

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**INCREMENTO DE LA SEGURIDAD VIAL MEDIANTE EL
ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO**

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

ARMANDO STEVE CALLUPE MORALES

Lima – Perú

2010

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

DEDICATORIA

A mi familia por haberme brindado siempre su apoyo y confianza. Especialmente a mis padres Armando y Teófila quienes siempre me apoyan incondicionalmente y gracias a quienes soy profesional.

A Gabriela por su comprensión y apoyo en el desarrollo de este trabajo.

	Pág.
RESUMEN	- 6 -
LISTA DE TABLAS	- 7 -
LISTA DE FIGURAS	- 10 -
LISTA DE SÍMBOLOS	- 13 -
LISTA DE SIGLAS	- 17 -
INTRODUCCIÓN GENERAL	- 18 -
CAPÍTULO I: ACCIDENTALIDAD ASOCIADA A LA GEOMETRÍA DE LAS CARRETERAS	- 21 -
1. Introducción:	- 21 -
2. Situación de la seguridad vial en el Perú	- 22 -
2.1 Evolución de la accidentalidad en el Perú.....	- 22 -
2.2 Causas de los accidentes.....	- 24 -
2.3 Esfuerzos del gobierno peruano para la mejora de la seguridad vial....	- 25 -
2.3.1 Plan Nacional de Seguridad Vial 2007 – 2011.....	- 25 -
2.3.2 Plan Tolerancia Cero.....	- 31 -
2.3.3 Revisiones técnicas vehiculares.....	- 33 -
3. Relación entre la geometría de carreteras y los accidentes	- 34 -
3.1 Modelos matemáticos para la predicción de accidentes.....	- 34 -
3.1.1 Planta:.....	- 35 -
3.1.2 Perfil:.....	- 41 -
3.1.3 Sección transversal.....	- 42 -
3.1.4 Múltiples elementos.....	- 45 -
3.2 Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM).....	- 47 -
CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MODULO ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DEL SOFTWARE INTERACTIVE HIGHWAY DESING MODEL (IHSDM)	- 49 -
1. Introducción	- 49 -
2. Interactive Highway Safety Desing Model – IHSDM	- 50 -
2.1 Modulo Consistencia del Diseño.....	- 52 -

2.1.1	Modelos de predicción de la velocidad de operación.....	53 -
A.	Toma de datos en campo.....	54 -
B.	Ecuaciones de predicción de la velocidad de operación (V_{85})	57 -
2.1.2	Algoritmo para el Cálculo del Perfil de Velocidades de Operación (V_{85}) con el software IHSDM	67 -
A.	Seleccionar la Velocidad Deseada.....	69 -
B.	Predecir la velocidad para cada curva utilizando las ecuaciones desarrolladas	69 -
C.	Predecir el límite de velocidad en pendiente haciendo uso de las ecuaciones del modelo de tráfico TWOPAS	71 -
D.	Seleccionar la menor velocidad para cada elemento a lo largo del alineamiento	83 -
E.	Ajustar las velocidades debido a las aceleraciones y desaceleraciones.....	85 -
F.	Llevar a cabo la evaluación de la consistencia del diseño.....	92 -
CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE UN TRAMO DE LA CARRETERA CHILETE – SAN PABLO – EMP. R03N.....		93 -
1.	Introducción	93 -
2.	Estudio Definitivo de la Carretera Chilete – San Pablo – Emp. R03N	94 -
2.1	Antecedentes del proyecto:.....	94 -
2.2	Ubicación	94 -
2.3	Estudio de trazo y topografía.....	96 -
3.	Análisis con el Software IHSDM.....	97 -
3.1	Datos de entrada para el software IHSDM	97 -
3.1.1	Alineamiento horizontal	99 -
3.1.2	Alineamiento vertical	102 -
3.2	Resultados del Análisis de Consistencia con el software IHSDM	104 -
3.2.1	Sentido creciente de las progresivas (Del Km 9+500 al Km 13+500) .	105 -
3.2.2	Sentido decreciente de las progresivas (Del Km 13+500 al Km 9+500)	110 -

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES A LOS SECTORES INCONSISTENTES DEL TRAMO DE LA CARRETERA CHILETE – SAN PABLO – EMP. R03N		- 115 -
1. Introducción		- 115 -
2. Sectores inconsistentes del tramo analizado (Km 9+500 – Km 13+500)		- 116 -
2.1 Sentido creciente de las progresivas (Del Km 9+500 hacia el Km 13+500)		- 116 -
2.2 Sentido decreciente de las progresivas (Del Km 13+500 hacia el Km 9+500)		- 119 -
3. Reducción de inconsistencias		- 122 -
3.1 Variación del diseño geométrico de los sectores con inconsistencia en condición 3.....		- 123 -
3.1.1 Sentido creciente de las progresivas.....		- 123 -
3.1.2 Sentido decreciente de las progresivas.....		- 126 -
4. Análisis de consistencia del nuevo trazo		- 128 -
5. Señalización para el control de la velocidad		- 136 -
CONCLUSIONES		- 138 -
RECOMENDACIONES		- 140 -
BIBLIOGRAFÍA		- 141 -
ANEXOS		- 143 -
ANEXO 01: Planos de planta y perfil del Estudio Definitivo de la Carretera Chilete – San pablo – Emp. R03N (Km 9+500 – Km 13+500).....		- 144 -
ANEXO 02: Reporte de resultados del análisis de consistencia con el software IHSDM del tramo Km 9+500 – Km 13+500.....		157
ANEXO 03: Planos de planta y perfil del tramo modificado (Km 9+500 – Km 13+406.938). 163		
ANEXO 04: Reporte de resultados del análisis de consistencia con el software IHSDM del tramo modificado (Km 9+500 – Km 13+406.938).		176
ANEXO 05: Planos de señalización del tramo modificado (Km 9+500 – Km 13+406.938).		182

RESUMEN

La seguridad vial es uno de los temas más importantes de los últimos tiempos debido al incremento de los accidentes de tránsito en carreteras de la mayoría de países, entre ellos el Perú.

Siendo el diseño geométrico la parte más importante del proyecto de una carretera, se debe evaluar su consistencia para mejorar la seguridad vial. La evaluación de la consistencia es aplicable en la fase de proyecto, para mejorar los diseños elaborados con la Norma de Diseño Geométrico DG – 2001, asimismo es aplicable en la etapa de servicio, para planear el mejoramiento del alineamiento o implementación de señalización en vías ya construidas con el fin de mejorar la seguridad vial.

La aplicación del análisis de consistencia del diseño geométrico en el tramo comprendido entre las progresivas 9+500 y 13+500 de la Carretera Chilete – San Pablo – Emp. R03N, muestra que la metodología identifica sectores con cierto grado de inconsistencia apoyado en el cálculo del perfil de velocidad de la carretera.

Luego de identificado los sectores inconsistentes, especialmente los que se encuentran en una condición 3 (mas critica), se puede rediseñar la geometría para mejorar su consistencia. El mejoramiento de la consistencia del tramo analizado se aprecia ya que las banderas rojas, que representan a los sectores inconsistentes más críticos, desaparecieron reduciéndose la inconsistencia a un nivel inferior.

Los perfiles de velocidad resultado del análisis, ayudara también a la ubicación de señalización para el control de la velocidad. La colocación de señalización se aplica en aquellos sectores, con cierto grado de inconsistencia, cuya modificación geométrica no sea posible o si la modificación no es la suficiente para reducir la significativa variación de velocidad.

Esto demuestra que la aplicación de la Norma de Diseño Geométrico DG – 2001 no es suficiente para obtener diseños geométricos con una buena consistencia y por ende una buena seguridad vial.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1:	Factores de reducción de accidentes (Vogt y Baret 1998).....	- 47 -
Tabla 2.1:	Parámetros estimados de curvas horizontales en pendiente (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 59 -
Tabla 2.2:	Ecuaciones de predicción de V_{85} para curvas horizontales en pendiente.....	- 59 -
Tabla 2.3:	Parámetros estimados de curvas verticales convexas con limitada distancia de visibilidad en tangentes horizontales (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 61 -
Tabla 2.4:	Parámetros estimados de curvas verticales cóncavas en tangentes horizontales (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 62 -
Tabla 2.5:	Parámetros estimados para la combinación de curvas horizontales y verticales convexas con limitada distancia de visibilidad (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 65 -
Tabla 2.6:	Parámetros estimados para la combinación de curvas horizontales y curvas verticales cóncavas (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)	- 66 -
Tabla 2.7:	Ecuaciones de predicción de velocidad (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 71 -
Tabla 2.8:	Características de rendimiento de vehículos de pasajeros (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)	- 77 -
Tabla 2.9:	Pasos seguidos por el modelo TWOPAS para el cálculo del perfil de velocidades (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000.).....	- 78 -
Tabla 2.10:	Ejemplo de cálculo del perfil de velocidades para un vehículo tipo 11 en pendiente ascendente constante de 5% seguida por una pendiente de 0% (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 79 -
Tabla 2.11:	Características de rendimiento de vehículos recreacionales de pasajeros (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 80 -
Tabla 2.12:	Características de rendimiento de camiones en los EE. UU. (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000.).....	- 82 -
Tabla 2.13:	Valores de aceleración y desaceleración para diferentes condiciones de alineamiento (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 87 -

Tabla 2.14:	Ecuaciones para determinar las distancias de aceleración y desaceleración (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 91 -
Tabla 3.1:	Parámetros de diseño geométrico.....	- 96 -
Tabla 3.2:	Elementos de curva del tramo de análisis (Km 9+500 al Km 13+500)	- 97 -
Tabla 3.3:	Datos del alineamiento horizontal del tramo en análisis.....	- 100 -
Tabla 3.4:	Datos del alineamiento vertical del tramo en análisis.....	- 102 -
Tabla 3.5:	Intervalos y colores asignados por magnitud de variación de la velocidad de operación y velocidad de diseño.....	- 104 -
Tabla 3.6:	Intervalos y colores asignados por magnitud de variación de la velocidad entre elementos adyacentes.....	- 105 -
Tabla 3.7:	Coordenadas del perfil de velocidad (sentido creciente de las progresivas)	- 107 -
Tabla 3.8:	Diferencia de la velocidad de operación (V_{85}) y la velocidad de diseño ($V_{diseño}$). (Sentido creciente de las progresivas).....	- 108 -
Tabla 3.9:	Diferencia de velocidades entre elementos geométricos adyacentes (sentido creciente de las progresivas).....	- 109 -
Tabla 3.10:	Coordenadas del perfil de velocidad (sentido decreciente de las progresivas)	- 112 -
Tabla 3.11:	Diferencia de la velocidad de operación (V_{85}) y la velocidad de diseño ($V_{diseño}$). (Sentido decreciente de las progresivas).....	- 112 -
Tabla 3.12:	Diferencia de velocidades entre elementos geométricos adyacentes (sentido decreciente de las progresivas).....	- 114 -
Tabla 4.1:	Diferencia de velocidades entre elementos geométricos adyacentes, condiciones 2 y 3 (sentido creciente de las progresivas)	- 116 -
Tabla 4.2:	Elementos geométricos con variación de velocidad de operación mayor o igual a 20 Km/h (Km 11+039.635 – Km 11+181.521).....	- 117 -
Tabla 4.3:	Elementos geométricos con variación de velocidad de operación mayor o igual a 20 Km/h (Km 11+582.840 – Km 11+919.084).....	- 118 -
Tabla 4.4:	Diferencia de velocidades entre elementos geométricos adyacentes, condiciones 2 y 3 (sentido decreciente de las progresivas)	- 120 -
Tabla 4.5:	Elementos geométricos con variación de velocidad de operación mayor o igual a 20 Km/h (Km 13+336.331 – Km 13+143.363).....	- 120 -

Tabla 4.6:	Elementos geométricos con variación de velocidad de operación mayor o igual a 20 Km/h (Km 10+646.698 – Km 10+460.048).....	- 121 -
Tabla 4.7:	Datos del alineamiento horizontal del trazo modificado.....	- 130 -
Tabla 4.8:	Datos del alineamiento vertical del trazo modificado.....	- 131 -
Tabla 4.9:	Diferencia de velocidades entre elementos geométricos adyacentes del trazo modificado (sentido creciente de las progresivas.).....	- 133 -
Tabla 4.10:	Diferencia de velocidades entre elementos geométricos adyacentes del trazo modificado (sentido decreciente de las progresivas.).....	- 135 -
Tabla 4.11:	Progresivas de ubicación de señales reglamentarias tipo R – 30 (Sentido creciente de las progresivas).....	- 137 -
Tabla 4.12:	Progresivas de ubicación de señales reglamentarias tipo R – 30 (Sentido decreciente de las progresivas).....	- 137 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Evolución del Numero de Colisiones de Transito 1998 – 2006 (Consejo Nacional de Seguridad Vial, 2007)..... - 23 -

Figura 1.2: Evolución del Numero de Muertes por Colisiones de Transito 1998 – 2006 (Consejo Nacional de Seguridad Vial, 2007)..... - 23 -

Figura 1.3: Causas del Total de Accidentes entre los años 2004 y 2006 (Consejo Nacional de Seguridad Vial, 2007.)..... - 24 -

Figura 1.4: Tapa del Plan Nacional de Seguridad Vial 2007 – 2011 (Consejo Nacional de Seguridad Vial, 2007)..... - 26 -

Figura 1.5: Inspector de Tolerancia Cero realizando los controles a buses interprovinciales..... - 33 -

Figura 1.6: Inspección Técnica Vehicular en las Instalaciones de LIDERCON. - 34 -

Figura 1.7: Relación entre el número de Accidentes y el grado de curvatura (Pérez Pérez, 2008)..... - 38 -

Figura 1.8: Probabilidad de que ocurran uno o más accidentes en terreno llano (curvas de transición) (Pérez Pérez, 2008)..... - 40 -

Figura 1.9: Relación entre el índice de peligrosidad y el ancho de carril para un IMD = 4000 (Pérez Pérez, 2008)..... - 44 -

Figura 1.10: Relación entre el índice de peligrosidad y el ancho de carril para un IMD = 1000 (Pérez Pérez, 2008)..... - 44 -

Figura 1.11: Organigrama de la Composición del Software IHSDM..... - 48 -

Figura 2.1: Colocación de sensores piezoeléctricos en curva horizontal (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)..... - 55 -

Figura 2.2: Ubicación de radares de medición en curva horizontal (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)..... - 55 -

Figura 2.3: Ubicación de sensores piezoeléctricos en curva vertical con limitada distancia de visibilidad (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000) - 56 -

Figura 2.4: Grafico V_{85} vs. R (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)..... - 58 -

Figura 2.5: Grafico V_{85} vs. $1/R$ (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)..... - 58 -

Figura 2.6: Curvas verticales en tangentes horizontales: V_{85} vs. K (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)..... - 60 -

Figura 2.7: Curvas verticales en tangentes horizontales: V_{85} vs. $1/K$ (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)..... - 61 -

Figura 2.8:	Combinación de curvas: V_{85} vs. R (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 63 -
Figura 2.9:	Combinación de curvas: V_{85} vs. $1/R$ (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 64 -
Figura 2.10:	Combinación de curvas: V_{85} vs. K (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 64 -
Figura 2.11:	Combinación de curvas: V_{85} vs. $1/K$ (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 65 -
Figura 2.12:	Diagrama de flujo del procedimiento utilizado por el Modulo Análisis de Consistencia.....	- 67 -
Figura 2.13:	Diagrama de flujo de la evaluación de la consistencia del diseño y Modelo del Perfil de Velocidades (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 68 -
Figura 2.14:	Diagrama de flujo para el cálculo de la velocidad de operación V_{85} (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 70 -
Figura 2.15:	Perfiles de velocidad obtenidos (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 72 -
Figura 2.16:	Ejemplo de curva de desempeño de un vehículo de pasajeros (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 74 -
Figura 2.17:	Vehículo tipo 11 en pendiente ascendente constante de 5% (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 77 -
Figura 2.18:	Vehículo tipo 11 en pendiente ascendente constante de 5% seguido de una pendiente 0% (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 80 -
Figura 2.19:	Perfil de velocidad de un camión tipo 3 en pendientes alternadas de 2% a cada 760 metros aproximadamente (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 83 -
Figura 2.20:	Perfiles de velocidad calculados (Design Consistency Module, Engineer’s Manual, 2008).....	- 84 -
Figura 2.21:	Perfil de velocidad luego de la selección de las velocidades menores (Design Consistency Module, Engineer’s Manual, 2008). ..	- 85 -
Figura 2.22:	Disposición de los dispositivos de medición de velocidad en curva horizontal (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 86 -
Figura 2.23:	Condiciones de aceleración y desaceleración (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).....	- 88 -

Figura 3.1:	Ubicación del tramo de análisis (Km 9+500 – Km 13+500).....	- 95 -
Figura 3.2:	Campos necesarios para ingreso de la información previo al análisis con el software.....	- 98 -
Figura 3.3:	Ingreso de datos del alineamiento horizontal en el software IHSDM.....	- 101 -
Figura 3.4:	Vista en planta de la carretera con el software IHSDM.....	- 101 -
Figura 3.5:	Ingreso de datos del alineamiento vertical en el software IHSDM...	- 103 -
Figura 3.6:	Vista del perfil de la carretera con el software IHSDM.....	- 103 -
Figura 3.7:	Perfil de velocidad obtenido por el software IHSDM (sentido creciente de las progresivas)...	- 106 -
Figura 3.8:	Perfil de velocidad obtenido por el software IHSDM (sentido decreciente de las progresivas).....	- 110 -
Figura 4.1:	Primer sector con inconsistencia de condición 3 (Análisis en el sentido creciente de las progresivas).....	- 117 -
Figura 4.2:	Segundo sector con inconsistencia de condición 3 (Análisis en el sentido creciente de las progresivas).....	- 119 -
Figura 4.3:	Primer sector con inconsistencia de condición 3 (Análisis en el sentido decreciente de las progresivas).....	- 121 -
Figura 4.4:	Segundo sector con inconsistencia de condición 3 (Análisis en el sentido decreciente de las progresivas).....	- 122 -
Figura 4.5:	Cambio de alineamiento del primer sector con inconsistencia de condición 3 (Análisis en el sentido creciente de las progresivas)...	- 124 -
Figura 4.6:	Cambio de alineamiento del segundo sector con inconsistencia de condición 3 (Análisis en el sentido creciente de las progresivas)...	- 125 -
Figura 4.7:	Cambio de alineamiento del primer sector con inconsistencia de condición 3 (Análisis en el sentido decreciente de las progresivas)	- 127 -
Figura 4.8:	Cambio de alineamiento del primer sector con inconsistencia de condición 3 (Análisis en el sentido decreciente de las progresivas)	- 128 -
Figura 4.9:	Perfil de velocidad obtenido por el software IHSDM para el nuevo trazo (sentido creciente de las progresivas)	- 132 -
Figura 4.10:	Perfil de velocidad obtenido por el software IHSDM para el nuevo trazo (sentido decreciente de las progresivas).....	- 134 -
Figura 4.11:	Señal reguladora R – 30 (Manual de dispositivos de control de tránsito para calles y carreteras).....	- 136 -

LISTA DE SÍMBOLOS

a:	Capacidad de aceleración del vehículo (ft/s ² [9.81 m/s ²]) a la velocidad V (Capítulo II)
α :	Tasa de aceleración (Capítulo II)
a_0, a_1 :	Constantes (Capítulo I)
a_0 :	Máxima aceleración a la velocidad cero. (Capítulo II)
a_i :	Coefficiente de la variable correspondiente del modelo
a_c :	Aceleración durante los cambios de marcha sin influencia del motor (pie/s ²)
a_p :	Aceleración limitada por los caballos de fuerza del vehículo (pie/s ²)
a_e :	aceleración efectiva (ft/s ²), incluyendo una asignación de 1,5 s por los retrasos en los cambio de marchas
A:	Número total de accidentes acaecidos en un tramo de carretera, que contiene una curva vertical, durante un año.
ARh:	Índice de accidentes promedio para la carretera específica en accidentes por millón de vehículos-millas.
B_0 :	Constante de interceptación (ordenada en el origen).
B:	Vector de las pendientes de las variables predictivas del modelo (Capítulo I)
B:	Bombeo (Capítulo III)
C_{de} :	Factor de corrección para convertir la resistencia aerodinámica en el nivel del mar a la elevación local = $(1 - 0.000006887E)^{4.255}$
C_{pe} :	Factor de corrección de la potencia neta en el nivel del mar a una elevación local, es igual a 1 - 0.00004E para los motores de gasolina y 1 para los motores diesel
D:	Grado de curvatura
\dot{a} :	Tasa de desaceleración, ver tabla 2.13
E:	Elevación local (ft)
F_{ar} :	Factor hipotético del índice de peligrosidad que varía de acuerdo a la naturaleza de la restricción a la visibilidad y al grado de peligrosidad en el área de restricción a la visibilidad.
FRA (%):	Factor de reducción de accidentes
ft:	Pies

G:	Valor absoluto de la diferencia de las inclinaciones de las rasantes (Capítulo I)
$GR_k = gl $:	Inclinación absoluta de la alineación rectilínea "k" situada dentro del tramo de carretera.
G:	Pendiente
G1:	Pendiente de entrada en curva vertical
G2:	pendiente de salida en curva vertical
g:	Aceleración de la gravedad
H:	Índice de inseguridad promedio en las zonas laterales de la carretera en el segmento de carretera, valorado subjetivamente sobre una escala de 1 (menos peligroso) a 7 (más peligroso).
I:	Angulo de deflexión
i_{max} :	Pendiente máxima
Km:	kilómetro
K:	Factor característico de curvas verticales
L:	Longitud de curva
L_{vc} :	Longitud de curva vertical
L_r :	Valor de la distancia de visibilidad restringida en millas (longitud de la distancia de visibilidad, menor o igual que el valor especificado por la AASHTO).
LCH_j :	Longitud de la curva horizontal "j" que está dentro de un tramo dividida entre la longitud de dicho tramo.
LCV_j :	Longitud de la curva vertical "j" que está dentro del tramo dividida entre la longitud de dicho tramo.
LR_k :	Longitud de la alineación rectilínea k dividida entre la longitud del tramo.
L_H :	Longitud de curva
LSC_c :	Longitud crítica de vía para desarrollar toda la aceleración y desaceleración
LSC_a :	Longitud de vía disponible para cambios de velocidad
m:	metro
$p = Pr(Y=1/x)$:	Probabilidad de que ocurran uno o más accidentes en el emplazamiento "Y" en un período de cinco años, siendo "x" el vector de las variables predictivas del modelo.
PA:	Anchura pavimentada de la berma en pies.

PI:	Punto de intersección de tangentes en curvas horizontales
PC:	Punto de inicio de curva circular
PT:	Punto de fin de curva circular
PIV:	Punto de intersección de tangentes en curvas verticales
PVC:	Punto de inicio de curva vertical
PVT:	Punto de fin de curva vertical
P_{max} :	Peralte máximo
R:	Radio
$R_j = \lg_{j2} - \lg_{j1} / l_j$:	Índice de inclinación de la curva vertical "j". Donde g_{j2} y g_{j1} son las inclinaciones de las rasantes de entrada y salida respectivamente. l_j es la longitud de la curva vertical.
S:	Presencia de curva de transición (1 o 0)
s/a:	Sobreancho
t:	Tiempo
TER1:	1 para terreno llano, 0 en otros casos.
TER2:	1 para terrenos montañosos, 0 en otros casos.
UP:	Anchura sin pavimentar de la berma en pies.
V:	Volumen de tráfico
V_{85} :	Velocidad percentil 85%
V_d :	Velocidad deseada por el conductor
V_m :	Velocidad máxima
V:	Velocidad
V_{f5} :	Percentil 85% de las velocidades deseadas en tangentes largas (m)
V_n :	Percentil 85% de velocidades en la curva "n" (Km/h)
V_{n+1} :	Percentil 85% de velocidades en la curva "n+1" (Km/h)
V_{n+1}^a :	Percentil 85% de velocidades en la curva "n+1" determinado como función de la tasa asumida de aceleración (Km/h)
V_a :	Máxima velocidad lograda en la via entre curvas en condición "B" (Km/h)
V_d :	Velocidad directriz (Capítulo III)
V':	Mayor velocidad al inicio del intervalo (V) y 10 ft / s
W_1 :	Ancho total de la calzada en pies, en curva
W/A:	Peso por las proyecciones de la relación del área frontal (lb/ft ²)
W/NHP:	Peso por variación de potencia neta (lb / hp)

X_n :	Posición al final del intervalo de tiempo "t"
X_o :	Posición al inicio del intervalo de tiempo "t"
X_{fd} :	Longitud de vía para desacelerar desde la velocidad deseada hasta la velocidad en la curva "n+1" (m)
X_{cd} :	Longitud de vía para desacelerar desde la velocidad de la curva "n" hasta la velocidad en la curva "n+1" (m)
X_{ca} :	Longitud de vía para desacelerar desde la velocidad V_a hasta la velocidad en la curva "n+1" (m)
X_{ca} :	Longitud de vía para acelerar desde la velocidad en la curva "n" hasta la velocidad en la curva "n+1" (m)
X_{fa} :	Longitud de vía para acelerar desde la velocidad en la curva "n" hasta la velocidad deseada (m)
X_{fs} :	Longitud de vía limitada entre las velocidades de dos curvas luego de la aceleración y antes de la desaceleración (m)
Z:	Número de accesos a las propiedades colindantes por kilómetro.
ΔV_a :	Diferencia entre la velocidad de la curva "n" y la máxima velocidad lograda en la vía entre curvas en condición "B" (Km/h)
ΔV_{85} :	Variación de la velocidad percentil 85% entre elementos adyacentes (tangente y curva)

LISTA DE SIGLAS

AASHTO:	American Association of State Highway and Transportation Officials o Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte (EE.UU.)
CNSV:	Consejo Nacional de Seguridad Vial
CPM:	Crash Prediction Module o Modulo de Predicción de Accidentes
DCM:	Design Consistency Module o Modulo Consistencia del Diseño
DVM:	Driver / Vehicle Module o Modulo Conductor / Vehículo
EE.UU.:	Estados Unidos de Norteamérica
FHWA:	Federal Highway Administration o Administración Federal de Carreteras
IHSDM:	Interactive Highway Safety Design Model o Modelo Interactivo de Diseño de la Seguridad Vial
IMD:	Índice Medio Diario
IRM:	Intersection Review Module o Modulo de Revisión de Intersecciones
LSD:	Limited Sight Distance o Limitada Distancia de Visibilidad
MTC:	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
NCHRP:	National Cooperative Highway Research Program
NLSD:	Non Limited Sight Distance o Distancia de Visibilidad no Limitada
PRM:	Policy Review Module o Modulo de Revisión de Normativa
SAE:	Society of Automotor Engineers o Sociedad de Ingenieros Automotores
SOAT:	Seguro Obligatorio contra Accidentes de Tránsito
SSD:	Stopping Sight Distance o Distancia de visibilidad de parada
TAM:	Traffic análisis Module o Modulo Análisis de Trafico
UTM:	Universal Transverse Mercattor

INTRODUCCIÓN GENERAL

La seguridad vial en las carreteras del país es un tema que debe ser abordado de manera más agresiva por instituciones estatales y privadas. El mejoramiento de la seguridad vial de las carreteras del país no solo es un esfuerzo noble en pos del cuidado de la vida humana, que es el principal objetivo del desarrollo de grandes proyectos de ingeniería, sino que también tiene un efecto en la economía del país, ya que carreteras más seguras permiten el movimiento económico, entre las diferentes regiones del país, evitando pérdidas materiales en accidentes de carretera.

El tema de la seguridad vial en carreteras va captando el interés de diversas instituciones internacionales públicas y privadas. En este sentido, el Departamento de Transporte de los Estados Unidos mediante la Administración Federal de Carreteras (FHWA) vienen desarrollando el software IHSDM en busca de una herramienta tecnológica que ayude a diseñadores y evaluadores de la seguridad de carreteras a concebir mejores diseños geométricos mediante el análisis de consistencia de ellas.

La consistencia en el diseño geométrico de un camino se refiere a conformar su geometría de acuerdo con las expectativas del conductor. Una inconsistencia en el diseño puede describirse como una característica geométrica, o combinación de ellas, con rasgos inusuales que los conductores pueden abordar de manera insegura. Esta situación puede llevar a errores en la selección de la velocidad o inapropiadas maniobras de manejo que pueden provocar accidentes (Aníbal L. Altamira, Alberto B. Graffigna, Juan E. Marcel, 2008)

El desarrollo de proyectos viales en el Perú, específicamente de los estudios de trazo de carreteras, casi siempre resuelven primero la situación planimétrica y luego la altimétrica sin que haya un análisis de la relación entre ellas. El resultado tridimensional de la combinación de ambas muchas veces resulta en situaciones de peligro, ya que se generan sectores inconsistentes en donde el conductor se encuentra con una situación que le obliga a efectuar maniobras de riesgo.

El Capítulo I presenta una visión general de la seguridad vial en el país, desde algunos datos estadísticos de accidentes hasta aquellos esfuerzos aplicados para intentar disminuir la cantidad de accidentes en las vías rurales y urbanas. Además, se presenta una descripción del trabajo del Ing. Ignacio Pérez Pérez en donde presenta diversos modelos que relacionan los accidentes con la geometría de las carreteras.

En el Capítulo II se presenta la base teórica sobre la cual se apoya el software IHSDM para el análisis de la consistencia del diseño geométrico. En este capítulo se puede ver cómo es que los investigadores de la FHWA recopilaron datos de campo y luego del procesamiento de estos se logró obtener ecuaciones de predicción de la velocidad de operación de vehículos en los EE.UU. La fuente principal para el desarrollo de este capítulo fue el Report FHWA-RD-99-171 producido por la Administración Federal de Carreteras de los EE.UU.

En el Capítulo III se muestra la aplicación del análisis de consistencia mediante el uso del software IHSDM al tramo del Km 9+500 al Km 13+500 de la carretera Chilete – San Pablo – Emp. R03N, cuyo estudio definitivo fue desarrollado por la empresa CESEL S.A. El software identificó la existencia de sectores inconsistentes de distinto grado a lo largo del tramo de aplicación, estos resultados son mostrados de manera gráfica (perfiles de velocidad) y textual (tablas de resumen) que luego ayudarán al análisis y mejora de las condiciones geométricas de estos sectores.

Finalmente en el capítulo IV se muestra la manera como se analizó los sectores con una inconsistencia mayor, y la manera como se pueden reducir estas mediante la variación del alineamiento horizontal principalmente. Sectores en donde una variación geométrica del alineamiento es casi imposible o aquellos que difícilmente reducirán su grado de inconsistencia, se plantea la colocación de una señal reguladora (R-30) para el control de la velocidad de los vehículos.

Es así como el análisis de consistencia del diseño permite incrementar la seguridad vial de los proyectos geométricos de carreteras en su etapa de planificación. No obstante, el análisis también puede ser efectuado en carreteras existentes, con el objetivo de realizar acciones de mejora de su seguridad vial ya

que el análisis permitirá identificar la ubicación de las zonas en donde se deberá prestar un mayor análisis para definir acciones de mejora a nivel de rediseño o mediante señalización específica en puntos cuya ubicación puede ser extraída de los resultados del análisis con el software.

El objetivo principal de este trabajo es mostrar la aplicación de esta metodología y como es que puede brindar una herramienta para el incremento de la seguridad vial en las carreteras del Perú. Asimismo, se pretende dejar abierta la posibilidad de iniciar el desarrollo de modelos de predicción de velocidades de operación en el Perú, para que más adelante podamos contar con una herramienta hecha en el Perú y aplicada en todos los proyectos desarrollados en las diferentes regiones del país.

CAPÍTULO I: ACCIDENTALIDAD ASOCIADA A LA GEOMETRÍA DE LAS CARRETERAS

1. Introducción:

La accidentalidad, en las carreteras del Perú y otros países, es un problema acarreado hace varios años atrás. Este problema produce muchas pérdidas de vidas humanas y/o lesiones graves a los tripulantes de los vehículos accidentados. Las estadísticas muestran un número alto de accidentes en las carreteras de nuestro país, así como su tendencia al incremento.

En los últimos años se puso en práctica algunas medidas con el objetivo de disminuir esta gran cantidad de accidentes, pero aún no se pone en práctica alguna metodología, desde el punto de vista técnico, que ayude a mitigar este problema.

La accidentalidad en carreteras es un tema complicado de analizar debido a la gran diversidad de factores que influyen en ella, muchos de los accidentes ocurridos son producto de la combinación de varios de estos factores. Por este motivo la geometría del trazado es un factor difícil de aislar.

Este capítulo busca explicar cómo es que la geometría del trazado se relaciona con la accidentalidad, jugando un papel importante en la búsqueda de incrementar la seguridad vial de las carreteras. Numerosos investigadores han realizado modelos de predicción de accidentes en carreteras, relacionando los elementos geométricos de estas. Esto demuestra la relación que existe entre la geometría del trazado y la accidentalidad en las carreteras.

El Departamento de Transporte de los Estados Unidos hizo un gran esfuerzo para tratar este problema, mediante la investigación de las características geométricas de las vías y su relación con la accidentalidad vial. El software IHSDM, creado por este organismo gubernamental, es el resultado de varias investigaciones llevadas a cabo desde hace varios años atrás y que aún se encuentra en desarrollo. Este software se perfila como la mejor herramienta para

los diseñadores de vías y para los encargados de mejorar las condiciones de accidentalidad de vías en servicio.

2. Situación de la seguridad vial en el Perú

La Constitución Política del Perú, en su Artículo 2, enumera a los derechos fundamentales de la persona; el primero de ellos establece que la persona tiene derecho “*A la vida, a su identidad, a su integridad moral, psíquica y física y a su libre desarrollo y bienestar. El concebido es sujeto de derecho en todo cuanto le favorece*”, es por ello que es necesario cuidar la vida, creando métodos o utilizando aquellos que están a nuestro alcance para ponerlos en práctica, y así cuidar este derecho fundamental.

“El cuidado del hombre y de su destino deben constituir el interés principal de todos los esfuerzos técnicos. No olvidéis esto jamás entre vuestros diagramas y ecuaciones”. Albert Einstein.

2.1 Evolución de la accidentalidad en el Perú

El país del Perú, al igual que muchos otros a nivel mundial, presenta el problema de la accidentalidad de una manera muy marcada. Es común ver en las noticias la ocurrencia de accidentes en carreteras como choques frontales, despistes, volcaduras, etc. El Consejo Nacional de Seguridad Vial maneja estadísticas de accidentes ocurridos en el territorio nacional, algunos de los cuales se presentan a continuación.

La Figura 1.1 muestra que la cantidad de accidentes de tránsito tuvo un decrecimiento hacia el año 2002, sin embargo, desde entonces se puede observar que este número ha ido en aumento y seguramente que esta tendencia se ha mantenido desde el 2006 hasta el año pasado. Cabe mencionar que es posible que se haya podido disminuir esta cifra del 2006 luego de la aplicación de algunos planes por parte del Gobierno, los cuales se verán más adelante.

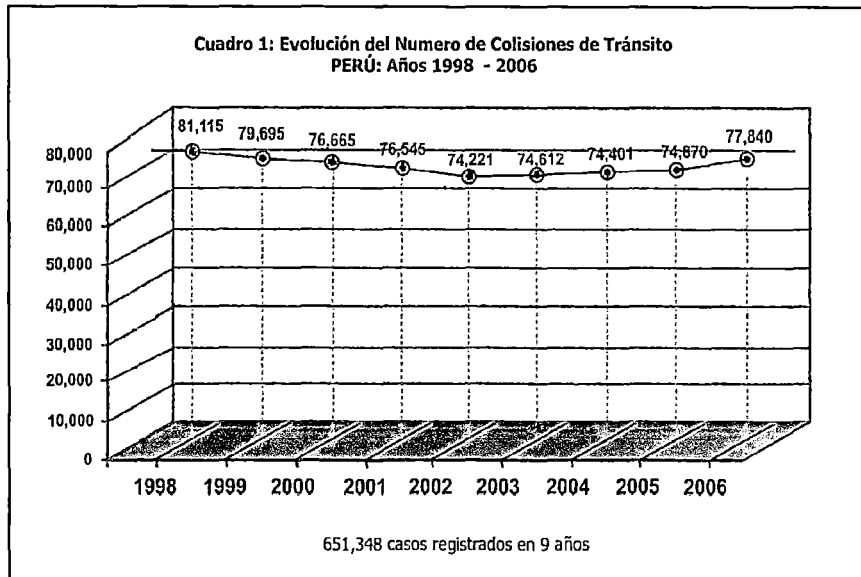


Figura 1.1: Evolución del Numero de Colisiones de Tránsito 1998 – 2006
 (Consejo Nacional de Seguridad Vial, 2007)

La Figura 1.2, muestra que no solo la cantidad de accidentes de tránsito tiene una tendencia de crecimiento en los últimos años, sino que también el número de muertos en estos accidentes se ha incrementado.

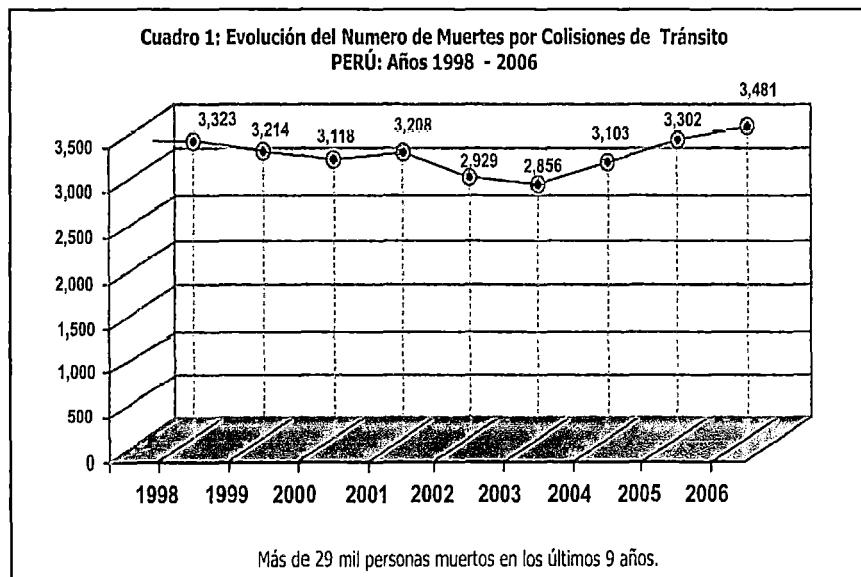


Figura 1.2: Evolución del Numero de Muertes por Colisiones de Tránsito 1998 – 2006 (Consejo Nacional de Seguridad Vial, 2007)

2.2 Causas de los accidentes

Las causas de los accidentes son muy diversas, tantas que sería casi imposible determinar certeramente que un determinado accidente corresponde a una sola causa, pues la gran mayoría es consecuencia de la combinación de muchos factores o causas.

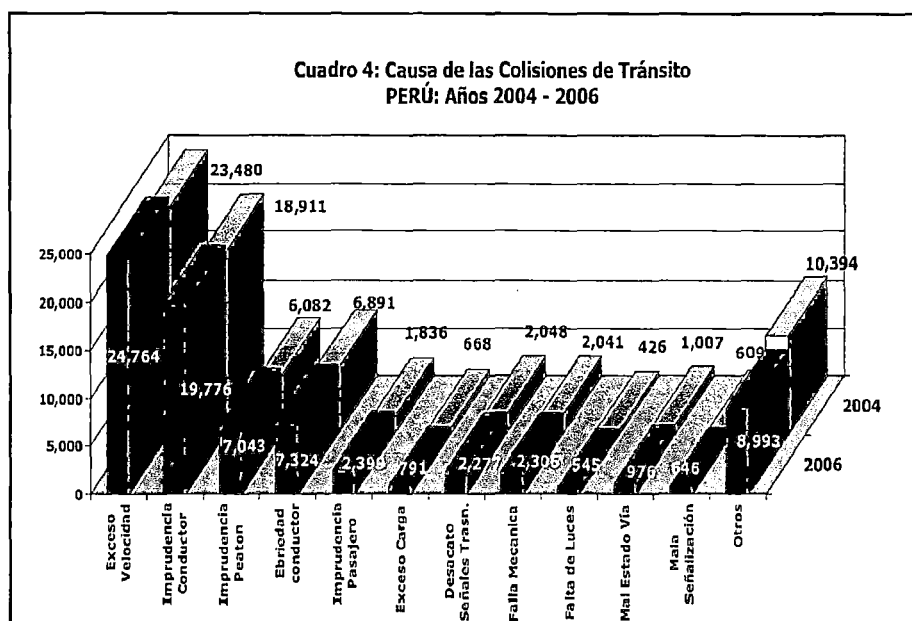


Figura 1.3: Causas del Total de Accidentes entre los años 2004 y 2006 (Consejo Nacional de Seguridad Vial, 2007)

Como se puede observar en el cuadro, la principal causa de los accidentes se debió a excesos de velocidad, mientras que la Imprudencia del Conductor se ubica en segundo lugar.

Luego de observar estas causas, se podría llegar a pensar que un accidente por exceso de velocidad estaría relacionado al diseño de la vía, posiblemente porque un elemento geométrico de la vía permitió un incremento de la velocidad, mientras que el elemento siguiente no estaba diseñado para aquella velocidad alcanzada. Esto podría generar una maniobra de desaceleración brusca, lo cual provocaría que el chofer ejecute una maniobra peligrosa lo cual cause el choque con otro vehículo, un despiste, choque contra guardavías, etc. Así mismo muchos de los accidentes ocurridos de esta manera pueden haber sido clasificados como imprudencia del conductor.

De acuerdo a lo mencionado, es posible relacionar a los accidentes ocurridos en una carretera con la geometría de estas; mas no es posible asegurar fehacientemente que esta es la causa de los accidentes. Sin embargo, es importante que aquellos factores que se cree pueden ser causas de accidentes sean tratados y eliminados, de ser posible. En este caso existe una probabilidad de que el diseño geométrico de la vía haya sido la causante del accidente, así que sería de gran importancia eliminar esta probabilidad y continuar con las otras causas que también estén relacionadas.

2.3 Esfuerzos del gobierno peruano para la mejora de la seguridad vial

La seguridad vial, tanto en el Perú como en los diferentes países del mundo, ha ido cobrando gran importancia, debido al incremento de accidentes de tránsito y sus consecuencias que muchas veces son fatales. Es por esto que en los últimos años se han visto esfuerzos dirigidos a enfrentar este problema. Estos deben ser tratados con un total compromiso para mejorar la situación que se vive desde hace varios años, y que continuará presentándose de no haber medidas efectivas que ayuden a reducir los casos de accidentes.

Las principales acciones tomadas por el gobierno peruano para la mitigación de la ocurrencia de accidentes de tránsito han sido las siguientes:

2.3.1 Plan Nacional de Seguridad Vial 2007 – 2011

El Consejo Nacional de Seguridad Vial y el Plan Nacional de Seguridad Vial 2007 – 2011 fue creado por el Gobierno del Perú para busca impulsar una política nacional de Seguridad Vial que ayude a cuidar la vida de los ciudadanos.

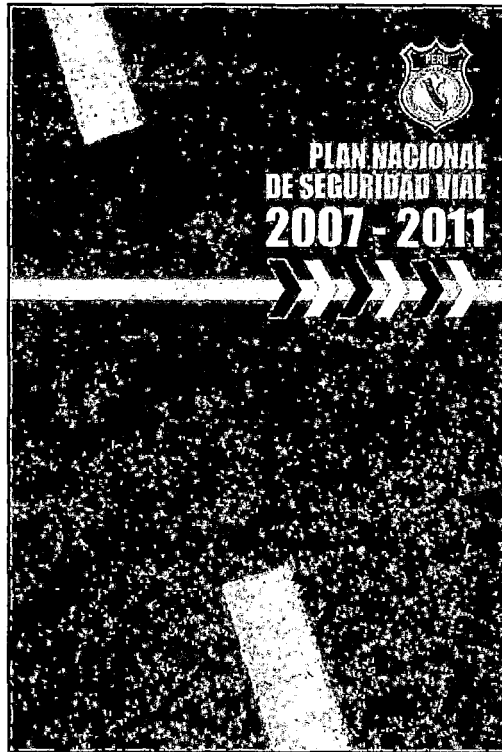


Figura 1.4: Tapa del Plan Nacional de Seguridad Vial 2007 – 2011 (Consejo Nacional de Seguridad Vial, 2007)

A) Meta del Plan Nacional De Seguridad Vial 2007 – 2001

“La meta principal del Plan Nacional es la de lograr dentro del periodo de vigencia del presente plan nacional, cinco años, la disminución del 30% de las colisiones de tránsito generadas por actitudes o comportamientos de los usuarios de las vías, conductor, ciclista y peatón priorizando acciones a la reducción de la ingesta de alcohol así como velocidad excesiva por parte de los conductores”. (Consejo Nacional de Seguridad Vial)

Este plan Nacional de seguridad Vial menciona 06 prioridades principales, que son:

- Prioridad General 01:

Formación de los niños, jóvenes y adolescentes en etapa escolar e universitaria para la generación de una cultura de respeto por las normas viales.

• **Prioridad General 02:**

Sensibilización de los usuarios de las diversas redes viales a nivel nacional.

• **Prioridad General 03:**

Promoción de acciones para el desarrollo e investigación de la seguridad vial nacional.

• **Prioridad General 04:**

Desarrollo de mecanismos de verificación y supervisión de la infraestructura vial.

• **Prioridad General 05:**

Fortalecimiento de las acciones de fiscalización de las normas de tránsito y revisión del marco normativo relacionado al tránsito y transporte.

• **Prioridad General 06:**

Liderazgo interinstitucional y sostenibilidad de la seguridad vial nacional.

De estas 6 prioridades podemos mencionar que las más importantes, desde el punto de vista de este trabajo, son las prioridades generales 03, 04 y 05.

La prioridad general numero 03 menciona a la promoción de acciones para el desarrollo e investigación de la seguridad vial y este trabajo lo que busca es promocionar una metodología, que si bien es cierto está desarrollada para una realidad diferente a la nuestra, es una base para futuras investigaciones que pretendan adecuar la metodología a la realidad peruana mediante el ajuste de las ecuaciones.

La prioridad general numero 04 menciona el desarrollo de mecanismos de supervisión de la infraestructura vial, este trabajo muestra la aplicación de una metodología que puede ser utilizada para la supervisión de los diseños

geométricos, buscando que estos diseños sean lo más consistentes posibles, es decir que esté coordinado a la expectativa del conductor para evitar que este ejecute maniobras de manejo peligrosas.

La prioridad general número 05 menciona el fortalecimiento del control de las normas de tránsito y revisión del marco normativo relacionado al tránsito y transporte, desde el punto de vista de este trabajo, se puede decir que mediante la aplicación del análisis de la consistencia del diseño geométrico se puede obtener recomendaciones a la norma de diseño DG-2001 que permitan tener diseños mucho más consistentes.

Basados en estas seis prioridades generales se elaboraron 20 Estrategias Específicas para el mejoramiento de la seguridad vial en el Perú, estas veinte estrategias están organizadas de la siguiente manera:

I. Educación y Comunicaciones

Estrategia Específica 01:

Implementación del Programa Educativo en Seguridad Vial al interior del sistema educativo nacional.

Estrategia Específica 02:

Diseño e implementación del Programa de Comunicaciones en materia de seguridad vial.

II. Desarrollo e Investigación de la Seguridad Vial Nacional

Estrategia Específica 03:

Diseño e implementación de un sistema de recolección de datos de colisiones de tránsito.

Estrategia Específica 04:

Restablecimiento de los sistemas de Revisiones Técnicas vehiculares.

Estrategia Específica 05:

Implementación de programa para la detección y eliminación de puntos negros viales.

Estrategia Específica 06:

Programa de mejoramiento del sistema de evaluación de postulantes para la obtención de licencias de conducir.

Estrategia Específica 7:

Ejecución del Estudio de Mejoramiento del sistema de emergencia, rescate y calidad en la asistencia de heridos producto de colisiones de tránsito.

Estrategia Específica 8:

Ejecución del Estudio que determine los Costos Sociales de las colisiones de tránsito en nuestro país.

Estrategia Específica 9:

Ejecución del Estudio de análisis impacto en la instalación de sistemas inteligentes de limitación de velocidades sobre la red vial.

III. Infraestructura e Ingeniería Vial.

Estrategia Específica 10:

Programa de Infraestructura Vial.

Estrategia Específica 11:

Implementación de Programas de Auditorias Viales.

IV. Gestión, control, fiscalización de las normas viales y asistencia de salud.

Estrategia Específica 12:

Programa de Fortalecimiento del accionar Policial para el control y fiscalización de las normas de tránsito.

Estrategia Específica 13:

Ordenamiento del sistema de transporte público de pasajeros.

Estrategia Específica 14:

Revisión del marco legal en materia relacionada a colisiones de tránsito.

V. Coordinación y liderazgo del Plan Nacional de Seguridad Vial

Estrategia Específica 15:

Incorporación del Plan Nacional de Seguridad Vial al interior de los planes operativos de los sectores integrantes del CNSV, así como de los Gobiernos Regionales y Locales del país.

Estrategia Específica 16:

Liderazgo del Plan Nacional.

Estrategia Específica 17:

Consolidación de la Secretaría Técnica.

Estrategia Específica 18:

Consolidación de la imagen del Consejo.

Estrategia Específica 19:

Descentralización: Creación de Comités Regionales de Seguridad Vial.

Estrategia Específica 20:

Mecanismos para el financiamiento y auto sostenibilidad de la seguridad vial nacional.

El tercer grupo es el de Infraestructura e Ingeniería Vial que a su vez contiene a la Estrategia Especifica 11, que habla de la implantación de Auditoria Viales. Dentro de esta estrategia especifica, se menciona que se debe establecer la presentación de un Estudio de Impacto a la Seguridad Vial, elaborado en la etapa de diseño del proyecto vial, y cuyos contenidos o parámetros serán estructurados por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, teniendo en cuenta algunas consideraciones mínimas como son diseño geométrico, volumen de transito, dispositivos de control, etc.

Es en esta parte donde se menciona al diseño geométrico como una consideración mínima a tomar en cuenta, y es uno de los propósitos de este trabajo al tratar de establecer un control de los diseños geométricos, estudiado en países del extranjero especialmente EE.UU., y que tiene que ver con el tema de identificar sectores inconsistentes que no son más que lugares con alta probabilidad de accidentes.

2.3.2 Plan Tolerancia Cero

Este fue otro esfuerzo del Gobierno del Perú que fue la de Implantar el Plan Tolerancia Cero, que busca entre otras cosas la salvaguarda de la integridad física y la vida de los pasajeros interprovinciales, este plan está enfocado principalmente al control de los miles de vehículos de transporte interprovincial

que no cuentan con los requerimientos técnicos para brindar seguridad a sus ocupantes.

Los inspectores del Ministerio de Transportes y Comunicaciones de “Tolerancia Cero”, controlan a todos los conductores y ómnibus es de transporte interprovincial de pasajeros que se dirigen de Lima hacia el interior, además se organizaron grupos de control al interior del país; estos controles están a cargo de los inspectores de Circulación Terrestre de los Gobiernos Regionales, con la colaboración de la Policía Nacional.

En el ómnibus se constata el buen estado de los neumáticos, luces, parabrisas y cintas retrorreflectivas y si portan el Certificado de Operatividad, Inspección Técnica y SOAT Vigente. El plan "Tolerancia Cero" también dispone la verificación de la velocidad del vehículo a través de medios como relojes marcadores. Estos dispositivos constatan la distancia recorrida, la hora de llegada y salida del bus.

Además de controlar las condiciones de los vehículos, antes de realizar su recorrido, se realiza un control al conductor, verificando que este tenga su Licencia de Conducir A-III y que pase la prueba psicosenométrica a la que son sometidos en forma aleatoria con el fin de constatar si se encuentran en condiciones aptas para conducir. En el caso de viajes de larga distancia, se verifica que el ómnibus cuente con un chofer extra para realizar el cambio luego de un tramo, esto para evitar que el cansancio de un solo chofer pueda originar accidentes durante el recorrido.



Figura 1.5: Inspector de Tolerancia Cero realizando los controles a buses interprovinciales

2.3.3 Revisiones técnicas vehiculares

De manera similar al Plan Tolerancia Cero, el Plan de Revisiones Técnicas, Impulsada por el Municipio de Lima, fue implantado con el objetivo de hacer que las unidades de transporte cumplan con las características técnicas mínimas como son: llantas en buen estado, dirección alineada, cintas retroreflectivas, control de emisiones de CO₂, etc.

Si bien es cierto que este plan fue aplicado solo en la ciudad de Lima, gran cantidad de los vehículos inspeccionados transitan también por las carreteras interprovinciales de nuestro país.

La Figura 1.6 muestra la inspección realizada a un vehículo en una de las instalaciones de la Empresa LIDERCON, encargada de las revisiones técnicas vehiculares.



Figura 1.6: Inspección Técnica Vehicular en las Instalaciones de LIDERCON

En torno a este tema se tienen diferentes puntos de vista desde los propios usuarios hasta las personalidades políticas de nuestro país, lo cierto es que este programa de revisiones técnicas tenía como fin el de asegurar que los vehículos que circulan a diario estuvieran en perfecto estado técnico para así reducir los accidentes de tránsito, sin embargo la manera en la que se implantó y manejó no fueron las más adecuadas, lo cual acarrió todos los problemas que se han observado mediante los medios de comunicación.

3. Relación entre la geometría de carreteras y los accidentes

3.1 Modelos matemáticos para la predicción de accidentes

Existen numerosas investigaciones que han tratado de relacionar la cantidad de accidentes con la geometría de las carreteras basada en los parámetros geométricos de la planta, del perfil longitudinal, de la sección transversal y de las bermas de la carretera, dando como resultado ecuaciones o modelos de predicción de accidentes, los cuales serían de mucha ayuda tanto en la fase de proyecto de carreteras así como en los proyectos de mejora de carreteras ya construidas.

El artículo titulado “Diseño Geométrico y Accidentes de circulación en Carreteras Rurales de dos Carriles. Estado del Arte” escrito por Ignacio Pérez Pérez de la Universidad de Coruña – España, resume la variedad de modelos de predicción de accidentes realizado por otros investigadores en su afán de relacionar la accidentalidad en carreteras con la geometría, además del volumen de tráfico de estas. Este artículo muestra algunas ecuaciones matemáticas basadas en el procesamiento estadístico de datos de campo, tomados por cada investigador en el desarrollo de estas ecuaciones matemáticas o modelos de predicción.

Algunos modelos se basan solo en las características geométricas en planta y otras en perfil, mientras que el modelo utilizado en el desarrollo del Modulo Análisis de Accidentes del IHSDM, es un modelo que combina las características geométricas de la vía tanto en planta como en perfil. Este Modulo de Accidentes no es objeto de análisis de este trabajo, sin embargo para fines del capítulo es importante mencionarlo ya que es una muestra de la relación entre la accidentalidad y el diseño geométrico.

Los modelos mencionados pueden ser muy útiles, tanto en la etapa de pre construcción como en la etapa de post construcción. En la etapa de pre construcción, nos permitiría realizar la evaluación del diseño seleccionado; mientras que en la etapa de post construcción, nos permitiría realizar la programación de las acciones de mejora en la seguridad vial de la vía ya construida. A continuación se muestran los modelos recopilados por Ignacio Pérez Pérez en su artículo.

3.1.1 Planta:

A) Curvas circulares

La ecuación 1.1 fue planteada por Glennon y Newman en 1983, esta ecuación relaciona a dos parámetros geométricos típicos de una curva circular, como son la longitud de curva (L) y el grado de curvatura (D), y al volumen de tráfico expresado en millones de vehículos en un año. Así como este modelo de predicción de la cantidad de accidentes en curvas circulares, existen otros más de diferentes autores, que en líneas generales han demostrado que al

incrementarse el grado de curvatura, la accidentalidad también aumenta. Según esto Glennon y Newman estimaron que al incrementar el grado de curvatura en 1° (segsagesimal) se obtendría un incremento de 0.0336 accidentes por millón de vehículos.

$$A = 0,902 (L) \cdot (V) + 0,0336 (D) \cdot (V) \quad (1.1)$$

Donde:

A = Número total de accidentes (accidentes con víctimas + accidentes con sólo daños materiales) acaecidos en la alineación curvilínea durante un año.

L = Longitud de la alineación curvilínea circular en millas.

V = Volumen de tráfico en 10⁶ vehículos.

R = Radio de la curva circular en pies.

D = Grado de curvatura en grados sexagesimales con 100 pies de arco base = 5730/R.

El coeficiente 0.902 es el valor numérico de un índice de accidentes expresado como el número total de accidentes/10⁶ vehículos-millas año en alineaciones rectas. Cuando sea posible, este valor se debe reemplazar por un índice de accidentes en tramos en línea recta que sea representativo de las condiciones locales de la carretera bajo consideración. Este modelo solamente es válido para curvas con grados de curvatura hasta 15°. La Ecuación 1.1 está conformada por dos partes. Por un lado, se representa el efecto de giro de naturaleza continuada que se produce en la curva en sí misma, y, que es directamente proporcional al tráfico en 10⁶ vehículos-millas año. Por otro lado, se relacionan el efecto producido tanto en las tangentes de entrada como en la de salida de la curva circular; y, que es directamente proporcional al grado de curvatura así como a la exposición al riesgo (Glenon y Newman, 1983).

La ecuación 1.2 muestra otro modelo de predicción de accidentes desarrollado por Zegeer et al 1991 presentado en el NCHRP Report 374 en 1995, investigación realizada para la Federal Highway Administration – FHWA.

$$A = [1,552 (L) \cdot (V) + 0,014 (D) \cdot (V) - 0,012 (S) \cdot (V)] (0,978)^{w1 - 30} \quad (1.2)$$

Siendo:

A = Número total de accidentes (accidentes con víctimas + accidentes con sólo daños materiales) acaecidos en la alineación curvilínea durante un año.

L = Longitud de la alineación curvilínea circular en millas.

V = Volumen de tráfico en 10^6 vehículos.

D = Grado de curvatura en grados sexagesimales con 100 pies de arco base.

S = Presencia de una curva de transición:

1 si existe curva de transición

0 si no existe curva de transición

w1 = Ancho total de la calzada en pies (carriles + bermas) en la curva.

Podemos observar 2 diferencias marcadas con respecto al modelo anterior. La primera diferencia es la inclusión de un factor que contempla la presencia de curvas de transición, este factor reduce en 0.012 el número de accidentes por millón de vehículos. La segunda diferencia de este modelo es que se toma en cuenta el ancho de la calzada en la zona de curva, según esto se puede apreciar que si el ancho de la calzada disminuye, la cantidad de accidentes aumenta.

En la Figura 1.7 se muestran 6 graficas, las cuales obedecen a la ecuación 1.2, en donde se puede ver que para una longitud y volumen de tráfico establecido, el aumento de ancho de la calzada es beneficioso para disminuir la accidentalidad.

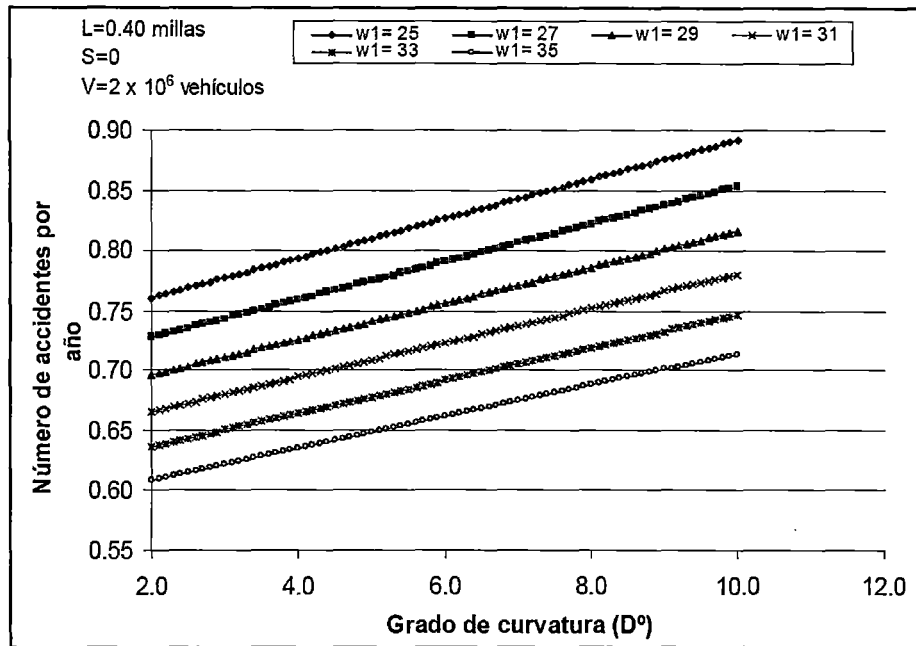


Figura 1.7: Relación entre el número de Accidentes y el grado de curvatura (Pérez Pérez, 2008)

Se puede notar que ninguno de estos dos modelos toma en cuenta al perfil de la carretera, el cual también influye en la accidentalidad de la vía, así como otros modelos que se apreciarán más adelante. Además de esto, la cantidad de accidentes en curvas también están relacionadas a las características de los dos tramos rectos contiguos a la curva en análisis, sin embargo estos modelos muestran la estrecha relación que se puede establecer entre la accidentalidad, en este caso en curvas, y la geometría de las mismas.

B) Curvas de transición

Council (1992) analizó la repercusión que tenían las curvas de transición frente a curvas circulares normales, encontrando que no existía una diferencia marcada entre ambas debido a que en un periodo de 5 años obtuvo que un 75% de las curvas, con o sin transición, tenían cero accidentes. Por ello decidió desarrollar *modelos logísticos lineales (Logit)*, estos modelos son lo suficientemente potentes como para predecir la probabilidad de que en un punto de la vía ocurra uno o más accidentes durante 5 años. Esta técnica estadística tiene la ventaja de permitir identificar el efecto producido por la curva de transición aún cuando éste sea muy débil (Peña Sánchez de Rivera, 1992).

Council (1992) desarrolló 30 modelos muy similares, dentro de tres categorías de terreno: montañoso, ondulado y llano. La ecuación 3 muestra a una de estas ecuaciones que se encuentra dentro de la categoría de terreno llano; para unos valores del grado de curvatura de la curva circular; entre 1° (radio de 5730 pies) y 10° (radio de 573 pies) y un índice medio diario (IMD) hasta 20000 vehículos inclusive (Council, 1992).

$$\text{logit}(p) = -3,2042 + 0,4336 (S) + 0,3125 \left(\frac{\text{IMD}}{1000} \right) + 0,4624 (D) - 0,0238 (D^2) - 0,1397 (S \cdot D)$$

..... Ecuación 1.3

Siendo:

$$\text{logit}(p) = \log\left(\frac{p}{1-p}\right) = B_0 + \sum_{i=1}^I B_i \cdot x_i$$

B₀ = Constante de interceptación (ordenada en el origen).

B = Vector de las pendientes de las variables predictivas del modelo.

p = Pr (Y=1/x)=Probabilidad de que ocurran uno o más accidentes en el emplazamiento “Y” en un período de cinco años, siendo “x” el vector de las variables predictivas del modelo.

S = Presencia de una curva de transición.

1 si existe curva de transición.

0 si no existe curva de transición.

IMD = Intensidad media diaria.

D = Grado de curvatura de la curva circular en grados sexagesimales con 100 pies de arco base.

Este modelo (Modelo Logístico Lineal) es un tanto más sofisticado que los anteriores debido a que modela el logaritmo de la probabilidad de que ocurran uno o más accidentes entre la probabilidad de que no se produzca ninguno. Luego de un análisis detallado se llega a la conclusión que cuando el valor de la probabilidad sea mayor que 0.5 significara la ocurrencia de uno o más accidentes, por el contrario si esta probabilidad es menor de 0.5 significara que el emplazamiento no tendrá accidentes.

La Figura 1.8 fue elaborada en base a este modelo asumiendo valores como el Índice Medio Diario (IMD) y la presencia o no de curvas de transición (S=1 o S=0).

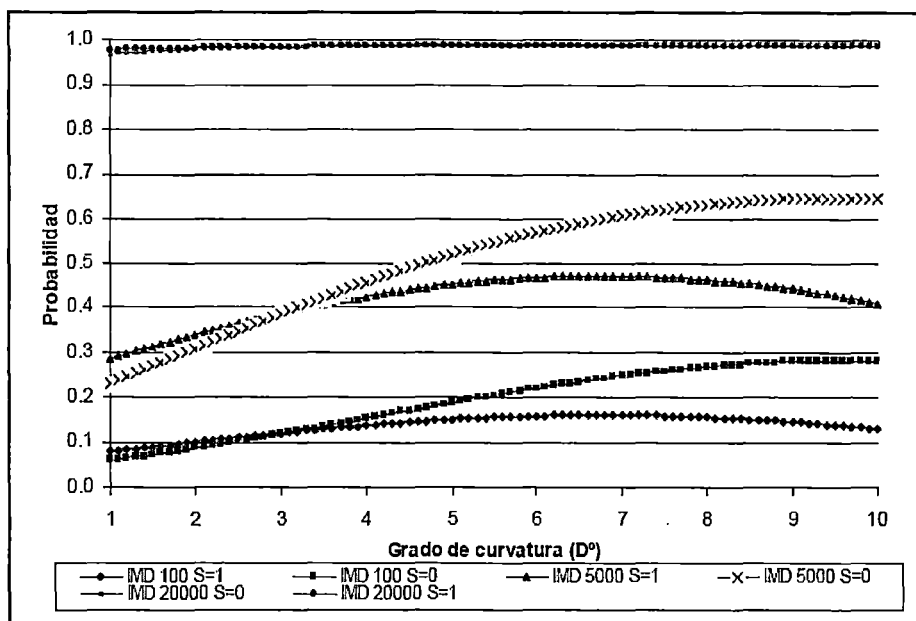


Figura 1.8: Probabilidad de que ocurran uno o más accidentes en terreno llano (curvas de transición) (Pérez Pérez, 2008)

Se observa que para un IMD de 20000 no hay demasiada variación entre una curva con y sin transición, mientras que para valores de IMD como 100 y 500 podemos notar la diferencia marcada entre la existencia o no de curvas de transición. Para estos dos últimos casos observamos que aproximadamente para un valor de 3° de curvatura la probabilidad es la misma mientras que para valores superiores notamos que la presencia de curvas de transición resulta beneficioso para reducir la accidentalidad.

Obviamente como se mencionó líneas arriba este modelo obedece a las condiciones norteamericanas, donde se desarrolló la investigación, y de la clasificación dada por Council, dentro de la cual se desarrolló esta ecuación.

En las conclusiones de su investigación Council dice que a pesar de que los resultados ofrecen alguna luz sobre el efecto de las curvas de transición, éstos aún no están lo suficientemente claros y, por lo tanto, se necesita investigar

mucho más acerca de este campo de la seguridad de la circulación vial (Council, 1992; Council, 1998).

3.1.2 Perfil:

Newman y Glennon (1983) desarrollaron un modelo teórico que predice la frecuencia con que ocurrirían accidentes en curvas verticales con una distancia de visibilidad limitada.

Si bien es cierto este modelo fue desarrollado teóricamente, basado solo en la experiencia profesional, por no haber sido contrastado con datos reales de accidentes, muestra una aproximación de la mejora que se puede dar a la seguridad vial mediante la mejora de las condiciones geométricas del perfil de la vía.

Este modelo de predicción de accidentes de circulación vial se expresa de la forma siguiente (Newman y Glennon, 1983; Transportation Research Board, 1987):

$$A = AR_h \cdot V \cdot [L_{vc} + L_r \cdot F_{ar}] \quad (1.4)$$

Siendo:

A = Número total de accidentes acaecidos en un tramo de carretera, que contiene una curva vertical, durante un año.

AR_h = Índice de accidentes promedio para la carretera específica en accidentes por millón de vehículos-millas.

L_{vc} = Longitud de la curva vertical en millas.

V = Volumen de tráfico en el tramo de carretera en 10⁶ vehículos.

L_r = Valor de la distancia de visibilidad restringida en millas (longitud de la distancia de visibilidad, menor o igual que el valor especificado por la AASHTO).

F_{ar} = Factor hipotético del índice de peligrosidad que varía de acuerdo a la naturaleza de la restricción a la visibilidad y al grado de peligrosidad en el área de restricción a la visibilidad.

El índice de peligrosidad promedio (AR_n) se toma en base a los datos recopilados de una longitud de carreteras considerable. En este sentido, Newman y Glennon (1983) indican las condiciones promedio de las carreteras de una sola calzada mediante un índice de 2,4 accidentes por millón de vehículos-millas. Por otro lado, la longitud de la distancia de visibilidad restringida (L_r) es una función de la velocidad de operación de las carreteras y de la geometría de las curvas. La distancia de visibilidad restringida se puede estimar mediante la expresión siguiente:

$$L_r = (a_0 + a_1 \cdot G) \cdot \frac{1}{5,28}$$

Siendo:

a_0, a_1 = Constantes.

G = Valor absoluto de la diferencia de las inclinaciones de las rasantes.

Las constantes de la expresión anterior se determinan en función de la distancia de visibilidad de parada y de la velocidad de proyecto. Un gran inconveniente de este modelo radica en que no ha sido validado utilizando datos reales de accidentes. Además, solamente se puede aplicar en carreteras en campo abierto con curvas verticales que no cumplen manifiestamente los estándares mínimos de proyecto de las distancias de visibilidad de parada especificados por la AASHTO 1984. (Ignacio Pérez Pérez, 2008)

3.1.3 Sección transversal

A) Ancho de carril y de berma

Un incremento en el ancho del carril y de las bermas ofrece una mejor seguridad vial, esto debido a que se está incrementando la separación lateral entre los vehículos lo cual ayuda a que la probabilidad de un choque frontal o frontolateral disminuya. La ventaja del incremento del ancho de las bermas radica en que al ser más anchas, permiten una mejor maniobra del conductor y un regreso seguro al carril después de haberse salido hacia la berma.

La Federal Highway Administration (FHWA) ha estudiado el efecto que tiene el ancho de carril y berma sobre la seguridad vial así como el tipo de berma y, también, otras variables (zonas de recuperación, terreno e intensidad de tráfico). Con este fin la FHWA presentó un modelo polinómico que cubre los accidentes de un solo vehículo con salida de la carretera, los que se producen mediante choques frontales entre vehículos y, igualmente, mediante choques frontolaterales (Zeeger y Deacon, 1987):

$$A = 0,0019 (IMD)^{0,882} (0,879)^w (0,919)^{PA} (0,932)^{UP} (1,236)^H (0,882)^{TER1} (1,322)^{TER2} \quad (1.5)$$

Siendo:

A = Número de accidentes de los tipos, salida de la carretera, colisión frontal, colisión frontolateral en direcciones opuestas, colisión frontolateral en la misma dirección por milla por año.

w = Anchura del carril en pies.

PA = Anchura pavimentada de la berma en pies.

UP = Anchura sin pavimentar de la berma en pies.

H = Índice de inseguridad promedio en las zonas laterales de la carretera en el segmento de carretera, valorado subjetivamente sobre una escala de 1 (menos peligroso) a 7 (más peligroso).

TER1 = 1 para terreno llano, 0 en otros casos.

TER2 = 1 para terrenos montañosos, 0 en otros casos.

La Figura 1.9, elaborada para un IMD de 4000, muestra por ejemplo que para un ancho del carril de 11 pies un cambio de ancho en las bermas de PA = 0 a PA = 4 se genera una disminución de la cantidad de accidentes aproximadamente a un 29%.

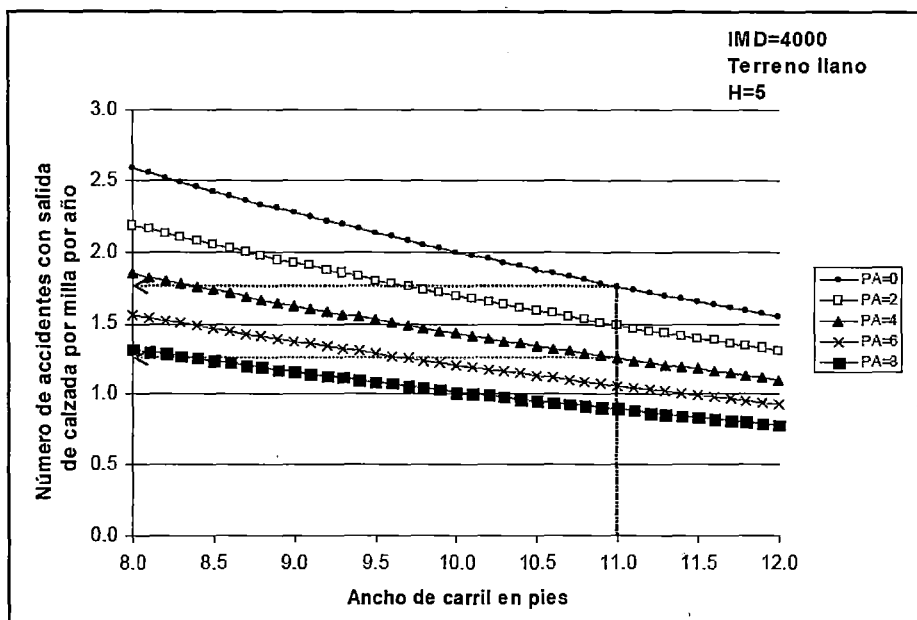


Figura 1.9: Relación entre el índice de peligrosidad y el ancho de carril para un IMD = 4000 (Pérez Pérez, 2008)

La Figura 1.10, elaborada para un IMD de 1000, muestra que al efectuar un ensanche de carril de 9 a 11 pies combinado con un ensanche de bermas de PA = 0 a PA = 4 pies, respectivamente, la reducción de la cantidad de accidentes aumenta aproximadamente en un 45%.

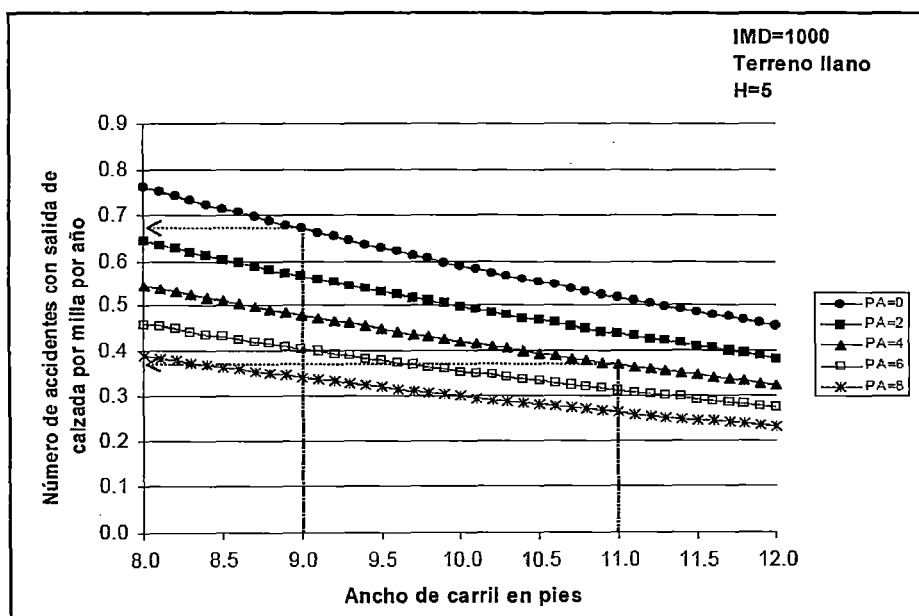


Figura 1.10: Relación entre el índice de peligrosidad y el ancho de carril para un IMD = 1000. (Pérez Pérez 2008)

3.1.4 Múltiples elementos

Este modelo fue desarrollado por Vogt y Bared (1998) con el objetivo de desarrollar un modelo que contemplara los múltiples efectos de la geometría de la carretera como la planta y el perfil. Las investigaciones fueron realizadas con la información recopilada en los estados de Minnesota y Washington en los Estados Unidos. Los datos fueron tomados de 619 tramos de carretera del Estado de Minnesota y 712 tramos del Estado de Washington, estas carreteras en su gran mayoría se encontraban en campo abierto.

El modelo obtenido de la investigación es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 A = & V \cdot \exp(0,17 + 0,14 \cdot E - 0,28 \cdot w - 0,19 \cdot PA + 0,067 \cdot H + 0,014 \cdot Z) \\
 & \times \left(\sum_i LCH_i \exp(0,014 \cdot D_i) \right) \\
 & \times \left(\sum_j LCV_j \exp(0,13 \cdot R_j) \right) \\
 & \times \left(\sum_k LR_k \exp(0,11 \cdot GR_k) \right)
 \end{aligned} \tag{1.6}$$

Siendo:

A = Número promedio de accidentes por año.

V = Exposición al riesgo en 10^6 vehículos- kilómetros.

E = Situación (**0** en Minnesota, **1** en Washington).

w = Anchura del carril en metros.

PA = Anchura de la berma pavimentada en metros.

H = Índice de inseguridad promedio en las zonas laterales de la carretera en el segmento de carretera, valorado subjetivamente sobre una escala de 1 (menos peligroso) a 7 (más peligroso).

Z = Número de accesos a las propiedades colindantes por kilómetro.

LCH_i = Longitud de la curva horizontal "i" que está dentro de un tramo dividida entre la longitud de dicho tramo.

D_i = Grado de curvatura de la curva horizontal "i" (en grados sexagesimales) situada en el tramo de carretera con 100 metros de arco base = $5730/R$.

R = Radio de la curva circular en metros.

LCV_j = Longitud de la curva vertical “j” que está dentro del tramo dividida entre la longitud de dicho tramo.

R_j = $|g_{j2} - g_{j1}| / l_j$ = Índice de inclinación de la curva vertical “j”. Donde g_{j2} y g_{j1} son las inclinaciones de las rasantes de entrada y salida respectivamente. l_j es la longitud de la curva vertical.

GR_k = $|g|$ = Inclinación absoluta de la alineación rectilínea “k” situada dentro del tramo de carretera.

LR_k = Longitud de la alineación rectilínea k dividida entre la longitud del tramo.

Como puede observarse, este modelo está hecho para los lugares donde se realizó la toma de datos, estados de Minnesota y Washington. Comparado con datos reales en estos dos estados, el modelo resulta eficiente pues sus resultados se ajustan muy bien a estos dos casos; es quizás esta característica la que no permitiría la aplicación en otros lugares de este modelo, sin embargo es probable que se pueda ajustar a situaciones diferentes, como es el caso del Perú, para ello se tendría que realizar un estudio que demandaría esfuerzo, dinero y tiempo para una recolección de datos extensa.

Por otra parte, los autores midieron el efecto que producían sobre la seguridad de la circulación vial las variables introducidas en el modelo, estimando el cambio obtenido en el promedio de accidentes al incrementar la variable correspondiente a la unidad. Para ello, se empleó la expresión siguiente (Vogt y Baret 1998)

$$FRA(\%) = -100 \cdot [e^{a_i} - 1]$$

Siendo:

FRA (%) = Factor de reducción de accidentes.

a_i = Coeficiente de la variable correspondiente del modelo.

De acuerdo a esta ecuación, en los estados de Minnesota y Washington se obtuvieron los factores de reducción de accidentes de la Tabla 1 (Vogt y Baret 1998). Como se observa en la Tabla 1.1, lógicamente, al incrementar tanto el ancho de carril como el ancho de berma en una unidad se producen factores de reducción positivos; es decir, una disminución del número de accidentes. Sin

embargo, al aumentar en la unidad el resto de las variables contempladas en la Tabla 1.1 se originan factores de reducción negativos; o sea, un incremento del número de accidentes.

VARIABLE	COEFICIENTE a_i	FACTOR (%)
w (ancho de carril)	-0,28	24,4
PA (ancho de arcén)	-0,19	17,3
H (índice de inseguridad en las zonas laterales)	0,067	-7,0
Z (densidad de accesos)	0,014	-1,4
D_i (grado de curvatura horizontal)	0,014	-1,4
R_i (índice de inclinación vertical)	0,13	-13,9
GR_x (inclinación absoluta)	0,11	-11,6

Tabla 1.1: Factores de reducción de accidentes (Vogt y Baret 1998)

Cabe destacar que este último modelo ha sido implementado por la FHWA como base para facilitar la evaluación de la seguridad vial de las carreteras en proyecto, bajo la denominación de **Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM)** (Harwood et al, 2000). En este sentido, este modelo de predicción base permite aplicar una serie de factores de modificación que a su vez también dependen de los elementos del diseño geométrico. Por tanto, el algoritmo resultante puede calibrarse para reflejar las condiciones particulares del entorno al que se aplique (Hughes et al, 2004; Sun et al, 2006). Por último, el modelo se complementa con un procedimiento bayesiano empírico que permite mejorar las estimaciones iniciales a partir de datos históricos de la accidentalidad. (Pérez Pérez 2008).

3.2 Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM)

El esfuerzo más resaltante sobre la relación entre la geometría de las carreteras y los accidentes es, sin duda, el realizado por la Federal Highway Administration (FHWA) mediante la creación del Interactive Highway Safety Design Model o Modelo Interactivo del Diseño de la Seguridad. Este modelo es resultado de numerosas investigaciones que han servido de base para la creación de este modelo y del Software del mismo nombre. Este software posee seis módulos, todos ellos relacionados a mejorar la seguridad vial.

La Figura 1.11 muestra los módulos que conforman el software IHSDM, estos 6 módulos pueden ser aplicados a una alternativa de diseño para luego obtener una alternativa revisada; producto de esta revisión se encontraran deficiencias o debilidades del diseño para con la seguridad que este ofrece. Basados en estos hallazgos es posible plantear alternativas de solución que pueden ir desde cambiar la geometría del diseño hasta el planteamiento de mejoras en la señalización, por ejemplo.

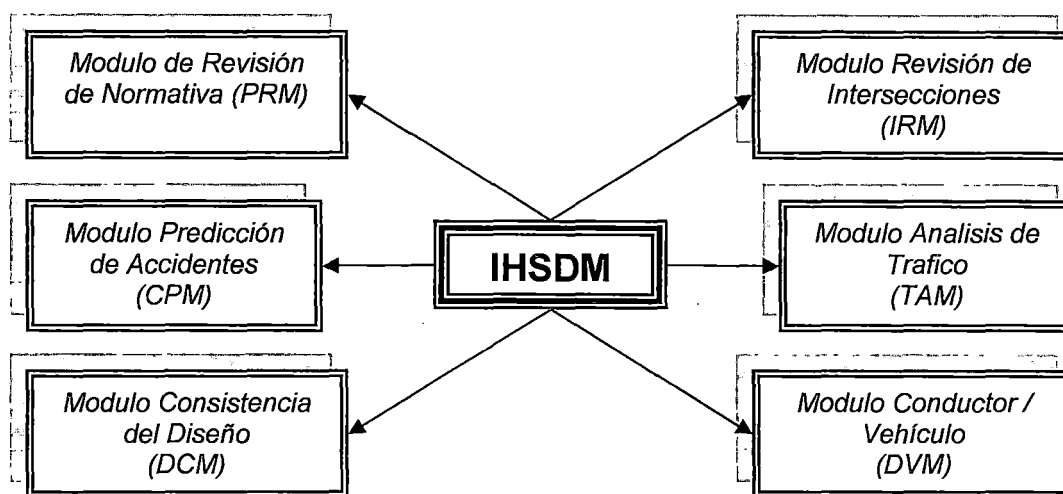


Figura 1.11: Organigrama de la Composición del Software IHSDM

Generalmente, para realizar una evaluación de mejora de una carretera debido al gran número de accidentes en los llamados puntos negros, esperamos a que estos se produzcan para que luego planteemos alternativas técnicas de solución, una de estas soluciones podría ser de una ampliación del radio de una curva donde se producen accidentes con gran frecuencia, mas es difícil hacer esto antes de la ocurrencia de los accidentes, sin embargo ahora existen algunos modelos que intentan cambiar esto, mediante la predicción de accidentes basados en el diseño geométrico.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MODULO ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DEL SOFTWARE INTERACTIVE HIGHWAY DESING MODEL (IHSDM)

1. Introducción

El capítulo tiene como objetivo dar a conocer el soporte teórico que tiene el Modulo Análisis de Consistencia del software IHSDM para el análisis de consistencia del diseño geométrico mediante el cálculo del perfil de velocidades de operación (V_{85}) a lo largo de una vía. Este perfil de velocidades permite identificar la inconsistencia de una vía mediante la variación de la velocidad de operación entre los elementos geométricos que la componen.

El análisis de consistencia se basa en el hecho que al generarse una variación de velocidad mayor o igual a 20 Km/h entre elementos adyacentes (tangente y curva), la probabilidad de que ocurra un accidente es mayor que cuando esta velocidad se mantiene constante o no varía significativamente. La probabilidad de ocurrencia de accidentes por una gran variación de velocidad se debe a que en una situación de inconsistencia se debe pasar de una velocidad a otra efectuando maniobras de aceleración y desaceleración, las cuales no deberían ser altas o bruscas para disminuir la probabilidad de sufrir un accidente.

El software identifica estos cambios de velocidad de operación, luego de efectuar cálculos matemáticos basados en modelos de predicción de velocidad y en el modelo de tráfico TWOPAS. El software muestra estos puntos al usuario mediante gráficos (banderas de colores) y Tablas de valores. Además, el software puede mostrar al usuario, los tramos de la vía en donde la velocidad de operación sobrepasa a la velocidad de diseño. Esto será mostrado con más detalle en el Capítulo III, donde se realiza una aplicación del análisis de consistencia a un tramo de cuatro kilómetros de la Carretera Chilete – San Pablo.

2. Interactive Highway Safety Design Model – IHSDM

El Departamento de Transporte de los EE.UU. mediante la Federal Highway Administration (FHWA), realizaron investigaciones relacionadas al mejoramiento de la seguridad vial en carreteras, especialmente en carreteras rurales de dos carriles. Producto de estas investigaciones se publicaron reportes elaborados por grupos de profesionales investigadores. Estos reportes son la base principal sobre la cual se creó el software Interactive Highway Design Model (IHSDM).

El IHSDM es una herramienta que aún está en desarrollo, pero que se perfila como el mayor aporte a la seguridad vial de carreteras en los últimos años. Este software permite el análisis de la seguridad vial de carreteras basándose en las características geométricas de la vía, así como en datos históricos de la carretera en evaluación, principalmente de accidentes acaecidos en ellas. Este software será la herramienta más importante para el análisis de la seguridad vial ofrecida por los diseños geométricos nuevos y de aquellas carreteras que se encuentran actualmente en servicio. Esto permitiría elaborar no solo el desarrollo de diseños geométricos con una buena seguridad vial en la etapa de proyecto, sino que también planes de mejoramiento de la seguridad vial de las carreteras ya construidas.

Obviamente el software no reemplaza a los criterios y conocimientos de los diseñadores, siendo solo una herramienta adicional que se brinda para la evaluación de los diseños geométricos de carreteras. El programa se encuentra en etapa de prueba y puede ser descargado desde la página principal de la Interactive Highway Design Model (www.ihsdm.com).

A continuación se describe brevemente cada uno de los 5 módulos habilitados en la versión de prueba.

- **Policy Review Module (PRM):** El Módulo Revisión de Normativa es una herramienta importante para quien desee revisar si las dimensiones utilizadas en el diseño geométrico de una vía cumplen con las mínimas establecidas en la Norma de Diseño Geométrico AASHTO. Al ser este software de procedencia Norteamericana, por defecto la norma base es la

AASHTO 2004, sin embargo, es posible adaptarla a la normativa de cada país, modificando las Tablas que contienen los parámetros de diseño geométrico de la vía.

- **Crash Prediction Module (CPM):** El Modulo de Predicción de Accidentes estima la frecuencia y severidad con la cual ocurrirían accidentes en la carretera analizada. Este modulo obtiene mejores resultados si se ingresan datos históricos de accidentes en la carretera analizada.
- **Design Consistency Module (DCM):** El Modulo Consistencia del diseño estima la velocidad de operación de los vehículos basado en la geometría de la carretera, generando un perfil de velocidades a lo largo de toda la vía. El modulo además genera tablas informativas de velocidad vs posición y de variación de velocidad entre elementos adyacentes. Estas últimas identifican a los sectores con inconsistencia en la velocidad para que puedan ser analizadas y tratadas mediante un rediseño o colocación de señalización del tipo vertical u horizontal.
- **Intersection Review Module (IRM):** El Modulo de Revisión de Intersecciones ayuda a revisar el diseño geométrico de una intersección, analizando principalmente la combinación de elementos geométricos que pudieran generar accidentes.
- **Traffic análisis Module (TAM):** El Modulo Análisis de Trafico estima los efectos operacionales que tendría en el futuro la carretera analizada, esta información puede ser usada en planificación de acciones de mejora de la vía, como por ejemplo la ampliación de los carriles, adición de vías de adelantamiento, etc.
- **Driver / Vehicle Module (DVM):** El Modulo Conductor / Vehículo simula el comportamiento que tendría el conductor al realizar las maniobras de manejo a través de la geometría de la carretera. Esto último con la finalidad de evaluar cómo es que el conductor maniobrará el vehículo, y así descubrir las condiciones que provocarían una reducción en el control del vehículo.

2.1 Modulo Consistencia del Diseño

La consistencia del diseño se refiere a la forma en la cual la geometría de la carretera se le va presentando al conductor y lo que el conductor espera encontrar. La meta de este modulo es lograr que las expectativas del conductor sean las que se presenten en la carretera o simplemente sean lo más cercana posible. De lograrse esto, se estaría incrementando la consistencia de la carretera mientras la frecuencia de accidentes disminuye.

Una de las expectativas que tienen los conductores, es mantener su velocidad casi constante. Por esta razón es importante identificar los sectores donde la velocidad tiene una variación significativa.

El Modulo Análisis de Consistencia evalúa la consistencia de la velocidad de operación utilizando perfiles de velocidad. Estos perfiles son producto de la estimación del percentil 85% de las velocidades de operación a lo largo de la carretera. El modelo del perfil de velocidades, combina las velocidades estimadas en curvas (horizontales, verticales y combinación horizontal – vertical), velocidad deseada en tangentes largas, tasas de aceleración y desaceleración en entrada y salida de curvas y un algoritmo para estimar velocidades en pendientes (modelo de trafico TWOPAS).

El modulo estima dos medidas:

- La diferencia esperada entre la velocidad estimada como el percentil 85% a lo largo de la vía y su velocidad de diseño de la vía, y
- La reducción esperada de la velocidad de operación del vehículo cuando pasa de una tangente a la curva siguiente a dicha tangente.

El objetivo del uso de estas dos medidas es identificar los sectores donde se debe prestar mayor atención y realizar un mayor análisis.

En relación a la primera medida, es poco común y no necesariamente un problema que la velocidad estimada como el percentil 85% sea mayor a la

velocidad de diseño de la vía. No es necesariamente un problema porque los valores tomados como referencia por la norma de diseño ya poseen un margen considerable que garantiza la seguridad de la vía.

En relación a la segunda medida, estima la reducción esperada de la velocidad de operación en la tangente y en la curva siguiente a dicha tangente. Lugares donde la reducción de la velocidad es considerable, se debe garantizar un mayor análisis. Por ejemplo, si luego del análisis con el software se identifican sectores con inconsistencia, se deberá analizar la posible causa de esta. Para ello se utilizarán las tablas arrojadas por el software para ver la variación de la velocidad en aquella zona, una vez identificada la causa se puede intentar a realizar una modificación en la geometría de la vía o de lo contrario solo plantear la colocación de señalización que permita el control de la velocidad.

Es importante mencionar dos advertencias en el uso del Módulo Análisis de Consistencia, las cuales son:

- El módulo se desarrolló en base a características geométricas de vías de los Estados Unidos, por lo que las ecuaciones base del software fueron calibradas con datos tomados en diferentes lugares de los EE.UU. Por este motivo, no debe esperarse una representatividad total de todos los casos, los cuales pueden variar por región.
- Los resultados obtenidos, en estas dos medidas antes mencionadas, no deben ser tomados como un estándar o norma. En forma similar, los colores usados en el perfil de velocidades no deben ser interpretados como categorías de aceptable y no aceptable.

2.1.1 Modelos de predicción de la velocidad de operación

Los modelos para la predicción de la velocidad de operación fueron desarrollados en base a datos medidos en diferentes estados de los EE.UU. Utilizando métodos estadísticos los investigadores lograron desarrollar ecuaciones de regresión para la predicción de la velocidad de operación en

curvas y tangentes. Esta velocidad de operación es calculada en base a las características geométricas de la carretera analizada.

Del total de datos tomados por los investigadores, la gran mayoría sirvió para realizar la regresión de ecuaciones o modelos de predicción, y la otra parte fue empleada para validarlas. Esta validación fue realizada para probar la representatividad de los modelos con respecto a otros datos tomados en campo.

La velocidad prevista con las ecuaciones y modelos es denominada como velocidad percentil 85%, denotada por V_{85} . El percentil 85%, de una muestra de velocidades observadas, es la estadística general usada para describir velocidades de operación en un elemento geométrico. V_{85} es la velocidad, igual o menor, a la cual el 85% de los conductores están circulando en la vía. El percentil 85% es el factor más común utilizado para establecer límites de velocidad en los Estados Unidos y es internacionalmente aceptado como la medida de la velocidad de operación.

A. Toma de datos en campo

- **Medida de la velocidad**

Los datos de velocidad de operación fueron tomados entre julio de 1996 y enero de 1997 en los estados de Minnesota, New York, Pennsylvania, Oregon, Washington y Texas. Estos estados fueron seleccionados porque las características de las vías rurales de dos carriles eran representativas del total de las vías de los EE.UU.

El tipo del vehículo fue determinado por observación en el lugar o en base al conteo de tráfico realizado con sensores piezoeléctricos colocados en la vía, así como se muestra en la Figura 2.1. Los sensores eran colocados en la vía separados 3.05 m aproximadamente, estos median el número y separación de los ejes que pasaban sobre ellos.

La velocidad era tomada por un radar de medición colocado en la vía, este radar media la velocidad del vehículo en dos posiciones, como se aprecia en la Figura 2.2.

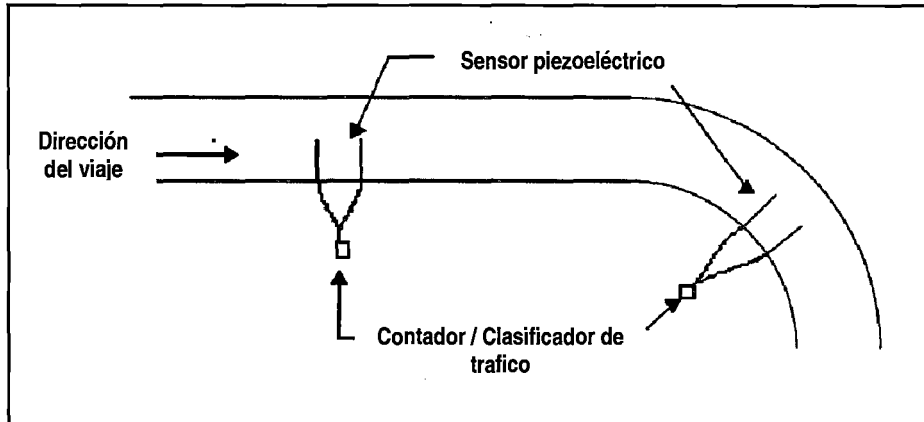


Figura 2.1: Colocación de sensores piezoeléctricos en curva horizontal (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).

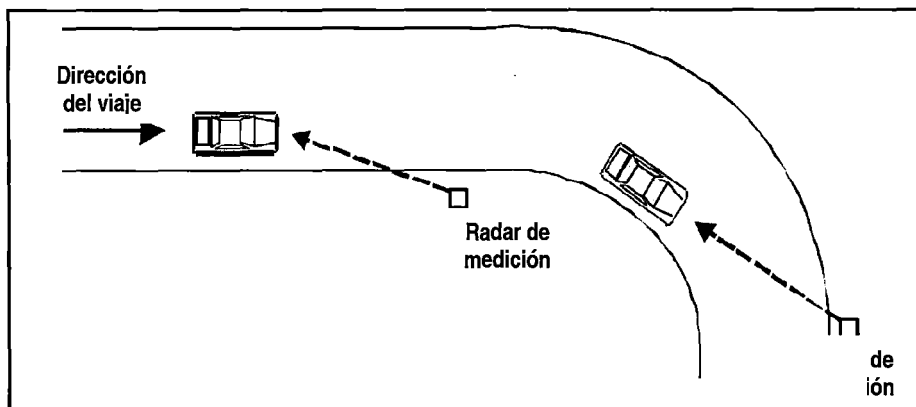


Figura 2.2: Ubicación de radares de medición en curva horizontal (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).

En curvas verticales la toma de datos de velocidad fue realizada utilizando sensores piezoeléctricos, esto debido a que los radares de medición eran más complejos de colocar cuando se trataba de una curva vertical con distancia de visibilidad limitada. Para la medición de velocidad de los vehículos se utilizaron tres sensores ubicados en la tangente de aproximación, el punto de la mínima distancia de visibilidad y la cresta de la curva. El punto de mínima distancia de

visibilidad fue calculado como el punto cuya elevación era menor en 1.07 m al de la cresta. La Figura 2.3 muestra la forma en que fueron ubicados los sensores.

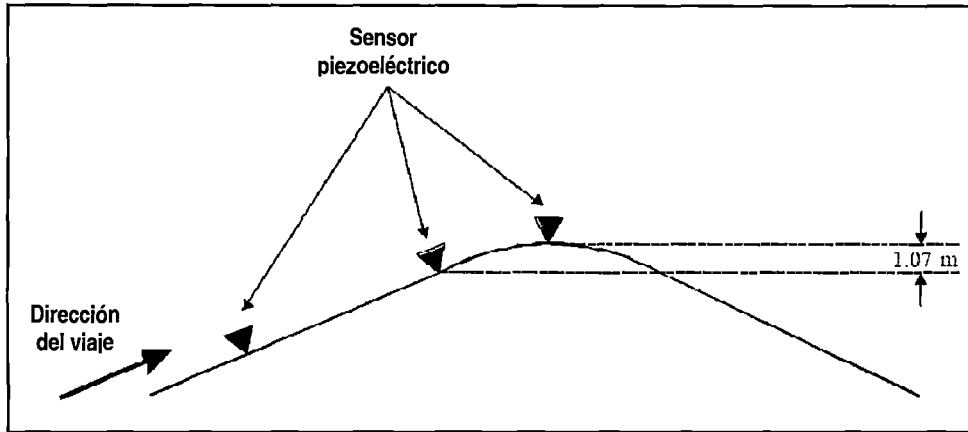


Figura 2.3: Ubicación de sensores piezoeléctricos en curva vertical con limitada distancia de visibilidad (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).

- **Datos geométricos de la vía**

Los datos de la geometría de la vía fueron extraídos de los estudios o planes ejecutados en las diferentes vías de los estados estudiados, muchos de estos estados tenían la data geométrica en versión digital, lo cual hizo el trabajo más rápido. Sin embargo, en aquellas donde no se contaba con una información digital se tuvo que recurrir a los proyectos de construcción en los Departamentos de Transporte de cada Estado.

Los datos geométricos necesarios para el desarrollo del estudio incluían información sobre curvas horizontales, curvas verticales y la tangente que precedían a estas. Para curvas horizontales la data obtenida fue: grado de curvatura (D), ángulo de deflexión (I), radio (R), longitud de curva (L_H), pendiente (G), progresiva del PC, progresiva del PI y progresiva del PT. Para curvas verticales la data obtenida fue: pendiente de la tangente de entrada (G1), pendiente de la tangente de salida (G2), progresiva del VPC, progresiva del VPI y progresiva del VPT. Además, para el último caso, incluyeron una nota para definir si la curva era cóncava o convexa.

Adicionalmente a la data mencionada, para curvas horizontales y verticales, recopilaron información de la tangente de acercamiento. Esta data está compuesta por la longitud (LT) y pendiente (GT) de la tangente, asimismo por las progresivas de inicio y fin.

B. Ecuaciones de predicción de la velocidad de operación (V_{85})

Los investigadores de la FHWA luego de tomar datos en campo, con los sensores mencionados anteriormente, se enfocaron en desarrollar los modelos de predicción de velocidad para diferentes condiciones geométricas, resultantes de combinar la planta y el perfil de la vía. Basados en investigaciones anteriores, los investigadores buscaron relacionar términos dependientes e independientes. Como resultado de las relaciones entre términos, los investigaciones hallaron que las variables que influían directamente sobre la velocidad de operación eran el radio, para curvas horizontales, y el factor K, característico de las curvas verticales.

• Curvas horizontales en pendiente

Cuatro condiciones de pendiente diferente fueron consideradas en la evaluación de curvas horizontales en pendiente:

1. Pendiente ascendente entre 0 y 4%,
2. Pendiente ascendente mayor a 4%,
3. Pendiente descendente entre 0 y 4%, y
4. Pendiente descendente mayor a 4%

Con estas consideraciones, los investigadores adoptaron como variables independientes al radio y a la inversa del radio. Esto debido a que investigaciones anteriores que desarrollaron modelos de predicción de la velocidad, también utilizaron a estas variables.

La Figura 2.4 muestra los datos recopilados en 94 sitios que tenían curvas horizontales en pendiente, asimismo se aprecian las curvas que corresponden a las ecuaciones finales calculadas. Se aprecia que la distribución de los puntos es

un tanto dispersa, mientras que en la Figura 2.5 la distribución de puntos es un tanto más lineal. En consecuencia, las ecuaciones que mejor se ajustan a los puntos serian lineales donde la variable es $1/R$.

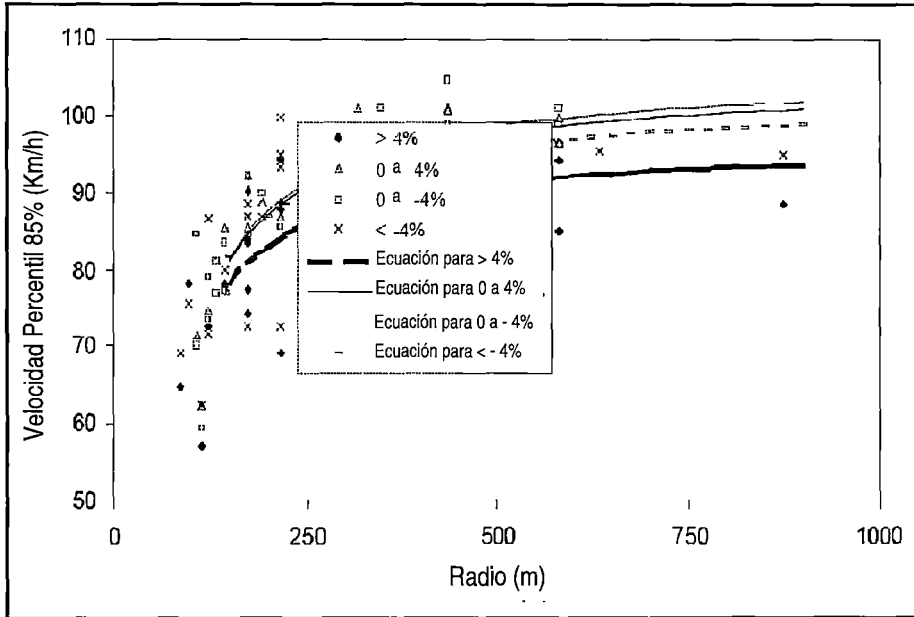


Figura 2.4: Grafico V_{85} vs. R (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).

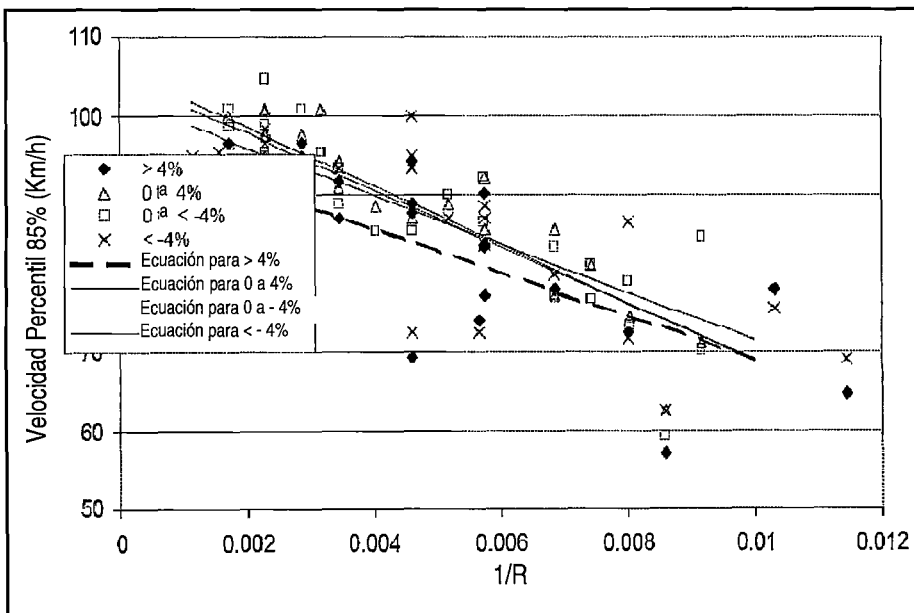


Figura 2.5: Grafico V_{85} vs. $1/R$ (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).

La Tabla 2.1 muestra los parámetros calculados en base a los gráficos anteriores y luego de diversos análisis estadísticos.

Condición de alineamiento	Variable independiente	Estimación del parámetro Beta	p – Valor	Número de sitios	R ²
0% ≤ G < 4%	1/R	-3574.51	0.0001	25	0.76
	Intercepto	104.82	0.0001		
4% ≤ G < 9%	1/R	-2752.19	0.0001	23	0.53
	Intercepto	96.61	0.0001		
-4% ≤ G < 0%	1/R	-3709.90	0.0001	25	0.76
	Intercepto	105.98	0.0001		
-9% ≤ G < -4%	1/R	-3077.13	0.0001	21	0.58
	Intercepto	102.10	0.0001		

Tabla 2.1: Parámetros estimados de curvas horizontales en pendiente (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).

De acuerdo con la Tabla anterior, las ecuaciones serían las siguientes:

Pendiente	Ecuación de predicción de V ₈₅
0% ≤ G ≤ 4%	V ₈₅ =104.82 – 3574.51/R
4% ≤ G ≤ 9%	V ₈₅ =96.61 – 2752.19/R
-4% ≤ G ≤ 0%	V ₈₅ =105.98 – 3709.90/R
-9% ≤ G ≤ 4%	V ₈₅ =102.10 – 3077.13/R

Tabla 2.2: Ecuaciones de predicción de V₈₅ para curvas horizontales en pendiente.

- **Curvas verticales en tangentes horizontales**

Para el análisis de las curvas verticales, los investigadores separaron todos los tipos de curvas verticales en tres categorías que son:

1. Curvas convexas con distancia de visibilidad limitada,
2. Curvas convexas con distancia de visibilidad no limitada, y
3. Curvas cóncavas

Para la realización de las ecuaciones de regresión, los investigadores tenían un número limitado de datos, motivo por el cual se optó por tomar datos de una investigación pasada realizada por la NCHRP Stopping Sight Distance (SSD). En esta investigación se tenía datos de curvas verticales con limitada y no limitada distancia de visibilidad, todos ellos tomados en los estados de Texas y Washington.

En la Figura 2.6 se observa la distribución de los datos en un gráfico velocidad versus el valor "K", característico de las curvas verticales. Además se dibujó la curva que corresponde a la ecuación de regresión calculada para curvas convexas con limitada distancia de visibilidad.

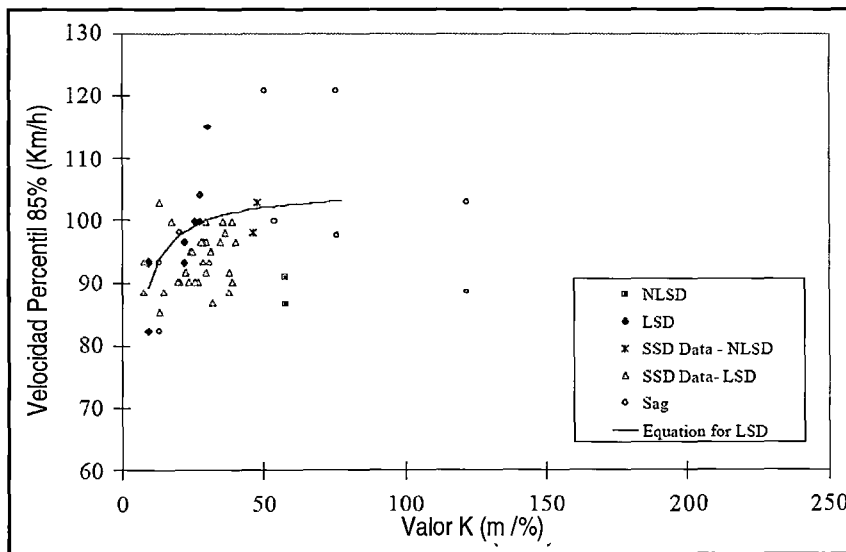


Figura 2.6: Curvas verticales en tangentes horizontales: V_{85} vs. K (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).

En forma similar a la anterior, en la Figura 2.7 se observa la distribución de los puntos en un gráfico velocidad versus la inversa de "K", además se dibujó la ecuación de regresión calculada (ecuación lineal).

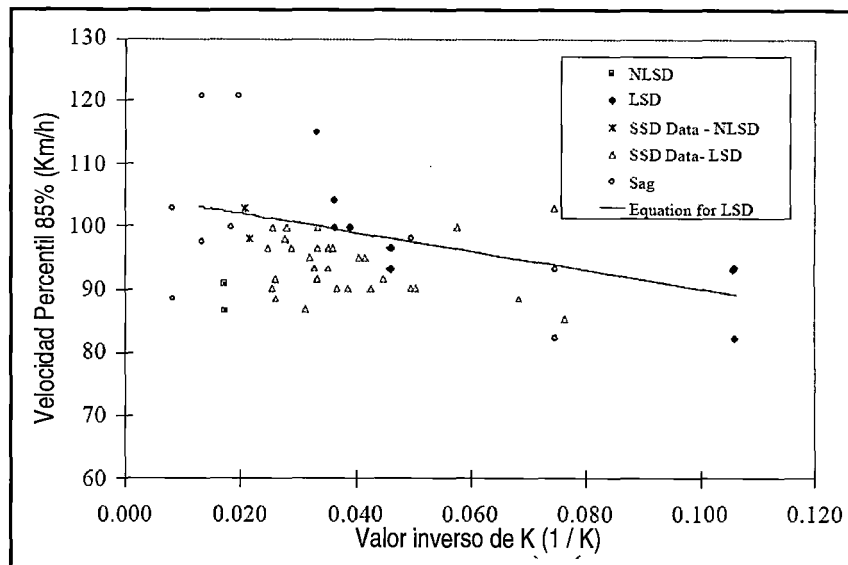


Figura 2.7: Curvas verticales en tangentes horizontales: V_{85} vs. $1/K$ (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).

De acuerdo con las conclusiones de la investigación, la relación de los datos de velocidad con la inversa del valor “K” tiene una mejor correlación estadística, que la relación con el valor “K”.

Luego del análisis realizado en la investigación, se obtuvo los siguientes parámetros estimados, representados en la Tabla 2.3 para curvas verticales convexas con limitada distancia de visibilidad en tangentes horizontales.

Variable Independiente	Estimación de parámetros	p- valor	Número de sitios	R ²
intercepto	105.08	0.0001	9	0.60
1/K	-149.69	0.0134		

Tabla 2.3: Parámetros estimados de curvas verticales convexas con limitada distancia de visibilidad en tangentes horizontales (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).

De forma similar, la Tabla 2.4 contiene los valores de parámetros estimados para curvas verticales cóncavas en tangentes horizontales.

Variable Independiente	Estimación de parámetros	p- valor	Número de sitios	R ²
intercepto	100.21	0.0001	7	0.49
1/K	-106.34	0.0779		
Recomendación: Use la velocidad deseada en tangentes largas				

Tabla 2.4: Parámetros estimados de curvas verticales cóncavas en tangentes horizontales (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).

No fue posible, para los investigadores, encontrar parámetros estimados para curvas verticales convexas con distancia de visibilidad no limitada en tangente horizontal. Esto debido a que solo se contaba con 2 datos de velocidad para esta configuración geométrica, a pesar que se tomaron datos de la investigación realizada por la NCHRP, pues luego de realizar la estadística de los datos concluyeron que la ecuación de regresión calculada no era estadísticamente significativa. En este caso los investigadores recomiendan utilizar la velocidad deseada.

- **Combinación de curvas verticales y horizontales**

El análisis de la combinación de curvas (por ejemplo lugares con curva vertical y horizontal) se inició con el ploteo de la data de velocidades recopilada versus R, 1/R, K y 1/K. Estos ploteos se muestran en la Figura 2.8, Figura 2.9, Figura 2.10 y Figura 2.11, respectivamente. Una evaluación inicial indicó que R y K pueden influenciar a la velocidad a lo largo de la combinación de curvas.

Para curvas verticales convexas sin distancia de visibilidad limitada en combinación con curvas horizontales no arrojó ecuación de regresión estadísticamente significativa. Una de las causas de esto fue que las curvas horizontales tenían radios de curva grandes. Conductores, ante la combinación de una curva horizontal de radio considerable y curva vertical convexa sin distancia de visibilidad limitada, no sentían la necesidad de disminuir su velocidad en respuesta a la geometría. En ese sentido los investigadores analizaron la data tomada en campo y luego de realizar varios análisis

concluyeron que era recomendable utilizar la menor velocidad predicha con las siguientes ecuaciones:

- Máxima velocidad asumida para tramos largos en tangente.
- Velocidad predicha utilizando la ecuación para curva horizontal en pendiente ascendente.
- Velocidad predicha utilizando la ecuación para curva horizontal en pendiente descendente.

Utilizando la menor velocidad, calculada con estas ecuaciones, se asegura que la velocidad pronosticada a lo largo de la combinación horizontal y vertical no sea mayor al caso que la curva horizontal fuera perfecta.

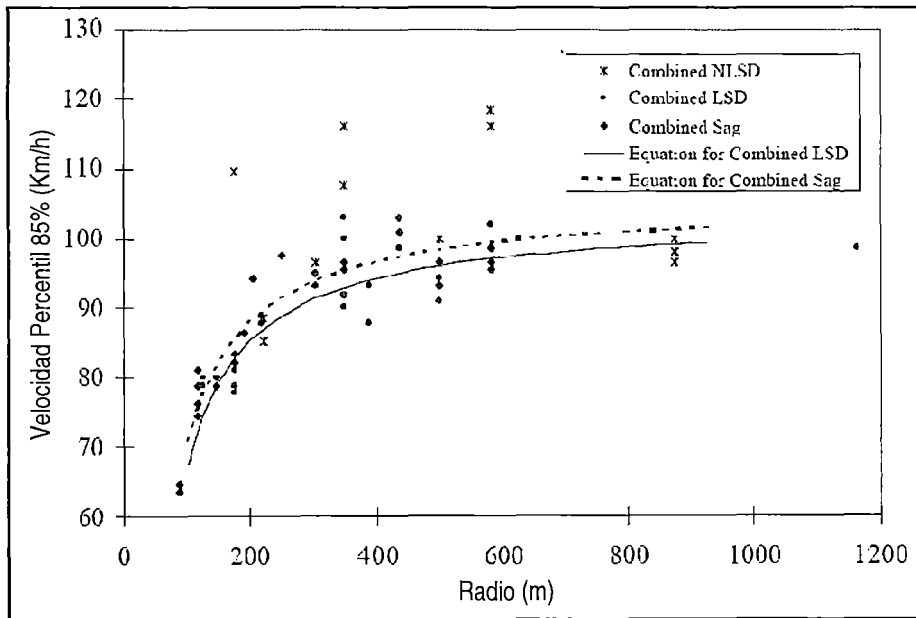


Figura 2.8: Combinación de curvas: V_{85} vs. R (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).

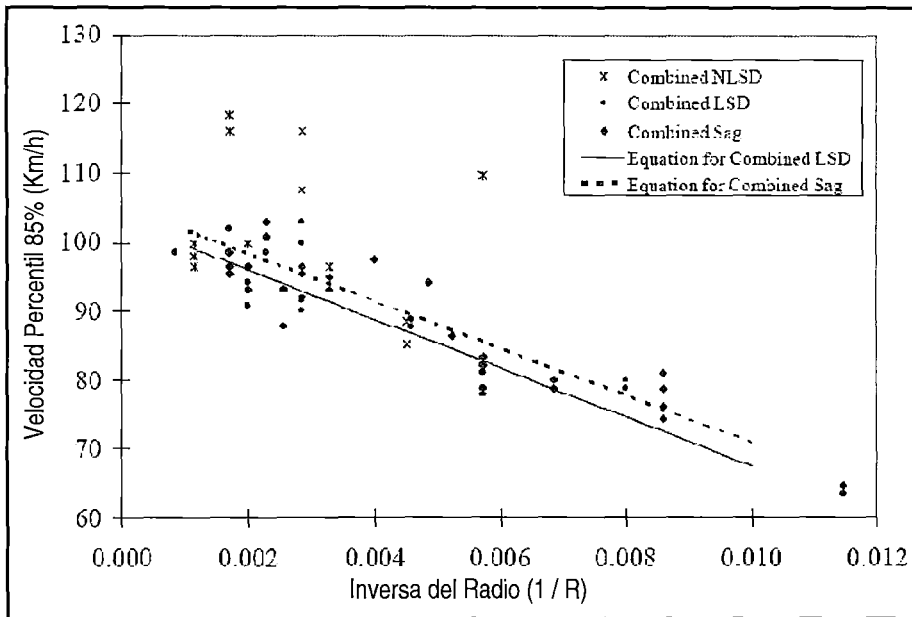


Figura 2.9: Combinación de curvas: V_{85} vs. $1/R$ (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).

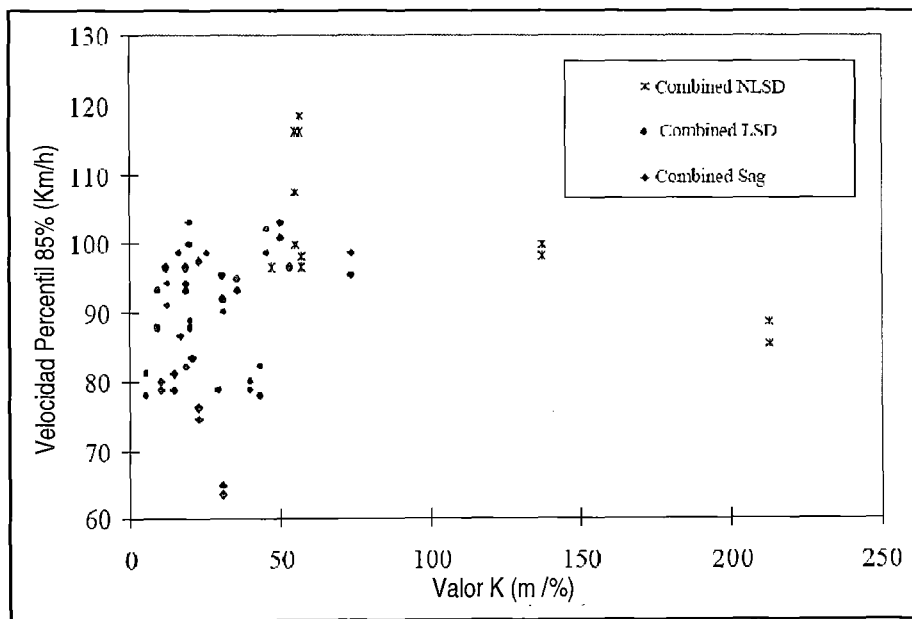


Figura 2.10: Combinación de curvas: V_{85} vs. K (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).

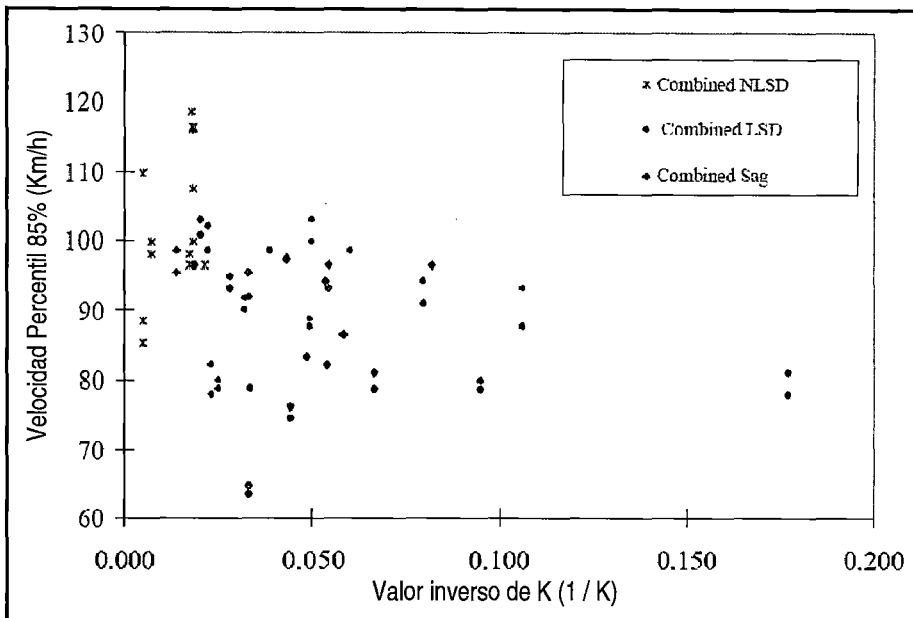


Figura 2.11: Combinación de curvas: V_{85} vs. $1/K$ (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).

Curvas verticales convexas con limitada distancia de visibilidad en combinación con curvas horizontales fueron evaluadas utilizando la data recopilada. Análisis de regresión compararon la influencia de $1/K$, $1/R$ y un término de interacción. El análisis demostró que solo $1/R$ fue significativa en la predicción de V_{85} . La Tabla 2.5 muestra los parámetros estimados para la ecuación de regresión hallada.

Variable Independiente	Estimación de parámetros	p- Valor	Número de sitios	R^2
intercepto	103.24	0.0001	22	0.74
$1/R$	-3576.51	0.0001		

Tabla 2.5: Parámetros estimados para la combinación de curvas horizontales y verticales convexas con limitada distancia de visibilidad (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).

De manera similar, para curvas verticales cóncavas combinadas con curvas horizontales, se realizaron análisis de regresión, los cuales mostraron que la única variable significativa fue $1/R$. La Tabla 2.6 muestra los parámetros estimados de la ecuación de regresión respectiva.

Variable Independiente	Estimación de parámetros	p- Valor	Número de sitios	R ²
intercepto	105.32	0.0001	25	0.92
1/R	-3438.19	0.0001		

Tabla 2.6: Parámetros estimados para la combinación de curvas horizontales y curvas verticales cóncavas (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000).

- **Tangentes**

Uno de los objetivos de la investigación desarrollada por la FHWA que tiene como producto al Report FHWA – RD – 99 – 171, fue la de encontrar ecuaciones de regresión que permitieran predecir la velocidad de operación en tramos en tangente, teniendo como variables a índices de alineamiento definidos en anteriores investigaciones.

Estos índices de alineamiento fueron comparados con la velocidad de operación (V_{85}) en tramos en tangente. Se desarrollaron análisis gráficos y estadísticos para hallar si estos índices eran predictores significativos de la velocidad. Sin embargo, luego de realizar el análisis, los investigadores llegaron a la conclusión de que estos índices de alineamiento no eran significativamente capaces de predecir la velocidad de operación (V_{85}).

De acuerdo con lo anterior, los investigadores establecieron que la velocidad utilizada para elaborar el perfil de velocidad sea la velocidad deseada la cual es igual a la velocidad observada en tramos rectos en tangente. De acuerdo a la base de datos recopilados en la investigación, esta velocidad es aproximadamente igual a 100 Km/h. En el caso del Perú esta velocidad podría ser demasiado alta ya que nuestra geografía lo impide en muchas partes del territorio peruano, sin embargo es posible asumir dicha velocidad en lugares donde se tenga una velocidad de diseño alta (carreteras en terreno llano o levemente ondulado).

2.1.2 Algoritmo para el Cálculo del Perfil de Velocidades de Operación (V_{85}) con el software IHSDM

A continuación se describe el procedimiento usado por el Módulo Análisis de Consistencia para el cálculo del perfil de velocidades utilizando la información geométrica de la vía, como curvas y tramos rectos en planta y perfil. Además, es necesario indicar el valor de la velocidad de diseño, velocidad de operación o velocidad deseada, velocidad de inicio del análisis y velocidad final del análisis.

Debido a que la mayoría de software de diseño geométrico tienen mayor facilidad de exportar los datos a Excel, es posible generar la data necesaria en una hoja Excel para luego copiarla en las Tablas del software donde se ingresa toda esta data.

La Figura 2.12 muestra un diagrama de flujo que menciona los principales procedimientos que se siguen para el análisis de consistencia de una vía con el Módulo Análisis de Consistencia del software IHSDM.

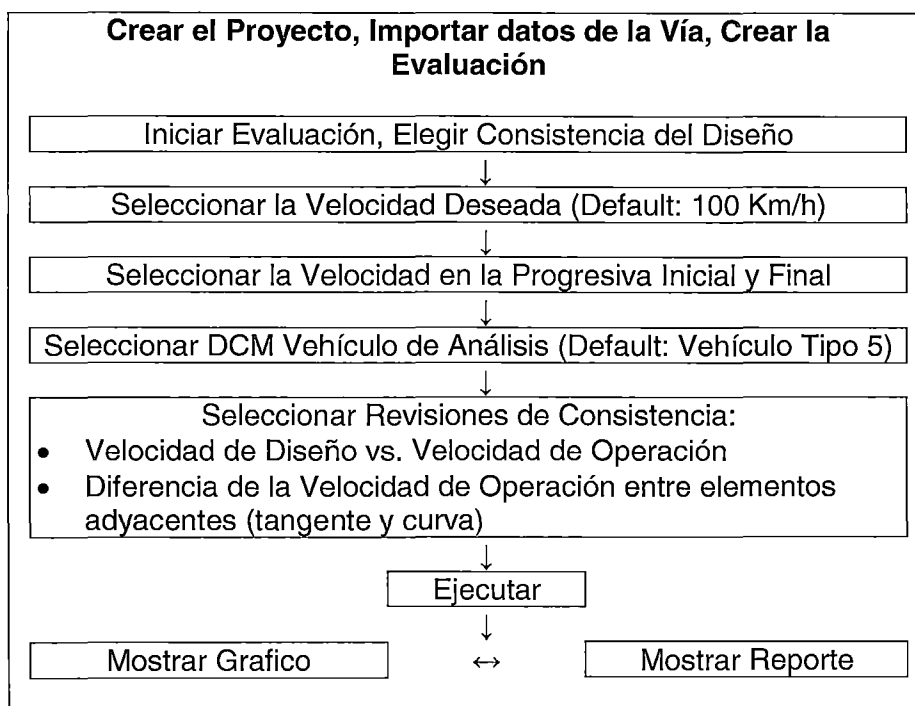


Figura 2.12: Diagrama de flujo del procedimiento utilizado por el Módulo Análisis de Consistencia.

El Módulo Análisis de Consistencia evalúa la consistencia de la velocidad de operación en vías rurales de dos carriles. El primer paso en este proceso es la de estimar la velocidad percentil 85% (V_{85}) a lo largo del tramo de análisis para un tipo de vehículo dado.

Los pasos seguidos para la obtención del perfil de velocidades, el cual nos permitirá el análisis de consistencia de la vía, son los siguientes:

- A. Seleccionar la velocidad de operación para el alineamiento
- B. Predecir la velocidad para cada curva
- C. Predecir el límite de velocidad en pendiente haciendo uso de las ecuaciones del modelo de tráfico TWOPAS
- D. Seleccionar la menor velocidad para cada elemento a lo largo del alineamiento
- E. Ajustar las velocidades debido a las aceleraciones y desaceleraciones
- F. Llevar a cabo la evaluación de la consistencia del diseño

La Figura 2.13 muestra la relación de los pasos seguidos para el cálculo del perfil de velocidades y la aplicación del análisis de consistencia del diseño.

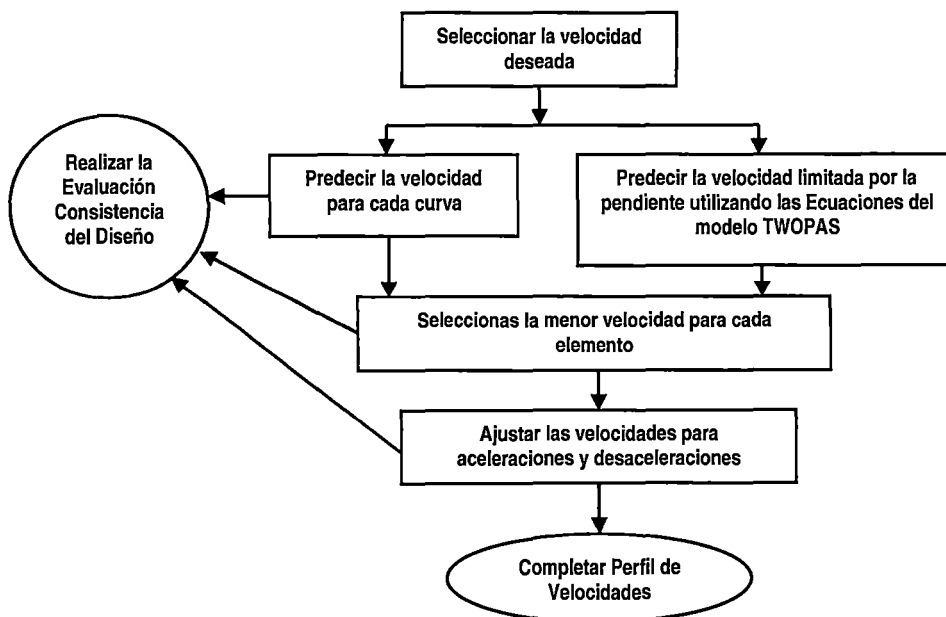


Figura 2.13: Diagrama de flujo de la evaluación de la consistencia del diseño y Modelo del Perfil de Velocidades (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)

A. Seleccionar la Velocidad Deseada

El paso inicial es seleccionar la velocidad deseada a lo largo de la vía. La velocidad deseada es la velocidad seleccionada por el conductor, cuando el alineamiento horizontal o vertical no lo obligan a tomar esa velocidad. La velocidad deseada para un conductor no puede ser medida, sin embargo, la velocidad observada en una tangente, más allá de la influencia del alineamiento horizontal o vertical, puede ser tomado como la velocidad deseada. Debido a que los estudios fueron realizados en los Estados Unidos, esta velocidad deseada es aproximadamente 100 Km/h la cual es representativa para tangentes largas, se entiende por tangente larga a la tangente donde es posible acelerar y mantener esa velocidad por una parte del tramo. Este valor también puede ser estimado realizando mediciones en la vía a analizar, sin embargo en el país no es práctica común realizar estas mediciones por lo que no se cuenta con datos de este tipo.

B. Predecir la velocidad para cada curva utilizando las ecuaciones desarrolladas

Utilizando las ecuaciones desarrolladas por la FHWA, las cuales se describieron en el ítem 2.1.1, se calculan las velocidades de operación para cada una de las curvas dentro del tramo de aplicación. Estas ecuaciones o modelos se resumen en la Tabla 2.7.

La Figura 2.14 muestra un diagrama de flujo que ayuda al cálculo de la velocidad de operación partiendo de los datos geométricos característicos del tramo de aplicación. Estas características o datos de la vía se encuentran en la cabeza del diagrama de flujo, entre ellos se encuentran al PC, PT, radio, pendiente, VPC, VPT, etc. Esta información sirve para definir cuál de las tres grandes categorías será la aplicable, estas tres categorías son: curva horizontal, curva vertical y tramo en tangente.

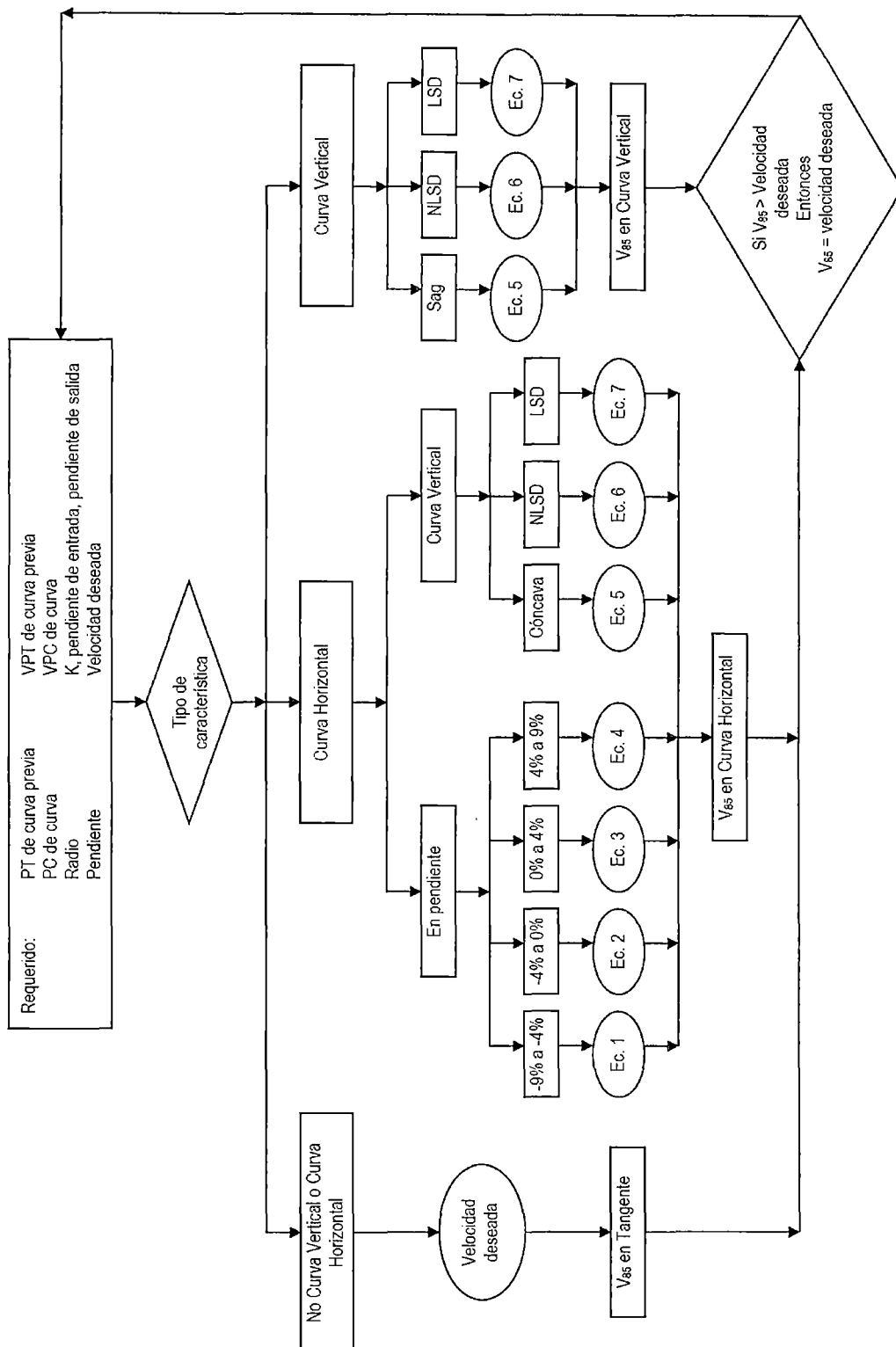


Figura 2.14: Diagrama de flujo para el cálculo de la velocidad de operación V_{85}
(Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)

ACEc. Nº (1)	Condición de alineamiento	Ecuación ⁽²⁾	Nº de Observ.	R ²	MSE
1.	Curva Horizontal en pendiente: -9% ≤ G < -4%	$V_{85} = 120.10 - \frac{3077.13}{R}$	21	0.58	51.95
2.	Curva Horizontal en pendiente: -4% ≤ G < 0%	$V_{85} = 105.98 - \frac{3709.90}{R}$	25	0.76	28.46
3.	Curva Horizontal en pendiente: 0% ≤ G < 4%	$V_{85} = 104.82 - \frac{3574.51}{R}$	25	0.76	24.34
4.	Curva Horizontal en pendiente: 4% ≤ G < 9%	$V_{85} = 96.61 - \frac{2752.19}{R}$	23	0.53	52.54
5.	Curva Horizontal combinada con Curva Vertical Cóncava	$V_{85} = 105.32 - \frac{3438.19}{R}$	25	0.92	10.47
6.	Curva Horizontal combinada con Curva Vertical Convexa sin distancia de visibilidad limitada	(Ver nota 3)	13	n/a	n/a
7.	Curva Horizontal combinada con Curva Vertical Convexa con distancia de visibilidad limitada (Ejemplo, K ≤ 43 m/%)	$V_{85} = 103.24 - \frac{3576.51}{R}$ (ver nota 4)	22	0.74	20.06
8.	Curva Vertical Cóncava en Tangente Horizontal	V ₈₅ = velocidad deseada asumida	7	n/a	n/a
9.	Curva Vertical Convexa sin distancia de visibilidad limitada (K > 43m%) en Tangente Horizontal	V ₈₅ = velocidad deseada asumida	6	n/a	n/a
10.	Curva Vertical Convexa con distancia de visibilidad limitada (K > 43m%) en Tangente Horizontal	$V_{85} = 105.08 - \frac{149.69}{K}$	9	0.60	31.10

Notas:
 1. AC Ec. N° = Número de ecuación de acuerdo a la condición de alineamiento
 2. Donde: V₈₅ = Velocidad percentil 85% de vehículo de pasajeros (km/h) K = grado de curva vertical
 R = radio de la curva (m) G = Pendiente (%)

3. Usar la menor velocidad de las velocidades previstas con AC EQ N° 1 o 2 (para pendientes descendentes) y AC EQ N° 3 o 4 (para pendientes ascendentes).
 4. Además, revisar la velocidad prevista con AC EQ N° 1 o 2 (para pendientes descendentes) y AC EQ N° 3 o 4 (para pendientes ascendentes) y usar la menor velocidad. Esto asegurará que la velocidad prevista a lo largo de la curva combinada no sea mejor que si solo la curva horizontal estuviese presente (Ejm. Que la inclusión de una curva vertical convexa de limitada distancia de visibilidad resulte en una mayor velocidad)

Tabla 2.7: Ecuaciones de predicción de velocidad (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)

C. Predecir el límite de velocidad en pendiente haciendo uso de las ecuaciones del modelo de tráfico TWOPAS

El modelo de tráfico TWOPAS se encarga de modelar el efecto que tiene la pendiente de una vía sobre la velocidad de autos particulares, buses o camiones. Las velocidades calculadas de esta manera pueden servir como

limitante de la velocidad en tangentes, calculadas como V_{85} para tangentes largas en terreno llano. Por ejemplo, para el caso estadounidense la velocidad V_{85} para tangentes en terreno llano es de 100 Km/h. Sin embargo, si se tratara de una tangente en pendiente ascendente, la velocidad de este camión sería de 82 Km/h, limitando así el valor de la velocidad a 82 Km/h y no 100 Km/h. De esta misma forma puede manejarse para el caso de curvas horizontales que se encuentren en pendientes.

El modelo TOWPAS grafica un perfil de velocidades basado en las características de los tipos de vehículos y la pendiente por la cual estos transitan, de este modo el análisis consta de tres perfiles de velocidad. El primer perfil es calculado con las ecuaciones de predicción de velocidad antes mencionadas, el segundo perfil es el correspondiente a la velocidad deseada y el último es el calculado por el modelo TWOPAS.

La Figura 2.15 muestra a los tres perfiles de velocidad antes mencionados, es menor valor de velocidad para cada uno de estos perfiles será la velocidad de operación del vehículo en ese punto.

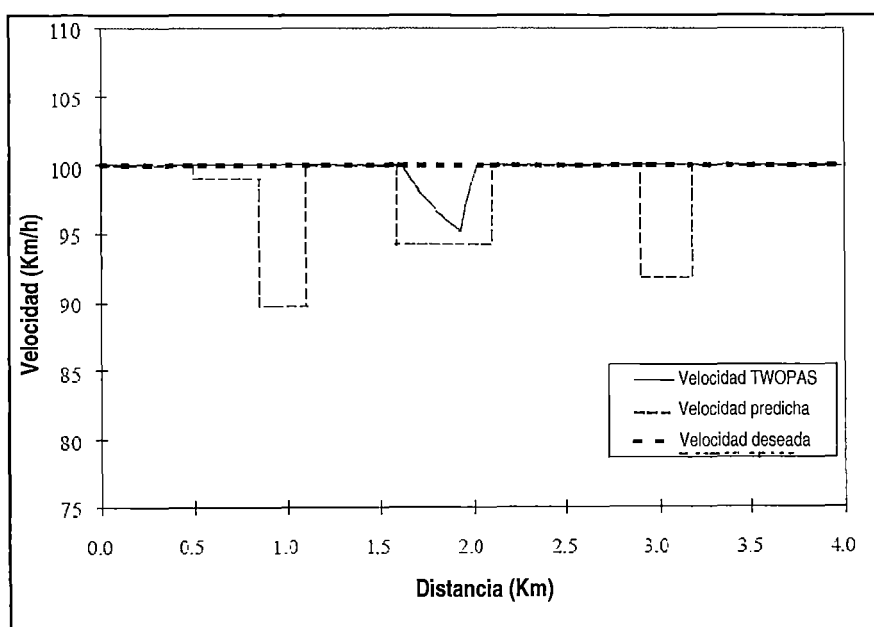


Figura 2.15: Perfiles de velocidad obtenidos (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)

- **Ecuaciones Vehículo – Rendimiento para buses y autos de pasajeros**

Investigaciones realizadas en los Estados Unidos por St. Jhon y Kobett, muestran que el ritmo de aceleración de estos dos tipos de vehículos varia linealmente, pero de forma inversa con la velocidad. Es así que se tiene la siguiente ecuación:

$$a = a_o \left(1 - \frac{V}{V_m} \right) \quad (2.1)$$

Donde:

a = capacidad de aceleración del vehículo (ft/s² [9.81 m/s²]) a la velocidad V .

a_o = máxima aceleración (ft/s²) a la velocidad cero.

V = velocidad actual (ft/s)

V_m = máxima velocidad (ft/s) sostenida por el vehículo en terreno llano.

A esta ecuación se le adicione un componente más, que toma en cuenta la pendiente por la cual transita el vehículo, quedando la ecuación de la siguiente forma.

$$a = a_o \left(1 - \frac{V}{V_m} \right) - g \times G \quad (2.2)$$

Donde:

g = aceleración debido a la gravedad (32.17 ft/s²)

G = gradiente expresado como fracción decimal [9.81m/s] (Es decir, porcentaje de pendiente dividido por 100; + para pendiente ascendente, - para pendiente descendente).

La Figura 2.16 muestra una curva de desempeño para un vehículo de ciertas características, en este caso para un vehículo tipo 9. Como se aprecia, la aceleración máxima se logra cuando la velocidad del vehículo es cero, es decir cuando este inicia su movimiento. De manera análoga, la máxima velocidad del vehículo se da cuando la aceleración es cero, es decir el vehículo mantiene la máxima velocidad constante.

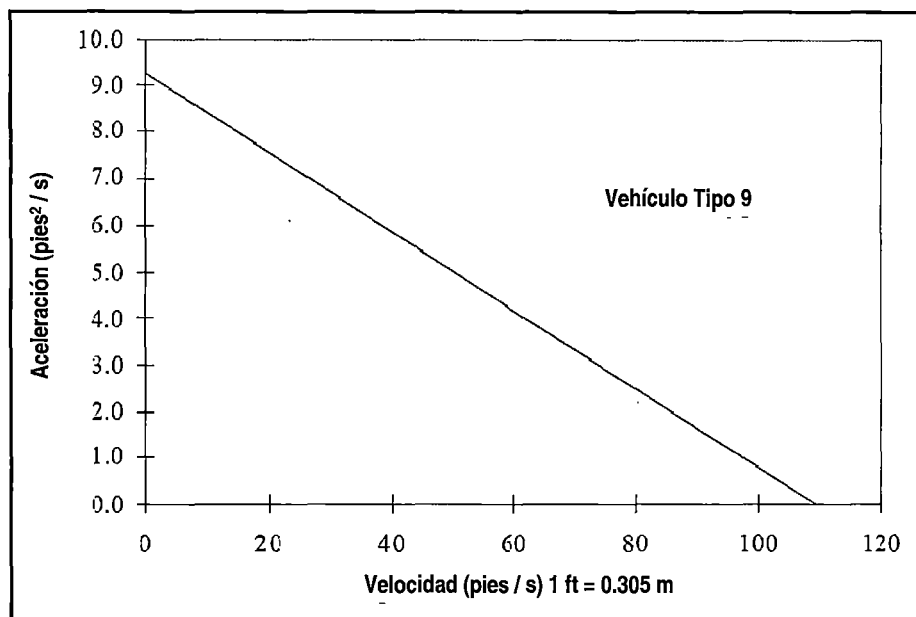


Figura 2.16: Ejemplo de curva de desempeño de un vehículo de pasajeros
(Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)

Finalmente, estudios anteriores mostraron que los conductores no sostenían la máxima capacidad de aceleración de sus vehículos durante un periodo de tiempo. Los conductores generalmente utilizaban el 73% de la capacidad máxima de aceleración y la gran mayoría no superaba el 90% de la velocidad máxima admitida por sus vehículos.

Teniendo en consideración al párrafo precedente, se tiene que la ecuación 2.2 queda de la siguiente manera:

$$a = 0.73 \times a_o \left(1 - \frac{V}{0.90 \times V_m} \right) - g \times G \quad (2.3)$$

Una aceleración y comportamiento de la velocidad más realista es calculada por el modelo TWOPAS con un algoritmo basado en el uso de una y otra ecuación, según el siguiente algoritmo: si “a” en la ecuación 2.3 es menor o igual a cero, entonces el vehículo está restringido a esa aceleración; sin embargo, cuando “a” en la ecuación 2.13 es positivo, entonces el conductor usará la mayor aceleración representada por el valor de “a” en la ecuación 2.2.

El algoritmo descrito es aplicado secuencialmente sobre un intervalo de un segundo. El valor de aceleración “a”, resultado del algoritmo, representa el máximo ritmo de aceleración que será usado durante cada intervalo de un segundo. Donde la aceleración “a” sea negativa, representara el máximo ritmo de desaceleración que el vehículo pueda usar sobre un intervalo de un segundo. Donde la aceleración “a” sea positiva, representara el más largo ritmo de desaceleración que el vehículo pueda usar sobre un intervalo de un segundo.

Una investigación encontró que incluso cuando los conductores no están limitados por el rendimiento del vehículo, el ritmo de aceleración preferido por los conductores estará limitado como una función de la diferencia entre la velocidad actual del conductor y la velocidad deseada. Estas preferencias generalmente entran a tallar solo cuando el ritmo de aceleración que se necesitaría ser usado por el conductor en retornar a la velocidad deseada excede el valor de 1.2 ft/s² (0.4 m/s²). Las siguientes tres ecuaciones representan limitaciones sobre la nueva velocidad basada sobre la máxima aceleración o desaceleración preferida por los conductores para los siguientes tres casos específicos:

Si $|V_d - V| \leq 1.2$ entonces,

$$V_n = V_d \quad (2.4)$$

Si $|V_d - V| > 1.2$ y $V_d - V > 0$ entonces,

$$V_n = V + (1.2 + 0.108 \times |V_d - V|) \times t \quad (2.5)$$

Si $|V_d - V| > 1.2$ y $V_d - V < 0$ entonces,

$$V_n = V - 1.2 \times t \quad (2.6)$$

Donde: V_d = velocidad deseada por el conductor (ft/s)

Si la nueva velocidad basada en las ecuaciones (2.4), (2.5), o (2.6), como sea apropiado, es menor que la nueva velocidad basada en las ecuaciones (2.1), (2.2) o (2.3), entonces la menor velocidad basada en las ecuaciones (2.4), (2.5), o (2.6) gobernará. Preferencia por la máxima aceleración generalmente gobierna

las elecciones de velocidad en terreno plano, en pendiente descendente, y en pendiente levemente ascendente, pero no en pendientes ascendentes altas.

Una vez conocida la velocidad al final del intervalo de un segundo, la aceleración durante el intervalo y la posición al final de este, puede ser calculado basándose en relaciones cinemáticas simples como:

$$a = \frac{V_n - V}{t} \quad (2.7)$$

$$X_n = X_o + V \times t + 0.5 \times a \times t^2 \quad (2.8)$$

Donde:

X_n = posición al final del intervalo de tiempo "t"

X_o = posición al inicio del intervalo de tiempo "t"

El algoritmo presentado arriba, representado por las ecuaciones (2.1) al (2.8), puede ser aplicado para determinar la máxima velocidad de un vehículo de pasajeros viajando a través de cualquier secuencia de pendientes especificada, dando una velocidad inicial del vehículo, al inicio de la sección. Estas ecuaciones son aplicadas interactivamente en intervalos de un segundo de modo que la velocidad calculada para el final de un intervalo vendrá a ser la velocidad inicial del intervalo siguiente.

La Tabla 2.8, muestra las características principales de varios tipos de vehículos utilizados por el modelo TWOPAS.

TIPO DE VEHICULO ^a	MAXIMA ACCELERACION (ft/s ²) ^b	MAXIMA VELOCIDAD (ft/s) ^c	PORCENTAJE DE LA POBLACION DE AUTOS DE PASAJEROS (%)	RENDIMINETO DE LOS AUTOS DE PASAJEROS
9	9.28	109.1	10	El más bajo
10	9.77	114.9	15	
11	10.09	118.7	20	
12	10.43	122.7	25	
13	11.20	131.8	30	El más alto

^a Identificador del tipo de vehiculo usado en TWOPAS.
^b Máxima aceleración a la velocidad cero en pendiente llana utilizando la mayor cantidad de caballos de fuerza disponible.
^c Máxima velocidad en pendiente llana utilizando la mayor cantidad de caballos de fuerza disponible.

Tabla 2.8: Características de rendimiento de vehículos de pasajeros (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)

La Figura 2.17, muestra la curva de velocidad versus posición de un vehículo tipo 11, nomenclatura dada en la Tabla 2.8, en pendiente ascendente de 5%. Como se puede observar, la velocidad va decreciendo hasta que el vehículo alcanza su velocidad más lenta de ascenso, la cual es mantenida mientras continua su ascenso.

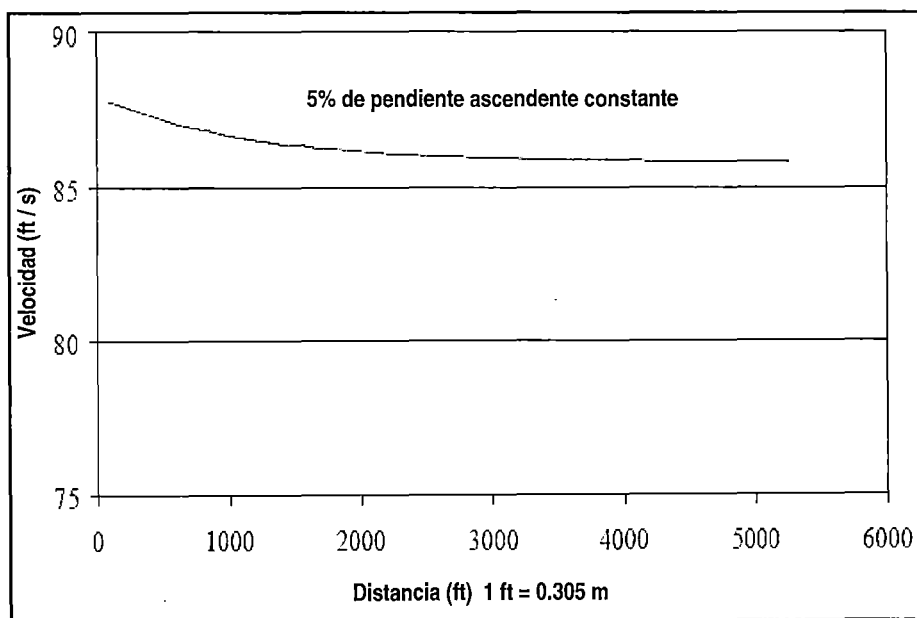


Figura 2.17: Vehículo tipo 11 en pendiente ascendente constante de 5% (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)

La Tabla 2.9, enlista los pasos seguidos para calcular el perfil de velocidad utilizando el modelo TWOPAS. En base a esta Tabla se ejecuta un ejemplo numérico líneas abajo.

COLUMNA	VALOR
(1)	Tiempo Transcurrido (s)
(2)	Velocidad deseada del conductor (ft/s). V_d .
(3)	Velocidad del vehículo (ft/s) al empezar el intervalo de 1 s, V .
(4)	Posición del vehículo al empezar del intervalo de 1 s.
(5)	Pendiente local (%)
(6)	Aceleración (ft/s ²) como la limitada por el rendimiento del vehículo sin restricción del conductor, "a" en la ecuación (2.2)
(7)	Aceleración (ft/s ²) como limitado por el rendimiento del vehículo con restricción del conductor, "a" en la ecuación (2.3)
(8)	Aceleración neta basada en los límites del rendimiento del vehículo. Si la columna (7) es menos que o igual a cero, use la columna (7), de lo contrario use la columna (6).
(9)	Velocidad (ft/s) al final del intervalo de 1 s como limitada por el rendimiento del vehículo, basado en la ecuación (2.4)
(10)	Velocidad (ft/s) al final del intervalo de 1 s basado en las ecuaciones (2.5), (2.6), o (2.7), según sea apropiado.
(11)	Variación de aceleración sobre el intervalo de 1 s basado en la diferencia entre la velocidad mostrada en la columna (3) y la velocidad mostrada en la columna (10).
(12)	Aceleración actual (ft/s ²) sobre el intervalo de 1 s basado en la diferencia entre la velocidad mostrada en la columna (3) y la velocidad mostrada en la columna (13). Esto representa el cambio más crítico de aceleración mostrado en las columnas (8) y (11).
(13)	Velocidad (ft/s) al final del intervalo de 1 s. Basado en la más baja velocidad en las columnas (9) y (10).
(14)	Nueva posición (ft) al final del intervalo de 1 s, basado en la ecuación (2.9).

Tabla 2.9: Pasos seguidos por el modelo TWOPAS para el cálculo del perfil de velocidades (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)

La Tabla 2.10, muestra la forma de cálculo realizado por el modelo TWOPAS para modelar la variación de la velocidad de un vehículo tipo 11 cuando este se encuentra subiendo una pendiente uniforme de 5% y que luego es seguida por una pendiente de 0%. Esta Tabla fue desarrollada en base a los pasos enlistados en la Tabla 2.9.

(1) lapso de tiempo	(2) Velocidad deseada	Inicio del intervalo de 1 s		(5) Pendiente local (%)	Aceleracion limitada (ft/s ²)			(9) Nueva velocidad basada en el rendimiento del vehiculo	Limitada aceleracion y velocidad basada en preferencias del conductor		(12) Aceleracion actual (ft/s ²)	Fin del intervalo de 1 s	
		(3) Velocidad (ft/s)	(4) Posicion (ft)		(6) Sin restriccion del conductor	(7) Con restriccion del conductor	(8) Neta		(10) Velocidad (ft/s ²)	(11) Aceleracion (ft/s ²)		(13) nueva velocidad (ft/s)	(14) Nueva posicion (ft)
0	88.00	88.00	0.00	5.00	1.00	-0.17	-0.17	88.80	88.00	0.00	-0.17	87.80	87.90
1	88.00	87.70	87.80	5.00	1.02	-0.16	-0.16	87.70	88.00	0.17	-0.16	87.70	175.70
2	88.00	87.40	175.40	5.00	1.03	-0.14	-0.14	87.50	88.00	0.32	-0.14	87.50	263.30
3	88.00	87.10	262.70	5.00	1.04	-0.13	-0.13	87.40	88.00	0.47	-0.13	87.40	356.70
4	88.00	86.90	349.70	5.00	1.05	-0.12	-0.12	87.30	88.00	0.60	-0.12	87.30	438.10
5	88.00	86.60	436.40	5.00	1.06	-0.11	-0.11	87.20	88.00	0.72	-0.11	87.20	525.10
6	88.00	86.40	523.00	5.00	1.07	-0.10	-0.10	87.10	88.00	0.83	-0.10	87.10	612.40
7	88.00	86.20	609.30	5.00	1.08	-0.10	-0.10	87.00	88.00	0.94	-0.10	87.00	699.40
8	88.00	86.00	695.40	5.00	1.09	-0.09	-0.09	86.90	88.00	1.03	-0.09	86.90	786.40
9	88.00	85.90	781.40	5.00	1.10	-0.08	-0.08	86.80	88.00	1.12	-0.08	86.80	873.20
49	88.00	85.80	4231.50	5.00	1.18	-0.01	-0.01	85.80	87.30	1.43	-0.01	85.80	4317.30
50	88.00	85.80	4317.30	5.00	1.18	-0.01	-0.01	85.80	87.30	1.43	-0.01	85.80	4403.20
51	88.00	85.80	4403.20	5.00	1.18	-0.01	-0.01	85.80	87.30	1.43	-0.01	85.80	4489.00
52	88.00	85.80	4489.00	0.00	2.79	1.61	2.79	88.60	87.30	1.43	1.43	87.30	4575.60
53	88.00	87.30	4575.60	0.00	2.67	1.50	2.67	89.90	88.00	0.73	0.73	88.80	4663.20
54	88.00	88.00	4663.20	0.00	2.61	1.44	2.61	90.60	88.00	0.00	0.00	88.00	4751.20
55	88.00	88.00	4751.20	0.00	2.61	1.44	2.61	90.60	88.00	0.00	0.00	88.00	4834.20
56	88.00	88.00	4837.20	0.00	2.61	1.44	2.61	90.60	88.00	0.00	0.00	88.00	4927.20

Tabla 2.10: Ejemplo de cálculo del perfil de velocidades para un vehículo tipo 11 en pendiente ascendente constante de 5% seguida por una pendiente de 0% (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)

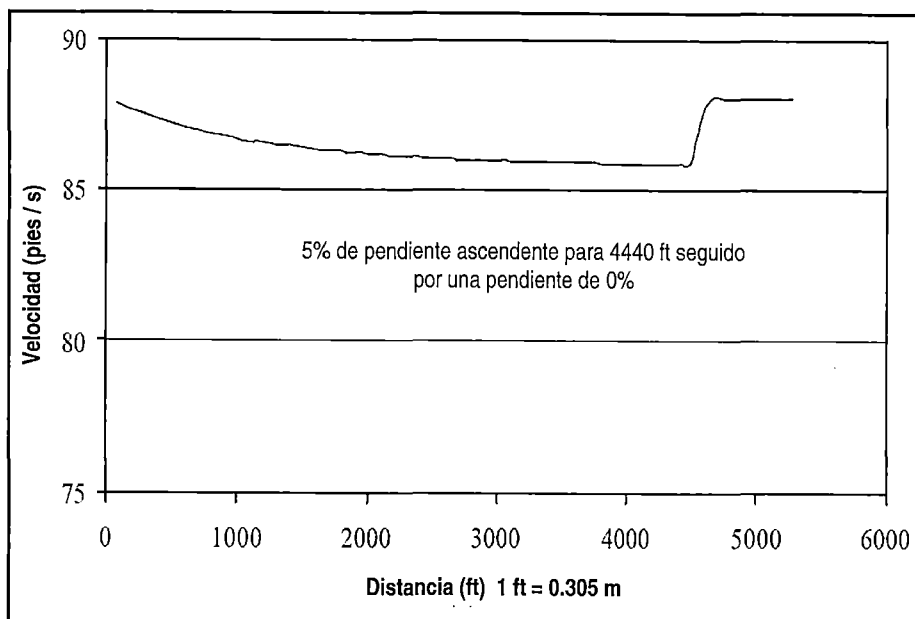


Figura 2.18: Vehículo tipo 11 en pendiente ascendente constante de 5% seguido de una pendiente 0% (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)

De esta misma manera se puede calcular el perfil de velocidades, utilizando el modelo TWOPAS, para vehículos recreacionales de pasajeros. Para esto se debe tener en cuenta las características de rendimiento de este tipo de vehículos. La Tabla 2.11, muestra dichas características.

Tipo de Vehículo ^a	Máxima aceleración (ft/s ²) ^b	Máxima velocidad (ft/s) ^c	Porcentaje de la población de autos de pasajeros (%)	Rendimiento de vehículo recreacional
5	8.22	78.7	1.2	El más bajo
6	8.64	89.7	48.8	
7	8.75	96.0	48.8	
8	8.76	97.5	1.2	El más alto
^a Identificador del tipo de vehículo usado en TWOPAS. ^b Máxima aceleración a la velocidad cero en pendiente llana utilizando la mayor cantidad de caballos de fuerza disponible. ^c Máxima velocidad en pendiente llana utilizando la mayor cantidad de caballos de fuerza disponible.				

Tabla 2.11: Características de rendimiento de vehículos recreacionales de pasajeros (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)

• **Ecuaciones Vehículo – Rendimiento para Camiones**

El cálculo del perfil de velocidad aplicando el modelo TWOPAS para el caso de camiones es de manera similar a la explicada anteriormente. Sin embargo, el modelamiento del desempeño vehicular para camiones, requiere diferentes ecuaciones de desempeño porque características adicionales del vehículo entran en juego. Las ecuaciones que rigen este modelamiento son las siguientes:

$$a_c = -0.2445 - 0.0004 \times V' - \frac{0.021 \times C_{de} (V')^2}{(W/A)} - \frac{222.6 \times C_{pe}}{(W/NHP)(V')^2} - g \times G \quad (2.9)$$

$$a_p = \frac{a_c + \frac{15368 \times C_{pe}}{(W/NHP) \times V'}}{1 + \frac{14080}{(W/NHP)(V')^2}} \quad (2.10)$$

$$a_e = \frac{0.4 \times V' \times a_p}{0.4 \times V' + \frac{1.5 \times a_p}{|a_p|} \times (a_p - a_c)}, \quad V \geq 10 \text{ ft/s} \quad (2.11)$$

$$a_e = \frac{10 \times a_p}{10 + \frac{1.5 \times a_p}{|a_p|} \times (a_p - a_c)}, \quad V < 10 \text{ ft/s} \quad (2.12)$$

Donde:

a_c = aceleración durante los cambios de marcha sin influencia del motor (pie/s²)

a_p = aceleración limitada por los caballos de fuerza del vehículo (pie/s²)

a_e = aceleración efectiva (ft/s²), incluyendo una asignación de 1,5 s por los retrasos en los cambio de marchas

V' = mayor velocidad al inicio del intervalo (V) y 10 ft / s

C_{de} = factor de corrección para convertir la resistencia aerodinámica en el nivel del mar a la elevación local = $(1 - 0.00006887E)^{4.255}$

C_{pe} = factor de corrección de la potencia neta en el nivel del mar a una elevación local, es igual a $1 - 0.00004E$ para los motores de gasolina y 1 para los motores diesel

E = elevación local (ft)

W/A = peso por las proyecciones de la relación del área frontal (lb/ft²)

W/NHP = peso por variación de potencia neta (lb / hp)

La ecuación 2.9 representa la aceleración del camión sin influencia del motor. La ecuación 2.10 representa la aceleración limitada por el caballaje del motor. Las ecuaciones 2.11 y 2.12, combinan la aceleración sin influencia del motor y la aceleración limitada por el caballaje del motor en una aceleración efectiva que permite utilizar al camión su máxima potencia excepto durante cambios de marcha retrasados de 1.5 segundos, durante el cual el camión “navega” (sin poder suministrado por el motor). Este modelo de rendimiento del camión está basado en la Sociedad de Ingenieros Automotores (SAE).

La Tabla 2.12 muestra diversos parámetros para diferentes tipos de camión en los EE. UU. Estos parámetros son utilizados para evaluar las ecuaciones anteriormente descritas y así calcular el perfil de velocidad correspondiente.

Tipo de vehículo ^a	Peso por variación neta de caballos de fuerza (lb/hp)	peso por las proyecciones de la relación del área frontal (lb/ft ²)	Factor corrección del altitud para:		Porcentaje de la población de camiones (%)
			Caballos de fuerza netos	Resistencia aerodinámica	
1	266	620	1.00	0.957	12.0
2	196	420	1.00	0.957	25.6
3	128	284	1.00	0.957	34.0
4	72	158	1.00	0.957	28.4

^a Identificador del tipo de vehículo usado en TWOPAS

Tabla 2.12: Características de rendimiento de camiones en los EE. UU. (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)

La segunda columna de esta Tabla corresponde al valor de la variable W/NHP , la tercera columna corresponde al valor de las variable W/A , la cuarta y quinta columna corresponde a los valores de C_{pe} y C_{de} respectivamente.

Utilizando interactivamente las ecuaciones mencionadas es posible determinar la velocidad del camión al inicio y final de cualquier intervalo de tiempo de un segundo. Por supuesto es necesario ingresar un valor inicial de velocidad y pendiente por el cual se desplaza el camión para que las velocidades siguientes puedan ser calculadas.

En la Figura 2.19 se observa el perfil de velocidad para un camión tipo 3 que circula en un terreno ondulado y por una vía que alterna pendientes ascendentes y descendentes de 2%. Estas pendientes alternadas se encuentran separadas aproximadamente por 760 metros en donde el camión disminuye su velocidad y luego la recupera.

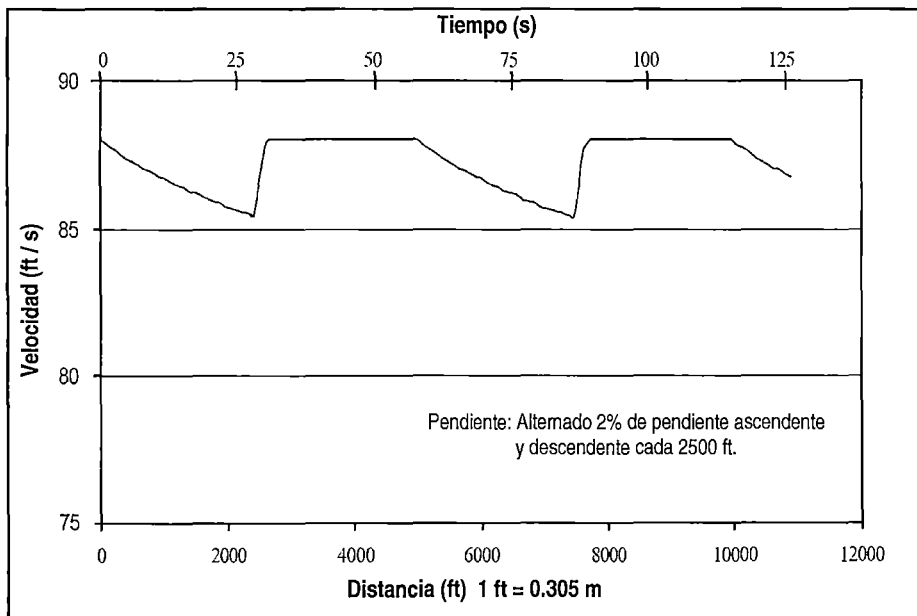


Figura 2.19: Perfil de velocidad de un camión tipo 3 en pendientes alternadas de 2% a cada 760 metros aproximadamente (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)

Como se puede ver, el camión disminuye su velocidad de 88 a 85.5 ft/s (26.8 a 26.1 m/s) en cada 760 metros de pendiente ascendente, pero recupera su velocidad en los 91.4 metros siguientes de pendiente descendente.

Como se puede observar es posible modelar el comportamiento de la velocidad para diferentes tipos de vehículos, entre livianos y pesados. El modelo TWOPAS es utilizado por el modelo IHSDM para el cálculo del perfil de velocidad basado en el desempeño del vehículo frente a pendientes ascendentes y descendentes.

D. Seleccionar la menor velocidad para cada elemento a lo largo del alineamiento

Este paso consiste en seleccionar la menor velocidad en base a los tres perfiles de velocidad calculados. Estos tres perfiles son los siguientes:

1. Perfil de velocidad basado en la velocidad deseada
2. Perfil de velocidad basado en las ecuaciones de predicción de velocidad
3. Perfil de velocidad basado en el modelo TWOPAS

La Figura 2.20 muestra gráficamente a los tres perfiles de velocidad mencionados.

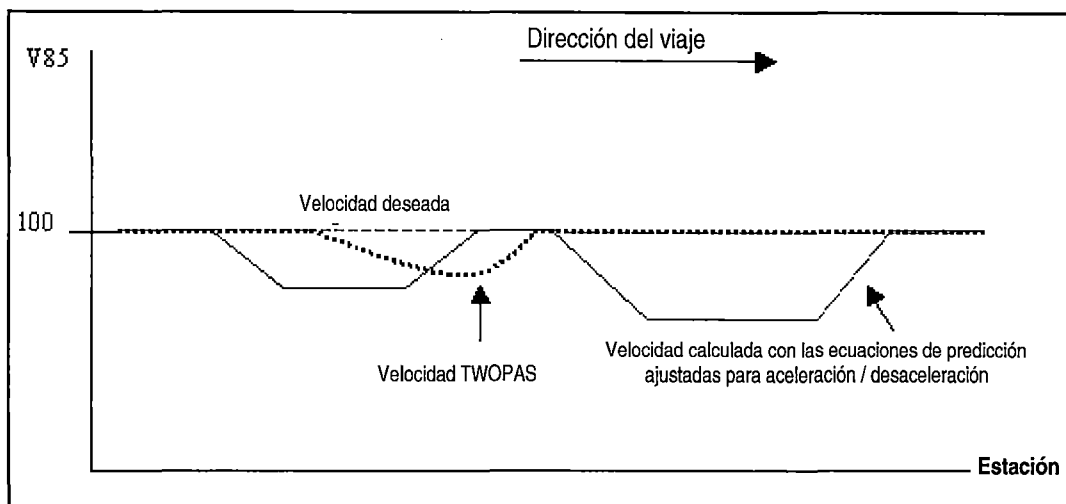


Figura 2.20: Perfiles de velocidad calculados (Design Consistency Module, Engineer's Manual, 2008)

La Figura 2.21 muestra el perfil de velocidad luego de la selección de la menor velocidad producto de la superposición de los tres perfiles de velocidad calculados.

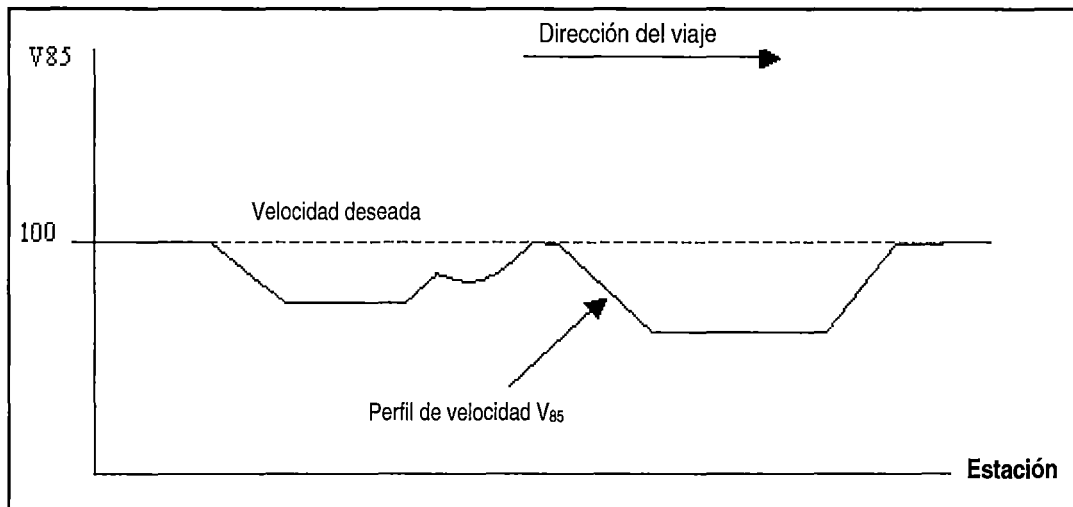


Figura 2.21: Perfil de velocidad luego de la selección de las velocidades menores
(Design Consistency Module, Engineer's Manual, 2008)

E. Ajustar las velocidades debido a las aceleraciones y desaceleraciones

La investigación realizada por la Federal Highway Administration de los EE.UU. también se encargó de desarrollar modelos matemáticos para ajustar el perfil de velocidades debido a las aceleraciones y desaceleraciones efectuadas por los conductores cuando ingresan a una curva y salen de ella. Los valores de aceleración mediante las cuales fueron desarrollados los modelos fueron producto de modelamientos estadísticos de datos tomados en 21 lugares de Texas y Pennsylvania.

Estas aceleraciones fueron calculadas en base a la medición de la velocidad en puntos preestablecidos por los investigadores. En la Figura 2.22, se observa la disposición de estos dispositivos de medición.

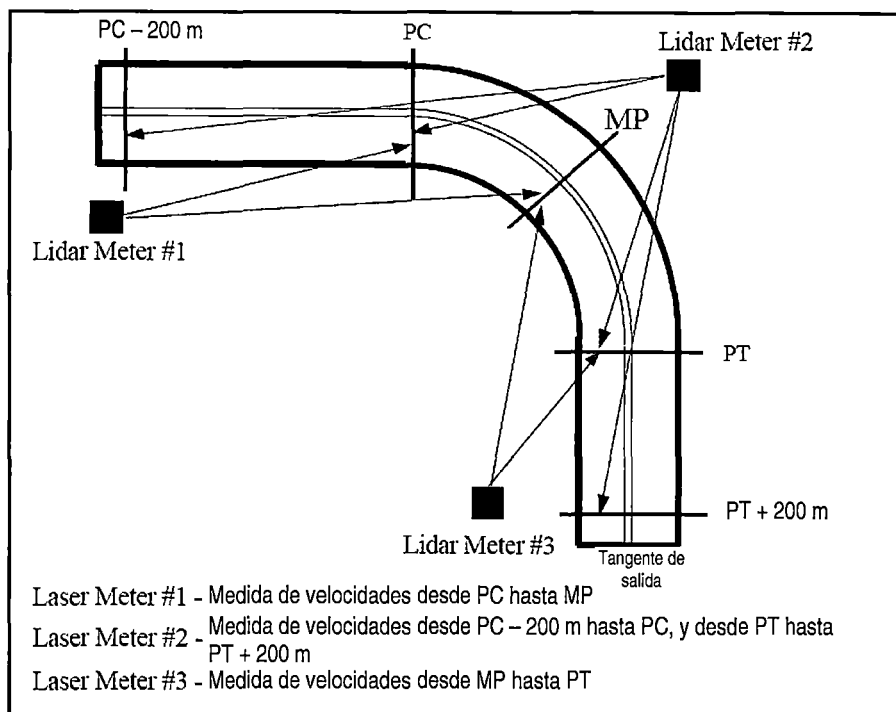


Figura 2.22: Disposición de los dispositivos de medición de velocidad en curva horizontal (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)

Debido a la disposición de los dispositivos de medición de la velocidad, los datos tomados fueron corregidos matemáticamente tomando en cuenta su posición con respecto a la línea de trayectoria de los vehículos.

Con estos datos tomados en campo, los investigadores obtuvieron diversas curvas de velocidad de donde se pudo obtener la variación de la aceleración en diversos puntos de la curva analizada. Luego de estas evaluaciones y ajustes matemáticos, los investigadores obtuvieron las aceleraciones y desaceleraciones para diversas situaciones de alineamiento.

La Tabla 2.13 muestra los valores obtenidos luego del procesamiento y evaluación de los datos tomados en campo.

Ritmo de desaceleración, d (m/s ²)	Condición del alineamiento		Ritmo de aceleración, a (m/s ²)	
Perfil de Velocidad				
Radio, R (m)	d		Radio, R (m)	
R ≥ 436	0.00	1-4	R > 875	
175 ≤ R ≤ 436	0.6794 - 295.14/R		Curva Horizontal en pendiente: -9% ≤ G ≤ 9%	436 < R < 875
R < 175	1.00		250 < R ≤ 436	0.21
			175 < R ≤ 250	0.43
1.00		5	0.54	
(usar tasas para condición de alineamiento 1 al 4)		6	(usar tasas para condición de alineamiento 1 al 4)	
1.00		7	0.54	
n/a		8	n/a	
n/a		9	n/a	
1.00		10	0.54	
Donde: K = tasa de curvatura vertical, G = pendiente (%)				
Consistencia del diseño (Todas las condiciones de alineamiento)				
1.00 a 1.48	Diseño bueno		0.54 a 0.89	
1.48 a 2.00	Diseño regular		0.89 a 1.25	
> 2.00	Diseño pobre		> 1.25	

Tabla 2.13: Valores de aceleración y desaceleración para diferentes condiciones de alineamiento (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)

En el análisis de las aceleraciones y desaceleraciones efectuadas por los conductores se diferencian seis situaciones. Estas seis situaciones se originan debido a que la longitud de la tangente entre curva y curva puede o no ser la suficiente para poder desarrollar la aceleración que nos lleve a alcanzar la velocidad deseada y luego desacelerar lo suficiente hasta alcanzar la velocidad de la curva siguiente.

A continuación se muestran las seis situaciones identificadas por los investigadores de la FHWA.

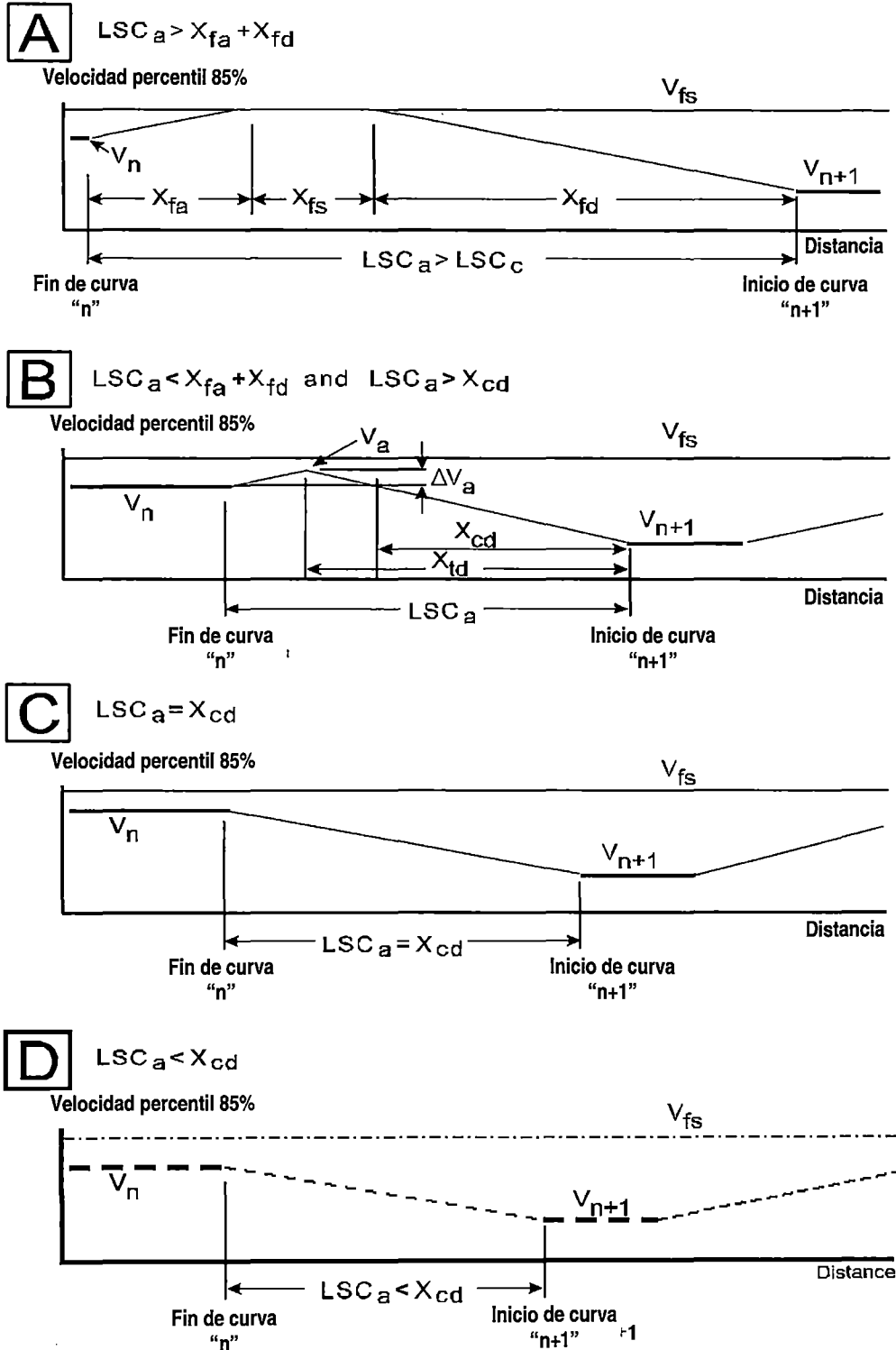


Figura 2.23: Condiciones de aceleración y desaceleración (Report FHWA – RD

– 99 – 171, 2000)

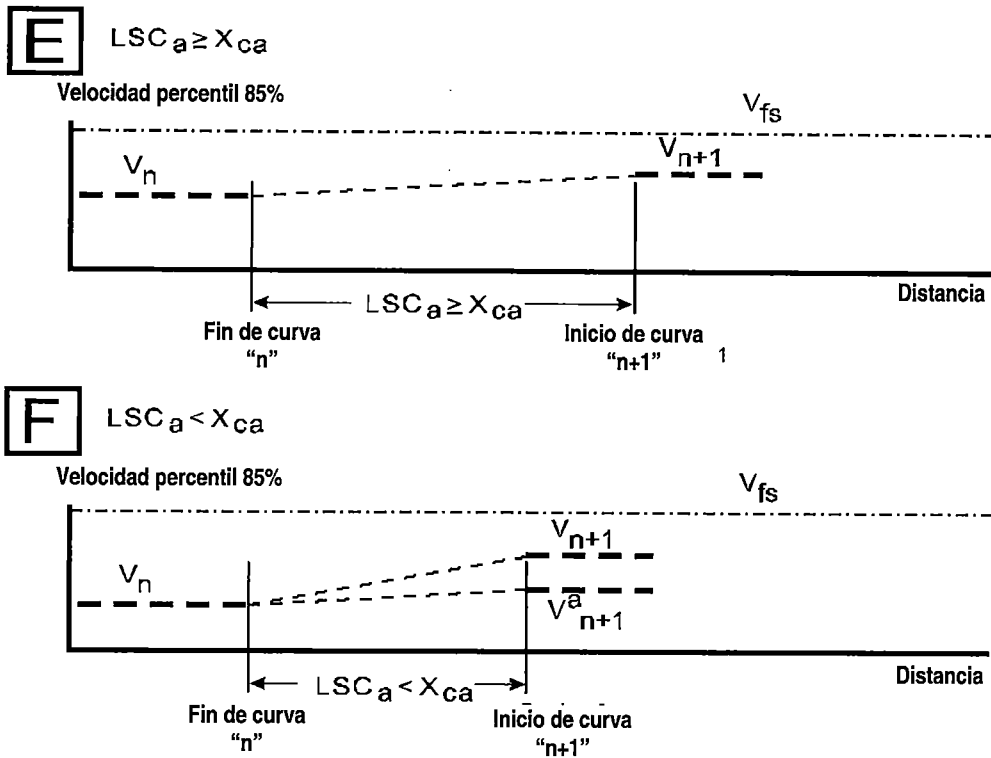


Figura 2.23: (Continuación) Condiciones de aceleración y desaceleración
(Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)

Caso "A":

Este caso es el más ideal, aquí se tiene que la longitud disponible para cambios de velocidad (LSC_a) es mayor que la suma de las longitudes necesarias para desarrollar la aceleración (X_{fa}) y desaceleración (X_{fd}), quedando además una longitud (X_{fs}) donde el vehículo mantiene la velocidad de operación deseada antes de la desaceleración.

Caso "B":

En este caso la longitud disponible para cambios de velocidad (LSC_a) es menor a la suma de las longitudes necesarias para desarrollar la aceleración (X_{fa}) y desaceleración (X_{fd}), pero es mayor que la longitud necesaria para desarrollar la desaceleración desde la velocidad de la curva "n" hasta la velocidad de la curva "n+1" (X_{cd}). En estas condiciones, la aceleración se producirá hasta alcanzar una

velocidad “Va”, que es menor a la deseada, y desde este valor comienza la desaceleración hasta la velocidad de la curva “n+1”.

Caso “C”:

En este caso la longitud disponible para cambios de velocidad (LSC_a) es igual a la longitud necesaria para desarrollar la desaceleración desde la velocidad de la curva “n” hasta la velocidad de la curva “n+1” (X_{cd}).

Caso “D”:

En este caso la longitud disponible para cambios de velocidad (LSC_a) es menor a la necesaria para desarrollar la desaceleración desde la velocidad de la curva “n” hasta la velocidad de la curva “n+1” (X_{cd}). En estas condiciones el software podrá colocar una banderilla en el perfil para indicarle al usuario que una aceleración superior a la deseada se está produciendo entre dos curvas. Esto último no es tan grave debido a que los límites de aceleración de la Tabla 2.13 son aproximaciones y no valores definitivos.

Caso “E”:

En este caso la longitud disponible para cambios de velocidad (LSC_a) es mayor o igual a la longitud necesaria para acelerar desde la velocidad de la curva “n” hasta la velocidad de la curva “n+1” (X_{ca}), esto no representa problema alguno para el afinamiento del perfil de velocidades.

Caso “F”:

En este caso la longitud disponible para cambios de velocidad (LSC_a) es menor a la longitud necesaria para acelerar desde la velocidad de la curva “n” hasta la velocidad de la curva “n+1” (X_{ca}). En estas condiciones la velocidad en la curva “n+1” puede ser ajustada a la velocidad V_{n+1}^a .

Las ecuaciones que gobiernan las diversas variables presentadas en los seis casos anteriores se observan en la Tabla 2.14.

$LSC_c = X_{fa} + X_{fd}$ (1)	$X_{fs} = LSC_a - X_{fd} - X_{fa}$ (6)
$X_{fd} = \frac{V_{fs}^2 - V_{n+1}^2}{25.92d}$ (2)	$X_{td} = \frac{V_a^2 - V_{n+1}^2}{25.92d}$ (7)
$X_{cd} = \frac{V_n^2 - V_{n+1}^2}{25.92a}$ (3)	$V_a = V_n + \Delta V_a$ (8)
	Nota: Cuando se calcula V_a , la curva con el mayor radio es utilizada.
$X_{ca} = \frac{V_{n+1}^2 - V_n^2}{25.92a}$ (4)	$\Delta V_a = \left(\frac{25.92ad(LSC_a) + dV_n^2 + aV_{n+1}^2}{(a+d)} \right)^{\frac{1}{2}} - V_n$ (9)
$X_{fa} = \frac{V_{fs}^2 - V_n^2}{25.92a}$ (5)	$V_{n+1}^a = (V_n^2 + 2a(LSC_a))^{\frac{1}{2}}$ (10)

Donde:

V_{fs} =percentil 85% de las velocidades deseadas en tangentes largas (m)

V_n =percentil 85% de velocidades en la curva "n" (Km/h)

V_{n+1} =percentil 85% de velocidades en la curva "n+1" (Km/h)

V_{n+1}^a =percentil 85% de velocidades en la curva "n+1" determinado como función de la tasa asumida de aceleración (Km/h)

V_a =maxima velocidad lograda en la via entre curvas en condición "B" (Km/h)

ΔV_a =diferencia entre la velocidad de la curva "n" y la máxima velocidad lograda en la vía entre curvas en condición "B" (Km/h)

d =tasa de desaceleración, ver tabla 2.13

a =tasa de aceleración, ver tabla 2.13

LSC_c =longitud critica de via para desarrollar toda la aceleración y desaceleración

LSC_a =longitud de vía disponible para cambios de velocidad

X_{fd} =longitud de vía para desacelerar desde la velocidad deseada hasta la velocidad en la curva "n+1" (m)

X_{cd} =longitud de vía para desacelerar desde la velocidad de la curva "n" hasta la velocidad en la curva "n+1" (m)

X_{td} =longitud de vía para desacelerar desde la velocidad V_a hasta la velocidad en la curva "n+1" (m)

X_{ca} =longitud de vía para acelerar desde la velocidad en la curva "n" hasta la velocidad en la curva "n+1" (m)

X_{fa} =longitud de vía para acelerar desde la velocidad en la curva "n" hasta la velocidad deseada (m)

X_{fs} =longitud de vía limitada entre las velocidades de dos curvas luego de la aceleración y antes de la desaceleración (m)

Tabla 2.14: Ecuaciones para determinar las distancias de aceleración y desaceleración (Report FHWA – RD – 99 – 171, 2000)

F. Llevar a cabo la evaluación de la consistencia del diseño

Finalizado el cálculo del perfil de velocidades de operación (V_{85}), y de acuerdo con la investigación desarrollada por la FHWA, es posible calificar a la variación de la velocidad de la siguiente forma:

- Buen diseño: $\Delta V_{85} \leq 10 \text{ Km/h}$
- Diseño regular: $10 \text{ Km/h} \leq \Delta V_{85} \leq 20 \text{ Km/h}$
- Diseño pobre: $20 \text{ Km/h} \leq \Delta V_{85}$

El software IHSDM efectúa todos los pasos anteriormente descritos en pocos segundos y da como resultado el perfil de velocidad y el perfil de variación de la velocidad de operación V_{85} . Tomando en cuenta los intervalos de esta variación, el software coloca banderas de tres colores para indicar al usuario la situación de la consistencia en determinado sector.

En el capítulo siguiente se muestra la aplicación de la metodología en una carretera del Perú. Si bien es cierto que el modelo fue desarrollado con datos de carreteras en los EE.UU., las cuales tienen características geométricas diferentes a las que se tienen en el país, servirá de muestra de aplicación de una metodología que va cobrando interés en el mundo y que se encuentra aún en desarrollo por países del primer mundo como lo es EE.UU. Además se tendrá una visión general de lo que se puede lograr con el análisis de consistencia de los diseños que ejecuta el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, y porque no incluir en la norma de diseño geométrico DG-2001 un capítulo especial que de nuevas luces para que los diseños realizados cobren mayor riqueza en lo que a seguridad vial se refiere.

Resulta muy importante que en el país se comience a desarrollar investigación acerca de esta metodología, comenzando por organizar equipos de investigación para recopilar abundante data en las diversas carreteras del país y así poder ajustar estas ecuaciones a nuestra realidad y obtener resultados más satisfactorios.

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE UN TRAMO DE LA CARRETERA CHILETE – SAN PABLO – EMP. R03N

1. Introducción

El análisis de consistencia del tramo seleccionado consistirá en calcular mediante el Software IHSDM el perfil de velocidades de operación a lo largo de todo el trazo. Este Software, como se vio en el capítulo anterior, utiliza modelos matemáticos o ecuaciones para calcular las velocidades de operación en tramos rectos y curvos. Para esto, será necesario introducir la data geométrica de la carretera en el formato manejado por el software, esta Tabla con los datos y formato requeridos se desprenden de la Tabla de elementos de curva que la mayoría de software de diseño de carreteras arroja automáticamente. Además de esto, el programa requiere del ingreso de datos de velocidad en base a los cuales se inician las iteraciones y/o cálculos para completar el perfil de velocidad a lo largo de toda la vía.

En base a este perfil de velocidades y a las Tablas generadas como reporte, será posible identificar los sectores donde se presenten variaciones de velocidades significativas (mayor igual a 20 Km/h), moderadas (entre 10 y 20 Km/h) o bajas (menos de 10 Km/h). Asimismo se identificara si la velocidad en determinados sectores o tramos, es mayor a la velocidad de diseño adoptada.

A modo de ejemplo se aplicará el análisis al tramo del Km 9+500 al Km 13+500 de la Carretera Chilete – San Pablo – Emp. R03N, ubicada en la Región Cajamarca, de la cual se tiene la data geométrica completa del Estudio Definitivo realizado por la Empresa CESEL S.A. en el año 2007.

Cabe mencionar que la aplicación de esta metodología a una carretera del Perú responde a la intención de mostrar el gran aporte que significa identificar las inconsistencias del diseño geométrico de proyectos de carreteras en etapas de planificación, mejoramiento y/o mantenimiento.

2. Estudio Definitivo de la Carretera Chilete – San Pablo – Emp. R03N

2.1 Antecedentes del proyecto:

El 20.08.2005 PROVIAS NACIONAL y MINERA YANACOCKA S.R.L. Firmaron un convenio de Colaboración Interinstitucional con el objeto de establecer los Términos de Colaboración Interinstitucional para el desarrollo del Proyecto “Mejoramiento de la Carretera Chilete – San Pablo – Empalme Ruta 3N Km. 25 (Carretera Cajamarca – Bambamarca)”, con una extensión aproximada de 75 Km., ubicada en el departamento de Cajamarca (Hoy Región Cajamarca). Mediante este acuerdo Minera YANACOCKA S.R.L. se compromete, entre otras cosas, a realizar el Estudio Definitivo de la Carretera en mención.

El estudio definitivo de la Carretera Chilete – San Pablo – Emp. R03N de 73.13 Km. fue encargada por Minera YANACOCKA S.R.L. a la consultora CESEL S.A. el año 2005. Este estudio estuvo supeditado a la revisión y aprobación por parte de la Unidad Gerencial de Estudios del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC).

Con fecha 31 de marzo del 2008, mediante Resolución Directoral 1263-2008-MTC/20, se aprueba el Estudio Definitivo del Proyecto.

2.2 Ubicación

La franja de la Carretera Chilete – San Pablo – Empalme Ruta 3N (Km. 25 carretera Cajamarca - Bambamarca), políticamente se desarrolla en las provincias de Contumazá, San Pablo y Cajamarca, en la Región Cajamarca.

Desde Lima, se llega por la carretera Panamericana Norte hasta el km. 678, y desde este punto se inicia la carretera asfaltada de penetración a la ciudad de Cajamarca (177 km.), la cual pasa por el poblado de Chilete, tras 90 kilómetros de recorrido desde Ciudad de Dios.

La nueva carretera no está codificada como Ruta y permite la conexión de la Ruta 8 (Km. 90 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca) con la Ruta 3N (Km. 25 de la carretera Cajamarca - Bambamarca).

Geográficamente, en el sistema UTM, el tramo seleccionado Km. 9+500 – Km 13+500 se emplaza entre las coordenadas siguientes:

- Norte: 9.206.821,833 hasta la 9.207.526,188
- Este: 740.177,727 hasta la 738.681,932

La altitud del tramo es variable desde los 1250 m.s.n.m. hasta los 1580 m.s.n.m.

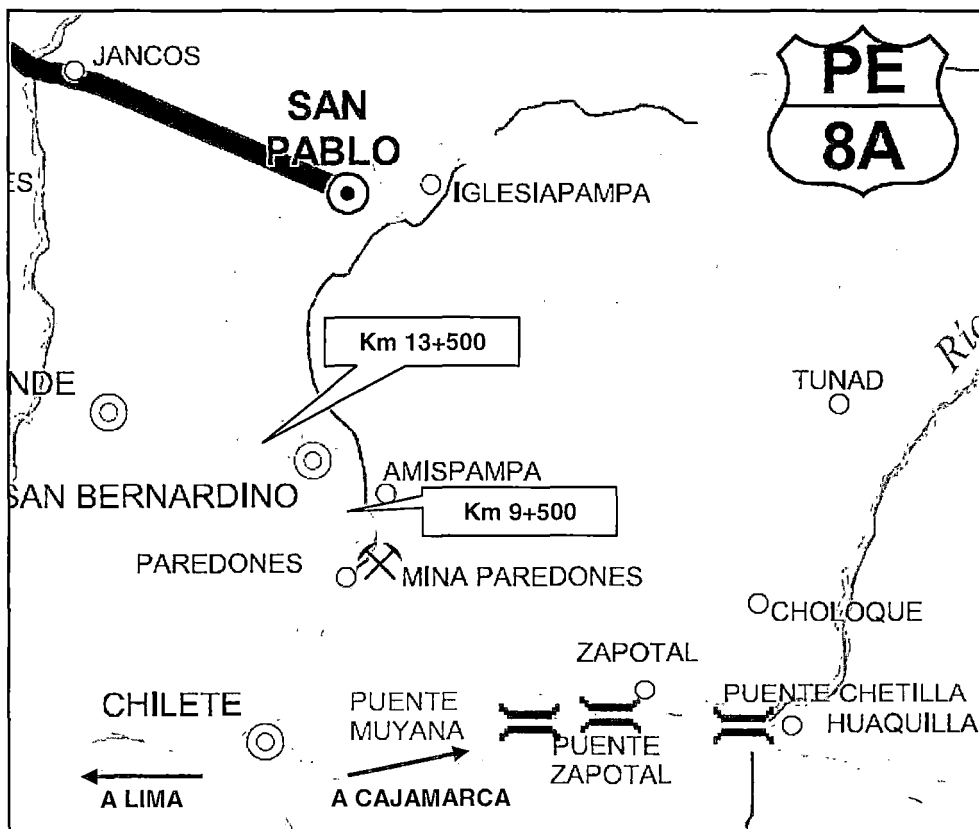


Figura 3.1: Ubicación del tramo de análisis en la Carretera Chilete – San Pablo – Emp. R03N (Km 9+500 – Km 13+500)

2.3 Estudio de trazo y topografía

Este estudio fue realizado con base en la Norma de Diseño Geométrico DG-2001. La Tabla 3.1, muestra un resumen de los parámetros de diseño adoptados:

DESCRIPCIÓN	PARAMETROS	OBSERVACIÓN
1. Clasificación de Carretera	Segunda Clase	Tipo 3 y 4
2. Velocidad Directriz : Vd	30 Km./h.	
3. Radio Mínimo : R mín.	30 m.	
4. Radio Curva de Vuelta : R mín.	20 m.	
5. Ancho de Calzada : a	6.00 m.	
6. Ancho de Berma : b	0.50 m.	
7. Long. Cueva Vertical : Lc.	$18(\alpha_2 - \alpha_1)$	Segundo AASHTO
8. Long. Mín. Curva Vertical : Lc mín.	80 m.	Longitud Mínima
9. Peralte Máximo : Pmáx	8%	12% máximo absoluto
10. Pendiente Máximo : i máx.	9%	Para Tipo 4
11. Bombeo : B	2.0%	Para Precip.>500 mm./a
12. Sobre Ancho : s/a	Según Normas	

Tabla 3.1: Parámetros de diseño geométrico

La Tabla 3.2, muestra los elementos de curva producto del diseño de la carretera. Esta Tabla contiene todos los datos necesarios para poder elaborar una Tabla especial con los datos requeridos por el software y dispuestos de una manera especial. La mayoría de programas de diseño arrojan esta Tabla exportándola al programa Excel en donde puede trabajarse para recopilar solo la información requerida por el software y en el formato que lo requiere.

Curva	S	Angulo de Deflexión	R	PC	PI	PT	Norte	Este
INICIO					9+500.00		9206821.833	740177.727
1	I	34°21'58"	50	9+510.259	9+525.721	9+540.250	9206847.541	740176.917
2	I	16°43'15"	60	9+574.432	9+583.250	9+591.942	9206894.735	740142.413
3	D	18°14'5"	60	9+616.307	9+625.936	9+635.402	9206920.564	740108.271
4	I	6°17'42"	200	9+657.599	9+668.596	9+679.572	9206955.789	740083.919
5	D	36°2'39"	60	9+700.861	9+720.382	9+738.606	9206994.917	740049.963
6	D	31°47'46"	60	9+786.421	9+803.510	9+819.718	9207079.032	740042.740

Curva	S	Angulo de Deflexión	R	PC	PI	PT	Norte	Este
7	D	24°16'31"	70	9+861.068	9+876.123	9+890.726	9207144.581	740075.978
8	I	119°26'38"	25	9+918.627	9+961.447	9+970.744	9207198.371	740142.792
9	I	129°15'43"	35	10+062.875	10+136.688	10+141.837	9207275.627	739948.849
10	D	24°0'35"	200	10+185.944	10+228.473	10+269.754	9207122.640	739997.210
11	I	16°8'14"	150	10+338.525	10+359.789	10+380.772	9206990.919	739982.278
12	D	152°58'31"	47	10+460.048	10+655.632	10+585.534	9206699.002	740032.017
13	I	34°48'9"	150	10+646.698	10+693.708	10+737.810	9206942.566	739850.508
14	D	21°47'4"	200	10+859.357	10+897.843	10+935.399	9207008.273	739654.168
15	I	20°54'44"	150	10+984.887	11+012.569	11+039.635	9207083.059	739565.945
16	D	89°11'23"	22	11+147.274	11+168.965	11+181.521	9207135.149	739417.825
17	D	98°30'45"	22	11+181.606	11+207.144	11+219.432	9207180.001	739432.889
18	I	93°38'24"	22	11+368.699	11+392.143	11+404.654	9207089.759	739609.408
19	I	99°58'19"	22	11+404.759	11+430.965	11+443.146	9207135.409	739629.198
20	D	34°3'5"	90	11+529.352	11+556.912	11+582.840	9207168.003	739493.074
21	D	65°57'56"	50	11+861.518	11+893.967	11+919.084	9207417.777	739264.335
22	I	56°34'56"	50	11+972.593	11+999.505	12+021.971	9207521.300	739309.311
23	D	39°36'5"	50	12+197.212	12+215.214	12+231.771	9207705.729	739189.085
24	D	16°49'2"	90	12+269.525	12+282.829	12+295.941	9207774.345	739196.905
25	I	104°16'7"	25	12+308.384	12+340.538	12+353.880	9207827.516	739219.825
26	I	50°59'15"	40	12+382.353	12+401.427	12+417.949	9207840.053	739141.117
27	I	35°40'3"	50	12+480.461	12+496.546	12+511.586	9207774.778	739068.462
28	D	81°52'33"	35	12+675.884	12+706.243	12+725.900	9207568.948	739023.225
29	D	85°57'47"	35	12+726.043	12+758.660	12+778.555	9207573.649	738960.281
30	I	90°26'58"	40	12+811.534	12+851.849	12+874.680	9207679.559	738960.714
31	D	49°50'32"	30	12+935.770	12+949.709	12+961.867	9207679.126	738845.371
32	I	141°39'54"	30	13+143.363	13+229.670	13+217.539	9207893.769	738662.870
33	D	5°15'33"	300	13+336.331	13+350.108	13+363.867	9207675.032	738670.654
34	I	11°46'45"	120	13+391.583	13+403.962	13+416.254	9207621.244	738667.627
FIN					13+500.001		9207526.188	738681.932

Tabla 3.2: Elementos de curva del tramo de análisis (Km 9+500 al Km 13+500)

En el anexo 01 se adjuntan los planos en planta y perfil correspondientes el Estudio Definitivo de la Carretera Chilete – San Pablo – Emp. R03N (Tramo: Km 9+500 al Km 13+500) realizado por CESEL S.A.

3. Análisis con el Software IHSDM

3.1 Datos de entrada para el software IHSDM

El software IHSDM, en su modulo Análisis de Consistencia, requiere de la siguiente información para desarrollar el análisis.

- Alineamiento horizontal
- Alineamiento vertical
- Velocidad deseada o velocidad estimada en las tangentes de la vía
- Velocidad de diseño

La Figura 3.2, muestra en la parte izquierda los cuatro campos necesarios para realizar el análisis. El software es capaz de encontrar alguna inconsistencia en la información ingresada, como por ejemplo: la pendiente de la tangente de salida de una curva vertical debe ser la misma que la pendiente de la tangente de entrada de la siguiente. Si el software detecta una diferencia en este valor, sin que se tenga alguna otra condicionante, entonces marcará un aspa roja en el campo que contiene la información errada. De manera contraria, si los datos no presentan alguna inconsistencia se mostrará un check color verde, así como se ve en la siguiente figura. En la parte derecha de esta misma figura se puede ingresar las coordenadas de la estación inicial (coordinates), el azimut de la estación de inicio (heading) y la elevación de alguna estación donde este dato sea conocido (elevation).

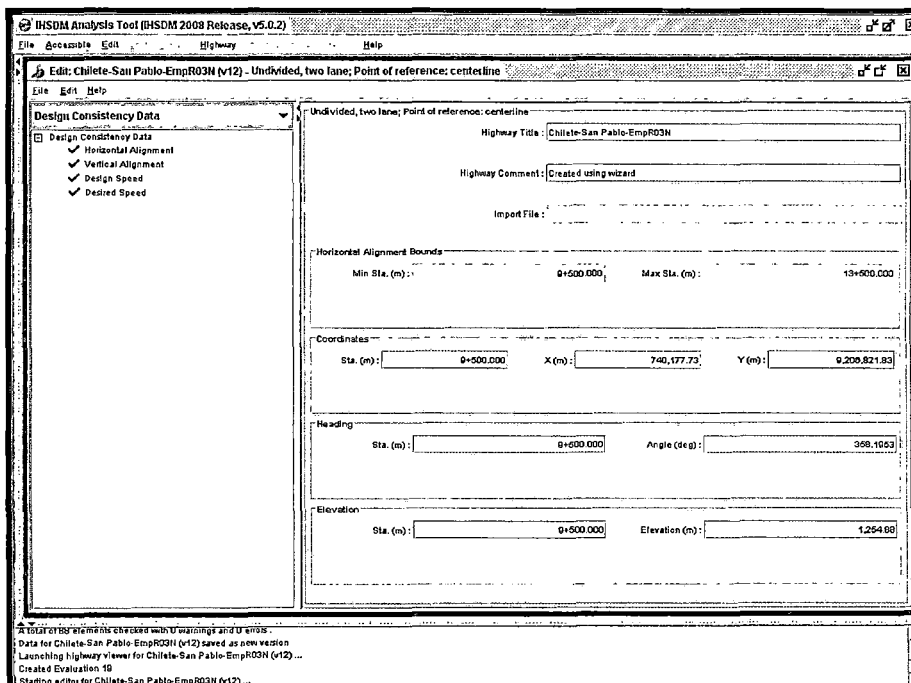


Figura 3.2: Campos necesarios para ingreso de la información previo al análisis con el software

3.1.1 Alineamiento horizontal

La Tabla 3.3, muestra los elementos constituyentes de la carretera como son curvas y tangentes. Todos estos debe están identificados como tangente (Tangent) y Curva (Curve), en el caso que el diseño de la carretera contemplara el uso de curvas espirales, estas serán identificadas como espiral (Spiral). En el caso analizado, solo se cuenta con curvas circulares y tangentes.

Basados en la Tabla 3.2, se procede a elaborar esta Tabla donde se especifica la progresiva de inicio y fin de cada elemento. Además, para las curvas circulares, se tiene que especificar el radio y la dirección (izquierda o derecha).

Element type	Start Station	End Station	Curve Radius (m)	Direction of curve
Tangent	9+500.000	9+510.259		
Curve	9+510.259	9+540.250	50	Left
Tangent	9+540.250	9+574.432		
Curve	9+574.432	9+591.942	60	Left
Tangent	9+591.942	9+616.307		
Curve	9+616.307	9+635.402	60	Right
Tangent	9+635.402	9+657.599		
Curve	9+657.599	9+679.572	200	Left
Tangent	9+679.572	9+700.861		
Curve	9+700.861	9+738.606	60	Right
Tangent	9+738.606	9+786.421		
Curve	9+786.421	9+819.718	60	Right
Tangent	9+819.718	9+861.068		
Curve	9+861.068	9+890.726	70	Right
Tangent	9+890.726	9+918.627		
Curve	9+918.627	9+970.744	25	Left
Tangent	9+970.744	10+062.875		
Curve	10+062.875	10+141.837	35	Left
Tangent	10+141.837	10+185.944		
Curve	10+185.944	10+269.754	200	Right
Tangent	10+269.754	10+338.525		
Curve	10+338.525	10+380.772	150	Left
Tangent	10+380.772	10+460.048		
Curve	10+460.048	10+585.534	47	Right
Tangent	10+585.534	10+646.698		
Curve	10+646.698	10+737.810	150	Left
Tangent	10+737.810	10+859.357		
Curve	10+859.357	10+935.399	200	Right
Tangent	10+935.399	10+984.887		
Curve	10+984.887	11+039.635	150	Left
Tangent	11+039.635	11+147.274		

Element type	Start Station	End Station	Curve Radius (m)	Direction of curve
Curve	11+147.274	11+181.521	22	Right
Tangent	11+181.521	11+181.606		
Curve	11+181.606	11+219.432	22	Right
Tangent	11+219.432	11+368.699		
Curve	11+368.699	11+404.654	22	Left
Tangent	11+404.654	11+404.759		
Curve	11+404.759	11+443.146	22	Left
Tangent	11+443.146	11+529.352		
Curve	11+529.352	11+582.840	90	Right
Tangent	11+582.840	11+861.518		
Curve	11+861.518	11+919.084	50	Right
Tangent	11+919.084	11+972.593		
Curve	11+972.593	12+021.971	50	Left
Tangent	12+021.971	12+197.212		
Curve	12+197.212	12+231.771	50	Right
Tangent	12+231.771	12+269.525		
Curve	12+269.525	12+295.941	90	Right
Tangent	12+295.941	12+308.384		
Curve	12+308.384	12+353.880	25	Left
Tangent	12+353.880	12+382.353		
Curve	12+382.353	12+417.949	40	Left
Tangent	12+417.949	12+480.461		
Curve	12+480.461	12+511.586	50	Left
Tangent	12+511.586	12+675.884		
Curve	12+675.884	12+725.900	35	Right
Tangent	12+725.900	12+726.043		
Curve	12+726.043	12+778.555	35	Right
Tangent	12+778.555	12+811.534		
Curve	12+811.534	12+874.680	40	Left
Tangent	12+874.680	12+935.770		
Curve	12+935.770	12+961.867	30	Right
Tangent	12+961.867	13+143.363		
Curve	13+143.363	13+217.539	30	Left
Tangent	13+217.539	13+336.331		
Curve	13+336.331	13+363.867	300	Right
Tangent	13+363.867	13+391.583		
Curve	13+391.583	13+416.254	120	Left
Tangent	13+416.254	13+500.000		

Tabla 3.3: Datos del alineamiento horizontal del tramo en análisis.

Una vez elaborada la Tabla anterior, es posible copiar y pegar los datos en la Tabla de ingreso del alineamiento horizontal del software (Horizontal Aligment). La Figura 3.3 muestra el campo Horizontal Aligment con los datos ya ingresados.

The screenshot shows the IHSDM Analysis Tool (v5.0.2) interface. The main window displays the 'Horizontal Alignment' data table, which lists various alignment elements (Tangent, Curve, Spiral) with their respective start and end stationing, curve radius, and deflection angle. The table is as follows:

Element Type	Start Sta.	End Sta.	Curve Radius (m)	Direction of Curve	Radius Position	Deflection Angle (deg)
Tangent	9+500.000	9+810.250				
Curve	9+510.250	9+540.250	50.00	Left		
Tangent	9+540.250	9+574.432				
Curve	9+574.432	9+591.942	80.00	Left		
Tangent	9+591.942	9+618.307				
Curve	9+618.307	9+635.422	60.00	Right		
Tangent	9+635.422	9+657.592				
Curve	9+657.592	9+679.572	200.00	Left		
Tangent	9+679.572	9+700.851				
Curve	9+700.851	9+738.806	60.00	Right		
Tangent	9+738.806	9+788.421				
Curve	9+788.421	9+819.716	60.00	Right		
Tangent	9+819.716	9+851.085				
Curve	9+851.085	9+880.728	70.00	Right		
Tangent	9+880.728	9+918.827				
Curve	9+918.827	9+970.744	25.00	Left		
Tangent	9+970.744	10+082.875				
Curve	10+082.875	10+141.837	35.00	Left		
Tangent	10+141.837	10+185.644				
Curve	10+185.644	10+289.754	200.00	Right		
Tangent	10+289.754	10+338.525				
Curve	10+338.525	10+380.772	150.00	Left		
Tangent	10+380.772	10+480.043				
Curve	10+480.043	10+585.534	47.00	Right		
Tangent	10+585.534	10+640.688				
Curve	10+640.688	10+737.810	150.00	Left		

Figura 3.3: Ingreso de datos del alineamiento horizontal en el software IHSDM

La Figura 3.4 muestra la planta de la carretera, aquí se puede verificar que los datos del alineamiento horizontal ingresados hayan sido los correctos, esto comparando el gráfico en planta con la planta que se tiene en autocad producto del diseño geométrico.

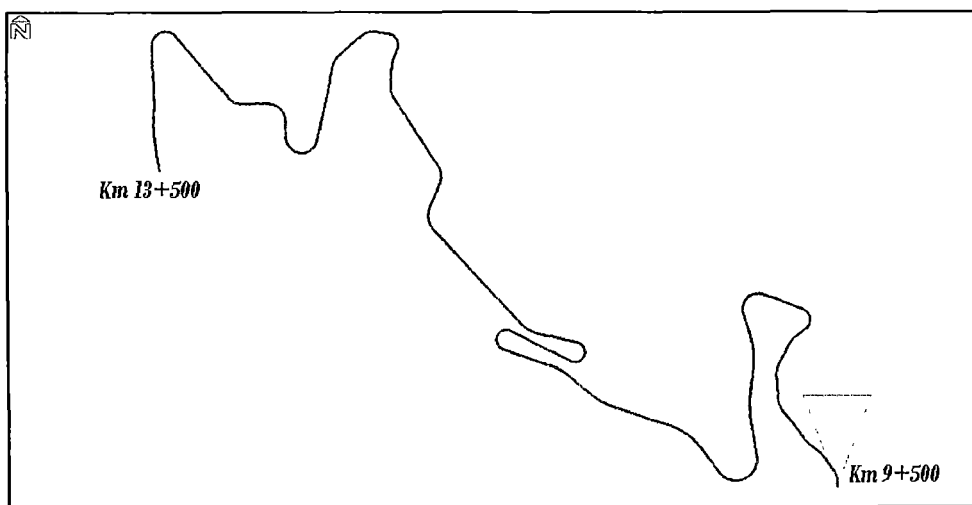


Figura 3.4: Vista en planta de la carretera con el software IHSDM

3.1.2 Alineamiento vertical

Para el caso del alineamiento vertical, el formato requerido por el software no es muy diferente a las Tablas arrojadas por los software de diseño de carreteras, por lo tanto no será necesario reacomodar la información como en el caso del alineamiento horizontal.

La Tabla 3.4, muestra los datos del alineamiento vertical necesarios para el análisis. En la Tabla del software para el ingreso del alineamiento vertical existe otro formato que también puede ser utilizado, este requiere ingresar las progresivas de inicio y fin de las curvas verticales. En este caso el programa de diseño utilizado arroja los datos del alineamiento vertical de la siguiente forma.

Type	VPI Start Station	Back grade (%)	Back length (m)	Forward grade (%)	Forward length (m)
VPI	9+560	9.36	40	8.59	40
VPI	10+170	8.59	40	0.43	40
VPI	10+310	0.43	30	7.27	30
VPI	10+430	7.27	40	1.03	40
VPI	10+570	1.03	40	7.45	40
VPI	11+230	7.45	60	0.48	60
VPI	11+410	0.48	60	10	60
VPI	12+210	10	0	9.3	0
VPI	12+314	9.3	30	9.91	30
VPI	12+470	9.91	0	10	0
VPI	12+950	10	30	4.59	30
VPI	13+030	4.59	30	9.9	30
VPI	13+100	9.9	30	9.33	30

Tabla 3.4: Datos del alineamiento vertical del tramo en análisis.

Los datos de la Tabla anterior se copian y pegan en la Tabla de ingreso del alineamiento vertical del software (Vertical Aligment). La Figura 3.5 muestra el campo Vertical Aligment con los datos ya ingresados.

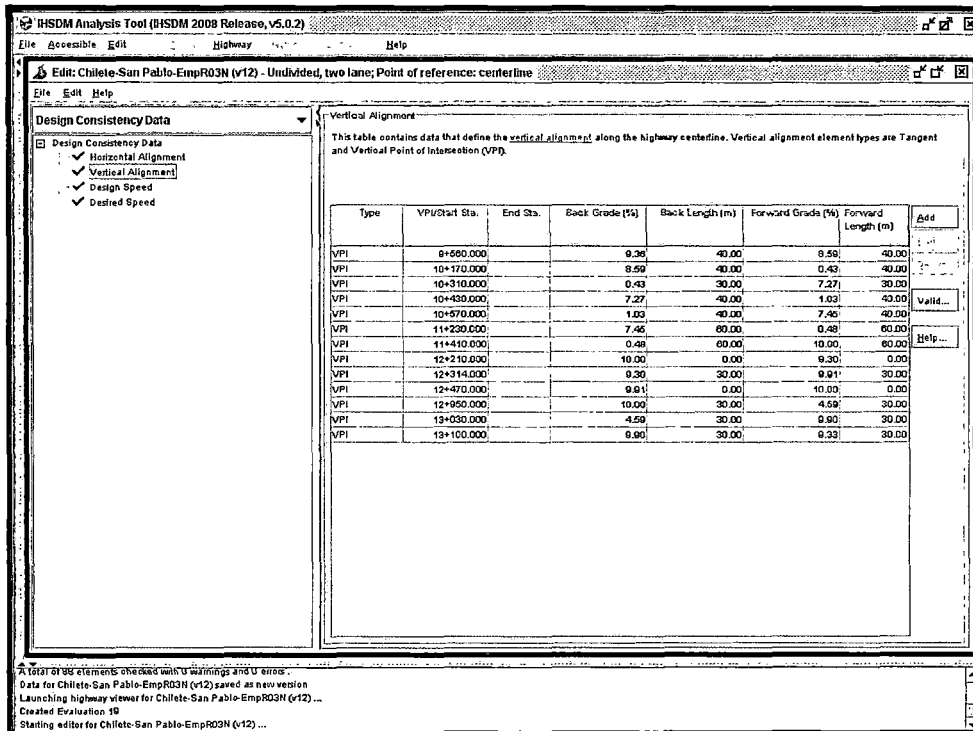


Figura 3.5: Ingreso de datos del alineamiento vertical en el software IHSDM

La Figura 3.6 muestra el perfil de la carretera, aquí se puede verificar que los datos del alineamiento vertical ingresados hayan sido los correctos, esto comparando el gráfico en perfil con el perfil que se tiene en autocad producto del diseño geométrico

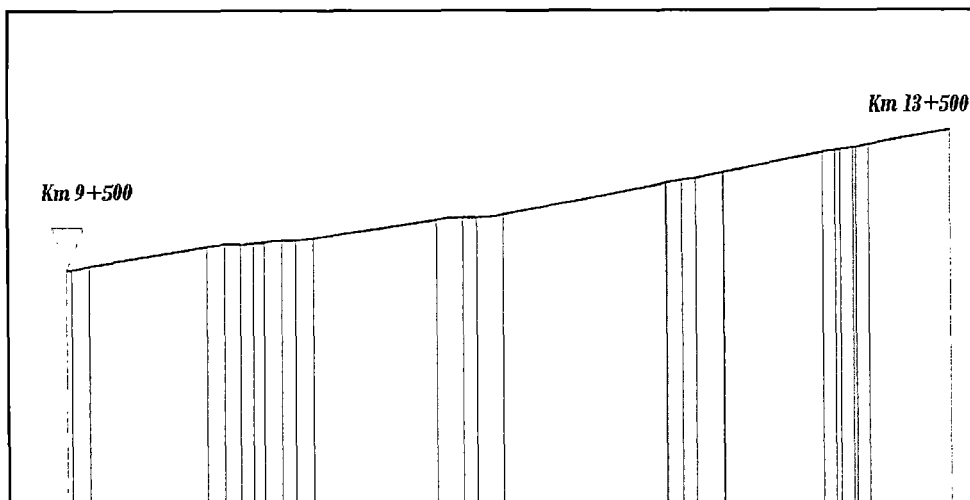


Figura 3.6: Vista del perfil de la carretera con el software IHSDM

3.2 Resultados del Análisis de Consistencia con el software IHSDM

El software realizó el análisis de consistencia siguiendo los pasos explicados en el capítulo III, en base a estos pasos el software elaboró el perfil de velocidades en el sentido creciente y decreciente de las progresivas, es decir desde el Km 9+500 hacia el Km 13+500 y viceversa. Automáticamente el software también identificó las zonas con variación en la velocidad entre la velocidad de operación y la velocidad de diseño, asimismo entre la velocidad de operación entre elementos geométricos adyacentes, generándose de este modo dos situaciones.

La primera situación responde al hecho de que el software identifica los sectores donde la velocidad de operación calculada excede a la velocidad de diseño en determinado valor. La Tabla 3.5 muestra los intervalos de variación entre la velocidad de operación y la de diseño y los colores correspondientes asignados de acuerdo al intervalo en donde se ubica dicha variación.




$\Delta V = V_{\text{operación}} (V_{85}) - V_{\text{diseño}}$	Color asignado	Condición
$\Delta V \leq 10 \text{ Km}$		1
$10 \text{ Km/s} \leq \Delta V \leq 20 \text{ Km/s}$		2
$20 \text{ Km/s} \leq \Delta V$		3

Tabla 3.5: Intervalos y colores asignados por magnitud de variación de la velocidad de operación y velocidad de diseño.

La segunda situación responde al hecho de que el software identifica la magnitud de la variación de la velocidad entre dos elementos geométricos adyacentes de la carretera. La Tabla 3.6 muestra los intervalos de variación entre la velocidad de dos elementos adyacentes y los colores correspondientes asignados de acuerdo al intervalo en donde se ubica dicha variación.



ΔV elementos adyacentes	Color asignado	Condición
$\Delta V \leq 10 \text{ Km}$		1
$10 \text{ Km/s} \leq \Delta V \leq 20 \text{ Km/s}$		2
$20 \text{ Km/s} \leq \Delta V$		3

Tabla 3.6: Intervalos y colores asignados por magnitud de variación de la velocidad entre elementos adyacentes.

En el anexo 02, se adjunta el reporte arrojado por el software luego de realizado el análisis. A continuación se presenta una explicación de los resultados obtenidos, en base al reporte mencionado.

3.2.1 Sentido creciente de las progresivas (Del Km 9+500 al Km 13+500)

La Figura 3.7 muestra diferentes curvas, las cuatro primeras son elaboradas en base a la data geométrica horizontal y vertical mientras que la última es el perfil de velocidades calculado. Como se puede observar, en la mayor parte del tramo la variación de la velocidad entre la velocidad de operación y la velocidad de diseño es mayor a 20 Km/h, lo cual nos da una idea de que en este tramo la velocidad máxima permisible sería superada en casi todo el tramo. Por otra parte, las banderas de colores nos indican la magnitud de la variación de la velocidad entre electos adyacentes (tangente y curva), el color de cada una varía de acuerdo con la Tabla 3.6.

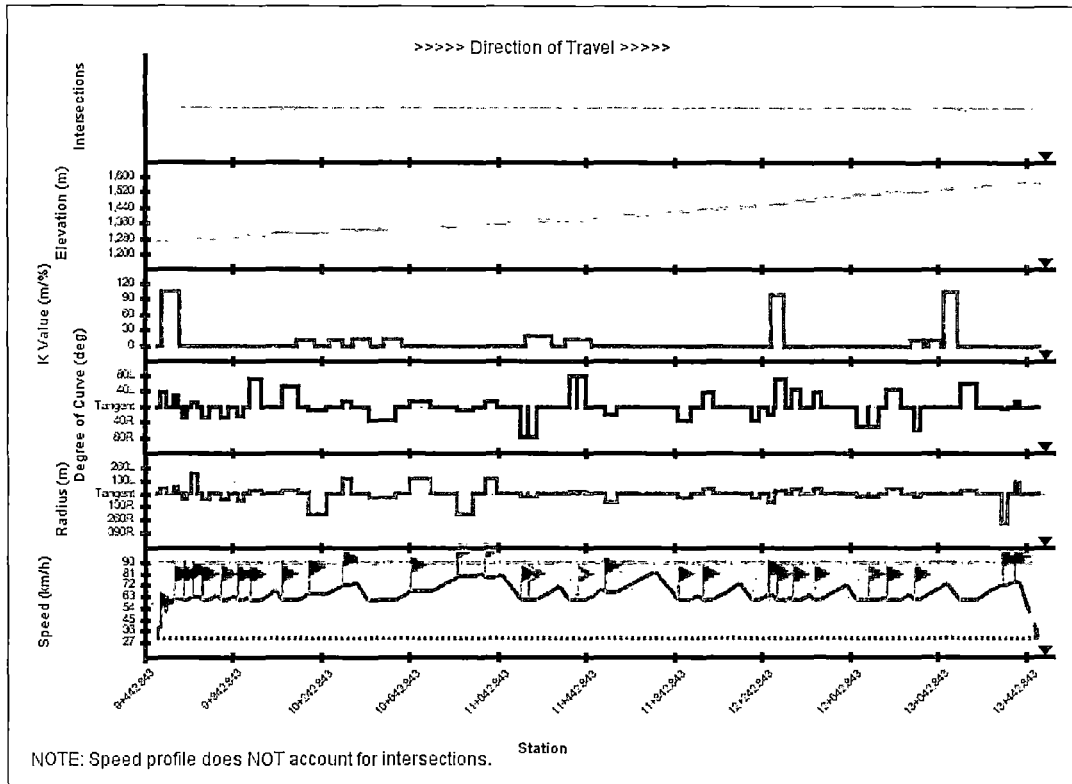


Figura 3.7: Perfil de velocidad obtenido por el software IHSDM (sentido creciente de las progresivas)

La Tabla 3.7 muestra las coordenadas del perfil de velocidad calculados, esta Tabla también es mostrada al usuario por el software. Se observa que la velocidad de operación calculada estaría alrededor de los 63 Km/h en promedio, esto significaría que los vehículos transitan por este tramo a mayor velocidad que la de diseño. Estos datos serían muy útiles para el diseño de la señalización vertical, pues nos muestra aquellos sectores donde el vehículo alcanza velocidades altas y serían en estos sectores donde debemos colocar señales para indicarle al conductor que no exceda un límite de velocidad.

Progresiva	Velocidad (Km/h)	Progresiva	Velocidad (Km/h)	Progresiva	Velocidad (Km/h)
9+500.000	30	10+402.080	74	12+295.941	64*
9+509.416	38	10+460.048	60	12+306.667	61
9+510.259	38	10+585.534	60	12+308.385	60
9+520.881	45	10+646.698	67	12+331.667	60
9+534.174	51	10+737.810	67	12+353.880	60
9+540.250	53	10+859.357	78	12+373.764	62
9+549.097	56	10+935.399	78	12+381.667	60
9+574.432	60	10+969.259	81	12+382.353	60
9+583.147	60	10+981.667	79	12+406.667	60
9+591.943	60	10+984.887	78	12+417.949	60
9+616.307	60	11+039.635	78	12+480.461	60
9+621.841	60	11+060.381	80	12+511.586	60
9+635.402	60	11+147.274	60	12+626.320	72
9+642.625	61	11+156.667	60	12+675.884	60
9+657.599	63	11+181.521	60	12+725.900	60
9+664.229	63	11+181.580	60	12+726.000	60
9+679.572	63	11+181.606	60	12+726.044	60
9+700.861	60	11+219.432	60	12+778.555	60
9+738.606	60	11+323.669	71	12+801.585	63
9+771.996	64	11+368.699	60	12+806.667	61
9+781.780	61	11+381.667	60	12+811.534	60
9+786.421	60	11+404.654	60	12+874.680	60
9+806.667	60	11+404.728	60	12+917.340	65
9+819.718	60	11+404.760	60	12+931.667	61
9+848.594	63	11+443.146	60	12+935.770	60
9+856.667	61	11+529.352	66	12+956.667	60
9+861.068	60	11+582.840	66	12+961.867	60
9+881.667	60	11+761.068	83	13+088.610	73
9+890.726	60	11+861.518	60	13+143.363	60
9+918.627	60	11+919.084	60	13+217.539	60
9+970.744	60	11+956.451	64	13+336.331	73
10+035.082	67	11+956.667	64	13+356.667	73
10+056.667	62	11+972.593	60	13+363.867	73
10+062.875	60	12+021.971	60	13+391.583	74
10+141.837	60	12+144.346	73	13+406.667	74
10+185.944	65	12+197.212	60	13+416.254	74
10+269.754	65	12+231.771	60	13+431.667	67
10+338.525	72	12+256.667	63	13+500.000	30
10+356.667	72	12+269.525	64		
10+380.772	72	12+281.667	64		

* El ritmo de desaceleración predicha desde la progresiva 12+295.941 hasta la progresiva 12+308.385 (en el sentido creciente de las progresivas) es mayor que el ritmo de desaceleración confortable, esta ultima establecida en base a la data recopilada para el desarrollo del Modulo Consistencia del Diseño.

Tabla 3.7: Coordenadas del perfil de velocidad (sentido creciente de las progresivas)

La Tabla 3.8, en base a las Tablas 3.5 y 3.7, muestra la progresiva inicial y final donde se produce una condición diferente con respecto a la diferencia entre la velocidad de operación (V_{85}) y la de diseño ($V_{\text{diseño}}$).

Progresiva		$V_{85} - V_{\text{diseño}}$		Condición
Inicio	Fin	Min (km/h)	Max (km/h)	
9+500.000	9+513.048	0	10	1
9+513.048	9+532.128	10	20	2
9+532.128	13+462.963	20	53	3
13+462.963	13+481.482	10	20	2
13+481.482	13+500.000	0	10	1

Tabla 3.8: Diferencia de la velocidad de operación (V_{85}) y la velocidad de diseño ($V_{\text{diseño}}$). (Sentido creciente de las progresivas).

La Tabla 3.9, en base a las Tablas 3.6 y 3.7, muestra la magnitud de la diferencia entre elementos geométricos adyacentes, y la condición en que se encuentra esta.

Progresiva de la máxima velocidad en elemento precedente	Máxima velocidad en elemento precedente (Km/h)	Progresiva de inicio de curva	Velocidad en curva (Km/h)	Diferencia de velocidad (Km/h)	Condición
9+510.259	38	9+510.259	38	0	1
9+565.473	61	9+574.432	60	1	1
9+608.957	62	9+616.307	60	2	1
9+657.599	63	9+657.599	63	0	1
9+687.743	63	9+700.861	60	3	1
9+771.996	64	9+786.421	60	4	1
9+848.594	63	9+861.068	60	3	1
9+910.210	62	9+918.627	60	2	1
10+035.082	67	10+062.875	60	7	1
10+185.944	65	10+185.944	65	0	1
10+338.525	72	10+338.525	72	0	1
10+402.080	74	10+460.048	60	14	2
10+646.698	67	10+646.698	67	0	1
10+859.357	78	10+859.357	78	0	1

Progresiva de la máxima velocidad en elemento precedente	Máxima velocidad en elemento precedente (Km/h)	Progresiva de inicio de curva	Velocidad en curva (Km/h)	Diferencia de velocidad (Km/h)	Condición
10+969.259	81	10+984.887	78	3	1
11+060.381	80	11+147.274	60	20	3
11+181.580	60	11+181.606	60	0	1
11+323.669	71	11+368.699	60	11	2
11+404.728	60	11+404.760	60	0	1
11+519.726	68	11+529.352	66	2	1
11+761.068	83	11+861.518	60	23	3
11+956.451	64	11+972.593	60	4	1
12+144.346	73	12+197.212	60	13	2
12+269.525	64	12+269.525	64	0	1
12+295.941	64	12+308.385	60	4	1
12+373.764	62	12+382.353	60	2	1
12+461.602	65	12+480.461	60	5	1
12+626.320	72	12+675.884	60	12	2
12+726.000	60	12+726.044	60	0	1
12+801.585	63	12+811.534	60	3	1
12+917.340	65	12+935.770	60	5	1
13+088.610	73	13+143.363	60	13	2
13+336.331	73	13+336.331	73	0	1
13+388.286	74	13+391.583	74	0	1

Tabla 3.9: Diferencia de velocidades entre elementos geométricos adyacentes (sentido creciente de las progresivas)

En base a la Tabla anterior se puede notar que existen dos lugares en donde se excede la variación de 20 Km/h entre la velocidad en la tangente y la curva que la sucede. Este lugar puede ser catalogado como un lugar con altas probabilidades de ocurrencia de accidentes debido a que el conductor podría realizar alguna maniobra peligrosa al tratar de reducir su velocidad para ingresar a la curva con una velocidad adecuada.

La identificación de estos puntos nos permite tomar mayor atención a su diseño y de cómo podemos variar la geometría para que haya una mejor consistencia

de la velocidad en este lugar. El capítulo IV analiza las dos alternativas que buscan reducir la inconsistencia encontrada.

3.2.2 Sentido decreciente de las progresivas (Del Km 13+500 al Km 9+500)

De forma similar al análisis en sentido creciente de las progresivas, la Figura 3.8 muestra cinco diferentes curvas. Las cuatro primeras son elaboradas en base a la data geométrica horizontal y vertical mientras que la última es el perfil de velocidades calculado. Como se puede observar, en la mayor parte del tramo la variación de la velocidad entre la velocidad de operación y la velocidad de diseño es mayor a 20 Km/h, lo cual nos da una idea de que en este tramo la velocidad máxima permisible sería superada en casi todo el tramo. Por otra parte, las banderas de colores nos indican la magnitud de la variación de la velocidad entre electos adyacentes (tangente y curva), el color de cada una varía de acuerdo con la Tabla 3.6.

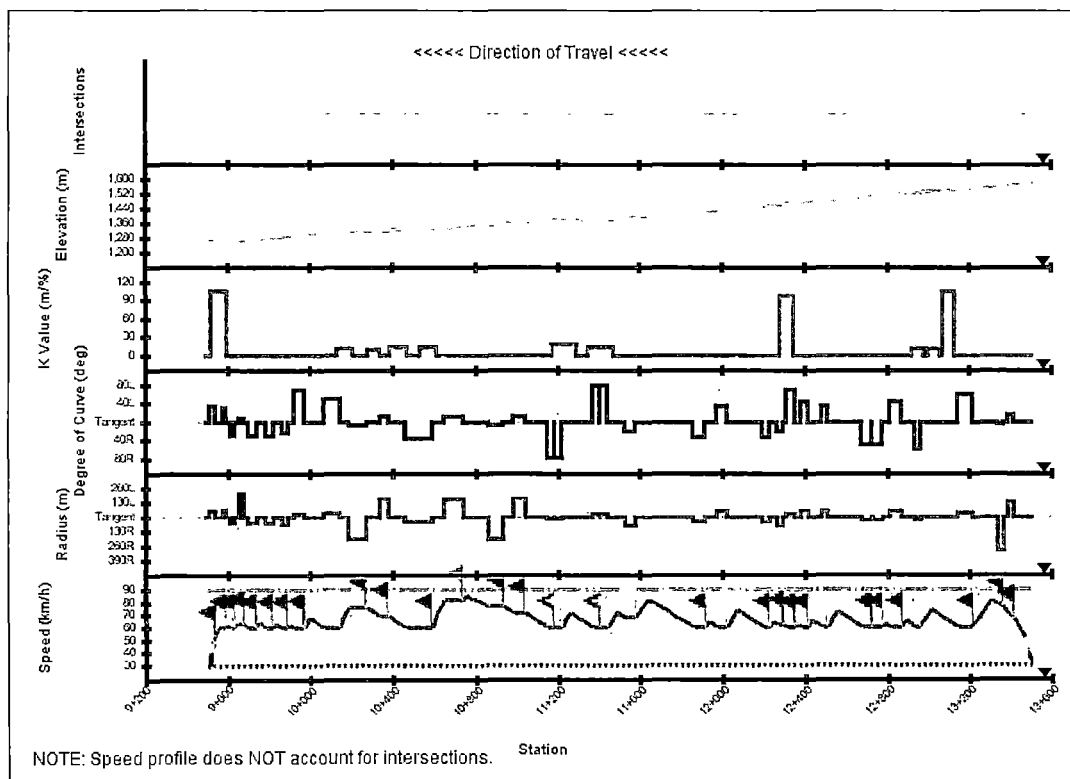


Figura 3.8: Perfil de velocidad obtenido por el software IHSDM (sentido decreciente de las progresivas)

La Tabla 3.10 muestra las coordenadas del perfil de velocidad calculados, esta Tabla también es mostrada al usuario por el software. Se observa que la velocidad de operación calculada estaría alrededor de los 62 Km/h en promedio, esto significaría que los vehículos transitan por este tramo a mayor velocidad que la de diseño. Estos datos serían muy útiles para el diseño de la señalización vertical, pues nos muestra aquellos sectores donde el vehículo alcanza velocidades altas y serían en estos sectores donde debemos colocar señales para indicar al conductor que no exceda un límite de velocidad.

Progresiva	Velocidad (Km/h)	Progresiva	Velocidad (Km/h)	Progresiva	Velocidad (Km/h)
13+500.000	30	12+246.914	64	10+338.525	69
13+499.999	30	12+243.332	63	10+269.754	75
13+490.583	38	12+231.771	60	10+185.944	75*
13+479.118	45	12+218.332	60	10+141.837	60
13+465.825	51	12+197.212	60	10+062.875	60
13+450.903	56	12+074.837	73	9+998.538	67
13+434.526	61	12+021.971	60	9+993.332	66
13+416.852	66	11+972.593	60	9+970.744	60
13+416.254	66	11+919.084	60	9+918.627	60
13+391.583	71	11+861.518	60	9+899.143	62
13+363.867	75	11+645.105	81	9+893.332	61
13+336.331	79	11+582.840	68	9+890.726	60
13+308.424	81	11+529.352	68	9+868.332	60
13+217.539	60	11+490.958	72	9+861.068	60
13+143.363	60	11+443.146	60	9+819.718	60
13+016.620	73	11+418.332	60	9+786.421	60
12+961.867	60	11+404.760	60	9+753.031	64
12+943.332	60	11+404.686	60	9+743.332	61
12+935.770	60	11+404.654	60	9+738.606	60
12+874.680	60	11+393.332	60	9+718.332	60
12+811.534	60	11+368.699	60	9+700.861	60
12+778.555	60	11+264.462	71	9+693.332	61
12+726.044	60	11+243.332	66	9+679.572	62
12+725.943	60	11+219.432	60	9+668.332	62
12+725.900	60	11+181.606	60	9+657.599	62
12+675.884	60	11+181.546	60	9+648.521	63
12+561.151	72	11+181.521	60	9+643.332	62
12+511.586	60	11+168.332	60	9+635.402	60
12+493.332	60	11+147.274	60	9+618.332	60

Progresiva	Velocidad (Km/h)	Progresiva	Velocidad (Km/h)	Progresiva	Velocidad (Km/h)
12+480.461	60	11+039.635	71	9+616.307	60
12+436.807	65	10+984.887	71	9+599.293	62
12+418.332	60	10+935.399	76	9+593.332	60
12+417.949	60	10+859.357	76	9+591.943	60
12+393.332	60	10+756.008	85	9+574.432	60
12+382.353	60	10+743.332	83	9+568.332	61
12+353.880	60	10+737.810	82	9+550.562	57
12+308.385	60	10+646.698	82*	9+543.332	53
12+295.941	61	10+585.534	60	9+540.250	52
12+293.332	61	10+460.048	60	9+510.259	30
12+269.525	61	10+380.772	69	9+500.000	30

* El ritmo de desaceleración predicha desde la progresiva 10+646.698 hasta la progresiva 10+585.534 y desde la progresiva 10+185.944 hasta la progresiva 10+141.837 (en el sentido decreciente de las progresivas) es mayor que el ritmo de desaceleración confortable, esta ultima establecida en base a la data recopilada para el desarrollo del Modulo Consistencia del Diseño.

Tabla 3.10: Coordenadas del perfil de velocidad (sentido decreciente de las progresivas)

La Tabla 3.11, en base a las Tablas 3.5 y 3.10, muestra la progresiva inicial y final donde se produce una condición diferente con respecto a la diferencia entre la velocidad de operación (V_{85}) y la de diseño ($V_{diseño}$).

Progresiva		$V_{85} - V_{diseño}$		Condición
Inicio	Fin	Min (km/h)	Max (km/h)	
13+500.000	13+486.951	0	10	1
13+486.951	13+467.872	10	20	2
13+467.872	9+537.037	20	55	3
9+537.037	9+500.000	0	20	2
13+500.000	13+486.951	0	10	1

Tabla 3.11: Diferencia de la velocidad de operación (V_{85}) y la velocidad de diseño ($V_{diseño}$). (Sentido decreciente de las progresivas).

La Tabla 3.12, en base a las Tablas 3.6 y 3.10, muestra la magnitud de la diferencia entre elementos geométricos adyacentes, y la condición en que se encuentra esta.

Progresiva de la máxima velocidad en elemento precedente	Máxima velocidad en elemento precedente (Km/h)	Progresiva de inicio de curva	Velocidad en curva (Km/h)	Diferencia de velocidad (Km/h)	Condición
13+416.254	66	13+416.254	66	0	1
13+363.867	75	13+363.867	75	0	1
13+308.424	81	13+217.539	60	21	3
13+016.620	73	12+961.867	60	13	2
12+893.109	65	12+874.680	60	5	1
12+788.504	63	12+778.555	60	3	1
12+725.943	60	12+725.900	60	0	1
12+561.151	72	12+511.586	60	12	2
12+436.807	65	12+417.949	60	5	1
12+362.470	62	12+353.880	60	2	1
12+295.941	61	12+295.941	61	0	1
12+246.914	64	12+231.771	60	4	1
12+074.837	73	12+021.971	60	13	2
11+935.226	64	11+919.084	60	4	1
11+645.105	81	11+582.840	68	14	2
11+490.958	72	11+443.146	60	12	2
11+404.686	60	11+404.654	60	0	1
11+264.462	71	11+219.432	60	11	2
11+181.546	60	11+181.521	60	0	1
11+039.635	71	11+039.635	71	0	1
10+935.399	76	10+935.399	76	0	1
10+756.008	85	10+737.810	82	4	1
10+646.698	82	10+585.534	60	22	3
10+380.772	69	10+380.772	69	0	1
10+269.754	75	10+269.754	75	0	1
10+185.944	75	10+141.837	60	15	2
9+998.538	67	9+970.744	60	7	1

Progresiva de la máxima velocidad en elemento precedente	Máxima velocidad en elemento precedente (Km/h)	Progresiva de inicio de curva	Velocidad en curva (Km/h)	Diferencia de velocidad (Km/h)	Condición
9+899.143	62	9+890.726	60	2	1
9+882.192	63	9+819.718	60	3	1
9+758.031	64	9+738.606	60	4	1
9+679.572	62	9+679.572	62	0	1
9+648.521	63	9+635.402	60	3	1
9+599.293	62	9+591.943	60	2	1
9+568.332	61	9+540.250	52	9	1

Tabla 3.12: Diferencia de velocidades entre elementos geométricos adyacentes (sentido decreciente de las progresivas)

De manera similar, que el análisis en el sentido creciente de las progresivas, en base a la Tabla anterior se puede notar que existen dos lugares en donde se excede la variación de 20 Km/h entre la velocidad en la tangente y la curva que la sucede. Este lugar puede ser catalogado como un lugar con altas probabilidades de ocurrencia de accidentes debido a que el conductor podría realizar alguna maniobra peligrosa al tratar de reducir su velocidad para ingresar a la curva con una velocidad adecuada.

La identificación de estos puntos nos permite tomar mayor atención a su diseño y de cómo podemos variar la geometría para que haya una mejor consistencia de la velocidad en este lugar. El capítulo IV analiza e intenta plantear alternativas de solución para disminuir o eliminar la condición de inconsistencia de los sectores identificados en este capítulo.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES A LOS SECTORES INCONSISTENTES DEL TRAMO DE LA CARRETERA CHILETE – SAN PABLO – EMP. R03N

1. Introducción

Las inconsistencias identificadas por el software, mediante el cálculo del perfil de velocidades de operación, son analizadas y tratadas con el fin de reducir la magnitud de variación de velocidades entre elementos adyacentes, como son tangentes y curvas. Como se vio en los capítulos anteriores, el perfil de velocidad depende directamente del diseño geométrico, por lo tanto un cambio en la configuración geométrica conllevará a un nuevo perfil de velocidades.

El análisis del perfil de velocidad inicial permitirá identificar la forma como varía la velocidad con respecto a la posición, de este modo podemos identificar el mejor cambio en la geometría que la modificará a nuestra conveniencia. Estos cambios en la geometría deben ajustarse a la topografía del terreno, para que la nueva disposición geométrica no requiera de la utilización de estructuras especiales o incrementen el volumen de trabajo para la construcción o mejoramiento de la vía.

Un nuevo análisis con el software permite ver si los cambios practicados son realmente los necesarios para el mejoramiento de la consistencia del diseño. Aquellos sectores donde no es posible variar la geometría, de manera tal que se modifique el perfil de velocidad como se desea, son resueltos mediante la colocación de señalización reguladora de velocidad máxima y de otros que contribuyan a evitar las grandes variaciones de velocidad entre elementos adyacentes.

De este modo se muestra como el análisis de consistencia del diseño geométrico es una herramienta útil e importante para el mejoramiento de la seguridad vial en las carreteras. Sin embargo, es preciso el desarrollo de modelos basados en la realidad del país, para así obtener mejores perfiles de velocidades mucho más representativos.

2. Sectores inconsistentes del tramo analizado (Km 9+500 – Km 13+500)

Como se vio en el capítulo III, el análisis fue realizado en dos sentidos, el primero en el sentido creciente de las progresivas y la segunda en sentido decreciente de las progresivas. Luego de cada análisis, el software arrojó las Tablas 3.9 y 3.12 como resultado, referidas a la magnitud de la diferencia entre la velocidad de operación de elementos geométricos adyacentes (tangente y curva) y la condición en que esta diferencia se encuentra.

A continuación se realiza un resumen de las condiciones 2 y 3 en base a las dos Tablas mencionadas anteriormente. Posteriormente se realizara el análisis y se planteara una medida para disminuir la condición de la inconsistencia encontrada, es decir disminuir la variación de la velocidad de operación en menos de 20 Km/h.

2.1 Sentido creciente de las progresivas (Del Km 9+500 hacia el Km 13+500)

En base a la Tabla 3.9 generamos la Tabla 4.1, para resumir solo las condiciones 2 y 3. De ambas condiciones, la condición 3 es la que representa al sector con mayor variación entre las velocidades de operación en tangente y curva y por ende representa a los sectores con mayor probabilidad de ocurrencia de accidentes.

Progresiva de la máxima velocidad en elemento precedente	Máxima velocidad en elemento precedente (Km/h)	Progresiva de inicio de curva	Velocidad en curva (Km/h)	Diferencia de velocidad (Km/h)	Condición
10+402.080	74	10+460.048	60	14	2
11+060.331	80	11+147.274	60	20	3
11+323.669	71	11+368.699	60	11	2
11+761.068	83	11+861.518	60	23	3
12+144.346	73	12+197.212	60	13	2
13+088.610	73	13+143.363	60	13	2

Tabla 4.1: Diferencia de velocidades entre elementos geométricos adyacentes, condiciones 2 y 3 (sentido creciente de las progresivas)

De acuerdo con la Tabla anterior, extraemos de la Tabla 3.3 los elementos geométricos que corresponden a la condición 3, identificada con el software. La Tabla 4.2 muestra a los elementos geométricos que conforman el primer sector donde se produjo la condición 3.

Element type	Start Station	End Station	Curve Radius (m)	Direction of curve
Tangent	11+039.635	11+147.274		
Curve	11+147.274	11+181.521	22	Right

Tabla 4.2: Elementos geométricos con variación de velocidad de operación mayor o igual a 20 Km/h (Km 11+039.635 – Km 11+181.521)

La Figura 4.1, muestra el sector donde se presenta la primera inconsistencia de tipo 3, identificada en el análisis en el sentido creciente de las progresivas. Este sector involucra a la tangente que se inicia en la progresiva 11+039.835 y a la curva que se inicia en la progresiva 11+147.274.

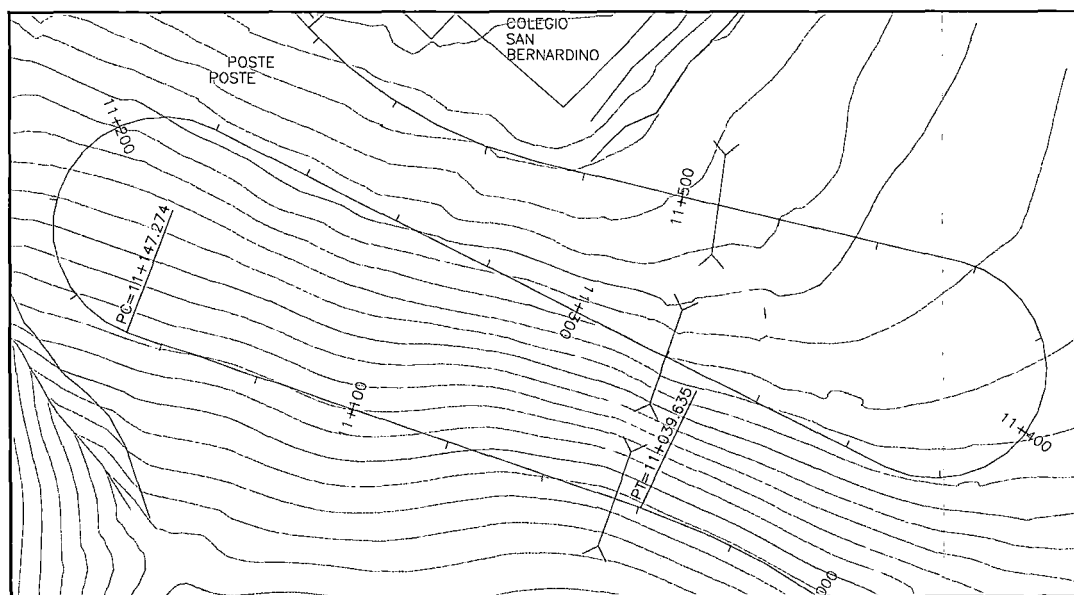


Figura 4.1: Primer sector con inconsistencia de condición 3 (Análisis en el sentido creciente de las progresivas)

Como se puede apreciar en la figura, este sector corresponde a una consecución de dos curvas de vuelta, cuyo radio es de 22 metros. Debido a este radio muy bajo, la velocidad en estas curvas es también baja. También es posible apreciar que la tangente inicia en el Km 11+039.635 y finaliza en el Km 11+147.274 representando una longitud de 107.40 metros en tramo recto, debido a esto la velocidad aumenta en la tangente y luego disminuye al aproximarse a la curva de vuelta, generándose de esta forma la variación de 20 Km/h entre elementos geométricos adyacentes.

De acuerdo con la Tabla 4.1, extraemos de la Tabla 3.3 los elementos geométricos que corresponden a la condición 3, identificada con el software. La Tabla 4.3 muestra a los elementos geométricos que conforman el segundo sector donde se produjo la condición 3.

Element type	Start Station	End Station	Curve Radius (m)	Direction of curve
Tangent	11+582.840	11+861.518		
Curve	11+861.518	11+919.084	50	Right

Tabla 4.3: Elementos geométricos con variación de velocidad de operación mayor o igual a 20 Km/h (Km 11+582.840 – Km 11+919.084)

La Figura 4.2, muestra el sector donde se presenta la segunda inconsistencia de tipo 3, identificada en el análisis en el sentido creciente de las progresivas. Este sector involucra a la tangente que se inicia en la progresiva 11+582.840 y a la curva que se inicia en la progresiva 11+861.518.

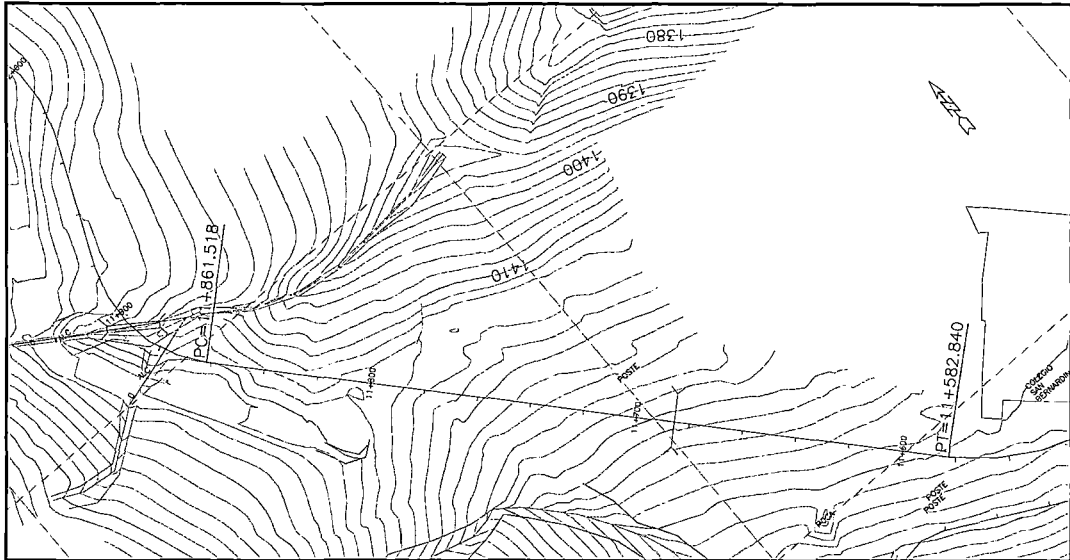


Figura 4.2: Segundo sector con inconsistencia de condición 3 (Análisis en el sentido creciente de las progresivas)

Como se puede apreciar en la figura anterior, la tangente se inicia en el Km 11+582.840 y finaliza en el Km 11+861.518, representando un tramo recto de 278.7. Esto nos indica que el vehículo puede alcanzar gran velocidad en esta tangente y luego disminuir su velocidad para ingresar a la curva siguiente. En este sector se genera una diferencia de velocidad de operación de 23 Km/h, de acuerdo con la Tabla 4.1.

2.2 Sentido decreciente de las progresivas (Del Km 13+500 hacia el Km 9+500)

De manera similar que en el sentido creciente de las progresivas, en base a la Tabla 3.12, se resume en la Tabla 4.4 los sectores con inconsistencias en condición 2 y 3. De ambas condiciones, la condición 3 es la que representa al sector con mayor variación entre las velocidades de operación en tangente y curva y por ende representa a los sectores con mayor probabilidad de ocurrencia de accidentes.

Progresiva de la máxima velocidad en elemento precedente	Máxima velocidad en elemento precedente (Km/h)	Progresiva de inicio de curva	Velocidad en curva (Km/h)	Diferencia de velocidad (Km/h)	Condición
13+303.424	81	13+217.539	60	21	3
13+016.620	73	12+961.867	60	13	2
12+561.151	72	12+511.586	60	12	2
12+074.837	73	12+021.971	60	13	2
11+645.105	81	11+582.840	68	14	2
11+490.958	72	11+443.146	60	12	2
11+264.462	71	11+219.432	60	11	2
10+646.698	82	10+585.534	60	22	3
10+185.944	75	10+141.837	60	15	2

Tabla 4.4: Diferencia de velocidades entre elementos geométricos adyacentes, condiciones 2 y 3 (sentido decreciente de las progresivas)

De acuerdo con la Tabla anterior, extraemos de la Tabla 3.3 los elementos geométricos que corresponden a la condición 3, identificada con el software. La Tabla 4.5 muestra a los elementos geométricos que conforman el primer sector donde se produjo la condición 3.

Element type	Start Station	End Station	Curve Radius (m)	Direction of curve
Curve	13+143.363	13+217.539	30	Left
Tangent	13+217.539	13+336.331		

Tabla 4.5: Elementos geométricos con variación de velocidad de operación mayor o igual a 20 Km/h (Km 13+336.331 – Km 13+143.363)

La Figura 4.3, muestra el sector donde se presenta la primera inconsistencia de tipo 3, identificada en el análisis en el sentido decreciente de las progresivas. Este sector involucra a la tangente que se inicia en la progresiva 13+336.331 y a la curva que se inicia en la progresiva 13+217.539.

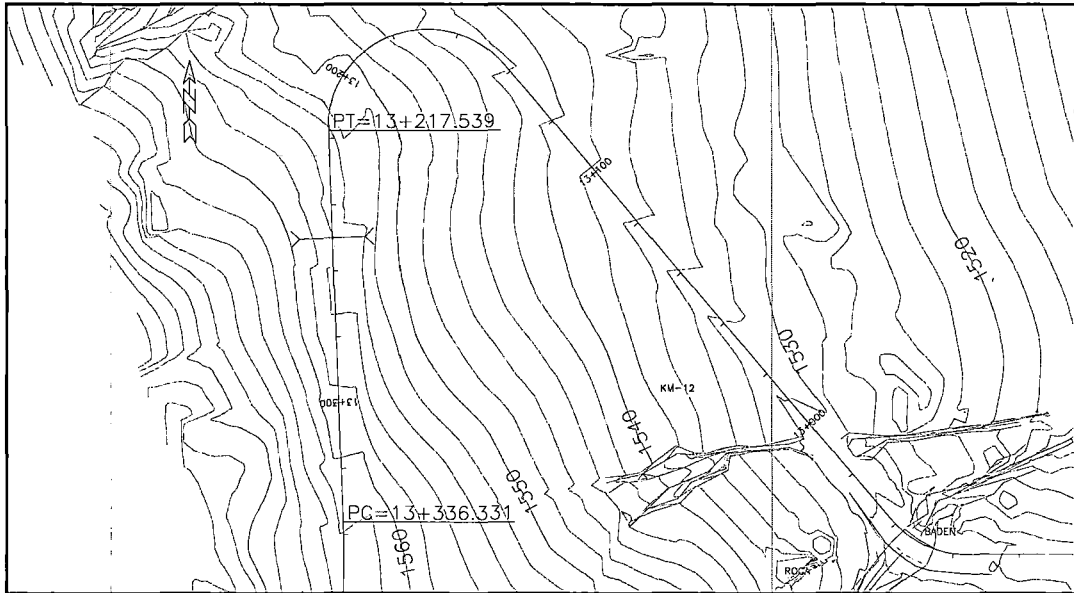


Figura 4.3: Primer sector con inconsistencia de condición 3 (Análisis en el sentido decreciente de las progresivas)

Como se puede apreciar en la figura anterior, la tangente se inicia en el Km 13+336.331 y finaliza en el Km 217.539, representando a un tramo recto de 118.8 metros de longitud. Según la Tabla 4.4, en esta tangente se alcanza una velocidad de 81 Km/h y luego se debe de disminuir dicha velocidad a un valor de 60 Km/h para entrar a la curva de 30 metros de radio. Debido a esto, en este sector se presenta una variación de velocidad de 21 Km/h.

De acuerdo con la Tabla 4.4, extraemos de la Tabla 3.3 los elementos geométricos que corresponden a la condición 3, identificada con el software. La Tabla 4.6 muestra a los elementos geométricos que conforman el segundo sector donde se produjo la condición 3.

Element type	Start Station	End Station	Curve Radius (m)	Direction of curve
Curve	10+460.048	10+585.534	47	Right
Tangent	10+585.534	10+646.698		

Tabla 4.6: Elementos geométricos con variación de velocidad de operación mayor o igual a 20 Km/h (Km 10+646.698 – Km 10+460.048)

La Figura 4.4, muestra el sector donde se presenta la segunda inconsistencia de tipo 3, identificada en el análisis en el sentido decreciente de las progresivas. Este sector involucra a la tangente que se inicia en la progresiva 10+646.698 y a la curva que se inicia en la progresiva 10+585.534.

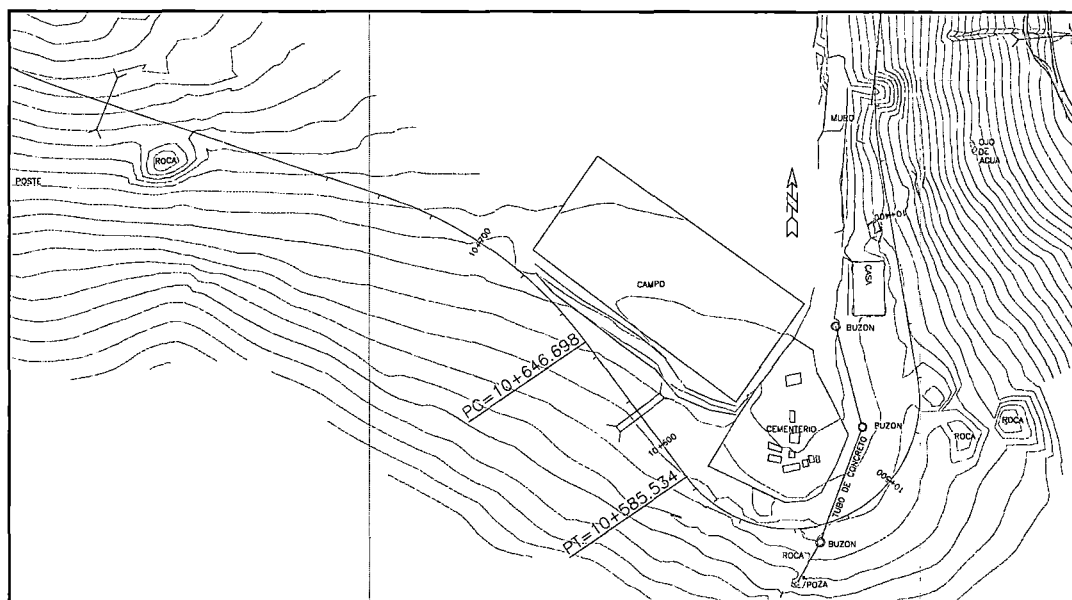


Figura 4.4: Segundo sector con inconsistencia de condición 3 (Análisis en el sentido decreciente de las progresivas)

Como se puede apreciar en la figura anterior, la tangente se inicia en el Km 10+646.698 y finaliza en el Km 10+585.534, representando a un tramo recto de 61.2 metros. Si bien es cierto esta tangente no es demasiado grande a comparación de los otros casos, la curva que la precede tiene un radio de 150 metros por lo que la velocidad en esta tangente es alta. Debido a esto la velocidad tiene que disminuir de 82 Km/h a un valor de 60 Km/h, generándose así una variación de 22 Km/h, de acuerdo con la Tabla 4.4.

3. Reducción de inconsistencias

Luego de identificado los sectores con inconsistencias en condición 3 (variación de velocidad de operación mayor o igual a 20 Km/h) en ambos sentidos del análisis, se procederá a analizar el origen de esta alta variación y la manera como reducirla.

Debido a que el perfil de velocidad depende directamente de la configuración geométrica de la vía, la primera alternativa será modificarla convenientemente en los sectores con inconsistencia en condición 3, para así reducir la brecha entre las velocidades en elementos geométricos adyacentes.

3.1 Variación del diseño geométrico de los sectores con inconsistencia en condición 3

La alternativa más efectiva para modificar el perfil de velocidad calculado por el software es cambiando la configuración geométrica de los sectores identificados como inconsistentes, especialmente la inconsistencia de condición 3 por ser la más crítica. Analizando los valores de las coordenadas del perfil de velocidad es posible identificar la causa de la diferencia entre velocidades de operación entre tangente y curva, esto dará la idea del cambio requerido en el alineamiento para acortar la diferencia entre las velocidades.

El rediseño se realizará respetando los parámetros mínimos de diseño establecidos por el estudio definitivo de la carretera, el cual fue realizado en base a la Norma de Diseño Geométrico de Carreteras DG – 2001.

3.1.1 Sentido creciente de las progresivas

En la Figura 4.1 se observó el sector donde se identificó el primer caso de inconsistencia de condición 3, luego del análisis en el sentido creciente de las progresivas.

En la Tabla 3.7 (Coordenadas del perfil de velocidad en el sentido creciente de las progresivas) se puede ver que la velocidad al inicio de la tangente es de 78 Km/h en el Km 11+039.385, se incrementa a 80 Km/h en el Km 11+060.381 y finalmente disminuye hasta 60 Km/h al inicio de la primera curva de vuelta en el Km 11+147.274.

Esto permite notar que sucedió lo representado por el Caso “B” en la Figura 2.23, en donde se parte de una valor de velocidad determinada en una curva “ V_n ” y ésta va en aumento hasta una velocidad “ V_a ” y finalmente desciende a la

velocidad de la siguiente curva “ V_{n+1} ”. De acuerdo con esto, la velocidad “ V_n ” sería de 78 Km/h, “ V_a ” sería de 80 Km/h y “ V_{n+1} ” sería de 60 Km/h.

La manera de disminuir la variación de 20 Km/h que hay entre la velocidad de 80 Km/h en el Km 11+060.381 y 60 Km/h en el Km 11+147.274, sería disminuyendo la longitud de la tangente para poder llegar al caso “C” de la Figura 2.23. En este caso mencionado, la velocidad “ V_n ” simplemente disminuye hasta la velocidad “ V_{n+1} ”, ya que la longitud de la tangente no es la suficiente para permitir una aceleración y desaceleración continuadas y simplemente se genera desaceleración.

Por lo tanto será necesario reducir la longitud de la tangente que precede a la primera curva de radio 22 metros. El cambio propuesto se presenta en la Figura 4.5, en este cambio simplemente se desplaza la curva de vuelta con el fin de reducir la tangente de entrada.

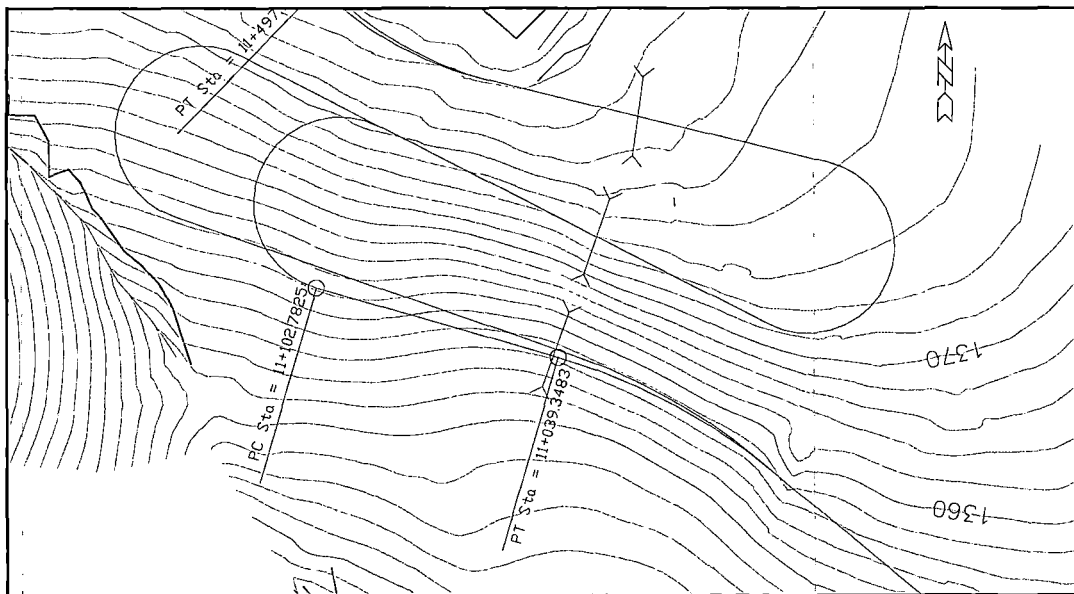


Figura 4.5: Cambio de alineamiento del primer sector con inconsistencia de condición 3 (Análisis en el sentido creciente de las progresivas)

En la Figura 4.2, se observó el segundo sector donde se produjo una inconsistencia de condición 3, luego del análisis en el sentido creciente de las progresivas.

Analizando la Tabla 3.7, se observa que la velocidad al inicio de la tangente es de 66 Km/h en el Km 11+582.840, luego aumenta hasta un valor de 83 Km/s en el Km 11+761.068 y finalmente desciende hasta 60 Km/h en el Km 11+861.518.

Esto indica que en este sector ocurre lo mismo que se menciona para el caso anterior. Por lo tanto la alternativa sería disminuir la longitud de la tangente, sin embargo esto no serviría de mucho ya que la tangente tiene una longitud mayor a 200 metros. Una mejor alternativa es la que se presenta en la Figura 4.6, en donde se propone incrementar el radio de la curva involucrada para que la velocidad de operación calculada sea superior a los 60 Km/h y de esta forma la diferencia con la velocidad de operación calculada en la tangente disminuiría.

Al aplicar esta alternativa se noto que al aumentar el radio de la curva involucrada se reduce la tangente a la salida de esta, siendo su longitud inferior a la longitud mínima de tangente entre dos curvas de sentido diferente indicada por la norma de diseño DG – 2001. Por este motivo se modifico el PI y el radio de la curva siguiente a la analizada.

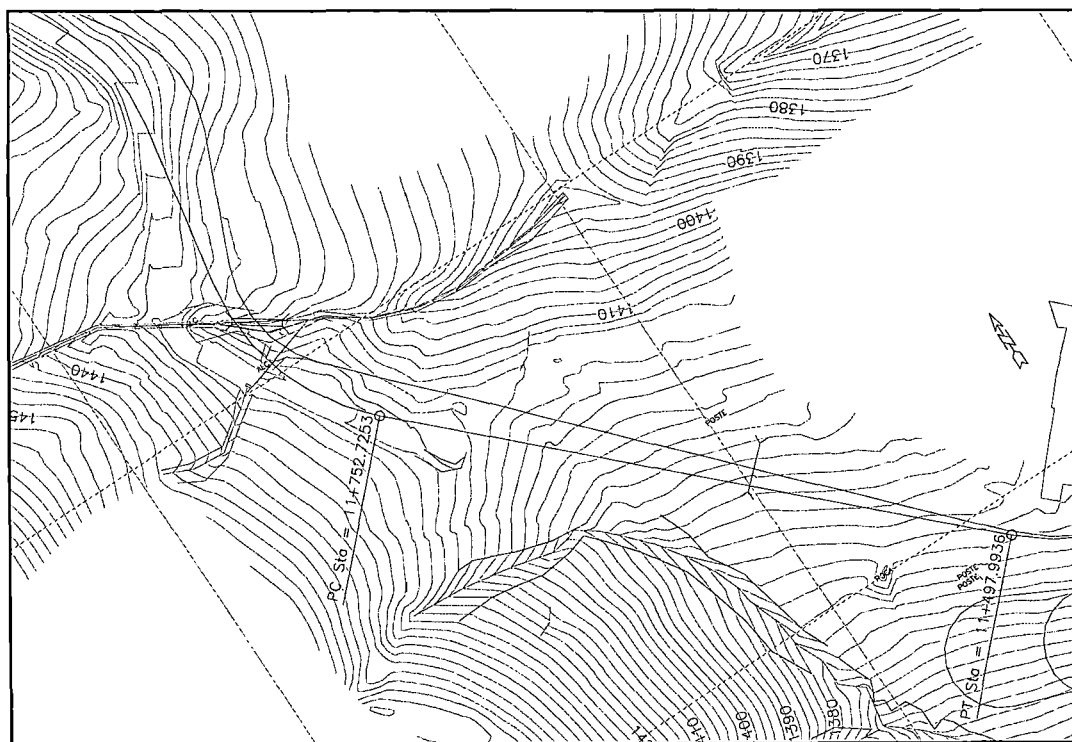


Figura 4.6: Cambio de alineamiento del segundo sector con inconsistencia de condición 3 (Análisis en el sentido creciente de las progresivas)

3.1.2 Sentido decreciente de las progresivas

En la Figura 4.3, se observó el primer sector donde se produjo una inconsistencia de condición 3, luego del análisis en el sentido decreciente de las progresivas.

Analizando la Tabla 3.10, se observa que la velocidad al inicio de la tangente es de 79 Km/h en el Km 13+336.331, luego aumenta hasta un valor de 81 Km/s en el Km 13+308.424 y finalmente desciende hasta 60 Km/h en el Km 13+217.539.

Esto indica que sucede lo mismo que en los dos casos de inconsistencia en el sentido creciente de las progresivas, debido a que la longitud de la tangente involucrada permite que el vehículo incremente su velocidad hasta 81 Km/h y luego la disminuya hasta los 60 Km/h.

En este sector el trazo original trata de pegarse a la carretera existente, con el objetivo de reducir los costos de construcción de la vía. Con esta premisa se puede observar que para poder reducir la diferencia de velocidad de operación entre la tangente y la curva, cuyo radio es 30 metros, se tendría que incrementar de manera significativa el radio. Sin embargo, esto sería casi imposible ya que nos alejaríamos mucho más de la vía existente, y se tendría que construir estructuras de concreto que resultarían costosas además de que la pendiente longitudinal aumentaría a más de 10%.

Otra alternativa sería la de reducir la velocidad en la tangente, para esto se tendría que reducir el radio de la curva anterior a la analizada. Esto último no sería posible ya que el ángulo de deflexión de la curva anterior a la analizada es pequeño, por lo tanto un radio pequeño generaría una longitud de curva pequeña.

La Figura 4.7 muestra la alternativa tomada. Esta alternativa trata de acortar la tangente a fin de evitar que la velocidad con la que sale de la curva anterior a la analizada se incremente y simplemente disminuya hasta los 60 Km/h de la curva de 30 metros de radio.

En el nuevo análisis que se practicará en el siguiente ítem, se apreciara si es que este cambio no tan significativo surte efecto en el perfil de velocidad. De no suceder lo que se espera, simplemente se optara por la colocación de una señalización que establecerá una velocidad máxima de circulación.

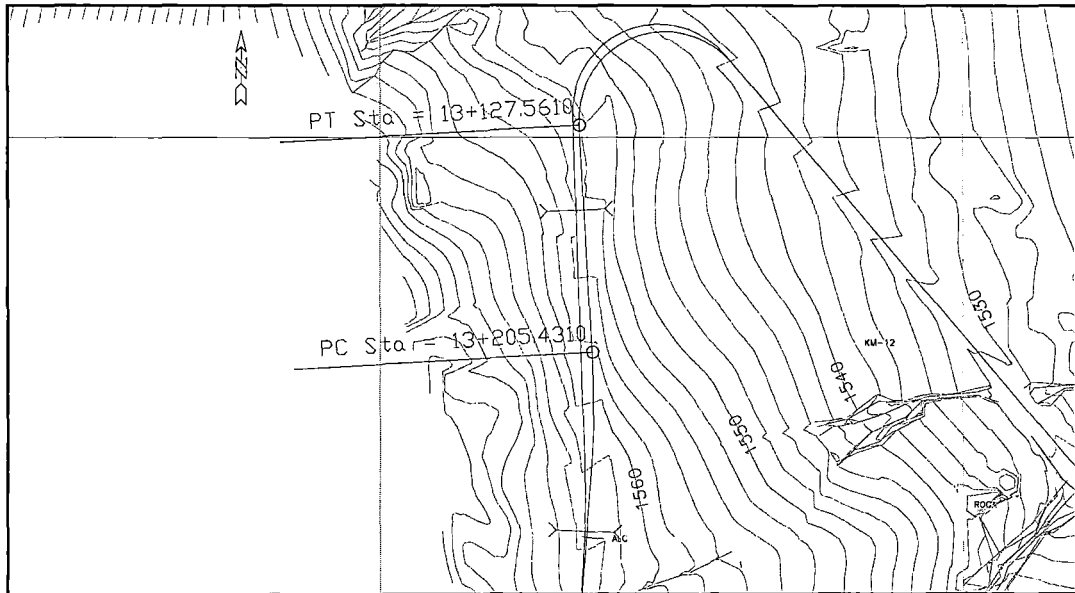


Figura 4.7: Cambio de alineamiento del primer sector con inconsistencia de condición 3 (Análisis en el sentido decreciente de las progresivas)

En la Figura 4.4, se observó el segundo sector donde se produjo una inconsistencia de condición 3, luego del análisis en el sentido decreciente de las progresivas.

Analizando la Tabla 3.10, se observa que la velocidad al inicio de la tangente es de 82 Km/h en el Km 10+646.698 y luego disminuye hasta 60 Km/h en el Km 10+585.534, inicio de la curva de 47 metros de radio.

En este caso, la variación de velocidad mayor a 20 Km/h no se origina debido a que la longitud de la tangente permite un incremento de la velocidad con que sale de la curva anterior a la analizada. Lo que sucede es que las dos curvas antes de la analizada tienen radios de 200 y 150 metros, según la Tabla 3.3, y para estos radios que son relativamente grandes la velocidad de operación calculada es también grande. Entonces la velocidad de operación ya viene con

un valor alto y luego tiene que disminuirse al ingresar a la curva con radio 47 metros, esto genera que se deba disminuir la velocidad en más de 20 Km/h.

Por este motivo se plantea reducir el radio de la curva que precede a la analizada de 150 metros a 100 metros e incrementar el radio de 47 metros de la curva analizada a 55 metros.

La Figura 4.8, muestra la forma como varia el trazo luego de los cambios explicados.

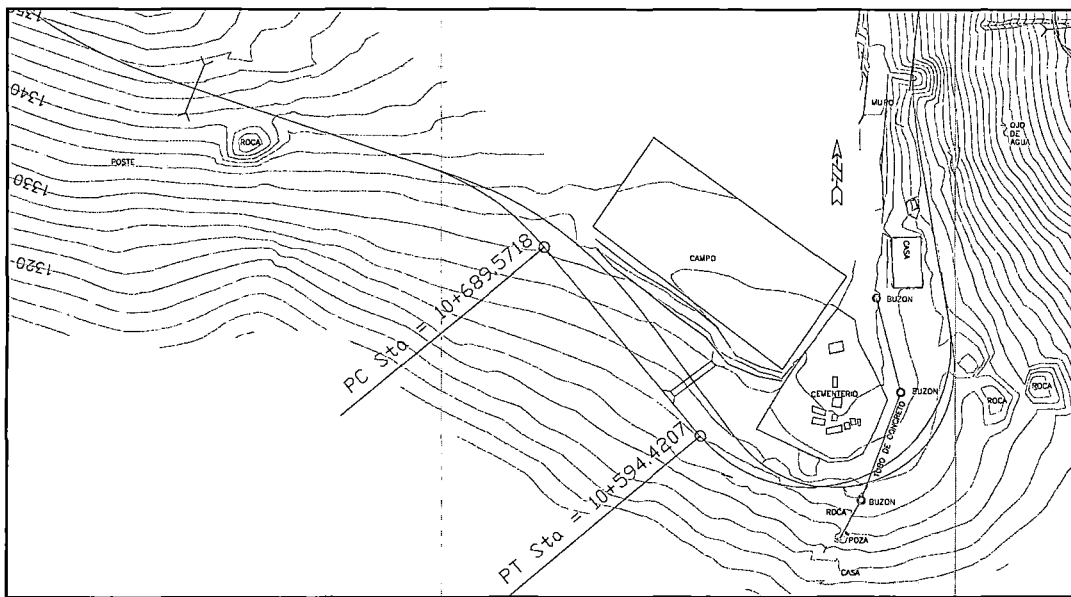


Figura 4.8: Cambio de alineamiento del primer sector con inconsistencia de condición 3 (Análisis en el sentido decreciente de las progresivas)

4. Análisis de consistencia del nuevo trazo

Rediseñado el alineamiento horizontal de los sectores con inconsistencias, se calculara los perfiles de velocidad en sentido creciente y decreciente de las progresivas. El diseño del perfil no sufrió grandes cambios a fin de poder comparar ambos diseños antes y después de los cambios efectuados en la planta.

De manera similar al análisis realizado al trazo original en el capítulo III, procedemos a colocar la data en el formato necesario para ingresarla en las Tablas de alineamiento horizontal y vertical del software.

La Tabla 4.7, muestra la data del alineamiento horizontal nuevo.

Element type	Start Station	End Station	Curve Radius (m)	Direction of curve
tangent	9+500.000	9+510.259		
curve	9+510.259	9+540.250	50	left
tangent	9+540.250	9+574.432		
curve	9+574.432	9+591.942	60	left
tangent	9+591.942	9+616.307		
curve	9+616.307	9+635.402	60	right
tangent	9+635.402	9+657.599		
curve	9+657.599	9+679.572	200	left
tangent	9+679.572	9+700.861		
curve	9+700.861	9+738.606	60	right
tangent	9+738.606	9+786.421		
curve	9+786.421	9+819.718	60	right
tangent	9+819.718	9+861.068		
curve	9+861.068	9+890.726	70	right
tangent	9+890.726	9+918.627		
curve	9+918.627	9+970.744	25	left
tangent	9+970.744	10+062.875		
curve	10+062.875	10+141.837	35	left
tangent	10+141.837	10+185.944		
curve	10+185.944	10+269.754	200	right
tangent	10+269.754	10+338.525		
curve	10+338.525	10+380.772	150	left
tangent	10+380.772	10+450.441		
curve	10+450.441	10+594.421	55	right
tangent	10+594.421	10+689.572		
curve	10+689.572	10+745.103	100	left
tangent	10+745.103	10+855.151		
curve	10+855.151	10+931.193	200	right
tangent	10+931.193	10+976.440		
curve	10+976.440	11+039.348	150	left
tangent	11+039.348	11+102.782		
curve	11+102.782	11+143.572	22	right
tangent	11+143.572	11+143.612		
curve	11+143.612	11+176.092	22	right
tangent	11+176.092	11+286.086		
curve	11+286.086	11+322.042	22	left
tangent	11+322.042	11+322.147		

Element type	Start Station	End Station	Curve Radius (m)	Direction of curve
curve	11+322.147	11+360.534	22	left
tangent	11+360.534	11+449.389		
curve	11+449.389	11+497.994	90	right
tangent	11+497.994	11+752.725		
curve	11+752.725	11+841.164	90	right
tangent	11+841.164	11+908.685		
curve	11+908.685	11+966.069	80	left
tangent	11+966.069	12+110.929		
curve	12+110.929	12+143.122	50	right
tangent	12+143.122	12+182.202		
curve	12+182.202	12+208.618	90	right
tangent	12+208.618	12+221.061		
curve	12+221.061	12+266.557	25	left
tangent	12+266.557	12+295.030		
curve	12+295.030	12+330.626	40	left
tangent	12+330.626	12+393.137		
curve	12+393.137	12+424.263	50	left
tangent	12+424.263	12+588.561		
curve	12+588.561	12+638.576	35	right
tangent	12+638.576	12+638.720		
curve	12+638.720	12+691.232	35	right
tangent	12+691.232	12+724.211		
curve	12+724.211	12+787.356	40	left
tangent	12+787.356	12+848.446		
curve	12+848.446	12+874.544	30	right
tangent	12+874.544	13+052.687		
curve	13+052.687	13+127.561	30	left
tangent	13+127.561	13+205.431		
curve	13+205.431	13+245.036	300	right
tangent	13+245.036	13+297.516		
curve	13+297.516	13+324.219	120	left
tangent	13+324.219	13+406.938		

Tabla 4.7: Datos del alineamiento horizontal del trazo modificado.

La Tabla 4.8, muestra la data del alineamiento vertical nuevo. Cabe mencionar que se trato de mantener el alineamiento vertical original, sin embargo fue preciso ajustar algunas curvas verticales, ya que el cambio en el alineamiento horizontal conllevaba a una nueva configuración del terreno en este nuevo trazo.

Type	VPI Start Station	Back grade (%)	Back length (m)	Forward grade (%)	Forward length (m)
VPI	9+560.0	9.36	40	8.59	40
VPI	10+170.0	8.59	40	0.43	40
VPI	10+310.0	0.43	30	7.27	30
VPI	10+430.0	7.27	40	1.03	40
VPI	10+610.0	1.03	40	8.12	40
VPI	11+180.0	8.12	60	2.54	60
VPI	11+330.0	2.54	50	10.00	50
VPI	12+129.5	10.00	0	9.30	0
VPI	12+234.0	9.30	30	9.91	30
VPI	12+390.0	9.91	0	10.00	0
VPI	12+870.0	10.00	30	4.59	30
VPI	12+950.0	4.59	30	9.90	30
VPI	13+020.0	9.90	30	9.33	30

Tabla 4.8: Datos del alineamiento vertical del trazo modificado.

Los demás datos necesarios como velocidad inicial de análisis, velocidad de diseño, etc. Se mantuvieron igual que en el caso del análisis realizado en el capítulo III.

En el anexo 03 se adjunta los planos en planta y perfil del tramo con las modificaciones analizadas anteriormente.

Culminado el ingreso de todos los datos requeridos por el análisis, se procedió a evaluar el nuevo trazo con el software IHSDM de la misma manera que se hizo para el trazo original.

La Figura 4.9 muestra el perfil de velocidad en el sentido creciente de las progresivas obtenido por el software luego del análisis. Se puede ver que las banderas rojas, que representaban a los sectores con inconsistencia de condición 3, desaparecieron convirtiéndose en amarillas.

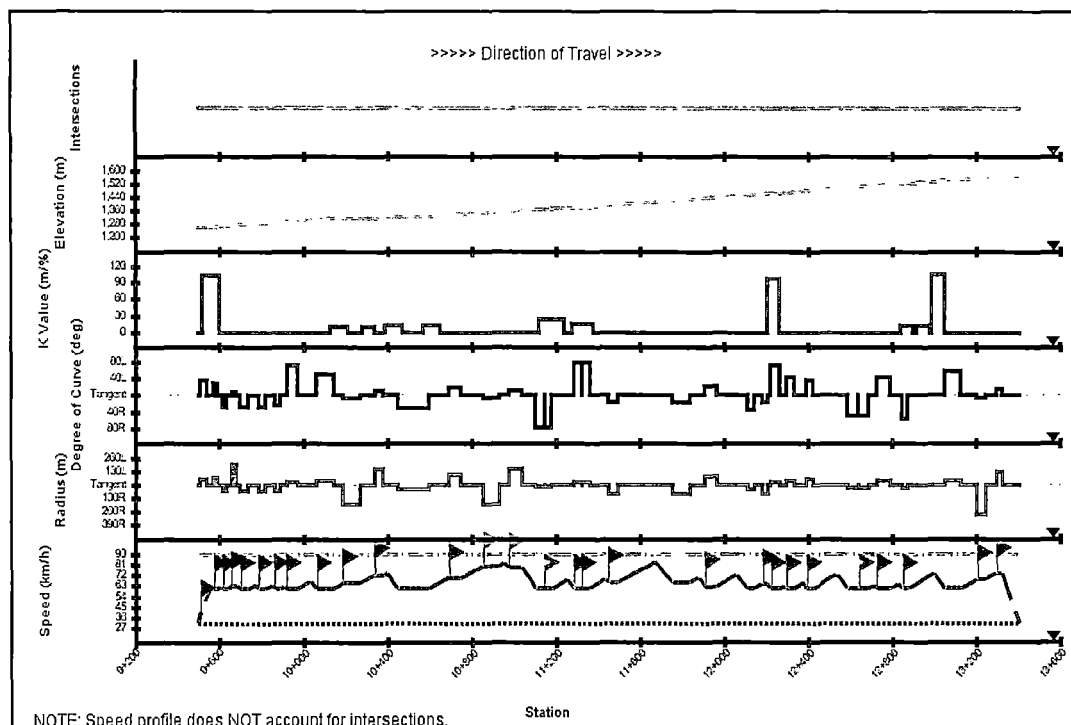


Figura 4.9: Perfil de velocidad obtenido por el software IHSDM para el nuevo trazo (sentido creciente de las progresivas)

La Tabla 4.9, muestra la condición en que se encuentran los diferentes sectores de la vía en donde se realizó el análisis, en el sentido creciente de las progresivas, y se calculó la variación de la velocidad de operación entre elementos adyacentes (tangente y curva). Como se puede ver, los dos sectores que se hallaban en la condición 3, ahora se encuentran en una condición 2, que no es la mejor, pero que mejoró con respecto a la anterior.

De esta manera se puede afinar más los cambios en la geometría de la vía para mejorar la consistencia del trazo, por supuesto esta variación del trazo se verá limitada por la topografía y/u otras condiciones que pudieran presentarse.

Progresiva de la máxima velocidad en elemento precedente	Máxima velocidad en elemento precedente (Km/h)	Progresiva de inicio de curva	Velocidad en curva (Km/h)	Diferencia de velocidad (Km/h)	Condición
9+510.259	38	9+510.259	38	0	1
9+565.473	61	9+574.432	60	1	1
9+608.957	62	9+616.307	60	2	1
9+657.599	63	9+657.599	63	0	1
9+687.743	63	9+700.861	60	3	1
9+771.996	64	9+786.421	60	4	1
9+848.594	63	9+861.068	60	3	1
9+910.210	62	9+918.627	60	2	1
10+035.082	67	10+062.875	60	7	1
10+185.944	65	10+185.944	65	0	1
10+338.525	72	10+338.525	72	0	1
10+395.371	73	10+450.441	60	13	2
10+686.153	70	10+689.572	69	1	1
10+855.151	79	10+855.151	79	0	1
10+958.726	82	10+976.440	78	4	1
11+039.348	78	11+102.783	60	18	2
11+143.600	60	11+143.612	60	0	1
11+252.904	68	11+286.086	60	8	1
11+322.115	60	11+322.147	60	0	1
11+438.964	69	11+449.389	66	3	1
11+675.879	83	11+752.725	66	17	2
11+877.750	70	11+908.685	62	8	1
12+061.413	72	12+110.929	60	12	2
12+182.202	64	12+182.202	64	0	1
12+208.618	64	12+221.061	60	4	1
12+286.440	62	12+295.030	60	2	1
12+374.279	65	12+393.137	60	5	1
12+538.996	72	12+588.561	60	12	2
12+638.677	60	12+638.720	60	0	1
12+714.262	63	12+724.211	60	3	1
12+830.017	65	12+848.446	60	5	1
12+998.945	73	13+052.687	60	13	2
13+205.431	68	13+205.431	68	0	1
13+297.516	73	13+297.516	73	0	1

Tabla 4.9: Diferencia de velocidades entre elementos geométricos adyacentes del trazo modificado (sentido creciente de las progresivas)

La Figura 4.10 muestra el perfil de velocidad en el sentido decreciente de las progresivas obtenido por el software luego del análisis. Se puede ver que una de las banderas rojas, que representaban a un sector con inconsistencia de condición 3, desapareció convirtiéndose en amarilla. Sin embargo aun permanece un sector con inconsistencia en condición 3, debido a que en ese lugar la topografía no permite realizar un cambio sustancial en la geometría que permita variar la velocidad de operación calculada. Por este motivo es que en este sector deberá de colocarse obligatoriamente señalización para el control de la velocidad.

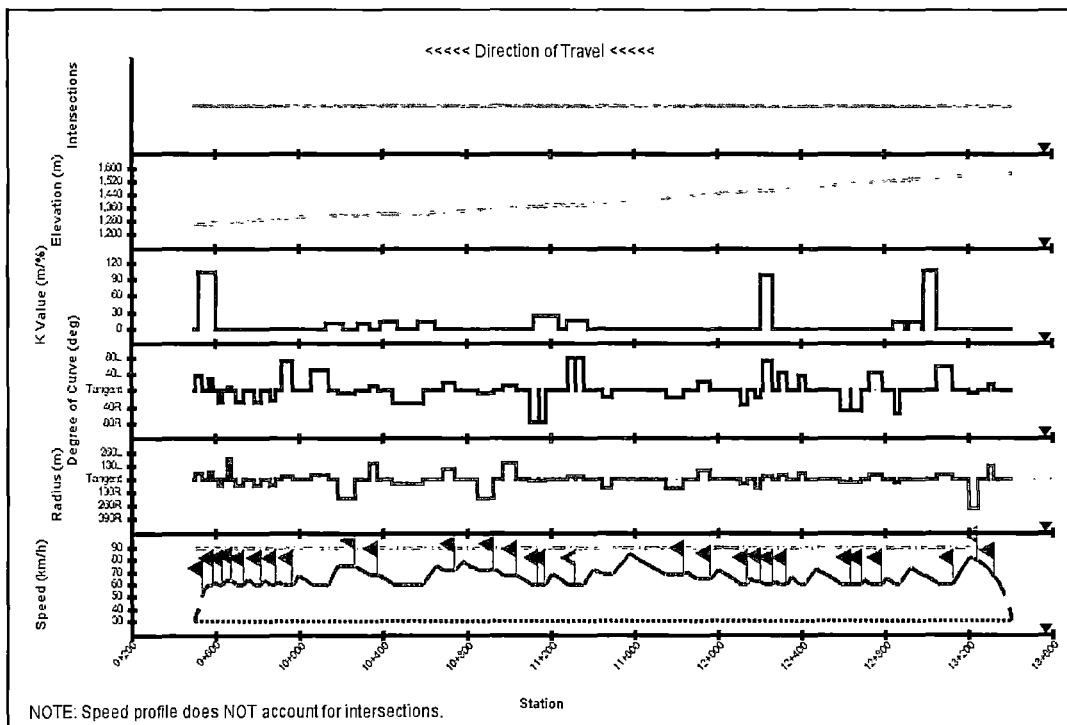


Figura 4.10: Perfil de velocidad obtenido por el software IHSDM para el nuevo trazo (sentido decreciente de las progresivas)

La Tabla 4.10, muestra la condición en que se encuentran los diferentes sectores de la vía en donde se realizó el análisis, en el sentido decreciente de las progresivas, y se calculó la variación de la velocidad de operación entre elementos adyacentes (tangente y curva). Como se puede ver, el segundo sector que se hallaba en la condición 3, ahora se encuentran en una condición 2, que no es la mejor, pero que mejoró con respecto a la anterior. Mientras que el primer sector inconsistente no varió debido a que la variación de la geometría no fue sustancial por cuestiones topográficas y económicas.

Progresiva de la máxima velocidad en elemento precedente	Máxima velocidad en elemento precedente (Km/h)	Progresiva de inicio de curva	Velocidad en curva (Km/h)	Diferencia de velocidad (Km/h)	Condición
13+324.219	66	13+324.219	66	0	1
13+245.036	79	13+245.036	79	0	1
13+205.431	81	13+127.561	60	21	3
12+928.285	73	12+874.544	60	13	2
12+805.786	65	12+787.356	60	5	1
12+701.181	63	12+691.232	60	3	1
12+638.620	60	12+638.576	60	0	1
12+473.828	72	12+424.263	60	12	2
12+349.484	65	12+330.626	60	5	1
12+275.146	62	12+266.557	60	2	1
12+208.618	61	12+208.618	61	0	1
12+158.665	64	12+143.122	60	4	1
12+000.081	72	11+966.069	64	8	1
11+849.416	70	11+841.164	68	2	1
11+574.840	84	11+497.994	68	16	2
11+409.145	72	11+360.534	60	12	2
11+322.073	60	11+322.042	60	0	1
11+209.275	68	11+176.093	60	8	1
11+143.584	60	11+143.572	60	0	1
11+039.348	67	11+039.348	67	0	1
10+931.193	72	10+931.193	72	0	1
10+779.022	79	10+745.103	71	7	1
10+655.192	75	10+594.421	60	15	2
10+380.772	68	10+380.772	68	0	1
10+269.754	74	10+269.754	74	0	1
10+185.944	74	10+141.837	60	14	2
9+998.538	67	9+970.744	60	7	1
9+899.143	62	9+890.726	60	2	1
9+832.192	63	9+819.718	60	3	1
9+753.031	64	9+738.606	60	4	1
9+679.572	62	9+679.572	62	0	1
9+648.521	63	9+635.402	60	3	1
9+599.293	62	9+591.943	60	2	1
9+574.432	60	9+540.250	52	8	1

Tabla 4.10: Diferencia de velocidades entre elementos geométricos adyacentes del trazo modificado (sentido decreciente de las progresivas)

En el anexo 04 se adjunta el reporte de resultados obtenidos por el software IHSDM, luego del análisis del tramo modificado.

5. Señalización para el control de la velocidad

Como se pudo evidenciar en el análisis anterior, existe un sector donde no se logro reducir la inconsistencia de condición 3, debido a que no es posible variar demasiado la geometría en ese sector. La otra alternativa para poder manejar el tema de la gran variación de la velocidad de operación es la señalización.

La colocación de la señalización a lo largo del tramo se realizará en el sector que aún presenta una inconsistencia de condición 3 y en aquellos con una inconsistencia de condición 2, que no son las más críticas pero que de todos modos representa una probabilidad de ocurrencia de accidentes.

La señal utilizada para el control de la velocidad de operación es la señal de velocidad máxima. Esta señal es una señal del tipo reguladora. Las señales reguladores tienen por objetivo indicarle al usuario la existencia de limitaciones, restricciones o prohibiciones que norman el uso de la vía.

La Figura 4.11 muestra la señal reguladora R-30 Velocidad máxima. Esta señal será colocada en los lugares donde sea necesario para evitar una gran variación de la velocidad de operación de los vehículos al desplazarse por los sectores identificados como inconsistentes de condición 2 y 3.



Figura 4.11: Señal reguladora R – 30 (Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras, 2000)

De acuerdo con las Tablas 4.1 y 4.4 en la mayoría de casos la velocidad que es superada en más de 10 Km/h tiene un valor de 60 Km/h, por lo tanto la colocación de la señal de velocidad máxima con este valor sería suficiente para evitar incrementos de velocidad en estos sectores.

Las Tablas 4.11 y 4.12 muestran las progresivas en donde se colocarían estas señales.

	Progresiva	Señal
1	10+200	R – 30
2	10+760	R – 30
3	11+520	R – 30
4	12+980	R – 30
5	12+460	R – 30
6	12+900	R – 30

Tabla 4.11: Progresivas de ubicación de señales reglamentarias tipo R – 30
 (Sentido creciente de las progresivas)

	Progresiva	Señal
1	10+320	R – 30
2	10+840	R – 30
3	11+700	R – 30
4	12+560	R – 30
5	13+020	R – 30
6	13+280	R – 30

Tabla 4.12: Progresivas de ubicación de señales reglamentarias tipo R – 30
 (Sentido decreciente de las progresivas)

En el anexo 05 se adjunta los planos de señalización del tramo en análisis, solo se colocaron las señales mencionadas a continuación.

CONCLUSIONES

La operación de los vehículos está supeditada también a las características geométricas de la vía, ya que el conductor efectúa las maniobras necesarias para el control del vehículo de acuerdo con la percepción que tiene del camino.

El cálculo de la velocidad de operación con el software IHSDM puede arrojar resultados que no concuerden con las características de los conductores peruanos debido a que el software aplica modelos desarrollados en base a datos de velocidad en carreteras de los EE.UU. Sin embargo el perfil de velocidades obtenido es de bastante ayuda para el inicio de la aplicación del análisis de consistencia del diseño geométrico.

La velocidad de operación en curvas de radio inferior a los 80 metros es siempre igual a 60 Km/h. Esto debido a que el mínimo valor de velocidad medido en los EE.UU., para desarrollar los modelos de predicción de velocidad, es de 60 Km/h. Obviamente que la velocidad en curvas con radios pequeños, por ejemplo 30 metros, será inferior a los 60 Km/h. Debido a esto, es seguro que la inconsistencia hallada en un sector donde se tiene a una curva de radio inferior a los 80 metros sea mucho más marcada que el calculado por el software IHSDM.

La aplicación del análisis al tramo de prueba se realizó en el supuesto que no existe una intersección con otra vía, que provoque una reducción de velocidad obligatoria. Sin embargo el software contempla esto, y es posible hacer el análisis si se tiene esta situación. Otra alternativa a esto sería la de realizar el análisis dividiendo la carretera en dos tramos, ya que la velocidad en la intersección se podría estimar con un valor constante, el cual puede ser introducido en el software como la velocidad inicial o final de análisis.

El análisis aplicado al tramo de prueba mostró que en total existían cuatro sectores con una inconsistencia de condición 3 (diferencia de velocidad entre elementos adyacentes mayor o igual a 20 Km/h). Estas fueron analizadas para hallar el motivo de esta gran variación y luego se practicó un cambio de alineamiento con el fin de reducir la inconsistencia.

Los sectores inconsistentes identificados fueron reducidos a una inconsistencia de condición 2, a excepción de un sector. La causa de la no reducción de la inconsistencia de este sector se debió a que no fue posible practicar un cambio en el alineamiento por cuestiones topográficas y económicas. Por este motivo se recurrió a la colocación de señalización en este sector y en todos aquellos con una inconsistencia de condición 2, que no es la más crítica pero representa a un cierto grado de peligrosidad.

Luego del rediseño del alineamiento de la carretera, la longitud se redujo en aproximadamente 50 metros. Esto no quiere decir que siempre que se aplique el análisis de consistencia se logrará reducir la longitud de la vía y por ende su costo, ya que pueden existir soluciones que requieren de obras como muros de contención, pontones, puentes, etc. los cuales incrementarían los costos. Por este motivo, en el desarrollo del capítulo IV se trató de variar el alineamiento en lo posible, tratando de no generar la necesidad de obras como las antes mencionadas.

No es suficiente la sola aplicación de las normas de diseño geométrico para obtener como resultado un diseño con una buena seguridad vial, sino que es necesaria la aplicación de métodos de revisión de los diseños con el objetivo de mejorar su desempeño, relativo a la seguridad vial, a lo largo de su vida útil.

La norma de Diseño Geométrico DG – 2001 contiene una sección que se orienta a brindar recomendaciones para una buena coordinación entre el alineamiento horizontal y vertical. Sin embargo el control del cumplimiento de estas recomendaciones no es posible si es que no se cuenta con un software que automatice el proceso. Por esta razón, el análisis de consistencia del diseño geométrico con el software IHSDM se muestra como una alternativa para la revisión de la consistencia del trazado.

RECOMENDACIONES

Se recomienda iniciar el estudio y desarrollo del análisis de consistencia del diseño geométrico en el país para mejorar la seguridad vial de las carreteras en las etapas de planificación de vías nuevas y mejoramiento de aquellas que se encuentran en servicio. Para esto se sugiere establecer vínculos con los países en donde ya se inicio con el desarrollo de modelos propios para el cálculo de los perfiles de velocidad de carreteras, como es el caso de Colombia por ejemplo.

Se recomienda que en una futura actualización de la Norma de Diseño Geométrico de Carreteras DG – 2001 se comiencen a dar directivas para la revisión de la consistencia de los diseños geométricos elaborados en el país.

BIBLIOGRAFÍA

1. AEPO Ingenieros Consultores S.A. “Análisis de la carretera AV-502 con el programa IHSDM Beta v 2.02 (Interactive Highway Safety Design Model)”, España 2002
2. Altamira, Anibal, Graffigna, Alberto, Marcel, Juan. “Herramienta para la Evaluación del Diseño Geométrico de Caminos Rurales”. Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de San Juan. Argentina, 2008.
3. CESEL Ingenieros S.A. “Estudio Definitivo de la Carretera Chilete – San Pablo – Emp. R03N”, Lima – Perú 2007.
4. Consejo Nacional de Seguridad Vial. “Plan Nacional de Seguridad Vial 2007 – 2011”. Lima – Perú 2007.
5. Dirección General de Caminos – Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). “Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (DG – 2001)”, Segunda Edición, Lima – Perú 2001.
6. Fitzpatrick, K., Elefteriadou, L., Harwood, D. W., Collins, J. M., McFadden, J., Anderson, I. B., Krammes, R. A., Irizarry, N., Parma, K. D., Bauer, K. M. and Passetti, K. “Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways”, U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration Report FHWA-RD-99-171, Virginia – United States of America – 2000.
7. Fitzpatrick, K., Wooldridge, M. D., Tsimhoni, O., Collins, J. M., Green, P., Bauer, K. M., Parma, K.D., Koppa, R., Harwood, D. W., Anderson, I., Krammes, R. A. and Poggioli, B. “Alternative Design Consistency Rating Methods for Two-Lane Rural Highways”, U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration Report FHWA-RD-99-172, Virginia – United States of America – 2000

8. Fitzpatrick, K., Anderson, I. B., Bauer, K. M., Collins, J. M., Elefteriadou, L., Green, P., Harwood, D. W., Irizarry, N., Koppa, R., Krammes, R. A., McFadden, J., Parma, K. D., Passetti, K., Poggioli, B., Tsimhoni, O. and Wooldridge, M. D. "Evaluation of Design Consistency Methods for Two-Lane Rural Highways, Executive Summary", U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration Report FHWA-RD-99-173, Virginia – United States of America – 2000.

9. PÉREZ PÉREZ, Ignacio. "Diseño geométrico y accidentes de circulación en carreteras rurales de dos carriles. Estado del arte".

10. SANCHEZ ORDOÑEZ, José Fernando. "La Evaluación de la Consistencia del Diseño Geométrico de Carreteras: Un aporte a la Seguridad Vial", Universidad del Cauca, Popayán – Colombia 2007.

11. U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration. Software Interactive Highway Design Model (IHSDM). United States of America – 2008

ANEXOS

ANEXO 01: Planos de planta y perfil del Estudio Definitivo de la Carretera
Chilete – San pablo – Emp. R03N (Km 9+500 – Km 13+500).

ANEXO 02: Reporte de resultados del análisis de consistencia con el software IHSDM del tramo Km 9+500 – Km 13+500.

Design Consistency Evaluation Report

IHSDM Version: 5.0.2 IHSDM 2008 Release

Report Date: Nov 17, 2009 2:41:59 PM

Name: armando

Organization:

Telephone:

E-Mail:

Project: Tesis (Aug 17, 2009 10:28 PM)

Evaluation: Evaluation 18 (2:41 PM)

Highway Information: Chilete-San Pablo-EmpR03N (v11)

DCM Analysis Vehicle: Passenger Car - Type 5

Vehicle Start Speed: 30 (km/h)

Vehicle End Speed: 30 (km/h)

Table of Contents

GRAPH: Design Consistency Results (increasing stations)

GRAPH: Design Consistency Results (decreasing stations)

TABLE: V85 Speed Profile Coordinates (increasing stations)

TABLE: V85 Speed Profile Coordinates (decreasing stations)

TABLE: Design Speed Assumption Check (increasing stations)

TABLE: Design Speed Assumption Check (decreasing stations)

TABLE: Speed Differential of Adjacent Design Elements Check (increasing stations)

TABLE: Speed Differential of Adjacent Design Elements Check (decreasing stations)

Design Consistency Results (increasing stations)

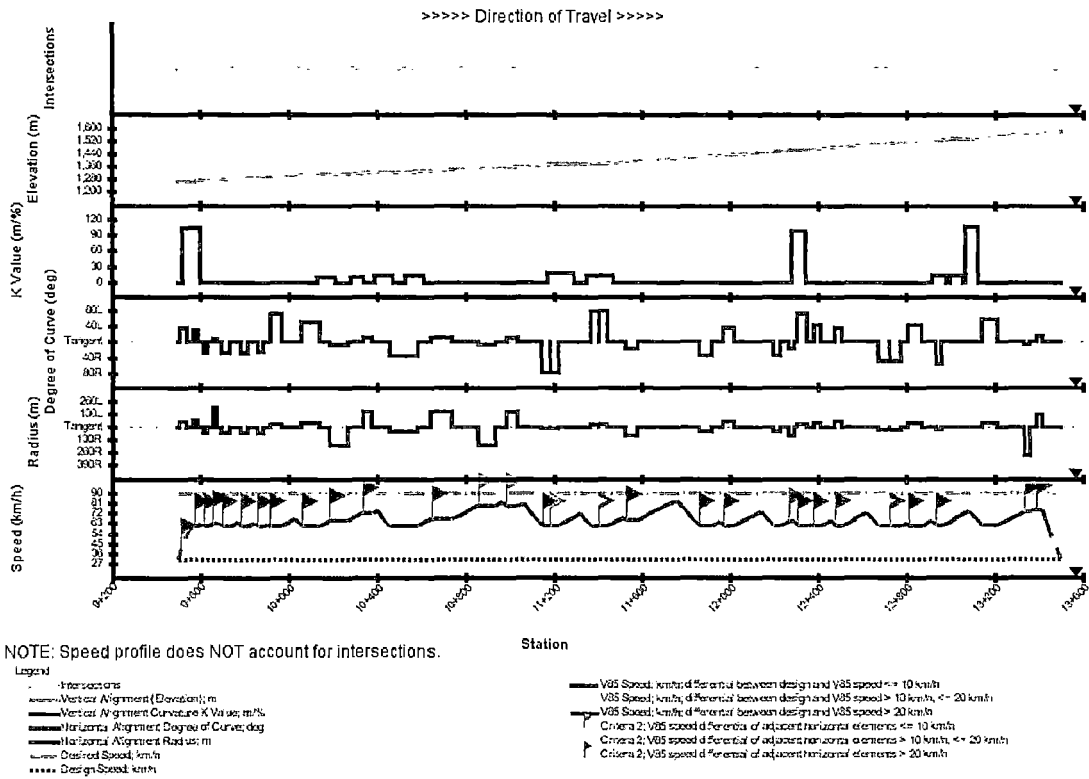
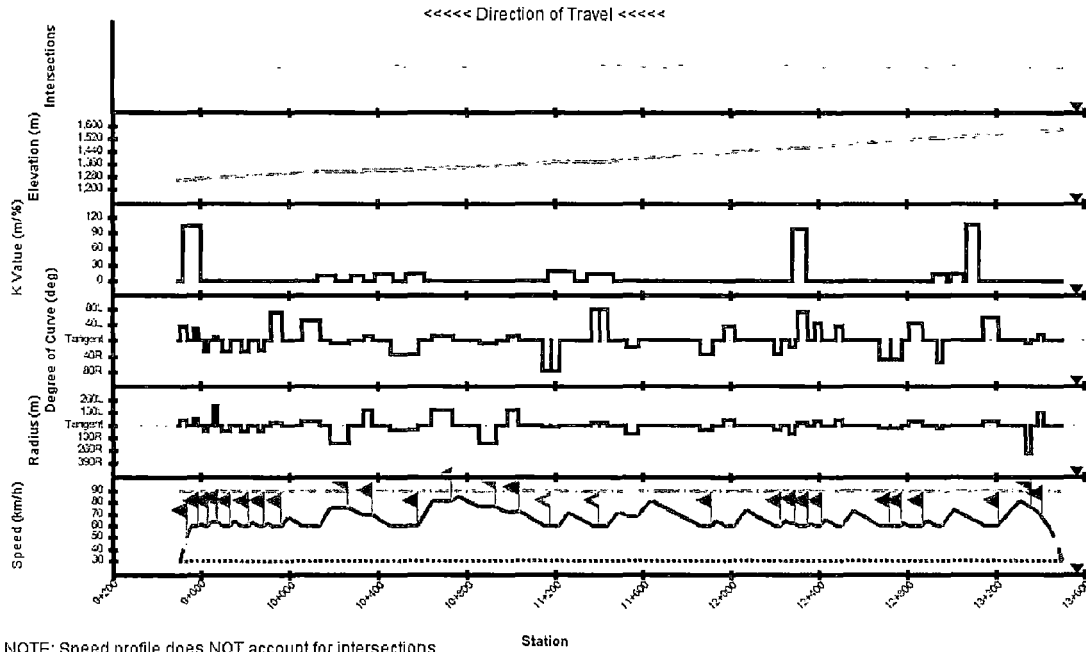


Figure 1 1: Design Consistency Results (increasing stations)

Design Consistency Results (decreasing stations)



Legend

- Intersections
- Vertical Alignment (Elevation): m
- Vertical Alignment Curvature K Value: m/s
- Horizontal Alignment Degree of Curve: deg
- Horizontal Alignment Radius: m
- Design Speed: km/h
- Design Speed: km/h
- V85 Speed: km/h differential between design and V85 speed <= 10 km/h
- V85 Speed: km/h differential between design and V85 speed > 10 km/h, <= 20 km/h
- V85 Speed: km/h differential between design and V85 speed > 20 km/h
- Criteria 2: V85 speed differential of adjacent horizontal elements <= 10 km/h
- Criteria 2: V85 speed differential of adjacent horizontal elements > 10 km/h, <= 20 km/h
- Criteria 2: V85 speed differential of adjacent horizontal elements > 20 km/h

Figure 2 1: Design Consistency Results (decreasing stations)

V85 Speed Profile Coordinates (increasing stations)

Table 1 V85 Speed Profile Coordinates (increasing stations)

Station	Speed (km/h)
9+500.000	30
9+509.416	38
9+510.259	38
9+520.881	45
9+534.174	51
9+540.250	53
9+549.097	56
9+574.432	60
9+583.147	60
9+591.943	60
9+616.307	60
9+621.841	60
9+635.402	60
9+642.625	61
9+657.599	63
9+664.229	63
9+679.572	63
9+700.861	60
9+738.606	60
9+771.996	64
9+781.780	61
9+786.421	60
9+806.667	60
9+819.718	60
9+848.594	63
9+856.667	61
9+861.068	60
9+881.667	60
9+890.726	60
9+918.627	60
9+970.744	60
10+035.082	67
10+056.667	62
10+062.875	60
10+141.837	60
10+185.944	65
10+269.754	65
10+338.525	72
10+356.667	72
10+380.772	72
10+402.080	74
10+460.048	60
10+585.534	60
10+646.698	67
10+737.810	67
10+859.357	78
10+935.399	78
10+969.259	81
10+981.667	79
10+984.887	78
11+039.635	78
11+060.381	80
11+147.274	60
11+156.667	60
11+181.521	60
11+181.580	60
11+181.606	60
11+219.432	60
11+323.669	71
11+368.699	60
11+381.667	60
11+404.654	60
11+404.728	60
11+404.760	60
11+443.146	60
11+529.352	66
11+582.840	66
11+761.068	83
11+861.518	60

11+919.084	60
11+956.451	64
11+956.667	64
11+972.593	60
12+021.971	60
12+144.346	73
12+197.212	60
12+231.771	60
12+256.667	63
12+269.525	64
12+281.667	64
12+295.941	64*
12+306.667	61
12+308.385	60
12+331.667	60
12+353.880	60
12+373.764	62
12+381.667	60
12+382.353	60
12+406.667	60
12+417.949	60
12+480.461	60
12+511.586	60
12+626.320	72
12+675.884	60
12+725.900	60
12+726.000	60
12+726.044	60
12+778.555	60
12+801.585	63
12+806.667	61
12+811.534	60
12+874.680	60
12+917.340	65
12+931.667	61
12+935.770	60
12+956.667	60
12+961.867	60
13+088.610	73
13+143.363	60
13+217.539	60
13+336.331	73
13+356.667	73
13+363.867	73
13+391.583	74
13+406.667	74
13+416.254	74
13+431.667	67
13+500.000	30

* The deceleration rate predicted from 12+295.941 to Station 12+308.385 (in the direction of increasing stations) is greater than the approximated comfortable deceleration rate, as determined by data collected to develop the Design Consistency Module (as referenced in FHWA Report FHWA-RD-99-171, "Speed prediction for Two-Lane Rural Highways"). See V85 Speed Profile Coordinates of the Design Consistency Module Engineer's Manual for additional information.

V85 Speed Profile Coordinates (decreasing stations)

Table 2 V85 Speed Profile Coordinates (decreasing stations)

Station	Speed (km/h)
13+500.000	30
13+499.999	30
13+490.583	38
13+479.118	45
13+465.825	51
13+450.903	56
13+434.526	61
13+416.852	66
13+416.254	66
13+391.583	71
13+363.867	75
13+336.331	79
13+308.424	81
13+217.539	60
13+143.363	60
13+016.620	73
12+961.867	60
12+943.332	60
12+935.770	60
12+874.680	60
12+811.534	60
12+778.555	60
12+726.044	60
12+725.943	60
12+725.900	60
12+675.884	60
12+561.151	72
12+511.586	60
12+493.332	60
12+480.461	60
12+436.807	65
12+418.332	60
12+417.949	60
12+393.332	60
12+382.353	60
12+353.880	60
12+308.385	60
12+295.941	61
12+293.332	61
12+269.525	61
12+246.914	64
12+243.332	63
12+231.771	60
12+218.332	60
12+197.212	60
12+074.837	73
12+021.971	60
11+972.593	60
11+919.084	60
11+861.518	60
11+645.105	81
11+582.840	68
11+529.352	68
11+490.958	72
11+443.146	60
11+418.332	60
11+404.760	60
11+404.686	60
11+404.654	60
11+393.332	60
11+368.699	60
11+264.462	71
11+243.332	66
11+219.432	60
11+181.606	60
11+181.546	60
11+181.521	60
11+168.332	60
11+147.274	60

11+039.635	71
10+984.887	71
10+935.399	76
10+859.357	76
10+756.008	85
10+743.332	83
10+737.810	82
10+646.698	82*
10+585.534	60
10+460.048	60
10+380.772	69
10+338.525	69
10+269.754	75
10+185.944	75*
10+141.837	60
10+062.875	60
9+998.538	67
9+993.332	66
9+970.744	60
9+918.627	60
9+899.143	62
9+893.332	61
9+890.726	60
9+868.332	60
9+861.068	60
9+819.718	60
9+786.421	60
9+753.031	64
9+743.332	61
9+738.606	60
9+718.332	60
9+700.861	60
9+693.332	61
9+679.572	62
9+668.332	62
9+657.599	62
9+648.521	63
9+643.332	62
9+635.402	60
9+618.332	60
9+616.307	60
9+599.293	62
9+593.332	60
9+591.943	60
9+574.432	60
9+568.332	61
9+550.562	57
9+543.332	53
9+540.250	52
9+510.259	30
9+500.000	30

* The deceleration rate predicted from 10+646.698 to Station 10+585.534 and from 10+185.944 to Station 10+141.837 (in the direction of decreasing stations) is greater than the approximated comfortable deceleration rate, as determined by data collected to develop the Design Consistency Module (as referenced in FHWA Report FHWA-RD-99-171, "Speed prediction for Two-Lane Rural Highways"). See V85 Speed Profile Coordinates of the Design Consistency Module Engineer's Manual for additional information.

Design Speed Assumption Table (increasing stations)

Table 3 Design Speed Assumption Check (increasing stations)

Station		V85 - Vdesign speed		Condition
From	To	Min (km/h)	Max (km/h)	
9+500.000	9+513.048	0	10	1
9+513.048	9+532.128	10	20	2
9+532.128	13+462.963	20	53	3
13+462.963	13+481.482	10	20	2
13+481.482	13+500.000	0	10	1

Design Speed Assumption Table (decreasing stations)

Table 4 Design Speed Assumption Check (decreasing stations)

Station		V85 - Vdesign speed		Condition
From	To	Min (km/h)	Max (km/h)	
13+500.000	13+486.951	0	10	1
13+486.951	13+467.872	10	20	2
13+467.872	9+537.037	20	55	3
9+537.037	9+500.000	0	20	2

Design Speed Assumption Check Conditions Key

- Condition 1: 0 mph
- Condition 2: 6 mph
- Condition 3: 12 mph
- Condition 4: (V85 - Vdesign)

where:
 V85 = estimated 85th percentile operating speed (mph)
 Vdesign = design speed (mph)

Speed Differential of Adjacent Design Elements Table (increasing stations)

Table 5 Speed Differential of Adjacent Design Elements Check (increasing stations)

Station of Max Speed on Preceding Element	Max Speed on Preceding Element (km/h)	Start Station of Curve	Speed On Curve (km/h)	Speed Differential (km/h)	Condition
9+510.259	38	9+510.259	38	0	1
9+565.473	61	9+574.432	60	1	1
9+608.957	62	9+616.307	60	2	1
9+657.599	63	9+657.599	63	0	1
9+687.743	63	9+700.861	60	3	1
9+771.996	64	9+786.421	60	4	1
9+848.594	63	9+861.068	60	3	1
9+910.210	62	9+918.627	60	2	1
10+035.082	67	10+062.875	60	7	1
10+185.944	65	10+185.944	65	0	1
10+338.525	72	10+338.525	72	0	1
10+402.080	74	10+460.048	60	14	2
10+646.698	67	10+646.698	67	0	1
10+859.357	78	10+859.357	78	0	1
10+969.259	81	10+984.887	78	3	1
11+060.381	80	11+147.274	60	20	3
11+181.580	60	11+181.606	60	0	1
11+323.669	71	11+368.699	60	11	2
11+404.728	60	11+404.760	60	0	1
11+519.726	68	11+529.352	66	2	1
11+761.068	83	11+861.518	60	23	3
11+956.451	64	11+972.593	60	4	1
12+144.346	73	12+197.212	60	13	2
12+269.525	64	12+269.525	64	0	1
12+295.941	64	12+308.385	60	4	1
12+373.764	62	12+382.353	60	2	1
12+461.602	65	12+480.461	60	5	1
12+626.320	72	12+675.884	60	12	2
12+726.000	60	12+726.044	60	0	1
12+801.585	63	12+811.534	60	3	1
12+917.340	65	12+935.770	60	5	1
13+088.610	73	13+143.363	60	13	2
13+336.331	73	13+336.331	73	0	1
13+388.286	74	13+391.583	74	0	1

Speed Differential of Adjacent Design Elements Table (decreasing stations)

Table 6 Speed Differential of Adjacent Design Elements Check (decreasing stations)

Station of Max Speed on Preceding Element	Max Speed on Preceding Element (km/h)	Start Station of Curve	Speed On Curve (km/h)	Speed Differential (km/h)	Condition
13+416.254	66	13+416.254	66	0	1
13+363.867	75	13+363.867	75	0	1
13+308.424	81	13+217.539	60	21	3
13+016.620	73	12+961.867	60	13	2
12+893.109	65	12+874.680	60	5	1
12+788.504	65	12+778.555	60	5	1
12+725.943	60	12+725.900	60	0	1
12+561.151	72	12+511.586	60	12	2
12+436.807	65	12+417.949	60	5	1
12+362.470	62	12+353.880	60	2	1
12+295.941	61	12+295.941	61	0	1
12+246.914	64	12+231.771	60	4	1
12+074.837	73	12+021.971	60	13	2
11+935.226	64	11+919.084	60	4	1
11+645.105	81	11+582.840	68	14	2
11+490.958	72	11+443.146	60	12	2
11+404.686	60	11+404.654	60	0	1
11+264.462	71	11+219.432	60	11	2
11+181.546	60	11+181.521	60	0	1
11+039.635	71	11+039.635	71	0	1
10+935.399	76	10+935.399	76	0	1
10+756.008	85	10+737.810	82	4	1
10+646.698	82	10+585.534	60	22	3
10+380.772	69	10+380.772	69	0	1
10+269.754	75	10+269.754	75	0	1
10+185.944	75	10+141.837	60	15	2
9+998.538	67	9+970.744	60	7	1
9+899.143	62	9+890.726	60	2	1
9+832.192	63	9+819.718	60	3	1
9+753.031	64	9+738.606	60	4	1
9+679.572	62	9+679.572	62	0	1
9+648.521	63	9+635.402	60	3	1
9+599.293	62	9+591.943	60	2	1
9+568.332	61	9+540.250	52	9	1

Speed Differential of Adjacent Design Elements Check Conditions Key

Condition 1: 0 mph

Condition 2: 6 mph

Condition 3: 12 mph

where:

V85Tangent = estimated 85th percentile operating speed on tangent (mph)

V85Curve = estimated 85th percentile operating speed at the beginning of the curve (mph)

ANEXO 03: Planos de planta y perfil del tramo modificado (Km 9+500 – Km 13+406.938).

ANEXO 04: Reporte de resultados del análisis de consistencia con el software IHSDM del tramo modificado (Km 9+500 – Km 13+406.938).

Design Consistency Evaluation Report

IHSDM Version: 5.0.2 IHSDM 2008 Release

Report Date: Dec 4, 2009 5:08:08 PM

Name: armando

Organization:

Telephone:

E-Mail:

Project: Tesis (Aug 17, 2009 10:28 PM)

Evaluation: Evaluation 2 (5:07 PM)

Highway Information: Chilete San Pablo_modifi_3 (v1)

DCM Analysis Vehicle: Passenger Car - Type 5

Vehicle Start Speed: 30 (km/h)

Vehicle End Speed: 30 (km/h)

Table of Contents

GRAPH: Design Consistency Results (increasing stations)

GRAPH: Design Consistency Results (decreasing stations)

TABLE: V85 Speed Profile Coordinates (increasing stations)

TABLE: V85 Speed Profile Coordinates (decreasing stations)

TABLE: Design Speed Assumption Check (increasing stations)

TABLE: Design Speed Assumption Check (decreasing stations)

TABLE: Speed Differential of Adjacent Design Elements Check (increasing stations)

TABLE: Speed Differential of Adjacent Design Elements Check (decreasing stations)

Design Consistency Results (increasing stations)

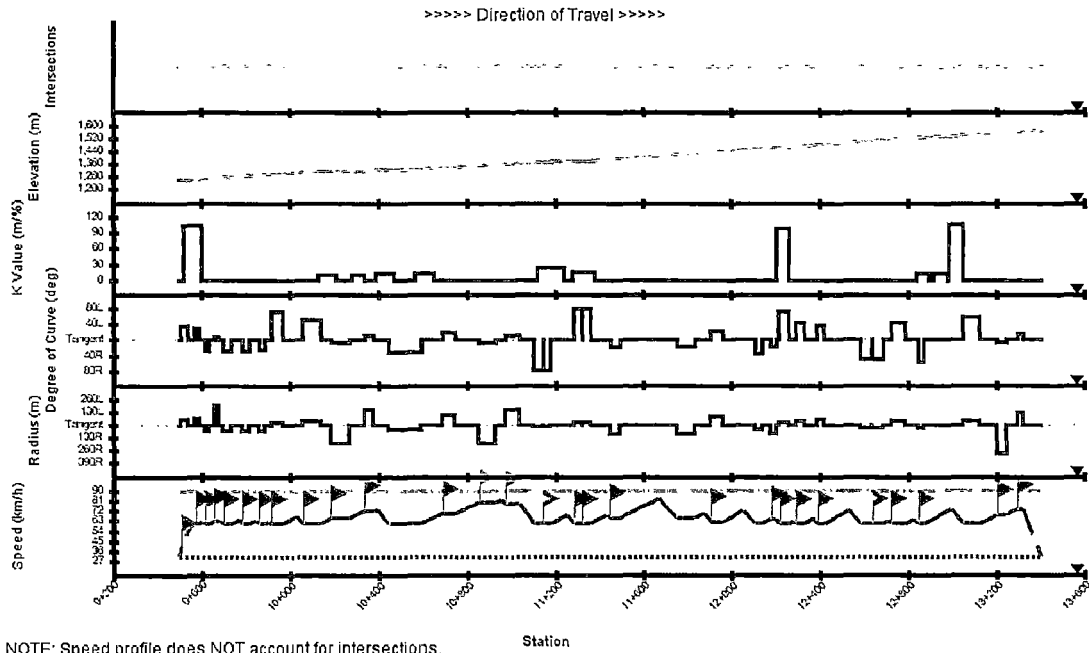


Figure 1 1: Design Consistency Results (increasing stations)

Design Consistency Results (decreasing stations)

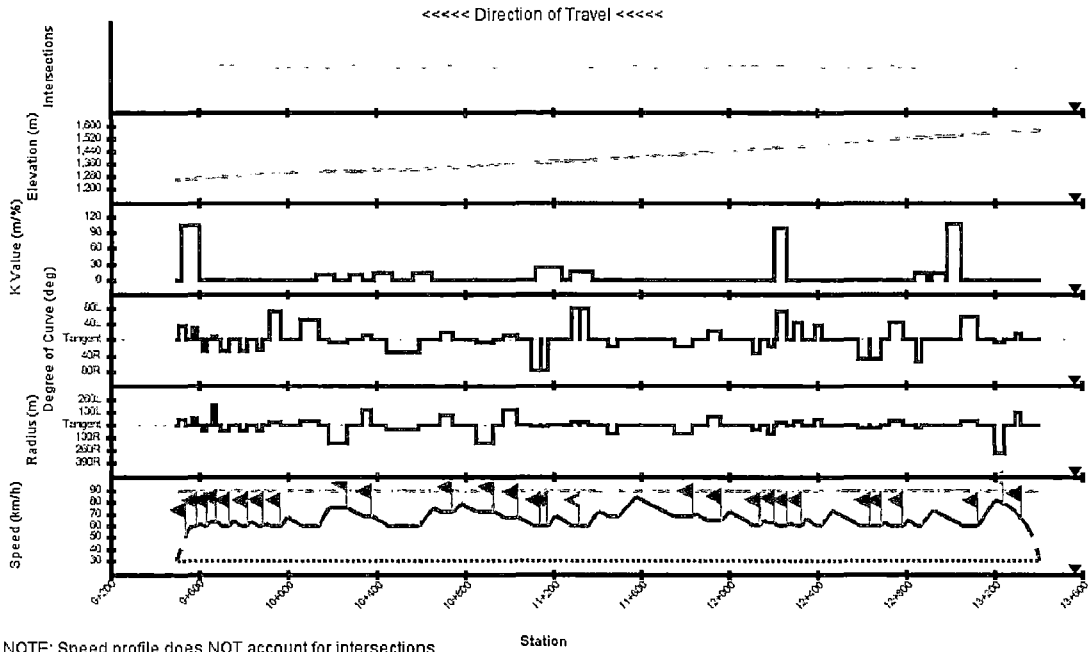


Figure 2 1: Design Consistency Results (decreasing stations)

V85 Speed Profile Coordinates (increasing stations)

Table 1 V85 Speed Profile Coordinates (increasing stations)

Station	Speed (km/h)
9+500.000	30
9+509.416	38
9+510.259	38
9+520.881	45
9+534.174	51
9+540.250	53
9+549.097	56
9+574.432	60
9+583.147	60
9+591.943	60
9+616.307	60
9+621.841	60
9+635.402	60
9+642.625	61
9+657.599	63
9+664.229	63
9+679.572	63
9+700.861	60
9+738.606	60
9+771.996	64
9+781.780	61
9+786.421	60
9+806.667	60
9+819.718	60
9+848.594	63
9+856.667	61
9+861.068	60
9+881.667	60
9+890.726	60
9+918.627	60
9+970.744	60
10+035.082	67
10+056.667	62
10+062.875	60
10+141.837	60
10+185.944	65
10+269.754	65
10+338.525	72
10+356.667	72
10+380.772	72
10+395.371	73
10+450.441	60
10+594.421	60
10+689.572	69
10+745.103	69
10+855.151	79
10+931.193	79
10+976.440	78
11+039.348	78*
11+102.783	60
11+143.572	60
11+143.600	60
11+143.612	60
11+156.667	60
11+176.093	60
11+252.904	68
11+286.086	60
11+306.667	60
11+322.042	60
11+322.115	60
11+322.147	60
11+360.534	60
11+449.389	66
11+497.994	66
11+675.879	83
11+752.725	66
11+841.164	66
11+877.750	70
11+908.685	62

11+966.069	62
12+061.413	72
12+110.929	60
12+131.667	60
12+143.122	60
12+182.202	64
12+206.667	64
12+208.618	64*
12+221.061	60
12+266.557	60
12+295.030	60
12+306.667	60
12+330.626	60
12+374.279	65
12+381.667	63
12+393.137	60
12+406.667	60
12+424.263	60
12+538.996	72
12+588.561	60
12+638.576	60
12+638.677	60
12+638.720	60
12+691.232	60
12+724.211	60
12+787.356	60
12+830.017	65
12+831.667	64
12+848.446	60
12+856.667	60
12+874.544	60
12+998.945	73
13+052.687	60
13+127.561	60
13+205.431	68
13+245.036	68
13+297.516	73
13+306.667	73
13+324.219	73
13+331.667	71
13+406.938	30

* The deceleration rate predicted from 11+039.348 to Station 11+102.783 and from 12+208.618 to Station 12+221.061 (in the direction of increasing stations) is greater than the approximated comfortable deceleration rate, as determined by data collected to develop the Design Consistency Module (as referenced in FHWA Report FHWA-RD-99-171, "Speed prediction for Two-Lane Rural Highways"). See V85 Speed Profile Coordinates of the Design Consistency Module Engineer's Manual for additional information.

V85 Speed Profile Coordinates (decreasing stations)

Table 2 V85 Speed Profile Coordinates (decreasing stations)

Station	Speed (km/h)
13+406.938	30
13+406.937	30
13+397.521	38
13+386.056	45
13+372.764	51
13+357.841	56
13+341.464	61
13+324.219	66
13+323.790	66
13+304.959	70
13+297.516	71
13+285.096	73
13+264.313	76
13+245.036	79
13+242.708	79
13+220.371	81
13+205.431	81*
13+127.561	60
13+052.687	60
12+928.285	73
12+874.544	60
12+850.270	60
12+848.446	60
12+805.786	65
12+800.270	63
12+787.356	60
12+724.211	60
12+701.181	63
12+700.270	62
12+691.232	60
12+638.720	60
12+638.620	60
12+638.576	60
12+588.561	60
12+473.828	72
12+424.263	60
12+400.270	60
12+393.137	60
12+330.626	60
12+295.030	60
12+266.557	60
12+221.061	60
12+208.618	61
12+200.270	61
12+182.202	61
12+158.665	64
12+150.270	62
12+143.122	60
12+125.270	60
12+110.929	60
12+000.081	72
11+975.270	66
11+966.069	64
11+908.685	64
11+841.164	68
11+752.725	68
11+574.840	84
11+497.994	68
11+449.389	68
11+409.145	72
11+360.534	60
11+322.147	60
11+322.073	60
11+322.042	60
11+300.270	60
11+286.086	60
11+209.275	68
11+200.270	66
11+176.093	60

11+143.612	60
11+143.584	60
11+143.572	60
11+125.270	60
11+102.783	60
11+039.348	67
10+976.440	67
10+931.193	72
10+855.151	72
10+779.022	79
10+745.103	71
10+689.572	71
10+655.192	75
10+594.421	60
10+450.441	60
10+380.772	68
10+338.525	68
10+269.754	74
10+185.944	74*
10+141.837	60
10+062.875	60
9+998.538	67
9+975.270	61
9+970.744	60
9+918.627	60
9+890.726	60
9+875.270	60
9+861.068	60
9+832.192	63
9+825.270	61
9+819.718	60
9+800.270	60
9+786.421	60
9+753.031	64
9+750.270	63
9+738.606	60
9+725.270	60
9+700.861	60
9+700.270	60
9+679.572	62
9+675.270	62
9+657.599	62
9+635.402	60
9+625.270	60
9+616.307	60
9+591.943	60
9+575.270	60
9+574.432	60
9+550.562	57
9+550.270	57
9+540.250	52
9+510.259	36
9+500.000	30

* The deceleration rate predicted from 13+205.431 to Station 13+127.561 and from 10+185.944 to Station 10+141.837 (in the direction of decreasing stations) is greater than the approximated comfortable deceleration rate, as determined by data collected to develop the Design Consistency Module (as referenced in FHWA Report FHWA-RD-99-171, "Speed prediction for Two-Lane Rural Highways"). See V85 Speed Profile Coordinates of the Design Consistency Module Engineer's Manual for additional information.

Design Speed Assumption Table (increasing stations)

Table 3 Design Speed Assumption Check (increasing stations)

Station		; V85 - Vdesign speed ;		; Condition ;
From ;	To ;	Min (km/h)	Max (km/h)	
9+500.000	9+513.048	0	10	1
9+513.048	9+532.128	10	20	2
9+532.128	13+369.901	20	53	3
13+369.901	13+388.420	10	20	2
13+388.420	13+406.938	0	10	1

Design Speed Assumption Table (decreasing stations)

Table 4 Design Speed Assumption Check (decreasing stations)

Station		; V85 - Vdesign speed ;		; Condition ;
From ;	To ;	Min (km/h)	Max (km/h)	
13+406.938	13+393.889	0	10	1
13+393.889	13+374.810	10	20	2
13+374.810	9+537.037	20	54	3
9+537.037	9+518.519	10	20	2
9+518.519	9+500.000	0	10	1

Design Speed Assumption Check Conditions Key

- Condition 1: 0 mph
- Condition 2: 6 mph
- Condition 3: 12 mph
- Condition 4: (V85 - Vdesign)

where:

- V85 = estimated 85th percentile operating speed (mph)
- Vdesign = design speed (mph)

Speed Differential of Adjacent Design Elements Table (increasing stations)

Table 5 Speed Differential of Adjacent Design Elements Check (increasing stations)

Station of Max Speed on Preceding Element	Max Speed on Preceding Element (km/h)	Start Station of Curve	Speed On Curve (km/h)	Speed Differential (km/h)	Condition
9+510.259	38	9+510.259	38	0	1
9+565.473	61	9+574.432	60	1	1
9+608.957	62	9+616.307	60	2	1
9+657.599	63	9+657.599	63	0	1
9+687.743	63	9+700.861	60	3	1
9+771.996	64	9+786.421	60	4	1
9+848.594	63	9+861.068	60	3	1
9+910.210	62	9+918.627	60	2	1
10+035.082	67	10+062.875	60	7	1
10+185.944	65	10+185.944	65	0	1
10+338.525	72	10+338.525	72	0	1
10+395.371	73	10+450.441	60	13	2
10+686.153	70	10+689.572	69	1	1
10+855.151	79	10+855.151	79	0	1
10+958.726	82	10+976.440	78	4	1
11+039.348	78	11+102.783	60	18	2
11+143.600	60	11+143.612	60	0	1
11+252.904	68	11+286.086	60	8	1
11+322.115	60	11+322.147	60	0	1
11+438.964	69	11+449.389	66	3	1
11+675.879	83	11+752.725	66	17	2
11+877.750	70	11+908.685	62	8	1
12+061.413	72	12+110.929	60	12	2
12+182.202	64	12+182.202	64	0	1
12+208.618	64	12+221.064	60	4	1
12+286.440	62	12+295.030	60	2	1
12+374.279	65	12+393.137	60	5	1
12+538.996	72	12+588.561	60	12	2
12+638.677	60	12+638.720	60	0	1
12+714.262	63	12+724.211	60	3	1
12+830.017	65	12+848.446	60	5	1
12+998.945	73	13+052.687	60	13	2
13+205.431	68	13+205.431	68	0	1
13+297.516	73	13+297.516	73	0	1

Speed Differential of Adjacent Design Elements Table (decreasing stations)

Table 6 Speed Differential of Adjacent Design Elements Check (decreasing stations)

Station of Max Speed on Preceding Element	Max Speed on Preceding Element (km/h)	Start Station of Curve	Speed On Curve (km/h)	Speed Differential (km/h)	Condition
13+324.219	66	13+324.219	66	0	1
13+245.036	79	13+245.036	79	0	1
13+205.431	81	13+127.561	60	21	3
12+928.285	73	12+874.544	60	13	2
12+805.786	65	12+787.356	60	5	1
12+701.181	63	12+691.232	60	3	1
12+638.620	60	12+638.576	60	0	1
12+473.828	72	12+424.263	60	12	2
12+349.484	65	12+330.626	60	5	1
12+275.146	62	12+266.557	60	2	1
12+208.618	61	12+208.618	61	0	1
12+158.665	64	12+143.122	60	4	1
12+000.081	72	11+966.069	64	8	1
11+849.416	70	11+841.164	68	2	1
11+574.840	84	11+497.994	68	16	2
11+409.145	72	11+360.534	60	12	2
11+322.073	60	11+322.042	60	0	1
11+209.275	68	11+176.093	60	8	1
11+143.584	60	11+143.572	60	0	1
11+039.348	67	11+039.348	67	0	1
10+931.193	72	10+931.193	72	0	1
10+779.022	79	10+745.103	71	7	1
10+655.192	75	10+594.421	60	15	2
10+380.772	68	10+380.772	68	0	1
10+269.754	74	10+269.754	74	0	1
10+185.944	74	10+141.837	60	14	2
9+998.538	67	9+970.744	60	7	1
9+899.143	62	9+890.726	60	2	1
9+832.192	63	9+819.718	60	3	1
9+753.031	64	9+738.606	60	4	1
9+679.572	62	9+679.572	62	0	1
9+648.521	63	9+635.402	60	3	1
9+599.293	62	9+591.943	60	2	1
9+574.432	60	9+540.250	52	8	1

Speed Differential of Adjacent Design Elements Check Conditions Key

Condition 1: 0 mph

Condition 2: 6 mph

Condition 3: 12 mph

where:

V85Tangent = estimated 85th percentile operating speed on tangent (mph)

V85Curve = estimated 85th percentile operating speed at the beginning of the curve (mph)

ANEXO 05: Planos de señalización del tramo modificado (Km 9+500 – Km 13+406.938).