

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Las ciudades, pueblos o comunidades de cualquier país necesitan el empleo de las carreteras para conectarse unas con otras, y por lo general para este se emplea un diseño transversal con una plataforma de dos carriles y dos direcciones, independientemente de la topografía y las características de diseño empleada en cada situación.

Bolivia no es la excepción, siendo este tipo de carretera la más empleada en el país y casi en su totalidad es la más empleada en el departamento de Tarija debido a la orografía presentada en su mayoría en la zona.

Se toma en cuenta que en las carreteras existe gran cantidad de accidentes, por lo cual se tiene conocimiento la importancia del diseño geométrico de una carretera y la necesidad de analizar los factores que más influyen en esta.

El diseño de carreteras parte del diseño geométrico de la misma, siendo afectada por varios factores que pueden ser tomados de forma independiente o dependientes entre sí. De este diseño dependerá la consistencia de la carretera, y esta afectará a la seguridad vial de los vehículos al momento de transitar la vía.

Se sabe que la velocidad de diseño de una carretera es un parámetro que condiciona los cálculos y decisiones al momento de diseñar la carretera. Siendo la más empleada la velocidad percentil 85, que es la más conocida. Pero para la obtención de la velocidad de diseño a emplear se pueden usar varios métodos lineales y no lineales. De igual forma se toma en cuenta que para el diseño de curvas de una carretera se asume que estas son horizontales y que esta puede ser una curva circular simple, compuesta o inversa; y la velocidad de diseño a emplear afectara al diseño de la curva.

Este proyecto buscará comparar las velocidades de diseño que se obtendrán en las distintas curvas en un tramo de carretera de una región del departamento de Tarija aplicando métodos lineales y no lineales, de igual forma verificar si las mismas curvas de estudio tienen un diseño consistente referida a los factores que intervienen en la obtención y cálculo de la velocidades de diseño de las mismas.

Con la realización de este estudio se podrá conocer la mejor forma de obtener la velocidad de diseño de una carretera y corroborar si para el diseño de carreteras de la

región se realiza un diseño consistente de la carretera enfocándose en la velocidad de diseño.

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE APLICACIÓN

En este proyecto se analizará la velocidad de diseño a emplear, que es el factor de más influencia en el diseño de la curva de una carretera, aplicando distintos métodos para la obtención de la velocidad mencionada y aplicando una distribución de velocidades a un tramo definido.

Se analizará las velocidades empleadas en el diseño de un tramo de carretera de la ciudad de Tarija, con el fin de comprobar si el diseño de curvas del tramo definido es consistente y lógico, o el mismo tiene algún déficit en el diseño de sus curvas en totalidad o solo en sectores.

Realizar la comparación de los resultados que serán obtenidos a partir de la aplicación de distintos métodos de obtención de la velocidad de operación, y se observará e analizará los resultados para poder definir cuál de estos es el más óptimo.

Con los datos obtenidos se realizará la mejor elección de la velocidad de proyecto que se debe aplicar para el diseño de la curva, y se determinará si existe la posibilidad de optimizar el diseño de la curva en cuestión, empleando el método respectivo para la obtención de las velocidades percentiles 85% y comparar si efectivamente se puede optimizar el diseño.

Esta aplicación podrá ser utilizada como una guía para el ingeniero civil al momento de obtener la velocidad de proyecto de una curva de carretera, ya que mediante el ejemplo de la obtención, calculo y comprobación que se realizará en la presente tesis se brindara certeza al encargado del diseño para que el mismo pueda optimizar el diseño de la curva si lo requiere.

De igual forma se definirá en que zona o regiones se podrá usar esta aplicación, si esta solo podrá ser empleada en la ciudad de Tarija debido a que es el lugar donde se realizará el estudio, o también podrá ser aplicada a regiones de otros departamentos que puedan tener condiciones similares en el lugar de emplazamiento de la carretera.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1 Situación problemática

El diseño de las curvas de una carretera es de vital importancia para brindar la consistencia de la misma, existen varios factores que intervienen en su diseño, uno de los factores que más influye en su diseño es la velocidad de diseño o proyecto, está en su mayoría es asumida por los proyectistas, hasta cierto punto que por ahorrar tiempo o esfuerzo se la asume sin fundamentos.

Al asumir la velocidad se corre el riesgo de que el criterio empleado por el proyectista puede ser incorrecto, y esto a su vez puede generar un deficiente diseño de la curva, esto conlleva a que la inseguridad vial en la carretera aumente, de esta forma se contradice la finalidad de brindar seguridad al conductor de la vía.

Medir de forma exacta la velocidad de los vehículos al momento de hacer los aforos, resultara un problema, ya que existen varios errores involuntarios que se pueden cometer, requiriendo realizar varias mediciones para precisar de mejor manera los datos a obtener.

En nuestro caso no se toma en cuenta una velocidad en específico para diseñar una curva, debiendo tomar una única velocidad de diseño de referencia para toda la carretera, esto ocasionara que las velocidades que se aforan y las velocidades que se estimaran mediante calculo no tengan una similitud entre ellas, por lo cual se deberá tomar en cuenta este factor al realizar las mediciones y cálculos respectivos.

El error o déficit en el diseño de la curva de una carretera puede generar que la misma no satisfaga las principales características que debe tener, como son la de brindar al peatón una vía segura, y al conductor una vía consistente, de calidad y comodidad.

También se debe buscar la forma de optimizar el resto de los factores que intervienen en el diseño de una curva, como ser el peralte o sobreebancho, estos factores son afectados directa o indirectamente por la velocidad de diseño, el tipo de carretera o el radio que se empleará en la curva, esta interrelación entre estos aspectos precisara un análisis para saber qué factores se pueden optimizar o si no es viable hacerlo.

1.3.2 Problema

¿Realizar el diseño de las curvas de cualquier tramo de carretera aplicando un análisis de la velocidad de diseño específico permitirá que sea óptimo, para lo cual podemos utilizar métodos de estimación de la velocidad en los cuales se optimice los factores que influyan en su diseño, para finalmente compararlas con las velocidades reales obtenidas a través de los aforos?

1.4 OBJETIVOS DEL PROYECTO DE APLICACIÓN

1.4.1 Objetivo general

Analizar la posibilidad de optimización de los factores que inciden en la determinación de la velocidad de proyecto para el diseño en curvas horizontales que permitan lograr un mejor comportamiento en la circulación de vehículos en tramos de carretera curvos aplicados a la red de carreteras departamentales en el Departamento de Tarija.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar la revisión de los métodos de cálculo y estimación de la velocidad de diseño que se pueden emplear para el diseño de una curva de carretera.
- Determinar un análisis de velocidad en un tramo de carretera del Departamento de Tarija.
- Obtener los datos de velocidad de las curvas de un tramo de carretera a través de aforos.
- Analizar los distintos métodos de cálculo de la velocidad.
- Comparar los resultados de los análisis de velocidades en curvas horizontales del tramo en estudio
- Verificar si el diseño de las curvas del tramo de carretera seleccionado son de manera óptima y consistente.
- Elaborar un análisis de los resultados y determinar las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

1.5 HIPÓTESIS

Si analizamos las velocidades en los tramos curvos por los métodos de cálculo recomendados en el diseño de una curva, entonces será posible realizar una optimización de estos factores para el dimensionamiento de curvas horizontales de una carretera.

1.6 VARIABLES

1.6.1 Variable independiente

Análisis de velocidad específica en el diseño geométrico de tramos curvos en planimetría de carreteras de la red departamental en el Departamento de Tarija.

1.6.2 Variable dependiente

Velocidad de diseño en tramos curvos en el tramo curvo específico.

1.6.3 Conceptualización de variables

Tabla 1 Tabla de conceptualización de variables

VARIABLE	CONCEPTO	MEDICIÓN	UNIDAD
INDEPENDIENTE	Velocidad específica empleada en el diseño geométrico de tramos curvos	Aplicación de fórmulas que intervienen en el diseño de la curva que se puedan optimizar mediante el empleo de una velocidad estimada	Km/h
DEPENDIENTE	Velocidad de diseño	Aforo de velocidades en distintos puntos en una curva	Km/h

1.7 ALCANCE DEL ESTUDIO DE APLICACIÓN

Se procede a escoger un tramo de carretera de cinco (5) km., este será comprendido entre el túnel de la Falda la Queñua y el puente de la comunidad de Calama, pertenecientes al Departamento de Tarija.

En este tramo se analizará todas las curvas pertenecientes al tramo en estudio, se observara todos los elementos de cada una de las curvas del tramo y se determinará su consistencia de diseño.

En este proyecto se busca obtener las velocidades reales que emplean los vehículos para circular en la carretera mencionada, no se tomará en cuenta el tipo de vehículo pero si el tipo de curva para la obtención o estimación de las velocidades mencionadas que se realizara mediante el aforo del tiempo de recorrido de cada automóvil.

Se realizará la medición de los tiempos de recorrido de los vehículos para cada curva en el campo, y se obtendrá velocidades medias y velocidades percentiles 85, para que mediante un análisis, se pueda comprobar si estas curvas tienen un diseño geométrico consistente, y de no darse ese caso, se podría notar que elementos no fueron optimizados en el diseño real y poder mejorarlo a través del análisis y un criterio escogido, este último procedimiento realizado en gabinete empleando una computadora y consultas a la bibliografía.

También mediante el análisis de las velocidades aforadas, se buscara la mejor manera de calcular o estimar la velocidad de diseño de las curvas de la carretera, y mediante la comparación de los resultados obtenidos en campo y en gabinete se podrá concluir que velocidad es la ideal para tener un diseño óptimo de una carretera.

Como conclusión, se podrá confirmar si la optimización de factores en el diseño geométrico de una curva de carretera es una acción clave o determinante, que denotará una gran diferencia si se decide o no aplicar estas optimizaciones en el diseño geométrico en una carretera. Así mismo se podrá evidenciar si este proyecto podrá ser una base o guía para que un Ingeniero Civil pueda diseñar las curvas de una carretera garantizando la consistencia de la misma.

CAPÍTULO II

CONCEPTOS DE DISEÑO GEOMÉTRICO Y VELOCIDAD DE DISEÑO DE UNA CURVA DE CARRETERA

CAPÍTULO II

CONCEPTOS DE DISEÑO GEOMÉTRICO Y VELOCIDAD DE DISEÑO DE UNA CURVA DE CARRETERA

2.1 PARÁMETROS DE DISEÑO GEOMÉTRICO

2.1.1 Controles del trazado en planta

En tramos restrictivos del trazado se deberá asegurar una operación segura y confortable considerando la Velocidad de Proyecto (V_p) correspondiente a la categoría de la ruta; en tanto que en los tramos de trazado amplio se deberá considerar la $V_{85\%}$ o la V^* según corresponda, asociada al conjunto de los elementos del tramo, en previsión de las velocidades de desplazamiento que adoptara un porcentaje importante de los usuarios en los periodos de baja demanda. Si por condiciones topográficas se debe cambiar la velocidad de proyecto, el diseño debe consultar el tramo de transición correspondiente, situación que se señalizara adecuadamente en terreno.

Los límites normativos que se indican más adelante se aplican a la combinación de elementos rectos y curvos de caminos bidireccionales y unidireccionales, excepto cuando se haga la salvedad correspondiente.

Las principales consideraciones que controlan el diseño del alineamiento horizontal son:

- Categoría de la ruta
- Topografía del área
- Velocidad de proyecto
- $V_{85\%}$ para diseñar las curvas horizontales
- V^* para verificar visibilidad de frenado
- Coordinación con el alineamiento vertical
- Costo de construcción, operación y mantención

Todos elementos deben conjugarse de manera tal que el trazado resultante sea el más seguro y económico, en armonía con los entornos naturales y al mismo tiempo adecuado a la categoría, según la clasificación funcional para diseño.

2.1.2 Criterios para establecer el trazado en planta

a. Elementos del trazado en planta

La planta de una carretera preferentemente deberá componerse de una sucesión de elementos curvos que cumplan las relaciones que se fijan más adelante y de aquellos tramos en recta que sean indispensables.

Los elementos curvos comprenden:

- Curvas circulares
- La parte central circular y dos arcos de enlace
- Otras combinaciones de arco circular y arco de enlace

b. Tendencia actual

La tendencia actual en el diseño de carreteras de cierto nivel se orienta hacia la utilización de curvas amplias que se adaptan a la topografía del terreno, haciendo casi desaparecer las rectas. Esta forma de trazado se preferirá por cuanto los largos tramos rectos inducen velocidades V85% muy por sobre la velocidad de proyecto, aumentan el peligro de deslumbramiento por las luces del vehículo que avanza en sentido opuesto, y porque la monotonía en la conducción disminuye la concentración del conductor, lo que en oportunidades es motivo de accidentes. Una sucesión de curvas de radios adecuados limitan la V85% y mantienen al conductor atento al desarrollo del trazado. Por otra parte, las curvas armonizan en mejor forma con las sinuosidades del terreno, proporcionando claras ventajas desde el punto de vista estético y económico.

En terrenos llanos y ondulados suaves los conductores esperan poder desarrollar velocidades relativamente altas y consecuentemente se deberán evitar los radios mínimos correspondientes a la categoría de la ruta, los que solo podrán emplearse en sectores obligados, siempre que estén precedidos de elementos curvos que van disminuyendo paulatinamente.

Los trazados sinuosos compuestos de curvas cortas, deberán evitarse en trazados de velocidad de proyecto sobre 70 km/h pues inducen a una conducción errática.

En terrenos ondulados fuertes y montañosos, los conductores están dispuestos a una mayor restricción pudiendo emplearse elementos en el orden de los mínimos de norma, siempre que ellos no aparezcan en forma sorpresiva.

c. El problema de la visibilidad

Si bien el trazado curvo tiene las bondades que se han indicado, la obtención de visibilidad de adelantamiento para caminos bidireccionales exige tramos rectos o de curvatura muy suave, que permitan adelantar en el mayor porcentaje posible de su longitud. Las curvas del orden del mínimo admisible disminuyen la confianza del conductor para adelantar, aunque ofrezcan visibilidad adecuada. Las rectas largas que se impongan para facilitar el adelantamiento deben terminar en curvas horizontales cuyo radio asegure una velocidad específica mayor o igual que las V85% definida.

d. Elementos de curvatura variable

La utilización de elementos de curvatura variable entre recta y curva circular, o bien como elemento de trazado propiamente tal, se hace necesaria por razones de seguridad, comodidad y estética.

2.1.3 Velocidad de proyecto

Es la velocidad que permite definir las características geométricas mínimas de los elementos del trazado bajo condiciones de seguridad y comodidad, elementos que solo podrán ser empleados en la medida que estén precedidos por otros (en ambos sentidos del tránsito), que anticipen el usuario que se está entrando a un tramo de características geométricas mínimas, el que además deberá estar debidamente señalizado.

La velocidad de proyecto reemplaza a la denominada velocidad de diseño, por cuanto como se verá más adelante, se introducen nuevos conceptos que también intervendrán en el diseño, como son la velocidad específica (V_e) y la velocidad percentil 85 (V85%). Se hace notar, que por lo general, una carretera o camino poseerá una longitud mayor con tramos de trazado más amplios que el correspondiente a aquellos de características mínimas, y por lo tanto, el diseño deberá considerar dicha realidad, ya que los usuarios al percibir la mayor amplitud del diseño tienden a elevar su velocidad de circulación.

En consecuencia, el concepto Velocidad de Proyecto se usará para efectos del sistema de clasificación funcional para diseño, a fin de indicar el estándar global asociada a la carretera y para definir los parámetros mínimos aceptables bajo condiciones bien definidas. (“Manual de diseño geométrico 2007-Administradora Boliviana de Carreteras”)

2.1.4 Velocidad específica

Es la máxima velocidad a la cual se puede circular por un elemento del trazado, considerado individualmente, en condiciones de seguridad y comodidad, encontrándose el pavimento húmedo, los neumáticos en buen estado y sin que existan condiciones meteorológicas, del tránsito, del estado del pavimento o del entorno de la vía, que impongan limitaciones a la velocidad.

La velocidad específica se aplica a los elementos curvos de la planta. Su divergencia con el antiguo concepto de velocidad de diseño, surge de la adopción de leyes de variación del peralte que en vez de disminuirlo ante radios crecientes, lo mantienen relativamente alto para un rango amplio de los mismos, confiriendo mayor seguridad ante velocidades de circulación mayores que las de proyecto (ex diseño), situación que es consecuente con la tendencia de los usuarios a elevar la velocidad ante trazados amplios.

En el caso particular de los elementos curvos la velocidad específica debe entenderse como la máxima velocidad a la que se puede recorrer una curva horizontal de radio y peralte dado, haciendo uso del máximo roce transversal especificado para dicha velocidad, en condiciones, de pavimento húmedo, neumáticos en razonable buen estado y condiciones de flujo libre. (“Manual de diseño geométrico 2007-Administradora Boliviana de Carreteras”)

2.1.5 Velocidad de operación

La velocidad de operación es la velocidad media de desplazamiento que pueden lograr los usuarios en un tramo de carretera de una velocidad de proyecto dada, bajo las condiciones prevalecientes del tránsito, del estado del pavimento, meteorológicas y grado de relación de esta con otras vías y con la propiedad adyacente.

Si el tránsito y la interferencia son bajos, la velocidad de operación del usuario medio es del orden de la velocidad de proyecto y para un cierto grupo de usuarios superior a esta. A medida que el tránsito crece, la interferencia entre vehículos aumenta tendiendo a bajar la velocidad de operación del conjunto.

2.1.6 Velocidad percentil 85

Es aquella velocidad que no es superada por el 85% de los usuarios en un tramo de características homogéneas, bajo las condiciones de tránsito prevalecientes, estado del pavimento, meteorológica y grado de relación de este con otras vías y con la propiedad adyacente. Cuando dichas condiciones no imponen restricciones, la V85% suele ser mayor que la velocidad de proyecto, independientemente de si la velocidad de proyecto está señalizada, corresponde a la máxima legal, etc. (Ello siempre que el tramo no tenga control policial habitual). En consecuencia, el 85% de los usuarios circula a la V85% o menos y un 15% de los usuarios supera dicha velocidad.

2.1.7 Velocidad de proyecto según categoría de la obra vial

La velocidad de proyecto fija el marco de referencia mínimo que define el diseño geométrico de una carretera o camino, principalmente en lo relativo a su trazado horizontal y vertical. Algunas características de la sección transversal, como los anchos mínimos de pavimentos y bermas, dependen más bien de volumen de tránsito, tipo de vehículos y proporción de estos en el flujo.

La velocidad de proyecto seleccionada para un proyecto de categoría dada dependerá fundamentalmente de la función asignada a la carretera, del volumen y composición del tránsito previsto, de la topografía de la zona de emplazamiento y de la diferencia de costo que implica seleccionar una u otra velocidad de proyecto dentro del rango posible considerado para la categoría. En definitiva, la elección de una velocidad de proyecto que se aparte de la óptima se reflejará en una disminución de la rentabilidad del proyecto.

Dentro del rango de velocidades posibles para cada categoría de carretera o camino, se justificaran las más altas en terrenos llanos o ligeramente ondulados y las más bajas para relieves montañosos o escarpados. Esto no solo por las consideraciones de costo ya expuestas, sino que también porque el usuario está mejor dispuesto a aceptar velocidades menores cuando el terreno es difícil y el trazado necesariamente sinuoso, que cuando no encuentra una razón evidente para ello.

Por lo anteriormente expuesto, si un sector extenso de camino, colector o local, que pueda llegar a ser pavimentado, se emplaza en un terreno muy favorable, sus elementos deberán proyectarse con valores más amplios, correspondientes a unos 10 a 20 km/h por

sobre la velocidad de proyecto que le corresponde al camino considerando su función y volumen de demanda general, a fin de evitar que cuando el camino se pavimente los usuarios traten de alcanzar esas velocidades en un trazado que no las acepta. Ahora bien, al cambiar las características del sector y pasar a un terreno difícil que obliga a retornar a las características propias de la velocidad de proyecto general asignada al camino, se debe diseñar cuidadosamente una zona de transición en que los elementos críticos (curvas en planta, distancia de visibilidad, etc.), vayan disminuyendo en forma paulatina a lo largo de varios elementos del trazado, hasta recuperar los valores normales correspondientes a la V_p propia de camino.

(“Manual de diseño geométrico 2007-Administradora Boliviana de Carreteras”)

2.1.8 Tiempos de recorrido y demoras

En zonas urbanas y en algunas carreteras interurbanas es frecuente que la velocidad de cada vehículo sufra grandes cambios durante el viaje, llegando incluso a anularse al permanecer el vehículo inmóvil durante algún tiempo. En este caso, el conocimiento de las velocidades instantáneas es poco representativo, y es más útil trabajar con velocidades medias de recorrido o con tiempo de recorrido, si se desea estimar la calidad del servicio ofrecido al usuario. Se denomina tiempo de recorrido al tiempo que invierte cada vehículo en desplazarse entre dos puntos fijos.

(Ingeniería de Carreteras Volumen I, Carlos Kramer, Editorial Mc Graw Hill, España 2004)

2.1.9 Visibilidad

Todo conductor precisa de dos distancias de visibilidad: La distancia de visibilidad para pasar y la distancia de visibilidad para parar.

2.1.9.1 Distancia de adelantamiento

La distancia de adelantamiento “ D_a ”, equivale a la visibilidad mínima que requiere un conductor para adelantar a un vehículo que se desplaza a velocidad inferior a la de proyecto; esto es, para abandonar su carril, sobrepasar el vehículo adelantado y retornar a su carril en forma segura, sin afectar la velocidad del vehículo adelantado ni la de un

vehículo que se desplace en sentido contrario por el carril utilizado para el adelantamiento.

De lo expuesto se deduce que la visibilidad de adelantamiento se requiere solo en caminos con carriles para tránsito bidireccional. En carreteras con carriles unidireccionales no será necesario considerar en el diseño el concepto de distancia de adelantamiento, bastando con diseñar los elementos para que cuenten con la visibilidad de frenado.

2.1.9.2 Distancia de frenado

En todo punto de una carretera o camino, un conductor que se desplace a la velocidad V, por el centro de su carril de tránsito, debe disponer al menos de la visibilidad equivalente a la distancia requerida para detenerse ante un obstáculo inmóvil, situado en el centro de dicho carril.

Se considera obstáculo aquel de una altura igual o mayor que 0.2 m., estando situados los ojos de conductor a 1,1 m., sobre la rasante del eje de carril de circulación.

La distancia de frenado sobre una alineación recta de pendiente uniforme, se calcula mediante la expresión:

$$D_f = \frac{V * t}{3.6} + \frac{V^2}{2.54 * (f \pm i)}$$

Dónde:

Df= Distancia para frenado (m)

t= Tiempo de Percepción + Reacción

f= Coeficiente de roce rodante, pavimento húmedo

i= Pendiente longitudinal (m/m).

V= Velocidad de proyecto (Km/h).

(“Manual de diseño geométrico 2007-Administradora Boliviana de Carreteras”)

2.1.10 Peralte

El peralte en si podría definirse como un elemento más de seguridad vial, y el papel que juega está muy relacionado con la física. Cuando un vehículo toma una curva, las diferentes fuerzas que actúan sobre el, al hacer el giro provocan cierta tendencia a seguir

en la dirección inicial, es decir, recto. El peralte contrarresta estas fuerzas, ayudando a que el vehículo permanezca en la vía y evitando su salida de la misma.

Para el cálculo del peralte hay que tener en cuenta principalmente el radio de la curva, el peso del vehículo y la velocidad del mismo, y con esto los ingenieros calculan las dimensiones para que los peraltes sean válidos para la mayor parte de los vehículos que transitan por una carretera.

(“<https://www.tecnocarreteras.es/2014/06/07/conociendo-un-poco-mas-acerca-de-los-peraltes-de-las-curvas/>”)

2.1.11 Sobreancho

Cuando un vehículo circula por una curva horizontal, ocupa un ancho de calzada mayor que en la recta. Esto es debido a que por la rigidez y dimensiones del vehículo, sus ruedas traseras siguen una trayectoria distinta a la de las ruedas delanteras, ocasionando dificultad a los conductores para mantener su vehículo en el eje del carril de circulación correspondiente.

Con el propósito de que las condiciones de operación de los vehículos en las curvas sean muy similares a las de la recta, la calzada en la curva debe ensancharse. A este aumento se denomina sobreancho de la curva.

(“<https://es.slideshare.net/abicho/49444970-sobreanchoenlascurvas>”)

2.2 FUNCIONES DE UNA RED DE CARRETERAS

Elemento fundamental para el desarrollo del transporte por carretera es el camino por el que se mueven los vehículos. Para que la circulación resulte segura y cómoda, es necesario disponer de una superficie preparada, que reúna unas condiciones adecuadas para permitir el movimiento de los vehículos a unas velocidades que normalmente suelen alcanzar, sin que la conducción se convierta en una tarea fatigosa y arriesgada. Dado el carácter básico que tiene el transporte por carretera, es necesario que el conjunto de los caminos que hay en un área determinada (una ciudad, una región, una nación) formen una red viaria con suficientes conexiones entre las distintas vías para permitir el movimiento de vehículos entre dos puntos cualesquiera de la misma. Y esta red tiene que ser suficientemente densa para que sea fácil el acceso a ella con vehículos automóviles desde cualquier zona habitada dentro del área que cubre la red viaria.

La red viaria cumple así dos funciones primordiales: Por una parte permitir la circulación de forma rápida, cómoda, económica y segura de los vehículos automóviles; y por otra permitir el acceso de estos vehículos a cualquier punto habitado en el área que sirve la red viaria. La primera es una función de movilidad, mientras que la segunda es una función de accesibilidad. Para cumplir ambas funciones, las carreteras deben reunir una serie de condiciones que puedan ser contradictorias; es decir, que puede ser adecuada para mejorar la accesibilidad pero puede comprometer la movilidad, y viceversa. Por ello se recurre a especializar distintas vías de la red, de forma que algunas se destinan casi exclusivamente a satisfacer las necesidades de la movilidad, y otras ante todo a permitir el acceso a la mayor parte del territorio.

2.3 LA SEGURIDAD EN LOS VEHÍCULOS

Solo en una proporción muy pequeña de los accidentes de carretera se señala alguna avería en el funcionamiento de vehículo como factor que ha contribuido al accidente, lo que indica que en general los vehículos son fiables. Casi todas las averías que contribuyen a un accidente están relacionados con un mantenimiento deficiente de los vehículos, lo que puede dar lugar a reventones, neumáticos deslizantes, frenos deficientes, rotura de la dirección, etc. Para conseguir que el mantenimiento de los vehículos cumpla unos requisitos mínimos, se establecen unos reconocimientos obligatorios cada cierto tiempo. La meticulosidad de unos reconocimientos y el plazo entre ellos dependen de las características de los vehículos y del tipo de servicio que realizan.

No obstante, existen aún aspectos de la seguridad de los vehículos que son susceptibles de mejora, sobre todo en lo que se refiere a la denominada seguridad pasiva. Por seguridad pasiva se entienden las medidas que tratan de conseguir que, si ocurre un accidente, los ocupantes del vehículo reciban los menores daños posibles. Para conseguirlo, se introducen medidas como la instalación de cinturones de seguridad y escudos de aire (airbags), la eliminación de elementos en el interior y exterior de los vehículos capaces de lesionar seriamente en un impacto, etc. Las altas velocidades que pueden desarrollar los actuales vehículos dificultan la consecución de un alto grado de seguridad pasiva en los choques producidos en esas condiciones.

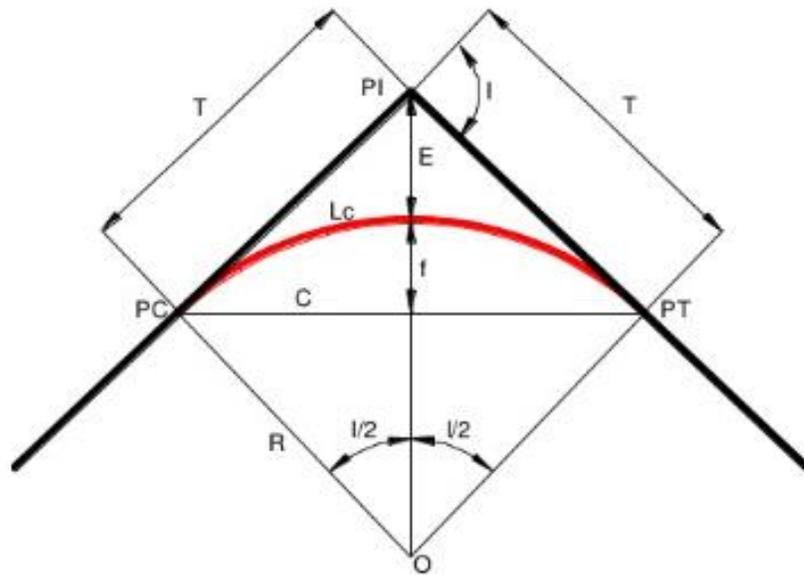
(Ingeniería de Carreteras Volumen I, Carlos Kramer, Editorial Mc Graw Hill, España 2004)

2.4 CURVAS CIRCULARES

2.4.1 Elementos de la curva circular

En la figura siguiente se ilustran los diversos elementos asociados a una curva circular. La simbología normalizada que se define a continuación deberá ser respetada por el proyectista.

Ilustración 1 Elementos de una curva circular



Fuente: <https://www.slideshare.net/Urteaga/trazo-y-replanteo-curvas-circulares-mut>

Dónde:

Las medidas angulares se expresan en grados centesimales (g).

O= Vértice; punto de intersección de dos alineaciones consecutivas del trazado.

I= Ángulo de deflexión entre ambas alineaciones, que se repite como ángulo del centro subtendido por el arco circular.

R= Radio de curvatura del arco de círculo.

T= Tangentes, distancias iguales entre el vértice y los puntos de tangencia del arco de círculo con las alineaciones de entrada y salida (m). Determinan el principio de curva PC y fin de curva FC.

Lc= Desarrollo; longitud del arco de círculo entre los puntos de tangencia PC y FC (m).

E= Externa

F= Flecha

C= Cuerda

PC= Principio de curva

PT= Punto de termino

2.4.2 Radios mínimos absolutos

Los radios mínimos para cada velocidad de proyecto, calculados bajo el criterio de seguridad ante el deslizamiento, están dados por la expresión:

$$R_{min} = \frac{V_p^2}{127(e_{max} + f)}$$

Rmin= Radio mínimo absoluto (m).

Vp= Velocidad proyecto (km/h).

e_{max}= Peralte máximo correspondiente a la carretera o el camino (m/m).

f: Coeficiente de fricción transversal máximo correspondiente a Vp.

Tabla 2 Tabla de valores máximos para el peralte y la fricción transversal

	e_{máx}	f
Caminos Vp 30 a 80 km/h	7%	0.265-V/602.4
Carreteras Vp 80 a 120 km/h	8%	0.193-V/1134

Fuente: Manual de diseño geométrico-Administradora Boliviana de Carreteras

Tabla 3 Tabla de radios mínimos absolutos en curvas horizontales

Caminos colectores-Locales-Desarrollo			
Vp	e_{máx}	f	R_{min}
Km/h	(%)		(m.)
30	7	0.215	25
40	7	0.198	50
50	7	0.182	80
60	7	0.165	12
70	7	0.149	180
80	7	0.132	250
Carreteras-Autopistas-Autorrutas-Primarios			
80	8	0.122	250
90	8	0.114	330
100	8	0.105	425
110	8	0.096	540
120	8	0.087	700

Fuente: Manual de diseño geométrico-Administradora Boliviana de Carreteras

a. Utilización de los radios mínimos absolutos

Los radios mínimos solo podrán ser empleados al interior de una secuencia de curvas horizontales, cuando estén comprendidos dentro del rango aceptable para curvas horizontales consecutivas, que se especifica en las tablas anteriores.

Al final de tramos rectos de más de 400 m. de largo, el menor radio autorizado será aquel cuya velocidad específica sea igual o mayor que la V_{85%} obtenida.

En carreteras o caminos unidireccionales, en que el eje del trazado se desarrolle por el centro del cantero central, el radio efectivo de las curvas en los carriles de la calzada interior, será menor que el del eje del trazado; en consecuencia, además de lo expuesto precedentemente, el radio mínimo del trazado deberá aumentarse en al menos el espacio existente entre el eje de trazado y el borde izquierda (según el sentido de tránsito) del carril interior de esa calzada.

b. Modificación del peralte máximo

Para los caminos que consultan un peralte máximo de 7% se podrá, en casos calificados y autorizados por la administradora Boliviana de Carreteras, subir el peralte a 8% siempre que la línea de máxima pendiente no supere un 11%. El recalcado de R_{min} se hará empleando la fricción transversal correspondiente. Lo anterior será aplicable a curvas críticas de un trazado y de ningún modo a todo un camino.

c. Verificación por visibilidad

El criterio de diseño de curvas por seguridad al deslizamiento, no garantiza la existencia de visibilidad de frenado o adelantamiento.

(“Manual de diseño geométrico 2007-Administradora Boliviana de Carreteras”)

2.4.3 Curvas horizontales con radios sobre los mínimos

El criterio tradicionalmente empleado con anterioridad establecía que para una velocidad de proyecto dada, correspondían peraltes decrecientes a medida que crecían los radios utilizados. Dicho criterio entra en contradicción con la realidad observada en cuanto a que mientras más amplio es el trazado, mayores son las velocidad que tienden a emplear los usuarios, $V_{85\%}$, según lo definido anteriormente. En consecuencia, las tendencias actuales del diseño mantienen peraltes relativamente altos para un rango amplio de radios, independizándose de la velocidad de proyecto, con lo cual las curvas de radio mayor que el mínimo, aceptan una velocidad específica (V_e) mayor que la de proyecto, lo que permite mantener la seguridad por criterio de deslizamiento, para aquel grupo de usuarios que tiende a circular a velocidades más elevadas que las de proyecto, todo ello sin aumentar la sensación de enfrentar un trazado aún más amplio. (“Manual de diseño geométrico 2007-Administradora Boliviana de Carreteras”)

2.4.4 Sobreancho en curvas circulares

En curvas de radio pequeño y mediano, según sea el tipo de vehículo comerciales que circulan habitualmente por la carretera o camino, se deberá ensanchar la calzada con el objeto de asegurar espacios libres adecuados (huelgas), entre vehículos que se cruzan en calzadas bidireccionales o que se adelantan en calzadas unidireccionales, y entre los vehículos y los bordes de las calzadas. El sobreancho requerido equivale al aumento del

espacio ocupado transversalmente por los vehículos al describir las curvas más las huelgas teóricas adoptadas, (Valores medios). El sobreecho no podrá darse a costa de una disminución del ancho de la berma o el SAP correspondiente a la categoría de la ruta. (“Manual de diseño geométrico 2007-Administradora Boliviana de Carreteras”)

2.4.5 Elementos que definen las corrientes de tráfico

Al hablar de las corrientes de tráfico, estas pueden quedar definidas de distintas materias:

Cuantitativamente, por los siguientes elementos:

- Volumen de tráfico.
- Densidad.
- Velocidad.

2.4.5.1 Volumen de tráfico

Por volumen de tráfico se entiende el número de vehículos que pasa por un tramo de carretera, en un intervalo de tiempo dado.

En los estudios de tráfico, los intervalos de tiempo más usuales son el año, el día y la hora, y así tiene volumen de tráfico anual, volumen de tráfico diario y volumen de tráfico horario.

Para conocer los volúmenes de tráfico en los diferentes tramos de una vía se realizan aforos y encuestas de origen y destino.

Los aforos o conteos permiten determinar el número de vehículos que pasa por un lugar o estación. De acuerdo a los datos requeridos, los conteos pueden ser cortos, largos o continuos.

En los conteos largos se utilizan para obtener una idea de las fluctuaciones del tráfico durante el año. Consisten en conteos semanales realizados en las diferentes estaciones del año, o si es posible, cada dos meses del año.

Finalmente, los conteos continuos permiten obtener los volúmenes de tráfico para un año completo, y mediante ellos es posible elaborar el patrón del tráfico anual.

La determinación de los volúmenes de tráfico se hace por medio de contadores, que pueden ser automáticos o manuales.

Para establecer el número de vehículos de dos ejes que pasan por un lugar es necesario conocer el porcentaje de vehículos con más de dos ejes que pasan por donde están obtenidos, para ello es necesario hacer conteos manuales durante un corto periodo de tiempo.

Características de los volúmenes de tráfico.-

En los estudios de carreteras, una de las unidades de medida de los volúmenes de tráfico más frecuentemente usada es el promedio diario de los volúmenes registrados durante un cierto periodo.

Este promedio se determina dividiendo el volumen total registrado durante el periodo entre el número de días correspondientes a ese periodo.

Cuando el periodo es mayor que un día y menos que un año, se obtiene el promedio diario de tráfico, que se abrevia PDT.

Cuando el periodo es de un año completo, 365 días, se obtiene el promedio diario del tráfico anual, abreviadamente PDTA.

El conocimiento de estos volúmenes es importante, destacándose su empleo en los estudios de justificación de la ampliación de las vías, como medida de la demanda de servicio actual y en el diseño de los elementos estructurales de la carretera en los que se tiene en cuenta el efecto destructivo de la repetición de carga.

2.4.5.2 Densidad

Aunque muchas veces se confunden los términos, volumen y densidad expresan conceptos diferentes.

Tal como se definió anteriormente, volumen es el número de vehículos que pasan por un tramo de una carretera en una unidad de tiempo, en tanto que densidad es el número de vehículos que se encuentran en una cierta longitud de la vía en un momento dado.

Si se considera un tramo de carretera de un kilómetro de longitud y a la distancia entre frente de dos vehículos sucesivos se la llama espaciamento, se puede escribir que:

$$\text{Densidad (veh/km)} = 1000 \text{ (m/km)} / \text{espaciamento medio (m/vehículo)}$$

Y se define el intervalo como el tiempo que transcurre entre el paso de dos vehículos sucesivos por un punto dado.

2.4.5.3 Velocidad

En un grado apreciable, velocidad y seguridad son sinónimos de la categoría de una carretera. La velocidad es factor primordial en todos los sistemas de transporte, y la velocidad a la que circulan los vehículos por una vía es un índice importante que debe tomarse en cuenta al establecer las especificaciones de proyecto de las mismas, pues a ella están ligados elementos tales como el peralte y la distancia de visibilidad, los cuales determinan los valores de la curvatura horizontal y vertical de la carretera.

La velocidad que adoptan los conductores en una carretera depende de diversas circunstancias, entre las que pueden señalarse: La habilidad del conductor, las condiciones del vehículo que maneja, las características físicas de la calzada y de sus costados, el estado del tiempo, la presencia de otros vehículos en la vía y las limitaciones impuestas por las leyes del tránsito.

El hecho de que, a veces, uno de estos factores predomine sobre los otros no significa que funcionen aisladamente ya que, en general, contribuyen de una manera conjunta al comportamiento de los conductores.

Tal como se definió anteriormente, la velocidad de proyecto de una carretera es la velocidad que se escoge para determinar y relacionar entre sí las características geométricas o físicas de la misma, tales como el peralte, la visibilidad, los radios de curvatura, etc., de las cuales depende la operación segura de los vehículos en la vía.

2.4.6 Geometría de las curvas circulares

En su forma más simplificada, el alineamiento en planta de una carretera consiste en una serie de tramos rectos (Tangentes) conectados por curvas circulares.

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

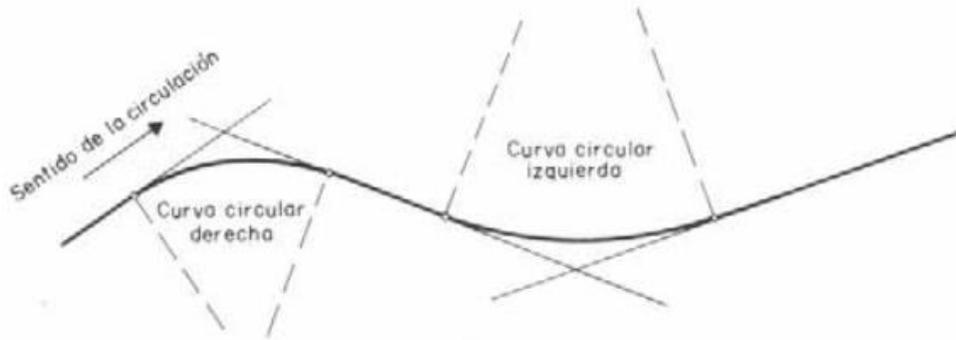
2.4.6.1 Clasificación y elementos de las curvas circulares

Cuando dos tangentes son enlazadas por una sola curva, esta se llama curva simple. Una curva simple puede doblar hacia la derecha o hacia la izquierda, recibiendo entonces ese calificativo adicional.

Cuando dos o más curvas circulares contiguas, de diferente radio, cruzan hacia el mismo lado, reciben el nombre de curvas compuestas, en tanto que cuando cruzan en sentido

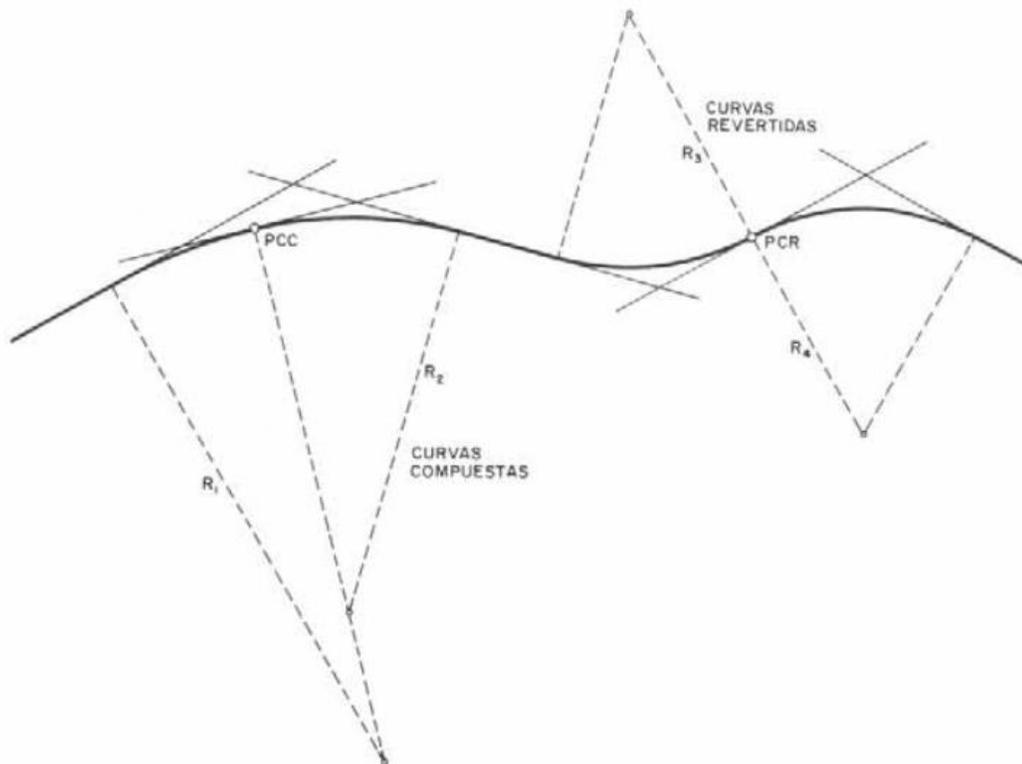
opuesto y tienen un punto de tangencia común, siendo sus radios iguales o diferentes, reciben el nombre de curvas revertidas.

Ilustración 2 Elementos de la curva circular simple



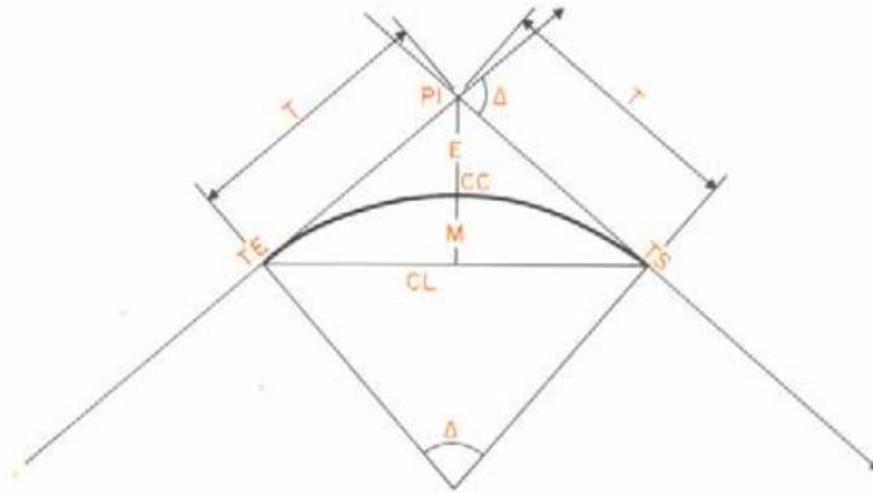
Fuente: Manual de diseño geométrico-Administradora Boliviana de Carreteras

Ilustración 3 Enlace de alineamientos rectos con curvas compuestas y revertidas



Fuente: Manual de diseño geométrico-Administradora Boliviana de Carreteras

Ilustración 4 Enlace de alineamientos rectos con curvas circulares simples



Fuente: Libro de carreteras – Jacob Carciente

En una curva circular simple hay que distinguir los siguientes elementos:

Los puntos donde los alineamientos rectos (Tangentes) son tangentes a la curva se llaman tangente de entrada, TE, y tangente de salida, TS, respectivamente.

La intersección de las dos tangentes a la curva se designa punto de intersección, PI; el ángulo de deflexión en el PI formado por la prolongación de una tangente y la siguiente se designan con la letra Δ y tiene por valor el ángulo al centro subtendido por la curva.

El tramo de tangente entre él TE y el PI o entre el PI y el TS se denomina semitangente y se designa con la letra T.

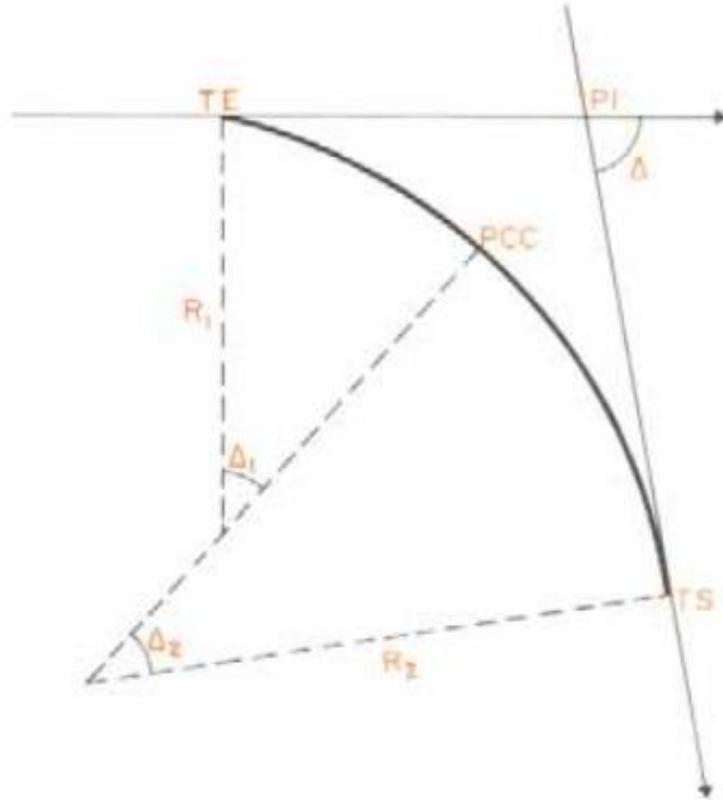
El arco TE-CC-TS es el largo de la curva, L.

La recta entre TE y TS es la cuerda larga, CL; CC es el punto medio de la curva, siendo PI-CC la externa, E. La distancia desde el CC a la cuerda larga es la ordenada media, M.

En las curvas circulares compuestas, además de los elementos acabados de señalar hay que distinguir el punto de tangencia común: Este punto se llama punto de curvatura compuesta, PCC.

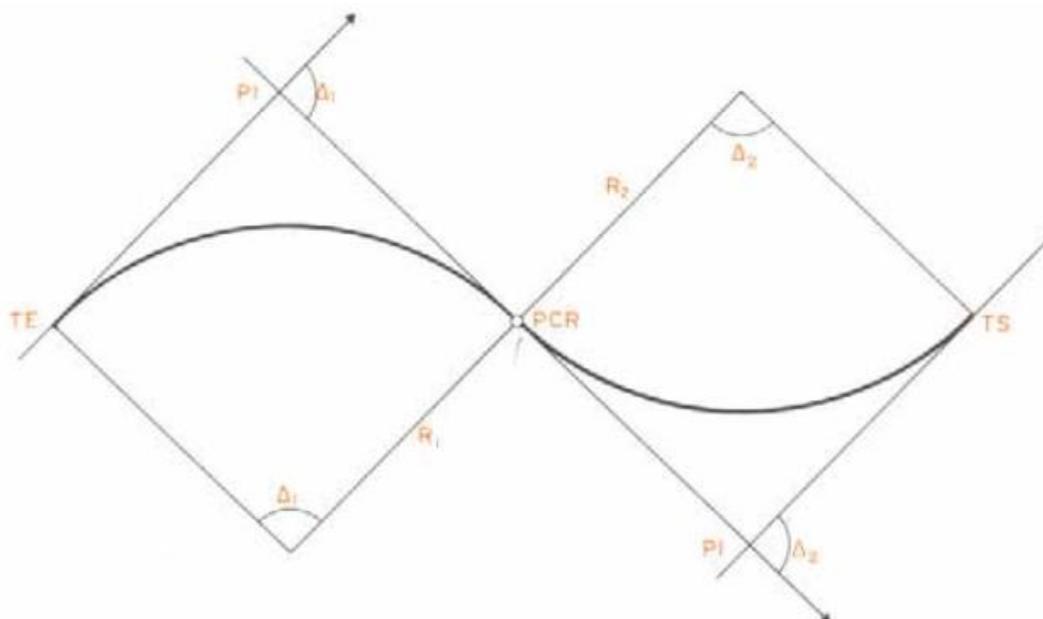
En las curvas revertidas, el punto de contacto recibe el nombre de punto de curvatura revertida, PCR.

Ilustración 5 Elementos de una curva compuesta



Fuente: Libro de carreteras – Jacob Carciente

Ilustración 6 Elementos de una curva revertida



Fuente: Libro de carreteras – Jacob Carciente

2.4.7 Relación entre la velocidad de proyecto y algunas características físicas de las carreteras

Tabla 4 Tabla de relación entre la velocidad de proyecto-Radio mínimo-Distancia de visibilidad de frenado y de paso

Velocidad de proyecto (km/h)	Radio mínimo de curvatura (metros) Para $e = 10\%$	Distancia de visibilidad de frenado (metros)	Distancia de visibilidad de paso (metros)
50	70	65	260
65	130	100	400
80	210	140	510
95	320	190	600
110	375	250	700
130	450	340	800

Fuente: Libro de carreteras – Jacob Carciente

La velocidad de proyecto es un módulo, una escala de referencia a través de la cual pueden estudiarse muchos aspectos del movimiento de los vehículos. Constituye, además la velocidad máxima segura que puede mantenerse en un trayecto, cuando las condiciones son tan favorables que la velocidad que adoptan los conductores depende casi exclusivamente de las características de la carretera.

2.4.8 Velocidades de proyecto para distintas condiciones topográficas

Tabla 5 Tabla de velocidades de proyecto para distintas condiciones topográfica

Condición topográfica del trazado	Velocidad de proyecto (km/h)
Carreteras en llano	90-120
Carreteras en terrenos muy ondulados	80-100
Carreteras en terrenos montañosos	60-80

Fuente: Libro de carreteras – Jacob Carciente

Aunque la velocidad máxima de proyecto ha sido fijada en las normas en 120 km/h, muchos ingenieros se inclinan por ampliar esta hasta 160 km/h, argumentando que, aunque las limitaciones actuales de los conductores y vehículos no permiten el empleo generalizado de esta velocidad, su uso para establecer las características de diseño es una garantía contra la obsolescencia del camino, a la vez que proporciona un margen de seguridad conveniente para la operación de los vehículos.

Sin embargo, debe tenerse presente que, a velocidades mayores de 130 km/h, ciertos factores tales como la acción giroscópica del volante, motor y ruedas, tienden a dominar el vehículo, quitándole el control al conductor, a la vez que los tiempos de percepción y reacción se hacen críticos.

(“Carreteras – Jacob Carciente Profesor titular de la Universidad de Venezuela”)

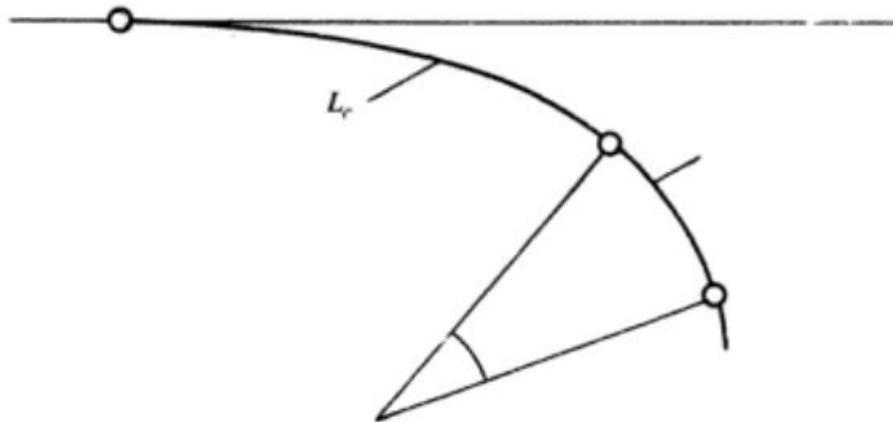
2.5 CURVAS DE TRANSICIÓN

2.5.1 Transición

El trazo de un camino por líneas rectas y curvas circulares horizontales es admisible únicamente como una primera aproximación, ya que la discontinuidad de curvatura existente en el enlace de una tangente con la mencionada curva no puede ser aceptada en

un trazo racional. Así pues, prácticamente, el recorrido de un vehículo, al pasar de una recta a una curva, debe ser efectuado por medio de una transición, o sea mediante una curvatura progresiva, es decir, aquella cuyo radio vaya poco a poco decreciendo del infinito en la unión A con la recta, al mínimo preciso, R, para evitar la sacudida del vehículo por adquirir de repente la relación centrífuga V^2/R en la unión B con la curva, y cuya longitud AB sea igual a la longitud L_c de la curva de transición.

Ilustración 7 Longitud de una curva de transición



Fuente: Vías de comunicación-Crespo Villalaz

Para proyectar un camino con características de seguridad su alineamiento debe ser tal que un conductor circulando a la velocidad de proyecto no únicamente pueda, con facilidad, mantener su vehículo en el carril por donde circula sino que también se sienta incitado a hacerlo de esa manera.

Para ello es necesario que se proyecten espirales de transición, o una curva equivalente, entre las tangentes y las curvas circulares como la clotoide o espiral de Euler que cumple con la condición de que el producto del radio (R) y la longitud (L) a cualquier punto es constante. Si la longitud de transición es “ L_c ” y se desea una variación constante de la fuerza centrífuga a lo largo de la espiral se tiene:

$$\text{Variacion por unidad de longitud} = \frac{V^2}{R \cdot L_c}$$

En un punto cualquiera de la espiral situado a una distancia “L” del origen de la transición, la aceleración centrífuga en ese punto valdrá:

$$\frac{V^2 \cdot L}{R \cdot L_c}$$

Por otra parte, si la curvatura en el punto considerado es $1/R$, la aceleración centrífuga en ese mismo punto será igual a V^2/R , por lo tanto:

$$\frac{V^2 \cdot L}{R \cdot L_c} = \frac{V^2}{R}$$

Dónde:

$$R \cdot L = R \cdot L_c \text{ pero } R \cdot L_c = K^2 \therefore R \cdot L = K^2$$

Que es la ecuación de la clotoide.

Con curvas de transición proyectadas adecuadamente se proporciona al usuario del camino una trayectoria que puede seguir con facilidad, de tal manera que la fuerza centrífuga aumente y disminuya gradualmente conforme el vehículo entra y sale, respectivamente, de una curva circular, disminuyendo con ello la tendencia a invadir el carril adyacente.

Las curvas de transición también proporcionan un medio adecuado para efectuar gradualmente un cambio tanto en la sobreelevación como en la ampliación en las curvas, características geométricas de las que ya se ha tratado con anterioridad.

Puesto que la aceleración en el movimiento circular vale V^2/R y es inversamente proporcional al radio de curvatura para una velocidad determinada, resulta que la transición ha de tener un radio de curvatura inversamente proporcional a su desarrollo desde el punto de partida. La curva que responde exactamente a esa premisa es una de tipo espiral. Parecida a esta es la lemniscata de Bernoulli, curva en la cual la aceleración difiere ligeramente de la proporcionalidad citada a medida que aumenta la distancia desde donde arranca la curva. Otra de las curvas que podría emplearse como curva de transición es la parábola cubica. Prácticamente, no existe diferencia entre estas tres

curvas en pequeñas desviaciones, y por lo tanto, en vértices abiertos, lo mismo da que la transición sea espiral, lemniscata o parábola cubica.

La longitud L_c de la curva de transición se determina de la manera siguiente:

El tiempo en el cual el vehículo recorre la longitud de transición L_c vale:

$$t = \frac{L_c}{V}$$

Ahora bien, como la aceleración normal va de un valor cero a un valor de V^2/R en un tiempo t , el incremento de la misma por unidad de tiempo o sea el coeficiente de variación de la aceleración centrífuga será:

$$J = \frac{\frac{V^2}{R}}{t} = \frac{\frac{V^2}{R}}{\frac{L_c}{V}} = \frac{V^3}{L_c \cdot R}$$

Por lo tanto, la longitud L_c de la transición en función de J vale:

$$L_c = \frac{V^3}{J \cdot R}$$

La estación de ingeniería experimental de Iowa, U.S.A., propone que el valor de J sea de 0.61 a 0.91 m/seg^3 , teniéndose bastante seguridad con el valor de 0.61 m/seg^3 ,

$$L_c = -\frac{V^3}{0.61 R} = 1.64 \cdot \frac{V^3}{R}$$

En la que V está dada en metros por segundo y R en metros.

Si se quiere emplear la expresión anterior usando la velocidad en Km/h se tendría que emplear así:

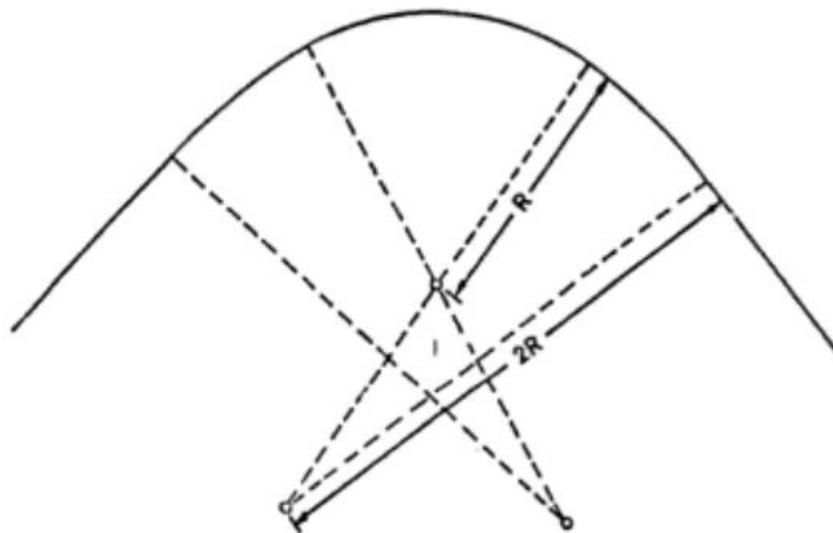
$$L_c = \frac{1.64 \cdot V^3}{(3.6)^3 \cdot R} = 0.0351 \cdot \frac{V^3}{R}$$

Formula en la cual V está en Km/h , R en metros y L_c en metros.

Conocida ya la longitud de transición, el problema que se plantea es el de cuál de las curvas de transición conocidas debe emplearse. Ya se ha indicado con anterioridad, que,

prácticamente, cualquiera de ellas puede ser usada sin dificultad. Sin embargo, una curva sencilla, que difiere poco de las progresivas ya conocidas, y que puede emplearse fácilmente es la parábola. Aun mas, en caminos, es suficiente, en muchísimas ocasiones, unir el círculo de radio R a la tangente con otro círculo de radio $2R$, resultando un trazo que difiere poco de las progresivas conocidas.

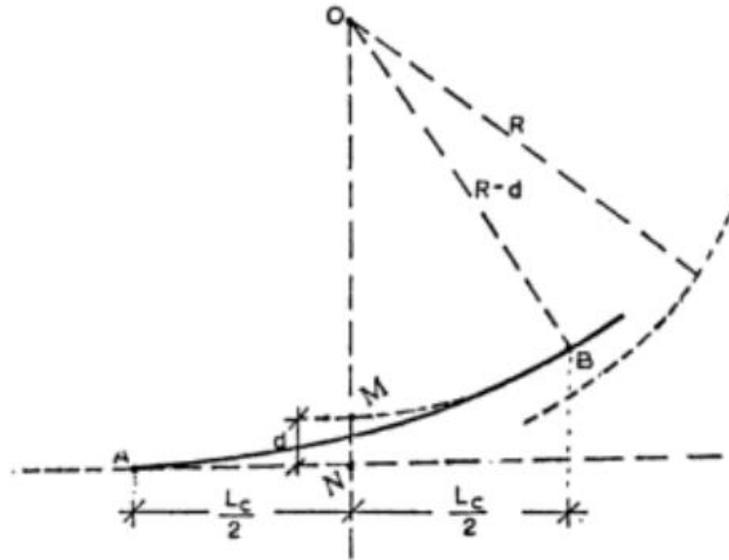
Ilustración 8 Construcción de una curva de transición



Fuente: Vías de comunicación-Crespo Villalaz

En una gran cantidad de casos se puede simplificar grandemente la construcción de las curvas de transición mediante el procedimiento que sigue.

Ilustración 9 Elementos de una curva de transición



Fuente: Vías de comunicación-Crespo Villalaz

Calcúlense los valores de L_c y de d las formulas:

$$L_c = 0.0351 \cdot \frac{V^3}{R}$$

$$d = \frac{L_c^2}{24 \cdot R}$$

Luego trácese un círculo concéntrico al círculo primitivo de la curva, con $(R-d)$ como radio, y, además, llévase el valor de $L_c/2$ a cada lado de M como se indica en la figura, quedando de esa manera fijados inmediatamente los puntos A y B . Por último se traza la curva AB tangente en A a la recta y en B al círculo y pasando por el punto medio de MN . De esa manera queda dibujada la curva de transición sin muchos refinamientos que muchas veces no son necesarios.

(Vías de Comunicación Crespo Villalaz, Editorial Limusa, 2007 Mexico)

2.5.2 Función

Las curvas horizontales tienen una curvatura variable con la distancia recorrida, con lo que se suavizan las discontinuidades en la variación de la curvatura y del peralte. Tanto la curvatura de la trayectoria (obtenida mediante el giro de las ruedas directrices) como el peralte varían paulatinamente a lo largo de una longitud de transición, desde un valor nulo en la alineación recta hasta un valor finito en la curva circular. Con esta solución aumenta la comodidad de la conducción, pues el volante se gira paulatinamente. También se ha comprobado que la presencia de curvas de transición bien diseñadas reduce la siniestralidad.

En ambos extremos de la curva de transición, este debe no solo coincidir con la alineación contigua y ser tangente a ellas, sino que también debe coincidir la curvatura. Estos extremos se denominan, respectivamente, tangentes de entrada o tangente de salida (según el sentido de recorrido) si la alineación contigua es una recta; y tangente común si es una circunferencia. Si se trata de enlazar dos alineaciones circulares de distinto radio y del mismo sentido de curvatura, una interior a la otra y que no sean concéntricas (curva ovoide), hay dos tangentes comunes.

La forma de una curvatura de transición, queda definida por la ley adimensional que relaciona las curvaturas con los recorridos:

$$\frac{I}{\rho} = \frac{R}{\rho} = \frac{f(s)}{f(L)}$$

Siendo “s” la distancia al punto de curvatura nula, medida a lo largo de la curva de transición; L la longitud de la curva de transición; ρ el radio de la circunferencia osculadora a la curva de transición en la tangente común (s=L).

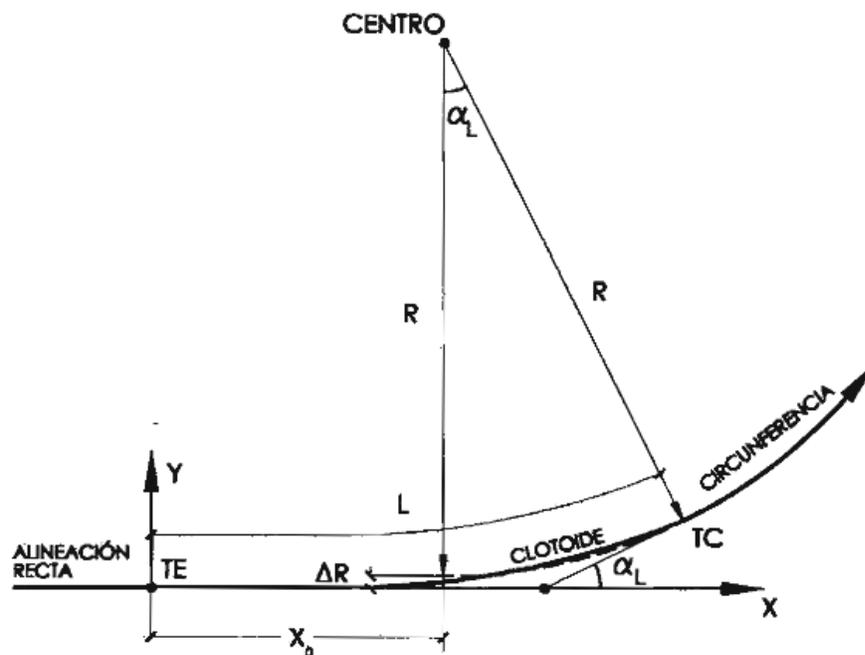
La inserción de las curvas de transición en un trazado exige que se definan tres parámetros:

1. La que se denomina abscisa del centro x_0 , la cual corresponde efectivamente a la posición del centro de la curva circular, referida a un sistema de coordenadas con su

origen en la tangente de entrada (o de salida), y con su eje de las abscisas (crecientes hacia el vértice) coincidente con la alineación recta.

2. El retranqueo ΔR de la curva circular, que corresponde a la separación que debe haber entre esta y la alineación recta para que quepa la curva de transición. En el mismo sistema de coordenadas definido en el apartado anterior, la ordenada del centro de la circunferencia ser $R + \Delta R$. Frente a los radios habituales, el retranqueo resulta muy pequeño
3. El desarrollo angular α_L de la curva de transición, o sea, la diferencia entre los acimutes en sus extremos, la cual consume una parte del ángulo de giro disponible.

Ilustración 10 Parámetros de inserción de una curva de transición



Fuente: Ingeniería de carreteras volumen I-Carlos Kramer

Para un mismo radio R de la curva circular, los tres parámetros de inserción dependen de la longitud de transición L y de la forma de la curva de transición: Fijada esta, es posible determinar tanto sus tres parámetros de inserción como las coordenadas de cualquiera de sus puntos sin que para ello sea imprescindible, reducirla a una expresión analítica. Basta con integrar:

$$d\alpha = \frac{ds}{\rho} = \frac{f(s) \cdot ds}{R \cdot f(L)}$$

Para hallar el ángulo α que representa la variación del acimut; particularizando para L se halla el desarrollo angular α_L .

En el sistema de coordenadas antes definido, las de un punto genérico s se hallan integrando:

$$x = L \cdot \int_0^s \cos \alpha \cdot ds$$

$$y = L \cdot \int_0^s \sen \alpha \cdot ds$$

Los dos restantes parámetros de inserción se obtienen, a partir de las coordenadas de la tangente común (x_L, y_L), mediante las expresiones:

$$x_0 = x_L - R \cdot \sen \alpha_L \approx x_L - R \cdot \alpha_L$$

$$\Delta R = y_L - R \cdot (1 - \cos \alpha_L) \approx y_L - R \cdot \frac{\alpha_L^2}{2}$$

Las aproximaciones son válidas para los valores pequeños de α_L que se emplean en la mayoría de las curvas.

(Ingeniería de Carreteras Volumen I, Carlos Kramer, Editorial Mc Graw Hill, España 2004)

2.5.3 La clotoide

La curva de transición más frecuentemente utilizada es la clotoide, que corresponde a la trayectoria de un vehículo que circula a una velocidad constante y cuyo conductor gira el volante a una velocidad angular también constante. La clotoide es una espiral definida por una ley de curvaturas lineal con la distancia recorrida:

$$\frac{R}{\rho} = \frac{s}{L}$$

Por lo tanto, en todo punto de una clotoide el producto del radio de curvatura ρ por la distancia s al punto de una curvatura nula es constante e igual a:

$$A^2 = R \cdot L$$

La constante A , que tiene las dimensiones de una longitud, se denomina parámetro de la clotoide. Respecto del punto de curvatura nula todas las clotoides son homotéticas, con factor de homotecia igual a A .

La variación del acimut resulta ser proporcional al cuadrado de la distancia recorrida:

$$\alpha = \frac{1}{R \cdot L} \cdot \int_0^s s \cdot ds = \frac{s^2}{2 \cdot A^2}$$

Lo que lleva a la definición del desarrollo angular de una clotoide:

$$\alpha_L = \frac{L^2}{2 \cdot A^2} = \frac{L}{2 \cdot R} \text{ rad} = \frac{100}{\pi} \cdot \frac{L}{R} \text{ gon}$$

La definición de las coordenadas cartesianas es más complicada, pues intervienen en ella las integrales de Fresnel. Para valores pequeños de α , la clotoide se aproxima a una parábola cubica:

$$x \approx s$$

$$y \approx \frac{s^3}{6 \cdot A^2}$$

Por lo tanto, si α_L , es pequeño, las coordenadas de la tangente común ($s=L$) son, aproximadamente:

$$x_L \approx L$$

$$y_L \approx \frac{L^3}{6 \cdot A^2}$$

Para valores pequeños de α_L los demás parámetros de inserción valen, aproximadamente:

$$x_0 \approx L - R \cdot \frac{L^2}{2 \cdot A^2} = \frac{L}{2}$$

$$\Delta R \approx \frac{L^3}{6 \cdot A^2} - R \cdot \frac{\left(\frac{L}{2 \cdot A^2}\right)^2}{2} = \frac{L^2}{24 \cdot R}$$

(Ingeniería de Carreteras Volumen I, Carlos Kramer, Editorial Mc Graw Hill, España 2004)

2.5.4 Longitudes mínima y máxima

No conviene que una curva de transición sea muy corta, pues:

1. Su presencia no resultaría suficientemente perceptible.
2. La velocidad de variación del peralte podría resultar incómoda.
3. La velocidad de variación del rozamiento transversal movilizado también podría resultar incómoda.

Tampoco conviene que sea muy larga, porque:

- Resultaría menos perceptible la magnitud de la curvatura final (la de la circunferencia).
- Pueden resultar muy largas las zonas de la plataforma de la carretera en las que es escasa la inclinación transversal, dando lugar a problemas de desagüe superficial.

Las condiciones anteriores acotan una gama aceptable de longitudes de la curva de transición, de manera que se cumplan todas ellas. La práctica se simplifica por la aplicación de unos criterios como los siguientes:

- a) Para la longitud mínima, suele resultar más determinante la condición de la categoría 1 antes reseñada, que las 2 y 3. Está relacionada con la imposición de unos valores mínimos al desarrollo angular de la curva de transición o al replanteo de la curva circular. Así, por ejemplo, la norma española 3.1-IC (1999) obliga a que sea, simultáneamente.

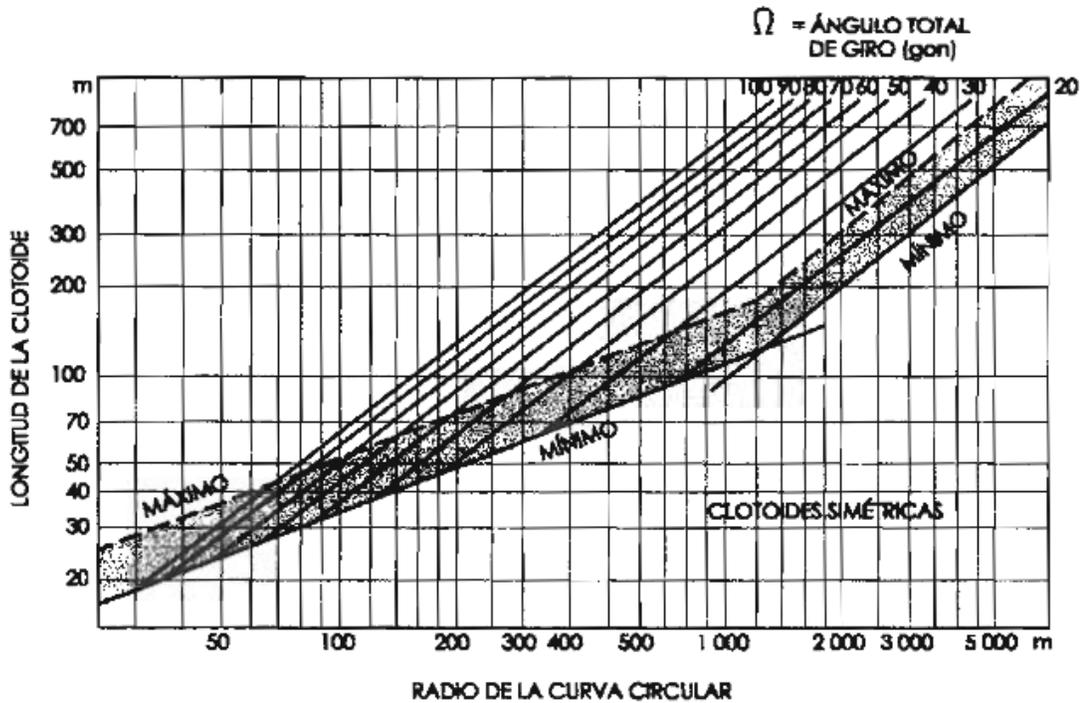
$$\alpha_L \geq \frac{1}{18} \text{ rad}$$

$$\Delta R \geq 0.5 \text{ m.}$$

Y recomienda que sea:

$$\alpha_L \geq \frac{\Omega}{5}$$

Gráfica 1 Longitudes mínima y máxima de una clotoide



Fuente: Ingeniería de carreteras volumen I-Carlos Kramer

Siendo Ω el ángulo total de giro (entre las alineaciones rectas que enmarcan a la curva). Naturalmente, si Ω es menor de 7,0736 gon la condición es imposible de cumplir; con estos ángulos pequeños, para evitar la aparición de puntos angulosos en la perspectiva se necesita un desarrollo mínimo:

$$\frac{\pi \cdot \Omega}{200} \cdot R \geq 325 \text{ m.} - 25 \cdot \Omega$$

El cual se traduce en unos radios muy grandes que permiten prescindir de las curvas de transición.

- b) La longitud máxima se suele definir como un múltiplo de la mínima. Así, por ejemplo, la Norma española 3.1-IC (1999) obliga que la longitud de una curva de transición no sea superior a 1,5 veces la mínima. En todo caso, la suma de los desarrollos angulares α_L de las dos curvas de transición que corresponden a una misma curva circular (una a la entrada y otra a la salida) no puede ser superior al ángulo total de giro Ω . Si, como es normal, se trata de unas clotoides simétricas, esto equivale a que sea (con Ω en gon):

$$L \leq \frac{\pi \cdot \Omega}{200} \cdot R$$

La condición 2 de velocidad de variación del peralte depende de la ley de velocidades a lo largo de la curva de transición (normalmente, se considera constante) y de la ley de peraltes en ella. Esta última se puede ver complicada por un intento de reducir la longitud de la zona en la que es escasa la inclinación transversal de la plataforma, dando lugar a leyes quebradas. En cualquier caso, la velocidad de variación del peralte, por razones de comodidad del usuario, no debería rebasar un 4 por segundo a la velocidad específica de la curva. Otras veces se limita la diferencia entre la inclinación longitudinal del eje de la calzada y la de sus bordes (de esta forma se refleja en la Norma española 3.1-IC).

En la condición 3, de velocidad de variación del rozamiento transversal movilizado (o lo que es lo mismo, de la aceleración centrífuga no compensada por el peralte, en m/s^3), influyen no solo las leyes de velocidad y de peralte, sino también la ley de curvatura determinada por la forma de la curva de transición. Los límites de la variación suelen disminuir al aumentar la velocidad específica de la curva. (Ingeniería de Carreteras Volumen I, Carlos Kramer, Editorial Mc Graw Hill, España 2004)

2.6 DISTRIBUCIÓN DE LAS VELOCIDADES

El concepto de velocidad es complejo en sí mismo y se puede referir a la de un solo vehículo, que no permanece constante ni siquiera cuando el conductor procura mantenerla fija, o a la distribución de las velocidades de los distintos vehículos en una corriente de tráfico. En general, interesa más estudiar unos valores representativos de la

distribución de las velocidades, que seguir la evolución de cada uno de los vehículos que circulan por un tramo.

Para estudiar la velocidad de los vehículos en una sección de una carretera o a lo largo de un tramo de ella, se pueden realizar directamente unas mediciones, o emplear unos modelos matemáticos de los vehículos y de sus conductores, comprobados por la medición de la velocidad de los primeros y por unas observaciones del comportamiento de los segundos.

Es preciso decidir el fractil de la distribución de velocidades al que se va a referir el trazado de la carretera:

- Un trazado que proporcione una circulación cómoda para los fractiles más altos de la distribución de las velocidades resulta muy caro; por tanto, los conductores más rápidos deben estar dispuestos a admitir un cierto grado de incomodidad en sus maniobras.
- Sólo se puede admitir que una fracción pequeña de conductores muy rápidos se sitúe más allá de unas condiciones estrictas de seguridad.

Por lo tanto, hay que establecer un compromiso aceptable entre los costes de construcción y los de explotación, habida cuenta de la diversidad de los comportamientos humanos a los que una misma infraestructura fija pretende servir. Este compromiso suele adoptar la forma siguiente:

- Se toma como referencia la velocidad V_{85} , sólo superada por el 15 por 100 de los vehículos, para los aspectos del diseño de la carretera relacionados con la comodidad de la circulación (maniobras menos bruscas, realizadas con mayor margen).
- La utilización de V_{85} para el diseño debe proporcionar también un suficiente margen de seguridad estricta a los vehículos más rápidos (los que circulan a una velocidad V_{99}), aunque sus ocupantes circulen con menor comodidad (maniobras más bruscas o de emergencia).

(Ingeniería de Carreteras Volumen I, Carlos Kramer, Editorial Mc Graw Hill, España 2004)

2.7 ESTUDIO DE VELOCIDADES

2.7.1 Aspectos generales

2.7.1.1 Condiciones de ejecución

Toda proposición de cambio o definición de velocidad de una vía o tramo de vía, deberá ir acompañado de un estudio de velocidades que justifique, desde un punto de vista técnico, la modificación que se pretende introducir.

El estudio servirá también para sintetizar de manera adecuada los datos, argumentos técnicos y modificaciones de diseño que requiera la gestión de velocidad y de la seguridad vial. Este deberá constar de dos partes; un “Diagnostico” y un “Proyecto de ingeniería” que sinteticen los aspectos técnicos definidos.

El desarrollo de un estudio de velocidad, se requerirá en autopistas, autorrutas, carreteras primarias y caminos colectores, debido a que un cambio de una velocidad máxima tendrá un impacto en la operación de tránsito en toda el área afectada. Se excluyen de esta necesidad los caminos locales y de desarrollo.

2.7.1.2 Definiciones

a. Velocidad de operación

La velocidad de operación es la velocidad media de desplazamiento que pueden lograr los usuarios en un tramo de carretera de una velocidad de proyecto dada, bajo las condiciones prevalecientes del tránsito, del estado del pavimento, meteorológicas y grado de relación de esta con otras vías y con la propiedad adyacente.

Si el tránsito y la interferencia son bajos, la velocidad de operación del usuario medio es del orden de la velocidad de proyecto y para un cierto grupo de usuarios superior a esta. A medida que el tránsito crece, la interferencia entre vehículos aumenta tendiendo a bajar la velocidad de operación del conjunto.

b. Velocidad de proyecto

Para efectos de los estudios de velocidad, la velocidad de proyecto asociada a las condiciones viales prevalecientes en el sector en análisis, se obtendrá a partir del análisis de los parámetros de diseño obtenidos en terreno.

Por otra parte, en caso que el proyecto vial del sector sujeto a estudio de velocidad esté disponible, la velocidad de proyecto será obtenida a partir de este.

La velocidad de proyecto obtenida en un tramo de vía, se debe diferenciar por sentido de tránsito. Además, cada tramo definido tiene implícito que sus condiciones de operación son homogéneas, en lo relativo a: Volumen de tránsito, capacidad de la vía, etc.

c. Velocidad equivalente

Se entenderá que dos velocidades son equivalentes, cuando difieren en +20% o -10% de la velocidad de referencia.

Tabla 6 Tabla de rango de velocidades equivalentes

Velocidad Km/h	Velocidad equivalente (Km/h)	
	Menor	Mayor
50	40	60
60	50	70
70	60	80
80	70	100
90	80	110
100	90	120
110	100	130

Fuente: Manual de diseño geométrico-Administradora Boliviana de Carreteras

2.7.2 Métodos para la determinación de velocidades de operación

2.7.2.1 Tipos de velocidad a determinar

Se pueden distinguir al menos tres tipos de velocidad, que representan fenómenos diferentes:

- Instantánea, asociada a un punto.
- De recorrido, asociada a un tramo excluyendo las detenciones,
- De viaje, asociada a un tramo incluyendo tiempos de detención.

Las velocidades de recorrido y de viaje son variables agregadas: la primera desde el punto de vista de la circulación, la segunda desde el punto de vista del usuario.

2.7.2.2 Aspectos temporales en la medición de velocidad

Las mediciones de velocidades de circulación vehicular, deben realizarse en momentos del año que representen las condiciones de operaciones normales, habituales o más representativas del tramo de vía en estudio.

A su vez, se registran diferencias entre las características de operación de sectores urbanos y rurales, principalmente por el efecto de los periodos de punta. De esta forma, los periodos horarios del día es factible realizar la medición de velocidad, serán distintos según si la ruta es rural o urbana.

Por otra parte, la medición de Velocidad de Operación se debe efectuar con una duración horaria tal que evite distorsiones puntuales que se puedan reproducir durante el día. Dado que los periodos factibles de efectuar la medición de velocidades son distintos entre los casos urbano y rural, lo mismo se aplica para la duración horaria mínima de la medición.

El periodo horario de medición de velocidad en zonas urbanas se debe determinar en función de los horarios de actividad en las distintas ciudades. En las zonas rurales se puede adoptar un horario para todo territorio nacional, de las 07:00 a las 20:00, dado que no existen variaciones tan marcadas de flujo vehicular, en la siguiente tabla se propone la duración de las mediciones en función de la zona en que se medirá.

Tabla 7 Tabla de aspectos temporales para medición de velocidades

Tipo de ruta	Duración mínima de la medición (hr)	Duración máxima de la medición (hr)
Urbana	6	9
Rural	8	12

Fuente: Manual de diseño geométrico-Administradora Boliviana de Carreteras

2.7.2.3 Métodos de medición de velocidad

La utilización de cada uno de los métodos que se describen a continuación, depende más de los recursos disponibles que del objetivo: si se cuenta con un radar o un detector de velocidad, lo lógico es medir velocidades instantáneas; en cambio, si se dispone solo de un vehículo, conviene su uso como vehículo flotante. Lo que interesa, en definitiva, es tener una estimación razonable de la velocidad de operación.

a. Velocidad instantánea

En estos casos, las velocidades individuales de los vehículos (V_i) se obtienen directamente de la lectura del instrumento o equipo. Es importante al definir el método a utilizar, que los usuarios no perciban que se les está midiendo la velocidad, ya que podría distorsionar los valores que se obtienen. Los métodos más usuales son:

i. Radar

Usado para control de límite de velocidad (desviación estándar ± 2 km/h). Este método presenta limitaciones en condiciones de circulación intensa, pues se dificulta la medición de un vehículo determinando. Es especialmente apto para vías interurbanas, cuando se desea determinar velocidades de aproximación a puntos singulares o cuando las velocidades observadas son homogéneas.

Existen sistemas de radar aptos para cualquier condición de operación, pero de preferencia se deberán utilizar los que se instalan sobre un vehículo en forma paralela a la calzada. Estos instrumentos miden en base a dos haces de laser en forma perpendicular a la vía, los que determinan la velocidad instantánea. Este método permite efectuar la medición sin que los usuarios perciban que están siendo observados.

ii. Sensores triboeléctricos

Son sensores puestos bajo el pavimento. Al pasar un vehículo produce una deformación que se transmite a un sensor, el que genera una carga eléctrica. Dos sensores ubicados a cierta distancia producirán dos cargas eléctricas en un intervalo de tiempo.

iii. Sensores de microondas

Este equipo se instala de forma transversal a la vía en análisis. Al pasar un vehículo interceptando el haz de la microonda detecta la velocidad de este. El equipo es de tamaño reducido y se instala en la parte superior de un poste emplazado a los costados de la vía.

b. Velocidad de recorrido y de viaje

En estos casos se determinan tiempos de viaje (T_i) para un cierto tramo de longitud (L) de la vía. Normalmente se trabaja con muestra (Subconjunto de vehículo observados). Los métodos de medición más usuales son:

i. Medición directa

Un observador con cronometro determina la diferencia de tiempo de viaje ΔT entre dos marcas separadas a una distancia ΔL . La velocidad individual (V_i) de cada vehículo será el cociente entre ΔL y ΔT . Es un método simple, pero solo aplicable a tramos cortos ya que un error en la obtención de ΔT implica velocidades diferentes. Existen problemas de paralelismo y el proceso es lento, lo que implica considerar tamaños muestrales pequeños.

ii. Método de las patentes

Este método consiste básicamente en ubicar observadores a la orilla de la vía, a fin de que anoten el número de la patente y el tiempo de pasada entre dos puntos de cada vehículo motorizado, identificando su categoría (vehículo liviano, bus, camión de dos ejes, etc.). La gran desventaja de esta técnica es el requerimiento computacional posterior para el análisis y procesamiento de la información.

Para situaciones de alto flujo vehicular, normalmente se anotan las patentes de algunos dígitos en particular; por ejemplo, los dígitos pares. Este método permite obtener tiempo de viaje o velocidades, conocida la distancia recorrida, para cada vehículo registrado. Se requiere que los cronómetros estén sincronizados. Su limitación radica en la dificultad de lectura de la patente al oscurecer.

iii. Método del vehículo flotante

Este método consiste en utilizar un vehículo que circule dentro de un pelotón de vehículos, en periodos sin congestión, registrado el tiempo empleado en recorrer un tramo de vía de longitud determinada. Los inconvenientes principales consisten en que los resultados obtenidos estarán estrechamente ligados a la forma de conducción del vehículo y el número de observaciones normalmente es pequeño en comparación con otros métodos.

iv. Método del seguimiento

Este método consiste en utilizar un vehículo que, a diferencia del caso anterior, está equipado con un registrador de eventos, de modo que registre, cada cierto intervalo de tiempo predefinido, la distancia recorrida y el tiempo empleado. Con esto, la información posible de obtener es el tiempo de viaje del pelotón para cada tramo recorrido. Las limitaciones del método son similares a las del vehículo flotante.

v. Filmación del flujo

Método apto para tamaños muestrales grandes. Es similar al método de medición directa y su principal limitación es que el procesamiento de la información es lento y normalmente existen problemas para determinar los puntos que definen ΔL . Las velocidades individuales se estiman como el cociente entre ΔL y ΔT . (“Manual de diseño geométrico 2007-Administradora Boliviana de Carreteras”)

2.7.3 Definición de velocidades máximas

2.7.3.1 Velocidad límite legal máxima

Corresponde a las establecidas la ley de Tránsito. Para el caso de vías en zona rurales, la velocidad máxima se define según lo indicado en la tabla siguiente:

Tabla 8 Tabla de velocidad límite legal máxima en vías interurbanas

Tipo de vehículo	Velocidad límite legal máxima
Vehículos livianos de menos de 3860 kg. de peso bruto	Vías unidireccionales 120 km/h
	Vías bidireccionales 100 km/h
Buses interurbanos	Vías unidireccionales 100 km/h
	Vías bidireccionales 100 km/h
Vehículos de transporte escolar	Vías unidireccionales 90 km/h
	Vías bidireccionales 90 km/h
Camiones 2 ejes y buses no interurbanos de más de 3860 kg.	Vías unidireccionales 90 km/h
	Vías bidireccionales 90 km/h
Camiones de más de 2 ejes	Vías unidireccionales 90 km/h
	Vías bidireccionales 90 km/h

Fuente: Manual de diseño geométrico-Administradora Boliviana de Carreteras

2.7.3.2 Velocidad límite legal señalizada

Corresponde a la señal vertical reglamentaria, instalada en un camino o carretera, que indica el conductor la velocidad máxima permitida para circular. Como regla general la velocidad límite legal señalizada en la velocidad límite legal máxima, salvo en aquellos sectores en que ha sido modificada por aspectos de operación o diseño, y respaldada mediante los estudios de velocidad contemplados en la normativa vigente, según corresponda.

2.7.3.3 Modificaciones de velocidad máxima

De ser necesario introducir modificaciones al diseño vial de la infraestructura existente, de manera que la velocidad de operación y la velocidad de proyecto sean equivalentes, se debe evaluar el tipo de modificación más adecuado de acuerdo a las características de la vía, se debe evaluar el tipo de modificación más adecuado de acuerdo a las características de la vía, de los sectores próximos al tramo en estudio, de los volúmenes de tránsito y de su composición, de su régimen de operación relevante.

(De paso o de accesibilidad), de su entorno (Netamente interurbano, semi urbano, urbano) y del uso de suelo.

Se tienen dos tipos de modificación posibles:

- Mejoramiento del diseño vial de manera de aumentar la velocidad de proyecto y hacerla equivalente con la velocidad de operación.
- Cambios en el diseño vial de manera de disminuir la velocidad de operación y hacerla equivalente con la velocidad de proyecto.

a. Rediseño vial para aumentar la velocidad

Se entienden como medidas de mejoramiento del diseño vial, a todas aquellas modificaciones tendientes a mejorar los parámetros de diseño geométrico, de pavimentos, de iluminación u otros; que resulten en un aumento de la velocidad de proyecto.

Se tomarán medidas técnicas y económicamente factibles de mejoramiento del diseño vial, en alguna de las siguientes situaciones:

- Cuando el tramo de vía en estudio represente una restricción de diseño geométrico, en relación con los sectores próximos a este. Es decir, una singularidad que afecta la operación de los vehículos.
- Cuando la velocidad de proyecto del tramo en estudio, este determinada por condición de distancia de visibilidad en planta, la cual puede ser mejorada mediante despejes laterales.

b. Rediseño vial para disminuir la velocidad

Hay investigaciones que indican que la velocidad de operación asumida por los usuarios de una vía, depende de la interpretación de las condiciones operacionales de la vía. No debe esperarse que la sola limitación legal o la señalización reduzcan la velocidad de operación, si los conductores perciben que pueden circular a una velocidad mayor.

Cualquier característica geométrica que aumente en los conductores la percepción de riesgo, resultara en una deducción de velocidad.

(“Manual de diseño geométrico 2007-Administradora Boliviana de Carreteras”)

2.8 CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA DE DISEÑO

Siguiendo las investigaciones efectuadas en Alemania, Suiza y las realizadas por Leisch y Leisch, en el año de 1988 los investigadores Lamm, Choueiri, Hayward y Paluri presentaron su trabajo: “Possible Desing Procedure to Promote Design Consistency in Highway Geometric Design in Two lane Rural Roads”, incluyendo además el estudio del comportamiento de los conductores y varias situaciones de accidentes en secciones curvas de carreteras rurales de dos carriles. Esta investigación se basó, principalmente, en criterios de seguridad para alcanzar la consistencia en alineamientos y fijó los criterios que en la actualidad se emplean para cualificar un alineamiento. Posteriores investigaciones han ampliado y profundizado los criterios desarrollando en base al análisis de regresiones múltiples la capacidad de describir relaciones entre parámetros de diseño, velocidad de operación y tasas de accidentes bajo condiciones reales. Siguiendo estas investigaciones, las recomendaciones con respecto a la consistencia del alineamiento o el lograr características más consistentes en la carretera, pueden darse siguiendo los criterios de seguridad.

Tabla 9 Criterios de seguridad

Criterio de Seguridad	Práctica de diseño		
	Buena	Justa	Mala
I	$ V_{85i} - V_{85i} + 1 \leq 10 \text{ Km/h}$	$10 \text{ Km/h} < V_{85i} - V_{85i} + 1 \leq 20 \text{ Km/h}$	$20 \text{ Km/h} < V_{85i} - V_{85i} + 1 $
II	$ V_{85} - V_d \leq 10 \text{ Km/h}$	$10 \text{ Km/h} < V_{85} - V_d \leq 20 \text{ Km/h}$	$20 \text{ Km/h} < V_{85} - V_d $

Fuente: Possible desing procedure to promote design consistency in highway geometric design in two lane rural roads-Lamm, Choueiri, Hayward y Paluri

Dónde:

V_{85} = 85avo. Percentil de la velocidad (km/h).

V_d = Velocidad de diseño (km/h).

Estos criterios ayudan a evaluar la consistencia del diseño pero no suplantán el buen juicio y la experiencia del diseñador.

2.8.1 Criterio de seguridad I

Para lograr seguras transiciones entre sucesivas características geométricas, los rangos recomendados para prácticas de diseño buenas, ajustadas y pobres se muestran en la tabla 5.1. Sobre la base de la diferencia absoluta entre las correspondientes velocidades V_{85} . Esto proporciona un sistema de calificación cuantificable y sofisticada, cuyo origen está fundamentado en una gran cantidad de accidentes observados y medidos.

- Una práctica de diseño buena significa que, de acuerdo con los rangos de la tabla 5.1. existe consistencia entre sucesivas características del alineamiento, el mismo que no crea inconsistencias en la velocidad de operación de los vehículos. Es de esperar un alineamiento con un diseño consistente.
- La práctica de un diseño ajustado indica que algunos segmentos de la carretera pueden contener al menos menores inconsistencias entre elementos sucesivos del diseño geométrico. Normalmente, se puede garantizar el tráfico empleando una conveniente señalización vertical y horizontal, no es necesario efectuar un rediseño.
- Una práctica de diseño pobre indica que aquellos segmentos de la carretera tienen fuertes inconsistencias entre las características consecutivas del alineamiento. El perfil de velocidades muestra quiebres, esto puede llevar a los conductores a realizar maniobras críticas y arriesgadas. Normalmente, se recomienda el rediseño.

2.8.2 Criterio de seguridad II

Para evaluar características geométricas independientes, tal como curvas y tangentes, se recomienda emplear los rangos mostrados en la tabla 9 para prácticas de diseño buenas, ajustadas y malas. Está basada en la diferencia absoluta entre la velocidad de operación V_{85} y la velocidad de diseño V_d .

- Una buena práctica de diseño significa que, de acuerdo a los rangos mostrados en la tabla 5.1. no es necesario efectuar adaptaciones ni correcciones entre las velocidades

V_{85} y la velocidad de diseño V_d . Es de esperar un alineamiento consistente en su diseño.

- Una práctica de diseño ajustada indica que se está al límite de lo recomendado, por lo que de acuerdo a los valores obtenidos en el perfil de velocidades debe realizarse un análisis y comparar los resultados de ambos criterios para tomar la decisión de rediseñar o asegurar el tráfico mediante una correcta señalización vertical y horizontal.
- Una pobre práctica de diseño indica que es necesario efectuar el rediseño del segmento de la carretera. No se espera consistencia en el diseño.

2.9 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN

2.9.1 Categoría de las vías

La clasificación para diseño consulta seis categorías divididas en dos grupos, ellas son:

- Carreteras: Autopistas, Autorrutas y Primarias
- Caminos: Colectoras, Locales y de Desarrollo

Cada categoría se subdivide según las velocidades de proyecto consideradas al interior de la categoría. Las V_p más altas corresponden a trazados en terrenos llanos, las intermedias en terrenos ondulados y las más bajas a terreno montañoso o cuyo entorno presenta limitaciones severas para el trazado. El alcance general de dicha terminología es:

Terreno llano: Está constituido por amplias extensiones libres de obstáculos naturales y una cantidad moderada de obras construidas por el hombre, lo que permite seleccionar con libertad el emplazamiento del trazado haciendo uso de muy pocos elementos de características mínimas. El relieve puede incluir ondulaciones moderadas de la rasante para minimizar las alturas de cortes y terraplenes; consecuentemente la rasante de la vía estará comprendida mayoritariamente entre $\pm 3\%$.

Terreno ondulado: Está constituido por un relieve con frecuentes cambios de cota, si bien no son demasiado importantes en términos absolutos, son repetitivos, lo que obliga a emplear frecuentemente pendientes de distinto sentido que pueden fluctuar entre 3 al

6%, según la categoría de la ruta. El trazado en planta puede estar condicionado en buena medida por el relieve del terreno, con el objeto de evitar cortes y terraplenes de gran altura, lo que justificara un uso más frecuente de elementos del orden de los mínimos. Según la importancia de las ondulaciones del terreno se podrá tener un ondulado medio o fuerte.

Terreno montañoso: Está constituido por cordones montañosos o “Cuestas”, en las cuales el trazado salva desniveles considerables en términos absolutos. La rasante del proyecto presenta pendientes sostenidas de 4 a 9%, según la categoría del camino, ya sea subiendo o bajando. La planta está controlada por el relieve del terreno (Puntillas, laderas de fuerte inclinación transversal, quebradas profundas, etc.) y también por el desnivel a salvar, que en oportunidades puede obligar al uso de curvas de retorno. En consecuencia, el empleo de elementos de características mínimas será frecuente y obligado.

En trazados por donde se atraviesan zonas urbanas o suburbanas, salvo casos particulares, no es el relieve del terreno el que condiciona el trazado, siendo el entorno de la ciudad, barrio industrial, uso de suelo, etc., el que los impone. Situaciones normalmente reguladas por el plan regulador y su seccional correspondiente.

Tabla 10 Tabla de clasificación funcional para diseño de carreteras y caminos rurales

Categoría		Sección transversal		Velocidades de proyecto (Km/h)	Código tipo
		Nº Carriles	Nº Calzadas		
Autopista	(O)	4 ó + UD	2	120-100-80	A(n)-xx
Autorruta	(I.A)	4 ó + UD	2	100-90-80	AR(n)-xx
Primario	(I.B)	4 ó + UD	2 (1)	100-90-80	P(n)-xx
		2 BD	1	100-90-80	P(2)-xx
Colector	(II)	4 ó + UD	2(1)	80-70-60	C(n)-xx
		2 BD	1	80-70-60	C(2)-xx
Local	(III)	2 BD	1	70-60-50-40	L(2)-xx
Desarrollo		2 BD	1	50-40-30*	D-xx

Fuente: Manual de diseño geométrico-Administradora Boliviana de Carreteras

Dónde:

UD= Unidireccionales

BD= Bidireccionales

(n)= Número total de carriles

-xx= Velocidad de proyecto (Km/h)

a. Autopista (0)

Son carreteras nacionales diseñadas desde su concepción original para cumplir con las características y niveles de servicio que se describen a continuación. Normalmente su emplazamiento se sitúa en terrenos rurales donde antes no existían obras viales de alguna consideración, que impongan restricciones a la selección del trazado y pasando a distancias razonablemente alejadas del entorno suburbano que rodea las ciudades o poblados (circunvalaciones).

Las velocidades de proyecto, según el tipo de emplazamiento son:

- Terreno llano a ondulado medio 120 km/h
- Terreno ondulado fuerte 100 km/h
- Terreno montañoso 80 km/h

b. Autorrutas (I.A)

Son carreteras nacionales existentes a las que se les ha construido o se le construirá una segunda calzada prácticamente paralela a la vía original. Normalmente se emplazan en corredores a lo largo de los cuales existen extensos tramos con desarrollo urbano, industrial o agrícola intensivo, muy próximo a la faja de la carretera.

Las velocidades de proyecto consideradas son:

- Terreno llano a ondulado fuerte 100 y 90 km/h
- Terreno montañoso 80 km/h

c. Carreteras primarias (I.B)

Son carreteras nacionales o regionales, con volúmenes de demanda medios a altos, que sirven al tránsito de paso con recorridos de mediana y larga distancia, pero que sirven también un porcentaje de tránsito de corta distancia, en zonas densamente pobladas.

Las velocidades de proyecto consideradas son:

- Terreno llano y ondulado fuerte 100 y 90 km/h
- Terreno montañoso 80 km/h

d. Caminos Colectores (II)

Son caminos que sirven de mediana y corta distancia, a los cuales acceden numerosos caminos locales o de desarrollo. El servicio de tránsito de paso y a la propiedad colindante tiene una importancia similar. Podrán circular por ellos toda clase de vehículos motorizados.

Las velocidades de proyecto consideradas son:

- Terreno llano a ondulado medio 80 km/h
- Terreno ondulado fuerte 70 km/h
- Terreno montañoso 60 km/h

e. Caminos Locales (III)

Son caminos que se conectan a los caminos colectores. Están destinados a dar servicio preferentemente a la propiedad adyacente. Son pertinentes las ciclovías.

Las velocidades de proyecto son:

- Terreno llano a ondulado medio 70km/h
- Terreno ondulado fuerte 60 km/h
- Terreno montañoso 50 y 40 km/h

f. Caminos de desarrollo

Están destinados a conectar zonas aisladas y por ellas transitarán vehículos motorizados y vehículos a tracción animal.

Las velocidades referenciales de proyecto son:

- Terreno llano a ondulado medio 50 y 40 km/h
- Terreno ondulado fuerte a montañoso 30 km/h

CAPÍTULO III

**APLICACIÓN DEL ANÁLISIS
DE LAS CURVAS EN EL
TRAMO “TÚNEL FALDA LA
QUEÑUA-PUENTE CALAMA”
ENTRE PROGRESIVAS 2+500 A
7+500**

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE LAS CURVAS EN EL TRAMO “TÚNEL FALDA LA QUEÑUA-PUENTE CALAMA” ENTRE PROGRESIVAS 2+500 A 7+500

3.1 ELECCIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO

Se desarrollara el análisis de la consistencia del diseño de un tramo de la red vial fundamental del departamento de Tarija.

De este tramo fue elegido cinco kilómetros de acuerdo a la necesidad del estudio de proyecto, en el cual se buscó que el mismo cuente con la mayor cantidad de curvas disponibles en un rango de cinco kilómetros.

El caso a estudiar corresponde a un subtramo de la siguiente ruta:

De la carretera Tarija – Potosí, se ha elegido el tramo: “Túnel Falda la Queñua – Puente Calama”, y del mismo se tomó un subtramo entre las progresivas: 2+500,00 a 7+500,00.

3.2 REVISIÓN DE LAS CONDICIONES EN EL TRAMO ELEGIDO

El tramo de carretera por analizar muestra una topografía que entra en la clasificación de montañosa, y de acuerdo al tipo de vehículos que circulan y a su diseño físico, esta carretera se sitúa en una categoría de Vía Colectora de acuerdo a la clasificación de la ABC.

3.3 CLASIFICACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LAS CURVAS

Dentro de los cinco kilómetros escogidos del tramo de estudio, se pudo identificar la cifra de treinta y dos (32) curvas, de las cuales se pudo clasificar a cuatro (4) de estas como curvas de tipo Circular y las restantes veintiocho (28) curvas como tipo Transición.

Tabla 11 Tabla de clasificación y organización de curvas

N°	Tipo de curva
PI-04-A	Circular
PI-05	Transición
PI-0.6	Transición
PI-07	Transición
PI-08	Transición
PI-08A	Circular
PI-09	Transición
PI-10	Transición
PI-11	Transición
PI-12	Transición
PI-13	Transición
PI-14	Transición
PI-15	Transición
PI-16	Transición
PI-17	Transición
PI-18	Transición
PI-19A	Transición
PI-19	Transición
PI-20	Transición
PI-21	Transición
PI-22	Transición
PI-22A	Circular
PI-23	Transición
PI-24	Transición
PI-25	Transición
PI-25A	Transición
PI-26A	Transición
PI-27A	Transición
PI-28A	Transición
PI-29A	Transición
PI-30A	Transición
PI-31A	Circular

Fuente: Elaboración propia

3.4 AFORO DE LAS VELOCIDADES EN EL TRAMO DE ESTUDIO

3.4.1 Definir los puntos de aforo en la curva

Para definir los puntos que se requerirán para el aforo, se tomó de guía del Manual de Diseño Geométrico de la ABC.

De acuerdo al manual existen varios métodos de obtener la velocidad de recorrido en una carretera, de estos se escogió el método de “Medición directa”, en el cual se toma el tiempo que emplea un vehículo en recorrer dos puntos a una distancia conocida.

Para el caso de este proyecto se tomó distancias dependientes de la forma y capacidad de visibilidad de cada curva, variando distancias entre 15 a 30 metros de distancia.

Se tomó tres puntos dentro de cada curva:

- El primer punto a definir fue en la mitad de la curva con ayuda de los planos y señales físicas en el terreno.
- El segundo punto fue la mitad de la distancia a medir en una dirección del carril.
- El tercer punto fue la mitad de las distancia a medir en la dirección opuesta del segundo punto.

3.4.2 Preparación de los instrumentos a emplear en la medición

Los elementos a emplear para el proceso de aforo de velocidades fueron: Un cronometro, cintas métricas, y planillas de aforo de acuerdo a requerimiento del proyecto.

Ilustración 11 Materiales para la aplicación practica



Fuente: Elaboración propia

La cinta métrica y cronometro fueron revisados antes de cada día de aforo para verificar su funcionamiento.

3.4.3 Aforo de tiempos de recorrido

Los datos para el aforo serán detallados en la parte final dentro de los Anexos.

3.5 CALCULO DE LAS VELOCIDADES EN GABINETE

3.5.1 Obtención de las velocidades de recorrido obtenidas de campo

Tabla 12 Tabla de tiempos aforados

Número de curva:	PI-04A		Distancia de recorrido (Metros) :	30	
Día:	1	Sentido 1 (Subida)		Sentido 2 (Bajada)	
Dato N°	Tipo de vehículo	Tiempo (Segundos)	Tipo de vehículo	Tiempo (Segundos)	
1	Volvo	2.07	Vagoneta	1.37	
2	Camioneta	2.24	Minivan	1.79	
3	Volvo	2.62	Vagoneta	1.59	
4	Minivan	2.32	Flota	3.05	
5	Volvo	2.70	Minivan	1.71	
6	Camioneta	3.87	Auto	1.29	
7	Minivan	2.10	Auto	1.61	
8	Minivan	2.05	Flota	3.01	
9	Minivan	2.01	Auto	1.32	
10	Volvo	2.50	Minivan	1.60	
11	Vagoneta	2.30	Minivan	1.83	
12	Minivan	2.45			
13	Auto	2.09			

Fuente: Elaboración propia

Para la obtención de las velocidades de recorrido se realizó la relación entre la distancia entre puntos de aforo y el tiempo que demora cada vehículo en cada en recorrer dicha distancia anteriormente.

$$\text{Velocidad de recorridos} \left(\frac{\text{Km}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{Distancia de recorrido(Km)}}{\text{Tiempo de recorrido(Horas)}}$$

3.5.2 Calculo de la velocidad media de cada curva

Los cálculos mostrados en los subíndices 3.5.2 y 3.5.4 fueron realizados empleando los datos de la curva PI-04A.

Curva PI-04A

Tabla 13 Tabla de velocidades de recorrido

PI-04		Distancia de recorrido (Metros) :	30.00
Día:	1	Subida	Bajada
Dato N°		Velocidad (Km/h)	Velocidad (Km/h)
1		40.00	35.41
2		41.22	35.88
3		43.20	59.02
4		44.08	60.34
5		46.55	63.16
6		46.96	67.08
7		48.21	67.50
8		51.43	67.92
9		51.67	78.83
10		52.17	81.82
11		52.68	83.72
12		53.73	

Fuente: Elaboración propia

$$Vel_{media} = \frac{\sum_i^n \text{Velocidades aforadas de cada curva}}{N^{\circ} \text{ de datos}}$$

$$Vel_{media(\text{Subida})} = \frac{40 + 41.22 + 43.2 + 44.08 + 46.55 + 46.96 + 48.21 + 51.43 + 51.67 + 52.17 + 52.68 + 53.73}{12}$$

$$Vel_{med(\text{Subida})} = 47.66 \frac{\text{Km}}{\text{h}}$$

$$Vel_{media(\text{Bajada})} = \frac{35.41 + 35.88 + 59.02 + 60.34 + 63.16 + 67.08 + 67.50 + 67.92 + 78.83 + 81.82 + 83.72}{11}$$

$$Vel_{med(\text{Subida})} = 63.70 \frac{\text{Km}}{\text{h}}$$

Tabla 14 Tabla de velocidades medias

Velocidad media de subida (Km/h)	Velocidad media de bajada (Km/h)
47.66	63.70

Fuente: Elaboración propia

3.5.3 Estimación de las velocidades de diseño según criterio y bibliografía

La norma de diseño geométrico de la ABC indica que para el diseño geométrico de una carretera de tipo Colector con una topografía montañosa se debe emplear una velocidad de diseño de 60 Km/h para el cálculo de los elementos de la vía.

3.5.4 Calculo de la velocidad percentil 85 de cada curva

Ejemplo:

1° Se procedió a ordenar los datos de menor a mayor:

Tabla 15 Tabla de velocidades de dato menor a mayor

PI-04		Distancia de recorrido (Metros) :	30.00
Día:	1	Subida	Bajada
Dato N°		Velocidad (Km/h)	Velocidad (Km/h)
1		40.00	35.41
2		41.22	35.88
3		43.20	59.02
4		44.08	60.34
5		46.55	63.16
6		46.96	67.08
7		48.21	67.50
8		51.43	67.92
9		51.67	78.83
10		52.17	81.82
11		52.68	83.72
12		53.73	

Fuente: Elaboración propia

2° De acuerdo a los datos obtenidos se determinó la velocidad a la cual 85% de los vehículos no excede al momento de circular la vía:

$$\Delta_{\text{Subida}} = \text{Dato mayor} - \text{Dato menor}$$

$$\Delta_{\text{Subida}} = 53.73 - 40.00 = 13.73 \frac{\text{Km}}{\text{h}}$$

$$\text{Vel}_{85(\text{Subida})} = \text{Dato menor} + 0.85 \times \Delta_{\text{Subida}}$$

$$\text{Vel}_{85(\text{Subida})} = 40.00 + 0.85 \times 13.73$$

$$\text{Vel}_{85(\text{Subida})} = 51.67 \frac{\text{Km}}{\text{h}}$$

$$\Delta_{\text{Bajada}} = \text{Dato mayor} - \text{Dato menor}$$

$$\Delta_{\text{Bajada}} = 83.72 - 35.41 = 48.31 \frac{\text{Km}}{\text{h}}$$

$$\text{Vel}_{85(\text{Bajada})} = \text{Dato menor} + 0.85 \times \Delta_{\text{Bajada}}$$

$$\text{Vel}_{85(\text{Bajada})} = 35.41 + 0.85 \times 48.31$$

$$\text{Vel}_{85(\text{Bajada})} = 76.47 \frac{\text{Km}}{\text{h}}$$

Tabla 16 Tabla de velocidad percentil 85

Velocidad percentil 85 de subida	Velocidad percentil 85 de bajada
51.67	76.47

Fuente: Elaboración propia

3.6 EVALUACIÓN DEL DISEÑO Y CONSISTENCIA DE LAS CURVAS EN EL TRAMO ESCOGIDO

Para el análisis de consistencia se aplicara el uso de dos criterios de seguridad:

Tabla 16 Criterios de seguridad de aplicación

Criterio de Seguridad	Práctica de diseño		
	Buena	Justa	Mala
I	$ V_{85i} - V_{85i} + 1 \leq 10 \text{ Km/h}$	$10 \text{ Km/h} < V_{85i} - V_{85i} + 1 \leq 20 \text{ Km/h}$	$20 \text{ Km/h} < V_{85i} - V_{85i} + 1 $
II	$ V_{85} - V_d \leq 10 \text{ Km/h}$	$10 \text{ Km/h} < V_{85} - V_d \leq 20 \text{ Km/h}$	$20 \text{ Km/h} < V_{85} - V_d $

Fuente: Possible desing procedure to promote design consistency in highway geometric design in two lane rural roads-Lamm, Choueiri, Hayward y Paluri

La aplicación de estos criterios se realizará en cada una de ambas direcciones de cada curva:

Ejemplo:

Curva PI-04A

Sentido de subida

Criterio 1

Condición “Buena”

$$|51.67 - 51.67 + 1| \leq 10 \text{ Km/h}$$

$$1 \leq 10 \text{ “Cumple”}$$

Criterio 2

Condición “Buena”

$$|51.67-60| \leq 10 \text{ Km/h}$$

$$8.33 \leq 10 \text{ “Cumple”}$$

La curva PI-04A de sentido de subida tiene una consistencia “Buena”.

Sentido de bajada

Criterio 1

Condición “Buena”

$$|76.47-76.47+1| \leq 10 \text{ Km/h}$$

$$1 \leq 10 \text{ “Cumple”}$$

Criterio 2

Condición “Buena”

$$|76.47-60| \leq 10 \text{ Km/h}$$

$$16.47 \leq 10 \text{ “No Cumple”}$$

Condición “Justa”

$$10 < 16.47 \leq 20 \text{ Km/h “Cumple”}$$

La curva PI-04A de sentido de subida tiene una consistencia “Buena”.

En la siguiente página se muestra tablas resumen del cálculo de criterios a cada uno de las curvas en su respectivo sentido:

Tabla 17 Tabla de análisis de consistencia de velocidades en sentido de subida

Análisis de consistencia de las curvas							
Velocidad de diseño (Km/h)	Carril de Sentido de subida						Estado
	Criterio de seguridad I			Criterio de seguridad II			
60	Buena	Justa	Mala	Buena	Justa	Mala	
PI-04-A	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-05	-	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-06	-	-	Mala	-	Justa	Justa	Inconsistente
PI-07	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-08	-	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-09	-	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-10	Buena	Justa	Justa	-	Justa	Justa	Consistente
PI-11	Buena	Justa	Justa	-	Justa	Justa	Consistente
PI-12	Buena	Justa	Justa	-	Justa	Justa	Consistente
PI-13	Buena	Justa	Justa	-	Justa	Justa	Consistente
PI-14	Buena	Justa	Justa	-	Justa	Justa	Consistente
PI-15	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-16	Buena	Justa	Justa	-	Justa	Justa	Consistente
PI-17	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-18	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-19A	-	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-19	-	Justa	Justa	-	-	Mala	Inconsistente
PI-20	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-21	-	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-22	-	Justa	Justa	-	Justa	Justa	Consistente
PI-23	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-24	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-24A	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-25	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-25A	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-26A	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-27A	-	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-28A	-	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-29A	Buena	Justa	Justa	-	Justa	Justa	Consistente
PI-30A	-	Justa	Justa	-	Justa	Justa	Consistente
PI-31A	Buena	Justa	Mala	-	-	Mala	Inconsistente

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18 Tabla de análisis de consistencia de velocidades en sentido de bajada

Análisis de consistencia de las curvas							
Velocidad de diseño (Km/h)	Carril de Sentido de bajada						Estado
	Criterio de seguridad I			Criterio de seguridad II			
60	Buena	Justa	Mala	Buena	Justa	Mala	
PI-04-A	Buena	Justa	Justa	-	Justa	Justa	Consistente
PI-05	Buena	Justa	Justa	-	Justa	Justa	Consistente
PI-06	-	-	Mala	Buena	Justa	Justa	Inconsistente
PI-07	-	Justa	Justa	-	Justa	Justa	Consistente
PI-08	-	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-09	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-10	Buena	Justa	Justa	-	Justa	Justa	Consistente
PI-11	-	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-12	-	Justa	Justa	-	Justa	Justa	Consistente
PI-13	-	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-14	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-15	Buena	Justa	Justa	-	Justa	Justa	Consistente
PI-16	-	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-17	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-18	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-19A	-	-	Mala	-	-	Mala	Inconsistente
PI-19	-	-	Mala	-	Justa	Justa	Inconsistente
PI-20	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-21	-	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-22	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-23	Buena	Justa	Justa	-	Justa	Justa	Consistente
PI-24	Buena	Justa	Justa	-	Justa	Justa	Consistente
PI-24A	-	-	Mala	-	Justa	Justa	Inconsistente
PI-25	-	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-25A	-	-	Mala	-	Justa	Justa	Inconsistente
PI-26A	-	-	Mala	Buena	Justa	Justa	Inconsistente
PI-27A	-	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-28A	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-29A	Buena	Justa	Justa	Buena	Justa	Justa	Consistente
PI-30A	-	-	Mala	-	Justa	Justa	Inconsistente
PI-31A	-	-	Mala	-	-	Mala	Inconsistente

Fuente: Elaboración propia

3.7 TABLA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN GABINETE

Tabla 19 Tabla resumen de velocidad media y velocidad percentil 85 de cada curva

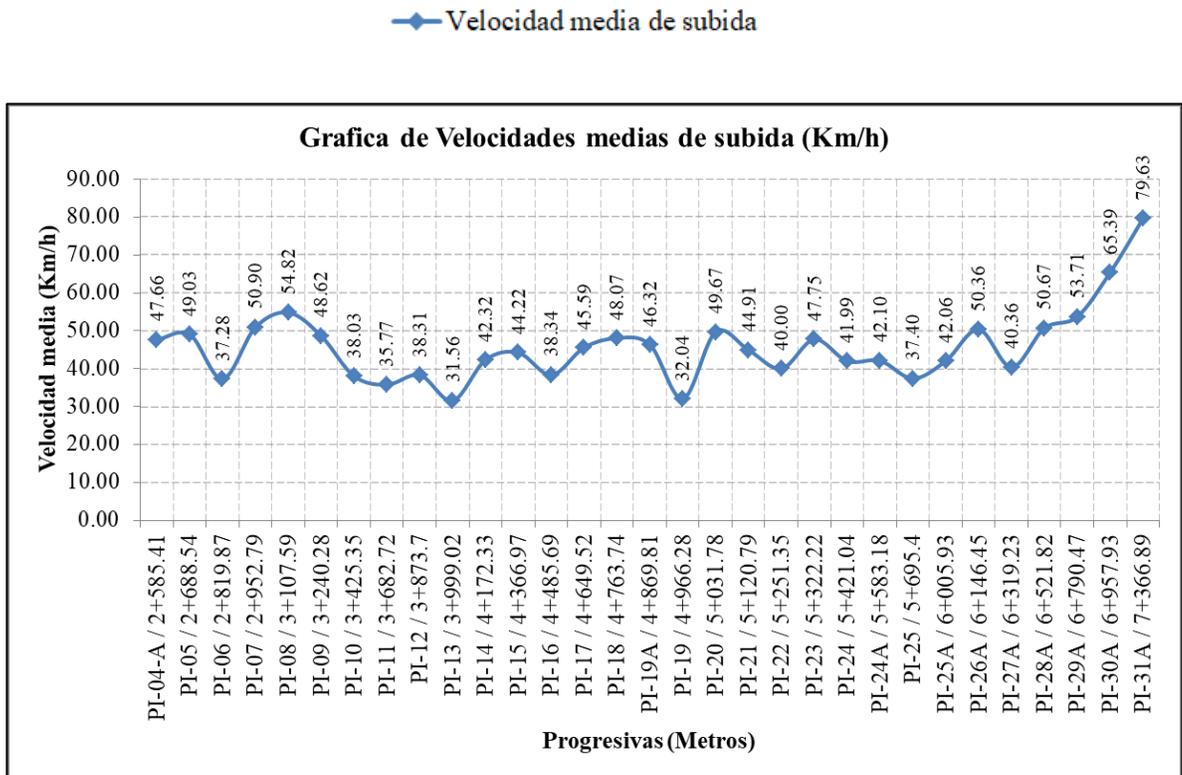
Calculo de velocidades						
Nº de curva	Velocidad media de subida (Km/h)	Velocidad media de bajada (Km/h)	Velocidad Percentil 85 de subida (Km/h)	Velocidad Percentil 85 de bajada (Km/h)	Velocidad de diseño (Km/h)	Estado
PI-04-A	47.66	63.70	51.67	76.47	60.00	Consistente
PI-05	49.03	56.03	53.19	77.78	60.00	Consistente
PI-06	37.28	44.11	41.43	56.49	60.00	Inconsistente
PI-07	50.90	56.71	63.95	70.10	60.00	Consistente
PI-08	54.82	46.23	67.27	58.22	60.00	Consistente
PI-09	48.62	50.00	55.16	58.07	60.00	Consistente
PI-10	38.03	43.12	43.50	47.21	60.00	Consistente
PI-11	35.77	49.34	44.55	58.70	60.00	Consistente
PI-12	38.31	38.78	43.20	47.22	60.00	Consistente
PI-13	31.56	51.99	42.87	57.66	60.00	Consistente
PI-14	42.32	51.11	47.18	56.44	60.00	Consistente
PI-15	44.22	42.63	53.07	47.52	60.00	Consistente
PI-16	38.34	49.91	43.93	58.99	60.00	Consistente
PI-17	45.59	39.75	52.24	50.17	60.00	Consistente
PI-18	48.07	49.41	58.66	57.61	60.00	Consistente
PI-19A	46.32	79.16	57.70	105.55	60.00	Inconsistente
PI-19	32.04	35.96	39.13	44.55	60.00	Inconsistente
PI-20	49.67	40.77	55.17	53.00	60.00	Consistente
PI-21	44.91	50.00	60.16	63.58	60.00	Consistente
PI-22	40.00	55.55	46.69	57.88	60.00	Consistente
PI-23	47.75	41.40	63.81	48.29	60.00	Consistente
PI-24	41.99	42.96	54.74	48.58	60.00	Consistente
PI-24A	42.10	58.71	58.66	75.17	60.00	Inconsistente
PI-25	37.40	48.89	55.62	59.62	60.00	Consistente
PI-25A	42.06	57.30	55.62	79.27	60.00	Inconsistente
PI-26A	50.36	46.38	59.34	50.22	60.00	Inconsistente
PI-27A	40.36	51.23	50.56	59.62	60.00	Consistente
PI-28A	50.67	55.07	63.56	63.99	60.00	Consistente
PI-29A	53.71	48.15	73.01	55.00	60.00	Consistente
PI-30A	65.39	63.32	79.31	75.41	60.00	Inconsistente
PI-31A	79.63	85.69	90.11	97.43	60.00	Inconsistente

Fuente: Elaboración propia

3.8 ANÁLISIS Y COMPROBACIÓN DE RESULTADOS FINALES

Las siguientes graficas muestran en su eje horizontal la progresiva del eje de cada curva en estudio, y en el eje de ordenadas muestran la velocidad media o velocidad percentil 85 de acuerdo al analisis particular de cada caso que se expondra acontinuacion:

Gráfica 2 Velocidades medias de subida

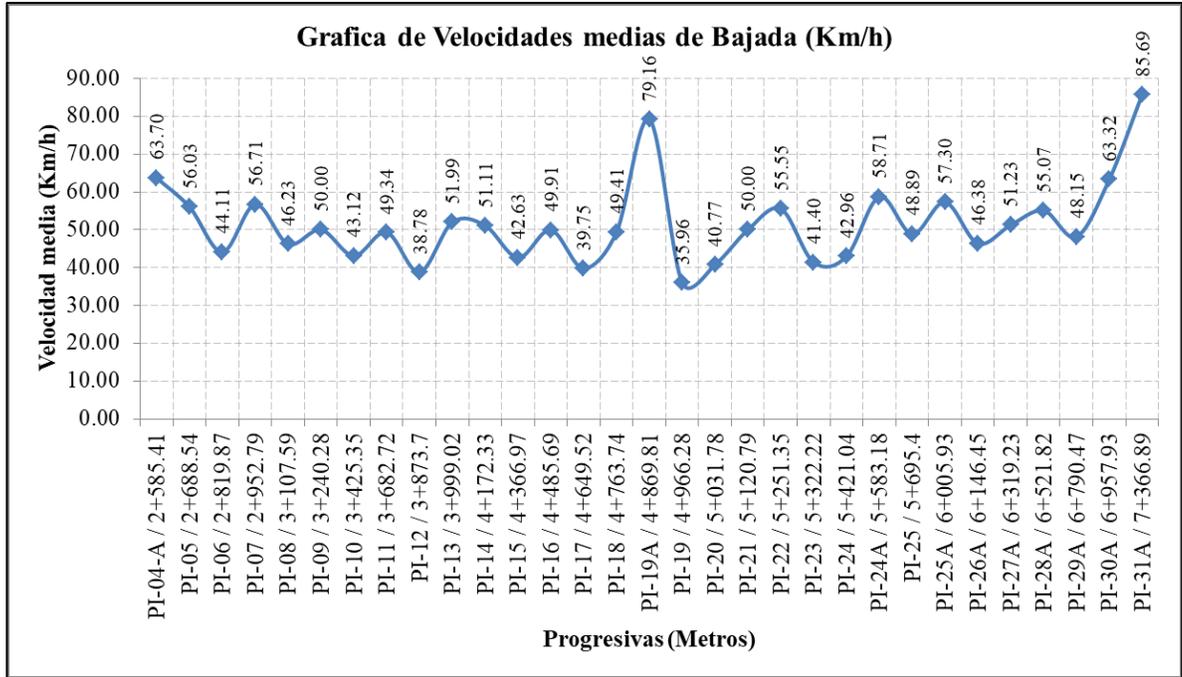


Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 2 se muestra las distintas velocidades medias de recorrido de cada curva en la cual se realizó a partir de su respectivo aforo en el sentido de subida, en el carril que conduce desde el Puente Calama hacia el túnel Falda la Queñua.

Gráfica 3 Velocidades medias de bajada

—●— Velocidad media de bajada

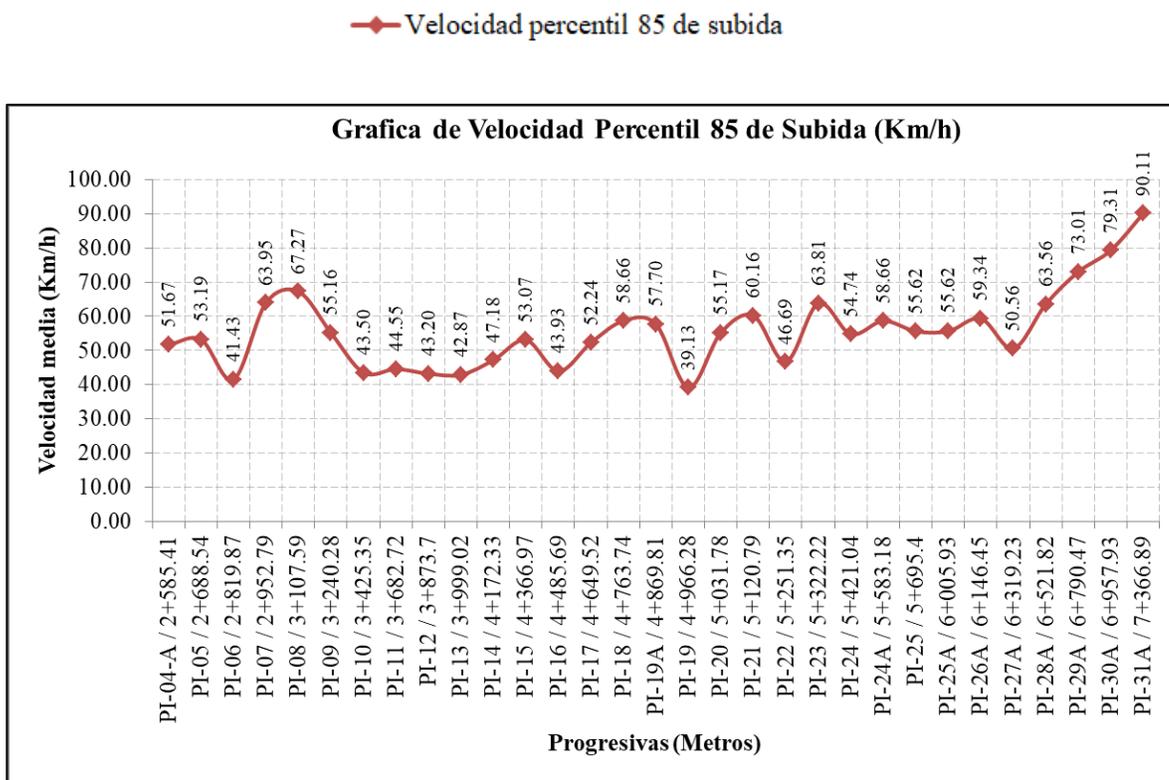


Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 3 se muestra las distintas velocidades medias de recorrido de cada curva en la cual se realizó a partir de su respectivo aforo en el sentido de bajada, en el carril que conduce desde el Túnel Falda la Queñua hacia el Puente Calama.

Se puede observar que la velocidad media máxima se encuentra en la curva PI-31A que se encuentra en el tramo estudiado, esta velocidad media es de 85.69 Km/h., el cual es mayor a la velocidad de diseño de la carretera la cual es 60 Km/h.. De igual forma otro punto a notar existe otro punto que igual existen otros cuatro puntos que superan la velocidad de diseño de la carretera, de los cuales tres fueron aforados en el carril de bajada.

Gráfica 4 Velocidad percentil 85 de subida

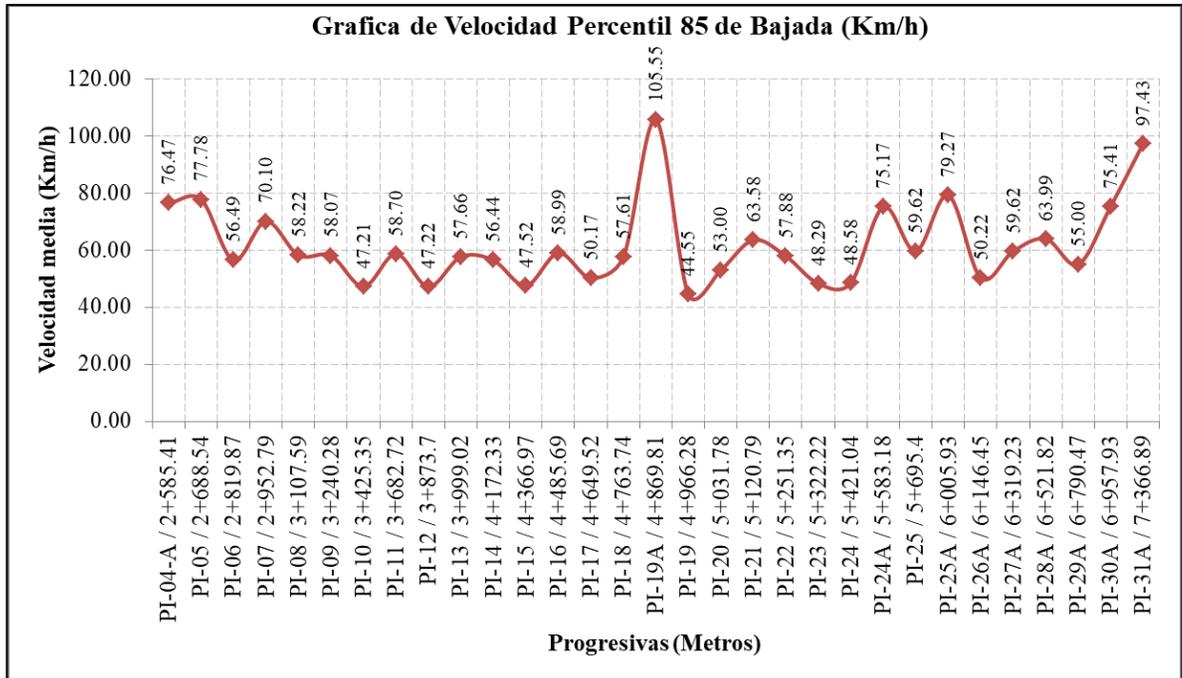


Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 4 se muestra las distintas velocidades percentiles de subida de cada curva según fue calculado en gabinete para el sentido de subida, en el carril que conduce desde el Puente Calama hacia el túnel Falda la Queñua.

Gráfica 5 Velocidad percentil 85 de bajada

■ Velocidad percentil 85 de bajada

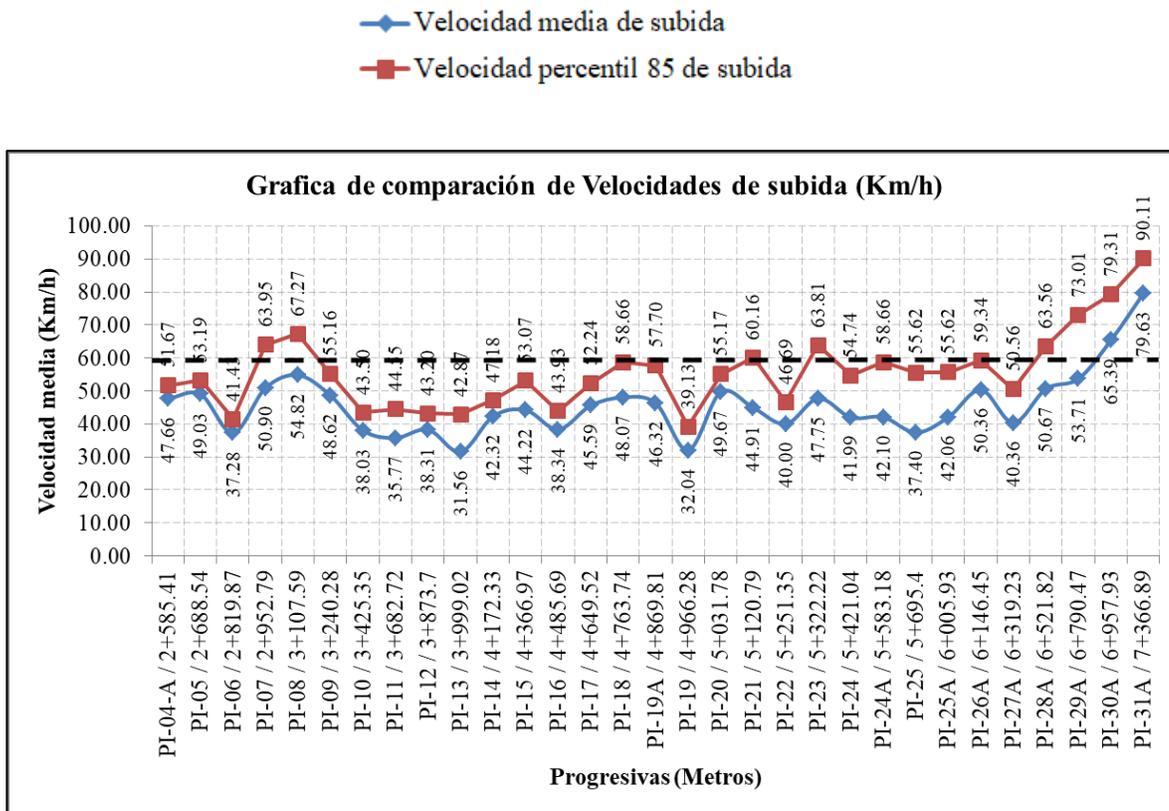


Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 5 se muestra las distintas velocidades percentiles de bajada de cada curva según fue calculado en gabinete para el sentido de bajada, en el carril que conduce desde el Túnel Falda la Queñua hacia el Puente Calama.

De acuerdo a los gráficos 4 y 5 de velocidad percentil 85 mostrados en la parte superior, se puede evidenciar que la velocidad percentil 85 máxima es de 105.55 Km/h., en la curva PI-19A.

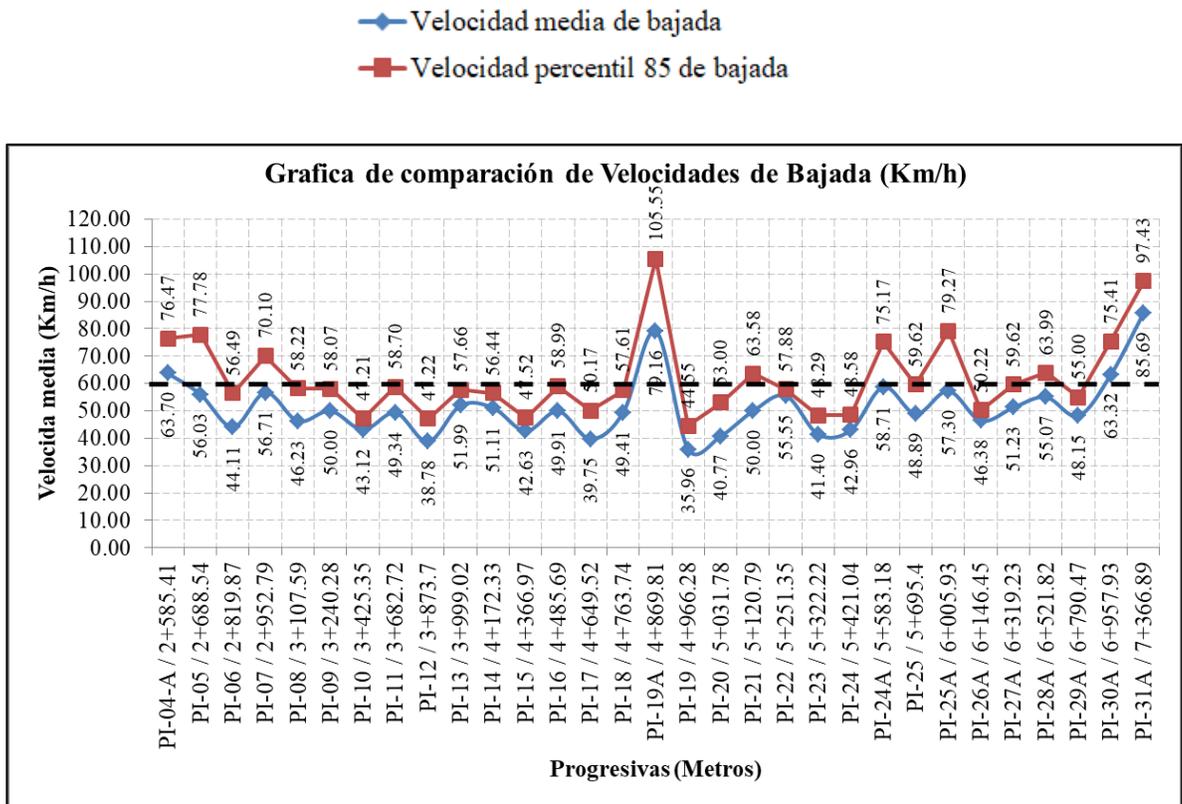
Gráfica 6 Comparación de resultados de subida



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 6 se muestra las distintas velocidades aforadas y calculadas en gabinete para el sentido de subida, en el carril que conduce desde el Puente Calama hacia el Túnel Falda la Queñua.

Gráfica 7 Comparación de resultados de bajada



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 7 se muestra las distintas velocidades aforadas y calculadas en gabinete para el sentido de bajada, en el carril que conduce desde el Túnel Falda la Queñua hacia el Puente Calama.

En las gráficas 6 y 7 se puede observar las velocidades respectivas en cada curva y su relación con la velocidad de diseño.

Si analizamos la velocidad media de cada curva, según las gráficas, esta velocidad tiende a ser menor que la velocidad de diseño recomendada por la norma, por el lado de la seguridad esta velocidad sería la indicada, pero la realidad de los aforos demuestra que los vehículos que circulan por una carretera exceden la velocidad de diseño que fue escogida para el diseño de la carretera, lo cual contradice el término de seguridad en el diseño.

Como segundo punto se puede definir que la velocidad percentil 85 puede ser una buena opción para tomar en cuenta al momento de escoger una velocidad para el diseño de una carretera, pero esto dependerá mucho del criterio del encargado del diseño, ya que como se puede observar en las gráficas, la velocidad percentil 85 tiende a ser similar a la velocidad de diseño que recomienda usar la Administradora Boliviano de Caminos, pero si analizamos más a detalle hay muchos casos en la que la velocidad percentil 85 está muy por encima a la velocidad de diseño según norma en algunas curvas.

En este proyecto se da prioridad al factor de la velocidad de diseño, y enfocando el análisis en este aspecto, se puede evidenciar que para poder emplear la velocidad percentil 85 como la velocidad de diseño, se debería realizar el análisis curva por curva, o en su defecto buscar la media de las velocidades percentiles 85 de la carretera, de esa forma se podría optimizar la obtención de la velocidad de diseño.

Si analizamos la velocidad de diseño que recomienda la norma de acuerdo a su categoría y clasificación, podemos observar que esta velocidad es a la cual la mayoría de los vehículos circulan y no superan, el resto de vehículos que superan esta velocidad tienden a tener una mala educación vial.

Para complementar el análisis descrito, tomaremos el análisis de la consistencia de las curvas en el punto “3.7” del presente proyecto, los resultados expuestos al someter las velocidades aforadas y las velocidades calculadas en gabinete a los dos criterios de consistencia, nos demuestra que nueve (8) de las treinta y dos (32) curvas son inconsistentes, es decir, que por lo menos no cumple uno de los dos criterios aplicados.

A continuación se describirá que criterio determina como inconsistente a las curvas siguientes y el análisis de cada caso:

PI-06: Existe un cambio de velocidad percentil 85 de una curva a otra mayor a 20 Km/h.

Esta curva demuestra inconsistencia debido a que la velocidad percentil 85 de la curva PI-05 de 77.48 km/h. es mayor comparado con la velocidad percentil 85 de la PI-06 de 56.49 km/h., esta diferencia es de 20.99 km/h., por lo tanto según el criterio empleado demuestra inconsistencia en la carretera.

Desde el punto de vista del diseño geométrico, antes de la curva PI-05 existe una recta notable, y al estar en sentido de bajada el conductor acelera, la recta que separa la curva PI-05 y PI-06 es menor a 50 metros, pero la PI-06 al ser una curva que tiene un radio de 50 m. incita al conductor a disminuir la velocidad de repente.

También se debe recalcar que esta situación dependerá de la educación vial del conductor.

PI-19A: Existe un cambio de velocidad percentil 85 de una curva a otra mayor a 20 Km/h., de igual forma existe una diferencia mayor a 20 Km/h. entre la velocidad percentil 85 de 105.55 km/h. y la velocidad de diseño de 60 Km/h.

Esta curva no cumple el criterio de consistencia en el sentido de bajada, ya que la diferencia entre la curva PI-19A de 105.55 km/h. y la velocidad percentil 85 de la PI-18 de 57.65 km/h. es de 47.94 km/h., como se puede observar la velocidad percentil 85 que imprimen los conductores en la curva es elevada, un motivo se podría deber a que las curvas anteriores a la PI-19A a pesar de no ser pronunciadas con sus radios de 60 m., la visibilidad entre estas curvas permite al conductor visualizar si existen vehículos más delante de la vía, por lo cual da la confianza al conductor de circular en altas velocidades.

Debido al anterior análisis mencionado, aquí influye la educación y seguridad vial del conductor, pero como se puede observar en este tramo los conductores exceden la velocidad permitida de diseño de 60 km/h., superándola con 45.55 km/h., el cual demuestra que la inconsistencia en esta curva también se debe a la mala educación vial del conductor.

PI-19: Existe un cambio de velocidad percentil 85 de una curva a otra mayor a 20 Km/h., de igual forma existe una diferencia mayor a 20 Km/h. entre la velocidad percentil 85 de 35.96 km/h. y la velocidad de diseño de 60 Km/h.

La curva PI-19 no cumple el criterio de seguridad II en el sentido de subida, ya que la velocidad percentil 85 de 35.96 km/h. es menor a la velocidad de diseño de 60 km/h. con 24.04 km/h., si bien desde el punto de vista de la seguridad, que la velocidad en la que circulan los vehículos sea mucho menor a la velocidad de diseño de la carretera es

positiva para evitar accidentes, pero esto igual demuestra que la curva dificulta al conductor realizar la maniobra de conducción, afectando al tiempo, porque las carreteras al ser un medio de transporte entre dos lugares, se busca que los conductores realicen esta trayectoria en el menor tiempo posible, si bien este caso en una sola curva no podría afectar de forma significativa, la acumulación de los mismos si lo podría hacer.

PI-24A: Existe un cambio de velocidad percentil 85 de una curva a otra mayor a 20 Km/h.

La curva PI-24A demuestra inconsistencia en el sentido de bajada, debido a que la diferencia de la velocidad percentil 85 de la curva PI-24A de 75.17 km/h. y la velocidad percentil 85 de la curva PI-24 de 48.58 km/h. es de 26.59 km/h., el motivo principal de esta inconsistencia se debe a que el radio de la curva es de 350 m., además de que después de esta curva existe una recta de 240 m., por lo cual el conductor aumenta la velocidad al momento de circular la curva. De igual forma el tema de la visibilidad antes y después de la curva permite al conductor tener la confianza para incrementar su velocidad de circulación.

PI-25A: Existe un cambio de velocidad percentil 85 de una curva a otra mayor a 20 Km/h.

Al igual que la anterior curva analizada, esta curva no presenta inconsistencia en el sentido de bajada, ya que la diferencia entre la velocidad percentil 85 la curva PI-25A de 79.27 km/h. y la velocidad percentil 85 de la curva PI-25 de 59.62 km/h. es de 19.65 km/h., pero el criterio siempre aumenta la diferencia con 1 km/h., con lo cual la diferencia sería de 20.65 km/h.

Esta inconsistencia se debe a que el radio de la curva PI-25 y la PI-25A es de 100 m., por lo cual el conductor al ver que las curvas no son pronunciadas, imprimen más velocidad.

PI-26A: Existe un cambio de velocidad percentil 85 de una curva a otra mayor a 20 Km/h.

Al contrario de la curva anterior en la cual el conductor imprime más velocidad de circulación, en este caso el conductor reduce su velocidad, la diferencia entre la

velocidad percentil 85 de la curva PI-26^a de 50.22 km/h. y la velocidad percentil 85 de la curva PI-26 de 79.27 km/h. es de 29.05 km/h., esta inconsistencia se debe a que el conductor puede percibir que a continuación circulara una curva pronunciada de 60 m. de radio, por lo cual la maniobra de conducción obliga al conductor a realizar una reducción brusca de velocidad.

PI-30A: Existe un cambio de velocidad percentil 85 de una curva a otra mayor a 20 Km/h.

En este caso tampoco se cumple el criterio de seguridad I en el sentido de bajada, ya que la diferencia entre la velocidad percentil 85 de la curva PI-30A de 75.41 km/h. y la velocidad percentil 85 de la curva PI-29A es de 20.41 km/h., esta inconsistencia al igual que otras situaciones descritas anteriormente se deben a que el conductor detecta que a continuación de la curva que transita existe una recta o una curva no pronunciada que le permitirá aumentar la velocidad sin riesgo, lo cual de nuevo pondrá a prueba la educación vial del conductor.

PI-31A: Existe un cambio de velocidad percentil 85 de una curva a otra mayor a 20 Km/h., de igual forma existe una diferencia mayor a 20 Km/h. entre la velocidad percentil 85 y la velocidad de diseño de 60 Km/h.

Esta curva de acuerdo a los criterios de seguridad es la más crítica, ya que no cumple ninguno de los criterios, ya que tanto la velocidad percentil 85 de subida de 90.11 km/h., como la velocidad percentil 85 de bajada de 97.43 km/h. son mayores a 20 km/h. de la velocidad de diseño de 60 km/h., y también son mayores a las velocidades percentiles de la curva anterior.

Este motivo se debe a que es una curva con un radio de 452.84 m., lo cual la pone al límite de ser una recta, el conductor imprime más velocidad, pero de acuerdo a la ubicación de emplazamiento de la curva esta condición es negativa, ya que se encuentra a la orilla de la comunidad de Choras, lo cual para los pobladores del lugar puede ser peligroso, y de nuevo juega un papel importante la educación vial de los conductores.

En resumen estas situaciones de inconsistencias se deben a que el trazado de la carretera da paso a que en ciertas curvas, el conductor aumente o disminuya su velocidad de circulación de manera repentina o apresurada, o que el mismo conductor exceda la velocidad de diseño para la cual fue emplazada la carretera, de igual forma la topografía dará concesiones o restringirá que el conductor aumente o disminuya la velocidad al momento de circular la vía.

3.9 ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL PRESENTE PROYECTO A CARRETERAS NO PAVIMENTADAS

El presente proyecto fue aplicado para una carretera pavimentada de dos carriles en dos sentidos, por lo tanto en el análisis realizado anteriormente se verifico la consistencia de acuerdo a la velocidad para una carretera ya emplazada, de igual forma se pudo observar que velocidades son empleadas por los conductores en la carretera y comparar esta velocidad con la que fue diseñada la carretera.

Si nos referimos a carreteras no pavimentadas, ya sean de tierra o ripiadas, la diferencia marcada entre ambos tipos de carretera, son las características de la capa de rodadura diferenciando entre:

- Carreteras Pavimentadas
- Carreteras de Pavimento Flexible
- Carreteras de Pavimento Rígido
- Carreteras No pavimentadas
- Carreteras de carpeta de ripio
- Carreteras de terracería

Las otras diferencias de geometría pueden darse o no en función de la categoría de la carretera, es decir, si hay un cambio de categoría pueden darse diferentes características geométricas como ser:

- Velocidad de diseño
- Radios de curvatura
- Ancho de carril y calzada
- Ancho de bermas
- Pendiente longitudinal y transversal
- Peralte
- Sobreancho

Pudiendo presentarse dos casos de análisis:

- Cuando existe las mismas características geométricas que la carretera pavimentada
- Cuando existe diferentes características geométricas que la carretera pavimentada

En el primer caso todo el procedimiento de análisis realizado en la carretera pavimentada, puede utilizarse en la carretera no pavimentada siguiendo el mismo procedimiento ya que mediante esta práctica pudimos observar la velocidad que se utiliza en distintas curvas, estas curvas tomadas de un subtramo donde los trazos curvos sinuosos abundan.

Aplicar este procedimiento previo a realizar el diseño final y pavimentado de una carretera, brindará le certeza al proyectista al momento de diseñar el camino y sus elementos, debido a que al obtener las velocidades de operación empleadas por los conductores en un camino no pavimentado, se podrá predecir la velocidad que imprimirán los mismos al momento de circular las curvas pertenecientes al tramo a diseñar. También se podrá observar las curvas críticas de la carretera, y se podrá tomar acciones previas para mejorar la consistencia de dichas curvas antes de realizar el pavimentado, con lo cual se podrá mejorar la experiencia de los usuarios que circularan la carretera.

En el segundo caso de carreteras no pavimentadas con diferentes características geométricas se puede realizar el análisis con el mismo procedimiento, pero es posible

que las condiciones de comportamiento del tráfico respecto a la velocidad sean distintas donde solo podrán ser críticas con velocidades altas, porque con velocidades bajas las condiciones de consistencia serán menos críticas y no será necesario un análisis más extenso porque no representa un problema en el comportamiento de la circulación vehicular.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- El método simplificado si es aplicado de forma ordenada es un método efectivo para los aforos de velocidad.
- El tipo de vehículo que circulará por la carretera es un factor a tomar en cuenta al momento de realizar la elección de la velocidad de diseño, ya que el estado del vehículo influirá en la velocidad que el mismo implique al momento de circulación.
- La velocidad percentil 85 puede ser considerada como velocidad de diseño si se aplica individualmente para cada curva y el proyectista lo decide de acuerdo a las condiciones físicas del lugar de emplazamiento, como ser la topografía y economía del proyecto.
- No se puede realizar una media de todas las velocidades percentiles 85 para obtener una velocidad de diseño final porque entre ellas existe diferencias significantes de magnitud y características del lugar.
- La velocidad media de recorrido no es la ideal para diseñar una carretera por que no refleja la situación real de la circulación de los vehículos debido a que más del 50% de vehículos superan esta velocidad.
- La velocidad de diseño de 60 Km/h que se obtiene de acuerdo a la norma de la Administradora Boliviana de Carreteras demuestra ser una buena opción para su empleo en el diseño de una carretera.
- Se debe analizar el lugar de emplazamiento antes de diseñar la geometría de una carretera para evitar una inconsistencia en el diseño.
- El tramo “Falda la Queñua-Puente Calama” de la carretera Tarija-Potosí entre progresivas 2+500 hasta 7+500 estudiado en el presente proyecto en presenta una buena consistencia de acuerdo a los criterios aplicados.

4.2 RECOMENDACIONES

- Se debe respetar la velocidad que se señala en una carretera para evitar accidentes.
- Se recomienda realizar una óptima elección de la velocidad de diseño para evitar que los conductores tiendan a excederlo.
- Se debe realizar las mediciones de manera cuidadosa para evitar errores en el aforo.
- Se debe tomar en cuenta el clima de la zona para que los aforos no se vean afectados por ciertos fenómenos climatológicos.