

Evaluación de la necesidad de lechos de frenado en pendientes descendentes usando principios de confiabilidad

Assesment the arrestor bed needs in downwards based on reliability principles

Tomás Echaveguren^{1*}, Sergio Vargas^{**}

* Universidad de Concepción, Concepción. CHILE

** Universidad del Bío Bío, Concepción. CHILE

Fecha de Recepción: 26/05/2013

Fecha de Aceptación: 23/10/2013

PAG 113- 127

Resumen

En pendientes descendentes prolongadas existe la posibilidad que los vehículos pesados sufran el corte de frenos. En tal caso, el conductor pierde el control de la velocidad de descenso del vehículo, incrementándose hasta valores superiores a los 120 km/h, caso en el cual el riesgo de accidentes aumenta. Los lechos de frenado son dispositivos que permiten contener los vehículos pesados fuera de control. En este trabajo se propone un método para determinar la necesidad de emplazar un lecho de frenado en una pendiente descendente, considerando el perfil de temperatura del sistema de frenos de los vehículos pesados, su peso y la geometría de la pendiente. Estos elementos se conjugan en un criterio para el diseño y otro para la operación. El primero evalúa la geometría en función de la velocidad de entrada. El segundo calcula un índice de peligrosidad basado en los principios de la confiabilidad para determinar la probabilidad de falla. Se presentan ejemplos de aplicación para configuraciones de carga convencionales (45 toneladas) y de alto tonelaje (61 y 75 toneladas), con diferentes potencias de frenado. Los criterios propuestos proporcionan mayor flexibilidad al diseñador, permiten clasificar la peligrosidad de las pendientes y evaluar la necesidad de proyectar lechos de frenado.

Palabras Clave: Lecho de frenado, vehículo pesado, pendiente descendente, confiabilidad

Abstract

In steeped downwards there exist the probability that heavy trucks were affected of cut brakes. In this situation, driver loses speed control downward, increasing speed up to 120 km/h or more and the crash risk increases. The arrestor beds are devices that provide contention to out-of-control trucks in downwards. This paper proposes a method to estimate the need of arrestor beds, based in the brake temperature profile, the weight of heavy trucks and the road geometry. The method is applicable in the geometric design and for road operation. In the first case, geometry is assessed using the entrance speed at the downward. In the second case, a dangerousness index is proposed based in reliability principles to estimate failure probability. Examples are presented considering trucks of 45, 60 and 70 tons of weight with different brake power. The index and criteria proposed are flexible and permitted to the designer to estimate the dangerousness of downwards and to design arrestor beds.

Keywords: Arrestor beds, heavy vehicles, downward, reliability

1. Introducción

Los lechos de frenado son sistemas de contención que se emplazan a los costados de los caminos en pendientes descendentes prolongadas que puedan inducir el corte del sistema de frenos de vehículos pesados. Desde el punto de vista del diseño son tres las preguntas que deben responderse al momento de decidir su inclusión en el diseño: ¿Es necesario?, si es necesario, en qué parte de la pendiente debe emplazarse?, qué longitud debe tener?.

Para responder estas preguntas, es necesario entrelazar el diseño geométrico de pendientes con las características mecánicas de los vehículos pesados. Particularmente relacionar su peso, potencia de motor, potencia de frenado, tipo de sistemas de freno; con la velocidad de descenso, la longitud e inclinación de la pendiente.

Las primeras dos preguntas no son fáciles de responder y representan una de las principales debilidades de las normas e instrucciones de diseño. La tercera pregunta en tanto, la mayoría de las normativas la responde a través de modelos de perfiles de velocidad basados en el equilibrio energético de un sistema cerrado.

1. Introduction

Arrestor beds are containment systems placed at the sides of roads crossing steeped downgrades, where braking systems failures of heavy weight vehicles are likely to take place. From the point of view of roads design, three questions shall be answered when deciding whether implementing arrestor beds: Are they needed? If so, where would they be installed? What is the length required?

So as to answer such questions, it is necessary to consider downgrades geometrical design and the mechanical characteristics of heavy weight vehicles. It is necessary to connect their weight, engine power, braking power, and kind of braking system with downhill speed, length and slope inclination.

The first two questions are not easy to answer at all. In fact, they are one of the main weaknesses of the existing roads design regulations and guidelines. While the third question is answered by most regulations by means of speed profiles, based on a closed system energetic balance.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: techaveg@udec.cl



En éste trabajo se presta atención a la primera pregunta: ¿Es necesario un lecho de frenado?. Esto teniendo en cuenta que la mayoría de las normativas e instrucciones de diseño utilizan criterios reactivos - cuando ocurren accidentes por corte de frenos - e independizan el problema del tipo de camión, proponiendo índices de comportamiento puramente geométricos. Ambos enfoques son débiles por cuanto no incluyen las características mecánicas de los vehículos pesados ni su desempeño al circular por pendientes prolongadas.

La ingeniería automotriz proporciona modelos del comportamiento del sistema de frenos de los camiones en combinación con su desempeño en función de modelos mecánicos. Estos modelos estiman la temperatura del sistema de frenos en función del equilibrio de las fuerzas tractoras. Aprovechando estos modelos, en éste trabajo se propone un procedimiento práctico destinado a precisar la decisión de emplazar un lecho de frenado y a detectar las pendientes descendentes potencialmente peligrosas.

Para ello, se utiliza el modelo de cálculo de evolución de temperaturas del sistema de frenos de camiones, teniendo en cuenta aspectos tales como peso bruto total, velocidad de operación, potencia de sistema de frenos y de motor, y tipo de sistema de frenos. El método propuesto permite determinar si en una pendiente se produce el corte de frenos o no y, por consiguiente, determinar si es necesario o no un lecho de frenado.

Posteriormente se realiza una caracterización de vehículos pesados existentes en el mercado de Chile, considerando vehículos pesados hasta 45 toneladas de peso bruto total. A partir de ambos insumos, se desarrolla un criterio de diseño para diversos tonelajes y velocidades de operación para determinar la necesidad o no de emplazar lechos de frenado en pendientes descendentes.

Se analizan casos de estudio considerando vehículos pesados con sistemas de frenos convencionales y combinaciones de vehículos de alto tonelaje (hasta 75 toneladas) con diversos sistemas de frenos auxiliares. Finalmente se realiza una comparación con los criterios de diseño empleados por las normativas de diseño.

2. El frenado en pendientes descendentes prolongadas

El proceso de frenado de un vehículo tiene por finalidad desacelerar el vehículo sin necesariamente reducir su velocidad a cero. Durante el frenado, el sistema de frenos reduce la velocidad del vehículo a través de la transformación de la energía cinética en una cierta cantidad de energía acústica, que es disipada como ruido, y en una cantidad mayor de energía térmica, disipada como calor.

2.1 Frenado en descensos largos

En los descensos largos, el conductor frena para mantener la velocidad del vehículo constante sin comprometer la seguridad, estabilidad y dirección del manejo. En ésta situación, el vehículo posee una energía potencial proporcional a su masa y posición en la pendiente, la cual se transforma en energía cinética durante el descenso del vehículo.

This research is focused on the first question. Is the arrestor bed implementation required? Taking into account that most roads design regulations and guidelines employ reactive guidelines (after accidents had already taken place due to brakes failures); such guidelines isolate the problem from the kind of truck, assuming behavior indexes from geometrical nature only. Both approaches are actually weak, as far as they do not include heavy weight vehicles mechanical features or their behavior while travelling steeped downgrades.

Motor truck engineering provides models on braking systems behavior, as well as vehicles performances based on mechanical models. Such models estimate the temperature of the braking system in function of the balance of tractor forces. Based on those models, this research proposes a practical procedure to determine the implementation of arrestor beds and to recognize potentially dangerous downgrades.

Consequently, a calculation method based on the temperatures evolution of braking system is employed, by taking into account vehicles total gross weight, operation speed, braking system power, engine power and braking system type. The proposed method is able to determine when brake failures are likely to take place or not, on a given downgrade. Therefore, it is capable of determining when the arrestor bed implementation is required.

Afterwards, a characterization of heavy weight vehicles existing in the Chilean market is developed, by including heavy weight vehicles up to 45-tons total gross weight. Both inputs are considered to develop a design criterion for different tonnages and operation speed so that to decide when implementing arrestor beds areas at steeped downhill roads.

Cases of study are analyzed considering heavy weight vehicles with conventional braking systems and combinations of high tonnage vehicles (up to 75 tons) owning diverse auxiliary braking systems. Finally, a comparison is made using the design criterion currently employed by design guidelines.

2. Braking on stepped downgrades

A braking process is intended to slow down a vehicle speed without necessarily decreasing its speed down to zero. While braking, the system reduces the speed by transforming the kinetic energy into a certain amount of acoustic energy, which is dissipated as noise and; into a larger amount of thermal energy which is dissipated as heat.

2.1 Braking on steeped downgrades

On steeped downgrades, the driver brakes to maintain a constant vehicle's speed, without affecting safety, stability and driving steering. In such situation, the vehicle has a power energy which is proportional to its mass and position on the downgrade. This energy is transformed into kinetic energy while the vehicle is going downwards.



Esta transformación de energía cinética en calor es la responsable del sobrecalentamiento de los frenos, lo cual provoca una reducción excesiva en la capacidad de frenado que puede causar accidentes.

Por tanto, uno de los problemas de conducción de vehículos pesados en descensos prolongados es la dificultad de controlar la velocidad sin el uso excesivo de los frenos de servicio. En tal caso, las fuerzas que resisten el movimiento son (Canale y Gutiérrez, 2005): el freno de motor convencional, fuerzas de resistencia al rodamiento, fuerza de resistencia aerodinámica y torque de frenado generado por los frenos auxiliares.

Por su parte, la potencia de frenado requerida (HP_{req} , en hp) es la potencia que deben generar las fuerzas que resisten el movimiento para mantener una velocidad constante. Depende de la velocidad de descenso (V , en km/h), del peso del vehículo (W en toneladas) y de la inclinación de la pendiente (i , en %), según la Ecuación 1 (DoT, 1981):

$$HP_{req} = \frac{WVi}{27,4} \quad (1)$$

Such kinetic energy transformation into heat energy is responsible of brakes overheating, which provokes an excessive reduction of the vehicle braking capacity that might lead to accidents.

Therefore, one of the most common driving problems on steeped downgrades is the difficulty endured by heavy weight vehicles to control speed, without exceeding the service conditions of the braking system. In such a case the strengths resisting the movements are (Canale and Gutierrez, 2005): conventional engine braking system, rolling resistance strengths, aero-dynamical resistance strength and braking torque strength generated by auxiliary braking systems.

On one hand, the required braking power (HP_{req} , at hp) is the power generated by strengths enduring the movement in order to maintain a constant speed. It depends on the downhill speed (V , at km/h); vehicle weight (W in tons) and; the slope inclination (i , in %), according to Equation 1 (DoT, 1981):

2.2 La pérdida de la capacidad de frenado en pendientes descendentes

La pérdida de capacidad de frenado de un vehículo, se debe a la reducción del coeficiente de fricción entre la lona y el tambor del freno o la pastilla y el disco de freno por sobrecalentamiento. Los materiales usados en la fabricación de las lonas y pastillas de freno son tales que su coeficiente de fricción aumenta ligeramente cuando la temperatura está en el rango de 150 a 250°C (Zanoli y Setti, 2004).

Pero en tanto ocurra un calentamiento excesivo, como el provocado por el uso intenso y prolongado de los frenos de servicio en un descenso largo con pendiente considerable, causa el desvanecimiento del freno por la pérdida de fricción entre los elementos mecánicos del sistema de frenos (fade en inglés). Cuando la temperatura del freno vuelve a la normalidad, el nivel de fricción vuelve también a la normalidad (Zanoli y Setti, 2004). Como se aprecia en la Figura 1, la temperatura a la cual se produce el desvanecimiento de freno no es un valor fijo, ya que depende principalmente de la calidad del material del sistema de frenos y de las condiciones del mismo en el momento en que se utiliza.

2.2 Loss of braking capacity on downgrades

A vehicle's loss of braking capacity is caused by the reduction of friction coefficient between the covering cloth and the brake drum; or the brake pad and the brake disc due to overheating. Materials employed for the manufacture of covering clothes and brake pads shall slightly increase their friction coefficient when temperature is at the range of 150 to 250°C (Zanoli and Setti, 2004).

When an excessive overheating takes place (caused by the intensive and prolonged use of the servicing brake system on a steeped downgrade), it leads to brakes fading due to friction loss between the mechanical elements in the braking system. When the brake temperature returns to normal conditions, the friction level also becomes normal (Zanoli and Setti, 2004). According to Figure 1, the temperature provoking brake fading has not a fixed value, because it mainly depends on the braking system materials quality and the conditions provided at the moment the system is employed.

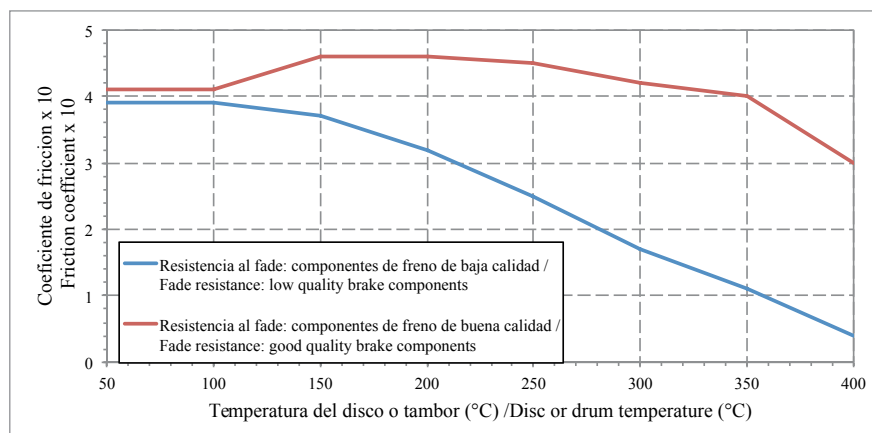


Figura 1. Resistencia al desvanecimiento del freno (Lucas y Widmer, 2004)

Figure 1. Resistance to brake fade (Lucas y Widmer, 2004)



Sin embargo, es posible definir un rango de valores de temperatura límite en base a investigaciones de diversos autores según:

- La temperatura segura para sistema de frenos a tambor es de 216°C (DoT, 1981);
- las temperaturas que exceden los 316°C, generalmente se ven afectados por la ocurrencia del fade (Limpert, 1999);
- los frenos de tambor son sensibles a la temperatura y comienzan a presentar pérdida de eficiencia cuando alcanzan temperaturas superiores a 250°C (Zanoli y Setti, 2004);
- en vehículos pesados con frenos de tambor, el fade se manifiesta a partir de los 350°C (Lucas y Widmer, 2004);

Asimismo Lucas (2004), señala que con la utilización de nuevos materiales de frenado en las lonas, pastillas, tambores y discos de freno, se aumenta la eficiencia del frenado. Por ende la temperatura en la que ocurre el desvanecimiento del freno es mayor.

3. La necesidad de utilizar lechos de frenado

Como se mencionó anteriormente, la pérdida de control del vehículo al descender por una pendiente ocurre por el desvanecimiento de los frenos de servicio. El desvanecimiento es consecuencia del sobrecalentamiento por su uso reiterado para mantener una velocidad que permita tener el control del vehículo en una pendiente descendente prolongada. En estos casos, se utilizan lechos de frenado, los cuales tienen por objetivo esencial otorgar al conductor de un camión sin frenos, la posibilidad de detenerse de manera segura. La pregunta que naturalmente surge es cuándo es necesario un lecho de frenado.

3.1 Criterios Normativos

Las normativas de diseño ofrecen una serie de criterios para responder esta pregunta, pero son esencialmente reactivos. La Tabla 1 muestra un resumen de los criterios recurrentemente usados por diversas normativas de diseño.

However, it is possible to determine a range for limit temperatures based on the researches developed by different authors:

- *Safe temperature for drum braking system at 216°C (DoT, 1981)*
- *temperatures exceeding 316°C, generally lead to brake fading (Limpert, 1999)*
- *drums brakes are sensitive to temperatures and they start losing efficiency when they reach temperatures higher than 250°C (Zanoli and Setti, 2004)*
- *in heavy weight vehicles owning drums braking systems, fading takes place as from 350°C (Lucas and Widmer, 2004)*

Similarly, Lucas (2004) indicates that the use of better quality materials for the elaboration of covering clothes, pads, drums and discs, will increase braking capacity efficiency. Therefore, the fading limit temperature will be higher

3. The need of implementing arrestor beds

The loss of a vehicle control, while travelling on a downgrade, is caused by braking system fading. Fading is the consequence of overheating due to the excessive use of braking system, which purpose is to maintain the vehicle control on a steeped downgrade. In such a case, the implementation of arrestor beds is required, so that drivers are able to maintain the control of the truck, in spite of the braking failure and; to stop the vehicle safely. Naturally, the question of when to implement arrestor beds arises.

3.1 Regulatory Criteria

Design regulations provide a series of standards to response such a question. However, they are essentially reactive standards. Table 1 shows a summary of criteria recurrently employed by several design regulations.

Tabla 1. Criterios Normativos para definir la necesidad de emplazar lechos de frenado en pendientes descendentes prolongadas (Adaptado de Echaveguren et al., 2007; AUSTRROADS, 2010 y AASHTO, 2011).

Table 1. Criteria for defining the need of arrestor beds in long downgrades (Adapted from Echaveguren et al., 2007; AUSTRROADS, 2010 and AASHTO, 2011).

País /Country	Criterios / Criteria
Estados Unidos/ United States	En caminos existentes en donde los vehículos pesados tengan problemas operacionales/ Existing roads where heavy weight vehicles endure operational problems. En caminos existentes con evidencia de accidentes debido a corte de frenos/ Existing roads evidencing accidents due to braking systems failures. En caminos nuevos en donde se requieran pendientes descendentes prolongadas/ New roads on steeped downgrades.
Australia/ Australia	Pendientes entre 3 % en 8 km hasta 12 % en 1 km. $i > 38/L^{1.5}$ / Downgrades between 3 %, 8 km up to 12 %, 1 km. $i > 38/L^{1.5}$
Nueva Zelandia/ New Zeland	En caminos existentes con evidencia histórica de accidentes debido a corte de frenos/ Existing roads with accident historical records due to braking system failure.
Reino Unido/ United Kingdom	En caminos existentes con evidencia de accidentes debido a corte de frenos/ Existing roads evidencing accidents due to braking systems failures.
España/ Spain	En caminos nuevos en donde se requieran pendientes descendentes prolongadas/ New roads on steeped downgrades.
Sud África/ South Africa	En pendientes superiores al 5 % y cuando CN > 60/ Downgrades higher than 5 % and when CN > 60

Particularmente, el Manual de Carreteras de Chile (MOP, 2012) propone las siguientes consideraciones para justificar la necesidad de diseñar un lecho de frenado en zonas con importante tránsito de camiones y con pendiente sostenida superior a 5 %, y que además se cumpla que $CN > 60$. El Valor de CN se obtiene mediante la Ec. 2, en donde L es la longitud de la pendiente, en km; e i es su inclinación longitudinal, en %.

Particularly, the Chilean Highway Manual (MOP, 2012) proposes the following considerations to justify the implementation of arrestor beds at some heavy traffic areas, which steeped slope is higher than 5%, besides meeting $CN > 60$. CN value is obtained by means of Eq. 2, where L is the length of the slope in km and; i is the longitudinal inclination expressed in %.

$$CN = i^2L > 60 \quad (2)$$

Los criterios propuestos en la Tabla 1 son amplios y en su mayoría son de carácter subjetivo, por lo cual son limitados. En particular, el criterio de la Ecuación 2, así como la mayoría de los criterios de la Tabla 1, si bien son simples de aplicar, no permiten relacionar el verdadero origen del corte de frenos, que es la combinación de comportamiento mecánico de los vehículos pesados, sistema de frenos, geometría y modo de conducción. En el estado del arte en tanto, Abdelwahab y Morral (1997) propusieron usar el sistema de calificación de severidad de las pendientes de Bowman (1989), pero no la implementan en un proceso sistemático de diseño.

The criteria proposed in Table 1 are wide and mostly of subjective nature, therefore, they are limited. Particularly, the criteria of Equation 2, as well as most criteria in Table 1, are easy to execute, but they do not allow us to correlate the genuine cause of the braking system failure, which is in fact the combination of heavy weight vehicles mechanical behavior, braking system, road geometry and driving performance. On the other hand, Abdelwahab and Morral (1997) proposed the use of the grade severity rating system created by Bowman (1989), but they did not implement it into a systematic design process.

3.2 Criterios basados en la temperatura del sistema de frenos

Johnson et al. (1981) caracterizaron las variables que influyen en el desvanecimiento de los frenos. Determinaron que la temperatura del sistema de frenos depende principalmente de la longitud e inclinación de la pendiente, del peso del vehículo y de la velocidad del mismo. Y, en segunda medida, de la temperatura ambiente, de la temperatura inicial del sistema de frenos y de la potencia del motor, de acuerdo a los estudios de Limpert (1999) Karczewski (1992), Fitch (1994), Allen et al. (2000) entre otros autores.

La Figura 2, ilustra el concepto de Johnson et al. (1981). En ella se grafica la variación de la temperatura de los frenos de servicio (T) con respecto al porcentaje de longitud de la pendiente recorrida (L), para un vehículo que ingresa a una pendiente con una cierta velocidad.

3.2 Criteria based on the braking system temperature

Johnson et al. (1981) characterized the variables influencing the braking system fading. They determined that a braking system temperature mainly depends on the length and inclination of the slope, as well as the weight of the vehicle and its speed. On the other hand, it also depends on the ambient temperature, the initial temperature of braking system and the engine power, in accordance with researches by Limpert (1999) Karczewski (1992), Fitch (1994), Allen et al. (2000) among other authors.

Figure 2 shows the concept of Johnson et al. (1981). It depicts the temperature variation of brakes in service (T), in regards to the length percentage of path transited (L) for a vehicle entering the slope at a given speed. The driver shall maintain a constant speed until completing the downhill race.



El conductor debe mantener esa velocidad constante hasta que finalice su descenso. Para que esto ocurra, es necesario aplicar el sistema de frenos constantemente de manera que no aumente su velocidad (aumenta debido al peso del vehículo e inclinación de la pendiente) en el trayecto.

To do so, the driver has to constantly employ the braking system, avoiding increasing the vehicle speed (increase caused by the vehicle weight and the slope inclination) during the whole downhill race.

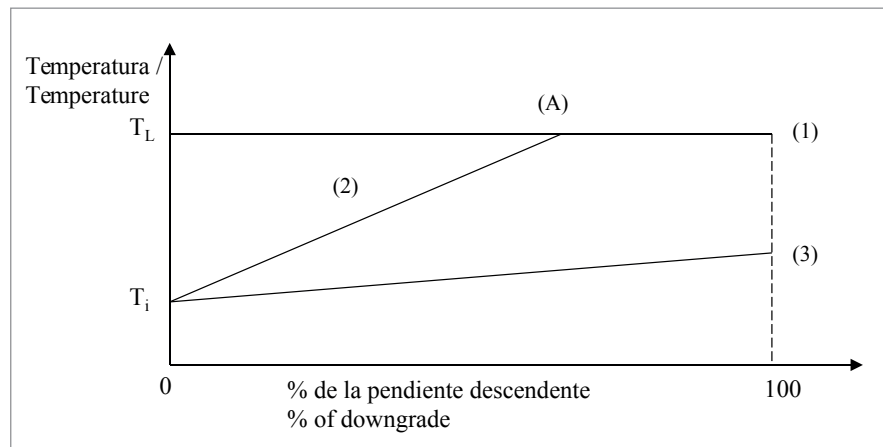


Figura 2. Concepto de la temperatura límite (TL) del sistema de frenos
Figure 2. Concept of limit temperature (TL) of the brake system

En la Figura 2, la línea 1 corresponde a la temperatura límite (T_L) que puede alcanzar el sistema de frenos de servicio para que funcione en forma correcta. Al aumentar la temperatura de los frenos (Línea 2) y alcanzar o sobrepasar la T_L (punto A) ocurre el desvanecimiento del freno y en consecuencia del sobrecalentamiento del sistema de frenado. En este caso, es necesario emplazar un lecho de frenado, dado que existe una alta probabilidad que en la pendiente se corte el sistema de frenos. La línea 3 en tanto, ilustra el caso en que la potencia de frenado es suficiente para no incrementar la temperatura del sistema de frenos, esta no sobrepasa la temperatura límite durante el descenso, y por tanto no se produce el corte de frenos.

Line 1 in Figure 2 shows the limit temperature (T_L) achievable by the braking system to meet optimal servicing conditions. By increasing braking system temperature (Line 2) and by reaching or exceeding T_L (Point A), brake fading takes place. Consequently, the overheating of brake system also takes place. In such a case, it is necessary to implement the arrestor bed, since there is a high probability of braking system failure on the downgrade. However, Line 3 shows a case where the braking power capacity is enough to avoid increasing braking system temperature by not exceeding limit temperature during downhill race. Consequently, the braking system failure is avoided.

4. El perfil de temperatura de los sistemas de frenos

El método propuesto se basa en la condición de equilibrio térmico del sistema de frenos de los vehículos pesados. De acuerdo a lo expresado en la Figura 2, cuando la temperatura del sistema de frenos durante el descenso, alcanza la temperatura límite del sistema de frenos, se produce la pérdida de fricción del sistema de frenos convencionales. En términos matemáticos, eso se expresa según la Ecuación 3. Esta Ecuación muestra que la temperatura del sistema de frenos al final de la pendiente, $T(L)$, se incrementa conforme el vehículo desciende por la pendiente. Esta variación térmica puede expresarse según Fitch (1994) como la suma de la temperatura inicial del sistema de frenos (T_i) que corresponde a la temperatura de servicio de los frenos al iniciar el descenso, más el aumento incremental de la temperatura del sistema de frenos.

4. Temperature profile of braking systems

The proposed method is based on the thermal balance condition of heavy weight vehicles' braking systems. According to Figure 2, when the temperature of a braking system reaches the limit temperature on a downgrade, the loss of friction in conventional braking systems takes place. In mathematical terms, above is expressed by Equation 3. This Equation shows that braking system temperature at the downhill end $T(L)$ is increased as long as the vehicle travels the downgrade. Such thermal variation may be expressed, according to Fitch (1994), as the addition of initial braking system (T_i) servicing temperature at the downgrade beginning, plus the incremental rise of braking system temperature.

$$T(L) = T(x) + \frac{dT(x)}{dx} \leq T_L \quad (3)$$

Si la temperatura del sistema de frenos en todo momento es inferior al valor límite (T_{LIM}) entonces no existe riesgo de corte de frenos. En caso contrario, en algún punto de la pendiente de bajada se producirá el corte de frenos y será necesario emplazar un lecho de frenado.

La temperatura a la distancia recorrida x , es función de la distancia recorrida, de las características mecánicas del vehículo y de la inclinación longitudinal de la pendiente. En tanto, la variación de temperatura conforme aumenta la distancia es función del peso del vehículo y de la velocidad de descenso.

En la práctica, la Ecuación 3 se utiliza para determinar el punto x de la pendiente donde se produce el corte de frenos, para la pendiente de descenso, la longitud, la velocidad inicial de descenso y el peso del vehículo. Si este punto se localiza dentro de la longitud L de la pendiente, entonces es necesario un Lecho de Frenado. En caso contrario no se necesita.

Un aspecto interesante de considerar es que este enfoque conceptual permite además determinar la Velocidad Máxima de Descenso Seguro (VMDS), que corresponde a la mayor velocidad a la cual puede descender un vehículo pesado sin que ocurra el corte de frenos. Este valor es importante para señalar, al inicio de la pendiente, la velocidad máxima para vehículos pesados durante el descenso.

Volviendo a la Ecuación 3, la temperatura del sistema de frenos en cualquier punto de la pendiente descendente se calcula, siguiendo a Bowman (1989), mediante la Ecuación 4.

$$T(x) = T_i + \left[T_\infty - T_i + \frac{K_2 HP_B - 32}{1,8} \right] (1 - e^{-K_1 x/V}) \quad (4)$$

En la cual, T_i es la temperatura del sistema de frenos al iniciar el descenso ($^{\circ}C$); T_∞ es la Temperatura ambiente ($^{\circ}C$); x es la longitud de la pendiente desde el inicio, (km); HP_B es la potencia de frenado generada por los frenos de servicio (hp); V es la velocidad de circulación, en km/h. Las constantes K_1 (en 1/h) y K_2 (en $^{\circ}F/hp$) están calibradas para camiones convencionales. De acuerdo a Fitch (1994) se calculan según:

$$K_1 = 1,23 + 0,016V \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{1}{0,10 + 0,0013V} \quad (6)$$

La potencia de frenado depende de la potencia requerida bruta para el frenado (HP_{req}), del consumo de potencia por rodado (HP_{rodado}), del consumo de potencia del motor (HP_{motor}) y de la potencia de frenado de los sistemas de freno auxiliares ($K_{aux} HP_{aux}$).

If the temperature of braking system is lower than the limit value (T_{LIM}) at all times, then the risk of braking system failure will be avoided. Otherwise, the brake system failure will occur, at some downhill point, and the implementation of the arrestor bed area will be required.

The temperature to the distance x is the result of the covered distance, vehicle mechanical characteristics and the slope longitudinal inclination. Therefore, the temperature varies as long as distance is increased, due to the vehicle weight and its downhill speed.

In practice, Equation 3 is employed to achieve the x point at the slope - where the braking system failure takes place - for the downgrade, length, downhill initial speed and vehicle weight. If the x point is achieved within the L downgrade length, then the implementation of the arrestor bed area is required. Otherwise, it is not required.

A relevant aspect to be considered is that this conceptual approach enables the determination of the Maximum Safety Downhill Speed (VMDS), which is the maximum allowed speed for heavy weight vehicles driving downwards to avoid brake systems failures. Such value shall be indicated by a sign post at the downgrade entrance.

Returning to Equation, the brake system temperature - at any point on the slope - is calculated by using Equation 4 by Bowman (1989).

Where T_i is the braking system temperature at the downhill beginning ($^{\circ}C$); T_∞ is the ambient temperature ($^{\circ}C$); x is the downgrade length from its beginning point (km); HP_B is the power produced by servicing brake system (hp) and; V is the circulation speed (km/h). Constants K_1 (in 1/h) and K_2 (in $^{\circ}F/hp$) were calibrated for conventional trucks. According to Fitch (1994) they are calculated as follows:

Braking power capacity depends on the gross power required to stop a vehicle (HP_{req}), on the power consumption per tread layer (HP_{tread}), engine power consumption (HP_{engine}) and braking power of auxiliary braking systems ($K_{aux} HP_{aux}$).

$$HP_B = HP_{req} - HP_{rodado} - HP_{motor} - K_{aux} HP_{aux} \quad (7)$$

De este modo, la potencia de frenado HP_B queda definida por la Ecuación 8.

$$HP_B = \frac{WVi}{27,4} - \frac{WVR_C}{27,4} - HP_{motor} - K_{aux} HP_{aux} \quad (8)$$

En donde W es el peso bruto total del vehículo, en toneladas; V es la velocidad inicial de descenso, en km/h; i es la pendiente longitudinal, en %; RC es el coeficiente de rodadura de la superficie del pavimento, que depende de la velocidad de circulación.

La constante K_{aux} corresponde al factor que determina el efecto amplificador de potencia de frenado debido al uso de sistemas de frenos auxiliares, tales como frenos de motor, de escape y retardadores de frenado. Estos sistemas incrementan notablemente la potencia de frenado y operan en conjunto con el freno convencional (Brossi, 2002; Widmer, 2000). El diferencial de temperatura en tanto, se calcula mediante la Ecuación 9, en la cual se asume por simplicidad que el cambio de temperatura es constante.

$$\frac{dT(x)}{dx} = 1,5 \times 10^{-4} WV^2 - 17,8 \quad (9)$$

5. Formulación de criterios de necesidad de lechos de frenado

En esta sección se presenta un conjunto solución de pendientes, longitud y velocidad de entrada, que justifica la utilización de un lecho de frenado para vehículos pesados convencionales de 45 toneladas y para las configuraciones de alto tonelaje de 61 y 75 toneladas. Estas últimas corresponden a configuraciones de alto tonelaje (CAT), las cuales sólo operan en algunos países de América Latina dados los requerimientos regulatorios, de diseño y operación logística (Díaz et al., 2012). Para ello se presenta en primera instancia la caracterización de cada una de las configuraciones de vehículos pesados, luego las condiciones geométricas bajo la cual se realizó la modelación, para posteriormente aplicar las ecuaciones 3 a 9 mediante simulación.

5.1 Configuraciones de Carga de Vehículos Pesados

Las configuraciones de carga y sistema de frenos son las indicadas en la Tabla 2. Se seleccionaron las combinaciones de CAT propuestas en el estudio de Díaz et al. (2012), teniendo en cuenta su potencial de utilización en América Latina.

Therefore, the braking power capacity is determined by using Equation 8.

Where W is the vehicle total gross weight, expressed in tons; V is the speed at downhill entrance, in km/h; i is the longitudinal downgrade, in %; RC is the tread layer coefficient, which depends on the traffic circulation speed.

The constant K_{aux} corresponds to the factor determining the braking power amplifier effect, due to the use of auxiliary braking systems, such as engine brakes, exhaust brakes and brake retardant systems. Such systems notably increase braking capacity and they work together with brake conventional systems (Brossi, 2002; Widmer, 2000). Meanwhile, temperature differential is calculated by means of Equation 9, which assumes by default that temperature variation is constant.

5. Criteria formulation for arrestor beds

This section needs presents a solution set for downgrades, length and entrance speed that justifies the implementation of arrestor beds for conventional 45-ton-heavy weight vehicles and for high tonnage configuration of 61 and 75 tons. The latter correspond to high tonnage configurations (CAT), which are available in some Latin-American countries only, mainly due to design and logistics operational regulations (Díaz et al., 2012). First of all, the characterization of each heavy vehicle configuration is presented. Afterwards, the geometrical conditions employed for this model are also introduced. Finally, the applications of equations 3 up to 9 are simulated.

5.1 Load Configurations for Heavy Weight Vehicles

Configurations for loading and braking systems are indicated in the Table 2. Combinations were selected in accordance with CAT proposed by Díaz et al. (2012), taking into account its potential utilization in Latin-America.

Tabla 2. Configuraciones de vehículos pesados para la modelación
Table 2. Heavy vehicle configurations for modeling

	Configuración de carga / <i>Load configuration</i>	Potencia máxima del motor (hp) / <i>Maximum engine power (hp)</i>	Potencia de frenado (hp) / <i>Brake power (hp)</i>
C1	Tracto + semirremolque: 45 T / <i>Articulated truck : 45 T</i>	360	Freno de escape: 216 / <i>Exhaust brake: 216</i>
C2	Bitrén corto de 7 ejes: 61 T / <i>Short heavy load truck of 7 axles: 61 T</i>	360	Freno de escape: 216 / <i>Exhaust brake: 216</i>
C3	Bitrén largo de 9 ejes: 75 T / <i>Long heavy load truck of 9 axles: 75 T</i>	360	Freno de escape: 216 / <i>Exhaust brake: 216</i>
C4	Bitrén corto de 7 ejes: 61 T / <i>Short heavy load truck of 7 axles: 61 T</i>	400	Retardador hidráulico: 560 / <i>Hydraulic retarder: 560</i>
C5	Bitrén largo de 9 ejes: 75 T / <i>Long heavy load truck of 9 axles: 75 T</i>	400	Retardador hidráulico: 560 / <i>Hydraulic retarder: 560</i>

5.2 Configuraciones geométricas para el análisis

Los rangos de las variables geométricas que conformaron los escenarios de evaluación consideraron longitud en pendiente, inclinación y velocidad de entrada a la pendiente:

- Longitud de la pendiente: de 1 a 12 km
- Inclinación de la pendiente: se incluyeron pendientes de 4%, 6%, 8% y 10%
- Velocidad de circulación: se consideró una velocidad de circulación en la entrada de la pendiente hasta el límite legal de velocidad, que en Chile es de 120 km/h

5.3 Cálculo del Criterio de Necesidad

De acuerdo a los resultados presentados anteriormente, resulta conveniente proponer una actualización del criterio actualmente en uso. Para ello se consideró un camión convencional de 45 toneladas de peso bruto. Este último valor representa el peso límite más recurrente en las normativas de pesos máximos de diversos países. Este camión convencional corresponde a la configuración de carga C1.

Teniendo en cuenta lo anterior, la necesidad de un lecho de frenado puede establecerse en base a dos criterios: Uno, relacionado con el valor de CN (Ver Ecuación 2) sin restricción a la velocidad de entrada más que la velocidad límite legal. El otro, se propone en base a un índice de peligrosidad de la pendiente el cual a su vez es dependiente de la relación entre la velocidad de operación en la pendiente y la VMDS.

El primer criterio permite en caminos nuevos proyectar pendientes prolongadas para evitar requerir un lecho de frenado, o en su defecto identificar en el diseño el donde emplazarlo. El segundo criterio permite en caminos nuevos establecer señales de velocidad límite al inicio de la pendiente y, a su vez, en caminos existentes establecer una regla para determinar la peligrosidad de las pendientes en función de la operación.

Criterio 1: Valor de CN sin restricción de velocidad

Este criterio se desarrolló para la configuración de carga C1 (Tabla 2). Con estos datos, se evaluaron múltiples combinaciones de inclinaciones y longitudes de pendientes,

5.2 Geometrical Configurations used for the analysis

The ranges of geometrical variables making up the assessment scenarios considered downgrade length, inclination and incoming speed at the slope.

- Downgrade length: from 1 to 12 km.
- Downgrade inclination: slopes at 4%, 6%, 8% and 10% were included.
- Circulation speed: a circulation speed at the downgrade entrance point was considered, then reaching the maximum speed limit, which is 120 km/h in Chile.

5.3 Calculation for the Implementation Criterion

In accordance with above results, it becomes convenient to update the criterion actually in force. For this purpose a conventional truck of 45-tons total gross weight was considered. This value represents the most recurrent limit weight accepted by the regulations for maximum allowed weight in different countries. This truck corresponds to load configuration C1.

By considering above, the need of implementing the arrestor bed may be determined based on two criteria. One: related with the CN value (Ref, Equation 2) without entrance limit speed restrictions but the legal speed limit. The other one is based on a dangerousness index, which in turn also depends on the relation between downgrade operation speed and the VMDS.

For new roads, the first criterion allows to design steeped downgrades to avoid the implementation of the arrestor bed, or to design where to place it instead. The second criterion allows the implementation of maximum speed limit sign posts, at the downgrade entrance on new roads. For existing roads, the second criterion may establish a rule to determine the dangerousness levels of slopes according to operation conditions.

Criterion 1: CN value without speed restrictions

This criterion was developed for load configuration C1 (Table 2). By using such data, multiple combinations of downgrade inclinations and lengths were assessed,



bajo la condición de que la VMDS sea igual a la velocidad de circulación a la entrada de la pendiente, con lo que se garantizaba que en esa condición no se producía el corte de freno. Se contaba así con los valores críticos de pendiente y longitud en pendiente. Luego para cada combinación de inclinaciones y longitudes de pendiente se calculó el valor de CN usando la Ecuación 2 en función de la velocidad de entrada, llegándose a los resultados que se muestran en la Tabla 3.

on the condition that the VMDS speed would be equal to the traffic circulation speed at the downgrade beginning point, thus guaranteeing that a brake system failure would not take place. In this way, the critical values for downgrade and downhill length were already available. Afterwards, the CN value was calculated for each inclination and length combinations, by using the Equation 2, in function of the incoming speed; thus achieving the results shown by Table 3.

Tabla 3. Criterio propuesto para justificar un lecho de frenado

Table 3. Suggested approach to justify an arrestor bed

Velocidad de entrada (km/h)/ Entrance speed (km/h)	CN	Velocidad de entrada (km/h)/ Incoming speed (km/h)	CN
30	> 560	80	> 210
40	> 410	90	> 170
50	> 340	100	> 140
60	> 290	110	> 110
70	> 250	120	> 90

Este criterio, al considerar la velocidad de entrada y el peso del camión más cargado, es menos restrictivo que el valor actualmente usado de CN (CN = 60), con lo cual es posible definir en base a una condición inicial de velocidad de operación y peso bruto total, la necesidad de un lecho de frenado para camiones con sistemas de frenos convencionales. Por ejemplo, para una velocidad de entrada de 60 km/h, se requiere un lecho de frenado cuando CN > 290, lo cual otorga una limitación a la elección de las variables pendiente y longitud en pendiente. Por ejemplo, pendientes del 7 % hasta 5,9 km y del 8 % hasta en 4,5 km cumplen con dicho criterio.

This criterion considers the incoming speed and loaded truck weight, therefore, the value is less restrictive than the currently employed CN value (CN = 60). Consequently, it is now possible to determine the arrestor bed implementation for conventional braking system trucks, based on the initial operation speed and total gross weight. For instance, at an incoming speed of 60 km/h, the arrestor bed is required when CN > 290, which limits the election of the variables downgrade and downhill length. For example, downgrades of 7 % up to 5.9 km and 8 % up to 4.5 km meet this criterion.

Criterio 2: Índice de Peligrosidad

Para establecer este índice se aplicaron los conceptos de la teoría de la confiabilidad, asumiendo como supuesto la normalidad de las distribuciones de velocidad de circulación y VMDS, además de la linealidad de la función de falla. Estos supuestos permiten usar una expresión como la Ecuación 10 para calcular la confiabilidad (Echaveguren et al., 2005).

Criterion 2: Dangerousness Index

So as to determine this index, the concepts from the reliability theory were applied, by assuming given normal distributions for traffic circulation speed and VMDS, as well as failure function linearity. These theoretical assumptions enable us to use Equation 10 to calculate the reliability index (Echaveguren et al., 2005).

$$\beta = \frac{\mu_{V_{op}} - \mu_{VMDS}}{\sqrt{\sigma_{V_{op}}^2 + \sigma_{VMDS}^2}} \quad (10)$$

En la Ecuación 10 el numerador representa la diferencia de las medias de la distribución de probabilidades de las velocidades de operación en la entrada de la pendiente (V_{op}) y la VMDS. El denominador representa la desviación estándar conjunta de ambas velocidades. En la medida que V_{op} sea mayor a la VMDS la probabilidad de falla se incrementa. Si es menor o igual la probabilidad de falla es nula.

The numerator in Equation 10 represents the difference between the mean distribution probabilities for the operation downgrade incoming speed (V_{op}) and the VMDS. The denominator represents the standard deviation for both speeds. As long as V_{op} is greater than VMDS, the failure probability is also greater. If V_{op} is equal or lower than VMDS, failure probability is zero.

La velocidad de operación se puede obtener a partir de mediciones directas en terreno. Su desviación estándar en tanto, puede estimarse en 4 km/h de acuerdo a la experiencia de los autores en caso que no se cuente con datos de terreno. La VMDS y su desviación estándar se calculan para cada configuración geométrica. Mediante simulación con las configuraciones de carga de la Tabla 2, las combinaciones posibles de inclinación y longitud de la pendiente, y usando las Ecuaciones 3 a 9, se obtuvo la expresión de la Ecuación 11, que representa la envolvente de la VMDS en función del parámetro CN de la Ecuación 2.

$$VMDS = \begin{cases} V_L & ; VMDS \geq V_L \\ 120 \left[1,04 - 0,9e^{-\frac{47.489,2}{CN^2}} \right] & ; VMDS < V_L \end{cases} \quad (11)$$

Simulaciones realizadas con la Ecuación 11 dieron por resultado una desviación estándar máxima de 3 km/h. Considerando además los rangos extremos posibles de los valores de β , se construyó el índice de peligrosidad (IP) de la Ecuación 12, que representa la probabilidad de ocurrencia de corte de frenos dada la geometría, operación y carga de los vehículos pesados. Se encuentra en función de la media de la velocidad de operación y de la VMDS calculada usando la Ecuación 11.

$$IP = \begin{cases} \frac{(\mu_{V_{op}} - \mu_{VMDS})/3,6}{27,7} 100 & ; \mu_{V_{op}} > \mu_{VMDS} \\ 0 & ; \mu_{V_{op}} \leq \mu_{VMDS} \end{cases} \quad (12)$$

Este índice permite estimar de manera sencilla la peligrosidad de las pendientes. Por ejemplo, para una pendiente del 8 % en 5 km, CN = 320. Según la Ec. 11, la VMDS = 57 km/h. Si la velocidad de operación es de 120 km/h, el índice de la ecuación 12 es IP = 63,3 %. Si la velocidad de operación es de 100 km/h, IP = 43,2 %; para una velocidad de operación de 80 km/h IP = 23,2 % y para 60 km/h IP = 3,1 %. Este resultado muestra que a mayor diferencia entre la velocidad de operación y la VMDS, mayor es la probabilidad de falla. Por tanto, si para un conjunto de pendientes se conocen los datos geométricos y de operación de vehículos pesados, es posible establecer con un mismo sistema de medida un ranking de peligrosidad de pendientes para caminos existentes.

Operation speed may be directly obtained from measurements at the road site. Therefore, the speed standard deviation can be estimated at 4 km/h, in accordance with the authors' experience, in case site data are not available. VMDS standard deviation may be determined for each geometrical configuration. By simulating load configurations in Table 2, all possible combinations of inclination and downgrade lengths were obtained. By employing the Equation 3 to Equation 9, the expression of Equation 11 was achieved, which represents the failure envelope for VMDS based on the parameter CN in Equation 2.

Simulations conducted by employing the Equation 11 provided a maximum standard deviation estimated at 3 km/h. Furthermore, by considering end-to-end β values, the dangerousness index (IP) in Equation 12 was elaborated, which represents the occurrence probability of braking system failure based on the road geometry, heavy weight vehicles operation and loading conditions. Above in function of the average for the operation speed and VMDS obtained by employing Equation 11.

This index enables an easy calculation on downgrades dangerousness conditions. For example, a downgrade of 8% in 5 km, CN = 320. According to Equation 11, VMDS = 57 km/h. If the operation speed is 120 km/h, the index in Eq. 12 is IP = 63,3%. If the operation speed is 100 km/h, IP = 43,2 %. For operation speed at 80 km/h IP = 23,2 % and at 60 km/h IP = 3.1 %. These results prove that the greater difference between operation speed and VMDS, the greater failure probability is. Therefore, if data from road geometrical and heavy weight vehicles operation conditions are available, then it will be possible to determine the grade dangerousness ranking for existing roads, by using only one system.

6. Estudio de un caso para configuraciones de carga especiales

Dentro de esta categoría caen las configuraciones de vehículos C2 a C5 de la Tabla 2. Estas configuraciones admiten un tonelaje máximo bruto desde 45 a 75 toneladas y poseen sistemas de frenos auxiliares de mayor potencia que las configuraciones convencionales de vehículos de carga. Si bien este tipo de vehículos no circulan en muchos países de la región, es interesante y conveniente analizar el potencial efecto de este tipo de configuraciones en los criterios de necesidad de emplazar lechos de frenado.

Las Figuras 3a, 3b, 3c y 3d grafican para las configuraciones de carga C2, C3, C4 y C5 el criterio de necesidad de un lecho de frenado considerando la geometría de la pendiente y la velocidad de operación en la entrada de la pendiente. Se adjunta además en la gráfica el criterio usado por la normativa de Chile (CN = 60) para ilustrar las diferencias existentes al considerar el peso del vehículo y el comportamiento del sistema de frenos.

En los ábacos de las Figuras 3a, 3b, 3c y 3d se elige la curva en función de la velocidad de operación en la entrada de la pendiente. Luego, con la longitud en pendiente y la inclinación se localiza el punto coordinado en el gráfico. Si el punto se encuentra a la izquierda de la curva, la VMDS es menor a la velocidad de operación en la entrada de la curva y se hace necesario emplazar un lecho de frenado. En contraparte, si el punto se localiza a la derecha de la curva, no se necesita un lecho de frenado.

Para ilustrar lo anterior, se consideró una pendiente con una inclinación de $\theta = 6\%$ y con una longitud en pendiente de 5 km. La velocidad de circulación adoptada para justificar o no la implementación del lecho de frenado fue: $V_{op} = 70$ km/h. En cada figura se grafica el punto coordinado para la configuración geométrica elegida.

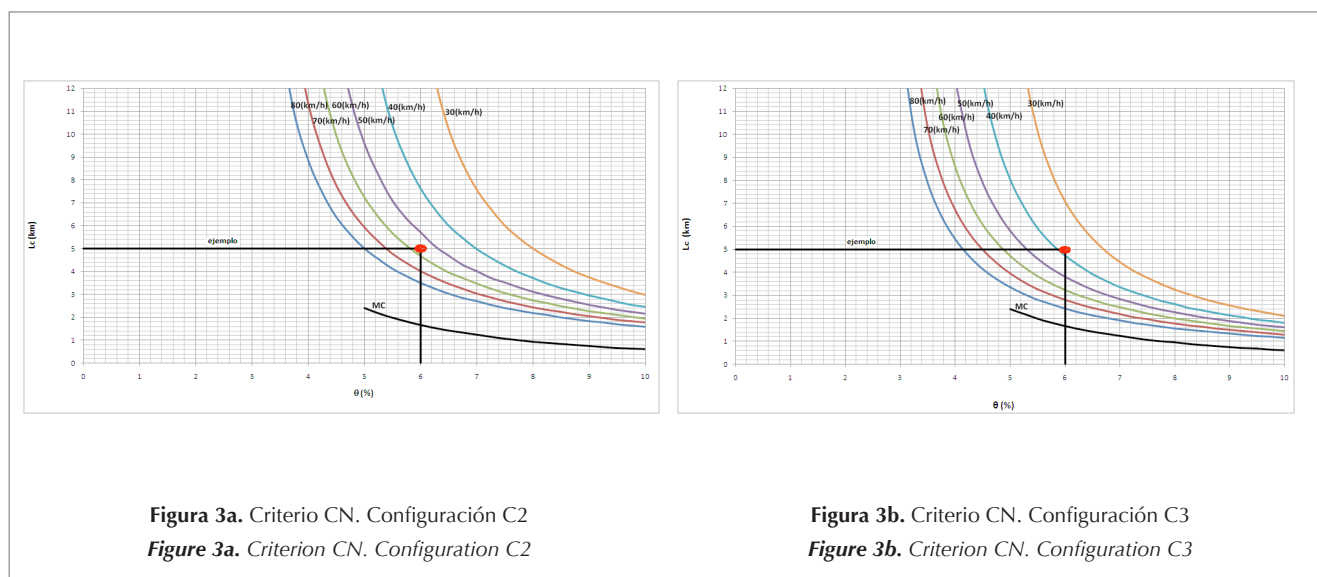
6. Studying a case for special load configurations

This category includes vehicles load configurations C2 to C5 in Table 2. Such configurations allow maximum gross tonnages from 45 to 75 tons. The vehicles have auxiliary braking systems of greater power capacity than conventional loading vehicles. Although such vehicles are not available in several countries of this region, it is interesting and convenient to analyze the potential effect of such configurations on the criteria employed to evaluate the need of implementing arrestor beds.

Figures 3a, 3b, 3c, and 3d show the criteria for implementing arrestor beds for load configurations C2, C3, C4 and C5 based on the downgrade geometry and the incoming operation speed on the slope. The graph also provides the criterion employed by Chilean regulations (CN = 60), so as to show the existing differences considered when evaluating the vehicle weight and its braking system behavior.

In the abacus of Figures 3a, 3b, 3c and 3d, the curve is chosen in function of the operation speed at the downgrade entrance point. Afterwards, by using the downgrade length and inclination, the coordinate point is located on the graph. If the point is located at the curve left side, then the VMDS is lower than the operation speed at the downgrade entrance point, therefore it will be necessary to implement the arrestor bed. Contrarily, if the point is located at the curve right side, the arrestor bed is not required at all.

So as to exemplify above, a downgrade with an inclination of $\theta = 6\%$ and downgrade length of 5 km was considered. The circulation speed used to determine the potential implementation of the arrestor bed was assumed as $V_{op} = 70$ km/h. Each graph shows the coordinate point for the selected geometrical configuration.



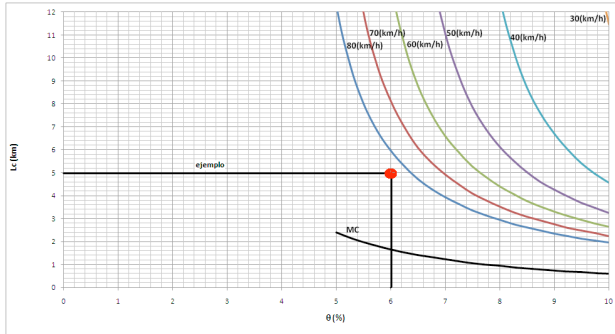


Figura 3c. Criterio CN. Configuración C4
Figure 3c. Criterion CN. Configuration C4

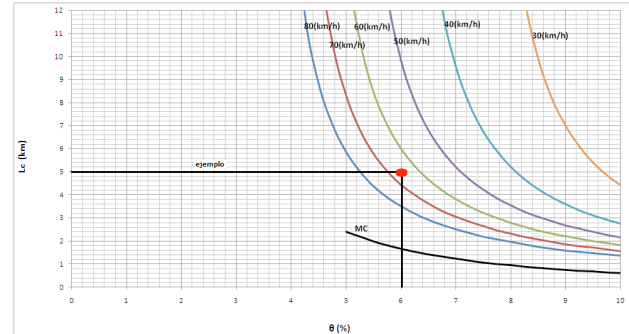


Figura 3d. Criterio CN. Configuración C5
Figure 3d. Criterion CN. Configuration C5

De acuerdo a la Figura 3, se aprecia que para las configuraciones C2, C3 y C5 con sistemas de frenos auxiliares el punto coordinado está a la izquierda de la curva asociada a los 70 km/h, por lo cual se justifica emplazar un lecho de frenado. Sólo la configuración C4 con retardadores no requiere de un lecho de frenado. Esto se debe a que los retardadores de frenado para los rangos medio-alto de peso (61 toneladas) son suficientes para mantener la velocidad de descenso constante. En los otros casos, el sistema de frenos no es suficiente para lograr mantener la velocidad de descenso y la temperatura, por lo cual existe probabilidad de corte del sistema de frenos.

Se aprecia también que en todos los casos de la Figura 3, la curva que describe el criterio CN = 60 se encuentra por debajo de las curvas propuestas, siendo por tanto este criterio muy conservador. Es decir, justifica el uso de lechos de frenado siempre para combinaciones de inclinaciones y longitudes de pendiente menores a las del criterio propuesto.

7. Conclusiones

Se concluyó que los criterios propuestos por normativas en base a índices geométricos desconocen el efecto del desempeño mecánico de los vehículos pesados y por tanto tienden a recomendar el emplazamiento de lechos de frenado cuando no es necesario.

El enfoque metodológico propuesto en este trabajo conjuga el diseño geométrico de pendientes descendentes con el desempeño mecánico de los vehículos pesados al circular por dichas pendientes, entregando así una herramienta de apoyo a los proyectistas para modificar geoméricamente pendientes, señalar velocidades límite de descenso y determinar la peligrosidad de las pendientes descendentes que hace necesario proyectar un lecho de frenado.

In accordance with Figure 2, it is observed that for configurations C2, C3 and C5 with auxiliary braking systems, the coordinate point is located at the curve left side, at 70 km/h; therefore the implementation of the arrestor bed is justified. Only configuration C4, with braking retarders does not require the arrestor bed. Braking retarders for medium and high weight vehicles (61 tons) are able to maintain the constant downhill speed. For the other cases, the braking system is not able by itself to maintain downhill speed and temperature. Consequently, there is a braking failure probability.

It is also observed from Figure 3 that in all cases, that the curve describing the criterion CN = 60 is located below the proposed curves, thus turning it into a very conservative criterion. Therefore, the implementation of the arrestor bed is required by downgrade inclinations and lengths combinations which are lower than the proposed criterion.

7. Conclusions

It was concluded that criteria proposed by regulations based on geometrical indexes are not aware on the mechanical performance of heavy weight vehicles. Therefore, they tend to recommend the implementation of arrestor beds in cases they are not required.

The method approach in this research job combines the information on downgrades geometrical design and the mechanical performance of heavy weight vehicles travelling down these slopes. The approach provides designers with supporting tools to modify downgrade geometry, to place maximum downhill speed sign posts and determine the downgrades dangerousness indexes leading to design the bed arrestor implementation.

Puesto que la velocidad de entrada a la pendiente es diferente a la velocidad de circulación en la pendiente, el criterio basado en CN es esencialmente un criterio de diseño para caminos nuevos en que no se conoce la velocidad de circulación. En este caso, la ecuación de cálculo de VMDS puede usarse para establecer una señal de velocidad límite en la entrada de la pendiente, asumiendo que esta velocidad será uniforme a lo largo de la pendiente, teniendo en cuenta el uso de los frenos de servicio de los vehículos pesados.

Un aumento del peso bruto total de los vehículos pesados, sobre las 45 toneladas sin una mejora en la potencia del motor y del sistema de frenado con respecto a un camión convencional, tiene un importante impacto en la necesidad de emplazar lechos de frenado en pendientes descendentes. En este trabajo se verificó, que las configuraciones de carga de 61 y 75 T necesitan lechos de frenado para velocidades de circulación menores en un 50 a 70% en comparación a un camión convencional.

El uso de conceptos de confiabilidad para evaluar la probabilidad de falla permite incorporar la variabilidad de la velocidad de operación y la variabilidad de la velocidad máxima de descenso. Esta variabilidad puede representarse a través de una función de falla que permite a su vez evaluar la peligrosidad de las pendientes de bajada, aportando así un criterio objetivo de apoyo al diseño y al análisis de seguridad en caminos existentes.

Siguiendo la idea anterior, el valor de velocidad máxima de descenso puede utilizarse convenientemente para regular mediante señalizaciones, la velocidad de entrada a la pendiente. Sin embargo, aspectos tales como la disposición de áreas de detención previas al inicio de pendientes de bajada para revisar los sistemas de frenos, son medidas complementarias al emplazamiento de lechos de frenado.

Since the operation speed at the downgrade entrance point is different to the downhill speed, the criterion based on CN is essentially a design criterion to be used for new roads, where the traffic circulation speed is not available yet. In this case the VMDS calculation may be used to determine a limit speed at the downgrade entrance point, by assuming that this speed will be constant alongside the slope and, provided that this service braking systems of heavy weight vehicles will be used.

The increase of heavy vehicles total gross weight, over 45 tons, without improving the engine power and braking systems available for conventional trucks, has a significant impact on the implementation of arrestor beds at downgrades. This research proved that all load configurations for 61 and 75 tons vehicles require arrestor beds, at traffic circulation speeds lower in 50 to 70% compared to conventional trucks.

The use of reliability concepts to determine failure probability enables the incorporation of the operation speed variability and the maximum downhill speed variability. This variability may be represented by means of a failure function, which in turn allows the determination of downgrades dangerousness levels. Therefore, these concepts provide an objective point of view for the design and analysis of existing roads safety conditions.

Furthermore, the maximum downhill speed may be conveniently used to standardize the operation speed at the downgrade entrance point by using sign posts. However, some elements placed prior to the downgrade entrance point, such as emergency escape lanes used for braking systems inspection, are only complementary solutions to the implementation of arrestor beds.

8. Referencias/References

- AASHTO (2011)**, A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, American Association of State Highway and Transportation Officials. Estados Unidos.
- Abdelwahab W. y Morral J. (1997)**, Determining Need for and Location of Truck Escape Ramps. *Journal of Transportation Engineering*. 123(5), 350 – 356.
- Allen R.W., Harwood D., Chstos J.P. y Glauz W. (2000)**, The Capability and Enhancement of VDANL and TWOPAS for Analyzing Vehicle Performance on Upgrades and Downgrades within IHSDM. FHWA-RD-00-0078. Federal Highway Administration. Estados Unidos.
- AUSTROADS (2010)**, Part 6: Roadside Design, Safety and Barriers. En Guide for Road Design. Austroads AGRD06/10.
- Bowman B. (1989)**, Grade Severity Rating System (GSRS). Report FHWA-IP-88-015. Federal Highway Administration. Estados Unidos.
- Brossi, A. (2002)**, Estudo do desempenho de frenagem de um ônibus biarticulado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Brasil.
- Canale A. y Gutiérrez J. (2005)**, Estudo do desempenho da frenagem e do controle da velocidade de descida em declive longo e acentuado no trecho da serra do Mar da Rodovia Dos imigrantes de veículos comerciais representativos da flota nacional. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Brasil.
- DoT (1981)**, Retarders for Heavy Vehicles: Evaluation of Performance Characteristics and In-Service Costs. United States Department of Transportation. Estados Unidos.
- Díaz R., Echaveguren T. y Vargas-Tejeda S. (2012)**, Camiones de alto tonelaje y su impacto en ciclo de vida de pavimentos asfálticos. *Revista de Construcción*. 11. 101 – 118.
- Echaveguren T., Bustos M. y de Solminihaç H. (2005)**, Assessment of horizontal curves of an existing road using reliability concepts. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 32(6). 1030 – 1038.
- Echaveguren T., Vargas S. y Ñancuñil J. (2007)**, Metodología de análisis y diseño de lechos de frenado. *Revista Ingeniería de Construcción*. 22(3). 175 – 184.



- Johnson W.A., Myers T.T., DiMarco R.J. y Allen R.W. (1981)**, A downhill grade severity rating system. Technical Paper Series 811263. Society of Automotive Engineers. Estados Unidos.
- Fitch J.W. (1994)**, Motor Truck Engineering Handbook. Society of Automotive Engineers. Estados Unidos.
- Karczewski J. (1992)**, Evolution in braking. Automotive Engineering. 100(8). 10 – 11.
- Limpert R. (1999)**, Brake Design and Safety. Society of Automotive Engineers. 2a Edición. Estados Unidos.
- Lucas M. y Widmer J. (2004)**, Características de frenagem da frota brasileira de caminhões e CVCs e sua influencia sobre la aseguaranca e capacidade das vias em declives longos. Actas de XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. 599 – 610. Florianópolis, 8 – 12 Noviembre 2004.
- Lucas M. (2004)**, Faixas adicionais para trechos de rodovias com declives longos considerando os aspectos técnicos da frenagem de veículos de carga. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Brasil.
- MOP (2012)**, Seguridad Vial. Manual de Carreteras, Vol. 6. Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Vialidad. Chile.
- Widmer J. (2000)**, Análise teórica da eficiencia de frenagem de algumas configuracões de veículos unitários e combinacões de veículos rodoviaros de carga brasileiros. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Brasil.
- Zanoli P.R. y Setti J.R. (2004)**, Desaceleracão de caminhões sem freós em caixas de retencão preenchidas com agregado artificial. Actas XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 611 – 623, Florianópolis, 8 – 12 Noviembre 2004.