SEDE SANTIAGO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

RESISTENCIA A LA RODADURA DE CAMINOS ESTABILIZADOS PARA PROYECCIONES DE COSTOS EN RUTAS MINERAS

Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil

Alumno: Polet Lanbert Obal.

Profesor Guía: Rodolfo Cabezas G.

Santiago, Chile

marzo, 2019

SEDE SANTIAGO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

RESISTENCIA A LA RODADURA DE CAMINOS ESTABILIZADOS PARA PROYECCIONES DE COSTOS EN RUTAS MINERAS

Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil

Alumno: Polet Lanbert Obal.

Profesor Guía: Rodolfo Cabezas G.

Santiago, Chile

marzo, 2019

CALIFICACIÓN DE LA MEMORIA

En Santiago, el… de... de…, los abajo firmantes dejan constancia que el alumno …… de la carrera Ingeniería Civil ha aprobado la memoria para optar al título ……. con una nota de ……

Profesor:…… Profesor:……

Firma:…… Firma:……..……

Profesor:……

Firma:…….

Santiago, Chile

Febrero, 2019

Para mi familia que me acompañaron en este proceso, en especial a mis padres y a mi abuelo Raúl que siempre me dieron la motivación para ser mejor persona.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos quienes hicieron posible esta investigación, a mi profesor guía, Rodolfo Cabezas por ayudarme, orientarme y aclarar dudas durante todo este tiempo, gracias por su disposición.

De igual modo, quiero agradecer a la casa de estudios por darme la oportunidad de formarme como profesional y darme las herramientas necesarias para enfrentar los desafíos futuros.

Por último, quiero agradecer a mis padres, por todo el cariño y apoyo incondicional durante todo el proceso universitario, porque siempre me dieron la motivación de seguir y lograr mis metas. A mi abuelo Raúl, que se fue antes de que cumpliera con mi promesa, pero fue el que siempre confió en mis capacidades y me brindó su apoyo desde el inicio.

RESUMEN

La resistencia a la rodadura es un concepto que en Chile es desconocido, por tanto, no se conocen los beneficios que podría traer si se lograra controlar esta resistencia. En otros lugares del mundo se han realizados estudios que comprueban que la resistencia a la rodadura puede reducir costos en consumo de combustible, mantenimientos de carreteras y neumáticos, entre otros. Debido a esto surgió un gran interés en estudiar la resistencia al rodamiento en Chile y analizar los beneficios que se podrían obtener para el ámbito minero en el país.

La investigación se enfocó principalmente en encontrar un modelo matemático adecuado para calcular la resistencia al rodamiento, con los parámetros de suelo, ya que es por donde se busca disminuir la resistencia a la rodadura. Luego se realizó un análisis de sensibilidad para el consumo de combustible utilizando resistencia a la rodadura de un 2% a un 14%, además se fueron modificando otros parámetros como la velocidad, masa, resistencia de frenado y pendiente, para analizar cómo influyen en el ahorro en costos de combustible de camiones de alto tonelaje.

Los resultados obtenidos fueron variando según las condiciones del camino, del camión y de la disminución de resistencia al rodamiento. Para reducciones de resistencia a rodamiento de un 2% a un 14% modificando diferentes velocidades se obtuvo un ahorro de un 73%. La variación de ahorro entre un camión sin carga y otro cargado es de un 73% a un 80% respectivamente. Para caminos con pendientes de 10% a 2% es un 35% a un 60% respetivamente y por último modificando la resistencia de frenado de 116,68kN a 558,29 kN los ahorros van desde un 45% a un 69% respectivamente. A futuro se requiere realizar una investigación más profunda, realizando las pruebas necesarias para obtener un coeficiente de resistencia a la rodadura más exacto con las características del suelo chileno y enfocarse en otros costos como el manteniendo de carreteras y neumáticos.

Palabras Clave: *rodadura, combustible, reducción, costos, resistencia.*

ABSTRACT

The rolling resistance is a concept that in Chile is unknown, therefore, there are no known benefits that could bring if you managed to control this resistance. In other parts of the world, studies have been carried out that prove that rolling resistance can reduce costs in fuel consumption, road and tire maintenance, among others. Because of this, there was a great interest in studying the resistance to the bearing in Chile and analyzing the benefits that could be obtained for the mining field in the country.

The research focused mainly on finding a mathematical model suitable for calculating the resistance to the bearing, with the soil parameters, because it is the one that seeks to reduce the rolling resistance. Then, a sensitivity analysis was made for fuel consumption using rolling resistance from 2% to 14%, in addition, other parameters were modified such as speed, mass, braking, and slope resistance, to analyze how they influence the Fuel cost savings for high-tonnage trucks.

The results obtained were varying according to the conditions of the road, the truck and the decrease in resistance to the bearing. For reductions of bearing resistance from 2% to 14% by changing different speeds, a savings of 73% was obtained. The saving variation between a truck with no load and another loaded is 73% to 80% respectively. For roads with slopes from 10 ° to 2 ° is 35% to 60% respectively and finally modifying the braking resistance of 116, 68kN to 558.29 KN the savings range from 45% to 69% respectively. In the future, a deeper investigation is required, carrying out the necessary tests to obtain a more accurate rolling resistance coefficient with the characteristics of the Chilean soil and to focus on other costs such as maintaining roads and tires.

Keywords: *rolling, fuel, reduction, costs, resistance.*

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN VI

ABSTRACT VII

TABLA DE CONTENIDOS VIII

INDICE DE FIGURAS X

INDICE DE TABLAS XII

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 OBJETIVOS 3

1.2 ALCANCE 3

2. MARCO TEÓRICO 4

2.1 PARÁMETROS DEL NEUMÁTICO 5

2.2 PARÁMETROS DE OPERACIÓN 8

2.3 PARÁMETROS DE TERRENO 11

2.4 MODELO CONSUMO DE COMBUSTIBLE 17

3. DESARROLLO 22

3.1 FORMULACIÓN TEÓRICA 22

3.2 PARÁMETROS DEL MODELO 23

3.3 VALORES REFERENCIALES 25

4. RESULTADOS 26

4.1 VARIACIÓN DE RESISTENCIA A LA RODADURA AL USAR ADITIVO.. 26

4.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y LA INFLUENCIA RELATIVA DE RESISTENCIA AL RODAMIENTO. 29

4.3 ANÁLISIS DE COSTOS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN FUNCIÓN DE RESISTENCIA A LA RODADURA 37

5. CONCLUSIONES.....45

5.1 TRABAJO FUTURO 46

BIBLIOGRAFÍA.....48

Bozo, N. (2016). *Caracterización del comportamiento mecánico de suelos con una emulsión asfáltica. Santiago: Universidad San Sebastián.* 48

ANEXOS.....51

A. ANEXO 1 52

A.1. CÁLCULO DE RESISTENCIA DE FRENADO.....52

A.2. CÁLCULO DE FUERZA DE INERCIA Y MOMENTO DE INERCIA.....53

B. ANEXO 2 55

B.1. CARACTERÍSTICAS DE CAMIÓN.....55

C. ANEXO 3 57

C.1. TABLA DE ADITIVOS ESTABILIZANTES Y/O SUPRESORES DE POLVO. (Bozo, 2016).....58

C.2. TABLA PARA SELECCIONAR UN ADITIVO ESTABILIZANTE.....60

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Relación entre la resistencia a la rodadura con el consumo de combustible y la producción**.** (Hackett, 2016) 2
Figura 2.1. Coeficiente de resistencia a la rodadura vs presión de inflado. (D. Gillespie, 1992). 5
Figura 2.2. Resistencia a la rodadura versus velocidad para superficies pavimentadas. (D. Gillespie, 1992)**.** 9
Figura 2.3. Efecto de penetración en resistencia a la rodadura. (Cherné & Gonzaléz, 2010).....11
Figura 2.4. Esquema de resistencia total. (Cherné & Gonzaléz, 2010) 13
Figura 2.5.Definicion de la profundidad media de perfil, “MPD”. (Yacchirema, 2016) 15
Figura 2.6.Esquema de ecuación 6. Modificado de (RutaTransporte, 2016) 15
Figura 2.7. Esquema de ecuación 13. Modificado de (Neumarket) 17
Figura 2.8. División de la energía del combustible. (Mammetti, Gallegos, & Frixas, 2013).....18
Figura 4.1. Consumo de combustible con la variación de coeficiente de resistencia a la rodadura y velocidad. 30
Figura 4.2. Consumo de combustible con la variación de coeficiente de resistencia a la rodadura y masa. 31
Figura 4.3. Consumo de combustible con la variación de coeficiente de resistencia a la rodadura y pendiente con masa de camión vacío. 33
Figura 4.4. Consumo de combustible con la variación de coeficiente de resistencia a la rodadura y pendiente de un camión cargado. 34
Figura 4.5. Consumo de combustible con la variación de coeficiente de resistencia a la rodadura y resistencia de frenado de un camión sin carga. 36
Figura 4.6. Variación de costos en función del coeficiente velocidad y el coeficiente de resistencia a la rodadura de un camión. 38
Figura 4.7. Variación de costos en función de coeficiente del coeficiente de resistencia a la rodadura y masa de un camión. 39

Figura 4.8. Variación de costos del consumo de combustible en función del coeficiente de resistencia a la rodadura y pendiente de un camión sin carga. 41
Figura 4.9. Variación de costos del consumo de combustible en función de coeficiente de resistencia a la rodadura y pendiente de un camión con carga. 42
Figura 4.10. Variación de costos del consumo de combustible en función de coeficiente de resistencia a la rodadura y resistencia de frenado de un camión. ..44

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Valores de coeficiente a la rodadura. (D. Gillespie, 1992) 7
Tabla 3.1. Parámetros utilizados para calcular resistencia a la rodadura. 24
Tabla 3.2.Parámetros utilizados para calcular consumo de combustible. 24
Tabla 3.3.Valores de consumo para camiones. (Recojevic & Komljenovic, 2010).25
Tabla 4.1. Límites de consistencias o de Atterberg. (Manual de carretera, Volumen 8, 2018).....27
Tabla 4.2.Consumo de combustible vs velocidad y resistencia a la rodadura. 29
Tabla 4.3.Consumo de combustible vs masa y resistencia a la rodadura. 31
Tabla 4.4.Consumo de combustible vs pendiente y resistencia a la rodadura de un camión sin carga. 32
Tabla 4.5.Consumo de combustible vs pendiente y resistencia a la rodadura de un camión con carga.....34
Tabla 4.6.Consumo de combustible vs resistencia de frenado y resistencia a la rodadura de un camión con carga. 35
Tabla 4.7.Costos de consumo de combustible vs velocidad y resistencia a la rodadura de un camión. 37
Tabla 4.8.Costos de consumo de combustible en función de la masa y resistencia a la rodadura de un camión. 39
Tabla 4.9.Costos de consumo de combustible en función de la pendiente y resistencia a la rodadura de un camión sin carga. 40
Tabla 4.10.Costos de consumo de combustible en función de la pendiente y resistencia a la rodadura de un camión con carga.....42
Tabla 4.11.Costos de consumo de combustible en función de la resistencia de frenado y resistencia a la rodadura de un camión con carga. 43

1. INTRODUCCIÓN

El diseño de caminos es vital para el proceso de producción en desarrollos industriales continuos como las operaciones mineras, por lo tanto, un camino en mal estado produce un impacto importante en los costos de operación. Un camino bien mantenido permite tener beneficios asociados como: dar más seguridad al conductor, disminuir los tiempos de ciclos de los camiones y disminuir daños a los vehículos en su totalidad. El daño está fuertemente afectado por el estado de deformaciones longitudinales, transversales, materiales sueltos, baches, entre otras faltas de serviciabilidad.

Un concepto asociado al aumento de costos en mantenimiento vehicular, dentro del cual destaca el deterioro de los neumáticos, corresponde a resistencia a la rodadura. En Chile, actualmente se conoce poco el concepto de resistencia a la rodadura que se tiene en los caminos estabilizados, principalmente en los caminos de faenas mineras que son usados por camiones de alto tonelaje, estos corresponden a caminos con carpetas granulares sin pavimentar. La resistencia a la rodadura corresponde a una fuerza que soporta el movimiento de un cuerpo que rueda sobre una superficie, produciéndose una deformación en la superficie, en la rueda o en ambos. Disminuir este índice provocará una disminución importante en los costos de mantenimiento de carreteras y en los repuestos de neumáticos de los camiones y a su vez disminuirá considerablemente el consumo de combustible.

Estudios en otros lugares del mundo sobre el índice de resistencia a la rodadura, han demostrado el impacto en los costos de caminos mineros al aplicar estabilización. Por ejemplo, con el producto comercial “EarthZyme”, basado en enzimas, se logra bajar la resistencia a la rodadura de 7% a un 2,7%, produciéndose una reducción de un 61% en costos directos de producción (Hackett, 2016). A su vez otorga una reducción en el combustible de hasta un 90% y un aumento en la productividad de la flota de 35% como se demuestra en la Figura 1.1. Otros beneficios que produjo este producto fue la reducción de costos de materiales, ya

que utiliza suelos de alto contenido de arcillas, y la reducción de costos de mantenimientos de las carreteras y vehículos, debido a que este producto logra aumentar la densidad después del tratamiento, lo que lleva a un aumento en el índice CBR y una reducción en la permeabilidad.

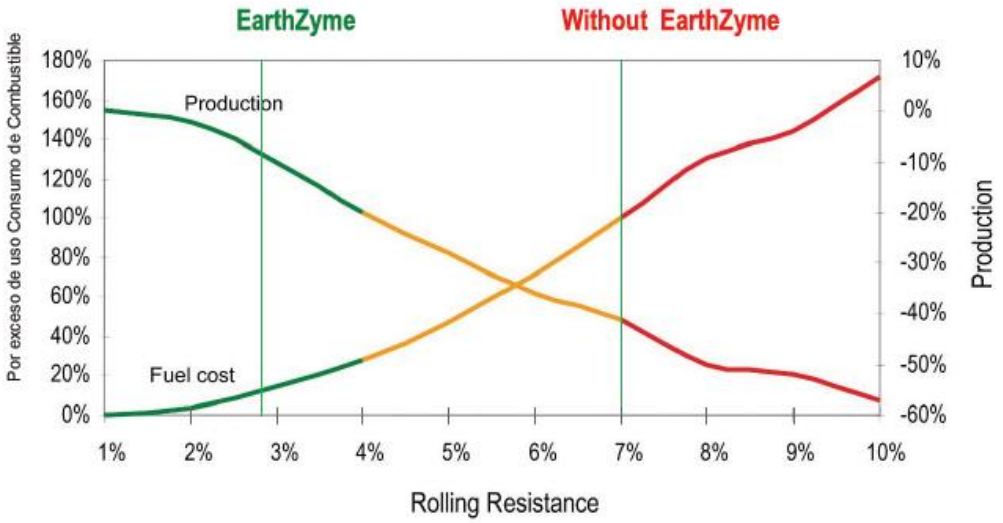

Figura 1.1. Relación entre la resistencia a la rodadura con el consumo de combustible y la producción**.** (Hackett, 2016)

En síntesis, conocer el concepto de índice de resistencia a la rodadura puede tener un gran impacto en los costos de caminos mineros, por esto se realizará un estudio para comprobar el impacto que se obtendría al controlar la resistencia a la rodadura.

1.1 OBJETIVOS

Estudiar el fenómeno de resistencia a la rodadura en caminos y poder proyectar el efecto de estabilización en caminos mineros de Chile, analizando el impacto en los costos de mantenimiento de las carreteras y vehículos.

Dentro de los objetivos específicos se contemplan:

- Estudiar modelos matemáticos básicos y complejos existentes de resistencia a la rodadura.
- Desarrollar una formulación matemática completa para calcular el índice de resistencia a la rodadura en Chile, con el fin de comparar datos de terreno y extrapolar el comportamiento para datos en faenas mineras.
- Hacer un análisis de sensibilidad y proyectar la aplicación del producto y su impacto en variables de control y costo.

1.2 ALCANCE

El estudio contempla definir un modelo para calcular el coeficiente de rodadura que existe en Chile, realizando un modelo matemático con propiedades más relevantes que presenta el país. También se realizará un análisis de sensibilidad de los impactos que tiene el coeficiente de resistencia a la rodadura en el consumo de combustible.

2. MARCO TEÓRICO

Resistencia a la rodadura se define como una fuerza que se opone el movimiento de un cuerpo que rueda sobre una superficie, produciéndose una deformación en la rueda, en la superficie o en ambas. Para obtener un índice de resistencia a la rodadura, se debe tener el conocimiento de cada uno de los parámetros que influyen al momento de calcular esta resistencia.

Para empezar, se debe tener en cuenta una formulación básica, en donde algunos autores la definen de la siguiente manera:

La resistencia a la rodadura se expresa de la siguiente manera: (Kenneth J.Kelly, 2002)

$$F_r = C_r * m * g \qquad \textbf{Ec. (1)}$$

Donde:

Fr: resistencia a la rodadura. [N]
Cr: coeficiente de resistencia a la rodadura. [Adimensional]
m: masa del vehículo [kg]
g: aceleración de gravedad. [m/s^2]

Se debe tener en cuenta que, en la formulación básica no se tienen en cuenta todos los parámetros que influyen realmente.

2.1 PARÁMETROS DEL NEUMÁTICO

El neumático juega un rol importante, debido a que es el cuerpo que rueda sobre una superficie, por lo tanto, se deforma y se desgasta al estar en contacto con el suelo.

La presión de inflado determina la elasticidad del neumático y cambia en diferentes tipos de superficies. Las presiones de inflado altas en suelos blandos como arenas, aumentan el coeficiente de resistencia a la rodadura, por el contrario, en presiones de inflados bajas disminuye la penetración y la resistencia. En superficies plásticas medianas, los efectos de presión de inflado son casi nulos. En suelos duros, el coeficiente de resistencia a la rodadura disminuye con una presión de inflado más alta. (D. Gillespie, 1992).

A continuación, la Figura 2.1 muestra como la presión de inflado cambia en las diferentes superficies.

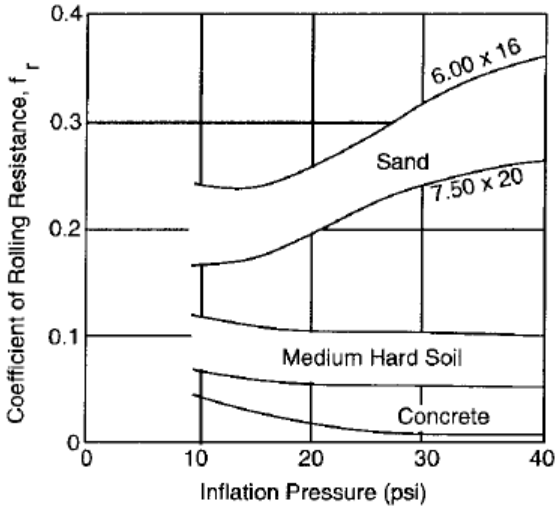

Figura 2.1. Coeficiente de resistencia a la rodadura vs presión de inflado. (D. Gillespie, 1992).

Otro parámetro importante que se debe considerar en los neumáticos es el material y el diseño con el que se realizarán, debido a que su grosor y material del cual están compuesto, determinan la rigidez y las pérdidas de energía del neumático. Las llantas desgastadas y lisas muestran valores de coeficientes hasta un veinte por ciento más bajos que las llantas nuevas. (D. Gillespie, 1992)

Gillespie consideró el vehículo como un todo y determinó que la resistencia a la rodadura total es igual a la suma de las resistencias de todas las ruedas, donde obtuvo la siguiente expresión (D. Gillespie, 1992):

$$R_x = R_{xf} + R_{xr} = f_r * W \qquad \textbf{Ec. (2)}$$

Donde:

R_x= resistencia a la rodadura total.

R_{xf}= resistencia a la rodadura de las ruedas delanteras.

R_xr=resistencia a la rodadura de las ruedas traseras.

f_r= coeficiente de resistencia a la rodadura.

W= peso del vehículo.

Gillespie además propuso una formulación para calcular el coeficiente de rodadura (D. Gillespie, 1992):

$$f_r = \frac{R_x}{W} = C * \frac{W}{D} * \sqrt{\frac{ht}{W}} \qquad \textbf{Ec. (3)}$$

Donde:

f_r: coeficiente de resistencia a la rodadura (adimensional)

R_x: fuerza de resistencia al rodamiento.

W: peso en la rueda.

C: pérdida de reflexión constante y características elásticas del material del neumático.

D: diámetro exterior.

ht: altura de la sección del neumático.

w: ancho de la sección del neumático.

La Tabla 2.2 enumera algunos coeficientes de resistencia a la rodadura que se pueden usar dependiendo del tipo de vehículo y el tipo de superficie.

Tipo de Vehículo	**Hormigón**	**Superficie media dura**	**Arena**
vehículo de pasajeros	0,015	0,08	0,30
Camión pesado	0,012	0,06	0,25
Tractor	0,02	0,04	0,20

Tabla 2.1. Valores de coeficiente a la rodadura. **(D. Gillespie, 1992)**

Otro estudio definió el siguiente modelo, integrando los siguientes parámetros: presión de inflado, radio exterior, ancho de sección, rigidez de material, radio de la llanta y además agrego parámetros operativos del neumático como: la velocidad y la carga normal. (Chalmer University of technology , 2014)

Se definió el modelo de la siguiente manera:

$$RR = \frac{e * N}{R} + F_{airdrag} \qquad \textbf{Ec. (4)}$$

Donde:

RR: resistencia a la rodadura

e*N: fuerza de resistencia a la rodadura por la amortiguación

R: radio del neumático

$F_{airdrag}$: Fuerza ocasionada por la resistencia aerodinámica rotacional.

$$F_{airdrag} = Vx^2 * (W * \pi * R) * Cd \qquad \textbf{Ec. (5)}$$

Donde:

V: velocidad (km/h)

W: peso del vehículo. (kg)

Cd: a un coeficiente de arrastre. (adimensional)

R: radio del neumático (m)

Las principales conclusiones para el modelo es que si la presión de inflado disminuye el valor de resistencia a la rodadura aumenta y si se aumenta el diámetro del neumático el valor de resistencia disminuye. Además, se indica que el modelo no explica la contribución de la temperatura y la influencia del comportamiento completo del material.

2.2 PARÁMETROS DE OPERACIÓN

Los parámetros de operación pueden producir efectos en la resistencia a la rodadura, como: velocidad, temperatura, aceleración, carga – descarga de un camión, etc.

El coeficiente de resistencia a la rodadura es directamente proporcional a la velocidad debido a un mayor trabajo de flexión y vibración en el cuerpo del neumático. Cuando el vehículo avanza a velocidades bajas, el efecto es menor. La velocidad afecta más cuando esta se combina con una presión de inflado más baja. (D. Gillespie, 1992).

La Figura 2.2 muestra la resistencia a la rodadura vs velocidad para un neumático radial. El aumento del coeficiente de resistencia a la rodadura es causado por una onda estacionaria de alta energía desarrollada en la carcasa del neumático justo detrás del parche de contacto. Los Neumáticos modernos clasificados para alta velocidad normalmente incluyen estabilizadores en el área del hombro para controlar el desarrollo de las ondas estacionarias. (D. Gillespie, 1992)

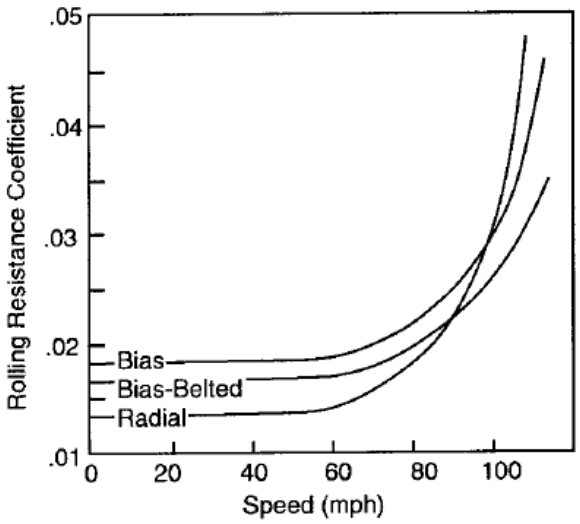

Figura 2.2. Resistencia a la rodadura versus velocidad para superficies pavimentadas. (D. Gillespie, 1992)**.**

En el instituto de investigación de transporte de la Universidad de Michigan, se desarrollaron ecuaciones similares para estimar la resistencia a la rodadura de los neumáticos para camiones pesados. (D. Gillespie, 1992)

Estas son:

Para tipo radial:

$$f_r = 0{,}0041 + 0{,}000041 * v) * Ch \qquad \textbf{Ec. (6)}$$

Para neumáticos diagonales:

$$f_r = 0{,}0066 + 0{,}000046 * v) * Ch \qquad \textbf{Ec. (7)}$$

Donde:

v: velocidad en millas por hora (mph)

Ch: coeficiente de la superficie de la carretera

- 1,0 para hormigón liso
- 1,2 para concreto desgastado, ladrillo, asfalto frío
- 1,5 para asfalto caliente

Se debe tener en cuenta que el enfoque principal de esta investigación es para suelos estabilizados no pavimentados, por lo tanto, el modelo de investigación de la Universidad de Michigan no es acorde para este estudio.

La temperatura es otro parámetro que causa un efecto importante en la resistencia, debido a que cuando un neumático empieza a rodar desde un estado frio, la temperatura aumenta y la resistencia disminuye en un primer periodo de viaje. (D. Gillespie, 1992).

La aceleración es una variable que puede aumentar considerablemente la resistencia a la rodadura, ya que esta produce un mayor desgaste al igual que cuando se frena abruptamente.

Por último, la carga- descarga de un camión produce un efecto en resistencia, dado que, a una mayor carga la resistencia aumenta, debido a que aumenta el peso que soporta la rueda.

2.3 PARÁMETROS DE TERRENO

Los parámetros que afectan al suelo son el principal enfoque de esta investigación, dado que, se requiere estudiar cómo mejorar la resistencia a la rodadura realizando mejoramientos de suelos.

En superficies duras, lisas y secas la resistencia a la rodadura es mínima, mientras que en un camino desgastado la resistencia a la rodadura casi se duplica. En los caminos mojados, se observa una mayor resistencia a la rodadura debido a la temperatura del funcionamiento del neumático que reduce su flexibilidad. (D. Gillespie, 1992).

La penetración en el suelo es un parámetro que produce efecto directamente proporcional en la resistencia a la rodadura, dado que al tener una mayor penetración se tiene una alta resistencia a la rodadura, por el contrario, al tener una menor penetración se obtiene una menor resistencia a la rodadura. Tal como muestra la Figura 2.3 (Cherné & Gonzaléz, 2010):

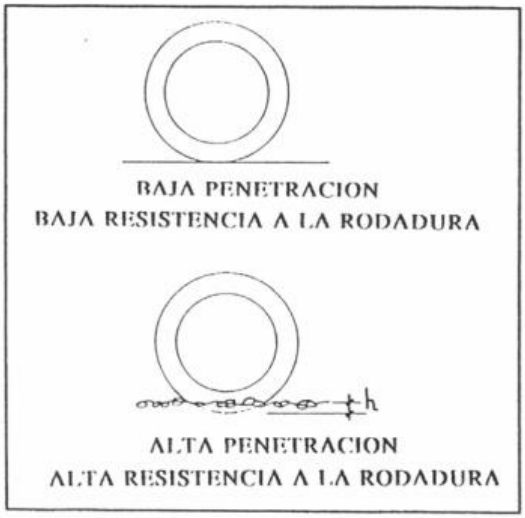

Figura 2.3. Efecto de penetración en resistencia a la rodadura. (Cherné & Gonzaléz, 2010)

Otra variable es la pendiente del camino. Esta induce la fuerza resultante del peso del vehículo paralela al plano de rodadura. (Cherné & Gonzaléz, 2010)

Su fórmula es la siguiente:

$$R_P = W * \sin \alpha \qquad \textbf{Ec. (8)}$$

Donde:

R_p= resistencia a la pendiente

W=peso del vehículo (t)

α= ángulo de inclinación (%)

Siendo (+) cuando el vehículo sube y (-) cuando baja.

Cuando un vehículo va subiendo una pendiente, la resistencia a la rodadura es más alta, ya que está ejerciendo más fuerza para subir, por el contrario, cuando baja la pendiente de un camino, este realiza poca fuerza produciendo una menor resistencia a la rodadura.

Se propone que, para calcular la resistencia a la rodadura, incluyendo su pendiente, es necesario sumar la ecuación 2 con la ecuación 9. (Cherné & Gonzaléz, 2010). En la Figura 2.4 se demuestra una aplicación de las ecuaciones, demostrando como calcular una resistencia total.

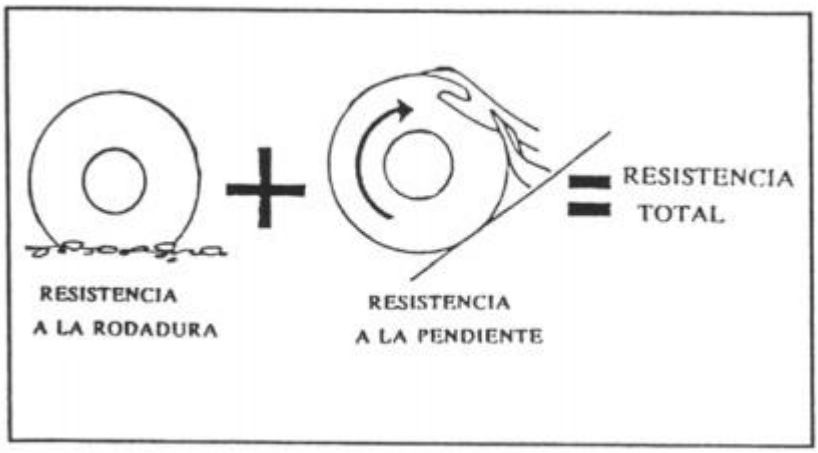

Figura 2.4. Esquema de resistencia total. (Cherné & Gonzaléz, 2010)

Además, se propone una ecuación de resistencia total, donde suma ambas ecuaciones. Esta es:

$$R_{TOTAL} = 10 \times W(t) \times \left(\frac{f_R \left(\frac{kg}{t}\right)}{10} \right) \pm i \qquad \textbf{Ec. (9)}$$

Donde:

W: peso del vehículo [t]
fr: factor de resistencia a la rodadura [kg/t]
i: pendiente (%)

Existe un modelo que utiliza varios parámetros del suelo que afectan la resistencia a la rodadura. El estudio analiza como las propiedades superficiales de la carretera, principalmente macrotextura y desniveles tienen un gran efecto en la resistencia a la rodadura. Se utilizó un vehículo liviano y un vehículo pesado (HGV) (Karlsson, Hammarström, Sörensen, & Eriksson, 2011) .

Su formulación básica para calcular resistencia a la rodadura, incluyendo parámetros como macrotextura y desniveles es la siguiente:

$$RR = Fz * (Cr_{00} + Cr_{MPD} * MPD + Cr_{IRI} * IRI + Cr_{IRI_v} * IRI * v + Cr_{temp} * T) \quad \textbf{Ec. (10)}$$

Donde:

MPD: macrotextura
IRI: Índice internacional de rugosidad (debe ser mayor a 0,25 m/km)
RR: Resistencia a la rodadura que actúa sobre una rueda [N].
Fz: Fuerza normal que actúa sobre una rueda [N].
v: velocidad [m/seg].
T: temperatura del neumático [°C].
Cr_{00}: resistencia a la rodadura base.
Cr_{MPD}: resistencia adicional debido a la macrotextura.
Cr_{IRI}: resistencia adicional debido a la irregularidad.
Cr_{IRI_v}: resistencia adicional debido a la irregularidad combinado con la velocidad.
Cr_{temp}: resistencia adicional debido a la temperatura.

El MPD se define como “Mean Profile Depth” y consiste en el promedio de los máximos que se obtienen en las dos mitades de longitud base. Su longitud de onda está en el intervalo [0,001 – 0,1 m] para este modelo. La Figura 2.5 explica la definición de MPD. (Yacchirema, 2016)

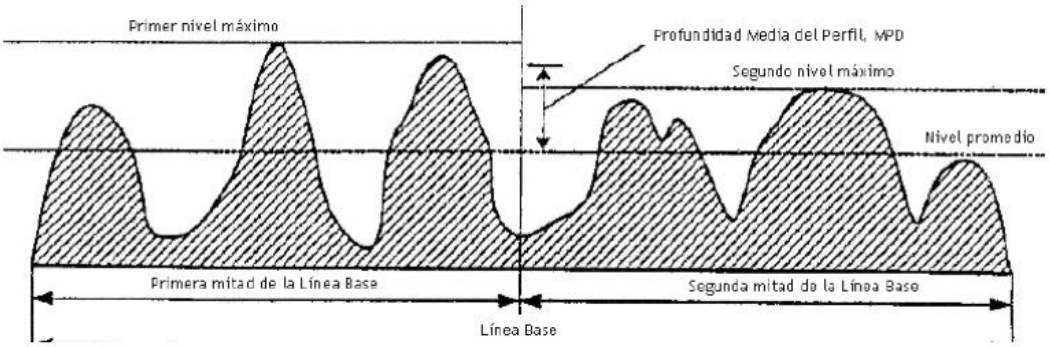

Figura 2.5.Definicion de la profundidad media de perfil, “MPD”. (Yacchirema, 2016)

La Figura 2.6 es un esquema de la ecuación 11, donde muestra todos los parámetros que afectan a la resistencia a la rodadura.

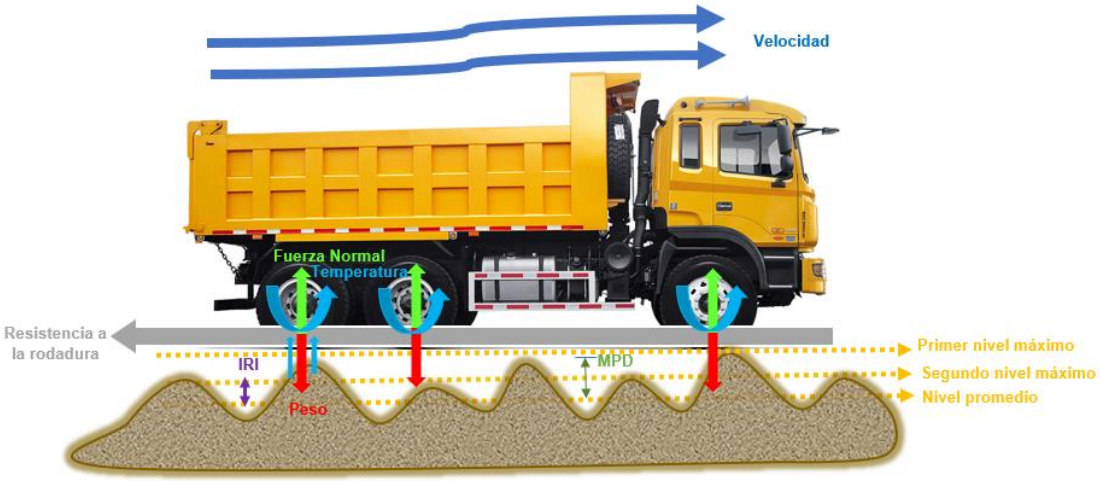

Figura 2.6.Esquema de ecuación 6. Modificado de (RutaTransporte, 2016)

“La resistencia a la rodadura es considerada como proporcional a la fuerza normal”. (Karlsson, Hammarström, Sörensen, & Eriksson, 2011). Se expresa en la siguiente fórmula:

$$RRC = \frac{RR}{F_z} \qquad \textbf{Ec. (11)}$$

Donde:

RRC: coeficiente de resistencia a la rodadura [adimensional].

RR: resistencia a la rodadura [N].

Fz: fuerza normal [kg].

La base para la estructuración del modelo de Karlsson, Hammarström, Sörensen, & Eriksson es la segunda ley de Newton. La fuerza total que actúa sobre el vehículo es la suma de la fuerza de gravedad y la fuerza de arrastre. La fuerza de arrastre consiste en resistencia a la rodadura, resistencia de aire, fuerza lateral y resistencia de transmisión, incluyendo perdidas en rodamientos. Se define la siguiente expresión: (Karlsson, Hammarström, Sörensen, & Eriksson, 2011)

$$-Me\dot{V} = F_{RR} + F_{air} + F_{side} + F_{trm} + F_{grav} \qquad \textbf{Ec. (12)}$$

Donde:

Me: masa de inercia.

$\dot{V}$: aceleración.

F_{RR}: resistencia a la rodadura.

F_{air}: resistencia del aire.

F_{side}: resistencia a las fuerzas laterales.

F_{trm}: resistencia a la trasmisión.

$F_{grav:}$ fuerza de gravitación.

La Figura 2.7 muestra un esquema de la ecuación 13, donde detalla las fuerzas y resistencias correspondientes.

Figura 2.7. Esquema de ecuación 13. Modificado de (Neumarket)

Para la resistencia a la rodadura se puede utilizar el siguiente modelo:

$$FRR = m \cdot g \cdot (Cr_{00} + Cr_{Tmp} \cdot T + Cr_{MPD} \cdot MPD + Cr_{IRI} \cdot IRI + Cr_{IRI_v} \cdot IRI \cdot (v - 20)) \quad \textbf{Ec. (13)}$$

Cr_{00}, Cr_{Tmp}, Cr_{MPD}, Cr_{IRI}, Cr_{IRI_V} son coeficientes constantes, en el capítulo 3 se darán a conocer rangos para estas constantes.

2.4 MODELO CONSUMO DE COMBUSTIBLE

La resistencia a la rodadura tiene un rol importante en el consumo de combustible, ya que disminuyendo esta resistencia el consumo de combustible disminuiría considerablemente.

Los autores Mammetti, Gallegos & Fixas realizaron un estudio para obtener un modelo que pueda estimar el consumo de combustible en función de la resistencia a la rodadura.

La resistencia a la rodadura se define como la energía consumida por un neumático por unidad de distancia recorrida y actúa en las condiciones de movimiento del vehículo, independiente de la velocidad, lo que afecta el par de torsión y en consecuencia el consumo de combustible. Una pequeña reducción en el consumo del combustible puede afectar considerablemente los costos por año debido al alto kilometraje de los camiones mineros. (Mammetti, Gallegos, & Frixas, 2013).

La Figura 2.8 muestra la división de la energía del combustible, donde se muestra que la resistencia a la rodadura solo afecta a una pequeña parte de la contribución total al consumo de combustible en términos absolutos.

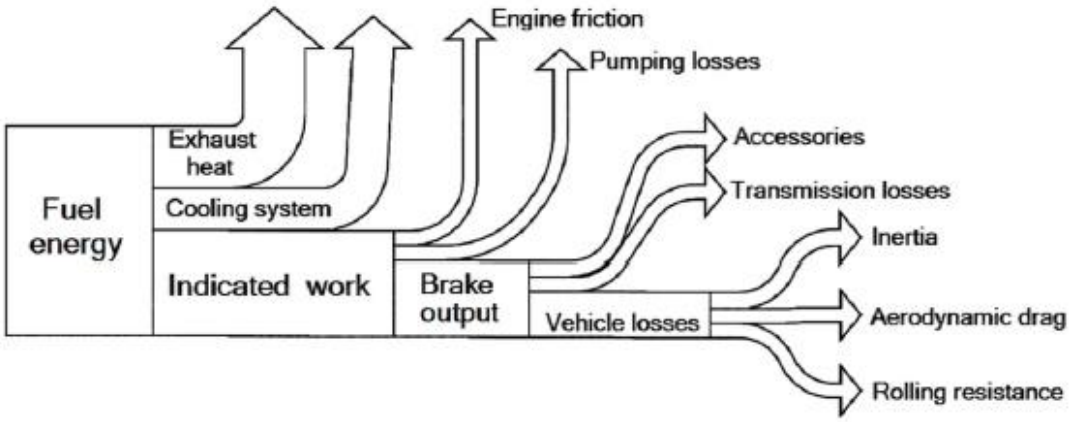

Figura 2.8. División de la energía del combustible. (Mammetti, Gallegos, & Frixas, 2013)

Para la formulación del modelo se planteó que el consumo del combustible se puede calcular a partir del combustible especifico y la potencia necesaria para acelerar el vehículo a una velocidad determinada e integrarlo por un ciclo de referencia, por lo tanto, la fórmula para consumo de combustible puede deducirse

de la fórmula de fuerza de equilibrio entre la fuerza motriz y la fuerza resistiva, como muestra la ecuación 24 (Mammetti, Gallegos, & Frixas, 2013):

$$M_{eng} * \frac{i_{tot}}{r} * \eta_{tr} = m * g * f * cos\gamma + cw * A * \frac{\rho}{2} * v^2 + m * g * \sin\gamma + k * m * a \qquad \textbf{Ec. (14)}$$

Donde:

Fuerza motriz aplicada a la huella del neumático:

- M_{eng}: esfuerzo de torsión motor [Nm].
- i_{tot}: relación de transmisión multiplicada por la relación de engranajes comprometidos.
- r: radio dinámico del neumático [m].
- η_{tr}: eficiencia total de transmisión [adimensional].

Fuerza de resistencia a la rodadura:

- m: masa del vehículo [t].
- g: aceleración gravitacional [m/s^2].
- f: coeficiente de resistencia a la rodadura [adimensional].

Resistencia aerodinámica:

- cw: coeficiente de arrastre [adimensional].
- A: área frontal [m^2].
- ρ: densidad del aire [kg/m^3].
- v: velocidad [km/h]

Resistencia a la pendiente:

- Ɣ: ángulo de inclinación [°]

El i_{tot} se expresa de la siguiente manera:

$$i_{tot} = i_g * i_{fd} \qquad \textbf{Ec. (15)}$$

Donde:

- i_g: transmisión final [adimensional].
- i_{fd}: engranajes comprometidos. [adimensional]

Fuerzas de inercias debido a la aceleración:

- a: aceleración [m/s^2].
- k: fuerza de inercia y se expresa de la siguiente manera:

$$k = 1 + \frac{J}{m * r^2} \qquad \textbf{Ec. (16)}$$

Donde:

- J: momento de inercia [t*m^2].
- m: masa del vehículo [t].
- r: radio del neumático [m].

Al multiplicar ambos lados de la ecuación por la velocidad se puede calcular la potencia y al conocer el consumo especifico de combustible, es posible calcular el consumo de combustible por la ecuación 27 (Mammetti, Gallegos, & Frixas, 2013):

$$B_e = \frac{\int_T b_e \frac{1}{\eta_{tr}} \left[(mgf \cos\gamma + c_w A \frac{\rho}{2} v^2) + m(g \sin\gamma + k * a) + B_r \right] * v * dt}{\int_T v * dt} \qquad \textbf{Ec. (17)}$$

Donde:

B_e: consumo por unidad de distancia [1/100km]

be: consumo de combustible especifico [g/kWh]

Br: resistencia de frenado [N]

Se puede tener una relación de la variación del consumo de combustible en función de la variación del coeficiente de resistencia a la rodadura:

$$\Delta B_e = \frac{\int_T \frac{1}{H_u * \eta_e} * \frac{1}{\eta_{tr}} * g * \cos\gamma * v * dt}{\int_T v * dt} * m\Delta f \qquad \textbf{Ec. (18)}$$

Donde:

H_u: valor calorífico especifico en función del combustible [KJ/kg].

η_e: eficiencia efectiva determinado por la velocidad del motor y el par de torsión necesario [adimensional].

Dentro de todos los estudios previos se ha llegado a conclusiones de que existe una gran variedad de modelos para calcular el coeficiente de resistencia a la rodadura y cada uno de ellos se enfocan en neumático, suelo o en la operación.

En Chile este estudio no tiene precedentes, debido a esto el enfoque principal de esta investigación encontrar un modelo para calcular el coeficiente de resistencia a la rodadura, y poder analizar el impacto que tiene en los costos de consumo de combustible.

A continuación en el capítulo 3 se detallará el desarrollo necesario para estimar el consumo de combustible en función de la resistencia a la rodadura.

3. DESARROLLO

Para este estudio se utilizará un modelo que se enfoque en controlar la resistencia a la rodadura a partir de las condiciones del suelo, considerando que es el enfoque principal de la investigación, por lo tanto, se eligió el modelo de Karlsson, Hammarström, Sörensen, & Eriksson.

Luego se procederá a calcular el consumo de combustible con el modelo de los autores Mammetti, Gallegos, & Frixas para demostrar la diferencia de costos que puede existir controlando la resistencia a la rodadura de caminos mineros.

La obtención de valores para el serán totalmente respaldos y los supuestos quedarán claramente expresados y respaldados.

3.1 FORMULACIÓN TEÓRICA

Primero se debe calcular el coeficiente de resistencia a la rodadura, este proceso se realizará con la siguiente ecuación:

$$RRC = \frac{RR}{F_z} \qquad \textbf{Ec. (19)}$$

Donde:

RRC: coeficiente de resistencia a la rodadura [adimensional]
RR: resistencia a la rodadura. [N]
Fz: fuerza normal que actúa sobre la rueda [N]

Para obtener el RRC se debe calcular antes el RR con la siguiente fórmula:

$$FRR = m \cdot g \cdot (Cr_{00} + Cr_{Tmp} \cdot T + Cr_{MPD} \cdot MPD + Cr_{IRI} \cdot IRI + Cr_{IRI_v} \cdot IRI \cdot (v - 20)$$ **Ec. (20)**

Luego se estimará el consumo de combustible para demostrar las diferencias de costos que existen si se disminuye o se aumenta dicho coeficiente.

La siguiente ecuación se usará para calcular el consumo de combustible:

$$B_e = \frac{\int_T b_e \frac{1}{\eta_{tr}} \left[(mgf \cos\gamma + c_w A \frac{\rho}{2} v^2) + m(g \sin\gamma + k * a) + B_r \right] * v * dt}{\int_T v * dt}$$ **Ec. (21)**

Desarrollando la integral, queda de la siguiente manera:

$$B_e = \frac{be}{\eta_{rt}} (\int_t mg \cos\gamma_i \, v_i + \int_t c_w \, A \frac{\rho}{2} \, v_i^2 \int_t mgsin\gamma_i v_i \, + \int_t mkav_i + \int_t B_r * v_i)$$ **Ec. (22)**

Finalmente se tiene:

$$B_e = \frac{be}{\eta_{rt}} (mgcos\gamma_i v_i t + c_w A \frac{\rho}{2} {v_i}^2 t + mgsin\gamma_i v_i t + mkav_i t + Brv_i t$$ **Ec. (23)**

3.2 PARÁMETROS DEL MODELO

La tabla 3.1 muestra los valores estimados para poder modelar resistencia a la rodadura con sus respectivas referencias:

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
Fz	210190	kg	(Komatsu, 2018)
Cr00	0,00431	-	(Karlsson, Hammarström, Sörensen, & Eriksson, 2011)
CrTemp	0,0000952	-	(Karlsson, Hammarström, Sörensen, & Eriksson, 2011)
T	25	°C	Temperatura ambiente
CrMPD	0,00101	-	(Karlsson, Hammarström, Sörensen, & Eriksson, 2011)
MPD	1,1	-	(Karlsson, Hammarström, Sörensen, & Eriksson, 2011)
CrIRI	0,00391	-	(Karlsson, Hammarström, Sörensen, & Eriksson, 2011)
IRI	15,5	m/km	(Manual de carretera, Volumen 8, 2018)
CrIRIv	0,0000249	-	(Karlsson, Hammarström, Sörensen, & Eriksson, 2011)
v	40	Km/h	Velocidad promedio

Tabla 3.1**.** Parámetros utilizados para calcular resistencia a la rodadura.

Para el consumo de combustible se utilizaron diversas masas, pendientes, resistencias de frenado, resistencias de rodadura y velocidades para ir realizando un análisis de sensibilidad del consumo de combustible, se detallan en la Tabla 3.2.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
be	0,213	g/kWh	(Kecojevic & Komljenovic, 2010)
η_{rt}	4,77	Adimensional	(Loainza & Rodriguez, 2013)
m	210,19 – 501,99	T	(Komatsu, 2018)
g	9,8	m/s^2	Aceleración de gravedad
v	10 – 20 – 30 – 40 – 50	Km/hr	Velocidades
ϒ	0 – 2– 4 – 6 – 8 – 10	°	Pendientes
Br	116,68 - 233,35 - 350,03 - 466,71 - 583,39	kN	Anexo A1
cw	0,66	Adimensional	(Mott, 2006)
A	121,83	m^2	(Komatsu, 2018)
k	1,64	m	Anexo A2
a	0,002	m/s^2	Anexo B1
f	0,02 – 0,04 – 0,06 – 0,08 – 0,1 – 0,12 – 0,14	Adimensional	Coef. de resistencia a la rodadura
J	12,3	$Ton*m^2$	Anexo A2
ρ	1,225	Kg/m^3	Densidad del aire normal

Tabla 3.2.Parámetros utilizados para calcular consumo de combustible.

3.3 VALORES REFERENCIALES

Se realizo un estudio donde muestran los valores de consumo de combustible más comunes para camiones, estos son:

Consumo de combustible (L/H)	Consumo de combustible (L/100km)	Potencia de camión (hp)
455	1.138	2.500
490	1.225	2.700
522	1.305	2.900
547	1.368	3.000
617	1.543	3.500
640	1.600	3.650

Tabla 3.3.Valores de consumo para camiones. (Recojevic & Komljenovic, 2010).

Para el caso de esta investigación se debe tener en cuenta que se ocupará un camión de 3.500 hp, por tanto, su consumo de combustible esta alrededor de 617 L/h para un camión de alto tonelaje.

En el capítulo 4 se detallarán todos los resultados del análisis de sensibilidad del consumo de combustible en función de la resistencia a la rodadura, masa, velocidad, resistencia de frenado, entre otros

4. RESULTADOS

En este capítulo se elegirá un aditivo adecuado para disminuir la resistencia a la rodadura y mostrarán todos los resultados obtenidos en el desarrollo considerando los parámetros determinados en el capítulo anterior, posteriormente se realizará un análisis de costos para realizar una comparación con la variación de la resistencia a la rodadura.

4.1 VARIACIÓN DE RESISTENCIA A LA RODADURA AL USAR ADITIVO.

Para el caso de una mina de alta cordillera que está ubicada en los límites de la región de Valparaíso y la región Metropolitana, a 3500 metros del nivel del mar. Su clima desde junio a septiembre es de invierno, en donde precipitan fuertes nevadas.

El camino hacia la mina se realiza recorriendo aproximadamente 16 kilómetros, en donde se tiene un camino pavimentado, luego está ruta es un camino de tierra debidamente construido y estabilizado.

El camino hacia la mina es principalmente de ripio y tierra, por lo tanto, nos encontramos con tipo de suelo granular y arenoso. Existen diferentes tipos de aditivos. En el anexo C1 se encuentra un resumen de aditivos con sus principales características. (Bozo, 2016). Además, en el anexo C2 se encontrará una guía para seleccionar un aditivo estabilizante.

A continuación, la tabla 4.1 muestra los límites de consistencias que existen en Chile. (Manual de carretera, Volumen 8, 2018).

	Limite Liquido	Índice de plasticidad
Subbase	Máx. 35	Máx. 8
Base estabilizadora	Máx. 35	Máx. 6
Capa de rodadura		
- Regiones I a III	Máx. 35	5 – 10
- Regiones IV a VI	Máx. 35	4 – 9
- Regiones VII a X	Máx. 35	3 – 8
- Regiones XI a XII	Máx. 35	Máx. 7

Tabla 4.1. Límites de consistencias o de Atterberg. (Manual de carretera, Volumen 8, 2018)

En el caso de la mina, que está ubicada en la V región, se toma un límite liquido de 35 y un índice de plasticidad entre 4 y 9.

Las estabilizaciones se clasifican en 2 tipos, estos son:

- Mecánica:
  - Compactación
- Química:
  - Cementantes
  - Químicos
  - Sales
  - Asfálticos
  - Mezcla de suelos.

Para el caso de una mina de alta cordillera, como se desea mejorar la capa de rodadura, según la Tabla C1 convendría usar un aditivo químico, en la subcategoría de sales, debido a que, es capaz de mejorar la capa de rodadura, controlando deformaciones. Además, se sabe que el camino se compone de gravilla y arena, por tanto, su clasificación correspondería a GW y SW. Según la Tabla C2 debido al tipo de suelo e índice de plasticidad menor a 10 sería más acorde un aditivo bituminoso.

Al mejorar la capa de rodadura, controlando las deformaciones, esto disminuiría la resistencia al rodamiento, lo que a su vez produciría una baja en el consumo de combustible.

4.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y LA INFLUENCIA RELATIVA DE RESISTENCIA AL RODAMIENTO.

Se realizó un análisis de sensibilidad al consumo de combustible para observar la variación que tiene con los parámetros pendiente, velocidad, masa y resistencia de frenado con diferentes coeficientes de resistencia a la rodadura. En todos los análisis siguientes se tomó una variación de coeficiente de resistencia al rodamiento de un 14% a un 2%.

1. *Variación de consumo de combustible dependiendo de la velocidad y coeficiente de resistencia a la rodadura:*

Para este análisis se consideró pendiente 0° y un camión sin carga. Se dio énfasis en estudiar cómo cambia el consumo de combustible con las diferentes velocidades y coeficientes de resistencia a la rodadura. Las velocidades que se usaron son 10, 20, 30, 40 y 50 km/h. El consumo de combustible dependiendo de la velocidad y resistencia al rodamiento se presenta en la Tabla 4.2.

		COEFICIENTE DE RESISTENCIA A LA RODADURA (ADIMENSIONAL)						
		0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14
VELOCIDAD (KM/H)	10	40,58	58,98	77,38	95,77	114,17	132,57	150,96
	20	81,17	117,96	154,75	191,55	228,34	265,13	301,92
	30	121,75	176,94	232,13	287,32	342,51	397,70	452,89
	40	162,34	235,92	309,51	383,09	456,68	530,26	603,85
	50	202,92	294,91	386,89	478,87	570,85	662,83	754,81
		CONSUMO DE COMUSTIBLE L/100KM						

Tabla 4.2.Consumo de combustible vs velocidad y resistencia a la rodadura.

Se realizó a partir de la Tabla 4.2 un gráfico para ilustrar el comportamiento del consumo de combustible, variando velocidad y resistencia al rodamiento, se consideró velocidad en el eje y, resistencia a la rodadura en el eje x y consumo

de combustible en el eje z. El gráfico se realizó en el software Matlab y se muestra en la Figura 4.1

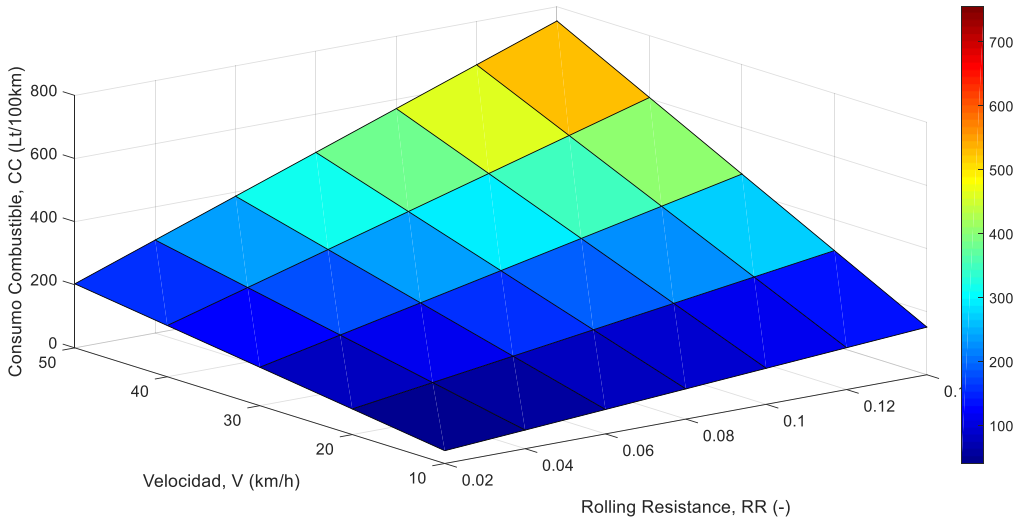

Figura 4.1. Consumo de combustible con la variación de coeficiente de resistencia a la rodadura y velocidad.

Como se aprecia en la Figura 4.1 si la velocidad aumenta a 50 km/h y el coeficiente de resistencia a la rodadura aumenta a un 14%, el consumo de combustible alcanza a 754,81 lt/100km. El ahorro de combustible si se disminuye el coeficiente de resistencia al rodamiento de un 14% a un 2% es de 551,89 lt/100km, lo que corresponde a un 73 % de ahorro en el consumo de combustible.

2. *Variación de consumo de combustible dependiendo de la masa y coeficiente de resistencia a la rodadura:*

Se consideró un camión con el peso sin carga, lo que equivale a 210,19 toneladas y otro con carga, con un peso igual a 502 toneladas. Se fijo una velocidad de 40 km/h y pendiente 0°. El consumo de combustible dependiendo de la masa y del coeficiente de resistencia a la rodadura se muestra en la Tabla 4.3:

		0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14
MASA (T)	210,2	162,34	235,92	309,51	383,09	456,68	530,26	603,85
	502	265,54	441,28	617,02	792,76	968,50	1.144,24	1.319,98
		CONSUMO DE COMBUSTIBLE (L/100KM)						

Tabla 4.3.Consumo de combustible vs masa y resistencia a la rodadura.

Se realizó a partir de la Tabla 4.3 un gráfico para ilustrar el comportamiento del consumo de combustible, variando masa de un camión cargado, otro sin carga y resistencia al rodamiento. Se consideró masa en el eje y, resistencia a la rodadura en el eje x y consumo de combustible en el eje z. El gráfico se realizó en el software Matlab y se muestra en la Figura 4.2

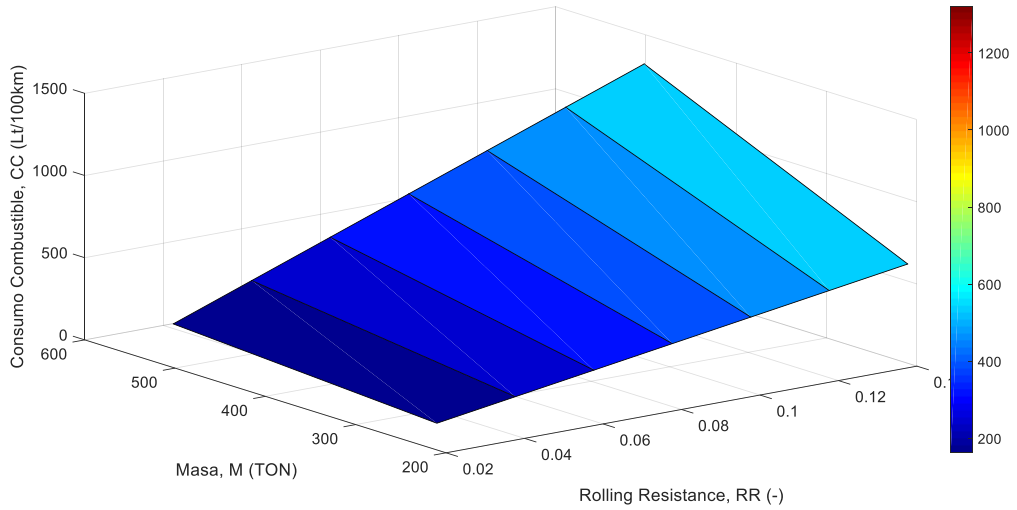

Figura 4.2. Consumo de combustible con la variación de coeficiente de resistencia a la rodadura y masa.

Se puede observar de la Figura 4.2 que, al aumentar la masa y la resistencia al rodamiento, el consumo de combustible llega a 2.149 lt/100km, para un camión sin carga y a 6.425 para un camión con carga. El ahorro de combustible si se disminuye la resistencia al rodamiento con un camión sin carga es de 441,51

lt/100km, lo que equivale a un 73% y el ahorro de un camión con carga es de 1.054,44 lt/100km, lo que corresponde a un 80% en ahorro de combustible.

3. *Variación de consumo de combustible dependiendo de la pendiente y coeficiente de resistencia a la rodadura de un camión sin carga:*

El tercer análisis se realizó variando la pendiente de 0% hasta 10% con el peso de un camión sin carga, se consideró una velocidad fija de 40 km/h. El consumo de combustible dependiendo de la pendiente y del coeficiente de resistencia al rodamiento se presenta en la Tabla 4.4

		COEFICIENTE DE RESISTENCIA A LA RODADURA (ADIMENSIONAL)						
		0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14
PENDIENTE (%)	0	162,34	235,92	309,51	383,09	456,68	530,26	603,85
	2	290,67	364,21	437,75	511,29	584,83	658,37	731,91
	4	418,60	492,01	565,42	638,82	712,23	785,63	859,04
	6	545,82	619,01	692,19	765,37	838,56	911,74	984,92
	8	672,03	744,90	817,78	890,65	963,52	1.036,40	1.109,27
	10	796,92	869,40	941,88	1.014,36	1.086,84	1.159,31	1.231,79
		CONSUMO DE COMBUSTIBLE L/100KM						

Tabla 4.4.Consumo de combustible vs pendiente y resistencia a la rodadura de un camión sin carga.

Se realizó a partir de la Tabla 4.4 un gráfico para ilustrar el comportamiento del consumo de combustible, variando la pendiente de un camión sin carga y resistencia al rodamiento. Se consideró pendiente en el eje y, resistencia a la rodadura en el eje x y consumo de combustible en el eje z. El gráfico se realizó en el software Matlab y se muestra en la Figura 4.3

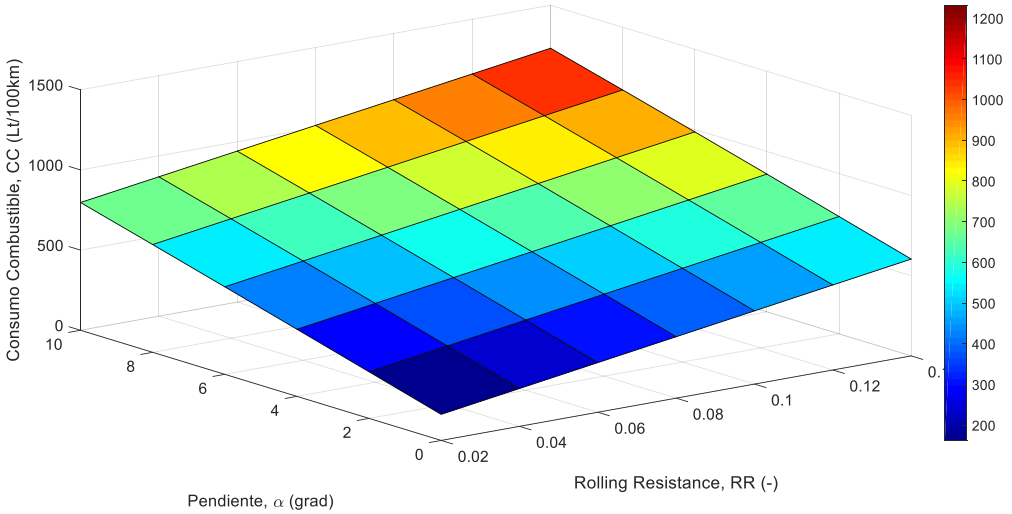

Figura 4.3. Consumo de combustible con la variación de coeficiente de resistencia a la rodadura y pendiente con masa de camión vacío.

Como se puede contemplar en la Figura 4.3 al tener una pendiente de 10% con una resistencia al rodamiento de 14% alcanza un consumo de combustible de 1.231,79 lt/100km. El ahorro de combustible que se tiene al disminuir la resistencia al rodamiento de un 14% a un 2% es de 434,87 lt/100km, lo que equivale a 35% de reducción en el consumo de combustible al tener una pendiente de 10%. Al tener una pendiente de 2% se tiene un ahorro de consumo de combustible de un 60%.

4. *Variación de consumo de combustible dependiendo de la pendiente y coeficiente de resistencia a la rodadura de un camión con carga:*

Se realizó con pendientes de 0% a 10% con la masa de un camión con carga, se consideró una velocidad fija de 40 km/h. El consumo de combustible dependiendo de la resistencia al rodamiento y de la pendiente de un camión con carga se muestra en la Tabla 4.5.

		COEFICIENTE DE RESISTENCIA A LA RODADURA (ADIMENSIONAL)						
		0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14
PENDIENTE (%)	0	265,54	441,28	617,02	792,76	968,50	1.144,24	1.319,98
	2	572,03	747,66	923,30	1.098,93	1.274,57	1.450,20	1.625,83
	4	877,57	1.052,88	1.228,19	1.403,51	1.578,82	1.754,13	1.929,45
	6	1.181,40	1.356,18	1.530,96	1.705,75	1.880,53	2.055,31	2.230,09
	8	1.482,81	1.656,85	1.830,90	2.004,94	2.178,98	2.353,02	2.527,06
	10	1.781,09	1.954,19	2.127,29	2.300,38	2.473,48	2.646,58	2.819,68
		CONSUMO DE COMBUSTIBLE (L/100KM)						

Tabla 4.5.Consumo de combustible vs pendiente y resistencia a la rodadura de un camión con carga.

Se realizó a partir de la Tabla 4.5 un gráfico para ilustrar el comportamiento del consumo de combustible, variando la pendiente de un camión sin carga y resistencia al rodamiento. Se consideró pendiente en el eje y, resistencia a la rodadura en el eje x y consumo de combustible en el eje z. El gráfico se realizó en el software Matlab y se muestra en la Figura 4.4

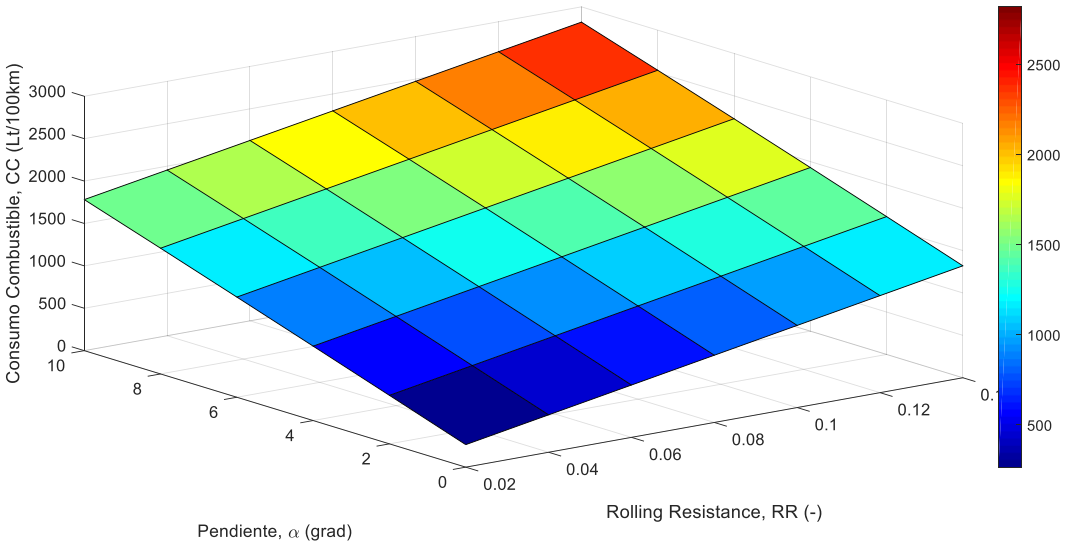

Figura 4.4. Consumo de combustible con la variación de coeficiente de resistencia a la rodadura y pendiente de un camión cargado.

Al tener un coeficiente de resistencia al rodamiento de 14% y una pendiente de 10% de un camión cargado, el consumo de combustible llega a 2.819,68 lt/100km, debido a la masa el consumo sube considerablemente comparándolo con un camión vacío. El ahorro al disminuir la resistencia de rodamiento de un 14% a un 2% es de 1.038,59 lt/100km, lo que corresponde a un 37% de reducción en el consumo de combustible. Al tener una pendiente de 2% el ahorro es de un 65% en el consumo de combustible.

5. *Variación de consumo de combustible dependiendo de la resistencia de frenado y coeficiente de resistencia a la rodadura:*

Finalmente se realizó un análisis de sensibilidad del consumo de combustible con los valores de resistencia de frenado de 116,68 kN, 233,35 kN, 250,03 kN, 466,71 kN y 583,39 kN con velocidades de 10, 20, 30, 40 y 50 km/h respectivamente. El consumo de combustible dependiendo de la resistencia al rodamiento y de la resistencia de frenado se muestra en la Tabla 4.6

		RESISTENCIA A LA RODADURA (ADIMENSIONAL)						
		0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14
RESISTENCIA DE FRENADO (KN)	116,7	119,37	164,18	208,99	253,80	298,62	343,43	388,24
	233,35	342,94	432,56	522,18	611,81	701,43	791,05	880,67
	350,03	670,72	805,15	939,58	1.074,02	1.208,45	1.342,89	1.477,32
	466,71	1.102,70	1.281,94	1.461,19	1.640,43	1.819,68	1.998,92	2.178,17
	583,39	1.638,88	1.862,94	2.087,00	2.311,05	2.535,11	2.759,17	2.983,22
		CONSUMO DE COMBUSTIBLE (L/100KM)						

Tabla 4.6.Consumo de combustible vs resistencia de frenado y resistencia a la rodadura de un camión con carga.

Se realizó a partir de la Tabla 4.6 un gráfico para ilustrar el comportamiento del consumo de combustible, variando la pendiente de un camión sin carga y resistencia al rodamiento. Se consideró resistencia de frenado en el eje y, resistencia a la rodadura en el eje x y consumo de combustible en el eje z. El gráfico se realizó en el software Matlab y se muestra en la Figura 4.5.

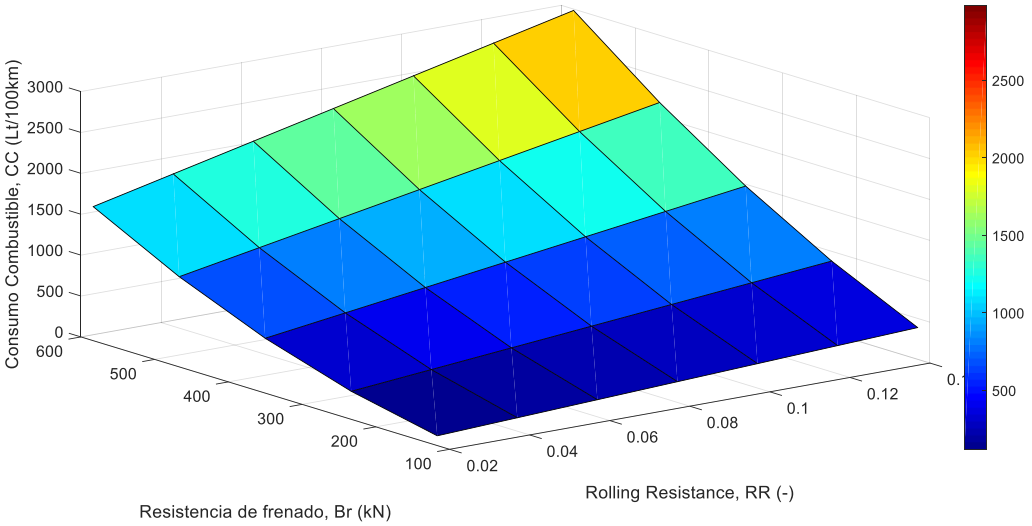

Figura 4.5. Consumo de combustible con la variación de coeficiente de resistencia a la rodadura y resistencia de frenado de un camión sin carga.

Como se muestra en la Figura 4.5 con un coeficiente de 14% y una resistencia de frenado de 583,39 kN el consumo de combustible alcanza a 2.983,22 lt/100km y al disminuir la resistencia a 2% se llega a un consumo de combustible de 1.638,88 lt/100km. El ahorro total si se disminuye la resistencia a la rodadura de un 14% a un 2% es de 1.344 lt/100km, lo que equivale a un 45% en consumo de combustible. Al tener una resistencia de frenado de 116,7 kN se tiene un ahorro de un 69% en el consumo de combustible.

4.3 ANÁLISIS DE COSTOS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN FUNCIÓN DE RESISTENCIA A LA RODADURA

Se realizó una estimación de costos del consumo de combustible en función de la resistencia a la rodadura. Se debe tener en cuenta que se realizó que se realizó con un camión que utiliza combustible Diesel, el precio utilizado es de $690 CLP y se calculó para un horario de trabajo de 24 horas diarias y 7 días a la semana.

1. *Variación de costos del consumo de combustible en función de resistencia a la rodadura y velocidad.*

Se utilizaron velocidades de 10, 20, 30,40, 50 km/h y una resistencia de rodadura desde 2% al 14%.

		COEFICIENTE DE RESISTENCIA A LA RODADURA (ADIMENSIONAL)						
		2%	4%	6%	8%	10%	12%	14%
VELOCIDAD (KM/H)	10 KM/H	$2.083.461	$3.027.851	$3.972.241	$4.916.631	$5.861.021	$6.805.411	$7.749.801
	20 KM/H	$8.333.844	$12.111.404	$15.888.964	$19.666.524	$23.444.084	$27.221.644	$30.999.204
	30 KM/H	$18.751.150	$27.250.660	$35.750.170	$44.249.680	$52.749.190	$61.248.699	$69.748.209
	40 KM/H	$33.335.378	$48.445.618	$63.555.857	$78.666.097	$93.776.337	$108.886.577	$123.996.816
	50 KM/H	$52.086.528	$75.696.278	$99.306.027	$122.915.777	$146.525.526	$170.135.276	$193.745.026
		COSTOS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE (CLP)						

Tabla 4.7.Costos de consumo de combustible vs velocidad y resistencia a la rodadura de un camión.

Además, se realizó un gráfico de barras para ilustrar la Tabla 4.7 donde se muestra en la Figura 4.6.

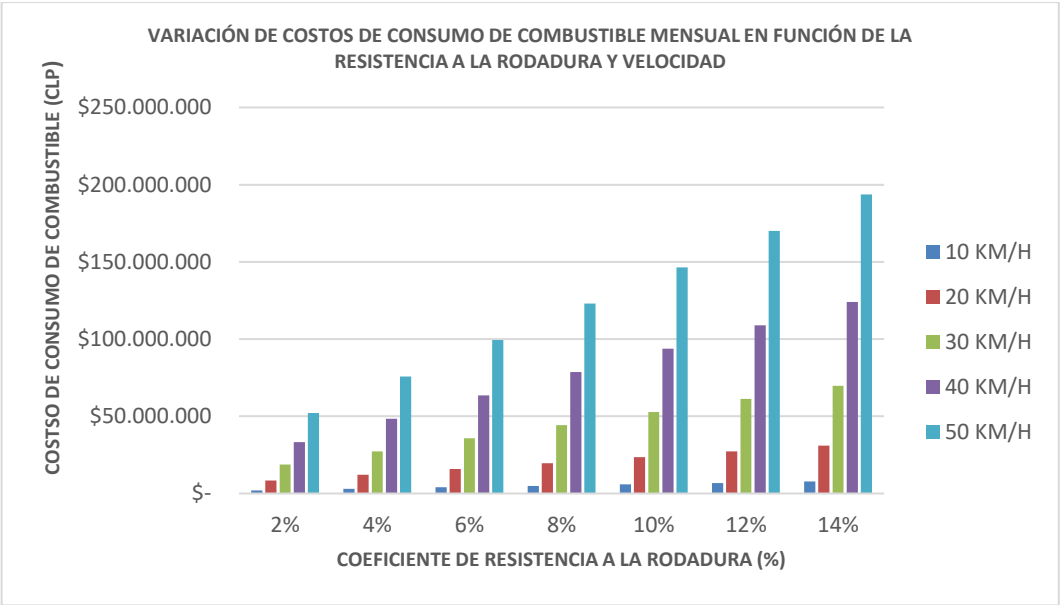

Figura 4.6. Variación de costos en función del coeficiente velocidad y el coeficiente de resistencia a la rodadura de un camión.

Como se puede observar en la Figura 4.6 a medida que aumenta la velocidad y la resistencia al rodamiento los costos se elevan. Se puede estimar que disminuyendo la resistencia al rodamiento de un 14% a un 2% hay una diferencia de un $141.658.498 CLP a una velocidad de 50km/h, lo que equivale a un 73% de ahorro en los costos de consumo de combustible.

2. *Variación de costos de consumo de combustible en función de resistencia a la rodadura y masa.*

Se realizó una estimación de costos en consumo de combustible de un camión cargado y sin cargar, con diferentes resistencias a la rodadura que varían de un 2% a un 14%. Se debe tener en cuenta que para este ítem se consideró una pendiente de 0°. Los costos son mensuales, considerando 24 horas diarias de trabajo y 7 días a la semana. Todos los resultados se muestran en la Tabla 4.8.

		COEFICIENTE DE RESISTENCIA A LA RODADURA (%)						
		2%	4%	6%	8%	10%	12%	14%
MASA (T)	210 T	$33.335.378	$48.445.618	$63.555.857	$78.666.097	$93.776.337	$108.886.577	$123.996.816
	502 T	$54.526.488	$90.613.787	$126.701.085	$162.788.383	$198.875.682	$234.962.980	$271.050.279
		COSTOS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE ($)						

Tabla 4.8.Costos de consumo de combustible en función de la masa y resistencia a la rodadura de un camión.

Se realizó una ilustración para la Tabla 4.8 donde se muestran los costos mensuales del consumo de combustible de un camión de alto tonelaje en función de resistencia a la rodadura y masa.

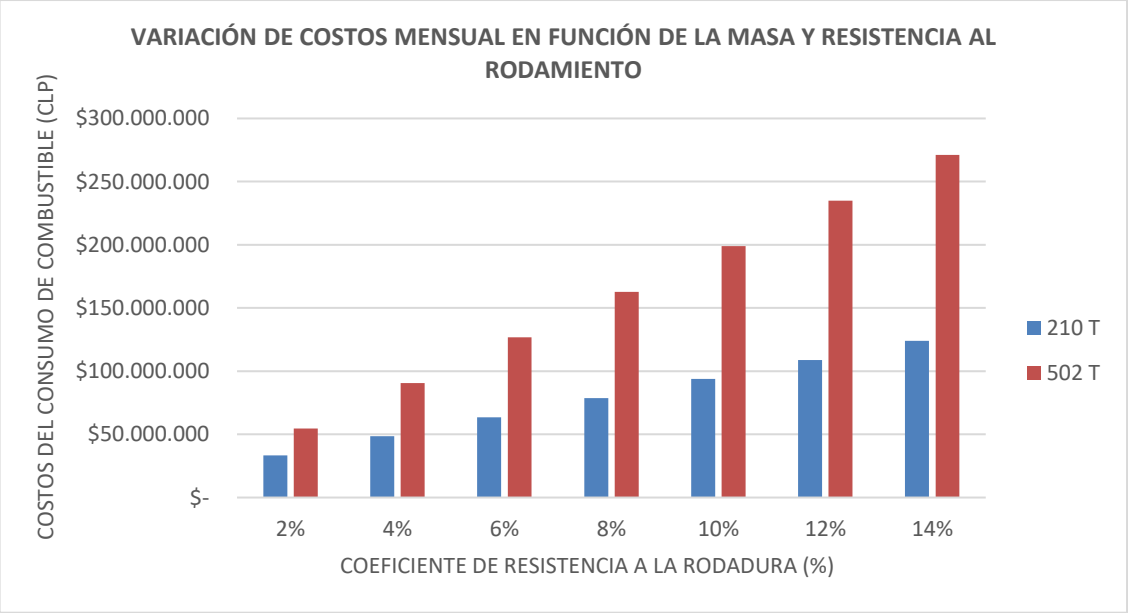

Figura 4.7. Variación de costos en función de coeficiente del coeficiente de resistencia a la rodadura y masa de un camión.

Como se puede observar en la Figura 4.7 depende mucho de si el camión está cargado o no, ya que, como observamos al tener mayor masa y coeficiente de rodadura los costos aumentan considerablemente. Al analizar los resultados obtenemos una diferencia de $90.661.438 CLP para un camión sin carga, lo que equivale a un 73% de ahorro en costo de combustible y para un camión cargado

se obtiene una diferencia $216.523.790 CLP, lo que equivale a un 80% de ahorro en combustible.

3. *Variación de costos del consumo de combustible en función de la resistencia a la rodadura y pendiente de un camión sin carga.*

Se consideraron pendientes de 0% hasta 10%, además de resistencia a la rodadura de 2% a 14% de un camión sin carga. La Tabla 4.9 muestra los costos del consumo de combustible mensual de un camión de alto tonelaje sin cargar.

		COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL RODAMIENTO (%)						
		2%	4%	6%	8%	10%	12%	14%
PENDIENTE (%)	0%	$33.335.378	$48.445.618	$63.555.857	$78.666.097	$93.776.337	$108.886.577	$123.996.816
	2%	$59.687.813	$74.788.852	$89.889.890	$104.990.929	$120.091.968	$135.193.007	$150.294.045
	4%	$85.957.752	$101.031.243	$116.104.735	$131.178.227	$146.251.718	$161.325.210	$176.398.702
	6%	$112.081.678	$127.109.444	$142.137.211	$157.164.977	$172.192.743	$187.220.509	$202.248.275
	8%	$137.997.118	$152.961.257	$167.925.397	$182.889.536	$197.853.676	$212.817.815	$227.781.955
	10%	$163.643.081	$178.526.078	$193.409.075	$208.292.072	$223.175.069	$238.058.066	$252.941.063
		COSTOS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE ($)						

Tabla 4.9.Costos de consumo de combustible en función de la pendiente y resistencia a la rodadura de un camión sin carga.

Se realizó una ilustración de la Tabla 4.9 para mostrar las variaciones que existen de los costos de consumo de combustible en función de la pendiente y la resistencia al rodamiento.

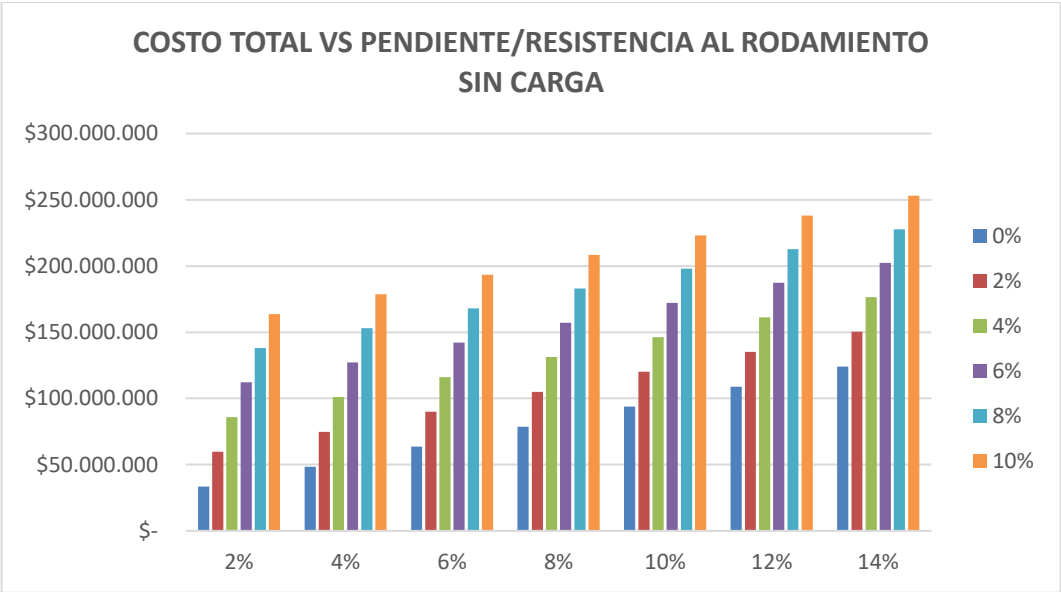

Figura 4.8. Variación de costos del consumo de combustible en función del coeficiente de resistencia a la rodadura y pendiente de un camión sin carga.

La Figura 4.8 muestra que, al tener una mayor pendiente y coeficiente de resistencia al rodamiento, los costos van creciendo. Estimando el ahorro que se obtiene disminuyendo la resistencia al rodamiento de un 14% a un 2% a una pendiente de 10° es de $89.297.981, lo que equivale a un 35% de ahorro en los costos de combustible, no obstante, al tener una pendiente de 2° se obtiene un ahorro de un 60%. Por lo tanto, la pendiente puede influir bastante en el ahorro de combustible, ya que existe una gran diferencia si se tiene una pendiente de 10° o una de 2°.

4. *Variación de costos del consumo de combustible en función de resistencia al rodamiento y pendiente de un camión cargado.*

Se consideraron pendientes de 0° hasta 10°, además de resistencia a la rodadura de 2% a 14% de un camión con carga. La Tabla 4.9 muestra los costos del consumo de combustible mensual de un camión de alto tonelaje con carga.

		COEFICIENTE DE RESISTENCIA A LA RODADURA (%)						
		2%	4%	6%	8%	10%	12%	14%
PENDIENTE (%)	0%	$54.526.488	$90.613.787	$126.701.085	$162.788.383	$198.875.682	$234.962.980	$271.050.279
	2%	$117.463.159	$153.528.483	$189.593.807	$225.659.131	$261.724.455	$297.789.779	$333.855.103
	4%	$180.202.806	$216.202.340	$252.201.875	$288.201.409	$324.200.943	$360.200.477	$396.200.011
	6%	$242.593.738	$278.484.068	$314.374.397	$350.264.726	$386.155.056	$422.045.385	$457.935.714
	8%	$304.486.747	$340.225.119	$375.963.491	$411.701.863	$447.440.235	$483.178.607	$518.916.979
	10%	$365.736.175	$401.280.756	$436.825.338	$472.369.919	$507.914.501	$543.459.083	$579.003.664
		COSTOS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE ($)						

Tabla 4.10.Costos de consumo de combustible en función de la pendiente y resistencia a la rodadura de un camión con carga.

Se realizó una ilustración de la Tabla 4.10 para mostrar las variaciones que existen de los costos de consumo de combustible en función de la pendiente y la resistencia al rodamiento.

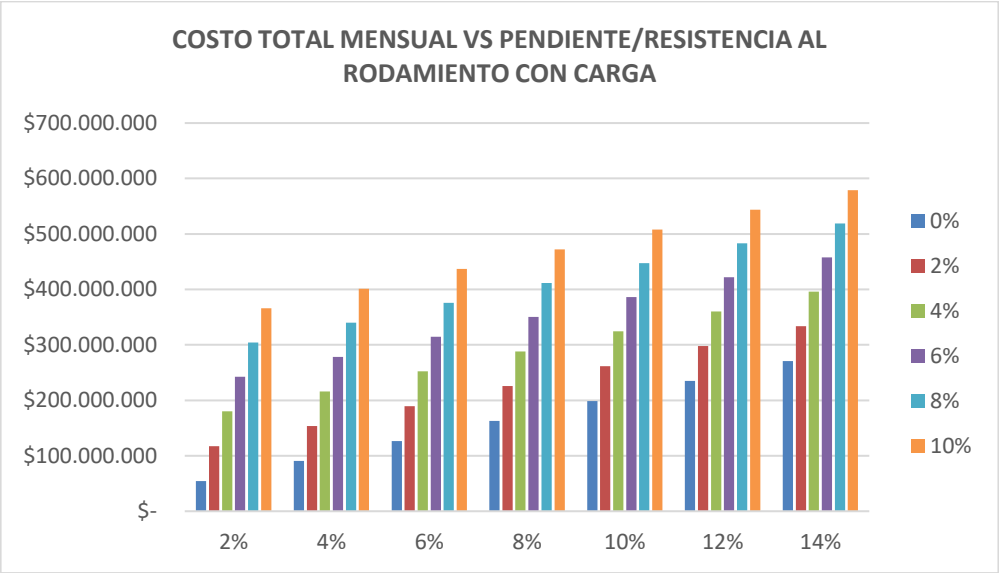

Figura 4.9. Variación de costos del consumo de combustible en función de coeficiente de resistencia a la rodadura y pendiente de un camión con carga.

Como se puede observar en la Figura 4.9 al disminuir la resistencia al rodamiento de un 14% a un 2% se obtiene un ahorro de un 37% con una pendiente de 10% y con una pendiente de 2% se obtiene un ahorro de 65%. Los costos cambian bastante con la pendiente que tenga el camino a la minera.

5. *Variación de costos de consumo de combustible en función de resistencia a la rodadura y resistencia de frenado.*

Se realizó una ilustración de la Tabla 4.11 para mostrar las variaciones que existen de los costos de consumo de combustible en función de la resistencia de frenado y la resistencia al rodamiento.

		COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL RODAMIENTO (ADIMENSIONAL)						
		2%	4%	6%	8%	10%	12%	14%
RESISTENCIA DE FRENADO (kN)	116,7	$19.032.501	$22.810.061	$26.587.621	$30.365.181	$34.142.741	$37.920.301	$41.697.861
	233,4	$59.461.508	$67.016.628	$74.571.747	$82.126.867	$89.681.987	$97.237.107	$104.792.227
	350,0	$121.289.001	$132.621.681	$143.954.361	$155.287.040	$166.619.720	$177.952.400	$189.285.080
	466,7	$204.514.321	$219.624.560	$234.734.800	$249.845.040	$264.955.280	$280.065.519	$295.175.759
	583,4	$309.137.467	$328.025.266	$346.913.066	$365.800.866	$384.688.665	$403.576.465	$422.464.265
		COSTOS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE MENSUAL ($)						

Tabla 4.11.Costos de consumo de combustible en función de la resistencia de frenado y resistencia a la rodadura de un camión con carga.

Se realizó una ilustración de la Tabla 4.11 para mostrar las variaciones que existen de los costos de consumo de combustible en función de la pendiente y la resistencia al rodamiento, se muestra en la Figura 4.10

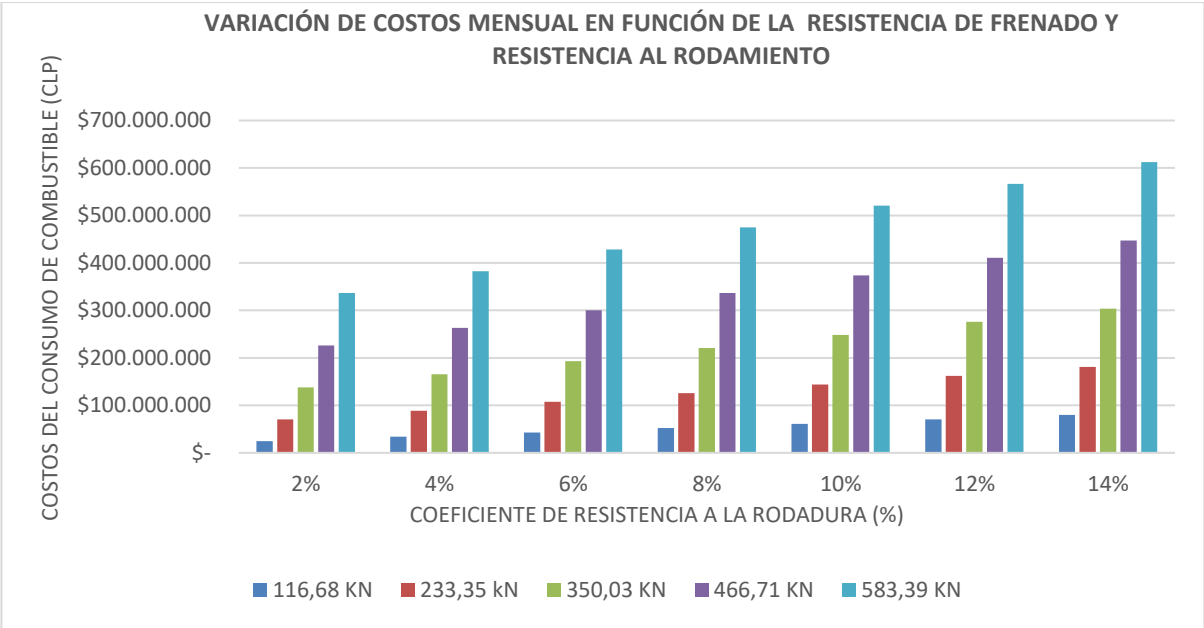

Figura 4.10. Variación de costos del consumo de combustible en función de coeficiente de resistencia a la rodadura y resistencia de frenado de un camión.

Como se muestra en la Figura 4.10 se puede observar que al disminuir la resistencia a la rodadura de un 14% a un 2% con una resistencia de frenado de 583,39 kN se obtiene un ahorro de un 27% y con una resistencia de frenado de 116,68 kN se tiene un ahorro de un 54,% en los costos de consumo de combustible.

5. CONCLUSIONES

En Chile se conoce poco el concepto de resistencia a la rodadura y no se conocen los beneficios que trae controlar esta resistencia, especialmente en el ámbito minero. En otros lugares del mundo se realizaron estudios para analizar las ventajas que se tiene al disminuir la resistencia al rodamiento, algunas de sus ventajas son: reducción en los costos de consumo de combustible, mantención de caminos y neumáticos, entre otros. Al saber que disminuir la resistencia a la rodadura trae beneficios surgió un interés para estudiar en Chile como afectaría esta resistencia en los costos del consumo de combustible.

Para esta investigación se buscaron varias referencias para poder calcular la resistencia al rodamiento. Se escogió un modelo apropiado para calcular resistencia a la rodadura en donde influían especialmente parámetros del suelo, que es por donde se busca atacar esta resistencia.

Para estimar los costos de consumo de combustible se supusieron valores referenciales de coeficiente de resistencia al rodamiento que van desde un 14% a un 2% y además se realizaron variando parámetros como: velocidad, masa, resistencia de frenado y pendiente.

Con el análisis de sensibilidad realizado se obtuvo que disminuyendo la resistencia a la rodadura de un 14% a un 2% los costos van disminuyendo según las condiciones que tenga el suelo y el vehículo. Teniendo diferentes velocidades los costos disminuyen en un 73%, no obstante, para un camión cargado a una velocidad de 40km/h los costos disminuyen en un 80% y para un camión sin carga disminuyen en un 73%.

Si se tienen pendientes en los caminos los costos varían bastante si la pendiente es de 10% o de 2%, para un pendiente de 10% se tiene un ahorro en los costos de consumo de combustible para un camión sin carga de un 35% y para una pendiente

de 2% se tiene un ahorro de un 60%. Para una pendiente de 10% con un camión cargado se obtuvo un ahorro en el costo del combustible de 37% y para una pendiente de 2% con un camión con carga es de 65%, por lo tanto, la pendiente juega un rol importante si se requiere disminuir los costos de consumo de combustible, ya que, al tener mayor pendiente este gasta más combustible, debido a esto se requiere que los caminos tengan menor pendiente posible.

Para la resistencia de frenado se obtuvo un ahorro en combustible de un 45% si se utiliza una resistencia de frenado de 558,39 kN, pero al utilizar una resistencia de frenado de 116,68 kN se obtiene un ahorro de 69%, por lo tanto, las veces que el camión frene influye bastante en los costos de consumo de combustible.

En conclusión, si se disminuye la resistencia a la rodadura de un 14% a un 2% se obtienen grandes ahorros en los costos de consumo de combustible, pero estos varían dependiendo de las condiciones que tenga el camino y el camión, pero aun así controlando la resistencia al rodamiento se tendría un ahorro bastante importante para las mineras. Por último, para disminuir la rodadura de una ruta minera se debe trabajar con un estabilizante químico, en la subcategoría de las sales, se estima que con ese estabilizante se puede disminuir la resistencia a la rodadura desde un 8% a un 2% aproximadamente.

5.1 TRABAJO FUTURO

Se apunta a realizar las pruebas correspondientes para obtener los parámetros necesarios para una correcta estimación de la resistencia de rodadura, con las características del suelo correspondiente a la zona que se quiere mejorar para disminuir el coeficiente, realizando pruebas de laboratorio al suelo.

En esta investigación se realizó un estudio preliminar para comprobar que la resistencia a la rodadura tiene beneficios en los costos para el ámbito minero por lo tanto se tomaron datos dentro de un rango, pero para trabajos futuros se

requiere tener los parámetros más adecuados para calcular exactamente la resistencia a la rodadura.

Para trabajos futuros se aconseja realizar estudios más profundos en el tema y llevarlos no solo a costos en consumo de combustible, si no, en todos los beneficios que este concepto tiene como: el mantenimiento de carreteras y neumáticos. Tener los costos asociados a esos mantenimientos le traerá más valor al estudio y se podrá tener un total en la reducción de costos que se obtiene reduciendo la resistencia a la rodadura en las condiciones del suelo.

Se propone realizar pruebas en caminos hacia mineras, en donde se consideren las condiciones reales que tiene la ruta y los parámetros de operación. Por último, proponer un producto que logre realizar este fenómeno de reducir en las características del suelo la resistencia al rodamiento.

BIBLIOGRAFÍA.

Bozo, N. (2016). *Caracterización del comportamiento mecánico de suelos con una emulsión asfáltica. Santiago: Universidad San Sebastián.*

Cavada, D. (2016). *Evalucación econónima del control de polución y reconstrucción de carpeta de rodados en camino industrial Los Bronces con supresor de polvo.* Santiago: Universidad de Chile.

Chalmer University of technology . (2014). *Type modelling for rolling resistance .* Obtenido de http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/200040/200040.pdf

Cherné, J., & Gonzaléz, J. (2010). *Movimientos de Tierra*. Obtenido de https://grupos.unican.es/gidai/web/asignaturas/ci/mmt.pdf

Comision nacional de energía . (28 de diciembre de 2018). *Sistema de informacion en línea de precios de combustible en estaciones de servicio*. Obtenido de Sistema de informacion en línea de precios de combustible en estaciones de servicio: http://www.bencinaenlinea.cl/web2/

CORFO, Instituto de investigación. (1964). Suelos. En CORFO, *Suelos* (pág. 96).

D. Gillespie, T. (1992). *Fundamentals of vehicle dynamics.* Estados Unidos: Society of automotive Engineers, Inc.

Environmental, C. (2016). *EarthZyme and Soil Compatibility.*

Gálvez, D. (10 de 06 de 2015). *Vialidad.* Obtenido de Vialidad: http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Adherencia%20Superficial.pdf

Hackett, S. (1 de Noviembre de 2016). *CYPHER ENVIROMENTAL*. Obtenido de CYPHER ENVIROMENTAL: https://cypherenvironmental.com/wp-content/uploads/Syncrude_EarthZymeRevised.pdf

Karlsson, R., Hammarström, U., Sörensen, H., & Eriksson, O. (2011). Obtenido de www.vti.se/publications

Kecojevic, V., & Komljenovic, D. (Diciembre de 2010). *Haul truck fuel consumption and CO2 emission under various engine load.* Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/261214668_Haul_truck_fuel_consumption_and_CO2_emission_under_various_engine_load_conditions

Kenneth J.Kelly. (2002). *Modeling Tools for Predicting the Impact of Rolling Resistance.* Obtenido de Modeling Tools for Predicting the Impact of Rolling Resistance: https://pdfs.semanticscholar.org/824f/bb4c80571d07834c9fd988dcd3f6feda5b52.pdf

Komatsu. (2018). *Komatsu*. Obtenido de https://www.komatsulatinoamerica.com/chile/categoria_productos/camiones-electricos-mineria-superficie/

Komatsu. (2018). *Komatsu 930-4SE*. Obtenido de https://s3.amazonaws.com/webklat/wp-content/uploads/2018/10/05202647/930E-4SE-ENG1.pdf

Komatsu. (s.f.). *Komatsu*. Obtenido de https://www.komatsulatinoamerica.com/chile/categoria_productos/camiones-electricos-mineria-superficie/

Loainza, J. L., & Rodriguez, L. E. (2013). *Estudio de la eficiencia del sistema de transmisión y frenado de los vehículos de transporte pesado, para la escuela de conductores profesionales del camión calvas de la provincia de loja.* Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.

Mammetti, M., Gallegos, D., & Frixas, A. (2013). *The influence of rolling resistance on fuel consumption in heavy-duty vehicles.*

Manual de carretera, Volumen 8. (2018). *Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control.* Santiago.

Manual de carretera-Volumen 1. (1997). En J. Lobos, S. Morales, Y. Vilic, & M. Martinez, *Evaluación de proyectos viales interurbanos* (pág. 122). Santiago: Minesterio de Obras publicas.

Ministerio de Agricultura. (2018). *Región de Valparaiso.* Santiago.

Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos .* México : Pearson Educations, INC.

Ortega, S. (3 de Enero de 2017). *LeasePlan*. Obtenido de LeasePlan : https://www.leaseplango.es/blog/conduccion-eficiente/resistencia-al-movimiento-vehiculo-guia-superfacil/

Recojevic, V., & Komljenovic, D. (Diciembre de 2010). *Haul truck fuel consumption and CO2 emission under various engine load conditions.* Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/261214668_Haul_truck_fuel_consumption_and_CO2_emission_under_various_engine_load_conditions

RutaTransporte. (2016). *RutaTransporte.* Obtenido de https://transporte.rutamotor.com/jac-presenta-nuevos-cruiser-4181-lander-3262-2017/3262-costado-2/

Vega, C. (2017). *Análisis experimental de efectos de estabilizado químico en suelos no plásticos.* Santiago: Universidad San Sebastían.

Vidal, C. (28 de Febrero de 2017). *uno2y3*. Obtenido de http://uno2y3.com/inercia-y-momento-de-inercia/: http://uno2y3.com/inercia-y-momento-de-inercia/

Yacchirema, H. (10 de 05 de 2016). *CORRELACIÓN DE LA MACROTEXTURA EN LA SUPERFICIE DE PAVIMENTOS CON UN PERFILOMETRO LÁSER EN TRAMO YAMBO - AMBATO.* Obtenido de https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11880/1/T-ESPE-053298.pdf

ANEXOS

A. ANEXO 1

Para obtener algunos de los datos anteriores se realizaron algunos supuestos para poder calcular los valores.

A.1. CÁLCULO DE RESISTENCIA DE FRENADO.

Para obtener la resistencia de frenado se supone un tiempo de 5 segundos, que es lo que se demora aproximadamente en frenar un camión. Con la siguiente ecuación debemos obtener la aceleración:

$$a = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} \qquad \textbf{Ec. (24)}$$

Donde:

a: aceleración (m/s^2)

v_f: velocidad final (m/s)

v_i: velocidad inicial (m/s)

t_f: tiempo final (s)

t_i: tiempo inicial (s)

Luego de calcular la aceleración se procede a calcular la resistencia de frenado con la siguiente ecuación:

$$RF = m * a \qquad \textbf{Ec. (25)}$$

Donde:

RF: resistencia de frenado. (kN)

m: masa del vehículo. (ton)

a: aceleración. (m/s^2)

Se calculó la resistencia de frenado para velocidades de 10km/h,20km/h, 30km/h, 40km/h y 50km/h. La Tabla A1 muestra los resultados obtenidos para cada velocidad.

Velocidad (m/s)	Tiempo (s)	Masa (t)	Resistencia de frenado (kN)
2,78	5	210,19	116,68
5,56	5	210,19	233,35
8,33	5	210,19	350,03
11,11	5	210,19	466,71
13,89	5	210,19	583,39

Tabla A1. Valores de resistencia de frenado para diferentes velocidades.

A.2. CÁLCULO DE FUERZA DE INERCIA Y MOMENTO DE INERCIA

Para calcular momento de inercia se calculó para una esfera con la siguiente fórmula (Vidal, 2017):

$$J = \frac{2}{3} M R^2 \qquad \textbf{Ec. (26)}$$

Donde:

J: momento de inercia para una rueda. ($ton*m^2$)
M: masa de la rueda. (ton)
R: radio de la rueda. (m)

Los valores son referenciales y se usaron los siguientes:

Se utilizó un neumático estándar de 53/89 R63, sus características son:

Peso del neumático: 26.127 kg.
Radio del neumático: 0,8001 metros.

Reemplazando los valores anteriormente mencionados en la ecuación 31 se obtiene:

$$J = 12{,}3\ t * m^2 \qquad \textbf{Ec. (27)}$$

Luego de obtener el momento de inercia se procederá a calcular la fuerza de inercia con la siguiente ecuación (Mammetti, Gallegos, & Frixas, 2013):

$$k = 1 + \frac{J}{m * r^2} \qquad \textbf{Ec. (28)}$$

Donde:

J= momento de inercia ($t*m^2$)
m: masa del vehículo. (t)
r: radio del neumático (m)
El resultado obtenido para k es de 1,02 (adimensional).

B. ANEXO 2

B.1. CARACTERÍSTICAS DE CAMIÓN.

Para esta investigación se utilizará un camión Komatsu 930E-4SE

Figura B1. Camión Komatsu 930E-4SE (Komatsu, 2018)

Peso bruto vehicular= 210.000 kg (463.380 lb)

Potencia neta al volante (SAE)= 2.550 hp. (1.902 kW) @1.900 rpm.

Capacidad de carga= 291,8 toneladas

Capacidad de la tolva (SAE)= 211 m^3

Combustible: Diesel

Dimensiones:

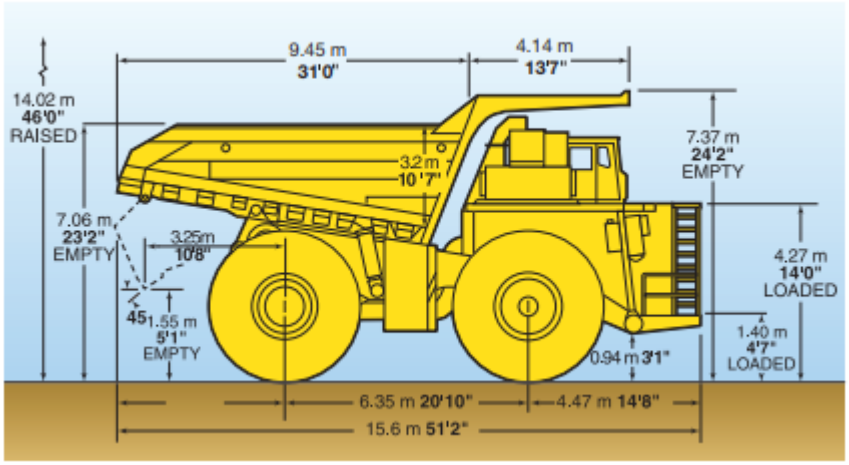

Figura B2. Dimensiones de camión Komatsu 930E-4SE (Komatsu, 2018)

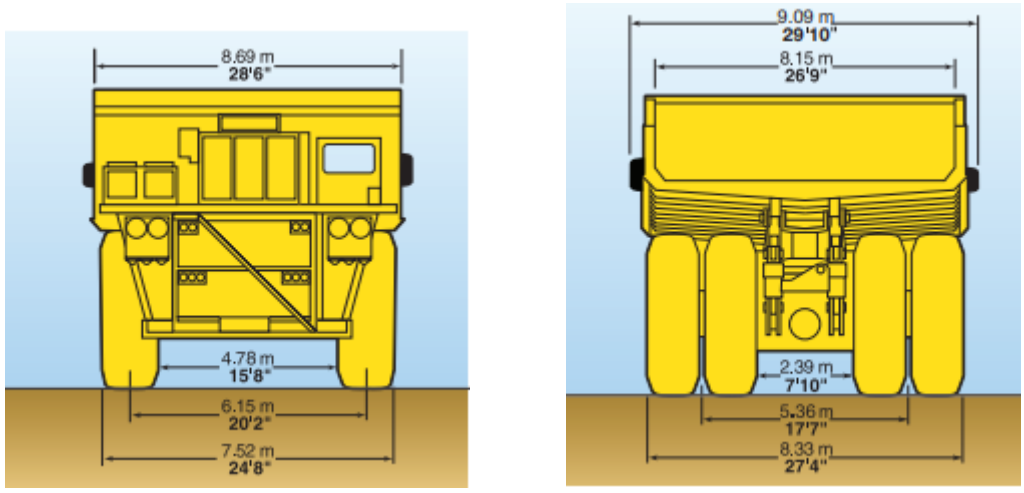

Figura B3. Dimensiones de camión Komatsu 930E-4SE (Komatsu, 2018)

C. ANEXO 3

C.1. TABLA DE ADITIVOS ESTABILIZANTES Y/O SUPRESORES DE POLVO. (Bozo, 2016)

C.2. TABLA PARA SELECCIONAR UN ADITIVO ESTABILIZANTE. (Vega, 2017)

Aditivo	Mezcla	Ventajas	Desventajas	Tipo de Suelo
Cemento	Suelo/cemento agua	Mejora la resistencia mecánica, caminos de mayor duración Disminución de la plasticidad y capacidad de retener agua del suelo. Aumenta su capacidad de soporto y resistencia al esfuerzo cortante	Difícil lograr una mezcla homogénea si el LP>30%	Todos, excepto suelos ricos en materia orgánica y/o alto contenido de sulfato. La mayor eficiencia y economía se logra con arenas y arcillas de baja a mediana plasticidad
Asfalto	Producto Bituminoso (Asfalto liquido – Asfalto cortado – emulsión asfáltica)	Impermeabiliza el suelo al recubrir sus partículas con una película de asfalto.	Problemas derivados del proceso de retracción	Materiales no cohesivos, tales como arenas y gravas. Suelos con un contenido de material fino menor al 20% y un IP<10%
A base de Enzimas	Compuesto natural orgánico similar a las proteínas (actúa como catalizador)	Aglomera las partículas finas a través del intercambio iónico con estas. Mejora CBR ya que favorece la compactación del material mediante la aglomeración de las partículas	Se requiere periodo de curado. Materia orgánica reduce efectividad.	Todo tipo de suelo, pero es recomendable que material fino (pasante por la malla N°200) sea entre un 18% a 30%. Las enzimas trabajan en suelos plásticos (IP<7%), ya que realizan cambio iónico con las arcillas.
A base de Aceite Sulfanado	Compuesto natural organizo similar a las proteínas (actúa como catalizador)	El suelo alcanza elevados índices de CBR y compactaciones superiores al 110% del Proctor, aumentando la capacidad de soporte y la resistencia al esfuerzo cortante	Actúa solo sobre la fracción fina de los suelos, es decir, limos y arcillas, por lo que la dosis de aceite a aplicar estará en función del contenido y tipo de árido fino.	Suelos granulares cuyo IP<10% y LL<40%
Cal	Suelo/Cal /Agua	Disminuye IP, ya que aumenta el LP. Aumenta la trabajabilidad. Mejora la estabilidad volumétrica del suelo.	Disminuye la densidad seca máxima. Aumenta la humedad optima del suelo.	Suelos finos, ricos en sílice y alúmina. Suelos arcillosos, con altos contenidos de finos de plasticidad media o alta, aunque también se utiliza en suelos de elevada humedad natural.
Capa de Protección (Capro)	Recubrimiento en base a emulsiones asfálticas. Es un tratamiento superficial simple con la diferencia que se adiciona gravilla o arena	Tiene como objetivo proteger la estructura (camino) de las deformaciones, esto es protegiendo la estructura granular de la disgregación del material que la conforma. En algunos casos también se utiliza un doble tratamiento superficial		

		gruesa sobre un riego con emulsión			
Cape Seal			Corrige las debilidades de un doble tratamiento superficial doble, debido a que utiliza un slury seal sobre la grava de ¾” para sellarla, consiguiendo una mayor duración y grado de funcional más alto, pavimentos más suaves y con menor intervención de conservación	Solución de estándar superior	
Sellos		Aplicación de Emulsión asfáltica con cobertura de agregado granular	Soluciones tradicionales superficiales simples (TSS), también incluye simple TSD con asentamiento sin mejoramiento geométrico, no obedeciendo de ingeniería		
Sales	Biochita	Sal constituida de Cloruro de Magnesio Hexahidratado (MgCl2*6H2O)	Facilita la compactación y retención de agua en zonas semidesérticas (propiedades higroscópicas). Mejora las capas de rodadura, eliminando calaminas, polvo y deformaciones por lo que reduce la conservación rutinaria a un mínimo.		Gran variedad de suelo, incluso no plásticos con pocos finos; y buenas calidades de rodados, similar a los caminos pavimentados.
	Cloruro de calcio ($CaCl_2$)	Sal	Mejora las propiedades del material pétreo, por lo que aumenta la resistencia a los esfuerzos de tracción y compresión, disminuyendo la permeabilidad.		

Tabla C1. Aditivos Estabilizantes y/o supresores de polvo. (Bozo, 2016)

Área	Tipo de suelo	Tipo de aditivo estabilizador recomendado	Restricción de LL e IP del suelo	Restricción en porcentaje que pasa el tamiz N°200	Comentarios
1A	SW ó SP	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal – Cemento – Ceniza volante	 IP<25%		
1B	SW – SM ó SP – SM ó SW – SC ó SP – SC	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal (4) Cal – Cemento – Ceniza volante	IP<10% IP<30% IP<12% IP<25%	IP<30% IP>12%	
1C	SM ó SC ó SM – SC	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal (4) Cal – Cemento – Ceniza volante	IP<10% - - IP>12% IP<25%	No exceda 30'% por peso	
2A	GW ó GP	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal– Cemento – Ceniza volante	 IP<25%		Material bien graduado. Debe contener al menos 45% del peso del material que pasa por la malla n°4
2B	GW – GM ó GP – GM ó GW – GC ó CP – GC	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal (4) Cal – Cemento – Ceniza volante	IP<10% IP<30% IP<12% IP<25%		Material bien graduado. Debe contener al menos 45% del peso del material que pasa por la malla n°4
2C	GM ó GC ó GM – GC	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal (4) Cal – Cemento – Ceniza volante	IP<10% - - IP>12% IP<25%	No exceda 30'% por peso	Materiales orgánicos y altamente ácidos que se encuentran dentro de esta área no son susceptibles a la estabilización por mecanismos ordinarios
3	CH ó CL ó MH ó ML ó OH ó OL ó ML – CL	(1)Cemento Portland (2)Cal	LL<40% e IP<10% IP>12%		
- - $PI \leq 20 + \frac{50-porcentaje\ que\ pasa\ por\ el\ tamiz\ n°200}{4}$					

Tabla C2. Guía para seleccionar un aditivo estabilizante. (Vega, 2017)