**12no SIMPOSIO INTERNACIONAL**

**DE ESTRUCTURAS, GEOTECNIA Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

**III Coloquio de Ingeniería Vial y Obras de Transporte**

**Ponencia: “Buenas Prácticas de Diseño Geométrico de Vías Férreas”**

**“Good Design Practices Railways”**

**Autor: Ing. Ángel J. Castro Vidal**

Centro laboral: EMPROY VC, MICONS. E mail: angelc@emproyvc.co.cu

**Resumen:**

Este trabajo consiste en el perfeccionamiento del procedimiento de diseño geométrico de las vías férreas cubanas y sus obras de fábrica menores y mayores, considerando las buenas prácticas adquiridas en las últimas décadas en diferentes proyectos de vías férreas en la EMPROY del MICONS de Villa Clara. Lo novedoso de esta investigación es que en la misma se proponen procedimientos y criterios de diseño, basados en las experiencias acumuladas durante muchos años de labor en esta actividad, por varios especialistas de esa entidad.

**1. Introducción**

Es cierto que el transporte por carreteras brinda muchas facilidades a la transportación de mercancías y personas por su rapidez y accecibilidad, pero su extensiva explotacón ha traido consigo algunos problemas colaterales: como el uso excesivo de combustibles fósiles, lo que en los últimos años ha provocado una disminución paulatina e inquietante de las reservas de petroleo en el mundo, el congestionamiento de las carreteras, un incremento de la accidentalidad y otros aspectos negativos como la ocupación de más espacios, lo que en los paises desarrollados constituye un verdadero mal nacional, así como la contaminación de la atmosfera, en un grado tan elevado que perjudica de manera cada vez más alarmante la salud de los seres humanos y al medio ambiente en general. Siendo estas, las razones principales que demuestran la importancia de utilizar las vías férreas para las transportaciones masivas de mercancias y pasajeros.

**Problemática:** La situación que presenta el diseño geométrico de las vías férreas cubanas es satisfactoria, al estar normalizado el procedimiento de diseño, sin embargo, en la bibliografía existente y en las normas técnicas vigentes no se contemplan todos los criterios de diseño necesarios para garantizar un eficaz trazado en planta y perfil, así como considerar las buenas prácticas para el diseño hidrológico e hidráulico de sus alcantarillas y puentes, con su racional dimensionamiento.

**Objetivo:** Dejar evidencia documental de las buenas prácticas que se deben considerar en el diseño geométrico de las vías férreas cubanas y de sus obras de fábrica mayores y menores, perfeccionando de esa manera la labor de diseño de estas importantes vías de comunicación terrestre en las empresas de proyecto del país.

**2. Metodología**

Se realizó una búsqueda bibliográfica actualizada en la intranet de la UCLV, en internet y en la documentación existente en el MICONS y el MITRANS, sobre el desarrollo del ferrocarril a nivel mundial y en Cuba. Existe un numeroso grupo de autores e instituciones que abordan el diseño de este tipo vías de comunicación terrestre, entre los autores más recientes se encuentran los libros de: (Crespo, 2000); (López-Pita, 2006); (Lima, 2011); (Manual de la UFC, 2015)**,** que abordan la teoría y los cálculos sobre el diseño geométrico; existe también abundante documentación normalizativa vigente en Cuba, tales como: las Normas Cubanas (NC**)** y las Normas Ramales del Ministerio de Transporte **(**NRMT); existen además diferentesinstituciones como la RENFE (España), la American Railway Engineering Association (AREA) de los EUA, la COPAN (Latinoamérica) y la UFC de Cuba, que abordan este tema, pero prácticamente ninguno de los autores e instituciones aportan las buenas prácticas adquiridas, para perfeccionar el diseño geométrico de las vías férreas, que deben considerarse en el procedimiento de diseño.

**3. Resultados y discusión**

Por supuesto, que para realizar el diseño de cualquier vía férrea es imprescindible apoyarse en las normas de diseño vigentes: la NC 1237:2018 sobre explanación de las vías férreas; la NC 249:2003 sobre clasificación de las vías férreas; la NRMT 79:2003 sobre el diseño geométrico de la planta; la NRMT 37: 2001 sobre diseño geométrico del perfil; la NRMT 212: 1986; la NRMT (vías y puentes) sobre superelevación de la vía férrea; con sus respectivas tablas y fórmulas, además de consultar las demás normas señaladas en la bibliografía. No obstante, las tablas, gráficos y fórmulas de las normas mencionadas no forman parte de esta ponencia, pero si las buenas practicas adquiridas (expresadas como criterios de diseño), que son los siguientes:

 **3.1 Criterios de diseño del trazado en planta propuestos para vías férreas nuevas**

* El primero de esos criterios es tratar de comunicar el origen y destino de la vía a proyectar con la menor longitud posible, pero la experiencia ha demostrado que la eficacia del diseño es prácticamente imposible sin el conocimiento de la topografía del terreno, analizando posibles variantes sobre cartas topográficas (a escalas apropiadas; como mín. 1: 25 000), siendo recomendable además visitar y recorrer los posibles trazados, no solo para conocer las dificultades topográficas de cada variante, sino también los tipos y posibles propiedades físico mecánicas de los suelos de cimentación en cada variante; o sea: si son rocosos, areno-arcillosos, blandos, etc. Además, para conocer el tipo de propiedad (estatal o particular) de los suelos que atraviesa cada variante y otras afectaciones tales como: viviendas, edificaciones, etc., ya que en muchas ocasiones esos aspectos definen cambios en las variantes o el estudio nuevas variantes.
* Otro criterio importante a tener en cuenta es la cantidad de ríos, arroyos y vanos que atraviesa cada variante, y por tanto la cantidad de puentes y alcantarillas que será necesario construir. Se debe señalar que resulta indeseable que en un tramo de vía menor de 500 m se intercepte dos o más veces un mismo rio, sobre todo si este requiere puentes de 60-80 m de longitud. En estos casos es preferible que la variante seleccionada tenga unos 500 m más de longitud, para evitar la construcción de más de un puente. Esto se hace aún más necesario si la solución de cimentación de esos puentes es compleja, por ejemplo por la existencia de suelos blandos.
* Estos criterios de diseño propuestos **para vías nuevas** se han estado utilizando prácticamente en todos los proyectos elaborados en la EMPROY de Villa Clara, desde mediados de la década de los años 80 del siglo pasado. Debe destacarse que la elaboración de proyectos por etapas facilita el análisis de variantes, sea: en Esquemas (o Ideas) Preliminares o en la etapa de Anteproyecto, sin embargo en la etapa de Proyecto Ejecutivo casi nunca es posible analizar variantes, ya que el certificado micro-localización aprobado para la obra casi siempre lo impide.

**3.2 Criterios de diseño del trazado en planta propuestos para vías férreas a reconstruir**

* Con mucha frecuencia es necesario aprovechar una explanación o infraestructura existente y en esos casos lo más recomendable es restablecer las alineaciones rectas de la vía antigua y tratar de rediseñar las curvas -casi siempre ampliando sus radios y sus curvas de transición-, para aumentar la categoría de la vía y su velocidad de diseño.
* Además de rediseñar las curvas es muy frecuente la necesidad de limpiar y ampliar la explanación en los tramos rectos, por su contaminación con material vegetal y por el estrechamiento producido por la erosión de los arrastres producidos por las lluvias. Para reconstruir los anchos del terraplén se deben emplear suelos granulares compactados a su máxima densidad seca, con una capa mínima de 20 cm de espesor hasta nivel de sub rasante. Recomendándose además reabrir las cunetas y mejorar el sistema de drenaje, así como limpiar la faja de la vía cercándola debidamente.
* Estos criterios de diseño propuestos **para vías a reconstruir** también se han estado utilizando prácticamente en todos los proyectos elaborados en la EMPROY de Villa Clara, desde mediados de la década de los años 80 del siglo pasado.
* Para reconstruir el ancho de las explanaciones hay que cumplir lo establecido en la Figura 1, procedente de la norma NC 1237:2018; sobre Explanación de las Vías Férreas. No obstante, en tramos de terraplenes altos y tramos en corte profundos (entre 6 y 12 m), se debe revisar la estabilidad de los taludes, empleando el paquete de programas GEOESTUDIO, específicamente el GEO SLOPE y para estimar la magnitud de los asentamientos el SIGMA W del mismo paquete computacional. En caso de posible inestabilidad en los taludes, pueden aplicarse medidas que aseguren su necesaria estabilidad, las cuales pueden ser:
1. Construcción de bermas laterales
2. Modificación de la pendiente del talud en tramos y/o el empleo de escalones.
3. Reforzar el talud empleando tecnologías disponibles (gaviones, tierra armada, geotextiles, anclajes, etc.
* Si la magnitud calculada del asentamiento es inadmisible, ya que supera el 1% de la altura del terraplén, deben adoptarse otras medidas que pueden ser:

1. Desplazar el suelo débil de cimentación cuando exista un espesor menor de 2 m, empleando suelos de alto peso específico (preferiblemente mayores de 2 t/m3), asegurando que el frente de avance del terraplén posea forma de saeta o quilla de barco.

2. Eliminar suelo de cimentación sustituyéndolo por un cimiento: faja de suelo constituida por un suelo granular de excelente a bueno (A-1 o A-2), con un espesor entre 0,80 y 1.00 m, debidamente compactado.

3. Si los espesores de suelo de cimentación débil son grandes, se ejecutarán drenes verticales mediante pozos o pilotes de arena o mechas drenantes, para acelerar la manifestación de los asentamientos y una vez producidos alrededor del 90 % de éstos, proceder a la construcción del terraplén en un intervalo usualmente a partir de los 9 o 12 meses.

**3.3 Criterios de diseño del trazado de la rasante propuestos para vías férreas nuevas**

* Después de seleccionada la mejor variante en planta y perfil, el principal criterio de diseño de la rasante del perfil en cualquier etapa del proyecto es proyectar la rasante más baja posible en los tramos en terraplén y la más alta posible en los tramos en corte. Con ello se minimizan los movimientos de tierra, lo que incide directamente en la disminución de los costos de construcción y los impactos ambientales de la obra. Para conseguirlo es necesario realizar primero los cálculos hidrológicos de las cuencas de cada cauce (de ríos y arroyos). Segundo, con los resultados de esos cálculos: gasto de diseño para una probabilidad dada, según la categoría de la vía, realizar después el diseño hidráulico del conducto a proyectar en cada cauce, definiendo: el tipo de conducto, sus dimensiones, la altura del agua en la entrada, su cota de invertida, etc. Y por último, con los datos del recubrimiento mínimo para cada tipo de conducto, determinar la altura mínima de la rasante sobre cada Obra de Fábrica Menor (OFM). Si alguno de los gastos de diseño excede los 30 m3/seg., ese cauce requerirá un puente y por tanto la altura de la rasante dependerá del tipo de solución: un puente de losas o un puente de vigas y losas, considerando que la diferencia mínima entre el nivel de aguas máximo y el nivel inferior de la estructura debe ser mayor de 0.50 m.
* Otro importante criterio de diseño de la rasante son los puntos de rasante obligada, tales como: los Pasos a Nivel con vías automotores (ver la NC 196-1:2004), así como los tramos en corte mayores de 400 m de longitud en los que se deben diseñar pendientes mínimas de 0.2 % hacia el comienzo y el final del corte.
* Además resulta importante que los puntos más bajos de las curvas verticales (simétricas o asimétricas) estén ubicados sobre las OFM, para facilitar el drenaje lateral de la explanación y tratar de minimizar los impactos ambientales, ya que el trazado de las rasantes y las pendientes de la invertida de las cunetas deben parecerse lo máximo posible al perfil del terreno natural.
* Estos de criterios de diseño del trazado de la rasante propuestos **para vías férreas nuevas** se han utilizado desde la etapa de Proyecto Técnico en los distintos tramos del FFCC Guabairo – La Campana en la provincia de Cienfuegos. Aunque justo es señalar que en varios tramos, por las irregularidades del perfil del terreno, no se pudieron diseñar alturas mínimas de terraplén sobre las OFM, con el objetivo de disminuir la profundidad de los cortes, además por la existencia de varios puntos de rasante obligada, tales como: los tres Pasos a Nivel con la Carretera: Cienfuegos – Cumanayagua, varios caminos importantes y en el puente El Guajiro, que es existente y aprovechable.

**3.4 Criterios de diseño del trazado de la rasante propuestos para vías férreas a reconstruir**

* En vías a reconstruir los criterios de diseño del trazado de la rasante se deben enfocar de dos maneras distintas: si es necesario reconstruir el sub-balasto (capa de subrasante) o si no es necesario reconstruir esa capa de subrasante. En el primer caso el principal criterio de diseño es muy similar al de las vías nuevas, o sea diseñar la subrasante más baja posible en los tramos en terraplén y diseñar una altura mínima de 0.30 m sobre el suelo natural en los tramos en corte, (si este no cumple las exigencias mínimas de subrasante del epígrafe 5.3.3 de la norma NC 1237:2018), para diseñar sobre ese suelo natural una nueva capa de subrasante.
* En el caso de que no sea necesario reconstruir la capa de subrasante, lo más recomendable es realizar pequeñas excavaciones -de 3 a 8 cm- sobre la subrasante existente, perfilarla y compactarla nuevamente, manteniendo una faja central horizontal de 2 m de ancho y franjas laterales con bombeos laterales del 5 %, antes de construir la nueva superestructura de la vía. Con esas pequeñas excavaciones casi siempre se logra recuperar el ancho de la explanación, de modo que la distancia entre el pie de talud del balasto y el hombro de la explanación sea mayor de 0.25 m.
* Como se puede apreciar, aplicando estos criterios en las reconstrucciones de vías férreas lo que realmente se diseña es la subrasante y partiendo de esta; con el espesor de balasto debajo de las traviesas, la altura de las mismas y la altura de los carriles (datos siempre predeterminados), finalmente calcular las cotas de rasante de la vía férrea: Cotas de Carril Proyectadas (CCP).
* Las exigencias mínimas que deben cumplir los suelos de la capa de coronación o subrasante del terraplén de una vía férrea, según elepígrafe 5.3.3 de la norma NC 1237:2018, son las siguientes:

 CBR > 20 %.

 Módulo de Elasticidad > 150 MPa

 El hinchamiento del suelo < 2 %

 El % de materia orgánica < 1 %.

 No existan partículas o fragmentos de rocas, con tamaño máximo de 10 cm.

 El material que pasa el tamiz No. 200 < 20 %.

* Se debe destacar que en los proyectos de reconstrucción casi siempre la rasante de la vía a reconstruir es más baja que la rasante de la vía existente, lo cual es lógico, ya que usualmente en las llamadas ¨reparaciones capitales¨, lo que realmente se hace para lograr la nivelación de las vías, es levantar las rasantes, siendo esta la causa principal (además de la erosión de la explanación), por la que se observan con bastante frecuencia derrames de balasto en los taludes, en el pié de estos y en las embocaduras de las obras de fábrica, una mala práctica que debe erradicarse.
* Estos de criterios de diseño del trazado de la rasante propuestos **para vías férreas a reconstruir** se han estado utilizando en la etapa de Proyecto Ejecutivo en todos los tramos del FFCC Central, que han requerido reconstrucción en los últimos 10 años, en las provincias de Villa Clara, Ciego de Ávila, Camagüey y Las Tunas.

**3.5 Criterios de diseño propuestos para la coordinación de los trazados en planta y rasante de las vías férreas.**

* Igual que ocurre en el diseño de otras vías, en el diseño de las vías férreas no se deben proyectar curvas verticales en cima en los puntos de inicio y fin de curvas horizontales, para facilitar la visibilidad ante cualquier obstáculo que se presente en las curvas, lo que tiene mayor importancia en las vías férreas, ya que en estas las distancias de frenado son mayores.
* Del mismo modo no se deben proyectar curvas verticales en depresión en los puntos de inicio y fin de curvas horizontales, pues en los puntos (TS y ST) es donde comienza la superelevación de las curvas, y precisamente en las curvas verticales en depresión es donde los trenes deben alcanzar mayores velocidades, sin embargo, en esos puntos la superelevación de las curvas horizontales no debe ser suficiente para esas velocidades.
* En caso de que coincidan curvas verticales en cima y curvas horizontales, estas últimas deben predominar en cuanto a su longitud, para evitar que las curvas horizontales queden ocultas por las curvas verticales.
* No se deben diseñar cambios de pendiente (con curvas verticales o sin ellas), en los puntos donde se proyectan -o existan- conexiones para apartaderos paralelos o para haces de vías de patios ferroviarios, ya que las conexiones de la superestructura no admiten curvaturas verticales.

**3.6 Criterios de diseño propuestos para los cálculos Hidrológicos e Hidráulicos en las vías férreas**

* El principal criterio de diseño para las Obras de Fábrica (mayores o menores) es el empleo del denominado Método Racional, en el cual se determina el gasto o caudal a evacuar por la expresión: **Q = 16.67 C.I.A** en m3/seg., mediante los cálculos hidrológicos de las cuencas que aportan y que se cierran por la construcción de las vías. En esa fórmula **C** es el coeficiente de escurrimiento (promedio ponderado) en cada cuenca, **I** es la intensidad de las lluvias a considerar en los cálculos (depende del tiempo de concentración y de la zona donde esté ubicada la obra), y **A** es el área de la cuenca en km2. Este método de cálculo es recomendable usarlo para cuencas de hasta 25 km2 de superficie, para cuencas mayores o en ese entorno, los especialistas en puentes utilizan además otros métodos de cálculo.
* Para diseñar las Obras de Fábrica Menores (OFM) de las vías férreas se recomienda utilizar la hoja de cálculo TRF1 (EXCEL: 2010), elaborada en la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara, pues en la misma están tabulados la mayoría de los datos necesarios para aplicar la fórmula racional y contiene los diagramas necesarios para calcular otros, además se facilita la elección de los conductos a diseñar mediante otras tablas contenidas en la hoja de cálculo.
* Otro criterio importante para el diseño hidráulico de las Obras de Fábrica, está dado por si en determinado lugar se hace necesario bajar el nivel de aguas máximo en la entrada de alguna obra de fábrica (puente o alcantarilla), por la existencia de niveles de piso de objetos importantes o viviendas, con muy poca diferencia en relación con el nivel de la invertida de esa OF. En estos casos: si se trata de un puente se diseñan más luces y si se trata de una alcantarilla se diseñan más conductos que los necesarios para evacuar el gasto, con el objetivo de reducir la altura máxima de aguas en la entrada de la misma, no obstante, la cantidad de conductos (o hileras), en el caso de las alcantarillas no debe exceder de tres, pues la práctica ha demostrado que cuando son más de tres, los conductos extremos se obstruyen con mucha facilidad.
* Estos de criterios de diseño propuestos para los cálculos hidrológicos e hidráulicos se han estado empleando desde las etapas iniciales en varios proyectos elaborados en la EMPROY de Villa Clara durante los últimos 10 años, tales como: el FFCC de Planta de Traviesas Cuba 71 en Santa Clara, el Apartadero del Tren Universitario junto al monumento del Tren Blindado en Santa Clara, el FFCC Guabairo-La Campana en la provincia de Cienfuegos, etc.

**3.7 Resultados de los criterios de diseño propuestos**

Los dos primeros ejemplos citados en el parrafo anterior son vias férreas nuevas y de poca longitud, por esta última razón no se emplearon los criterios de diseño propuestos para el trazado en planta. Sin embargo, en los mismos si se tuvieron en cuenta los criterios de diseño propuestos para: el trazado de las rasantes, la coordinación planta - perfil y el diseño de las obras de fábrica. Debe destacarse que la aplicación de esos criterios representó un ahorro considerable en los volúmenes de movimiento de tierra (y por tanto en el valor de construcción de las obras) e incidió satisfactoriamente en la reducción de los impactos ambientales producidos por ellas. Las aplicaciones más recientes de los criterios de diseño propuestos para vias férreas a reconstruir corresponden a varios tramos del FFCC Central desde el Km 427.8 hasta el Km 462.3 en la provincia de Ciego de Ávila, y en los tramos del FFCC Central más próximos a la ciudad de Camagüey: desde el Km 521 hasta el Km 528, donde se minimizaron los volumenes de terraplén de mejoramiento -necesarios para la capa de subrasante-, pues se diseñaron rasantes entre 5 y 10 cm más bajas que la rasantes existentes en el momento de elaborar los proyectos, con el consiguiente ahorro de recursos. Además se diseñó la eliminación del espesor excesivo de balasto para evitar los derrames de este material en los taludes, en el pié de estos y en las embocaduras de las obras de fábrica, así como la reapertura de cunetas y la mejora de todo el sistema de drenaje, lo que redujo los impactos ambientales que se estaban produciendo en esos tramos.

**4. Conclusiones**

* En esta ponencia se exponen las buenas prácticas -expresadas como criterios de diseño-, a considerar en el diseño geométrico de las vías férreas cubanas y sus obras de fábrica mayores y menores, basadas en las experiencias acumuladas durante casi 40 años de labor por varios especialistas de proyectos de la EMPROY del MICONS de Villa Clara, las cuales hacen posible elaborar diseños más eficaces y racionales, perfeccionando de esta manera la labor de diseño de estas importantes vías de comunicación terrestre.
* Los resultados de aplicación de los criterios de diseño propuestos han sido satisfactorios en todos los ejemplos de proyectos realizados, señalados en el contenido de esta ponencia, pero como se planteó en las primeras agrupaciones de criterios de diseño, la mayoria de ellos se han estado utilizando prácticamente en todos los proyectos elaborados en la EMPROY de Villa Clara, desde mediados de la década de los años 80 del siglo pasado. No obstante, en realidad esos criterios se han ido formando con el tiempo, por tanto se puede esperar –que también con el tiempo- sea posible mejorarlos e incrementarlos.

**5. Referencias bibliográficas**

1. Arenas Moré, Milagros. Metodología para la organización del proceso tecnológico de las reparaciones ligeras de vías férreas. Tesis de Maestría en Vías de Comunicación Terrestr*e*, Segunda edición. UCLV Santa Clara, 2014.
2. Crespo Villalaz, Carlos. Vías de Comunicación. Tercera Edición México: Editorial Limusa, 2000 – p 715.
3. De Las Cuevas Toraya, Juan. 500 años de Construcciones en Cuba, Editorial Chavín, Madrid, España, 2001.
4. Hernández Hernández, Katia. Automatización del Diseño Geométrico y Estructural de las Vías Férreas en Cuba. Tesis de Maestría en Vías de Comunicación Terrestr*e*, Segunda edición. UCLV Santa Clara, 2014.

Lima Menendez, Juan. Diseño, construccion y conservación de vías férreas. Tesis de Maestría en Vías de Comunicación Terrestres, Primera edición. UCLV, Santa Clara, 2011.

1. López Pita, Andrés. Infraestructuras ferroviarias. Primera Edición. Ediciones UPC. Barcelona. España, 2006.
2. Manual de Vías Férreas. Unión de Ferrocarriles de Cuba (UFC), MITRANS.

 La Habana, 2015.

1. Orta Amaro, Pedro A. Tecnología de la Construcción de Explanaciones. Editorial Félix Varela, La Habana, 2013.
2. Rojas Trujillo, Arley M. Perfeccionamiento de las asignaturas de las actividades de Vias Férreas para el Plan D. Trabajo de Diploma UCLV, Santa Clara, 2008.

**Normas de la Construcción (NC)**

NC 48-31:1984 Probabilidad de Diseño y Comprobación para Protección contra Innundadiones de avenidas de las obras

NC 249:2003 Transporte Ferroviario. Vías Férreas Clasificación de Vías Férreas

NC 196-1:2004 Transporte Ferroviario-Cruce con vías automotores-Parte 1 Diseño Geométrico

NC 196-2:2004 Transporte Ferroviario-Cruce con vías automotores-Parte 2 Requisitos de visibilidad en los Pasos a Nivel.

NC 197:2004 Transporte Ferroviariio-Vías Férreas-Balasto de piedra trturada-Especificaciones

NC 643:2008 Transporte Ferroviario-Vías Férreas-Gálibos de Ferrocarril.

NC 1237:2018 Transporte Ferroviario - Vías Férreas - Explanación de las Vías Férreas.