

# Metodología de análisis y diseño de lechos de frenado

## Methodology for assessement and design of arrestor beds

Tomás Echaveguren\*<sup>1</sup>, Sergio Vargas\*\*, Juan Ñancufil\*\*\*

\* Profesor Asistente, M.Sc. Universidad de Concepción, CHILE

\*\* Profesor Asistente, M.Sc. Universidad del Bio Bio, CHILE

\*\*\* Ingeniero Civil, Universidad de Concepción, CHILE

Fecha de recepción: 15/ 10/ 2007  
Fecha de aceptación: 20/ 11/ 2007  
PAG. 175 - 184

### Resumen

En pendientes descendentes prolongadas, los vehículos pesados enfrentan el riesgo de corte de frenos. Para mitigar el potencial daño, existen sistemas que permiten que el vehículo salga de la calzada hacia un dispositivo de contención. El más empleado en el mundo es el Lecho de Frenado (LF). Normativas de diseño nacional y extranjeras contienen criterios de diseño geométrico basados en la norma AASHTO (2001), la cual establece una velocidad de diseño fija, sin considerar las características de la pendiente del camino. Estas normativas tampoco proponen criterios analíticos que permitan al diseñador evaluar la necesidad y localización de los lechos de frenado. En este trabajo se propone una metodología secuencial de análisis y diseño de LF. Esta metodología proporciona criterios analíticos para evaluar la necesidad y la localización de un LF, en base al perfil de temperatura del sistema de frenos de camiones propuesto por Browman (1989). Para el diseño geométrico del LF se propone un método energético para determinar el perfil de velocidad y calcular la velocidad de diseño del LF en función de la longitud de la pendiente y la magnitud de la pendiente. Esta metodología proporciona criterios objetivos que permiten al diseñador resolver las principales interrogantes del diseño de un LF: ¿Es necesario utilizarlo?, ¿Dónde localizarlo?, ¿Qué velocidad de diseño emplear?. Para ilustrar la utilidad de la metodología propuesta se evaluó un LF en operación. Se determinó que su diseño era insuficiente, por lo cual se propuso reubicarlo, utilizar un atenuador de impacto y disponer señales de velocidad máxima para el descenso de camiones.

Palabras Clave: Lechos de frenado, vehículo pesado, corte de frenos, velocidad

### Abstract

In a long descending slopes heavy vehicles might lose control and runaway downgrade. To mitigate the potential damage, exist several systems that permits heavy vehicles leave the lane and stop. These systems are known as Arrestor Bed (AB). Design Standards consider the geometric criteria proposed by AASHTO (2001) standards. AASHTO recommend a constant value of the design speed for AB. Also, recommends general criteria to evaluate the need and location of an AB. The standards does no proposed analytic procedures to the designer assess the need and location of an AB. In this work, a methodology of analysis and design of AB is proposed. The methodology applies analytic criteria to evaluate the need and the location of an AB based on the brake temperature profile of trucks developed by Bowman (1989). Also, an energetic based method to estimate speed profile and design speed is proposed. The method consider the slope and the length of the slope. The proposed methodology allows to the designer to solve the main questions in the design of AB: ¿It is necessary an AB? ¿Where to locate it? ¿What is the design speed?. To illustrate the proposed methodology an AB at present in operation was analyzed. It was determined that is necessary to relocate de AB, to design an impact attenuator, and to post a limit speed for heavy vehicles in the downgrade lane.

Keywords: Arrestor beds, heavy vehicle, runaway, speed

## 1. Introducción

En pendientes prolongadas existe la probabilidad que falle el sistema de frenos de un vehículo pesado por sobrecalentamiento, caso en el cual el conductor pierde el control sobre el vehículo. Esto se produce debido a que en una pendiente, la aplicación intermitente de los

frenos calienta progresivamente los elementos internos, causando un proceso de fatiga térmica que termina por destruir el sistema de frenos. En estos casos el conductor pierde la capacidad de regular la velocidad durante el descenso, con la consecuente pérdida de control. Para

<sup>1</sup> Autor de correspondencia / Corresponding autor:  
Facultad de Ingeniería, Edmundo Larenas s/n, Casilla 160-C, Correo 3, Concepción.  
Teléfono: (56) 02 - 354 4244, E-mail: techaveg@udec.cl

reducir las consecuencias negativas de este tipo de incidentes, se utilizan los sistemas de contención. Un sistema de contención corresponde a todo dispositivo instalado en el costado o en la mediana de una carretera, con el objeto reducir la gravedad de los incidentes originados por vehículos fuera de control que abandonan la calzada (INN, 1999).

Dentro de la categoría de sistemas de contención se encuentran las Vías de Emergencias (VDE), que consisten en una pista ubicada en el costado o mediana del camino para permitir el escape y detención de los vehículos que pierden el control. VDE es un término genérico que incluye dispositivos tales como Pilas de Arena, Vías de Gravedad y Lechos de Frenado (LF). En la literatura se conocen como “Rampas de Escape para Camiones” (Truck Escape Ramps).

La Pila de Arena (Sand Pile) es un montón de arena de dimensión compacta dispuesta al costado del camino, que tiene por objetivo amortiguar el impacto de un vehículo. La Vía de Gravedad (Gravity Ramp) es un camino dispuesto como salida de la carretera, con una inclinación longitudinal ascendente y de superficie compacta, de modo tal que logra detener el vehículo por efecto de la gravedad. El Lecho de Frenado (LF) (Arrestor Bed) es una variante de la vía de gravedad, que combina el efecto del rozamiento, pérdida de energía cinética y amortiguadores de impacto para detener un vehículo.

En Chile, existe experiencia reciente en el uso de estos dispositivos. En efecto, haciendo abstracción de las variedades de diseño, en el país existen aproximadamente 13 sitios en donde se localizan estos dispositivos. El diseño de tales LF es reciente y se basó esencialmente en la experiencia del diseñador y el uso de normativas extranjeras (Mera y Mondaca, 2001).

Las versiones actualizadas del Manual de Carreteras de Chile incorporaron criterios de necesidad, localización y diseño. Los criterios de necesidad son generales y reactivos, puesto que se basan en la ocurrencia de accidentes por falla de frenos y por otro lado en condiciones geométricas más que de la dinámica de la conducción. Desde el punto de vista del diseño, el Manual de Carreteras de Chile adopta los criterios de diseño de la norma AASHTO 2001. Una de las limitaciones del método de diseño expuesto en el Manual de Carreteras es que utiliza una velocidad de diseño que es fija y que depende de la velocidad de proyecto, independientemente de la velocidad de circulación y del fenómeno de corte de frenos. Esto impide que los

diseños sean optimizados a las condiciones específicas tanto desde el punto de vista del trazado como del vehículo en los sectores potencialmente candidatos a emplazar un lecho de frenado.

En este artículo se presenta una metodología de análisis de lechos de frenado que complementa los procedimientos de diseño utilizados actualmente en Chile. La metodología propuesta proporciona al diseñador herramientas para determinar cuándo y dónde localizar lechos de frenado además de calcular la velocidad de diseño del mismo. La metodología permite además determinar si es necesario o no un atenuador de impacto en conjunto con el lecho de frenado.

## 2. Criterios normativos de diseño de lechos de frenado

El diseño de LF, obedece a un concepto de compensación de seguridad ante trazados que no admiten soluciones alternativas. Bajo este precepto, las instrucciones de diseño entregan procedimientos de diseño geométrico y aspectos relacionados con señalizaciones y demarcaciones.

A pesar de la diversidad de criterios de diseño que se encuentra en las normativas, es posible identificar un enfoque subyacente a todas ellas. Este es el abordar el proyecto del LF en forma integral, considerando los tres pasos esenciales de su ciclo de vida: Diseño, Ejecución y Operación (Ñancuñil, 2002). El interés de este artículo se centra en la etapa de diseño. En esta etapa, las preguntas básicas que surgen son: ¿Es necesario el LF?, ¿Dónde debe localizarse el LF?, ¿Cuál es la velocidad de diseño? ¿Cuál es su configuración geométrica?. Estas interrogantes dan origen a los criterios generales de diseño que se exponen a continuación.

### 2.1 Criterio de necesidad

El criterio de necesidad responde la primera pregunta a resolver en el diseño ¿Es necesario un LF?. Las normativas intentan responder esta pregunta proponiendo una serie de criterios como los que se muestran en Tabla 1. A partir de dicha Tabla se pueden identificar los siguientes situaciones que determinan la necesidad de un LF:

- (a) En caminos existentes, en base a la presencia de pendientes descendentes prolongadas y ocurrencia de accidentes, y
- (b) en caminos nuevos, cuando las restricciones de diseño

obliguen a emplear pendientes prolongadas y con una pendientes superior a cierto valor sobre cierta longitud.

Las normativas no proporcionan herramientas analíticas para estudiar racionalmente la necesidad de utilizar un LF (Witthford, 1992). Particularmente, Abdelwahab y Morral (1997) proponen el sistema Grade Severity Rating System (GSRG) desarrollado originalmente por Bowman (1989) como una herramienta adecuada para determinar la necesidad de construir un LF en pendientes prolongadas, pero no la implementan en un proceso sistemático de diseño.

## 2.2 Criterio de localización

Este criterio corresponde a la elección del lugar al interior de la pendiente donde se emplazará el LF, teniendo en cuenta las restricciones funcionales y físicas que impone una localización u otra. Las normativas revisadas ofrecen criterios generales de localización, los cuales se resumen en la Tabla 2.

## 2.3 Criterio de cálculo de velocidad de diseño

Las normativas revisadas utilizan dos criterios de

cálculo. Las normativas AASHTO (2001) recomienda utilizar un valor fijo de 140 Km./h. Las normativas de Sud Africa (CSIR, 2001) y España (Ministerio, 1999) recomiendan usar una velocidad de diseño que oscila entre 50 y 130 Km./h. Sin embargo, no establecen criterios para determinar cual velocidad de diseño utilizar dentro de ese rango.,La normativa Chilena por su parte recomienda utilizar como velocidad de diseño el valor de Velocidad de proyecto ( $V_p$ ) + 20 Km./h.

La velocidad de diseño del LF corresponde a una velocidad en pérdida de control. Esta velocidad no es constante dado que depende de la pendiente y de la distancia recorrida en pendiente luego del corte de frenos. Por tanto, si bien asumir una velocidad de diseño constante simplifica el diseño, no otorga flexibilidad para elegir una velocidad dependiente de las características de la pendiente y de la localización seleccionada. Por otra parte, no es adecuado considerar una velocidad de proyecto mayorada, por cuanto ésta velocidad corresponde a una velocidad en condición de control y no es posible determinar si efectivamente es esa la velocidad con ingresa un vehículo al LF.

Tabla 1. Criterios de necesidad de un LF propuestos en diversas normativas (Highways Agency, 1987; Ministerio, 1999; AASHTO, 2001; CSIR, 2001; TNZ, 2001; MOP,2005)

Instrucción	Criterio de Necesidad
Manual de Carreteras (Chile)	<ul style="list-style-type: none"> <li>En carreteras o caminos donde se identifique la recurrencia de accidentes por falla de frenos.</li> <li>En pendientes mayores al 5% si <math>i^2 \cdot L \geq 60</math> (i %, L (Km)).</li> </ul>
AASHTO (Estados Unidos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>En caminos existentes en donde vehículos pesados tengan problemas operacionales.</li> <li>Evaluar la experiencia que se ha tenido con accidentes.</li> <li>En caminos nuevos donde sea necesario utilizar pendientes largas y pronunciadas.</li> <li>En caminos con pendientes pronunciadas que se encuentran en zonas urbanas.</li> </ul>
3.1 - IC (España) CSIR (SudÁfrica) TA 57/87 (Reino Unido)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuando hayan ocurrido accidentes causados por vehículos que sufren la falla de sus sistemas de frenos.</li> <li>En caminos nuevos con rasante descendente de gran longitud.</li> <li>En pendientes mayores al 5% si <math>i^2 \cdot L \geq 60</math> (i %, L (Km)).</li> </ul>
TNZ (Nueva Zelandia)	<ul style="list-style-type: none"> <li>En pendientes descendentes en que exista un registro histórico de accidentes causados por vehículos que pierden el control.</li> </ul>

Tabla 2. Criterios de localización de un lecho de frenado propuestos por diversas normativas (Highways Agency, 1987; Ministerio, 1999; AASHTO,2001)

Instrucción	Criterios de Decisión
Manual de Carreteras (Chile)	Establece criterios de localización del lecho de frenado similares a AASHTO. No emplea procedimientos analíticos.
AASHTO (Estados Unidos)	A partir de la mitad de la pendiente. Antes de una curva horizontal. Evaluar si el LF puede ser localizado a la izquierda o derecha del camino.
TA 57/87 (Reino Unido)	A una distancia cercana del punto en donde ocurren accidentes por corte de frenos.
3.1 - IC (España)	En el lugar de la pendiente en que ocurre la mayor cantidad de accidentes de vehículos pesados por falla del sistema de frenos. Antes de una curva horizontal.

### 3. Conceptos de diseño de lechos de frenado

El diseño de LF comprende aspectos operacionales y geométricos (Ñancuñil, 2002). Las variables operacionales corresponden a aquellas que determinan el funcionamiento del LF durante la fase de operación, tales como las características del acceso, el ancho y el esvía. Las variables geométricas determinan la longitud e inclinación del LF. Los conceptos subyacentes son la Velocidad de Diseño y la Distancia de Parada, los cuales se discuten a continuación.

#### 3.1 Perfil de velocidad

El perfil de velocidad es la velocidad punto a punto con la cual el vehículo que pierde el control se desplaza por la pendiente. Está determinada por la energía potencial acumulada por el vehículo al momento del corte de frenos, la presencia de curvas horizontales y la resistencia aerodinámica (Gillespie, 1992; Abdelwahab y Morral, 1997). Por tanto, depende del balance entre energía potencial y cinética del vehículo.

Matemáticamente, y considerando un sistema conservativo, el perfil de velocidad puede describirse mediante enfoques aproximados o exactos. El enfoque aproximado asume que la energía potencial se va transformando progresivamente en energía cinética aumentando así la velocidad punto a punto. Así, la velocidad en el punto x de la pendiente (V(x)) es función de la velocidad inicial (V(0)) y de la diferencia de altura neta respecto de una referencia (h(x)), como lo muestra la ecuación 1.

$$V(x) = \sqrt{V(0)^2 - 2gh(x)} \tag{1}$$

Dentro de los métodos exactos se encuentra el método de equilibrio de fuerzas que muestra la ecuación

2. Este método permite estimar la velocidad a una distancia x del inicio de la pendiente, considerando los elementos propios de las resistencias activas y pasivas del vehículo. Incorpora el efecto de la fricción (K), el área frontal del vehículo (F), la potencia (W), la velocidad media en el tramo de estudio (Vm) y la velocidad media de los cuadrados de velocidad (Vn<sup>2</sup>).

$$Vx = 8.82 \sqrt{0.01291V_i^2 - 3.28 \cdot h_x - 3.28 \cdot K \cdot x - 3.3 \cdot 10^{-5} V_m \cdot x - \frac{0.0499F \cdot x \cdot V_n^2}{W}} \tag{2}$$

Las ecuaciones 1 y 2 consideran al vehículo como un cuerpo rígido que se roto traslada desde un punto determinado de la pendiente, sin intervención del conductor. La velocidad calculada mediante alguna de las expresiones anteriores, permite estimar la velocidad con que el vehículo llega a un LF y por tanto permite estimar una velocidad de diseño.

#### 3.2 La distancia de parada

La distancia de parada (DP), corresponde a la distancia que requiere para detenerse un vehículo que se desplaza a una cierta velocidad. Para el cálculo del a DP existen dos enfoques. Uno de ellos considera el vehículo como un cuerpo rígido de masa concentrada en el centro de gravedad. Este enfoque corresponde al procedimiento comúnmente utilizado para el cálculo de distancia de parada. La DP (en m) depende de la velocidad (V, en Km./h), de la inclinación longitudinal (i), del material empleado en la superficie de rodado del mismo (f) que asegura una cierta provisión de fricción Se expresa matemáticamente mediante la ecuación 3.

$$DP = \frac{V^2}{254(f \pm i)} \tag{3}$$

El segundo enfoque utiliza modelos de interacción neumático - suelo, que a través de un equilibrio de fuerzas entre la resistencia aportada por un material



suelto y la roto raslación del vehículo, logran determinar el perfil de velocidad la longitud requerida para la detención. Poseen la ventaja que es posible modelar el efecto del material suelto y su composición granulométrica, con lo cual su especificación se hace más precisa cuando se analizan superficies no pavimentadas. (Al – Qadi y Rivera – Ortiz, 1991).

#### 4. Metodología propuesta para el análisis de lechos de frenado

La metodología que se propone considera los criterios de necesidad y localización de un lecho de frenado además del proceso de diseño mismo. De este modo, el procedimiento de análisis se estructura en cuatro módulos:

- Módulo 1: Determinación de Necesidad de un LF
- Módulo 2: Determinación de Localización de un LF
- Modulo 3 y 4: Determinación de Velocidad de Diseño y Diseño Geométrico del LF

Los primeros dos módulos utilizan el método de calificación de riesgo de pendientes descendentes basado en el Perfil de Temperatura del Sistema de Frenos propuesto originalmente por Bowman (1989). En el tercer y cuarto módulo se aplican principios energéticos para la estimación de velocidad de diseño, y el cálculo de la pendiente y longitud del LF.

##### 4.1 Módulo 1: Identificación de necesidad de un LF

En este módulo se determina la necesidad de disponer de un LF en un sector de trazado con pendientes prolongadas. Para ello es necesario determinar la Velocidad Máxima de Descenso Seguro ( $V_{MDS}$ ) y la Velocidad de Circulación ( $V_c$ ).  $V_{MDS}$  corresponde a la máxima velocidad a la cual puede descender en condición de control un camión sin que se le produzca un corte de frenos.  $V_c$  en tanto, corresponde a la velocidad de operación de los vehículos pesados la cual puede ser obtenida como un percentil 85 o 99 de un registro de mediciones de velocidad instantánea. estimada en base a modelos de velocidad de operación en pendientes descendentes. En el caso de caminos nuevos se desconoce la velocidad de circulación. En tal caso es posible utilizar la velocidad de diseño de la curva vertical que da inicio a la pendiente descendente.

El criterio de decisión es: si  $V_c > V_{MDS}$  será necesario disponer de un LF, dado que existe la probabilidad que se produzca un corte de frenos, debido

a que la temperatura del sistema de frenos del vehículo se elevaría hasta el valor límite antes que el vehículo alcance el final de la pendiente.

Para estimar el valor de  $V_{MDS}$  se aplican las ecuaciones 4 a 8. Interesa determinar una velocidad tal que la temperatura límite del sistema de frenos se alcance al final de la pendiente. Para ello, el valor de la temperatura al final de la pendiente mas los incrementos por aplicación del freno deben ser menores o iguales a una cierta temperatura límite ( $T_{LIM}$ ).

$$T_f(Lc) + \Delta Tf = T_{LIM} \quad (4)$$

En donde  $T_f(Lc)$  corresponde a la temperatura del sistema de frenos al final de la pendiente ( $Lc$ );  $\Delta Tf$  corresponde al incremento en la temperatura de los frenos en una aplicación; y  $T_{LIM}$  el valor límite de temperatura del sistema de frenos, que equivale a 260 °C. El valor de temperatura  $T_f(Lc)$  se calcula mediante la ecuación 5.

$$T_f(Lc) = T_0 + \left[ T_\infty - T_0 + \frac{K_2 HPB - 32}{1.8} \right] \left[ 1 - e^{-\frac{K_1 Lc}{V_{MDS}}} \right] \quad (5)$$

En donde

- $T_f(Lc)$  : Temperatura del sistema de frenos al final de la pendiente (°C).
- $T_0$  : Temperatura del sistema de frenos al iniciar el descenso (65.6°C).
- $T_\infty$  : Temperatura ambiente (un valor sugerido es de 32°C)
- $Lc$  : Longitud de la pendiente (Km).
- $V_{MDS}$  : Velocidad máxima de descenso seguro (Km/h).
- $K1$  : Constante de calibración calculada según ecuación 6 (1/h).
- $K2$  : Constante de calibración calculada según ecuación 7 (°F/hp).
- $HPB$  : Potencia de Frenado calculada según la ecuación 8 (hp).

Las constantes  $K1$  y  $K2$  se calculan aplicando las ecuaciones de Bowman (1989):

$$K_1 = 1.23 + 0.016V_{MDS} \quad (6)$$

$$K_2 = 1/(0.1 + 0.0013V_{MDS}) \quad (7)$$

$$HPB = \left[ (2205W)^i - (450 + 10.83V_{MDS}^j) \right] \frac{V_{MDS}}{600} - HP_M \quad (8)$$





En donde  $W$  representa el peso del vehículo en toneladas,  $i$  representa la pendiente longitudinal en decimal, y  $HP_M$  representa la potencial del motor en hp.

El incremental de temperatura  $\Delta T_f$  se obtiene a partir de la ecuación 8, en la cual  $W$  es el peso del vehículo:

$$\Delta T_f = 1.5 \times 10^{-4} (W)(V_{MDS}^2) - 17.8 \quad (9)$$

El valor de  $V_{MDS}$  se obtiene resolviendo el sistema de ecuaciones compuesto por las ecuaciones 2, 4, 5, 6, 7, 8 y 9. El cálculo analítico de  $V_{MDS}$  es complejo, por lo cual en esta metodología se desarrollaron ábacos de cálculo de  $V_{MDS}$  como el ilustrado en la Figura 1. Estos gráficos consideran un rango de pendiente longitudinal entre 4 y 10 % cada 0.5 %, longitudes de la pendiente entre 0 y 16 Km. y dos rangos de peso del vehículo (30 a 40 T; 40 a 45 T).

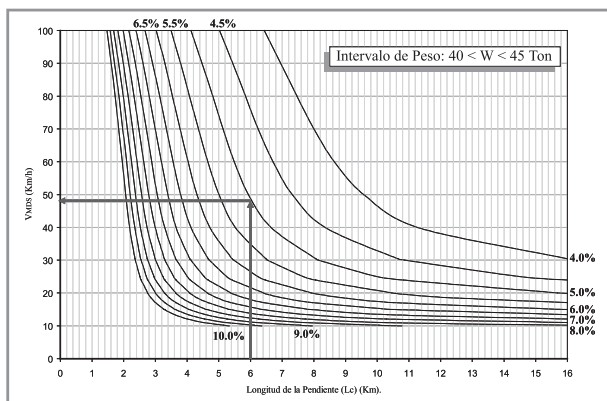


Figura 1. Ábaco de estimación de velocidad máxima de descenso seguro (Ñancuñil, 2002)

En el ejemplo de la figura se ingresa con la longitud en pendiente hasta interceptar la curva correspondiente a la pendiente en análisis, y posteriormente se determina el valor de  $V_{MDS}$ . En el ejemplo, para una pendiente longitudinal de 5. % y una longitud en pendiente de 6 Km, el valor de  $V_{MDS}$  es de 48 Km./h.

Una de las ventajas del uso de estos ábacos es que permiten realizar análisis inversos. Esto es, definir un valor de  $V_{MDS}$  igual a la velocidad de circulación, y establecer cual es la combinación de pendientes y longitudes en pendientes que no requieren el uso de un LF. De este modo es posible por ejemplo, tomar decisiones respecto de modificaciones al diseño altimétrico en zonas de pendientes prolongadas.

#### 4.2 Módulo 2: Localización del lecho de frenado

En este módulo el objetivo es determinar el lugar en donde se alcanza  $T_{LIM}$  a la velocidad de circulación ( $V_c$ ). Corresponde a la longitud ( $L_x$ ), respecto del inicio de la pendiente, donde  $V_{MDS} = V_c$ . Se calcula sustituyendo la variable  $L_c$  por la variable  $L_x$  en las ecuaciones 4 y 5, y valor de  $V_{MDS}$  por el valor de  $V_c$  en las ecuaciones 4, 5 y 8.

Al igual que en caso anterior, en este trabajo se desarrollaron ábacos para determinar el valor de  $L_x$ , para rangos de pendientes de 4 a 10 %, y longitudes de 0 a 16 Km. y dos rangos de peso (30 a 40 T; 40 a 45 T). En la Figura 2 se presenta el gráfico con un ejemplo de cálculo.

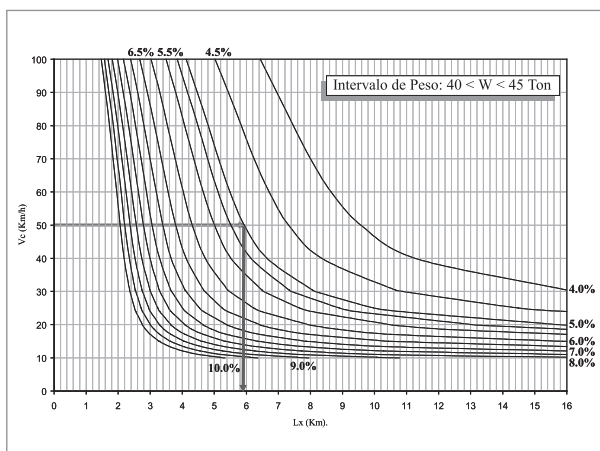


Figura 2. Ábaco para determinar la localización de  $L_x$  para una velocidad de circulación, pendiente longitudinal y rango de pesos determinado (Ñancuñil, 2002)

La variable de entrada es la velocidad de circulación ( $V_c$ ), que en este ejemplo es 55 Km/h. Con este valor se busca la curva correspondiente a la pendiente en estudio, en este caso 5 %, y posteriormente se determina el punto kilométrico en donde es probable se produzca el corte de frenos. En este caso es a 5.9 Km del inicio de la pendiente. Notar que si  $V_c = V_{MDS}$ , el punto kilométrico corresponde a la máxima longitud en pendiente que se puede proyectar dado un determinado valor de pendiente longitudinal.

#### 4.3 Módulo 3 y 4: Cálculo de velocidad de diseño y diseño geométrico del LF

El procedimiento de diseño consta de dos partes. La primera consiste en determinar la velocidad de diseño del LF. Esta velocidad corresponde a la velocidad con la que el vehículo que se encuentra en condición de emergencia e ingresa al LF. En una segunda etapa se

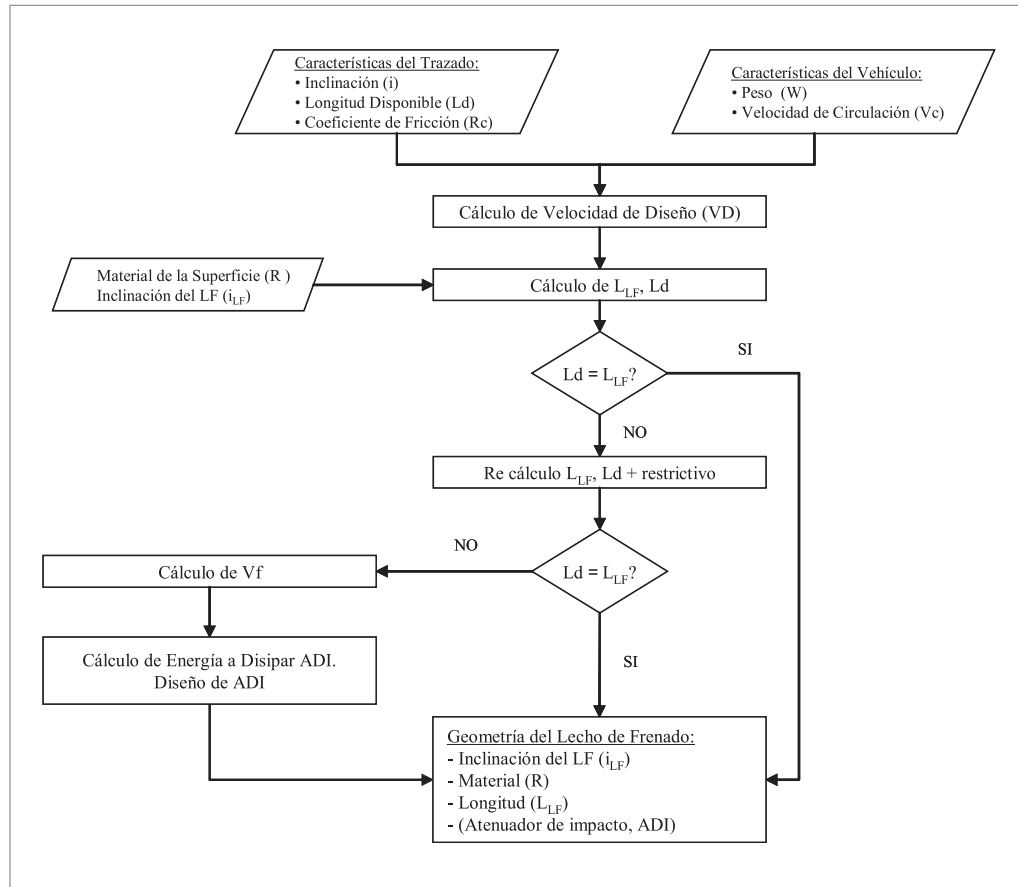


Figura 3. Diagrama de aplicación de metodología de diseño (Ñancufil, 2002)

determina la configuración geométrica del LF. La Figura 3 detalla el proceso de diseño:

4.3.1 Etapa 1: Determinación de velocidad de diseño

En el punto de la pendiente en que  $V_c = V_{MDS}$  la velocidad de diseño (VD) del LF será igual a  $V_c$  e igual a  $V_{MDS}$ . En la medida en que se elija una localización del LF a una distancia X corriente abajo del punto calculado, la VD se incrementará producto del aumento de la energía cinética del vehículo pesado al circular fuera de control.

La VD se obtiene mediante la ecuación 10, considerando la velocidad de circulación ( $V_c$ ) al ingresar a la pendiente, la pendiente longitudinal del trazado (i), el coeficiente de fricción longitudinal de la superficie de rodado del camino (Rc), y la posición relativa del lecho de frenado (X-Lx).

$$VD = \begin{cases} V_c & ; x \leq Lx \\ \sqrt{V_c^2 + 254,275(i - Rc)(X - Lx)} & ; x > Lx \end{cases} \quad (10)$$

4.3.2 Etapa 2: Determinación de la longitud requerida

del lecho de frenado

Una vez obtenido el valor de la velocidad de diseño se calcula la longitud requerida para que el para que el vehículo pesado se detenga totalmente en el LF. Esta distancia depende de la velocidad de diseño (VD), la pendiente longitudinal del LF ( $i_{LF}$ ) y la fricción longitudinal del material utilizado en la superficie de rodado del LF (R). La distancia de detención ( $L_{LF}$ ) corresponde a la longitud requerida

$$L_{LF} = \frac{VD^2}{254(R + i_{LF})} \quad (11)$$

4.3.3 Etapa 3: Evaluación de disponibilidad de espacio

Para evaluar la disponibilidad espacio, en primer lugar se identifica la longitud disponible en el lugar(Ld) para emplazar el LF. Si la longitud disponible en el sector de emplazamiento (Ld) es superior a la longitud de diseño del LF ( $L_{LF}$ ) entonces se proyecta el lecho de frenado según longitud, pendiente y material a utilizar aplicando la ecuación 10. Por el contrario, si el espacio disponible no es suficiente, se modifica la pendiente proyectada del

lecho y el material a utilizar para encontrar una longitud de diseño menor o igual al espacio disponible.

#### 4.3.4 Etapa 4: Diseño de atenuador de impacto

Si aún modificando la pendiente y el material a utilizar la longitud proyectada supera al espacio disponible, se evalúa utilizar atenuadores de impacto (ADI). La velocidad del vehículo pesado al final de la longitud del LF ( $V_f$ ) se calcula mediante la ecuación 12.

$$V_f = \sqrt{VD^2 - 254L_{LF}(R + i_{LF})} \quad (12)$$

La magnitud de esta velocidad y el peso del vehículo pesado, se utilizan para determinar la energía que debe disipar el ADI. Conocido el valor de energía y la aceleración máxima admisible, es posible determinar las constantes de rigidez y amortiguamiento que se deben especificar. Un análisis detallado de la dinámica de los ADI en lechos de frenado puede verse en Carrasco (2005).

## 5. Caso de estudio

Se realizó una aplicación de la metodología a un caso real. Se eligió el LF construido en una ruta del sur del país. Este LF se encuentra en operación desde el año 2001. Se realizaron mediciones de velocidad instantánea en el Km. 80,240, a partir del cual se obtuvo la velocidad de circulación, equivalente al percentil 85 de velocidad. Asimismo, se realizó un levantamiento topográfico del área de estudio. El tramo de camino seleccionado posee una pendiente de 7.7 % en 5 Km. El LF se ubica a 2.7 Km. del inicio de la pendiente, posee una longitud de 30 m y una inclinación del 33 %. El material empleado, proporciona un coeficiente de fricción de 0.15. En la Figura 4 se muestra un esquema de la localización y configuración del LF.

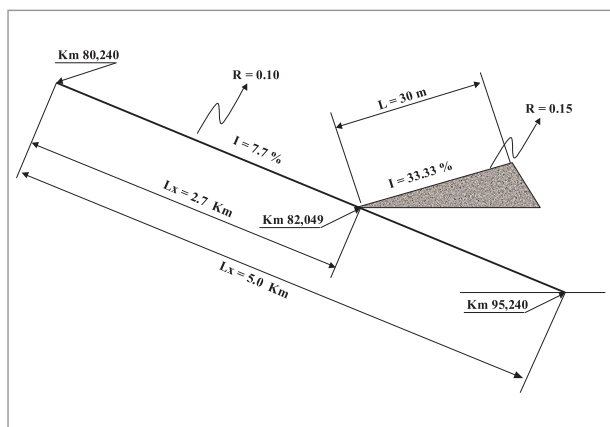


Figura 4. Configuración geométrica del lecho de frenado

#### a) Necesidad y localización del lecho de frenado

Para un rango de peso de 40 a 45 toneladas y una velocidad de circulación de 30 Km/h, el valor de  $V_{MDS}$  obtenido de la Figura 1 es de 17 Km/h. por tanto, aplicando el criterio de la sección 4.1 es necesario contar con un lecho de frenado. A partir de la Figura 2 de la sección 4.2 se obtiene que la localización del LF corresponde a 4.3 Km a partir del inicio de la pendiente.

En la localización actual, la temperatura del sistema de frenos del vehículo no alcanza el valor límite, por lo cual al pasar por la actual posición del LF continuará circulando en condición de control y el corte de frenos se puede producir pendiente abajo.

#### b) Estimación de velocidad de diseño

Asumiendo que la localización del LF es en el Km 85,040 (a 4.8 Km. del inicio de pendiente) se aplica la ecuación 9 para estimar la velocidad de diseño. El valor obtenido es de 97 Km./h.

#### c) Estimación de longitud requerida

Conocida la velocidad de diseño, se estima la longitud requerida para el valor de pendiente del lecho de frenado. El valor obtenido es de 77 m.

#### d) Evaluación de disponibilidad de espacio

La longitud disponible se obtiene directamente de terreno. En este caso en particular, la disponibilidad de espacio es de 35 m.

Puesto que la longitud actual del LF es de 30 m, y la longitud disponible es de 35 m existe un saldo de 42 m para alcanzar la longitud del LF tal que el vehículo pesado se detenga totalmente. Esto implica que es necesario proyectar un atenuador de impacto para lograr emplazar el LF en una longitud de 35 m.

#### e) Diseño de atenuador de impacto

Para diseñar el ADI se requiere usar como velocidad de impacto la velocidad al final del lecho de frenado calculada según ecuación 12. Para las variables de entrada utilizadas, la velocidad final es de 72 Km/h. Este valor se utilizar posteriormente para estimar la energía de impacto y determinar las constantes de amortiguación y rigidez del ADI.

#### f) Configuración geométrica

Una vez realizados los cálculos se resumen a continuación los valores de diseño del Lecho de Frenado.



- Localización del LF: Km 85,040
- Velocidad de diseño (VD) = 97 Km/h
- Longitud del LF (L) = 35 m
- Pendiente del LF (i) = 33 %
- Material Arena Suelta; R = 0.15
- Velocidad al Final del LF (Vf) = 72 Km/h

#### g) Optimización del diseño

El diseño del LF previsto se encuentra en las condiciones más desfavorable sin embargo puede ser optimizado modificando su superficie y aplicando medidas de gestión de tránsito. Por ejemplo, si se señala la velocidad a 20 Km./h, se está muy cerca de la velocidad máxima de descenso seguro en este caso, por lo cual se reducirá la velocidad de diseño y por tanto la longitud de frenado.

Asumiendo que el valor señalado es respetado por los conductores, mejorando el material de la superficie para aumentar su rugosidad, y localizando a una distancia más cercana del punto límite el LF, es posible mejorar el diseño del LF.

Considerando el aporte de rugosidad de la grava de canto rodado suelta (R = 0.25) la restricción de velocidad de 20 Km./h y una localización del LF a 4.6 Km de la pendiente, se logra reducir la velocidad al final del lecho de frenado hasta 19 Km/h. De este modo, el diseño optimizado queda:

- Localización del LF: Km 84,840
- Velocidad de diseño (VD) = 74 Km/h
- Longitud del LF (L) = 35 m
- Pendiente del LF (i) = 33 %
- Material: Grava canto rodado suelta; R = 0.25
- Velocidad al Final del LF (Vf) = 19 Km/h

## 6. Conclusiones

En este trabajo se propone una metodología analítica que permite identificar la necesidad de proyectar un LF en pendientes descendentes y calcular el lugar donde éste debe ser construido. El procedimiento considera dos escenarios posibles: con espacio disponible y sin espacio disponible. Esta metodología aporta herramientas y criterios adicionales a las recomendaciones normativas existentes actualmente en Chile.

La metodología propuesta establece un procedimiento analítico para determinar la necesidad de emplazar un lecho de frenado basado en la velocidad

máxima de descenso seguro. Esto es, la velocidad máxima de circulación bajo la cual no existe riesgo de corte de frenos. Asimismo, permite identificar la posición en la pendiente a partir de la cual es más probable que se produzca el corte de frenos y determinar en consecuencia la velocidad de diseño caso a caso. Tanto para definir la necesidad de un lecho de frenado como para definir su localización, los métodos involucran la geometría del trazado y la dinámica de circulación de los vehículos pesados por lo cual es una buena aproximación al problema de diseño de lechos de frenado.

La metodología propuesta también permite realizar análisis inversos. Permite por una parte establecer cuál es la combinación de pendientes y longitudes en pendientes que no requieren el uso de un LF, dada una cierta velocidad de circulación; o bien cuál debería ser la velocidad máxima señalizada de acuerdo al valor y longitud de la pendiente. Esto permite tomar decisiones respecto de modificaciones al diseño altimétrico o a la señalización en aquellas zonas de pendientes prolongadas.

La metodología propuesta fue aplicada en la verificación del diseño de un LF en la zona sur del país. Se determinó que la localización del lecho proyectado no es la adecuada, ya que se encuentra corriente arriba del punto teórico de corte de frenos, no cumpliendo el objetivo para el cual fue diseñada.

La principal ventaja de la metodología propuesta es que presenta un procedimiento sistemático y secuencial para responder las tres preguntas planteadas en el inicio de este trabajo: ¿Es necesario el LF?, ¿Dónde debe localizarse el LF?, ¿Cuál es la configuración geométrica del LF?. A diferencia de las normativas estudiadas, esta metodología permite implementar un enfoque preventivo en el diseño de lechos de frenado, con lo cual tanto el diseñador como el administrador de carreteras cuentan con un medio para analizar casos particulares del trazado en pendientes descendentes.

## 7. Referencias

- AASHTO (2001), "A Policy on Geometric Design of Highways and Streets". American Association of State Highways and Transportation Officials. Washington D.C. United States.
- Abdelwahab W. Morral J. (1997), "Determining Need for and Location of Truck Escape Ramps". Journal of Transportation Engineering. 123(5), 350 - 356.
- Al-Qadi I.L., Rivera-Ortiz L.A. (1991), "Use of Gravel



- Property to Develop Arrester Bed Stopping Model”. *Journal of Transportation Engineering*. 117(5), 566 - 584.
- Bowman B. (1989), “Grade Severity Rating System (GSRS) – Users Manual”. Report FHWA-IP-88-015. U.S Department of Transportation. Federal Highway Administration. Estados Unidos.
- Carrasco D. (2005), “Amortiguadores de Impacto para lechos de Frenado”. Memoria de Título. Supervisores: Tomás Echaveguren – Sergio Vargas. Universidad del Bio Bio. Departamento de Ingeniería Civil. Chile.
- CSIR (2002), “Geometric Design Manual”. CSIR Transportek. South Africa.
- Gillespie T. (1992), “Fundamentals of Vehicle Dynamics”. 1<sup>st</sup> Edition. Society of Automotive Engineers. United States.
- Highway Agency (1987), “Roadside Features” TA57/87. London, U.K.
- INN (1999), “Diseño de Sistemas de Contención”. NCH 2032/1-1999. Instituto Nacional de Normalización, Chile.
- Mera M., Mondaca P. (2001), “Análisis Comparativo, Métodos de diseño de Lechos de Frenado usados en Chile”. 1er Congreso de Ingeniería Vial. DIVIAL. 105 – 113. Universidad de Santiago de Chile, 21 – 23 de Noviembre del 2001, Santiago, Chile.
- Ministerio de Fomento (1999), “Instrucción de Carreteras. Norma 3.1 – I.C.: Trazado”. Dirección General de Carreteras. España.
- MOP (2003), “Instrucciones de Diseño”. En Manual de Carreteras Volumen 3. Ministerio de Obras Públicas. Chile.
- MOP (2005), “Seguridad Vial”. En Manual de Carreteras Volumen 6. Ministerio de Obras Públicas. Chile.
- Ñancufil J. (2002), “Proposición de una Metodología de Diseño de Lechos de Frenado”. Memoria de Título. Supervisor: Tomás Echaveguren. Universidad de Concepción. Departamento de Ingeniería Civil. Chile.
- TNZ (2001), “State Highway Geometric Design Manual”. Transit New Zealand. New Zealand.
- Transafety (1997), “Truck Escape Ramps: Determining the Need and the Location”. *Road Management & Engineering Journal*. <http://www.usroads.com/journals/rej/9708/re970801.htm>
- Whiteford D. (1992), “Truck Escape Ramps”. NCHRP Synthesis 178. National Academy Press. United States.