



**SCT**

# Conceptos que Conforman el Proyecto Ejecutivo de Carreteras

## PRESENTACIÓN

El desarrollo económico de un país está ligado directamente a su infraestructura carretera, ya que a través de ella se logra unir a los diversos sectores de la sociedad y promover el intercambio de productos y mercancías, movimiento de personas y cubrir necesidades de servicios de toda la población. Para cumplir con los anteriores objetivos, debe existir una adecuada planeación, operación, y conservación de la red carretera nacional, todo esto en armonía con el medio ambiente, para que el usuario transite por la red con la mayor seguridad y confort.

El proyecto de una carretera está compuesto de distintas etapas que se encuentran ligadas entre sí y que en su conjunto darán como producto final un elemento de desarrollo fundamental en el crecimiento de un país. Está integrado básicamente por las etapas de planeación, selección de ruta, proyecto geométrico de la ruta definitiva y estudios y proyectos de ingeniería de detalle. Cada una de las etapas del proyecto ejecutivo de una carretera, se deben llevar a cabo cumpliendo una serie de estudios y proyectos, sin dejar de realizar alguno de ellos, ya que se encuentran ligadas entre sí como un todo.

El objetivo principal de éste documento denominado *Conceptos que Conforman el Proyecto Ejecutivo de Carreteras*, es la de describir cada una de las etapas que se necesitan realizar para elaborar el proyecto ejecutivo de una carretera, que van desde su planeación en gabinete a través de estudios económicos, sociales, políticos, medioambientales, hasta la conformación de la Carpeta Técnica del Proyecto Ejecutivo, que contiene todos los estudios de ingeniería como son proyecto geométrico, ingeniería de tránsito, geotecnia, hidrología e hidráulica, entre otros.

Este documento es una herramienta básica de consulta para todos los profesionistas relacionados con la infraestructura carretera y también será de gran utilidad para los gobiernos municipales, estatales y federales, para la planificación de su red, respecto de los elementos que componen el proyecto de una carretera.

Ciudad de México, Enero del 2012

## CONTENIDO

### PRESENTACIÓN

---

### PARTE I

### PLANEACIÓN

---

Introducción	11
Proceso de Planeación de la Obra Pública	13
Estudios de interacción Oferta-Demanda	21
Estudios de Ingeniería de Tránsito	22
Estudios de Pre-factibilidad Socioeconómica	24
Estudios Geotécnicos	26
Anteproyecto	28
Estudios de Factibilidad Técnica	29
Estudios de Factibilidad Ambiental	29
Estudio de Factibilidad Legal	31
Estudio de Costo-Beneficio	31

## PARTE II

### SELECCIÓN DE RUTA DEFINITIVA

---

Introducción	34
Selección de Ruta Preliminar	35
Selección de Ruta Definitiva	40
Levantamiento fotogramétrico	41
Control del vuelo Aero-fotogramétrico	42
Planificación y Ejecución del Apoyo de Campo	43
Aero-Triangulación	43
Orientación de los Modelos Estereoscópicos	44
Restitución Planimétrica	44
Fotointerpretación Geotécnica	46
Fotointerpretación Hidrológica	50
Fotointerpretación de Cruces	51
Fotointerpretación Socioeconómica	54
Paisaje	56
Resultados del Análisis Fotogramétrico	57
Propuesta de Especificaciones Geométricas	58
Alineamiento Horizontal y Vertical	60

Costos de Operación	67
Ante-Presupuesto de las Rutas Estudiadas	70
Selección de la Ruta Definitiva	73

### **PARTE III**

#### **PROYECTO DEL TRAZO DEFINITIVO**

---

Levantamiento Fotogramétrico	76
Geotecnia Regional	76
Ingeniería de Tránsito	81
Selección de Entronques y Pasos a Desnivel	87
Drenaje	92
Planta y Perfiles Topográficos	96

### **PARTE IV**

#### **PROYECTO EJECUTIVO**

---

Introducción	109
Trazo en Campo del Proyecto Definitivo	110
Toponimia	115
Topografía para Obras de Drenaje	117

## CONCEPTOS QUE CONFORMAN EL PROYECTO EJECUTIVO DE CARRETERAS

---

Topografía de Pasos a Desnivel	119
Estudio de Drenaje Menor	121
Topografía	122
Cuenca	123
Funcionamiento del Drenaje	124
Cimentación de la Obra de Drenaje	124
Estudio Geotécnico para Terracerías	125
Estudio Geotécnico para Pavimentos	136
Estudio Geotécnico para Túneles	139
Estudio Topográfico para Entronques	149
Estudios Topohidráulicos-Hidrológicos	152
Estudios de Cimentación para Puentes	158
Laboratorio	162
Trabajos de Ingeniería	163
Proyecto Geométrico	166
Alineamiento Horizontal	166
Alineamiento Vertical	170
Proyecto de Puentes	181
Introducción	181

## CONCEPTOS QUE CONFORMAN EL PROYECTO EJECUTIVO DE CARRETERAS

---

Tipo de Puentes y Diseño Arquitectónico	182
Procedimiento Constructivo	186
Diseño Estructural	190
Elaboración del Proyecto Ejecutivo	193
Proyecto de Túneles	198
Introducción	198
Diseño Arquitectónico	200
Procedimiento de Construcción	201
Diseño Estructural	202
Elaboración del Proyecto Ejecutivo	209
Proyecto del Pavimento	215
Introducción	215
Diseño de la Estructura del Pavimento	217
Proyecto Ejecutivo y Procedimiento de Construcción	222
Proyecto de Muros de Contención	223
Introducción	223
Diseño Estructural del Muro	225
Proyecto Ejecutivo y Procedimiento de Construcción	227
Proyecto de Entronques	229

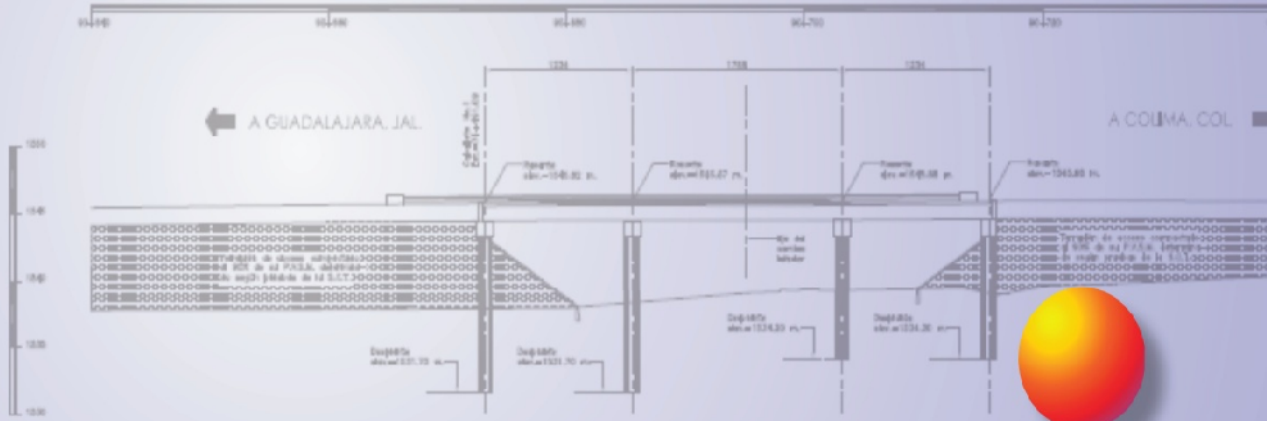


## CONCEPTOS QUE CONFORMAN EL PROYECTO EJECUTIVO DE CARRETERAS

---

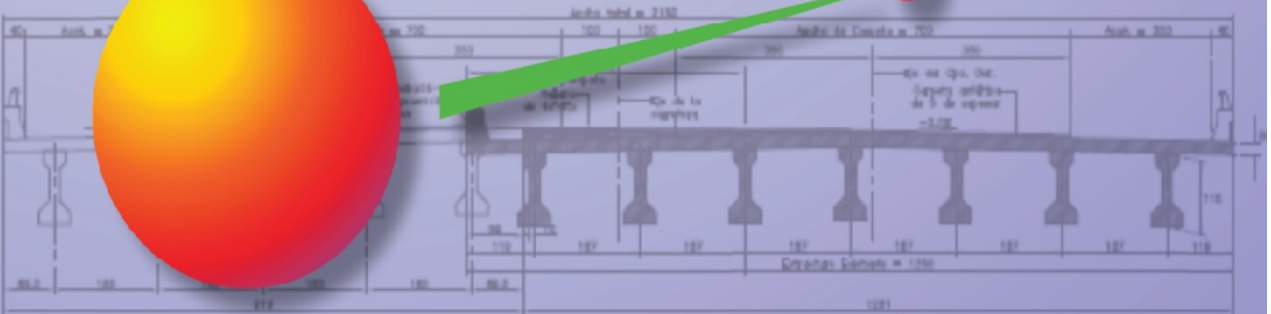
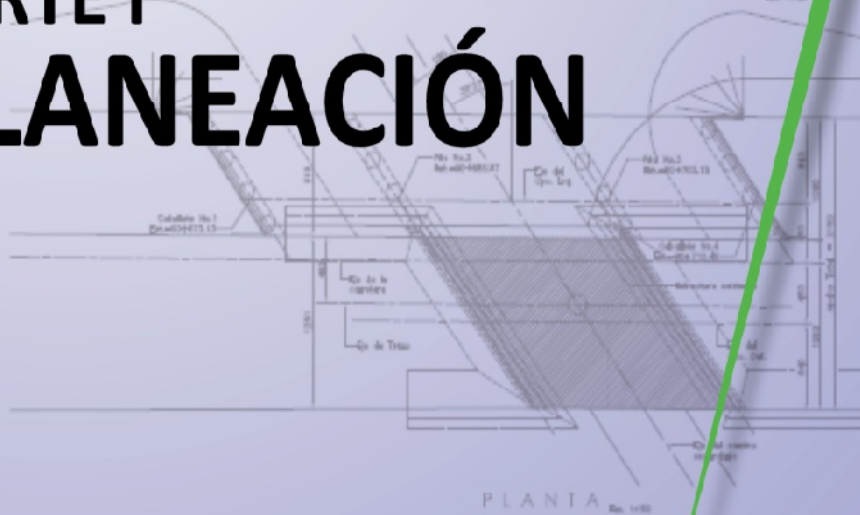
Introducción	229
Diseño	230
Proyecto Ejecutivo y Procedimiento de Construcción	231
Proyecto de Señalamiento	233
Introducción	233
Diseño	234
Proyecto Ejecutivo	235
Estudio de Impacto Ambiental	235
Introducción	235
Descripción del Estudio	236
Presentación del Proyecto Ejecutivo	239
Liberación del Derecho de Vía	239
Elaboración de la Carpeta Técnica	242

2011



# PARTE I PLANEACIÓN

CORTE ELEVACION POR EL EJE DEL CPO. IZQ. Esc. 1:50



# PLANEACIÓN

---

## INTRODUCCIÓN

Para llevar a cabo la planeación de un sistema carretero, es preciso que se establezcan los objetivos que se quieren alcanzar con las acciones que se van a emprender, en forma concreta y realizable, satisfaciendo la demanda de transporte de personas y mercancías con un mínimo de recursos.

El objetivo de la planeación en carreteras, es evaluar la factibilidad del proyecto mediante el análisis del estudio socioeconómico, que dependerá de que los beneficios que se obtengan con la obra superen a los costos de inversión, mantenimiento y operación, cumpliendo con las expectativas de obtener un rendimiento en un plazo determinado.

Entonces, los principales proyectos y productos requeridos de la planeación son un anteproyecto de la carretera y un estudio socioeconómico, los cuales a su vez necesitan para su elaboración de estudios complementarios pero indispensables como son mediciones de tránsito, de traslado de mercancías y de personas, costos de construcción y conservación, análisis de rentabilidad, etc.

Entre los objetivos de una adecuada planeación de la red carretera está disminuir desequilibrios sociales y económicos, mejorando el desarrollo regional y el acceso a zonas rurales marginadas. Eficientando el uso de los recursos, satisfaciendo las necesidades del usuario, considerando aspectos de seguridad y movilidad, tomando en cuenta la protección al

medio ambiente y el desarrollo de proyectos que contribuyan al reordenamiento territorial y la eficiencia operativa.

Estableciendo los objetivos, se realiza el planteamiento de las actividades, llevando a cabo la preparación y la puesta en práctica de las acciones seleccionadas, con un sistema de control y seguimiento de la evolución de la red carretera.

Se debe conocer el estado actual del sistema a través de la descripción física de la red, la cuantificación de la demanda del tráfico en las distintas secciones de la red y la valoración de su funcionamiento.

La descripción de la red se consigue mediante el desarrollo de un sistema de gestión de todas las carreteras, en el que aparezcan cada uno de los tramos, las características geométricas del trazado, sus características físicas, estado del señalamiento, entre otros.

El conocimiento de la demanda actual en la infraestructura carretera, exige la realización de aforos de tráfico para determinar el número de vehículos y su composición vehicular, realizando estudios de origen-destino.

Para prever la demanda de tráfico, existen diversos métodos, debido a que depende de un gran número de factores, tales como el nivel de desarrollo económico de una región, la localización de sus actividades industriales, comerciales, políticas, innovaciones tecnológicas, etc. Una vez determinada la demanda que ha de soportar una carretera, la aplicación de la ingeniería de tránsito también se requiere obtener estimaciones de demanda, características de la circulación y la proyección futura.

En la selección de la opción óptima, debido a que en muchas ocasiones los objetivos son de tipo económico, es conveniente analizar diferentes

alternativas que resuelvan la necesidad inicial estudiando los beneficios que pueden obtenerse y los costos de su realización de estas opciones; se debe realizar una evaluación económica para cada alternativa de solución comparándola con la alternativa cero o “hacer nada”, con las alternativas que resulten rentables, es necesario hacer un análisis de los beneficios y costos incrementables en el que se comparen las alternativas, del cual saldrá la más rentable.

El proceso de planeación de carreteras a cargo de la Secretaría de Comunicaciones y transportes (SCT), lo efectúan las Direcciones Generales de Desarrollo Carretero (DGDC) y de Carreteras (DGC), teniendo como objetivo atender la conexión de las áreas económicas del país, modernización, expansión, y mejorar la calidad del servicio de la red carretera nacional.

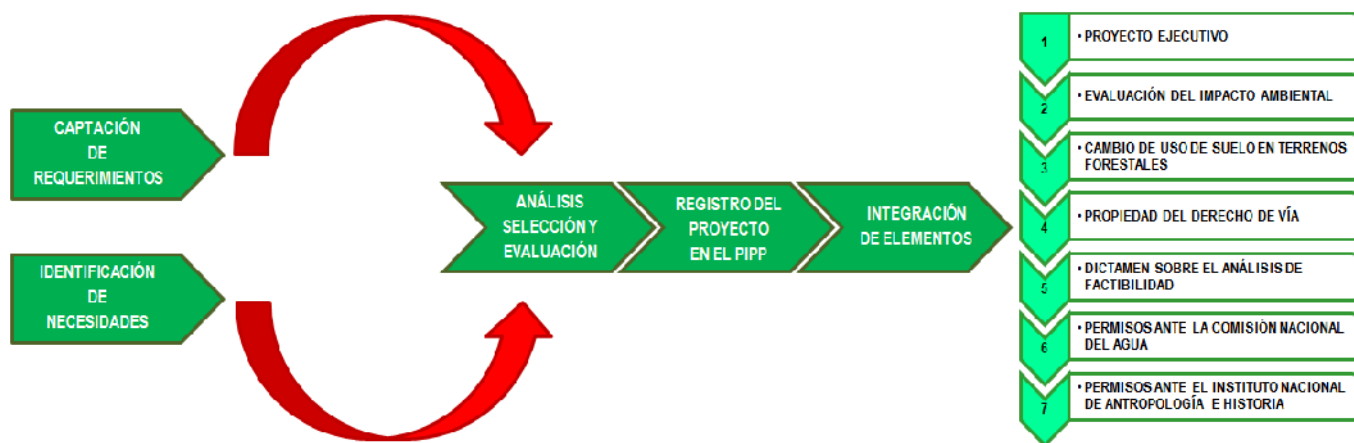
### **PROCESO DE PLANEACIÓN DE LA OBRA PÚBLICA**

El Proceso de Planeación de la Obra Pública se puede dividir en subprocesos con características y objetivos específicos, que al interactuar contribuyen a consolidar en tiempo y forma una Cartera de Proyectos con todos los elementos requeridos para soportar la formulación del Anteproyecto de Presupuesto de Egresos de la Federación; propiciando un flujo lógico y secuencial en el desarrollo de todas las actividades involucradas en el proceso.

1. Captación de Requerimientos.
2. Identificación de Necesidades.
3. Análisis, Selección y Evaluación.

4. Registro del Proyecto en el Proceso Integral de Programación y Presupuestación de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP).
5. Integración de Elementos.

### SUBPROCESOS DE LA PLANEACIÓN DE LA OBRA PÚBLICA



Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes 2011.

**El Subproceso de Captación de Requerimientos**, identifica el requerimiento de una obra de infraestructura. “*El Promovente*”, ya sea éste, un gobierno Municipal o Estatal, algún integrante de la Cámara de Diputados, o en general cualquier persona física o moral; detecta la necesidad de una obra de infraestructura que requiere ser financiada con recursos federales para: construir una nueva carretera federal, camino rural o alimentador para unir un punto de origen y uno de destino; modernizar una carretera federal un puente, un entronque, o un viaducto ya existentes; rehabilitar una carretera federal un puente, un entronque, o un viaducto ya existentes; o conservar una carretera federal, entre otros. En el subproceso se consultan los requisitos para el registro de solicitudes en la Cartera de Proyectos de la SCT y se integra un documento descriptivo o estudio preliminar el cual se registra en la misma. Independientemente de que en su momento la SCT establecerá comunicación con *el Promovente*, este podrá dar seguimiento a la evolución de su requerimiento a través de la Cartera de Proyectos de la SCT. En las fases descritas anteriormente, trabajan también los Gobiernos Estatales y algunos Consejos Regionales de Infraestructura, quienes junto con el PND aportan a la SCT los proyectos carreteros que ellos identifican para su modernización.

**En el Subproceso de Detección de Necesidades**, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)/Dirección General de Desarrollo Carretero (DGDC), analiza los documentos rectores de estrategias nacionales, como lo son: Plan Nacional de Desarrollo (PND), Programa Nacional de Infraestructura (PNI) y Programa Sectorial de

Comunicaciones y Transportes (PSCT), identificando las necesidades de infraestructura suficientes para dar cumplimiento a los objetivos y metas planteados en los mismos. De igual manera y a partir de la información de la operación y nivel de servicio de la red de carretera, proporcionada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)/Dirección General de Servicios Técnicos (DGST), identifica necesidades generadas por la interacción oferta-demanda, tomando en cuenta información como: aforos vehiculares de la red federal de carreteras, estadísticas de accidentes, estudios origen-destino, selección de segmentos, asignación de tránsito, entre otra. Finalmente concentra para su análisis y evaluación los requerimientos captados y las necesidades identificadas. En los subprocesos descritos anteriormente, trabajan también los Gobiernos Estatales y algunos Consejos Regionales de Infraestructura, quienes aportan a la SCT los proyectos carreteros que ellos identifican para su modernización.

**En el Subproceso de Análisis, Selección y Evaluación,** la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)/Dirección General de Desarrollo Carretero (DGDC) elabora una Planeación Anual, a partir de conjugar la información del PND y PNI, de los requerimientos captados, así como, de las necesidades identificadas; envía esta Planeación Anual a la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP). Así mismo, en este subproceso se analizan los requerimientos captados y las necesidades identificadas diseñando alternativas de solución que dependiendo de sus características son canalizadas al área de responsabilidad a la que corresponde su aplicación, en específico cuando se tratan de obras de conservación o rehabilitación de carreteras, o en su caso, de caminos rurales y alimentadores; en lo que respecta a soluciones que implican la construcción o modernización de carreteras se procede a evaluar mediante un Estudio de Pre factibilidad Socioeconómica la alternativa rentable, y decidir si puede ser una obra



de cuota, para el programa PPS, o bien, para programarse con presupuesto federal. Dependiendo de la fuente de recursos adecuada para cada solución se canalizan a las diferentes áreas dentro de la Dirección General de Desarrollo Carretero (DGDC), considerando fuentes de financiamiento distintas al PEF, tales como: Concesiones, Administración de Activos, Prestación de Servicios, entre otros. Para aquellas soluciones que son susceptibles de atenderse con recursos federales, evalúa su perfil y con base en el Anteproyecto (Ingeniería Básica) elaborado por la Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras (DGC) y registrado en la Cartera de Proyectos de la SCT, desarrolla el Estudio de Evaluación Costo-Beneficio y el de evaluación de factibilidad técnica, económica, ambiental y legal, mismos que envía a la Dirección General de Programación, Organización y Presupuesto (DGPOP) para trámite de registro en el Proceso Integral de Programación y Presupuestación (PIPP) de la SHCP.

**En el Subproceso de Registro del Proyecto de Inversión en el Proceso Integral de Programación y Presupuestación (PIPP) de la SHCP**, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)/Dirección General de Programación Organización y Presupuesto (DGPOP) recibe el Estudio de Costo-Beneficio y lo presenta ante la SHCP junto con su respectiva solicitud de registro en el PIPP. Por su parte la SHCP/Unidad de Inversión, con base en la revisión y análisis de la solicitud de registro y el Estudio Costo-Beneficio presentado procede a generar el número de registro en el PIPP el cual comunica a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)/Dirección General de Programación Organización y Presupuesto (DGPOP) para que esta continúe con el Proceso de Programación y Presupuestación. El Anteproyecto (Ingeniería Básica) que sirvió de base para el Estudio de Análisis Costo-Beneficio, pasa a la fase de pre inversión con la elaboración de Proyecto Ejecutivo, los

trámites de Derecho de Vía y estudios y gestiones de Impacto Ambiental, entre otros.

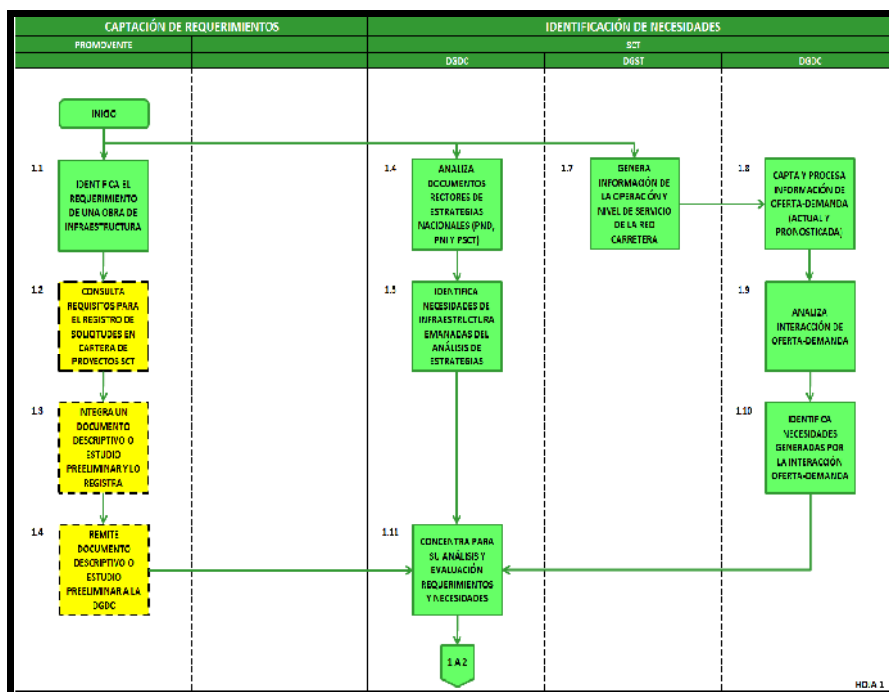
**El Subproceso de Integración de Elementos de Obra Pública** se realiza a través de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)/Dirección General de Carreteras (DGC), la cual contrata la ejecución de elementos que se deben cubrir en el proyecto. Es esencial que se disponga de la totalidad de los elementos, que se listan a continuación, para garantizar una adecuada dinámica de ejecución de la obra:

- a. Proyecto ejecutivo;
- b. Resolutivo de impacto ambiental;
- c. Cambio de uso de suelo;
- d. Liberación del derecho de vía; así como pago de bienes distintos a la tierra;
- e. Dictamen sobre el análisis de factibilidad;
- f. Permisos ante la CNA;
- g. Permisos ante el INAH, de ser el caso.

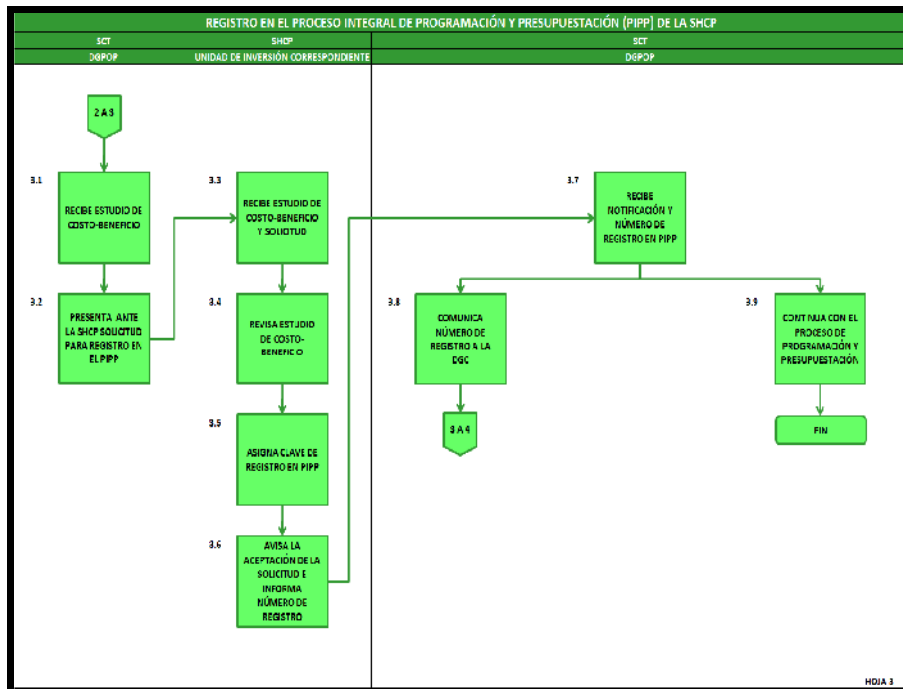
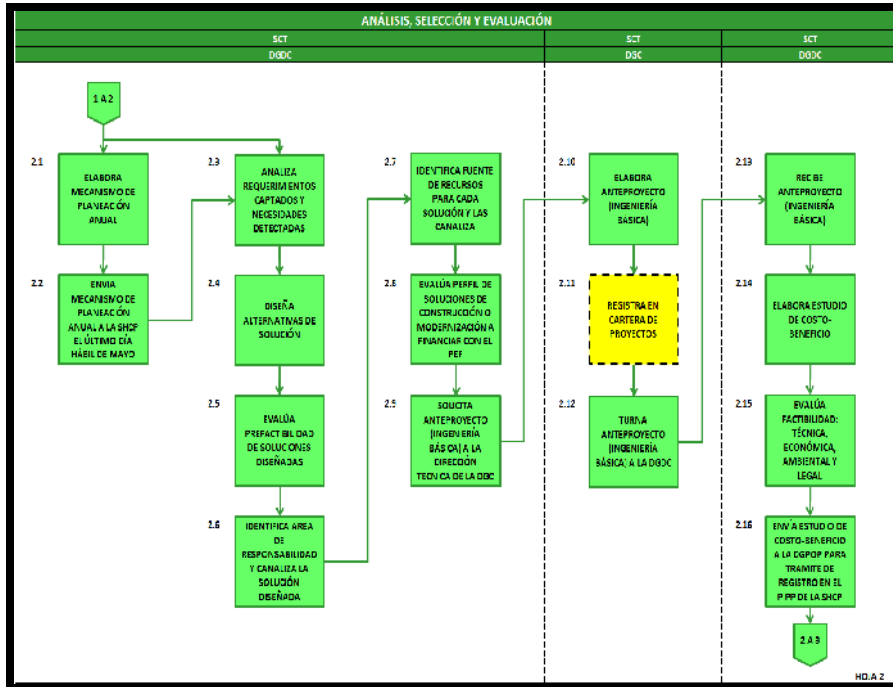
La integración de los elementos completos en la Cartera de Proyectos de la SCT, implica que todos los productos formulados o la evidencia documentada de la autorización ante alguna instancia normativa, que validan la conclusión del elemento, se encuentren digitalizados y vinculados en la herramienta tecnológica para la Gestión de Cartera de Proyectos de la SCT o en caso de no estar digitalizados, que estén disponibles en los archivos físicos de las áreas responsables de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)/Dirección General de Carreteras (DGC), misma que con esta información apoya la priorización de proyectos para integrar el Anteproyecto de Presupuesto de Egresos de la Federación, proceso a través del cual y en función al techo presupuestal, se deben construir diversos escenarios de inversión

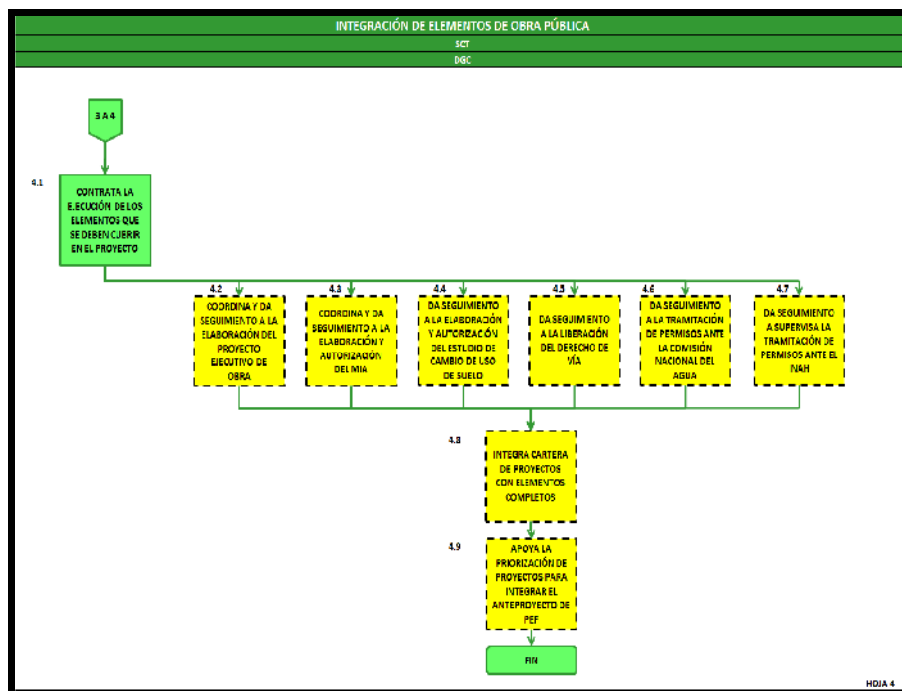
para la asignación de recursos integrados en la cartera de proyectos, con base en diversos criterios de priorización previamente definidos. Esta construcción de escenarios se soporta en la herramienta para la gestión de la cartera de proyectos de la SCT, misma que de manera sistemática es objeto de actualización, en cuanto el estatus de los proyectos, la programación de recursos a mediano plazo, el avance en la integración de elementos y la documentación registrada.

## DIAGRAMAS DE FLUJO DE LOS SUBPROCESOS DE PLANEACIÓN DE LA OBRA PÚBLICA EN LA SCT



# CONCEPTOS QUE CONFORMAN EL PROYECTO EJECUTIVO DE CARRETERAS





Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes 2011.

En los apartados siguientes se describirán los estudios efectuados en el proceso de planeación, cuya finalidad es la de analizar la factibilidad absoluta del proyecto de inversión, respaldando todas las consideraciones del proyecto y culminando con los resultados del Estudio de Costo-Beneficio, que se presentará a la consideración de la Secretaría de Hacienda.

## ESTUDIOS DE INTERACCIÓN OFERTA-DEMANDA.

Los estudios de interacción entre oferta y demanda, considerando en la demanda los pronósticos de futura demanda, conducen a la conclusión en primera instancia de la necesidad de una nueva carretera o de mejoras a la carretera existente; o bien, se puede concluir también que por ahora la demanda actual y a futuro se encuentran cubiertas adecuadamente y no se requiere obra alguna. En el caso de que la

oferta no cubra la demanda, se requerirá una mejora y el caso pasará al análisis de alternativas de solución.

En la SCT, en particular en la Sub Secretaría de Infraestructura, este proceso es constante, se recopila información y se hace un análisis por lo menos anualmente en todas las carreteras federales, ya que la demanda puede variar por cambios de desarrollo regional, proyectos industriales, inmigraciones, por nuevas zonas urbanas, etc.

Esta actividad del proceso de planeación produce constantemente necesidades de proyectos de carreteras nuevas o de mejoras a las carreteras existentes que pasan a la siguiente actividad, que consiste en el Análisis de Alternativas de Solución.

### **ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE TRÁNSITO**

Se consideran dos etapas en la elaboración de este estudio correspondiente al proceso de planeación. La primera es el monitoreo constante de los volúmenes y clasificación del tránsito en toda la red federal de carreteras, y la segunda que consiste en la identificación de una demanda de servicios en base tanto a la información de la primera como a que hayan sido detectadas necesidades regionales o nacionales derivadas de desarrollos económicos, industriales, de crecimiento de ciudades, migraciones, tanto actuales como a futuro.

Respecto a la primera etapa, consistente en el monitoreo de los volúmenes y clasificación del tránsito efectuada por la SCT, a través de su Dirección General de Servicios Técnicos (DGST).

Reconociendo que el valor de esta información trasciende el ámbito de la propia Secretaría, anualmente a través de la DGST se edita la

información presentada a través de la página web de la Dirección, cuya dirección es: [www.dgst.sct.gob.mx](http://www.dgst.sct.gob.mx). Para facilidad de consulta, la información se presenta organizada por estados de la república bajo el rubro de: Atención a Usuarios/Datos Viales.

El conocimiento del flujo vehicular en una red de carreteras permite conocer el grado de ocupación y las condiciones en que cada segmento opera; el análisis de su evolución histórica permite definir las tendencias de crecimiento y el momento a partir del cual ciertos segmentos dejarán de prestar un servicio adecuado, convirtiéndose en el cuello de botella del transporte que estanque el desarrollo en lugar de seguir propiciándolo.

Una adecuada auscultación del tránsito en una red resulta así fundamental para su adecuada operación, mantenimiento y desarrollo; es por lo tanto un insumo indispensable para la planeación de todas las actividades a realizar en la red.

En lo que a la infraestructura respecta, permite apoyar la asignación de tránsito a los nuevos segmentos propuestos, así como definir sus características geométricas y estructurales. En los segmentos existentes permite priorizar las necesidades de mantenimiento, definir el momento de las modernizaciones o reconstrucciones y señalar la necesidad de rutas alternas.

En lo que a operación respecta, el conocimiento del flujo vehicular permite comparar la oferta de servicios con la demanda existente y realizar análisis operacionales que orienten el encauzamiento del tránsito y el desenvolvimiento de la red.

Para conocer la magnitud de estos volúmenes, así como su evolución, se tienen instaladas más de 150 estaciones de aforo permanente de

vehículos; además se hacen estudios puntuales de composición vehicular y de variaciones en los diferentes días de una semana, así como también de variaciones horarias.

El trabajo de auscultación permanente es elaborado por un grupo de Ingenieros especialistas en Ingeniería de Tránsito y en Vías Terrestres, auxiliados por Ingenieros en Sistemas de Cómputo.

La segunda etapa del Estudio de Ingeniería de Tránsito a nivel de Planeación de Proyectos Carreteros, es elaborado por los Ingenieros con especialidad en Vías Terrestres de la DGDC, y consiste esta etapa en la detección de tramos carreteros en los que la demanda supera la oferta de servicio actual o a futuro, en cuyo caso proceden a considerar una propuesta de modernización, ampliación o nueva ruta carretera, que pasará al siguiente análisis, titulado: “Análisis de Alternativas de Solución”, donde se dictaminará si la propuesta es rentable; de lo contrario, se buscará otra alternativa y se analizará nuevamente, hasta encontrar una alternativa rentable que satisfaga la demanda de servicio.

### **ESTUDIOS DE PRE-FACTIBILIDAD SOCIOECONÓMICA**

Para cada una de las necesidades de demandas por satisfacer identificadas en esta actividad, se elabora una alternativa de solución, es decir, una propuesta de nueva carretera, o bien de ampliación o modernización de una existente, que mediante un estudio de pre factibilidad socioeconómica se determina si es rentable; si no lo es, se necesita considerar otra alternativa para nuevo análisis hasta obtener una alternativa rentable.

La evaluación socioeconómica que se aplica para los análisis de las alternativas como se indica en el párrafo anterior, la describe la SHCP



de la siguiente manera: “La evaluación socioeconómica es la evaluación del proyecto desde el punto de vista de la sociedad en su conjunto; para conocer el efecto neto de los recursos utilizados en la producción de los bienes o servicios sobre el bienestar de la sociedad. Dicha evaluación debe incluir todos los factores del proyecto, es decir, sus costos y beneficios independientemente del agente que los enfrente. Ello implica considerar adicionalmente a los costos y beneficios monetarios, las externalidades y los efectos indirectos e intangibles que se deriven del proyecto.”

Para llevar a cabo esta primera evaluación socioeconómica se requiere elaborar un análisis de costo-beneficio simplificado, donde la evaluación de los costos se hace con valores de costo promedio según el tipo de camino, sin considerar todavía la elaboración de un anteproyecto. De la misma manera se consideran los costos de los beneficios.

El objetivo en esta etapa es determinar mediante una evaluación de pre factibilidad socioeconómica, si la nueva carretera, o la modernización de la carretera existente, puede ser construida mediante una concesión recuperable con pago de peaje; o si puede ser modernizada por una concesión sin pago de peaje, con sistema PPS (Proyecto de Prestación de Servicios) de pago por servicio prestado; o si debe ser construida con recursos del presupuesto federal. Dependiendo si los beneficios son monetarios o son indirectos derivados del proyecto, se podrá clasificar el proyecto en una de las tres posibilidades de obtención de recursos para su construcción.

En el caso de que el proyecto no pueda ser turnado a los Programas de Concesiones ni de PPS. Se turna a la Cartera de Proyectos Presupuestales.

De cada uno de los proyectos, la Dirección de Planeación debe elaborar en primer lugar un Anteproyecto, y enseguida, de cada Anteproyecto un estudio de Factibilidad Técnica, un estudio de Factibilidad Económica, un estudio de Factibilidad Ambiental, un estudio de Factibilidad Legal y por último, un estudio de beneficio-costos.

### **ESTUDIOS GEOTÉCNICOS**

Este es el primer estudio requerido cuando se planea una carretera, permite tener los elementos suficientes para definir la ruta más conveniente de la misma y tener el soporte necesario para la toma de decisiones a nivel de planeación.

Hasta hace poco tiempo se hablaba de la necesidad de un estudio geológico que luego habría de aplicar un ingeniero civil a sus necesidades de proyecto; hoy en día, se requiere un estudio geotécnico, que por definición aplica las ciencias de geología, mecánica de rocas y mecánica de suelos a la solución de los cuestionamientos de proyecto, en este caso aplicados a la elección de la ruta más adecuada en la etapa de planeación de una carretera, así como la prevención de las medidas de sostenimiento y estabilización en casos necesarios.

Se ha sabido alguna vez de deslizamientos de tierras en laderas de cerros o montañas que causan destrozos y pérdida de vidas, también hemos oído de puentes que al estar cimentados o apoyados en terrenos con baja capacidad de carga o inestables han colapsado o requerido de medidas de estabilización muy costosas. Asimismo, se han visto caminos con terraplenes que se hundían o se deformaban incontroladamente dando un pésimo servicio a pesar de las costosas medidas de rehabilitación.

El estudio geotécnico en la etapa de planeación tiene el objetivo de alertar al proyectista sobre la ruta que pueda tener algún problema de este tipo para que la evite en lo posible, o bien indicarle qué medidas debe prever si inevitablemente tiene que afrontar algún problema.

El estudio geotécnico necesario en esta etapa de planeación, debe proporcionar un plano en planta con todas las unidades geotécnicas que se encuentren en la zona donde se ubiquen todas las alternativas de ruta, así como un plano con los perfiles estratigráficos de las diferentes unidades geotécnicas.

Es muy importante señalar que el espesor de los perfiles geotécnicos debe limitarse a la zona de influencia de la carretera, que normalmente es de 50 m.

Se debe obtener también un plano tectónico de la zona, es decir un plano en el que se ubiquen todas las fracturas, fallas o discontinuidades de las unidades geotécnicas, describiendo su tipo y forma, así como sus consecuencias en las características de las rocas en su vecindad.

Revisar y estudiar cuidadosamente las condiciones hidráulicas de las diversas unidades de la zona, previniendo problemas en túneles, zonas bajas con problemas de asentamientos o baja capacidad de carga, problemas para los terraplenes o pavimentos, etc. En zonas montañosas se estudian las laderas, previendo su comportamiento al excavar cortes o túneles. Estudiar las posibilidades de bancos de materiales para pavimento y terracerías. Se debe elaborar un cuarto plano con las características geotécnicas de las diferentes unidades y recomendaciones específicas en cuanto a estabilidad de taludes de los cortes y cimentación de terraplenes, puentes y viaductos importantes y

cualquier información relevante para tomar decisiones en cuanto a la elección de la ruta más adecuada.

El estudio geotécnico lo elabora un ingeniero geólogo y un ingeniero geotecnista, quienes llevarán a cabo un trabajo de campo exhaustivo y suficiente, que completarán con un trabajo de gabinete en el que elaborarán los planos y el informe. El tiempo para la elaboración de este estudio depende naturalmente de la magnitud y ubicación de la obra, pero se considera que debe variar de uno a dos meses.

## **ANTEPROYECTO**

Como ya se comentó anteriormente, el anteproyecto de la carretera se basa en la elección de una ruta sobre los planos topográficos del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). Con el conocimiento previo de la demanda del tránsito, conocida por el monitoreo constante que hace la Sub Secretaría de Infraestructura, mediante el conteo de tránsito en toda la red federal elaborado por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) y publicado en la página de internet de la SCT con el título de Datos Viales, que están al alcance de todas las personas que los necesiten y con el conocimiento también del volumen que se está demandando, se elige el tipo de carretera, de acuerdo a los tipos de vehículos que se permitirá circular, el número de carriles, el ancho y la velocidad de proyecto.

La decisión es tomada por un grupo de ingenieros de planeación, quienes considerando que se trata de una etapa de Anteproyecto, basados en los antecedentes técnicos señalados, trazan la ruta que satisfaga la demanda y obtienen los costos por kilómetro de los diferentes tramos que componen toda la ruta, aplicando las estadísticas

de costos que se tengan hasta el momento en proyectos con características topográficas similares. Cabe señalar la importancia del conocimiento y experiencia de los ingenieros de planeación encargados del Anteproyecto, del cual dependen los estudios de Factibilidad que se elaboran enseguida y sobre todo el de costo-beneficio, que de no resultar una rentabilidad positiva, requerirá de un replanteamiento de los alcances del proyecto.

Con la elaboración del Anteproyecto, los ingenieros deben preparar el documento de presentación ante la Secretaría de Hacienda de acuerdo a los lineamientos vigentes que emita la Dependencia.

## **ESTUDIOS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA**

Deberá acompañarse el Anteproyecto de una justificación de la Factibilidad Técnica, en la que debe apoyarse la decisión de la ruta con el estudio geológico, el estudio de tránsito, y con una descripción de la magnitud de los cortes, terraplenes, puentes y demás estructuras previstas en el proyecto.

## **ESTUDIOS DE FACTIBILIDAD AMBIENTAL**

El estudio de factibilidad ambiental se abocará a la descripción preliminar del impacto negativo de la obra, sus medidas de mitigación, y sobre todo el impacto positivo que se obtendrá al estar la obra en operación. Este estudio ha estado siendo elaborado por Biólogos; sin embargo, por estas fechas están saliendo las primeras generaciones de Ingenieros Ambientalistas quienes, en compañía de los Biólogos, estarán a cargo de éstos estudios, que por ahora serán de tipo

preliminar para aplicarse a un Anteproyecto, pero que posteriormente, de obtenerse la aprobación de Hacienda, en su etapa de proyecto ejecutivo será un estudio de Impacto Ambiental definitivo que deberá ser aprobado por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Todos los Proyectos de carreteras tienen impactos ambientales negativos, pero también tienen importantes impactos positivos. Una carretera, al proporcionar otra alternativa de circulación a los usuarios, puede evitar congestionamientos en muchas rutas y se tendrán mejores opciones de circulación con la nueva carretera, evitando los congestionamientos, disminuyendo la contaminación ambiental por emisiones y por ruido.

Por otra parte, el proyecto carretero bien planeado, disminuirá costos de operación de todos los vehículos, lo que redundará en aumento del Producto Interno Nacional y en consecuencia ahorros en el presupuesto nacional para inversiones en el medio ambiente.

Los impactos negativos principales de una nueva carretera, son por deforestación en el área de influencia, en áreas de bancos de materiales, de bancos de depósito de material sobrante o de desperdicio, y deterioro en el hábitat biológico de las especies locales en todas estas áreas; sin embargo, es ya parte de todos los proyectos el diseño de las medidas de mitigación de dichos impactos. Tales medidas pueden ser siembra en áreas escogidas para compensar la pérdida en las áreas trabajadas; recuperación de las áreas de depósito de material sobrante mediante nivelaciones y siembra; procuración de medidas de conservación de las especies afectadas, como puede ser acceso a depósitos de agua o creación de nuevos depósitos, así como siembra de vegetales necesarios para la supervivencia de las especies, etc.

El estudio de factibilidad ambiental en esta etapa de planeación, se limita a establecer la posibilidad de implementar todas las medidas necesarias para la mitigación de los impactos negativos, así como la cuantificación de los impactos tanto negativos como positivos, tomando en cuenta la necesidad del país de contar con un proyecto de inversión que estimule la economía regional y nacional, proporcione un servicio demandado por la sociedad y que, a la postre, pueda mitigar, solucionar y resarcir los impactos ambientales negativos inherentes al desarrollo de cualquier obra de ingeniería.

## **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD LEGAL**

El estudio de Factibilidad Legal lo elabora el grupo de abogados de la Dirección General de Asuntos Jurídicos de la SCT, o bien, una asesoría externa de un grupo de abogados, quienes prepararán para la Secretaría de Hacienda un documento en el que después de analizar los terrenos que podrían ser afectados por la ruta de la carretera dictaminará la factibilidad legal de la obra.

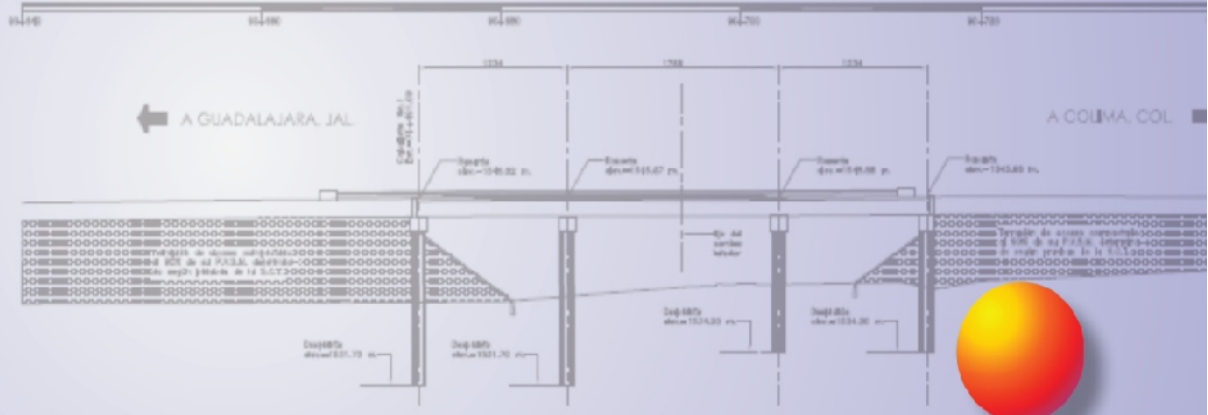
## **ESTUDIO DE COSTO-BENEFICIO**

Es el estudio culminante, que tomando en cuenta los resultados de todos los estudios que se hacen en la etapa de planeación, determina finalmente si el proyecto carretero, que es un proyecto de inversión, es rentable, es decir, que sus beneficios superen a sus costos. En este caso, siempre y cuando este Estudio de Costo-Beneficio se encuentre respaldado sólidamente por los resultados de factibilidad ya señalados (Técnica, Ambiental, Legal, etc.), recibirá el visto bueno de la SHCP, quien le asignará una Clave de Registro.

Como bien puede observarse, el Estudio de Costo-Beneficio debe ser elaborado por expertos Licenciados en Economía, en Administración de Empresas, o Financieros. Este grupo de profesionales es comandado por la DGDC, quien finalmente tramitará ante SHCP la obtención de la aprobación mediante la Clave de Registro.

Los estudios que acompañan al Estudio de Costo-Beneficio: el Estudio Geotécnico, el Estudio de Tránsito, el Anteproyecto de la Carretera, el Estudio de Factibilidad Técnica, Ambiental y Legal, requieren la participación de Ingenieros Civiles con especialidades en Geotecnia, en Ingeniería de Tránsito, en Vías Terrestres, Ambientalistas e Ingenieros en Sistemas de Cómputo. También se requieren Biólogos y Abogados. Desde luego todo este equipo de profesionales necesita el apoyo de dibujantes en AutoCAD y del equipo de oficina.

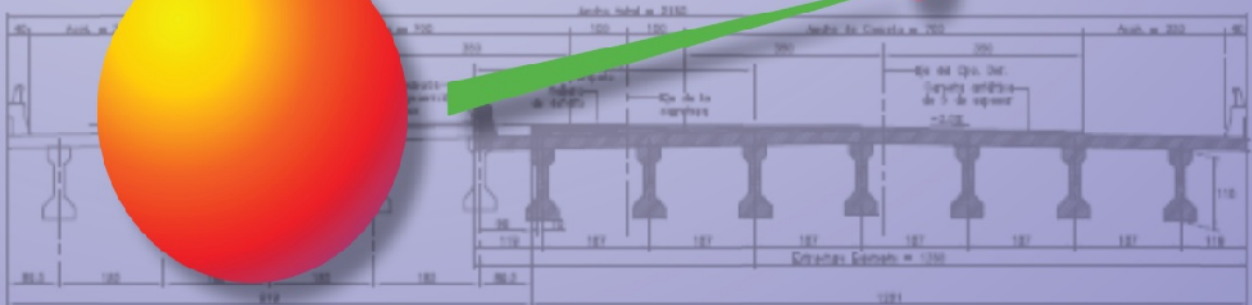




# PARTE II SELECCIÓN DE RUTA DEFINITIVA

CORTE ELEVACION POR EL EJE DEL CPO. [2Q]

PLANTA



## SELECCIÓN DE RUTA DEFINITIVA

---

### INTRODUCCIÓN

Una vez que se tiene la aprobación de la Secretaría de Hacienda mediante la asignación de un Número de Registro de Proyecto de Inversión, con el anteproyecto que aprobó Hacienda se inicia el proceso correspondiente a la tercera fase de la etapa de pre-inversión, constituida por la selección de la ruta definitiva.

En ésta etapa deben consultarse todos los estudios que fueron necesarios para obtener los datos con los que se hicieron los diseños y los planos en la etapa de planeación, para que al final que se concluyan los estudios y proyectos de detalle o de ingeniería básica, se elabore e integre la carpeta técnica final que usan los constructores para ejecutar la obra tal como fue concebida, planificada y proyectada.

En la selección de la ruta definitiva se tendrán proyectos parciales o individuales para cada punto de importancia en el desarrollo del trazo de la carretera que requieren análisis especiales, como lo son los puentes o los túneles, o bien para definir parámetros de caracterización de materiales o datos de diseño, como pueden ser los estudios de bancos de materiales para terracerías o estudios geotécnicos que proporcionan los datos indispensables para el cálculo del diagrama de masas.

## SELECCIÓN DE RUTA PRELIMINAR

Este estudio se realiza en gabinete y consiste en reunir todos los estudios y propuestas del estudio de Costo–Beneficio de la Etapa de Planeación, la información que se requiere del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), con las cartas topográficas, geológicas, de uso de suelo, entre otras, además de las fotografías aéreas o con el apoyo de programas cartográficos existentes en el internet, como pudiera ser Google Earth; la intención es la de seleccionar con precisión varias alternativas de ruta, de las cuales, una será la ruta seleccionada en función de sus características geotécnicas, topográficas, de impacto ambiental, sociales, costos, etc.

La diferencia principal entre la ruta escogida en la primera fase de Planeación, ruta con la que se hizo el estudio Beneficio-Costo, es que en este estudio de Selección Preliminar de ruta se estudia con más detalle la topografía, el drenaje, el uso de suelo, puntos obligados, entronques necesarios, etc.

El estudio de selección de ruta debe ser elaborado por un Director de Proyecto Geométrico y un Proyectista especializado en Proyecto Geométrico. La especialidad de estos ingenieros civiles, les hace expertos en proyectar de acuerdo con la topografía las curvas que requiera la carretera, para que los vehículos puedan circular con seguridad y confort a la velocidad de proyecto; también diseñan las pendientes o inclinación de los ascensos o descensos para que los vehículos pesados, con las cargas legales puedan ascender o descender a velocidad conveniente. También proyectan de acuerdo con la geología y la topografía de la zona la magnitud de los cortes y terraplenes, procurando que el volumen que se obtenga de la

excavación de los cortes sea igual o lo más parecido al volumen necesario para construir los terraplenes.

Analizan de igual manera las distancias de visibilidad de rebase y de parada de acuerdo con la topografía y las pendientes, para delimitar las zonas en las que se puede rebasar en el caso de carreteras con un carril para cada sentido de circulación. Estos especialistas, verifican la ubicación de entronques y pasos a desnivel, que requieren de un estudio y proyecto muy particular y detallado.

El trabajo del Proyectista de Proyecto Geométrico y de su Director, comienza con determinar los puntos obligados de paso de la ruta entre el origen y el destino. Estos puntos obligados de paso pueden obedecer a diferentes circunstancias, por ejemplo pueden ser cruces con ríos, que de acuerdo a las condiciones geotécnicas o a las condiciones hidráulicas conviene cruzarlos en lugares muy particulares. Pueden ser también lugares o zonas que deben evitarse, por ejemplo laderas de montaña cuyas condiciones geotécnicas no son adecuadas para pasar, ya que podrían ocurrir deslaves o deslizamiento de tierras, pantanos o zonas bajas con suelo compresible o sujeto a inundaciones estacionales, que representarían un peligro inminente.

Otro punto obligado de paso podría corresponder al cruce de una montaña, es decir el paso desde un sitio o población situada en un valle, en un lado de la montaña, a una población situada del otro lado de la misma, este paso habría que ser localizado en el punto más bajo entre ambas poblaciones, que corresponde a lo que se conoce como puerto de montaña. Otro punto importante sería el acceso a poblaciones intermedias entre el origen y el destino final, acceso a zonas de desarrollo futuro, tanto social como económico, o bien zonas que deban evitarse por posibilidades de deterioro ambiental y ecológico.

Una vez que se tienen los puntos de origen, destino y puntos obligados de la ruta, se inicia el análisis topográfico sobre las cartas topográficas del INEGI. El análisis consiste en trazar varias rutas posibles sobre las cartas topográficas que tienen escala de 1:50,000. Aunque la topografía a esta escala es solo aproximada, ya que tiene curvas de nivel a cada 10 m, es muy útil en esta etapa del estudio, ya que permite analizar el desarrollo del trazo tomando en cuenta la orografía del terreno; es decir, se puede trazar la ruta tomando en cuenta pendientes de ascenso, magnitud de cortes o hasta ubicar posibles túneles. El estudio topográfico estará completo cuando se tengan las alternativas suficientes para asegurar que se hayan tomado en cuenta todas las variables que pueden intervenir en la ubicación topográfica de la ruta.

Enseguida, debe elaborarse el análisis geológico, de drenaje y de uso de suelo. Este análisis se hace pasando las alternativas de ruta establecidas en el análisis topográfico a los planos del INEGI, geológico y de uso de suelo, y también al plano geológico que se hizo durante la etapa de planeación. Analiza que las rutas establecidas en el estudio topográfico no tengan inconvenientes desde el punto de vista geotécnico, como pudieran ser laderas inestables, materiales colapsables o de baja resistencia, zonas con materiales compresibles o de posibles hundimientos, zonas donde se pase por una falla geológica activa o que haya producido rocas muy fracturadas que pudieran producir derrumbes e inestabilidades si se construye por esa zona la carretera, etc.

Al estudiar las posibles rutas en los planos topográficos del INEGI, se consideran las dificultades que pudieran enfrentarse para drenar agua de lluvia o de corrientes de ríos permanentes o arroyos que con cierta periodicidad produzcan avenidas importantes y que requieran puentes u

obras de encauzamiento o de protección para la carretera. Se deben descartar de igual forma la posibilidad de zonas bajas de inundación que deben analizarse, así como cruce con lagunas o pantanos que tanto desde el punto de vista hidrológico como geotécnico se requiere cuidadosamente analizarlos.

El análisis del uso de suelo en las cartas del INEGI de cada una de las rutas obtenidas en el plano topográfico es un asunto de importancia. El analista debe considerar no perder de vista que la carretera puede producir un daño social superior al posible beneficio, por no escoger la ruta más adecuada desde el punto de vista de uso de suelo. Se dan casos frecuentemente en los que una ruta es mejor desde el punto de vista topográfico, pero socialmente afecta desfavorablemente a una población cercana a la ruta al truncarle su área de crecimiento o desarrollo futuro, o bien esta ruta aparentemente superior puede afectar a las mejores o únicas tierras de cultivo de una comunidad condenándola a la desaparición de sus fuentes de trabajo.

Aunque como se dijo al principio, este estudio se hace en gabinete, sin necesidad de que el proyectista tenga que hacer un estudio de campo, es muy conveniente y hasta quizás indispensable, que una vez que se hayan hecho los análisis descritos, se haga un recorrido en campo de cada una de las rutas, verificando si los supuestos en los análisis se cumplen en lo general. Este recorrido, normalmente no es de detalle, sino que tiene la finalidad de que el proyectista compruebe que no exista una diferencia notable entre lo supuesto en los análisis y en los estudios previos, geológico y de tránsito, con la realidad a la fecha en que está haciendo su estudio y análisis. Y también se sensibilice en cuanto a las consideraciones que haya realizado en los ámbitos: social, ecológico y de impacto ambiental.

Una vez hechos los análisis mencionados, se obtienen rutas que satisfagan los requisitos de cada una de las ramas de la ingeniería consideradas, es decir: topografía, geotecnia, drenaje, uso de suelo e impacto ambiental. Obtenidas estas rutas, se procede a la selección de Entronques.

Otro aspecto fundamental es la ubicación de los entronques que se tendrán en las rutas, el cual se basa en el análisis de las necesidades de conectar la carretera que se está estudiando, con poblaciones vecinas a la ruta o al acceso o conexión con otras carreteras ya en operación y que se crucen con la ruta estudiada.

De acuerdo con el tránsito esperado en la carretera en estudio y con el tránsito medido en las carreteras con las que se cruce, será el tipo de entronque propuesto en esta etapa de análisis y estudio, y podrá esperarse desde un entronque a nivel hasta un entronque a desnivel con carriles de incorporación y desincorporación adecuados. Todo esto debe ser previsto en este análisis de los entronques necesarios en cada una de las rutas propuestas.

Una vez que se tienen todos los análisis descritos, se procede a la ubicación final y definitiva de las rutas, obtenidas de los análisis topográficos, lo cual significa hacer un diseño preliminar de la carretera, que cumpla con las especificaciones fundamentales de alineamiento horizontal y vertical, es decir, que se puedan acomodar las curvas horizontales de manera que se logre la mayor seguridad y confort para los usuarios, respetando la velocidad de diseño y adaptando el proyecto a las condiciones topográficas del sitio y tomando en cuenta los resultados de los análisis efectuados.

El producto final de este estudio de selección preliminar de ruta, es un “larguillo”, o plano de las rutas propuestas, en toda su longitud, dibujadas en cartas topográficas del INEGI con escala de 1:25,000 o 1:50,000. Este larguillo con todas las rutas, o larguillos con cada una de las rutas, es la base para avanzar en el proyecto ejecutivo de una carretera.

## **SELECCIÓN DE RUTA DEFINITIVA**

El estudio consiste en el análisis de las rutas preliminares y en la determinación de la ruta definitiva para el estudio y elaboración del proyecto ejecutivo. Para la selección de la ruta definitiva, se analizan las rutas preliminares elaborando ante proyectos en cada una de ellas y estudiando sus costos totales, incluyendo costos de operación, para escoger la ruta que ofrezca el mejor servicio al menor costo y asignarla como ruta definitiva. Para este estudio ya es necesario elaborar trabajos de campo y auxiliarse con otros estudios cuyos resultados serán indispensables para la selección de la ruta definitiva. Todos estos otros estudios están basados en fotointerpretación, para lo cual son indispensables las fotografías aéreas de cada una de las rutas.

Es muy importante en esta etapa de selección de ruta definitiva, la toma de fotografías aéreas para la obtención del levantamiento fotogramétrico, que puede definirse como la obtención indirecta de la topografía de la zona mediante fotografías aéreas. Así que, tan pronto se tengan las rutas preliminares, deben planearse y ejecutarse los vuelos necesarios para la obtención de las fotos aéreas que son la base del estudio de la selección de la ruta definitiva. En esta etapa se requieren fotos obtenidas en vuelos altos, con obtención de fotos con escala 1:25,000. Además de la obtención de las fotos aéreas, es necesario contar con un apoyo terrestre, que es la colocación de algunos puntos de referencia para las



fotos, consistentes en mojoneras referenciadas mediante una triangulación topográfica.

### **Levantamiento fotogramétrico**

La fotogrametría se define como el conjunto de métodos y procedimientos mediante los cuales se puede deducir de la fotografía de un objeto, su forma, dimensiones, así como su situación; el levantamiento fotogramétrico es la aplicación de la fotogrametría a la topografía. En caso del estudio para carreteras, mediante la toma de fotografías aéreas de un área que cubre la zona de una ruta, y utilizando técnicas y equipos de análisis estereográfico, que permiten visualizar la zona en estereoscopia, se elaboran planos topográficos detallados con los cuales se puede trabajar el anteproyecto con sus especificaciones técnicas, cálculo de volúmenes y costos preliminares de construcción y de operación de las rutas preliminares.

Como resultado del levantamiento fotogramétrico, se pretende obtener un mapa o carta a base de un mosaico con las fotografías aéreas, con una escala ajustada y corregida, así como con las coordenadas correspondientes de todas las zonas, de cada una de las rutas por estudiar.

El estudio lo inicia un equipo de topografía que coloca en el campo, a lo largo de toda la ruta y aproximadamente a una distancia de 500 m entre sí, unos puntos de apoyo terrestre, que consisten en la colocación de una mojonera con un punto al que se le determinan sus coordenadas (xyz), mediante equipo de posicionamiento global (GPS). Las mojoneras se identifican mediante una cruz blanca de dimensiones suficientes para guía del avión que toma las fotografías, así como para que una vez que

se identifiquen en las fotos, sirvan de apoyo para la elaboración de los planos topográficos.

Una vez que se tienen en campo los puntos de apoyo y de control terrestre, se pueden hacer los vuelos para las tomas de las fotografías aéreas a las escalas que necesite el proyecto.

En resumen, las actividades necesarias para un levantamiento fotogramétrico son:

- Control del vuelo Aero-Fotogramétrico
- Planificación y ejecución del apoyo de campo
- Aero-Triangulación
- Orientación de los Modelos Estereoscópicos
- Restitución Planimétrica

En función de la finalidad del trabajo se determina la escala del vuelo, la focal, la superposición longitudinal y transversal de cada fotografía. Se planifican los ejes de vuelo de forma tal que se cubra toda la zona de interés. Se determinan las coordenadas geográficas de los puntos de entrada y salida de cada recorrido, las cuales guiarán al navegador del avión aero-fotogramétrico.

### **Control del vuelo Aero-Fotogramétrico**

En esta etapa se controla que todos los requisitos que hacen al vuelo (nitidez, superposición lateral y longitudinal, giros, etc.) se encuentren dentro de las tolerancias establecidas. Se realiza el control geométrico perspectivo del mismo.

## **Planificación y Ejecución del Apoyo de Campo**

En la etapa de planificación se determina la cantidad y ubicación de los puntos de campo. Es muy importante, dado que tienen gran influencia en la calidad final del trabajo. Se miden los Puntos de Apoyo Aerofotogramétrico (PAF), determinándolos mediante equipos GPS. Para ello se tiene en cuenta la cantidad de satélites tomados por el receptor que debe ser mayor a 4, tener un horizonte despejado por encima de los 15° y fundamentalmente deben ser identificables en el fotograma.

Posteriormente se referencian los puntos a la Red POSGAR, obteniéndose las coordenadas geográficas y a partir de ellas se obtienen unas coordenadas planas conocidas con el nombre de coordenadas Gauss-Kruger. Por cada punto se confecciona una monografía, se señala y marca con un punteado en la copia fotográfica correspondiente y se toman fotografías digitales que facilitan encontrar el punto en el terreno y permiten una perfecta identificación del punto de campo al operador de restitución en la etapa de aero triangulación.

### **Aero-Triangulación**

Esta etapa se encarga de densificar la cobertura fotográfica con una serie de puntos fotogramétricos que servirán en etapas posteriores a la perfecta orientación del par estereoscópico. Estos puntos unen los diferentes modelos y recorridos entre sí formando un bloque homogéneo de todo el trabajo. Se marcan 3 puntos de paso en cada fotograma y un punto de enlace entre recorridos. Por cada modelo estereoscópico tendremos 6 puntos de paso (3 a la izquierda, 3 a la derecha.) y 2 puntos de enlace (1 superior, 1 inferior), más los puntos de apoyo de campo anteriormente explicados.

Posteriormente se colocan en el estéreo restituidor cada uno de los pares, procediendo a orientar el modelo y leyendo en un sistema de coordenadas locales cada uno de los puntos de campo y fotogramétricos que intervienen en el modelo, obteniendo así coordenadas (xyz) locales.

En las etapas anteriores se han obtenido coordenadas en dos sistemas, de campo y locales. Para llevar todas las coordenadas al sistema de campo, se procesan todos los valores con un programa de ajuste espacial que compensa en bloque y detecta automáticamente errores excesivos. El programa determina el error medio cuadrático del bloque, las coordenadas de los puntos en el sistema de campo y los desvíos de las coordenadas (xyz).

### **Orientación de los Modelos Estereoscópicos**

Una vez obtenidas las coordenadas de todos los puntos fotogramétricos mediante la aero-triangulación, más las coordenadas de los puntos de campo, se prepara un mapa digital que va a ser la base de la restitución. Para ello se coloca en el aparato restituidor, las mismas diapositivas utilizadas en la aero-triangulación y se ajusta el modelo espacial a los valores obtenidos en el paso anterior, quedando el modelo estereoscópico perfectamente orientado con la realidad.

### **Restitución Planimétrica**

Toda interpretación y volcado de detalles en la cartografía está en directa relación con la escala del vuelo fotográfico. La forma del terreno se representa con curvas de nivel según la equidistancia fijada en el pliego. La altimetría se complementa mediante el acotamiento de puntos con una densidad acorde a la escala de restitución y de común acuerdo con el comitente. La cantidad de puntos acotados es tal que pueden caracterizar la forma del terreno, indicando siempre los puntos más elevados y los más bajos, así como todo punto en que se produzca un cambio brusco de pendiente.

En la preparación de vuelo se prevé desde la altura a la cual se volará, hasta las líneas de vuelo necesarias para cubrir toda el área con fotografías que deben tener un zona determinada de traslape para lograr el efecto estereográfico que permitirá calcular las elevaciones de todos

los puntos. Los puntos de apoyo y de control terrestre deben estar visibles para el avión y deben ser fotografiados, ya que son la base para el cálculo de las coordenadas y la altimetría o medición de las cotas y curvas de nivel que se presentarán en los planos.

Una vez que se ha logrado obtener las fotografías aéreas, se procede a elaborar la restitución. Restituir un punto de la fotografía es determinar su situación relativa respecto a otros que aparezcan también en la foto y de los que se conozcan su altitud y sus coordenadas. Al restituir todos los puntos de las fotos aéreas, con ayuda de todos los puntos de apoyo terrestre que se colocaron previamente y de los cuales se conocen sus coordenadas (xyz), se obtienen los planos topográficos con las curvas de nivel y con los datos detallados de todos los terrenos que se podrían afectar con la construcción de la carretera.

La restitución se elabora con un equipo especial de restitución. Los equipos de restitución han ido evolucionando, así como las cámaras fotográficas a medida que han evolucionado los sistemas de informática. Actualmente se utilizan cámaras digitales automáticas en los aviones, y equipos de cómputo con software modernos para hacer la restitución por computadora.

La escala de los planos que se obtienen está regida por la altura de vuelo del avión que toma las fotografías, por ello se programa la altura de vuelo de acuerdo con la escala que se pretende obtener para los planos. En esta etapa se programan vuelos con escala de las fotografías de 1:25,000, con lo cual se pueden obtener planos de la restitución con escala 1:5,000, con curvas de nivel a cada cinco metros.

El producto final del levantamiento fotogramétrico son los planos topográficos escala 1:2000, 1:1000, 1:500 según sea el tipo de proyecto a desarrollar, un tramo de camino o un entronque con curvas de nivel a cada 2 metros y el señalamiento de todos los detalles de la zona como pueden ser linderos de los terrenos encontrados, pequeñas rancherías o construcciones diversas, poblaciones, terrenos de cultivo, terrenos

desmontados, áridos, bosques, caminos rurales, vecinales, de acceso a fincas o poblaciones, carreteras de altas especificaciones y líneas de corriente eléctrica. Se prepara un plano topográfico para cada una de las rutas estudiadas, así como un mosaico fotográfico o larguillo fotográfico a manera de carta u ortofoto para cada una de las rutas, también por lo menos cuatro juegos con todos los pares estereográficos de cada una de las líneas, todo este material será trabajado en los próximos estudios en la cadena para la elaboración del proyecto ejecutivo.

### **Fotointerpretación Geotécnica**

La finalidad de este estudio es definir con mayor precisión, a la que se obtuvo en el estudio de planeación, las condiciones geotécnicas particulares de cada una de las rutas, de manera que se puedan evaluar las medidas que sea necesario considerar en cada una, derivadas de las condiciones geotécnicas.

En general las condiciones geotécnicas a estudiar conciernen a temas como pudieran ser laderas inestables, materiales colapsables o de baja resistencia, zonas con materiales compresibles o de posibles hundimientos, zonas donde se pase por una falla geológica activa o que haya producido rocas muy fracturadas que pudieran producir derrumbes e inestabilidades si se construye por esa zona la carretera.

La fotointerpretación geotécnica se hace con un juego de los pares estereográficos de fotografías obtenidas en el levantamiento fotogramétrico, así como con el larguillo o mosaico de fotografías obtenido también en el levantamiento fotogramétrico.

La técnica de fotointerpretación geotécnica consiste en analizar cada uno de los pares estereográficos, viéndolo en estereoscopia o tercera dimensión, con ayuda de un aparato sencillo llamado estereoscopio. El

ingeniero especialista analiza detalladamente toda la ruta a mediante cada uno de los pares de fotos, con la finalidad de sacar sus conclusiones y recomendaciones sobre drenaje, tonalidad, delimitación de fronteras o continuidad, vegetación, litología (tipo de rocas), fallas, fracturas y suelos.

Lo primero que debe analizar el ingeniero geotecnista en los pares estereográficos es el drenaje. En las fotos aéreas al estarlas viendo en el estereoscopio, debe marcar con lápiz graso las trazas de todas las corrientes o escurrimientos por pequeños que sean, las trazas deben seguirse a lo largo de toda el área visible en la foto. Dichas trazas, al unirse por unión de corrientes (adjuntas), forman patrones de formas que son característicos de diferentes formaciones rocosas, así el patrón de drenaje puede ser arborescente, dendrítico, paralelo, etc.

El análisis de la tonalidad en las fotos, y la delimitación de fronteras con diferente tonalidad es una herramienta muy útil tanto en la delimitación de diferentes unidades geológicas como en el análisis de uso de suelo y de calidad de los suelos que pudieran encontrarse en la zona.

Con los resultados de los análisis de drenaje y de tonalidad se pasa al análisis de continuidad o a delimitar fronteras de las posibles unidades geotécnicas. Cuando se hace este análisis se confronta y se complementa o confirma con el estudio geológico preliminar que se hace para el primer análisis de ruta en la etapa de planeación de la carretera.

En seguida se analizan y delimitan los diferentes tipos de vegetación, que pueden dar una buena idea del grado de intemperización que tienen las rocas del sitio, o bien se relacionan con los diferentes usos de suelo.

Con el resultado de todos los análisis anteriores y tomando en cuenta la información del estudio geológico preliminar, así como de las cartas geológicas del INEGI, se procede a la determinación de la clasificación litológica de las unidades geológicas encontradas, describiéndolas hasta donde sea posible en base a la fotointerpretación.

El poder identificar los tipos de rocas mediante el análisis de las fotografías, es un asunto que los especialistas aprenden a dominar en base a las formas de los patrones de drenaje y a la rama de la geotecnia llamada geomorfología, que nos enseña que las formas de la tierra que vemos como formas de las montañas, valles, lomeríos, escarpas, entre otros, tienen su origen en la manera como se acomodaron las rocas y como estuvieron sujetas a fuerzas de tectonismo y a fuerzas de intemperismo. De manera que estudiando los patrones de las trazas del drenaje, formas de los macizos rocosos, tonalidad, u otras características, un especialista en la materia puede deducir el tipo de roca que forma dichos macizos. Asimismo, el tipo de roca y su grado de intemperización nos dará idea de la resistencia de las rocas o suelos que se vayan a encontrar en las diferentes rutas de la carretera que se está estudiando.

De igual manera se trazan sobre las fotografías aéreas todas las fracturas encontradas en las rocas, identificando si son fallas y si se encuentran activas o inactivas. Este estudio se llama estudio de tectonismo y nos sirve para identificar posibles zonas de conflictos especiales provocados por zonas en las que las rocas se encuentren demasiado fracturadas o presenten alguna oquedad o áreas de discontinuidad que pudieran estar rellenas de arcilla o de material de baja resistencia.



Por último se analizan las áreas que evidentemente estén formadas por suelos, analizando si son suelos residuales o depositados por acarreos, destacando su uso actual y su posible clasificación. Es muy importante el análisis de la posibilidad de que el nivel freático se encuentre cercano a la superficie, así como si las zonas de suelos son susceptibles de inundaciones.

Todos estos trabajos de análisis e interpretación de las fotos aéreas es un trabajo de gabinete, sin embargo, es necesario verificar en campo todas las deducciones y supuestos de la interpretación fotogramétrica. En las fotos se escogen puntos de control, en los cuales pueda comprobarse en campo el tipo de rocas que supuestamente habría en el sitio, su grado de alteración y calidad, etc.

Estos puntos de control se escogen de manera que cumplan con el objetivo de ser representativos, pero que también tengan un acceso razonablemente adecuado para que la verificación de campo sea rápida. Se hace una visita en campo de todos estos puntos de control tomando toda la información que verifique, complemente o modifique los supuestos de la interpretación fotogramétrica. Después de la visita, de ser necesario, se ajustan los resultados de la fotointerpretación y se prosigue con el estudio de evaluación de las rutas.

Los análisis fotogramétricos tienen la finalidad de concluir en una evaluación de cada una de las rutas desde el punto de vista geotécnico, con la conclusión de cuál es en la que se encontrarían los materiales más estables, con menores dificultades para excavar los cortes, con menores problemas de estabilidad de taludes, con mejores materiales para construcción, con menores problemas para cruzar ríos y corrientes mayores, etc. *El producto final del estudio es un informe en el que se catalogan y se califican las rutas de la mejor a la menos buena desde el*

*punto de vista geotécnico, señalando sus ventajas y desventajas, y señalando también las posibles soluciones a los problemas o dificultades que pudieran presentarse.*

### **Fotointerpretación hidrológica**

El objetivo de la fotointerpretación hidrológica, es el de obtener mediante el estudio de las fotos aéreas, una evaluación de las rutas en base a las condiciones hidráulicas de las corrientes que se crucen, así como de posibles áreas de inundación y sus medidas de prevención, asimismo, de cruce o cercanía de lagunas, o lagos que se requiera cruzar o que la ruta pase cerca de ellos, todo esto en función de la hidrología regional. Para lograr lo anterior, es necesario estudiar cada uno de los cruces con ríos o corrientes desde el punto de vista hidrológico, recomendando para cada uno de ellos en forma preliminar, el área hidráulica necesaria para el puente, es decir, las dimensiones del puente, así como las obras de alivio necesarias según sea el caso.

Este estudio se realiza en forma similar a como se realiza la fotointerpretación geotécnica; sin embargo, los análisis de los pares estereográficos de las fotos se concentran en el aspecto hidráulico. Se analizan las corrientes mayores, las zonas bajas potenciales de inundación, las lagunas y lagos cercanos o que la ruta tenga que cruzar.

Se buscan señales de hasta donde ha llegado en épocas pasadas el nivel del agua en los ríos, previendo longitudes de puentes y obras de protección o encauzamiento. Se miden en lo posible las áreas de las cuencas de las corrientes, así como el tipo de terreno que se encuentre en dichas cuencas para estimar su coeficiente de escurrimiento. De acuerdo con predicciones hidrológicas de potencial de corrientes en función de intensidad de lluvias y períodos de retorno, se estiman los niveles máximos esperados en todas las corrientes o depósitos

lacustres, para así prever el tipo de puente u obra que se necesite considerar en cada una de las rutas.

El análisis descrito debe hacerse en cada uno de los cruces, para los cuales debe concluirse con su longitud estimada y el tipo de obras de alivio necesarias. Asimismo, para cada una de las rutas debe analizarse cada uno de los cruces. Se debe preparar un informe de cada ruta, con los datos de su longitud de puentes, tipo de puentes, y obras auxiliares. Estos informes de cada ruta, servirán tanto para el estudio preliminar de cruces, como para la elaboración del informe final de evaluación de las rutas desde el punto de vista hidrológico.

Se realiza una visita de campo a cada una de las rutas, con la finalidad de verificar y o complementar toda la información deducida de la fotointerpretación. Después de la visita, de ser necesario, se ajustan los resultados de la fotointerpretación y se prosigue con el estudio de evaluación de las rutas.

Se concluye, también al igual que en la fotointerpretación geotécnica, con una evaluación de cada una de las rutas pero ahora desde el punto de vista hidrológico e hidráulico. Se elabora un informe donde se clasifican las rutas, señalando desde la mejor hasta la que tenga menores posibilidades, describiendo ventajas y desventajas de cada una de ellas, así como el tipo de obras que se necesitarían en cada ruta.

### **Fotointerpretación de Cruces**

El objetivo de este estudio preliminar es empezar a considerar el tipo de estructura de puentes y su longitud, y sobre todo, el tipo de cimentación que podría requerirse.

En base al estudio de fotointerpretación geotécnica se tiene la primera información acerca de los materiales que pudieran encontrarse en la zona de cruce, así como el orden de magnitud de su resistencia. En base al estudio de fotointerpretación hidrológica se tiene el orden de magnitud de las estructuras de los puentes, con lo cual se puede deducir la ubicación de los apoyos de los puentes.

Como resultado de la fotointerpretación hidrológica, que debe ser previa a este estudio se tienen ya las longitudes de cada uno de los cruces, y se tiene también información acerca de obras auxiliares como pudieran ser puentes de alivio para zonas de inundación, etc.

Si se trata de cruces de puentes que se encuentren en zonas de montaña, se analiza en primer lugar el tipo de roca que se encuentra en las márgenes y se deduce el espesor de la cobertura de roca intemperizada o de suelo que pudiera encontrarse en la superficie. Con el tipo de roca y la posibilidad de roca intemperizada, puede deducirse si hay la eventualidad de una cimentación por apoyo directo mediante zapatas en las márgenes para cimentar los estribos del puente, o si habría que esperar una cimentación profunda en caso de que la cobertura de material poco resistente sobre la roca sea de gran espesor sobre el centro del cauce. Se estima también el tipo de material que constituye los depósitos de acarreo, su susceptibilidad de ser socavado y sobre todo su posible espesor.

De acuerdo con el espesor de la cobertura de material de depósito sobre la roca en el centro del cauce, se puede pensar en el tipo de cimentación, que podría ser por apoyo directo mediante zapatas, que es la solución más favorable, solamente en el caso de que el espesor de depósito sea pequeño y se resuelva el problema de la socavación. En caso de que se espere un espesor grande (mayor de 6 m) de depósitos

en el cauce, podría pensarse en una cimentación profunda que podría ser mediante pilastrones o pilotes.

Si se trata de puentes en zonas planas o de llanura, mediante la fotointerpretación se determina el tipo de suelos que las forman, si son residuales o depositados, ubicación de nivel freático y posibilidades de asentamientos o de deformaciones por cambios volumétricos. Este tipo de información obtenida en la fotointerpretación geotécnica se debe en buena parte a la información complementaria recabada durante la visita de verificación de campo es indispensable en ese estudio de geotécnica. El tipo de cimentación esperada para los puentes en estas zonas, generalmente es una cimentación profunda, que podrá ser mediante pilastrones, pilotes o cilindros, de acuerdo a la profundidad esperada del estrato de roca o estrato resistente, y también del tamaño del puente y del tipo de estructura con la que se resuelva el cruce.

Para cada uno de los puentes de cada una de las rutas, se hace un análisis con apoyo en los pares estereográficos y tomando en cuenta todos los resultados de los estudios fotogramétricos ya descritos, se elabora un informe para cada ruta, con las recomendaciones de cimentación de cada uno de los cruces. Estos informes sirven de base también para el informe de evaluación de las rutas desde el punto de vista del estudio preliminar de cruces.

El resultado final del estudio preliminar de cruces, es un informe de evaluación de las rutas desde el punto de vista de los cruces de corrientes o puentes, se elabora un informe en el que se clasifican las rutas, señalando desde la mejor hasta la menos buena, describiendo ventajas y desventajas de cada una de ellas, así como el tipo de obras que se necesitarían en cada ruta.

## **Fotointerpretación Socioeconómica**

El objetivo de esta fotointerpretación es evaluar las rutas, considerando la información más reciente y actualizada acerca de las zonas por las que se desarrollan cada una de las rutas y revisar los impactos sociales y económicos de cada una de ellas. En lo general estos aspectos ya fueron tomados en cuenta primero en la etapa de planeación, y después, en la etapa de selección preliminar de ruta se atendieron parcialmente estos temas al hacer el análisis de uso de suelo en las cartas del INEGI.

El impacto social de una ruta, toma en cuenta el impulso que pudiera dar la carretera al generar accesos a zonas antes inaccesibles, y que ahora, una ruta en particular pudiera poner al alcance de la sociedad. Asimismo, deben tomarse en cuenta los beneficios que puede proporcionar la obra al comunicar poblaciones que tenían una comunicación deficiente o de menor calidad. Se utiliza, para la evaluación el criterio del beneficio para la colectividad. Deben considerarse los costos por habitante servido, así como los elementos de carácter social que se logra, como son entre otros la, asistencia médica, educación y cultura.

La información que se requiere para evaluar las carreteras en función social consiste en el número de habitantes potencialmente beneficiados, localizados en la zona de influencia del proyecto, entendamos como zona de influencia aquella área geográfica, económica y social afectada y beneficiada directa o indirectamente por la construcción del camino.

El criterio a utilizar en la evaluación de los proyectos de carreteras desde el punto de vista del impacto económico debe regirse bajo la perspectiva de desarrollo económico. Tomando en cuenta los efectos del aprovechamiento actual y potencial para la zona de influencia de la carretera.

El beneficio para el proyecto se obtiene de la cuantificación de la producción obtenida y su incremento debido a la carretera que se registra en la zona de estudio; pueden también incorporarse en cierta medida el beneficio obtenido para la sociedad local en términos de aumento de ingresos por habitante.

Es recomendable para recabar la información necesaria, que el encargado del estudio reciba la colaboración de un experto en el rubro agrícola, que conozca los recursos que se van a obtener, para esto debe limitarse la zona de influencia, clasificar el suelo según su uso y aprovechamiento, conocer la producción agrícola y ganadera actual, superficie agrícola aprovechable, costos de transporte, ingresos por habitante, salario mínimo y longitud y costo del proyecto.

Tomando en cuenta todos los criterios socioeconómicos señalados, el proyectista debe analizar cada una de las rutas, señalando en primer lugar las áreas, zonas o poblaciones que puedan recibir impactos socioeconómicos. Determinar el número de habitantes de esas zonas o poblaciones que serán beneficiados, y de acuerdo al tipo de beneficio, cuantificar el beneficio en términos de ingreso por habitante, para que con esta misma unidad sean evaluadas las rutas y se puedan comparar entre sí.

El analista preparará un informe que describa para cada ruta los beneficios socioeconómicos que pueden esperarse, con el detalle de las

poblaciones y el número de habitantes beneficiados, con una pequeña memoria de cálculo. Es claro que todas las rutas tienen unas zonas en las que tienen exactamente el mismo beneficio social y económico, como son las zonas de origen y destino que son comunes para todas las rutas; naturalmente al ser iguales estos beneficios, no es necesario tomarlos en cuenta en esta evaluación entre rutas.

El informe final considerará una evaluación entre las rutas desde el punto de vista socioeconómico, señalando la mejor ruta desde esta perspectiva, y las que le siguen hasta señalar la menos calificada, señalando ventajas y desventajas de cada una de ellas.

### **Paisaje**

El objetivo de este estudio es el de evaluar las rutas con fines de comparación, desde el punto de vista del paisaje. Hoy en día existe la necesidad de entender el paisaje como *un recurso clave para el desarrollo económico y la competitividad de los territorios*, mejorando su atractivo turístico y convirtiéndose en un incentivo para la captación de inversiones, siempre desde una rigurosa protección medioambiental y una gestión urbana equilibrada y sostenible; según fuentes de la consejería de Obras Públicas de Murcia, España, donde recientemente se llevó a cabo un seminario sobre *“El Entorno como Factor de Desarrollo”*. En ese seminario, los expertos internacionales Andreas Hildenbrand (Alemania) y Antonio J. Navarro (España) externaron interesantes opiniones que aquí se reproducen por corresponder al tema de paisaje en carreteras.

Andreas Hildenbrand experto en gestión paisajística afirma que es necesario trabajar: *“Para hacer del paisaje y el patrimonio histórico un factor de identidad, un activo del desarrollo económico válido para captar*



*residentes y nuevas empresas”. También afirmó que “El paisaje está en la totalidad del territorio (en los accesos a una ciudad, en un parque eólico) y lo que hay que hacer es apostar por la calidad”, por ejemplo, una carretera puede ser el mejor mirador para contemplar un paisaje.*

Hildenbrand destaca la política de integración de las carreteras dentro del paisaje natural y los incentivos a agricultores para que se comprometan a la gestión paisajística de sus explotaciones. Hildenbrand destacó la política de integración de las carreteras dentro del paisaje natural y los incentivos a agricultores para que se comprometan a la gestión paisajística de sus explotaciones.

Por su parte, el Director General de Vivienda y Territorio de la Comunidad Autónoma de Murcia, España, Antonio J. Navarro, destacó que para realizar una carretera *“Además del informe de impacto ambiental, es necesario también contar con un estudio de paisaje, con la finalidad de garantizar que esta se integre en el entorno y ayude a resaltar la belleza del territorio regional”*.

El estudio preliminar de paisaje, realizado aquí por medio de las fotografías aéreas, compara para cada una de las rutas, la integración de la carretera con el entorno y el paisaje calificándolas subjetivamente desde la mejor ruta desde el punto de vista de paisaje e integración al entorno. Se presenta un informe final, señalando los resultados de la evaluación y describiendo las ventajas y desventajas de cada una de las rutas estudiadas.

## **Resultados del Análisis Fotogramétrico**

Como resultado del levantamiento fotogramétrico y los estudios relacionados con la fotointerpretación, se obtienen las plantas

fotogramétricas con la topografía restituida y sus coordenadas, de cada una de las rutas, material con el cual se puede ya pasar a los siguientes estudios. Se tienen los mosaicos o larguillos para cada una de las rutas, formados con las fotos aéreas ensambladas y con el trazo de las rutas, así como los resultados de cada uno de los estudios de fotointerpretación, geotécnica, hidrológica, socioeconómica, paisaje, etc. Con esta información se puede pasar al estudio de las alternativas de ruta y a la selección de una de las rutas estudiadas como la mejor.

### **Propuesta de Especificaciones Geométricas**

Las especificaciones geométricas básicas son: el tipo de carretera con el número de carriles de circulación, dimensiones de los acotamientos y, si los hay del camellón central, ancho de corona, de carriles de circulación y de acotamiento, además de estas dimensiones; las otras especificaciones básicas son la velocidad y vehículo de proyecto. De estas especificaciones básicas, derivan otro tipo de especificaciones subordinadas y más técnicas, como son entre otros, los grados de curvatura, sobre elevación en las curvas, distancias de visibilidad de parada, pendientes máximas y longitud máxima de pendientes.

La razón de ser del proyecto de una carretera es el de satisfacer una demanda, que puede ser por motivo de un rezago, de una previsión futura, de una modernización, o de la integración de un plan nacional. La demanda se mide con el tránsito al que hay que servir. El servicio debe proporcionarse a un número determinado de vehículos medido como tránsito diario promedio anual TDPA, este tránsito es un número que representa el total de los vehículos, y engloba tanto automóviles como todo tipo de vehículos de carga o pasaje. Para obtener más detalle, este tránsito se desglosa en porcentajes de automóviles A, autobuses B y vehículos de carga C, y para diseño de pavimentos el desglose debe ser

más detallado considerando los porcentajes de acuerdo al número y tipo de ejes de todos los vehículos.

Entonces cada proyecto es para un número determinado de vehículos, y en función de ese número de vehículos y del número de habitantes beneficiados por el proyecto, así como del cálculo previo de la relación beneficio-costos, queda establecido el tipo de servicio que debe proporcionar la carretera y su tiempo de recorrido. El tiempo de recorrido nos marca una velocidad de operación y en consecuencia, la velocidad y vehículo de proyecto.

El servicio y tipo que proporciona una la carretera, desde el punto de vista operacional, se establece de acuerdo con la metodología, capacidad y niveles de servicio que van desde A hasta F, donde A representa una condición ideal de flujo libre, B un flujo razonablemente libre, C un flujo estable y así hasta F que representa un flujo forzado. Para carreteras de altas especificaciones, que conocemos como autopistas se considera adecuado un nivel de servicio B para terrenos de lomerío y planos, y un nivel de servicio C para terrenos montañosos, en su horizonte de planeación

Tomando en cuenta los criterios expuestos, así como la demanda de servicio, ya establecida desde la etapa de planeación de la carretera, el Director de Proyecto Geométrico, que es un ingeniero con especialidad o maestría en Ingeniería de Tránsito o Vías Terrestres, estudiará los antecedentes y establecerá las especificaciones geométricas de la carretera, para seguir con el estudio de las líneas en cada una de las rutas y seleccionar la ruta definitiva.

## **Alineamiento Horizontal y Vertical**

En base a toda esta información, el objetivo de este estudio es diseñar en forma definitiva el trazo horizontal y en planta de cada una de las rutas, tomando en cuenta los resultados de los estudios fotogramétricos con que se cuenta, y dibujar un plano con el trazo en una planta con las coordenadas y todos los datos topográficos de las curvas circulares y/o espirales y demás especificaciones geométricas. Este trazo en planta debe hacerse para todas y cada una de las alternativas de ruta por estudiar, ya que en base al estudio que posteriormente se hará de cada una de estas alternativas, se escogerá la solución única definitiva.

Además de la obtención del plano en planta con el trazo, como objetivo de este estudio, debe dibujarse para cada alternativa de ruta un perfil deducido del trazo de la planta.

En el diseño de la línea de trazo, el proyectista debe acomodar sobre el terreno, representado por el plano de planta topográfica, una línea que simbolice el eje de la carretera y que se vaya acomodando al terreno logrando una serie de propósitos que constituyen las bases de diseño. El principal propósito es de brindar seguridad y comodidad al usuario que se desplace a la velocidad de proyecto de la carretera.

En relación con la seguridad, es muy importante que el conductor tenga la visibilidad suficiente para maniobrar en caso necesario. Al respecto, el proyectista debe diseñar la carretera de manera que, en primer lugar, exista en toda la carretera la visibilidad de parada suficiente. Por ejemplo, cuando el conductor llega a una curva, donde la visibilidad

hacia los lados está restringida por los taludes de un corte o por la vegetación, debe considerar hacia adelante una distancia de visibilidad para que en el caso inesperado de que sobre la carretera se encuentre un objeto u obstáculo, dicha distancia sea lo suficiente para reaccionar y frenar con seguridad. El proyectista calcula esta distancia de visibilidad de frenado en función de la velocidad de proyecto, el tiempo de reacción promedio de los conductores, el coeficiente de fricción del pavimento y la pendiente de la carretera.

La distancia de visibilidad de rebase, se calcula en las carreteras que tengan únicamente dos carriles de circulación. Esta distancia, debe tomarse muy en cuenta y calcular la distancia suficiente para permitir a los conductores circular el carril de tránsito opuesto, para rebasar a otros vehículos, sin riesgo de colisión.

Por último, en caso de entronques o accesos a otras carreteras, debe haber una distancia de visibilidad suficiente para dar tiempo al conductor a tomar decisiones.

Un experto en proyecto geométrico de carreteras, domina los aspectos de tiempos de reacción, distancia de frenado de los vehículos, efectos de la pendiente en aspectos de frenado, características de los diferentes vehículos, y en general la manera de obtener todos los parámetros y variables que se deben considerar en el cálculo de las distancias de visibilidad.

Otro tema concerniente con la seguridad y confort del usuario en carreteras es el de las curvas horizontales. Estas curvas deben tener un peralte que contrarreste la fuerza centrífuga que se presenta cuando los vehículos circulan por la curva, este peralte tiene un valor máximo que no se puede rebasar y que depende principalmente del clima, las

posibilidades de nevada o helada y frecuencia del paso de vehículos lentos.

Las curvas horizontales se diseñan con la velocidad de proyecto de manera que se logre el nivel de servicio especificado para la carretera. Las curvas pueden ser circulares simples o con una transición de espiral de acuerdo con su grado de curvatura, es decir si son curvas muy suaves o muy cerradas de acuerdo con la topografía del terreno.

Tomando en cuenta las especificaciones del proyecto, la velocidad de proyecto y el nivel de servicio, el proyectista debe acomodar el proyecto a la topografía de la ruta, buscando siempre dentro de los límites establecidos por las especificaciones, la máxima seguridad, proporcionando al usuario un flujo continuo y homogéneo, sin cambio abrupto, tranquilo y suave, buscando siempre el máximo confort y el menor costo de recorrido.

Desde el punto de vista del alineamiento horizontal, el proyectista debe buscar que el alineamiento sea direccional y práctico es decir; que se dirija a los objetivos y metas, lo más directo posible. Sin embargo, a la vez debe ser congruente con la topografía y con la preservación de los bienes de los propietarios de predios y los bienes comunitarios. En montaña, un trazo que fluya conforme al contorno general es preferible a un trazo con grandes tangentes y cortes excesivos, pero un alineamiento ondulado, compuesto por curvas cortas, debe evitarse pues produce una operación errática. Debe tomarse en cuenta también, que en carreteras con solo dos carriles de circulación es necesario diseñar tangentes con suficiente visibilidad de rebase en un porcentaje adecuado para el nivel de servicio requerido.

En el diseño del alineamiento horizontal deben evitarse en lo posible el uso de los radios mínimos de curvatura para la velocidad de proyecto. El proyectista debe privilegiar el uso de curvas amplias, dejando las cerradas o de radio mínimo para situaciones especiales de condiciones críticas.

Es muy importante tomar en cuenta que el alineamiento horizontal debe estar cuidadosamente coordinado con el alineamiento vertical, de lo contrario se percibirá una distorsión contradictoria.

El alineamiento vertical es la proyección sobre un plano vertical del desarrollo del eje del camino. El alineamiento vertical también se compone de tangentes y curvas. Las tangentes se caracterizan por su longitud y su pendiente y están limitadas por dos curvas sucesivas. La pendiente de una tangente es la relación entre el desnivel y la distancia entre dos puntos de la misma. La pendiente representa la medida de las inclinaciones de las subidas o descensos en la carretera coloquialmente conocidas como cuestas.

Respecto al alineamiento vertical, el proyectista debe cuidar que el cambio de pendientes sea gradual, en armonía con el tipo de carretera y con la topografía del terreno, de preferencia pendientes grandes con longitudes largas, en su lugar preferir acomodar longitudes cortas con algunos quiebres o tramos con pequeña pendiente donde los vehículos puedan retomar impulso.

Aunque las especificaciones indican máxima pendiente permitida y máxima longitud permitida, la manera como el proyectista aplica estos criterios para lograr acomodar el proyecto en armonía con el terreno y con el servicio que debe dar al usuario, determinará al final de cuentas la calidad del proyecto terminado.

Otro tema respecto al alineamiento vertical, es el relativo a que el proyectista debe evitar la formación de lo que conocemos como columpios o montaña rusa. Esta situación se presenta cuando en un tramo recto, el perfil de la carretera, por seguir el perfil del lomerío del terreno, presenta una sucesión de subidas y bajadas; este alineamiento, además que dificulta la visibilidad de los conductores, es engañoso, ya que a pesar de que aparentemente ve a una distancia lejana, se tiene un tramo intermedio oculto en el que no saben si pueden encontrar algún obstáculo o algún inconveniente.

Se deben evitar alineamientos de dos curvas verticales sucesivas separadas por una corta tangente del perfil, ya que aunque se diseñen cumpliendo con las especificaciones del proyecto, son desagradables estéticamente y no son confortables.

Al igual que en el alineamiento horizontal, muchos otros aspectos técnicos debe tomar en cuenta el proyectista sobre el alineamiento vertical. Pero también es muy importante que el alineamiento horizontal esté cuidadosamente coordinado con el diseño del perfil, es decir del alineamiento vertical, de lo contrario habrá una distorsión entre ambos alineamientos con la consecuente invalidación entre sí de las características positivas que pudieran haberse logrado individualmente.

La combinación de los alineamientos horizontal y vertical, es decir de la proyección en planta del proyecto carretero y su perfil, es un asunto que debe haber sido tomado muy en cuenta en el proceso de elección de ruta, de manera que en esta etapa, donde se tiene ya la topografía obtenida de la restitución fotogramétrica, la tarea pendiente es la de desarrollar un diseño específico armonizando las líneas vertical y



horizontal, de manera que el diseño final de la carretera sea económico, confortable y seguro para los usuarios de la carretera.

El alineamiento de una carretera está basado en sus características o especificaciones básicas, que a su vez, están basadas en tránsito, topografía, condiciones geotécnicas, desarrollos culturales existentes, desarrollos futuros, puntos obligados de paso y puntos terminales de la carretera. La velocidad del proyecto fue considerada en base a la localización general de la carretera y al servicio demandado por los usuarios, pero en el proceso particular de diseño y en esta etapa de diseño de los alineamientos vertical y horizontal, la velocidad del proyecto adquiere una gran importancia, que sirve para mantener balanceados todos los elementos de diseño, determina valores límite para muchos elementos como curvatura y distancia de visibilidad y tiene influencia entre otros como el ancho de calzada en curva, la sobre elevación tipos de curvas horizontales y longitud de curvas verticales.

Volviendo en particular a los asuntos que debe tener muy en cuenta el proyectista para lograr una combinación adecuada del alineamiento horizontal con el perfil, se puede mencionar como ejemplo y entre otros de carácter más técnico, lo siguiente:

Las curvas de la carretera deben estar balanceadas con las pendientes, curvas amplias o grandes tangentes no son compatibles con fuertes pendientes o con pendientes en longitudes grandes, curvas cerradas tampoco son compatibles con pendientes pequeñas o terrenos planos, ambas situaciones constituyen un mal diseño.

Curvas verticales superpuestas con curvas horizontales, generalmente constituyen un buen diseño, aunque es necesario analizar

cuidadosamente cada caso particular. Cambios sucesivos en el perfil sin una combinación con curvas horizontales podrían dar por resultado una serie de jorobas visibles desde cierta distancia por los conductores, lo cual no es un buen diseño.

Curvas horizontales cerradas no deben ubicarse en la cresta o cerca de la cresta de una curva vertical pronunciada. En esta condición el conductor puede no percatarse del cambio horizontal del alineamiento especialmente de noche.

En las intersecciones, tanto las curvas horizontales como las verticales deben hacerse lo más planas que sea posible, ya que la distancia de visibilidad es muy importante puesto que los vehículos pueden disminuir la velocidad o incluso parar.

En áreas residenciales el alineamiento podría ser diseñado para minimizar el ruido a los vecinos. Generalmente, secciones deprimidas, u ocultas en cortes en cajón hacen la carretera menos visible y menos ruidosa y molesta para los vecinos.

El alineamiento debe ser diseñado para realzar vistas escénicas atractivas ya sean naturales o construidas en el entorno, tales como ríos, formaciones rocosas, parques y estructuras sobresalientes. Debe propiciarse el paso de la carretera de manera que realce la vista de estas estructuras sobresalientes y que el usuario pueda disfrutar de la vista del paisaje.

Se han descrito aquí una serie de criterios que el ingeniero proyectista especialista en Ingeniería de Tránsito o Vías Terrestres, de preferencia con maestría en la materia, debe considerar al diseñar para cada una de las rutas sus alineamientos horizontal y vertical debidamente

coordinados y apegados a la topografía particular de cada zona por la que se aloje la ruta estudiada. El diseño debe ser muy cuidadoso y abarcar muchos otros cálculos y aspectos técnicos del diseño, hasta agotar las posibilidades de un diseño mejor.

El producto final de este estudio son los planos de planta y perfil deducido de cada una de las alternativas de diseño correspondientes a cada una de las rutas estudiadas. Con este material se pasará a los estudios siguientes de costos de operación y ante presupuesto de las rutas estudiadas con la finalidad de escoger la ruta definitiva.

### **Costos de Operación**

Puesto que cada uno de los anteproyectos de las alternativas de ruta tiene ventajas y desventajas con respecto a los otros anteproyectos, una manera de compararlos para decidir la ruta definitiva seleccionada, es mediante la comparación de sus costos. Los costos considerados en esta etapa son principalmente los de construcción y operación. En este estudio se obtendrán los costos de operación.

Los costos de operación, en este caso, corresponden a los costos de recorrido de los vehículos que circularán por la carretera y se agrupan en tres categorías:

- Costos anuales fijos
- Costos hora-vehículo transcurridos
- Costos vehículo-kilómetro recorridos

Para los análisis que se necesitan en ésta etapa, los costos que se requiere calcular en este estudio son los correspondientes a los costos vehículo/kilómetro, incluyendo el costo anual fijo. Cada tipo de vehículo

tiene un costo diferente, por ejemplo un automóvil, un vehículo de carga tipo “tráiler” (tractor con semirremolque), autobús, camión de carga tipo tórton, etc., evidentemente cada uno de estos tipos de vehículos tiene un costo de adquisición diferente, pero además, cuando estos vehículos recorren un kilómetro de carretera, tienen un costo adicional que es diferente para cada uno de ellos, y diferente también según el tipo de carretera que recorran, ya que si la carretera es plana y sin curvas consumen menos gasolina y llantas que si la carretera es en montaña con muchas curvas y fuertes pendientes.

Es necesario en este estudio hacer el cálculo de los costos de operación, para cada uno de los vehículos que circularán por la carretera y para cada uno de los proyectos que se van a analizar, de manera que el objetivo del estudio es tener los datos para calcular el costo total de operación de cada anteproyecto para poder hacer el análisis comparativo. Cada anteproyecto tiene el mismo número de vehículos de cada tipo que circularán por la carretera, pero cada proyecto tiene diferente número de kilómetros por recorrer y diferente tipo de geometría en; terreno plano, montaña y lomerío, con diferente costo en cada tipo de terreno, lo cual dará diferentes costos de operación para cada anteproyecto.

Estos costos de operación, naturalmente que son pagados en primera instancia por cada uno de los usuarios de la carretera, es decir no es un desembolso directo del Gobierno o del constructor; sin embargo, son costos que asume el país y que tienen repercusión en la capacidad de generación de crecimiento económico y en la generación del producto interno. Este concepto es más claro cuando la carretera va a ser de peaje, en la cual se debe ofrecer al usuario un servicio en el que se disminuya el costo de operación con respecto a la opción de escoger

circular por otras rutas que no le cobren pero donde el costo de operación sea mayor.

Para este tipo de análisis, es factible utilizar los costos de operación para cada tipo de vehículo calculados por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), los cuales se pueden encontrar en la Publicación Técnica No. 316 del año 2008. Los cálculos se hicieron con datos de costos de adquisición de los vehículos y de los insumos de ese año, y están presentados de manera que fácilmente se puedan actualizar los datos y obtener el costo de operación correspondiente.

La publicación Técnica se titula: Costos de Operación Base de los Vehículos Representativos del Transporte Interurbano. En esta publicación se define *“el costo de operación base como el costo de operación por kilómetro de un vehículo que transita sobre una carretera recta y plana; esto es con curvatura y pendiente iguales a cero y con pavimento en muy buenas condiciones. Dicho costo se calcula como la suma de los productos de los diferentes consumos del vehículo en un kilómetro de recorrido, por sus respectivos costos unitarios. Con el uso de este concepto, bastará actualizar los costos unitarios periódicamente, utilizando precios promedio nacionales de los vehículos y los consumos ya estudiados por el Instituto, para actualizar el costo base.”*

En el estudio se calculan en primer lugar los “costos base”, para cada uno de los tipos de vehículos que conforman el tránsito diario promedio anual. En segundo lugar se zonifica cada uno de los anteproyectos de acuerdo al tipo de alineamiento, es decir, zonas planas, lomerío, o montaña. De acuerdo al tipo de zona, el costo de operación base aumentará debido a que se generarán más gastos al disminuir rendimientos por efecto de las pendientes y el tipo de curvas de las diferentes zonas. Para cada tipo de vehículo, el IMT ha calculado un

factor por el que se multiplica el costo de operación base, para obtener el costo de operación de ese vehículo correspondiente al tipo de alineamiento del proyecto en esa zona.

El costo de operación total de cada tipo de vehículos en una zona, es el costo de operación unitario vehículo/kilómetro, multiplicado por el número de vehículos que se espera que pasen en el período de diseño, por el número de kilómetros de longitud que tiene esa zona por 365 días del año. El costo de operación total de la zona es la suma de los costos de operación de cada tipo de vehículos calculados como se indicó.

El costo de operación total de un anteproyecto es la suma de los costos totales de todas las zonas en las que se dividió. El objetivo de este estudio es calcular los costos de operación totales de cada uno de los anteproyectos de las alternativas.

### **Ante-Presupuesto de las Rutas Estudiadas**

El objetivo de este estudio es calcular el ante presupuesto del costo de construcción de la carretera. Al igual que en el estudio de los costos de operación, en este estudio se calcula el costo de construcción de manera preliminar de cada uno de los anteproyectos de las alternativas de ruta.

El volumen de movimiento de tierras, es decir de cortes y terraplenes construidos es uno de los más importantes elementos del costo; sin embargo, en esta etapa del estudio todavía no se tiene la magnitud de los cortes puesto que no se ha hecho el estudio geotécnico de detalle para establecer la inclinación de los taludes de los cortes; tampoco se tiene la ubicación de bancos de préstamo de materiales para terracerías que son indispensables para formar la capa superior de los terraplenes y

cortes, y que servirá para apoyar el pavimento. Se cuenta ya con el estudio geotécnico preliminar que sirvió para ubicar las alternativas de ruta, y el proyectista tendrá que apoyarse en este estudio para establecer la inclinación de los taludes de los cortes y la ubicación de los bancos de materiales para terracerías. Con esa información se puede hacer una estimación muy adecuada a nivel de ante presupuesto de los volúmenes de movimiento de tierras, y por lo tanto del costo que pudiera tener la construcción de terracerías.

El estudio geotécnico preliminar con el que se cuenta en esta etapa del estudio, y que sirvió para elegir las alternativas de ruta y los anteproyectos, es muy importante y puede ser determinante para la elección del anteproyecto definitivo, ya que para cada uno de los anteproyectos deberá considerarse cuidadosamente el estudio geotécnico, en base al cual se fijará la inclinación de los taludes en los diferentes tramos o zonas por las que pasen los anteproyectos; la inclinación de los taludes es determinante en el volumen de terracerías y por lo tanto en el costo de las terracerías, y es un factor que influirá en la toma de decisiones. Asimismo, el estudio geotécnico podría señalar que alguno de los anteproyectos necesite medidas especiales de estabilización de taludes, como por ejemplo anclas y drenes transversales; estas medidas de estabilización tendrían influencia en el costo de esa alternativa en especial, así como en la elección final de la ruta.

En el anteproyecto se cuenta ya con la longitud de los puentes, así como su altura. Esta información es confiable a nivel de ante presupuesto, y para estimar el costo de estas estructuras, basta con aplicar precios unitarios promedio, estadísticos, para estructuras similares que generalmente se tienen en pesos por metro lineal para diferentes anchos

de carretera, altura y longitud de los puentes. Para el caso de obras de drenaje menor se procede de la misma manera.

El pavimento de la carretera constituye también una parte importante del costo, al igual que en los volúmenes de terracerías, en esta etapa del estudio no se tiene aún el estudio y diseño del pavimento. Este estudio geotécnico para diseño de pavimento se realizará hasta que se tenga la ruta definitiva, de manera que por lo pronto y para fines de anteproyecto, se debe suponer una estructura de pavimento en base al estudio geotécnico preliminar. Como tampoco se tiene aún la ubicación de los bancos de materiales para pavimento, los precios de las capas de pavimento como pudieran ser base hidráulica y carpeta asfáltica, se toman al igual que los precios de las estructuras de los puentes, de los precios promedio que se tienen de estadísticas de obras anteriores.

El estudio geotécnico con el que se cuenta, determinará el espesor del pavimento, que podría ser diferente en cada uno de los anteproyectos, tomando en cuenta la calidad de los materiales con que se cuente y en función también con la cercanía de los bancos de materiales para la construcción del pavimento.

Alguno de los anteproyectos podría tener túneles, los cuales requieren un estudio y un diseño muy especial como sucede también en los puentes grandes. Al igual que en los puentes, el estudio geotécnico preliminar con que se cuenta en esta etapa, sirve para prever el orden de magnitud de las dificultades que podría tener la construcción de un túnel, en esa medida se puede considerar el costo unitario por metro de túnel de acuerdo con los datos que ya se han recabado de la experiencia en la construcción de túneles.



Para las obras complementarias de drenaje, que son entre otras cunetas, contra cunetas, lavaderos, bordillos y sub drenes, así como también para el señalamiento de la carretera, se cuenta con precios promedio, por kilómetro de carretera para diferentes anchos. Estos precios se aplicarían igual a cada alternativa, salvo que haya una mención en el estudio geotécnico en el sentido de que alguna de las alternativas tenga condiciones especiales en las que haya que tomar medidas especiales de subdrenaje.

El producto final de este estudio es el dato específico del costo de construcción, a nivel de ante presupuesto, de cada uno de los anteproyectos, con lo cual se evaluará cada una de las rutas.

### **Selección de la Ruta Definitiva**

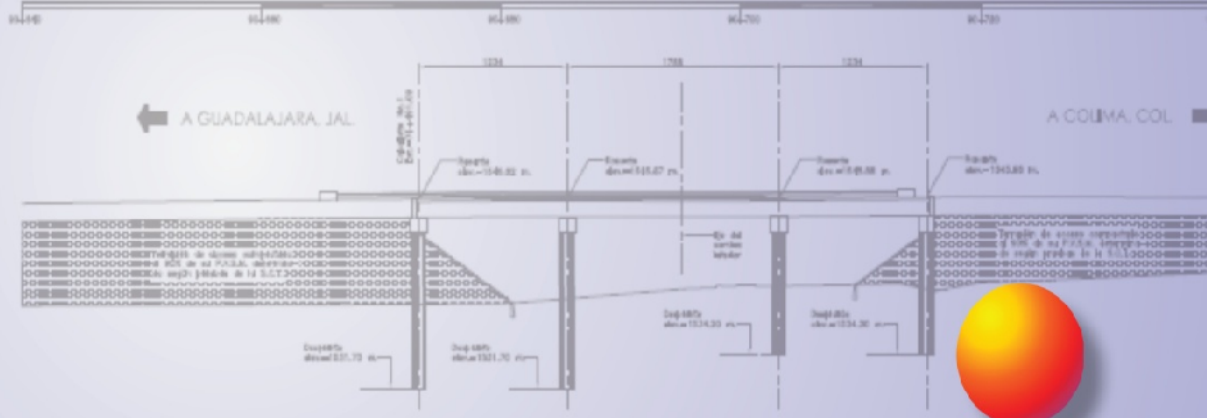
Con este trabajo se culmina la etapa de Selección de Ruta. El objetivo de este trabajo es presentar el informe del estudio que culmina con la selección de la ruta óptima para la carretera, presentada en mosaico fotográfico con escala 1:25,000, y en planos topográficos restituidos con escala 1:5,000 y curvas de nivel a cada 5 m. También se tienen juegos de fotografías con pares estereográficos de toda la ruta, planos geológicos, estudio geotécnico preliminar de la ruta, y los estudios hidrológico, socioeconómico, paisaje, costos, así como todos los estudios que apoyaron la conclusión de que la ruta escogida es la mejor.

La base para la selección de la ruta en esta etapa, es la comparación de los costos de todos los anteproyectos que representan a las rutas. Es de entenderse que para la obtención de los anteproyectos ya se realizó un trabajo muy completo de estudio de cada ruta en cuanto a sus condiciones geotécnicas, hidrológicas, de uso de suelo,

socioeconómicas etc., de manera que en este estudio se recoge el resultado de muchos estudios previos ya realizados.

Se suma para cada anteproyecto el costo de construcción con el costo de operación y en primer lugar el monto menor de esa suma suele ser el mejor anteproyecto; sin embargo, cuando dos sumas son iguales o muy parecidas, entran en juego ventajas como pudieran ser ahorros en tiempo de viaje, en costo de accidentes, costo de emisiones y costo por contaminación auditiva. En esa circunstancia, el proyectista tiene que proceder a evaluar estos costos, que por lo general serán menores, ante dos anteproyectos diseñados con iguales especificaciones geométricas, cuanto menor sea la distancia total de recorrido.

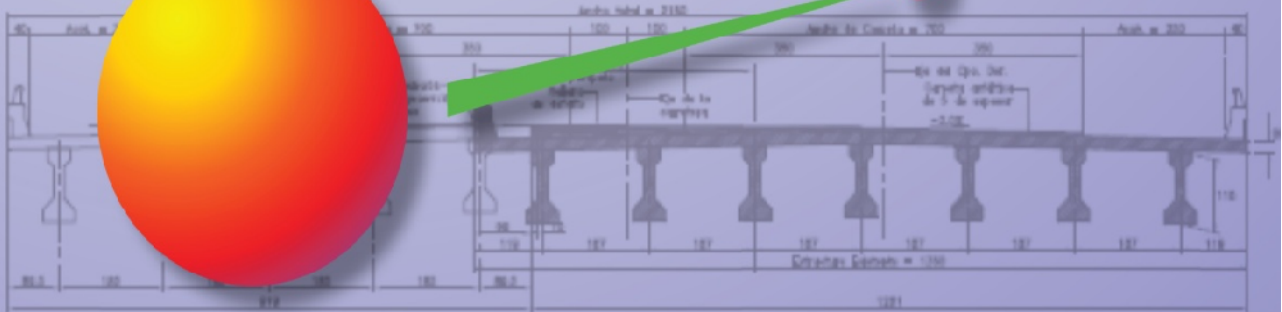
Una vez que se tiene la decisión sobre el anteproyecto seleccionado, representante de la ruta seleccionada, se presenta un informe breve con el respaldo de todos los estudios indicados en el primer párrafo y con un larguillo de la ruta seleccionada dibujado en planos del INEGI con escala 1:50,000, así como el mosaico formado con las fotografías 1:25,000 con el larguillo de la ruta y la planta del anteproyecto con escalas de 1:5,000 y el perfil deducido con las escalas 1:2,000 y 1:200. Con estos documentos, que representan la ruta definitiva, se procede al inicio de las siguientes etapas del proyecto ejecutivo.



# PARTE III PROYECTO DEL TRAZO DEFINITIVO

CORTE ELEVACION POR EL EJE DEL CPO. [2Q]

PLANTA



## PROYECTO DEL TRAZO DEFINITIVO

---

### **LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO**

Los planos y fotos aéreas que se utilizaron para localizar la ruta definitiva por su escala no son útiles en esta etapa del estudio, puesto que es necesario conocer con mayor precisión la línea de trazo para el proyecto. Por lo tanto, el objetivo de este estudio es tomar nuevas fotos aéreas, sobre la ruta seleccionada y con escalas de 1:10,000 y de 1:5,000. El procedimiento consiste en preparar el vuelo para la toma de fotografías, siguiendo el mismo procedimiento descrito en la Parte II.

### **GEOTECNIA REGIONAL**

Antes de comenzar a trabajar en el proceso creativo, el proyectista estudia cuidadosamente toda la información que se ha acumulado en los estudios previos que llevaron a la conclusión de la mejor ruta, ya que en la medida que tenga claro el resultado de estos estudios, al estar proyectando tendrán en mente siempre las restricciones, las ventajas y todas las consideraciones derivadas de los estudios previos.

Respecto a geotecnia se tiene mucha información reunida hasta esta etapa del Proyecto Ejecutivo. Debemos recordar que el término geotecnia se aplica al conjunto de tres ciencias de la ingeniería que son la geología, mecánica de suelos y mecánica de rocas; en el pasado reciente se separaban los estudios llamándolos geológico y geotécnico, siendo el geotécnico el relativo a mecánica de suelos y mecánica de rocas, quedando el geológico exclusivamente para describir los asuntos de geología.

Hasta ahora se cuenta con el estudio geotécnico regional que se hizo en la etapa de planeación y antes se llamaba estudio geológico regional pero que ahora tiene una acepción completa; también se tiene el estudio de fotointerpretación geotécnica que se realizó con los pares estereográficos de las fotos del vuelo a escala 1:25,000 que fueron tomadas en la etapa de Selección de Ruta.

Para el cabal aprovechamiento de la geotecnia es necesario transportar la fotointerpretación geotécnica que se trabajó en las fotos con escala de 1:25,000, a las nuevas fotos que tienen mucho más detalle por corresponder a un vuelo bajo con escala 1:5,000. En el trabajo de fotointerpretación que se hizo sobre las alternativas de ruta, se estudiaron las fotos, los patrones de drenaje señalando las trazas de todas las corrientes y escurrimientos, se analizaron la textura y los tipos de vegetación, los usos de suelo y se señalaron las fronteras o contactos entre materiales de diferentes características geotécnicas. Se obtuvieron todas las fracturas o fallas geológicas encontradas y las zonas donde pudieran encontrarse materiales inestables o problemas de drenaje o subdrenaje.

La técnica de fotointerpretación geotécnica consiste en analizar cada uno de los pares estereográficos, viéndolo en estereoscopia o tercera dimensión, con ayuda de un aparato sencillo llamado estereoscopio. El ingeniero especialista analiza detalladamente toda la ruta mediante cada uno de los pares de fotos, con la finalidad de establecer sus conclusiones y recomendaciones.

Ahora se cuenta con fotos aéreas con más detalle por estar tomadas desde un vuelo más bajo, todos los datos tomados en las fotos anteriores se transcriben a las nuevas fotos, las que también se estudian en el estereoscopio confirmando o ajustando los datos de acuerdo a lo que se observe al acercarse a la imagen.

Algunas características de las formaciones geotécnicas que se obtienen de la fotointerpretación se pueden apreciar mucho mejor cuando los vuelos son altos y las fotos son a una escala grande. Los patrones de drenaje, los cambios de tonalidad y la expresión morfológica de las unidades geotécnicas así como los contactos entre ellas, son algunas de estas características. Otras como uso de suelo, vegetación, y análisis de cruces, se facilitan con las fotos tomadas en vuelos bajos.

En las fotos tomadas en el vuelo bajo se tiene más detalle, lo que se aprovecha para analizar las zonas donde se crucen fracturas o incluso fallas, viendo si los materiales del lugar han sido alterados por los movimientos, si la zona de influencia es considerable, si los materiales ya se han consolidado, etc.

Al estar pasando los datos que ya se tenían a las nuevas fotos, se van analizando y estudiando nuevamente, confirmado o, ajustando o modificando la información, como ya se dijo, aprovechando el mayor detalle de las nuevas fotos.

El objetivo principal de la geotecnia es delimitar las unidades geotécnicas que se encuentren, caracterizándolas con la mayor precisión posible; delimitar las fronteras es establecer con claridad los límites hasta donde se encuentren materiales similares; por ejemplo, se puede decir que de un sitio hasta otro, se pueden encontrar rocas muy alteradas, rocas ígneas extrusivas que pueden ser basaltos y/o andesitas que por su grado de alteración al excavarse van a producir fragmentos de roca de tamaños de 1.5 a 2 m, con 50% de arcilla rojiza y que en su estado natural estas rocas pueden soportar taludes de  $\frac{3}{4}:1$ , que el material que se obtenga de los cortes deberá desperdiciarse por ser arcilloso. Este tipo de información es la que necesita el ingeniero proyectista de diseño geométrico y que le debe proporcionar el ingeniero

geotecnista. Con una información como esta, el proyectista procurará no tener cortes grandes o muy altos sobre este material puesto que todo el producto del corte debe desperdiciarse en lugar de aprovecharse para formar terraplenes.

Así como en el ejemplo anterior, el geotecnista debe realizar descripciones precisas sobre las zonas bajas en las que se tenga la posibilidad de tener materiales de baja resistencia, prever zonas con problemas de subdrenaje, posibilidad de escases de materiales para ubicar bancos de materiales y todo lo relativo a los datos que se necesitan para estimar volúmenes de corte y terraplén y cálculos de movimientos de tierras.

Los datos más comunes que proporcionan información acerca de las características geotécnicas de los materiales son: grado de dificultad para excavación, coeficientes de abundamiento, clasificación geotécnica según normas del material que se obtendrá al excavar los cortes, tipo de material con el que se construirán los terraplenes, etc.

Todos esos datos que se obtienen del estudio geotécnico derivado de la fotointerpretación, son indispensables para que el proyectista pueda hacer su trabajo y por tal motivo el ingeniero geotecnista debe preparar los planos con los datos geotécnicos aprovechando el mosaico de la ruta que se elaboró con las nuevas fotografías aéreas.

En ese mosaico se ubican todas las unidades geotécnicas a lo largo de toda la ruta, de preferencia señalando con diferente color en forma tenue las diferentes unidades, que no son más que zonas donde se encuentran materiales con características similares. Así mismo, se marcan todas las fracturas, fallas o cualquier característica especial que el geotecnista considere que es necesario destacar. Junto con esa

información, en el mismo plano, puede presentarse una tabla con el resumen de las principales características de los materiales aplicables al diseño de terracerías, como son, espesores probables de los estratos, descripción geotécnica del material, uso que puede dársele al material obtenido de la excavación de los cortes, coeficientes de abundamiento, inclinación de taludes para los cortes y terraplenes.

En la etapa anterior de selección de ruta se tenía un anteproyecto que corresponde a esta ruta seleccionada, y se aprovecha el perfil deducido del eje de carretera seleccionado como anteproyecto para que el ingeniero proyectista dibuje en él un perfil de suelos, es decir presente en ese perfil la estratigrafía esperada de todas las unidades geotécnicas encontradas en su estudio y presenta también en este perfil las características de los materiales que se espera encontrar al igual que en el plano de la planta geotécnica del mosaico fotografía.

En caso de que en el tramo se haya previsto en el anteproyecto de elección de ruta, que en esta ruta elegida se prevean túneles, en esta segunda etapa de fotointerpretación geotécnica se afinan también los datos concernientes a la geotecnia de túneles. Sobre todo se comprueba la descripción geotécnica de la unidad por la que se proyectará el túnel, y se hace la primera estimación de las características geotécnicas de los materiales a lo largo del túnel. Estas características principalmente definen la calidad del macizo rocoso y se refieren al grado de descomposición o sanidad de la roca, lo cual define el tipo de sostenimiento que pudiera necesitar el túnel, así como al revestimiento final necesario.



## **INGENIERÍA DE TRÁNSITO**

Un proyecto ejecutivo para la construcción de una carretera es un proyecto de inversión cuya finalidad es la de satisfacer una demanda, en este caso la demanda es la de un servicio a los usuarios del sistema carretero.

Es función del gobierno Federal, en este caso de la SCT, monitorear continuamente el proceso de oferta y demanda de transporte con la finalidad de estar al pendiente de proporcionar los servicios demandados y con ello propiciar el desarrollo económico e incremento del producto interno.

La manera de efectuar el monitoreo es llevando a cabo trabajos continuos de Ingeniería de Tránsito, que consisten en medir el volumen de tránsito y su clasificación vehicular, así como el origen y destino de los viajes de los usuarios en las carreteras del país. Estos estudios constituyen un banco de datos que sirve para evaluar constantemente el servicio de las carreteras, así como la base para elaborar otros estudios de Ingeniería de Tránsito con la finalidad de conocer la proyección a futuro de la demanda del servicio. Vale la pena hacer el comentario que estos datos están disponibles en la DGST en su página electrónica, mencionada en la primer parte de éste documento.

En el estudio de Planeación, fue necesario evaluar el proyecto y calcular su factibilidad mediante el análisis de la relación Beneficio-Costo. Para esta etapa, en la que se tiene que estudiar las necesidades de entronques, accesos, salidas y retornos, es conveniente ampliar y detallar el estudio de Ingeniería de Tránsito.

El estudio de Ingeniería de Tránsito en esta etapa, es un estudio de Demanda, mediante el cual se debe analizar el tránsito que utilizará la carretera en un período de diseño que puede variar de 15 a 30 años; es decir, se tiene que obtener un pronóstico confiable del volumen vehicular que transitará en la carretera en el horizonte de planeación establecido. Además, este pronóstico debe estar muy detallado, ya que para poder analizar los entronques y accesos se debe conocer el tránsito que se incorporará en el futuro a la carretera en cada uno de esos lugares. La elaboración de un pronóstico confiable debe basarse en análisis acuciosos sobre muchos temas como son: oferta de infraestructura vial en una zona aledaña al nuevo proyecto de carretera, perspectivas de crecimiento nacional y regional, etc.

Si la carretera que se está proyectando no es una modernización o ampliación, sino que se trata de un trazo nuevo sobre una ruta nueva, el primer dato que debe aportar el estudio de tránsito es el tránsito que circulará por la carretera al inicio de sus operaciones.

Si la carretera va a ser libre de cuota, la elaboración del pronóstico es más sencilla, ya que todos los usuarios de la región vecina que al circular por la carretera nueva disminuyan sus tiempos de viaje, sin duda van a ocupar la nueva carretera. Si la carretera va a ser de cuota, tendrá que hacerse un estudio más detallado para predecir el tránsito que preferirá circular por la carretera de cuota.

La obtención del tránsito diario promedio anual para el año de inicio de operaciones, (TDPA) asignado, es un trabajo laborioso. En primer lugar se requiere el estudio de caracterización de la red vial de influencia asociada a la carretera que se está proyectando, así como el análisis del comportamiento histórico del aforo vehicular de dicha red.

La red vial de influencia en relación con la carretera que se construirá se establece en base a que la nueva carretera ofrecerá un mejor servicio a los usuarios, por lo tanto los límites de esta red de influencia estarán definidos por la zona donde el usuario deberá elegir si se transporta por la nueva carretera o sigue usando sus rutas tradicionales. Generalmente el usuario decide la ruta por la cual tendrá un menor tiempo de recorrido, quedando en segundo lugar para la elección el confort y seguridad con el cual se transporte.

Para establecer el grado de confort y los tiempos de recorrido se tiene que caracterizar la red de influencia; esto es, mediante un estudio de campo se obtienen los índices de servicio relativos al estado del pavimento, y la longitud y ubicación de los diferentes tramos, así como las opciones de rutas dentro de la red.

Respecto a los índices de servicio, se tratará de obtener registros históricos que normalmente se tienen en las dependencias encargadas de la conservación de las carreteras, pudiendo ser en el mejor de los casos mediciones objetivas del índice de servicio mediante el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), o bien las subjetivas del Índice de Servicio Actual (ISA).

Puesto que el grado de confort y en consecuencia la calificación, dependen primordialmente de la rugosidad de la superficie de rodamiento del camino, se han diseñado equipos de medición de la rugosidad, estandarizándose internacionalmente una unidad de medición de la rugosidad llamada IRI. Estos equipos se desplazan a lo largo de toda la longitud de la carretera midiendo el IRI y en consecuencia el Índice de Servicio que caracteriza al tramo carretero.

El ISA y el IRI se refieren al grado de confort que ofrece pavimento; sin embargo, el confort también depende de las características geométricas del camino, de su capacidad para alojar cierto volumen de tránsito, su grado de saturación, la cantidad y tipo de camiones de carga.

El Manual de Capacidad Vial editado por la SCT, proporciona una metodología que toma en cuenta todas estas características físicas, geométricas y de volúmenes de tránsito, para obtener el flujo vehicular equivalente y la velocidad de flujo libre, obteniéndose el nivel de servicio con el que operan los diversos tramos de la red de influencia.

Entonces, el ingeniero especialista en Ingeniería de Tránsito, en la búsqueda del tránsito que tendrá la carretera al inicio de operaciones conocido como TDPA en el año base o año de inicio, debe trabajar en primer lugar estableciendo la red vial en la que tendrá influencia la nueva carretera, midiendo sus longitudes y sus índices de servicio para establecer los tiempos de recorrido y conocer hasta donde puede ofrecer la carretera nueva un mejor servicio de manera que los usuarios la prefieran en lugar de sus rutas tradicionales. Deberá tener muy en cuenta también los cambios y mejoras que estén programados en la red de influencia.

Este estudio se complementa con mediciones del tránsito que circula por esa red vial de influencia, y con encuestas de opinión acerca de las preferencias de los usuarios respecto a la oferta de la nueva carretera.

En cuanto a las mediciones del tránsito, se debe acudir en primera instancia a los registros históricos de las mediciones efectuadas por la SCT, consultando los Datos Viales en la página web de la Dirección General de Servicios Técnicos. Esta información se debe, haciendo

mediciones del tránsito, insistiendo en el detalle del tipo y porcentaje de vehículos de carga.

Las encuestas de Origen–Destino tienen como objetivo caracterizar la demanda de la red vial de influencia y conocer el patrón de viajes que realizan sus usuarios. En dichas encuestas, se registran datos como tipo de vehículo, lugar de origen y destino, motivo del viaje, frecuencia con que se realiza el viaje y algunas características socioeconómicas que permiten una estratificación de mercado por tipo de usuario. Las encuestas se hacen sobre muestras representativas del tránsito por tipo de vehículo y tomando en cuenta el volumen de tránsito, se extrapolan adecuadamente a toda la red de influencia.

El estudio de toda esta información, mediciones, encuestas, etc., llevará al ingeniero especialista en Ingeniería de Tránsito a concluir sobre el importantísimo dato del pronóstico del tránsito que tendrá la carretera en proyecto al inicio de sus operaciones. Tan importante como este dato de inicio, es el pronóstico de proyección del tránsito a través de los años siguientes a su puesta en servicio, hasta llegar al período de diseño, que generalmente son de 15 a 30 años.

El incremento del tránsito depende del aumento de variables socioeconómicas, que son la base para el pronóstico de viajes. Se estudia en primer lugar la influencia histórica que han tenido las diferentes variables en el comportamiento del tránsito en la red de influencia, para así considerarlas en el modelo de pronóstico para cada uno de los años venideros. Generalmente la red de influencia es un área grande que es necesario zonificar, aplicando a cada zona sus valores correspondientes de las variables, que principalmente son: población, producto interno bruto, parque vehicular por tipo de vehículo y población económicamente activa ocupada.

Para la obtención correcta de cada una de estas variables y para aplicarlas adecuadamente a los modelos de crecimiento anual de cada uno de los tipos de vehículos en cada una de las regiones y zonas en que se dividió la red de influencia, es necesario que el ingeniero especialista en Ingeniería de Tránsito realice una investigación regional acuciosa, y que en temas como desarrollo regional, crecimiento del producto interno y del parque vehicular, se asesore con analistas financieros regionales y con datos históricos y de planeación regional y nacional.

Para cada región de la red de influencia se tendrán variables diferentes para aplicar al crecimiento anual de cada uno de los tipos de vehículos, es decir automóviles, autobuses, camiones unitarios y camiones articulados. Las tasas de crecimiento son diferentes para cada región, para cada vehículo y para cada año. Habrá de calcularse los aportes del tránsito proveniente de cada una de las regiones al tránsito que circulará por la carretera en proyecto.

Como resultado del estudio de Ingeniería de Tránsito, el especialista proporcionará el pronóstico del volumen del tránsito diario promedio anual que circulará por la carretera en proyecto en cada uno de los años venideros, desglosada por cada uno de los tipos de vehículos mencionados. El pronóstico deberá contener el detalle de cómo se integrará el tránsito total esperado año con año, especificando para cada uno de los puntos intermedios de la carretera en los que se incorporará tránsito proveniente de las diferentes regiones, las cantidades o volúmenes de tránsito por cada entronque. Estos datos son indispensables para el diseño de los entronques, para el diseño y ubicación de las casetas de cobro y es un dato indispensable también para el diseño del pavimento.

El estudio de Ingeniería de Tránsito se presenta en un informe detallado con la descripción de la metodología del estudio; la descripción, detalle y resultados de los trabajos de campo realizados como: encuestas, mediciones de tránsito, recopilación de información en dependencias de conservación, estudios económicos y de desarrollo regional y del país, datos estadísticos de crecimiento de producción, exportaciones, parque vehicular, cálculos del modelo de crecimiento del tránsito, etc., Este es un estudio detallado, con todos los trabajos realizados, memorias de cálculos, encuestas, etc.

También es necesario presentar un informe ejecutivo. Este informe de trabajo, resume los resultados obtenidos en el informe detallado, destacando las conclusiones y recomendaciones para aplicarse directamente en el diseño.

### **SELECCIÓN DE ENTRONQUES Y PASOS A DESNIVEL**

Una vez que se conoce el pronóstico del tránsito que se incorporará a la carretera en cada uno de los sitios donde se cruzará el proyecto con carreteras existentes, el proyectista encargado del diseño geométrico, deberá estudiar la solución de los entronques para proporcionar el mejor servicio posible tanto a los usuarios de la carretera en proyecto que no saldrán en el entronque, sino que seguirán en la ruta, como a los que se incorporarán o saldrán en el entronque.

El proyectista analiza todas las intersecciones del anteproyecto del trazo definitivo. La SCT considera dos tipos generales de intersecciones: los entronques y los pasos.

Se llama Entronque a la zona donde dos o más caminos se cruzan o se unen, permitiendo la mezcla de las corrientes de tránsito. Se le

denomina paso, a la zona donde dos vías terrestres se cruzan sin que puedan unirse las corrientes de tránsito. Tanto los entronques como los pasos pueden contar con estructuras a distintos niveles.

A cada vía que sale o llega a una intersección y forma parte de ella, se le llama rama de la intersección. A las vías que unen las distintas ramas de una intersección, se les llama enlaces; llamándose rampas, a los enlaces que unen dos vías a diferente nivel.

El proyectista debe estudiar los entronques y diseñar las ramas y los enlaces para que los usuarios tengan la mayor seguridad y confort, lo cual se logran al buscar el menor número de maniobras, evitando las de cruce. En el área de la intersección, un conductor puede cambiar de la ruta sobre la cual circula manejando, a otra diferente trayectoria o cruzar la corriente de tránsito que se interpone entre él y su destino. Estas son las maniobras necesarias en un entronque que deberán ser estudiadas por el proyectista.

En cualquier caso que exista convergencia, divergencia o cruce, existe un conflicto entre los usuarios que intervienen en las maniobras. Esto puede incluir a los usuarios cuyas trayectorias se unen, cruzan o separan, o puede abarcar a los vehículos que se aproximan al área de conflicto. El área de conflicto cubre la zona de influencia en la cual los usuarios que se aproximan pueden causar trastornos a los demás conductores, debido a las maniobras realizadas en la intersección.

Al igual que el proyecto del trazo del eje de la ruta, el proyecto de los entronques es un trabajo que requiere de la experiencia y creatividad del ingeniero proyectista. El proyectista debe conjugar la topografía del lugar con las necesidades del entronque respecto a los accesos necesarios y diseñar un entronque con las ramas y enlaces que proporcionen el



servicio con la mayor seguridad y confort y adaptándolos al número de vehículos que circularán por él.

El proyecto debe considerar los grados de acuerdo con las velocidades en cada rama, los carriles de aceleración y desaceleración, las pendientes o inclinaciones de las rampas y sobre todo, la geometría general del entronque tomando muy en cuenta la topografía de la zona.

En el proyecto de las ramas, el ingeniero tiene que contemplar la cantidad de vehículos que se espera circulen en las horas pico, para así considerar una velocidad de circulación adecuada al número de vehículos y el tipo de carreteras que forman la intersección, y calcular las pendientes, las distancias de visibilidad y la sobreelevación de cada rama.

En los enlaces, el proyectista debe considerar las distancias de visibilidad y las longitudes necesarias para la aceleración de los vehículos hasta que lleguen a la velocidad mínima de circulación sobre el carril al cual se van a incorporar. En caso de que vayan a salir, se debe proyectar un carril de desaceleración con longitud suficiente para que los vehículos puedan disminuir su velocidad de operación sobre el carril en que venían circulando, hasta la velocidad de proyecto sobre las ramas de la intersección.

Se debe recordar ahora que en esta etapa se diseña el trazo de los ejes de cada uno de los entronques, así como la geometría en su totalidad, lo cual significa que el proyecto conceptual se elabora sobre los planos topográficos restituidos con escala 1:2,000 o 1:1,000 obtenidos de los vuelos bajos 1:10,000 y 1:5,000 y los proyectos definitivos se elaboran a escalas de 1:500.

Además de los proyectos de los trazos definitivos de las intersecciones, es necesario proyectar también los pasos a desnivel, los retornos, los paraderos, las rampas de frenado y los carriles de ascenso en pendientes de longitud corta, en pendientes largas es conveniente aumentar el número de carriles en ambos sentidos de circulación .

Cuando se lleva a cabo un proyecto carretero, se interrumpe el paso entre los caminos que comunican a pequeñas poblaciones, rancherías, ejidos, ranchos, etc., los cuales no pueden tener acceso a la carretera según el estudio de Ingeniería de Tránsito. Es necesario entonces proporcionarles a los ciudadanos afectados, una solución para no interrumpir su comunicación. Esta solución es mediante los pasos a desnivel.

En esta etapa, el proyectista debe determinar mediante su estudio, el tipo de paso, su ubicación y sus dimensiones. Los tipos de pasos a desnivel son:

Superiores o inferiores para vehículos, peatonales y para ganado. Los pasos superiores se dan cuando estos cruzan por arriba de la carretera a la que se hace referencia, mientras que los pasos inferiores son cuando estos cruzan por debajo de la carretera a la que se hace referencia.

Esta es una etapa muy importante en el diseño de los pasos a desnivel; Aunque aún no se hace el diseño estructural ni geométrico de los accesos al paso, se decide sobre todo la necesidad de construirlos, su ubicación y sus dimensiones. Aunque se trabaja con los planos de restitución a escalas 1:2,000 y 1:1,000 y con las fotos aéreas, es indispensable que el proyectista vaya al campo y constate la verdadera necesidad de los pasos y sus dimensiones.

En primer lugar, en gabinete se estudian las ubicaciones y dimensiones de los pasos. Muchas veces la ubicación puede no ser la que tenía el camino que se cruza (secundario), ya que hay que adecuarlo al nuevo camino (principal), por ejemplo, hay situaciones en las que el cruce original puede ubicarse en un corte muy alto del camino principal donde se requeriría un puente muy grande y que con una pequeña desviación del camino que cruza podría ubicarse donde el corte no sea muy alto o de preferencia pasarlo bajo el camino de mayor importancia. Desde el punto de vista de la conveniencia del camino buscaría resolver la travesía mediante pasos superiores, donde la estructura del puente es más chica y económica. Cuando se tiene ya la ubicación y tipo de los pasos se procede a la verificación en campo.

La mayoría de las veces, cuando se programa la visita al campo para la verificación de los pasos, se tienen ya solicitudes de pasos de vecinos, ejidatarios, propietarios, autoridades municipales, etc., de manera que en esta visita no solo hay que verificar, sino negociar acerca de las necesidades que según cada solicitante son prioritarias e indispensables. Incluso algunas desviaciones o adecuaciones, que desde el punto de vista de proyecto son necesarias, muchas veces son objeto de negociaciones arduas y complejas.

También es necesario estudiar en esta etapa la ubicación de retornos y rampas de frenado si se tienen pendientes descendentes largas. La experiencia indica que es necesario colocar retornos a distancias máximas del orden de cinco kilómetros, cuando son carreteras con 40 más carriles con separador central, aunque esta distancia depende mucho de la topografía del tramo, ya que las distancias de visibilidad necesarias para los retornos son grandes y en los terrenos montañosos es complicado, el proyectista puedes optar por retornos a desnivel.

Las rampas de frenado se necesitan cuando se tienen pendientes mayores que la pendiente generadora del camino y de longitud considerable; con longitudes mayores a un kilometro, ya es necesario estudiar la conveniencia de su construcción

Los paraderos, cuya ubicación es motivo de estudio en esta etapa, son áreas con espacio suficiente para que cualquier vehículo pueda disminuir su velocidad, incorporarse al paradero, estacionarse cómodamente para cumplir el cometido para el que fue diseñado, y luego para salir con seguridad, tener el carril adecuado de aceleración e incorporación a la carretera.

Los paraderos pueden tener funciones diferentes, como por ejemplo, los más comunes son para el ascenso y descenso de pasajeros de los autobuses, los de áreas de descanso para los conductores principalmente de vehículos de carga articulados (trailers); los que proporcionan servicios de baños o wc; los necesarios para gasolineras o incluso galerías comerciales y/o de artesanías; los paraderos para disfrutar paisajes naturales o para admirar obras de ingeniería como puentes de la misma carretera; y para diversos usos similares demandados por los usuarios.

### **DRENAJE**

En esta etapa del proyecto ejecutivo se seleccionó una ruta sobre la cual se han restituido planos con escala 1:2,000 y 1:1,000, provenientes de las fotografías aéreas tomadas a escalas 1:10,000 y 1:5,000. Con la información que se recaba en este estudio y con la que se tiene acerca del uso de suelo y la geotecnia de la zona de la ruta, se calcula la cantidad de agua o gasto probable que pasará por cada uno de los

cruces con los ríos y corrientes, para que con esta información el proyectista de la geometría del camino pueda decidir el sitio adecuado para cruzar los ríos con el trazo de la carretera, dentro de la zona del trazo preliminar que ya se ha decidido en las etapas previas de elección de ruta.

Este es un estudio de gabinete que se elabora con la ayuda de toda la información disponible en la Dirección General de Servicios Técnicos, acerca de los caudales de lluvia históricos en la República Mexicana. También se recaba información en los datos del INEGI. La SCT publica libros con las curvas Isoyetas de Intensidad-Duración-Período de Retorno, para cada uno de los estados de la República.

Mediante las curvas Isoyetas se puede obtener la intensidad de lluvia en milímetros por hora en cualquier sitio; además, puede ser una lluvia con una duración desde 5 minutos hasta dos horas, con períodos de retorno desde cinco años hasta cien años. Con esta información, complementada con los usos de suelo que se encuentran en el INEGI, un hidrólogo puede calcular el gasto máximo de agua que puede pasar en un punto de un río por el que va a cruzar el trazo, y con ello saber en forma de anteproyecto las dimensiones de puente que necesita en cada sitio de cruce y así acomodar su trazo a la mejor conveniencia.

La delimitación de cuencas se hace en las fotos aéreas disponibles, de preferencia se usan las fotos de vuelos bajos que tienen más detalle, pero muchas veces las cuencas son más grandes del área fotografiada, y hay necesidad de acudir a las fotos de vuelos más altos con mayor escala.

Las cuencas constituyen el área que por razones de la topografía, capta el agua de lluvia, que al escurrir superficialmente confluye en un punto

determinado. Al proyectar una carretera, se cruzan cuencas obstruyendo el paso natural de las corrientes hacia las partes bajas y finalmente hacia el mar. Es entonces necesario conocer en qué lugar y cuánta agua va a llegar a la carretera, para darle paso a través de puentes, alcantarillas, canales, cunetas y contra cunetas.

Para conocer cuánta agua va a llegar a la carretera, se necesita saber la intensidad de la lluvia, cual es el área que va a recoger esa agua de lluvia, y por qué tipo de terreno va a escurrir esa agua hasta llegar a la carretera. Con esto, se calculan las obras de drenaje necesarias. Del resultado de un buen estudio de drenaje depende en mucho evitar la prematura destrucción de las carreteras.

El estudio de drenaje se inicia en esta etapa con la delimitación y estudio de las cuencas y con la reunión y análisis de toda la información histórica disponible acerca de las lluvias en la región y las probables lluvias que se tendrán en el futuro durante la vida útil de la carretera.

La delimitación de las cuencas se realiza al trazar el parteaguas en las fotografías aéreas con lápiz graso de toda la zona de aportación que se encuentre aguas arriba de la carretera. Al final de este trabajo, se tendrá dividida la carretera en segmentos de diferente longitud, donde a cada segmento le corresponde un área por drenar o cuenca. El objetivo es conocer cuánta agua hay que drenar de ese segmento y diseñar las canalizaciones y puentes necesarios para tal propósito.

Hay situaciones en que las cuencas, por su tamaño, salen de las zonas de fotos con escala 1:10,000, entonces habrá que recurrir a las fotos con escala 1:25,000. También hay casos muy especiales de grandes ríos, cuyas cuencas se extienden a cientos de kilómetros y naturalmente salen de la zona de cualquier fotografía; estas situaciones especiales

son casos en los que la Comisión Nacional del Agua (CNA) tiene un estricto control y dispone de toda la información hidrológica que pone a disposición de la SCT. De hecho, todos los puentes con corrientes grandes deben tener la aprobación la CNA respecto a su gasto de diseño, es decir a la cantidad de agua con la que se dimensiona el puente.

Una vez que se tienen dibujadas las cuencas en las fotografías, es necesario medir la superficie de cada una, obtener las lluvias máximas esperadas en esa cuenca particular con los datos de las Isoyetas de la DGST, clasificar los tipos de suelo por los que escurrirá el agua en la superficie de la cuenca para determinar los coeficientes de escurrimiento, que sirven todos en su conjunto para hacer los cálculos de la cantidad de agua (gasto) que llegará a la carretera.

El resultado de estos estudios y cálculos realizados por un ingeniero hidrólogo, es un informe para utilización del ingeniero proyectista. Este informe consta principalmente del larguillo o mosaico fotográfico donde se encuentra dibujado el eje del proyecto, y donde además se dibujan las fronteras que delimitan todas las cuencas, teniéndose al final de cuentas los tramos de carretera donde el eje de trazo cruza las cuencas y tiene que recibir el aporte de agua que dichas cuencas acarrearán.

El larguillo o mosaico se complementa con los datos de la cantidad de agua que se recibe en cada segmento de carretera y comentarios sobre el tipo y tamaño de la obra de drenaje necesaria, ya sea puente o alcantarilla, así como las obras de drenaje complementarias como canales o alcantarillas de alivio que se juzguen necesarias.

## PLANTA Y PERFILES TOPOGRÁFICOS

Hasta esta etapa del estudio, se tiene la ruta definitiva con el anteproyecto del trazo. En la siguiente etapa, se debe obtener el trazo definitivo basado en la topografía restituida de los vuelos bajos. La obtención de los planos de la planta y el perfil deducido del trazo definitivo, prácticamente constituyen el diseño final de la carretera y con estos planos solo faltará el detalle de las secciones transversales, que estará definida por la inclinación de taludes de cortes y terraplenes para tener el diseño geométrico terminado.

Debe tenerse muy en cuenta que el diseño geométrico es la concepción idealizada de la carretera. Para que se pueda construir, será necesario el proyecto ejecutivo que se obtendrá con los trabajos y estudios que se realizarán después de esta etapa de obtención de la planta y perfil definitivos.

Nuevamente, al igual que en las etapas de selección de ruta y estudio de alternativas de ruta, es necesario el talento creativo, para obtener el trazo definitivo sobre la ruta final. Esta vez se tiene una topografía más precisa en relación a la que se tenía cuando se obtuvo el anteproyecto con planos restituidos con escala 1:5,000, ya que ahora se tienen planos restituidos con escala 1:2,000 o 1:1,000. Se debe recordar que los planos con escala 1:5,000 se obtuvieron con el vuelo alto con escala 1:25,000, y que son restituidos porque se obtienen a través del trabajo de restitución de las fotos aéreas, es decir de relacionar las fotos estereoscópicas con los puntos de control terrestre los cuales tienen coordenadas conocidas.



Los planos con escala 1:1,000 o 1:2,000, permiten afinar el anteproyecto, se realiza de nuevo el proyecto contando ya con las indicaciones de los estudios de ingeniería de tránsito, geotécnico, hidrológico, de ubicación de entronques, accesos, salidas y retornos; ubicación de pasos a desnivel; plano con la delimitación de cuencas con sus tramos y volumen de agua por drenar; así como los sitios para puentes y su longitud probable. Se cuenta con un informe detallado, uno ejecutivo, planos y larguillos informativos.

Del estudio de Ingeniería de Tránsito se tiene el volumen del tránsito que circulará por cada tramo de carretera, el que se incorporará y/o saldrá por cada uno de los cruces con otras carreteras y la distribución de los diferentes tipos de vehículos, como automóviles, camiones unitarios, camiones articulados, autobuses, etc. Con esa información, el proyectista diseñará la geometría definitiva de los entronques, con sus ramas, accesos y demás. Esta información es básica para el diseño de los retornos, paraderos, miradores, rampas de frenado, etc.

Del estudio geotécnico se tiene un plano o mosaico fotográfico a manera de larguillo fotográfico con coordenadas y con el anteproyecto. En este plano, el ingeniero geotecnista, delimitó las diferentes unidades geotécnicas por las que atraviesa el trazo de la carretera, describiendo las características geotécnicas de los materiales que se encontrarán en la carretera, señalando posibles zonas de materiales por las que se debe evitar localizar el trazo, o se deban tomar precauciones especiales al proyectar cortes y terraplenes, etc.

También se tiene el informe detallado que respalda las recomendaciones indicadas. En los casos en los que el anteproyecto tenga previsto ubicar túneles, el estudio geotécnico debe señalar en forma preliminar las

características geotécnicas de las rocas que se encontrarán en las zonas de túnel.

Se tiene también en esta etapa la ubicación de entronques, pasos a desnivel y retornos. Corresponde al diseño geométrico adecuar los entronques a la topografía de los sitios y al volumen de tránsito y establecer el tipo de entronque con ubicación de ramas, accesos, tipo y longitud de las estructuras necesarias. También de acuerdo con el volumen de tránsito se diseñarán los retornos y rampas de frenado si son necesarias.

Del estudio hidrológico se tiene otro plano o mosaico fotográfico en el que se delimitan las cuencas por las que el trazo atraviesa, junto con un informe en el que se detalla la cantidad de agua que aportarían a la carretera cada una de esas cuencas, y la recomendación en cuanto al tamaño de puentes, alcantarillas y obras de encauzamiento para cada uno de los segmentos de carretera de cada cuenca. Naturalmente este estudio aporta recomendaciones especiales cuando se cruzan ríos con grandes corrientes, respecto al sitio más adecuado para cruzarlo desde el punto de vista hidrológico, ya que se debe elegir un sitio en el que se tengan los menores riesgos de erosiones, cambio de curso de corriente, de turbulencias, etc.

Provisto con toda esta información procedente de los estudios previos realizados por especialistas en diferentes disciplinas, el proyectista, especialista en diseño geométrico, inicia el proceso de diseño del trazo definitivo de la ruta. Este mismo proyectista, anteriormente ya elaboró el anteproyecto de la misma ruta basado en planos topográficos restituidos de fotografías aéreas con escala 1:10,000 y con información geotécnica que un especialista en la materia interpretó de esas mismas fotos. Ahora ya cuenta con información más detallada y completa, y procede a

elaborar su mismo trabajo creativo, y técnico, para encontrar el mejor trazo, que reúna la máxima comodidad y la máxima seguridad para el usuario, con el menor costo para el transporte, y con el estricto cumplimiento de las normas de diseño establecidas mediante la velocidad de diseño especificada para el tramo.

Una vez analizados todos los estudios, informes y planos con los que se cuenta, se elaborará el diseño del almacenamiento horizontal definitivo, tomando en cuenta las restricciones, recomendaciones y características de los materiales que se encontraron en el trazo, así como las condiciones hidráulicas de cada tramo por el que será necesario pasar con el trazo.

Se entiende como alineamiento horizontal a la proyección en planta, o en un plano horizontal, del eje de la carretera, que representa la sucesión de rectas y curvas desde el origen hasta el destino final. Este trazo deberá proporcionar un desplazamiento fluido, y adaptado a la topografía del terreno en lo posible sin menos cabo de la seguridad, comodidad y el menor costo para el transporte.

De nuevo se calculan las distancias mínimas de visibilidad de parada, para proyectar las curvas, tomando en cuenta obstáculos como taludes de corte, puentes y cualquier edificación que pudiera haber. Esta distancia mínima de visibilidad de parada es la necesaria para que un conductor que circula a la velocidad de proyecto y que ve cualquier obstáculo en el camino, como pudiera ser un vehículo parado o un objeto que haya caído al pavimento, tenga tiempo de reaccionar sin sobresalto, aplicar el freno y detener el vehículo sin alcanzar el obstáculo. Esta distancia la debe proporcionar el proyectista en toda la longitud de la carretera.

En carreteras con dos carriles, uno para cada sentido de circulación, debe estudiarse también una distancia de seguridad para el rebase, que debe considerar el proyectista para ubicar rectas con esa distancia o mayor a intervalos convenientes según la topografía regional y la intensidad del tránsito. Esta distancia es la que necesita un conductor para rebasar con seguridad a un vehículo lento considerando que en sentido contrario circula otro vehículo. El cálculo de esta distancia necesaria debe hacerlo el proyectista en función de las velocidades de los tres vehículos involucrados, considerando factores de seguridad adecuados a la protección, seguridad y confort de los usuarios.

El proyectista diseñará las curvas de la carretera lo más amplias que sea posible, dentro de los límites de las especificaciones para la velocidad de proyecto. Deberán evitarse en lo posible las curvas cerradas, que son las que estarían al límite permitido por la velocidad de proyecto, proyectándolas solamente en los casos en donde las curvas amplias se tengan cortes y terraplenes de alturas desproporcionadas y muy costosas, sin descuidar la seguridad de los usuarios.

En cada curva se calcula la sobreelevación o peralte que se requiere según la velocidad de proyecto, para contrarrestar la fuerza centrífuga que tiende a sacar de la curva a los vehículos. Un peralte bien diseñado proporciona una seguridad y comodidad conveniente y necesaria en el alineamiento horizontal. También las curvas necesitan un ancho mayor de la carretera en relación al ancho que se tiene en una recta o tangente.

Este sobre ancho se calcula en cada curva de acuerdo con el grado de curvatura, la velocidad de proyecto y el vehículo de proyecto, siendo un valor de notable importancia debido a que los vehículos más largos, al girar en la curva por su geometría, pueden invadir el carril contiguo,

situación que es más notable entre más largos sean los vehículos; de allí que las curvas deben diseñarse para los vehículos que vayan a permitir circular por esa carretera, lo que se establece en la etapa de planeación conforme al Reglamento y Norma Oficial Mexicana.

El diseño de carriles adicionales, es parte del alineamiento horizontal, existen varios casos en los que se necesitan carriles adicionales. Uno de ellos se presenta cuando se tiene una pendiente fuerte ascendente que se mantiene en una longitud corta; en este caso, los vehículos muy pesados reducen su velocidad y con su lentitud pueden provocar asentamientos del flujo vehicular afectando a muchos usuarios.

Un carril adicional requiere de una especial atención para su diseño; es necesario delimitar bien su longitud limitándola a lo estrictamente necesario y diseñar su transición tanto de entrada como de salida, cuidando especialmente la incorporación o entrada que debe ser gradual, sin conflictos y con una visibilidad suficiente.

En los casos de pendientes largas es mejor ampliar la sección transversal agregando carriles para cada sentido de circulación, ya que el sentido del descenso, los vehículos ligeros tienden a rebasar indebidamente a los vehículos lentos produciéndose accidentes.

El ancho de la carretera, o sección transversal tipo, fue definida durante la etapa de planeación. De acuerdo con el servicio que demandan los usuarios, es decir, con el tránsito esperado, y el tipo de vehículo se establece el número de carriles; el ancho de los carriles, el ancho de los acotamientos, el ancho del camellón central, etc. Sobre ese ancho de carretera que fue definido en la etapa de proyecto, trabaja ahora el proyectista en diseño de los carriles adicionales, cuidando siempre de lograr un viaje fluido y con las mismas características y la misma

seguridad desde el origen hasta el destino final. Cualquier cambio de dimensiones o del criterio de diseño en tramos particulares de la carretera, conducirá invariablemente a tener accidentes automovilísticos.

Se dan casos en los que posteriormente a la terminación del proyecto ejecutivo, alguien pretenda quizá con buena intención, disminuir el ancho de la carretera en los puentes y en los túneles. De hacerlo, se tendrán accidentes, ya que se pierde totalmente el criterio de diseño, fluidez y seguridad. El diseño geométrico es una creación armónica entre el servicio que demandan los usuarios y la topografía del terreno. Creación basada en estudios de física, fotogrametría, topografía, hidrología, geotecnia, ingeniería de tránsito y vías terrestres.

Otro caso en el que se necesitan carriles adicionales es el caso de los entronques. En cualquier carril adicional es necesario diseñar los accesos e incorporaciones, que deben tener una longitud y visibilidad de acuerdo con las velocidades de diseño de la carretera principal. El diseño de los entronques en esta etapa es un diseño integral que el proyectista debe realizar desde el punto de vista de la geometría, en armonía total con la topografía del sitio.

Se diseña el alineamiento horizontal de los entronques con el mismo criterio con que se diseña la carretera principal, solo que aquí en las ramas se considera otra velocidad de diseño, que permite curvas más cerradas. Cuando los entronques enlazan dos o más carreteras de altas especificaciones o muy importantes, todas con velocidades de diseño altas, los entronques consecuentemente deben enlazar las carreteras con velocidades altas en los entronques y sin conflictos en las incorporaciones, de manera que los flujos al cambiar de carretera sigan siendo fluidos y confortables, de manera que el usuario no sienta el cambio de carretera y siga su ruta en forma fluida y segura.

Por último, se necesita diseñar carriles adicionales en las zonas de todo tipo de paraderos, que hasta esta etapa de diseño están ya previstos, como son los de ascenso y descenso de pasajeros, los de áreas de descanso, miradores, y de servicio como baños y gasolineras. En los paraderos se necesitan principalmente los de acceso e incorporación que como ya se dijo, deben diseñarse con la longitud adecuada a la velocidad de la carretera, y tener la visibilidad adecuada para seguridad. El diseño de las instalaciones en las áreas de paraderos, incluyendo los estacionamientos, se llevará a cabo en la siguiente etapa del proyecto.

El alineamiento horizontal debe considerar también el diseño de rampas de frenado. Estas rampas se colocan en pendientes descendentes o bajadas muy largas, para auxiliar a los vehículos (normalmente de carga) que pudieran quedar sin frenos y precipitarse sobre la carretera, para que puedan salir en esas rampas provistas de un pavimento de grava suelta en la que las llantas se incrusten paulatinamente y detengan la carrera de los vehículos sin frenos.

Todo lo que el proyectista debe considerar en el diseño del alineamiento horizontal, debe hacerlo teniendo muy en cuenta la topografía. En el diseño de las tangentes (rectas) y curvas, es imposible no tomar en cuenta la altura de los terraplenes y cortes que pudieran generarse con el diseño. Este tema compete al alineamiento vertical de la carretera, y en consecuencia los alineamientos horizontal y vertical, son dependientes entre sí y no pueden manejarse en forma separada. Ciertamente es que se inicia el diseño con el alineamiento horizontal, pero al mismo tiempo se toma en cuenta todo lo concerniente al alineamiento vertical. De hecho, al terminar el alineamiento horizontal, se tiene ya avanzado el alineamiento vertical; y al terminar el alineamiento vertical, tiene que

revisarse y ajustarse el alineamiento horizontal, y así sucesivamente hasta que ambos alineamientos sean compatibles.

El alineamiento vertical es la proyección en un plano vertical del perfil de la carretera, en la que pueden apreciarse las subidas y bajadas (tangentes ascendentes y descendentes), así como las curvas verticales. Como en ese perfil se dibuja también el terreno natural, se tienen también las alturas de los cortes y los terraplenes.

El diseño del alineamiento vertical, consiste en el ajuste del perfil de la carretera para lograr que, por un lado las subidas y bajadas no sean muy pronunciadas, o en otras palabras, que las pendientes no sean muy fuertes y largas. Que los cortes y los terraplenes no sean muy altos, y que al igual que en el alineamiento horizontal se tenga una circulación cómoda y fluida dentro de los límites de la velocidad de proyecto de la carretera. Teniendo especial énfasis en el costo de operación vehicular para encontrar la mejor razón económica, por lo que habrá de considerarse túneles, puentes y viaductos.

En el diseño del alineamiento vertical deben calcularse las distancias de visibilidad de parada y vigilar que se cumplan de preferencia mucho más allá de los mínimos para comodidad de los usuarios.

Curvas verticales superpuestas con curvas horizontales, generalmente constituyen un buen diseño, aunque es necesario analizar cuidadosamente cada caso particular. Cambios sucesivos en el perfil sin una combinación con curvas horizontales podrían dar por resultado una serie de jorobas visibles desde cierta distancia por los conductores, lo cual no es un buen diseño.



Curvas horizontales cerradas no deben ubicarse en la cresta o cerca de la cresta de una curva vertical pronunciada. En esta condición el conductor puede no percatarse del cambio horizontal del alineamiento especialmente de noche.

En las intersecciones tanto las curvas horizontales como las verticales deben hacerse lo más planas que sea posible, ya que la distancia de visibilidad en esos casos es muy importante puesto que los vehículos en la intersección pueden disminuir la velocidad o incluso parar.

Hay situaciones especiales en las que el proyectista se encuentra con una situación planteada por la topografía en las que decide optar por la construcción de uno o varios túneles, ante la opción de cambiar el trazo alargándolo, haciéndolo sinuoso y aumentando el costo de operación. La misma situación se presenta cuando la decisión es construir viaductos. Los viaductos son grandes puentes que se proyectan y construyen para pasar sobre grandes barrancas o depresiones que sería más costoso y complicado resolverlas con terraplenes y que solo podrían evitarse cambiando el trazo de la carretera con los inconvenientes ya señalados.

Realmente, esta situación de optar por túneles o viaductos ya la analizó el proyectista desde la etapa de elección de ruta definitiva y anteproyecto del trazo. En esta etapa del proyecto del trazo definitivo, le corresponde afinar y definir la opción de túnel o corte y viaducto o terraplén. El estudio detallado del trazo en planta y del perfil del eje, conducirá al proyectista a definir la altura final entre la rasante y el terreno natural en la zona de definición de corte o túnel y si la cobertura sobre un posible túnel es adecuada se decidirá por túnel, o por el contrario si la altura del corte y los materiales o el macizo rocoso es adecuado según lo señalado por el ingeniero geotecnista, se decidirá por

corte. Así mismo, la altura final de la rasante sobre una barranca o valle profundo, definirá si se proyecta un viaducto o un terraplén.

Este tipo de decisiones no son sencillas. Es necesario considerar muchos factores tanto de orden económico del transporte como del geotécnico y del proyecto geométrico. Características de los materiales de los macizos rocosos de la excavación para corte o túnel, con el detalle de que si es posible emplearlos en la construcción de terraplenes; ubicación de bancos de materiales para construcción de terracerías con sus distancias de acarreo; análisis de los movimientos del diagrama de masas, el cual indicará si hay material de desperdicio y a qué distancia debe llevarse para tirarlo.

Una vez que se ha conformado el alineamiento vertical o perfil, con el alineamiento horizontal o planta del trazo definitivo, y que también se tiene definida tanto la ubicación con detalle como la forma en que se han resuelto los entronques, túneles, viaductos, y que se tiene también la lista de los sitios donde se ubicarán pasos a desnivel con su respectiva solución en cuanto al tipo de pasos.

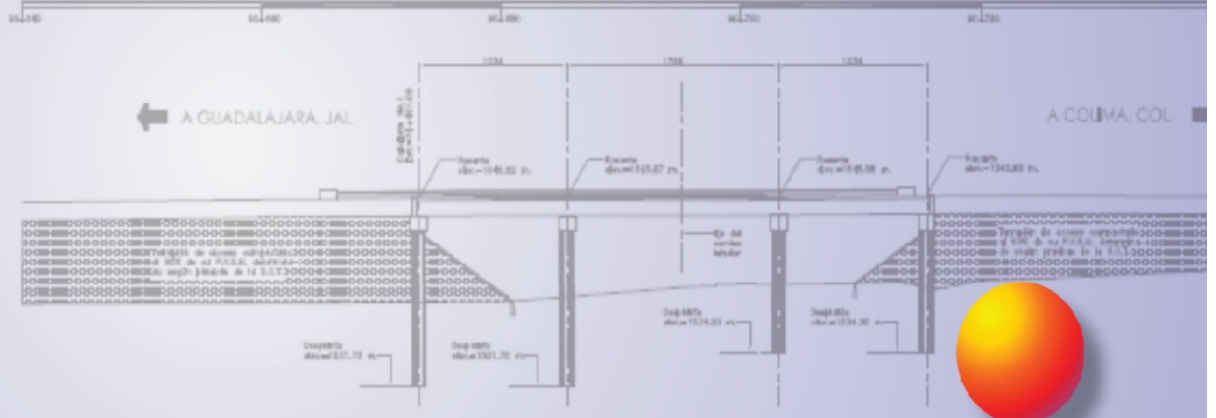
Para la solución del drenaje del trazo definitivo, el proyectista cuenta con los planos y con el informe que le ha preparado el hidrólogo. En los planos tiene la delimitación de las cuencas que definen un tramo de carretera que cruza por cada cuenca. En el informe el hidrólogo señala la cantidad de agua máxima que se presentará en cada tramo durante la vida útil de la carretera. Asimismo, el hidrólogo recomienda el sitio para la ubicación de puentes y su longitud. Todo lo relativo a los puentes y a las situaciones especiales que pudiera haber señalado el informe, el proyectista del diseño geométrico ya debió haberlo considerado durante el diseño de la geometría tanto horizontal como vertical del trazo

definitivo. Queda por resolver el drenaje menor y las obras complementarias.

En carreteras se considera drenaje menor, a todas las corrientes que para cruzar a la carretera requieren de un puente con longitud máxima de seis metros. Un puente de esa longitud, normalmente no requiere de sondeos profundos para estudiar la cimentación y estructuralmente puede resolverse con diseños tipo más sencillos que en un puente grande. Por otra parte, la corriente en una obra de menos de seis metros normalmente no es permanente y provoca menos erosiones.

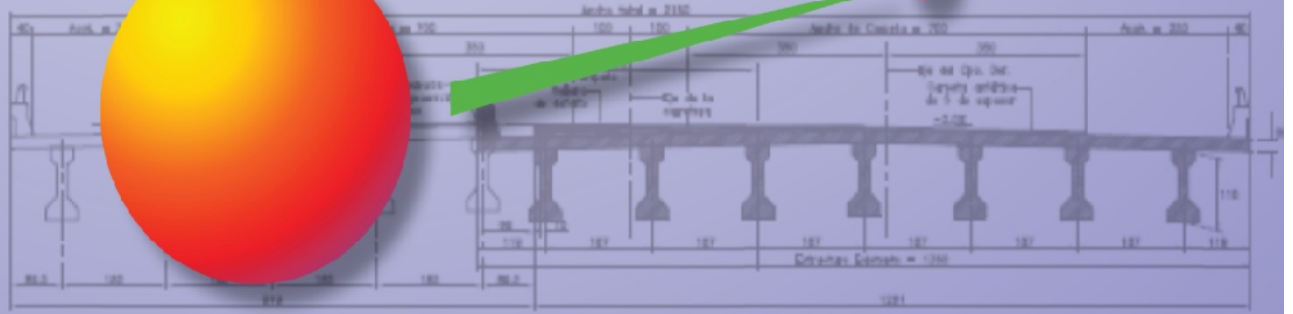
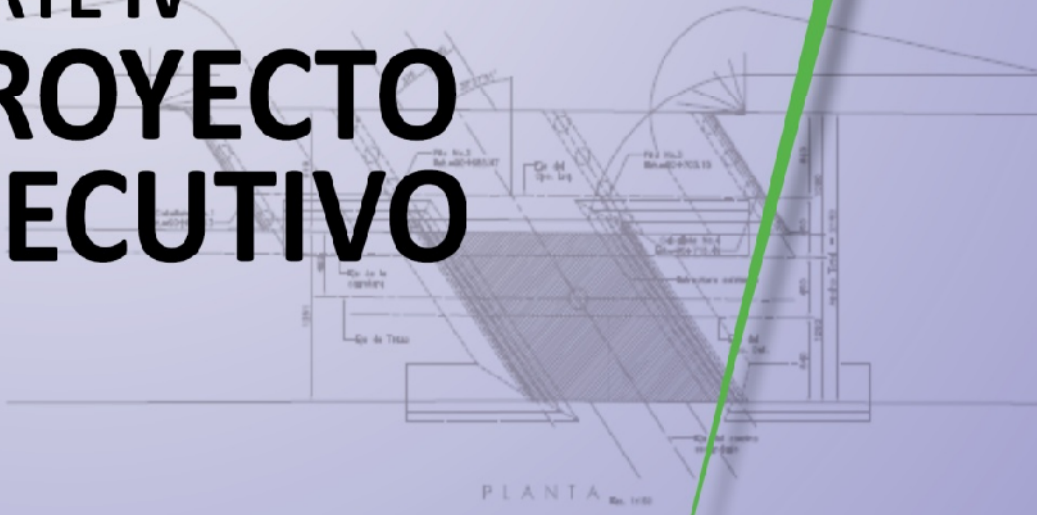
El proyectista del trazo definitivo, debe analizar cada uno de los tramos definidos por la delimitación de las cuencas y señalar todos los sitios en los que debe diseñarse una obra de drenaje menor, procurando que coincidan con los sitios de las corrientes naturales y en su caso señalando también las canalizaciones que sean necesarias para encauzar las corrientes.

Con el diseño del trazo definitivo, se tiene una planta topográfica con escala 1:2,000 o 1:1,000 restituida de las fotos aéreas; la ubicación precisa y el proyecto conceptual de los entronques; la lista con las ubicaciones y los tipos de pasos a desnivel; los logares con las ubicaciones y tamaño de los puentes, viaductos y túneles; y la ubicación de las obras de drenaje menor.



# PARTE IV PROYECTO EJECUTIVO

CORTE ELEVACION POR EL EJE DEL CPO. [2Q]



## PROYECTO EJECUTIVO

---

### INTRODUCCIÓN

El Proyecto Ejecutivo es el conjunto de planos, especificaciones, normas y procedimientos, indispensables para la construcción de la carretera tal y como fue idealmente concebida. El proyecto ejecutivo debe acompañarse de todos los estudios realizados para obtener los datos o parámetros con los que se elaboraron los diseños y los planos. La presentación final es la Carpeta Técnica que se entrega a los constructores.

Para facilitar el control y descripción de los estudios y trabajos necesarios, la SCT ha dividido El Proyecto Ejecutivo, en varias sub-etapas que son:

- Selección de ruta.
- Anteproyecto (Ingeniería Básica)
- Trabajos de campo.
- Análisis de Gabinete.
- Proyecto Definitivo.
- Integración de la Carpeta Técnica.
- Trazo en campo del proyecto.

Cada una de estas sub-etapas requiere de estudios y trabajos que van produciendo proyectos parciales o individuales como los puentes, túneles o diseño de pavimento, o bien están encaminados a obtener parámetros de caracterización de materiales o datos de diseño, como los estudios de cimentación para puentes, bancos de materiales para

terracerías o estudios geotécnicos que proporcionan los datos indispensables para el cálculo del diagrama de masas.

## **TRAZO EN CAMPO DEL PROYECTO DEFINITIVO**

La topografía juega un papel primordial en el diseño de Vías Terrestres. Ya se ha dicho que el diseño de una carretera debe armonizar con la topografía, es decir, con las formas en las que la naturaleza presenta la superficie de la corteza terrestre. Esta armonía ha sido la base del diseño del trazo definitivo, respetando siempre las características técnicas que debe cumplir el proyecto.

El conocimiento de la superficie de la corteza terrestre sobre la que se va a colocar la carretera, se obtiene mediante la topografía. Gracias al conocimiento detallado de la topografía se sabrá la magnitud de las excavaciones necesarias, la magnitud de los puentes y obras de drenaje; podrán medirse y cuantificarse los volúmenes de tierra o roca que se necesita excavar, transportar y compactar; y podrán diseñarse las estructuras necesarias como puentes, viaductos y túneles.

Hasta esta etapa del proyecto, toda la topografía se ha obtenido por medio de las fotografías aéreas. Aprovechando esta tecnología, se ha tenido un grado de avance significativo, ya que se tiene ya el diseño del trazo definitivo, suficientemente estudiado y respaldado por los estudios complementarios al trazo geométrico, como son los geotécnicos, hidrológicos y de ingeniería de tránsito.

Por medio de las fotografías aéreas en vuelos altos, con escala 1:25,000, se han hecho los estudios de las posibles rutas y se ha seleccionado la mejor. Sobre la ruta seleccionada se han efectuado vuelos bajos, con escalas 1:10,000 y 1:5,000, y se han hecho los

estudios necesarios para obtener el trazo definitivo sobre la ruta seleccionada.

Se tiene ya el proyecto definitivo, después de haber estudiado los anteproyectos en varias rutas. Estos anteproyectos se estudiaron en base a la topografía restituida de las fotografías aéreas. Cuando se obtuvo la ruta definitiva, se estudió el proyecto definitivo según ya ha sido descrito, en base a una topografía muy detallada producto de la restitución de las fotografías aéreas correspondientes a vuelos muy bajos. Aunque esta topografía es ya detallada, no es adecuada para la elaboración de los proyectos ejecutivos de las obras de drenaje, de los pasos a desnivel, de los puentes y, en la mayoría de los casos, de las terracerías. Es por tanto necesario trazar en el campo el proyecto definitivo de la carretera, mediante los trabajos de topografía necesarios.

Estos trabajos de topografía, se basan en el proyecto definitivo que ya se tiene. Se tienen ya todos los datos del alineamiento horizontal, es decir el trazo de la carretera en una planta o plano horizontal. Estos datos no cambiarán a menos que se encuentre un motivo especial. La implantación del trazo del proyecto definitivo consiste en pasar al campo el dibujo de esa línea horizontal del proyecto definitivo y obtener las curvas de nivel reales del terreno mediante el levantamiento o medición de la topografía real. Lo que ocurre realmente es que el trazo proyectado no sufre modificaciones y con la obtención de la topografía real se hacen ajustes en el perfil de la carretera también llamado alineamiento vertical.

Los trabajos de topografía en campo cuentan con la ventaja de que se tienen las referencias que se dejaron cuando se pusieron las marcas o puntos de control terrestre para apoyo de los vuelos y toma de fotografías aéreas. Esas marcas o puntos de control terrestre

constituyen el vínculo entre el proyecto definitivo obtenido de las fotos aéreas, y el trazo definitivo en campo que implantarán los trabajos de topografía.

El contar con los puntos de control terrestre, permite que no sea necesario correr el trazo con avance continuo ininterrumpido desde el inicio hasta el final, sino que el trabajo topográfico se simplifica puesto que se ubican en primer lugar los puntos trascendentes del trazo, como son todos los puntos de inflexión (PI) de las tangentes o rectas, y con ellos los puntos básicos de las curvas, como son inicio de curva: Tangente–Espiral (TE) y/o Espiral–Curva (EC) ó Tangente-Curva (TC). Terminación de curva: Curva-Tangente (CT), o Curva–Espiral (CE) o Espiral Tangente (ET). Si se tienen tangentes o rectas largas, también se ubican algunos puntos sobre estas tangentes, puntos llamados Punto Sobre Tangente (PST) que facilitan el trazo de estas tangentes largas.

Puesto que se tienen las coordenadas de todos estos puntos, y también se tienen las coordenadas de los puntos de control terrestre, se ubican en campo todos con la mayor precisión posible y se fijan referencias mediante mojoneras o marcas en estructuras o en árboles, para que meses después cuando se vaya a iniciar la construcción, se encuentren las referencias, se reubiquen los puntos y pueda replantearse el trazo nuevamente.

Teniendo con precisión todos estos puntos característicos, indispensables para definir el trazo, solo resta unirlos para pasar al terreno en campo, el dibujo que se tiene en planos del proyecto del trazo definitivo. El trabajo topográfico de unión de estos puntos, requiere de menor precisión que el sembrado de los puntos característicos ya descritos y se le ha llamado como la labor de “relleno”. Esta labor de



relleno, consiste en medir y colocar un trompo con estaca de kilometraje a cada 20 m sobre las rectas o tangentes. Estas marcas con trompo y estaca también se colocan en las curvas a cada 20 m sin contar con los datos característicos de curva. Terminada la labor de relleno se tiene en campo el trazo del proyecto definitivo y se procede a la nivelación de dicho trazo.

El trabajo topográfico de nivelación se hace de manera tradicional. Lo hace un topógrafo con dos ayudantes y puede ser con un nivel convencional o con un nivel electrónico, y se hace siempre el cierre correspondiente que significa salir nivelando de un punto, llegar a una longitud preestablecida y regresar al punto de partida a donde deberá llegarse con la precisión requerida. Es muy importante dejar bancos de nivel a distancias no mayores de 500 m, es decir, por lo menos dos por kilómetro.

Los bancos deben ubicarse en sitios accesibles, preferentemente dentro del derecho de vía, en estructuras inamovibles y duraderas y claramente señalados. En sitios inhabitados, montañas, bosques o selvas, a falta de estructuras donde ubicar los bancos se recurre a troncos de árboles grandes donde se acondiciona una pequeña área de referencia y se colocan grapas para ubicar un punto con su elevación fija y que servirá de referencia para futuras nivelaciones al rehacer el trazo.

Una vez que se tienen los trompos a cada 20 m con su correspondiente elevación o cota, se procede a levantar o medir las secciones transversales de topografía. Estas secciones se miden en una línea perpendicular al trazo longitudinal de la carretera, y en una longitud a cada lado del trazo de por lo menos 50 m, siendo la distancia mínima la necesaria para llegar al derecho de vía de la carretera.

Las secciones transversales se pueden levantar o medir a la manera tradicional, es decir con nivel de mano, tomando los niveles de cada uno de los puntos de quiebre o cambio de pendiente en sentido transversal a la línea de trazo, de manera que con estos puntos en los que se tiene su ubicación o distancia respecto al trazo y también su cota o elevación, se puede configurar la topografía de toda el área, es decir se puedan dibujar las curvas de nivel reales, sustituyendo a las curvas de nivel restituídas de las fotografías aéreas.

Las secciones transversales de topografía también se pueden levantar o medir con una estación total, que es un teodolito o tránsito moderno, en el cual por medio de un programa de computadora, se registra en campo el punto de inflexión de la sección transversal y automáticamente el programa de la estación total lo registra, lo calcula y lo ubica con sus coordenadas (xyz), en una planta o plano horizontal en el que ya se tiene también el trazo definitivo.

Ya se tiene entonces el plano del trazo definitivo con las coordenadas completas (xyz) de todos los puntos. En ese mismo plano, manejado por la estación total por medio del programa electrónico de computadora, se agregan todos los puntos levantados en campo en las secciones transversales de topografía, logrando que automáticamente se ubique cada uno de estos puntos con sus tres coordenadas en el plano de la planta electrónica.

Sembrados todos los puntos descritos en los dos párrafos anteriores en el plano de la planta electrónica, con sus coordenadas correspondientes, se tiene la planta topográfica definitiva correspondiente al trazo definitivo. El mismo programa de computadora, dibuja las curvas de nivel a la equidistancia que se le solicite. En carreteras, normalmente es a cada metro.

Este trabajo topográfico correspondiente a la implantación en campo del trazo definitivo, constituye la base y el inicio de los trabajos de topografía en campo para el proyecto ejecutivo. Lo llevan a cabo ingenieros topógrafos, con un equipo de colaboradores de apoyo. Una brigada de campo está formada por tres ingenieros topógrafos, un ingeniero en jefe encargado de la planeación, organización y supervisión de los trabajos de campo, un ingeniero encargado de la estación total y un ingeniero encargado de los trabajos de nivelación. El grupo auxiliar está formado por cuatro ayudantes de ingeniero o topógrafos prácticos y dos auxiliares que son choferes y ejecutan labores diversas de apoyo.

El equipo de trabajo está constituido básicamente por dos camionetas, una estación total con medidor de distancias electrónico, libreta electrónica y dos prismas, un nivel electrónico con estadal electrónico, cintas, trompos, estacas y equipo básico de topografía y campamento.

### **TOPONIMIA**

Toponimia es el estudio del origen y significación de los nombres propios del lugar, consiste en registrar los nombres de los predios, ranchos, parcelas, ejidos, comunidades, etc. Por los que va pasando el eje del trazo del proyecto definitivo.

En el plano de la planta del trazo del eje del proyecto, se debe registrar toda esta información. El topógrafo debe auxiliarse con la planta restituida del vuelo bajo, misma que le sirve de referencia para implantar en campo el trazo definitivo; en esa planta ya vienen registrados todos los linderos de los terrenos, así como caminos y veredas regionales que fueron tomados de las fotografías aéreas. Ahora, ya en campo, es necesario primero verificar todos esos cruces con linderos de terrenos y

referenciarlos con precisión a la topografía de campo, considerando que no solo interesa el punto del cruce con el eje del trazo, sino también los cruces de esos linderos con las líneas del derecho de vía.

Conocida la ubicación de los predios, es necesario conocer también el nombre regional y el nombre del dueño. En caso de terrenos comunitarios, el nombre del ejido o de la comunidad. También se recaba el uso de suelo que se está dando al predio, es decir, de cultivo, pastoreo, potrero, zona virgen, etc. Toda esta información debe presentarse en el plano de la planta del trazo.

En todos los caminos o veredas que cruce el trazo, o que pasen cerca del trazo de manera que aparezcan en la zona del plano de planta, deberá recabarse el dato del lugar de destino hacia cada uno de los lados del camino o vereda. Naturalmente, se consignará también el nombre de todos los pueblos o rancherías cercanos al trazo y que aparezcan en la planta. Es importante también el nombre del municipio al que pertenece el terreno por el que se desarrolla el trazo. Toda esta información debe presentarse en la planta del trazo.

Este trabajo de toponimia, se realiza como parte de la topografía de implantación del trazo definitivo. Básicamente el topógrafo en jefe de la brigada, el trazador, es el que debe consignar la ubicación por coordenadas de cada uno de los puntos de los linderos; sin embargo, es necesario que cuente con un auxiliar de ingeniero encargado exclusivamente del tema, es decir, en primer lugar señalándole al topógrafo los puntos de los linderos que debe ubicar, y por otra parte, recabando toda la información acerca de los nombres de predios, propietarios, uso de suelo, etc.

La toponimia es parte de los trabajos de topografía de implantación del trazo definitivo, y para cuestión de tiempo de ejecución debe considerarse el mismo de la topografía. Solo hay que considerar en el personal de la brigada de topografía a un auxiliar adicional encargado del tema de la toponimia.

## **TOPOGRAFÍA PARA OBRAS DE DRENAJE**

Imposible diseñar las obras de drenaje menor si no se tiene la topografía precisa del sitio. Son muchos los casos de fracasos en la ubicación de las alcantarillas, ya sean losas, bóvedas o tubos, con resultado de que el agua erosiona el terraplén, daña el pavimento, se encharca o almacena aguas arriba de la carretera y hasta provoca fallas del terraplén al saturarlo indebidamente. Este tipo de situaciones ocurre cuando la obra de drenaje se proyecta y ubica atendiendo a las indicaciones de una topografía imprecisa. Recuérdese que hasta esta etapa del estudio se cuenta ya con una topografía restituida de los vuelos bajos; sin embargo esta topografía suele ser imprecisa para la ubicación de las obras de drenaje.

Conociendo la topografía del sitio, el proyectista de las obras de drenaje (drenajista), tratará de ubicar las obras siguiendo exactamente el cauce natural de la corriente. Muchas veces, en caso de terraplenes muy altos, laderas muy inclinadas y cañadas profundas, no es posible seguir el cauce, y la topografía será una herramienta indispensable para estudiar la mejor ubicación de la obra.

Por otra parte, el drenajista tiene que elaborar el “funcionamiento del drenaje”, que es el proyecto de todas las obras adicionales a la alcantarilla, que son necesarias para el buen funcionamiento de todo el sistema. Estas obras adicionales son canales de encauzamiento hacia la

obra que pueden ubicarse según se necesite, del lado de la entrada y/o del de la salida; descargas de cunetas y/o contracunetas; solución del drenaje mediante canales en las áreas del derecho de vía entre dos obras de drenaje sucesivas en un mismo terraplén (Caso de terraplenes largos en zonas planas o de lomerío suave); es obvio que sin una topografía precisa no es posible diseñar estas obras adicionales que constituyen el funcionamiento del drenaje.

Se procede entonces a efectuar el levantamiento topográfico de las obras de drenaje menor. Para hacerlo, lo primero que se necesita es ubicar con precisión el punto de cruce del eje del trazo, con el cauce de la corriente. El topógrafo tiene que apoyarse en el trazo topográfico del proyecto definitivo que ya fue implantado en campo. Recuérdese que en este trazo, los puntos implantados con coordenadas son los característicos de las curvas, y algunos puntos sobre tangente si las tangentes son largas. Los puntos a cada veinte metros, ubicados para relleno de la topografía no tienen precisión para apoyar una nueva topografía.

El topógrafo tiene que rehacer el trazo en la zona del cruce partiendo de los puntos característicos más cercanos, cuyas coordenadas son conocidas y que están debidamente referenciados. Apoyado en esos puntos, rehace el trazo y determina el cruce del trazo con el cauce de la corriente, ubicando un nuevo punto en el cruce con medidas precisas y con sus coordenadas, para lo cual, primero ubica el cruce y enseguida corre una nivelación precisa a partir del banco de nivel más cercano.

Con apoyo en el punto del cruce y el trazo recién reubicado, se traza una poligonal siguiendo el centro del cauce tanto aguas arriba como aguas abajo. A través de esta poligonal, previamente nivelada, se levantan

secciones transversales para cubrir con topografía detallada toda el área necesaria para diseñar la obra y su funcionamiento de drenaje. La longitud de la poligonal sobre el centro del cauce y la de sus secciones transversales es muy variable dependiendo del tipo de terreno y de las dificultades particulares del drenaje en esa obra; por ello es necesario que esta topografía la realice el mismo drenajista encargado del proyecto de drenaje, quien al revisar las condiciones topográficas en campo, y teniendo ya una idea de la magnitud del terraplén, de la cuenca por drenar, y analizando también las huellas de corrientes de agua históricas en el sitio y en sitios característicos cercanos, tendrá una idea del área que necesitará estudiar para diseñar la obra y elaborar el funcionamiento de drenaje.

El resultado de los trabajos de topografía para el diseño de las obras de drenaje menor, es un plano con la planta topográfica del sitio, con curvas de nivel a cada 0.5 m, así como otro plano con el perfil del eje del cauce.

### **TOPOGRAFÍA DE PASOS A DESNIVEL**

Los pasos a desnivel pueden ser: Paso Inferior Vehicular (PIV), Paso Superior Vehicular (PSV), Paso Inferior Peatonal y de Ganado (PIPG) y Paso Superior Peatonal y de Ganado (PSPG). Hay casos en los que se requiera un paso para peatones que no necesariamente sea paso para ganado. Todos los pasos requieren el diseño de un puente, es decir, de una estructura, que generalmente es de concreto, aunque en algunos casos puede ser de acero, principalmente en caso de Pasos Inferiores Peatonales.

El diseño de cualquier puente requiere del conocimiento preciso del sitio en el que se va a construir, lo que se logra con el levantamiento topográfico del sitio. Si se diseña con una topografía que no sea precisa,

como pudiera ser la que ya se tiene de la restitución de los vuelos bajos, se corre el riesgo de que el puente no se ubique en el mejor sitio, o que se diseñe una estructura cuya cimentación no esté apoyada en el estrato de roca o suelo resistente, y que no tenga la profundidad adecuada.

El procedimiento para hacer el levantamiento topográfico para pasos a desnivel es similar al que se aplica para las obras de drenaje, considerando que en lugar del eje del cauce de la corriente, en este caso se tiene el eje del camino secundario.

La topografía se inicia rehaciendo el eje del trazo de la carretera principal apoyándose en los puntos característicos de las curvas o en puntos sobre tangente, que deben encontrarse en el campo debido a que fueron referenciados adecuadamente, y de los cuales se conocen las coordenadas. Después de que se ha recuperado el trazo, se ubica con precisión el punto del cruce con el eje del camino secundario, se busca el banco de nivel más cercano y se corre la nivelación hasta el punto de cruce recién ubicado.

Se traza una nueva poligonal por el eje del camino secundario hasta una distancia de por lo menos cien metros a cada lado del eje del camino principal, con estacas a cada veinte metros y se corre la nivelación por esta nueva poligonal. Se levantan secciones transversales de topografía para poder configurar adecuadamente toda el área de influencia del paso a desnivel.

Cuando se implantó en campo el trazo del proyecto definitivo, se marcaron todos los puntos de cruce con un camino secundario, como se comenta en la descripción correspondiente; sin embargo, el sitio de cruce de ambos trazos no es la ubicación definitiva de un paso a desnivel, ya que esta ubicación debe proyectarse de acuerdo con la



topografía del sitio, el alineamiento horizontal y vertical de ambas carreteras y las necesidades de los usuarios del camino secundario, por lo tanto, la primer tarea que se tiene cuando se va a diseñar un paso a desnivel es la de ubicar el cruce en el sitio más conveniente tanto para la carretera principal, como para los usuarios de la carretera secundaria.

Al igual que en el caso de la topografía para las obras de drenaje, para los pasos a desnivel se requiere preparar también una planta con la topografía de detalle del sitio y un perfil del eje del camino secundario, tomando en cuenta que la ubicación exacta del cruce puede variar y que posiblemente se requiera modificar el trazo de la carretera secundaria.

### **ESTUDIO DE DRENAJE MENOR**

Antes de elaborar el diseño de la estructura de una obra de drenaje menor (Alcantarilla), es necesario hacer un estudio de campo para ubicar la obra en el sitio adecuado, dimensionar la cuenca que se necesita drenar, clasificar el material de la cuenca y, en un estudio de gabinete complementario, determinar el gasto máximo que pasará por la alcantarilla en el período de diseño así como el área hidráulica mínima necesaria en la obra.

Es muy conveniente que el ingeniero drenajista haga este estudio de campo al mismo tiempo que se elabora el estudio topográfico para las obras de drenaje menor que ya fue descrito. El ingeniero drenajista que es un ingeniero hidrólogo, o con estudios en el ramo, puede supervisar a un ingeniero topógrafo e indicarle la magnitud del área necesaria que se requiere configurar con la topografía de detalle.

Antes de salir al campo, el drenajista debe reunir toda la información que ya se tiene acerca del tema. Recordemos que para llegar a esta etapa

del estudio definitivo, ya se pasó por la elección de ruta y la elaboración de un anteproyecto sobre la ruta elegida como definitiva. Para la elección de ruta jugó un papel importante el estudio del drenaje, así como para la elaboración del ante presupuesto derivado del anteproyecto.

Se deben recabar las fotos aéreas del tramo y los mosaicos a manera de larguillos, correspondientes a todos los vuelos, tanto los altos a escala grande para la etapa de elección de ruta, como los bajos a escala chica correspondientes a la ruta elegida con los que se hizo el anteproyecto y el trazo del proyecto definitivo.

También se tienen que recabar todos los informes hidrológicos y de drenaje que se realizaron en las diferentes etapas del estudio y los estudios de delimitación de cuencas y clasificación de materiales en las cuencas. Es de consulta obligada el libro Isoyetas de Intensidad-Duración-Período de Retorno de la DGST. Con toda esta información, el Drenajista debe tener la delimitación de la cuenca por drenar para cada obra de drenaje señalada en el proyecto definitivo, revisando si ya se tienen provenientes del proyecto definitivo, o completándolas si hacen falta.

El trabajo del drenajista en campo, se divide en tres temas básicos: Topografía, Cuenca y Funcionamiento de Drenaje.

### **Topografía**

Puesto que el drenajista conoce el proyecto definitivo, y cuenta con los planos de trabajo de este proyecto, que son planos de planta y perfil en tramos de cinco kilómetros, tiene una idea básica de cómo se debe acomodar la obra de drenaje en función del tipo de terreno y de la altura

del terraplén, y con ello sabe también hasta donde debe abarcar la configuración topográfica del terreno para estudiar la ubicación de la obra y su funcionamiento de drenaje.

También tendrá una idea clara de cómo funcionará el drenaje en el sitio, lo cual dependerá mucho de la topografía y de la rasante del proyecto definitivo. Así que a partir de estos conocimientos y de la inspección detallada de campo, el drenajista dará instrucciones al topógrafo acerca de las dimensiones del área necesaria que deberá configurarse a base de las secciones transversales de topografía que se levantarán a partir del trazo del eje del cauce.

### **Cuenca**

Después de dar instrucciones al topógrafo, el drenajista se abocará al estudio de la cuenca. A partir de las fotografías aéreas debe ya contar con la delimitación de las cuencas, de manera que en este recorrido de inspección, solo debe verificar, hasta donde sea posible, la veracidad de dicha delimitación, y sobre todo, clasificar el tipo de terreno que constituye dicha cuenca, que bien pudieran ser varias zonas con diferentes tipos de terreno. Es necesario conocer qué tan rápido se desplaza el agua de lluvia de toda la cuenca hacia la alcantarilla, y también qué posibilidades hay de que parte del agua se infiltre en lugar de escurrir; el drenajista debe observar y tomar nota del tipo de terreno de la cuenca, o si está dividida en varios tipos de terreno. El terreno puede ser montañoso, lomerío fuerte, lomerío suave, ondulado, semiplano y plano. En relación a las posibilidades de infiltración, el suelo puede ser, rocoso forestado, rocoso árido, deforestado para cultivo, potreros, etc.

## **Funcionamiento del Drenaje**

Debe inspeccionar el drenajista el comportamiento de la corriente en la zona del cruce con el trazo del proyecto definitivo. Ver si la tendencia es a erosionar o a depositar y sobre todo tomar nota de todas las corrientes menores afluentes de la principal y que pudieran ser tapadas por el terraplén y que deberán ser encauzadas debidamente para evitar infiltraciones y erosiones en el terraplén. También deberá darse una idea de cómo se debe recoger el agua de las cunetas en los cortes vecinos y encauzarse hacia la alcantarilla.

El resultado del estudio de campo para las obras de drenaje menor, es un informe en el que para cada una de las obras, se adjunte una copia de la foto o fotos aéreas con el dibujo de la cuenca por drenar, y acompañada con la información tabulada de los datos acerca del terreno en la cuenca, sus dimensiones, su clasificación y el tipo de terreno en la cuenca. También se debe adjuntar un informe de campo del funcionamiento, acompañado de un croquis que presente la problemática detectada y su solución.

## **Cimentación de la Obra de Drenaje**

En las obras de drenaje menor, conocidas como alcantarillas, cuya diferencia con los puentes radica en la longitud de su claro (menor de 6 m), el drenajista deberá observar las condiciones del terreno donde será desplantada la obra mediante su inspección visual a través de Pozos a Cielo Abierto y definir el tipo de cimentación más conveniente, en base a proyectos tipo. Debido a que las alcantarillas no transmiten grandes esfuerzos al terreno, generalmente son suficientes capacidades de carga de entre 1 y 3 kg/cm<sup>2</sup>.

## **ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA TERRACERÍAS**

El estudio geotécnico para el proyecto de terracerías, tiene como finalidad conocer todas las características de los materiales sobre los que se van a excavar cortes, o bien se van a desplantar terraplenes; características que darán a los proyectistas los parámetros de cálculo para elaborar los diagramas de masas y movimiento de tierras. El estudio geotécnico determina el perfil de suelos del eje del trazo, proporcionando toda la información necesaria para diseñar cortes y terraplenes.

El estudio geotécnico se basa, en primer lugar, en un estudio de campo de la geología de superficie. Se llama geología de superficie a la que se aplica al conocimiento con el mayor detalle posible de la capa superficial de la corteza terrestre; a la pequeña capa de un espesor del orden de cincuenta metros, sobre la cual se va a construir la carretera, involucrando a los materiales de esa capa al excavar cortes, construir terraplenes y obtener materiales de construcción mediante la explotación y excavación de bancos de préstamo de materiales para terracerías y para pavimento.

El estudio de geología superficial lo lleva a cabo un ingeniero geotecnista con un ayudante y equipo de transporte y campamento. Provisto de cartas de INEGI, de todos los estudios geológicos previos que fueron hechos en las etapas de elección de ruta y de proyecto definitivo, con todas las fotografías aéreas que fueron usadas en la fotointerpretación geológica y que cuentan con la delimitación de las unidades geológicas así como con el dibujo de los patrones de drenaje, y que cuentan también con la delimitación de los usos de suelo; provisto como se decía, de todo este valioso material que le simplificará notablemente el trabajo, se encamina a un recorrido sobre la línea del

trazo definitivo, con la finalidad de describir con el mayor detalle posible, los materiales que pudieran encontrarse en los diferentes tramos de la carretera sobre la zona del derecho de vía y hasta la profundidad involucrada por los cortes de la carretera.

Deberá prever si pudieran encontrarse lugares con flujos de agua considerables, con materiales de baja resistencia o cualquier característica especial a tomar en cuenta. Fuera del derecho de vía, deberá explorar bancos de materiales ya existentes, o zonas potenciales para ubicar bancos de materiales para terracerías y pavimentos. Este trabajo lo realiza el ingeniero geotecnista basado exclusivamente en el recorrido de la línea de trazo y la observación y análisis de afloramientos, así como de la geomorfología de la zona.

El resultado de este estudio es un informe en el que se describan los materiales que probablemente se encontrarán en los diferentes tramos de la carretera, su comportamiento esperado en cuanto a estabilidad de taludes de los cortes, su calidad para formar terraplenes y la posibilidad de situaciones especiales para estudiar con más detalle.

Con la información recabada, así como con el estudio geológico de detalle ya elaborado, se delimitarán las unidades geológicas existentes, donde, se establecerá su clasificación, su edad, grado de intemperización, fracturamiento e inclinación de estratos o echado. Se tratará de ubicar la presencia de fallas o accidentes geológicos que indiquen la posibilidad de problemas para el camino, y se ubicarán también las zonas donde se tenga la posibilidad de situar los bancos de material para las capas de subrasante y subyacente, así como los bancos para pavimento.

Enseguida, el ingeniero encargado del estudio geotécnico de campo, con base en el informe de geología de superficie, programará una serie de sondeos mediante pozos a cielo abierto, con la finalidad de recabar muestras de los materiales sobre el trazo y elaborar un perfil de suelos con las características de todos los materiales encontrados. El ingeniero iniciará su trabajo de campo haciendo los sondeos necesarios, auxiliado por un ayudante, equipo de transporte, y personal de apoyo para la elaboración de pozos a cielo abierto y recabar muestras para enviar al laboratorio.

Los pozos a cielo abierto permitirán tomar muestras, de cada estrato encontrado, de tamaño suficiente para elaborar todos los ensayos necesarios para clasificar los materiales que se obtendrán; en algunos lugares, donde el material pudiera servir para las capas superiores de la terracería, se necesitan muestras con tamaño del orden de 50 kg para poder efectuar los ensayos requeridos.

Los pozos a cielo abierto servirán además para confirmar afloramientos y complementar la información obtenida de la morfología de los afloramientos, de cortes naturales o excavados cercanos a la línea de trazo. Con esa información y los resultados de los ensayos de laboratorio se configura el perfil de suelos.

Se procede enseguida a la elaboración de los sondeos a cielo abierto prolongados si es posible con posteadora o herramienta similar, ubicándolos sobre la línea de trazo en las zonas en que se proyecten cortes de importancia, cambios evidentes en la estratigrafía de la zona, y en general, ubicándolos regularmente a lo largo del trazo. Se tomarán muestras de los materiales obtenidos de los sondeos, para efectuarles ensayos de laboratorio que servirán para determinar su calidad y

resistencia para soportar taludes en cortes, y para su posible uso en los terraplenes de la carretera.

En los sondeos donde se encuentre suelo, se elaborarán ensayos de peso volumétrico en el lugar, para cada uno de los estratos y se tomarán muestras para ensayos de peso volumétrico máximo y así determinar los coeficientes de variación volumétrica.

Es muy importante efectuar una inspección detallada en campo por un especialista en geotecnia, con la finalidad de integrar la información recabada en los sondeos, afloramientos, cortes naturales, etc., con la del estudio geológico, fotos aéreas, etc., y elaborar las tablas y larguillo del perfil de suelos. Si no se lleva a cabo esta inspección, se corre el riesgo de no aprovechar la información de los sondeos al malinterpretar la estratigrafía.

En campo, con los resultados y la clasificación manual de los materiales, se elaborarán las tablas de curva masa en forma preliminar, con los datos básicos como tratamiento probable, clasificación para presupuesto y utilización del material en el terraplén. Con ello, se podrá conocer si hay necesidad de complementar el estudio sobre el eje del trazo.

Durante el recorrido de la línea, se complementarán y afinarán los datos del estudio geológico y se tomará nota también de los posibles lugares donde se ubicarán las obras de drenaje menor; en dichos lugares, se observará el material que aflora en el cauce, el tipo de arrastre y, donde se juzgue necesario se hará uno o más sondeos a cielo abierto para emitir las recomendaciones de cimentación.

La localización y muestreo de los bancos de material para capa subrasante, capa subyacente y cuerpo de terraplén, es la actividad que



sigue. Naturalmente, para esta etapa ya se tiene toda la información recabada en el estudio geológico y durante la realización de los sondeos, así como una buena idea de los volúmenes requeridos. Los sondeos, el muestreo y el levantamiento del croquis de cada banco se harán de acuerdo a lo indicado en las Normas SCT.

En casos especiales, que pudieran ser zonas de pantanos o suelos blandos detectados por la exploración geotécnica, o bien en cortes de altura grande en zonas de roca, se programan sondeos profundos con máquina perforadora. En suelos blandos, de los sondeos profundos se pueden obtener muestras inalteradas, a las que se les pueden hacer ensayos de laboratorio muy especializados (triaxiales y de consolidación) mediante los cuales se puede conocer la resistencia y deformabilidad de los mantos profundos, y analizar si el suelo resiste el peso del terraplén que se pretende construir, así como la magnitud de los asentamientos que pudieran presentarse.

En el caso de sondeos profundos en roca, necesarios en lugares donde se proyectan cortes de gran altura, con los sondeos profundos solo se obtienen muestras alteradas de la roca, y si la roca está fracturada y alterada se obtiene muy poca muestra o ninguna. Se debe considerar que la información de sondeos profundos en roca es únicamente cualitativa, clasificándose la roca de acuerdo a la cantidad de muestra obtenida en una escala de muy buena a mala. Esta clasificación debe ser juzgada por un ingeniero geotecnista, ya que parte muy importante de las decisiones que se tomen respecto a la resistencia de la roca, dependen de su clasificación geológica y geotécnica, la cual debe hacerse en función de un estudio completo de geología de superficie como se describió en párrafos anteriores.

Hay casos de rocas aparentemente muy suaves en las que no se obtiene muestra de las perforaciones de sondeos profundos, y que por ello deben clasificarse como rocas muy malas, pero que desde el punto de vista de vías terrestres pudieran tener resistencias adecuadas para resistir taludes poco inclinados sin problemas de inestabilidad, como es el caso de las rocas llamadas tobas de la formación Tarango en las cercanías de la ciudad de Toluca.

El ingeniero encargado del proyecto geométrico, estará esperando los resultados del estudio geotécnico para poder elaborar su proyecto, ya que del estudio geotécnico se definirán las inclinaciones de los taludes con los que se excavarán los cortes y con ello se determinará el volumen de material que deberá ser excavado. También el estudio geotécnico analizará la calidad de los materiales obtenidos de la excavación de los cortes, y determinará hacia donde deberá ser transportado ese material, ya sea para formar parte de los terraplenes o para desperdicio.

En caso de que los materiales que se obtengan de la excavación de los cortes no tengan calidad para formar terraplenes y deban desperdiciarse, el estudio geotécnico le dirá al proyectista donde debe obtener el material adecuado para formar esos terraplenes (bancos de materiales para terracerías).

Mediante el estudio geotécnico se decidirá si se requiere subdrenaje, y si se requiere alguna protección o estabilización para taludes. En las zonas donde habrá terraplenes, debe determinarse cuidadosamente el tipo y resistencia de los materiales que constituyen el terreno natural, con la finalidad de conocer si resisten el peso del terraplén, si son de esperarse asentamientos, si se requiere despalme, si el nivel freático obliga a un

procedimiento especial de construcción y, en general, estudiar y recomendar lo procedente para que los terraplenes sean estables.

La recomendación respecto a la inclinación que debe darse a los taludes de los cortes grandes es un asunto de mayor importancia en el proyecto, así como de la mayor complejidad técnica. En la práctica cotidiana, solo en casos excepcionales pueden hacerse estudios analíticos de estabilidad de acuerdo con las prácticas de mecánica de suelos y de mecánica de rocas, debido a que los materiales de los cortes de laderas en montaña donde se ubican normalmente los trazos carreteros, distan mucho de ser homogéneos e isotrópicos, que es condición primaria para poder hacer un cálculo analítico.

La resistencia de las rocas está definida por sus planos de fracturamiento. La resistencia en esos planos y la dirección que tienen respecto a la dirección del talud, es determinante en cuanto a la estabilidad del corte; sin embargo, la única manera de saber la resistencia de los planos es haciendo suposiciones basadas en experiencias recabadas por investigadores reconocidos, y en la experiencia del propio geotecnista encargado del estudio. La dirección que tienen los planos respecto a la inclinación del talud, puede medirse en campo solo en la superficie por donde pasa el trazo y en afloramientos o cortes de construcciones que puedan encontrarse cercanos al trazo; de los sondeos profundos con máquina perforadora no es posible obtener información confiable respecto a la dirección de los planos de fracturamiento.

Además, los trazos de carretera van cambiando de dirección constantemente, y los cortes necesarios para la carretera son de longitudes muy grandes, longitudes suficientes para que la dirección de las fracturas varíe mucho longitudinalmente, variación que se incrementa

con las irregularidades propias de las rocas, que en distancias cortas de las laderas por donde pasa la carretera, normalmente, presentan plegamientos irregulares, fallas, estratos o pseudoestratos inesperados, rellenos de material suelto, de baja resistencia o inestable, etc.

Para tratar de superar de la mejor manera posible todas estas dificultades, el ingeniero geotecnista recurre a zonificar, identificando macizos rocosos que para cada zona establecida se les pueda asignar unas condiciones y características promedio. Considerando la calidad de las rocas de cada zona, que se obtiene del promedio de lo encontrado en cada zona a través de los sondeos, de la geología de superficie, de la inspección geotécnica detallada sobre la línea de trazo y en general de todos los estudios geológicos y geotécnicos previos, se establecen criterios generales de análisis estructural aplicando los métodos de análisis dictados por la mecánica de rocas para cada uno de los macizos rocosos que integran las diferentes zonas, y se determinan los taludes que resisten los cortes de diferentes alturas que se proyecten en esas zonas.

El estudio geotécnico dictaminará el talud recomendable para cada uno de los cortes que presente el proyecto definitivo. Hay algunas rocas que a pesar de ser estables, se intemperizan y erosionan con facilidad en las superficies de los taludes de los cortes recién excavados, y pueden presentar problemas de granedo de material superficial suelto de la superficie del talud que puede caer sobre las cunetas y aún sobre el acotamiento o sobre la carretera; el estudio geotécnico debe identificar la presencia de este tipo de materiales y recomendar las medidas de protección de taludes que se consideren pertinentes para su solución.

Los trabajos de campo requieren de la localización de préstamos de banco de materiales para la construcción de terracerías. Para la parte

superior de las terracerías, tanto en terraplenes como en cortes, se necesita material que cumpla con las características indicadas en las Normas de la SCT , ya que esa capa superior constituye el apoyo o cimentación del pavimento y, en la medida de que sea de calidad superior, el pavimento tendrá un soporte y un comportamiento también superior.

La capa superior de las terracerías constituye la cimentación del pavimento se conoce como capa subrasante y, solo en casos excepcionales, el material que se obtiene de los cortes tiene la calidad y la homogeneidad necesarias; se requiere entonces de la localización de lugares donde se pueda obtener material de buena calidad, homogéneo y en volumen suficiente. Parte importante del estudio geotécnico es la localización de los bancos para capa subrasante, e incluso para terraplenes, ya que no siempre el material que se obtiene de los cortes es suficiente para la construcción de los terraplenes.

Para la localización de los bancos, es necesario tener conocimientos acerca de la geología de superficie del sitio, ya que esto permite deducir en qué lugares es posible encontrar los materiales buscados. Estos sitios pueden ser desde depósitos antiguos de río, rocas suaves como la toba o rocas muy intemperizadas; evitando las planicies formadas por depósitos de aluvión ya que generalmente son materiales arcillosos, y la arcilla es material de mal comportamiento para carreteras.

La localización y muestreo de los bancos de material para capa subrasante, capa subyacente y cuerpo de terraplén, es la actividad que sigue. Naturalmente, para esta etapa ya se tiene toda la información recabada en el estudio geológico y durante la realización de los sondeos, así como una buena idea de los volúmenes requeridos. Los

sondeos, el muestreo y el levantamiento del croquis de cada banco se harán de acuerdo a lo indicado en las Normas SCT.

Terminado el estudio de campo, se elaborará el programa de ensayos de laboratorio para las muestras obtenidas y se llevarán al laboratorio para ser ensayadas. Dependiendo de la longitud del tramo, del programa y de las fechas de terminación de los trabajos, los ensayos de laboratorio se revisarán conforme se vayan obteniendo.

Es necesario entonces, localizar, sondear y estudiar, bancos de materiales para capa subrasante, capa subyacente y cuerpo de terraplén, así como estudiar la capacidad de carga para las obras de drenaje menor, determinar las obras complementarias necesarias y elaborar los procedimientos de construcción.

Al término de los estudios de campo, se tiene una cantidad importante de muestras de material recabadas en el campo para llevar al laboratorio y hacer los ensayos correspondientes. Desde el momento de la obtención de la muestra en campo se programan las pruebas que se requieren de acuerdo al sitio donde se haya obtenido la muestra y al destino que se pretenda dar a ese material. En campo, el ingeniero debe hacer una clasificación manual previa, que le servirá para su primer reporte y clasificación, así como para un programa de ensayos de laboratorio.

La siguiente etapa corresponde al laboratorio. Se analizarán las muestras obtenidas en campo mediante los ensayos requeridos en las Normas de Calidad de la SCT, con lo cual se determinará, de acuerdo con la calidad de los materiales, el uso que pueda darse al material en las diferentes capas que constituyen las terracerías. El material de mejor calidad debe colocarse para que sirva de cimentación a la estructura del

pavimento, esto es en la parte superior de los terraplenes y en la nivelación de las superficies obtenidas en las excavaciones de los cortes. Hacia la parte inferior de los terraplenes se coloca el material con menor calidad, siendo ésta la necesaria para soportar el peso propio del terraplén sin permitir deformaciones inadecuadas. Las Normas SCT señalan con detalle los requisitos de calidad para las diferentes capas de las terracerías, que son: la capa subrasante, la capa subyacente o de transición y el cuerpo del terraplén. En las mismas normas se describen con detalle los ensayos de laboratorio que deben hacerse a los materiales y los valores que deben cumplir para ser aptos a colocarse en determinada capa.

Para manejar toda la información recabada, es necesario obtener un perfil estratigráfico que se integra con la información de los sondeos, con los resultados de laboratorio, con la información del estudio geológico, así como de la inspección detallada. Dicho perfil estratigráfico, permitirá describir y clasificar cada uno de los materiales encontrados, determinando su tratamiento probable, sus coeficientes de variación volumétrica, su clasificación para presupuesto y se presentará con las observaciones y comentarios respecto a su calidad y ubicación respecto al trazo.

Dependiendo de la longitud del tramo, y del programa y fechas de terminación de los trabajos, los ensayos de laboratorio conforme se vayan obteniendo se irán aplicando para elaborar los perfiles de suelos y definir los bancos de materiales.

El trabajo de gabinete consiste en el análisis e interpretación de los resultados de laboratorio y de la información recabada en el campo, con lo cual se elaborarán las tablas con los datos para cálculo de la curva

masa, bancos de materiales, procedimientos de construcción y en general el informe Geotécnico general.

## **ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA PAVIMENTOS**

El estudio geotécnico de campo para el diseño del pavimento se hace al mismo tiempo que se hace el estudio de campo correspondiente al proyecto de terracerías. Está también a cargo del ingeniero geotecnista del proyecto de terracerías; en la práctica forma parte del estudio geotécnico de campo.

La información geotécnica que se requiere para el diseño del pavimento está muy relacionada con la que se obtiene para el proyecto de terracerías y, en términos generales, difiere en que además de la información geotécnica para terracerías, se necesita la localización y caracterización de los bancos de materiales para la construcción del pavimento.

Para el diseño de la estructura del pavimento, se necesita básicamente la ubicación y características de los materiales disponibles para la construcción de la capa subrasante, información que ya se tiene del estudio geotécnico. En particular, se necesitan los ensayos de laboratorio efectuados a los bancos de capa subrasante para determinar si cumplen con los requisitos de las normas SCT y, además, nuevos ensayos de laboratorio programados para el estudio del material de esos bancos desde el punto de vista del diseño del pavimento.

Estos nuevos ensayos se realizan para estudiar la variación del módulo elástico del material de la capa subrasante, con la variación de la humedad de compactación, con la variación de la masa volumétrica



seca, con el grado de saturación y con los contenidos de agua esperados durante el período de trabajo o vida útil del pavimento.

Se necesita para el diseño del pavimento, información acerca de las condiciones de humedad y de intensidad de lluvia de las diferentes regiones o zonas por las que pase el proyecto. Es muy necesario saber, para tomar en cuenta en el diseño del pavimento, cómo se ha resuelto el drenaje general del camino y, sobre todo, si ha sido necesario considerar algún tipo de subdrenaje.

Para decidir sobre el tipo de pavimento que se va a diseñar, es necesario saber el tipo de materiales que se dispone para la construcción de las diferentes capas del pavimento; de acuerdo con los materiales disponibles, la estructuración puede ser con base asfáltica o con base hidráulica; puede ser con sub base, o sin sub base; inclusive puede considerarse la construcción de pavimento de concreto hidráulico. La decisión de la estructuración del pavimento se comentará en la sección correspondiente al diseño del pavimento.

Los bancos de materiales para pavimento pueden estar ubicados donde se encuentre roca sana, o bien donde se encuentren depósitos de grava-arena de río. En todos los casos de material para pavimento se requiere instalar una planta de trituración y cribado. En caso de que se encuentre roca para pavimento, deberá buscarse que sea una roca con dureza suficiente para cumplir con los ensayos de laboratorio de Desgaste de Los Ángeles y de Intemperismo Acelerado.

Si las rocas cumplen con los requisitos de estos ensayos, pasarían a una segunda etapa de pruebas que se harían después de triturar y cribar las muestras de roca. En campo, se tratará de aprovechar roca proveniente de la excavación de los cortes como primera opción. De no

ser posible se buscarán bancos ya explotados en el pasado y, como última opción, frentes de roca nuevos que deban abrirse especialmente para el nuevo proyecto. Los depósitos de río tiene la ventaja sobre las rocas sanas de que su extracción es más sencilla, solamente debe de asegurarse que los depósitos de río no se encuentren contaminados, en cuyo caso, tiene que recurrirse al lavado del material para eliminar el los residuos nocivos.

Terminado el estudio geotécnico de campo y, entregadas todas las muestras al laboratorio, el estudio geotécnico y el informe final dependen de los resultados de los ensayos de laboratorio, así que mientras el laboratorio hace su trabajo, solo se puede iniciar la elaboración del informe con temas como informe fotográfico, dibujo de los croquis de ubicación de los bancos de materiales, clasificación y descripción de los macizos rocosos, y toda aquella información que no dependa del laboratorio. El laboratorio que se necesita como apoyo de los estudios geotécnicos es un laboratorio de materiales para terracerías y pavimentos.

En esta etapa solo se necesitan los ensayos tradicionales clásicos para terracerías y pavimentos, que aun así, solo los puede realizar un laboratorio especializado con aparatos que puedan medir el Valor Soporte California (CBR), el Equivalente de Arena, el Desgaste Los Ángeles, entre otros, y todos los ensayos índice de mecánica de suelos como son: límites de consistencia y granulometría.

Para mezclas asfálticas, se requiere de equipos para el diseño de mezclas asfálticas. Con estos ensayos se lleva a cabo el cálculo para el diseño estructural del pavimento, en el que se consideran los datos de tránsito que originaron la demanda de la carretera. Posteriormente, cuando se esté planeando la estrategia de construcción del pavimento,

se afinarán los datos acerca de la superficie de rodamiento requerida, y se decidirá el tipo de cemento asfáltico conveniente y podrá diseñarse una mezcla asfáltica con las últimas técnicas disponibles como pudieran ser, para el asfalto, el horno rotacional para película delgada, la vasija de presión para envejecimiento, el aparato de corte dinámico, el viscosímetro rotacional, la viga de flexión, y el aparato de tensión directa; para mezclas asfálticas, el compactador giratorio, el aparato de corte SUPERPAV y la rueda de Hamburgo.

Un laboratorio de materiales que cuente con los aparatos y equipo necesario para realizar estos ensayos para un tramo de carretera, debe designar por lo menos a un ingeniero especialista en geotecnia, un ingeniero en jefe del laboratorio, dos laboratoristas y dos ayudantes de laboratorio.

### **ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA TUNELES**

El estudio geotécnico de campo se emprende con la finalidad de conocer con el mayor detalle posible el material que se encontrará al hacer la excavación del túnel, así como cualquier característica del sitio que pudiera afectar la excavación, como flujos de agua, cavernas, depósitos de material suelto, etc.

Al hablar de ingeniería de túneles, ancestralmente se tiene la experiencia de la actividad minera, sus métodos de excavación y sostenimiento y los registros de accidentes famosos. Después de las minas, fue necesaria la excavación de túneles para ferrocarriles; con el aumento del área necesaria de túnel para ferrocarriles, se aumentó muy notablemente el riesgo de derrumbes y se estableció una nueva técnica de construcción de túneles. Para carreteras se hizo necesaria una área

mucho mayor que la de ferrocarriles, implementándose la especialidad de la construcción de túneles carreteros.

La excavación de un túnel debe avanzar metro a metro, por lo que debe enfrentarse la problemática de posibles derrumbes, inundaciones y sobre todo la necesidad de sostenimiento que significa la colocación de soportes de acero que retengan la presión del terreno que tiende a cerrar el hueco que se ha excavado en el terreno, y proteger por lo pronto a los trabajadores que realizan la excavación y después a los usuarios de la carretera. En consecuencia debería conocerse de antemano mediante los estudios de campo, el tipo de terreno, su resistencia y su deformabilidad en cada metro del terreno por el que se excavará el túnel.

Los estudios geotécnicos de campo están encaminados al conocimiento de las características del terreno, con el mayor detalle posible, para prever lo que se encontrará en la excavación de cada metro de túnel y tener previsto y diseñado el sistema de sostenimiento y protección, que deberá implementarse inmediatamente después de excavar cada metro de túnel.

Los estudios geotécnicos de campo se forman con: sondeos profundos con máquina perforadora, exploración geofísica sísmica y eléctrica, estudio de geología de superficie y de detalle. Todos estos estudios pueden hacerse en campo al mismo tiempo y, desde el punto de vista del diseño estructural, tienen como objetivo identificar unidades de macizos rocosos con características suficientemente homogéneas como para elaborar modelos de computadora y análisis mediante el método de elementos finitos para determinar los esfuerzos que se generarán al hacer la excavación y que deberán ser sostenidos por las estructuras de

marcos metálicos que deberán colocarse inmediatamente después de hacer la excavación.

La primera dificultad que se encuentra para realizar los estudios geotécnicos es el acceso al sitio donde deberá proyectarse el túnel. Donde se requiere un túnel carretero suele ser un lugar montañoso y en ocasiones escarpado donde solo se puede acceder caminando y no se puede transportar una máquina convencional para hacer sondeos. Tampoco es posible pensar en construir un camino de acceso en esta etapa del proyecto. Los sondeos profundos solo pueden hacerse con máquinas portátiles que tienen limitada su profundidad de exploración a unos cincuenta metros, y sobre todo, el diámetro de las muestras obtenidas es pequeño, lo que limita la posibilidad de obtener muestras inalteradas. Se tratará de hacer el mayor número de sondeos posibles llegando siempre más allá de la profundidad a la que se espera que pase el túnel.

El estudio de geología de superficie es de la mayor importancia, pues de sus deducciones e interpretación tanto del tipo de rocas como de su estructura, fracturamiento, plegamientos e historia de su formación, depende todo el resultado del estudio geotécnico. Este estudio, lo deben realizar ingenieros geólogos y geotecnistas.

El trabajo de campo es pesado físicamente, ya que aunque cuenten con todos los estudios geotécnicos y geológicos previos, y las fotos aéreas que se hayan elaborado en la etapa de anteproyecto y etapas anteriores, es necesario que recorran ahora toda la zona por la que se construirá el túnel, identificando y muestreando todos los tipos de roca que se encuentren, midiendo las fracturas y juntas, identificando los grados de intemperismo, los flujos de agua, investigando fallas y fracturas, contactos entre rocas distintas, e investigando acerca de los

movimientos tectónicos que hayan dado origen a ese tipo de formaciones.

Es conveniente que se inicie el primer sondeo en un sitio que se escoja en base a los estudios del anteproyecto, y que al mismo tiempo que se inicia la perforación de ese sondeo, los ingenieros geólogo y geotecnista inicien su trabajo de geología de superficie. Antes de que se termine la perforación del primer sondeo, los ingenieros ya tendrán, en base a los estudios que lleven hasta entonces, la ubicación de todos los sondeos necesarios y en la ubicación precisa para obtener información que confirme o aclare sus deducciones y les detalle profundidades de formaciones rocosas distintas que ellos hayan identificado.

En todos los sondeos profundos deberán recuperarse todas las muestras de roca que se obtengan, colocándolas en orden de recuperación, en cajas adecuadas que se consiguen comercialmente en el medio, en las que se identifica con detalle la profundidad a que fue obtenida cada una de las muestras. Cada muestra se someterá posteriormente a un análisis mediante el cual se medirán porcentajes de recuperación, así como calidad de los fragmentos recuperados, con lo cual se obtendrán índices de clasificación para cada metro de roca perforada. También se harán análisis petrográficos en el laboratorio, y análisis de resistencia mediante ensayos de compresión simple.

En el campo, además de la exploración directa que se hace con los sondeos profundos ya descritos, se hace también una exploración indirecta, o exploración geofísica, midiendo con aparatos especiales desde la superficie, la respuesta del material en toda la profundidad explorada a estímulos eléctricos y/o sísmicos, conocidos como exploraciones geosísmica y geoeléctrica.

La exploración geosísmica consiste en medir la velocidad con que se transmiten las ondas sísmicas a través de las diferentes rocas o diferentes materiales que se encuentren bajo la superficie hasta la profundidad por la que se excavará el túnel. A lo largo de la línea de trazo se colocan geófonos a cada 5 m hasta una distancia del orden de dos veces la profundidad que se necesita explorar; en uno de los extremos de la línea de geófonos se hace una detonación, de preferencia con dinamita, o mediante un disparo de escopeta, que produce un mini sismo.

Las ondas sísmicas que se refractan en los diferentes materiales encontrados son captadas por los geófonos, registrándose los tiempos de llegada de las ondas refractadas; con esta información se prepara un registro de llegada de ondas o sismograma, cuyo análisis reportará las velocidades de transmisión de las ondas sísmicas de los diferentes materiales encontrados, así como las profundidades a las cuales cambia la velocidad de transmisión.

Como resultado de la exploración geosísmica se tiene un perfil a lo largo de todo el proyecto de túnel, con las diferentes velocidades de transmisión de ondas, así como las profundidades de las fronteras entre las diferentes velocidades.

La exploración geoelectrica consiste en hacer sondeos indirectos puntuales. Un sondeo geoelectrico consiste en la medición desde un punto en la superficie, de la conductividad eléctrica en cada metro de profundidad bajo el punto de referencia hasta la profundidad que se necesite.

En la superficie se coloca en el punto donde se necesita el sondeo, un aparato generador de corriente eléctrica conectado a un electrodo que

se fija al terreno; en forma transversal al eje de la carretera, se colocan electrodos de medición a ambos lados y a distancias del orden de cinco metros hasta una distancia total del orden de la profundidad que se necesita explorar.

Se aplica la corriente eléctrica y se mide la corriente recibida en los electrodos, con los cual se obtiene un registro o electrograma cuyo análisis permite conocer la conductividad eléctrica con la profundidad, en el punto en el que se hizo el sondeo geoelectrico. El resultado de la exploración geoelectrica es el dibujo en un perfil topografico de todos los sondeos efectuados, con el registro de las conductividades eléctricas a diferentes profundidades.

Una vez terminados los trabajos de campo, los ingenieros geólogo y geotecnista que encabezaron la exploración de campo, son los que continúan con el trabajo en gabinete para analizar los resultados de campo y de laboratorio y proporcionar los parámetros de diseño que necesitan los ingenieros estructuristas para elaborar los planos finales del túnel.

El trabajo de gabinete debe iniciarse analizando las muestras de roca obtenidas de cada uno de los sondeos. Mediante técnicas específicas de medición, obtendrán de cada metro de sondeo el porcentaje de recuperación (%R) y el índice de calidad de la roca (RQD). Enseguida deberán dibujar en un perfil topografico los registros de cada sondeo indicando la variación con la profundidad del (%R) y del RQD, además deberán seleccionar también las muestras que se enviarán al laboratorio con el programa del tipo de ensayos necesarios.

Analizarán las discontinuidades, fracturas o fisuras encontradas en las rocas en el campo y de las cuales midieron su abertura, su orientación y



el tipo de relleno que pudieran haber tenido. Estos datos se registran y se consignan en una representación gráfica conocida como estereograma de las familias de diaclasas.

Los ingenieros geofísicos analizarán en gabinete los sismogramas recabados en campo, y/o los registros de conductividad eléctrica de los sondeos eléctricos, y harán los cálculos necesarios para la obtención de los perfiles con la información geofísica. Como resultado de la exploración geofísica, deberán presentar un plano con la planta topográfica en la cual se deben señalar los sitios en los que se hicieron los sondeos geoeléctricos, y/o los tendidos de geófonos para la exploración geosísmica.

En el mismo plano, se presentará un perfil topográfico en el cual se plasmarán los resultados del estudio geofísico indicando las variaciones de la conductividad eléctrica con la profundidad para cada uno de los sondeos. Es costumbre que los ingenieros geofísicos presenten en este plano su interpretación de las condiciones geológicas del sitio del túnel, deducidas de los resultados del estudio geofísico y de sus propias observaciones de campo; sin embargo, la geología definitiva es la obtenida por los ingenieros geólogo y geotecnista, a los que servirán, entre otros muchos datos, los obtenidos de la exploración geofísica.

Además del plano, los ingenieros geofísicos presentarán un informe descriptivo de su trabajo y sobre todo con las observaciones que hayan realizado respecto a los materiales y rocas encontradas.

Ahora, los ingenieros geólogo y geotecnista, después de haber elaborado los análisis de las muestras de roca obtenidas, los análisis de las diaclasas encontradas, después de recibir los resultados de los ensayos de laboratorio y los resultados de la exploración geofísica, procederán a la elaboración del plano geológico del sitio del cruce. Este

plano contiene toda la información geológica recabada en campo, y su elaboración requiere del análisis minucioso que hacen los ingenieros geotecnista y geólogo encargados del estudio.

El plano geológico consta de una planta topográfica en la cual se dibujan las diferentes unidades geológicas encontradas. De un perfil topográfico en el que se dibujan los registros de los sondeos exploratorios con máquina, indicando en forma gráfica los porcentajes de recuperación a cada metro de profundidad y el índice de calidad de la roca también a cada metro de profundidad; en ese perfil topográfico se dibujan las unidades geológicas deducidas de toda la información recabada.

El dibujo en el perfil de las unidades geológicas se hace después de definir el tipo de unidades que fueron detectadas y detalladas desde las observaciones de campo y que se fueron configurando con los resultados de los diferentes estudios, desde el análisis de las muestras de los sondeos con máquina, hasta el análisis de la exploración geofísica y los ensayos de laboratorio. Al tiempo en que se van delimitando las diferentes unidades geológicas, se van definiendo sus características litológicas y físicas que determinan su comportamiento en el túnel.

En el plano geológico, además de la planta y perfil, deben describirse las características de las unidades geológicas encontradas, destacando las características físicas de las rocas, su grado de intemperismo, sus fracturas, plegamientos, etc. También deben incluirse en el plano las características de las diferentes familias de diaclasas encontradas, detallando las familias en cada uno de los portales del túnel, así como las que se espera encontrar a través de la excavación del túnel en toda su longitud.

Un tema de la mayor importancia que debe considerar el estudio geotécnico, y en particular, el plano geológico, es el de las fallas o fracturas en los macizos rocosos que pudieran encontrarse en la zona del túnel o cercanos. De encontrarse, deben consignarse en la planta y en el perfil geológico, indicando sus consecuencias en la conformación de las unidades geológicas y sobre todo, la forma en que se encontrarán las rocas o materiales durante la excavación del túnel al llegar a la zona de falla. Esta descripción se detallará como se hace en la descripción de las unidades geológicas en el mismo plano.

Pero aún falta convertir la información geológica producto de todos estos estudios de campo, de laboratorio y de gabinete, en información específica para uso directo en el diseño de las estructuras de sostenimiento y de revestimiento que constituyen el diseño estructural del túnel. Falta elaborar el plano con el perfil geotécnico.

El plano con el perfil geotécnico es un plano en el que se presenta la planta geológica igual a la del plano geológico, y en el que se presenta el perfil geológico, pero que además de toda la información ya presentada, se le añade una descripción de los características geotécnicas asignadas a cada unidad del macizo rocoso detallando los cambios encontrados de esas características por tramos que se han zonificado con los estudios realizados por el geólogo y el geotecnista.

En este perfil geológico se zonifica por tramos entre cadenamientos, asignando a cada tramo sus características geotécnicas definidas por los parámetros encontrados mediante los estudios ya señalados. Dichos parámetros son:

1. *Litología General*: Descripción geológica de la roca que forma la unidad en la zona.
2. *Estructura General*: Descripción geotécnica del estado físico que presenta la roca, señalando su grado de intemperismo, fracturamiento, así como cualquier dato que ayude a la interpretación del comportamiento físico esperado de la roca.
3. *RQD*: Primer clasificación de la calidad de la roca obtenida directamente de los sondeos efectuados con máquina perforadora.
4. *Calidad RMR*: Parámetro más importante para aplicar al diseño estructural. Define la calidad del macizo rocoso, zonificado como una unidad a la que se le encontró mediante los estudios de campo, de laboratorio y del análisis en gabinete entre esos cadenamientos una calidad promedio representada por esa clasificación y que define los parámetros de resistencia que se usarán en el diseño estructural.
5. *Calidad Q*: Parámetro de calidad igual al anterior RMR, que sirve como respaldo al RMR y que entre ambos definirán la resistencia del macizo rocoso necesaria para el diseño estructural.
6. *Geosísmica*: Resultados del estudio de exploración geosísmica, expresados como velocidad de propagación de las ondas sísmicas en (m/s) a través de la unidad del macizo rocoso.
7. *Geoeléctrica*: Resultados del estudio de exploración geoeléctrica, expresados como conductividad eléctrica del macizo rocoso, expresada en (ohm-m).

8. *Procedimiento Constructivo*: Recomendación en base a la calidad del macizo rocoso.

Además de los datos para el diseño estructural del túnel, se requieren los datos para el diseño de la inclinación de los taludes en los portales del túnel, por lo que es necesario que en el perfil geotécnico se describan como zonas particulares las correspondientes a los cadenamientos en los que se ubicarán los portales, con la misma información proporcionada para la parte interior del túnel.

En el plano deben adjuntarse los estereogramas de las diaclasas o familias de diaclasas, separando las correspondientes a cada uno de los portales a las correspondientes a las distintas zonas del interior del túnel.

## **ESTUDIO TOPOGRÁFICO PARA ENTRONQUES**

Durante el estudio del anteproyecto de la línea de trazo correspondiente al trazo definitivo, se estudiaron los entronques, el cual concluyó con su ubicación definitiva, así como con el diseño de su geometría, de acuerdo con el servicio requerido por las carreteras que se conectan, con la topografía de la zona, con las velocidades de operación y el volumen de tránsito esperado.

El diseño incluye la ubicación y dimensiones de las estructuras necesarias y el anteproyecto con plantas y perfiles de cada una de las ramas del entronque. Debe recordarse que este anteproyecto está basado en los planos de topografía restituida de las fotografías aéreas correspondientes a los vuelos bajos, que permiten escalas de 1:5,000 y 1:2,000.

El siguiente paso en el propósito de obtener el proyecto ejecutivo de los entronques es la proyección en campo del proyecto definitivo. Para ello se requiere una brigada completa de topografía, compuesta por lo menos por un ingeniero topógrafo, un auxiliar nivelador, dos cadeneros, dos estadaleros, dos peones, un auxiliar y un chofer; equipo de transporte con dos vehículos, equipo de topografía con estación total y nivel electrónico, así como equipo de campamento.

El objetivo de esta etapa es la de obtener la topografía real, no deducida, del sitio del entronque con el mayor detalle, que así lo amerita el diseño de las estructuras del entronque. El trazo en campo del proyecto se hace con una metodología similar a la del eje del trazo. Se inicia de la restitución detallada del trazo definitivo en toda la zona del entronque, donde se ubicarán con detalle los puntos de inicio y terminación de las curvas del entronque, y los puntos de cruce con los caminos secundarios señalados para el entronque.

Todos estos puntos se identificarán en forma definitiva con mojoneras y se fijarán las referencias adecuadas para que esos puntos puedan ser encontrados y restituidos posteriormente con la mayor facilidad. Mientras se fijan esos puntos, el nivelador localiza el banco de nivel más cercano correspondiente al trazo definitivo, y traslada los niveles a uno o dos bancos ubicados junto al entronque en sitios que perduren hasta la construcción del entronque.

Una vez que se tienen todos estos puntos característicos, se procede al trazo de todas las ramas del entronque, en su mayoría curvas, señalando los puntos característicos para rehacer el trazo posteriormente y referenciándolos en forma adecuada.

Se colocan estacas a cada 10 m y se nivelan con precisión. A través de las estacas colocadas a cada 10 m se obtienen secciones transversales de topografía con la finalidad de elaborar la planta topográfica general de toda la zona del entronque, por lo cual deberá cuidarse que la longitud de las secciones sea tal que se crucen con las secciones correspondientes a otras ramas del entronque.

En las zonas donde se han proyectado estructuras, ya sean puentes o pasos peatonales, deberá detallarse la topografía, colocando en el eje del trazo estacas a cada 5 m y levantando las secciones transversales de topografía, considerando que se requieren curvas de nivel a cada 0.5 m.

El resultado final de este estudio de topografía para los entronques son los siguientes planos:

1. *Planta General del Entronque*: con los datos topográficos en planta de los caminos principal y secundarios, de todos los puntos característicos del camino principal, de los cruces con los caminos secundarios, actual y del proyecto de entronque y todos los datos de las ramas del entronque, destacando las referencias y los bancos de nivel, con el objetivo que todo el entronque pueda ser replanteado en campo antes de su construcción las veces que sea necesario.
2. *Planta Topográfica General de todo el Entronque*: con curvas de nivel a cada metro.
3. *Perfil del Camino Principal*: en toda la zona del entronque.
4. *Perfiles Topográficos*: de cada una de las ramas del entronque.

5. *Planta Topográfica de Detalle*: de cada una de las zonas donde se requiera una estructura, puente o paso peatonal.

Todos estos planos los debe elaborar la misma brigada de topografía en el campo, ya que cualquier duda o dato faltante puede ser revisado fácilmente.

## **ESTUDIOS TOPOHIDRÁULICOS-HIDROLÓGICOS**

Cuando el proyecto de una carretera tiene que cruzar un río, es necesario proyectar un puente y lo primero que se necesita decidir es de qué tamaño se necesita el puente. Para tal fin es importante tener presente que la magnitud de la corriente de los ríos es muy variable día con día y año con año, y con no poca frecuencia nos enteramos de puentes destruidos por las corrientes en temporadas de lluvias intensas.

Se le debe dar al puente una longitud y una altura suficientes para permitir el paso de la corriente y de sus arrastres como son ramas y árboles. Se debe conocer también la velocidad de la corriente y los materiales que conforman el cauce para con ello calcular y prevenir erosiones en las márgenes y socavación en la cimentación del puente. Cada puente, según su tamaño, tiene una capacidad para dejar pasar cierto caudal, cuando esa capacidad es superada el puente colapsa por insuficiencia hidráulica o por socavación.

Para dimensionar al puente se recomienda que se haga con el caudal máximo que se quiere en el río para un período de retorno definido, generalmente de 100 años, ya que si se decidieran las dimensiones del puente en base a la corriente que se encuentre en el momento de hacer el proyecto, habría una gran probabilidad de que en la próxima



temporada de lluvias o al año siguiente, viniera una corriente de mayor magnitud y la capacidad del puente fuera rebasada.

Se debe entonces dimensionar el puente en base a una creciente que pudiera ocurrir en años venideros. Según estadísticas, si consideramos la corriente máxima que puede ocurrir en un cierto tiempo, con una recurrencia o período de retorno de cinco años, ésta corriente sería menor a una corriente con un período de retorno de 10 años, y a su vez ambas serían menores si el período de retorno fuera de 20 años y así sucesivamente.

El período de retorno de la corriente esperada en años venideros determina las dimensiones del puente y prácticamente su vida útil. En carreteras la SCT considera un período de retorno de 100 años, el cual fue consensado con la CNA. Conviene señalar que la CNA tiene a su cargo la regulación de todas las normas relativas a las corrientes fluviales y tiene una tabla que recomienda que en carreteras se revise el proyecto para un período de retorno de 500 y 1000 años en casos especiales, donde la falla del puente pudiera ocasionar daños de grandes consecuencias. Actualmente es necesario pedir un Permiso de Construcción del Puente a la CNA para cruzar la carretera sobre una corriente o cuerpo de agua.

Entonces, para diseñar cualquier puente carretero, lo primero que hay que saber es cuál es la corriente de diseño, hasta donde llega el nivel en las márgenes y en el centro del cauce, cual es el gasto de la corriente y a qué velocidad pasará bajo la estructura. Para obtener toda esta información es necesario hacer un Estudio Topohidráulico e Hidrológico.

Mediante el Estudio hidrológico se determina la máxima lluvia y su duración, que podrá ocurrir en el período de retorno de 100 años; se

debe medir el área de la cuenca de influencia hasta el puente, los coeficientes de escurrimiento de los diferentes terrenos que se encuentren en la cuenca, y mediante análisis y cálculos hidrológicos determinar el gasto o cantidad de agua que pasaría bajo el área del puente en proyecto para un período de retorno de 100 años.

El Estudio Topohidráulico, como su nombre lo indica, se compone del levantamiento topográfico y del estudio hidráulico. Mediante el levantamiento topográfico se obtienen las características físicas del terreno cercano al puente y del cauce del río. Esta información se plasma en los siguientes planos; planta general, planta detallada, perfil general, perfil detallado y de pendientes y secciones hidráulicas.

La planta general debe cubrir una extensión tal que permita conocer el funcionamiento hidráulico de la corriente en la zona del cruce, y que se puedan proyectar las obras auxiliares y de protección que sean necesarias. En dicho plano deberá estar contenida la siguiente información: Eje del trazo, nivel de aguas máximas de diseño, ubicación de los monumentos de concreto con los apoyos del estudio topográfico, sentido de la corriente, longitud de tangentes, rumbos, datos de curvas de trazo, velocidad y gasto de la corriente, construcciones aledañas, líneas telegráficas, telefónicas, de energía eléctrica, ductos, cercas o bardas, caminos, escala gráfica, norte, ubicación de las secciones hidráulicas, etc.

La planta detallada, con curvas de nivel a cada 0.5 m, tendrá una extensión en sentido transversal de por lo menos 60 m a cada lado del eje de proyecto, y en sentido longitudinal del camino se cubrirá al menos hasta encontrar la traza del nivel de aguas máximas de diseño con el terreno natural, y se procurará llevarla hasta la intersección del terreno natural con la rasante de proyecto. En el caso de puentes especiales se

deberá consignar el tipo de navegación sobre el cauce y el gálibo de navegación, medición de hidrometría y velocidades máximas de la corriente a diferentes profundidades.

El perfil de construcción consistirá en el retrazo y nivelación del eje de proyecto, cubriendo una extensión mínima de 300 m a cada lado del cruce con la corriente; en caso de terreno plano fuera de las márgenes, el levantamiento deberá extenderse 100 m o más si fuera necesario. En el caso de llanuras de inundación muy extensas, del orden de kilómetros, el perfil se levantará de acuerdo a lo anterior y se complementará con los datos del eje del trazo, hasta que pueda definirse el funcionamiento hidráulico de la corriente y estar en posibilidades de recomendar la ubicación de las obras auxiliares. En el caso de puentes especiales o barrancas profundas, el perfil de construcción se extenderá hasta una distancia tal que permita al proyectista definir la rasante del puente, y también en este caso será conveniente complementarlo con los datos del eje de trazo.

El perfil detallado es un plano que se utilizará para elaborar el perfil de suelos de la obra en proyecto y se dibuja utilizando los datos del retrazo y nivelación del eje de proyecto, cubriendo una extensión que abarque por lo menos las dimensiones de la obra u obras que se proyectarán.

El estudio Hidráulico es un estudio complementario del Hidrológico y se basa en la topografía de la zona del cruce de la corriente con el eje de proyecto. Con el estudio Hidrológico se determinó el gasto de diseño que pasará por el cruce del trazo con el río o arroyo. Conociendo este gasto y haciéndolo pasar por el cauce y con la topografía con detalle, se puede calcular el Nivel de Aguas Máximas de Diseño (NAME). El estudio hidráulico es indispensable para calcular la velocidad de la corriente en el cruce, para cotejar los datos del estudio hidrológico con las huellas de

las avenidas históricas registradas en el sitio y para obtener el NAMO (Nivel de Aguas Máximas Ordinarias) y el NAMIN (Nivel de Aguas Mínimas).

El estudio Hidráulico, basado principalmente en el método de sección y pendiente, requiere en general del levantamiento topográfico de tres secciones hidráulicas, de ser posible, una aguas arriba, otra en el cruce y otra aguas abajo, separadas entre sí al menos 200 m; el trabajo se efectuará levantando los puntos notables del terreno hasta la intersección con el NAME de diseño, que podrá ser obtenido en el campo o con el estudio hidrológico.

Se deberá determinar el coeficiente de rugosidad ( $n$ ) en cada sección hidráulica y obtener la pendiente geométrica del cauce mediante un levantamiento detallado de su fondo en una longitud tal que se extienda al menos 200 m más allá de la sección hidráulica localizada aguas arriba y 100 m más allá de la sección localizada aguas abajo.

Los datos del estudio hidráulico se plasman en el plano de secciones y pendientes, que contiene el perfil del fondo del cauce, la línea recta que represente su pendiente media, los puntos que representen el NAME en cada sitio donde éste haya sido investigado en el campo, la línea recta que pase entre ellos y que representará la pendiente media de la superficie libre del agua.

Los cálculos hidráulicos se realizan de acuerdo a la fórmula de Manning siempre y cuando se cumplan los requisitos para su aplicación; en caso contrario, podrá utilizarse otro método hidráulico que se considere conveniente o el software diseñado por la Armada de los Estados Unidos conocido como HECRAS.

Como resultado de los estudios realizados, se elaborará un informe general donde se indiquen características generales y particulares de la corriente y su cuenca, la información relevante de su funcionamiento, sobre todo la no contenida en los planos y finalmente las conclusiones y recomendaciones del estudio, con su justificación correspondiente. Con el informe final se adjuntarán los planos que se enlistan a continuación:

- Planta General
- Planta Detallada
- Perfil de Construcción
- Perfil Detallado
- Planta de la cuenca hidrológica de análisis
- Secciones y Pendientes
- Croquis de localización
- Levantamiento de puentes cercanos

El manejo de la información contenida en el informe con los resultados de estos estudios, deberá estar a cargo de los ingenieros proyectistas de la estructura del puente, quienes en base a esa información elaborarán el proyecto conceptual del puente que deberá ser aprobado por la gerencia de proyectos.

El proyecto conceptual, determina el tipo de puente, es decir si es mediante vigas presforzadas apoyadas en pilas, o si es un puente atirantado soportado por cables, o un puente soportado por una estructura de arco, etc. El proyecto conceptual también define la ubicación de los apoyos del puente, que son los estribos y las pilas. La ubicación de los apoyos es indispensable para iniciar la siguiente etapa del proyecto del puente que es el Estudio de Cimentación.

## ESTUDIOS DE CIMENTACIÓN PARA PUENTES

Tienen como finalidad proporcionar a los ingenieros encargados del diseño estructural, la capacidad de carga o resistencia del terreno sobre el que se desplantaran las pilas y estribos del puente y la profundidad mínima que debe tener la cimentación para soportar las cargas provenientes de su estructura.

Del estudio de cimentación se deben desprender las recomendaciones tales como el tipo de cimentación más adecuado, ya sean pilotes, cilindros, zapatas, pilastrones, etc. Adicionalmente, y conociendo los resultados del Estudio Topohidráulico e Hidrológico, el Estudio de Cimentación Para Puentes (E CPP) define también la profundidad esperada de la socavación y recomienda las medidas necesarias para evitar sus efectos.

Para lograr los objetivos indicados, los trabajos que se efectúan en el E CPP, se inician en el campo elaborando un estudio de geología de superficie, así como sondeos con máquinas perforadoras cuya capacidad debe ser tal que puedan llegar a una profundidad de 50 m.

Mediante éstos sondeos se deben conocer los materiales que se encuentren bajo el terreno natural donde se desplantaran las pilas o apoyos del puente y su capacidad para resistir las cargas. También se debe conocer si son susceptibles de deformarse o tener asentamientos debidos a esas cargas o a las de los terraplenes de acceso del puente.

Las máquinas que hacen estos sondeos tienen diámetros del orden de 0.5 a 0.8 m, miden la resistencia de los materiales encontrados haciendo pruebas como la de Penetración Estándar, o bien la Prueba de Cono Dinámico, y también obtener muestras ya sean alteradas o inalteradas

en toda la profundidad del sondeo, para que esas muestras sean llevadas al laboratorio donde se medirá su resistencia.

En el proyecto de carreteras nuevas, muchas veces es necesario construir caminos de acceso para trasladar las máquinas al sitio, o desarmar las máquinas y trasladarlas en partes sobre brechas o veredas en terrenos montañosos, para volver a armarse al llegar al sitio del sondeo. En ocasiones especiales en ríos caudalosos, es necesario colocar las máquinas sobre balsas ancladas en el sitio donde se requiere el sondeo. Naturalmente habrá puentes pequeños, que tienen cargas mínimas en sus apoyos que se limitarían a dos, donde los sondeos podrían realizarse mediante pozos a cielo abierto (PCA).

Con el estudio geológico de superficie o de detalle, debe detectarse el tipo de materiales que podría esperarse encontrar al hacer los sondeos, así como la profundidad probable que sería necesario explorar. Este estudio geológico es indispensable también para conocer el grado de intemperismo o alteración de las rocas que pudiera haber en el sitio, y así tener la base para la determinación de la resistencia o capacidad de carga de dichas rocas.

Un dato indispensable es la identificación y medición de las fracturas o diaclasas que se encuentren en los macizos rocosos, identificando familias de diaclasas orientadas similarmente y elaborando los estereogramas que identifiquen a los macizos rocosos para su estudio de capacidad de carga.

Cuando se va a trabajar en un estudio geotécnico de cimentación de puentes, ya se debe contar con el diseño conceptual del puente, lo que permite conocer la ubicación de los apoyos, y de acuerdo con las dimensiones de los claros se sabrá también de que orden serán las

cargas que los apoyos transmitirán al suelo. Con esta información, el ingeniero director del estudio de cimentación ubicará un sondeo en cada apoyo, y sobre todo, podrá decidir la profundidad a la cual se suspenderá el sondeo teniendo toda la información suficiente para conocer la capacidad de carga del terreno.

La decisión, que debe tomarse en campo, acerca de la profundidad a la que dará por terminado un sondeo es de la mayor importancia y trascendencia; debe tenerse una idea muy clara acerca de la capacidad de carga que se requiere de acuerdo con las dimensiones del puente, así como los conocimientos de mecánica de suelos para entender que la información y características de los materiales deben conocerse hasta una profundidad por debajo del nivel de desplante de las zapatas, pilotes o pilas, para poder analizar la distribución de esfuerzos, y las deformaciones que pudieran ocurrir al apoyar la carga del puente.

Así que al ir conociendo los materiales que se vayan encontrando al realizar el sondeo, para que junto con la información geológica y la de las características del puente, poder decidir acerca de cuándo se tiene la información suficiente de un sondeo para suspender su ejecución.

La finalidad de los sondeos para cimentación de puentes es la de conocer la estratigrafía del subsuelo, es decir qué tipo de materiales hay bajo el mismo, si hay cambios a diferentes profundidades y que resistencia y deformabilidad tienen esos materiales. Para lograrlo, se debe ir tomando muestras de materiales a toda la profundidad del sondeo; estas muestras se mandan a un laboratorio para hacer ensayos de resistencia y deformabilidad.

Si se encuentran suelos al hacer un sondeo se deben hacer pruebas de resistencia en el mismo sondeo, con un procedimiento llamado



penetración estándar, tomando muestras mediante un muestreador llamado tubo partido con el que se obtendrán muestras alteradas representativas. Si el suelo es blando o de poca resistencia, se deben obtener muestras inalteradas a las que se les podrán realizar ensayos especiales como los triaxiales o los de consolidación. En suelos también se realizan en campo ensayos de resistencia con el cono eléctrico.

Los criterios anteriores de suspensión de sondeos se refieren a la profundidad de éstos, medida a partir de la superficie del terreno encontrada al tiempo de ejecutarlos, siempre que esta superficie no pueda sufrir modificaciones posteriores con motivo de la construcción del camino u otra obra, o por efecto de agentes naturales; cuando así suceda dichos criterios deberán aplicarse tomando en cuenta la condición más desfavorable para la cimentación, sea definitiva o temporal, que pueda presentarse durante la vida útil de la estructura. Tal es el caso de pasos inferiores ubicados en zonas de corte del camino, donde la profundidad de los sondeos deberá definirse considerando la posición de la subrasante y del corte; también cuando se estudien puentes sobre corrientes de agua importantes para los que se deberá prever la posible socavación local y general de los apoyos, a fin de que los sondeos no queden cortos.

En cualquier caso, la profundidad a la que se den por terminados los sondeos quedará al juicio y experiencia del responsable por parte del contratista, y será la responsabilidad de éste que sea la suficiente y adecuada para los fines del estudio y del proyecto de la cimentación de la obra.

Debe reportarse la profundidad a la que se encontró el nivel freático en los sondeos durante su ejecución. Si la detección de éste no fuera posible, se investiga su profundidad en pozos o norias existentes en el

área; o bien, mediante un reporte estadístico de datos proporcionados por habitantes de los alrededores. Asimismo, durante los trabajos de exploración se efectúa un reconocimiento del sitio para observar y reportar todas aquellas condiciones que puedan afectar el comportamiento de la cimentación o de la propia estructura, como son: procesos erosivos actuantes, inestabilidad de laderas naturales, existencia de cavidades naturales o artificiales, etc.

### **Laboratorio**

De acuerdo con la estratigrafía encontrada en la exploración y muestreo de campo, se elaborará un programa de ensayos de laboratorio, suficiente para clasificar el suelo y obtener sus parámetros para el diseño geotécnico de la cimentación. Todas las muestras recuperadas en los trabajos de exploración se identificarán y clasificarán conforme al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y se les determinará su contenido de agua.

A las muestras representativas o alteradas de suelos típicos se les definirán los siguientes parámetros:

- Límites de consistencia líquido y plástico en suelos arcillosos o limosos plásticos.
- Composición granulométrica por mallas para arenas y gravas.
- Porcentaje de finos para arenas finas, limos y/o arcillas.

En muestras inalteradas (arcilla o limo):

Compresión no confinada.

- Compresión Triaxial no consolidada-no drenada (UU)

- Compresión Triaxial consolidada-no drenada (CU) (en su caso)
- Compresión Triaxial consolidada-drenada (CD) (en su caso)
- Consolidación unidimensional.
- Peso volumétrico en su estado natural.
- Peso específico relativo de sólidos.
- Resistencia al corte con Torcometro de bolsillo.

De los núcleos de roca se obtendrá:

- Clasificación geológica.
- Índice de Calidad de la Roca (RQD).
- Compresión simple.

### **Trabajos de Ingeniería**

Con base en la exploración efectuada, se elaborará el perfil estratigráfico del subsuelo, a escalas iguales tanto horizontal como vertical 1:100 para pasos y puentes con longitud menor a 100 m y 1:200 ó 1:500 para estructuras de mayor longitud. En dicho perfil se dibujarán las columnas estratigráficas de los sondeos realizados, indicando secuencia y descripción de los estratos detectados, así como características de cada uno de ellos.

En base a los resultados de los sondeos y ensayos de laboratorio y tomando en cuenta el gasto y velocidad de diseño de la corriente para un período de retorno de 100 años obtenidos del estudio Topohidráulico e Hidrológico, se analiza y calcula la socavación general, así como la socavación local. Para el cálculo de la socavación general se usará el método de Lischtvan–Levediev, y para el cálculo de la socavación local se usará el método de Yaroslavtziev, independientemente de que se podrán complementar los estudios con otros métodos reconocidos.

Se analizarán alternativas de cimentación adecuadas a las condiciones del sitio, determinando para cada alternativa su nivel de desplante, capacidad de carga admisible, estabilidad, asentamientos, diseño de la excavación, comportamiento de terraplenes de acceso, cálculos de socavación en el caso de puentes, y estabilidad general para cimentaciones en taludes.

Se revisará estabilidad de los terraplenes de acceso cuando sea procedente y se revisará el efecto de los asentamientos que sufran en su etapa constructiva como de servicio de la estructura proponiéndose soluciones para mitigar dicho efecto. Se describirán procedimientos constructivos para las cimentaciones propuestas, con base en las condiciones del subsuelo que se tengan en el cruce.

Se requiere elaborar una memoria de cálculo, como todo estudio que implique la elaboración y desarrollo de cálculos matemáticos, aplicación de teorías de análisis, uso de los parámetros obtenidos en estudios anteriores y de una explicación de la metodología mediante la cual se obtienen los resultados; se debe presentar en forma clara, señalando como es que a partir de los datos de los materiales encontrados en los sondeos, de los resultados de los ensayos de laboratorio y aplicando las teorías de mecánica de suelos y mecánica de rocas, se llega a la conclusión de recomendar la cimentación adecuada al puente en particular, y como se llega a calcular la capacidad de carga del terreno para cada uno de los apoyos y para los terraplenes de acceso, y también los posibles asentamientos en cada una de estas estructuras.

De igual forma se deben presentar en la memoria, los cálculos efectuados, a partir del estudio Topohidráulico e Hidrológico, para conocer la profundidad máxima a la que llegará la socavación en el

cauce y en los apoyos del puente ya que su profundidad de desplante tiene que ser mayor a la de la socavación, además de proyectar medidas de mitigación contra las erosiones causadas por la socavación.

Los estudios de cimentación para puentes son elaborados por tres equipos de profesionales especializados: La brigada de exploración de campo encargada de la ejecución de los sondeos profundos y recolección de muestras. El laboratorio de mecánica de suelos instalado en forma permanente en una localidad, donde se concentran las muestras de campo. Y finalmente el gabinete de estudios finales, cálculos de cimentación y elaboración del informe final.

Un informe del estudio de cimentación será necesario para cada uno de los puentes. En el informe se describirán los sondeos efectuados con todos sus datos de campo y fotos de los trabajos, del sitio y de las condiciones particulares de los afloramientos de materiales. Se describirán los ensayos de laboratorio programados y las razones por las cuales se programaron ese tipo de ensayos en particular. Se presentarán los resultados de los ensayos de laboratorio y se describirán los cálculos de capacidad de carga y de asentamientos efectuados. Se concluirá indicando los resultados de los cálculos y las recomendaciones de cimentación para cada uno de los apoyos de los puentes. El informe se acompañará con la memoria de cálculo en la que se presenten con todo orden y detalle todas las hipótesis, métodos de cálculo, teorías, análisis y los cálculos finales con el resultado que concluya con la información de capacidad de carga, nivel de desplante y asentamientos esperados.

## **PROYECTO GEOMÉTRICO**

### **Alineamiento horizontal**

La base del proyecto ejecutivo de una carretera, así como el emblema y representación de todos los estudios, trabajos y proyectos de este gran proyecto de inversión, es el plano con el proyecto en planta de una carretera.

La planta de un proyecto ejecutivo es la representación gráfica en un plano horizontal, de la superficie de la tierra, sobre la que se dibuja la traza del eje del proyecto. Es una vista desde arriba del trazo de la carretera sobre el terreno natural. Esta representación de la superficie de la tierra es la que se ha obtenido a través de todos los estudios topográficos y fotogramétricos realizados, y en ella se observan con detalle todos los accidentes topográficos, todas las construcciones, linderos y terrenos, así como todos los puentes, túneles y entronques proyectados.

La planta de la carretera que representa el alineamiento horizontal definitivo, es el resultado de un largo proceso que se ha estado desarrollando desde que se idealizó, y que se ha ido elaborando paso a paso, con la finalidad de obtener el trazo que mejor satisfaga las demandas del proyecto.

Debe recordarse que el planteamiento de la demanda fue establecido, ya sea por medio del monitoreo del tránsito en la zona, por planes de desarrollo regional, por planeación de nuevas zonas de desarrollo, por incremento del producto regional, por planes de integración nacional, etc. Una vez planteada la demanda de un servicio, se hizo un estudio de ingeniería de tránsito en el que se obtuvo con todo detalle el volumen de

tránsito al que debería darse el servicio, las mejoras que deberían obtenerse respecto a otras opciones de viaje sin el proyecto de una nueva carretera y, sobre todo, los beneficios que se obtendrían al construir una nueva carretera.

El trazo de la carretera representado por el alineamiento horizontal, corresponde a la ruta definitiva elegida entre otras por ser la que proporciona el servicio al menor costo de operación. El alineamiento horizontal debe proporcionar al usuario un manejo fluido de su vehículo, sin sobresaltos ni sorpresas, en armonía con la topografía o accidentado del terreno, con curvas adecuadas a la velocidad de operación y con la visibilidad adecuada. La tecnología para lograr este cometido, ya fue aplicada al elaborar el proyecto de trazo definitivo sobre los planos de topografía obtenidos de las fotos aéreas. Ahora ya se tiene la topografía levantada en campo con mayor precisión y se procede a elaborar los planos de proyecto ejecutivo empezando por la planta del trazo.

Con el detalle de la topografía levantada en campo, debe hacerse una revisión del proyecto definitivo del trazo. Respecto al alineamiento horizontal, en esta etapa no suele haber ajustes importantes, salvo condiciones muy especiales que desde luego deben tomarse en cuenta.

La planta con el proyecto ejecutivo, se dibuja en planos de kilómetro, es decir se dibuja un plano por cada uno de los kilómetros de que consta el proyecto. La planta debe contener en primer lugar la topografía de toda el área de la carretera comprendida por lo menos en todo el ancho del derecho de vía; debe tener dibujadas las curvas de nivel representativas de niveles a cada metro, estar señalados los bancos de nivel cuya información detallada de ubicación, referencias y coordenadas incluyendo cota de nivel del banco, se indicarán en un cuadro adjunto a la planta.

El dibujo se hará con escala 1:2,000 en documento electrónico Autocad, y se dejarán referencias considerando que el dibujo se ajustará al tamaño necesario para su fácil manejo. Además de la topografía, el plano deberá contar con la cuadrícula de coordenadas a las que estará referido el trazo.

Sobre la topografía de la planta se dibujará el eje del trazo con todo el detalle de sus curvas y tangentes, indicando todos los puntos significativos que fueron implantados en el campo, como los puntos de curvas, Tangente–Espiral (TE), Espiral–Curva (EC), Curva–Espiral (CE) y Espiral–Tangente (ET), se indicarán también los puntos sobre tangente que hayan sido colocados en el campo.

Todos estos puntos permiten rehacer el trazo en el campo y se presentan los datos de las curvas y espirales en una tabla adjunta al plano. En esa tabla se indican en orden progresivo de cadenamientos los datos de tangentes y curvas con toda la información necesaria para rehacer o reproducir el trazo en el campo. También en tabla adjunta deben presentarse las referencias para ubicar los puntos originales que fueron implantados en el campo.

Además del eje del trazo, se debe representar en la planta el ancho de la calzada dibujando la franja correspondiente; también se debe dibujar el límite del derecho de vía. Otra información que debe dar la planta mediante el dibujo, es la de las dimensiones de los cortes y terraplenes; se debe dibujar el inicio de los cortes o terraplenes así como la distancia horizontal hasta la que va a llegar el terraplén o la excavación del corte. Con esto se tiene un panorama completo del proyecto ejecutivo de la carretera visto en planta.



Esta información acerca de los cortes y terraplenes no puede obtenerse sino hasta después de que hayan sido terminados los estudios de rasante y movimiento de tierras, y que se hayan determinado y calculado las secciones transversales de construcción. En la práctica se va elaborando el dibujo de la planta en paralelo con el avance del resto de los estudios y diseños del proyecto ejecutivo, y el dibujo de la planta se va completando conforme se tengan los datos necesarios.

Por último, el dibujo de la planta debe contar con la toponimia. Para fines del proyecto ejecutivo de carreteras, el término se aplica únicamente al señalamiento de los nombres propios del lugar y de los terrenos afectados por el trazo, indicando si son pequeñas propiedades o ejidos, los nombres de los dueños de los ranchos o predios, el nombre del ejido, etc.

No debe olvidarse el nombre del municipio y el estado por el que se desarrolla el trazo y señalar todos los pueblos o rancherías cercanas. Si se cruza un camino o vereda, se debe señalar hacia qué población se dirige en ambos lados. Todos los linderos de los ranchos, ya sea que separen potreros o que sean límites de propiedad, deben ser también señalados.

La revisión del alineamiento horizontal, y el diseño final expresado por medio del plano con la planta del trazo aquí descrito, está a cargo del ingeniero proyectista del diseño geométrico y director general del proyecto. Este ingeniero encabeza a un equipo de ingenieros especialistas en diseño geométrico y en sistemas de cómputo, así como un grupo de auxiliares técnicos y dibujantes que se encargan del diseño final y preparación del proyecto geométrico ejecutivo. Una parte del diseño lo constituye el alineamiento horizontal, que como ya se dijo, se hace en paralelo con otras actividades del proyecto, de manera que no

es conveniente individualizar al personal encargado de la elaboración del plano, sino que en conjunto se describirá al equipo y los rendimientos para el diseño geométrico y proyecto ejecutivo en su conjunto.

### **Alineamiento Vertical**

El alineamiento vertical se refiere al perfil topográfico de la carretera. Es una vista de perfil, en la que se pueden visualizar las subidas, bajadas, tramos planos, etc., con lo que se aprecia el desplazamiento del trazo en relación con el terreno natural, observándose si el camino va sobre un terraplén o por un corte, si la pendiente es muy fuerte, si la distancia de subida con pendiente fuerte es grande, si los terraplenes son altos, etc.

Cuando se diseñó el trazo definitivo en los planos obtenidos de las fotos aéreas, se hizo un diseño del alineamiento vertical; sin embargo, entonces no se contaba con el estudio geotécnico definitivo que determina las inclinaciones de los taludes y el tipo de material que se obtendría de las excavaciones; toda esta información se manejó de manera preliminar. Ahora que ya se ha implantado en campo el trazo definitivo y que se tiene la topografía con detalle obtenida de un levantamiento topográfico, y que se tiene además el estudio geotécnico definitivo, se debe revisar y ajustar el diseño. Es decir, ahora se debe hacer el diseño definitivo y elaborar el proyecto ejecutivo.

Debe recordarse que el diseño geométrico está regido por una velocidad de proyecto que fue determinada en base a la demanda del servicio obtenida de un estudio de ingeniería de tránsito. Una vez establecido el volumen y composición del tránsito de proyecto y la velocidad de proyecto, mediante el diseño geométrico se debe lograr dar un servicio de manejo fluido, seguro, en armonía con la topografía y con el paisaje,

logrado todo esto con el menor costo posible y con el menor impacto ambiental.

El proyectista debe dominar todos los elementos técnicos del diseño y armonizarlos con las condiciones topográficas, las necesidades del usuario, la economía del proyecto, las condiciones ambientales, de uso de suelo, de paisaje, etc. Debe reconocerse el trabajo del ingeniero de diseño geométrico, como un oficio artesanal que imprime un sello personal al diseño, que el usuario nota y agradece.

El diseño del alineamiento vertical, consiste en el ajuste del perfil de la carretera para lograr que, por un lado las subidas y bajadas no sean muy pronunciadas, o en otras palabras, que las pendientes no sean muy fuertes y largas. Que los cortes y los terraplenes no sean muy altos, y que al igual que en el alineamiento horizontal se tenga una circulación cómoda, fluida y segura, dentro de los límites de la velocidad de proyecto de la carretera.

En el diseño del alineamiento vertical deben calcularse las distancias de visibilidad de parada y vigilar que se cumplan de preferencia mucho más allá de los mínimos, para comodidad de los usuarios. El alineamiento vertical debe estar combinado con el alineamiento horizontal de manera que funcionen en forma armónica dando al usuario el mayor confort y seguridad. Para una combinación adecuada del alineamiento horizontal con el perfil, se puede mencionar, como ejemplo, que deben cumplirse las consideraciones siguientes:

- Las curvas de la carretera deben estar balanceadas con las pendientes. Curvas amplias o grandes tangentes no son compatibles con fuertes pendientes o con pendientes en longitudes grandes, así como con curvas cerradas con pendientes

pequeñas o terrenos planos. Ambas situaciones deben evitarse pues constituyen un mal diseño.

- Curvas verticales superpuestas con curvas horizontales, generalmente constituyen un buen diseño, aunque es necesario analizar cuidadosamente cada caso particular. Cambios sucesivos en el perfil sin una combinación con curvas horizontales podrían dar por resultado una serie de jorobas visibles desde cierta distancia por los conductores, lo cual no es un buen diseño.
- Curvas horizontales cerradas no deben ubicarse en la cresta o cerca de la cresta de una curva vertical pronunciada. En esta condición el conductor puede no percatarse del cambio horizontal del alineamiento especialmente de noche.
- En las intersecciones, tanto las curvas horizontales como las verticales deben hacerse lo más planas que sea posible, ya que la distancia de visibilidad en esos casos es muy importante puesto que los vehículos en la intersección pueden disminuir la velocidad o incluso parar.

Una vez que se ha conformado el alineamiento vertical o perfil, con el alineamiento horizontal o planta del trazo definitivo, y que también se tiene definida tanto la ubicación con detalle como la forma en que se han resuelto los entronques, túneles, viaductos, y que se tiene también la lista de los sitios donde se ubicarán pasos a desnivel con su respectiva solución en cuanto al tipo de pasos, se procede entonces a la elaboración del proyecto ejecutivo.

La solución o diseño final del alineamiento vertical, implica diseñar en conjunto las secciones transversales constructivas y el cálculo de volumen de masas o movimiento de tierras, que antiguamente se conocía como cálculo de “curvamasa”.

El diseño del alineamiento vertical consiste en ir ubicando en el perfil del terreno natural la línea conocida como subrasante, logrando todos los objetivos y consideraciones ya señalados. La línea subrasante representa una línea sobre el eje de la carretera, ubicada en la parte inferior del pavimento o, igualmente, en la parte superior de los terraplenes y a lo largo de toda la carretera.

El ingeniero proyectista del diseño geométrico procede, por tanteos, y aplicando su buen criterio y experiencia, a trazar una subrasante y revisarla. Una vez revisada se ajusta buscando optimizar los objetivos de proyecto y se revisa nuevamente; se procede así las veces que sea necesario hasta que el proyectista logra su objetivo.

Cada subrasante tiene diferentes secciones transversales de construcción y tiene diferentes volúmenes de tierras en cortes y en terraplenes. Para cada uno de los tanteos y las revisiones descritas, es necesario obtener las secciones transversales y la volumetría correspondientes a la rasante revisada.

Diseñar la rasante definitiva, o del proyecto ejecutivo, implica la obtención en consecuencia de las secciones transversales de construcción y los volúmenes de materiales que se deben excavar, transportar, y compactar para formar terraplenes.

También se tendrán los volúmenes de terraplenes que hay que formar con material acarreado de los bancos señalados en el estudio geotécnico, y en general todo el estudio de movimiento de tierras que se representa mediante el llamado diagrama de masas. Este diagrama es una representación gráfica de los volúmenes que se moverán, y acarrearán, indicando los sitios donde excavará y se colocará el

material, ya sea de excavación de los propios cortes de la carretera o de los bancos de materiales para terracerías.

El diseño del alineamiento vertical, es decir, de la rasante definitiva, es el que determina las alturas de los cortes y los volúmenes de excavación en los diferentes materiales; las distancias de transporte (acarreos) de los diferentes materiales y los volúmenes de materiales que se necesita compactar para formar terraplenes. Estos conceptos de obra constituyen una parte fundamental del costo de la carretera.

El ingeniero especialista en diseño geométrico tiene bajo su responsabilidad los dos más importantes objetivos del proyecto: elaborar un diseño de carretera que proporcione al usuario el servicio más seguro y confortable de acuerdo a la velocidad de proyecto, y diseñar una carretera al menor costo posible.

Para el análisis de los diferentes planteamientos para la ubicación idónea de la subrasante, el ingeniero cuenta con programas de cómputo especializados en el tema de movimiento de masas. Con ellos, el proyectista hará los cálculos matemáticos necesarios, (matematización) para cada una de las posibilidades de subrasante hasta lograr la definitiva. El programa de cómputo es un programa al que se debe alimentar con los datos del perfil topográfico del terreno; las secciones transversales de topografía levantadas en campo al hacer la implantación del trazo definitivo; las medidas exactas de la sección transversal de la carretera; los datos de las curvas horizontales (alineamiento horizontal) con sus sobreamanchos y elevaciones correspondientes; los datos de la inclinación de los taludes de los cortes y de los terraplenes obtenidos del estudio geotécnico; los datos de los coeficientes de variación volumétrica de los materiales de cada corte obtenidos del estudio geotécnico; el uso que deba darse a los materiales

excavados de cada uno de los cortes; la dificultad de excavación de los materiales en cada corte; y, por último, la ubicación exacta de la subrasante de proyecto.

Con toda esa información el programa deberá proporcionar: todos los datos topográficos para dibujar las secciones de construcción a cada 20 m y en los puntos intermedios significativos; el cálculo de las áreas de corte o terraplén de cada una de las secciones transversales; el cálculo de los volúmenes entre cada dos secciones transversales sucesivas; el cálculo de los volúmenes acumulados progresivamente en cada sección; y el dibujo del diagrama de masas en el que se apreciará si en algún tramo del proyecto haga falta material para formar terraplenes, en cuyo caso tiene que considerarse obtenerlo del banco de materiales más cercano, o si sobra material que deberá transportarse a un banco o lugar destinado a colocar material de desperdicio.

Conviene recordar que los cálculos matemáticos para lograr conocer los volúmenes de material indicados, es a lo que se conoce como matematización, que ahora se hace con un programa de cómputo y que antiguamente se hacía en forma manual y se conocía como cálculo de “curvamasa”.

Con la finalidad de que el proyectista pueda tener una visión de conjunto de la carretera, se dibujan planos del perfil que representen una longitud de por lo menos cinco kilómetros, en los que se hacen los diseños de la ubicación de la subrasante, hasta lograr la subrasante definitiva. Con estos planos llamados planos de trabajo se hacen los cálculos y se obtiene toda la información del proyecto, que será copiada a los planos de kilómetro para facilidad del manejo de la información durante la construcción.

Con los datos del proyecto del alineamiento horizontal y del alineamiento vertical, se elaboran los “planos de kilómetro” del proyecto ejecutivo.

Cuando se describió el diseño del alineamiento horizontal para el proyecto ejecutivo, se dijo que los resultados del diseño se presentan en planos conocidos como “planos de kilómetro”. En cada uno de estos planos se presentan todos los datos del proyecto ejecutivo correspondientes tanto del alineamiento horizontal como del alineamiento vertical.

En cada plano se dibuja un kilómetro de carretera con toda la información para que se pueda rehacerse en el campo el trazo de la carretera y que se puedan conocer los movimientos de tierras diseñados, es decir la magnitud de los cortes y terraplenes, la geometría del camino tanto horizontal como vertical, la longitud de los acarreos o distancias a las que deben transportarse los materiales excavados y la ubicación de los bancos de materiales.

El proyecto ejecutivo para la construcción de terracerías está formado principalmente por estos planos de kilómetro, solo complementados con los planos de las secciones de construcción que se presentan por separado, y por los documentos de los procedimientos de construcción. El proyecto ejecutivo para la construcción de toda la carretera se complementará con los planos y documentos para cada una de las estructuras adicionales, como puentes, viaductos, túneles, pasos a desnivel, entronques y obras de drenaje menor.

El diseño del alineamiento vertical se presenta en los planos de kilómetro junto con el alineamiento horizontal, y también en los planos de las secciones transversales de construcción.



En el perfil que se dibuja en los planos de kilómetro, se incluyen los diagramas de masas, donde se indica por ejemplo que el material obtenido de los cortes efectuados entre los puntos delimitados por ciertos kilometrajes, deberá transportarse para formar terraplenes ubicados entre otros kilometrajes. Con estas indicaciones se deben elaborar los programas de construcción y de movimientos de maquinaria. También junto con los diagramas de masas se indica la ubicación y principales características de los bancos de materiales para complementar terracerías y formar las capas superiores de la terracería conocidas como capa subrasante y capa subyacente.

En la parte inferior del plano del perfil se indican los niveles del terreno natural y de la subrasante a cada veinte metros, cuya diferencia es la altura de los cortes o terraplenes en cada punto. Se incluyen también los datos principales del estudio geotécnico, consignando la estratigrafía y todas las características geotécnicas de los materiales en los diferentes tramos en que se hayan encontrado en el kilómetro que corresponde al plano, constituyéndose así el plano del perfil del camino en un plano de perfil estratigráfico.

Tanto en el plano de la planta como en el del perfil, se dibujan, ubicadas en sus kilometrajes exactos, las estructuras de los puentes, túneles, pasos a desnivel y obras de drenaje menor. En el caso de los entronques, solamente se señala la zona destinada al entronque sobre el diseño normal de los alineamientos horizontal y vertical de la carretera principal, a la que deberán ajustarse las ramas y estructuras del entronque.

Con el diseño del alineamiento vertical, constituido por el diseño de la subrasante definitiva, se tienen los datos de las secciones transversales de construcción. Las secciones representan una vista de un corte

transversal de la carretera en la que puede verse el ancho de la calzada y los taludes de los cortes o terraplenes con sus inclinaciones correspondientes de acuerdo con los datos proporcionados por la geotecnia. Estas secciones transversales son un dato indispensable para la construcción, pues en ellas se encuentran los niveles que se deben alcanzar en campo en todo el ancho de la corona del camino y en los taludes de terraplenes y cortes hasta alcanzar el terreno natural.

En los planos de kilómetro no caben los dibujos de las secciones transversales, de manera que se presentan en planos por separado. Generalmente, en campo, los ingenieros constructores, superintendentes, supervisores, topógrafos, jefes de laboratorio, jefes de frente, etc. manejan los planos de kilómetro impresos en tamaños adecuados para su manejo en el campamento o en campo, de 60 x 90 cm, o en tamaño doble carta. Las secciones transversales las manejan normalmente en documento electrónico para consulta en computadora y principalmente los consultan los topógrafos, los supervisores y los superintendentes.

Con el diseño del alineamiento vertical, constituido por el diseño de la subrasante definitiva, también se tienen los volúmenes de obra. El cálculo de estos volúmenes es producto de la matematización, y se obtiene por medio de los programas de cómputo, que documentan sus cálculos mediante listados de las secciones transversales que se convierten en dibujos con el mismo programa, y mediante listados de los volúmenes calculados. Los listados tanto de secciones como de volúmenes forman parte de las memorias de cálculo como respaldo del proyecto, pero los resultados de los cálculos de volúmenes sí se incluyen en los planos de kilómetro.

En los planos de kilómetro se dibuja en la parte superior la planta con toda la información del proyecto como se indicó cuando se describió el diseño del alineamiento horizontal y en la parte inferior se dibuja el perfil con los datos del alineamiento vertical como fue descrito en este apartado. Del lado izquierdo de los dibujos se presentan todos los datos topográficos detallados para que el trazo de la carretera pueda ser restituido cuantas veces sea necesario durante la construcción.

Del lado derecho de los dibujos se presentan los datos de los volúmenes correspondientes al kilómetro en cuestión. Estos datos son: volúmenes de cortes o de excavación, volúmenes de terraplenes, volúmenes de acarreo procedentes de cortes con sus distancias de acarreo, y volúmenes de acarreo o transporte procedente de banco de préstamo con sus correspondientes distancias. También se indican los volúmenes de material que será transportado a desperdicio. Con esta información de volúmenes de corte y de terraplén, distancias de acarreo, etc., complementada con la información geotécnica acerca de las dificultades para excavación de cada uno de los materiales que se encontrarán en ese kilómetro, se puede hacer un análisis de costos, así como una planeación del uso de maquinaria necesaria y programas de trabajo.

Con el diseño del alineamiento horizontal y la elaboración de los planos de kilómetro, se completa el proyecto ejecutivo del diseño geométrico de la carretera.

En resumen, el proyecto ejecutivo de la geometría de la carretera (diseño geométrico), está conformado por:

- Planta de kilómetro, donde vienen los datos de planta y perfil, con datos de volúmenes acarreo y bancos de terracerías, el número de estos planos es de uno por cada kilómetro de carretera.

- Planos de Secciones Transversales de construcción, una sección a cada veinte metros, con toda la información topográfica del terreno natural y del diseño, para excavación de cortes y formación de terraplenes.
- Documento con los procedimientos de construcción y especificaciones de construcción.
- Memoria de cálculo del diseño de la subrasante y cálculo de volúmenes y movimientos de masas.

Este proyecto ejecutivo de la geometría, que es el proyecto ejecutivo para construcción de terracerías, debe acompañarse de los estudios que le sirvieron de apoyo. El estudio de Ingeniería de Tránsito que asignó el tránsito de diseño y en consecuencia el ancho de calzada. Las fotografías aéreas en vuelos alto y bajo, con los mosaicos de la ruta definitiva. Los estudios geológicos en las etapas preliminares del proyecto. Los Estudios Hidrológicos preliminares. El estudio Geotécnico preliminar. Y por último, el Estudio Geotécnico definitivo.

Además del proyecto ejecutivo para construcción de terracerías, se requieren los proyectos ejecutivos de cada una de las obras que complementan la carretera: Puentes, Túneles, Pavimento, Entronques, Pasos a Desnivel, Obras de Drenaje Menor y Obras Complementarias de Drenaje.

## PROYECTO DE PUENTES

### Introducción

Antes de llegar a esta etapa en la que se hará el diseño de la estructura del puente y el proyecto ejecutivo para su construcción, ya se han hecho varios estudios previos e indispensables. En la etapa de elección de ruta se estudiaron los sitios más adecuados para efectuar el cruce sobre el río o la barranca con ayuda de los estudios geológico y geotécnico. En esa misma etapa se hicieron estudios hidrológicos preliminares para estimar las dimensiones del puente. Al seleccionarse una ruta definitiva, se afinaron los estudios preliminares geológico, geotécnico e hidrológico, con la finalidad de elaborar el trazo definitivo y en consecuencia el cruce final de los puentes.

Con el proyecto del trazo definitivo y con los estudios preliminares geotécnico e hidrológico, se elabora el proyecto conceptual del puente, mediante el cual se dimensiona la estructura y se decide el número de apoyos o pilas del puente y la longitud de los claros entre las pilas. Se elabora un perfil del proyecto conceptual del puente con información acerca de los sitios en que podrían estar ubicados los apoyos del puente, la altura de las pilas para los apoyos, el orden de magnitud del peso que soportarían esos apoyos que se sabría en función de la altura y separación entre ellos, con lo que se conocería la longitud total del puente.

El proyecto conceptual del puente, toma en cuenta principalmente el aspecto estructural. De acuerdo con el claro que se necesita salvar, con las características de la corriente del río, la topografía del sitio, la altura del puente y demás consideraciones de ese tipo, se ubican los apoyos

con la propuesta de los claros a la mejor conveniencia estructural y geométrica.

El aspecto arquitectónico y de impacto visual, se considera solo en forma preliminar; aunque hay excepciones, en las que las dimensiones, o ubicación de un puente, lo destacan en forma particular, hasta particularizarlo y considerarlo un proyecto especial independiente de la carretera, en cuyo caso estos aspectos, arquitectónico y de impacto visual, predominan sobre el aspecto estructural en el diseño.

Con el proyecto conceptual del puente, al tiempo que se hace la implantación en campo del trazo definitivo de la carretera, se hacen los estudios de campo para el puente: Topohidráulico e Hidrológico y de Cimentación. No se puede elaborar el diseño estructural del puente si no se tienen los resultados de estos estudios.

### **Tipo de Puente y Diseño Arquitectónico**

Al contar con los estudios Topohidráulico e Hidrológico y de Cimentación, el proyecto conceptual del puente se estudia, se complementa, y sirve de base para la elección del tipo de puente y su diseño arquitectónico.

Los puentes tienen un impacto visual muy importante; inevitablemente atraen la atención tanto de los usuarios de la carretera como de los vecinos del lugar y, en muchos casos, constituyen por sí mismos el paisaje; este impacto visual puede inclusive ser negativo o desagradable si se incurre en un diseño inadecuado.

Los puentes son también monumentos de referencia, impactan visualmente de tal manera, que se convierten en referencias regionales,

como una escultura propia de la región y de sus habitantes en ocasiones durante varias generaciones, e incluso siglos como los puentes romanos o los puentes de tiempos de la Colonia en México.

Todas las carreteras tienen uno o varios puentes que deben identificarse como casos especiales o de excepción, a los que se deben dar una atención exclusiva en su diseño, o inclusive considerarlos de una importancia similar al resto de la carretera y administrarlos como una obra independiente. En estos casos, se debe pensar que se diseña una escultura monumental. En México tenemos ejemplos de este tipo de puentes como el Puente Baluarte, Tampico, el Coatzacoalcos II, el Metlac, el Mezcala, Barrancas, entre otros.

Sobre la base del proyecto conceptual se revisan y afinan los requerimientos estructurales del puente. Con los resultados de los estudios Topohidráulico e Hidrológico y de Cimentación definitivos, se ajustan las dimensiones del puente, ya que estos estudios determinan la cantidad de agua que pasará bajo el puente y la altura mínima para permitir el libre paso del agua, considerando ya, la restricción que significan los apoyos del puente. También se definirá la longitud total del puente ya que los estudios determinarán la longitud mínima necesaria de la sección hidráulica para dejar pasar la corriente en condiciones de máximas avenidas.

Ajustada la geometría básica del puente, se procede a revisar si se requieren más sondeos profundos para la cimentación, ya que lo más conveniente es tener un sondeo en cada uno de los sitios donde se desplantará un apoyo, y es probable que con los ajustes que se hagan, alguno de los sondeos haya quedado fuera del sitio de apoyo, en cuyo caso conviene programar nuevos sondeos que deberán realizarse con celeridad para tomarlos en cuenta en el diseño final del puente. De

manera preliminar y de acuerdo con la geología particular del sitio, se extrapolan los resultados del sondeo más cercano, en espera de la confirmación mediante el nuevo sondeo.

Con las dimensiones básicas: altura de los apoyos, número de claros y longitud de los claros, se procede al diseño arquitectónico consistente en una creación escultural, que resuelva también las necesidades estructurales. Este proceso creativo es de libertad absoluta, es elaborado por el equipo de diseñadores de puentes, y avalado por el Director General del Proyecto, y su Consejo de Gerencia de Proyecto. Solo cabe mencionar algunos conceptos básicos que se deben tomar en cuenta desde el punto de vista estructural:

Para la ubicación del sitio en que se construirá el puente, puede considerarse la utilización de piezas prefabricadas para la construcción de la superestructura, sin embargo, está sujeta a que se cuente con caminos de acceso para transportar piezas de grandes dimensiones. Piezas pequeñas como vigas preesforzadas tipo AASHTO hasta de 30 m de longitud, pueden fabricarse en el sitio sin necesidad de grandes instalaciones. Piezas mayores requerirían para su fabricación de la construcción de talleres que quizá no pudieran instalarse en la obra, o bien se necesitaría construir un camino exclusivamente para su transporte al lugar.

En primer lugar es necesario elegir el tipo de superestructura y el material que se usará para construirla. La superestructura es la parte del puente que se encuentra en la parte superior; es la estructura que se apoya en los apoyos y soporta la losa que sirve para la circulación de los vehículos.



En puentes chicos puede ser una losa de concreto reforzado apoyada directamente en los apoyos. En puentes un poco mayores será necesario que la losa tenga nervaduras para reforzar la estructura. A medida que crece la longitud del puente será necesario recurrir a vigas que se apoyen en los apoyos y que soporten la losa del puente.

Si el claro del puente crece, se pensará en vigas de acero, o en vigas de concreto preesforzado, vigas prefabricadas o postensadas. Así al ir creciendo el claro, seguirá creciendo la demanda de resistencia y se pensará en estructuras especiales como vigas en cajón de concreto preesforzado o de acero, armaduras de acero, puentes en arco de acero o de concreto, puentes atirantados o puentes colgantes, o procedimientos especiales como pueden ser los puentes empujados en doble voladizo.

Como puede verse, la decisión del tipo de puente y tipo de materiales, debe pasar por considerar muchas posibilidades que es necesario evaluar adecuadamente, tomando en cuenta las posibilidades de obtención de materiales, los costos, los procedimientos de construcción, el tiempo de construcción, el acceso al sitio de la obra, el tipo de carretera. También debe considerarse el número de puentes de la carretera, ya que si hay muchos de dimensiones chicas o medianas debe pensarse en un diseño uniforme que facilite la fabricación y construcción.

Planteadas las necesidades estructurales del puente, el diseño escultural o arquitectónico pudiera variar un poco la geometría del puente sin desatender las necesidades estructurales, pero atendiendo la demanda indispensable de impacto visual. Esto generalmente aumentaría el costo, lo cual es necesario evaluar, ya que en muchos casos este aumento sería indispensable ante la posibilidad de que una

solución que atienda estrictamente las necesidades estructurales al menor costo, podría tener un impacto visual negativo, desvirtuando todo el trabajo del diseño geométrico elaborado hasta ahora.

Como ejemplo se puede mencionar las estructuras de los pasos inferiores en las que el conductor de la vía principal pasa por debajo y puede encontrarse con dos o tres a cada kilómetro. Estas estructuras deben ser muy bien estudiadas desde el punto de vista geométrico, ya que el impacto visual es muy importante y debe procurarse que sea muy positivo para hacer más confortable el viaje.

Este trabajo de elección del tipo de puente, tipo de materiales y diseño arquitectónico lo hace el equipo de ingenieros estructuristas especializados en puentes. Dicho equipo está formado por ingenieros en diferentes disciplinas, ingenieros civiles, ingenieros arquitectos, e ingenieros en sistemas de cómputo.

### **Procedimiento Constructivo**

En puentes grandes, el procedimiento de construcción determinará la manera en la que hay que hacer el diseño estructural. En consecuencia, antes de entrar al diseño de la estructura se deberá definir el procedimiento de construcción.

El procedimiento de construcción ha sido estudiado en forma preliminar o conceptual al escoger el tipo de estructura. Deberá ahora diseñarse y presentarlo como proyecto ejecutivo, ya sea en planos o en documentos explicativos y con especificaciones particulares.

Naturalmente el procedimiento será más sencillo entre más pequeño sea el puente y menos complicada su estructura. Sin embargo, toda obra

debe tener especificado su procedimiento de construcción. En puentes chicos se hace una descripción de los trabajos, con especificaciones especiales acerca de la excavación para la cimentación, de la verificación de la profundidad de desplante, las plantillas de cimentación, de cómo debe tratarse el nivel freático en caso de encontrarlo, de cómo debe verificarse el armado de las zapatas y los niveles de las cimbras, etc. Es decir, debe describirse todo el proceso de construcción, especificando con detalle las verificaciones de calidad y de geometría hasta la terminación del puente. Para la elaboración de este documento y/o planos, se puede contar con el auxilio de las Normas SCT, y de las internacionales como AASHTO y ASTM.

Para los puentes grandes el procedimiento de construcción es más complicado y es definido en esta etapa con una retroalimentación de información con el constructor para considerar equipo y herramientas disponibles para lo que se detalla mediante los planos, documentos y especificaciones.

Según el tipo de puente la superestructura puede ser prefabricada parcialmente o totalmente, transportada al sitio y colocada mediante grúa.

La subestructura, formada por la cimentación, las pilas o columnas y los cabezales de las columnas, normalmente es de concreto reforzado y es colada (fabricada) in situ.

Puentes de claros medianos, digamos de 25 a 45 m y alturas pequeñas como los pasos a desnivel, se solucionan con vigas prefabricadas, de acero o de concreto preesforzado, que son colocadas sobre los apoyos terminados, por medio de grúas. El diseño estructural que se hará enseguida, debe considerar que las vigas prefabricadas, aguanten los

esfuerzos provocados por las maniobras de izamiento y colocación, y tengan previstos los ganchos para que la grúa asegure la viga y proceda a izarla sin riesgo de fractura.

En estructuras más grandes, se prefabrican dovelas con la sección completa incluyendo el ancho de calzada; una dovela es simplemente una pequeña porción de la estructura del puente que se irá ensamblando con otras dovelas hasta completar la longitud total. Este procedimiento de construcción está sujeto a que se tenga la posibilidad de contar con un taller de prefabricado cercano a la obra.

En caso de puentes en caminos, está sujeto a que se pueda justificar la instalación de un taller, la construcción de caminos de acceso y contar con un volumen de obra adecuado. En estos casos, el diseño estructural es más complicado y se prevé tanto las maniobras de transporte y colocación, como la unión entre las dovelas al colocarlas para el correcto trabajo estructural dentro del conjunto de la estructura del puente, además de aplicar un postensado en obra para la unión de las dovelas si es necesario. Las dovelas son izadas con grúas de gran capacidad y colocadas en su sitio, y sujetas conforme al sistema diseñado.

Otra solución aplicada, cuando los puentes son muy altos y los claros muy grandes, es la conocida como doble voladizo, en la cual las dovelas no son prefabricadas sino que se van colando en el sitio; mediante este procedimiento se prescinde del uso de grúas para izado de dovelas. El colado in situ se hace una vez que se tienen las columnas del puente. Desde la parte superior de la columna se van construyendo dovelas en voladizo, es decir gravitando sobre una columna y avanzando hacia el vacío y apoyando una cimbra metálica conocida como carrito que se apoya en lo ya construido y se proyecta hacia adelante soportando el colado o construcción de concreto de una nueva dovela. Este proceso es

continuo hasta unir el puente con el avance que viene en sentido contrario, o bien hasta alcanzar el otro apoyo.

En ambos casos, ya sea con dovelas prefabricadas o dovelas coladas en el sitio, se generan en la estructura esfuerzos y deformaciones durante el proceso de construcción, muy importantes y muy diferentes de los que ocurrirán durante la vida de la estructura, por lo que el diseño estructural deberá tomar muy en cuenta el proceso de fabricación, transporte, montaje y operación en obra de la estructura en construcción. El procedimiento de construcción, en primer lugar, será proporcionado al encargado del diseño estructural para que lo tome en cuenta en su diseño.

Los mismos conceptos serán aplicados si el tipo de superestructura de puente escogida es con cajones de acero, con armaduras de acero, con arco de acero, con arco de concreto, con vigas prefabricadas de acero; si la estructura es fabricada en un extremo del puente y empujada hacia los apoyos; si es fabricada en el fondo y luego izada para montarla; si es un puente atirantado con diversas modalidades estructurales y esculturales; si es suspendido con cables, etc.

En todos los casos deben prepararse planos y documentos con la descripción detallada del procedimiento de construcción y las especificaciones que deberán cumplirse durante ese procedimiento. En primera instancia esos planos y documentos pasarán al siguiente proceso que es el diseño estructural.

## **Diseño Estructural**

El diseño estructural consiste en lograr que el tipo de estructura ya seleccionada, tenga los espesores, refuerzos, resistencia, calidad, durabilidad, resistencia al intemperismo y en general que resista todos los esfuerzos que pudieran generarse desde que se fabrica la estructura hasta que concluya su vida útil, sin olvidar que dichos esfuerzos son generados por todas las diversas fuerzas y causas posibles. Hay que lograr que las deformaciones causadas por dichos esfuerzos, estén dentro de lo tolerable para el buen funcionamiento de la estructura. La estructura, en general, se diseña para soportar todas las cargas y fuerzas que pudiera tener durante su vida útil.

Dentro de las cargas que soporta un puente, están las de los vehículos que pudieran pasar sobre el puente y el peso propio de la estructura. Con respecto a las fuerzas actuantes se pueden mencionar las de sismo, las de viento, las provocadas por cambios de temperatura y las que pudiera ocasionar una avenida sobre el cauce de una corriente de agua. Adicionalmente pueden considerarse cargas de personal y equipo de construcción durante el proceso constructivo; fuerzas de tensión y de inercia durante la carga y montaje.

Como ya se ha mencionado, en esta etapa ya se tienen los estudios Topohidráulico e Hidrológico y de Cimentación, que fueron indispensables para llegar hasta aquí. Para casos especiales de puentes muy grandes, se requieren adicionalmente dos estudios: el Estudio de Riesgo Sísmico Local y el Estudio de Incidencia de Viento. En caso de puentes medianos y chicos, se aplican parámetros regionales producto de la experiencia nacional.

Un primer paso en el diseño, es conocer los materiales con que se cuenta para la construcción del puente. En caso de puentes muy pequeños se tendrá que utilizar lo que se tenga en la región. En puentes grandes se pensará en transportar los materiales necesarios desde donde sea necesario. En el caso del concreto se necesita conocer las características del que se pueda fabricar en el sitio de la obra o en los talleres de prefabricado, tomando en cuenta su módulo elástico y su resistencia a la ruptura en compresión. El acero debe adquirirse con las características ofrecidas por los fabricantes en cuanto a módulo de elasticidad y resistencia máxima a la tensión directa.

En el caso más general de diseño, conociendo los parámetros que caracterizan a los materiales que se utilizarán en la construcción y la geometría general del puente, se inician los análisis proponiendo geometrías o formas de los diversos elementos de concreto que componen la superestructura, elaborando un modelo matemático que represente a la superestructura y a las cargas y fuerzas a que estará sujeta en diferentes circunstancias y haciendo todos los cálculos necesarios para conocer los esfuerzos que se producirán en cada punto de la superestructura.

Se analizarán esfuerzos principales normales de compresión, de tensión de cortante, de flexión y de torsión. Si se exceden los esfuerzos de compresión que resiste el concreto, será necesario ajustar los espesores de los elementos para que eso no suceda. En las zonas de esfuerzos de tensión, se reforzará el concreto con acero para absorber dichos esfuerzos de tensión y/o se aplicará preesfuerzo al concreto en sentido contrario para contrarrestar dichos esfuerzos de tensión.

Se necesita elaborar varios modelos matemáticos con cálculos diferentes y estudiar el comportamiento de toda la superestructura del

puente en un modelo, además de hacer otros modelos para cada tipo de pieza prefabricada en sus diferentes etapas de transporte y de izado. Otros modelos serán necesarios para la etapa de construcción del puente y un modelo para los cambios volumétricos de la estructura.

Es importante que al elaborar los modelos matemáticos para cálculo, se consideren todas las cargas y fuerzas, colocadas en la situación más desfavorable. Los análisis matemáticos de los modelos generalmente se hacen en un plano, o de dos dimensiones, pero en casos especiales como puentes atirantados, es necesario hacer análisis tridimensional y análisis dinámicos considerando las fuerzas del viento.

Hasta hace unos pocos años, se necesitaban unos despachos enormes de matemáticos que resolvían los diversos modelos planteados para la solución del puente. Ahora se cuenta con herramientas o programas de cómputo muy especializados que facilitan en gran medida la solución de estos problemas matemáticos.

Las dimensiones de diseño, es decir, la sección de diseño de la estructura será la de sección mínima y mínimo refuerzo y preesfuerzo, que sea capaz de resistir todos los casos con diferentes tipos de cargas según se vayan presentando durante el proceso de construcción y operación del puente así como un comportamiento funcional y de confort durante su vida útil.

Además de las dimensiones de diseño de la superestructura se seleccionan y detallan cada una de las piezas complementarias del puente, como pudieran ser soportes laterales de los cabezales, diafragmas, contrafuertes, aleros de los estribos, juntas de dilatación, tipos de apoyos en trabes y elementos principales, etc.



Los equipos para la construcción, como cimbra deslizante metálica o “carrito” para el colado in situ de dovelas en puentes en voladizo, o cualquier equipo planteado en los procedimientos de construcción también serán diseñados en esta etapa.

El diseño de la subestructura, que en muchos casos comprende la cimentación compuesta por el cabezal sobre los pilotes, o bien una zapata para apoyo directo, la pila de apoyo y su cabezal para soporte de la superestructura y los estribos con sus cabezales, se diseñan también por este equipo de especialistas, aunque los cálculos suelen ser más tradicionales y menos complicados que en la superestructura, salvo en el caso de diseños especiales de las pilas por requerimientos arquitectónicos o por necesidades de resolver fuerzas transversales.

El producto final del diseño estará presentado principalmente en las memorias de cálculo, diagramas y croquis con secciones transversales de diseño de los diferentes elementos. Toda esta información se convertirá en el proyecto ejecutivo con el trabajo del grupo al que corresponde la siguiente etapa que es la elaboración del Proyecto Ejecutivo.

### **Elaboración del Proyecto Ejecutivo**

La elaboración del proyecto ejecutivo para la construcción de un puente consiste en la elaboración de los planos y documentos con descripción de los trabajos, procedimientos de construcción y especificaciones, suficientes para que la idea elaborada para su concepción sea transformada físicamente en el puente.

Se recopilarán todos los estudios previos que sirvieron de apoyo al proyecto, incorporándolos en la memoria de cálculo. De estos estudios

se tomará toda la información para generar el proyecto ejecutivo. Uno de los principales planos es el plano de cimentación basado principalmente en el estudio geotécnico para cimentación

Un segundo plano elemental es el plano general del puente, en el que se presenta en primer lugar un perfil del terreno natural con el perfil del puente, en el que se muestra el nivel de cimentación, consistente en el trazo del perfil de la zapata con su nivel de desplante, o en su caso, el nivel del cabezal que cubre a los pilotes.

Se trazan también en este plano los perfiles de las pilas, hasta el nivel de la rasante de la carretera, su ubicación con sus cadenamientos y niveles exactos y toda la geometría general. En el perfil de la superestructura se muestra si la solución es mediante dovelas o mediante vigas.

Se acompaña en el mismo plano una planta con la topografía por lo menos hasta el derecho de vía, donde se plasma el eje de la carretera con sus cadenamientos y el ancho del puente. Se traza una sección transversal de la superestructura con lo cual se define el tipo de puente, ya sean vigas, cajones, dovelas etc.

Se indican los cadenamientos exactos de las pilas y se proyecta la planta de la zapata y de las pilas sobre las zapatas. En este mismo plano se describen los materiales de construcción, sus características, resistencias por cumplir y especificaciones a las que hay que sujetarse; un croquis con la ubicación del puente, una lista con los nombres de los planos que constituyen el proyecto ejecutivo y sobre todo, una lista de los materiales que se utilizarán para la construcción del puente y las cantidades de cada uno de ellos que será necesario utilizar para la construcción. Este plano general es una descripción de la geometría

general del puente con sus dimensiones, materiales de construcción y cantidades de obra.

Además del plano general, se elaboran planos detallados de cada uno de los elementos que constituyen el puente en el orden en el que será necesario que se construyan. Se empezará por la cimentación de cada uno de los apoyos, es decir, los dos estribos y cada una de las pilas de apoyo. Debe recordarse que cada uno de los elementos descritos en los planos ya fue diseñado estructuralmente, es decir calculado para que resista todas las cargas, y que en esta etapa, se trazaran los elementos calculados con su geometría exacta en relación con el terreno natural y con los otros elemento que constituyen el puente y con los cuales se conecta o interactúa. Estos planos contienen los detalles suficientes para que los elementos del puente en ellos descritos puedan construirse tal como fueron concebidos.

De la cimentación en primer lugar se necesita un plano con la geometría del elemento descrito. El plano con la geometría indicará la profundidad o nivel hasta el cual será necesario excavar, la inclinación de los taludes de corte de la excavación, las dimensiones y niveles topográficos exactos necesarios para las maniobras de excavación e instalación de maquinaria. Por ejemplo si la cimentación es mediante pilotes, en el plano de la geometría se indicará la longitud de los pilotes y su diámetro o sección transversal, si son pilotes de concreto o de acero y el estrato en el que deberán incrustarse.

Además del plano con la geometría, se dibujará el plano o planos que se necesiten para la descripción del elemento y su construcción. Este plano se llama refuerzo del elemento, ya que se dan todos los detalles del acero de refuerzo, o el preesfuerzo necesario, y en general todos los datos para la fabricación del elemento. En este plano de refuerzo del

elemento se presenta la lista de materiales con sus cantidades necesarias para la fabricación de esa pieza en particular.

De cada uno de los elementos que se necesitan para ir construyendo el puente, se van elaborando los planos necesarios. En muchos casos, se necesitan dos planos para cada pieza o elemento, estos planos son: el plano con la geometría y el plano con el refuerzo. Algunas veces se necesita para el refuerzo más de un plano por requerimientos de la complejidad de la pieza, como sería el caso de las dovelas cuyo tamaño abarca la sección transversal completa de la superestructura del puente.

En el caso de cimentación profunda se necesitan planos tanto de geometría como de refuerzo para los pilotes, planos para el cabezal sobre los pilotes y planos para el arranque o unión de la pila con el cabezal. Se necesitan planos independientes para cada uno de los apoyos del puente.

En el caso de cimentación por apoyo directo mediante zapatas, se necesitan planos para la zapata y en su caso para la unión o arranque de la columna. Igualmente se necesitan planos para cada una de las zapatas y también de los estribos.

Para las pilas o columnas también se elaboran planos para su geometría y planos para su refuerzo. Se requieren planos para cada una de las pilas y para sus cabezales.

Se debe recordar que todos los planos de refuerzo de cada uno de los elementos, tiene su lista de materiales, con las cantidades necesarias de cada material requerido. Tiene también una descripción del procedimiento de construcción con el suficiente detalle para que un técnico en la materia pueda interpretarlo adecuadamente.

Igualmente para la superestructura se requieren planos tanto de la geometría como del refuerzo de cada uno de los elementos, ya sean vigas pre fabricadas de concreto con preesfuerzo o postensado o vigas de acero. Si se trata de dovelas igualmente se dibujan todos los planos necesarios según el procedimiento de construcción del puente, ya que pueden ser prefabricadas y colocadas luego con grúa o coladas en el lugar y post tensadas in situ. En todos los casos se proporciona todos los datos, tanto de geometría como de refuerzo en la cantidad de planos que sean necesarios para que quede muy claro lo que se requiere en el puente.

En el caso de los elementos postensados, se necesitan además de los planos particulares de cada dovela, un plano de conjunto en el que se indique con detalle el proceso de preesfuerzo en todo el conjunto estructural y datos del tensado inicial de los cables de preesfuerzo.

Se termina con los planos para la losa superior para el paso de vehículos en el caso de puentes de vigas, ya que en el de dovelas viene comprendida en la sección, y con el plano para los parapetos del puente. En este plano se incluyen detalles de las juntas de dilatación, bancos de apoyo, tipos de apoyos de traveses y accesorios.

En el caso de puentes especiales, como los atirantados o suspendidos, los planos requeridos son completamente similares. La diferencia es el requerimiento adicional de que las pilas o algunas de ellas se prolonguen hacia arriba para convertirse en el pilón o mástil sobre el que se apoyarán los cables de los tirantes y que se dibujarán según el diseño estructural previo. En cuanto al tablero de la superestructura, se forma también mediante dovelas que pueden ser igualmente prefabricadas, de

acero o de concreto, o coladas in situ según las condiciones muy particulares de cada lugar.

Dependiendo del tamaño del puente, un proyecto ejecutivo puede estar formado por entre 20 y 100 planos. Además, el proyecto debe acompañarse de todos los estudios previos realizados, que son: Topohidráulico e Hidrológico, Cimentación, Riesgo Sísmico Local y de Incidencia de Viento. Se acompaña de un documento en el que se realiza una descripción de los trabajos y de las Especificaciones de Construcción del Puente. Un documento especial es el de la descripción detallada del procedimiento de construcción.

El documento del Procedimiento de Construcción, que fue elaborado en la etapa previa al cálculo estructural, se acompaña por los planos descriptivos necesarios, y que comprende las etapas de prefabricación, transporte, montaje y operación durante la construcción; es muy importante cumplir con toda precisión durante la construcción, ya que el diseño de la estructura fue elaborado siguiendo ese proceso y cualquier cambio invalidará el diseño y puede provocar un colapso.

## **PROYECTO DE TUNELES**

### **Introducción**

Los túneles carreteros son necesarios en una vía rápida de comunicación que cruza tramos de montaña, con la finalidad de mantener un desarrollo del alineamiento tal que permita la fluidez y confort a los usuarios. Los túneles son obras caras, y se justifican cuando el cambio de la ruta a otra opción sea de mayor longitud y

menos directa con respecto a la unión del origen con el destino o cuando se tengan grandes movimientos de tierra en la construcción.

En la etapa de elección de ruta se plantean todas las posibilidades y se hacen los cálculos de costos tomando en cuenta los de construcción, mantenimiento, conservación y de operación. Para carreteras con alto volumen de tránsito, los costos de operación son muy importantes, y cualquier aumento en la longitud de la ruta los eleva considerablemente; en estos casos es cuando se justifica cualquier inversión inicial alta, que será recompensada con la disminución de los costos de operación tan pronto como la carretera empiece a funcionar.

En la etapa de elección de ruta cuando se opta por la alternativa de construir túnel, en campo se efectúa el del trazo definitivo, se realizan los estudios de campo para el diseño del túnel o túneles. Estos estudios son: geológico de detalle o de superficie, de exploración mediante sondeos profundos, de exploración indirecta mediante geofísica compuesta por sondeos eléctricos y prospección geosísmica. Con esta información se realiza el diseño estructural del túnel y finalmente la elaboración de los planos del proyecto ejecutivo del túnel.

En el proyecto de los túneles se tiene en cuenta que entre menor sea la longitud de un túnel, es menos complicada su construcción, ya que para túneles de más de 100 m de longitud es necesario colocar iluminación, y para longitudes mayores se necesita ventilación. En esos casos se requiere una casa de máquinas cercana a uno de los portales con accesos, estacionamiento y demás facilidades para un mantenimiento y conservación adecuadas. En casos especiales de túneles con longitudes del orden de un kilómetro o mayores, se considera la construcción de un túnel adicional pequeño, paralelo y con algunos accesos al principal,

para que sirva como acceso, auxilio y evacuación en casos de accidentes.

Al igual que en los puentes, los pasos para conseguir el proyecto ejecutivo son: Diseño Arquitectónico, Diseño Estructural y elaboración de Planos del Proyecto Ejecutivo.

### **Diseño Arquitectónico**

Es muy importante estudiar el impacto visual en los portales de los túneles. Los cortes de acceso a los portales son por lo general muy altos, y debe cuidarse que sean estables y sobre todo que no tengan posibilidad de graneos o pequeños derrumbes. Es costumbre cubrir con concreto lanzado toda la superficie de estos taludes, lo cual es bueno desde el punto de vista de protección del talud contra la erosión e intemperismo, pero presenta un impacto visual gris y poco atractivo. Es muy conveniente colocar a la entrada del portal un pequeño tramo de túnel falso, con diseño geométrico agradable cubierto de vegetación, diseñado con la finalidad de que el usuario entre al túnel con una sensación de seguridad, sin incertidumbre, y que a su paso, se encuentre con suficiente iluminación y visibilidad como para darle absoluta confianza. Es necesario que todos los túneles tengan un diseño arquitectónico adecuado de sus portales.

Estos temas son los que atiende el proyecto arquitectónico del o los túneles, ya que si son varios túneles en el tramo, que generalmente están a distancias cortas entre sí, debe cuidarse que armonice la arquitectura entre ellos. Se preparan modelos en computadora que muestran el aspecto del túnel y con ellos se puede estudiar el impacto visual, y tomar decisiones en cuanto al tipo de entrada más conveniente.



En caso de túneles largos que requieran una casa de máquinas para iluminación y ventilación. El diseño arquitectónico debe estudiar también su ubicación y diseño geométrico, para que esa construcción que forma parte del paisaje del túnel sea también agradable al usuario.

### **Procedimiento de Construcción**

El procedimiento de construcción de un túnel se refiere principalmente al proceso de excavación del túnel, y depende en primer lugar de las condiciones geotécnicas del sitio reportadas por los estudios geotécnicos.

Cuando las condiciones geotécnicas detectadas en el estudio son desfavorables e inciertas, como puede ser en alguna zona donde existen fallas, discontinuidades, estratos blandos de arcillas, o rocas muy alteradas o suaves, es necesario excavar un tubo piloto dentro de la misma sección del túnel definitivo o paralelo a él. Este tubo será más fácil de sostener en caso de atravesar materiales poco resistentes, y con este tubo se van conociendo las verdaderas condiciones del material del túnel completo y previendo las medidas reales de sostenimiento.

En condiciones normales, se planea la excavación del túnel por métodos convencionales, como puede ser el de excavación con picadora neumática y retiro de material con trascabo y camiones, o bien con explosivos y retiro de rezaga. Para este tipo de excavación se aplica el método Austriaco, el cual consiste en la excavación del túnel en dos fases; primero se hace la excavación de la parte superior de la sección del túnel en toda su longitud hasta abrir paso de lado a lado pero solo de la parte superior del túnel, siendo más seguro el sostenimiento de esa parte superior. Posteriormente se excava la parte inferior, permitiendo un proceso más fácil tanto para excavar como para sostener.

En casos especiales de túneles de longitud muy grande, puede justificarse el uso de máquinas tuneladoras cuya inversión inicial es alta pero que en longitudes grandes se obtiene un costo unitario más bajo con mejor rendimiento y menos dificultades en la excavación. Las dimensiones de una de estas máquinas tendrían que adaptarse a las del túnel requerido para la carretera. En México no se han usado este tipo de máquinas en carreteras.

El método Austriaco es el de aplicación más adecuada en el caso de carreteras, a menos que las condiciones geotécnicas del sitio requieran de la construcción de un tubo piloto. Una vez que se decide el procedimiento de construcción se pasa al diseño estructural que será congruente con el procedimiento escogido.

El Director General del proyecto, junto con un ingeniero Especialista en Túneles con un ayudante que es un ingeniero también Especialista en Túneles, son los que decidirán los procedimientos de construcción. El resultado es solo un documento con la descripción del método, que posteriormente acompañará a todos los planos del proyecto ejecutivo en los cuales se describe el procedimiento de construcción de acuerdo con las estructuras a que se refiera cada plano.

### **Diseño Estructural**

Las estructuras principales que son necesarias calcular y diseñar son la de sostenimiento y la de revestimiento. La primera es la que se coloca inmediatamente después de cualquier avance en la excavación y que apuntala todo el techo y los laterales, haciendo que el terreno natural recién excavado se apoye en un marco de acero, con el fin de asegurar su estabilidad durante la construcción y después de ella. La segunda es la cubierta de concreto colado en el sitio, que cubre toda la superficie del

túnel, y que se coloca cubriendo y reforzando la estructura de sostenimiento y dando el acabado y apariencia final del túnel a fin de proporcionar resistencia a largo plazo y mejorar su funcionalidad.

Junto con la construcción de estas estructuras se debe diseñar el uso de concreto lanzado, de anclas de fricción, del sistema de drenaje y de impermeabilización para evitar filtraciones hacia el revestimiento. Se debe diseñar el pavimento y el sistema de drenaje superficial en los cortes de acceso al túnel. Adicionalmente es necesario diseñar la inclinación de los taludes de los cortes en los portales, con sus medidas de protección y precauciones necesarias para el inicio de la excavación del túnel (Enfilaje).

En primer lugar se debe diseñar la estructura de sostenimiento, por cada metro de avance en la excavación de túnel, se coloca un marco de acero que detenga al macizo rocoso que constituye el terreno natural evitando cualquier derrumbe. De acuerdo con la calidad de la roca o material que se esté excavando, estos marcos podrán colocarse a distancias que van desde medio metro hasta metro y medio. En caso de rocas de muy buena calidad hasta puede prescindirse de los marcos, recurriendo como alternativa a colocar anclas de fricción.

Debe diseñarse el calibre de cada marco y la separación entre marcos, el diseño depende de la calidad del macizo rocoso o suelo que se esté excavando. Es necesario conocer la fuerza que debe soportar el marco para evitar que se exceda su resistencia y se produzca algún derrumbe. Es muy difícil conocer estas fuerzas.

El objetivo de los estudios de campo, geología de detalle, exploración directa mediante sondeos profundos, exploración indirecta mediante geofísica, ensayos de laboratorio y estudios geotécnicos, tienen como

objetivo conocer las características de los materiales que se encontrarán al excavar el túnel y en toda su zona de influencia . Estas características son las que servirán para el cálculo de esfuerzos y deformaciones que se generarán al abrir la excavación.

En la mayoría de los casos, las condiciones de los materiales a lo largo de una trayectoria de túnel son muy variables e impredecibles. A pesar de lo minucioso que hayan sido los estudios, habrá siempre un grado de incertidumbre que solo se resolverá al abrir la excavación. Sin embargo se hará el diseño con la información máxima disponible, dejando en todo caso como variable la separación de los marcos que se resolverá conforme avance la excavación.

El diseño estructural se hace en base a un modelo geológico-geotécnico del macizo rocoso, calculando los esfuerzos por peso propio en la zona del túnel antes de la construcción, y luego, simulando la excavación, calcular la nueva distribución de esfuerzos y deformaciones que ocurrirían con motivo del retiro del material excavado. Para ello es necesario proyectar en tres dimensiones las características geométricas de los materiales encontrados, es decir contactos, fallas, estratos, plegamientos, etc., y enseguida darles las características reológicas que se encontraron en cada material diferente por medio de ensayos de laboratorio y estudios de campo que previamente se realizaron.

Antiguamente, antes de contar con las computadoras, el proceso matemático para el análisis de esfuerzo y de formaciones tenía que hacerse en forma manual utilizando el método de elementos finitos, lo que significaba un proceso muy complicado, especializado y muy tardado. Ahora, con la ayuda de las computadoras y de los programas de cómputo especializados en el cálculo de esfuerzos y deformaciones en diversos modelos, el asunto es menos complicado; sin embargo, la

elaboración del modelo de acuerdo con la topografía y los materiales encontrados en campo, todavía es un proceso muy laborioso y muy especializado.

Una vez que se conocen los esfuerzos que es necesario soportar para evitar caídos, se diseña un marco metálico con las dimensiones necesarias, para cada uno de los tramos con diferentes materiales que atraviesa el túnel, estableciendo también el espaciamiento necesario entre marcos.

No está de más insistir en la importancia de los estudios de campo para conocer las características de los materiales en los macizos rocosos. Todos los cálculos matemáticos descritos arrojarían resultados erróneos si las características de los materiales en los modelos difieren de las que realmente se encuentren en el campo.

Siendo los macizos rocosos tan heterogéneos y erráticos, investigadores en el ramo de geotecnia y en especial en túneles, como los profesores Bienasky y Barton, han estudiado el comportamiento de los macizos rocosos y clasificado las rocas con parámetros de acuerdo a sus características visibles y que se pueden establecer análisis de esfuerzos y deformaciones.

De acuerdo con estas clasificaciones, llamadas RMR (Rock Mass Rating) y Q (Calidad de la Roca de Barton), han establecido recomendaciones generales para los sistemas de sostenimiento en túneles. A la fecha, es indispensable el monitoreo constante de la excavación en túneles, mediante el cual después de cada metro de excavación se revisa el estado de la roca encontrada, clasificándola con el RMR de Bienasky o el Q de Barton para confirmar si el sostenimiento

proyectado corresponde a la roca supuesta para los cálculos, o si es necesario hacer algún ajuste en campo.

Un ingeniero civil especialista en cálculo estructural se encarga del diseño de los marcos metálicos necesarios para el sostenimiento, utilizando los perfiles estructurales, es decir el tipo de vigas o canales metálicos de las dimensiones adecuadas para que la estructura pueda ser parcialmente prefabricada y pueda ser montada en el campo con la mayor rapidez posible. También, de acuerdo con el tipo de roca y la carga esperada se establecerá el espaciamiento entre los marcos.

El revestimiento de concreto reforzado colado en el sitio del túnel, será diseñado por el ingeniero especialista en estructuras a partir de los esfuerzos esperados en la excavación que se obtuvieron con el modelo matemático.

Otros diseños estructurales necesarios son los correspondientes al pavimento y a los taludes de los cortes de acceso a los portales del túnel. Es costumbre colocar un pavimento de concreto hidráulico, ya que en general las labores de conservación serían menores en comparación con un pavimento asfáltico, y el riesgo de incendio también sería menor.

El mismo modelo del macizo rocoso elaborado para el diseño estructural del túnel, se utiliza para el diseño de la inclinación de los taludes de la excavación de acceso a los portales. La inclinación y las medidas de sostenimiento para los taludes, tienen un factor de seguridad mayor que en el resto de los taludes de la carretera, ya que es necesario que el usuario tenga una sensación de seguridad y confianza absolutas al entrar al túnel. Anclas sobre el talud de los cortes y protección contra erosión e intemperismo cubriendo la superficie del talud mediante la

técnica de concreto lanzado, son prácticas habituales en la excavación de estos cortes.

En la mayoría de los túneles, como una medida de seguridad y para mejorar el impacto visual, se proyecta un tramo de túnel falso. Se llama así a una estructura a manera de túnel que se construye sobre la corona del camino, después de que ha sido excavado en su totalidad el corte de acceso al túnel. Esta estructura con una longitud del orden de 15 m puede cubrirse, lateralmente y por la parte de arriba en una altura de dos o tres metros, con un relleno de suelo o roca sobrantes de las excavaciones de los cortes; este relleno se foresta con vegetación agradable, además de que se le da al túnel falso, generalmente de concreto, una geometría arquitectónica como puerta de entrada al túnel. La estructura del túnel falso se diseña para soportar las cargas del relleno depositado sobre la estructura, además de su peso propio.

Diseños especiales son los correspondientes a la iluminación y la ventilación. Ambos sistemas requieren un cuarto de máquinas y de recepción de energía que debe construirse cercano a una de las entradas del túnel. Ingenieros especialistas en estas ramas son necesarios para la realización de los diseños que deberán adecuarse a la longitud de túnel. El diseño de la iluminación se inicia con la determinación de la luminosidad requerida para confort, y con el diseño de las lámparas necesarias para proporcionarla. El sitio y altura de las lámparas, así como la separación entre ellas previendo un acceso adecuado para reparación y mantenimiento, son parte esencial del diseño, así como los ductos del cableado y registros en caso necesario. El cuarto de máquinas se diseñará para albergar el equipo de transformadores, medidores, controladores y vigilante.

La ventilación requiere también del diseño de un proyectista especializado, quien de acuerdo con la geometría del túnel proyectara el equipo necesario para la extracción del aire con exceso de bióxido de carbono y el inyectado de aire fresco. Es necesario el diseño de ductos adecuados con sus abanicos de extracción y ventilación.

Para las estructuras de sostenimiento, de revestimiento y de pavimento, como resultado del diseño debe tenerse una memoria de cálculo en la que se describa el método de cálculo y su procedimiento, con la secuencia de los cálculos efectuados y sus resultados, los parámetros de cálculo y un comentario sobre la obtención de estos parámetros.

Se presentarán los planos obtenidos en los programas de cálculo en los que se plasmen las características del macizo rocoso, la disposición de los estratos o unidades geológicas y sobre todo, los esfuerzos del macizo en el área del túnel generados por la excavación. Deben realizarse planos con el detalle de la geometría de las estructuras y su ubicación en la excavación del túnel, la descripción de los materiales que deben usarse para la construcción y sus especificaciones en cuanto a calidad de los materiales empleados.

En el caso de los taludes de las excavaciones en los portales, se presentará también la memoria de cálculo con la descripción y resultados de los análisis y se presentarán planos con vistas de perfil y de frente de los cortes, en las que se apreciarán las inclinaciones de los taludes obtenidas de los cálculos y las medidas de sostenimiento y protección diseñadas.

Se presentarán también planos de detalle de los dispositivos de sostenimiento, como anclas, concreto lanzado, etc. Igualmente para el



pavimento, el resultado del diseño estará constituido por la memoria de cálculo y los planos de detalle de la estructura del pavimento.

El señalamiento del túnel dependerá de la longitud y del alineamiento horizontal a su llegada; es decir, si se llega al túnel en una zona de curvas o por medio de una recta, se deben colocar las señales preventivas e informativas indicando la proximidad del túnel, restrictivas indicando la velocidad con que deberá circularse en el túnel y señalando, en su caso, que no debe haber rebases dentro del túnel y que deben encenderse las luces del vehículo dentro del túnel.

Considerando que hay una norma internacional respecto a las dimensiones de las señales, color, tamaño de letras, geometría, altura, calidad de la pintura, capacidad reflejante, etc., basta con que en el plano se indique un croquis con la ubicación exacta de la señal, el tipo de información que se quiere dar, y se remita a la norma para el cumplimiento de todas las especificaciones que debe cumplir la señal.

### **Elaboración del Proyecto Ejecutivo**

La elaboración del proyecto ejecutivo para la construcción de un túnel consiste, como en el caso de los puentes, en la elaboración de los planos y documentos con descripción de los trabajos, procedimientos de construcción y especificaciones; toda esta información deberá ser suficiente para la correcta transformación de la idea elaborada para la concepción del túnel, en una realidad física en la carretera.

Como parte del proyecto se tienen ya los tres planos que son: el geológico, el geofísico y el geotécnico, que fueron el resultado de los estudios geotécnicos de campo, de laboratorio y de gabinete, y que son la base para el diseño. Estos planos ya fueron descritos y, después del

plano general, constituyen el inicio de la presentación del proyecto ejecutivo.

El plano general del túnel es la presentación formal del proyecto ejecutivo. Es un plano en el que se muestra la planta y el perfil del túnel dentro de una representación topográfica con el detalle de los cadenamientos (kilometrajes exactos) de ubicación, así como la profundidad con respecto al nivel natural de terreno. Además de mostrarse estas características del túnel se acompañan todos los datos de topografía para que se pueda reproducir en el campo su eje. En este mismo plano se incluye una sección tipo, es decir una vista del túnel en la que se aprecien sus dimensiones, como ancho, altura, número de carriles de circulación y forma de la sección.

Por último se incluye una tabla con el resumen de todas las cantidades de obra necesarias para la construcción, como son: metros cúbicos de excavación, kilogramos de acero estructural para marcos de sostenimiento, metros cúbicos de concreto para revestimiento, metros cúbicos de concreto lanzado, metros cúbicos de concreto para pavimento, kilogramos de acero de refuerzo en revestimiento, etc.

Enseguida se van elaborando todos los planos necesarios para ir definiendo ordenadamente los pasos necesarios para la construcción. Primeramente se elaboran los planos correspondientes a los cortes de acceso a los portales, normalmente se elaboran tres planos para cada uno de los cortes en los accesos, aunque nunca está limitado el número de planos, es decir, se harán todos los planos que sean necesarios.

Los tres planos son el plano de obras, el plano de secciones transversales y el plano de excavación. En el plano de obras se presentan los detalles de la inclinación de los taludes tanto laterales

como el talud frontal, con los detalles topográficos y de ubicación de las medidas de sostenimiento, es decir, tipo de anclas, concreto lanzado y lo que sea necesario. Se incluyen los detalles geométricos y estructurales de las anclas y una descripción del procedimiento para su construcción, así como también para el concreto lanzado en caso que se requiera. En este plano se incluye la lista de materiales correspondiente a las anclas, concreto lanzado y lo que sea necesario como sostenimiento.

Sigue el plano de secciones transversales de construcción de la excavación en el que se indican secciones a cada 10 m o menos si es necesario para detallar la geometría que tendrá la excavación. En este plano se incluye solo información de la geometría del corte.

El último plano para los cortes de los accesos es el de la excavación; en este plano se indica en forma general la geometría de la excavación, adjuntando planta, perfil y vistas frontales de la entrada del túnel detallando las dimensiones de la excavación; se adjunta como información principal de este plano, el cálculo del volumen de excavación y el resultado del cálculo con el volumen total de excavación para el corte de acceso al portal correspondiente.

Terminados los planos de los cortes de acceso, se procede a la elaboración de los planos del túnel. Se empieza con los planos estructurales de los marcos metálicos de sostenimiento. Puesto que ya se tiene el diseño de estos marcos de acero, se procede a la elaboración de los planos con el detalle geométrico para su construcción, y con la especificación de calidad y características del acero estructural, de la soldadura, de los tornillos, placas de conexión y demás detalles necesarios.

Posteriormente se continúa con los planos estructurales del revestimiento y los túneles falsos; estos planos contienen el detalle necesario para la construcción de la estructura de revestimiento que en muchos casos es la misma que se prolonga para formar un túnel falso. La estructura está formada por una zapata que se cuela primero, y por el túnel que se cuela con el apoyo de una cimbra móvil que se desplaza a manera de carro. El plano debe tener los datos exactos para la colocación del acero de refuerzo, así como el tipo, cantidad y separación de las varillas. Se especifica la resistencia del concreto, su revenimiento y para el empalme y soldadura de las uniones de las varillas de refuerzo.

Como siguiente paso, se elaboran los planos correspondientes a los procedimientos de construcción y medidas de sostenimiento para diferentes tramos del túnel. La longitud total del túnel se divide en tramos en los que por su condición geotécnica se ha diseñado un sostenimiento particular y en los que aplica un procedimiento de construcción particular.

Para cada uno de los tramos en que se divide el túnel se necesita un plano en el que se presenta una sección transversal de diseño, ya con el revestimiento y sobre todo con el detalle geométrico de ese tramo, donde se deduce la línea teórica de excavación y el sitio exacto en el que debe colocarse el marco metálico de sostenimiento. Desde luego se indica el tipo de marco que debe colocarse, el espaciamiento entre marcos y la manera en la que debe asegurarse el apoyo inmediato del terreno natural recién excavado en el marco metálico que se ha colocado; normalmente este apoyo se logra aplicando concreto lanzado con acelerante de fraguado y reforzado con fibras.

Si el tramo de túnel se desarrolla en una curva las secciones transversales son diferentes a los tramos de recta y varían para cada

sección conforme avanza la excavación, por lo que estos casos se requieren planos para secciones por lo menos a cada cinco metros donde se muestre con detalle la geometría de cada sitio.

El número de planos con los procedimientos de construcción y medidas de sostenimiento para cada tramo en los que se ha dividido el túnel, es muy variable dependiendo de la longitud del túnel y del número de tramos en los que se ha dividido. Desde luego, se harán los planos que sean necesarios para explicar con todo detalle el proceso de excavación del túnel.

Inmediatamente después de que se ha excavado el túnel y colocado su sostenimiento, es necesario instrumentarlo, es decir colocar los instrumentos de medición para ir monitoreando los movimientos que pudiera tener el túnel con tendencia a cerrar la excavación o derrumbarse. Estas mediciones son de convergencia, es decir de la tendencia del túnel a cerrarse (converger).

Es necesario elaborar un plano de instrumentación, en el cual se establecen las especificaciones de colocación de los aparatos de medición, indicando el tipo de aparato necesario y su ubicación en la sección del túnel, especificando las mediciones que deberán hacerse en cada sección, con qué periodicidad, como deberán reportarse y a qué distancia se deberán colocar cada una de las secciones de medición.

Después del plano de instrumentación, se elabora el plano o planos de impermeabilización. La impermeabilización del túnel consiste en la colocación entre la superficie un tanto irregular que se obtuvo al cubrir la excavación y los marcos metálicos de sostenimiento, y la superficie del extradós del revestimiento, con dos membranas, una geotextil para captar y desalojar el agua que pueda venir de filtraciones, y una

membrana impermeable que impida el paso del agua hacia la estructura de revestimiento. Al colocar estas membranas en toda la longitud del túnel, y cubriendo toda la sección transversal, el revestimiento se colocará prácticamente haciendo contacto con la membrana impermeable.

En el plano de impermeabilización se detallará la manera en la que deben colocarse las membranas, sus especificaciones, dimensiones, cantidades de obra y todo lo necesario para la correcta impermeabilización del túnel.

Enseguida se elabora el plano de Drenaje. En este plano se considera el drenaje superficial sobre el pavimento del túnel y el desalojo del agua infiltrada en la membrana geotextil que impermeabiliza al túnel. Se representa la solución del drenaje superficial como si fuera drenaje urbano, es decir, se desaloja el agua mediante coladeras y ductos en la orilla de la guarnición y bajo la banquetta del túnel, diseñando los registros que sean necesarios y los desagües hacia cunetas o canales fuera del túnel.

El drenaje de infiltraciones, también es captado en registros y conducido en ductos hacia afuera del túnel. Toda esta información debidamente detallada, debe consignarse en el plano con las especificaciones y dimensiones; se termina el plano, como todos los aquí descritos, con la lista de cantidades de obra correspondientes.

Se termina la elaboración del proyecto ejecutivo con la incorporación de los planos correspondientes a la construcción de la casa de máquinas para iluminación y ventilación, los planos para la instalación de la iluminación dentro del túnel, los planos para la instalación de la

ventilación dentro del túnel, y el plano de señalamiento. Estos planos, ya fueron elaborados durante la etapa de diseño del túnel.

Los planos deben acompañarse con documentos de todos los estudios que se hicieron para el proyecto y diseño del túnel, como estudios geológicos, de exploración directa mediante sondeos con máquina perforadora, de exploración indirecta mediante estudios geofísicos y estudios geotécnicos para caracterización del macizo. También las memorias de cálculo para distribución de esfuerzos en el macizo y cálculos de las estructuras metálicas de los marcos de sostenimiento y de la estructura de concreto para revestimiento y túnel falso. En general debe tenerse la memoria y respaldo de todo el diseño del túnel.

## **PROYECTO DEL PAVIMENTO**

### **Introducción**

El pavimento es el primero que “da la cara” ante el usuario que juzgará el servicio que le proporcione una carretera. El grado de confort que sienta el usuario al conducir un vehículo en la carretera, estará regido por la rugosidad del pavimento, y la rugosidad es producto de la calidad del diseño, de la construcción y de la conservación de la carretera. La mínima rugosidad, proporcionará una superficie tersa y un alto confort en el manejo. La rugosidad aumenta si se tiene un diseño con espesores de pavimento insuficientes, si la calidad de los materiales es mala, o si la construcción es deficiente.

Aún si la calidad del diseño y construcción son muy buenas, y recién construida la carretera la rugosidad es mínima, a medida que empieza a circular el tránsito, el pavimento empieza su proceso de deterioro. El

pavimento es una estructura en la que cada una de las cargas del tránsito que pasa por ella, consume un porcentaje de su resistencia, ocasionando una deformación permanente.

A medida que van circulando los vehículos por el pavimento, sobre todo los vehículos pesados, se van acumulando pequeñas deformaciones, que con el tiempo producen rugosidad en el pavimento. Además, el mismo paso de los vehículos y el agua de lluvia, deterioran la superficie de rodamiento, produciendo el pulimiento de los materiales que hace resbaladizo al pavimento, ocasionando erosiones, desprendimientos y deformaciones superficiales de la carpeta; estos deterioros, sumados a las deformaciones permanentes acumuladas, van ocasionando un aumento en la rugosidad del pavimento en detrimento del confort que inicialmente pudo haber tenido la carretera. Es labor de los equipos de conservación mantener la rugosidad al mínimo posible, haciendo conservación adecuada.

El pavimento debe diseñarse para soportar las cargas impuestas por el tránsito, es decir, por el paso de los vehículos sobre la superficie de rodamiento. Las cargas se miden por el número acumulado de vehículos que vayan a pasar durante el período de diseño; este número es un pronóstico de acuerdo al estudio de tránsito que dio origen a la necesidad de proyectar la carretera.

El período de diseño es producto de una estrategia de inversión, ya que se puede hacer un diseño con resistencia de las capas inferiores para un período de 30 años, pero con resistencia de la carpeta o superficie de rodamiento para un período que pudiera variar de 5 a 15 años, dependiendo de la estrategia de manejo de inversión y flujo de caja.



Esta práctica se debe a que, si las capas inferiores del pavimento fallan, la reparación demandaría restaurar todo el espesor del pavimento, pero si la falla se ubica solo en la parte superior, cualquier restauración será más fácil y menos costosa; por ello un buen cimiento de la estructura del pavimento hará que la vida útil se prolongue por un muy largo tiempo, rehabilitando solo la capa superior cada vez que sea necesario; sin embargo, cualquiera que sea la estrategia aplicada, debe cuidarse que siempre se mantenga un nivel de servicio adecuado al confort de manejo del usuario.

### **Diseño de la Estructura del Pavimento**

El diseño del pavimento debe ser más que el planteamiento teórico para determinar los espesores de las diferentes capas. El proyectista debe conocer con exactitud los materiales con los que se construirá la terracería, su procedimiento de construcción, los bancos de materiales y los ensayos de laboratorio y todo lo concerniente con la calidad de materiales con los que contará para la realización de su diseño.

Debe conocer a fondo las características del drenaje y subdrenaje que se haya diseñado para la carretera, así como las condiciones hidrológicas de cada tramo, el tiempo de duración de las lluvias, su intensidad y el ciclo de ocurrencia de las precipitaciones anuales. Todos estos factores tienen incidencia directa en el diseño del pavimento.

Al llegar a esta etapa correspondiente al diseño del pavimento, ya se cuenta con el Estudio Geotécnico para el Diseño del Pavimento; este estudio se hizo junto con el Geotécnico para Proyecto de Terracerías, inmediatamente después de la topografía para la implantación en campo del trazo definitivo de la carretera.

Estos estudios forman parte del proyecto de pavimento, y de ellos el proyectista obtiene los datos de la resistencia de los materiales que constituyen la cimentación del pavimento, que en este caso es la parte superior de la terracería formada por una capa llamada capa subrasante. Mediante el estudio geotécnico de terracerías se tienen los bancos de préstamo de donde se tomarán los materiales necesarios para formar esta capa; a estos materiales se les hicieron ensayos de laboratorio para determinar su calidad y sus parámetros de resistencia. Es muy importante la cimentación del pavimento que estará formada con el material de la capa subrasante.

Uno de los problemas del diseño de pavimentos es que la resistencia de los materiales con que se construyen y, sobre todo, los de la cimentación donde se apoyan, varía constantemente; las variaciones se suceden muchas veces en un mismo día y sobre todo con las diferentes estaciones o épocas del año. El material de la subrasante o cimentación del pavimento es suelo areno-arcilloso, cuya resistencia medida con su módulo resiliente, varía notablemente al variar el contenido de agua y al variar también su densidad; en el campo, durante la vida útil del pavimento, la humedad y densidad de este material está variando constantemente en ciclos anuales, por lo que es necesario que el proyectista considere esta situación y conforme a los resultados del laboratorio del material, pondere su comportamiento y seleccione los parámetros de diseño adecuados a cada situación.

La carpeta asfáltica tiene también variaciones constantes en su resistencia, en ciclos diarios y estacionales. La variación de la resistencia de la carpeta asfáltica se debe principalmente a cambios en la temperatura que a su vez producen cambios en la viscosidad del asfalto con incidencia directa en la resistencia de la carpeta. La elección del tipo de asfalto es muy importante en el diseño de pavimentos, y

deberá hacerse en función de las temperaturas esperadas durante la vida útil del pavimento y en función de una estrategia de mantenimiento de un buen servicio del pavimento y un buen programa de aplicación de recursos o flujo de caja.

Los vehículos para los que debe diseñarse un pavimento son de pesos muy diferentes entre sí; la cantidad de vehículos que pasarán durante el período de diseño se obtiene a base de un pronóstico elaborado con datos históricos de crecimiento aunados a los pronósticos de desarrollo regional y de tránsito generado por la construcción de la carretera. Son datos imprecisos que deben manejarse cuidadosamente y que inciden notablemente en el diseño del pavimento.

El diseño del pavimento de una carretera es un asunto delicado que requiere de aplicación de criterio por parte del ingeniero especialista en geotecnia para la aplicación de los datos adecuados de diseño y de la estrategia de construcción, mantenimiento y rehabilitación del pavimento; etapas que deberán ser previstas desde el diseño original.

Dada la variabilidad de las características de los materiales con los que se construyen los pavimentos, así como de los materiales de su cimentación y de las cargas que soportará el pavimento, los métodos de diseño son de tipo "Mecanicista"; es decir, en base a un planteamiento analítico teórico de análisis de distribución de esfuerzos y deformaciones en las diferentes capas, se hacen ajustes correspondientes a lo observado en modelos de comportamiento de pavimentos en tramos de prueba. Con esos ajustes a los resultados analíticos se obtienen diseños que toman en cuenta tanto los fundamentos teóricos, como los resultados de comportamiento real medidos en los tramos de prueba.

Por la razón anteriormente expuesta hay varios métodos de diseño de pavimentos, más prestigiosos entre más recursos apliquen los organismos que los patrocinan para la construcción y monitoreo constante de tramos de prueba y equipo de investigadores que analicen y apliquen constantemente los resultados de dichos tramos de prueba a los métodos de diseño.

El método más reconocido internacionalmente es el Método de Diseño de Pavimentos de la AASHTO, que es la Asociación Americana de Carreteras Estatales y Transportes Oficiales. Esta Asociación americana cuenta con los mayores recursos para mantener un constante monitoreo de sus tramos de prueba y de su equipo de investigadores.

Debido a que los tramos de prueba AASHTO están sujetos a condiciones de temperatura humedad y medioambiente correspondientes a Estados Unidos, el mismo método recomienda que para su aplicación en otras regiones, se hagan observaciones y ajustes de acuerdo con la experiencia local.

En México, el Instituto de Ingeniería de la UNAM desarrolló un método de diseño similar con tramos de prueba patrocinados por la SCT. Este método, con su actualización de 1999, se aplica en México en forma satisfactoria; sin embargo, el diseño de un pavimento no es simplemente la aplicación de un método para obtener espesores de las diferentes capas del pavimento. El diseño implica que el proyectista conozca el sitio donde se construirá el pavimento y sus condiciones de variación estacional del clima, las condiciones del drenaje natural y el proyecto de drenaje y subdrenaje de la carretera, las condiciones geotécnicas que se encontrarán en los cortes y terraplenes de la carretera, los bancos de materiales con los que se construirán los terraplenes y el pavimento, los ensayos de laboratorio efectuados a esos bancos y los ensayos que el

mismo proyectista programe. En resumen, debe conocer con el mayor detalle posible todos los factores que intervienen en el proyecto y que afectan el comportamiento de los materiales de la estructura del pavimento.

El proyectista debe contar también con el estudio de Ingeniería de Tránsito que sirvió de base para identificar la demanda de servicio que condujo a la necesidad del proyecto carretero y, en conjunto con el Ingeniero en Jefe del Proyecto de Inversión, establecer la estrategia de construcción conservación y mantenimiento de la carretera, a partir de la cual se establecerá el período de diseño del pavimento.

En México se diseña el pavimento flexible o asfáltico considerando los métodos AASHTO y del Instituto de Ingeniería de la UNAM, obteniéndose una estructura de acuerdo con el criterio del proyectista, que será revisada también por el método del Instituto Norteamericano del Asfalto o por algún otro método como pudiera ser el Catálogo Español o el KENLAYER de Kentucky. El pavimento rígido o de concreto hidráulico se diseña por el método de la PCA (Portland Cement Asociación), y se revisa por el método AASHTO.

Una vez que el ingeniero proyectista tiene la información completa de la resistencia de los materiales que va a utilizar en el pavimento, así como del sitio y las condiciones de la obra, y tomando en cuenta también el tránsito que debe soportar el pavimento, procede a elaborar los cálculos utilizando los métodos señalados anteriormente, obteniendo una resistencia que debe soportar la estructura del pavimento (Número estructural AASHTO) y que puede conformarse acomodando espesores de los diferentes materiales con que cuenta para obtener la estructura óptima.

Puede usar por ejemplo base hidráulica y carpeta asfáltica; o base hidráulica, base asfáltica y carpeta asfáltica; sub-base, base hidráulica y carpeta asfáltica; sub-base y concreto hidráulico. El diseñador debe configurar dos estructuras de pavimento con los espesores adecuados para que satisfagan los requisitos de resistencia y que constituyan alternativas para una misma solución que podrán ser analizadas posteriormente cuando el avance en la construcción proporcione información adicional para decidir.

En carreteras de longitud grande, es muy posible que se encuentren tramos con diferentes características, que pueden ser diferentes volúmenes de tránsito y/o diferentes características de los materiales en la carretera y en los bancos de préstamo. En esos casos es necesario zonificar identificando diferentes tramos, cada uno de los cuales se tratará con un diseño de pavimento diferente.

### **Proyecto Ejecutivo y Procedimiento de Construcción**

El proyecto ejecutivo del pavimento se limita a la elaboración de secciones transversales con el detalle de las alternativas de estructura de pavimento para cada una de las zonas en las que se haya dividido la carretera. Las especificaciones de construcción se adjuntarán al documento con los Procedimientos de Construcción.

El documento con los procedimientos de construcción es una descripción detallada del proceso, en la que se van intercalando instrucciones de cómo construir las diferentes capas del pavimento, sus espesores, niveles y tolerancias, con las especificaciones que se deben cumplir en cuanto a calidad de materiales, calidad de acabados y de procedimiento constructivo.

Se hace mención de las normas particulares que se deben cumplir para cada tipo de material, y en caso necesario, se establecen especificaciones particulares que requiera el proyectista, y que se deban cumplir como necesidades de su proyecto en particular.

El documento descrito, debe incluir los volúmenes de obra correspondientes a cada una de las capas y materiales que se requieren para la construcción del pavimento.

El diseño de pavimento lo realiza un solo ingeniero con maestría en geotecnia, con un ayudante de ingeniero y el equipo de oficina. El ingeniero proyectista debe estar coordinado por el Director General del Proyecto Ejecutivo, con maestría en Vías Terrestres, con quien debe establecer las estrategias para definir el período de diseño, así como las alternativas de estructuración del pavimento.

## **PROYECTO DE MUROS DE CONTENCIÓN**

### **Introducción**

Los muros de contención, son estructuras que esencialmente sirven para sostenimiento de tierras. En carreteras se aplican principalmente para sostener terraplenes en laderas en las que de no colocar un muro, el terraplén se extendería hacia abajo de la ladera en una longitud tan grande que prácticamente no podría sostenerse. En estos casos el muro puede colocarse en la orilla de la corona del camino, o bien a media ladera. También los muros son necesarios en los accesos a los puentes o viaductos y en los estribos de los mismos puentes o viaductos, en cuyo caso su diseño y proyecto constructivo se elaboran junto con el diseño del puente.

En los entronques y pasos a desnivel es común que se necesiten muros. En todos los puentes se necesita por lo menos un muro en cada uno de los estribos para sostener el terraplén de acceso, evitando su derrame hacia la parte central del puente; comúnmente los aleros son muros laterales a los estribos de los puentes, que sirven para sostener el terraplén en la transición o llegada al sitio del puente.

Hay casos especiales en los que se requieren muros para sostener taludes en los cortes de la carretera. Esta necesidad normalmente se detecta durante la etapa de construcción, y es hasta entonces que se puede hacer el diseño correspondiente. Esta situación es especial y corresponde a una partida de imprevistos que debe considerar todo proyecto para cubrir las incertidumbres propias de una obra de gran magnitud.

Los muros pueden construirse de concreto reforzado, de mampostería, de mampostería seca, de tierra armada, de gaviones simples y de gaviones con tierra armada. Hay muchas empresas especializadas en la construcción de muros que han patentado su propio sistema con alguna variante de los materiales y sistemas arriba indicados.

Para el diseño de un muro, se necesitan en primer lugar los datos geotécnicos. Se necesita conocer la profundidad a que puede cimentarse el muro; sobre qué material o formación geológica puede apoyarse; con qué capacidad de carga debe diseñarse; y con qué tipo de material puede formarse el muro.

Esta información se requiere para cada sitio en particular donde se deba diseñar el muro y forma parte del estudio geotécnico que debe hacerse enseguida de la implantación en campo del trazo definitivo; para la



realización de este estudio geotécnico, se cuenta ya con la planta del trazo definitivo y con el perfil deducido de dicho trazo; aún no se tienen las secciones transversales sobre las que se diseñan los muros, pero el proyectista del geométrico debe indicar al geotecnista los probables sitios donde se requeriría muro, con la finalidad de que sean estudiados y se conozca la geotecnia con el detalle de los datos de cimentación para el muro.

### **Diseño Estructural del Muro**

La primera decisión importante que debe tomar el estructurista es la de escoger el tipo de material con el que deba construirse el muro. Esta decisión debe basarse tanto en el informe geotécnico acerca de los materiales disponibles en el sitio, como en la geometría del terreno natural y el terraplén proyectado, es decir, del análisis de la sección transversal de proyecto de la carretera. Los muros de mampostería y los de gaviones dependen de la posibilidad de conseguir roca de los cortes de la carretera y son preferibles ante la posibilidad de construir muros de concreto reforzado.

En el caso de puentes, viaductos y pasos a desnivel, es común el uso de muros de concreto reforzado, para poder evitar erosión, reducir espacios, dar sensación de seguridad al usuario, etc. En estos casos el proyecto de los muros forma parte del proyecto estructural del puente.

El diseño de un muro requiere de un análisis de capacidad de carga de la zapata de cimentación; de estabilidad del conjunto cimentación terraplén retenido y muro; y un análisis y diseño de la estructura del muro, que requiere su dimensionamiento y el cálculo del refuerzo necesario. Mediante el análisis de capacidad de carga de la zapata de cimentación, se debe dimensionar una zapata y analizar los esfuerzos

que transmitiría al terreno de cimentación, hasta alcanzar unas dimensiones óptimas de la zapata tales que los esfuerzos transmitidos al terreno correspondan al máximo permisible por compresión y a cero de tensión.

Mediante el análisis de estabilidad del conjunto se revisan todos los posibles círculos y planos de falla, para que en ninguno de ellos el factor de seguridad sea inferior a 1.5, o al factor acordado en cada caso; los círculos y planos de falla analizados incluirán aquellos que pasan por el terraplén y el terreno natural bajo el muro, así como los que pasan por la propia estructura del muro en casos de mampostería seca o gaviones.

Con el análisis estructural del muro, una vez que se cuenta con el análisis de estabilidad del conjunto, se calculan los esfuerzos producidos por los empujes de tierras sobre el muro y se calcula la dimensión y refuerzo necesarios para soportar dichos esfuerzos. Con este último análisis se obtiene el diseño del muro, es decir, sus dimensiones, tipo de material con que debe construirse y el refuerzo y características particulares del material estructural.

En cualquier diseño del muro el drenaje juega un papel primordial. Si el material del terraplén que debe retener el muro, se llena de agua, el empuje sobre el muro se aumenta potencialmente, ya que además del empuje de tierras se tendría el empuje del agua (hidrostático); esto debe evitarse diseñando un sistema de drenaje en el muro que elimine el agua del trasdós lo más rápidamente que sea posible; este sistema de drenaje se resuelve normalmente colocando un filtro de material permeable, graduado adecuadamente, en todo el respaldo o trasdós para que se recoja rápidamente toda el agua que pudiera presentarse y que se drene hacia afuera del muro colocando todas las salidas que sean necesarias a través del muro y especialmente en la parte inferior. Situaciones

especiales podrán resolverse con el uso de materiales geotextiles y soluciones especiales se tendrán en los casos de muros de gaviones.

Como resultado del trabajo, se deben tener las memorias de cálculo con los datos de los muros y las secciones transversales con su dimensionamiento y del conjunto terraplén-terreno natural-muro.

### **Proyecto Ejecutivo y Procedimiento de Construcción**

Esta etapa del proyecto de muros consiste en la elaboración de los planos necesarios para la construcción de la obra. De cada muro es necesario elaborar en primer lugar un plano general, que como en todas las obras presenta la ubicación particular y las dimensiones generales respecto al camino y al terraplén que se requiere sostener.

En este plano general se presenta una planta, un perfil y secciones transversales del camino y del muro; en ellas se detallan todas las dimensiones y los niveles del conjunto tal como fueron concebidas en la etapa anterior de diseño estructural y como se indican en la memoria de cálculo; también se presenta en la descripción detallada de los materiales con los que deberá construirse el muro y sus especificaciones; por último, este plano debe contener la lista con las cantidades de materiales y los volúmenes de obra necesarios para la construcción del muro.

El plano general se complementará con el número de planos necesarios para proporcionar todos los datos estructurales del muro. Se necesita un plano con los detalles de la cimentación donde se indicará el tipo de material en el que debe cimentarse el muro y las medidas que deben tomarse como acondicionamiento de la cimentación.

Se debe hacer la descripción geotécnica del sitio y de la cimentación como fue indicada en el estudio geotécnico; se darán en este plano todos los niveles y cadenamientos con precisión y se indicará un procedimiento de construcción particular para la cimentación. Desde luego se presentarán proyecciones en planta, perfil y secciones de la cimentación o zapata del muro, con todas las especificaciones que se deben cumplir en la zapata y en el terreno de cimentación.

Se necesitan los planos estructurales con el detalle del cuerpo del muro. En estos planos se presenta la geometría del muro y su refuerzo. Igualmente se presentan proyecciones en planta, en perfil y en secciones, para la comprensión exacta de lo que fue concebido en el diseño estructural; se presentan por último las características y especificaciones que deben cumplir los materiales de construcción.

Un plano especial es requerido para la solución del drenaje. En este plano se presenta con detalle la ubicación de las diferentes soluciones que haya considerado el diseño del muro; es muy importante que este plano refleje con exactitud lo que se tenga considerado en el diseño estructural. Debe contener las especificaciones que deben cumplir los materiales necesarios para el drenaje, la ubicación y dimensiones de los desagües y todo lo necesario para el cumplimiento de los sistemas de drenaje.

Los procedimientos de construcción pueden ir detallándose en cada uno de los planos. En el plano general puede indicarse el procedimiento general para la secuencia de los procesos de construcción y sus especificaciones, y en cada uno de los otros planos se puede ir estableciendo el procedimiento de construcción para cada una de las etapas de construcción de las diferentes partes del muro, como pueden ser: acondicionamiento de la cimentación, colocación de la zapata del

muro, etc., y así en cada uno de los planos del muro hasta terminar con el plano del drenaje.

## PROYECTO DE ENTRONQUES

### Introducción

El diseño de los entronques se hace en forma preliminar durante la etapa en la cual se hace también el diseño del trazo definitivo de la carretera. En esa etapa se tiene la topografía restituida de los vuelos bajos con escalas de 1:10,000 y/o 1:5,000, de los cuales se restituyen planos con escala 1:2,000 y con curvas de nivel a cada metro. Sobre esa topografía se diseña el entronque, obteniéndose planos de planta detallada del entronque pero con perfil deducido.

Al igual que en lo que respecta al trazo definitivo de la carretera, para los entronques se hace también el estudio topográfico de campo consistente en la implantación del proyecto obtenido de los planos restituidos.

El resultado final de este estudio de topografía para los entronques son los siguientes planos:

1. *Planta General del Entronque*; con los datos topográficos en planta de los caminos principal y secundarios con los datos de todos los puntos característicos del camino principal, de los cruces con los caminos secundarios, actual, y del proyecto de entronque así como con todos los datos de las ramas del entronque, destacando las referencias y los bancos de nivel, con el objetivo que todo el entronque pueda ser replanteado en campo antes de su construcción todas las veces que sea necesario.
2. *Planta Topográfica General*; de todo el entronque con curvas de nivel a cada metro.

3. *Perfil del Camino Principal*; en toda la zona del entronque.
4. *Perfiles Topográficos*; de cada una de las ramas del entronque.
5. *Planta Topográfica de Detalle*; de cada una de las zonas donde se requiera una estructura, puente o paso peatonal.

Con toda esta información topográfica se procede a la elaboración del proyecto ejecutivo del entronque.

## **Diseño**

El diseño del entronque toma en cuenta el tránsito, la topografía, el tipo de caminos que hay que enlazar, la arquitectura, los carriles de aceleración y desaceleración y todos los temas que influyen en el diseño. En esta etapa se tenía ya prácticamente el diseño definitivo, a no ser por las dudas en cuanto a la precisión de la topografía. En esta etapa, el diseño consiste en la revisión de la topografía respecto a la rasante en cada una de las gasas, haciendo los ajustes que se ameriten y dibujando las secciones transversales de cada una de las gasas.

Ya se había establecido el ancho de corona, el alineamiento horizontal y vertical, datos de curvas horizontales y verticales, etc., quedando pendiente para esta etapa solo la elaboración de los perfiles con la topografía levantada en campo, las secciones transversales de construcción y el cálculo de volúmenes de cada gaza.

Para el diseño de entronque debe contarse con el estudio geotécnico correspondiente, mediante el cual se puede conocer la inclinación de taludes de los cortes, el terreno natural sobre el que se desplantarán los terraplenes, los bancos de materiales para la construcción de terracerías

y los espesores especificados para las capas de terracería y de pavimento. El diseño geométrico en esta etapa termina con la elaboración de los diagramas de movimiento de tierras correspondientes a cada una de las gasas.

Un diseño especial para los entronques es el del señalamiento. En una planta del entronque se estudia la necesidad de señales, las cuales deben ubicarse a las distancias adecuadas para informar a los usuarios de la cercanía de un entronque, de los destinos a los que se puede ingresar, la distancia a que se encuentran esos destinos, el número de las carreteras, si son libres o de cuota, etc.

También debe guiarse al usuario del entronque regulando su velocidad, introduciéndolo a los carriles de desaceleración correspondientes y proporcionándole un acceso seguro a la nueva carretera. El señalamiento debe diseñarse de acuerdo a las normas SCT.

El diseño debe cuidar de la ubicación precisa de la señal en sitios muy visibles pero sin constituir un obstáculo que pueda representar algún peligro, lo cual también está previsto en las Normas. El resultado del diseño es un plano con las indicaciones de los sitios en los que se necesitan las señales; plano que se completará y detallará en la elaboración del proyecto ejecutivo.

### **Proyecto Ejecutivo y Procedimiento de Construcción**

El proyecto ejecutivo consiste en la elaboración de los planos constructivos. En primer lugar se tiene el plano de la planta general del entronque, el cual presenta el entronque completo en todo su conjunto. En una sección de este plano se muestra la topografía detallada del sitio y la ubicación del entronque y de todas las carreteras que enlaza.

En otra parte del plano se presenta la planta del entronque con todo el detalle de su geometría, es decir con los datos precisos de sus curvas horizontales, anchos y sobre anchos de calzada, referencias topográficas y tablas con datos geométricos para que la planta del entronque pueda ser reproducida en campo durante la construcción cuantas veces sea necesario. En este plano también se presenta el resumen con los volúmenes totales de obra desglosado en sus diferentes conceptos, como corte, terraplén, pavimento, etc.

En planos diferentes se presenta para cada una de las gazas del entronque un plano con la planta, perfil y secciones de construcción, cada uno de estos conceptos se muestra con toda la información similar a la presentación de los planos de kilómetro del proyecto del trazo definitivo; por ejemplo, el perfil tiene las elevaciones del terreno natural, de la subrasante, los datos de geotecnia, un diagrama de movimiento de tierras con la indicación de la ubicación del banco o bancos de materiales, la ubicación de bancos de nivel y referencias, así como toda la información necesaria para la construcción del entronque.

El plano de señalamiento es una planta del entronque con la ubicación y descripción de las señales necesarias, indicando la norma que deben cumplir y la leyenda correspondiente en el caso de las señales informativas. En este plano debe incluirse el resumen del volumen de obra, que en este caso es la lista de señales necesarias.

En un documento por separado se hace la descripción de los trabajos por ejecutar, en la que en una secuencia ordenada se describen los procedimientos de construcción y las especificaciones que deben cumplirse para la correcta elaboración de los trabajos.



## PROYECTO DE SEÑALAMIENTO

### Introducción

Las señales en una carretera cumplen una función primordial. Nuevamente se tiene el caso de que no basta con que una carretera tenga un excelente diseño geométrico y un pavimento en magníficas condiciones, ya que si no se tiene un buen señalamiento, no se puede dar el servicio y se desvirtúa todo el trabajo que se hizo en otras áreas. La operación de la carretera se maneja a través de un señalamiento adecuado.

Las señales en carreteras son dispositivos de control del tránsito para protección e información al usuario. Mediante las señales se canaliza el tránsito en los carriles adecuados según la ruta que necesite el usuario, se le informa y restringe sobre la velocidad a la que debe circular y se le da todo tipo de información sobre su viaje.

Se le llama señalamiento horizontal al que se pinta sobre la superficie del pavimento y señalamiento vertical al que se presenta mediante tableros sostenidos con postes. Dentro del señalamiento vertical, se destacan las señales informativas digitales o luminosas diseñadas de tal manera que difícilmente pasen desapercibidas.

De acuerdo con lo que se pretenda señalar, se clasifican en señales preventivas, restrictivas, informativas, marcas en el pavimento y señales de protección en obras. Las dimensiones de las señales, su ubicación, materiales con los que deben construirse, tipo de pintura, etc., están reguladas por las Normas Oficiales Mexicanas de Señalamiento y de las Normas SCT, las que a su vez están coordinadas con normas internacionales.

## **Diseño**

El diseño del señalamiento, tiene como finalidad: en primer lugar detectar los sitios en los que indispensablemente debe colocarse una señal, en segundo lugar decidir y redactar en su caso lo que deba decir esa señal y, en tercer lugar, calcular con exactitud el punto del camino en el que deba colocarse la señal.

Un ingeniero especialista en Ingeniería de Tránsito, en gabinete, estudiando los planos de planta y perfil de la carretera y tomando en cuenta todos los accesos, paraderos, pasos a desnivel, entronques, así como el entorno de la carretera, y sobre todo, la topografía y curvas horizontales y verticales de la carretera, debe elaborar el proyecto de señalamiento.

Los sitios en los que se necesitan señales se deciden en función de la operación general de la carretera, su topografía y curvaturas, accesos y entronques. En esta etapa se decide qué tipo de señal debe colocarse y qué información se debe proporcionar.

El siguiente paso es la ubicación de las señales en el punto exacto. De acuerdo con la velocidad de operación de la carretera, las señales deben colocarse de manera que si es necesario que el usuario tome una decisión, o tenga que frenar, los tiempos de reacción y de frenado sean suficientes para que pueda realizarse cualquier maniobra con seguridad.

Los tamaños de las señales preventivas y restrictivas, así como de las rayas que deben pintarse sobre el pavimento, son estándar y deben apegarse a lo especificado por las normas. Los tamaños de las señales informativas se ajustarán al mensaje que se quiera transmitir. En todos

los casos, los colores y material reflejante con el que deben pintarse las señales, también lo especifican las normas.

### **Proyecto Ejecutivo**

En los planos de la planta de cada kilómetro se dibujan los puntos exactos en los que deben colocarse las señales. Si se trata de señales estandarizadas, basta un croquis de la señal con el cadenamiento en el que debe colocarse, y en tabla adjunta en el mismo plano se describe la especificación que debe cumplir. En el caso de señales informativas se dibuja la leyenda o letrero que deben tener, se describe el tipo de señal, ya sea tablero, bandera o señal digital en puente, y en la tabla adjunta se especifican lo que debe cumplir la señal en cuanto a tamaño de letras, pintura, material de la señal, etc.

## **ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL**

### **Introducción**

El objetivo de la elaboración del estudio de Manifestación del Impacto Ambiental es el de detectar todos los impactos negativos que causará la construcción de la carretera y, sobre todo, elaborar el proyecto de medidas de mitigación de dichos impactos, documento conocido como MIA que deberá ser aprobado por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)

La SEMARNAT, es una Secretaría de Estado, la cual en el ámbito de sus funciones federales está la de evaluar y dictaminar las manifestaciones de impacto ambiental de proyectos de desarrollo que le presenten los sectores público, social y privado; resolver sobre los estudios de riesgo ambiental, así como sobre los programas para la

prevención de accidentes con incidencia ecológica; es por ello que el proyecto ejecutivo de una carretera, para poder construirse debe contar con la aprobación de la SEMARNAT mediante la presentación de la MIA, quien además estará al pendiente de que se cumpla con lo manifestado en el documento y que se lleven a cabo las medidas de mitigación manifestadas.

### **Descripción del Estudio**

El estudio para la Manifestación del Impacto Ambiental, debe elaborarlo personal especializado en temas ambientales. Tradicionalmente han sido Biólogos los profesionales encargados de hacerlo; sin embargo, recientemente se han implantado carreras universitarias de Ingenieros Ambientalistas que se estarán incorporando a la realización de esta tarea. De cualquier manera, estos profesionales deben conocer perfectamente el proyecto de carreteras y deben estar muy involucrados también en los aspectos de su construcción para que sean tomados en cuenta en el estudio de Impacto Ambiental.

La SEMARNAT tiene un instructivo de cómo debe presentarse una MIA para proyectos de vías generales de comunicación, que es necesario seguir puntualmente para que la Secretaría pueda revisarlo y, en su caso, aprobarlo. El instructivo está a disposición del público general en internet, y en general se pide lo siguiente:

En primer lugar se debe preparar un documento titulado “Caracterización de las Obras y Actividades” en el cual se debe informar de los temas siguientes:

1. Características generales
2. Parámetros de operación
3. Infraestructura adicional

4. Túneles
5. Puentes

Mediante este primer informe, se pretende que la Secretaría se percate de la magnitud y alcances de la obra, y al mismo tiempo tenga una primera idea de los impactos ambientales tanto positivos como negativos que pudiera generar.

En el capítulo de características generales, se debe informar a la SEMARNAT todos los datos que identifiquen al tipo de carretera que se va a construir, como son su longitud total, ancho de corona y carriles de circulación, velocidad de operación, tipo de pavimento, pendientes máximas y mínimas, grados de curvatura, etc.

En el capítulo parámetros de operación se informa sobre el tránsito de diseño de la carretera y los tipos de vehículos que circularán. En el capítulo de infraestructura adicional, debe describirse las obras como entronques, pasos a desnivel, paraderos, casetas, rampas, etc. En los capítulos de túneles y puentes, deben incluirse además de los planos constructivos, los estudios geotécnicos e hidrológicos que se hayan realizado.

Se requiere también un segundo informe titulado “Obras y Actividades Provisionales Asociadas”. En este capítulo se deben describir detalladamente las obras provisionales como caminos de acceso, almacenes, campamentos, dormitorios, instalaciones sanitarias, bancos de materiales, plantas de tratamiento de aguas residuales, ductos, subestaciones eléctricas, líneas de transmisión, etc.

Estas obras provisionales asociadas son de importancia fundamental en los impactos ambientales; basta como ejemplo los bancos de materiales para la construcción y los caminos de acceso, cuya longitud la mayoría

de las veces rebasa con mucho la propia longitud del camino que se construirá. La Secretaría prestará mucha atención en la vigilancia de que estas obras provisionales tengan un tratamiento muy adecuado en cuanto a minimizar los impactos ambientales negativos y a la aplicación estricta de medidas adecuadas de mitigación.

Un tercer informe se titula “Actividades del Proyecto para la Preparación del Sitio”. En este informe se describen con detalle las actividades siguientes: Desmontes y despalmes, excavaciones, compactaciones y/o nivelaciones, cortes, rellenos en zona terrestre y rellenos en cuerpos de agua o en zonas de inundación, dragados, desviación de cauces y cualquier otro tipo de actividades que amerite la construcción de la carretera.

En este informe, se deben dar con detalle y acompañadas de los planos correspondientes, la ubicación donde se desarrollará cada actividad, los volúmenes que manejarán los métodos y procedimientos de construcción en cada caso, y sobre todo, aquí ya se describirán las afectaciones o impactos ambientales que se ocasionarán, señalando las especies afectadas y la magnitud de las afectaciones.

Se presentará para su análisis a la SEMARNAT un juego de planos constructivos completos de la carretera y de cada una de las obras asociadas como puentes, túneles, entronques y pasos a desnivel; así como un informe de los impactos ambientales tanto negativos como positivos, y las medidas de mitigación propuestas. Con toda esta información se producirá el dictamen correspondiente, ya sea aprobando las medidas de mitigación propuestas o estableciendo nuevas medidas producto de su análisis.

Durante la construcción, SEMARNAT tiene inspectores que están al tanto de que se cumpla con lo dictaminado, y que no se tengan excesos en cuanto a las áreas de proyecto para caminos de acceso, bancos, etc.

Como ya se ha visto, es necesario preparar un informe completo de la carretera, con planos, cálculo de áreas, de volúmenes, y hacer una descripción detallada de los procedimientos de construcción, y sobre todo establecer con detalle la magnitud de las afectaciones o impactos ambientales negativos a la flora y a la fauna en todas las áreas de la construcción (carretera, caminos de acceso, bancos, campamentos, almacenes, etc.).

Esto significa un enorme trabajo y sobre todo requiere un profundo conocimiento en asuntos ambientales. Para la elaboración de estos estudios se requiere la participación de un equipo de Biólogos o Ingenieros Ambientalistas, los cuales preparan el informe y lo presentan y gestionan ante la SEMARNAT hasta obtener la aprobación correspondiente.

## **PRESENTACIÓN DEL PROYECTO EJECUTIVO**

### **Liberación del Derecho de Vía**

La liberación del derecho de vía consiste en la compra del terreno por el que tiene que construirse la carretera, o en caso necesario, la expropiación correspondiente. Este asunto debe iniciarse lo más pronto posible, ya que nunca se sabe cuánto tiempo podrían tardarse las gestiones y, en muchos casos se ha visto retrasada la construcción, con todos los costos indirectos que ello implica, por no tener liberado el derecho de vía. Tan pronto como se tenga definido el proyecto definitivo

y los recursos para la compra de los terrenos, deben iniciarse las gestiones de adquisición del derecho de vía.

La SCT comisiona a un gestor, que puede tener cualquier profesión, pero que debe tener cualidades de gran negociador. En principio, con contadas excepciones, las personas no están resignadas a deshacerse de una parte de su terreno sobre todo si en él tienen algunas construcciones o sembradíos, o su vivienda. El negociador debe empezar explicando la necesidad de la carretera, los beneficios colectivos y también individuales que se obtendrán con su construcción; por otra parte, debe negociar el precio justo de los terrenos, construcciones y sembradíos existentes en el predio y gestionar que en el menor tiempo posible se haga el trámite para el pago de los terrenos y obtener así su liberación.

Constitucionalmente todos los terrenos son de la nación, y la propiedad privada opera y es respetada mientras que la nación no requiera el terreno para un bien colectivo plenamente justificado; en este caso, ante situaciones extremas de negativa de algún propietario a vender su terreno, puede aplicarse la ley de expropiaciones. Debe tratarse de evitarse esta situación llegando a un acuerdo razonable con todos los propietarios, pero de ninguna manera pueden alargarse las negociaciones ni retrasarse la construcción de la obra por negativas irracionales de cooperación, debiendo de aplicarse sin titubeos la ley de expropiación en los casos necesarios.

La liberación del derecho de vía, aunque forma parte del proyecto ejecutivo, es una actividad que no requiere, como las otras actividades, de un diseño y un proyecto constructivo. Es una actividad muy importante; de no llevarse a cabo, el proyecto ejecutivo pasa a ser inviable, y todo el trabajo que se haya efectuado hasta el momento, se



pierde en su totalidad. Aquí en México, se recuerda tristemente el asunto de los terrenos para la construcción de un nuevo aeropuerto de la Cd. De México, que al no poder adquirirse suspendieron un proyecto de inversión muy importante. Aquí es donde puede aquilatarse el trabajo que se hace en la Primera Parte, donde en la etapa de Planeación debe estudiarse la factibilidad socioeconómica mediante un estudio que se presenta a la Secretaría de Hacienda y Crédito Público como apoyo, entre otros, del estudio de costo – beneficio que avala la factibilidad del proyecto de inversión. Este estudio de factibilidad socioeconómica en la etapa de planeación, debe prever los problemas sociales que podría acarrear la obra y prever cómo podrían solucionarse, o abortar el proyecto de esa alternativa desde la etapa de planeación.

El gestor negocia la compra de los terrenos y de los bienes que en él se encuentren, e integra una carpeta con toda la documentación que acredite dicha compra. El gestor (o gestores) debe estar apoyado por un equipo de abogados o Departamento Jurídico, y por el Notario Público correspondiente. El tiempo necesario para lograr esta gestión es muy variable según las circunstancias de cada carretera, por lo que debe iniciarse tan pronto se tenga la aprobación del trazo definitivo y los recursos para la compra. Si se requiere, para fines de programación, estimar un tiempo para esta gestión, debe considerarse un tiempo de tres meses para un tramo de 30 kilómetros.

## **Elaboración de la Carpeta Técnica**

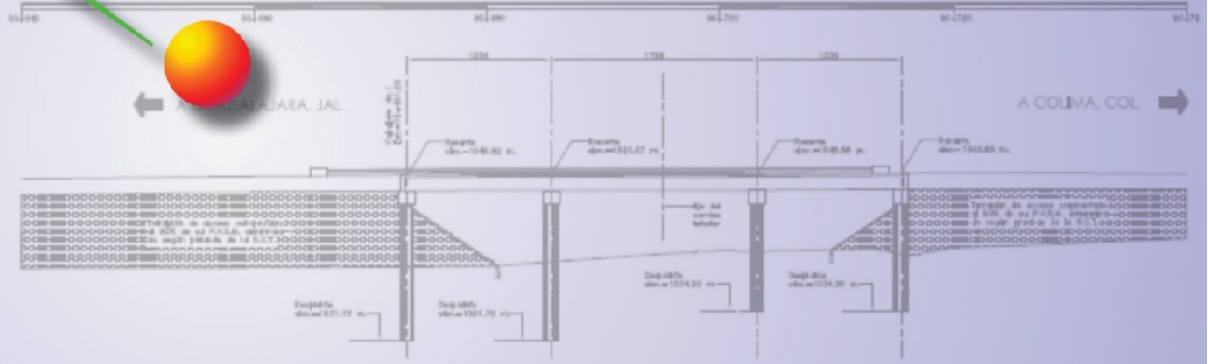
Formar la carpeta técnica es labor de la Gerencia de Proyectos. Esta gerencia se forma al inicio de la elección de ruta descrita en la segunda parte y corresponde al siguiente paso después de que se aprueba el proyecto de inversión por parte de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público. En proyectos elaborados en la SCT, la gerencia la asume una de las Direcciones Generales, normalmente la Dirección General de Carreteras. En algunos proyectos se licita el proyecto ejecutivo y se asigna a una empresa la Gerencia del Proyecto. En cualquier caso, la SCT revisa y, en su caso, aprueba los proyectos cuidando que se cumpla con las Normas SCT.

Además de la recopilación ordenada de los proyectos ejecutivos de las diferentes partes de la carretera, la Gerencia debe hacer una revisión con la finalidad de que todos los proyectos sean claros y suficientes, puesto que la finalidad es entregar la carpeta técnica al constructor, para que las obras sean construidas sin ninguna duda, teniendo información suficiente.

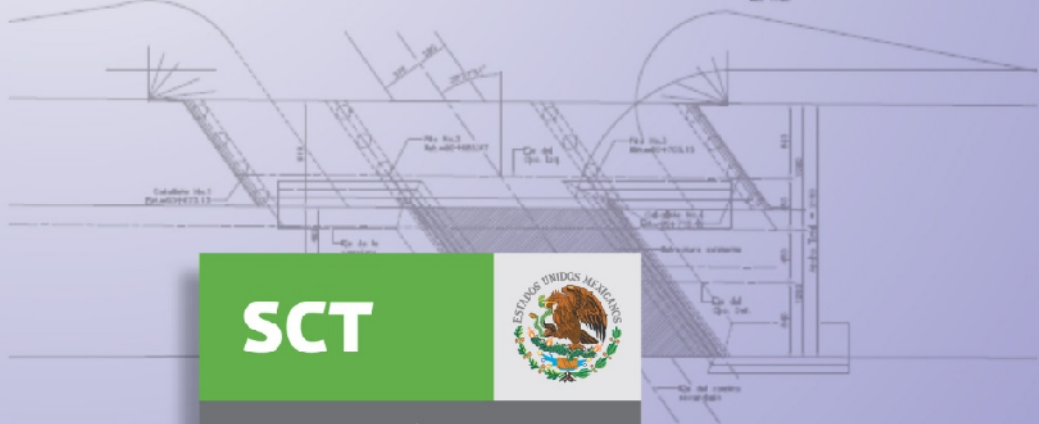
Durante la construcción de la carretera, debe haber un vínculo con la Gerencia de Proyectos. En el asunto de la geotecnia, tanto en el tema de las inclinaciones de los taludes de los cortes, como del sostenimiento en los túneles, es indispensable un seguimiento geotécnico durante la construcción; a medida que avanzan las excavaciones en la obra, se deben ir adecuando y ajustando los proyectos de sostenimiento y protección en los túneles, y de protección de taludes en los cortes; este seguimiento geotécnico debe estar avalado por la Gerencia de Proyectos, quien designará a los ingenieros encargados del seguimiento.

Si durante la construcción se detectara la posibilidad de efectuar alguna modificación en el proyecto, aparentemente para mejorarlo o para disminuir costos, deberá esta modificación ser presentada a la Gerencia de Proyectos para que sea analizada y, de ser aprobada, requerirá ser consignada y firmada en el plano correspondiente, o consignar en ese mismo plano la creación de un nuevo plano. De no ser aprobada la modificación, no podrá hacerse ninguna modificación al proyecto y, de hacerlo se puede incurrir en problemas legales.

Con la formación de la carpeta técnica, que quedaría disponible para que la Gerencia de Proyectos se la entregue al constructor, se termina la Elaboración del Proyecto Ejecutivo.



CORTE ELEVACION POR EL EJE DEL CPO. 12Q. Esc. 1:100



**SCT**



SECRETARÍA DE  
COMUNICACIONES  
Y TRANSPORTES

**DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS**

Avenida Coyoacán 895.  
Col. Acacias  
Delegación Benito Juárez,  
C.P. 03200 México D.F.  
<http://st.sct.gob.mx>

