



1
2 y
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

APLICACION DE CURVAS ESPIRALES
EN CAMINOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO TOPOGRAFO GEODESTA

P R E S E N T A :

RUBEN GALLEGOS CORTES

MEXICO, D. F.

1991

FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

PRIMERA PARTE: INTRODUCCION.

1.1.-Desarrollo del Transporte terrestre.....	1
---	---

SEGUNDA PARTE: ANTECEDENTES:

2.1.-Justificación del proyecto.....	5
2.2.-Proyecto Original.....	5
2.2.1.-Objetivos y alternativas de solución.....	5
2.2.2.-Especificaciones del Proyecto Original.....	7
2.2.3.-Resumen de datos.....	8
2.3.-Proyecto Modificado.....	11
2.3.1.-Alternativas de solución.....	11
2.3.2.-Alternativa de ampliación del camino actual....	13
2.3.2.1.-Criterios generales para el proyecto....	13
2.3.2.2.-Determinación preliminar de especificaciones de Proyecto Geométrico..	14
2.3.2.3.-Planteamiento de soluciones.....	15
2.3.3.-Observaciones y Recomendaciones para el Proyecto original.....	18
2.3.4.-Especificaciones para el Proyecto Modificado....	21
2.4.-Apoyo teórico.....	22
2.4.1.-Alineamiento horizontal.....	22
2.4.1.1.-Tangentes.....	22
2.4.1.2.-Curvas circulares.....	22
2.4.1.3.-Elementos de la curva circular.....	23

2.4.1.4.-Curvas de Transición.....	27
2.4.1.5.-Ventajas de las curvas de Transición.....	30
2.4.1.6.-Elementos de la curva con espirales.....	31
2.4.2.-Sección transversal.....	39
2.4.2.1.-Elementos de la sección transversal.....	39

**TERCERA PARTE: METODOLOGIA PARA EL DISEÑO Y CALCULO DE CURVAS
ESPIRALES.**

3.1.-Planteamiento del problema.....	45
3.2.-Diseño de una curva espiral.....	46
3.3.-Cálculo y trazo de una curva con espirales.....	56
3.3.1.-Calculo de las curvas espirales y circular.....	56
3.3.2.-Trazo de la curva.....	63
3.4.-Resumen de curvas.....	65
3.5.-Problemas presentados.....	75
3.6.-Referenciación del trazo definitivo.....	77

CUARTA PARTE: ANALISIS DE RESULTADOS.....79

QUINTA PARTE: CONCLUSIONES.....82

SEXTA PARTE: BIBLIOGRAFIA.

PRIMERA PARTE

I N T R O D U C C I O N .

1.1 DESARROLLO DEL TRANSPORTE TERRESTRE.

Entre los logros más importantes y antiguos del hombre, están: la domesticación de los animales de tiro y la invención de la rueda. Lo anterior hizo posible el vehículo de tracción animal y aumentó enormemente su capacidad para transportar mercancías de un lugar a otro. Este vehículo necesitaba naturalmente de una vía para su operación, de modo que las carreteras se desarrollaron también desde épocas primitivas. Existen restos de carreteras pavimentadas, que fueron construidas hace más de 4000 años, que han sido halladas en Creta.

A través de todas las edades y a medida que aumentaron las poblaciones, los hombres avanzaron hacia el desierto y establecieron centros de poblaciones. Estos eran comunicados entre sí utilizando veredas y carreteras más acabadas, que fueron siendo mejoradas paulatinamente mediante nuevos trazos, mejoramiento de su superficie y de las obras de drenaje, hasta que llegaron a ser caminos carreteros excelentes para su época. Un número considerable de ellos sobrevive hasta hoy en trazos escogidos originalmente por ingenieros romanos o especialistas medievales que seleccionaban los caminos.

Es probable que algunas de nuestras carreteras actuales, tengan un origen aún más antiguo. El hombre primitivo, en su incesante búsqueda de alimentos, siguió las emigraciones de los animales de caza, de los que dependía su existencia y más tarde, mucho

después de haberse exterminado los animales de caza, quedaron las rutas de sus migraciones como canales para el movimiento del hombre, a medida que las corrientes de migración, conquista y comercio disminuían..

Las rutas se estabilizaron gradualmente a lo largo de las líneas de menor resistencia y los trazos que atravesaban los valles, o vados o las condiciones más favorables, llegaron a ser las arterias de comunicación más importantes.

Los romanos fueron los constructores de carreteras más laboriosas de la época antigua. Su imperio estaba conectado sin interrupción por una amplia red de buenas carreteras, producto de años de trabajo de esclavos, soldados y contratistas privados. En total, los romanos construyeron aproximadamente 80,000 Km. de carreteras principales, las cuales hicieron posible que el ejército romano, que nunca llegó a tener más de 360,000 hombres, impusiera la autoridad de Roma sobre más de cien millones de personas.

Después de la caída de Roma, la construcción de carreteras se olvidó. Aquellas que fueron construidas por los romanos, se descuidaron en su conservación y en algunos casos, destruidas intencionalmente para impedir el avance de posibles enemigos.

Sin carreteras, los vehículos también desaparecieron y durante la Edad Media, prácticamente todos los pasajeros y carga fueron transportados en lomo de animales.

En 1550, solamente había tres carruajes en todo París y el primer coche en Inglaterra apareció en 1555.

Hubo un renacimiento gradual en la construcción de carreteras en Europa, el cual empezó aproximadamente en 1720, recibiendo un

fuerte impulso debido a los trabajos de: Tresaguet en Francia, de Mac Adam en Inglaterra y Telford en Escocia.

La última parte del siglo XVII y la primera del XVIII, fue un periodo de intensa construcción de canales en Europa y en los Estados Unidos; este período terminó abruptamente a mediados del siglo XVIII, debido a la rápida expansión de los ferrocarriles a vapor, lo cual privó del tráfico a los canales. Siguió luego un sorprendente periodo de construcción de ferrocarriles y en un lapso de sesenta años, las regiones civilizadas del mundo estuvieron entrelazadas con vías férreas que formaban un sistema de transporte altamente desarrollado. Este sistema alcanzó su madurez tanto en Europa como en Norteamérica, aproximadamente en 1910.

Al iniciarse el siglo XIX el automóvil entró en el ambiente del transporte. Los vehículos de estos primeros días crearon una demanda por mejores caminos que los existentes para vagones y carruajes, las carreteras se mejoraron, pero no tan rápidamente como para mantenerse acorde con el desarrollo mecánico de los vehículos automotores y el incremento del número de vehículos en operación.

La introducción de maquinaria pesada para la construcción de carreteras después de la primera Guerra Mundial, permitió a los constructores ponerse ligeramente a la par con los fabricantes de vehículos, pero esta ventaja ha ido disminuyendo debido al gran número de camiones y automóviles de hoy en día, que han hecho obsoletos los sistemas de carreteras de todos los Países. Para evitar el fracaso de estos sistemas de transporte, las autoridades responsables de la construcción de caminos deben

ahora trazar, diseñar y construir carreteras más resistentes, mejores y más costosas que ninguna de las construidas en el pasado. Las carreteras modernas son más anchas y construidas para velocidades altas y mayores distancias de visibilidad, requiriendo cortes más profundos, terraplenes más altos y grandes volúmenes de excavación. A pesar de que los volúmenes movidos son tan grandes, con un costo unitario relativamente bajo y utilizando maquinaria moderna para el movimiento de tierras, las carreteras actuales resultan muy costosas. Estos altos costos de construcción han dado énfasis a la importancia del trabajo de trazo en ingeniería, ya que sólo mediante una cuidadosa exploración y estudio del terreno, podrán mantenerse los costos de las carreteras modernas dentro de límites razonables.

SEGUNDA PARTE.

A N T E C E D E N T E S.

2.1. JUSTIFICACION DEL PROYECTO.

La carretera México-Toluca es una de las vías más importantes que confluyen en la ciudad de México y comunica a la Capital del estado de México en su forma más directa.

Ante la problemática existente de varios años atrás, respecto a las fuertes curvaturas y pendientes en algunos tramos de dicha carretera: los altos volúmenes de tránsito y el alto índice de accidentes registrados, del orden de 2.04 por millón de veh./km., que la ubican como la más peligrosa del país, el gobierno del estado de México tomó la iniciativa de resolver el problema en el tramo correspondiente a la entidad. Para realizar la obra era necesario elaborar un proyecto de ampliación del tramo que une el poblado de la Marquesa con Toluca, el cual debía considerar varias alternativas de solución. El tramo se designó La Marquesa-Lerma y la responsable de elaborar el proyecto fué la Junta Local de Caminos del estado de México.

2.2. -PROYECTO ORIGINAL.

2.2.1.-Objetivos y alternativas de solución.

Dentro de los objetivos planteados en el informe técnico que la Junta Local de Caminos envió al gobierno del estado en relación a la ampliación y modificación del camino México-Toluca en su

tramo La Marquesa-Lerma, fueron:

- 1.-Reducir el número de accidentes, muy alto en este camino.
- 2.-Proporcionar al usuario una vía con mejores especificaciones.
- 3.-Aportar seguridad y comodidad al usuario.

Para realizar el proyecto se plantearon tres alternativas, las cuales se enlistan a continuación:

Alternativa A.

En esta alternativa se planteaba prolongar la sección transversal de la vía Tolloca hasta los límites del estado con el Distrito Federal en una longitud aproximada de 18.5 km., considerando ocho carriles de circulación distribuidos en cuatro cuerpos separados, con un ancho de sección transversal de 126 m.

Alternativa B.

Se planteaba construir un cuerpo adicional de tres carriles, aislando el tránsito en cuerpos separados, considerando un total de seis carriles por los dos cuerpos, con un ancho de 50 metros a lo largo de 18.5 km.

Alternativa C.

En esta alternativa se planteaba una combinación de las dos anteriores, considerando:

a).-La prolongación de la vía Tolloca hasta el poblado de Amomolulco en una longitud de 3.5 km., en esta propuesta se tenía afectaciones aisladas a construcciones y terrenos agrícolas. Para reducir el costo de construcción, se proponía utilizar el camino existente que une a Lerma con Amomolulco y que se desarrolla paralelo al camino actual, mismo que se ampliaría y quedaría como un cuerpo lateral para baja velocidad, formando parte del proyecto, con lo que se haría variar la

sección de la vía Tollocan.

b).-En la longitud restante (15 km.) se planteaba la construcción de un cuerpo nuevo entre Amomolulco y los límites del estado con el Distrito Federal. Con esta alternativa se tenía también afectaciones aisladas. Para corregir y mejorar las especificaciones, se planteaba realizar modificaciones al camino actual. Desde el punto de vista técnico y económico, esta alternativa fué la más recomendable.

Con el informe se enviaron las secciones tipo y una carta topográfica con la localización de la vía, las cuales anexo; así como la planta, el perfil, las secciones de construcción y los diagramas de la curva masa, que por razones de espacio no se incluyeron.

2.2.2.-Especificaciones del Proyecto original.

Camino: México-Toluca (Cuerpo nuevo).

Tramo: La Marquesa-Lerma.

En base al objetivo y criterios generales del proyecto, así como a la información obtenida en los reconocimientos realizados en el estudio de fotografías aéreas, cartas topográficas y el análisis de capacidad y niveles de servicio, se establecieron las especificaciones siguientes para el proyecto:

Velocidad de proyecto:100 km/h.
Clase de curva:Circular.
Grado máximo de curvatura:3° 30'
Ancho de corona:17.00 m.
Ancho de calzada:12.00 m. (3 carriles).
Acotamientos:2.50 m.

Pendiente gobernadora:3.6% del km. 0+000 alkm. 10+000 y
 1.4% del km 10+000 al km.18+000.
 Pendiente máxima:6 ‰
 Sobreelevación máxima:8 ‰

En el resumen de datos se incluyó el análisis de las pendientes por tramos, así como los volúmenes totales de corte y terraplén. A continuación se enlistan los valores de las especificaciones de cada uno de los tramos y los volúmenes totales.

2.2.3.-Resumen de datos.

Camino: México-Toluca.

Tramo: La Marquesa-Lerma.(Sentido: México-Toluca).

Del Km. 0+000 al Km. 5+000.

Velocidad del proyecto:.....100 Km/h.
 Grado de curva: 3° 30'
 Clase de curva: Circular.
 Pendiente gobernadora: 3.4 ‰
 Volumen de corte: 88,700 m³.
 Volumen terraplén: 81,350 m³.

Del Km. 5+000 al Km. 10+000.

Velocidad de Proyecto: 100 Km./h.
 Grado máximo de curvatura: 3° 30'
 Clase de curva: Circular.
 Pendiente gobernadora: 3.8 ‰.
 Pendiente máxima: 6.0 ‰ en 1000 m.
 Volumen de corte: 19,800 m³.
 Volumen de terraplén: 11,100 m³.

Del Km. 10+000 al Km. 18+000.

Velocidad de Proyecto:	100 Km/h
Grado máximo de curvatura:	3° 30'
Clase de curva:	Circular.
Pendiente máxima:	5.5 ‰ en 500 m.
Pendiente gobernadora:	1.4 ‰
Volumen de corte:	1,900 m ³ .
Volumen de terraplén:	44,100 m ³ .

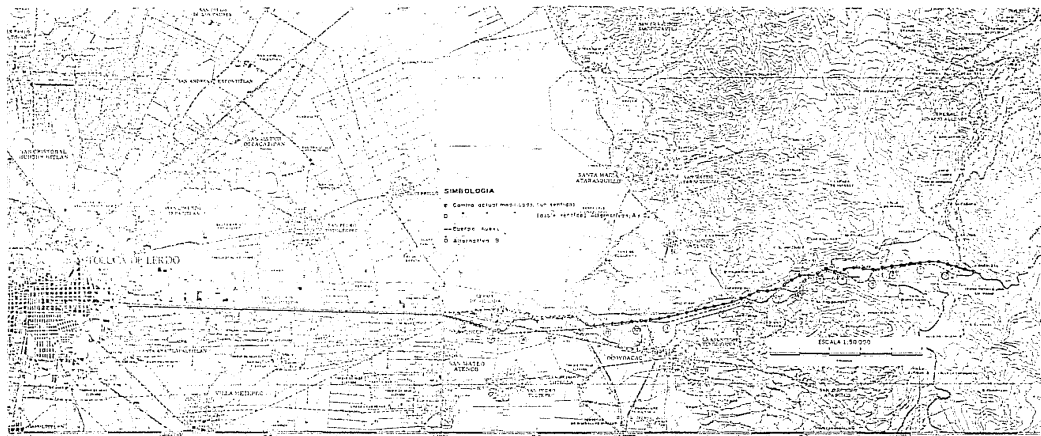
En el estudio de localización de la línea para alojar el cuerpo nuevo se consideraron especificaciones tales que permitieron una velocidad de 100 Km/h. en un 90% del tramo, con pendientes máximas de 6‰ en tramos muy cortos. El 10% restante (dos kilómetros aproximadamente) por las condiciones topográficas y de afectación, la velocidad se reducía a 90 Km/h.

Para el mejoramiento del camino actual, la Junta Local de Caminos propuso que las curvas críticas se ampliaran a un grado máximo de 3° 30', para una velocidad de 100 Km/h. en todo el tramo, desechando con esta propuesta, pequeños tramos del camino en las curvas. Por las características de las especificaciones del proyecto del cuerpo nuevo y de la ampliación del camino existente, ambos se consideraron como un camino de tipo especial. En relación a la operación, se recomendó que el camino actual modificado operase en el sentido La Marquesa-Lerma y el cuerpo nuevo en dirección Toluca-La Marquesa.

Concluido el proyecto, se presentó a las autoridades del gobierno del estado, quienes después de revisarlo acordaron su realización. Por la magnitud de la obra, la Secretaria de Asentamientos Humanos y Obras Públicas tenía que autorizar la realización del Proyecto, trámite que no fue fácil desde el

principio. Los convenios esperados no se dieron; por un lado debido a la falta de recursos en aquel momento en la Secretaría; y por el otro, el proyecto no se insertaba en la Política del Plan Nacional de Desarrollo Urbano. A pesar de lo anterior el gobierno del Estado asumió la responsabilidad y decidió llevar a cabo la realización de la obra. Nuevamente la Junta Local de Caminos del Estado se encargó de la realización del proyecto. El trabajo se inició con el establecimiento del trazo definitivo. Siguió a este los trabajos de limpieza, despalle y posteriormente se comenzaron los cortes y la conformación de los terraplenes, se ubicaron y trazaron las obras de drenaje según las necesidades. Avanzada la obra SAHOP decidió participar, pero antes solicitó la suspensión total de los trabajos de construcción. Se sostuvo una serie de pláticas que finalmente concluyó en una serie de acuerdos en donde se establecieron las condiciones de participación de cada Dependencia.

Los trabajos fueron suspendidos en su totalidad y se solicitó por parte de SAHOP, toda la información referente al proyecto del tramo. Se solicitó además, tiempo para realizar algunos estudios y recorridos del camino, particularmente del tramo en construcción y revisar el proyecto elaborado por la Junta Local de Caminos del Estado de México. A partir de este momento la SAHOP se hizo cargo del proyecto.

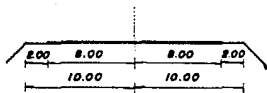


SIMBOLOGIA

- Camino actual (med. 1000' y anchura)
- Camino antiguo (med. 1000' y anchura)
- Camino nuevo
- Distancia 5

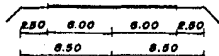
ESCALA 1:50,000

4 CARRILES DE 4 M.



SECCION TRANSVERSAL DEL CAMINO ACTUAL

3 CARRILES DE 4 M.

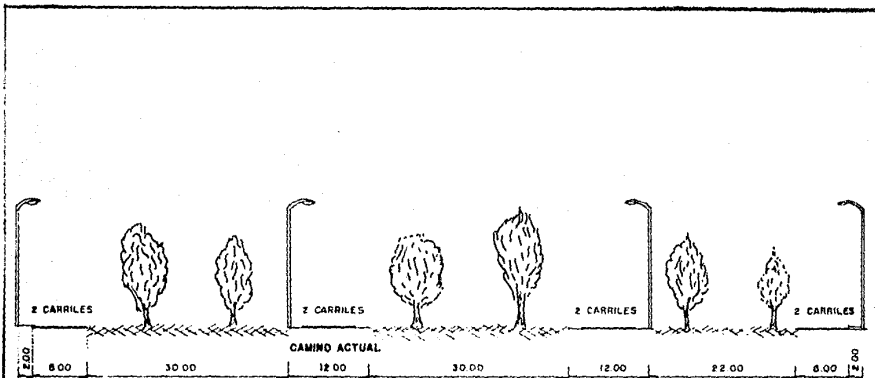


SECCION TRANSVERSAL PARA CUERPO NUEVO



SECCION TRANSVERSAL PARA CUERPOS PARALELOS

TRAMO: LA MARQUESA - AMOMOLULCO



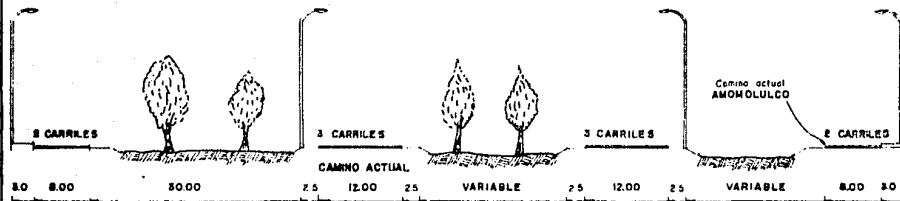
ALTERNATIVA "A"
 SECCION TRANSVERSAL "PASEO TOLLOCAN"
 TRAMO: AMOMOLULCO - E. ZAPATA.

ACOT EN M

FIG. 2.2

ESC. 1: 500

FUENTE: JUNTA LOCAL DE CAMINOS
 EDO. DE MEXICO.



ALTERNATIVA "B"

SECCION TRANSVERSAL CON FAJAS SEPARADORAS VARIABLES.

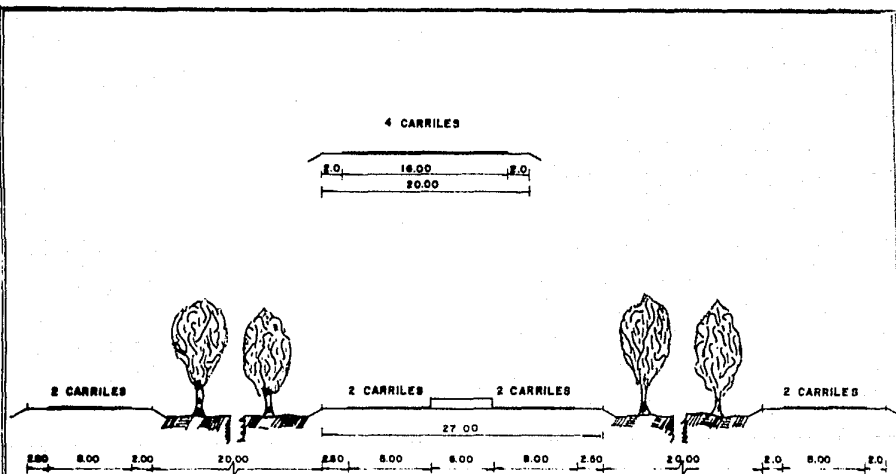
TRAMO : AMOMOLULCO - E. ZAPATA .

En esta alternativa se propone aprovechar el camino a la población de AMOMOLULCO como valle lateral derecho.

ACOT. EN M.

FIG. 2.3

ESC 1:600
FUENTE: JUNTA LOCAL DE CAMINOS.
EST. DE MEXICO.



ALTERNATIVA "C"
SECCION TRANSVERSAL "PASEO TOLLOCAN"
TRAMO : AMOMOLULCO - E. ZAPATA

ACOT. EN M.

FIG. 2.4

FUENTE : JUNTA LOCAL DE CAMINOS -
 EDO. DE MEXICO .

ESC. 1:1250

2.3. -PROYECTO MODIFICADO.

Concluida la revisión del Proyecto de la Junta Local de Caminos, la Dirección de Ingeniería de Tránsito (SAHOP) envió al gobierno del Estado un informe relacionado con la ampliación de la carretera México-Toluca, en este documento se planteaba la solución del problema bajo la perspectiva del Plan Nacional de Desarrollo Urbano de manera integral; contenía además el resultado de la revisión del proyecto del tramo La Marquesa-Lerma y posibilidades de solución del tramo: México-La Marquesa, buscando mejores alternativas:

2.3.1. -Alternativas de solución.

Ante la situación descrita, se consideraba conveniente atacar el problema bajo la perspectiva del Plan Nacional de Desarrollo Urbano, con un análisis de distintas alternativas, pudiendo ser cualquiera de las siguientes:

- A)- Ampliación de la carretera actual.
- B)- Proyectar una carretera de cuota.
- C)- Transporte masivo con trenes cortos con frecuencia adecuada.

A).- Ampliación de la carretera actual.

Dadas las características topográficas y del uso del suelo en las zonas que atraviesa, esta alternativa podía otorgar la capacidad necesaria para un horizonte del proyecto de camino de 15 años, por medio de una sección para tres carriles por sentido, sin grandes dificultades en el tramo La Marquesa-Lerma.

En cambio esta misma sección en el tramo Mexico-La Marquesa obligaría a mayores inversiones y alcanzaría su capacidad en 1983 para el subtramo Caseta-Vista Hermosa; el otorgar a este subtramo una ampliación a cuatro carriles por sentido, únicamente proporcionaría cuatro años más de servicio antes de alcanzar su capacidad, lo cual parecía de poco beneficio en relación al incremento de la inversión. Esta solución requería para ser congruente con el Plan Nacional de Desarrollo Urbano, que se implementaran medidas que restringieran la proliferación de fraccionamientos y nuevas construcciones.

B).- Proyecto de una carretera de cuota.

La alternativa de una carretera de cuota, aún cuando requería de una elevada inversión, cumplía en una forma más satisfactoria con la política que señalaba el Plan Nacional de Desarrollo Urbano y permitía una recuperación directa de la inversión, aun cuando no fuera en su totalidad; la diferencia no recuperable era posible resultara menor a la inversión que requería la alternativa A).

C).- Transporte masivo con trenes cortos.

La alternativa que consideraba el transporte masivo, se estimó que a largo plazo representaba la solución más adecuada por las ventajas que implicaba desde los puntos de vista operativo, contaminación, energéticos, comodidad, etc. En este año (1978) la Secretaría de Comunicaciones y Transportes realizó, con asesoría italiana, un estudio de trenes rápidos que comunicaran la ciudad de México con las ciudades importantes de la zona

conurbada del Centro, entre las que se encontraba la ciudad de Toluca.

2.3.2.-Alternativas de ampliación del camino actual.(SAHOP).

El objetivo del proyecto, así como los criterios generales del mismo planteados en el informe de SAHOP, coincidían en gran medida con los planteados en el proyecto elaborado por la Junta Local de Caminos del Estado de México.

2.3.2.1.- Criterios generales para el Proyecto.

De los criterios planteados enlisto los más importantes.

- a).-Se debía aprovechar al máximo el camino construido.
- b).-Debía afectarse lo menos posible la operación del tránsito actual.
- c).-Las especificaciones para el proyecto geométrico debían ser congruentes con los alineamientos vertical y horizontal con la sección transversal.
- d).-El proyecto tomaría en cuenta las servidumbres ya establecidas.
- e).-Se analizarían las alternativas factibles que garantizaran la solución más económica.
- f).-Para los tramos con diferente velocidad de proyecto se debía introducir las transiciones adecuadas.
- g).-Para determinar el valor de la sobreelevación para grados menores al máximo, se debía utilizar el criterio de variación parabólica, con lo cual se aumentaban los coeficientes de

seguridad.

2.3.2.2.-Determinación preliminar de especificaciones de proyecto geometrico.

Después de realizar los estudios necesarios, la Dirección de Ingeniería de Tránsito estableció las siguientes especificaciones de proyecto que podría validarse o ajustarse una vez que se desarrollara un anteproyecto. Para su estudio la carretera se dividió en tres tramos:

- i.-Tramo: Entronque Reforma-Constituyentes-Cuajimalpa.
- ii.-Tramo: Cuajimalpa-La Marquesa.
- iii.-Tramo: La Marquesa-Lerma.

Correspondiendo a cada tramo, diferentes especificaciones de proyecto; como se describe para el tramo de interés.

iii.-Tramo: La Marquesa-Lerma.

a.-Alternativa un solo cuerpo.

Velocidad de Proyecto:90 a 100 Km/h.
Ancho de corona:28.00 m.(para seis carriles).
Ancho de calzada:2 de 11.00 m.
Camellón central:1.00 m.
Acotamientos:Dos de 2.50 m.
Pendiente Gobernadora:5% y 6% del Km. 37 al Km. 42,
Pendiente máxima:6% y 7% del km. 37 al Km. 42.
Sobreelevación máxima:10 %.

b.-Alternativa dos cuerpos separados.

Cuerpo actual.

Para el cuerpo actual se recomendó dejar la sección para cuatro carriles en un sentido y realizar las rectificaciones al trazo propuesto por la Dirección General de Conservación de Obras Públicas, que coincidían con las planteadas por la Junta Local de Caminos del Estado, como la de Río Hondo, considerando en éstas la misma sección por razones de continuidad y uniformidad aunque por capacidad no fuera necesario.

Cuerpo nuevo.

Para el cuerpo nuevo, las especificaciones resultantes fueron:

Velocidad de Proyecto:	90 a 100 Km/h.
Ancho de corona:	15.00 m.
Ancho de calzada:	10.50 (tres carriles).
Acotamiento derecho:	2.50 m.
Acotamiento izquierdo:	2.00 m.
Pendiente Gobernadora:	5 ‰.
Pendiente máxima:	6 ‰.
Sobreelevación máxima:	10 ‰.

2 3.2.3.-Planteamiento de soluciones.

En esta parte del informe, se exponían las posibilidades de solución para cada tramo del camino en función del derecho de vía disponible, la topografía del terreno, el uso del suelo y la aplicación de las especificaciones propuestas para alcanzar los objetivos del proyecto.

Para el tramo de interés se consideraron dos alternativas, una de ellas planteaba aprovechar el camino actual ampliándolo hacia un solo lado o hacia ambos lados, según conviniese, para obtener una sección de 28.00 m. y seis carriles en un solo cuerpo, introduciendo las rectificaciones al trazo, que permitieran por curvatura velocidades de 90 a 100 km/h. El inconveniente de esta alternativa era que se presentaba una pendiente fuerte en el tramo del Km. 37 al Km. 42, pero a pesar de lo anterior se estimaba que esta variante resultaría la de menor inversión.

La otra alternativa consistía en proyectar la sección total en cuerpos separados, dejando el actual de cuatro carriles para un sentido, al que era necesario rectificar para darle una velocidad de 90 a 100 Km/h. en las zonas de curvatura más cerradas y proyectar un nuevo cuerpo para tres carriles de circulación en el otro sentido, con las mismas características de velocidad de proyecto.

Para la alternativa de cuerpos separados, se presentaban dos variantes: en una el cuerpo nuevo se llevaría paralelo al actual a una distancia constante de hombro a hombro que podría ser de 4.00 a 6.00 m., con un trazo como el señalado para la primera alternativa.

La otra variante, que correspondía a la planteada por la Junta Local de Caminos en su proyecto, el cuerpo nuevo se separaba del actual a distancias variables con el propósito de disminuir la pendiente para el lado de ascenso y aprovechar las áreas entre los dos cuerpos para desarrollo de espacios recreativos.

2.3.2.3.1.-Justificación de la sección transversal.

A partir del TPDA de 15,000 veh/día en 1977 y el análisis de la tendencia histórica del crecimiento del tránsito en el tramo de interés, se determinaron los volúmenes a: 5, 10, 15 y 20 años y se realizó un estudio de capacidad y volúmenes de servicio correspondientes a los distintos niveles, con los siguientes resultados: Para una sección de seis carriles, se tendría un nivel de servicio "C" en 1985, el "D" hasta 1993 y alcanzaría su capacidad en 1998, correspondiendo a un TPDA del orden de 62,500 veh/día.

Para la sección de cuerpos separados que sumaban siete carriles; se tendría para el sentido con cuatro carriles el nivel de servicio "C" en 1987, el "D" hasta 1996 y alcanzaría su capacidad en el año 2001; para el sentido con tres carriles, el comportamiento sería como en el caso anterior (sección total de seis carriles).

De lo anterior, se concluyó que la sección para tres carriles era la recomendable en este tramo y para el caso de construirse la de cuerpos separados, el nuevo cuerpo debía ser de tres carriles.

Selección de ruta.

Para el tramo La Marquesa-Lerma, se habían visto dos alternativas en cuanto a sección transversal y una de ellas con dos variables, lo que llevaba al análisis de tres probabilidades.

El avance del estudio, señalaba la conveniencia de efectuar un

anteproyecto para cada una de ellas que permitieran su evaluación para definir la más conveniente. Se recomendaba que para ésto se tomara en cuenta que ya estaba iniciada la construcción de la alternativa propuesta por la Junta Local de Caminos.

2.3.3.-Observaciones y Recomendaciones para el Proyecto Original.

2.3.3.1.-Observaciones

En una parte del informe se enlistó una serie de argumentos que sirvieron para modificar parte del proyecto original. Entre las observaciones generales: se reclamaba la falta de información en algunos de los planos, se argumentó que los perfiles carecían de cuadros con cantidades de obra, datos geotécnicos y otros necesarios.

De la revisión de los perfiles se objetó el proyecto de la subrasante, ya que al parecer existían errores en el criterio de su establecimiento. Se reclamó el valor de la pendiente gobernadora empleado, debido a que se detectaron pendientes máximas sostenidas con longitudes superiores a las convenientes, (5 % y 6 % en 4.3 kilómetros), lo que se consideró alto para el tipo de camino que se deseaba construir. Por lo que respecta al volumen de las terracerías, se estimó que la subrasante podía mejorarse de tal manera que éste disminuyera considerablemente. Se observaron además otros errores, tales como: la falta de notas aclaratorias, el uso que posteriormente se le daría al recorte del pavimento existente, los prestamos obtenidos no se

indicaba si eran laterales o de banco, las aclaraciones sobre el paso a desnivel con el ferrocarril, sobre el uso del camino existente y sobre los requisitos del cruce con el Rio Lerma.

Otra falta reclamada fue que los movimientos de las terracerias, habian sido calculadas con unidades de acarreo que no eran las especificas y en uso. Por otra parte al no haber estudios geotécnicos y haber usado un coeficiente de variabilidad volumetrica de 1.00, era posible que las compensaciones no resultaran reales, teniéndose desperdicios y préstamos de ajustes no considerados.

En el tramo comprendido entre los kilómetros 15+700 y 16+600, se tenia en las calles laterales terraplenes de 2.30 m. en promedio, los que se consideraron altos e injustificables para el servicio que proporcionarían. De las secciones de construcción, faltaba el proyecto de algunos pequeños tramos. Otras deficiencias fueron: no proyectar la cuña de afinamiento, no dar las ampliaciones correspondientes a las curvas, emplear en algunas ocasiones taludas de 2x1 para el terraplén, los cuales resultaban costosos y sin ninguna ventaja y no anotar debidamente algunos datos del proyecto, tales como: taludes, sobreelevaciones y anchos.

De la revisión de las especificaciones empleadas en el Proyecto, se reclamó: no haber considerado el criterio de pendiente gobernadora, necesario para una mejor ubicación del eje del camino; el uso de una sobreelevación máxima del 8 %, valor que se consideró inadecuado para el grado máximo de curvatura empleado (4°). En cuanto al criterio que se aplicó para determinar el valor de la sobreelevación para grados menores que

el máximo, no se aceptó; argumentándose que no era el indicado para un camino de tal importancia. Tampoco se aceptó el empleo de curvas circulares con tangentes de transición, en su lugar se recomendó el empleo de curvas espirales que se consideraban las adecuadas para este tipo de camino. Por lo que respecta al ancho de carril que era de 4.00 m., se consideró demasiado e incorrecto porque se incrementaban considerablemente los costos de construcción, por lo que se sugería el uso de carriles de 3.50 m., con su respectiva ampliación en las curvas. Otra observación al Proyecto fué, no haber considerado los accesos a la carretera en las zonas de recreación. En relación a los entronques, se sugería reestudiar las intersecciones buscando mejores alternativas.

2.3.3.2.-Recomendaciones.

Finalmente, el resultado de la revisión del Proyecto concluyó con una serie de recomendaciones, de las cuales enlisto las mas importantes:

- a).-Elaborar de manera integral, el proyecto de ampliación de la carretera: México-Toluca.
- b).-Desarrollar el proyecto, siguiendo la metodología que señala el Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras de la SAHOP.
- c).-Efectuar el estudio geotécnico para apoyo del proyecto definitivo.
- d).-Elaborar los procedimientos de construcción considerando el tránsito sobre el camino.
- e).-Si se aprobaba la alternativa que siguió la Junta Local de

Caminos, era necesario rehacer el proyecto definitivo con apoyo en planos topográficos y un estudio geotécnico, bajo el criterio de aprovechar al máximo la obra construida.

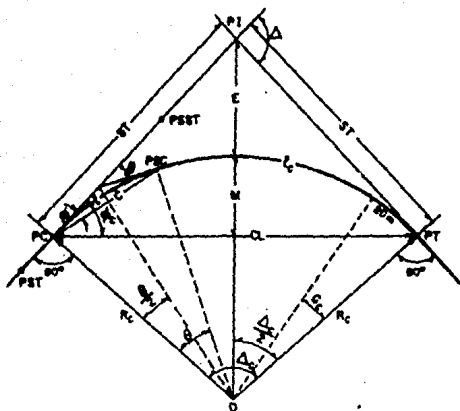
2.3.4.- Especificaciones para el Proyecto Modificado.

Tramo: La Marquesa-Lerma.

Después de la revisión, el proyecto original quedó con las siguientes especificaciones:

Tipo de camino:	Especial.
Velocidad de Proyecto:	90 Km/h.
Clase de curva:	Espiral.
Grado máximo de curvatura:	4° 00'
Ancho de corona:	17.00 m.
Ancho de calzada:	12.00 m. (tres carriles).
Acotamientos:	2.50 m.
Pendiente Gobernadora:	3.6 ‰ del 0+000 al Km. 10 y 1.4 ‰ del km.10 al km.18.
Pendiente máxima:	6 ‰
Sobreelevación:	10 ‰

Especificaciones con las que finalmente se reelaboró y se realizó el proyecto del tramo en estudio.



PI	Punto de intersección de la prolongación de las tangentes
PC	Punto en donde comienza la curva circular simple
PT	Punto en donde termina la curva circular simple
PST	Punto sobre tangente
PSST	Punto sobre subtangente
PSC	Punto sobre la curva circular
O	Centro de la curva circular

Δ	Angulo de deflexión de las tangentes
Δ_c	Angulo central de la curva circular
θ	Angulo de deflexión a un PSC
ϕ	Angulo de una cuerda cualquiera
ϕ_c	Angulo de la cuerda larga
G_c	Grado de curvatura de la curva circular

R_c	Radio de la curva circular
ST	Subtangente
E	Externa
M	Ordenada media
C	Cuerda
CL	Cuerda larga
l	Longitud de un arco
l_c	Longitud de la curva circular

FIGURA 2.23. ELEMENTOS DE LA CURVA CIRCULAR SIMPLE

2.4. APOYO TEORICO.

2.4.1.-Alineamiento Horizontal.

El alineamiento horizontal se define como la proyección del eje de la subcorona de un camino sobre un plano horizontal y los elementos que lo integran son: las tangentes, las curvas circulares y las curvas de transición.

2.4.1.1.- Tangentes.

Las tangentes son las proyecciones de las rectas que unen las curvas sobre un plano horizontal. Al lugar donde se intersectan dos tangentes consecutivas se le denomina Punto de Intersección y se le representa como "PI" y al ángulo formado por la prolongación de una tangente y la siguiente se le conoce como ángulo de deflexión y se le representa por " Δ ".

Las tangentes se unen entre sí mediante curvas; la longitud de una tangente es la distancia comprendida entre el final de la curva anterior y el principio de la siguiente.

Se denomina punto sobre tangente y se le representa por "PST", a cualquier punto del alineamiento horizontal ubicado en el terreno sobre una tangente. La Longitud mínima de una tangente entre dos curvas consecutivas está definida por la longitud necesaria para dar la sobreelevación y ampliación a las curvas.

2.4.1.2.- Curvas Circulares.

Las curvas circulares son los arcos de círculo que forman la proyección horizontal de las curvas empleadas para unir dos

tangentes seguidas. Dichas curvas pueden ser simples o compuestas, según se trate de un arco de círculo, de dos o más de ellos sucesivos y de diferente radio.

2.4.1.2.1. - *Curvas circulares simples.*

Cuando dos tangentes están unidas entre sí por una curva circular, se le denomina curva simple y según el sentido del cadenamiento, estas pueden ser hacia la derecha o hacia la izquierda llamándose también directas e inversas. Las curvas circulares simples tienen como elementos característicos los que se indican en la figura (2.5) y se obtienen como a continuación se indica.

2.4.1.3. - *Elementos de una curva circular simple.*

La figura 2.5, muestra los elementos de una curva circular simple.

1. - *Grado de curvatura 'G'.*

Es el ángulo que subtiende una cuerda de 20 metros; la que para los países que usan el sistema métrico inglés es de 100 pies. El grado de curvatura se representa con las letras "G".

$$\frac{G_c}{20} = \frac{360^\circ}{2\pi R_c} \quad \therefore \quad G_c = \frac{1145.92}{R_c} \quad \dots\dots\dots (I)$$

El grado máximo de curvatura que puede tener una curva, es el

que permite a un vehiculo recorrer con seguridad la curva con la sobreelevación máxima a la velocidad de proyecto.

2. - Radio de la curva.

Es el radio de la curva circular, se simboliza con R_c y se obtiene de la expresión (I).

$$R_c = \frac{1145.92}{G_c} \dots\dots\dots (II)$$

3. - Angulo central.

Es el ángulo que subtiende la curva circular, se simboliza como " Δ_c ", en curvas circulares simples este ángulo es igual a la deflexión de las tangentes.

4. - Longitud de curva.

Es la longitud del arco entre el "PC" y el "PT", se representa como " L_c ".

$$\frac{I_c}{2\pi R_c} = \frac{\Delta_c}{360^\circ} \quad \therefore \quad L_c = \frac{\pi \Delta_c}{180} R_c$$

pero considerando la expresión (II) se tiene:

$$L_c = \frac{20 \Delta_c}{G_c} \dots\dots\dots (III)$$

5.-Subtangente.

Es la distancia entre "PI"- "PC" o "PI"- "PT", medidas sobre las tangentes, se representa como ST. Del triángulo rectángulo PI-O-PT de la figura (2.5) se tiene:

$$ST = R_c \tan \frac{\Delta_c}{2} \dots\dots\dots (IV)$$

6.-Externa.

Es la distancia más corta entre el "PI" y la curva; se representa con la letra E. En el triángulo rectángulo PI-O-PT de la figura (2.5), se tiene:

$$E = R_c \sec \frac{\Delta_c}{2} - R_c = R_c \left(\sec \frac{\Delta_c}{2} - 1 \right) \dots\dots\dots (V)$$

7.-Ordenada media.

Es la longitud de la flecha en el punto medio de la curva, se simboliza con la letra "M" y se obtiene del triángulo rectángulo PI-O-PT.

$$M = R_c - R_c \cos \frac{\Delta_c}{2} \dots\dots\dots (VI)$$

8.- Deflexión a un punto cualquiera de la curva.

Es el ángulo entre la prolongación de la tangente en el "PC" y

la tangente en el punto considerado, se le representa como θ y se obtiene:

$$\frac{\theta}{1} = \frac{G_c}{20} \quad \therefore \quad \theta = \frac{G_c l}{20} \dots\dots\dots (VII)$$

9. - *Cuerda.*

Es la recta comprendida entre dos puntos de la curva y se representa con la letra "C". Si esos puntos son el "PC" y el "PT", a la cuerda resultante se le denomina cuerda larga (CL). Del triángulo PC-O-PSC, se tiene:

$$C = 2R_c \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \dots\dots\dots (VIII)$$

y para la cuerda larga:

$$CL = 2R_c \operatorname{sen} \frac{\Delta_c}{2} \dots\dots\dots (VIIIa)$$

10. - *Angulo de la cuerda.*

Es el ángulo comprendido entre la prolongación de la tangente y la cuerda considerada, se representa como ϕ . Se obtiene del triángulo PC-O-PSC.

$$\phi = \frac{\theta}{2}$$

y considerando la expresión (VII):

$$\phi = \frac{G \cdot l}{40} \dots\dots\dots (IX)$$

Para la cuerda larga:

$$\phi_c = \frac{G_c l_c}{40}$$

Para fines del trazo se considera que la cuerda C tiene la misma longitud que el arco l y para minimizar el error cometido al hacer esta consideración, se toman cuerdas de 20 metros en curvas con G menor o igual a 8°, de 10 metros en curvas con G entre 8° y 22° y de 5 metros para curvas con una G entre 22° y 62°.

2.4.1.3.-Curvas de transición.

Todo vehículo de motor sigue una trayectoria cuando entra o sale de una curva circular horizontal, el cambio en la dirección y la pérdida o ganancia de la fuerza centrífuga no puede realizarse de manera instantánea, esta trayectoria varía dependiendo de la velocidad, el radio de la curva, la sobreelevación y las maniobras de cada conductor. Para una velocidad y curva moderadas, el conductor promedio puede realizar una trayectoria de transición adecuada dentro de los límites del ancho de carril normal, a una velocidad alta y curva cerrada, la transición que resulta es más larga y solamente puede recorrerse sometiéndose a

condiciones peligrosas o invadiendo materialmente los carriles contiguos. Para proyectar un camino con características de seguridad, el alineamiento horizontal debe ser tal que un conductor circulando a la velocidad de proyecto, encuentre posible mantener su vehículo en su carril y además se sienta seguro de hacerlo así, para eso se requiere que haya curvas espirales de transición o una equivalente entre tangentes y la mayoría de las curvas circulares, así como entre curvas circulares de radios muy diferentes.

En 1955, en los Estados Unidos, aproximadamente la mitad de los estados ya usaban la curva espiral en sus carreteras para efectuar la transición a los arcos circulares (AASHO).

La mayoría de esos estados aplicaban la espiral de Euler, que en la terminología matemática se le denomina Clotoide y en la práctica su aplicación es relativamente sencilla.

El grado de curva varía de 0° en el extremo de la tangente de la espiral hasta el grado del arco circular en el extremo de la curva circular.

Por definición el grado de curva en cualquier punto sobre la espiral, varía directamente con la distancia medida a lo largo de la espiral. En el caso de una espiral combinada, se tiene un grado de curva inicial que es diferente de cero.

La objeción generalizada contra el uso de las curvas espirales es que sus cálculos son muy tediosos y posiblemente rebasen las posibilidades de muchos especialistas en localización y proyectistas. Esta objeción podría ser aceptada si fuera necesario determinar cada curva espiral con una precisión teórica alta para las condiciones particulares

velocidad-radio-terreno; pero este no es el caso, ya que puede usarse como base algunas de las curvas matemáticas, porque sus diferencias son muy pequeñas en el camino ya construido; para una base ya conocida, el grado de afinamiento que se desea en la aplicación de las curvas espirales, puede obtenerse usando valores redondeados en la longitud de la espiral, para las cuales las dimensiones de control pueden enlistarse en tablas convenientes de proyectos.

El uso de tablas en el alineamiento inicial de la localización, requiere de poco tiempo extra o cálculos y evita las correcciones posteriores.

El trabajo minucioso se necesita solamente cuando se desea insertar espirales en una línea ya fijada, definida por tangentes y curvas circulares, tal y como se dió en nuestro caso y que es motivo del presente trabajo.

En tal caso, la corrección necesaria dá por resultado grados de curvatura fraccionarios y longitudes de espiral "incompletas", que no permiten usar tablas que simplifican el trabajo. Considerando los beneficios mostrados, los ingenieros deben orientar sus esfuerzos hacia la aplicación práctica de las curvas espirales mejor que explorar con pequeñas diferencias teóricas y fórmulas complejas con factores supuestos desconocidos.

El cálculo de líneas paralelas de curvas espirales, como es el caso del derecho de vía, implica cálculos laboriosos y algo difíciles por los grados de curvatura fraccionarios y longitudes "incompletas" de espiral, sin embargo, las líneas paralelas de espiral calculadas, generalmente no son necesarias, ya que una

línea paralela se puede localizar a una distancia fija a partir del eje de un camino o puede usarse una línea equivalente en forma de curvas circulares compuesta para aproximarse a la espiral paralela, con la precisión que se desee.

2.4.1.4.- Ventajas de las curvas de Transición.

Las principales ventajas de las curvas de transición en el alineamiento horizontal de un camino son las siguientes:

1.- Las curvas de transición proyectadas correctamente, dan a los conductores una trayectoria que se puede seguir natural y fácilmente, de tal manera que la fuerza centrífuga aumenta y disminuye gradualmente conforme el vehículo entra y sale de una curva circular, esto reduce a un mínimo la tendencia a invadir los carriles de tránsito adyacentes, además tiende a promover uniformidad en la velocidad y da por resultado un aumento en la seguridad.

2.- La longitud de la curva de transición proporciona una disposición conveniente para la transición de la sobreelevación. La transición entre la pendiente transversal normal y la sección totalmente elevada en la curva, puede hacerse a lo largo de la longitud de la curva de transición en forma que se ajuste con precisión a la relación velocidad-radio del vehículo que la recorre. Cuando el cambio de sobreelevación se hace sin curva de transición, de manera usual parte sobre la curva y parte sobre la tangente, el conductor que se acerca a esta curva, necesita mover el volante en sentido opuesto a la dirección de la curva cuando está en la porción sobreelevada de tangente para mantener

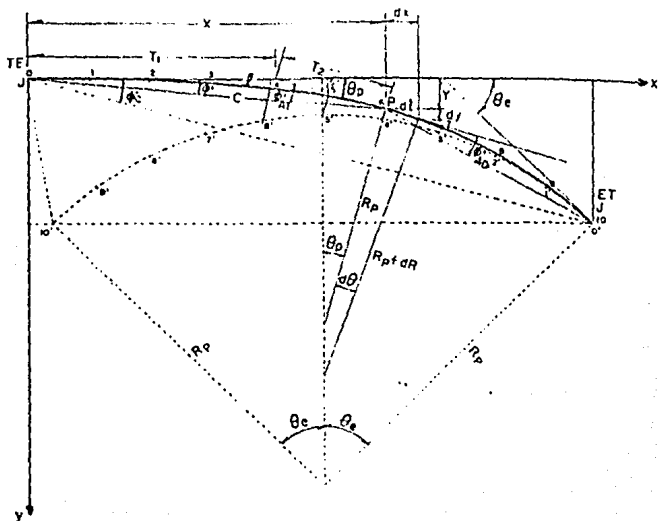
su vehículo sobre la tangente. Esta maniobra no es normal y explica en parte el porqué muchos vehículos se desvían hacia el interior de las curvas.

3.-Cuando la sección de la carpeta necesita ser ampliada a los lados de una curva circular, la espiral facilita la transición para dar ese ancho. El uso de espirales permite la simplificación del procedimiento del proyecto y dá flexibilidad al permitir que la ampliación de curvas cerradas se pueda adaptar, en parte, en el lado exterior del pavimento, sin alterar la orilla del mismo.

4.-La apariencia de un camino puede mejorarse mediante la inserción de curvas espirales. Su uso evita los quiebres notables al inicio y final de las curvas circulares que pueden parecer mas deformadas por la transición de la sobreelevación. Las espirales son parte esencial de un alineamiento con fluidez natural y de apariencia agradable y se ajustan a las condiciones del terreno.

2.4.1.5.-Elementos de una curva circular con espirales.

Las curvas circulares con espirales de transición constan de una espiral de entrada, una curva circular simple y una espiral de salida. La curva se denomina simétrica cuando las espirales de entrada y salida tienen la misma longitud, en caso contrario es asimétrica. En la figura 2.2, se muestran los elementos de una



- P** Punto cualquiera sobre una espiral
o Punto en donde se inicia la espiral
io Punto en donde termina la espiral
 θ_e Deflexión total de la espiral
 θ_D Deflexión de la espiral en un punto **P**
 ϕ_c Angulo de la cuerda larga de la espiral
 ϕ Angulo de la cuerda a un punto **P**
 ϕ_{AT} Angulo respecto a la tangente en **P**, de una cuerda anterior que subtiende un arco de espiral **JP**, de longitud l_{JP}
 ϕ_{AD} Angulo respecto a la tangente en **P**, de una cuerda posterior que subtiende un arco de espiral **JP**, de longitud l_{JP}
l Longitud de la espiral del origen al punto **P**
C Cuerda de la espiral desde el origen al punto **P**
 R_p Radio de curvatura de la espiral en el punto **P**
X, Y Coordenadas del punto **P**
 T_1 Tangente larga al punto **P**
 T_2 Tangente corta al punto **P**

FIGURA 2.6. ELEMENTOS DE LA ESPIRAL O CLOTOIDE

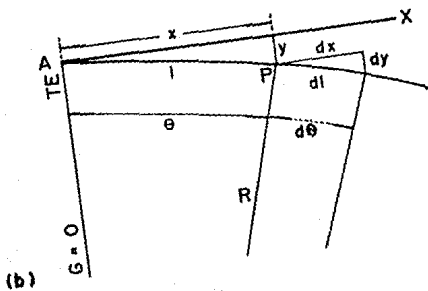
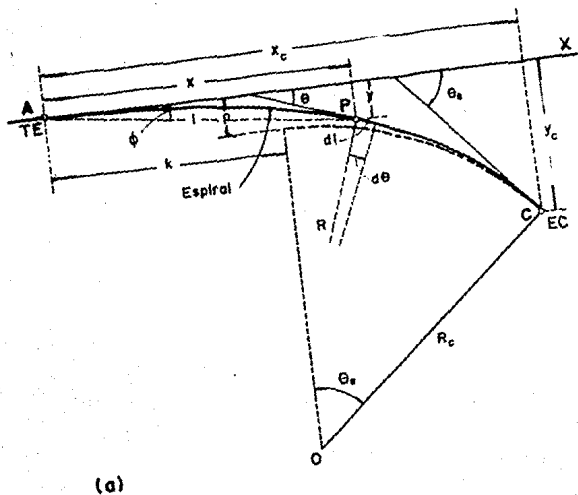


FIG. 2.6. Elementos de la espiral.

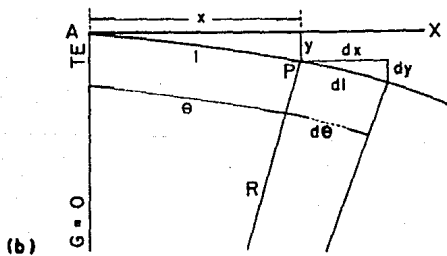
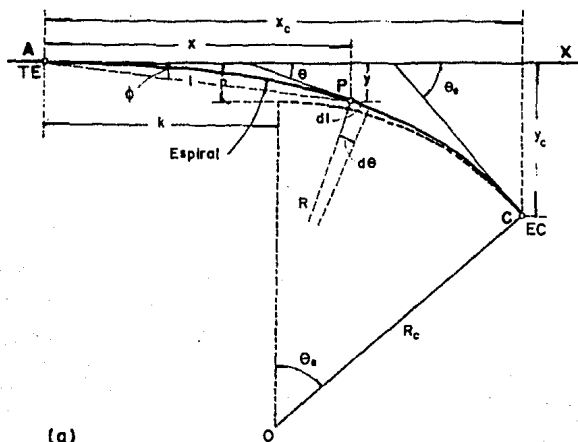
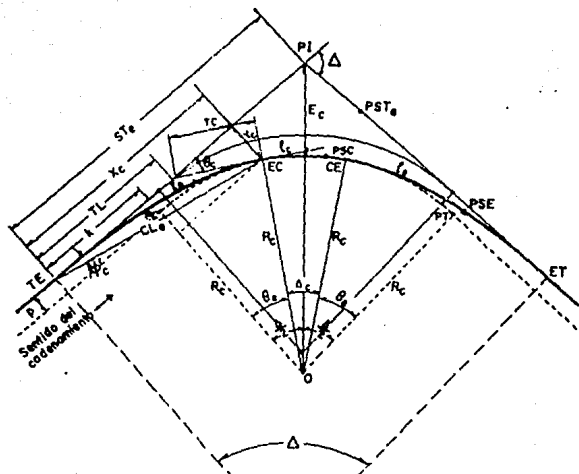


FIG. 2.6'. Elementos de la espiral.



- PI Punto de intersección de las tangentes
 TE Punto donde termina la tangente y empieza la espiral
 EC Punto donde termina la espiral y empieza la curva circular
 CE Punto donde termina la curva circular y empieza la espiral
 ET Punto donde termina la espiral y empieza la tangente
 PSC Punto sobre la curva circular
 PSE Punto sobre la espiral
 PST_e Punto sobre la subtangente

- Δ Ángulo de deflexión de las tangentes
 Δ_c Ángulo central de la curva circular
 θ_e Deflexión de la espiral
 φ_c Ángulo de la cuerda larga de la espiral

- ST_e Subtangente
 X_c, Y_c Coordenadas del EC o del CE
 h, p Coordenadas del PCo del PT (Desplazamiento)
 TL Tangente larga
 TC Tangente corta
 CL_o Cuerda larga de la espiral
 E_c Externa
 R_c Radio de la curva circular
 l_e Longitud de la espiral de entrada a salida
 l_c Longitud de la curva circular

FIGURA 2.7.-ELEMENTOS DE LA CURVA CIRCULAR CON ESPIRALES

espiral o Clotoide y en la 2.3, los de una curva simétrica; los que se calculan como sigue:

1.-Grado de curvatura de la curva circular.

$$Gc = \frac{1145.92}{Rc} \dots\dots\dots(1)$$

En donde Rc es el radio de la curva circular.

2.-Longitud de la espiral.

Es la longitud medida sobre la curva entre el TE y el EC, o del CE al ET. Su valor mínimo se determina en otro inciso.

3.-Parámetro de la espiral.

Es la magnitud que define las dimensiones de la espiral.

$$k = \sqrt{R \cdot l_e} \dots\dots\dots(2)$$

4.-Deflexión de la curva.

Es el ángulo comprendido entre las normales a las tangentes en TE y ET. Su valor es igual a la deflexión de las tangentes y se representa con Δ.

5.-Deflexión a un punto cualquiera de la espiral.

Es el ángulo comprendido entre la tangente en TE o ET y la

tangente en un punto cualquiera PSE.

$$\theta = \frac{l^2}{2k^2} \dots \dots \dots (1)$$

si $l = l_e$; $\theta = \theta_e$; y por tanto: $2k^2 = \frac{l_e^2}{\theta_e}$

y substituyendo en (3), se tiene:

$$\theta = \left(\frac{l}{l_e}\right)^2 \theta_e \dots \dots \dots (4)$$

6.-Deflexión de la espiral.

Es el ángulo comprendido entre las tangentes a la espiral en sus puntos extremos.

Nuevamente, si $l = l_e$; $\theta = \theta_e$; y de la expresión:

$$\theta = \frac{l^2}{2RcI_e}$$

se tiene:

$$\theta_e = \frac{l_e^2}{2RcI_e} = \frac{l_e}{2RC} \dots \dots \dots (5)$$

Con la expresión anterior se obtiene θ_e en radianes; si la expresamos en grados y consideramos que: $R_e = \frac{1145.92}{G_e}$, se tendrá:

$$\theta_e = \frac{l_e}{2 \times \frac{1145.92}{G_e}} \frac{180}{\pi}$$

$$\theta_e = \frac{G_c l_e}{40} \dots\dots\dots (6)$$

7.-Longitud total de la curva.

Es la suma de las longitudes de las dos espirales de transición y de la longitud de la curva circular. Para curvas simétricas, se tiene:

$$L = 2l_e + l_c$$

tomando en cuenta las expresiones $l_c = 20 \frac{\Delta_c}{G_c}$ y $\theta_e = \frac{G_c l_e}{40}$:

se tiene:
$$L = 2\left(\frac{40\theta_e}{G_c}\right) + \frac{20\Delta_c}{G_c} = \frac{80\theta_e + 20\Delta_c}{G_c}$$

pero: $\Delta_c = \Delta - 2\theta_e$

$$L = \frac{80\theta_e + 20\Delta - 40\theta_e}{G_c}$$

$$L = \frac{40\theta_e + 20\Delta}{G_c} \dots\dots\dots (7)$$

y tomando en cuenta la expresión (6):

$$L = l_e + \frac{20\Delta}{G} \dots\dots\dots (8)$$

Lo cual indica que al insertar una curva espiral, se incrementa la longitud total de la curva en l_e .

8.-Coordenadas del punto EC de la curva.

De las ecuaciones;

$$x = 1(1 - \frac{\theta^2}{5 \times 2!} + \frac{\theta^4}{9 \times 4!} - \frac{\theta^6}{13 \times 6!} + \dots)$$

y
$$y = 1(\frac{\theta}{3} - \frac{\theta^3}{7 \times 3!} + \frac{\theta^5}{11 \times 5!} - \frac{\theta^7}{15 \times 7!} + \dots)$$

Se tienen:
$$X_c = 1e(1 - \frac{\theta_e^2}{10}) \quad y$$

$$Y_c = 1e(\frac{\theta_e}{3} + \frac{\theta_e^3}{42}) \dots \dots \dots (9)$$

En donde θ_e está en radianes. Si se expresa θ_e en grados, de las expresiones siguientes:

$$x = \frac{1}{100} [100 - 0.304617 \theta^2 (10)^{-2} - 0.429591 \theta^4 (10)^{-7} - 0.301987 \theta^6 (10)^{-12}]$$

$$y = \frac{1}{100} [0.581776 \theta - 0.126585 \theta^3 (10)^{-4} + 0.122691 \theta^5 (10)^{-9} - 0.652559 \theta^7 (10)^{-15}]$$

se tendrá:

$$X_c = \frac{1e}{100} (100 - 0.00305 \theta_e^2)$$

$$Y_c = \frac{1e}{100} (0.582 \theta - 0.0000126 \theta e^3) \dots \dots (9')$$

9.-Coordenadas del PC de la curva circular.- De la Fig. 2.3:

$$p = Y_c - R_c \text{ sen } \theta_c$$

$$k = X_c - R_c \text{ sen } \theta_c \dots\dots\dots(10)$$

10.-Subtangente.-

Es la distancia entre el PI y el TE o ET de la curva, medida sobre la prolongación de la tangente, y se denomina STc. De la Figura 2.3 se tiene:

$$ST_c = k + (R_c + p) \tan \frac{\Delta}{2} \dots\dots\dots(11)$$

11.-Externa.

Es la distancia entre el PI y la curva y se denomina Ec. De la fig. 2.3 se tiene:

$$E_c = p + (R_c + p) \sec \frac{\Delta}{2} - (R_c + p)$$

$$E_c = (R_c + p) \sec \frac{\Delta}{2} - R_c \dots\dots\dots(12)$$

12. Cuerda larga.

Es la recta que une el TE y EC o el ET y el CE y se le llama CLc. De la ecuación,

$$C = \sqrt{X^2 + Y^2} = y \csc \phi' = x \sec \phi'$$

se tiene:

$$CL_e = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2} \dots\dots\dots (13)$$

13. Angulo de la cuerda larga.

Es el ángulo comprendido entre la tangente en TE y la cuerda larga y se simboliza como ϕ'_c . De las ecuaciones:

$$\phi' = \text{áng. tan. } \frac{Y}{X} \quad y$$

$$Z = 3.1 \times 10^{-3} \theta^3 + 2.3 \times 10^{-5} \theta^5$$

En donde ϕ' y θ estan expresados en grados y Z que es una corrección, dada en segundos; por lo que se tiene:

$$\phi'_c = \frac{\theta_c}{3} - Z \dots\dots\dots (14)$$

14. Tangente larga.

Es el tramo de subtangente comprendido entre el TE o ET y la intersección con la tangente a EC o CE, se le llama TL. De la ecuación:

$$Tl = x - y \cot \theta$$

se tiene:

$$TL = X_c - Y_c \cot \theta_c \dots\dots\dots (15)$$

15.-Tangente corta.

Es el tramo de la tangente a CE o EC comprendida entre uno de estos puntos y la intersección con la subtangente correspondiente, se representa como TC. De la ecuación:

$$T_2 = y \operatorname{csc} \theta$$

se tiene:

$$TC = Y_e \operatorname{csc} \theta_e \dots\dots\dots (16)$$

De la tabla "Elementos de la curva de transición de 100 m. de longitud", incluida en el Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras editado por SAHOP, pueden obtenerse los elementos de una espiral de 100 m. de longitud. Para una curva de longitud l_e , los valores tabulados deberán multiplicarse por el factor: $l_e/100$.

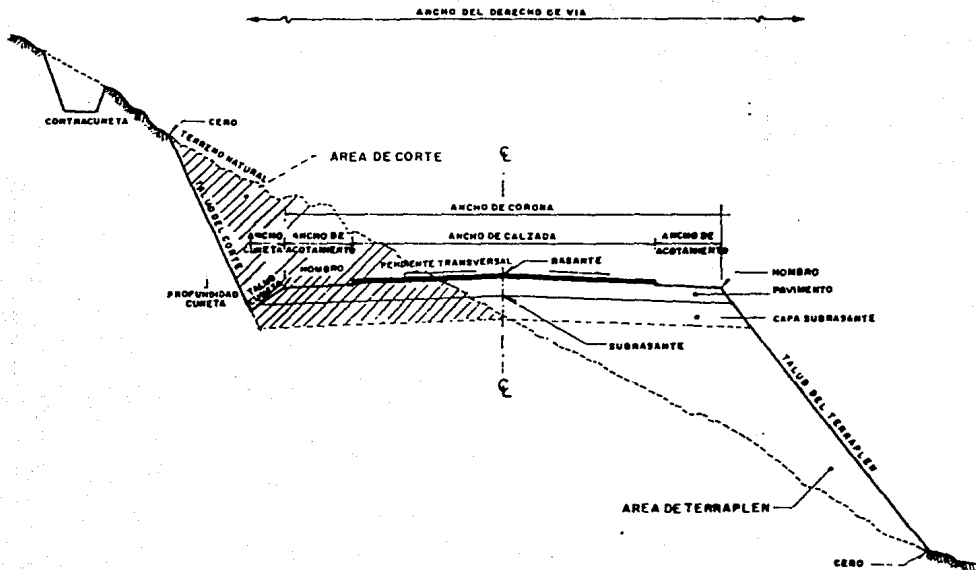


FIGURA 2.8.-SECCION TRANSVERSAL TIPICA EN UNA TANGENTE DEL ALINEAMIENTO HORIZONTAL

2.4.2.-Sección Transversal.

La sección transversal de un camino en un punto cualquiera del mismo es un corte vertical normal al alineamiento horizontal. Define la disposición y dimensiones de los elementos que forman el camino en el punto correspondiente a cada sección y su relación con el terreno natural.

2.4.2.1.-Elementos de la sección Transversal.

Los elementos que integran y definen la sección transversal son: la corona, la subcorona, las cunetas y contracunetas, los taludes y las partes complementarias; de los cuales solo describiré lo referente a la Corona. En la figura 2.8, se muestra una sección transversal típica de un camino en tangente.

2.4.2.1.1.-Corona

Es la superficie del camino terminado comprendida entre los hombros del camino. En la sección transversal se representa por una línea. Los elementos que definen la corona son: la rasante, la pendiente transversal, la calzada y los acotamientos.

A).-Rasante.-Es la línea que se obtiene al proyectar sobre un plano vertical el desarrollo del eje de la corona del camino. En la sección transversal se representa mediante un punto.

B).-Pendiente transversal.- Es la pendiente que se da la corona y es normal al eje. Según su relación con los elementos del alineamiento horizontal se dan tres casos:

1.-Bombeo.

2.-Sobreelevación.

3.-Transición de sobreelevación.

1.-Bombeo.-Es la pendiente que se dá a la corona en las tangentes del alineamiento horizontal, hacia uno y otro lado de la rasante para evitar la acumulacion del agua sobre el camino.

2.-Sobreelevación.- Es la pendiente que se dá a la corona hacia el interior de la curva para contrarrestar en parte el efecto de la fuerza centrífuga de un vehiculo en las curvas del alineamiento horizontal.

La expresión para calcular la sobreelevación necesaria en una curva circular para que un vehiculo no deslice a una cierta velocidad es:

$$S = 0.00785 \frac{V^2}{R} - \mu$$

en donde:

S = Sobreelevación, en valor absoluto.

V = Velocidad del vehiculo, en km/h.

R = Radio de la curva, en m.

μ = coeficiente de fricción lateral.

Sin embargo debido a algunos problemas relacionados con la construcción, operación y conservación de la carretera, ha hecho necesario fijar una sobreelevación máxima, de las cuales se admiten cuatro valores: Se aplica 12% en lugares en donde no se presentan heladas ni nevadas y el porcentaje de vehiculos

pesados en la corriente de tránsito es mínimo; 10% en lugares en donde sin haber hielo o nieve se tiene un gran porcentaje de vehículos pesados; 8% en zonas en donde las heladas y nevadas son frecuentes y el 6% en zonas urbanas.

3. Transición de sobreelevación.-

El término Transición, es el que se usa para designar el cambio de sección transversal de una sección de corona normal a la sección con sobreelevación total, o viceversa. Para satisfacer los requisitos de seguridad y confort, la transición de sobreelevación debe desarrollarse de manera uniforme sobre una longitud adecuada para las velocidades de circulación correspondientes.

En los Estados Unidos, las dependencias de carreteras de algunos de sus estados emplean la curva espiral para hacer el cambio de pendiente transversal que se desea. Quienes no emplean la espiral, usan longitudes proporcionales obtenidas empíricamente, de tangente y curva circular para este propósito.

En cualquier caso y siempre que sea posible hacerlo, la longitud para efectuar la transición de sobreelevación debe ser la misma para un cierto grado y un porcentaje de sobreelevación. La curva espiral tiene una forma muy parecida a la trayectoria natural que sigue un vehículo cuando recorre una curva. En curvas sin espirales, el vehículo en general recorre una trayectoria parecida de transición dentro de los límites del pavimento.

En la práctica común, se observa que la apariencia y aspecto de la transición de sobreelevación predomina en gran parte la longitud de la espiral. Las longitudes necesarias de espiral,

calculadas de otra manera, frecuentemente son mas cortas que las obtenidas por apariencia general, por lo que las fórmulas para valores de espiral dan lugar a valores empiricos de la longitud de transición que resultan mas largos. En los Estados Unidos se han establecido longitudes de transición de control dentro de una variación entre 30.48 m. y 182.88 m. (100 y 600 pies respectivamente), pero no hay una base universal aceptada que considere todos los anchos de pavimentos empleados en carreteras. En una expresión empirica muy usual, la longitud necesaria se indica en términos de la pendiente longitudinal de la orilla exterior del pavimento con relación al eje del camino. La práctica señala que para tener una buena apariencia y comodidad, la longitud de la transición de sobreelevación debe ser tal, que la pendiente longitudinal de 1 en 200 nunca se rebase ($1/2 \%$). Otros especialistas emplean la misma relación de 1 en 200 para velocidades de proyecto superiores a: 80.465 km/h. (50 mph). Para velocidades de proyecto de: 48.279 y 64.372 km/h. (30-40 mph), usan pendientes relativas de: 1:150 y 1:175 respectivamente. Para hacer evidente la importancia de las altas velocidades de proyecto y ponerlas acorde con los elementos de las curvas horizontales y verticales mas abiertas, lo que se hace es extrapolar la pendiente relativa que cambia para el caso de altas velocidades de proyecto en la forma siguiente:

Velocidad de Proyecto (km/h)	48.279 (30 mph)	64.372 (40 mph)	80.465 (50 mph)	96.558 (60 mph)	112.651 (70 mph)
------------------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	---------------------

Pendiente entre perfiles de orilla de pavimento de 2 carriles y eje del camino.	1:150	1:175	1:200	1:225	1:250
---	-------	-------	-------	-------	-------

La longitud de transición obtenida de esta manera, es directamente proporcional a la sobreelevación total que es producto del ancho de la carpeta y el por ciento de sobreelevación.

La tabla T-4, da valores de longitud de transición para caminos de 2 carriles, con anchos de carriles de: 3.05 y 3.65 m.

En la práctica, es posible observar que independientemente del ancho de carril y la sobreelevación, se usan longitudes mínimas para la transición en el rango de 30.48 a 60.96 m., (de 100 a 200 pies). Cuando se emplean valores menores a los mostrados en la tabla T-4, se tiene cambios bruscos en el perfil de las orillas de la carpeta, que no se recomiendan.

Las longitudes mínimas mostradas en el último renglón de la Tabla T-4, son supuestos y se usan para proyecto. Estas longitudes mínimas se aproximan a la distancia recorrida en 2 segundos a la velocidad de proyecto y deben usarse en lugar de las distancias más cortas señaladas en la tabla.

Los valores de la tabla T-4, con frecuencia sirven de control de proyecto; pero se recomienda para un alineamiento de categoría que las transiciones de sobreelevación sean más largas.

Cuando se utiliza una curva espiral la transición de sobreelevación generalmente se desarrolla sobre la longitud total de la espiral; la que depende de las fórmulas y factores empleados, curva y velocidad de proyecto particulares. La longitud obtenida puede ser mayor o menor que la longitud para transición de sobreelevación que se indica en la tabla T-4. En la generalidad de los casos los valores calculados para longitud de espiral y longitud para la transición no difieren en gran cantidad. Tomando en cuenta la naturaleza empírica de estas longitudes, se recomienda hacer una corrección en una de ellas, para evitar dos grupos de valores cuando se fija un control de proyecto.

TERCERA PARTE.

METODOLOGIA DEL DISEÑO Y CALCULO DE CURVAS ESPIRALES.

3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Con el cambio de algunas especificaciones del proyecto, se hizo necesario modificar algunas partes del mismo, sobre todo los tramos referidos a las curvas en donde inicialmente se habían proyectado curvas circulares con valores de velocidad, grado de curvatura y sobreelevación diferentes a las requeridas, lo que motivó la modificación del proyecto original. El trazo nuevo contemplaba necesariamente por el tipo de camino y la velocidad de proyecto, la inserción de espirales en las curvas, tanto a la entrada como a la salida. Con el nuevo trazo se obtendría: un cadenamamiento, un perfil y unas secciones que darían información sobre el avance de la obra en ese momento y lo más importante es que se tendría el apoyo para las nuevas características del camino. Se referirían las obras de drenaje y se referenciarían los puntos importantes del trazo.

Para poder establecer el nuevo trazo, hubo la necesidad de diseñar antes las curvas espirales en función de los elementos antes descritos y del espacio disponible en el terreno. Antes de establecer las magnitudes de las curvas, era necesario considerar los cortes, terraplenes, obras de drenaje y otros obstáculos que restringían el espacio. Entre los problemas a resolver se tuvo entre otros los siguientes:

- 1.-Obtener los elementos de la curva espiral en función de la velocidad de Proyecto, del grado máximo de curvatura y de la sobreelevación.

- 2.-Establecer las longitudes de la espiral en función del grado de curvatura, que pudieran insertarse en los espacios definidos por los cortes y terraplenes.
- 3.-Qué criterios seguir para obtener la longitud mínima de una espiral.
- 4.-Como calcular una curva espiral y como trazarla en campo.

3.2.-DISEÑO DE LA CURVA ESPIRAL.

A).- Longitud mínima de la espiral.

Las curvas de transición tienen como objetivo permitir un cambio constante en la aceleración centrífuga de un vehículo, así como de la sobreelevación y la ampliación. La longitud de una espiral tiene como función el permitir este cambio, el cual sería más rápido si la longitud fuera más corta.

En 1909, W.H. Short obtuvo la primera expresión para calcular la longitud mínima de la espiral para curvas de ferrocarril, apoyándose en que la variación de la aceleración centrífuga debe ser constante cuando se recorre una curva a velocidad uniforme. La aceleración centrífuga a_c en un punto cualquiera de la curva vale:

$$a_c = \frac{v^2 l}{R l_c}$$

Si se designa "t" al tiempo que requiere el vehículo para

recorrer la espiral a velocidad constante v , en un punto cualquiera de la curva se tendrá que: $l = v t$, el cual al substituirlo en la expresión anterior queda:

$$a_c = \frac{v^2 (vt)}{Rc l_e} = \frac{v^3 t}{Rc l_e}$$

Por otro lado la variación de la aceleración centrífuga debe ser constante, de tal manera que:

$$\frac{da_c}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{v^3 t}{Rc l_e} \right) = C$$

$$\frac{v^3}{Rc l_e} = C \quad \therefore \quad l_e = \frac{1}{C} \frac{v^3}{Rc}$$

En donde: l_e = longitud mínima de la espiral, en m.

v = velocidad del vehículo, en m/seg.

Rc = radio de la curva en m.

C = coeficiente de variación de la aceleración centrífuga en $m/seg^2/seg$.

si se expresa la velocidad en Km/h, la ecuación anterior queda:

$$l_e = 0.0214 \frac{v^3}{CRc} \dots\dots\dots (1)$$

El término "C" es el coeficiente de la aceleración centrífuga, es un valor empírico que indica el grado de comodidad. Para ferrocarriles, se acepta un valor de 0.305 m/seg^2 , en caminos pueden emplearse valores de "C" que varían de 0.305 a 0.915

m/seg.³ En un manual publicado en 1938, J. Barnett propuso un valor para "C" de 0.61 m/seg.³, el cual ha sido aceptado y aplicado ampliamente.

Posteriormente en 1949, B.V. Smirnoff propuso una fórmula similar a la de Shortt, en la cual se tomaba en cuenta la sobreelevación. La fórmula propuesta es:

$$l_e = \frac{0.0214}{C} V \left(\frac{V^2}{R_c} + 127 S \right) \dots\dots\dots(2)$$

- En donde : l_e = Longitud mínima de la espiral, en m.
- V = Velocidad del vehículo, en Km/h.
- R_c = Radio de la curva, en m.
- S = Sobreelevación en la curva circular, en valor absoluto.
- C = Coeficiente de comodidad, fijada empíricamente entre 0.305 y 0.610 m/seg.³.

J.J. Leeming y A.N. Black en 1950, encontraron a partir de una serie de experiencias realizadas en caminos existentes, que la comodidad de los pasajeros parecía estar relacionada con la aceleración centrífuga en la curva circular y no con la variación de esa aceleración a lo largo de la espiral; este hecho ha provocado dudas sobre la validez de la fórmula de Shortt y sus diferentes versiones.

La AASHO (American Association of State Highway Officials), recomienda otra forma de calcular la longitud mínima de la

espiral, en la que se considera el aspecto estético del camino y consiste en igualar la longitud de la espiral con la longitud necesaria para dar la sobreelevación correspondiente a la curva circular. Se establece que la espiral debe tener la longitud suficiente para permitir que la pendiente longitudinal de la orilla de la calzada con respecto al eje del camino, donde comienza la curva, tenga un valor máximo P. La AASHO, tomando en cuenta la apariencia de las transiciones y apoyada en consideraciones empíricas, establece que para caminos de dos carriles y velocidades entre 48 y 112 Km/h, el valor de esa pendiente sea de 1/150 y 1/250 respectivamente. Tomando en cuenta lo anterior, se tiene:

$$p = \frac{1}{m}$$

y
$$m = 1.5615 V + 75 \dots \dots \dots (3)$$

En donde:

p = Pendiente longitudinal de la orilla de la calzada con respecto al eje del camino, en valor absoluto.

m = Talud de la orilla de la calzada respecto al eje del camino. Es igual el recíproco de la pendiente.

V = Velocidad de proyecto, en Km/h.

De lo anterior, se obtiene que la longitud mínima de la espiral para caminos de dos carriles es:

$$l_e = \frac{aS}{p} = m a S \dots\dots\dots (4)$$

En donde:

l_e = Longitud mínima de la espiral en metros.

a = Semiancho de la calzada en tangente para caminos de dos carriles.

S = Sobreelevación de la curva circular, en valor absoluto.

Un criterio desarrollado en México por la Secretaría de Obras Públicas para calcular la longitud mínima de espiral, fija un valor constante a la velocidad con la que el vehículo sube o baja por la espiral de transición cuando circula por ella a la velocidad de proyecto. Si el conductor mantiene al vehículo en el centro de su carril, el desnivel que sube o baja al circular por la transición es:

$$d = \frac{aS}{2}$$

En donde: d = Desnivel en metros.

a = Semiancho de carpeta o ancho de carril en m.

S = Sobreelevación, en valor absoluto.

Si el vehículo recorre la espiral de longitud l_e a la velocidad de proyecto V , necesitará un tiempo t de:

$$t = \frac{l_e}{0.277 V}$$

En donde: t , está expresado en seg.

l_e , en m.

V , en Km/h.

La velocidad en el ascenso o descenso de la transición V_e expresada en m/seg., será:

$$V_e = \frac{d}{t} = \frac{aS/2}{l_e/0.277 V} = \frac{0.138VaS}{l_e}$$

Esta velocidad debe ser de cierta magnitud que permita al conductor circular de manera segura y cómoda. Para fijar esta velocidad se analizan los valores de la pendiente longitudinal entre la orilla de la calzada y el eje del camino, según recomienda la AASHO.

Para una velocidad de 48 Km/h (13.333 m/seg.), la AASHO recomienda una pendiente de 1/150, lo que significa que el desnivel de la orilla de la calzada con respecto al eje del camino será de 1 m. en 150 m. y por lo tanto el desnivel del eje será de 0.50 m. Por otra parte un vehículo que se desplace a 48 km/h., recorrerá los 150 m. en 11.25 segundos, con lo que la velocidad de ascenso o descenso en la espiral de transición será:

$$V_e = \frac{0.50}{11.25} \frac{m}{seg.} = 0.0444 \text{ m/seg.}$$

De igual manera, la AASHO recomienda para una velocidad de

112 km/h. una pendiente de 1/250. Un vehículo a esta velocidad, recorrerá los 250 metros en 8.04 segundos, con lo que la velocidad de ascenso o descenso en la espiral será:

$$V_e = \frac{0.50 \text{ m}}{8.04 \text{ seg.}} = 0.0621 \text{ m/seg.}$$

Lo anterior parece indicar que para velocidades de proyecto bajas, la AASHO recomienda longitudes de espiral relativamente mayores que las requeridas, aceptando como segura y cómoda una velocidad de ascenso de 0.062 m/seg. para velocidades de proyecto altas. Si este valor se acepta en la velocidad de ascenso o descenso como una constante para cualquier velocidad de proyecto, se tendrá:

$$V_e = 0.062 = \frac{0.138Vas}{l_e}$$

de lo anterior se pasa a:

$$l_e = \frac{0.138Vas}{0.062}$$

$$\therefore l_e = 2.225 \text{ Vas}$$

En esta expresión, la longitud de transición es directamente proporcional al semiancho de la calzada y entre menor sea este ancho, menor será la longitud de transición requerida, lo cual aunque no influye en la seguridad y comodidad del usuario, da

una apariencia poco estética al camino. Tomando en cuenta esto último, se recomienda que la expresión obtenida para una velocidad de proyecto de 112 Km/h. y un semiancho de calzada de 3.65 m., se aplique a cualquier semiancho, es decir que:

$$l_e = 2.22 \times 3.65 \text{ VS}$$

$$l_e = 8\text{VS} \dots\dots\dots(5)$$

En donde:

l_e = Longitud mínima de transición en m.

V = Velocidad de proyecto en Km/h.

S = Sobreelevación en valor absoluto.

Por cuestiones prácticas, se acepta que la longitud mínima de transición sea tal, que un vehículo circulando a la velocidad de proyecto tarde mínimamente 2 segundos en recorrerla, que a la velocidad de ascenso y ancho de carril considerados, representa una sobreelevación de 0.07, el cual al substituirlo en la expresión (5), nos dá que la longitud mínima absoluta de transición es:

$$l_e = 0.56 \text{ V} \dots\dots\dots(6)$$

Con las expresiones anteriores se determinan las longitudes de transición para caminos de dos carriles. Si el camino es de más de dos carriles el criterio para calcular la longitud de

VELOCIDAD DE PROYECTO — km/h	SHORTT	SMIRNOFF	AASHO				SOP
	$l_e = 0.035 \frac{V^3}{R}$	$l_e = 0.035V \left(\frac{V^2}{R} + 127 S \right)$	$l_e = m a S$				$l_e = 8VS$
			$m = 1.5625 v + 75$				
			$a = 2.75$	$a = 3.05$	$a = 3.35$	$a = 3.65$	
30	39	37	34	37	41	44	24
40	47	46	38	42	46	50	32
50	58	56	42	47	51	56	40
60	68	65	46	51	57	62	48
70	77	74	51	56	62	67	56
80	86	82	55	61	67	73	64
90	94	90	59	66	72	79	72
100	102	97	64	71	77	84	80
110	109	104	68	75	83	90	88

TABLA T-1.-CUADRO COMPARATIVO DE LONGITUDES MINIMAS DE TRANSICION
SEGUN DIFERENTES CRITERIOS (S = 0.10)

transición es el mismo, pero considerando el desnivel del eje del carril más alejado con respecto al eje del camino, por lo que la longitud de transición para caminos de cuatro y seis carriles se incrementará en 1.2 y 2.5 veces con respecto a la de dos carriles.

La tabla T-1, muestra las longitudes de transición obtenidas con cada uno de los criterios antes descritos para caminos de dos carriles y sobreelevación de 10 % .

B).- Longitudes mínimas de espiral para el Proyecto.

Finalmente, considerando los valores de: 10% de sobreelevación máxima; 90 km/h. como velocidad de proyecto y 48.279 km/h. como la velocidad mínima que establece la AASHO; fué posible obtener de la tabla T-4 los valores de la longitud de espiral necesarios para la transición de la sobreelevación en caminos de dos carriles, siendo 78.569 m. y 54.864 m., respectivamente.

Para conocer las longitudes de transición para un camino de tres carriles, la AASHO recomienda multiplicar los valores anteriores por el factor 1.2, con lo que se obtuvieron:

$$54.864 \times 1.2 = 65.836 \text{ m. y}$$

$$78.569 \times 1.2 = 94.282 \text{ m.}$$

que son las longitudes necesarias para la transición de la sobreelevación, para las velocidades antes consideradas. Los valores proporcionados por la SAHOP, fueron: 65.00 y 94.00 metros, valores con los que se trazaron las curvas del proyecto. El primer valor (65.00 m.), se consideró como mínimo para curvas

con grado de curvatura comprendido entre 0° y 2° y 94.00 m., para las curvas con el grado máximo que fué 4° . Para los valores intermedios, la longitud varió entre 65.00 y 94.00 m. los cuales se dan en la tabla siguiente (T-3).

LONGITUDES DE ESPIRAL PARA EL PROYECTO.

Camino: México-Toluca. Tramo: La Marquesa-Lerma.

Vel/proyecto: 90 km/h. $G_{\text{máx}}$: 4.25° . $S_{\text{máx}}$: 10 % .

GRADO	RADIO	ϕ	θ_e	l_e
$0^{\circ} 15'$	4583.680	$0^{\circ} 08' 07.5''$	$0^{\circ} 24' 2.5''$	65.00
$0^{\circ} 30'$	2291.840	$0^{\circ} 16' 15''$	$0^{\circ} 48' 15''$	65.00
$0^{\circ} 45'$	1527.893	$0^{\circ} 24' 22.5''$	$1^{\circ} 13' 07.5''$	65.00
$1^{\circ} 00'$	1145.920	$0^{\circ} 32' 30''$	$1^{\circ} 37' 30''$	65.00
$1^{\circ} 15'$	916.736	$0^{\circ} 40' 37.5''$	$2^{\circ} 01' 52.5''$	65.00
$1^{\circ} 30'$	763.946	$0^{\circ} 48' 45''$	$2^{\circ} 26' 15''$	65.00
$1^{\circ} 45'$	654.811	$0^{\circ} 56' 52.5''$	$2^{\circ} 50' 37.5''$	65.00
$2^{\circ} 00'$	527.960	$1^{\circ} 05' 00''$	$3^{\circ} 15' 00''$	65.00
$2^{\circ} 15'$	509.297	$1^{\circ} 18' 45''$	$3^{\circ} 56' 15''$	70.00
$2^{\circ} 30'$	458.368	$1^{\circ} 32' 30''$	$4^{\circ} 37' 30''$	74.00
$2^{\circ} 45'$	416.698	$1^{\circ} 47' 15''$	$5^{\circ} 21' 45''$	78.00
$3^{\circ} 00'$	381.973	$2^{\circ} 03' 00''$	$6^{\circ} 09' 00''$	82.00
$3^{\circ} 15'$	352.590	$2^{\circ} 19' 45''$	$6^{\circ} 59' 15''$	86.00
$3^{\circ} 30'$	327.405	$2^{\circ} 37' 30''$	$7^{\circ} 52' 30''$	90.00
$3^{\circ} 45'$	305.578	$2^{\circ} 52' 30''$	$8^{\circ} 37' 30''$	92.00
$4^{\circ} 00'$	286.480	$3^{\circ} 08' 00''$	$9^{\circ} 24' 00''$	94.00

Tabla T-3.

Selección de longitudes de espiral, obtenidas de la tabla "Elementos de la espiral", proporcionada por la SANOP.

El valor de la pendiente longitudinal calculado para 90 Km/h. (velocidad de proyecto), fué de: 1/215.625, el cual se obtuvo de interpolar los valores extremos de la velocidad que AASHO considera (48 y 112 km/h.).

3.3.-CALCULO Y TRAZO DE UNA CURVA CON ESPIRALES.

Para poder realizar el trazo de una curva circular con espirales de transición, se requiere conocer los valores de: la subtangente, los ángulos de deflexión y la posición de ciertos puntos importantes de la misma, tales como : TL, EC y CE.

3.3.1.-Cálculo de la curva.

Una vez que se han definido las tangentes de entrada y salida de la curva, fijado el punto de intersección (PI), siempre y cuando sea posible y medido el ángulo de deflexión (Δ), se procede a determinar los valores necesarios para realizar su trazado. Lo anterior es posible ya que se conoce la velocidad de proyecto; el grado de curva se designa a criterio del trazador según las condiciones topográficas del terreno.

El primer elemento a calcular es T_s , que es la distancia de la subtangente total de la curva, el que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T_s = (R_c + p) \tan \frac{1}{2} \Delta_T + k$$

en donde:

R_c = radio de la curva circular.

p, k = coordenadas de los puntos: PC y PT. (Desplazamiento)

Los valores de: $p, k, X_c, Y_c, TL, TC, CL$ y ϕ se obtienen de la tabla para espirales según la velocidad de proyecto y el grado de curvatura de la curva, (Ver tabla T-3).

Para explicar el cálculo de los elementos de una curva circular con espirales de entrada y de salida, se presenta el siguiente ejemplo:

Datos:

$V = 90$ Km/h (velocidad de proyecto)

$G = 2^\circ 00'$

$\Delta = 24^\circ 30'$ IZQ.

$PI = 10+857.08$

a.-Cálculo del radio.

$$R_c = \frac{1145.92}{G_c}$$

substituyendo: $R_c = \frac{1145.92}{2}$

$$\therefore R_c = 572.96 \text{ m.}$$

b.-Cálculo de la subtangente total (T_o).

$$T_o = (R_c + p) \tan \frac{1}{2} \Delta_r + k$$

ELEMENTOS DE UNA CURVA ESPIRAL.

Camino: México-Toluca. Tramo: La Marquesa-Lerma.

Vel/Proy: 90 Km/h- Gmáx: 4.25°.- Smáx: 10 %.

G	p	k	Yc	Xc	TL	TC	φ
0°15'	0.038	32.500	0.153	64.999	43.333	21.667	0° 08'07.5''
0 30	0.076	32.500	0.307	64.998	43.333	21.667	0 16 15
0 45	0.114	32.499	0.447	64.997	43.334	21.668	0 24 22.5
1 00	0.153	32.499	0.615	64.995	43.335	21.668	0 32 30
1 15	0.192	32.498	0.768	64.992	43.336	21.669	0 40 37.5
1 30	0.226	32.498	0.921	64.988	43.337	21.670	0 48 45
1 45	0.267	32.497	1.075	64.984	43.338	21.672	0 56 52.5
2 00	0.305	32.496	1.229	64.979	43.341	21.673	1 05 00
2 15	0.401	34.995	1.603	69.967	46.678	23.344	1 08 45
2 30	0.498	36.992	1.990	73.952	49.350	24.680	1 32 30
2 45	0.611	38.989	2.432	77.931	52.024	26.022	1 47 15
3 00	0.735	40.984	2.932	81.905	54.699	27.363	2 03 00
3 15	0.875	42.978	3.492	85.872	57.378	28.707	2 19 45
3 30	1.030	44.972	4.118	89.830	60.059	30.054	2 27 30
3 45	1.155	45.965	4.609	91.791	61.406	30.733	2 52 30
4 00	1.279	46.958	5.131	93.747	62.755	31.414	3 08 00
4 15	1.393	47.451	5.524	94.706	63.436	31.761	3 21 52.5

TABLA. T-2.

Fuente: SAHOP.

para el cálculo del elemento T_e se requiere conocer: p y k . A continuación se enlistan los valores de los elementos de una curva espiral para una velocidad de proyecto de 90 Km/h y un grado de curva $G = 2^\circ$; obtenidos de la tabla T-2.

$$\begin{aligned} p &= 0.305 \text{ m.} \\ k &= 32.496 \text{ "} \\ X_c &= 64.979 \text{ "} \\ Y_c &= 1.229 \text{ "} \\ TL &= 43.341 \text{ "} \\ TC &= 21.673 \text{ "} \\ \theta &= 1^\circ 05' \end{aligned}$$

Substituyendo se tiene:

$$\begin{aligned} T_e &= (572.960 + 0.305) \tan 12^\circ 15' + 32.496 \\ T_e &= 573.265(0.2171212) + 32.496 = 156.964 \\ T_e &= 156.964 \text{ m.} \end{aligned}$$

c.-Cálculo de la deflexión de la curva circular (Δ_c).

$$\Delta_c = \Delta_t - 2\theta_e$$

substituyendo:

$$\Delta_c = 24^\circ 30' - 6^\circ 30' = 18^\circ 00'$$

$$\Delta_c = 18^\circ 00'$$

d.-Cálculo de la longitud de la curva circular (LC).

$$LC = \frac{\Delta c}{G} 20$$

substituyendo:

$$LC = \frac{18}{2} 20 = 180$$

$$LC = 180.00 \text{ m.}$$

e.- Cálculo de la longitud de la curva espiral (l_e).

$$l_e = \frac{40 \theta e}{2}$$

substituyendo:

$$l_e = \frac{40(3.25)}{2} = 65$$

$$l_e = 65.00 \text{ m.}$$

f.-Cálculo del cadenamamiento de la curva.

$$PI = 10+857.080$$

$$T_e = \underline{156.964}$$

$$TE = 10+700.116$$

+

$$l_e = \underline{65.000}$$

$$EC = 10+765.116$$

+

$$LC = \underline{180.000}$$

$$EC = 10+945.116$$

+

$$l_e = \underline{65.000}$$

$$ET = 11+010.116$$

g.-Cálculo de las deflexiones de las curvas.

Para obtener las deflexiones de los puntos sobre la espiral (fracciones y estaciones completas), se calcula un número constante "n" que multiplicado por el cuadrado de la distancia del TE o ET al de interés nos da el valor de la deflexión para ese punto. Para lo cual se aplica la expresión siguiente:

$$\theta = \frac{l^2}{l_e^2} \phi$$

en donde:

θ = deflexión a un punto cualquiera sobre la espiral.

l = distancia del punto inicial TE o final ET de la curva al punto de interés.

l_e = longitud de la espiral para el grado de curva.

ϕ = deflexión al punto EC o CE desde el TE o ET.

siendo constantes l_e y ϕ ; "n" se calcula con la siguiente expresión:

$$n = \frac{\phi}{l_e^2}$$

la cual puede denominarse factor de deflexión de la espiral; que para el caso particular de $G = 2^\circ$ se tiene:

$$n = \frac{1.083111}{(65)^2} = 2.5641 \cdot 10^{-4}$$

valor que al substituir en la expresión inicial se tiene:

$$\theta = l^2 n$$

fórmula con la que se calculan las deflexiones de la curva espiral y en donde l varía para cada estación.

Para obtener las deflexiones de la curva circular, el cálculo se realiza de la misma manera que cualquier curva circular simple. La deflexión por metro se calcula mediante la siguiente expresión:

$$dm = \frac{\Delta_c / 2}{LC}$$

en donde:

Δ_c es la deflexión de la curva circular.

LC la longitud de la curva circular.

para el ejemplo:

$$dm = \frac{9}{180} = 0.05$$

valor que multiplicado por la distancia de la estación (EC o CE) al punto de interés nos da la deflexión para ese punto. Para completar el ejemplo, se incluye el siguiente cuadro:

ESTACIONES	DISTANCIA	(DISTANCIA) ²	DEFLEXIONES (DISTANCIA) ² x D	$\frac{\Delta c/2}{LC}$
ET=11+010.116	0.000	0.000	0.000 ⁰ = 0 ⁰ 00'00''	
11+000	10.116	102.233	0.0262 = 0 01 34	
10+980	30.116	906.973	0.2325 = 0 13 57	
960	50.116	2511.613	0.6440 = 0 05 00	
CE=10+765.116	65.000	4225.000	1.0833 = 1 05 00	
CE=10+945.116	180.000	Deflexión por m. 0.05 ⁰	9 ⁰ 00'00''	
960	174.884	174.884 x 0.05	8 44 39	
920	154.884		7 44 39	
900	134.884		6 44 39	
880	114.884		5 44 39	
860	94.884		4 44 39	
840	74.884		3 44 39	
820	54.884		2 44 39	
800	34.884		1 44 39	
780	14.884		0 44 39	
EC=10+765.116	0.000		0 00 00	
EC=10+765.116	65.000	4225.00	1.0833 = 1 ⁰ 05'00''	
760	59.884	3586.093	0.9195 = 055 10	
740	39.884	1590.733	0.4078 = 0 24 28	
720	19.884	395.373	0.1013 = 0 06 05	
TE=10+700.116	0.000	0.000	0.000 = 0 00 00	

T-O.

Cálculo de las deflexiones de una curva con espirales de entrada y salida.

3.3.2. -Trazo de la curva.

3.3.2.1. -Ubicación de los puntos importantes de la espiral.

Una vez que se ha concluido el cálculo de las deflexiones, el paso siguiente es la ubicación de los puntos EC y CE mediante los valores de X_c y Y_c así como el TL. Ubicar estos puntos es posible hacerlo antes de cualquier otra cosa, ya que X_c , Y_c y TL, vienen tabulados en tablas.

3.3.2.2. -Situación de los puntos EC y CE.

Con los valores de X_c y Y_c obtenidos de la tabla "Elementos de una curva espiral", según el grado de curvatura, se situaron los puntos EC y CE como se explica a continuación. Para EC: centrado y nivelado el tránsito en el TE, se midió sobre la subtangente el valor que corresponde a X_c y se hincó en este punto un trompo con clavo para definirlo con precisión; hecho lo anterior, se llevó el tránsito al punto X_c en donde se centró y niveló. Observando el punto TE con ceros en el vernier se midió un ángulo de 90° y la distancia Y_c hacia el interior de la curva, estableciendo finalmente el punto EC, que junto con el TE definieron la espiral de entrada. Para ubicar el punto CE el procedimiento fué similar, solo que se partió del ET; ambos puntos definieron la espiral de salida. La espiral de entrada se trazó del TE y la espiral de salida del ET.

3.3.2.3. -Trazo de las curvas espirales y circular.

Hecho lo anterior y para llevar un orden se regresó al TE donde nuevamente se centró y niveló el instrumento y visando el X_c con 0° en el vernier se inició el trazo de la curva espiral de

entrada mediante sus deflexiones; las cuales se habian calculado con anterioridad, hasta cerrar en el punto EC. Este cierre debe ser en teoría, preciso; si existe una diferencia significativa debe revisarse tanto el cálculo como el trazo para su corrección. En la generalidad de los casos, la curva espiral se traza desde una sola estación y generalmente es el TE o ET según sea el caso, pero cuando esto no es posible se establece un punto sobre la curva y se continúa con el trazo. Para trazar la espiral de salida, el instrumento se centró y se niveló en el ET, los pasos siguientes son similares a los realizados en el punto TE, pero apoyado en su respectiva subtangente y midiendo las deflexiones hacia el interior de la curva.

El trazo de la curva circular, considerando sus deflexiones, puede hacerse del EC o el CE siendo esto indistinto, pero se recomienda hacerlo desde el EC para seguir el orden del cadenamamiento. Centrado y nivelado el instrumento en el punto EC y visando el punto TL con el telescopio en posición inversa y con 0° en el vernier A, se giró verticalmente ("vuelta de campana") para quedar en posición directa y medir las deflexiones de la curva circular desde 0° hasta llegar al punto CE, con una deflexión igual a la mitad del valor de la Δ_c (Deflexión de la curva circular), con lo anterior se concluyó el trazo de toda la curva.

El procedimiento para obtener los datos de las otras curvas, el cálculo de sus deflexiones y su trazo en función de su respectivo grado de curvatura, es el mismo que se siguió en el ejemplo dado anteriormente. El cálculo anterior se aplica a curvas simétricas, las curvas que no lo son reciben otro trato.

3.4.-RESUMEN DE CURVAS.

Camino: México-Toluca, tramo: La Marquesa-Lerma.

Tipo de curva:.....circulares con espirales de entrada y salida.

Velocidad de proyecto:...90 Km/m.

Grado Máx. de curvatura:...4° 00'

Sobreelevación máxima:...10 ‰

En la parte siguiente se enlistan los valores de los elementos: p , k , Y_c , X_c , TL, TC y ϕ , así como los elementos calculados y el cadenamiento de las curvas que integraron el proyecto. Los primeros elementos se obtuvieron de la tabla T-2 que aquí se incluye; θ_e , T_e , Δ_c , LC, R y el cadenamiento fueron calculados.

(1)

PI = 1+698.97

$\Delta_T = 5^\circ 05' \text{ IZQ.}$

G = $0^\circ 15'$

R = 4583.680 m.

Cadenamiento

$p = 0.038 \text{ m.}$

$\theta_e = 0^\circ 24' 22.5''$

TE = 1+463.001

$k = 32.500 \text{ m.}$

$\Delta_c = 4^\circ 16' 15.0''$

EC = 1+528.001

$Y_c = 0.153 \text{ m.}$

LC = 341.666 m.

CE = 1+869.662

$X_c = 64.999 \text{ m.}$

$T_e = 235.369 \text{ m.}$

ET = 1+934.662

TL = 43.333 m.

$l_e = 65.000 \text{ m.}$

TC = 21.667 m.

$\phi = 0^\circ 08' 07.5''$

(2)

$$PI = 2+665.20$$

$$\Delta_c = 40^\circ 47' \text{ IZQ.}$$

$$G = 4^\circ 00'$$

$$R = 286.48 \text{ m.}$$

$$p = 1.29 \text{ m.}$$

$$\theta_c = 9^\circ 40' 00''$$

$$TE = 2+501.27$$

$$k = 46.96 \text{ m.}$$

$$\Delta_c = 21^\circ 39'$$

$$EC = 2+595.27$$

$$Y_c = 5.14 \text{ m.}$$

$$LC = 109.91 \text{ m.}$$

$$CE = 2+705.18$$

$$X_c = 93.75 \text{ m.}$$

$$T_c = 153.963 \text{ m.}$$

$$ET = 2+799.18$$

$$TL = 62.76 \text{ m.}$$

$$l_c = 94.00 \text{ m.}$$

$$TC = 31.41 \text{ m.}$$

$$c = 3^\circ 13' 20''$$

(3)

$$PI = 3+173.85$$

$$\Delta_c = 95^\circ 16' \text{ DER.}$$

$$G = 4^\circ 00'$$

$$R = 286.48 \text{ m.}$$

$$p = 1.29 \text{ m.}$$

$$\theta_c = 9^\circ 40' 00''$$

$$TE = 2+811.38$$

$$k = 46.96 \text{ m.}$$

$$\Delta_c = 21^\circ 59'$$

$$EC = 2+905.38$$

$$Y_c = 5.14 \text{ m.}$$

$$LC = 382.33 \text{ m.}$$

$$CE = 3+287.71$$

$$X_c = 93.75 \text{ m.}$$

$$T_c = 362.47 \text{ m.}$$

$$ET = 3+381.71$$

$$TL = 62.76 \text{ m.}$$

$$l_c = 94.00 \text{ m.}$$

$$TC = 31.41 \text{ m.}$$

$$c = 3^\circ 13' 20''$$

(4)

PI = 3+611.83

$\Delta_T = 63^\circ 11' 14''$

G = $4^\circ 00'$

R = 286.48 m.

p = 1.29 m.

$\theta_c = 9^\circ 40' 00''$

TE = 3+387.90

k = 46.96 m.

$\Delta_c = 21^\circ 59'$

EC = 3+481.90

$Y_c = 5.14$ m.

LC = 382.33 m.

CE = 3+703.82

$X_c = 93.75$ m.

$T_c = 223.93$ m.

ET = 3+797.82

TL = 62.76 m.

$l_c = 94.00$ m.

TC = 31.41 m.

$\phi = 3^\circ 13' 20''$

(5)

PI = 3+980.50

$\Delta_T = 50^\circ 30'$ DER.

G = $4^\circ 00'$

R = 286.48 m.

p = 1.29 m.

$\theta_c = 9^\circ 24'$

TE = 3+797.82

k = 46.96 m.

$\Delta_c = 21^\circ 59'$

EC = 3+691.82

$Y_c = 5.14$ m.

LC = 158.50 m.

CE = 4+050.32

$X_c = 93.75$ m.

$T_c = 182.68$ m.

ET = 4+144.32

TL = 62.76 m.

$l_c = 94.00$ m.

TC = 31.41 m.

$\phi = 3^\circ 08'$

(6)

PI = 4+395.35

$\Delta_T = 70^\circ 30' 12Q.$

G = $4^\circ 00'$

R = 286.48 m.

p = 1.279 m.

k = 46.958 m.

$Y_c = 5.130$ m.

$X_c = 93.747$ m.

TL = 62.755 m.

TC = 31.414 m.

$\phi = 3^\circ 08'$

$\theta_e = 9^\circ 24'$

$\Delta_c = 51^\circ 42'$

LC = 258.50 m.

$T_e = 250.33$ m.

$J_c = 94.00$ m.

TE = 4+145.02

EC = 4+239.02

CE = 4+497.52

ET = 4+591.52

(7)

PI = 4+807.02

$\Delta_T = 30^\circ 30' DER.$

G = $4^\circ 00'$

R = 286.48 m.

p = 1.279 m.

k = 46.958 m.

$Y_c = 5.131$ m.

$X_c = 93.747$ m.

TL = 62.755 m.

TC = 31.414 m.

$\phi = 3^\circ 08'$

$\theta = 9^\circ 24' 00''$

$\Delta_c = 11^\circ 42'$

LC = 58.50 m.

$T_e = 125.41$ m.

$J_c = 94.00$ m.

TE = 4+681.61

EC = 4+775.61

CE = 4+834.11

ET = 4+928.11

(8)

$$PI = 5+139.54$$

$$\Delta_T = 59^\circ 30' \text{ IZQ.}$$

$$G = 4^\circ 00'$$

$$R = 286.48 \text{ m.}$$

$$p = 1.279 \text{ m.}$$

$$k = 46.958 \text{ m.}$$

$$Y_c = 5.131 \text{ m.}$$

$$X_c = 93.747 \text{ m.}$$

$$TL = 62.755 \text{ m.}$$

$$TC = 31.414 \text{ m.}$$

$$\phi = 3^\circ 08'$$

$$\theta_c = 9^\circ 24'$$

$$\Delta_c = 40^\circ 42'$$

$$LC = 203.50 \text{ m.}$$

$$T_c = 211.43 \text{ m.}$$

$$l_c = 94.00 \text{ m.}$$

$$TE = 4+928.11$$

$$EC = 5+022.11$$

$$CE = 5+225.61$$

$$ET = 5+319.61$$

(9)

$$PI = 5+697.60 \text{ m.}$$

$$\Delta_T = 98^\circ 00' \text{ DER.}$$

$$G = 4^\circ 00'$$

$$R = 286.48 \text{ m.}$$

$$p = 1.279 \text{ m.}$$

$$k = 46.958 \text{ m.}$$

$$Y_c = 5.131 \text{ m.}$$

$$X_c = 93.747 \text{ m.}$$

$$TL = 62.755 \text{ m.}$$

$$TC = 31.414 \text{ m.}$$

$$\phi = 3^\circ 08'$$

$$\theta_c = 9^\circ 24'$$

$$\Delta_c = 79^\circ 12'$$

$$LC = 396.00 \text{ m.}$$

$$T_c = 377.99 \text{ m.}$$

$$l_c = 94.00 \text{ m.}$$

$$TE = 5+315.61$$

$$EC = 5+413.61$$

$$CE = 5+809.61$$

$$ET = 5+903.61$$

(10)

PI = 6+144.41

$\Delta_T = 65^\circ 43' IZQ.$

G = $4^\circ 00'$

R = 286.48 m.

p = 1.279 m.

k = 46.958 m

$Y_c = 5.131$ m.

$X_c = 93.747$ m.

TL = 62.755 m.

TC = 31.414 m.

$\phi = 3^\circ 08'$

$\theta = 9^\circ 24'$

$\Delta_c = 46^\circ 55'$

LC = 234.58 m.

$T_c = 232.82$ m.

$l_c = 94.00$ m.

TE = 5+911.59

EC = 6+005.59

CE = 6+240.17

ET = 6+334.17 A1

(6+342.35)AD

(11)

PI = 7+168.87

$\Delta_T = 62^\circ 30' DER.$

G = $2^\circ 45'$

R = 416.70 m.

p = 0.611 m.

k = 38.989 m.

$Y_c = 2.432$ m.

$X_c = 77.931$ m.

TL = 52.024 m.

TC = 26.022 m.

$\phi = 1^\circ 47' 15''$

$\theta = 5^\circ 21' 45''$

$\Delta_c = 51^\circ 46' 30''$

LC = 376.54 m.

$T_c = 292.22$ m.

$l_c = 78.00$ m.

TE = 6+876.65

EC = 6+954.65

CE = 7+331.19

ET = 7+409.19

(12)

PI = 7+669.30

$\Delta_T = 65^\circ 30' \text{ IZQ.}$

G = $3^\circ 30'$

R = 327.405 m.

p = 1.030 m.

k = 44.972 m.

$Y_c = 4.118 \text{ m.}$

$X_c = 89.830 \text{ m.}$

TL = 60.059 m.

TC = 30.054 m.

$\phi = 2^\circ 37' 30''$

$\theta_c = 7^\circ 52' 30''$

$\Delta_c = 49^\circ 45'$

LC = 284.28 m.

$T_c = 256.22 \text{ m.}$

$I_c = 90.00 \text{ m.}$

TE = 7+413.08

EC = 7+503.08

CE = 7+787.36

ET = 7+877.36

(13)

PI = 8+062.84

$\Delta_T = 27^\circ 14' \text{ DER.}$

G = $2^\circ 30'$

R = 458.37 m.

p = 0.498 m.

k = 36.992 m.

$Y_c = 1.990 \text{ m.}$

$X_c = 73.952 \text{ m.}$

TL = 49.350 m.

TC = 24.680 m.

$\phi = 1^\circ 32' 30''$

$\theta_c = 4^\circ 37' 30''$

$\Delta_c = 17^\circ 59'$

LC = 143.87 m.

$T_c = 148.14 \text{ m.}$

$I_c = 74.00 \text{ m.}$

TE = 7+914.70

EC = 7+988.70

CE = 8+132.57

ET = 8+206.57

(14)

PI = 10+492.13

$\Delta_T = 28^\circ 30'$ DER.

G = $2^\circ 00'$

R = 572.96 m.

p = 0.305 m.

$\theta_c = 3^\circ 15'$

TE = 10+314.04

k = 32.496 m.

$\Delta_c = 22^\circ 00'$

EC = 10+379.04

$Y_c = 1.229$ m.

LC = 220.00 m.

CE = 10+599.04

$X_c = 64.979$ m.

$T_c = 178.09$ m.

ET = 10+664.04

TL = 43.341 m.

$l_c = 65.00$ m.

TC = 21.673 m.

$\phi = 1^\circ 05'$

(15)

PI = 10+857.08

$\Delta = 24^\circ 30'$ IZQ.

G = $2^\circ 00'$

R = 572.96 m.

p = 0.305 m.

$\theta_c = 3^\circ 15'$

TE = 10+700.11

k = 32.496 m.

$\Delta_c = 18^\circ 00'$

EC = 10+765.11

$Y_c = 1.229$ m.

LC = 180.00 m.

CE = 10+945.11

$X_c = 64.979$ m.

$T_c = 156.97$ m.

ET = 11+010.11

TL = 43.341 m.

$l_c = 65.00$ m.

TC = 21.673 m.

$\phi = 1^\circ 05'$

(16)

PI = 11+743.76

$\Delta_T = 3^\circ 37'$ DER.

G = $0^\circ 30'$

R = 2,291.84 m.

p = 0.076 m.

$\theta_e = 0^\circ 48' 45''$

TE = 11+638.90

k = 32.500 m.

$\Delta_c = 1^\circ 59' 30''$

EC = 11+703.90

$Y_c = 0.307$ m.

LC = 79.67 m.

CE = 11+783.57

$X_c = 64.998$ m.

$T_o = 104.86$ m.

ET = 11+848.57

TL = 43.333 m.

$l_e = 65.00$ m.

TC = 21.667 m.

$\phi = 0^\circ 16' 15''$

(17)

PI = 12+777.40

$\Delta_T = 40^\circ 26'$ DER.

G = $3^\circ 00'$

R = 381.973 m.

p = 0.735 m.

$\theta_e = 6^\circ 09'$

TE = 12+595.11

k = 40.984 m.

$\Delta_c = 28^\circ 06'$

EC = 12+677.11

$Y_c = 2.932$ m.

LC = 187.55 m.

CE = 12+864.96

$X_c = 81.905$ m.

$T_o = 181.91$ m.

ET = 12+946.96

TL = 54.699 m.

$l_e = 82.00$ m.

TC = 27.363 m.

$\phi = 2^\circ 03' 00''$

(18)

PI = 13+388.32

$\Delta_T = 39^\circ 25' \text{ IZQ.}$

G = $3^\circ 00'$

R = 381.973 m.

p = 0.735 m.

$\theta_e = 6^\circ 09'$

TE = 13+210.25

k = 40.988 m.

$\Delta_c = 27^\circ 07'$

EC = 13+292.25

$Y_c = 2.933 \text{ m.}$

$l_c = 180.78 \text{ m.}$

CE = 13+473.03

$X_c = 81.905 \text{ m.}$

$T_e = 178.07 \text{ m.}$

ET = 13+555.03

TL = 54.699 m.

$l_e = 82.00 \text{ m.}$

TC = 27.363 m.

$\phi = 2^\circ 03' 00''$

(19)

PI = 14+981.51

$\Delta_T = 46^\circ 56' \text{ IZQ.}$

G = $4^\circ 00'$

R = 286.48 m.

p = 1.279 m.

$\theta_e = 9^\circ 24' 00''$

TE = 14+809.63

k = 46.958 m.

$\Delta_c = 30^\circ 56'$

EC = 14+903.63

$Y_c = 5.131 \text{ m.}$

LC = 154.67 m.

CE = 15+058.29

$X_c = 93.747 \text{ m.}$

$T_e = 171.88 \text{ m.}$

ET = 15+152.29

TL = 62.755 m.

$l_e = 94.00 \text{ m.}$

TC = 31.414 m.

$\phi = 3^\circ 08' 00''$

3.5. - PROBLEMAS PRESENTADOS.

Al insertar las curvas de transición entre las tangentes y cada curva circular, hubo la necesidad de respetar la posición que ésta tenía con respecto a las obras y obstáculos que la rodeaban, tales como: vía de FF.CC. (México-Acambaro), gasoducto, torres y líneas de conducción eléctrica (alta tensión) y la carretera actual. No hubo trascendencia cuando el problema fué fácil de resolver, no así cuando este no fué posible al primer intento, ya que era necesario buscar otras alternativas, las cuales tenían que considerar las obras de drenaje que en su mayoría estaban ya construídas y había que aprovecharlas al máximo. En ocasiones hubo necesidad de trazar dos y hasta tres veces la misma curva debido a que el trazo no era el idóneo por una u otra razón. Tal fue el caso de la curva establecida finalmente en el PI 5+697.60 que se trazó cuatro veces. Aquí los problemas fueron el traslape de tres curvas y la vía del ferrocarril que se desarrolla paralelo al eje del camino en construcción en un nivel superior, que debido al acercamiento del corte se pensó que podía desestabilizarse. Como era de esperarse, las autoridades de los FF.CC. tuvieron conocimiento del problema y solicitaron la suspensión de la obra en tanto esta situación no se resolviera. Representantes de FF.CC. y la JLC del estado se reunieron. Los acuerdos a que se llegaron fueron los siguientes:

- 1.- En relación al corte realizado en el Km. 4+980 al 5+080 del camino, la vía se protegió de la siguiente manera:
 - a).-Se cortó la parte adyacente a la vía hasta dejarlo a su

nivel y posteriormente se construyó una cuneta para captar el agua que pudiera caer sobre esta superficie.

b).-Se zampeó el talud hasta la parte superior de la cuneta.

c).-Se construyó un muro de contención en los cerros del camino con una altura de 1.50 m.

Con el trabajo anterior se consideró resuelto el problema de inestabilidad que pudo presentarse por este corte y se protegió la vía del posible desplazamiento.

2.-En relación al problema de drenaje presentado a la altura del Kilómetro 5+000 al 5+260, se estableció un tubo de 0.90 m. de diámetro por debajo del muro de contención, con un colector a la misma altura que la parte superior del muro para captar el agua que escurría por el piedraplen en que se apoyaba la vía del ferrocarril.

3.-En el corte proyectado para el tramo del Km. 5+300 al 5+400, se detectó que se alojaba en roca y era necesario romper con explosivos para formar el corte del proyecto. El problema se solucionó de la siguientes manera:

a).-Se aceptó de común acuerdo respetar el trazo original con del objeto de aprovechar los trabajos realizados. Con el producto del corte paralelo a la vía, se obtuvo el material suficiente para tender una capa considerable que ahogó los rieles, previendo con ésto que las rocas, producto de las explosiones cayeran sobre los mismos y el impacto afectara la estabilidad de los mismos. En relación a los cortes restantes paralelos a la vía, los representantes de los FF.CC. no pusieron

objeción alguna después de revisar las secciones transversales de las vías y el camino y verificar las distancias entre los mismos; solo recomendaron revisar los taludes del corte proyectado para evitar posteriormente la formación de socavones.

3.6. -REFERENCIACION DEL TRAZO DEFINITIVO.

Con frecuencia, los puntos base de la línea definitiva se pierden entre la maleza, son arrancados o movidos de su sitio por el paso de los animales u otras circunstancias accidentales; sucede lo mismo con el estacado, dificultándose la localización del retrazo posterior cuando se inicia la construcción del camino.

Por tales circunstancias, deben referenciarse convenientemente todos los puntos principales de la línea definitiva, tales como: PST, PC, PI y PT, si el trazo cuenta con curvas circulares y TE, EC, CE y ET si son curvas espirales.

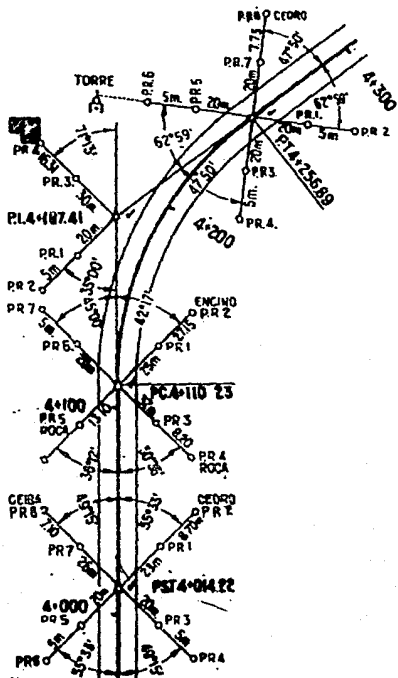
En la práctica se recomienda para tangentes largas el establecimiento y la referenciación de tres o cuatro puntos sobre tangente (PST) por kilómetro, de preferencia a cada 300 m. y nunca a intervalos mayores de,600 m. Los puntos de referencia se colocan fuera del derecho de vía, los ángulos se miden en cuadrantes, tomando como origen el eje del camino. En los Puntos de intersección (PI) se toma como eje la tangente del lado del PC. La numeración de los puntos de referencia se hace invariablemente en el sentido del giro de las manecillas del reloj, de adentro hacia fuera y comenzando adelante y a la

derecha del eje del camino. Siempre se debe consignar las distancias parciales del punto referenciado al primer PR y de éste al segundo PR, como se indica en el esquema número 7 que se anexa. Las distancias se miden paralelamente al terreno. Se eligen puntos bien definidos que sean visibles desde la línea de preferencia: rocas, troncos de árboles corpulentos, aristas de construcciones, acantilados, etc., que se marcarán (con pintura roja o negra) con una circunferencia de 20 cm., de diámetro, una tachuela o punto en el centro y la anotación PR-1, PR-2, etc. para que puedan identificarse fácilmente. En los lugares en donde se marcan las referencias con trompo y estaca, se recomienda cubrir a los primeros con un monumento de piedras o tierra, de unos 80 centímetros, de altura aproximadamente, que los protejan y marquen su existencia.

CUARTA PARTE.

ANALISIS DE RESULTADOS.

De un total de diecinueve curvas que integraron en el tramo, en estudio, diez se trazaron en terreno montañoso con un grado máximo de curvatura de 4° ; lo que equivale al 52.6 % del total de curvas. A estas curvas se les asignó una longitud de espiral de 94.00 m.; para las otras el grado varió entre $0^{\circ} 15'$ y $3^{\circ} 45'$ y las longitudes de espiral variaron entre 65.00 y 94.00 m. A las curvas con grado de $0^{\circ} 15'$ a $2^{\circ} 00'$ se les asignó una longitud de espiral de 65.00 m. Con las longitudes de espiral, fué posible obtener los valores de los elementos: θ_s , p , k , Y_c , X_c , TL , TC y ϕ'_c para cada grado de curvatura y 90 km/h., con los cuales se elaboró una tabla similar a la proporcionada por el personal de la Secretaria, para la misma velocidad. La longitud de espiral para el grado máximo de curvatura, se obtuvo tomando en cuenta la recomendación que AASHO hace para ello y que consiste en igualar la longitud de la espiral con la longitud necesaria para dar la sobreelevación correspondiente a la curva circular. Considerando una pendiente longitudinal (m) de 215.625 (calculada), un ancho de carril (a) de 3.65 m. y una sobreelevación máxima (S) de 10% , se obtuvo una longitud de espiral de 78.703 m. para un camino de dos carriles; valor muy cercano al que maneja la AASHO (79.00). La longitud de espiral para un camino de tres carriles, se obtuvo considerando también el criterio que AASHO recomienda para este caso y consiste en multiplicar el valor anterior (78.703) por 1.2, obteniendo una longitud de:



MODELO PARA ESTABLECER PUNTOS DE REFERENCIA.

FIG. 5.1

FUENTE: S.A.N.O.P.
MEXICO, D.F.

$$l_e = 78.703 \times 1.2 = 94.443 \text{ m.}$$

valor que en el proyecto se manejó como 94.00 y correspondió a las curvas mas cerradas que fueron de 4°.

Para comprobar que el valor anterior era correcto, se recurrió a la tabla: "Longitud necesaria para transición de sobreelevación" de una publicación de AASHO, de donde se obtuvo un resultado similar. Considerando la velocidad de proyecto (90 km/h) y la sobreelevación máxima (10 %), la tabla dió un valor para L_c de: 78.569 m. que corresponde a un camino de dos carriles, aplicando el factor 1.2 al valor anterior se obtuvo la longitud de espiral para uno de tres carriles que es:

$$78.569 \times 1.2 = 94.282 \text{ m.}$$

valor muy parecido al anterior (94.443 m.).

Por otra parte, el valor asignado a las transiciones para la sobreelevación de las curvas con grado de: 0° 15' a 2° 00' fué de 65.00 m. Este valor se obtuvo de aplicar la fórmula:

$$l_e = m a S,$$

que AASHO recomienda para el caso. El valor de la velocidad considerada fue de: 48.279 Km/h (30 mph.) para la que corresponde una pendiente longitudinal de $P = 1/150$; siendo los valores de "m" y "a", 150 y 3.65 m. respectivamente.

Substituyendo estos valores en la expresión anterior se tiene:

$$l_e = 150(3.65)(0.10) = 54.75 \text{ m.}$$

longitud que corresponde a un camino de dos carriles, si se aplica el factor 1.2 se tiene:

$$l_e = 54.75(1.2) = 65.70 \text{ m.}$$

que es la longitud de espiral para un camino de tres carriles y que es muy cercano al asignado por SAHOP a las curvas de grados: $0^\circ 15'$, $0^\circ 30'$, $0^\circ 45'$, $1^\circ 00'$, $1^\circ 15'$, $1^\circ 30'$, $1^\circ 45'$ y $2^\circ 00'$ del proyecto.

Para confirmar este último valor, se procedió a obtenerlo de la tabla T-4, que para una velocidad de 48.279 Km/h (30 mph) y una sobreelevación de 10 % dió un valor de 54.864 m. que al afectarlo por 1.2 se obtuvo: 65.836 m., que es la longitud de transición para sobreelevación en un camino de tres carriles; valor muy cercano al obtenido por medio de la fórmula.

Para las curvas con grados de $2^\circ 15'$ a $3^\circ 45'$ se les asignó valores intermedios entre 65.00 m. y 94.00 m. según puede verse en la tabla T-3. En la práctica, los valores que se muestran al final de la tabla T-4 son aplicados como mínimos, independientemente del ancho de carril y de la sobreelevación. Cuando se usan valores menores, se obtiene como resultados, cambios bruscos del perfil de las orillas del pavimento que no se recomiendan. Estos valores mínimos se aproximan a la distancia recorrida en dos segundos a la velocidad de proyecto. Los valores de la tabla T-4, con frecuencia sirven de control para un proyecto real, pero para un alineamiento de alta categoría se sugiere que las transiciones de sobreelevación sean más largas.

*

QUINTA PARTE.

C O N C L U S I O N E S .

Después de analizar los criterios de diferentes autores que se han dedicado al estudio de la Clotoide aplicada a carreteras y FFCC, es posible concluir afirmando que la longitud mínima de espiral universal, no existe. Si para un proyecto de camino, se aplican las diferentes fórmulas que se han obtenido a partir de estudios realizados, puede observarse que las longitudes mínimas de cada autor difieren considerablemente.

La elección de la longitud de espiral aplicable, a un cierto ángulo de deflexión (Δ), con frecuencia está condicionada a las longitudes que en el terreno es posible dar a la tangente de la espiral (T_e) o a la distancia al vértice, (externa). Cuando se usa una curva espiral, la transición de sobreelevación generalmente se desarrolla sobre la longitud de la espiral. Dependiendo de la fórmula y factores usados, la longitud de la espiral para una curva particular y una velocidad de proyecto dada, puede ser menor o mayor que la longitud de sobreelevación que se da en la tabla T-4.

En la mayoría de los casos los valores calculados para longitud de espiral y longitud de distancia de sobreelevación no difieren en gran cantidad, pero considerando la naturaleza empírica de ambas, se recomienda hacer una corrección en una, para no tener dos grupos de valores cuando se trata de fijar un control en un proyecto. La longitud de la distancia de sobreelevación se aplica a todas las curvas sobreelevadas; concluyendo que este valor también debe usarse en lugar de las longitudes de espiral mínimas.

Para satisfacer los requisitos de seguridad y confort, la transición de sobreelevación debe desarrollarse uniformemente sobre una longitud adecuada o para las velocidades de circulación correspondientes.

En la práctica común de proyecto, se ve que la longitud que predomina es la calculada para dar una buena apariencia y aspecto de la transición de sobreelevación. Las longitudes requeridas de espiral, determinadas de otra manera, con frecuencia son más cortas que las determinadas por apariencia; por lo que las fórmulas para valores de espiral dan lugar a valores empíricos de longitud de transición que resultan más largos. Aunque en algunos países se han establecido rangos de longitudes de transición de control, no existe una base empírica universal aceptada que considere todos los anchos de pavimentos usados en carreteras.

Por razones prácticas, la longitud mínima aceptable de transición debe tener un valor tal, que un vehículo que se desplace a la velocidad de proyecto tarde cuando menos 2 segundos en recorrerla.

La longitud de transición aplicable a los pavimentos más anchos que 2 carriles, está sujeta a la misma obtención teórica que la correspondiente para caminos de dos carriles. Sobre esta base, las longitudes para caminos de cuatro carriles serían el doble de los valores obtenidos para caminos de dos carriles y los correspondientes para caminos de seis carriles serían el triple. Aunque las longitudes de este orden pueden considerarse deseables, especialmente con espirales en las que el cambio de por cierto de sobreelevación se efectúa sobre su longitud,

frecuentemente no es posible poner longitudes basadas en esas relaciones directas. Aún cuando una cantidad considerable de proyectistas especializados en la materia coinciden en que las longitudes de transición de sobreelevación para los pavimentos anchos, deben ser más largas que las correspondientes para caminos de dos carriles, no se ha aceptado un criterio general para la relación de longitud de ese caso.

Sobre una base totalmente empírica, se ha llegado a la conclusión de que las longitudes de transición de sobreelevación mínima para pavimentos más anchos que dos carriles, deben ser como sigue:

Caminos de tres carriles: 1.2 veces la longitud para caminos de dos carriles.

Caminos de seis carriles: 2.0 veces la longitud para caminos de dos carriles.

Se recomienda, por ventajoso, considerar durante el estudio y proyecto, directamente las curvas con su transición, en lugar de realizar posteriormente la modificación de las curvas circulares.

Por otra parte, el empleo de la Clotoide como arco de transición, ofrece a la vista un camino con características agradables; permitiendo a los conductores adherir su vehículo al terreno (carpeta) cuando recorre la curva a velocidad de proyecto. La adecuación de las curvas al terreno tiene como consecuencia menor movimiento de tierras, lo que supone una considerable ventaja en la construcción, así como una reducción en el costo del camino.

TABLA T-4.

LONGITUD NECESARIA PARA TRANSICION DE SOBREELEVACION.

Camino de dos carriles de 3.65 m. c/u.

sobreelevacion: en por ciento.	<i>l</i> = Longitud de transición de sobreelevación en m. para velocidad de proyecto en km/h. de:					
	48.279	64.372	80.465	90.000	96.558	112.651
0.02	10.668	12.192	15.240	16.142 ¹	16.764	18.288
0.04	21.336	25.908	28.956	31.665 ¹	33.528	36.576
0.06	33.528	38.100	44.196	46.905 ¹	48.768	54.864
0.08	44.196	51.816	57.912	62.426 ¹	65.532	73.152
0.10	54.864	64.008	73.152	78.569 ¹	82.296	91.440
0.12	65.532	76.200	88.392	94.712 ¹	99.060	109.728
long. mínima de proyecto s/ considerar la sobreelevación.	30.480	38.100	45.720	50.230	53.340	60.960

¹ = valores obtenidos mediante interpolación.

*

SEXTA PARTE.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- 1.-Fernandez P. O. Espinoza L. E. "Caminos Planeación, diseño geométrico, terracerías y drenaje".- Chapingo, Méx. 1967.
- 2.-Hickerson, F. Thomas. "Levantamiento y trazado de Caminos". Edit. Mc Graw Hill. Méx., 1969.
- 3.- Ilesley Henes L. "Práctica Vial Americana". Vol. 1. (Trad. de E. F. Tagle). Librería y Edit. El Ateneo, Buenos Aires, Arg. 1948.
- 4.-Krenz Alfred y Osterloh H., "Curvas de Transición en Carreteras" (Manual de Clotoides).- Edit. Tecnos, Madrid 1975.
- 5.-Landa Germán G. "Principios para el Proyecto Geométrico de Caminos". Cap. II y III de: "A Policy on Geometric Design of Rural Highways".- AASHO, 1955.- Dirección Gral. de Proyectos y Laboratorios. Depto Técnico. SOP. México, D.F. 1962.
- 6.-Mendoza Aleida.- Manual de Campo.- Ediciones de Ciencia y Tecnología. Instituto del Libro.- La Habana, Cuba. 1969.
- 7.-M. Eisber, R. y S. Lerner, Física. vol. 1. Fundamentos y aplicaciones. Edit. Mc Graw Hill, Méx. D.F., 1984.
- 8.-R. Resnick, David Halliday. Física, vol. 1. Cla. Editorial Continental S.A. de C.V.-Décima cuarta edición.- Méx. D.F. 1988.
- 9.-Sears Weston F., Mécanica, Movimiento ondulatorio y calor. Edit. Aguilar.- Madrid, España. 1972.
- 10.-Caminos y Desarrollo.- Secretaría de Obras Públicas. Méx., D.F. 1975.

- 11.-Curvas Espirales de Transición.- Instructivo de Campo. Dirección de Proyectos y Laboratorios. Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas. Departamento de Vías Terrestres.- Méx., D.F. 1956.
- 12.-El Arte del Trazado de carreteras. Centro Regional de ayuda Técnica.- México.- Agencia para el Desarrollo Internacional (A.I.D). Dirección de Caminos del Ministerio de Fomento y Obras Públicas del Perú.
- 13.-Informe Preliminar del Proyecto de ampliación de la carretera México-Toluca.- Dirección de Servicios Técnicos. Dirección de Ingeniería de Tránsito. SAHOP.- México, 1978.
- 14.-Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras. Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. Primera edición. Tercera reimpresión.- Talleres Gráficos de la Nación. México, D.F. 1981.
- 15.-Revista AISOP núm. 3 de la Asociación de ingenieros SOP. Epoca II. México, D.F. 1975.
- 16.-Tabla de elementos de la curva espiral.- Dirección General de Carreteras por Cooperación. SAHOP. México, D.F. 1978.