentaje de sobre elevación transversal con respecto al sistema de traveses y las longitudes finales de las columnas deberán presentar alturas de acuerdo a los niveles descritos por del trazo vertical del proyecto.

La figura 38 muestra el modelo matemático de un puente vehicular curvo completamente finalizado.

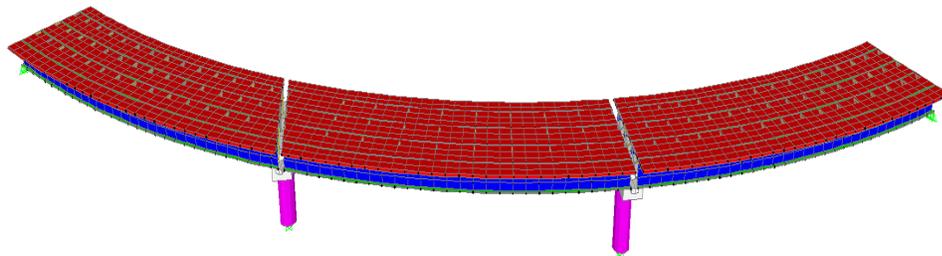


Figura 38. Modelo matemático final de un puente vehicular curvo

Las cargas a considerar en la etapa E corresponderán a las siguientes:

- a) Permanentes. - Peso propio de la estructura.
- b) Variables. - Carga viva
- Carga por impacto.
- Fuerza centrífuga.
- c) Eventuales. - Carga por viento.
- Carga por sismo.
- Carga por frenaje.
- Variación de temperatura.

Para el diseño de los elementos de concreto reforzado deberán realizarse todas las combinaciones de carga que pudieran llegar a presentarse durante el periodo de la vida útil de la estructura, afectadas por un factor de carga según las especificaciones del reglamento del cual se haga uso. Para el diseño de la cimentación será necesario realizar un sistema de combinaciones de carga sin factorizar donde intervenga únicamente las cargas vivas y permanentes.

Un aspecto de gran importancia a considerar durante esta etapa son los efectos que provocan los cambios de temperatura sobre la estructura tanto en condiciones reales como en los procesos de análisis y diseño.

Es sabido que materiales como el concreto y el acero sufren contracciones o expansiones ante este fenómeno natural; sin embargo, estas deformaciones experimentarán mayores incrementos en ciudades donde el clima presente condiciones extremas. Si adicionalmente consideramos que el coeficiente de dilatación térmica en el acero es mayor en comparación con el del concreto aproximadamente en un 30 %, deberá evitarse en todo momento que las trabes presenten alguna restricción ante el deslizamiento, como pudiera suceder cuando cualquiera de los claros de un puente vehicular curvo fueran anclados totalmente en ambos extremos.

Se sugiere tomar en cuenta la anterior recomendación durante los procesos constructivos relacionados con el montaje y colocación del sistema de traveses, ya que de lo contrario las deformaciones experimentadas por los materiales y en particular por los efectos de expansión generarán fuerzas radiales que actuarán directamente sobre los cabezales incrementando considerablemente la cantidad del acero de refuerzo principal a flexión de las columnas en cantidades que podrán superar en algunas ocasiones el 3% de la cantidad mínima del reforzamiento especificado para esta clase de elementos estructurales.

La figura 39 muestra las deformaciones que sufre un puente vehicular curvo al considerar los efectos que provocan los cambios por temperatura.

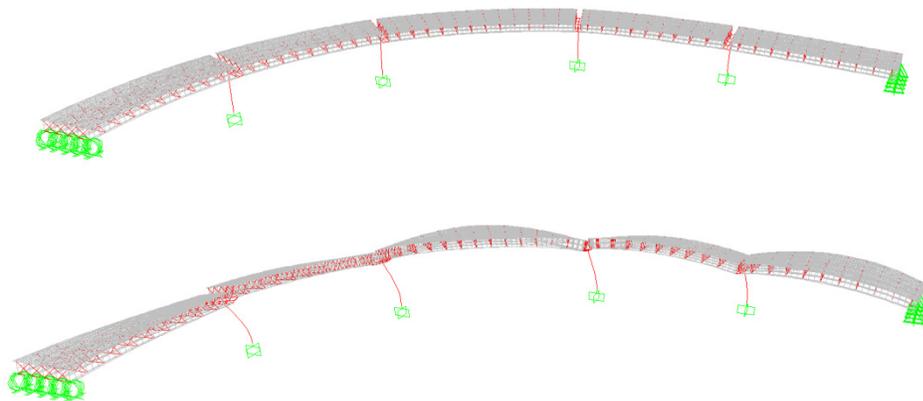


Figura 39. Efectos de la variación de temperatura en un modelo matemático

La cantidad de acero adicional en las columnas debido a esta condición, podrá ser determinado a partir de una comparativa entre los resultados de dos distintas etapas propuestas de análisis. La primera de ellas deberá descartar cualquier deformación de los materiales por efecto de la variación térmica; esto significa, la ausencia de esta carga eventual dentro de las combinaciones finales de diseño. La segunda etapa de análisis por el contrario requiere que tales efectos sean contemplados

durante los procesos de evaluación de la estructura. De esta forma será posible desarrollar satisfactoriamente una comparativa entre ambos resultados.

Hay que tener presente que existen algunos otros factores externos relacionados directamente con la geometría y estructuración del proyecto que determinan el aumento en la cantidad del acero de refuerzo de las columnas. Por ejemplo el valor de referencia mencionado anteriormente del 3% corresponde al análisis de un puente vehicular curvo que aparece en la figura 40, el cual presenta las siguientes características:

- Número de carriles: 2.
- Radio de curvatura: 75 metros.
- Numero de traveses: 5 traveses con una separación de 1.60 metros.
- Cabezales: elementos de 1.80 metros de peralte.
- Columnas: elementos de 1.50 metros de diámetro.
- Numero de claros: Un claro central de 40 metros y dos claros de 30 metros en ambos extremos.

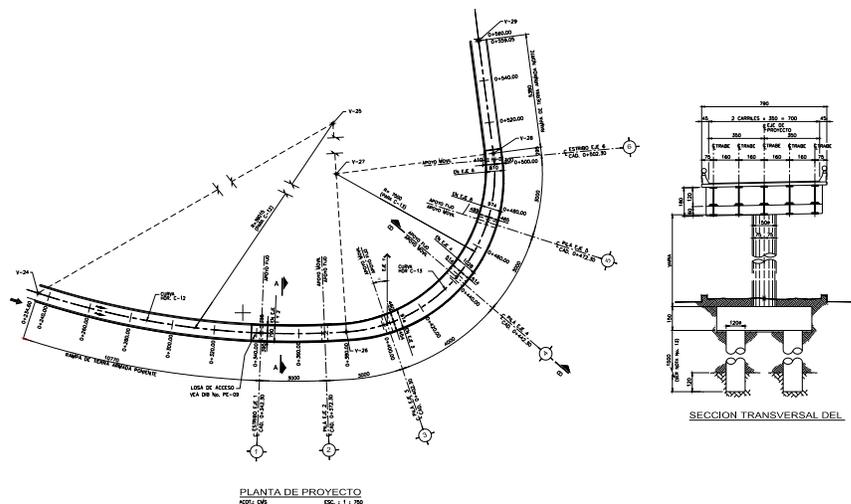


Figura 40. Estructuración y geometría del puente vehicular curvo utilizado para análisis de referencia

Respecto a los apoyos es necesario que alguno de los extremos del conjunto de traveses permanezca fijo por medio de un sistema de anclaje, mientras que el otro únicamente deberá permanecer sobre una placa de neopreno o en su defecto sobre un apoyo que permita desplazamientos como el que aparece en la figura 41.



Figura 41. Sistema de apoyos de neopreno que permiten un desplazamiento

Si por alguna razón el puente permaneciera anclado en ambos extremos, que en ningún momento es recomendable, los agujeros deberán presentar una geometría oblonga en la dirección de los mayores desplazamientos que pudiera llegar a presentar la estructura ante los efectos provocados por los cambios de temperatura.

CAPITULO V

APLICACION DE LA PROPUESTA METODOLOGICA A UN CASO DE ESTUDIO

El haber considerado el caso de estudio denominado Puente Radial III en este trabajo de tesis permitió ejemplificar el uso y aplicación de la propuesta metodología para el análisis de puentes vehiculares curvos formados por traveses de acero y losa de concreto. En los capítulos anteriores se hace referencia precisamente a este proyecto por medio de una serie de figuras así como por un conjunto de apéndices que contienen información analítica con la cual fue posible desarrollar las distintas etapas involucradas en el proceso de análisis y modelaje de esta estructura.

Este caso de estudio surge a partir de la solicitud de un dictamen de revisión por parte de la Secretaría de Obras Públicas del estado de Tamaulipas al Instituto de Ingeniería Civil respecto a un puente que presentaba problemas en la Superestructura relacionados con la pérdida de los niveles de sobre elevación.

El Puente Radial III se encuentra ubicado al poniente de la Ciudad de Nuevo Laredo Tamaulipas sobre el Boulevard Aeropuerto en su intersección con el Segundo

Anillo Periférico, su longitud total en planta es de 368.22 metros incluyendo sus rampas de acceso. En la figura 42 se puede apreciar una toma panorámica de este puente vehicular.



Figura 42. Puente Radial III. Nuevo Laredo Tamaulipas

- *Descripción de la Superestructura.*

La Superestructura del Puente Radial III presenta dos carriles de circulación con el mismo flujo vehicular a lo largo de tres claros con una longitud de 30 metros aproximadamente. Los elementos estructurales que conforman la Superestructura del puente consisten en una losa de concreto reforzado con un espesor constante de 20 cm, la cual se encuentra ubicada sobre un conjunto de cuatro traveses de acero formados por tres placas con una separación a centros de 2.10 metros, los volados de la losa ubicados a cada extremo presentan una longitud de 1.30 metros a partir del eje central de la trabe de borde. Finalmente todo el arreglo de traveses se encuentra unido transversalmente por un sistema de diafragmas formados por ángulos iguales que presentan una configuración en “X”. La figura 43 muestra parte de la Superestructura del puente.



Figura 43. Superestructura del Puente Radial III

- *Descripción de la Subestructura.*

La Subestructura del Puente Radial III se encuentra conformada en su totalidad por un sistema de elementos estructurales de concreto reforzado. La figura 44 muestra solo algunos de estos elementos.



Figura 44. Subestructura del Puente Radial III

Los cabezales de la estructura presentan una sección geoméricamente variable, las columnas de sección transversal circular con un diámetro de 1.50 metros, emergen de una cimentación rectangular conformada por un zapata de transferencia con un espesor de 1.20 metros y 6 pilotes con un diámetro de 1.20 metros desplantados a una profundidad de 8 metros con respecto al nivel del terreno natural. Los extremos del puente corresponden a dos estribos conformados por un cabezal rectangular que descansa sobre 3 pilotes con una longitud de 10 metros y una sección transversal circular de 1.20 metros de diámetro. En el apéndice D se presenta el plano general del proyecto en planta y la configuración geométrica de la Superestructura del puente.

Este trabajo de tesis inicialmente contemplaba el desarrollo de una serie de actividades completamente teóricas acerca de la propuesta metodológica para el análisis de puentes vehiculares curvos. El considerar alguna prueba de carga con la cual fuera posible realizar una comparativa entre los resultados teóricos obtenidos por métodos analíticos y los estudios experimentales resultaba algo simplemente fuera de alcance, debido a que no se contaba con el patrocinio de alguna institución o dependencia para poder desarrollar tanto la logística como el financiamiento de las actividades relacionadas con las pruebas experimentales de campo.

En la práctica, la realización de esta comparativa de forma rutinaria es prácticamente imposible debido a los altos costos que implica desarrollar este tipo de pruebas. Adicionalmente, también será necesaria una perfecta coordinación con las autoridades locales para el cierre parcial o total de la vialidad donde se pretende desarrollar la prueba, ya que en la mayoría de las ocasiones los conductores exigen que el tránsito vehicular de dicha zona sea constante y fluido.

La serie de circunstancias mencionadas anteriormente hacían suponer que solo existía una remota posibilidad de poder realizar una prueba experimental de campo con la cual fuera posible obtener algunos otros parámetros de gran importancia

además de la comparativa de resultados; sin embargo, la oportuna solicitud de evaluación del Puente Radial III permitió brindar un amplio abanico de información adicional respecto al comportamiento de estos complejos sistemas estructurales, de tal forma que lo que inicialmente se había considerado como un proyecto de tesis teórico convencional finalmente se convertía en un estudio analítico-experimental debidamente fundamentado.

5.1 PROBLEMATICA DE LA ESTRUCTURA

La evaluación del Puente Radial III comprendió dos distintas etapas con las cuales fue posible determinar la gravedad y magnitud de los daños en la estructura, así como las posibles causas que las generaron. La primera etapa comprendió un recorrido de inspección visual durante el cual se realizó paralelamente un registro fotográfico de las condiciones en que se encontraba la estructura en ese momento. Posteriormente la segunda etapa contempló la evaluación total de la información analítica proporcionada.

La serie de fallas detectadas durante la evaluación de la estructura ofrecieron la oportunidad de poder hacer uso de la metodología propuesta en este trabajo de tesis, así como de proporcionar una mayor sensibilidad y un mejor entendimiento de los distintos valores obtenidos a través de las diferentes etapas que contempla el análisis de esta clase de puentes vehiculares curvos.

A continuación se describe cada una de las etapas de evaluación:

a) Etapa I. Recorrido inicial de obra.

Durante el primer recorrido fue posible realizar una evaluación visual de las condiciones en que se encontraban la mayoría de los elementos estructurales que conformaban la estructura a ser analizada. Fue durante esta primera visita donde se detectó de forma casi inmediata que la mayoría de las traveses presentaban grandes deflexiones aproximadamente al centro del claro. La propuesta de solución inicial contempló la colocación de una capa adicional de concreto en todos los claros que presentaban esta condición con el fin de recuperar los niveles originales del trazo vertical del proyecto como se puede apreciar en la figura 45.

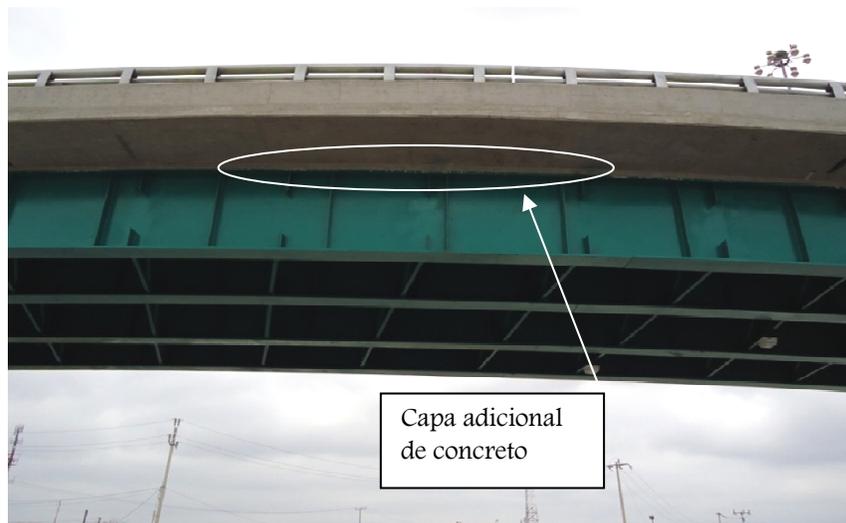


Figura 45. Concreto adicional para recuperar la sobre elevación original del proyecto

Otro aspecto que llamó la atención fue el haber detectado distintos bloques de poliestireno en la parte inferior de la losa correspondiente al primer claro del extremo sur, como parte de una propuesta de solución ante la problemática relacionada con los desplazamientos verticales del conjunto de traveses, aunado a la pérdida de sobre

elevación que adquiriría la Superestructura. Si adicionalmente consideramos el hecho de que sería necesaria una capa adicional de concreto para corregir estos defectos, seguramente el supervisor de obra opto por utilizar esta clase de aligerante para reducir la carga adicional por efecto del sobre colado.

La figura 46 muestra una imagen donde puede apreciarse la condición anteriormente mencionada.



Figura 46. Aligerantes en losa de concreto

b) Etapa II. Revisión de información.

Las rampas de acceso también fueron otros elementos en los cuales desde el primer recorrido de inspección visual se pudo apreciar que los niveles finales de transición se encontraban en condiciones no satisfactorias. Lo anterior pudo confirmarse una vez que se analizó el registro de información referente a un levantamiento topográfico solicitado a lo largo de la estructura en el que se especificaba como requisito que los cadenamientos deberían realizarse a cada tres metros.

La figura 47 muestra las condiciones que presentaban las rampas de acceso al momento del recorrido.



Figura 47. Rampas de acceso

Durante la revisión de toda la información analítica proporcionada se realizó una investigación de forma simultánea, esta investigación consistió en una búsqueda por internet acerca de los comentarios o información emitida por los periódicos locales durante las fechas de los procesos constructivos del Puente Radial III, con lo cual se pudo constatar por medios fotográficos así como por las distintas publicaciones encontradas, que efectivamente se había realizado un proceso de montaje erróneo.

El apéndice E muestra el documento emitido por un periódico local encontrado en la red; sin embargo, un pequeño fragmento de esta información se presenta a continuación:

“La misma constructora nos informó que una viga de la estructura cuando se colocó estaba torcida, la enderezaron y reforzaron pero hay malos antecedentes de puentes curvos como en Torreón y Veracruz en donde uno tuvo que ser demolido y el otro se cayó sólo porque requieren de una infraestructura especial”

Como se puede apreciar en imagen de la figura 48, las traveses del puente se encuentran apuntaladas debido a que fueron montadas seguramente de forma individual y no por pares o triadas como lo especifica el reglamento AASHTO para esta clase de puentes.



Figura 48. Montaje de traveses durante la construcción del Puente Radial III

También fue posible determinar en base a esta investigación que la Superestructura del proyecto original presentaba una ausencia en la cantidad de diafragmas así como una configuración transversal deficiente, debido a que este sistema de sujeción no presentaba elementos horizontales a nivel de ambos patines del conjunto de traveses. Ante tales condiciones las traveses podrían girar con cierta facilidad y presentar alguna distorsión debido a que el sistema transversal de diafragmas no presentaba una rigidez adecuada. Por la ausencia de una restricción que pudiera proporcionar un funcionamiento eficaz de estabilidad al sistema de traveses, adicionalmente podría ser factible la presencia de desplazamientos tanto verticales como horizontales en estos elementos. La explicación anterior puede ser demostrada con la ayuda de la imagen mostrada en la figura 49.



Figura 49. Sistema de diafragmas correspondientes al Puente Radial III

Ante la problemática gradual que experimentaba la estructura durante la etapa de montaje, por parte de los diseñadores se decidió añadir algunos otros diafragmas al sistema de traves colocados de forma intermedia respecto a los existentes, con la diferencia de que estos últimos si presentaban elementos horizontales que se habían omitido inicialmente y complementando aquellos que lo requerían.

5.2 PRUEBA EXPERIMENTAL Y SU ETAPA DE ANALISIS

De acuerdo a la propuesta metodología planteada, la etapa de análisis a la cual corresponde la instrumentación del puente para la obtención de los esfuerzos y deflexiones provocados únicamente por la carga viva corresponde a la etapa D. Para

esta prueba fue necesario el uso de dos vehículos cargados con material de banco, los cuales posteriormente fueron trasladados a una báscula para el registro de su peso. El primero vehículo designado como C1 se muestra en la figura 50 y correspondió a un camión de 5 ejes el cual registró un peso de 55.615 toneladas.



Figura 50. Camión de prueba C1

El segundo vehículo designado como C2 fue un camión de 6 ejes, el cual registró un peso en la báscula de 62.995 toneladas, valor muy cercano al camión de diseño IMT 66.5 especificado por la SCT. La figura 51 muestra este vehículo.



Figura 51. Camión de prueba C2

Ambos vehículos fueron colocados para la prueba a una distancia de 10 metros a partir del inicio del primer y segundo claro del puente si tomamos como referencia la rampa de acceso sur como lo muestra la figura 52, lo anterior con el propósito de llevar un control respecto a la posición de cada una de las cargas durante los procesos del modelaje.

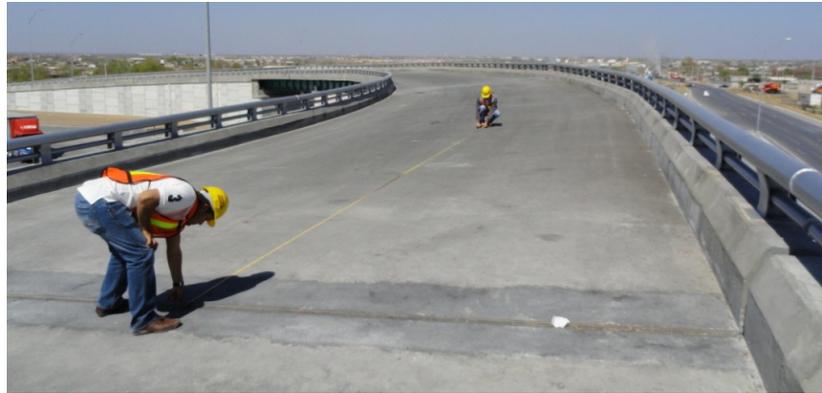


Figura 52. Determinación de la línea de ubicación de cargas

El primer claro del Puente Radial III fue instrumentado con un extensómetro en cada trabe exterior aproximadamente en la posición del diafragma número 7 y la colocación de un dispositivo de medición de esfuerzos strain gauge muy cercano al centro del claro de la viga más alejada respecto al eje principal del proyecto en planta. La figura 53 muestra la colocación del strain gauge.



Figura 53. Proceso de instalación del dispositivo strain gauge

El claro central únicamente fue instrumentado con extensómetros, los cuales fueron colocados tratando de respetar la misma ubicación longitudinal que se había realizado en el primer claro. La figura 54 muestra la colocación de los instrumentos de medición para el registro de deflexiones.



Figura 54. Colocación e instalación de extensómetros

A nivel de piso se preparaba el equipo de cómputo donde quedaría registrada la información referente a la prueba, la figura 55 muestra dicho proceso. El software utilizado para la medición de los esfuerzos en las traveses corresponde al Modelo P3 con el uso del puente de Wheatstone como equipo de medición de resistencias.



Figura 55. Equipo de cómputo para registro de información

Una vez colocados los equipos de medición, se verificó su correcto funcionamiento para posteriormente proceder con la prueba de carga, para esto los dos vehículos ya se encontraban en la parte baja de la rampa de acceso sur esperando únicamente indicaciones para su traslado hacia los puntos de referencia que se habían señalado en la carpeta asfáltica. La evaluación del Puente Radial III comprendió la realización de 2 pruebas experimentales de campo durante las cuales se pudieron obtener los esfuerzos y deflexiones que presentaba el sistema de travesas con la finalidad de determinar entre algunos otros objetivos, si las deflexiones por carga viva se encontraban dentro de los parámetros permisibles de acuerdo al reglamento de diseño del cual se hacía uso. La primera prueba fue realizada en el claro comprendido entre los ejes de 1 y 2 de acuerdo al trazo geométrico del proyecto. La información respecto al desarrollo de las pruebas físicas en campo, así como la secuencia y ubicación de los vehículos de carga se presenta a continuación.

1. Primeramente se ubicó el camión C2 en el carril derecho tomando como referencia el sentido del flujo vehicular para posteriormente registrar las acciones mecánicas que generaba esta unidad en el sistema de travesas. La ubicación del camión C2 aparece en la figura 56.



Figura 56. Ubicación del camión de prueba C2

2. Permaneciendo aún en la misma posición el camión C2, en seguida se incorporo el camión C1 verificando que el eje posterior de cada uno de los vehículos se encontrara sobre la referencia previamente establecida de 10 metros a partir del extremo del claro. Una vez colocadas ambas unidades en posición, se procedió nuevamente con el registro de información. La figura 57 muestra la ubicación del camión C2.



Figura 57. Ubicación del camión de prueba C1

3. La siguiente etapa de la prueba contemplo el desalojo del camión C1 permaneciendo en la misma posición el camión C2 para luego realizar la toma de resultados.
4. Finalmente el camión C2 fue retirado y el último registro de datos se llevo a cabo.

La misma prueba experimental de campo fue realizada en dos ocasiones en condiciones exactamente similares, con la finalidad de verificar que los resultados obtenidos previamente presentarán una similitud con respecto a los nuevos valores de la segunda prueba y de esta forma evitar algún posible error o confusión con la interpretación de los resultados finales. Adicionalmente sobre el mismo claro se realizo una prueba dinámica; sin embargo, a diferencia de la prueba anterior en donde las

cargas permanecían estáticas, en esta ocasión se hizo circular primeramente el camión C2 por el carril derecho a una velocidad aproximada de 40 km/h y posteriormente se hizo circular el camión C1 por el carril izquierdo a la misma velocidad. El registro de resultados para esta prueba se realizó de manera independiente y a partir del primer instante en que cada uno de los vehículos circulaba por el claro de estudio.

Respecto a la segunda prueba de carga podemos mencionar que el procedimiento fue exactamente similar al efectuado en el primer claro del puente, sin embargo, la diferencia consistió en que los trabajos se desarrollaron para el claro central de la estructura. En el apéndice F se muestra la serie de resultados obtenidos durante el desarrollo de la prueba experimental de campo.

A pesar que las pruebas experimentales desarrolladas en la estructura correspondieron únicamente a la penúltima etapa de análisis según la propuesta metodológica planteada en este trabajo de tesis, se decidió por realizar un análisis completo de la Superestructura. En el apéndice G se muestran los resultados del proceso de modelaje de la estructura para cada una de las 4 diferentes etapas que contempló el análisis de cada claro del proyecto.

5.3 COMPARACION DE RESULTADOS

Las siguientes tablas muestran un resumen de la información obtenida durante las pruebas experimentales de campo así como aquella determinada por medios

analíticos a traves de los modelos matemáticos respecto a los esfuerzos y deflexiones de mayor magnitud. Es conveniente mencionar que la condición de carga más desfavorable resulto cando ambos vehículos fueron colocados de manera simultánea sobre la Superestructura del puente vehicular.

La tabulación de estos resultados permitió realizar una comparativa entre los valores finales registrados por cada uno de los procedimientos, así como su correspondiente diferencia numérica.

- Tabla I. Resultados respecto al primer claro de análisis.

TABLA I
COMPARACION DE RESULTADOS.
PRIMER CLARO DE ANALISIS

	Deflexión de prueba (cm)	Deflexión de modelo (cm)	Diferencia (cm)	Esfuerzo de prueba (kg/cm ²)	Esfuerzo de modelo (kg/cm ²)	Diferencia (kg/cm ²)
Trabe interna	0.703	0.702	0.001	-	-	-
Trabe externa	2.07	1.09	0.98	165	159	6

Como es posible apreciar la deflexión real que presenta la trabe interna de la Superestructura del puente prácticamente coincide con la que predice el modelo matemático; sin embargo, para la trabe externa las condiciones son diferentes, ya que la deflexión determinada por medio del modelo matemático resulto un 47% inferior a la obtenida durante la prueba experimental de campo. Para el caso de los esfuerzos, los valores emitidos por medio de la modelación de la estructura resultaron ligeramente inferiores en un 4% respecto a los registrados con el puente Wheatstone.

- Tabla II. Resultados respecto al segundo claro de análisis.

TABLA II
COMPARACION DE RESULTADOS.
SEGUNDO CLARO DE ANALISIS

	Deflexión de prueba (cm)	Deflexión de modelo (cm)	Diferencia (cm)
Trabe interna	0.731	0.861	0.130
Trabe externa	1.681	0.905	0.776

De acuerdo al modelo matemático, la deflexión experimentada por la trabe interna resulto conservadora en un 18% respecto al registro obtenido durante la prueba de campo. Curiosamente para el caso de la trabe externa el resultado presento un comportamiento inverso, ya que la deflexión real de la estructura resulto mayor en un 46% respecto a los parámetros estimados por el modelo matemático.

Si bien, los resultados presentan en ocasiones diferencias hasta de un 47% al momento de realizar su comparación, estos valores no sobrepasan los 10 mm en cualquiera de las deflexiones experimentadas por la estructura. Para el caso de los esfuerzos la diferencia entre estos valores resulto de un 4%, por lo tanto, de continuar este comportamiento seguramente los resultados finales de algunas otras pruebas experimentales oscilaran en un rango de $\pm 20 \text{ kg/cm}^2$.

En el apéndice H se muestran algunas figuras de los modelos matemáticos correspondientes a la etapa de análisis D, con los cuales fue posible la obtención de la información que aparece en las tablas I y II de la comparación de resultados.

Cómo fue posible apreciar anteriormente, existen algunos registros en donde los resultados de las pruebas experimentales de campo prácticamente coincidieron con los valores obtenidos por medio de la modelación matemática; sin embargo, en algunas

otras ocasiones estos valores presentaron ciertas diferencias, las cuales probablemente estén relacionadas con alguno de los siguientes factores.

- a) Calibración del modelo matemático. Aunque se cuenta con una herramienta poderosa en los procesos del análisis y diseño estructural será conveniente calibrar el software para poder determinar con seguridad que los resultados obtenidos a través del modelo matemático correspondan verdaderamente aquellos valores que experimentará la estructura en condiciones reales.
- b) Posición exacta de los strain gauges y extensómetros. Debido a que estos dispositivos de medición son extremadamente sensibles al registro de información, su colocación deberá realizarse bajo un estricto control para lograr la obtención de valores muy cercanos a los proporcionados por el análisis. También es necesario mencionar que la determinación de estos valores por medio del modelo matemático deberá coincidir con la ubicación física de cada dispositivo empleado en la Superestructura del puente vehicular. La figura 58 muestra la ubicación y colocación de estos dispositivos de medición.



Figura 58. Colocación de dispositivos de medición

- c) Espaciamiento entre diafragmas. La ausencia de diafragmas transversales que inicialmente presentaba la Superestructura del puente así como las afectaciones sufridas por estas circunstancias, fueron las causas principales por las cuales se considero una cantidad adicional de estos elementos estructurales durante los procesos de montaje. Desafortunadamente este procedimiento se realizo sin un registro que pudiera brindar alguna información respecto a la ubicación de cada diafragma transversal incluido, por lo que ante esta situación se decidió por realizar los modelos matemáticos considerando la separación entre estos elementos de manera uniforme y equidistante a partir del sistema de diafragmas existentes.
- d) Posición y magnitud de cargas. La ubicación de las cargas de los vehículos fue otro aspecto de gran importancia, ya que durante el desarrollo de las pruebas experimentales en todo momento se trato de que cada uno de los ejes de ambos vehículos permanecieran en la misma posición respecto al punto de referencia previamente determinado; sin embargo, durante la ejecución de estos trabajos resulto prácticamente imposible hacer coincidir de manera transversal y longitudinal cada uno de estos ejes, especialmente cuando estas cargas habían sufrido un determinado movimiento y reacomodo sobre la estructura. Adicionalmente deberá considerarse que únicamente se contaba con el valor de carga registrado por la bascula para cada uno de los camiones de prueba y no con el correspondiente a cada uno de los ejes de forma desglosada, por lo que ante esta situación se considero asignar un cierto porcentaje de la carga total a cada ejes tomando como referencia los camiones de diseño T3-S2 y T3-S3.

Finalmente se puede mencionar que la prueba de campo correspondiente a la etapa de análisis E de acuerdo con la metodológica propuesta, contemplo únicamente

la obtención de esfuerzos y deflexiones por concepto de las cargas vehiculares. Los resultados correspondientes a la máxima deflexión que sufrió la estructura, posteriormente fueron comparados con los límites permisibles establecidos por el reglamento AASHTO, encontrándose que la prueba había resultado satisfactoria.

Es importante mencionar que la comparativa de resultados que se muestra en la tabla III corresponde a la máxima deflexión experimentada por la trabe externa del primer claro.

TABLA III
COMPARACION Y AJUSTE DE RESULTADOS PARA TRABE EXTERNA.
PRIMER CLARO DE ANALISIS

Camión de prueba	Deflexión de prueba (cm)	Factor de corrección	Deflexión corregida (cm)	Deflexión carga viva + impacto (cm)	Deflexión permisible 1/800
C2	1.831	$66.5/62.995$ =1.0556	1.831×1.0556 =1.9328	1.25×1.9328 =2.416	2920/800
C1	0.236	$66.5/55.615$ =1.1957	0.236×1.1957 =0.2822	1.25×0.2821 =0.353	
Total	2.067			2.769	3.65

5.4 CONCLUSION ACERCA DE LA COMPARACION DE RESULTADOS

En base al estudio desarrollado respecto al proyecto denominado puente Radial III con el uso de la propuesta metodología que contempla este trabajo de tesis, se puede

comentar que la estructura en general presento un dimensionamiento correcto en todos sus elementos estructurales; sin embargo, no podemos decir que su diseño se realizo correctamente debido principalmente a dos factores:

- a) El diseño de las trabes se realizo sin haber tomado en cuenta la curvatura en planta que describe a este sistema estructural.
- b) La cantidad y configuración de los diafragmas de sujeción resulto deficiente.

Si adicionalmente consideramos que los procesos constructivos relacionados con la etapa de montaje no fueron realizados correctamente, como resultado obtenemos una acumulación de condiciones no satisfactorias que se reflejaron directamente en la perdida de los niveles geométricos de la estructura.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- *Conclusiones.*

De acuerdo a los principales resultados obtenidos de esta investigación, es posible establecer la siguiente serie de conclusiones y recomendaciones.

a) Trabajo de tesis

El objetivo de la propuesta metodología presentada en este trabajo de tesis no únicamente abarca el modelaje y análisis de los puentes vehiculares curvos formados por traveses de acero y losa de concreto, si no que pretende aún ser más ambicioso. Debido a que su procedimiento se desarrolla por etapas, esta metodología posee el potencial de poder realizar revisiones y/o peritajes en estructuras existentes que presenten algún daño estructural, solo será necesario realizar un estudio que contemple la revisión total de la información analítica y una inspección visual de

campo. Con estas dos acciones fácilmente podrá desarrollarse un estudio completamente a detalle logrando determinar las condiciones en las que se encuentra la estructura como el realizado en el Puente Radial III o identificar únicamente la o las etapas en las cuales se hacen presentes dichas patologías. Sin importar cual sea el caso, el objetivo principal de esta metodología consiste en determinar ante qué nivel de riesgo se encuentra la estructura para posteriormente emitir alguna solución o recomendación para contrarrestar tales efectos.

Finalmente se puede comentar que desde un inicio existieron dos aspectos de gran importancia que ayudaron a determinar la elección del proyecto denominado Puente Radial III como parte las actividades a desarrollar dentro de este trabajo de tesis. Primeramente podemos mencionar que el previo conocimiento del tema así como el haber participado anteriormente en el diseño de esta clase de estructuras fueron dos grandes razones que marcaron una gran influencia sobre la decisión final de esta elección; sin embargo, la solicitud oportuna del dictamen de revisión fue el segundo aspecto contundente que dictaminó la aprobación final del proyecto.

b) Generales

Es necesario que el diseñador sea conservador en todo momento al realizar el diseño final de cualquier puente vehicular curvo, de igual manera resulta conveniente que el ejecutor de obra acredite una previa experiencia en relación a los procesos constructivos necesarios para la realización de este tipo de estructuras. Hay que tener en mente que el reglamento AASHTO utiliza un tipo de camión con una magnitud de carga inferior en un 2.03% respecto al vehículo de diseño estipulado por la SCT en nuestro país, lo anterior simplemente por mencionar alguno de los tantos factores que intervienen durante el análisis de estos complejos sistemas estructurales. El realizar un

diseño conservador contempla finalmente no pasar por alto cualquier condición desfavorable que pudiera afectar los factores de seguridad de la estructura como pudiera ser una mala supervisión de obra lo cual generalmente sucede, obtener una mala calidad de los materiales como dosificaciones erróneas en el concreto, pruebas de laboratorio mal ejecutadas, etc. Si adicionalmente añadimos un mal diseño o una mala construcción por falta de experiencia, generaremos un mecanismo de acciones desafortunadamente perjudiciales que afectarán directamente la estabilidad de la estructura.

Resulta totalmente conveniente que el diseñador sea contratado como supervisor de obra transitorio una vez terminados los trabajos relacionados con el análisis y diseño estructural debido a que se encontrará estrechamente relacionado con el proyecto, de manera que al presentarse alguna situación extraordinaria durante la ejecución de los trabajos constructivos, este profesional podrá emitir una acertada opinión o mejorar cualquier área de oportunidad que llegara a presentarse, ya que precisamente durante este proceso una enorme cantidad de decisiones son tomadas de forma precipitada debido principalmente a los ajustados tiempos relacionados con la entrega final de la obra.

c) Normativa

Actualmente existe un área de investigación suficientemente grande respecto al estudio de los puentes vehiculares curvos; sin embargo, es prioritario contar con una normativa especializada para el análisis y diseño de esta clase de estructuras en nuestro país, debido a que la construcción de estos complejos sistemas vehicules son una actividad frecuentemente desarrollada en las grandes ciudades así como en el actual sistema carretero.

El reglamento Estadounidense emitido por la AASHTO utiliza el camión de diseño HS20 para el análisis de los puentes vehiculares curvos. Por lo tanto, resulta conveniente mencionar que las normas y reglamentos de dicho país presentan un mayor control respecto al registro y peso de los vehículos que circulan a través de su amplio sistema de vialidades. En México, por otra parte, no se realiza un estricto control respecto al valor de carga que pueden transportar estos vehículos, incluso existe la posibilidad de sobrepasar las magnitudes de carga establecidas para el camión de diseño IMT 66.5 como lo demostró la báscula al realizar el pesaje del camión C2 durante las pruebas experimentales de campo, ya que dicho vehículo registro un peso de 62.995 toneladas valor muy cercano al determinado como carga máxima de acuerdo a la normativa que aplica en nuestro país.

d) Análisis de los elementos

Es muy frecuente que durante los procesos de análisis no se tomen en cuenta las distintas etapas del montaje de traveses para el cálculo de los momentos flexionantes sobre las columnas, resultando ser las acciones mecánicas críticas en algunas ocasiones si se compara con aquellos momentos obtenidos cuando el sistema de traveses se encuentra totalmente montado sobre los cabezales, si adicionalmente consideramos que el uso de diafragmas y la losa de concreto aumentan la rigidez de la Superestructura distribuyendo las cargas un tanto más uniforme, podríamos considerar incluso que las acciones mecánicas obtenidas de un análisis en el que se considera la circulación de vehículos sobre un carril externo podrán presentar una menor magnitud.

La curvatura en el trazo geométrico de un puente está directamente relacionada con los efectos de flexión y torsión que experimentarán las traveses, además de una

mayor interacción entre los componentes del sistema estructural respecto al experimentado en puentes rectos sin la presencia de esta condición geométrica. Los distintos efectos obtenidos deberán ser acumulados durante el análisis y diseño para asegurar que los elementos del puente presenten un adecuado dimensionamiento.

Independientemente si el sistema de traveses es montado en pares o triadas, es necesario determinar las distintas contraflechas que presentará cada uno de estos elementos estructurales durante las distintas etapas que contempla el análisis, ya que si estos desplazamientos verticales no son determinados adecuadamente el trazo geométrico vertical se verá afectado. Adicionalmente el éxito o fracaso de los niveles finales de la Superestructura se encontrará directamente en función de los procedimientos constructivos efectuados.

e) Procedimiento constructivo

Un procedimiento constructivo perfectamente ejecutado en los puentes vehiculares curvos es un aspecto de igual o mayor importancia que el análisis y diseño estructural de estas estructuras. Estos tres factores mencionados anteriormente deberán desarrollarse sin algún margen de error, de lo contrario la estructura evidenciará algún tipo de falla como desafortunadamente ha ocurrido en una gran cantidad de puentes alrededor del mundo.

f) Modelaje

Los métodos especializados de análisis de cualquier programa de cómputo que maneje el método del elemento finito, son hasta ahora la herramienta más eficiente

para el diseño de esta clase de estructuras siempre y cuando se asegure que el software presente una adecuada calibración.

Es necesario contar con un sistema coordenado bien definido respecto a la geometría real de la estructura ya que con esto será posible realizar una comparativa entre las coordenadas de los modelos matemáticos y los parámetros anteriormente mencionados, puesto que es necesario que ambos sistemas de referencia coincidan perfectamente.

La realización de los modelos matemáticos a una escala real, así como extremadamente detallados nos brinda una referencia de que tanto puede estar calibrado un determinado software al comparar los resultados obtenidos por medio del análisis con la serie de datos recopilados durante las pruebas experimentales de campo.

g) Consideraciones

El mantenimiento periódico y constante de estas estructuras se encuentra estrechamente relacionado con la conservación de las mismas, evitándose con lo anterior frecuentes reparaciones las cuales en ciertas ocasiones si no logran ser corregidas oportunamente podrán generar fallas estructurales de gravedad.

- *Recomendaciones.*

- a) Análisis de los elementos

Si el eje central de la columna se coloca excéntricamente respecto al centro geométrico del sistema de traveses de manera que coincida con la resultante de cargas de la Superestructura del puente, los momentos flexionantes correspondientes a la carga muerta sobre estos elementos estructurales lograrán disminuirse o incluso eliminarse en su totalidad, de lo contrario este tipo de acciones mecánicas permanecerán constantes sobre estos elementos.

Los momentos flexionantes de mayor magnitud sobre las columnas ocurrirán por los efectos de temperatura cuando las traveses permanezcan ancladas a los cabezales, provocando la generación de fuerzas radiales que actúen directamente sobre estos elementos estructurales.

Resulta una buena alternativa contar con distintos algoritmos especialmente durante la etapa del diseño de los elementos estructurales principales de la estructura, los cuales deberán estar elaborados en cualquier hoja de cálculo como Excel o Mathcad. Con este tipo de herramienta será posible realzar el diseño de forma casi inmediata una vez obtenidas las acciones mecánicas críticas del análisis estructural.

- b) Procedimiento constructivo

Una característica importante en el desarrollo del proceso constructivo de las columnas radica en el proceso del colado, ya que éste deberá realizarse de forma

monolítica y no por secciones, lo anterior para evitar la presencia de posibles planos de falla que generen la aparición de alguna articulación plástica a lo largo del elemento.

Cuando sea posible y el presupuesto lo contemple, la colocación de un simulador de niveles en el lugar de obra con el cual sea posible determinar las contraflechas por peso propio será de gran ayuda, ya que servirá de guía para nivelar el conjunto de trabes y realizar la sujeción de las mismas por medio de diafragmas transversales antes de su colocación definitiva sobre los cabezales

Es conveniente que los cabezales presenten una capa de poliestireno en la parte superior de los mismos, ya que con esta medida se evitará cualquier despostillamiento o desprendimiento de recubrimiento debido a las expansiones de la losa experimentadas por los cambios de temperatura.

CAPITULO VII

TEMAS DE INTERES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Este trabajo de tesis presenta una secuencia bien definida de las principales acciones y procedimientos a considerar durante la evaluación de las distintas etapas que contempla el análisis referente al estudio de los puentes vehiculares curvos.

Sin embargo, existe la posibilidad de que esta propuesta metodología pueda sufrir algún tipo de modificación en su contenido, siempre y cuando el lector pueda demostrar que es posible mejorar o refinar el resultado final de alguno de los procedimientos empleados durante el análisis de esta clase de estructuras.

Si la situación anteriormente mencionada llegara a presentarse, podríamos considerar que además de haberse presentado una propuesta metodología para el análisis de los puentes vehiculares curvos completamente explícita y fundamentada, adicionalmente se pudiera considerarse que el tema en cuestión genero el interés necesario al grado de haber captado la atención del lector de manera que requirió la realización de una investigación de manera independiente para corroborar o mejorar

según sea el caso, alguno de los resultados o información proporcionados en este trabajo de tesis.

Es importante mencionar que toda la información contenida en este documento podrá servir de referencia para alguna otra área de investigación estrechamente relacionada con el estudio de puentes vehiculares curvos.

Algunos temas de interés los cuales personalmente considero pudieran ser una buena línea de investigación o incluso alguna posibles alternativas para la obtención del grado de maestría en el área de ingeniería estructural serán mencionados a continuación.

1. Comparación de los procesos de análisis durante la evaluación de las distintas etapas relacionadas con los puentes vehiculares curvos formado por traveses de acero y losa de concreto (PUVECUTayLoc) cuando se consideran las cargas vehiculares establecidas por la SCT y aquellas especificadas por el reglamento AASHTO. La figura 59 muestra los vehículos de diseño.

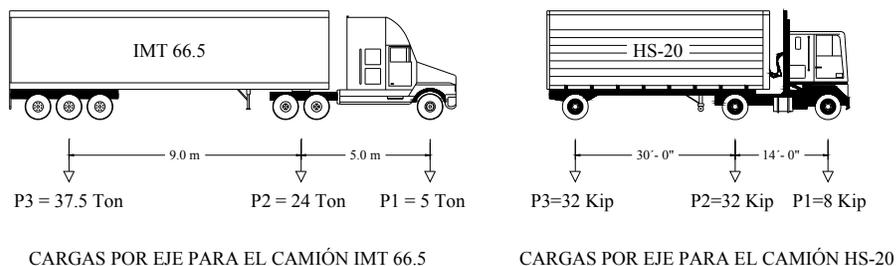


Figura 59. Vehículo de diseño IMT 66.5 y HS-20

2. Comportamiento de los PEVECUTayLoc, cuando a partir de una determinada longitud de claro, posteriormente se experimenta con distintos radios de curvatura los cuales deberán presentar una variación en su longitud de forma gradual y ascendente hasta que las acciones mecánicas obtenidas del análisis

proporcionen resultados prácticamente similares al de un sistema de traveses con un trazo geométrico recto en planta. La figura 60 ejemplifica esta propuesta.

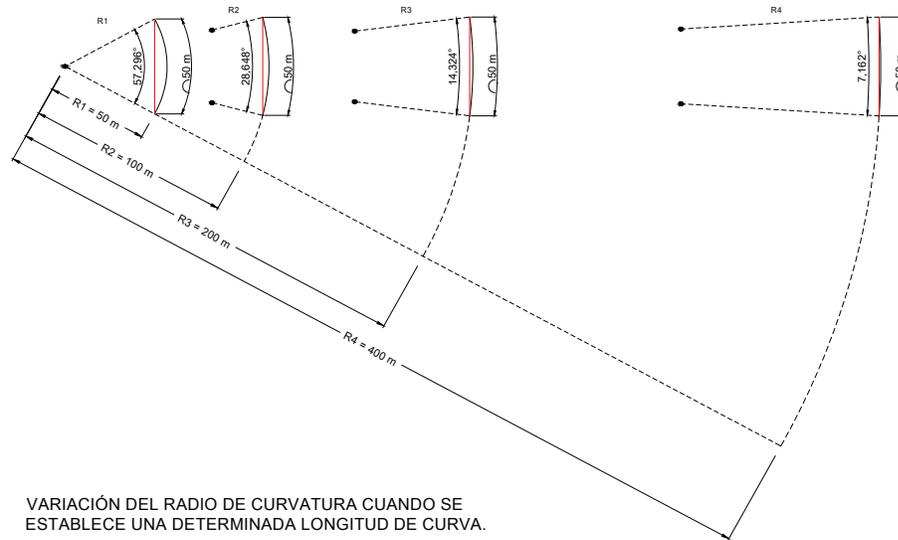


Figura 60. Variación del radio de curvatura ante una longitud de curvatura establecida

3. Comportamiento de los PEVECUTayLoc, cuando a partir de un radio de curvatura establecido convenientemente se determinan distintos claros de análisis pudiendo variar éste valor en incrementos de 5 o 10 metros como se muestra en la figura 61.

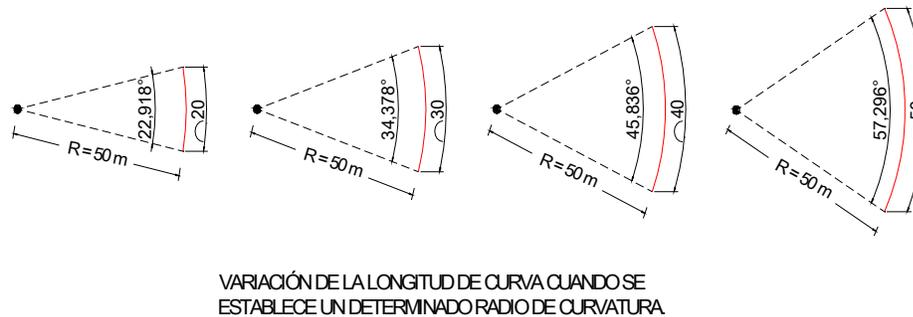


Figura 61. Variación de la longitud del claro ante un determinado radio de curvatura

4. Comportamiento de los PEVECUTayLoc, cuando la separación del conjunto de traves en una vista en planta sufre variaciones, esto sucede cuando la ingeniería de tránsito por medio de un análisis establece que deberá ser considerado un ancho mayor al centro del claro respecto al que se encuentra ubicado en la zona de los apoyos. La figura 62 muestra ésta diferencia.

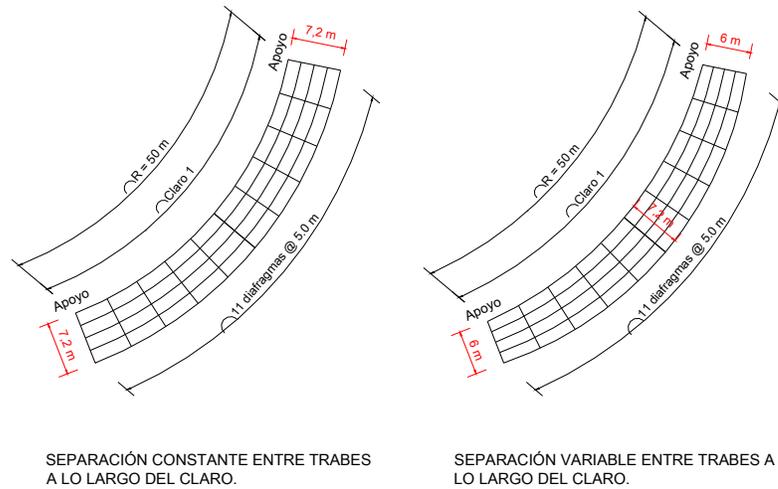


Figura 62. Espaciamiento constante y variable a lo largo del sistema de traves

5. Comportamiento de los PUVECUTayLoc, cuando son utilizados distintos arreglos en la configuración de los diafragmas. La figura 63 muestra tres distintas configuraciones en el arreglo transversal de estos elementos.



Figura 63. Configuración del sistema transversal de diafragmas

6. Comportamiento de los PUVECUTayLoc, cuando en el arreglo de la sección transversal de la Superestructura del puente se consideran distintos porcentajes de sobre elevación como lo muestra la figura 64.

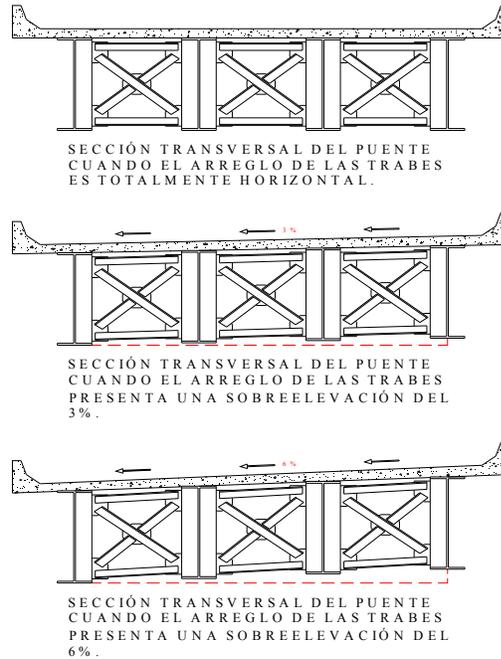


Figura 64. Sección transversal de la Superestructura ante distintos porcentajes de sobre elevación

7. Comportamiento de los PUVECUTayLoc, cuando son considerados diafragmas a nivel del patín inferior de las traves de acero, asimilando una especie de sección cajón. La figura 65 muestra esta condición.

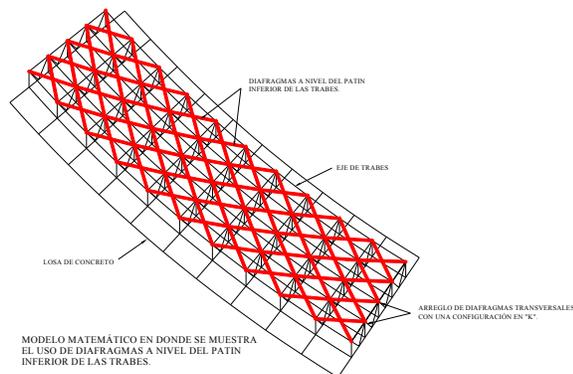


Figura 65. Comportamiento de la Superestructura ante un sistema de diafragmas ubicados en la parte inferior de las traves

8. Comportamiento de los PUVECUTayLoc, cuando los extremos de cada claro sean considerados como apoyos simples con una orientación en forma radial, así como cuando presenten un determinado grado de esviaje respecto al radio que describe la curvatura de las traveses. Las mismas consideraciones podrán ser aplicadas para el caso de claros continuos. La figura 66 muestra algunas alineaciones en la configuración de los apoyos.

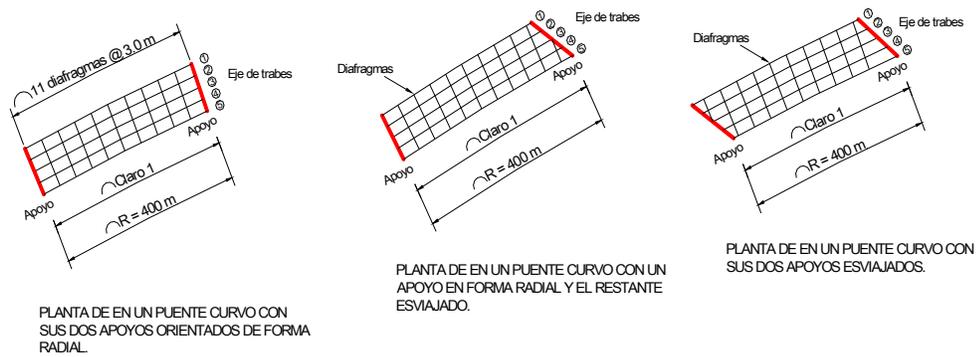


Figura 66. Alineación de la configuración del sistema de los apoyos en la Superestructura

REFERENCIAS

1. AASTHO (2002). Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Edition, American Association of State Highway Officials, Washington, D.C.
2. AASTHO (2003). Guide Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges with Design Examples for I-Girder and Box-Girder Bridges, American Association of State Highway Officials, Washington, D.C.
3. AASTHO (2004). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 3th Edition, With 2004 Interims, American Association of State Highway Officials, Washington, D.C.
4. AASHTO/NSBA (1992). V-Load Analysis. An Approximate Procedure, Simplified and Extended, for Determining Moments and Shears in Designing Horizontally-Curved Open-Framed Highway Bridges, Highway Structures Design Handbook, Vol. I, Chapter 12, American Institute of Steel Construction.
5. AASHTO/NSBA(2011). Steel Bridge Collaboration, Guidelines for Steel Girder Bridge Analysis, 1st Edition, Document G13.1.
6. ACI 318 and ACI 3018R (2005). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318) and Commentary (ACI 318R), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
7. AISC (1999). Load and Resistance Factor Design Specifications for Structure Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
8. Domenic Coletti, P.E., and John Yadlosky, P.E., “Behavior and Analysis of Curved and Skewed Steel Girder Bridges,” National Steel Bridge Alliance, 2005 World Steel Bridge Symposium, Orlando FL.

9. Hanshin Express Public Corporation and Steel Structures Committee (1988). "Guidelines for the Design of Horizontally Curved Girder Bridges (Draft)," Hanshin Public Corporation.
10. Hall, D. H., Grubb, M.A., and Yoo, C.C. "Improved Design Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges," National Cooperative Highway Research Program, Research Rep. No. 424, Washington, D.C. 1999.
11. Jewell J., Rowhani P., Meline R. and Peter Rich. "Vehicle Crash Test of the Type 70 Bridge Rail," Federal Highway Administration, California Department of Transportation, ESC-98/06, January 1998, pp. 74.
12. Kulicki J.M., Wassef W. G, Kleinhans. "Development of LRFD Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Bridges," National Cooperative Highway Research Program, Research Rep. No. 563, Washington, D.C. 2006.
13. Linzell, D. G. (1999). "Studies of a full-scale horizontally curved steel I girder bridge system under self-weight ," PhD dissertation, Scholl of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
14. Linzell D, Hall D, White D. "Historical Perspective on Horizontally Curved I Girder Bridge Design in the United Sates," Journal of Bridge Engineering, ASCE, 1084-0702, Vol. 9, No. 3, May/June 2004, pp.218-229.
15. Ronald D. Ziemian (2010), Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, 6th Edition, John Wiley & Sons Inc.
16. Ross H. E., Jr., Sicking D.L., Zimmer R.A. and Michie J.D. "Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features," National Cooperative Highway Research Program, Research Report No. 350, Washington, D.C. 1993.
17. Tung, D.H.H., and Fountain, R.S., "Approximate Torsional Analysis of Curved Box Girders by the M/R Method," AISC Engineering Journal, Vol. 7, No. 3, Chicago IL. 1970.
18. Wai-Fah Chen and Lian Duan. "Horizontally Curved Bridges," Chapter 15, Bridge Engineering Handbook, 1st Edition, CRC Press, Boca Raton 2000.

19. White D. W., Zureick A., Phoawanich N, and Jung S.K. (2001).
“Development of unified equations for design of curved and straight steel bridge I girders,” Final Rep., Prepared for American Iron and Steel Institute Transportation and Infrastructure Committee, Professional Service Industries, Inc., and Federal Highway Administration, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
20. Xanthakos Petros P., “Steel Bridges Curved in Plan,” Theory and Design of Bridges, Chapter 6, John Wiley & Sons Inc.
21. Zureick A., Naqib R., and Yadlosky, J.M. (1994). “Curved steel bridge Research project, interim report I: Synthesis,” Publication Number FHWA-RD-93-129, HDE Engineering, Inc., Pittsburg.
22. Zureick A. and Naqib R. “Horizontally Curved Steel I-Girders State-of-the-Art Analysis Methods,” Journal of Bridge Engineering, ASCE, 1084-0702, Vol. 4, No. 1, February 1999, pp. 38-47.

APENDICE A. SISTEMA ANGULAR Y COORDENADO DE REFERENCIA DEL CASO DE ESTUDIO

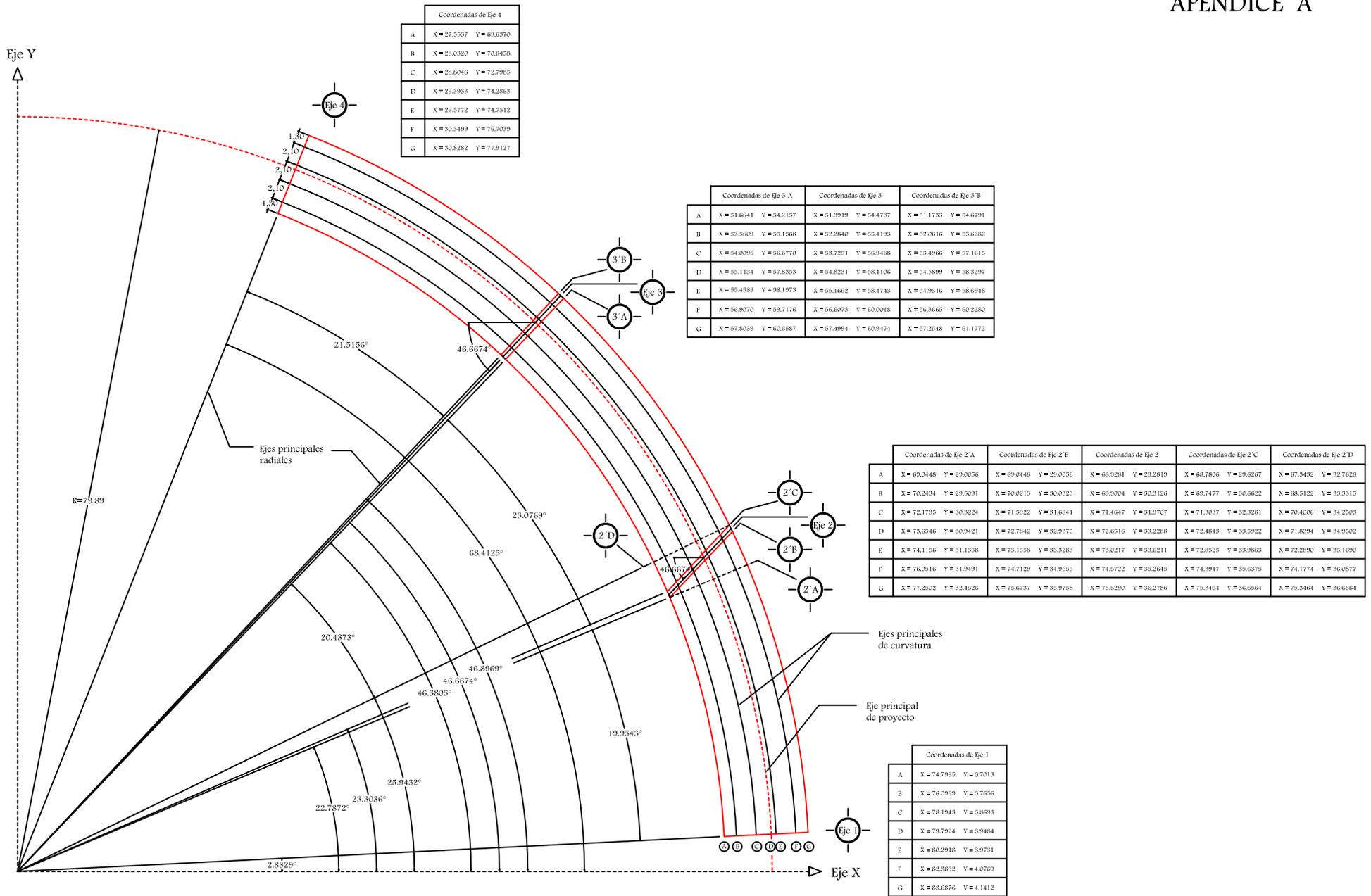


Figura 67. Sistema angular y coordenado de referencia. Planta general

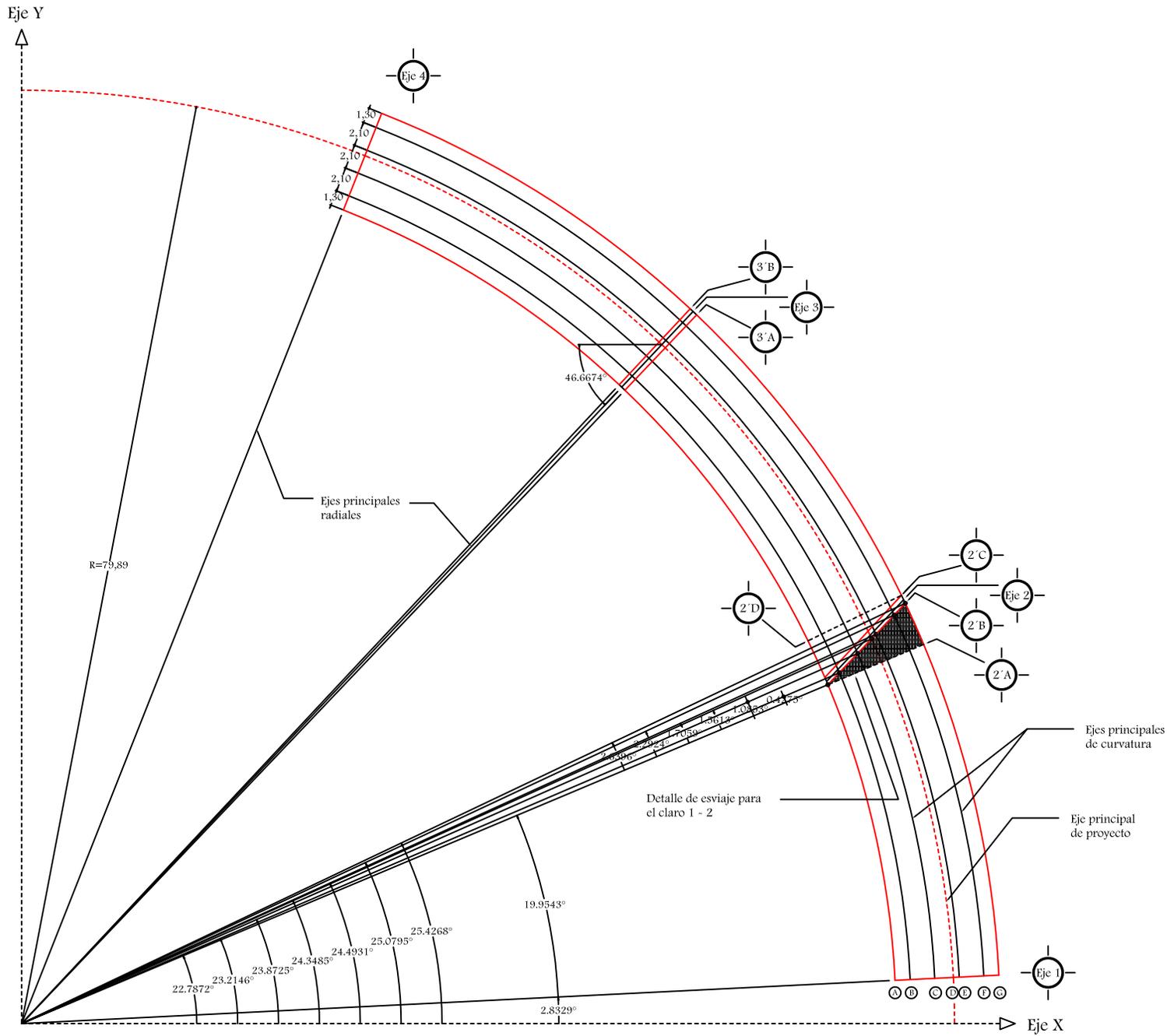


Figura 68. Sistema angular y coordinado de referencia. Esviaje entre ejes 1 - 2

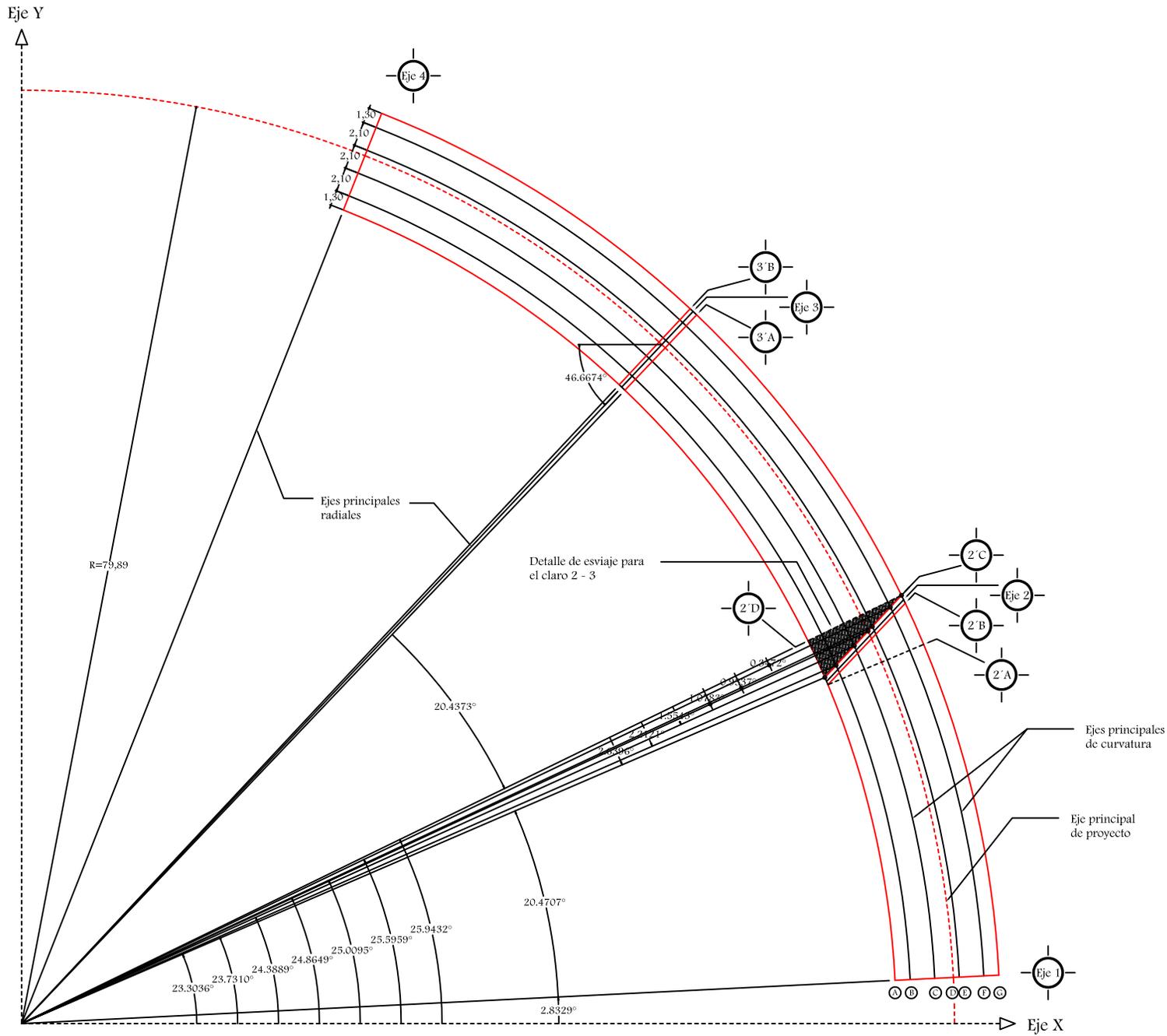


Figura 69. Sistema angular y coordenado de referencia. Esviaje entre ejes 2 - 3

APENDICE B. ALGORITMO DE NIVELES Y ANGULOS

Proyecto: Puente Radial III
 Ubicación: Nuevo Laredo Tamaulipas

Determinación de retícula para niveles de modelo matemático.
 Información de proyecto.

Rc = Radio de curvatura del eje de proyecto	Rc = 79.89 m
Sep = Distancia entre traves	Sep = 2.10 m
Vol = Distancia de volado	Vol = 1.30 m
Ac = Ancho de calzada	Ac = 8.90 m
LC1 = Longitud de curva (ejes 1-2)	LC1 = 30.00 m
LC2 = Longitud de curva (ejes 2-3)	LC2 = 30.00 m
LC3 = Longitud de curva (ejes 3-4)	LC3 = 30.00 m
Eje1 = Espaciamiento entre eje 1	Eje1 = 0.32 m
Eje2 = Espaciamiento entre eje 2	Eje2 = 0.40 m
Hc2 = Altura de columna (eje2)	Hc2 = 5.00 m
Hc3 = Altura de columna (eje3)	Hc3 = 5.50 m
NRE1 = Nivel de rasante para estribo (eje 1)	NRE1 = 147.854 m
NRP2 = Nivel de rasante para pila (eje2)	NRP2 = 148.126 m
NRP3 = Nivel de rasante para pila (eje3)	NRP3 = 147.821 m
NRE4 = Nivel de rasante para estribo (eje 4)	NRE4 = 146.948 m

Radios de curvatura principales

LBI (m)	T1 (m)	T2 (m)	EP (m)	T3 (m)	T4 (m)	LBD (m)
74.89	76.19	78.29	79.89	80.39	82.49	83.79

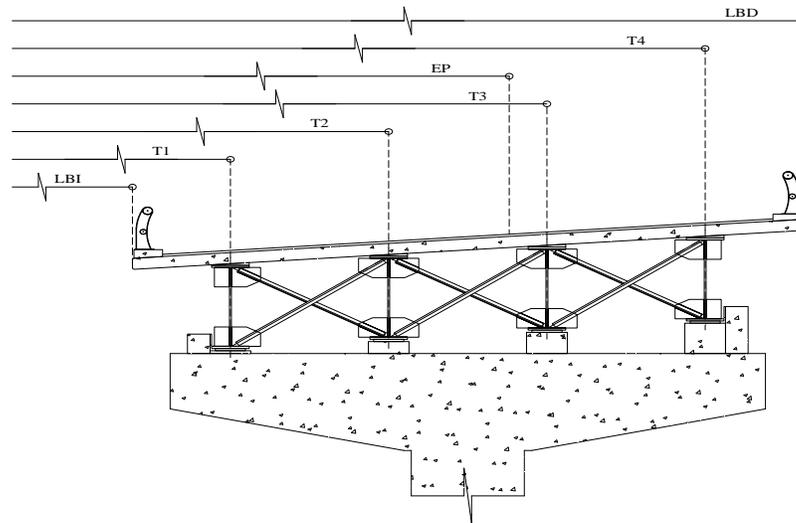


Figura 70. Sección transversal de la Superestructura del puente Radial III

Donde :

- LBI = Radio para borde izquierdo de losa
- T1 = Radio para trabe 1
- T2 = Radio para trabe 2
- EP = Radio para el eje de proyecto
- T3 = Radio para trabe 3
- T4 = Radio para trabe 4
- LBD = Radio para borde derecho de losa

Niveles de sobre elevación transversal para eje 1

S = Porcentaje de sobre elevación

S = 6.34 %

	LBI	T1	T2	EP	T3	T4	LBD
Dist	1.3	2.1	1.6	0	0.5	2.1	1.3
Nc	147.537	147.619	147.753	147.854	147.886	148.019	148.101
D	0.082	0.133	0.101		0.032	0.133	0.082
	0.317						0.247

Niveles de sobre elevación transversal para eje 2

S = Porcentaje de sobre elevación

S = 7.90 %

	LBI	T1	T2	EP	T3	T4	LBD
Dist	1.3	2.1	1.6	0	0.5	2.1	1.3
Nc	147.731	147.834	148.000	148.126	148.166	148.331	148.434
D	0.103	0.166	0.126		0.040	0.166	0.103
	0.395						0.308

Niveles de sobre elevación transversal para eje 3

S = Porcentaje de sobre elevación

S = 7.90 %

	LBI	T1	T2	EP	T3	T4	LBD
Dist	1.3	2.1	1.6	0	0.5	2.1	1.3
Nc	147.426	147.529	147.695	147.821	147.861	148.026	148.129
D	0.103	0.166	0.126		0.040	0.166	0.103
	0.395						0.308

Niveles de sobre elevación transversal para eje 4

S = Porcentaje de sobre elevación

S = 7.90 %

	LBI	T1	T2	EP	T3	T4	LBD
Dist	1.3	2.1	1.6	0	0.5	2.1	1.3
Nc	146.553	146.656	146.822	146.948	146.988	147.153	147.256
D	0.103	0.166	0.126		0.040	0.166	0.103
	0.395						0.308

Dist = Espaciamiento entre puntos

Nc = Nivel de cota

D = Desnivel entre puntos

= Sumatoria de desniveles a bordes

Retícula parcial y total de los ángulos de curvatura para modelo matemático

LC = 30.00 m Diam = 159.78 m = 21.5156 °

LC = 0.32 m Diam = 159.78 m = 0.2295 °

LC = 0.40 m Diam = 159.78 m = 0.2869 °

	°	long equiv
1er ángulo	2.8329	3.95
2do ángulo	24.3485	30.00
3er ángulo	24.578	30.32
4to ángulo	24.8649	30.72
5to ángulo	46.3805	60.72
6to ángulo	46.6674	61.12
7mo ángulo	46.8969	61.44
8vo ángulo	68.4125	91.44

Reticula parcial y total de las alturas principales para modelo matemático

Cota mayor			
NRE1	NRP2	NRP3	NRE4
147.854	148.126	147.821	146.948
Dc	0.272	0.305	0.873
Hc		5	5.5
Cpe	5.533	5.805	5.5
			4.627

Dc = Desnivel de cota entre ejes
 Hc = Altura de columna
 Cpe = Cota principal de eje

Reticula discretizada de alturas para eje 1

	LBI	T1	T2	EP	T3	T4	LBD
Cota	5.216	5.298	5.432	5.533	5.565	5.698	5.780
	0.317						0.247

Reticula discretizada de alturas para eje 2

	LBI	T1	T2	EP	T3	T4	LBD
				0.805			
Cota	5.410	5.513	5.679	5.805	5.845	6.010	6.113
	0.395						0.308

Dc 1-2	0.194	0.214	0.247	0.272	0.280	0.313	0.333
--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Diam (m)	149.78	152.38	156.58	159.78	160.78	164.98	167.58
° =	19.9543	19.9543	19.9543	19.9543	19.9543	19.9543	19.9543
LC (m) =	26.0818	26.5346	27.2659	27.8231	27.9973	28.7286	29.1814

Diam (m)	149.78	152.38	156.58	159.78	160.78	164.98	167.58
' ° =	0	0.4275	1.0853	1.5613	1.7059	2.2924	2.6396
LC ' (m) =	0.0000	0.5685	1.4830	2.1770	2.3935	3.3004	3.8602

LC 1-2 (m) =	26.0818	27.1030	28.7489	30.0001	30.3908	32.0291	33.0416
D =	0.194	0.210	0.234	0.252	0.258	0.280	0.294
D - 2 =	0.000	0.004	0.013	0.020	0.022	0.032	0.039

Reticula discretizada de alturas para eje 3

	LBI	T1	T2	EP	T3	T4	LBD
				0.000			
Cota	5.105	5.208	5.374	5.500	5.540	5.705	5.808
	0.395						0.308

Dc 2-3	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305
--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Diam (m)	149.78	152.38	156.58	159.78	160.78	164.98	167.58
° =	2.6396	2.2121	1.5543	1.0783	0.9337	0.3472	0
LC (m) =	3.4502	2.9416	2.1238	1.5035	1.3100	0.4999	0.0000

Diam (m)	149.78	152.38	156.58	159.78	160.78	164.98	167.58
° =	20.4373	20.4373	20.4373	20.4373	20.4373	20.4373	20.4373
LC (m) =	26.7131	27.1768	27.9259	28.4966	28.6750	29.4240	29.8877

LC 1-2 (m) =	30.1633	30.1184	30.0497	30.0001	29.9850	29.9239	29.8877
D' =	0.035	0.030	0.022	0.015	0.013	0.005	0.000
D - 3 =	0.270	0.275	0.283	0.290	0.292	0.300	0.305

Reticula discretizada de alturas para eje 4

	LBI	T1	T2	EP	T3	T4	LBD
Cota	4.232	4.335	4.501	4.627	4.667	4.832	4.935
	0.395						0.308

Dc 3-4	0.873	0.873	0.873	0.873	0.873	0.873	0.873
--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Diam (m)	149.78	152.38	156.58	159.78	160.78	164.98	167.58
° =	21.5156	21.5156	21.5156	21.5156	21.5156	21.5156	21.5156
LC (m) =	28.1225	28.6107	29.3993	30.0001	30.1879	30.9765	31.4647

APENDICE C. ALGORITMO DE CARGAS

Proyecto: Puente Radial III
 Ubicación: Nuevo Laredo Tamaulipas

Determinación de las cargas para la etapa de análisis B

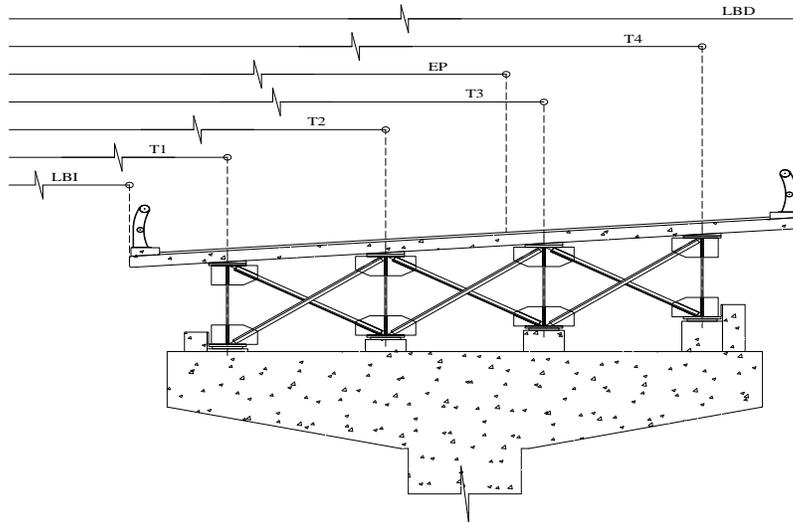


Figura 71. Superestructura del puente Radial III

Longitud de análisis: Claro de eje 1 - 2

No = Numero de espacios (diafragmas)
 Nd = Numero de divisiones (entre diafragmas)
 tl = Espesor de losa

No = 12 Esp
 Nd = 3 Div
 tl = 0.20 m

	T1 (m)	T2 (m)
Ancho tributario (m)	2.35	2.1
LC promedio (m)	26.63	27.27
LC / No (m)	2.22	2.27
LC / Nd (m)	0.740	0.757
Carga por nodo (kg)	834.33	763.45
Carga final de nodo (kg)	850	780
Extremo radial (kg)	425	390

	T3 (m)	T4 (m)
	2.1	2.35
	28.00	28.64
	2.33	2.39
	0.778	0.795
	783.92	897.25
	800	920
	400	460

NdT1 = Numero de divisiones p/T1
 NdT2 = Numero de divisiones p/T2
 NdT3 = Numero de divisiones p/T3
 NdT4 = Numero de divisiones p/T4

NdT1 = 1 Div
 NdT2 = 2 Div
 NdT3 = 3 Div
 NdT4 = 4 Div

	T1 (m)	T2 (m)
LC ' promedio (m) =	0.684	1.482
LC ' / NdT (m) =	0.684	0.741
Carga por nodo (kg)	771.34	746.75
Carga por nodo (kg)	790	770
Nodo final radial (kg)	820	775
Extremo esviado (kg)	395	385

	T3 (m)	T4 (m)
	2.392	3.185
	0.797	0.796
	803.81	898.09
	820	920
	810	920
	410	460

Longitud de análisis: Claro de eje 2 - 3

NdT1 = Numero de divisiones p/T1
 NdT2 = Numero de divisiones p/T2
 NdT3 = Numero de divisiones p/T3
 NdT4 = Numero de divisiones p/T4

NdT1 = 4 Div
 NdT2 = 3 Div
 NdT3 = 2 Div
 NdT4 = 1 Div

	T1 (m)	T2 (m)
LC' (m) =	2.839	2.125
LC' / NdT (m) =	0.710	0.708
Carga por nodo (kg)	800.46	714.05
Carga por nodo (kg)	820	730
Nodo final radial (kg)	845	765
Extremo esviado (kg)	410	365

T3 (m)	T4 (m)
1.311	0.603
0.656	0.603
660.87	680.53
680	700
750	820
340	350

	T1 (m)	T2 (m)
Ancho tributario (m)	2.35	2.1
LC promedio (m)	27.27	27.93
LC / No (m)	2.27	2.33
LC / Nd (m)	0.758	0.776
Carga por nodo (kg)	854.52	781.93
Carga final de nodo (kg)	870	800
Extremo radial (kg)	435	400

T3 (m)	T4 (m)
2.1	2.35
28.67	29.33
2.39	2.44
0.797	0.815
802.90	918.97
820	940
410	470

Longitud de análisis: Claro de eje 2 - 3

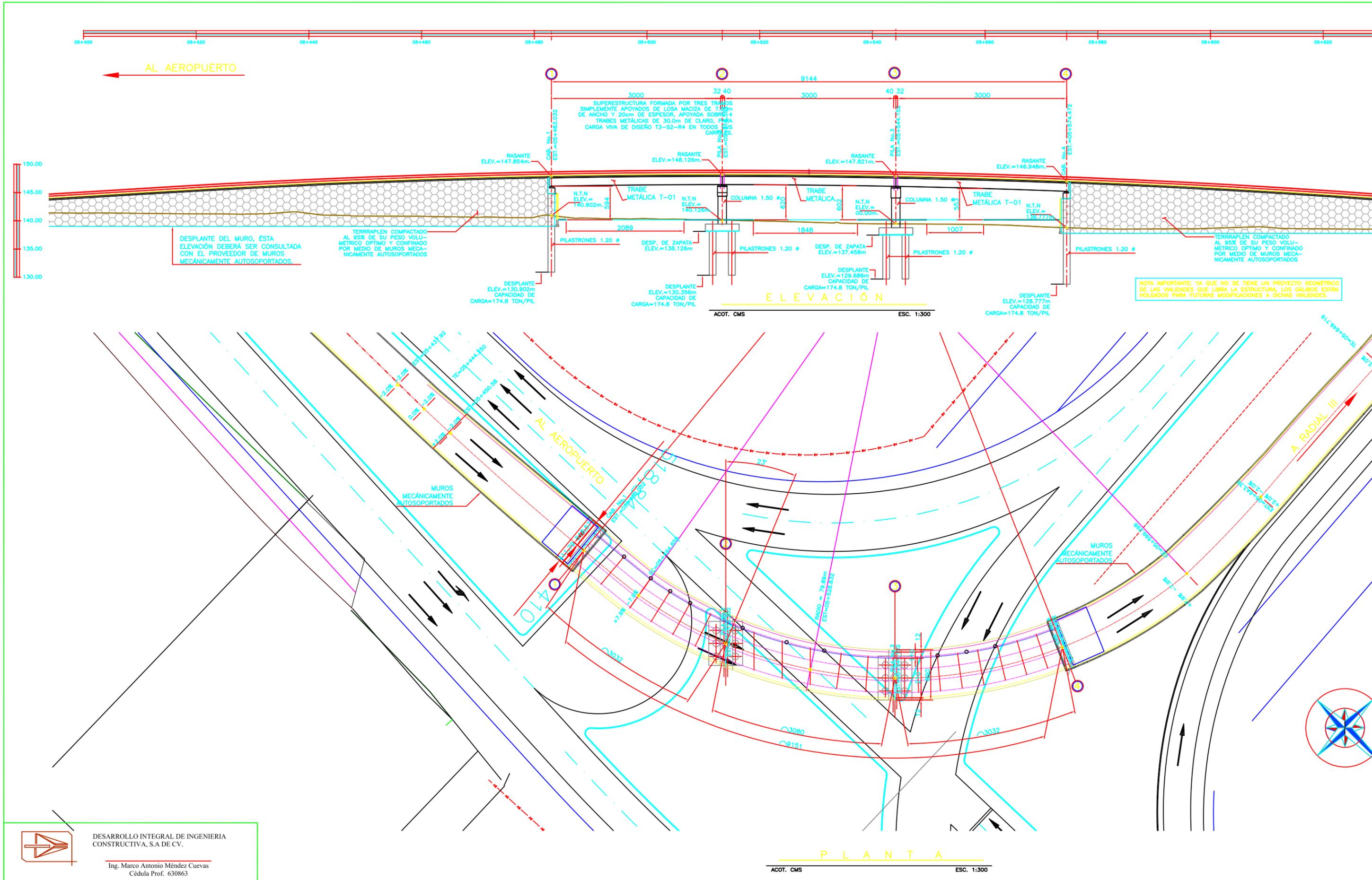
No = Numero de espacios (diafragmas)
 Nd = Numero de divisiones (entre diafragmas)
 tl = Espesor de losa

No = 16 Esp
 Nd = 3 Div
 tl = 0.20 m

	T1 (m)	T2 (m)
Ancho tributario (m)	2.35	2.1
LC promedio (m)	28.71	29.40
LC / No (m)	1.79	1.84
LC / Nd (m)	0.598	0.612
Carga por nodo (kg)	674.71	617.39
Carga final de nodo (kg)	690	640
Extremo radial (kg)	345	320

T3 (m)	T4 (m)
2.1	2.35
30.19	30.88
1.89	1.93
0.629	0.643
633.95	725.59
650	740
325	370

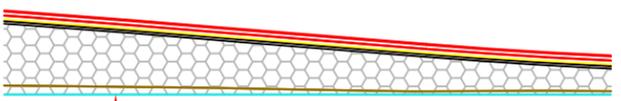
APENDICE D. PLANOS DE PROYECTO



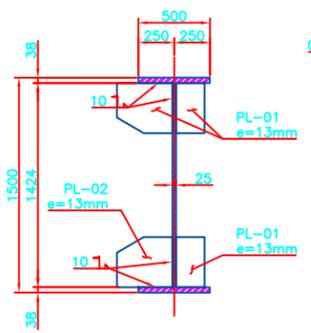
DESARROLLO INTEGRAL DE INGENIERIA CONSTRUCTIVA, S.A. DE CV.
 Ing. Marco Antonio Méndez Cuevas
 Cédula Prof. 630863



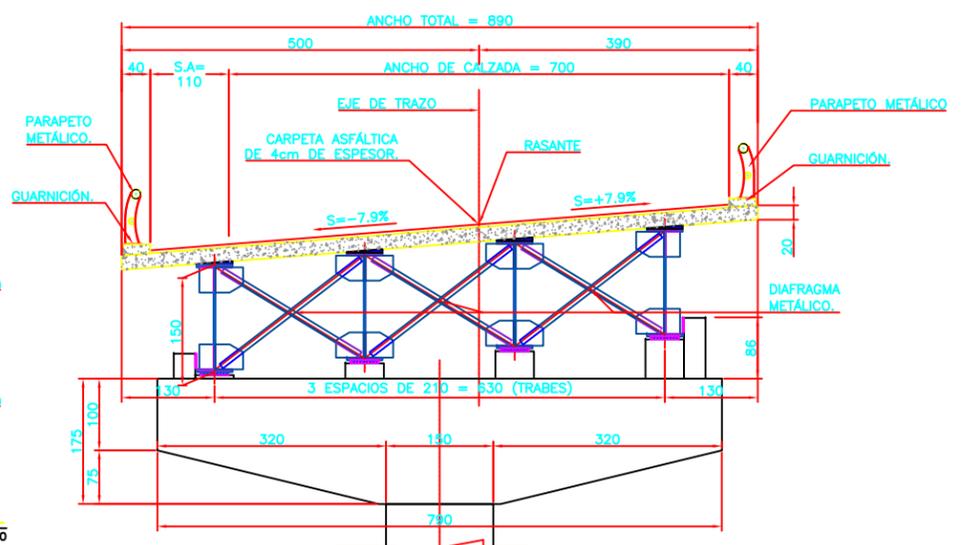
A RADIAL III



DESPLANTE DEL MURO, ÉSTA ELEVACIÓN DEBERÁ SER CONSULTADA CON EL PROVEEDOR DE MUROS MECÁNICAMENTE AUTOSOPORTADOS.



TRABE METÁLICA T-01
ACOT. mm ESC. 1:20



SECCIÓN TRANSVERSAL (EST=05+5544.152)
ACOT. CMS ESC. 1:50

DATOS DE CURVA HORIZONTAL

TIPO DE CAMINO = C	Vel. de proy.=40 km/h
TE = 05 + 437.92	Rc = 79.89 m.
EC = 05 + 494.66	Xc = 25.22 m.
CE = 05 + 599.30	Yc = 1.33 m.
ET = 05 + 649.72	K = 12.63 m.
Ste = 97.74 m.	p = 0.33
PI = 05 + 649.72	Le = 25.00 m.
Gc = 14° 20' 37.4"	Sc = 7.90 m.
Lc = 104.93 m.	Ac = 1.10

SOBREELEVACIONES

PUNTO	ESTACION	IZQUIERDA	DERECHA
N1	437.92	-2.000	-2.000
TE	444.25	-2.000	0.000
N2	450.58	-2.000	2.000
EC	494.66	-7.900	7.900
CE	599.30	-7.900	7.900
N3	643.39	-2.000	2.000
ET	649.72	-2.000	0.000
N4	656.05	-2.000	-2.000

LISTA DE PLANOS

- 01-PLANO GENERAL
- 02-PLANO GEOMETRICO
- 03-LOSA TRAMO 1-2 - GEOM. Y REF.
- 04-LOSA TRAMO 2-3 - GEOM. Y REF.
- 05-LOSA TRAMO 3-4 - GEOM. Y REF.
- 06-TRABE METÁLICA TRAMO 1-2-A
- 07-TRABE METÁLICA TRAMO 1-2-B
- 08-TRABE METÁLICA TRAMO 1-2-C
- 09-TRABE METÁLICA TRAMO 1-2-D
- 10-TRABE METÁLICA TRAMO 2-3-A
- 11-TRABE METÁLICA TRAMO 2-3-B
- 12-TRABE METÁLICA TRAMO 2-3-C
- 13-TRABE METÁLICA TRAMO 2-3-D
- 14-TRABE METÁLICA TRAMO 3-4-A
- 15-TRABE METÁLICA TRAMO 3-4-B
- 16-TRABE METÁLICA TRAMO 3-4-C
- 17-TRABE METÁLICA TRAMO 3-4-D
- 18-CABALLETE No.1 - GEOM. Y REF. (1/2)
- 19-CABALLETE No.1 - GEOM. Y REF. (2/2)
- 20-PILA No.2 - GEOM. Y REF.
- 21-PILA No.3 - GEOM. Y REF.
- 22-CABALLETE No.4 - GEOM. Y REF. (1/2)
- 23-CABALLETE No.4 - GEOM. Y REF. (2/2)
- 24-LOSA DE ACCESO DE CABALLETE No.1
- 25-LOSA DE ACCESO DE CABALLETE No.4
- 26-GUARNICIÓN Y PARAPETO
- 27-SECCIONES TRANSVERSALES (1/3)
- 28-SECCIONES TRANSVERSALES (2/3)
- 29-SECCIONES TRANSVERSALES (3/3)
- 30-SERIALAMIENTOS

MATERIALES

PARAPETO METALICO

tubo de acero galvanizado diam 6" cad 40	12,233.00 Kg
tubo de acero galvanizado diam 3" cad 40	2,616.30 Kg
Placas A-36 154mm # y e=1/4" (154 pzas)	160.00 Kg
Placas A-36 76mm # y e=1/4" (154 pzas)	41.00 Kg
PILASTRAS	
Acero A-36 en pilastras	1,051.30 Kg
4 redondos de Acero A-36 de 5/8" #	1,278.00 Kg

GUARNICION SEGUN PLANO

Longitud total	850.00 ml
Acero de refuerzo de L.E. >4000Kg/cm ²	13,616.00 Kg
Concreto de f'c=250 Kg/cm ²	51.10 m ³
4 REMATES	
Acero de refuerzo de L.E. >4000Kg/cm ²	224.00 Kg
Concreto de f'c=250 Kg/cm ²	1.35 m ³

SUPERESTRUCTURA, LOSA Y DIAFRAGMAS

Acero de refuerzo de L.E. >4200Kg/cm ²	17,953 Kg
Concreto de f'c=250 Kg/cm ²	163.00 m ³
Concreto asfáltico	30.00 m ³
Drenes Duraflex de 7.6# @ 300	62.00 pzas
DIAFRAGMAS METALICOS ACERO A-36	
Placa de A1 DE 125x10mm de espesor	3,588.75 Kg
Placa de A2 DE 200x350x10mm de espesor	542.60 Kg
Angulo de Diafragma de 0.076x0.095x10mm de espesor	3,202.00 Kg

APYOS

Neopreno ASTM D 2240, dureza shore 60	113.00 dm ³
Acero estructural A-36 (ft=100kg/cm ²)	906.80 Kg

JUNTA DE DILATACION

Junta de dilatación tipo Frey-Mex T-50 6 similar	45.35 ml
Acero de refuerzo de L.E. >4000 Kg/cm ²	232 Kg

SUBESTRUCTURA

CABALLETE No. 1 Y 4

Acero de refuerzo de L.E. 4000 kg/cm ² en:	
Cabezal, diafragma, bancos, topes y aleros	4,315 kg
Pilastrones de 1.20m de diametro	25,128 kg
Concreto de f'c=250 kg/cm ² en:	
Cabezal, diafragma, topes y bancos de apoyo	41.4 m ³
Pilastrones 1.20m	98.40 m ³
Perforación de pilastrones de 120 cms. diam.	60.00 ml
Neopreno 20x20x2 en tope lateral	4.80dm ³

PILAS No. 2, Y 3

Acero de refuerzo de L.E. >4000 kg/cm ²	
Cabezal, bancos y topes	5,565 kg
Columna de 1.50m de diametro	10,403 kg
Pilastrones de 1.20m de diametro	31,163 kg
Zapata	14,165 kg
Concreto de f'c=250 kg/cm ² en:	
Cabezal, diafragma, topes y bancos de apoyo	43.00 m ³
Columna de 1.5m de diametro	18.0 m ³
Pilastrones 1.20m de diametro	105.60 m ³
Zapata	122.50 m ³
Excavación para la zapata	308.00 m ³
Relleno producido de la excavación	176.95 m ³
Perforación de pilastrones de 120 cms. diam.	93.20 ml
Neopreno 20x20x2 en tope lateral	9.60 dm ³

LOSAS DE ACCESO

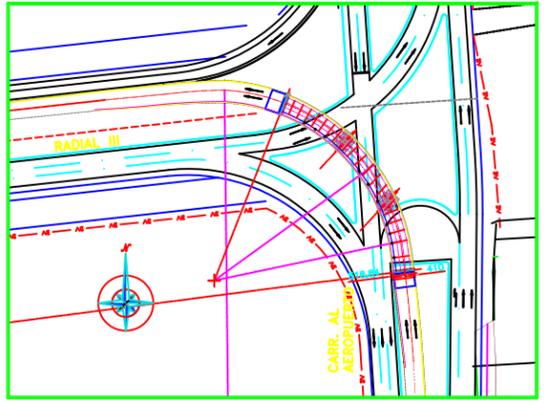
Acero de Refuerzo de L.E. = 4200 Kg/cm ²	3,564 Kg
Acero de Refuerzo de L.E. = 2320 Kg/cm ²	72 Kg
Concreto con f'c = 250 Kg/cm ²	26.89 m ³
Cartón asfáltico de 2 cm de espesor	11.00 m ²

ACCESOS

Terraplen compactado	11,658.67 m ³
Base y sub base	2,211.97 m ³
Riego de impregnación	3,248.03 m ²
Carpeta asfáltica	129.92 m ²
Muros mecánicamente autosoportados	4,347.42 m ²

CARGA VIVA

CAMION T3-S2-R4 TIPO I
PESO = 72.5 ton.



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN

NOTAS:

- GENERALIDADES:**
- Dimensiones:
En centímetros, excepto en las que se indica otra unidad.
- Elevaciones:
En metros referidos al B-N-
- Especificaciones:
La última edición de las Normas para Construcción e Instalaciones de la S.C.T.
- Aplicación del proyecto:
Carga móvil tipo : T3-S2-R4 en todos los carriles.
La profundidad de desplante indicada en este plano considera una capacidad de carga admisible de 172 ton/pil.
Se deberán de construir los terraplenes de acceso retorando unicamente la capa de material organico de 50cm
Las perforaciones para alojar los pilotes colados en el lugar se harán del mismo diametro que estos, con sustitución total de suelo por lodo bentonitico con las siguientes características:
Densidad: 1.1 ton/m³
Viscosidad Marsh: 30 a 60s
Viscosidad plastica: 10 a 25 centipoises
Filtración: menor de 20cm³ de agua
Contenido de arena: menor de 3%
- NOTA: ESTE PLANO SUSTITUYE TODOS LOS ANTERIORES CON FECHA DE MAYO DE 2010

CUADRO DE REVISIONES

No.	FECHA	DESCRIPCION	REVISÓ
01	May-2010	REVISIÓN GENERAL DEL PROYECTO	DEICSA
02	Jun-2010	CAMBIO DEL ALINEAMIENTO VERTICAL.	DEICSA

R. AYUNTAMIENTO DE NUEVO LAREDO
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS, DESARROLLO URBANO, MEDIO AMBIENTE Y SERVICIOS MUNICIPALES

ENTRONQUE: **BLVD. AEROPUERTO - RADIAL III**

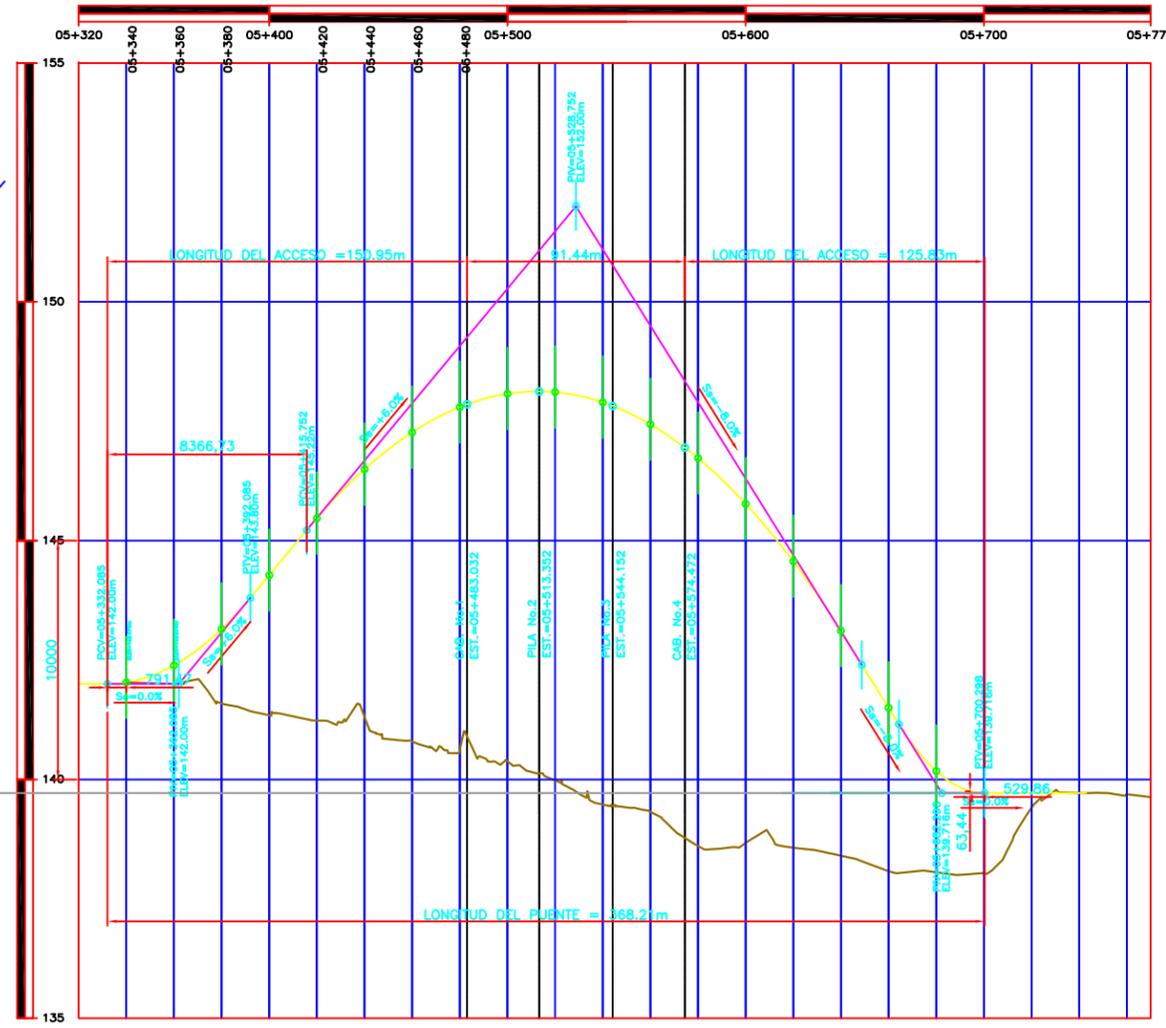
PLANO: **GENERAL**

ESTRUCTURA: **P. S. V. "BLVD. AEROPUERTO"**

TRAMO	KILOMETRO	ORIGEN
CIUDAD DE NUEVO LAREDO	-----	TAMAULIPAS

PRESIDENCIA MUNICIPAL DE NUEVO LAREDO
Ing. Ramón Garza Barrios

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE DESARROLLO URBANO Y SERVICIOS MUNICIPALES Ing. Mario Alberto Salinas Falcón	DIRECTOR DE PROYECTOS ESTRATEGICOS DIBUJÓ Ing. E. Gómez V.
SUBDIRECTOR DE PROYECTOS ESTRATEGICOS	FECHA: Junio de 2010 PLANO: 01/36



CROQUIS DE RASANTE

NOTA: PARA OBTENER ELEVACIONES DE SUB RASANTE RESTÉNSE 0.45m A LAS ELEVACIONES AQUÍ MOSTRADAS.

ACOT. CMS ESC. 1:1500

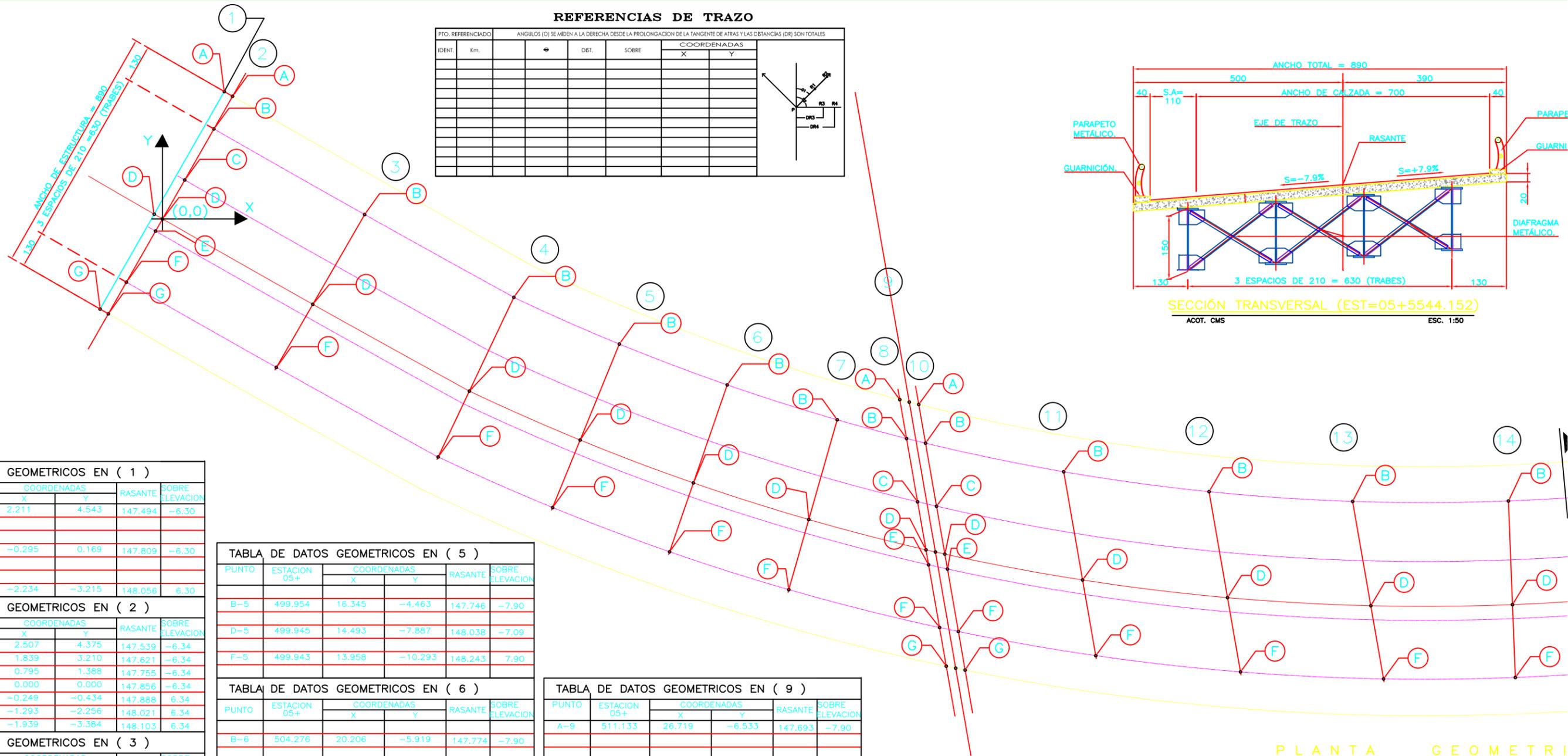


TABLA DE DATOS GEOMETRICOS EN (1)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
A-1	482.689	2.211	4.543	147.494	-6.30
D-1	482.690	-0.295	0.169	147.809	-6.30
G-1	482.695	-2.234	-3.215	148.056	6.30

TABLA DE DATOS GEOMETRICOS EN (2)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
A-2	483.032	2.507	4.375	147.539	-6.34
B-2	483.032	1.839	3.210	147.621	-6.34
C-2	483.032	0.795	1.388	147.755	-6.34
D-2	483.032	0.000	0.000	147.856	-6.34
E-2	483.032	-0.249	-0.434	147.888	6.34
F-2	483.032	-1.293	-2.256	148.021	6.34
G-2	483.032	-1.939	-3.384	148.103	6.34

TABLA DE DATOS GEOMETRICOS EN (3)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-3	489.261	7.233	0.157	147.653	-7.17
D-3	489.211	5.377	-3.045	147.918	-7.17
F-3	489.171	4.073	-5.294	148.103	7.17

TABLA DE DATOS GEOMETRICOS EN (4)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-4	495.624	12.571	-2.795	147.706	-7.90
D-4	495.614	10.980	-6.142	147.998	-7.90
F-4	495.604	9.864	-8.490	148.203	7.90

TABLA DE DATOS GEOMETRICOS EN (5)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-5	499.954	16.345	-4.463	147.746	-7.90
D-5	499.945	14.493	-7.887	148.038	-7.09
F-5	499.943	13.958	-10.293	148.243	7.90

TABLA DE DATOS GEOMETRICOS EN (6)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-6	504.276	20.206	-5.919	147.774	-7.90
D-6	504.276	18.995	-9.416	148.066	-7.90
F-6	504.276	18.144	-11.872	148.271	7.90

TABLA DE DATOS GEOMETRICOS EN (7)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-7	508.594	24.140	-7.164	147.792	-7.90
D-7	508.604	23.123	-10.722	148.083	-7.90
F-7	508.604	22.409	-13.222	148.288	7.90

TABLA DE DATOS GEOMETRICOS EN (8)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
A-8	510.754	26.379	-6.445	147.732	-7.90
B-8	511.365	26.622	-7.831	147.836	-7.90
C-8	512.316	27.017	-10.090	148.002	-7.90
D-8	513.005	27.317	-11.803	148.128	-7.90
E-8	513.214	27.410	-12.337	148.169	7.90
F-8	514.062	27.802	-14.534	148.333	7.90
G-8	514.564	28.043	-15.954	148.436	7.90

TABLA DE DATOS GEOMETRICOS EN (9)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
A-9	511.133	26.719	-6.533	147.693	-7.90
D-9	513.352	27.655	-11.880	148.088	-7.90
G-9	514.892	28.380	-16.024	148.086	7.90

TABLA DE DATOS GEOMETRICOS EN (10)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
A-10	515.201	27.059	-6.618	147.731	-7.90
B-10	512.113	27.300	-7.998	147.837	-7.90
C-10	513.026	27.694	-10.248	148.002	-7.90
D-10	513.698	27.993	-11.955	148.128	-7.90
E-10	513.904	28.087	-12.489	148.168	7.90
F-10	514.730	28.476	-14.716	148.332	7.90
G-10	515.220	28.717	-16.092	148.434	7.90

TABLA DE DATOS GEOMETRICOS EN (11)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-11	517.392	32.245	-9.018	147.789	-7.90
D-11	518.712	32.921	-12.877	148.078	-7.90
F-11	519.565	33.393	-15.577	148.114	7.90

TABLA DE DATOS GEOMETRICOS EN (12)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-12	522.897	37.446	-9.729	147.764	-7.90
D-12	523.938	38.107	-13.508	148.049	-7.90
F-12	524.611	38.571	-16.157	148.045	7.90

TABLA DE DATOS GEOMETRICOS EN (13)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-13	528.298	42.583	-10.076	147.721	-7.90
D-13	529.074	43.234	-13.797	148.005	-7.90
F-13	529.577	43.691	-16.407	147.999	7.90

TABLA DE DATOS GEOMETRICOS EN (14)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-14	534.144	48.157	-10.060	147.654	-7.90
D-14	534.144	48.303	-13.758	147.946	-7.90
F-14	534.144	48.405	-16.356	147.946	7.90

TABLA DE DATOS GEOMETRICOS EN (15)

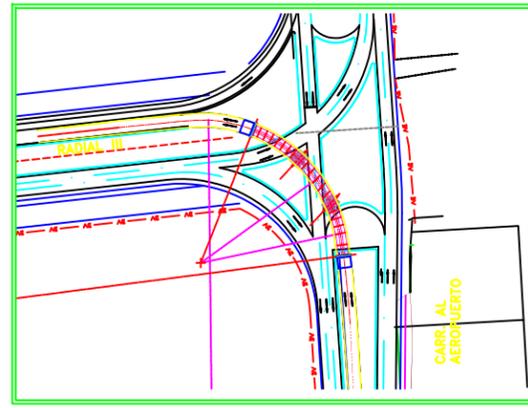
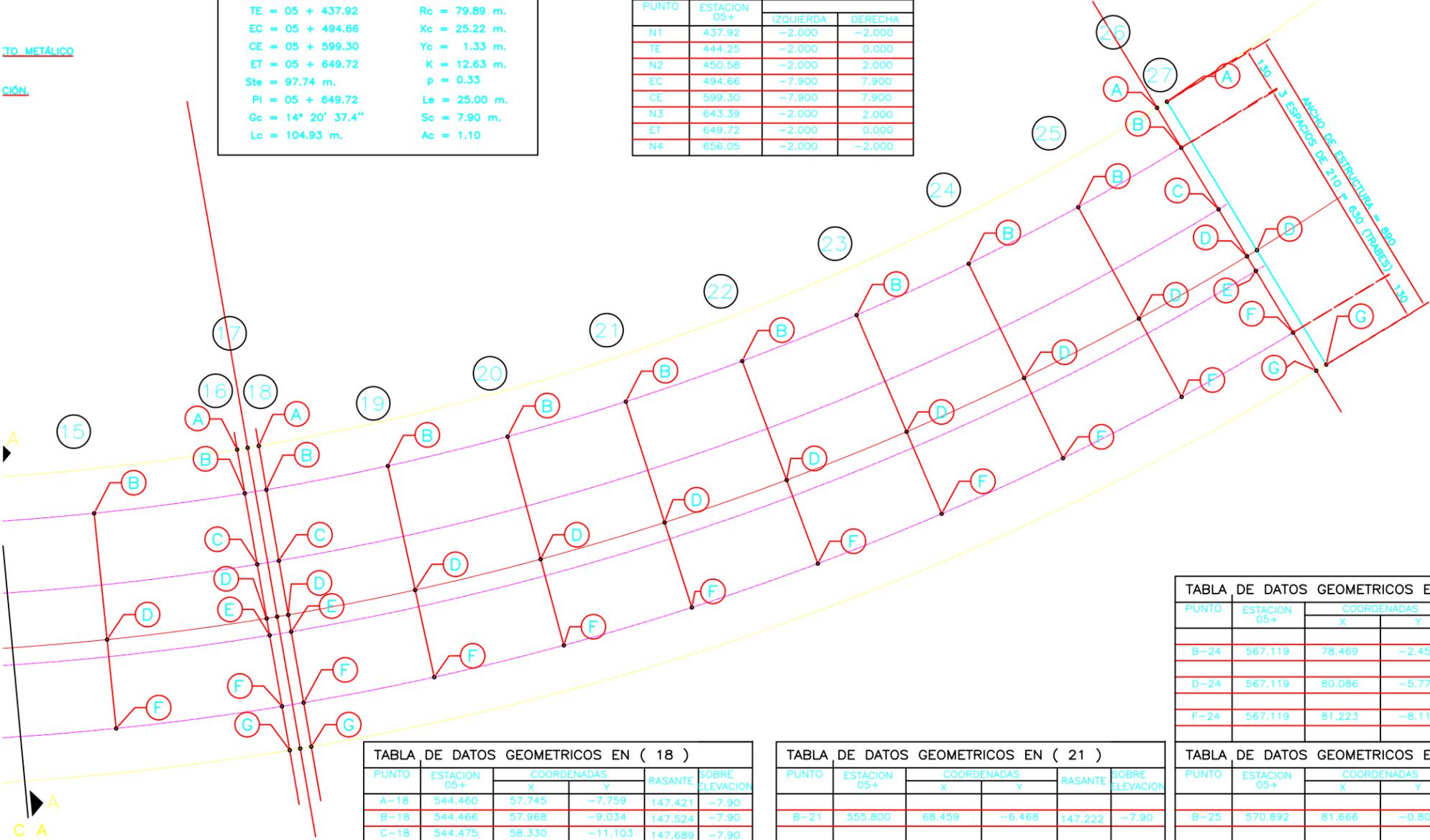
PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-15	539.171	52.939	-9.721	147.579	-7.90
D-15	539.171	53.317	-13.402	147.871	-7.90
F-15	539.171	53.582	-15.988	147.871	7.90

DATOS DE CURVA HORIZONTAL

TIPO DE CAMINO = C	
TE = 05 + 437.92	Rc = 79.89 m.
EC = 05 + 494.66	Xc = 25.22 m.
CE = 05 + 599.30	Yc = 1.33 m.
ET = 05 + 649.72	K = 12.63 m.
Ste = 97.74 m.	p = 0.33
PI = 05 + 649.72	Le = 25.00 m.
Gc = 14° 20' 37.4"	Sc = 7.90 m.
Lc = 104.93 m.	Ac = 1.10

PUNTO	ESTACION 05+	SOBREELEVACIONES	
		IZQUIERDA	DERECHA
N1	437.92	-2.000	-2.000
TE	444.25	-2.000	0.000
N2	450.58	-2.000	2.000
EC	494.66	-7.900	7.900
CE	599.30	-7.900	7.900
N3	643.39	-2.000	2.000
ET	649.72	-2.000	0.000
N4	656.05	-2.000	-2.000

TO METÁLICO
CIÓN.



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN

NOTAS

- ELEVACIONES EN METROS REFERIDOS AL BANCO DE NIVEL.
- DIMENSIONES EN CENTIMETROS, EXCEPTO DONDE SE INDIQUE OTRA UNIDAD.
- ESPECIFICACIONES :
 - LA ÚLTIMA EDICIÓN DE LAS NORMAS PARA CONSTRUCCIÓN E INSTALACION DE LA SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES HACIENDO REFERENCIA AL LIBRO 3.01.02 (ESTRUCTURAS Y OBRAS DE DRENAJE), Y EN PARTICULAR A LOS SIGUIENTES CAPITULOS :
 - 022 EXCAVACION PARA ESTRUCTURA
 - 023 RELLENOS
 - 026 CONCRETO HIDRAULICO
 - 027 ACERO PARA CONCRETO HIDRAULICO
 - 028 ESTRUCTURA DE CONCRETO REFORZADO
 - 029 ESTRUCTURA DE CONCRETO PRESFORZADO
- NOTAS IMPORTANTE:
 - EL INGENIERO RESIDENTE DEBERA VERIFICAR LAS DIMENSIONES GENERALES ANTES DEL INICIO DE LAS OBRAS.
 - LOS VOLUMENES EXCEDENTES DEBERAN SER JUSTIFICADOS Y CUANTIFICADOS OPORTUNAMENTE POR EL INGENIERO RESIDENTE A CARGO DE LA OBRA.

NOTA: ESTE PLANO SUSTITUYE TODOS LOS ANTERIORES CON FECHA DE MAYO DE 2010

Tabla de datos geométricos en (16)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-16	543.777	57.114	-7.864	147.435	-7.90
C-16	543.795	57.337	-9.139	147.537	-7.90
D-16	543.822	57.699	-11.208	147.702	-7.90
E-16	543.842	57.975	-12.784	147.828	-7.90
F-16	543.847	58.061	-13.277	147.868	7.90
G-16	543.872	58.423	-15.345	148.032	7.90
H-16	543.886	58.648	-16.626	148.179	7.90

Tabla de datos geométricos en (17)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-17	544.108	57.420	-7.814	147.388	-7.90
C-17	544.152	58.281	-12.734	147.782	-7.90
D-17	544.183	58.954	-16.575	147.782	7.90

Tabla de datos geométricos en (18)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
A-18	544.460	57.745	-7.759	147.421	-7.90
B-18	544.466	57.968	-9.034	147.524	-7.90
C-18	544.475	58.330	-11.103	147.689	-7.90
D-18	544.481	58.606	-12.679	147.816	-7.90
E-18	544.484	58.692	-13.171	147.856	7.90
F-18	544.491	59.055	-15.240	148.020	7.90
G-18	544.497	59.279	-16.521	148.124	7.90

Tabla de datos geométricos en (19)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-19	548.254	61.514	-8.342	147.405	-7.90
D-19	548.254	62.309	-11.956	147.697	-7.90
F-19	548.254	62.867	-14.495	147.697	7.90

Tabla de datos geométricos en (20)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-20	552.027	65.009	-7.487	147.318	-7.90
D-20	552.027	65.973	-11.059	147.610	-7.90
F-20	552.027	66.651	-13.569	147.610	7.90

Tabla de datos geométricos en (21)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-21	555.800	68.459	-6.468	147.222	-7.90
D-21	555.800	69.591	-9.990	147.514	-7.90
F-21	555.800	70.386	-12.466	147.514	7.90

Tabla de datos geométricos en (22)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-22	559.573	71.858	-5.287	147.116	-7.90
D-22	559.573	73.155	-8.752	147.408	-7.90
F-22	559.573	74.066	-11.187	147.408	7.90

Tabla de datos geométricos en (23)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-23	563.346	75.197	-3.946	147.003	-7.90
D-23	563.346	76.656	-7.347	147.295	-7.90
F-23	563.346	77.681	-9.736	147.295	7.90

Tabla de datos geométricos en (24)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-24	567.119	78.469	-2.450	146.880	-7.90
D-24	567.119	80.086	-5.778	147.172	-7.90
F-24	567.119	81.223	-8.116	147.172	7.90

Tabla de datos geométricos en (25)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
B-25	570.892	81.666	-0.801	146.748	-7.90
D-25	570.892	83.439	-4.048	147.040	-7.90
F-25	570.892	84.685	-6.330	147.040	7.90

Tabla de datos geométricos en (26)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
A-26	574.472	83.967	2.094	146.552	-7.90
B-26	574.472	84.673	0.931	146.655	-7.90
C-26	574.472	85.762	-0.865	146.821	-7.90
D-26	574.472	86.592	-2.233	146.947	-7.90
E-26	574.472	86.851	-2.660	146.987	7.90
F-26	574.472	87.941	-4.455	147.152	7.90
G-26	574.472	88.615	-5.567	147.255	7.90

Tabla de datos geométricos en (27)

PUNTO	ESTACION 05+	COORDENADAS		RASANTE	SOBRE ELEVACION
		X	Y		
A-27	574.835	84.257	2.272	146.498	-7.90
B-27	574.812	86.882	-2.056	146.895	-7.90
G-27	574.796	88.905	-5.390	147.203	7.90

CUADRO DE REVISIONES		
No.	FECHA	DESCRIPCIÓN
01	May-2010	REVISION GENERAL DEL PROYECTO
02	Jun-2010	CAMBIO DEL ALINEAMIENTO VERTICAL.

R. AYUNTAMIENTO DE NUEVO LAREDO
SECRETARIA DE OBRAS PÚBLICAS, DESARROLLO URBANO, MEDIO AMBIENTE Y SERVICIOS MUNICIPALES

ENTRONQUE: **BLVD. AEROPUERTO - RADIAL III**

PLANO DE GEOMETRÍA

ESTRUCTURA: **P. S. V. "BLVD. AEROPUERTO"**

T R A M O	KILOMETRO	ORIGEN
Ciudad de Nuevo Laredo	-----	TAMAUPLIPAS

PRESIDENCIA MUNICIPAL DE NUEVO LAREDO

Ing. Ramón Garza Barrios
DIRECTOR DE PROYECTOS ESTRATEGICOS

Ing. Mario Alberto Salinas Falcón
SUBDIRECTOR DE PROYECTOS ESTRATEGICOS

Ing. D. Cortés B.
DIBUJO

FECHA: JUNIO 2010 PLANO: 02/36

APENDICE E. PUBLICACION DE LA RED



Ahora Primera Hora Ultima Hora Clasificados Edición Impresa Entretenimiento Multimedia Publicidad



No será abierto puente de la Radial III por inseguro; Director de Obras Públicas

29/01/2011 - 08:11 AM Por Nora Morales Morales

Nora Morales Morales

El puente vehicular de la avenida Aeropuerto y Radial III no será abierto a la circulación por ser inseguro para la ciudadanía ya que se cometieron errores al colocar la infraestructura.

El ingeniero Luis Martínez Llano, director de Obras Públicas, dijo que en 10 días esperan tener los resultados del dictamen que realizan especialistas de la Universidad Autónoma de Nuevo León y podrán saber qué tan seguro es para el tráfico vehicular.

"La misma constructora nos informó que una viga de la estructura cuando se colocó estaba torcida, la enderezaron y reforzaron pero hay malos antecedentes de puentes curvos como en Torreón y Veracruz en donde uno tuvo que ser demolido y el otro se cayó sólo porque requieren de una infraestructura especial".

Agregó que el puente curvo tiene un avance del 98 por ciento y aún cuando la constructora responsable concluya la obra no será abierto al tráfico de vehículos hasta que se tengan los resultados de los especialistas.

"Ahorita tampoco podemos hablar de una demolición porque no se tiene el resultado del dictamen esto será hasta que haya concluido el estudio, de igual forma el dictamen que se realiza a los otros puentes", explicó.

Martínez Llano finalmente comentó que sigue la supervisión de 25 obras que quedaron inconclusas de la administración anterior, en el caso del puente de la colonia Fovissste éste será reparado por la propia constructora con la garantía de obra.

APENDICE F. RESULTADOS DE PRUEBA EXPERIMENTAL DE CAMPO

RESULTADOS PRUEBAS DE CARGA EN PUENTE VEHICULAR

OBRA: PUENTE RADIAL III
LOCALIZACIÓN: NUEVO LAREDO, TAMAULIPAS

UBICACIÓN DE LA PRUEBA: CLARO EXTREMO SUR, PRUEBA 1



FECHA Y HORA	CONDICIÓN DE CARGA	DEFORMACIONES Y DESPLAZAMIENTOS		
		Strain gage No. 1 me	Extensómetro 1 mm	Extensómetro 2 mm
02/03/2011 12:39:39 p.m	"CEROS"	0	0.014	0.025
02/03/2011 12:41:06 p.m	CAMIÓN C2	59	18.31	0.727
02/03/2011 12:41:55 p.m	CAMIÓN C1	81	20.67	7.028
02/03/2011 12:45:39 p.m	SE RETIRA CAMIÓN C1	68	19.45	0.968
02/03/2011 12:48:23 p.m	SE RETIRA CAMIÓN C2	10	1.386	0.295

UBICACIÓN DE LA PRUEBA: CLARO EXTREMO SUR, PRUEBA 2 (REPETICIÓN DE PRUEBA 1)

FECHA Y HORA	CONDICIÓN DE CARGA	DEFORMACIONES Y DESPLAZAMIENTOS		
		Strain gage No. 1 me	Extensómetro 1 mm	Extensómetro 2 mm
02/03/2011 12:52:57 p.m	"CEROS"	0	-0.052	0.01
02/03/2011 12:54:26 p.m	CAMIÓN C2	61	17.45	0.857
02/03/2011 12:55:21 p.m	CAMIÓN C1	72	19.02	7.192
02/03/2011 12:56:43 p.m	SE RETIRA CAMIÓN C1	56	17.72	0.937
02/03/2011 12:58:24 p.m	SE RETIRA CAMIÓN C2	-3	0.032	0.039

UBICACIÓN DE LA PRUEBA: CLARO EXTREMO SUR, PRUEBA 3 (DINÁMICA)

FECHA Y HORA	CONDICIÓN DE CARGA	DEFORMACIONES Y DESPLAZAMIENTOS		
		Strain gage No. 1 me	Extensómetro 1 mm	Extensómetro 2 mm
02/03/2011 12:59:25 p.m	"CEROS"	0	-0.001	0.007
02/03/2011 01:05:21 p.m	CAMIÓN C2	56	15.58	0.777
02/03/2011 01:07:05 p.m	CAMIÓN C1	-9	0.833	5.665
02/03/2011 01:07:32 p.m	SIN CARGA	-23	-0.187	0.119

RESULTADOS PRUEBAS DE CARGA EN PUENTE VEHICULAR

OBRA: PUENTE RADIAL III
LOCALIZACIÓN: NUEVO LAREDO, TAMAULIPAS

UBICACIÓN DE LA PRUEBA: CLARO CENTRAL, PRUEBA 1



FECHA Y HORA	CONDICIÓN DE CARGA	DESPLAZAMIENTOS		
			Extensómetro 1 mm	Extensómetro 2 mm
02/03/2011 02:26:14 p.m	"CEROS"	-	0.007	0.011
02/03/2011 02:32:18 p.m	CAMIÓN C2	-	0.437	15.45
02/03/2011 02:33:44 p.m	CAMIÓN C1	-	7.305	16.81
02/03/2011 02:35:21 p.m	SE RETIRA CAMIÓN C1	-	1.08	15.44
02/03/2011 02:36:51 p.m	SE RETIRA CAMIÓN C2	-	0.066	0.797

UBICACIÓN DE LA PRUEBA: CLARO CENTRAL, PRUEBA 2 (REPETICIÓN DE PRUEBA 1)

FECHA Y HORA	CONDICIÓN DE CARGA	DESPLAZAMIENTOS		
			Extensómetro 1 mm	Extensómetro 2 mm
02/03/2011 02:37:44 p.m	"CEROS"	-	-0.07	0.025
02/03/2011 02:39:41 p.m	CAMIÓN C2	-	7.472	16.13
02/03/2011 02:40:57 p.m	CAMIÓN C1	-	7.509	13.08
02/03/2011 02:42:21 p.m	SE RETIRA CAMIÓN C1	-	0.696	15.59
02/03/2011 02:43:21 p.m	SE RETIRA CAMIÓN C2	-	0.077	0.381

UBICACIÓN DE LA PRUEBA: CLARO CENTRAL , PRUEBA 3 (DINÁMICA)

FECHA Y HORA	CONDICIÓN DE CARGA	DESPLAZAMIENTOS		
			Extensómetro 1 mm	Extensómetro 2 mm
02/03/2011 02:43:47 p.m	"CEROS"	-	0.022	-0.012
02/03/2011 02:46:30 p.m	CAMIÓN C2	-	0.592	15.14
02/03/2011 02:47:33 p.m	CAMIÓN C1	-	7.263	-0.263
02/03/2011 02:48:00 p.m	SIN CARGA	-	-0.001	-0.223

APENDICE G. ETAPAS DE ANALISIS

Proyecto de investigación: Puente Radial III
 Ubicación: Nuevo Laredo, Tamaulipas

OBTENCIÓN DE RESULTADOS EN LAS DISTINTAS ETAPAS DEL ANÁLISIS PARA EL CLARO COMPRENDIDO ENTRE LOS EJES 1 Y 2

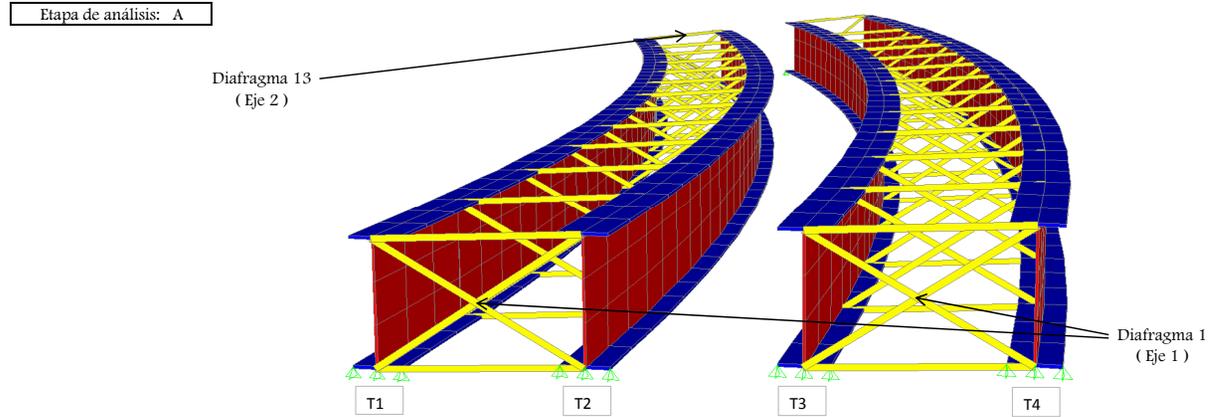


Figura 74. Etapa de análisis A correspondiente al claro comprendido entre los ejes 1 y 2 del puente Radial III

		Eje 1												Eje 2
		Diaf 1	Diaf 2	Diaf 3	Diaf 4	Diaf 5	Diaf 6	Diaf 7	Diaf 8	Diaf 9	Diaf 10	Diaf 11	Diaf 12	Diaf 13
Deflexiones (cm)	T1	0	0.234	0.442	0.615	0.747	0.833	0.869	0.853	0.786	0.669	0.506	0.302	0
	T2	0	0.498	0.972	1.393	1.731	1.962	2.071	2.05	1.9	1.632	1.263	0.819	0
	T3	0	0.399	0.756	1.06	1.3	1.467	1.557	1.564	1.488	1.331	1.097	0.794	0
	T4	0	0.85	1.667	2.405	3.016	3.462	3.714	3.759	3.591	3.223	2.675	1.982	0

			Eje 1											Eje 2	
			1 (Eje 1)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 (Eje 2)
Esfuerzos (kg/cm ²)	T1	Comp	-27	-38	-12	-65	-99	-118	-128	-125	-110	-82	-40	-44	-25
		Tens	81	161	95	77	65	63	70	62	52	65	89	121	92
	T2	Comp	-22	-120	-161	-282	-370	-426	-433	-447	-409	-342	-237	-207	-17
		Tens	95	22	56	100	130	138	148	145	146	125	89	57	43
	T3	Comp	-40	-81	-1	-50	-84	-106	-121	-120	-115	-100	-65	-59	-43
		Tens	129	210	131	110	79	55	62	69	72	66	83	75	125
	T4	Comp	-26	-148	-204	-356	-471	-552	-566	-604	-576	-513	-403	-295	-23
		Tens	73	11	68	133	181	215	233	235	205	193	139	79	43

Proyecto de investigación: Puente Radial III
 Ubicación: Nuevo Laredo, Tamaulipas

OBTENCIÓN DE RESULTADOS EN LAS DISTINTAS ETAPAS DEL ANÁLISIS PARA EL CLARO COMPRENDIDO ENTRE LOS EJES 1 Y 2

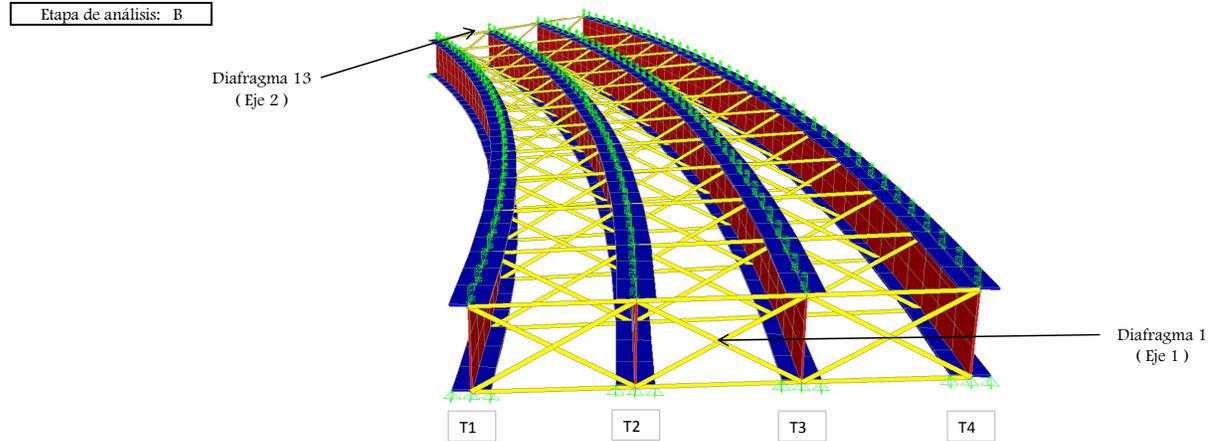


Figura 75. Etapa de análisis B correspondiente al claro comprendido entre los ejes 1 y 2 del puente Radial III

		Eje 1											Eje 2	
		Diaf 1	Diaf 2	Diaf 3	Diaf 4	Diaf 5	Diaf 6	Diaf 7	Diaf 8	Diaf 9	Diaf 10	Diaf 11	Diaf 12	Diaf 13
Deflexiones (cm)	T1	0	0.337	0.629	0.867	1.046	1.158	1.201	1.174	1.078	0.915	0.692	0.414	0
	T2	0	0.504	0.967	1.367	1.685	1.904	2.012	2	1.878	1.639	1.294	0.859	0
	T3	0	0.673	1.311	1.877	2.336	2.663	2.838	2.851	2.67	2.391	1.94	1.372	0
	T4	0	0.859	1.682	2.422	3.032	3.472	3.716	3.753	3.576	3.202	2.653	1.963	0

		Eje 1											Eje 2		
		1 (Eje 1)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 (Eje 2)	
Esfuerzos (kg/cm ²)	T1	Comp	-42	-165	-106	-121	-184	-221	-230	-225	-198	-147	-88	-80	-35
		Tens	557	335	168	239	290	320	335	327	295	251	221	180	35
	T2	Comp	-44	-202	-188	-245	-335	-389	-427	-427	-393	-338	-246	-211	-27
		Tens	437	211	130	233	315	370	395	395	366	315	238	176	205
	T3	Comp	-42	-212	-231	-346	-465	-541	-585	-585	-546	-475	-343	-318	-21
		Tens	322	127	156	240	348	415	450	460	425	355	245	185	442
	T4	Comp	-40	-227	-290	-437	-582	-679	-710	-723	-675	-585	-415	-425	-22
		Tens	229	70	126	246	381	465	515	515	470	385	250	191	230

Proyecto de investigación: Puente Radial III
 Ubicación: Nuevo Laredo, Tamaulipas

OBTENCIÓN DE RESULTADOS EN LAS DISTINTAS ETAPAS DEL ANÁLISIS PARA EL CLARO COMPRENDIDO ENTRE LOS EJES 1 Y 2

Etapa de análisis: C

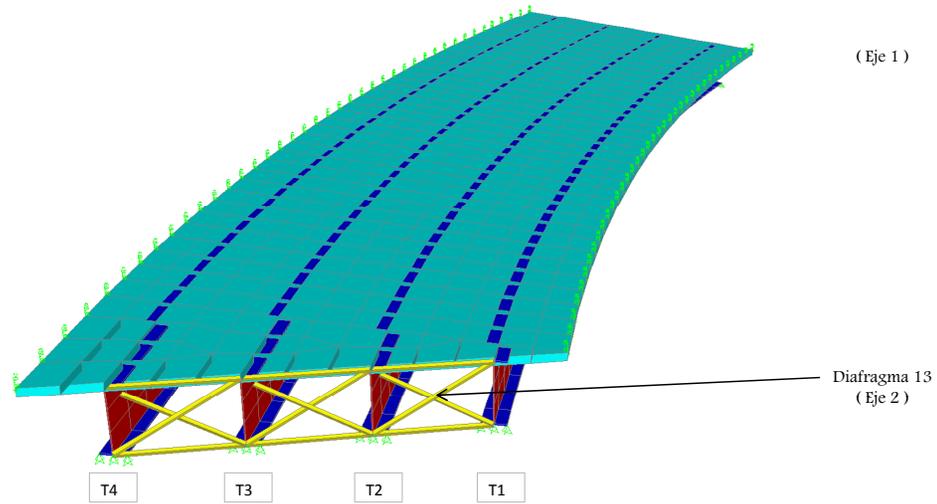


Figura 76. Etapa de análisis C correspondiente al claro comprendido entre los ejes 1 y 2 del puente Radial III

		Eje 1												Eje 2
		Diaf 1	Diaf 2	Diaf 3	Diaf 4	Diaf 5	Diaf 6	Diaf 7	Diaf 8	Diaf 9	Diaf 10	Diaf 11	Diaf 12	Diaf 13
Deflexiones (cm)	T1	0	0.073	0.144	0.207	0.256	0.287	0.298	0.29	0.261	0.216	0.156	0.088	0
	T2	0	0.07	0.141	0.208	0.264	0.304	0.324	0.321	0.297	0.253	0.193	0.122	0
	T3	0	0.074	0.154	0.233	0.302	0.353	0.356	0.387	0.366	0.37	0.254	0.174	0
	T4	0	0.089	0.186	0.284	0.371	0.438	0.48	0.491	0.471	0.422	0.347	0.252	0

		Eje 1											Eje 2		
		1 (Eje 1)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 (Eje 2)	
Esfuerzos (kg/cm ²)	T1	Tens	66	16	38	40	50	55	55	55	45	29	14	8	9
	T2	Tens	60	13	18	25	43	55	61	60	52	38	19	16	5
	T3	Tens	15	5	5	16	40	60	71	70	68	53	28	15	5
	T4	Tens	5	5	5	13	50	75	90	93	91	75	45	19	5

Proyecto de investigación: Puente Radial III
 Ubicación: Nuevo Laredo, Tamaulipas

OBTENCIÓN DE RESULTADOS EN LAS DISTINTAS ETAPAS DEL ANÁLISIS PARA EL CLARO COMPRENDIDO ENTRE LOS EJES 1 Y 2

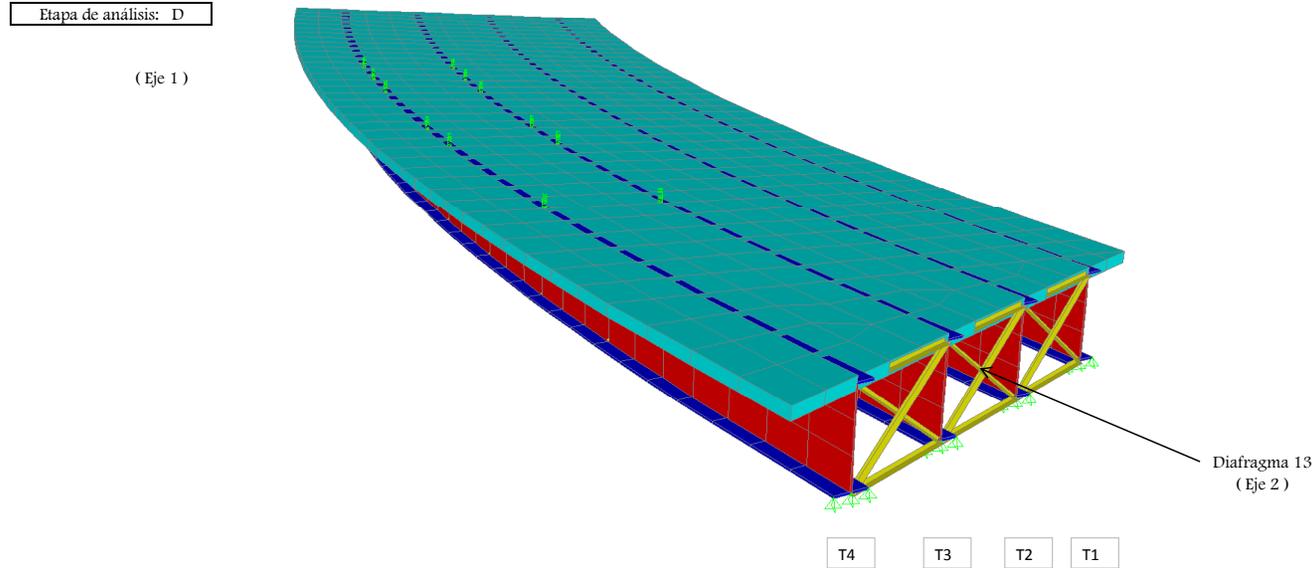


Figura 77. Etapa de análisis D correspondiente al claro comprendido entre los ejes 1 y 2 del puente Radial III

		Eje 1											Eje 2	
		Diaf 1	Diaf 2	Diaf 3	Diaf 4	Diaf 5	Diaf 6	Diaf 7	Diaf 8	Diaf 9	Diaf 10	Diaf 11	Diaf 12	Diaf 13
Deflexiones (cm)	T1	0	0.153	0.314	0.464	0.59	0.675	0.708	0.693	0.628	0.513	0.366	0.201	0
	T2	0	0.166	0.343	0.518	0.671	0.782	0.836	0.834	0.771	0.651	0.491	0.306	0
	T3	0	0.174	0.371	0.572	0.756	0.896	0.973	0.982	0.922	0.796	0.623	0.419	0
	T4	0	0.184	0.399	0.629	0.845	1.017	1.118	1.142	1.085	0.951	0.762	0.538	0

		Eje 1											Eje 2		
		1 (Eje 1)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 (Eje 2)	
Esfuerzos (kg/cm ²)	T1	Tens	147	15	53	59	102	167	133	124	100	51	17	5	6
	T2	Tens	86	10	5	39	105	158	167	161	155	93	35	10	10
	T3	Tens	5	15	10	22	105	177	205	210	191	125	57	13	20
	T4	Tens	15	20	15	5	112	193	246	259	235	162	81	10	36

Proyecto de investigación: Puente Radial III

Ubicación: Nuevo Laredo, Tamaulipas

OBTENCIÓN DE RESULTADOS EN LAS DISTINTAS ETAPAS DEL ANÁLISIS PARA EL CLARO COMPRENDIDO ENTRE LOS EJES 1 Y 2

Resultados Finales

		Eje 1												Eje 2
		Diaf 1	Diaf 2	Diaf 3	Diaf 4	Diaf 5	Diaf 6	Diaf 7	Diaf 8	Diaf 9	Diaf 10	Diaf 11	Diaf 12	Diaf 13
Sumatoria final de deflexiones (cm)	T1	0	0.644	1.215	1.689	2.049	2.278	2.368	2.317	2.125	1.8	1.354	0.804	0
	T2	0	1.072	2.08	2.968	3.68	4.17	4.407	4.371	4.075	3.524	2.75	1.8	0
	T3	0	1.146	2.221	3.17	3.938	4.483	4.751	4.802	4.524	4.092	3.291	2.34	0
	T4	0	1.798	3.535	5.111	6.419	7.372	7.91	8.003	7.638	6.847	5.675	4.197	0

		Eje 1												Eje 2	
		1 (Eje 1)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 (Eje 2)	
Sumatoria final de esfuerzos (kg/cm ²)	T1	Comp	-69	-203	-118	-186	-283	-339	-358	-350	-308	-229	-128	-124	-60
		Tens	851	527	354	415	507	605	593	568	492	396	341	314	142
	T2	Comp	-66	-322	-349	-527	-705	-815	-860	-874	-802	-680	-483	-418	-44
		Tens	678	256	209	397	593	721	771	761	719	571	381	259	263
	T3	Comp	-82	-293	-232	-396	-549	-647	-706	-705	-661	-575	-408	-377	-64
		Tens	471	357	302	388	572	707	788	809	756	599	413	288	592
	T4	Comp	-66	-375	-494	-793	-1053	-1231	-1276	-1327	-1251	-1098	-818	-720	-45
		Tens	322	106	214	397	724	948	1084	1102	1001	815	515	299	314

Proyecto de investigación: Puente Radial III
 Ubicación: Nuevo Laredo, Tamaulipas

OBTENCIÓN DE RESULTADOS EN LAS DISTINTAS ETAPAS DEL ANÁLISIS PARA EL CLARO COMPRENDIDO ENTRE LOS EJES 2 Y 3

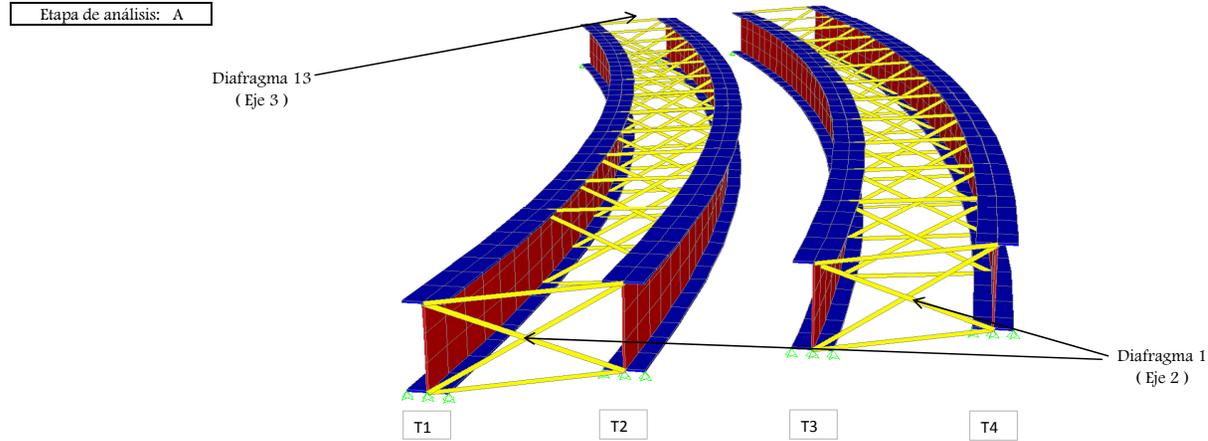


Figura 78. Etapa de análisis A correspondiente al claro comprendido entre los ejes 2 y 3 del puente Radial III

		Eje 2												Eje 3
		Diaf 1	Diaf 2	Diaf 3	Diaf 4	Diaf 5	Diaf 6	Diaf 7	Diaf 8	Diaf 9	Diaf 10	Diaf 11	Diaf 12	Diaf 13
Deflexiones (cm)	T1	0	0.622	0.834	1	1.112	1.167	1.162	1.097	0.973	0.794	0.567	0.3	0
	T2	0	1.166	1.706	2.151	2.468	2.638	2.647	2.496	2.194	1.762	1.227	0.628	0
	T3	0	0.428	0.663	0.855	0.994	1.074	1.093	1.047	0.94	0.774	0.556	0.295	0
	T4	0	0.729	1.297	1.788	2.162	2.392	2.461	2.363	2.104	1.705	1.195	0.613	0

		Eje 2												Eje 3	
		1 (Eje 2)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 (Eje 3)	
Esfuerzos (kg/cm ²)	T1	Comp	-31	-65	-55	-93	-111	-119	-119	-108	-88	-55	-6	-71	-30
		Tens	107	96	75	54	42	33	33	43	63	90	120	179	100
	T2	Comp	-28	-188	-305	-411	-479	-514	-515	-482	-416	-316	-183	-132	-18
		Tens	107	28	105	152	181	196	198	185	160	120	67	17	89
	T3	Comp	-29	-121	-35	-82	-111	-128	-132	-124	-103	-69	-15	-73	-29
		Tens	98	152	102	65	50	35	31	38	47	82	112	169	90
	T4	Comp	-25	-119	-219	-346	-434	-485	-500	-477	-419	-323	-190	-135	-18
		Tens	165	10	77	118	158	178	184	176	144	120	72	29	102

Proyecto de investigación: Puente Radial III
 Ubicación: Nuevo Laredo, Tamaulipas

OBTENCIÓN DE RESULTADOS EN LAS DISTINTAS ETAPAS DEL ANÁLISIS PARA EL CLARO COMPRENDIDO ENTRE LOS EJES 2 Y 3

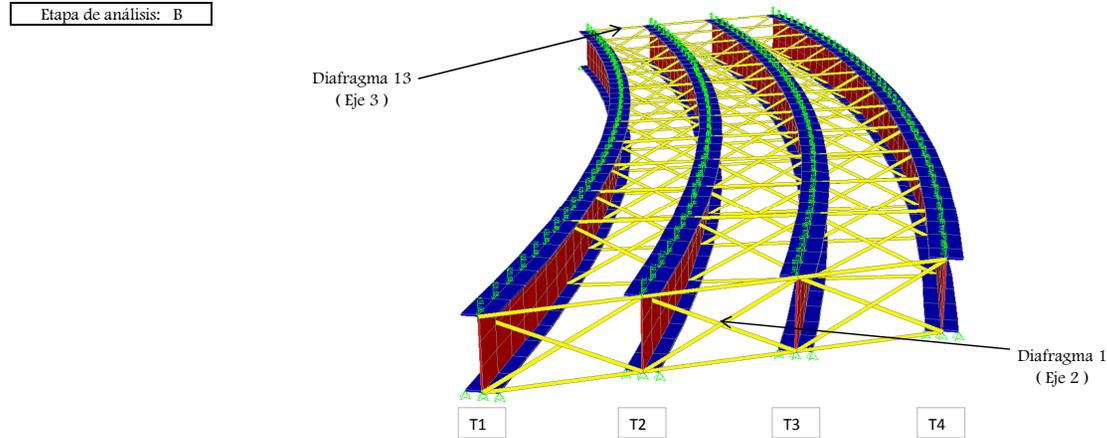


Figura 79. Etapa de análisis B correspondiente al claro comprendido entre los ejes 2 y 3 del puente Radial III

		Eje 2												Eje 3
		Diaf 1	Diaf 2	Diaf 3	Diaf 4	Diaf 5	Diaf 6	Diaf 7	Diaf 8	Diaf 9	Diaf 10	Diaf 11	Diaf 12	Diaf 13
Deflexiones (cm)	T1	0	0.783	1.042	1.24	1.37	1.428	1.415	1.33	1.177	0.959	0.684	0.361	0
	T2	0	0.852	1.232	1.541	1.763	1.885	1.899	1.803	1.602	1.304	0.925	0.483	0
	T3	0	0.884	1.402	1.839	2.164	2.355	2.399	2.292	2.04	1.657	1.168	0.604	0
	T4	0	0.892	1.578	2.165	2.609	2.878	2.954	2.833	2.523	2.045	1.435	0.738	0

			Eje 2												Eje 3
			1 (Eje 2)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 (Eje 3)
Esfuerzos (kg/cm ²)	T1	Comp	-35	-252	-130	-2.15	-257	-280	-275	-260	-216	-148	-115	-162	-42
		Tens	220	267	208	273	312	329	327	305	270	210	117	268	462
	T2	Comp	-28	-247	-186	-295	-355	-405	-410	-382	-327	-245	-170	-195	-43
		Tens	255	208	196	287	347	381	390	369	317	238	130	214	430
	T3	Comp	-25	-232	-253	-380	-475	-525	-535	-505	-442	-335	-221	-211	-45
		Tens	335	120	193	301	387	435	444	420	357	257	135	154	335
	T4	Comp	-27	-175	-325	-490	-600	-665	-680	-645	-565	-431	-285	-222	-41
		Tens	460	45	195	320	424	481	493	465	389	268	131	90	247

Proyecto de investigación: Puente Radial III
 Ubicación: Nuevo Laredo, Tamaulipas

OBTENCIÓN DE RESULTADOS EN LAS DISTINTAS ETAPAS DEL ANÁLISIS PARA EL CLARO COMPRENDIDO ENTRE LOS EJES 2 Y 3

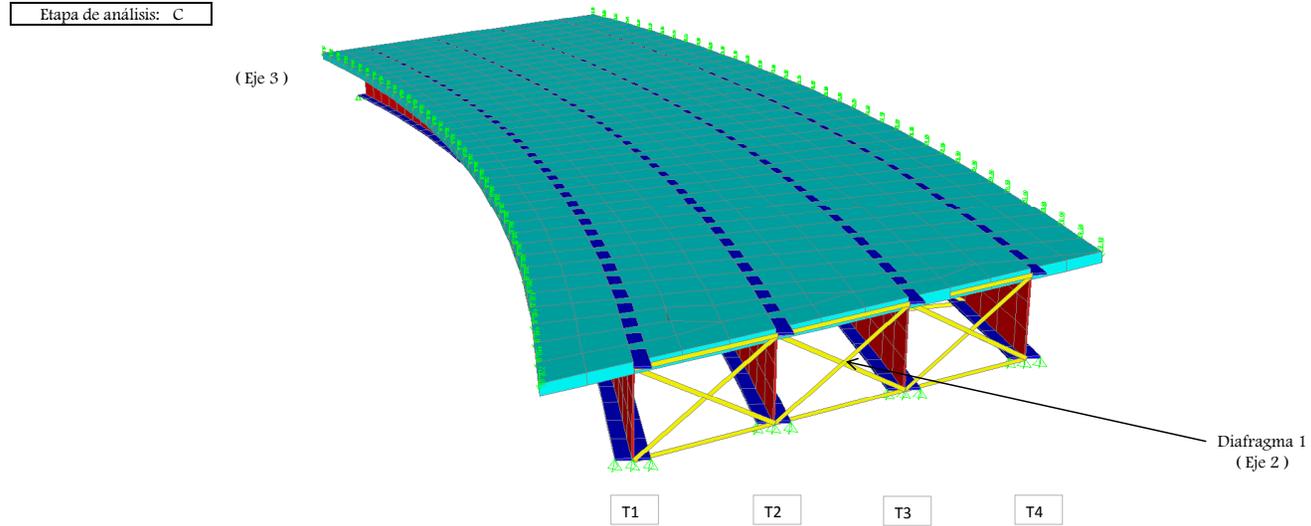


Figura 80. Etapa de análisis C correspondiente al claro comprendido entre los ejes 2 y 3 del puente Radial III

		Eje 2												Eje 3
		Diaf 1	Diaf 2	Diaf 3	Diaf 4	Diaf 5	Diaf 6	Diaf 7	Diaf 8	Diaf 9	Diaf 10	Diaf 11	Diaf 12	Diaf 13
Deflexiones (cm)	T1	0	0.194	0.269	0.328	0.369	0.388	0.385	0.358	0.312	0.247	0.169	0.084	0
	T2	0	0.141	0.213	0.275	0.32	0.345	0.347	0.326	0.284	0.224	0.152	0.075	0
	T3	0	0.109	0.183	0.25	0.302	0.334	0.342	0.325	0.285	0.226	0.153	0.075	0
	T4	0	0.094	0.177	0.255	0.319	0.361	0.376	0.361	0.32	0.255	0.174	0.087	0

			Eje 2												Eje 3
			1 (Eje 2)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 (Eje 3)
Esfuerzos (kg/cm ²)	T1	Tens	5	47	55	62	70	73	70	64	51	32	20	10	27
	T2	Tens	27	37	39	52	65	72	72	65	50	30	16	5	47
	T3	Tens	29	22	25	42	62	73	77	70	55	32	14	5	26
	T4	Tens	10	10	14	39	69	87	93	88	72	42	13	15	15

Proyecto de investigación: Puente Radial III
 Ubicación: Nuevo Laredo, Tamaulipas

OBTENCIÓN DE RESULTADOS EN LAS DISTINTAS ETAPAS DEL ANÁLISIS PARA EL CLARO COMPRENDIDO ENTRE LOS EJES 2 Y 3

Etapa de análisis: D

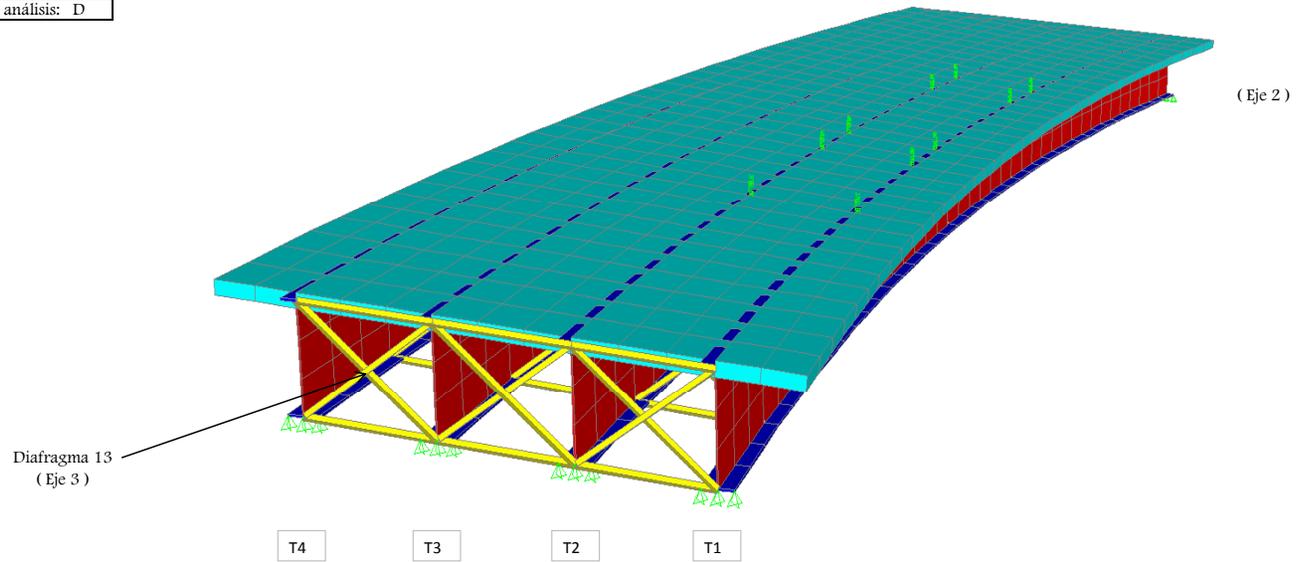


Figura 81. Etapa de análisis D correspondiente al claro comprendido entre los ejes 2 y 3 del puente Radial III

		Eje 2											Eje 3	
		Diaf 1	Diaf 2	Diaf 3	Diaf 4	Diaf 5	Diaf 6	Diaf 7	Diaf 8	Diaf 9	Diaf 10	Diaf 11	Diaf 12	Diaf 13
Deflexiones (cm)	T1	0	0.39	0.559	0.704	0.807	0.856	0.854	0.796	0.684	0.553	0.356	0.172	0
	T2	0	0.321	0.5	0.663	0.787	0.855	0.867	0.817	0.707	0.552	0.369	0.18	0
	T3	0	0.255	0.44	0.618	0.766	0.859	0.884	0.844	0.736	0.576	0.386	0.187	0
	T4	0	0.196	0.386	0.581	0.753	0.868	0.91	0.878	0.77	0.602	0.402	0.194	0

		Eje 2											Eje 3		
		1 (Eje 2)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 (Eje 3)	
Esfuerzos (kg/cm ²)	T1	Tens	11	25	85	125	155	158	165	152	103	47	18	25	55
	T2	Tens	7	31	55	112	161	177	189	177	120	58	9	18	41
	T3	Tens	6	5	25	86	158	205	209	201	149	69	11	18	8
	T4	Tens	32	5	5	62	163	217	242	236	176	81	11	30	10

Proyecto de investigación: Puente Radial III
 Ubicación: Nuevo Laredo, Tamaulipas

OBTENCIÓN DE RESULTADOS EN LAS DISTINTAS ETAPAS DEL ANÁLISIS PARA EL CLARO COMPRENDIDO ENTRE LOS EJES 2 Y 3

Resultados Finales

		Eje 2												Eje 3
		Diaf 1	Diaf 2	Diaf 3	Diaf 4	Diaf 5	Diaf 6	Diaf 7	Diaf 8	Diaf 9	Diaf 10	Diaf 11	Diaf 12	Diaf 13
Sumatoria final de deflexiones (cm)	T1	0	1.599	2.145	2.568	2.851	2.983	2.962	2.785	2.462	2	1.42	0.745	0
	T2	0	2.159	3.151	3.967	4.551	4.868	4.893	4.625	4.08	3.29	2.304	1.186	0
	T3	0	1.421	2.248	2.944	3.46	3.763	3.834	3.664	3.265	2.657	1.877	0.974	0
	T4	0	1.715	3.052	4.208	5.09	5.631	5.791	5.557	4.947	4.005	2.804	1.438	0

			Eje 2												Eje 3
			1 (Eje 2)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 (Eje 3)
Sumatoria final de esfuerzos (kg/cm ²)	T1	Comp	-66	-317	-185	-95.15	-368	-399	-394	-368	-304	-203	-121	-233	-72
		Tens	343	435	423	514	579	593	595	564	487	379	275	482	644
	T2	Comp	-56	-435	-491	-706	-834	-919	-925	-864	-743	-561	-353	-327	-61
		Tens	396	304	395	603	754	826	849	796	647	446	222	254	607
	T3	Comp	-54	-353	-288	-462	-586	-653	-667	-629	-545	-404	-236	-284	-74
		Tens	468	299	345	494	657	748	761	729	608	440	272	346	459
	T4	Comp	-52	-294	-544	-836	-1034	-1150	-1180	-1122	-984	-754	-475	-357	-59
		Tens	667	70	291	539	814	963	1012	965	781	511	227	164	374

Proyecto de investigación: Puente Radial III
 Ubicación: Nuevo Laredo, Tamaulipas

OBTENCIÓN DE RESULTADOS EN LAS DISTINTAS ETAPAS DEL ANÁLISIS PARA EL CLARO COMPENDIDO ENTRE LOS EJES 3 Y 4

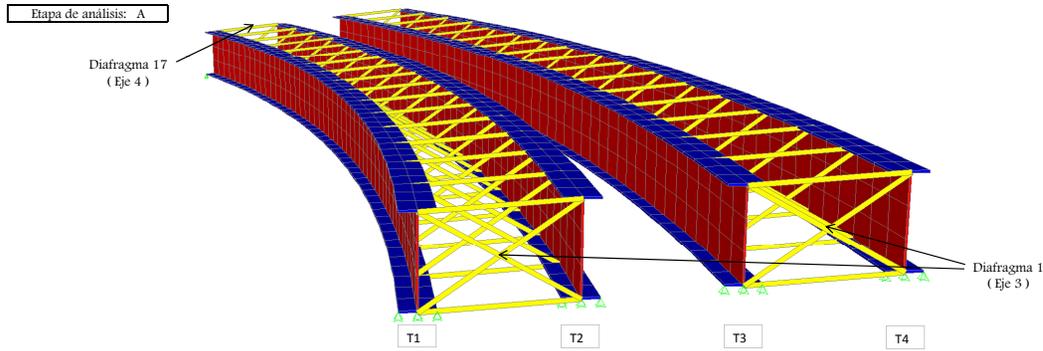


Figura 82. Etapa de análisis A correspondiente al claro comprendido entre los ejes 3 y 4 del puente Radial III

		Eje 3															Eje 4	
		Diaf 1	Diaf 2	Diaf 3	Diaf 4	Diaf 5	Diaf 6	Diaf 7	Diaf 8	Diaf 9	Diaf 10	Diaf 11	Diaf 12	Diaf 13	Diaf 14	Diaf 15	Diaf 16	Diaf 17
Deflexiones (cm)	T1	0	0.216	0.413	0.589	0.739	0.86	0.948	1	1.02	1	0.948	0.86	0.74	0.59	0.414	0.216	0
	T2	0	0.454	0.893	1.305	1.669	1.97	2.195	2.334	2.381	2.334	2.196	1.971	1.669	1.305	0.894	0.454	0
	T3	0	0.277	0.531	0.757	0.949	1.104	1.217	1.286	1.31	1.286	1.217	1.104	0.95	0.757	0.531	0.277	0
	T4	0	0.583	1.149	1.679	2.149	2.538	2.828	3	3.067	3	2.828	2.538	2.149	1.68	1.149	0.583	0

		Eje 3															Eje 4		
		1 (Eje 3)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17 (Eje 4)	
Esfuerzos (kg/cm ²)	T1	Comp	-30	-75	-47	-35	-72	-100	-116	-126	-131	-127	-117	-100	-73	-37	-48	-76	-28
		Tens	304	193	131	104	80	60	58	56	56	57	58	60	81	105	133	195	305
	T2	Comp	-35	-115	-162	-230	-326	-397	-450	-480	-491	-480	-450	-399	-326	-232	-165	-117	-36
		Tens	135	29	46	90	123	151	170	181	184	180	168	150	122	88	45	31	133
	T3	Comp	-35	-84	-48	-35	-74	-101	-120	-131	-132	-130	-118	-101	-75	-36	-50	-85	-34
		Tens	300	215	147	115	88	66	61	59	59	59	61	66	90	117	147	217	301
	T4	Comp	-30	-130	-180	-259	-365	-450	-508	-545	-559	-546	-509	-452	-368	-263	-183	-131	-30
		Tens	135	22	48	102	140	172	195	209	213	208	195	170	139	99	48	20	137

Proyecto de investigación: Puente Radial III
 Ubicación: Nuevo Laredo, Tamaulipas

OBTENCIÓN DE RESULTADOS EN LAS DISTINTAS ETAPAS DEL ANÁLISIS PARA EL CLARO COMPRENDIDO ENTRE LOS EJES 3 Y 4

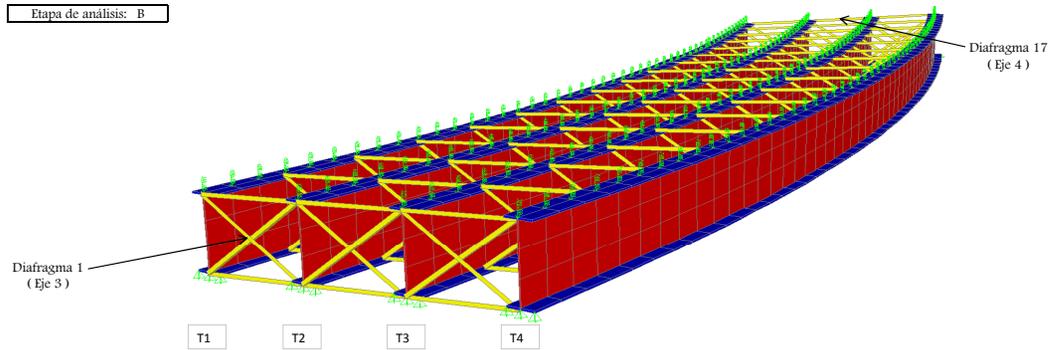


Figura 88. Etapa de análisis B correspondiente al claro comprendido entre los ejes 3 y 4 del puente Radial III

		Eje 3															Eje 4	
		Diaf 1	Diaf 2	Diaf 3	Diaf 4	Diaf 5	Diaf 6	Diaf 7	Diaf 8	Diaf 9	Diaf 10	Diaf 11	Diaf 12	Diaf 13	Diaf 14	Diaf 15	Diaf 16	Diaf 17
Deflexiones (cm)	T1	0	0.282	0.538	0.764	0.955	1.107	1.218	1.286	1.309	1.286	1.219	1.108	0.955	0.764	0.538	0.283	0
	T2	0	0.399	0.773	1.113	1.407	1.647	1.823	1.931	1.968	1.931	1.823	1.647	1.408	1.113	0.773	0.399	0
	T3	0	0.516	1	1.466	1.867	2.196	2.439	2.59	2.64	2.59	2.44	2.196	1.867	1.467	1	0.516	0
	T4	0	0.642	1.263	1.844	2.357	2.781	3.096	3.291	3.357	3.291	3.097	2.781	2.357	1.844	1.264	0.642	0

		Eje 3															Eje 4		
		1 (Eje 3)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17 (Eje 4)	
Esfuerzos (kg/cm ²)	T1	Comp	-40	-160	-141	-79	-147	-192	-232	-246	-257	-251	-231	-195	-147	-80	-142	-160	-40
		Tens	520	336	245	203	235	280	306	327	331	326	306	280	235	202	245	335	518
	T2	Comp	-42	-188	-190	-171	-261	-326	-379	-401	-417	-406	-377	-327	-263	-172	-190	-190	-43
		Tens	442	240	202	196	255	318	362	386	395	386	363	318	255	196	200	238	442
	T3	Comp	-40	-195	-230	-250	-361	-449	-512	-550	-563	-550	-515	-450	-365	-253	-230	-200	-42
		Tens	347	158	155	186	271	354	405	445	457	445	407	353	272	185	153	155	345
	T4	Comp	-40	-200	-274	-325	-463	-568	-642	-690	-705	-690	-645	-571	-466	-329	-275	-200	-40
		Tens	245	90	114	175	286	385	456	498	511	500	457	385	287	174	113	87	249

Proyecto de investigación: Puente Radial III
 Ubicación: Nuevo Laredo, Tamaulipas

OBTENCIÓN DE RESULTADOS EN LAS DISTINTAS ETAPAS DEL ANÁLISIS PARA EL CLARO COMPRENDIDO ENTRE LOS EJES 3 Y 4

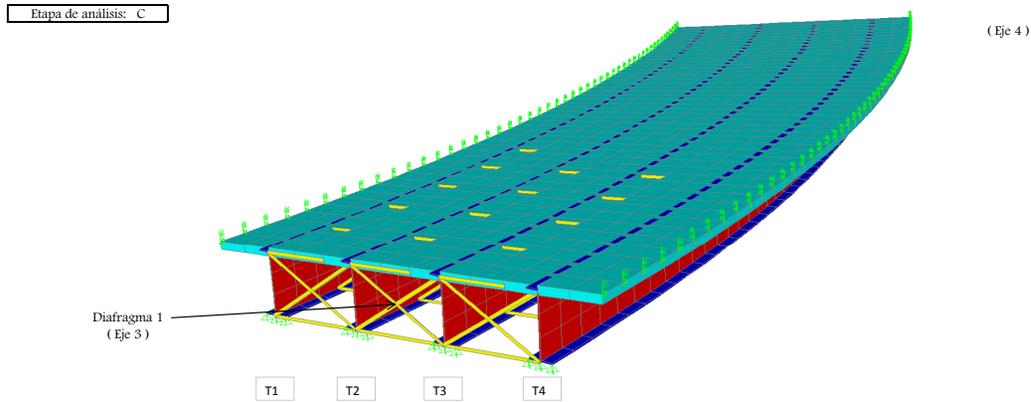


Figura 84. Etapa de análisis C correspondiente al claro comprendido entre los ejes 3 y 4 del puente Radial III

		Eje 3															Eje 4		
		1 (Eje 3)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17 (Eje 4)	
Deflexiones (cm)	T1	0	0.061	0.122	0.182	0.234	0.287	0.31	0.33	0.337	0.33	0.31	0.277	0.233	0.181	0.122	0.063	0	
	T2	0	0.057	0.116	0.174	0.227	0.272	0.306	0.328	0.335	0.328	0.306	0.272	0.227	0.174	0.116	0.057	0	
	T3	0	0.059	0.121	0.183	0.242	0.291	0.329	0.353	0.361	0.353	0.329	0.292	0.242	0.184	0.122	0.059	0	
	T4	0	0.069	0.14	0.213	0.28	0.338	0.382	0.41	0.42	0.41	0.384	0.339	0.282	0.215	0.142	0.071	0	
Esfuerzos (kg/cm ²)	T1	Tens	57	15	22	25	36	48	57	61	62	60	56	47	35	23	20	18	55
	T2	Tens	67	10	12	16	31	47	58	65	66	65	58	46	30	15	15	12	65
	T3	Tens	35	10	5	10	30	48	63	70	74	71	63	48	30	10	5	13	35
	T4	Tens	15	15	10	9	35	59	76	88	91	88	76	60	36	9	10	19	18

Proyecto de investigación: Puente Radial III
 Ubicación: Nuevo Laredo, Tamaulipas

OBTENCIÓN DE RESULTADOS EN LAS DISTINTAS ETAPAS DEL ANÁLISIS PARA EL CLARO COMPRENDIDO ENTRE LOS EJES 3 Y 4

		Resultados Finales																
		Eje 3																Eje 4
		Diaf 1	Diaf 2	Diaf 3	Diaf 4	Diaf 5	Diaf 6	Diaf 7	Diaf 8	Diaf 9	Diaf 10	Diaf 11	Diaf 12	Diaf 13	Diaf 14	Diaf 15	Diaf 16	Diaf 17
Sumatoria final de deflexiones (cm)	T1	0	0.559	1.073	1.535	1.928	2.254	2.476	2.616	2.666	2.616	2.477	2.245	1.928	1.535	1.074	0.562	0
	T2	0	0.91	1.782	2.592	3.303	3.889	4.324	4.593	4.684	4.593	4.325	3.89	3.304	2.592	1.783	0.91	0
	T3	0	0.852	1.652	2.406	3.058	3.591	3.985	4.229	4.311	4.229	3.986	3.592	3.059	2.408	1.653	0.852	0
	T4	0	1.294	2.552	3.736	4.786	5.657	6.306	6.701	6.844	6.701	6.309	5.658	4.788	3.739	2.555	1.296	0

		Eje 3																Eje 4	
		1 (Eje 3)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17 (Eje 4)	
Sumatoria final de esfuerzos (kg/cm ²)	T1	Comp	-70	-235	-188	-114	-219	-292	-348	-372	-388	-378	-348	-295	-220	-117	-190	-236	-68
		Tens	881	544	398	352	351	388	421	444	449	445	420	387	351	330	398	548	878
	T2	Comp	-77	-303	-352	-401	-587	-723	-829	-881	-908	-886	-827	-726	-589	-404	-355	-307	-79
		Tens	644	279	260	302	409	516	590	632	645	631	589	514	407	299	260	281	640
	T3	Comp	-75	-279	-278	-285	-435	-550	-632	-681	-695	-680	-633	-551	-440	-289	-280	-285	-76
		Tens	682	383	307	311	389	468	529	574	590	575	531	467	392	312	305	385	681
	T4	Comp	-70	-330	-454	-584	-828	-1018	-1150	-1235	-1264	-1236	-1154	-1023	-834	-592	-458	-331	-70
		Tens	395	127	172	286	461	616	727	795	815	796	728	615	462	282	171	126	404

APENDICE H. MODELAJE DE ETAPA DE ANALISIS D

La figura 85 y la secuencia del 86 al 88 muestran respectivamente, la colocación de los dispositivos de medición, así como algunas figuras del modelo matemático correspondiente al primer claro del puente Radial III durante la etapa de análisis D.



Figura 85. Colocación de dispositivos de medición durante la primera prueba experimental de campo

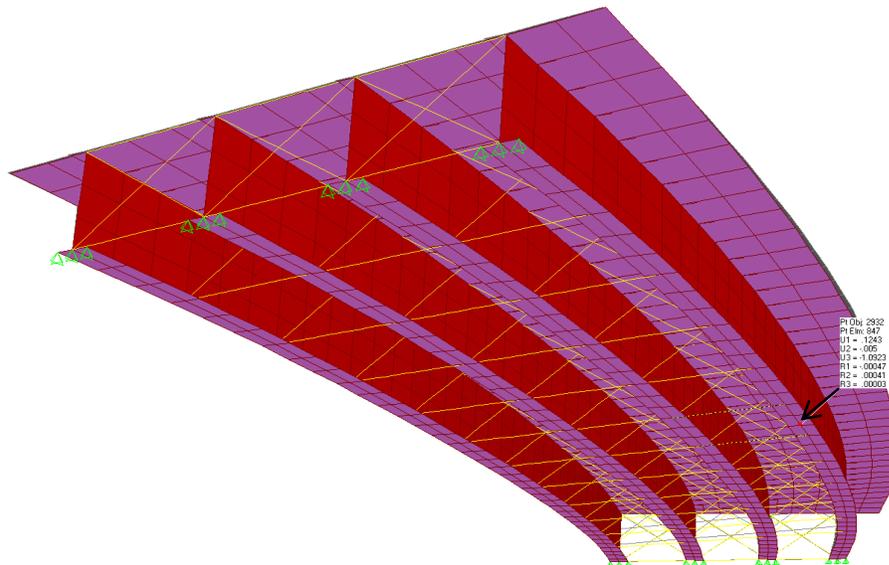


Figura 86. Deflexión en trabe externa de acuerdo al modelo matemático del primer claro

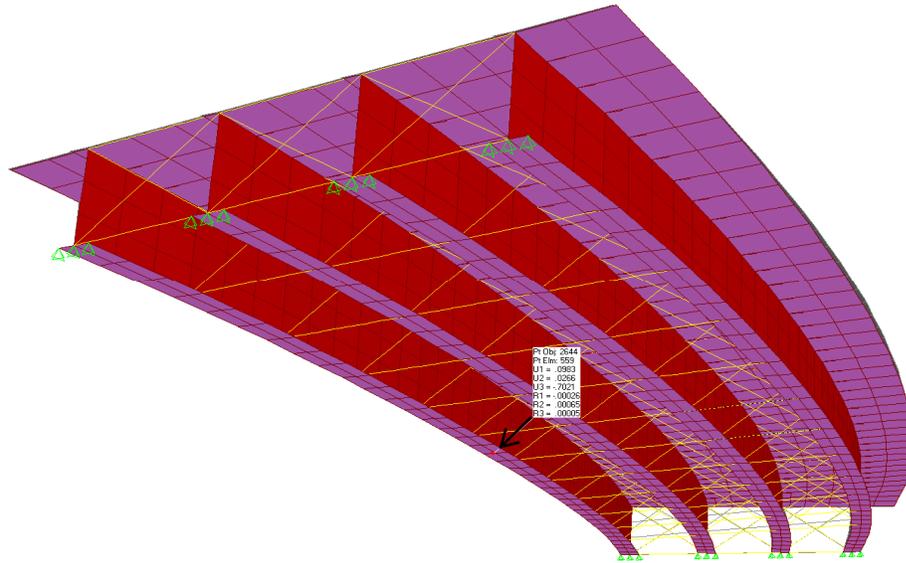


Figura 87. Deflexión en trabe interna de acuerdo al modelo matemático del primer claro

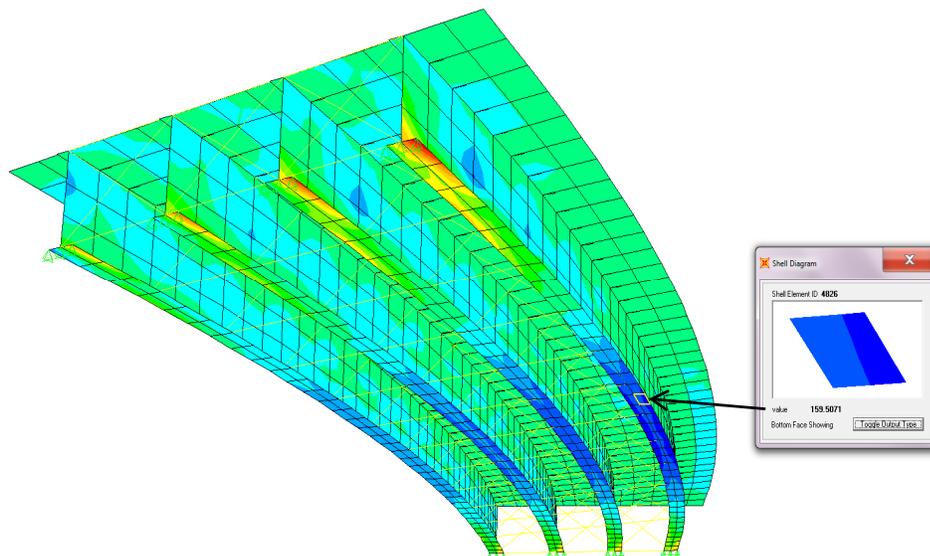


Figura 88. Esfuerzo en trabe externa de acuerdo al modelo matemático del primer claro

De manera similar la secuencia de figuras del 89 al 91 muestran respectivamente la colocación de los dispositivos de medición para el segundo claro del puente Radial III, así como los modelos matemáticos de la misma etapa de análisis.



Figura 89. Colocación de dispositivos de medición durante la segunda prueba experimental de campo

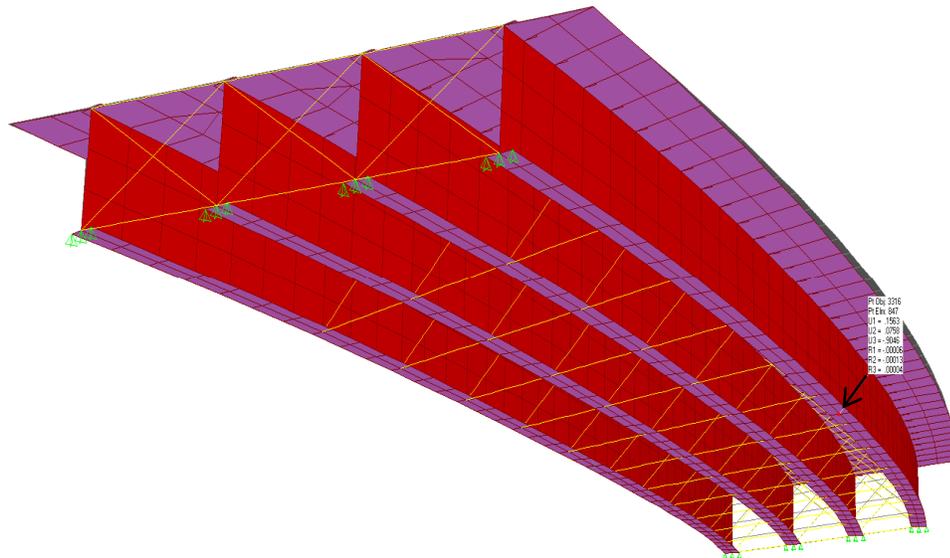


Figura 90. Deflexión en trabe externa de acuerdo al modelo matemático del segundo claro

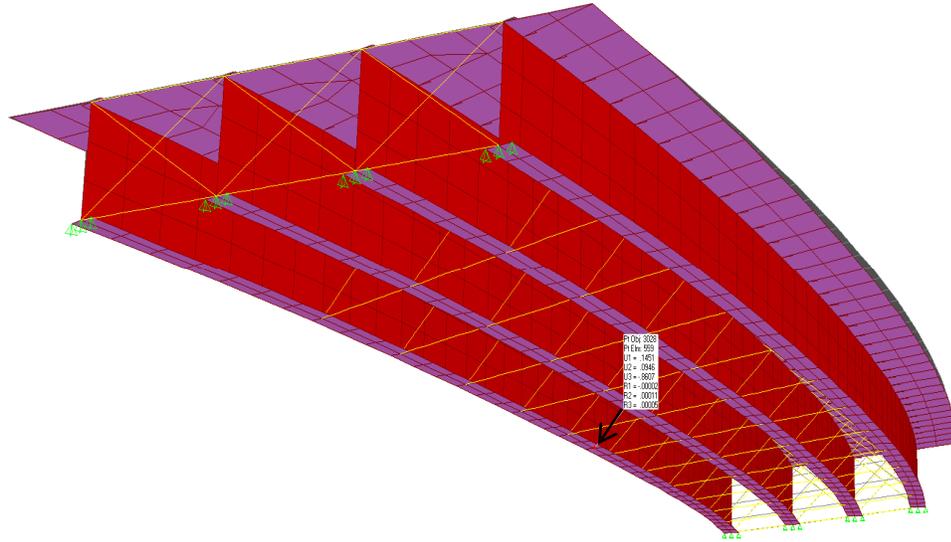


Figura 91. Deflexión en trabe interna de acuerdo al modelo matemático del segundo claro