

**UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS**  
**FACULTAD DE CONSTRUCCIONES**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**TRABAJO DE DIPLOMA**

---

**“Propuesta de un procedimiento para la determinación de la  
velocidad de operación en curvas horizontales de carreteras rurales  
en Villa Clara”.**

---

**Diplomante:** Diana Elaine Abreu Pérez.

**Tutor:** Dr. Ing. René A. García Depestre.

**Cotutor:** Ing. Luis Felipe Basulto López.

**Santa Clara**

**2017**

**DEDICATORIA**

A mi madre por confiar en mí, por impregnarme voluntad, por lograr hacer de mí la mujer que soy, por hacerme entender con su complicidad, paciencia y empuje que no existen glorias sin sacrificios y por sobre todas las cosas por hacerme sentir a distancia la razón de su vida.

A mi abuela que con dedicación me condujo a hacer realidad este sueño que creció con la seguridad de tenerla siempre para mí, y que se hizo más dulce con la sabiduría de sus años, con la ternura de sus consejos y con la inteligencia de sus mimos y reclamos.

### **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, fuente de apoyo en mi vida, que multiplicó su valor en el logro de este empeño.

A mis tías, por tener en los labios el aliento constante y las palabras precisas.

A mi padre, quien con su ejemplo ha incentivado mi superación.

A mi pareja, que ha sido mi confidente en noches de desvelo, por su constante preocupación y por ser la más visible muestra que con amor se logran las obras más complejas. Gracias por llegar cuando más te necesitaba.

A mis amigos, esos que tal vez no busco todos los días, pero los tengo y me tienen cuando me necesitan, porque me han hecho entender el valor de la amistad.

A mi tutor por brindarme sus conocimientos sin mirar el reloj, por inculcarme con exigencia sentido de la responsabilidad y por transmitirme en cada encuentro confianza en la victoria.

A todos los profesores que con alto nivel académico han hecho posible que aumente en mí el amor a la profesión que nació como un sueño en la vocacional y que durante estos años contribuyeron a que se hiciera realidad.

## **RESUMEN**

La accidentalidad en Cuba en los últimos años ha venido en incremento, provocando la necesidad de analizar las causas y condiciones que generan la situación actual, teniendo en cuenta en primer lugar el costo que representa para una sociedad como la nuestra, en la que se hacen tantos esfuerzos por la conservación de la especie humana y que se trunca ante fenómenos como este y en segundo lugar el impacto en el orden económico, en el período en el que los cubanos emprendemos un modelo con visión hacia el 2030 próspero y sostenible. Como estrategia se ha ampliado el sistema de divulgación con el fin de incrementar la educación de los usuarios y administradores de las vías, pese a ello las estadísticas demuestran que continúa en ascenso la accidentalidad relacionado en cierta manera con el aumento de la velocidad de circulación de algunas carreteras, producto a la modernización del parque automotriz cubano. A pesar de esto las condiciones geométricas de las vías en su gran mayoría no han sido modificadas hace más de 40 años y las características de la superficie de rodadura de las carreteras, aun cuando se hacen reparaciones, han ido en deterioro. Dentro de las partes del trazado de una vía, las curvas circulares son el elemento donde más accidentes se producen. El presente trabajo tratara de proponer un procedimiento sencillo para la determinación de la velocidad de circulación en las curvas horizontales en función de las características geométricas, funcionales y operacionales de las mismas.

**ABSTRACT**

The accidents in Cuba in the last years has come in increment, causing the necessity to analyze the causes and conditions that generate the current situation, keeping in the first place the cost that represents for a society like ours, in which they become so many efforts for the conservation of the human species and that it is truncated before phenomena like this and in second place the impact in the economic order, in the period in which the Cubans undertake a model with vision toward the 2030 prosperous and sustainable. As strategy the popularization system has been enlarged with the purpose of increasing the education of the users and administrators of the roads, in spite of it the statistics demonstrate that the accidents continues in ascent related in certain way with the increase of the speed of circulation of some highways, product to the modernization of the Cuban self-driven park. In spite of this the geometric conditions of the roads in their great majority have not been modified ago more than 40 years and the characteristics of the surface of rolling of the highways, even when repairs are made, they have gone in deterioration. Inside the parts of the layout of a road, the horizontal curves are the element where more you have an accident they take place. The present research tried to propose a simple procedure for the determination of the operation speed in the horizontal curves in function of the geometric, functional and operational characteristics of the same ones.

---

**ÍNDICE**

|                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCCIÓN.....                                                                                                                                                                   | 1  |
| 1    CAPÍTULO I. Estado del conocimiento sobre la estimación de la velocidad máxima de circulación en curvas horizontales en función de las características físicas de la vía. .... | 6  |
| 1.1    Velocidad.....                                                                                                                                                               | 6  |
| 1.1.1    Velocidad de diseño .....                                                                                                                                                  | 6  |
| 1.1.2    Velocidad de operación .....                                                                                                                                               | 8  |
| 1.1.3    Velocidad específica.....                                                                                                                                                  | 9  |
| 1.1.4    Velocidad instantánea .....                                                                                                                                                | 9  |
| 1.1.5    Velocidad de recorrido.....                                                                                                                                                | 9  |
| 1.1.6    Velocidad media temporal .....                                                                                                                                             | 9  |
| 1.1.7    Velocidad media espacial .....                                                                                                                                             | 10 |
| 1.1.8    Velocidad media de recorrido .....                                                                                                                                         | 10 |
| 1.2    Toma de datos de velocidad.....                                                                                                                                              | 10 |
| 1.3    Variables condicionantes de la velocidad de operación .....                                                                                                                  | 11 |
| 1.3.1    Factores externos a la vía.....                                                                                                                                            | 11 |
| 1.3.2    Factores internos de la vía.....                                                                                                                                           | 13 |
| 1.4    Influencia de la geometría de las curvas horizontales en la velocidad de operación.<br>16                                                                                    |    |
| 1.4.1    Radio (R). ....                                                                                                                                                            | 16 |
| 1.4.2    Grado de curvatura (DC) .....                                                                                                                                              | 16 |
| 1.4.3    Ángulo de inflexión ( $\Delta$ ).....                                                                                                                                      | 17 |
| 1.4.4    Longitud de la curva (L) .....                                                                                                                                             | 17 |
| 1.4.5    Pendiente longitudinal (L) .....                                                                                                                                           | 17 |

|       |                                                                                                                                |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.4.6 | Tasa de cambio de curvatura (CCRS) .....                                                                                       | 18 |
| 1.5   | Dinámica del vehículo en alineaciones curvas .....                                                                             | 18 |
| 1.5.1 | Las fuerzas actuantes sobre el vehículo. ....                                                                                  | 19 |
| 1.5.2 | Parámetros determinantes de la estabilidad del vehículo .....                                                                  | 20 |
| 1.6   | Medición de los factores físicos de las curvas .....                                                                           | 21 |
| 1.6.1 | Radio y grado de curvatura.....                                                                                                | 21 |
| 1.6.2 | Pendiente longitudinal .....                                                                                                   | 22 |
| 1.6.3 | Pendiente transversal o peralte .....                                                                                          | 22 |
| 1.6.4 | Calzada .....                                                                                                                  | 23 |
| 1.6.5 | Fricción transversal.....                                                                                                      | 23 |
| 1.7   | Conclusiones parciales.....                                                                                                    | 24 |
| 2     | CAPÍTULO II. Metodología propuesta para la determinación de la velocidad máxima de circulación en las curvas horizontales..... | 26 |
| 2.1   | Procedimiento propuesto .....                                                                                                  | 26 |
| 2.1.1 | Selección del emplazamiento a analizar .....                                                                                   | 27 |
| 2.1.2 | Levantamiento geométrico del emplazamiento .....                                                                               | 27 |
| 2.1.3 | Características funcionales y operacionales de las curvas horizontales. ....                                                   | 29 |
| 2.1.4 | Análisis de los resultados .....                                                                                               | 33 |
| 2.2   | Selección de datos .....                                                                                                       | 33 |
| 2.3   | Conclusiones parciales.....                                                                                                    | 36 |
| 3     | Capítulo III: “Análisis de los tramos de estudio e interpretación de los resultados.” .....                                    | 38 |
| 3.1   | Datos generales de la vía .....                                                                                                | 38 |
| 3.2   | Descripción de los segmentos .....                                                                                             | 39 |
| 3.2.1 | Descripción de las características específicas de cada segmento. ....                                                          | 41 |
| 3.3   | Análisis general de los resultados.....                                                                                        | 57 |

|                      |                                                   |    |
|----------------------|---------------------------------------------------|----|
| 3.3.1                | Levantamiento geométrico del emplazamiento .....  | 57 |
| 3.3.2                | Pendiente longitudinal y transversal .....        | 58 |
| 3.3.3                | Ancho de carril y paseos.....                     | 59 |
| 3.3.4                | Ensanche .....                                    | 59 |
| 3.3.5                | Características funcionales y operacionales. .... | 60 |
| 3.4                  | Conclusiones parciales.....                       | 62 |
| CONCLUSIONES .....   |                                                   | 63 |
| RECOMENDACIONES..... |                                                   | 64 |
| BIBLIOGRAFÍA.....    |                                                   | 65 |
| ANEXOS.....          |                                                   | 68 |

## INTRODUCCIÓN

Con el avance de la ciencia y la técnica, puestos en función de los vehículos automotores, se ha propiciado un incremento en la capacidad de carga, la comodidad y la velocidad de los mismos, cambiando las condiciones de circulación en las vías.

Lo expresado con anterioridad ha llevado internacionalmente a un aumento en el límite de la velocidad de circulación permisible en las carreteras rurales, propiciando que la velocidad de operación de los vehículos supere la velocidad de diseño de las carreteras, siendo esta una de las posibles causas del aumento de la accidentalidad.

Desde el año 2011 en adelante en Cuba se ha registrado un incremento de la accidentalidad media anual con respecto al período anterior. Específicamente, la provincia de Villa Clara en el año 2015 se encontraba en el tercer lugar en cuanto a cantidad de accidentes de tránsito a nivel nacional. En las tablas 1 y 2, se citan algunos datos que referencian la accidentalidad en el país y en la provincia. ((ONEI), 2011-2015)

**Tabla 1: Reporte de accidentalidad en Cuba en los últimos cinco años.**

| <b>Años</b> | <b>Accidentes</b> | <b>Fallecidos</b> | <b>Lesionados</b> |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>2011</b> | 11 604            | 682               | 8 241             |
| <b>2012</b> | 11 627            | 708               | 8 710             |
| <b>2013</b> | 11 685            | 687               | 8 236             |
| <b>2014</b> | 11 294            | 746               | 8 831             |
| <b>2015</b> | 11 104            | 788               | 8 185             |

**Tabla 2: Reporte de accidentalidad en la provincia de Villa Clara en los últimos cinco años.**

| <b>Años</b> | <b>Accidentes</b> | <b>Fallecidos</b> | <b>Lesionados</b> |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>2011</b> | 699               | 58                | 784               |
| <b>2012</b> | 723               | 57                | 819               |
| <b>2013</b> | 744               | 50                | 775               |
| <b>2014</b> | 664               | 60                | 706               |
| <b>2015</b> | 755               | 44                | 651               |

A nivel nacional la accidentalidad se ha mantenido por encima de los 11 000 accidentes por año y a pesar del ligero descenso en el 2015 se ha elevado el número de fallecidos, lo que denota que aunque existen en todas las provincias la comisión de vialidad presidida por la dirección del gobierno encargada de la prevención y educación de conductores y población en general, no se ha logrado transformar este indicador, en el que fluye el esfuerzo de un

grupo de factores desde el cumplimiento de las regulaciones viales hasta el mantenimiento por las entidades correspondientes de la infraestructura de la vía, aun cuando en Villa Clara se aprecia una disminución en la cantidad de fallecidos, se evidencia un aumento en el número de accidentes que no solo trae como consecuencia la pérdida de vidas humanas, sino que lacera en montos considerables el desarrollo de la economía, por lo que se hace necesario detenerse a evaluar las causas fundamentales de esta tendencia en nuestra provincia.

Con el fin de minimizar al máximo esta situación es imprescindible considerar los tres factores concurrentes de la siniestralidad: el conductor, el vehículo y la infraestructura. Este último es considerado por algunos estudios como el causante, en mayor o menor medida, del 30 % de los accidentes en carretera. (Pérez Zuriaga et al., 2011)

Investigaciones previas han mostrado como las colisiones tienden a concentrarse desproporcionadamente en ciertos tramos de la carretera, indicando que además de los errores de los conductores, las características de la carretera juegan un papel primordial cuando se produce un accidente. (J. and L., 2000)

Las curvas son los elementos de trazado de la carretera que presentan una mayor problemática, debido a la peculiar distribución de fuerzas que actúan sobre el automóvil cuando éste aborda este tipo de alineaciones en planta, mucho más crítica que la existente en alineaciones rectas. (Tomás Jover et al., 2002)

Algunos de los parámetros que se pueden ver afectados son la estabilidad del vehículo que en gran medida tiene que ver con los accidentes que se producen por salida de calzada y choques frontales, los cuales pueden atribuirse a un insuficiente rozamiento transversal en la curva. También influyen los índices de trazado de la vía, tales como el radio de una curva, la longitud de una recta, ancho de los carriles y visibilidad lateral. (Tomás Jover et al., 2002)

La mayoría de los estudios definen como criterio para la estimación de la velocidad máxima de circulación la media de la velocidad obtenida de vehículos circulando en condiciones de flujo libre en un tramo de carretera, sin tomar en cuenta las condiciones físicas en las que se encuentra en esos momentos y el desgaste que pudiera producirse a lo largo de los años. (Basulto López and García Depestre, 2016)

En Cuba La mayoría de las carreteras han sido diseñadas hace más de 40 años y las mismas no han sufrido modificaciones en cuanto a su geometría y debido a la evolución

tecnológica de la ingeniería automotriz, la velocidad de los vehículos ha sobrepasado los límites para los que fue diseñada la carretera actual y las calles, por lo que la mayor parte de los reglamentos resultan obsoletos. De ahí que la presente investigación esté enfocada en cómo determinar en función de las características físicas de un tramo de vía rural específicamente en las curvas horizontales en carreteras rurales, la velocidad máxima a la que se puede circular por ella.

### **Problema científico**

No existe un procedimiento para en función de las características físicas de un tramo de vía rural, determinar la velocidad máxima de operación a la que pueden circular los vehículos.

### **Objeto de estudio**

La velocidad máxima de circulación en curvas horizontales en carreteras rurales.

### **Campo de Acción**

Seguridad Vial en Carreteras Rurales (Ingeniería Vial).

### **Hipótesis**

Con la propuesta de un método basado en las características físicas de la vía, es posible determinar la velocidad máxima de circulación en las curvas horizontales y revisar en las carreteras existentes, la velocidad en dicho tramo de la vía.

### **Objetivo general**

Proponer un procedimiento con la perspectiva de determinar la velocidad máxima a la que pueden circular los vehículos por una curva horizontal de una carretera rural en función de las características físicas de la vía.

### **Objetivos específicos**

1. Realizar una búsqueda de información sobre procedimientos en países foráneos y Cuba para determinar la velocidad máxima de circulación en curvas horizontales en función de las características físicas de la vía.
2. Proponer procedimiento para determinar la velocidad de circulación de las curvas horizontales en carreteras rurales y definir los tramos de estudio.
3. Aplicar el procedimiento propuesto a casos de estudio y llegar a conclusiones sobre la metodología propuesta.

### **Tareas científicas**

1. Revisión de la bibliografía existente sobre el tema a tratar.
2. Definición del concepto de todos los parámetros que intervienen en la propuesta de determinación de velocidad para curvas horizontales.
3. Proposición de un procedimiento para determinar la velocidad de circulación de las curvas horizontales en carreteras rurales.
4. Determinación de los parámetros que intervienen en la velocidad de la curva.
5. Definición del procedimiento de uso del péndulo de fricción que se va a utilizar para determinar la fricción transversal en las curvas horizontales.
6. Elección de los tramos de estudio para aplicar el procedimiento en función de sus características físicas y antecedentes de accidentalidad.
7. Análisis los resultados de la metodología propuesta.

### **Métodos**

Métodos del nivel teórico:

- Inductivo - deductivo, se irá de lo universal en la determinación de las características física de las curvas horizontales a lo particular en la determinación de la velocidad de operación en las carreteras rurales en la provincia de Villa Clara.
- Histórico - lógico, para conocer la aplicación de las metodologías y específicamente su aplicación en la provincia, haciéndose una comparación entre estas.
- Analítico - sintético, para la determinación de los aspectos típicos y característicos en los enfoques metodológicos estudiados y arribar a conclusiones.
- Sistémico - estructural, para analizar la utilización del procedimiento como parte de un sistema que permite identificar en tiempo real las características físicas en las carreteras rurales para en función de ellas determinar la velocidad máxima de circulación.

Métodos del nivel empírico:

- Análisis de documentos, permite valorar lo establecido al respecto en la aplicación de estas metodologías en Cuba y otros países.

Métodos del nivel matemático y estadístico:

- Pruebas estadísticas descriptivas.

### **Novedad científica**

La elaboración de un procedimiento para la determinación de la velocidad de circulación máxima en curvas horizontales de carreteras rurales en función de las características físicas de la vía, el cual no se ha realizado con anterioridad en el país.

### **Valor práctico**

El procedimiento propuesto puede ser aplicado por ingenieros que trabajen en la rama de ingeniería vial para comprobar el buen funcionamiento de la circulación de los vehículos en la vía, más específicamente en las curvas horizontales y de esta manera prevenir la ocurrencia de accidentes.

### **Organización del informe**

El presente informe posee la siguiente estructura:

- Resumen
- Introducción
- Desarrollo
  - Capítulo I: “Estado del conocimiento sobre la estimación de la velocidad máxima de circulación en curvas horizontales en función de las características físicas de la vía.”
  - Capítulo II: “Metodología propuesta para la determinación de la velocidad máxima de circulación en las Curvas Horizontales.”
  - Capítulo III: “Análisis de los tramos de estudio e interpretación de los resultados.”
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Bibliografía
- Anexos

## **CAPÍTULO I. Estado del conocimiento sobre la estimación de la velocidad máxima de circulación en curvas horizontales en función de las características físicas de la vía.**

En este capítulo se realiza un análisis del estado actual del conocimiento sobre la velocidad de operación en carreteras rurales, específicamente en los tramos curvos, teniendo en cuenta la incidencia de las características físicas de las curvas horizontales para la determinación de la velocidad máxima de circulación, así como los diversos factores que inciden en los cambios de la misma y el comportamiento de los vehículos al circular en dichas alineaciones, con el objetivo de mejorar la seguridad vial. Esta revisión bibliográfica permitirá confirmar la hipótesis del trabajo y establecer la línea de trabajo a seguir.

### **1.1 Velocidad**

En general, el término velocidad se define como la relación entre el espacio recorrido y el tiempo que se tarda en recorrer dicho espacio. Es decir, para un vehículo representa su relación de movimiento, generalmente expresada en kilómetros por hora (km/h). El término velocidad se utiliza de diferentes maneras de acuerdo a los estudios que se efectúen y los objetivos que se persigan, lo que significa que existen conceptualmente varios tipos de velocidades, los cuales deben ser definidos y aplicados claramente. (Méndez T., 2009)

Entre los tipos de velocidades existentes se encuentran: la velocidad de diseño, velocidad de operación, velocidad específica, velocidad instantánea, velocidad de recorrido, velocidad media espacial, velocidad media temporal, y velocidad media de recorrido.

#### **1.1.1 Velocidad de diseño**

El concepto de velocidad de diseño fue inicialmente desarrollado en EE.UU. en los años 30 del siglo XX como un mecanismo para diseñar carreteras convencionales en planta, permitiendo a la mayoría de usuarios desarrollar una velocidad uniforme. A lo largo de la historia se ha ido modificando el concepto de velocidad de diseño y el modo en el cual se tiene en cuenta en los diseños.

La velocidad de diseño se escoge para determinar y relacionar entre sí las características geométricas o físicas de las carreteras, tales como el peralte, la visibilidad, el radio de curvatura, entre otras.

En muchas ocasiones, la velocidad de diseño es menor que aquella a la que los conductores piensan que pueden circular de forma segura. En estos casos, el diseño de la vía obliga a que los conductores adapten su velocidad a la que la vía permite en condiciones seguras, mediante la instalación de elementos de ayuda o coacción a la conducción, como por ejemplo señales de curva peligrosa o limitaciones de velocidad. (Pérez Zuriaga, 2012)

La AASHTO en 2004, definió la velocidad de diseño como la *“máxima velocidad segura que puede ser mantenida sobre una sección específica de la vía cuando las condiciones son lo suficientemente favorables para que sean los factores del diseño de la vía los que condicionen la conducción”*. ((AASHTO), 2004)

A continuación, se muestra la tabla 1.1 con las recomendaciones de la velocidad de diseño propuestas por la AASHTO para diferentes tipos de vías y condiciones topográficas, en km/h.

**Tabla 1.1 Recomendaciones de la AASHTO para la elección de velocidad de diseño**

|                 | Llano   | Ondulado | Montañoso |
|-----------------|---------|----------|-----------|
| <b>Arterial</b> | 100-110 | 80-100   | 60-80     |
| <b>Colector</b> | 60-100  | 50-80    | 30-60     |
| <b>Local</b>    | 50-80   | 30-60    | 30-50     |

Existen otras muchas recomendaciones para las velocidades de diseño de diferentes vías, siendo la anterior la más destacada.

La ley número 109 Código de seguridad vial en Cuba definió la velocidad de diseño como la *“velocidad seleccionada para proyectar y relacionar entre sí las características físicas de una vía que influyen en el movimiento de los vehículos. Es la velocidad máxima a la cual los vehículos pueden circular en un tramo de vía, cuando las características físicas de esta son los únicos factores que determinan la seguridad”*. (Ley 109, 2010)

Según la norma cubana NC 853: 2012 "Carreteras rurales – categorización técnica y características geométricas del trazado directo" para las diferentes categorías de carreteras y en dependencia del tipo de terreno por el cual se desarrollan sus trazados, se fijan las siguientes velocidades de diseño mostradas en la tabla 1.2. ((NC), 2012)

**Tabla 1.2 Velocidades de diseño**

| Categoría<br>técnica de la<br>carretera                                                                                                                                                                 | Velocidades de diseño<br>Km/h |    |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----|----|
|                                                                                                                                                                                                         | Tipo de terreno               |    |    |
|                                                                                                                                                                                                         | LL                            | O  | M  |
| I                                                                                                                                                                                                       | 100                           | 80 | 60 |
| II                                                                                                                                                                                                      | 80                            | 60 | 50 |
| III                                                                                                                                                                                                     | 60                            | 50 | 40 |
| IV                                                                                                                                                                                                      | 50                            | 40 | 30 |
| NOTA: Estas definiciones se utilizan para generalizar el tipo de terreno en un tramo del trazado, dándole la clasificación del tipo predominante. Este tramo de trazado debe ser como mínimo de 3,0 km. |                               |    |    |

### 1.1.2 Velocidad de operación

Cuando los vehículos circulan por una vía, no ajustan su velocidad en función de la velocidad de diseño impuesta por el diseñador, sino que tienen su propia percepción sobre las características de la vía y ajustan su velocidad a dichas características. Ése es el origen de la velocidad de operación. ((SCT), 2016)

La velocidad de operación es la velocidad media de desplazamiento que pueden lograr los usuarios en una carretera con una velocidad de diseño dada, bajo las condiciones prevalecientes del tránsito y grado de relación de ésta con otras vías y con la propiedad adyacente. Si el tránsito y la interferencia son bajas, la velocidad de operación puede llegar a ser muy similar a la velocidad de diseño. A medida que el tránsito crece, la interferencia entre vehículos aumenta tendiendo a bajar la velocidad de operación del conjunto. Este concepto es básico para evaluar la calidad del servicio que brinda una carretera, así como parámetro de comparación entre una vía existente con características similares a una vía en proyecto a fin de seleccionar una velocidad de diseño lo más acorde con el servicio que se desee brindar. (Echaveguren and Díaz, 2004)

El componente más importante de la operación de los conductores es la velocidad que los vehículos que ellos conducen adquieren a lo largo de la vía. Esta velocidad es un valor que se desarrollará en la vía una vez construida, y, por tanto, no puede ser conocida a priori en la fase de diseño de la misma. Sin embargo, se ha comprobado cómo esta velocidad de operación, pese a su carácter empírico, puede ser estimada con mayor o menor fiabilidad desde la fase de diseño. (Alegría Orellana et al., 2006)

La ley número 109 Código de seguridad vial en Cuba definió la velocidad de operación como la *“máxima velocidad de marcha que puede mantener con seguridad un conductor en un tramo de vía determinado, bajo las condiciones prevalecientes: meteorológicas, del tránsito y la vía, sin exceder en ningún momento la velocidad de diseño”*. (Ley 109, 2010)

### **1.1.3 Velocidad específica**

La velocidad específica de un elemento de trazado se define como la máxima velocidad que puede mantenerse a lo largo de un elemento de trazado considerado aisladamente, en condiciones de seguridad y comodidad, cuando encontrándose el pavimento húmedo y los neumáticos en buen estado, las condiciones meteorológicas, del tráfico y legales son tales que no imponen limitaciones a la velocidad.

La Velocidad Especifica se aplica a los elementos curvos de la planta. Su divergencia con el antiguo concepto de Velocidad de Diseño, surge de la adopción de leyes de variación del peralte que, en vez de disminuirlo ante radios crecientes, lo mantienen relativamente alto para un rango amplio de los mismos, confiriendo mayor seguridad ante velocidades de circulación mayores que las de proyecto, situación que es consecuente con la tendencia de los usuarios a elevar la velocidad ante trazados amplios. (Agudelo Ospina, 2002)

### **1.1.4 Velocidad instantánea**

Es la velocidad medida de un vehículo en un momento determinado de la circulación del mismo en la vía; esto es, en un espacio de tiempo infinitamente pequeño. (Benítez Olmedo and Medina Segismundo, 2003)

### **1.1.5 Velocidad de recorrido**

Es la velocidad media conseguida por el vehículo a recorrer un tramo determinado de carretera independientemente del elemento del trazado de la vía por el que este circulando. (Cifuentes Ospina, 2014)

### **1.1.6 Velocidad media temporal**

Es la velocidad media de todos los vehículos que pasan por un perfil fijo de la carretera en un cierto período de tiempo. (González Garrido, 1999)

### **1.1.7 Velocidad media espacial**

Es la velocidad media de todos los vehículos que en un instante determinado están en un tramo de carretera dado. (González Garrido, 1999)

### **1.1.8 Velocidad media de recorrido**

Es la media de las velocidades de recorrido de todos los vehículos en un tramo de carretera. (Ibagon Castañeda, 2003)

Teniendo como referencia todos los conceptos planteados con anterioridad, se demuestra que un factor que hace a la velocidad muy importante en el tránsito es que la velocidad de los vehículos actuales ha sobrepasado los límites para los que fue diseñada la carretera actual contribuyendo al aumento de la accidentalidad.

De todas las velocidades anteriormente mencionadas y como ya se había planteado, este trabajo se concentrará en el estudio de la velocidad de operación, ya que la misma es la encargada de crear un perfecto equilibrio entre el usuario, el vehículo y la vía, de tal manera que siempre se garantice la seguridad.

## **1.2 Toma de datos de velocidad**

Para la caracterización y modelización de la velocidad, uno de los desafíos más importantes es la disponibilidad de datos de calidad de las variables implicadas. En los estudios relacionados con la velocidad desarrollada por los conductores en un tramo de carretera y concretamente en los efectuados con el objetivo de desarrollar modelos para la estimación de la velocidad de operación, se han utilizado distintos dispositivos de toma de datos, en su mayor parte datos puntuales.

Generalmente, el dispositivo empleado en la recogida de datos sobre velocidades de vehículos es una pistola radar, utilizada de forma manual. Sin embargo, la utilización de este dispositivo presenta tres problemas a considerar.

En primer lugar, para registrar la velocidad de un vehículo utilizando alguno de los modelos de pistola de radar, un observador debe leer la pantalla LCD del dispositivo y otra persona escribir los datos leídos; como resultado, se puede introducir un error humano en el proceso de recogida de datos. En segundo lugar, la medida de la velocidad con una pistola de radar en secciones curvas tiene cierto grado de inexactitud debido a que el ángulo registrado es diferente de cero y cambia a lo largo de la curva (error de coseno). Por último, la presencia

de personal puede afectar considerablemente al conductor variando su comportamiento y elección de la velocidad. (De Solminihac T. and Echaveguren N., 2015)

Existen otros dispositivos como: pistolas Light Detection and Ranging (Lidar) y contadores/clasificadores electrónicos, que no son usados frecuentemente en Cuba. Todos estos dispositivos proporcionan una amplia muestra de datos de velocidad (generalmente alrededor de 100 datos en cada punto) con mayor o menor influencia en el comportamiento de los conductores.

### **1.3 Variables condicionantes de la velocidad de operación**

Se han llevado a cabo gran cantidad de estudios con el objetivo de identificar las variables o aspectos con mayor influencia sobre la velocidad de operación, con el fin de ajustar mejor el comportamiento de los modelos de velocidad de operación a la realidad. En este epígrafe se presentan, clasificadas en categorías, las variables más influyentes sobre la velocidad de operación. (Rocci, 2010)

#### **1.3.1 Factores externos a la vía**

En este epígrafe se enuncian los factores que se sabe por estudios previos tienen influencia sobre la velocidad de operación, pero sobre los que no es posible ejercer ningún control actuando únicamente en la infraestructura vial, en este grupo se incluyen desde las condiciones de luminosidad o atmosféricas hasta las características de los conductores.

#### **Condicionantes meteorológicos**

La lluvia puede afectar a la velocidad de operación desde dos puntos de vista. Por un lado, suponen una dificultad a la visibilidad del conductor, que especialmente se agudiza cuando el efecto meteorológico en cuestión es de gran intensidad. Por otro lado, la presencia de agua entre la superficie de rodaje y las llantas disminuye la fricción entre las mismas, de aquí uno de los problemas más comunes derivados de la condición de la superficie: deficiencia de fricción que provoca que el conductor pierda el control del vehículo y que este “patine”, se salga de la vía o colisione.

La conclusión más extendida es que las condiciones meteorológicas no producen alteraciones significativas sobre la velocidad de operación. Existen unos mínimos estudios que indican que unas condiciones meteorológicas muy adversas producen una disminución ligera de la velocidad de operación.

### Condicionantes lumínicos

En la mayoría de los estudios realizados, se puede observar una ligera disminución de la velocidad de operación en condiciones de baja luminosidad, aunque esta no es estadísticamente significativa en la mayoría de estudios.

### Condicionantes topográficos

La topografía actúa influenciando al conductor para que este fije una cierta velocidad deseada para el recorrido. Esta es una variable mucho más difícil de evaluar e introducir en los modelos de estimación de las velocidades de operación. Al contrario que las anteriores condicionantes, esta es invariable y conocido desde la fase de diseño, por lo que su existencia incide de dos formas en el comportamiento de los conductores en la vía:

- Una topografía más accidentada obliga al ingeniero a diseñar la vía con una forma más sinuosa, con lo que la curvatura media es mucho mayor, disminuyendo la velocidad de operación final de los conductores.
- El conductor identifica la topografía más accidentada con un mayor peligro en la vía, por lo que también disminuye su velocidad de operación.

A manera de conclusión de los planteamientos anteriores se puede exponer que una topografía más accidentada, implica descensos sensibles en la velocidad de operación.

### El entorno

El sentido de este condicionante es más extenso que el de topografía, y comprende todo aquello de lo que el conductor puede percibir en un punto en concreto y a medida que va recorriendo la vía, no todo el entorno influye con el igual peso sobre el conductor, puesto que este está centrado sobre la carretera, tendrá más influencia sobre el mismo todo lo que esté situado en las proximidades.

Debido a la gran variabilidad de los condicionantes relacionados con el entorno y a la dificultad de su medición todavía no hay resultados relevantes sobre su influencia en la velocidad de operación. (Wang, 2006)

### **El factor humano**

Las variables relacionadas con los conductores individuales son las más difíciles de identificar y estimar y las causantes de la variabilidad residual en los modelos de predicción de las velocidades de operación.

Estas variables son fundamentalmente variables asociadas a la psicología y a las condiciones particulares de cada conductor, como edad, sexo, experiencia en la conducción, el conocimiento de la vía, el propósito del viaje, entre otras.

### **El vehículo**

El vehículo es el tercero de los factores concurrentes que más influyen en la siniestralidad y también en la elección de la velocidad.

El tipo de vehículo es la variable asociada que más suele influir en la velocidad, distinguiendo generalmente entre ligeros, medios y pesados. Sin embargo, no es la única a considerar, sino que también son importantes la relación peso/potencia, el modelo o la antigüedad del vehículo, por ejemplo, los conductores con vehículos ligeros, deportivos y nuevos suelen circular a una mayor velocidad y asumir más riesgos.

En Cuba esta variable se ve influenciada por la amplia gama de tipos de vehículos que existen en el país y la coexistencia en la carretera entre vehículos que tienen más de cincuenta años de explotación y vehículos modernos.(McLean, 1981)

### **1.3.2 Factores internos de la vía**

Dentro de este apartado se describen las diferentes variables que pueden presentar cierta influencia sobre la velocidad de operación y que están íntimamente relacionadas con las carreteras, abarcando desde las características geométricas de los diferentes elementos del trazado hasta densidad de señalización o de accesos.(Rocci, 2010)

#### **Clasificación funcional de la vía**

La clasificación funcional de la vía es la base para el diseño de un tramo de carretera. Esta clasificación atiende al objetivo final de la vía, clasificándola según el tipo de tráfico que va a atender. De este modo, la geometría, sección transversal y señalamientos serán consecuencia de la misma.

La clasificación funcional de la vía no sólo influye en los parámetros anteriores, sino que también tiene cierta influencia psicológica sobre los conductores, el hecho de que el desplazamiento de un vehículo sea de larga distancia implica que con mayor probabilidad la vía empleada para dicho desplazamiento será de alta capacidad, lo mismo ocurre en el caso contrario, con desplazamientos menores.

Como consecuencia, las velocidades de operación mayores se dan en vías de mayor capacidad.

### **Densidad de señalización**

No es una variable típicamente estudiada para los modelos de velocidad de operación, pero diversos estudios realizados muestran cómo a mayores densidades de señalización la velocidad de operación es menor. Esto puede ser explicado porque la existencia de más señales requiere más atención a estas por parte de los conductores. (Valverde González, 2013)

### **Sección transversal**

Se ha estudiado ampliamente la influencia sobre la velocidad de operación de la anchura de carriles y aceras. Las tres variables han resultado significativas sobre la misma, llegando a incluirse en algunos modelos para su estimación.

La anchura de carriles es la variable más empleada en los modelos discretos, una mayor anchura provoca que los conductores se sientan más seguros en su conducción, ya que se les permite un mayor margen de maniobra, con lo que las velocidades de operación aumentan.

También es importante el modo en el cual se delimitan los carriles y las aceras. Así, la existencia de las marcas viales que delimiten los carriles provoca un aumento de la velocidad de operación, comparando con el caso en que no existan dichas líneas. Este factor es uno de los determinantes en el procedimiento que se pretende plantear en la presente investigación para la determinación de la velocidad de operación en curvas horizontales. (McFadden and Elefteriadou, 1997)

### **Visibilidad**

La visibilidad en la carretera es de importancia fundamental para la conducción segura. En el proyecto geométrico se considera a través de la distancia de visibilidad, que es la longitud de

carretera que el conductor puede ver frente a él continuamente bajo condiciones atmosféricas y del tránsito favorables y que le permiten realizar las maniobras asociadas con el proceso de conducción de manera segura.

El proyectista requiere considerar al menos cuatro aspectos sobre la distancia de visibilidad: la necesaria para detener el vehículo, la necesaria para rebasar a vehículos más lentos, las necesarias para tomar decisiones y el criterio para medir las distancias de visibilidad en el proyecto.

La visibilidad frontal juega un papel fundamental sobre la velocidad de operación. Tramos con gran distancia de visibilidad presentarán mayores velocidades de operación que tramos similares con menor visibilidad, donde los conductores tienden a reducir la velocidad con el fin de disminuir también la distancia de frenado frente a cualquier obstáculo presente en la carretera.

La visibilidad lateral juega un papel menos importante sobre la velocidad de operación, y además ha sido menos estudiada que la visibilidad frontal. Sin embargo, en los estudios realizados se ha llegado a la conclusión de que sí afecta a la velocidad de operación.

La falta de estudios acerca de esta variable es debido no sólo a la creencia de que es menos influyente sobre la velocidad de operación que otras variables, sino también a que es más difícil de introducir como parámetro en los modelos o de definir un parámetro para ser estudiado, mientras que hay consenso en que la visibilidad frontal debe medirse como distancia de visibilidad, no ocurre lo mismo con la visibilidad lateral.

Una menor visibilidad lateral implica una menor velocidad de operación, de acuerdo con los estudios realizados, aunque su efecto es mucho más ligero que el de la visibilidad frontal.(Lamm et al., 1988)

### **Características geométricas de las curvas**

Las curvas horizontales son los elementos geométricos del trazado que mayor control suponen sobre la velocidad de operación, influyendo no sólo en las propias secciones curvas sino también, en muchos casos, en las secciones rectas adyacentes, lo cual justifica uno de los objetivos de la presente investigación.

Algunas de las variables relacionadas con la curva en planta que más frecuentemente suelen utilizarse en el estudio de la velocidad de operación son, el radio, grado de curvatura,

ángulo de inflexión, longitud de la curva, y pendiente longitudinal de la curva. Sin embargo, la presencia o no de curvas de transición también puede influir en la velocidad desarrollada tanto en rectas como en curvas, la influencia de estos aspectos en la velocidad se describirá en profundidad más adelante.

### **1.4 Influencia de la geometría de las curvas horizontales en la velocidad de operación.**

La mayor parte de los estudios realizados encaminados a establecer una relación entre las velocidades de operación en vías rurales y elementos discretos del trazado se centran sobre las curvas horizontales.

De todas las variables que controlan las curvas horizontales, las relacionadas con el radio (como el propio radio o el grado de curvatura) y la fricción son las que más explican la velocidad de operación.

Sin embargo, los modelos más completos incluyen también otras variables, como el ángulo de inflexión, la longitud de la curva, entre otras. (Fitzpatrick et al., 2000)

#### **1.4.1 Radio (R).**

El radio (medido generalmente en metros) es la variable más influyente sobre la velocidad de operación en curvas horizontales, tal y como puede intuirse y como ha sido demostrado por multitud de estudios, al ser la variable que más variabilidad explica.

La influencia de esta variable sobre la velocidad de operación generalmente es tomada en una relación lineal, aunque en algunas ocasiones también se encuentra de forma inversa, dentro de una potencia o en forma radical. En todos los casos el comportamiento es que, a mayor radio, la velocidad de operación es mayor.

Según un estudio desarrollado por (Fitzpatrick and Collins, 2000), la velocidad crece a medida que el radio crece, hasta que este alcanza un valor de entre 300 y 400 metros, donde parece estancarse.

#### **1.4.2 Grado de curvatura (DC)**

Esta variable guarda relación directa con el radio, y por ello es indistinto emplear en las correlaciones una u otra.

Según un estudio desarrollado por (Ottesen and Krammes, 2000), a menor radio, la velocidad de operación aumenta. Para grados de curvatura de  $4^\circ$  o menos, la velocidad de operación permanece constante, lo que parece indicar que en estos casos los vehículos circulan por la curva a una velocidad similar a la que desarrollarían en una recta.

### 1.4.3 Ángulo de inflexión ( $\Delta$ )

Según un estudio desarrollado por (Treat et al., 1979), para curvas de gran radio (superiores a 350 metros), se observa una disminución de las velocidades de operación a medida que el ángulo de inflexión aumenta.

Esto se explica debido a que a medida que los conductores observan un mayor cambio en la orientación de la vía reducen sus velocidades.

### 1.4.4 Longitud de la curva (L)

Su efecto sobre la velocidad de operación, al igual que en el caso del ángulo de deflexión, es de poca importancia comparado con el del radio, resultando su influencia en algunos estudios estadísticamente insignificante.

Según un estudio desarrollado por (Ottesen and Krammes, 2000), se distingue un comportamiento diferente para grados de curvatura superiores e inferiores a  $4^\circ$ . Para grados de curvatura inferiores a  $4^\circ$ , las velocidades de operación aumentan a medida que la longitud de la curva aumenta, mientras que para grados de curvatura mayores las velocidades de operación disminuyen a medida que la longitud de la curva aumenta.

Este efecto puede interpretarse como que los conductores, al circular por curvas con altos grados de curvatura, tienden a suavizar la curva y desaceleran menos. Sin embargo, si la curva es de mayor longitud, tienen más tiempo para decelerar, con lo que la velocidad en el punto medio de la curva es menor.

### 1.4.5 Pendiente longitudinal (L)

Se trata de una variable poco estudiada principalmente debido a que se trata de una variable cuya definición pertenece al trazado en perfil. Sin embargo, en los casos en los que sí se ha estudiado se suele llegar a la conclusión de que sí es influyente, especialmente cuando se combina con las variables ángulo de deflexión o longitud de la curva.

En los casos en que el efecto de esta variable ha sido estudiado, se distinguen dos comportamientos (fuera del rango de validez de los modelos horizontales), según la pendiente sea superior o inferior a 4 %:

- En pendiente ascendente, la velocidad parece no ser afectada significativamente hasta pendientes del 4 %. A partir de ahí, sí se ve reducida de forma importante.
- En pendiente descendente, no se observó diferencia estadística entre pendientes inferiores o superiores a 4 %.

### **1.4.6 Tasa de cambio de curvatura (CCRS)**

Anteriormente se ha introducido esta variable como índice que estima la curvatura media de una vía o su sinuosidad. Se puede emplear también como variable estimativa de la velocidad de operación. Para ello el índice CCR se aplica únicamente a una curva (incluyendo sus curvas de transición asociadas), y pasa a representarse como CCRS.

Estas son las variables relacionadas con la curva en planta que más frecuentemente suelen utilizarse en el estudio de la velocidad de operación, no obstante, la presencia o no de curvas de transición también puede influir en la velocidad desarrollada tanto en rectas como en curvas.

Sin embargo, según (Fitzpatrick and Collins, 2000), la velocidad de operación en las curvas sin curvas de transición es ligeramente menor que las velocidades en las curvas con curvas de transición, lo cual da a entender que gracias a las curvas de transición el conductor consigue ajustar mejor su trayectoria, reduciendo menos su velocidad. Este efecto es mayor cuanto menor sea su radio.

## **1.5 Dinámica del vehículo en alineaciones curvas**

Las curvas horizontales son los elementos de trazado de la carretera que presentan una mayor problemática desde el punto de vista de su proyecto, de forma que garanticen una correcta estabilidad de cualquier vehículo que transita por ellas. Este hecho es debido a la peculiar distribución de fuerzas que actúan sobre el automóvil cuando éste aborda este tipo de alineaciones en planta, mucho más crítica que la existente en alineaciones rectas.

Por tanto, para diseñar correctamente una curva es necesario determinar qué requisitos deben presentar para que los vehículos transiten por ésta en condiciones de seguridad y comodidad adecuadas. (Posada Henao et al., 2014)

### 1.5.1 Las fuerzas actuantes sobre el vehículo.

Cuando los vehículos viajan por una curva, la fuerza centrífuga actúa de forma tal que los dirige hacia afuera de la curva, la fricción de las llantas del vehículo y la fuerza que produce el peralte contrarrestan a la fuerza centrífuga, con el aumento de velocidad se aumenta la fuerza centrífuga, hasta un punto en el que la fricción y el peralte no son suficientes para mantener al vehículo en la vía y éste patina, algunos vehículos se vuelcan bajo estas condiciones debido a la ubicación de su centro de gravedad. (Rocci, 2011)

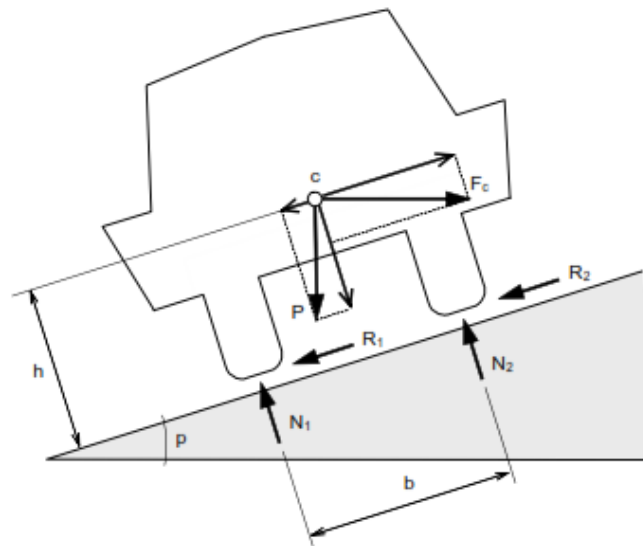


Figura 1.1 Diagrama de fuerzas actuantes sobre el vehículo en una curva

#### Peso del vehículo ( $P$ )

Fuerza vertical aplicada en el centro de masas del móvil, generada como consecuencia de la acción del campo gravitatorio terrestre, puede expresarse en función de la aceleración de la gravedad, y de la masa del vehículo.

#### Fuerza centrífuga ( $F_c$ )

Provocada por la variación en la dirección del vehículo dentro de la curva circular. Es proporcional a la aceleración normal, que depende de la velocidad a la que circula el vehículo, y del radio de la curva.

### **Fuerza de rozamiento (R)**

Fuerza pasiva producida por el contacto entre neumático y pavimento. Depende de la reacción normal a la superficie de contacto, y del coeficiente de resistencia al deslizamiento transversal.(Roco H. et al., 2015)

### **1.5.2 Parámetros determinantes de la estabilidad del vehículo**

Existen principalmente cuatro tipos de parámetros cuya adecuada combinación determina la estabilidad del vehículo al abordar una curva, estos parámetros pueden depender de la geometría de la curva, como el radio horizontal y peralte de la curva, o depender de condiciones externas tales como el tipo de usuario o la climatología, se puede distinguir los siguientes parámetros:

#### **Parámetros intrínsecos**

Son aquellos cuyo valor no depende de condicionantes externos a la geometría de la curva y del vehículo, que permanecen constantes. Pueden distinguirse los siguientes:

- Relativos al trazado de la carretera: Radio horizontal de la curva,  $r$ , y peralte de la misma,  $p$ .
- Relativos al vehículo: Relación entre la posición del centro de masas del vehículo respecto al pavimento, y la distancia existente entre caras exteriores de neumáticos de un mismo eje,

#### **Parámetros extrínsecos**

A diferencia de los anteriores, dependen de condiciones externas variables, tales como el tipo de usuario o la climatología. Cabe diferenciar los siguientes:

- Velocidad de circulación, dependiente del usuario y de las condiciones climáticas que influyen en a la hora de regular la velocidad del vehículo.
- Coeficiente de resistencia al deslizamiento transversal, dependiente en gran medida de las condiciones climáticas (presencia de agua en la superficie del pavimento), de la velocidad de circulación y del estado del pavimento.

### 1.6 Medición de los factores físicos de las curvas

#### 1.6.1 Radio y grado de curvatura

El valor del radio, escogido por el diseñador de la vía, depende de las condiciones topográficas del sitio y de las limitaciones que imponen las leyes de la mecánica del movimiento de los vehículos en una curva, para una determinada velocidad de diseño.

Además de las condiciones topográficas y la velocidad de diseño, el radio de una curva está también condicionado por las tangentes disponibles ya que al aumentar el radio de una curva aumentan también sus tangentes, otro criterio importante a tener en cuenta en el momento de definir el radio de una curva es el de la uniformidad ya que lo ideal es que el valor asumido no difiera demasiado de los ya especificados evitando cambios bruscos en las velocidades.

Cuando se cambia de tipo de terreno esto obliga normalmente a un cambio en la velocidad de diseño y si el cambio es mayor de 20 Km/h es necesario especificar un tramo de transición que permita a los conductores adaptarse de manera segura al cambio de curvatura.

En el alineamiento horizontal desarrollado para una velocidad de diseño determinada, debe evitarse el empleo de curvas con radio mínimo. En general, se tratará de usar curvas de radio amplio reservándose el empleo de radios mínimos para las condiciones más críticas.

El radio de la curva y el grado de curvatura estarán siempre en razón inversa y siempre, que sea posible es conveniente utilizar grados de curvatura pequeños, o sea, radios amplios, para que la transición del vehículo de un tramo recto a otro con diferente inclinación se produzca de forma gradual. (Jiang and Li, 2002)

Esto no es posible siempre debido a diferentes condiciones, entre ellas se pueden citar:

- Limitaciones en la tangente.
- Limitaciones en la externa.
- Topografía del terreno.
- Economía.
- Coordinación entre la planta y el perfil de la rasante.
- Puntos obligados en planta.

### 1.6.2 Pendiente longitudinal

La pendiente máxima se define a partir del tipo de vía, configuración topográfica, la velocidad de diseño y la composición vehicular, esta última se debe tener en cuenta ya que cuando el porcentaje de vehículos pesados es alto la pendiente longitudinal no puede ser muy elevada pues a pesar de que se encuentre transitando por curvas de radios amplios, su velocidad será mucho menor que la velocidad específica y el vehículo puede perder fácilmente el equilibrio en la curva. Si debido a la configuración topográfica se hace difícil disminuir la pendiente es aconsejable proporcionar un carril de ascenso, en vías de dos carriles, de modo que el tráfico pesado no interfiera el flujo de los vehículos livianos que ascienden.(Leclair, 2004)

Los valores máximos de pendientes longitudinales de los bordes con respecto al eje de la vía, los cuales dependen de la velocidad de diseño y se encuentran expuestos en la tabla 1.3.

**Tabla 1.3 Pendiente longitudinal máxima**

| Velocidad de diseño (Km/h) | Pendiente longitudinal (máxima) |
|----------------------------|---------------------------------|
| 30                         | 1/100                           |
| 40                         | 1/125                           |
| 50                         | 1/150                           |
| 60                         | 1/175                           |
| 80                         | 1/200                           |
| 100                        | 1/225                           |

### 1.6.3 Pendiente transversal o peralte

Para colaborar con la condición de equilibrio dinámico, normalmente se inclina la calzada un determinado ángulo  $\beta$ , para disminuir la proyección de la fuerza centrífuga sobre la calzada.

Para el valor de peralte máximo, se adoptan valores de peralte máximo en función de los siguientes factores:

- Caracterización de los caminos por su uso o destino
- Condiciones topográficas (llano-ondulado-montañoso) (Tabla 1.4)
- Condición de operación de los vehículos (zonas de restricción de velocidades o zonas sub-urbanas)
- Tráfico y nivel de servicio esperado

Las condiciones climáticas deben ser un factor a considerar convenientemente por el proyectista.

**Tabla 1.4 Valores de peralte según tipo de terreno**

| Peralte | Características del área                                       |
|---------|----------------------------------------------------------------|
| 0,10    | En zonas rurales montañosas                                    |
| 0,08    | En zonas rurales llanas                                        |
| 0,06    | En zonas próximas a urbanas, con vehículos a bajas velocidades |
| 0,04    | En zonas urbanas                                               |

### 1.6.4 Calzada

El ancho de calzada definido en un proyecto se refiere al ancho en tramo recto del alineamiento horizontal. Cuando se trata de tramos curvos el ancho puede aumentar y el exceso requerido se denomina sobreancho, los valores mínimos recomendados están en función del tipo de carretera, del tipo de terreno y de la velocidad de diseño.

### 1.6.5 Fricción transversal

La fricción es la resistencia al movimiento entre las llantas del vehículo y superficie de rodadura, su magnitud se expresa por el coeficiente de fricción, definido por la relación entre la fuerza de fricción tangencial generada en las llantas en sentido contrario al movimiento y la fuerza perpendicular generada por la masa del vehículo. (Bella, 2008)

La fuerza de fricción, se puede descomponer en dos componentes ortogonales denominadas: fricción longitudinal y fricción transversal cuyas magnitudes corresponden a la fuerza normal generada por la masa del vehículo y por el coeficiente de fricción que también tiene componentes longitudinal y transversal. (De Solminihac T. et al., 2006)

La fricción longitudinal se aprovecha para acelerar o frenar el vehículo a lo largo de la carretera y la fricción transversal hace posible que el vehículo cambie de dirección en condiciones de estabilidad.

El coeficiente de fricción longitudinal para el diseño, debe considerar condiciones desfavorables, como superficie mojada, llantas gastadas y maniobras inesperadas. El coeficiente de fricción transversal también debe considerar la comodidad de los conductores que son sensibles a los efectos de la fuerza centrífuga y dejar disponibilidad de fricción longitudinal de al menos 85 %. (Rodríguez Ocampo, 2011)

El coeficiente de fricción se determina mediante equipos que deslizan una rueda o zapata sobre el pavimento con una inclinación respecto a la dirección de circulación, lo cual genera una fuerza de reacción transversal, esto representa mejor la situación de derrape de un vehículo en zonas de curvas y se les conoce como péndulos de fricción.

Dentro de los procedimientos de ensayos para determinar la resistencia al deslizamiento los más conocidos a nivel internacional son: el Tráiler ASTM de Estados Unidos y el GRIPTESTER, SCRIM y el MuMeter de Gran Bretaña para mediciones continuas de alto rendimiento y el Péndulo TRRL y CRT-PENDULUM para medidas puntuales de bajo rendimiento. Estos dispositivos en general sirven para caracterizar la resistencia al deslizamiento a medianas velocidades (50 km/h). (Tomás Jover et al., 2002)

Cabe señalar, que cada ensayo con su equipo asociado tiene condiciones propias de medición como pueden ser dispositivos de provisión de agua, velocidad, temperatura, entre otros, por lo cual los resultados obtenidos por cada tipo de equipo no son comparables directamente entre sí.

La resistencia a la fricción es indispensable en las superficies de rodadura, por lo que se debe cuidar que éstas no se alisen por efecto de desgaste de los agregados causado por el rozamiento con las llantas; cuando las superficies se alisen, se deben tratar para devolverles su propiedad antiderrapante.

### 1.7 Conclusiones parciales

- Teniendo en cuenta que los vehículos al circular por una vía, no ajustan su velocidad en función de la velocidad de diseño impuesta por el diseñador, sino que tienen su propia percepción sobre las características de la vía y ajustan su velocidad a dichas características se hace necesario sistematizar las acciones de regulación y control para garantizar la seguridad vial.
- Tras analizar las condiciones dinámicas a las que se ve sometido un vehículo cuando aborda una curva, queda patente la importancia de los parámetros geométricos de la misma a la hora de garantizar su estabilidad, visibilidad y, por ende, la seguridad de sus ocupantes.
- Una vez evaluada la información recopilada se corrobora que las peculiaridades físicas de la vía influyen notablemente en la velocidad máxima de circulación, por lo que la determinación de la misma se encuentra en función de dichas características.

- A pesar de que internacionalmente existen metodologías para determinar la velocidad máxima de operación en tramos curvos en carreteras rurales, cada país tiene sus propios parámetros de diseño de vías y de comprobación de la eficiencia de las mismas. En Cuba no existe un procedimiento concreto que permita determinar la velocidad de operación en curvas horizontales de carreteras rurales.

## **CAPÍTULO II. Metodología propuesta para la determinación de la velocidad máxima de circulación en las curvas horizontales.**

En el siguiente capítulo se describe el procedimiento propuesta para la realización de la investigación científica, la cual consta de varios pasos para lograr la determinación de la velocidad de operación en curvas horizontales de las carreteras rurales de Villa Clara en función de las características funcionales de las mismas, la base teórica en la que se fundamenta este procedimiento se encuentra descrita en la revisión bibliográfica anteriormente realizada.

### **2.1 Procedimiento propuesto**

La propuesta de procedimiento se apoya en el ordenamiento de ideas y temas, los que deben establecer una serie de pasos o tareas, el mismo debe ser lo suficientemente flexible como para permitir que los investigadores y proyectistas sean creativos ante posibles imprevistos que el estudio de la accidentalidad y los elementos del sistema de seguridad vial pueda deparar. El procedimiento propuesto será el siguiente:

1. Selección del emplazamiento a analizar.
2. Levantamiento geométrico del emplazamiento
  - Radio de la curva
  - Pendiente longitudinal y transversal
  - Ancho de carril y paseos
  - Ensanche
3. Características funcionales y operacionales de las curvas horizontales.
  - Fricción
  - Deterioros
  - Velocidad

### 4. Análisis de los resultados

#### 2.1.1 Selección del emplazamiento a analizar

La selección del emplazamiento se realizará en función de la ubicación, trazado en planta, interés económico de la carretera, la accidentalidad, volumen de tránsito, composición vehicular y otros elementos que a criterios del investigador entienda necesarios. Puede ser seleccionado un emplazamiento a criterios del investigador o por interés particular.

Para la presente investigación el emplazamiento a analizar estará enfocado en las curvas horizontales de carreteras rurales debido a las disímiles dificultades que presenta el vehículo al abordar este tipo de alineaciones.

Las fuentes de información son los expedientes de las carreteras de los Centros Provinciales de Vialidad (CPV), de no existir dichos documentos es posible obtenerlos en el terreno mediante un levantamiento. (Basulto López and García Depestre, 2016)

#### 2.1.2 Levantamiento geométrico del emplazamiento

En este momento se procede a la búsqueda u obtención de información del emplazamiento a estudiar, entre los elementos geométricos a determinar están el radio de la curva, la pendiente longitudinal y transversal, ancho de carril y paseos y ensanche.

##### Radio de la curva

Se utilizará el método de campo de la cuerda. Este método consiste en hacer mediciones por el borde exterior de la vía con una cuerda fija de 1000 cm determinando las flechas (ver figura 2.1), empleando la ecuación 2.1.

$$R = \frac{C^2 + f_{prom}^2}{8 * f_{prom}} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Donde:

- C longitud de la cuerda (cm)
- $f_{prom}$  longitud promedio de las flechas

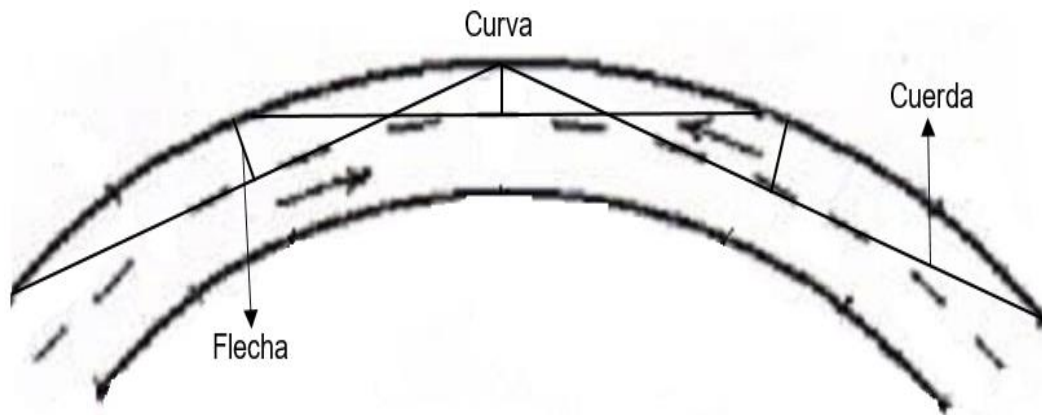


Figura 2.1 Ejemplo de aplicación del método de la cuerda

### Pendiente longitudinal y transversal

Se emplea una cuerda de longitud variable, dos reglas una de ellas graduada y un nivel de línea (figura 2.2), utilizando la expresión 2.2.

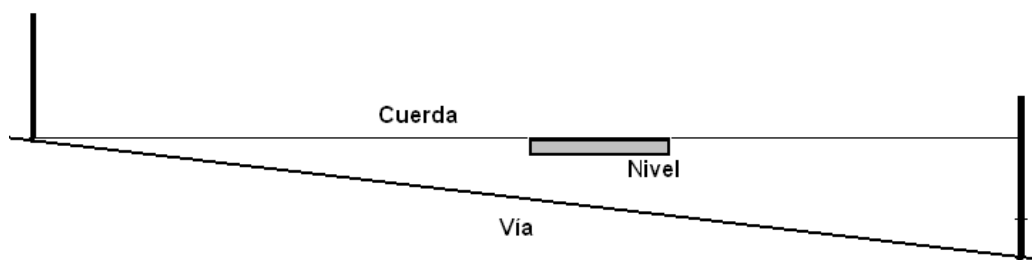


Figura 2.2 Forma de obtener la pendiente en el terreno.

$$Pend = \frac{\Delta H}{Dist} \times 100 \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Donde:

- $\Delta H$ : Diferencia de altura entre los puntos donde están ubicada la regla.
- $Dist$ : Distancia horizontal entre los puntos donde se ubican las reglas.

### Ancho de carril y paseos

Se realizarán mediciones con la cinta métrica.

### Ensanche

Se determina mediante la diferencia de anchos de carril en las diferentes estaciones.

### 2.1.3 Características funcionales y operacionales de las curvas horizontales.

#### Fricción

La determinación de la fricción de la vía se realizará calculando el coeficiente de resistencia al deslizamiento utilizando el péndulo británico el cual incorpora una zapata de goma que simula el neumático, así, se mide la fricción entre la zapata y la superficie de ensayo, proporcionando un valor normalizado de resistencia al deslizamiento, que se denomina



Figura 2.3 Péndulo británico

Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento, C.R.D. (E, 2007)

#### Resumen del método

Este método consiste en el uso de un equipo de ensayo tipo péndulo, provisto en su extremo de una zapata deslizante de caucho para medir las propiedades friccionantes de la superficie de ensayo, la cual debe estar limpia y completamente mojada antes de efectuar el ensayo, antes de realizar la prueba, la zapata del péndulo se debe fijar de tal manera que apenas se establezca contacto con la superficie, el péndulo se levanta a su posición inicial y se asegura allí, luego se suelta permitiendo el contacto entre la zapata y la superficie de ensayo, un indicador o aguja indicadora, mostrará el valor del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento (C.R.D), a mayor fricción entre la zapata deslizante y la superficie de ensayo más se retarda el movimiento del indicador y se obtiene una lectura más grande del (C.R.D),

se deben hacer cuatro movimientos pendulares sobre cada superficie a ensayar cuando se utiliza un caucho natural en la zapata o cinco movimientos cuando se usa un caucho tipo M 261. (E, 2007)

### **Muestra de ensayo**

La resistencia al deslizamiento de algunos materiales varía considerablemente en un mismo perfil transversal del pavimento. Los ensayos se deben realizar en la zona más utilizada por el tráfico de vehículos, esto es, en la rodada, pero se pueden requerir ensayos en otras áreas.

La localización de los puntos de ensayo será representativa, el mínimo de ensayos necesarios para obtener un valor del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento (C.R.D), en un determinado tramo o sección de pavimento dependerá de la uniformidad de la superficie, se debe estudiar y preparar un plan de muestreo.

La superficie de ensayo en el campo debe estar libre de partículas sueltas y se limpiará con un chorro de agua limpia a presión, la misma no tiene que ser horizontal ya que el instrumento puede ser nivelado en la posición de trabajo, utilizando únicamente los tornillos de nivelación y la cabeza del péndulo despejará la superficie.

### **Procedimiento**

1. Para obtener un valor del coeficiente de resistencia al deslizamiento en una sección de 50 m de longitud se efectuarán cinco medidas separadas 10 m una de otra. En este caso se tomarán secciones al inicio, centro y final de cada curva, siempre por el borde exterior y transversalmente en cada huella de los neumáticos del vehículo.
2. Se mide la temperatura de la superficie en cada zona de ensayo. Si se utiliza un pirómetro este debe orientarse perpendicularmente a la superficie.
3. Una vez montado el aparato, comprobado el cero y ajustada la longitud de rozamiento de la zapata, se sitúa el brazo del péndulo y la aguja indicadora en posición de disparo.
4. Se procede entonces a realizar las medidas, liberando el péndulo y la aguja de su posición horizontal. Para ella se dispara el botón de sujeción, con lo que el péndulo efectúa una oscilación arrastrando a la aguja que marcará un valor sobre la escala K. Se recoge con la mano el brazo del péndulo en los comienzos de su oscilación de retorno y se anota el valor obtenido redondeando al número entero más próximo al señalado por la

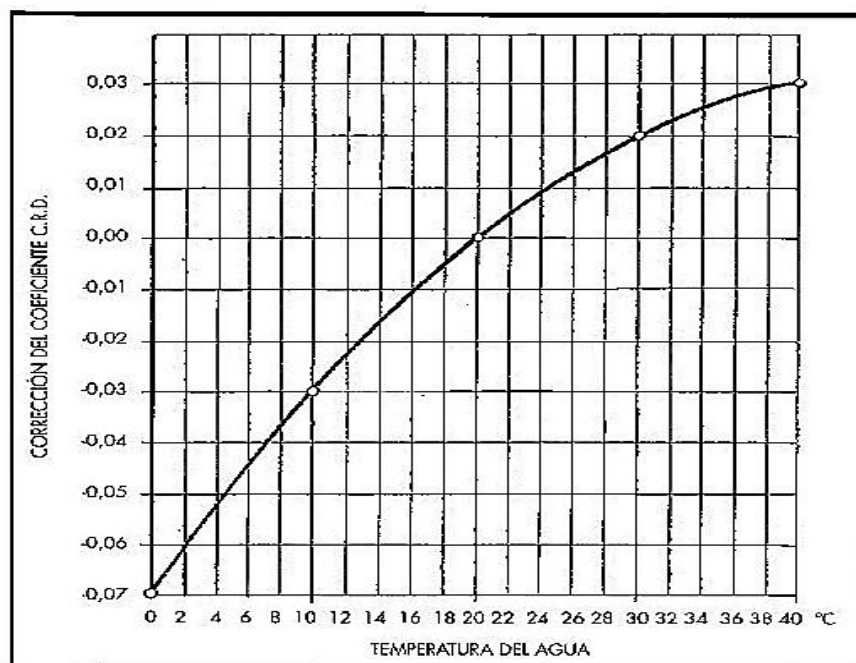
aguja en la escala. Se lleva el péndulo y la aguja a la posición original utilizando la palanca de elevación de la zapata.

5. Se repite la medida cinco veces sobre cada punta de ensayo efectuándolas siempre en las mismas condiciones, volviendo a mojar con abundancia la superficie, justamente antes de realizar cada medida. Si el valor numérico de las cinco medidas no difiere en más de tres unidades, se anota el valor medio resultante como valor efectivo del CRD del punto de ensayo. Si la diferencia entre estas cinco medidas es mayor de tres unidades, se continúa realizando medidas hasta que tres consecutivas den la misma lectura, en cuyo caso se toma esta última como valor efectivo del CRD en el punto ensayado.
6. Finalizado el ensayo se comprueba que el equipo se mantiene nivelado y que el cero del péndulo no ha variado. Además, en trabajo de campo se comprueba también el recorrido de la zapata sobre el pavimento y las temperaturas del agua de humectación y del punto de ensayo, si en estas comprobaciones es aparente alguna desviación con respecto a las condiciones establecidas, se rechaza el ensayo y se repite. (E, 2007)

### **Cálculo del CRD**

Luego de calculado la media de los cinco resultados o de los tres últimos, según proceda este valor medio se divide por cien. (NTL, 1998)

Posteriormente se corrige el valor medio calculado ( $V_{mc}$ ) en función de la temperatura de ensayo, mediante la gráfica de la figura 2.3, sumando o restando la corrección por temperatura ( $C_t$ ) del coeficiente según proceda.



**Figura 2.4 Corrección del CRD en función de la temperatura de ensayo (CRD<sub>20°C</sub> = 0,000).**

El resultado del ensayo de resistencia al deslizamiento, coeficiente de resistencia al deslizamiento (CRD), se calcula mediante la ecuación 2.3, redondeando el resultado final a la centésima.

$$CRD = \frac{Vmc}{100} \pm Ct \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

### Informe

El informe debe contener lo siguiente:

- Valores individuales en unidades C.R.D o valores de pulimento y los valores
- promedio de C.R.D o promedio de los valores de pulimento para cada
- superficie de ensayo.
- Temperatura de la superficie ensayada.
- Tipo, edad, condición, textura y localización de la superficie de ensayo.
- Tipo y fuente de donde proviene el agregado para la prueba de pulimento.
- Tipo y edad de la zapata de caucho.

### Deterioros

Para la determinación de los deterioros se emplea el manual de deterioros para pavimentos flexibles del Centro Nacional de Vialidad.

### Velocidad

Con el objetivo de determinar la velocidad máxima en curva circular se aplicará la ecuación 2.4 que se plantea en la NC853: 2012, la cual expresa que:

$$R = \frac{V^2}{127*(e+f_t)} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Donde:

- V: velocidad (km/h)
- R: radio de la curva (m)
- e: Supe relevación del pavimento (m/m)
- ft: coeficiente de fricción transversal determinado con anterioridad

### 2.1.4 Análisis de los resultados

Se considera la última parte del proceso investigativo, unido al arribo de conclusiones. Es objetivo principal del capítulo III, luego de llevar a cabo el análisis de las curvas en el tramo de carretera rural escogido, se analizarán los resultados de la evaluación de las mismas, comprobando si los parámetros de fricción transversal de dicha curva están dentro de los parámetros permisibles de las normativas cubanas en función del tipo de vía que se esté evaluando.

Además de esto se comprobará según las características funcionales restantes cual debe ser la velocidad de operación en ese tramo específico de la vía que es la curva y en función de estos resultados y de la realidad sobre el terreno se propondrán medidas con el objetivo de mejorar la circulación y la seguridad de los vehículos al transitar por dicho tramo de carretera.

## 2.2 Selección de datos

Para llevar a cabo la metodología a implementar, ya se había definido con anterioridad que, para vías rurales, las curvas horizontales son el tramo de la carretera donde se concentra la mayor cantidad de accidentes.

Se debe precisar si la evaluación de estos tramos de vías (curvas horizontales) se realizará en toda la red vial o solamente en tramos seleccionados, ya que de esto depende el procedimiento a emplear.

- En caso de que se pretenda evaluar toda la red, se aplica el procedimiento a implementar en toda la red que se pretende analizar y más precisamente en todas las curvas horizontales que se presenten en el tramo.
- En caso de que para la evaluación se pretenda realizar solamente un muestreo de los elementos a analizar (Curvas horizontales) en el tramo en cuestión, se debe llevar a cabo la implementación de técnicas estadísticas.

La selección de las curvas se realiza a partir de los elementos que contrarrestan el efecto de la fuerza centrífuga en las curvas, de los que depende la velocidad en curvas horizontales.

$$R_c = \frac{v^2}{127,14(e+\mu)} \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Donde:

$e$ : Tasa de peralte (m/m)

$\mu$ : Coeficiente de fricción lateral

$V$ : Velocidad del vehículo (Km/h)

$R_c$ : Radio de la curva circular (m)

Se determinan intervalos de radio a partir de la categoría de la vía y del tipo de terreno, según la NC853: 2012, posteriormente se define la cantidad de curvas a partir de los valores de velocidad que no superan los asumidos para la dispersión de  $\pm 2,5$  km/h.

**Tabla 2.1 Cantidad de lugares**

|         | Radios de las curvas horizontales en metros |         |         |          |
|---------|---------------------------------------------|---------|---------|----------|
| Radios  | <75                                         | 75-210  | 211-500 | >501     |
| Lugares | <75                                         | 75-131  | 211-277 | 501-535  |
|         |                                             | 131-159 | 277-318 | 535-591  |
|         |                                             | 159-185 | 318-366 | 591-647  |
|         |                                             | 185-210 | 366-413 | 647-710  |
|         |                                             |         | 413-458 | 710-782  |
|         |                                             |         | 458-500 | 782-869  |
|         |                                             |         |         | 869-995  |
|         |                                             |         |         | 995-1067 |
|         |                                             |         |         | >1067    |
| Total   | 1                                           | 4       | 6       | 9        |

En la tabla anterior se muestran los lugares obtenidos a partir del análisis de la ecuación 2.5 en función del radio de las curvas horizontales para cada condición de alineación en carreteras rurales, apoyado en 20 intervalos. (García Depestre et al., 2012)

Una vez establecidos los intervalos de radio para cada curva, es necesario determinar la cantidad existentes y cuales son necesarios para el desarrollo de la investigación. El cálculo del número de muestras se determina mediante el empleo de la expresión 2.6 cuando se conoce el tamaño de la población.

$$n = \frac{Z^2 * p * q * N}{N * E^2 + Z^2 * p * q} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

Donde:

n: Tamaño de la muestra

Z: Nivel de confianza (95%)

p: Variabilidad positiva (0,5)

q: Variabilidad negativa (0,5)

N: Tamaño de la población

E: Precisión o error (5%)

La cantidad de lugares en la red de carreteras o tramos seleccionados se obtiene a partir del análisis del trazado geométrico y se presenta en forma de tabla

**Tabla 2.2 Cantidad de lugares en la red de carreteras**

| Característica del tramo                  | Intervalos de radio (m) |         |        |       |
|-------------------------------------------|-------------------------|---------|--------|-------|
|                                           | >501                    | 211-500 | 75-210 | <75   |
| Curva horizontal en pendiente (-9% a -4%) | a/b/c                   | a/b/c   | a/b/c  | a/b/c |
| Curva horizontal en pendiente (-4% a 0%)  | a/b/c                   | a/b/c   | a/b/c  | a/b/c |
| Curva horizontal en rampa (+4% a 0%)      | a/b/c                   | a/b/c   | a/b/c  | a/b/c |
| Curva horizontal en rampa (+9% a 4%)      | a/b/c                   | a/b/c   | a/b/c  | a/b/c |
| Curva horizontal con acuerdo convexo      | a/b/c                   | a/b/c   | a/b/c  | a/b/c |
| Curva horizontal con acuerdo cóncavo      | a/b/c                   | a/b/c   | a/b/c  | a/b/c |

A: Número existente de lugares

B: Número Real de lugares

C: Numero de lugares para la determinación

En cada lugar se tomarán tres muestras, entrada, medio y salida y se calcula la dispersión para ver si es mayor que la asumida. En caso de que sea así hay que tomar mayor número de muestras.(García Depestre et al., 2012)

Dispersión asumida =?

S= 0.05-0,1

$$n = \left( \frac{t * S_a}{ep} \right)^2 \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Donde:

n: número de muestras a tomar

t: parámetro de distribución normal

S<sub>a</sub>: Desviación estándar asumida

ep: Error en las mediciones

Para una correcta y exhaustiva investigación la muestra a tratar, referente a las carreteras rurales, debe estar orientada sobre aquellas que presentan una mayor accidentalidad dentro de la zona escogida, sin embargo, por cuestiones de tiempo la muestra contendrá una sola carretera rural de la cual se tomarán los tramos más críticos y se analizarán las curvas horizontales presentes en los mismos, en función de las expresiones expuestas anteriormente.

### 2.3 Conclusiones parciales

- Se propone un procedimiento para la determinación de la velocidad de operación en curvas horizontales de carreteras rurales, en función de las características geométricas y físicas de la carretera.
- El procedimiento, a pesar de no agrupar la totalidad de los factores que pudieran determinar el comportamiento de un vehículo en una curva horizontal, ayuda a encontrar algunas características que en un momento dado pueden influir a la ocurrencia de accidentes.
- El equipo péndulo británico utilizado para determinar el coeficiente de resistencia al deslizamiento es perfectamente utilizable en las carreteras cubanas y se considera un aporte a la investigación.
- El procedimiento propuesto es perfectamente aplicable a un cualquier caso de estudio de las características de una curva, requiriendo un mínimo de recursos y se considera igualmente válido para la obtención de buenos resultados de mejora de la seguridad de la circulación.



### Capítulo III: “Análisis de los tramos de estudio e interpretación de los resultados.”

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación del procedimiento descrito en el capítulo II, para un tramo de vía rural de interés nacional en la provincia de Villa Clara. Se tomó como referencia para el desarrollo de este trabajo la carretera Santa Clara – Manicaragua teniendo en cuenta que la misma es la vía de más rápido acceso a la zona montañosa de la provincia, y clasifica como una de las carreteras con más alto grado de accidentalidad, razón por la cual es considerada de alto interés para el Centro de Ingeniería del Tránsito.

Con el objetivo de facilitar el análisis de los resultados de manera cronológica, se escogerá el tramo de carretera y se dividirá en segmentos, para la determinación de la velocidad operacional máxima de la vía a partir de las características geométricas de la misma.

#### 3.1 Datos generales de la vía

Para el análisis y aplicación del método propuesto se tomará como muestra un tramo de carretera de 8,00 km de longitud, el cual comprende desde la Intersección de la rotonda de la Circunvalación con la Carretera de Manicaragua hasta la intersección con la Autopista Nacional.

**Carretera:** Santa Clara – Manicaragua

La carretera Santa Clara – Manicaragua, es una carretera rural de dos carriles realizada entre el 1930 y 1947, según la NC853: 2012 se clasifica como una vía de III Categoría, debido a que presenta un Promedio Anual de Volúmenes Diarios de Tránsito (PAVDT) de 750 a 2000 vehículos por día y fue diseñada con una velocidad de 60 Km/h. Esta carretera permite la comunicación con la autopista nacional y con las provincias de Sancti Spíritus y Cienfuegos, además de enlazar la capital provincial con el macizo montañoso Guamuhaya, siendo considerada una vía de acceso para el turismo de naturaleza.

**Segmentos:** Quedarán definidos de acuerdo al kilometraje propio de la vía, para este caso en específico tendrán una longitud de 2.00 km, para un total de cuatro segmentos.

### Ubicación

El tramo de vía analizado se encuentra ubicado al sur de la ciudad de Santa Clara. La carretera une los municipios de Santa Clara y Manicaragua, intersectando, aproximadamente en su kilómetro ocho a la Autopista Nacional. (Figura 3.1).



Figura 3.1 Vista satelital

### 3.2 Descripción de los segmentos

**Segmento 1:** Este primer segmento se encuentra ubicado entre Intersección de la rotonda de la Circunvalación con la Carretera de Manicaragua hasta el segundo kilómetro.

El estudio se realizó en el tramo de vía comprendido entre la Circunvalación ubicada en el kilómetro 0 hasta la estación 200+0.00, ambos pertenecientes al municipio de Santa Clara. Este tramo, al igual que los tres restantes, presenta un pavimento flexible y tiene una longitud de 2,00 km.



Figura 3.2 Segundo segmento

**Segmento 2:** El segundo segmento se encuentra ubicado desde el segundo kilómetro hasta el cuarto kilómetro, comprendido entre la estación 200+0.00 y la Estación 400+0.00, pertenecientes también al municipio de Santa Clara.



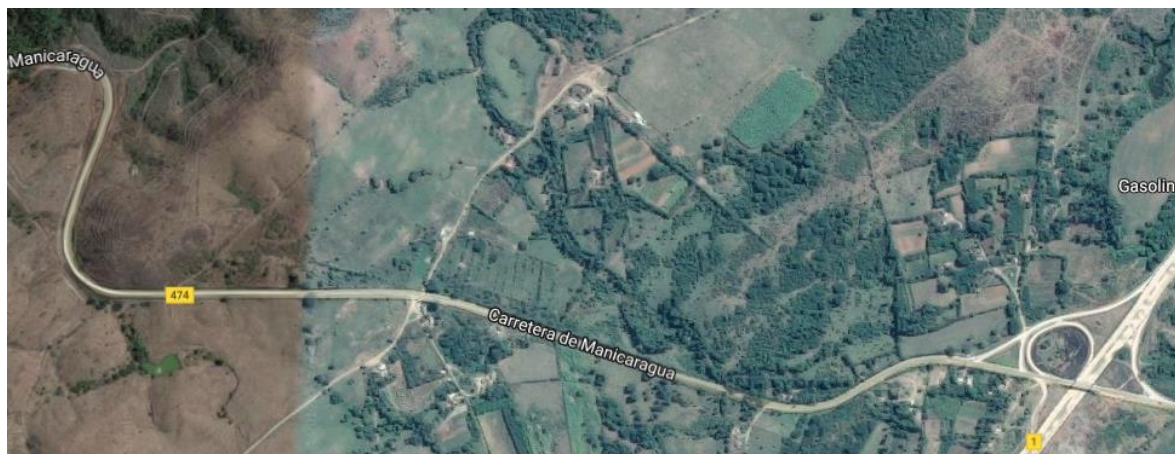
**Figura 3.3 Segundo segmento**

**Segmento 3:** El tercer segmento se encuentra ubicado desde el cuarto kilómetro hasta el sexto kilómetro, comprendido entre la estación 400+0.00 y la Estación 600+0.00, igualmente pertenecientes al municipio de Santa Clara.



**Figura 3.4 Tercer segmento**

**Segmento 4:** Este último segmento se encuentra ubicado desde el Sexto kilómetro hasta la intersección con la Autopista Nacional, comprendido entre la estación 600+0.00 y la estación 800+0.00, distribuido entre el municipio de Santa Clara y Manicaragua



**Figura 3.5 Cuarto segmento**

### 3.2.1 Descripción de las características específicas de cada segmento.

El procedimiento utilizado para el análisis de los parámetros físicos de la carretera, es recurrente durante el estudio de todas las curvas seleccionadas en los cuatro segmentos.

**Segmento 1:** Este segmento cuenta con cuatro curvas horizontales de las cuales las dos más significativas fueron la tres y la cuatro.

#### CURVA 3

##### Radio de curvatura

Para la determinación del radio de la curva se utiliza la ecuación 2.1, definida en el capítulo II, en función de la longitud de la cuerda y el promedio de las flechas medidas en el terreno.

**Tabla 3.1 Mediciones de flechas**

| Medición | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | Promedio |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|
| Flecha   | 12 | 13 | 12 | 12 | 13 | 13 | 15 | 12 | 14 | 14 | 13 | 13 | 12 | 11 | 11 | 12.667   |

El resultado obtenido fue de 98.70 m de radio.

**Pendiente longitudinal y transversal**

La pendiente longitudinal fue medida al inicio y al final de la curva, presentando una relación de variación de 14 cm y 32 cm en 10 m, respectivamente; aplicando la ecuación 2.2, definida en el Capítulo II, se obtuvieron pendientes de 1.4 % al inicio y de 3.2 % al final de la curva, ambas en rampa.

El peralte de la carretera fue medido en el punto medio de la curva, aplicando la ecuación 2.2, definida en el Capítulo II, la cual arroja una relación de 25 cm en 5 m, para una pendiente transversal de 5 %.

**Ancho de carril y paseos**

Para el análisis de la vía, el carril derecho se considera el que se encuentra ubicado en ese sentido de circulación cuando el conductor va desde Santa Clara a Manicaragua. El resultado de las mediciones con la cinta métrica se plantea en la tabla 3.2

**Tabla 3.2 Registro de mediciones de ancho de carril y paseo**

| Estación | Paseo izquierdo (m) | Carril izquierdo (m) | Carril derecho (m) | Paseo derecho (m) |
|----------|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| PC       | 1.50                | 3.0                  | 3.10               | 1.50              |
| PM       | 1.50                | 3.10                 | 3.10               | 1.50              |
| PT       | 1.50                | 3.10                 | 3.10               | 1.50              |

**Ensanche**

Como se puede comprobar en la tabla anterior de las dimensiones de la sección transversal de la vía en diferentes estaciones, la misma posee ensanche en el borde interior de la curva (carril derecho), pero el mismo no posee un desarrollo uniforme, por lo que de antemano aquí se encuentra una dificultad del diseño de la curva.

**Fricción**

Para la obtención del coeficiente de fricción de la carretera, se tomaron dos secciones al inicio, al centro y al final de la curva, para un total de seis secciones, simulando las ruedas del vehículo (Figura 3.6), haciendo énfasis en el carril exterior, pues este requiere de más fricción para contrarrestar el efecto de la fuerza centrífuga y prevenir la salida del vehículo por la tangente. Este procedimiento fue utilizado durante todo el tramo.

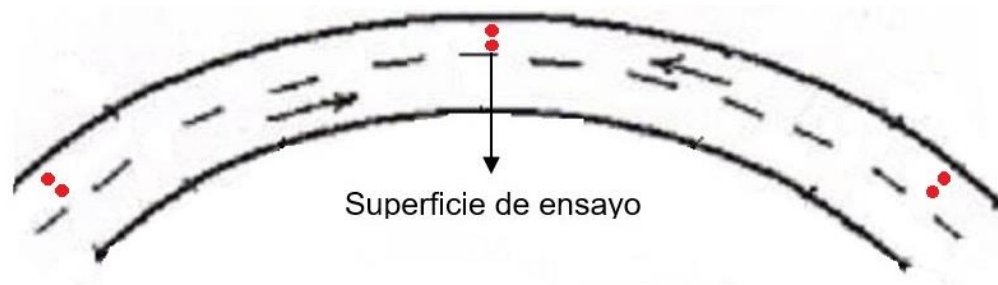


Figura 3.6 Superficie de ensayo

Luego de llevarse a cabo el análisis con el péndulo de fricción según el procedimiento descrito en el Capítulo II y aplicarse la ecuación 2.3, este proporciona los siguientes resultados:

Tabla 3.3 Cálculo del coeficiente de resistencia al deslizamiento

| Tramo | Huella   | Lectura media (cm) | Temperatura (°C) | Factor de corrección | CRD   |
|-------|----------|--------------------|------------------|----------------------|-------|
| PC    | Interior | 42,2               | 31               | 0,023                | 0,445 |
|       | Exterior | 61                 | 31               | 0,023                | 0,633 |
| PM    | Interior | 42,2               | 31               | 0,023                | 0,445 |
|       | Exterior | 45                 | 31               | 0,023                | 0,473 |
| PT    | Interior | 47                 | 31               | 0,023                | 0,493 |
|       | Exterior | 48,4               | 31               | 0,023                | 0,507 |

### Deterioros

En el caso de estudio no fue necesario analizar los deterioros presentes en la curva, ya que luego de una valoración inicial se contactó que no existen deterioros significativos en la calzada, aunque se observó la existencia de pulimento de los agregados y exudación en algunos de sus tramos. Para el resto de los segmentos analizados el pavimento se comporta de igual forma.

### Velocidad

Para la determinación de la velocidad en el tramo se aplicó la ecuación 2.4, definida en el Capítulo II, obtenida de la NC853: 2012. Los resultados se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Determinación de la velocidad

| CRD promedio | Radio (m) | Peralte (m/m) | Velocidad (km/h) |
|--------------|-----------|---------------|------------------|
| 0,499        | 98,700    | 0,05          | 82,98            |

**CURVA 4****Radio de curvatura****Tabla 3.5 Mediciones de flechas**

| Medición | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | Promedio |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|
| Flecha   | 13 | 12 | 14 | 12 | 12 | 14 | 15 | 15 | 14 | 14 | 14 | 13 | 12 | 12 | 12 | 13.200   |

El radio de la curva calculado es de 94,713 m.

**Pendiente longitudinal y transversal**

Para la pendiente longitudinal se obtuvo una relación de variación de 13 cm y 33 cm en 10 metros, al inicio y final de la curva respectivamente, obteniéndose pendientes de 1.3 % al inicio, en rampa y de 3.3 % al final, en pendiente.

El peralte de la carretera arrojó una relación de 14 cm en 5 m, para una pendiente transversal de 2.8 %.

**Ancho de carril y paseos**

Los resultados de las mediciones con la cinta métrica se exponen en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6 Registro de mediciones de ancho de carril y paseo**

| Estación | Paseo izquierdo (m) | Carril izquierdo (m) | Carril derecho (m) | Paseo derecho (m) |
|----------|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| PC       | 1.50                | 3.15                 | 3.15               | 1.50              |
| PM       | 1.50                | 3.20                 | 3.15               | 1.50              |
| PT       | 1.50                | 3.15                 | 3.10               | 1.50              |

**Ensanche**

De la tabla anterior se desprende que la curva posee ensanche en el borde interior (carril izquierdo), el cual no posee un desarrollo uniforme.

**Fricción**

Los resultados de las mediciones realizadas con el péndulo se presentan en la tabla 3.7

**Tabla 3.7 Cálculo del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento**

| Tramo | Huella   | Lectura media (cm) | Temperatura (°C) | Factor de corrección | CRD   |
|-------|----------|--------------------|------------------|----------------------|-------|
| PC    | Interior | 50,8               | 31               | 0,023                | 0,531 |
|       | Exterior | 47,2               | 31               | 0,023                | 0,495 |
| PM    | Interior | 51,6               | 31               | 0,023                | 0,539 |
|       | Exterior | 54,6               | 31               | 0,023                | 0,569 |
| PT    | Interior | 40                 | 31               | 0,023                | 0,423 |
|       | Exterior | 55,8               | 31               | 0,023                | 0,581 |

### Velocidad

La velocidad calculada se muestra en la tabla 3.8.

**Tabla 3.8 Determinación de la velocidad**

| CRD promedio | Radio (m) | Peralte (m/m) | Velocidad (km/h) |
|--------------|-----------|---------------|------------------|
| 0,523        | 94,713    | 0,028         | 81,41            |

**Segmento 2:** Tramo comprendido del kilómetro dos al kilómetro cuatro. Este segmento cuenta con cuatro curvas horizontales de las cuales se analizaron la segunda y la tercera por ser las más significativas.

### CURVA 6

#### Radio de curvatura

**Tabla 3.9 Mediciones de flechas**

| Medición | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | Promedio |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|
| Flecha   | 12 | 13 | 12 | 13 | 14 | 12 | 13 | 14 | 12 | 13 | 12 | 12 | 13 | 14 | 13 | 12.80    |

La curva presenta un radio de 97,672 m a partir de la fórmula propuesta.

#### Pendiente longitudinal y transversal

Se obtuvieron pendientes longitudinales de 1.6 % al inicio y de 2.2 % al final de la curva, ambas en rampa, a partir de una relación de variación de 16 cm y 22 cm en 10 m respectivamente.

El peralte de la carretera fue medido en el punto medio de la curva, con una relación de 14 centímetros en 5 m, para una pendiente transversal de 2.8 %.

**Ancho de carril y paseos**

El resultado de las mediciones con la cinta métrica se plantea en la tabla 3.10

**Tabla 3.10 Registro de mediciones de ancho de carril y paseo**

| Estación | Paseo izquierdo (m) | Carril izquierdo (m) | Carril derecho (m) | Paseo derecho (m) |
|----------|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| PC       | 1.50                | 3.0                  | 3.10               | 1.50              |
| PM       | 1.50                | 3.10                 | 3.20               | 1.50              |
| PT       | 1.50                | 3.15                 | 3.15               | 1.50              |

**Ensanche**

Como se puede evidenciar en la tabla 3.10 la curva posee ensanche en el borde interior (carril derecho), presentando un desarrollo uniforme.

**Fricción**

Luego de llevarse a cabo el análisis con el péndulo de fricción se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 3.11 Cálculo del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento**

| Tramo | Huella   | Lectura media (cm) | Temperatura (°C) | Factor de corrección | CRD   |
|-------|----------|--------------------|------------------|----------------------|-------|
| PC    | Interior | 59,6               | 27               | 0,015                | 0,611 |
|       | Exterior | 59,2               | 27               | 0,015                | 0,607 |
| PM    | Interior | 63                 | 30               | 0,02                 | 0,65  |
|       | Exterior | 67,8               | 30               | 0,02                 | 0,698 |
| PT    | Interior | 49,6               | 31               | 0,023                | 0,519 |
|       | Exterior | 54,4               | 31               | 0,023                | 0,567 |

**Velocidad**

Los resultados obtenidos en función de los parámetros calculados se muestran en la tabla 3.12.

**Tabla 3.12 Determinación de la velocidad**

| CRD promedio | Radio (m) | Peralte (m/m) | Velocidad (km/h) |
|--------------|-----------|---------------|------------------|
| 0,591        | 97,672    | 0,028         | 87,60            |

## **CURVA 7**

### **Radio de curvatura**

**Tabla 3.13 Mediciones de flechas**

| Medición | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | Promedio |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|
| Flecha   | 14 | 13 | 14 | 13 | 13 | 18 | 14 | 13 | 13 | 12 | 12 | 11 | 12 | 11 | 10 | 12.867   |

El cálculo del radio de la curva suministró un resultado de 97.166 m.

### **Pendiente longitudinal y transversal**

La pendiente longitudinal presentó una relación de variación de 27 cm y 23 cm en 10 m, al inicio y final de la curva; alcanzando pendientes de 2.7 % y de 2.3 % respectivamente, ambas en pendiente.

El peralte de la carretera fue medido en el punto medio de la curva, proyectando una relación de 18 cm en 5 m, para una pendiente transversal de 3.6 %.

### **Ancho de carril y paseos**

El resultado de las mediciones con la cinta métrica se plantea en la tabla 3.14.

**Tabla 3.14 Registro de mediciones de ancho de carril y paseo**

| Estación | Paseo izquierdo (m) | Carril izquierdo (m) | Carril derecho (m) | Paseo derecho (m) |
|----------|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| PC       | 1.50                | 3.0                  | 3.10               | 1.50              |
| PM       | 1.50                | 3.0                  | 3.10               | 1.50              |
| PT       | 1.50                | 3.0                  | 3.15               | 1.50              |

### **Ensanche**

El ensanche se presenta en el borde interior de la curva (carril derecho), pero el mismo no posee un desarrollo uniforme.

### **Fricción**

Los resultados del análisis de la fricción se presentan en la tabla 3.15.

**Tabla 3.15 Cálculo del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento**

| Tramo | Huella   | Lectura media (cm) | Temperatura (°C) | Factor de corrección | CRD   |
|-------|----------|--------------------|------------------|----------------------|-------|
| PC    | Interior | 59,6               | 27               | 0,015                | 0,611 |
|       | Exterior | 59,2               | 27               | 0,015                | 0,607 |
| PM    | Interior | 63                 | 30               | 0,02                 | 0,65  |
|       | Exterior | 67,8               | 30               | 0,02                 | 0,698 |
| PT    | Interior | 49,6               | 31               | 0,023                | 0,519 |
|       | Exterior | 54,4               | 31               | 0,023                | 0,567 |

### Velocidad

Los resultados del cálculo de la velocidad se muestran en la tabla 3.16.

**Tabla 3.16 Determinación de la velocidad**

| CRD promedio | Radio (m) | Peralte (m/m) | Velocidad (km/h) |
|--------------|-----------|---------------|------------------|
| 0,609        | 97,166    | 0,036         | 89,19            |

**Segmento 3:** Tramo comprendido del kilómetro cuatro al kilómetro seis. Este segmento cuenta con seis curvas horizontales de las cuales se analizaron las tres más significativas.

## CURVA 9

### Radio de curvatura

**Tabla 3.17 Mediciones de flechas**

| Medición | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | Promedio |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|
| Flecha   | 11 | 12 | 12 | 13 | 13 | 13 | 13 | 16 | 15 | 12 | 12 | 12 | 11 | 10 | 10 | 12.333   |

El resultado de las mediciones proporciona un valor de 101.367 m de radio.

### Pendiente longitudinal y transversal

Se obtuvieron pendientes longitudinales de 2.2 % al inicio en rampa y de 5 % al final en pendiente, presentando una relación de variación de 22 cm y 50 cm en 10 m respectivamente.

El peralte de la carretera fue medido en el punto medio de la curva, arrojando una relación de 20 cm en 5 m, para una pendiente transversal de 4 %.

### Ancho de carril y paseos

El resultado de las mediciones con la cinta métrica se plantea en la tabla 3.18

**Tabla 3.18 Registro de mediciones de ancho de carril y paseo**

| Estación | Paseo izquierdo (m) | Carril izquierdo (m) | Carril derecho (m) | Paseo derecho (m) |
|----------|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| PC       | 3.20                | 3.20                 | 3.20               | 1.50              |
| PM       | 3.10                | 3.25                 | 3.10               | 1.50              |
| PT       | 3.25                | 3.25                 | 3.0                | 1.50              |

### Ensanche

En la tabla anterior se observa la existencia de ensanche en el borde interior de la curva (carril izquierdo), pero no presenta un desarrollo uniforme.

### Fricción

Los coeficientes de fricción obtenidos se muestran en la tabla 3.19.

**Tabla 3.19 Cálculo del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento**

| Tramo | Huella   | Lectura media (cm) | Temperatura (°C) | Factor de corrección | CRD   |
|-------|----------|--------------------|------------------|----------------------|-------|
| PC    | Interior | 41,8               | 34               | 0,025                | 0,443 |
|       | Exterior | 39,8               | 34               | 0,025                | 0,423 |
| PM    | Interior | 34,2               | 34               | 0,025                | 0,367 |
|       | Exterior | 36,6               | 34               | 0,025                | 0,391 |
| PT    | Interior | 44,2               | 34               | 0,025                | 0,467 |
|       | Exterior | 40,6               | 34               | 0,025                | 0,431 |

### Velocidad

El cálculo de la velocidad con el uso de la norma NC853: 2012 se recoge en la tabla 3.20

**Tabla 3.20 Determinación de la velocidad**

| CRD promedio | Radio (m) | Peralte (m/m) | Velocidad (km/h) |
|--------------|-----------|---------------|------------------|
| 0,420        | 101,367   | 0,04          | 76,98            |

**CURVA 11****Radio de curvatura****Tabla 3.21 Mediciones de flechas**

| Medición | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | Promedio |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|
| Flecha   | 12 | 12 | 13 | 13 | 15 | 14 | 15 | 17 | 14 | 13 | 15 | 14 | 13 | 13 | 12 | 13.667   |

El cálculo del radio arrojó un resultado de 91.48 m.

**Pendiente longitudinal y transversal**

La pendiente longitudinal presentó una relación de variación de 40 cm y 50 cm en 10 m al inicio y final de la curva, obteniéndose pendientes de 4 % y de 5 % respectivamente, ambas en rampa.

El peralte de la carretera fue medido en el punto medio de la curva, exhibiendo una relación de 23 cm en 5 m, para una pendiente transversal de 4.6 %.

**Ancho de carril y paseos**

El resultado de las mediciones con la cinta métrica se plantea en la tabla 3.22.

**Tabla 3.22 Registro de mediciones de ancho de carril y paseo**

| Estación | Paseo izquierdo (m) | Carril izquierdo (m) | Carril derecho (m) | Paseo derecho (m) |
|----------|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| PC       | 1.50                | 3.10                 | 3.10               | 1.50              |
| PM       | 1.50                | 3.30                 | 3.30               | 1.50              |
| PT       | 1.50                | 3.10                 | 3.0                | 1.50              |

**Ensanche**

Como se puede comprobar en la tabla anterior la curva posee ensanche en el borde interior (carril izquierdo), a pesar de ser un desarrollo uniforme

**Fricción**

El análisis de la fricción proporciona los siguientes resultados:

**Tabla 3.23 Cálculo del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento**

| Tramo | Huella   | Lectura media (cm) | Temperatura (°C) | Factor de corrección | CRD   |
|-------|----------|--------------------|------------------|----------------------|-------|
| PC    | Interior | 48,2               | 35               | 0,027                | 0,509 |
|       | Exterior | 55                 | 35               | 0,027                | 0,577 |
| PM    | Interior | 29,4               | 35               | 0,027                | 0,321 |
|       | Exterior | 35,2               | 35               | 0,027                | 0,379 |
| PT    | Interior | 43,4               | 37               | 0,028                | 0,462 |
|       | Exterior | 45,6               | 37               | 0,028                | 0,484 |

### **Velocidad**

Al determinar la velocidad se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 3.24 Determinación de la velocidad**

| CRD promedio | Radio (m) | Peralte (m/m) | Velocidad (km/h) |
|--------------|-----------|---------------|------------------|
| 0,455        | 91,480    | 0,046         | 76,32            |

## **CURVA 12**

### **Radio de curvatura**

**Tabla 3.25 Mediciones de flechas**

| Medición      | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | Promedio |
|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|
| <b>Flecha</b> | 19 | 15 | 19 | 18 | 21 | 20 | 20 | 20 | 14 | 16 | 16 | 25 | 24 | 19 | 28 | 19.600   |

El radio determinado fue de 63.80 m.

### **Pendiente longitudinal y transversal**

La pendiente longitudinal fue medida al inicio y al final de la curva, presentando una relación de variación de 6 cm y 11 cm en 10 m respectivamente, presentando valores de pendientes de 0,6 % al inicio y de 1,1 % al final, ambas en pendiente.

El peralte de la carretera fue medido en el punto medio de la curva, arrojando una relación de 45 cm en 5 m, para una pendiente transversal de 9 %.

### **Ancho de carril y paseos**

El resultado de las mediciones con la cinta métrica se plantea en la tabla 3.26

**Tabla 3.26 Registro de mediciones de ancho de carril y paseo**

| Estación | Paseo izquierdo (m) | Carril izquierdo (m) | Carril derecho (m) | Paseo derecho (m) |
|----------|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| PC       | 1.50                | 3.30                 | 3.30               | 1.50              |
| PM       | 1.50                | 3.60                 | 3.20               | 1.50              |
| PT       | 1.50                | 3.15                 | 3.10               | 1.50              |

### Ensanche

Como se evidencia en la tabla anterior de las dimensiones de la sección transversal de la vía en diferentes estaciones, la misma posee ensanche en el borde interior de la curva (carril izquierdo), pero el mismo no posee un desarrollo uniforme.

### Fricción

Luego de llevarse a cabo el análisis con el péndulo de fricción se alcanzaron los siguientes resultados:

**Tabla 3.27 Cálculo del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento**

| Tramo | Huella   | Lectura media (cm) | Temperatura (°C) | Factor de corrección | CRD   |
|-------|----------|--------------------|------------------|----------------------|-------|
| PC    | Interior | 56                 | 36               | 0,028                | 0,588 |
|       | Exterior | 43,6               | 36               | 0,028                | 0,464 |
| PM    | Interior | 35                 | 38               | 0,029                | 0,379 |
|       | Exterior | 55,6               | 38               | 0,029                | 0,585 |
| PT    | Interior | 39,6               | 37               | 0,028                | 0,424 |
|       | Exterior | 42,4               | 37               | 0,028                | 0,452 |

### Velocidad

Para la determinación de la velocidad en el tramo se aplicó la ecuación de la NC853: 2012. Los resultados se exponen en la tabla 3.28.

**Tabla 3.28 Determinación de la velocidad**

| CRD promedio | Radio (m) | Peralte (m/m) | Velocidad (km/h) |
|--------------|-----------|---------------|------------------|
| 0,482        | 63,800    | 0,09          | 68,08            |

**Segmento 4:** Tramo comprendido del kilómetro cuatro al kilómetro seis. Este segmento cuenta con tres curvas horizontales y se analizaron las tres.

**CURVA 13****Radio de curvatura****Tabla 3.29 Mediciones de flechas**

| Medición | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | Promedio |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|
| Flecha   | 12 | 12 | 12 | 15 | 13 | 13 | 17 | 17 | 15 | 13 | 12 | 12 | 11 | 10 | 11 | 13.00    |

El cálculo del radio de la curva suministró un resultado de 96.17 m.

**Pendiente longitudinal y transversal**

La pendiente longitudinal fue medida al inicio y al final de la curva, presentando una relación de variación de 21 cm y 15 cm en 10 m respectivamente; alcanzando pendientes de 2,1 % al inicio en rampa y de 1,5 % al final, en pendiente.

El peralte de la carretera fue medido en el punto medio de la curva, obteniéndose una relación de 10 cm en 5 m, para una pendiente transversal de 2 %.

**Ancho de carril y paseos**

El resultado de las mediciones con la cinta métrica se plantea en la tabla 3.30

**Tabla 3.30 Registro de mediciones de ancho de carril y paseo**

| Estación | Paseo izquierdo (m) | Carril izquierdo (m) | Carril derecho (m) | Paseo derecho (m) |
|----------|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| PC       | 1.50                | 3.10                 | 3.0                | 1.50              |
| PM       | 1.50                | 3.15                 | 3.25               | 1.50              |
| PT       | 1.50                | 3.0                  | 3.15               | 1.50              |

**Ensanche**

El ensanche se presenta en el borde interior de la curva (carril derecho), pero el mismo no posee un desarrollo uniforme.

**Fricción**

El cálculo del coeficiente de resistencia al deslizamiento provee los siguientes resultados:

**Tabla 3.31 Cálculo del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento**

| Tramo | Huella   | Lectura media (cm) | Temperatura (°C) | Factor de corrección | CRD   |
|-------|----------|--------------------|------------------|----------------------|-------|
| PC    | Interior | 42,8               | 29               | 0,018                | 0,446 |
|       | Exterior | 52,8               | 29               | 0,018                | 0,546 |
| PM    | Interior | 30,2               | 28               | 0,017                | 0,319 |
|       | Exterior | 45,2               | 28               | 0,017                | 0,469 |
| PT    | Interior | 34,6               | 29               | 0,018                | 0,364 |
|       | Exterior | 39,2               | 29               | 0,018                | 0,41  |

### Velocidad

Los resultados del cálculo de la velocidad se muestran en la tabla 3.32.

**Tabla 3.32 Determinación de la velocidad**

| CRD promedio | Radio (m) | Peralte (m/m) | Velocidad (km/h) |
|--------------|-----------|---------------|------------------|
| 0,426        | 96,170    | 0,02          | 73,78            |

### CURVA 14

#### Radio de curvatura

**Tabla 3.33 Mediciones de flechas**

| Medición | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | Promedio |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|
| Flecha   | 13 | 12 | 14 | 14 | 18 | 15 | 13 | 18 | 14 | 16 | 12 | 14 | 12 | 12 | 10 | 13.8     |

La curva presenta un radio de 90.597 m a partir de la fórmula propuesta.

#### Pendiente longitudinal y transversal

Se obtuvieron pendientes longitudinales de 3,1 % al inicio y de 3,3 % al final de la curva, ambas en rampa, a partir de una relación de variación de 31 cm y 33 cm en 10 m respectivamente.

El peralte de la carretera fue medido en el punto medio de la curva, con una relación de 20 centímetros en 5 m, para una pendiente transversal de 4 %.

#### Ancho de carril y paseos

El resultado de las mediciones con la cinta métrica se plantea en la tabla 3.34.

**Tabla 3.34 Registro de mediciones de ancho de carril y paseo**

| Estación | Paseo izquierdo (m) | Carril izquierdo (m) | Carril derecho (m) | Paseo derecho (m) |
|----------|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| PC       | 1.50                | 3.10                 | 3.10               | 1.50              |
| PM       | 1.50                | 3.20                 | 3.0                | 1.50              |
| PT       | 1.50                | 3.15                 | 3.0                | 1.50              |

### **Ensanche**

En la tabla anterior se observa la existencia de ensanche en el borde interior de la curva (carril izquierdo), pero no presenta un desarrollo uniforme.

### **Fricción**

Los resultados del análisis de la fricción se presentan en la tabla 3.35.

**Tabla 3.35 Cálculo del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento**

| Tramo | Huella   | Lectura media (cm) | Temperatura (°C) | Factor de corrección | CRD   |
|-------|----------|--------------------|------------------|----------------------|-------|
| PC    | Interior | 43,6               | 28               | 0,017                | 0,453 |
|       | Exterior | 39,8               | 28               | 0,017                | 0,415 |
| PM    | Interior | 26,8               | 29               | 0,018                | 0,286 |
|       | Exterior | 31                 | 29               | 0,018                | 0,328 |
| PT    | Interior | 35                 | 32               | 0,024                | 0,374 |
|       | Exterior | 39,8               | 32               | 0,024                | 0,422 |

### **Velocidad**

Los resultados del procesamiento de datos de la velocidad máxima se muestran en la tabla 3.36.

**Tabla 3.36 Determinación de la velocidad**

| CRD promedio | Radio (m) | Peralte (m/m) | Velocidad (km/h) |
|--------------|-----------|---------------|------------------|
| 0,380        | 90,597    | 0,04          | 69,49            |

## **CURVA 15**

### **Radio de curvatura**

**Tabla 3.37 Mediciones de flechas**

| Medición | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | Promedio |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|
| Flecha   | 15 | 13 | 14 | 13 | 14 | 20 | 19 | 18 | 15 | 15 | 13 | 14 | 11 | 11 | 10 | 14.2     |

El radio determinado fue de 88.046 m.

### **Pendiente longitudinal y transversal**

La pendiente longitudinal fue medida al inicio y al final de la curva, mostrando una relación de variación de 30 cm y 11 cm en 10 m respectivamente; donde se obtuvieron pendientes de 3,0 % al inicio y de 1,1 % al final, ambas en pendiente.

El peralte de la carretera fue medido en el punto medio de la curva, presentando una relación de 25 cm en 5 m, para una pendiente transversal de 5 %.

### **Ancho de carril y paseos**

El resultado de las mediciones con la cinta métrica se plantea en la tabla 3.38

**Tabla 3.38 Registro de mediciones de ancho de carril y paseo**

| Estación | Paseo izquierdo (m) | Carril izquierdo (m) | Carril derecho (m) | Paseo derecho (m) |
|----------|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| PC       | 1.50                | 3.0                  | 3.15               | 1.50              |
| PM       | 1.50                | 3.15                 | 3.20               | 1.50              |
| PT       | 1.50                | 3.10                 | 3.10               | 1.50              |

### **Ensanche**

Como se puede comprobar en la tabla anterior de las dimensiones de la sección transversal de la vía en diferentes estaciones, la misma posee ensanche en el borde interior de la curva (carril derecho), pero el mismo no posee un desarrollo uniforme

### **Fricción**

Luego de llevarse a cabo el análisis con el péndulo de fricción según el procedimiento descrito se proporcionan los siguientes resultados:

**Tabla 3.39 Cálculo del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento**

| Tramo | Huella   | Lectura media (cm) | Temperatura (°C) | Factor de corrección | CRD   |
|-------|----------|--------------------|------------------|----------------------|-------|
| PC    | Interior | 43,4               | 31               | 0,023                | 0,457 |
|       | Exterior | 56,4               | 31               | 0,023                | 0,587 |
| PM    | Interior | 34,2               | 32               | 0,024                | 0,366 |
|       | Exterior | 40,2               | 32               | 0,024                | 0,426 |
| PT    | Interior | 54                 | 32               | 0,024                | 0,564 |
|       | Exterior | 59,4               | 32               | 0,024                | 0,618 |

### **Velocidad**

Para la determinación de la velocidad en el tramo se aplicó la ecuación definida la norma NC853: 2012. Los resultados se muestran en la Tabla 3.40.

**Tabla 3.40 Determinación de la velocidad**

| CRD promedio | Radio (m) | Peralte (m/m) | Velocidad (km/h) |
|--------------|-----------|---------------|------------------|
| 0,503        | 88,046    | 0,05          | 78,64            |

## **3.3 Análisis general de los resultados**

Para el análisis de los resultados del tramo estudiado primeramente es necesario realizar la clasificación de la vía, anteriormente definida como una vía de categoría III, con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con las normativas vigentes de diseño de carreteras en el país.

Es necesario destacar que el análisis a realizar de las características geométricas del tramo será en función del tráfico que circula por la misma y no en función de la velocidad de diseño de esta, ya que la velocidad de circulación con la que se diseñó la vía no es la que posee en la actualidad.

### **3.3.1 Levantamiento geométrico del emplazamiento**

Para el caso del radio de curvatura la NC853: 2012, establece como radio mínimo 81,85 m para curvas que se encuentren en carreteras de III categoría y en terrenos ondulados, de acuerdo a la tabla 5 de dicha norma.

La tabla 3.41 resume los radios determinados a partir de las mediciones en el terreno, de su análisis se comprueba el cumplimiento de las regulaciones establecidas por la norma vigente, debido a que son valores superiores a los 81,85 m, excepto para la curva 12 del

tercer segmento la que presenta una diferencia considerable de 18 m por debajo de lo normado.

**Tabla 3.41 Resumen de radios**

| Segmento | Curva | Radio   |
|----------|-------|---------|
| I        | 3     | 98,700  |
|          | 4     | 94,713  |
| II       | 6     | 97,672  |
|          | 7     | 97,166  |
| III      | 9     | 101,367 |
|          | 11    | 91,480  |
|          | 12    | 63,800  |
| IV       | 13    | 96,170  |
|          | 14    | 90,597  |
|          | 15    | 88,046  |

### **3.3.2 Pendiente longitudinal y transversal**

La pendiente longitudinal, medida en el terreno, expresa valores entre 1 % y 5 %, cumpliendo con lo que se encuentra estipulado en la tabla 10 de la norma NC853: 2012 la cual especifica una pendiente máxima de 6 %.

La pendiente transversal máxima en una curva, según la normativa antes mencionada, debe ser de 6 % a 10 % y en el caso de estudio como se pudo comprobar, las mismas poseen valores entre 2 % y 9 %. Por tanto, el tramo analizado no presenta inconvenientes con este parámetro.

La tabla 3.42 expresa los resultados obtenidos durante las mediciones.

**Tabla 3.42 Cálculo de pendientes**

| Segmento | Curva | Pendiente longitudinal inicial (%) | Pendiente transversal central (%) | Pendiente longitudinal final (%) |
|----------|-------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| I        | 3     | 1.4                                | 5                                 | 3.2                              |
|          | 4     | 1.3                                | 2.8                               | 3.3                              |
| II       | 6     | 1.6                                | 2.8                               | 2.2                              |
|          | 7     | 2.7                                | 3.6                               | 2.3                              |
| III      | 9     | 2.2                                | 4                                 | 5                                |
|          | 11    | 4                                  | 4.6                               | 5                                |
|          | 12    | 0.6                                | 9                                 | 1.1                              |
| IV       | 13    | 2.1                                | 2                                 | 1.5                              |
|          | 14    | 3.1                                | 4                                 | 3.3                              |
|          | 15    | 3                                  | 5                                 | 1.1                              |

### 3.3.3 Ancho de carril y paseos

Para los anchos de los carriles, tanto en el carril derecho como en el izquierdo el ancho promedio es aproximadamente de 3,10 m para los tramos de entrada y salida de las curvas.

En el tramo curvo, en el caso de las curvas de inflexión derecha, el ancho promedio es de 3,15 m para el carril derecho y 3,10 m para el carril izquierdo.

En las curvas de inflexión izquierda el ancho promedio es de 3,15 m para el carril derecho y 3,30 m para el carril izquierdo.

Como es de fácil deducción estos anchos de carriles no deberían presentar problemas para la circulación porque lo expuesto en la NC853: 2012, plantea que en carreteras con características similares a la que se encuentra en cuestión el ancho de carril debe ser de 3 metros.

### 3.3.4 Ensanche

Como se había tratado con anterioridad, el tramo de análisis (intersección de la rotonda de la Circunvalación con la Carretera de Manicaragua a la intersección con la Autopista Nacional) en su totalidad no posee un ensanche bien definido, una de las causas presumibles por las que el desarrollo del ensanche no posea la adecuada geometría es por los trabajos de recape que se realizan en la carretera, siendo esto una deficiencia que se pudiera erradicar fácilmente con la buena realización de dichos trabajos.

### 3.3.5 Características funcionales y operacionales.

#### Fricción

Del análisis de los resultados del coeficiente de fricción, obtenidos a partir de la utilización del péndulo británico, se determinó el estado del pavimento en dicho tramo de carretera, tomando en cuenta los límites establecidos por la Asociación Mundial de Carreteras (AIPCR).

**Tabla 3.43 Calificación del pavimento**

| Valor de CDR | Calificación                      |
|--------------|-----------------------------------|
| <0.5         | Malo (derrapamiento del vehículo) |
| 0.51-0.6     | De regular a bueno                |
| 0.61-0.8     | Bueno                             |
| 0.81-0.9     | De bueno a regular                |
| >0.91        | Malo (desgaste de neumáticos)     |

En la tabla 3. Se expresan los CRD promedio de las mediciones y el estado del pavimento de las curvas en cada segmento del tramo analizado.

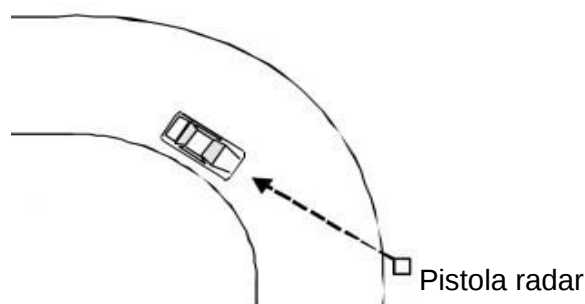
**Tabla 3.44 Análisis del estado del pavimento**

| Segmento | Curva | CRD promedio | Estado del pavimento |
|----------|-------|--------------|----------------------|
| I        | 3     | 0,499        | Malo                 |
|          | 4     | 0,523        | De regular a bueno   |
| II       | 6     | 0,591        | De regular a bueno   |
|          | 7     | 0,609        | Bueno                |
| III      | 9     | 0,420        | Malo                 |
|          | 11    | 0,455        | Malo                 |
|          | 12    | 0,482        | Malo                 |
| IV       | 13    | 0,426        | Malo                 |
|          | 14    | 0,380        | Malo                 |
|          | 15    | 0,503        | Malo                 |

De los datos reflejados en la tabla anterior se concluye que el pavimento del tramo analizado en su mayoría, principalmente desde el kilómetro cuatro hasta el kilómetro ocho, presenta una clasificación de malo con peligro de derrapamiento de los vehículos, demostrando una de las posibles causas del aumento de la accidentalidad en el año 2016, el cual contó con 29 accidentes, 2 muertos y 31 heridos, los detalles pertinentes se exponen en el Anexo I de este trabajo.

## Velocidad

Además del cálculo realizado según el procedimiento propuesto por este trabajo, en coordinación con el Centro de Ingeniería de Tránsito se pudo obtener las mediciones de las velocidades reales de circulación de los vehículos en algunos de los tramos analizados, con la ayuda de la pistola radar, siempre llevándose a cabo las mediciones en el centro de la curva aproximadamente.



**Figura 3.7 Localización de los dispositivos de medida en la curva horizontal**

La tabla 3.45 resume los valores de velocidad obtenidos en los tramos analizados en función del tipo de vehículo.

**Tabla 3.45 Análisis de la velocidad con la pistola radar**

| Estación | Tipo de Vehículo | Cantidad | Velocidad |
|----------|------------------|----------|-----------|
| 200+0.00 | Ligeros          | 51       | 77        |
|          | Pesados          | 30       | 67.3      |
| 300+0.00 | Ligeros          | 123      | 75        |
|          | Pesados          | 36       | 69        |
| 600+0.00 | Ligeros          | 68       | 69        |
|          | Pesados          | 56       | 64        |

Luego de calcular la velocidad máxima de circulación de la vía, según sus características geométricas, se obtuvo como resultado que la velocidad promedio de circulación oscilaba entre 70 km/h y 85 km/h, mientras que el límite de velocidad permisible de la carretera es de 60 km/h, confirmando que la mayoría del tramo muestreado está en correspondencia con lo que se encuentra señalizado.

**Tabla 3.46 Velocidad máxima vs pistola radar**

| Segmento | Velocidad máxima de operación calculada (km/h) | Pistola Radar Km/h |
|----------|------------------------------------------------|--------------------|
| I        | 82.2                                           | 77                 |
| II       | 84.6                                           | 75                 |
| III      | 72.2                                           | 75                 |
| IV       | 73.9                                           | 69                 |

De los datos proporcionados por la pistola radar, se obtuvieron valores de velocidad promedio de circulación de 69-77 km/h los cuales se encuentran dentro del rango de velocidad máxima establecido por el procedimiento, lo que podría traer consigo un aumento del riesgo de accidentalidad, producto que se encuentran circulando a velocidades muy próximas a las máximas soportadas, para las características actuales de la carretera.

### **3.4 Conclusiones parciales**

- Luego de analizar los resultados obtenidos durante todo el proceso investigativo se confirmó que este método es aplicable a las características de una vía en Cuba y el mismo evidencia resultados satisfactorios en cuanto a su aplicación.
- Se demostró que la mayoría del tramo analizado se encuentra correctamente señalado, y que la vía, según sus características físicas se encuentra en concordancia con el límite de velocidad propuesto.
- Se ratificó a través del trabajo con el péndulo británico que el tramo evaluado presenta dificultades con la fricción, siendo los segmentos tres y cuatro los más críticos demostrando que es uno de los factores más importantes a tener en cuenta en cuanto a la circulación de un vehículo por la vía.
- De las curvas analizadas en cuanto a características geométricas la numero 12 fue la que presentó mayor problemática al contener un radio menor que el mínimo establecido por la norma, provocando problemas de visibilidad, lo que constituye, una de las causas del aumento de accidentes

### **CONCLUSIONES**

1. Se planteó un procedimiento que permitió determinar la velocidad máxima de circulación en las curvas horizontales de carreteras rurales, en función de características físicas de la vía, como el radio de curvatura, el peralte y el coeficiente de fricción.
2. El procedimiento propuesto evidenció su validez, a partir del análisis de la velocidad máxima de circulación en el tramo de carretera Santa Clara - Manicaragua en sus primeros 8 km, debido a que la velocidad obtenida estuvo comprendida entre 70 y 85 km/h, siendo estos, resultados mayores que la velocidad límite permisible de la vía de 60 km/h, por ende, esta se encuentra correctamente señalizada.
3. Se tomó como referencia la norma NC853: 2012, para la comprobación de los resultados obtenidos a partir las mediciones de campo y el trabajo de gabinete, los cuales en su mayoría se encuentran acorde a los valores normativos.
4. El problema fundamental se presenta en la curva número 12 del tercer segmento, específicamente al final del kilómetro seis, donde el radio calculado fue de 63.8 m siendo este un valor inferior a lo estipulado en la norma de 81.85 m, confirmando la peligrosidad de esta curva, ya denominada como la que más accidentes provoca en esta carretera anualmente.
5. Se demostró que el uso de la pistola de radar, que hasta ahora no se había tomado en cuenta en el procedimiento propuesto, puede jugar un papel fundamental en la comprobación de la velocidad de operación real a la que circulan los vehículos por la vía en cuestión

### **RECOMENDACIONES**

Sería propicio realizar este mismo estudio en pavimento rígido para ver qué resultados se logran.

Se sugiere efectuar el procedimiento en terrenos llanos, teniendo en cuenta que sería más aplicable debido al aumento de la velocidad en los mismos

Se propone que durante las mediciones con la pistola radar, exista una restricción de la presencia del personal no solicitado, ya que puede afectar considerablemente al conductor variando su comportamiento y elección de la velocidad.

**BIBLIOGRAFÍA**

- (AASHTO), A. A. O. S. H. A. T. O. 2004. A policy on geometric design of highway and streets. *In: AASHTO (ed.). Washington, D.C.*
- (NC), O. N. D. N. 2012. Carreteras rurales - categorización técnica y características geométricas del trazado directo. *In: COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN, N. C. D. C. (ed.) NC853: 2012. Cuba.*
- (ONEI), O. N. D. E. E. I. 2011-2015. Accidentes del tránsito. Cuba: Anuario estadístico de Cuba.
- (SCT), S. D. C. Y. T. 2016. *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras Mexico* Secretaria de Comunicaciones y Transporte.
- AGUDELO OSPINA, J. J. 2002. *Diseño geométrico de vías.*
- ALEGRÍA ORELLANA, J. A., AYALA CARBALLO, R. F. & FUENTES QUIJADA, C. E. 2006. *Propuesta de un manual de diseño geométrico de Carreteras para el salvador.* Universidad de El Salvador.
- BASULTO LÓPEZ, L. F. & GARCÍA DEPESTRE, R. A. 2016. Procedimiento para determinación de la velocidad en curvas. *18 Convención científica d ingeniería y arquitectura.*
- BELLA, F. 2008. Assumptions of operating speed-profile models on deceleration and acceleration rates: verification in the driving simulator. *87th Annual Meeting Transportation Research Board.* Washington D.C.
- BENÍTEZ OLMEDO, R. & MEDINA SEGISMUNDO, A. 2003. *Diseño geométrico de carreteras.*
- CIFUENTES OSPINA, N. 2014. *Estudio de seguridad vial para determinar la incidencia del diseño geometrico en la accidentalidad* Escuela colombiana de ingenieria julio garavito
- DE SOLMINIHAC T., H. & ECHAVEGUREN N., T. 2015. Antecedentes para la inspeccion y diseño de especificaciones de textura, resistencia al deslizamiento y friccion en pavimentos.
- DE SOLMINIHAC T., H., ECHAVEGUREN N., T. & VARGAS TEJEDA, S. 2006. Modelacion de la demanda de friccion lateral en curvas horizontales, en carreteras chilenas. . *Gestión de la construcción.* Santiago.
- E, I. N. V. 2007. Coeficiente de resistencia al deslizamiento usando el péndulo britanico
- I.N.V. E - 792 - 07.* España
- ECHAVEGUREN, T. & DÍAZ, Á. 2004. *Perfiles de velocidad de operación en curvas horizontales aisladas*
- FITZPATRICK, K. & COLLINS, J. M. 2000. Speed-profile model for two-lane rural highways. *Transportation Research Board, Vol. 1737.*
- FITZPATRICK, K., ELEFTERIADOU, L., HARWOOD, D. W., COLLINS, J. M., MCFADDEN, J. & ANDERSON, I. B. Speed prediction for two-lane rural highways. FHWA, 2000.

- GARCÍA DEPESTRE, R. A., DELGADO MARTÍNEZ, D. E. & DÍAZ GARCÍA, E. E. 2012. Modelos de perfil de velocidad para evaluación de consistencia del trazado en carreteras de la provincia de villa clara.
- GONZÁLEZ GARRIDO, M. 1999. Estudio de velocidades.
- IBAGON CASTAÑEDA, M. H. 2003. Ingeniería de tránsito y transporte, ¿teoría?... O solución al problema de movilidad actual
- J., M. & L., E. 2000. Evaluating horizontal alignment design consistency of two-lane rural highway: development of new procedure. *Transportation Research Board*, 1737
- JIANG, Y. & LI, S. 2002. Measuring and Analyzing Vehicle Position and Speed Data at Work Zones Using Global Positioning System. *Institute of Transportation Engineers(ITE)*
- LAMM, R., CHOUERI, E. M., HAYWARD, J. C. & PALURI, A. 1988. Possible design procedure to promote design consistency in highway geometric design on two-lane rural roads. *Transportation Research Board*, 1195.
- LECLAIR, R. 2004. *Normas para el diseño geométrico de las carreteras regionales*.
- LEY 109 2010. Código de seguridad vial. 40. Cuba: Gaceta Oficial de la Republica de Cuba
- MCFADDEN, J. & ELEFTERIADOU, L. 1997. Formulation and validation of operating speed-based models using bootstrapping. *Transportation Research Board*, 1579.
- MCLEAN, J. 1981. Driver speed behavior and rural road alignment design. *Traffic Engineering & Control*, 22.
- MÉNDEZ T., D. 2009. *Maestría en vías terrestres*
- NTL 1998. Coeficiente de resistencia al deslizamiento con el pendulo del TRRL. In: NTL (ed.) *NTL-175/98*
- OTTESEN, J. L. & KRAMES, R. A. 2000. *Speed-profile model for a design consistency evaluation procedure in the united states*. *Transportation research board*, 1701.
- PÉREZ ZURIAGA, A. M. 2012. *Caracterización y modelización de la velocidad de operación en carreteras convencionales a partir de la observación naturalística de la evolución de vehículos ligeros*, Valencia.
- PÉREZ ZURIAGA, A. M., CAMACHO TORREGROSA, F. J. & GARCÍA GARCÍA, A. 2011. La velocidad de operación y su aplicación en el análisis de la consistencia de carreteras para la mejora de la seguridad vial. *Cuaderno PTC*
- POSADA HENAO, J. J., CADAVID AGUDELO, S. & CASTRO GÓMEZ, L. 2014. Consistencia en el diseño. Predicción de la velocidad de operación en carreteras. *Ingeniería solidaria*, 10.
- ROCCI, S. 2010. La velocidad, base del trazado (1ª parte). *RUTAS*, Vol. 141.
- ROCCI, S. 2011. La velocidad, base del trazado (2ª parte). *RUTAS*, Vol. 142.
- ROCO H., V., FUENTES L., C. & VALVERDE P., S. 2015. Evaluación de la resistencia al deslizamiento en pavimentos chilenos.

- RODRÍGUEZ OCAMPO, H. J. 2011. Consideraciones para el diseño geométrico y pavimentación con adocretos en vías urbanas.
- TOMÁS JOVER, R., BAÑÓN BLÁZQUEZ, L. & FERREIRO PRIETO, J. I. 2002. La estabilidad del vehículo en las curvas: Aspectos geométricos y su influencia en el coeficiente de seguridad.
- TREAT, J. R., TUMBAS, N. S., MCDONALD, S. T., SHINAR, D., HUME, R. D., MAYER, R. E., STANSIFER, R. L. & CASTELLAN, N. J. 1979. Trilevel study of the causes of traffic accidents: final report - executive summary. Bloommington. *Institute for research in public safety.*
- VALVERDE GONZÁLEZ, G. 2013. *Manual para el desarrollo de proyectos de infraestructura desde la óptica de la seguridad vial*, Costa Rica
- WANG, J. 2006. *Operating Speed Model for Low Speed Urban Tangent Streets Based on In-Vehicle GPS Data. 85th TRB Annual Meeting*

**ANEXOS**

**Anexo I: Accidentalidad en Santa Clara en el año 2016.**

| Fecha    | Dirección/<br>lugar                 | Vehículos          | Fallecidos | Lesionados | Daños \$ | Artículo<br>e inciso | Causas                           |
|----------|-------------------------------------|--------------------|------------|------------|----------|----------------------|----------------------------------|
| 15-04-16 | Carretera a<br>manicaragua<br>km 4  | Camión-<br>ómnibus | -          | -          | 1000.00  | 79.5                 | Colisión<br>entre veh<br>en mov. |
| 19-04-16 | Carretera a<br>manicaragua<br>km 4  | Auto-auto          | -          | -          | 400.00   | 85.1                 | Colisión<br>entre veh<br>en mov. |
| 20-04-16 | Puente<br>clemente<br>km 21         | Auto-<br>camión    | -          | 1          |          | 162.3                | Colisión<br>entre veh<br>en mov. |
| 12-03-16 | Carretera a<br>manicaragua          | Auto-vta           | -          | -          | 100.00   | 85.1                 | Colisión<br>entre veh<br>en mov. |
| 29-02-16 | Carretera a<br>manicaragua<br>km 18 | Auto-<br>animal    | -          | -          |          | 119                  | Atropello<br>a animal            |
| 27-02-16 | Casanova<br>km 20                   | Auto-vta           | -          | -          |          | 102.4                | Colisión<br>entre veh<br>en mov. |
| 04-01-16 | Carretera a<br>manicaragua<br>km 6  | Camioneta          | 2          | 1          | 700.00   | 102.12               | Vuelco                           |
| 04-01-16 | Carretera a<br>manicaragua<br>km 28 | Jeep-auto          | -          | -          |          | 102.12               | Colisión<br>entre veh<br>en mov. |
| 16-01-16 | Carretera a<br>manicaragua<br>km 18 | Auto-<br>animal    | -          | -          | 500.00   | 102.12               | Atropello<br>a animal            |
| 16-01-16 | Casanova<br>km 20                   | Auto-<br>peatón    | -          | 1          |          | 102.12               | Atropello<br>a animal            |
| 17-01-16 | Carretera a<br>manicaragua<br>km 27 | Moto-vta           | -          | -          |          |                      |                                  |
| 13-05-16 | Puente<br>clemente<br>Km 21         | Rastra-<br>camión  | -          | 15         |          | 161                  | Colisión<br>entre veh<br>en mov. |
| 12-06-16 | Mataguá km<br>18                    | Auto-vta           | -          | -          | 1000.00  | 146.3                | Colisión<br>entre veh<br>en mov. |

## Anexos

|          |                                             |                  |   |   |         |        |                            |
|----------|---------------------------------------------|------------------|---|---|---------|--------|----------------------------|
| 12-06-16 | Carretera a manicaragua km 20               | Camión           | - | - | 1000.00 | 102.12 | Vuelco                     |
| 17-06-16 | Seibabo km 10                               | Auto             | - | 1 | 3000.00 |        | Choque contra obj fijo     |
| 15-06-16 | Carretera a manicaragua km 1                | Vehículo-ómnibus | - | - | 500.00  |        | Colisión entre veh en mov. |
| 15-06-16 | Carretera a manicaragua km 4                | Auto             | - | - |         | 128.5  | Vuelco                     |
| 02-07-16 | Carretera a manicaragua km 19               | Jeep-auto        | - | 1 | 1000.00 | 164.20 | Colisión entre veh en mov. |
| 02-07-16 | Carretera a manicaragua km 16               | Auto             | - | - | 4500.00 |        | Choque contra obj fijo     |
| 27-07-16 | Carretera a manicaragua                     | Moto-vta         | - | - | 100.00  | 78.5   | Colisión entre veh en mov. |
| 17-08-16 | Carretera a manicaragua km 3 <sup>1/2</sup> | Camión-auto      | - | - | 50.00   | 102.12 | C.e.v.m                    |
| 17-08-16 | Carretera a manicaragua km 5                | Camioneta        | - | - |         | 102.12 | C vuelco                   |
| 30-10-16 | Carretera manicaragua a santa clara         | Auto-animal      | - | - |         |        | Colisión                   |
| 10-10-16 | Finca cardoso carretera a manicaragua       | Moto             | - | 2 |         | 102    | Vuelco                     |
| 18-10-16 | Carretera a manicaragua km 12               | Ómnibus-auto     | - | - |         | 182    | Colisión                   |
| 21-10-16 | Carretera a manicaragua el rodeo            | Camión-peatón    | - | 1 |         | 145.7  | Colisión                   |
| 17-11-16 | Carretera a manicaragua casanova            | Equino-yutong    | - | - |         | 102.12 |                            |
| 03-11-16 | Carretera a manicaragua                     | Camión-jeep      | - | - |         | 102.12 |                            |

## ***Anexos***

|          |                                     |        |   |    |        |        |  |
|----------|-------------------------------------|--------|---|----|--------|--------|--|
|          | km 1                                |        |   |    |        |        |  |
| 16-12-16 | Carretera a<br>manicaragua<br>km 24 | Camión | - | 8  | 500.00 | 102.12 |  |
| Total    |                                     |        | 2 | 31 |        |        |  |