



VI Congreso Iberoamericano de Seguridad Vial

ANÁLISIS FUNCIONAL Y ESTADÍSTICO DE DATOS DE ENSAYOS A ESCALA REAL EN LECHOS DE FRENADO

Diseño de vías para una movilidad más segura. Diseño de infraestructuras más seguras

Autores: Mariana L. Espinoza - Aníbal L. Altamira

Institución:

Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña (EICAM) - Facultad de Ingeniería -
Universidad Nacional de San Juan

Cargo:

Profesor Titular - Profesor Titular. Director EICAM

Dirección: Av. Libertador San Martín 1109 (oeste) - CP 5400 - San Juan - Argentina

mespinoza@eicam.unsj.edu.ar - altamira@eicam.unsj.edu.ar

Teléfono: (54) (264) 4228666 / 4272439



RESUMEN:

Los lechos de frenado son dispositivos de seguridad que se construyen al costado del camino con la finalidad de contener y detener en forma segura los vehículos que en situación de emergencia no pueden detener su marcha en una pendiente descendente. Esta emergencia puede provocarse por una falla en el sistema de frenado, pudiendo derivar en un accidente grave o fatal. La falla podría originarse por un continuo e indebido uso del sistema de frenado.

Este trabajo tuvo como objetivo analizar funcional y estadísticamente las variables que intervienen en el funcionamiento de un lecho de frenado utilizando datos obtenidos sobre ensayos a escala real.

Para ello se diseñó una matriz factorial con los factores: velocidad de ingreso, pendiente, coeficiente de resistencia a la rodadura y mantenimiento, cada uno de ellos con sus respectivos niveles.

Se ejecutaron los ensayos, se procesaron y analizaron los datos obtenidos y se propusieron modelos estadísticos. Para seleccionar el modelo más adecuado se realizó un análisis de regresión y residual de cada uno. Finalmente se obtuvo el modelo más adecuado, que resultó aquel que incluye los factores mantenimiento y velocidad. Los coeficientes del modelo resultaron significativos.

El modelo obtenido con los datos observados arroja longitudes de detención mayores a las calculadas con el modelo de cálculo utilizado por la AASHTO en el rango de 30 a 70 km/h.

Del análisis funcional y estadístico se concluyó que el mantenimiento es un factor muy influyente sobre la longitud de detención. Los ensayos demuestran que cuando el material está sin mantenimiento la longitud de detención aumenta en aproximadamente un 24%. La diferencia es estadísticamente significativa.

PALABRAS CLAVE:

lechos de frenado, caminos de montaña, seguridad, ensayos, mantenimiento



1. INTRODUCCIÓN

San Juan provincia ubicada al oeste de la República Argentina, presenta una topografía con una serie de cordones montañosos. Los caminos que la atraviesan presentan muchas veces tramos con pendiente fuerte y sostenida. Durante los últimos años debido al impulso de la actividad económica en la provincia, especialmente de la actividad minera, ha habido un crecimiento sustancial en el flujo de vehículos (particularmente pesados, ómnibus y camiones de gran porte). En este contexto, es posible observar para el caso de pendientes ascendentes, que los camiones ven afectado su funcionamiento y rendimiento a partir de la pérdida de velocidad y elevado consumo de combustible. Para el caso de pendientes descendentes, el continuo frenado para evitar incrementos excesivos en la velocidad, puede afectar el funcionamiento mecánico de los frenos produciendo rotura o recalentamiento, lo que puede derivar en graves accidentes. En este sentido, se han producido ya varios accidentes debidos a esta situación.

1.1. Planteo del problema

Para tratar de minimizar la gravedad de los accidentes, se han construido en algunos de los caminos de la provincia de San Juan dispositivos de seguridad llamados “Rampas de Escape” (RE). Estas permiten evitar o disminuir los potenciales riesgos presentes, conteniendo los vehículos pesados que en situación de emergencia no pudieran detener su marcha en una elevada pendiente descendente. En Argentina desde hace pocos años las RE han comenzado a estar incluidas dentro del diseño integral de los caminos con características geométricas como la mencionada. Sin embargo no siempre su diseño, construcción y prácticas de mantenimiento se ejecutan teniendo en cuenta las recomendaciones de diseño.

1.2. Alcances del Estudio

Se realizaron 28 pruebas a escala real sobre rampas ubicadas en el camino de ingreso a la mina Veladero (Provincia de San Juan) con el objetivo de analizar el comportamiento de las variables de diseño de una RE. Los ensayos se hicieron sobre tres de ellas, cada una con una geometría particular.



Se analizaron tres tipos de materiales, uno suelo común y los otros dos materiales disponibles en yacimientos cercanos al camino.

Se usó un camión rígido de ocho ruedas modelo SCANIA P 420 CB 8x4 NZ, el peso del camión descargado es de 9,4 t. Todas las pruebas se realizaron con el camión descargado.

Se consideraron tres velocidades de ingreso: 30, 50 y 70 km/h.

2. ANTECEDENTES

2.1. Conceptos Básicos

Las fuerzas que actúan sobre el movimiento de un vehículo se dividen en tractivas y resistentes. La tractiva depende de las características de potencia del motor y de las pérdidas en el tren de tracción.

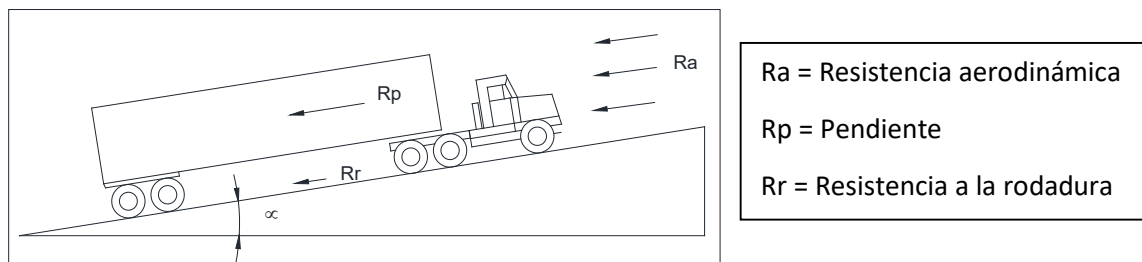


Figura 1: Fuerzas que actúan sobre un vehículo en movimiento al momento de ingresar a una rampa de escape.

Las fuerzas resistentes incluyen: aerodinámica, resistencia a la rodadura y pendiente (Figura 3). Para el caso de una pendiente descendente, la pendiente favorece el movimiento, es decir deja de ser resistente. Cuando la pendiente descendente supera la de equilibrio comienza a aparecer la fuerza de frenado para evitar excesos peligrosos en la velocidad de operación. En esta situación la fuerza tractiva del motor desaparece y el movimiento es producido por la inercia del



vehículo y el efecto de la componente del peso que favorece el desplazamiento. Al momento que los frenos dejan de actuar el vehículo desciende en forma descontrolada y la velocidad comienza a incrementarse pudiendo sobrevenir el accidente en cualquier momento. Esta situación es el dato de entrada para el diseño de una RE.

Según la segunda ley de Newton del movimiento

$$F = m * a = R_a + R_r + R_p \quad (1)$$

Para detener un vehículo descontrolado debe utilizarse la resistencia aerodinámica y a la rodadura y una pendiente ascendente.

Las dos fuerzas principales para el análisis de una RE son la resistencia a la rodadura y la pendiente. La resistencia del aire se desprecia en el análisis por ser su valor insignificante frente a las otras fuerzas intervinientes (eso ocurre en condiciones climáticas normales, si hay vientos fuertes ya pasa a depender de la dirección del viento y puede dejar de ser insignificante); eso además introduce un factor de seguridad en el cálculo de la resistencia total.

Para los fines del diseño de una RE las fuerzas de los frenos y del motor son ignoradas, pues se supone que la tractiva es nula y el sistema de frenado está descompuesto.

La resistencia a la rodadura se origina en la interacción entre el área de contacto de las ruedas del vehículo y la superficie de rodamiento. Es aplicable solo cuando el vehículo está en movimiento. Está influenciada por las características del material que compone la superficie de rodamiento. Los valores recomendados se expresan en la Tabla 1.



Tabla 1: Coeficiente de resistencia a la rodadura

Material de la cama de frenado	Coeficiente de resistencia a la rodadura R
Concreto con cemento Portland	0,01
Concreto asfáltico	0,012
Grava compactada	0,015
Tierra arenosa suelta	0,037
Agregado molido suelto	0,050
Grava suelta	0,100
Arena	0,150
Gravilla de tamaño uniforme	0,250

Fuente: *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets (AASHTO, 2001)*

2.2. Modelo de comportamiento clásico

El modelo físico que liga las variables involucradas en el cálculo de una RE es:

$$L_o = \frac{V_e^2}{254 * (R + i)} \quad (2)$$

L_o = Longitud (m)

V_e = Velocidad de entrada a la rampa (km /hora)

R = Resistencia a la rodadura del material que conforma el lecho (adimensional) (Tabla 1)

i = Pendiente, positiva si es ascendente o negativa si es descendente (adimensional)



3. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROBLEMA

Durante el estudio de antecedentes se identificaron las variables relevantes que afectan el funcionamiento de una rampa de escape.

La segunda etapa de la metodología tuvo como objetivo analizar las variables independientes y dependientes que intervienen en la investigación, hacer el diseño de la matriz factorial y de las pruebas a escala real. La concreción de las tareas previstas en esta etapa fue imprescindible para ejecutar las pruebas a escala real y de esa manera obtener la muestra a analizar.

Se analizaron las principales variables independientes que afectan el fenómeno. Entre ellas, cabe mencionar a la pendiente longitudinal, la velocidad, coeficiente de resistencia a la rodadura y el mantenimiento. También influyen, aunque en menor medida, otras variables que no fueron evaluadas como el tipo y carga de vehículo, y el espesor del material.

Se definió una metodología de ejecución de las pruebas y el equipo a utilizar. Este incluye un equipo GPS, un camión modelo SCANIA, una cámara filmadora, una cámara fotográfica y una cinta métrica. La selección de las rampas se realizó en función de las características geométricas y de materiales. También se evaluó la seguridad que ofrecían para las maniobras de ingreso.

3.1. Variables intervinientes

La variable dependiente y las variables independientes a analizar en esta investigación se muestran en las Tablas 2 y 3

Tabla 2: Variable dependiente

Nº	Variable Respuesta	Definición
1	Longitud (m)	Espacio necesario para la detención del vehículo que ingresa a la rampa en situación de descontrol.



Tabla 3: Variables independientes

Nº	Variables Explicativas	Definición
1	Velocidad de Ingreso (km/h)	Es la velocidad a la cual ingresa el vehículo al LF.
2	Pendiente longitudinal (%)	Relación entre las unidades de altura de ascenso o descenso por cada unidad de recorrido horizontal en una sección homogénea del LF.
3	Coefficiente de resistencia a la rodadura	Valor adimensional que es función de la fuerza de resistencia a la rodadura que actúa para retardar el movimiento de vehículo. Depende del tipo de material del lecho.
4	Mantenimiento	Procedimiento que se le aplica a los LF para conservarlos con sus condiciones ideales

3.2. Matriz factorial

La matriz factorial se usa para explicar la relación entre las variables y sus niveles. Sus factores son cuatro:

- Factor A: Velocidad de Ingreso con 3 niveles
- Factor B: Pendiente longitudinal con 3 niveles
- Factor C: Coeficiente de resistencia a la rodadura con 3 niveles
- Factor D: Mantenimiento con 2 niveles



Tabla 4: Factores y Niveles del experimento

	FACTORES	NIVELES
A	Velocidad de Ingreso (km/h)	30
		50
		70
B	Pendiente longitudinal (%)	i_1
		i_2
		i_3
C	Coeficiente de resistencia a la rodadura	R_1
		R_2
		R_3
D	Mantenimiento	Ahuellado
		Sin Ahuellar

La matriz que se diseñó tiene similitud con la usada para un diseño factorial fraccionado. Si bien se definieron cuatro factores, dos de ellos son bloques (pendiente y coeficiente de resistencia a la rodadura). La matriz factorial propuesta para esta investigación se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: Matriz factorial

		NIVELES													
FACTORES	R	R_1				R_2				R_3					
	Pendiente (%)	i_1				i_2				i_3					
	Velocidad (km/h)	30	50	70	30	50	70	30	50	70					
	Mantenimiento	S/A	A/A	S/A	A/A	S/A	A/A	S/A	A/A	S/A	A/A	S/A	A/A		
REPETICIONES	1														
	2														
	3														



3.3. Equipo a utilizar

Para la realización de los ensayos se utilizó un camión modelo SCANIA P 420 CB 8x4 NZ. Sobre él se instaló el instrumento de medición denominado Vbox Lite, ubicado en el interior del habitáculo. Este instrumento hace la recolección de distancia, velocidad, altura y heading en forma continua.

3.4. Selección de rampas a ensayar

Las rampas seleccionadas pertenecen al camino de ingreso a la mina Veladero. Dadas las características geométricas y composición de tránsito, el camino tiene implementado un conjunto de medidas para garantizar que la probabilidad de ocurrencia de accidentes sea mínima. Entre las medidas está la construcción de 30 rampas de escape distribuidas a lo largo de 115 km del camino, con el objetivo de contener aquellos vehículos que pudieran sufrir descensos descontrolados o quedarse sin frenos. De las 30 rampas construidas, se seleccionaron tres para estudiar, cuyas características geométricas se muestran en la Tabla 6. La selección se hizo teniendo en cuenta, que hubiera diferencia en las características geométricas y el tipo de material utilizado para la conformación del LF. También se evaluó que las condiciones de ingreso fueran seguras.

Tabla 6: Características geométricas observadas en rampas ensayadas

Nº	Ubicación (m)	Ancho (m)	Longitud (m)	Pendiente (%)	Ubicación Costado del camino	Material lecho	Tipo material (estimado)
1	73.600	6	80	5,5	Derecho	Granular de cantera	Grava
2	66.300	10	700	4,4	Derecho	Sin lecho	Gravilla
3	48.300	7,5	84	16,0	Derecho	Granular de cantera	Grava



3.5. Diseño de pruebas a escala real

3.5.1. Características de las pruebas

- Se definió un plan de pruebas a ejecutar en cada una de las rampas de escape a ensayar, según lo detalla la matriz factorial.
- Todas las pruebas fueron ejecutadas por el mismo conductor. El conductor del camión fue seleccionado por su gran experiencia en la conducción de ese vehículo en particular, esto garantizó la ausencia de imprevistos por desconocimiento del manejo de ese vehículo. Fue acompañado por un copiloto, que avaló el cumplimiento del plan diseñado para la ejecución de las pruebas y controló el perfecto funcionamiento del instrumento VBox Lite.
- En todas las pruebas el conductor aceleró hasta alcanzar la velocidad prevista y justo antes del ingreso a la rampa dejó la caja de cambios en punto muerto, simulando un estado de pérdida de control.
- Luego de una evaluación previa de los posibles estados de carga se decidió realizar las pruebas en el estado descargado, por ser la situación más desfavorable. Un vehículo descargado posee menor resistencia a la rodadura que un vehículo cargado, con lo cual la distancia de desaceleración es mayor. No se descarta que más adelante se realicen pruebas con otros estados de carga, como media carga y carga completa.
- Las velocidades de ingreso fueron: 30, 50 y 70 km/h. Su selección fue realizada teniendo en cuenta las condiciones de uso del camino en cuanto a velocidades máximas permitidas, tipo de carga transportada, circulación de vehículos en convoy.



4. RECOLECCIÓN DE DATOS

4.1. Ejecución de pruebas

El instrumento Video Vbox se instaló en el camión con la precaución de no causar al conductor ninguna interferencia de visibilidad.

El material del LF fue escarificado y nivelado hasta quedar en condiciones óptimas para el ingreso de un vehículo en estado de descontrol.

El vehículo se posicionó en una progresiva anterior a la correspondiente al ingreso a la rampa, con el objetivo de poder alcanzar la velocidad de ensayo prevista indicada para cada una de las pruebas. El vehículo estaba descargado.

Cuando todo estaba preparado se daba inicio a la prueba, percibiéndose una desaceleración paulatina del vehículo y sus ocupantes hasta producirse la detención completa. Posteriormente se realizaba la medición de la longitud de detención directamente con cinta y se tomaban fotografías.

4.2. Recolección de muestras de material

Con la finalidad de evaluar el material del lecho se tomaron dos muestras representativas de cada una de las rampas ensayadas.

La recolección la hizo personal especializado que conocía las normativas correspondientes para la realización de cada ensayo (por ejemplo cantidad de material).

5. PROCESAMIENTO DE DATOS

5.1. Procesamiento de muestras de material

Las características del material se evaluaron por medio de los ensayos de Desgaste Los Ángeles (IRAM, 1975), Elongación y Lajosidad (DNV, 2013) y Granulometría (DNV, 2013). La cantidad que se tomó para las muestras fue entre 5 y 13 kg.



Las curvas granulométricas de las muestras ensayadas se representan en la Figura 2.

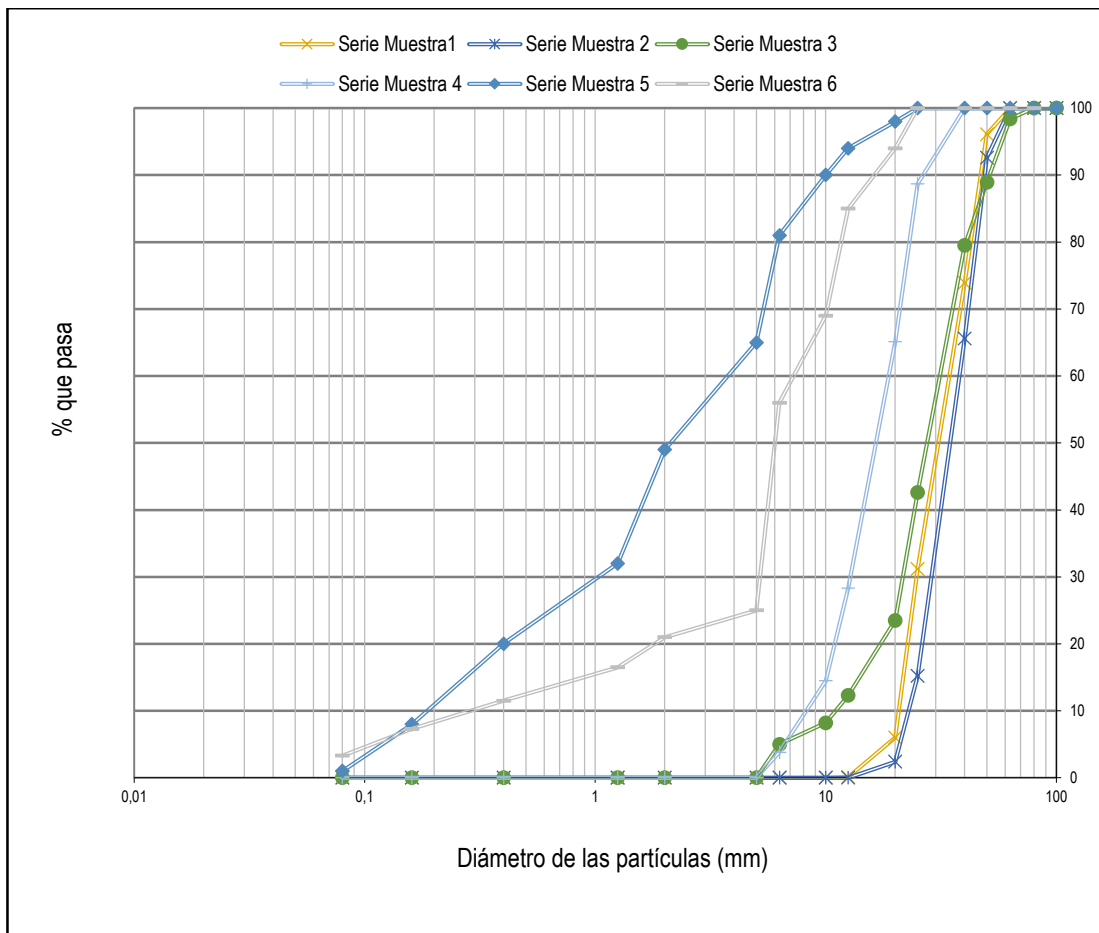


Figura 2: Curvas granulométricas muestras ensayadas

La Tabla 7 presenta la evaluación de cada muestra con respecto a los requisitos que deben cumplir los materiales según recomienda la (Norma Oficial Mexicana NOM-036-SCT2. Rampas de emergencia para frenado en carreteras., 2009).



Tabla 7: Evaluación de las muestras

		Muestras					
		Rampa 73.400		Rampa 48.300		Rampa 66.300	
		1	2	3	4	5	6
Material		Grava	Grava	Grava	Grava	Gravilla	Gravilla
ENSAYOS	Granulometría	SC	SC	NC	NC	NC	NC
	Desgaste Los Ángeles	SC	SC	SC	SC	NC	NC
	Elongación	NC	SC	NC	NC	NC	SC
	Lajosidad	SC	NC	SC	SC	SC	SC

NC: No cumple según (Norma Oficial Mexicana NOM-036-SCT2. Rampas de emergencia para frenado en carreteras., 2009)

SC: Si cumple según (Norma Oficial Mexicana NOM-036-SCT2. Rampas de emergencia para frenado en carreteras., 2009)

El material de las Muestras 1 y 2, aunque no es óptimo, es el que más se adecua a las recomendaciones.

5.2. Procesamiento de los datos obtenidos por el instrumento Vbox

Con el fin de obtener una base de datos útil se procesaron los archivos obtenidos por el instrumento.

5.3. Variable Dependiente

La variable dependiente es la longitud de detención del vehículo (Tabla 2). Se midió sobre el terreno, luego de la detención del vehículo.



5.4. Variables Independientes

Las variables independientes (Tabla 3) incluyen: velocidad de ingreso, pendiente longitudinal, el coeficiente de resistencia a la rodadura y el mantenimiento del LF.

La velocidad se obtuvo en forma directa del Vbox, la pendiente longitudinal se calculó con los datos de la altura relativa obtenida por Vbox, mientras que el mantenimiento se observó in situ. Para obtener el valor del coeficiente de resistencia a la rodadura se realizó el cálculo a partir del modelo (1).

5.5. Observaciones recolectadas.

Hubo variación en cuanto a cantidad de pruebas realizadas, respecto a la programación original del plan de pruebas a ejecutar, según se muestra en la Tabla 8.

Rampa 73.600: se ejecutaron todas las pruebas programadas pero dos de ellas se reservaron para la validación del modelo. Se realizaron 18 pruebas alternando estados Sin Ahuellar y Ahuellado. Luego de culminada la prueba con el LF en estado Sin Ahuellar (material recién escarificado y nivelado) se realizaba la prueba siguiente sobre la huellas dejadas por el camión en la prueba anterior, estado Ahuellado.

Rampa 66.300: se hicieron 7 pruebas, por motivos de logística no pudo completarse el total de pruebas programadas. Dada la respuesta de la rampa a la velocidad de ingreso se decidió hacer 3 pruebas a velocidades más altas que las planteadas en la matriz factorial propuesta. Al ser esta una rampa del tipo gravitacional (sin material granular en su superficie) no se ahuelló. Todas las pruebas realizadas fueron en estado Sin Ahuellar.

Rampa 48.300: solo se ejecutaron 3 pruebas en esta rampa. Por problemas técnicos no pudo realizarse la cantidad total de ensayos que estaba prevista en la matriz factorial. El material no se ahuelló. Todas las pruebas realizadas fueron en estado Sin Ahuellar.

En todas las pruebas realizadas en la Rampa 73.600 y 48.300 el vehículo se detuvo por efecto combinado de la pendiente y del coeficiente de resistencia a la rodadura del material. Pero una



vez producida la detención el conductor del camión tuvo que aplicar el freno dado que sino el vehículo comenzaba a descender circulando hacia atrás. El vehículo se detuvo pero no se enterró.

En la matriz factorial definitiva, se muestra con el código x las pruebas realizadas y con el código 0 las pruebas no realizadas.

Tabla 8: Matriz factorial con observaciones recolectadas

		NIVELES																			
FACTORES	R	R ₁						R ₂						R ₃							
	Pendiente (%)	i ₁						i ₂						i ₃							
	Velocidad (km/h)	30		50		70		30		50		70		30		50		70			
	Mantenimiento	S/A	A/A	S/A	A/A	S/A	A/A	S/A	A/A	S/A	A/A	S/A	A/A	S/A	A/A	S/A	A/A	S/A	A/A		
REPETICIONES	1	x	x	x	x	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0
2	x	x	x	x	x	x	0	0	x	0	x	0	x	0	0	0	0	0	0	0	
3	x	x	x	x	x	x	0	0	x	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

5.6. Datos procesados

5.6.1. Rampa 73.600



Tabla 9: Resultados pruebas rampa 73.600

Nº de orden	Nombre del archivo	Mantenimiento	Velocidad de ingreso de diseño (km/h)	Velocidad de ingreso de archivo (km/h)	Longitud detención de archivo (m)	Tiempo (seg)
1	002	SA	30	30,5	21,53	4,38
2	003	A	30	38,21	30,91	4,85
3	005	SA	30	34,84	29,26	4,93
4	006	A	30	36,48	32,31	5,21
5	007	SA	30	35,58	29,05	4,72
6	009	A	30	41,01	37,13	5,17
7	012	SA	50	49	40,94	4,99
8	013	A	50	53,69	45,99	5,21
9	014	SA	50	54,25	39,5	5,30
10	015	A	50	58,28	52,95	5,49
11	016	SA	50	49,18	38,4	5,15
12	017	A	50	54,69	43,3	5,31
13	002m	SA	70	59,18	49,41	5,47
14	003m	A	70	71,72	67,55	5,86
15	004m	SA	70	69,19	63,84	6,12
16	005m	A	70	67,13	65,69	6,27
17	006m	SA	70	71,7	65,01	6,05
18	008m	A	70	73,09	78,33	6,46

SA: Sin Ahuellar

A: Ahuellado

Las pruebas 9 y 12 no se tuvieron en cuenta en el análisis estadístico, dado que se utilizaron en la validación del modelo.



5.6.2. Rampa 66.300

Tabla 10: Resultados pruebas rampa 66.300

Nº de Orden	Nombre del archivo	Velocidad de ingreso de diseño (km/h)	Velocidad de ingreso de archivo (km/h)	Longitud detención de archivo (m)	Tiempo (seg)
1	010	30	25,68	54	13,75
2	011	50	49,98	142	19,08
3	013	50	65,02	211	21,09
4	015	50	61,74	184	20,55
5	016	70	75,9	272	24,45
6	001	70	75,37	274	25,04
7	002	70	82,34	314	26,47

5.6.3. Rampa 48.300

Tabla 11: Resultados pruebas rampa 48.300

Nº de Orden	Nombre del archivo	Velocidad de ingreso de diseño (km/h)	Velocidad de ingreso de archivo (km/h)	Longitud detención de archivo (m)	Tiempo (seg)
1	003	30	34,43	32,75	5,88
2	004	30	36,42	38,78	6,59
3	006	50	49,11	62,94	8,5



6. ANÁLISIS DE DATOS

6.1. Rampa 73.600

6.1.1. Velocidad instantánea vs Tiempo

En la Figura 3 a, b se observa como varía la velocidad instantánea en función del tiempo transcurrido para cada una de las pruebas ejecutadas. La Figura 3-a representa el estado Sin Ahuellar y la 3-b el estado Ahuellado. Los gráficos muestran que el vehículo, ingresando a 30 km/h requiere en promedio 4,88 seg. para detener su movimiento, en las pruebas realizadas a 50 km/h, el tiempo promedio transcurrido fue de 5,26 seg. y para las pruebas realizadas a 70 km/h el tiempo promedio transcurrido fue de 6,15 seg.

Se observa una tendencia de tipo lineal, a excepción de la primera parte del gráfico. Esto muestra el efecto del ingreso de las ruedas del vehículo al LF, una vez que todas las ruedas están adentro del lecho, el gráfico se hace lineal. Este efecto se observa mejor cuando el lecho está Sin Ahuellar, Figura 3-a.

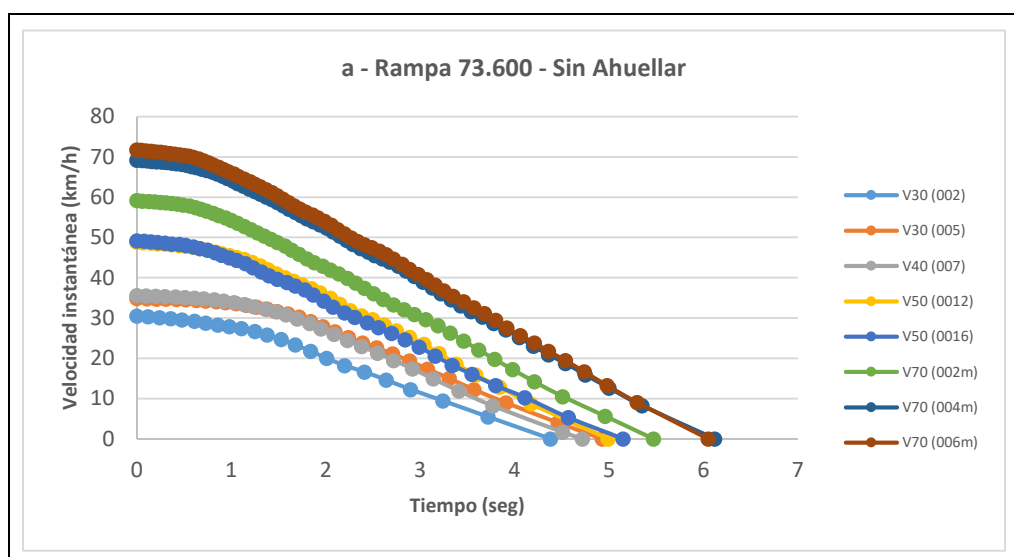


Figura 3-a: Velocidad instantánea vs Tiempo. Rampa 73.600

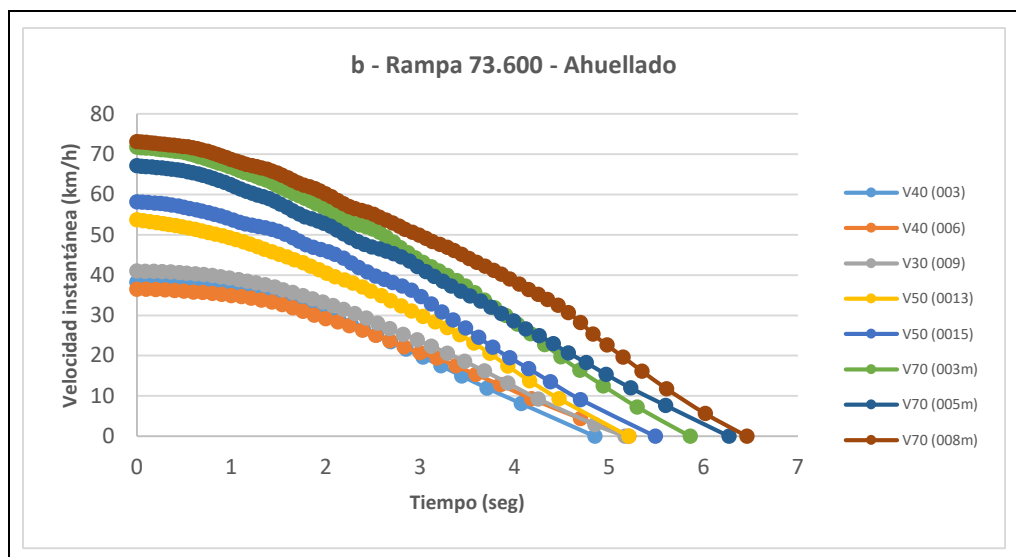


Figura 3-b: Velocidad instantánea vs Tiempo. Rampa 73.600

6.1.2. Velocidad de ingreso vs Tiempo de detención.

La Figura 4 muestra la relación existente entre la velocidad de ingreso y el tiempo de detención del vehículo para ambos estados de mantenimiento. Se advierte claramente que para los mismos rangos de velocidades de ingreso los tiempos de detención en estado Ahuellado son mayores que los tiempos del estado Sin Ahuellar. Esto muestra la importancia que tiene el factor mantenimiento.

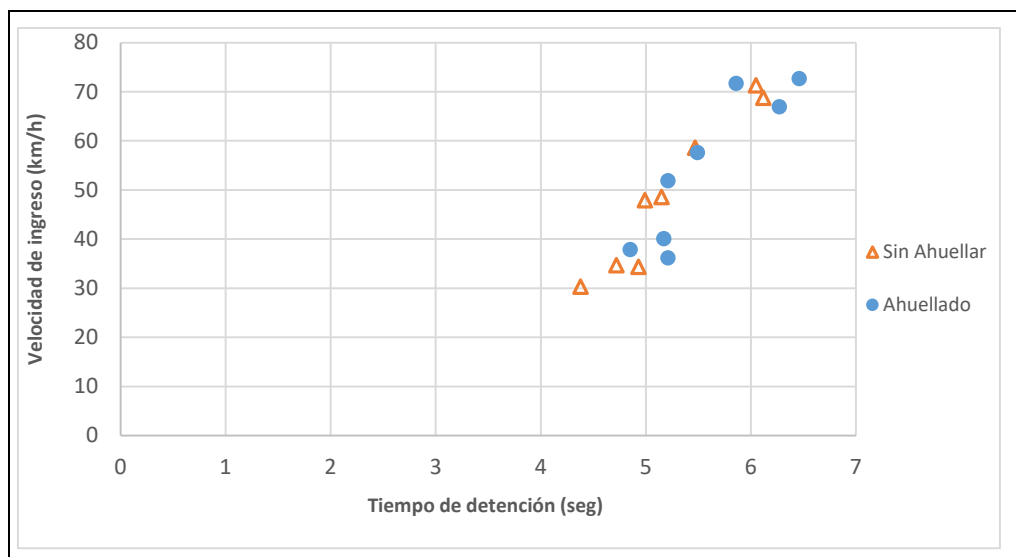


Figura 4: Velocidad de ingreso vs tiempo de detención. Rampa 73.600

6.1.3. Velocidad instantánea vs Longitud recorrida

En la Figura 5 a, b se observa como varía la longitud recorrida en función de la velocidad instantánea para cada prueba. La Figura 5-a muestra el estado Sin Ahuellar y la 5-b el estado Ahuellado. Hay una tendencia a que la velocidad tenga una mayor variación una vez que todas las ruedas del vehículo ingresan en el lecho. Esto se observa mejor en las pruebas a velocidades de ingreso más altas y en consecuencia con longitudes de detención mayores.

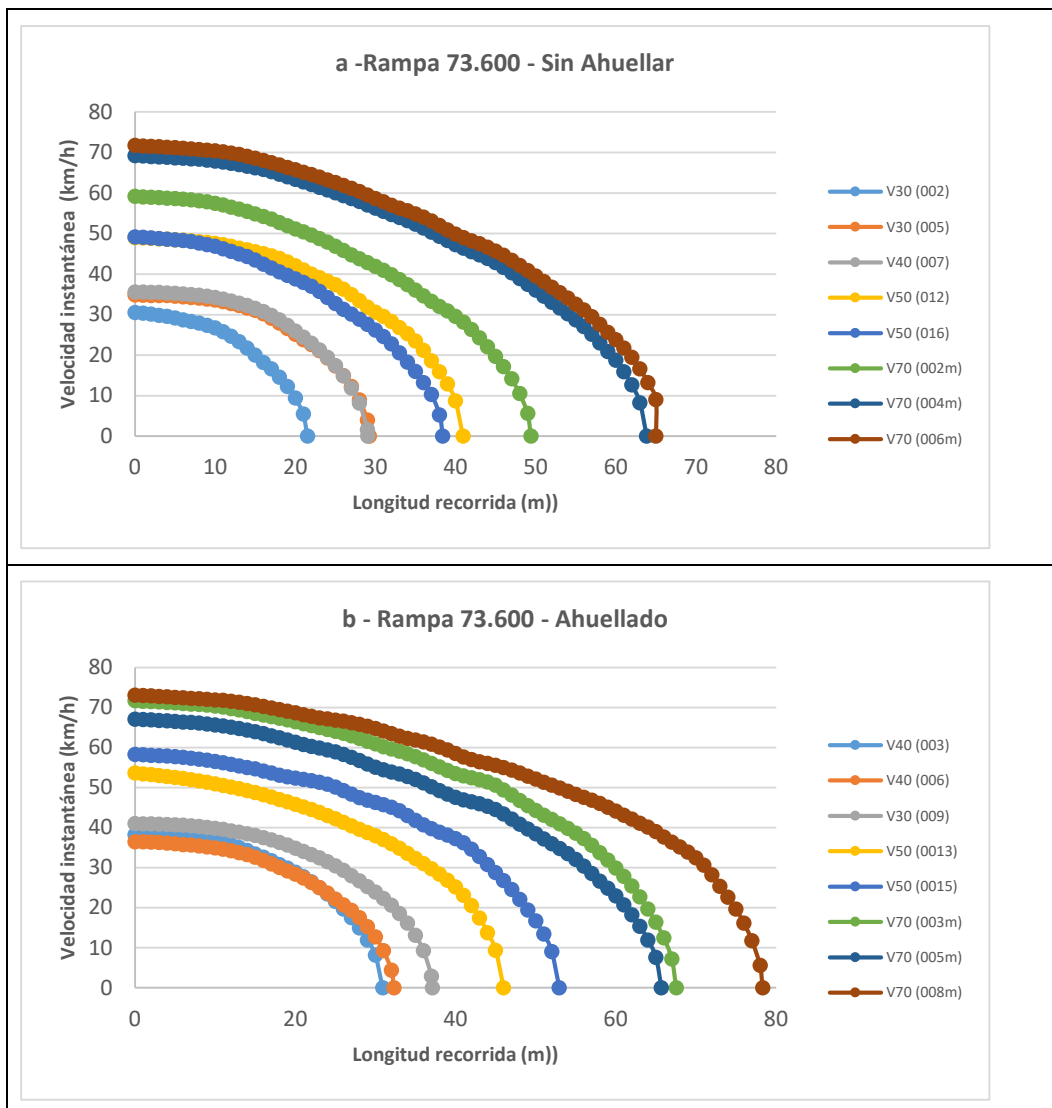


Figura 5 a-b: Velocidad instantánea vs Longitud recorrida. Rampa 73.600.

6.1.4. Velocidad de ingreso vs Longitud de detención

La Figura 6 muestra la relación existente entre la velocidad de ingreso y la longitud de detención del vehículo para ambos estados de mantenimiento. Se advierte claramente que para los mismos rangos de velocidades de ingreso las longitudes de detención en estado



Ahuellado son mayores que las longitudes del estado Sin Ahuellar. Esto muestra la importancia que tiene el factor mantenimiento.

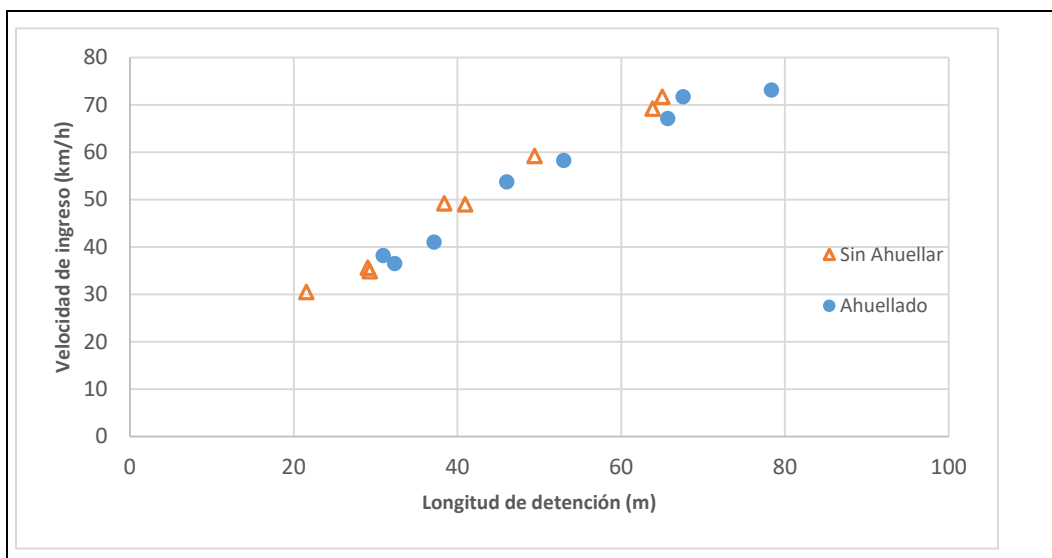


Figura 6: Velocidad de ingreso vs Longitud de detención. Rampa 73.600

6.1.5. Longitudes de detención Sin Ahuellar vs Longitudes Ahuelladas

Se hace la comparación de longitudes de detención entre estado Sin Ahuellar y estado Ahuellado. En la Tabla 12 y en la Figura 7 puede observarse que las longitudes de detención para el estado Ahuellado son mayores.

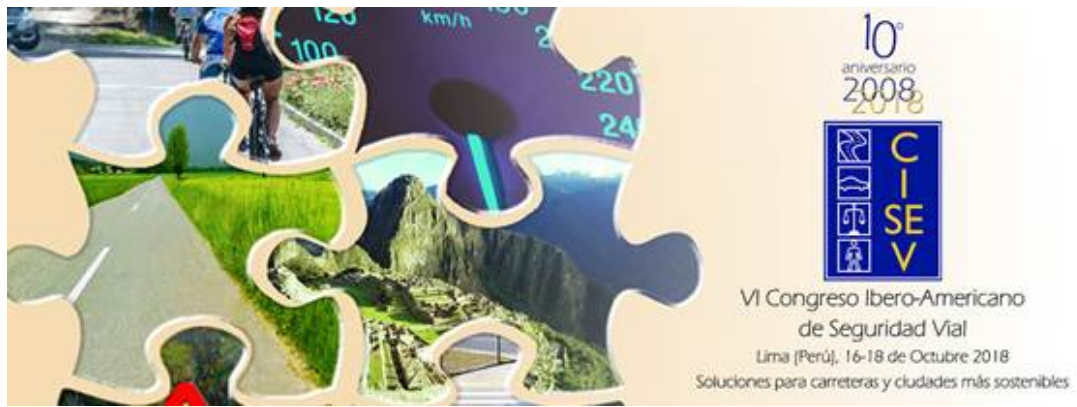


Tabla 12: Longitudes de detención en estado Sin Ahuellar y Ahuellado

Archivo	Longitud de detención (m)		
	Sin Ahuellar	Ahuellado	Diferencia (%)
002 -003	21,53	30,91	43,57
005 -006	29,26	32,31	10,42
007 - 009	29,05	37,13	27,81
012 - 013	40,94	45,99	12,34
016 -015	38,4	52,95	37,89
002m - 003m	49,41	67,55	36,71
004m -005m	63,84	65,69	2,90
006m -008m	65,01	78,33	20,49

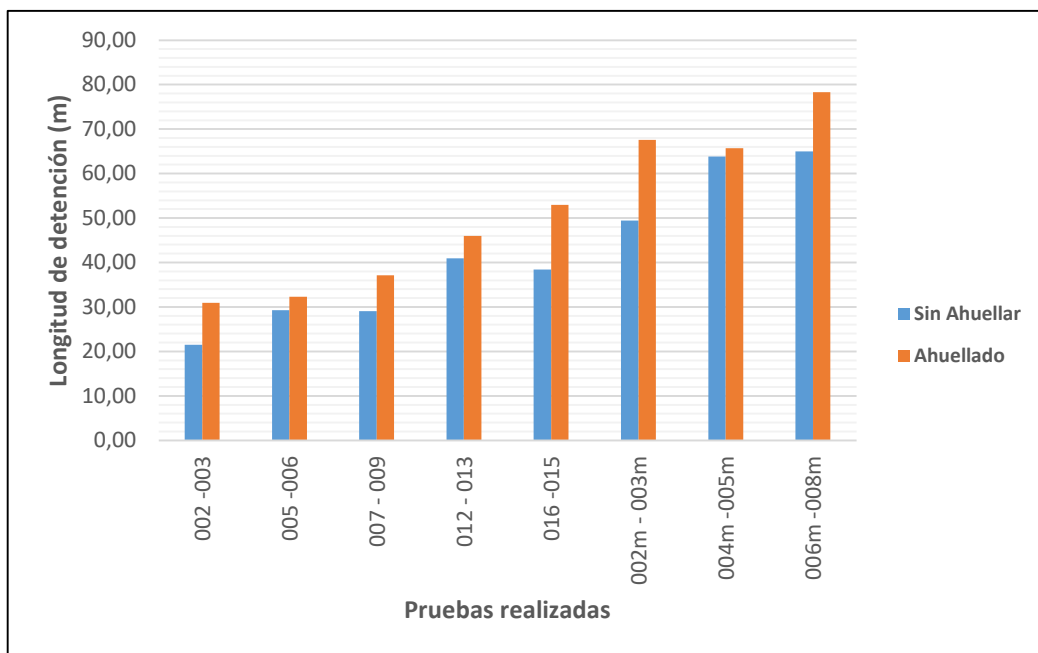


Figura 7: Longitudes de detención estado Sin Ahuellar vs estado Ahuellado



Las diferencias varían en un intervalo comprendido entre el (11,65% - 36,37%), con una media del 24,01% (Figura 8). Esto confirma la importancia de un buen mantenimiento en este tipo de dispositivos de seguridad.

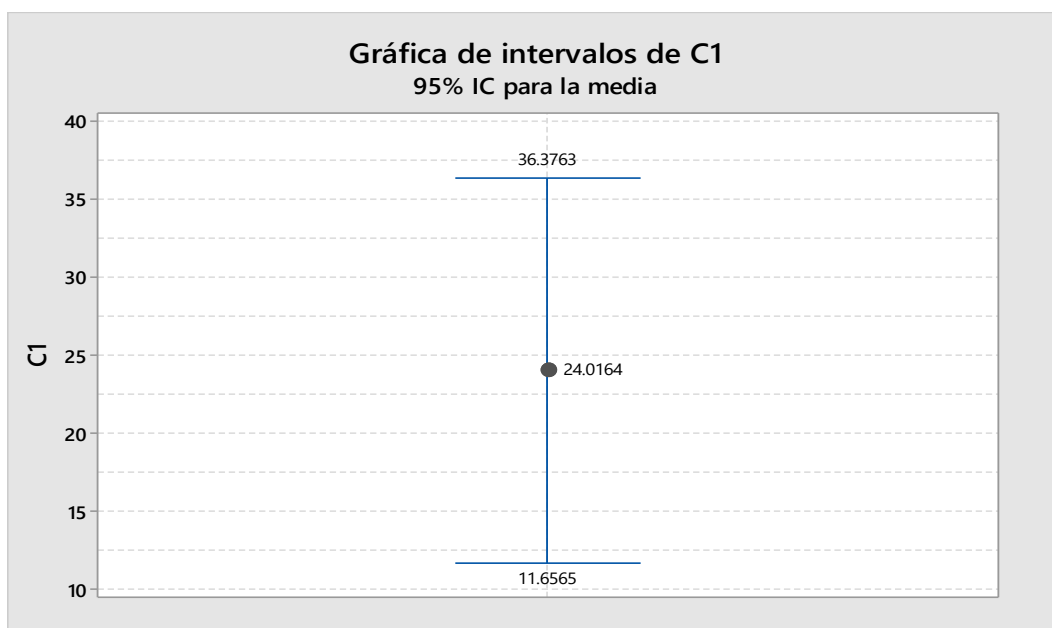


Figura 8: Intervalo de confianza para las diferencias de longitudes de detención entre estado Sin Ahuellar y Ahuellado

Para evaluar si son estadísticamente diferentes las longitudes de detención Sin Ahuellar y Ahuellado se realizó una prueba de hipótesis para datos pareados. Se usaron los datos en dos situaciones, Sin Ahuellar y Ahuellado. Las hipótesis fueron:

$$H_0: \mu_D = 0 \quad H_1: \mu_D \neq 0$$

Como resultado de la prueba se obtuvo:

$$\text{Estadístico } t = -4,47179 \quad \text{y} \quad \text{Valor-p} = 0,0028947$$

La conclusión es que se rechaza H_0 para $\alpha = 5\%$ con un 95 % de confianza

Esto significa que las longitudes de detención en los dos estados pueden considerarse diferentes a un nivel de significación del 5 %.



Considerando esta conclusión que demuestra la importancia del mantenimiento, según (Echaveguren, 2011), deben programarse tres tipos de operaciones de mantenimiento:

- Periódicas, independiente del uso.
- Por uso, después de un incidente.
- Excepcionales en función del clima donde se ubique el lecho. (después de una nevada importante).

6.1.6. Desaceleración vs Velocidad de ingreso

La relación entre la velocidad de ingreso y la tasa media de desaceleración puede observarse en el gráfico de la Figura 9. El cálculo de la desaceleración media se realizó usando una ecuación proveniente de la física básica:

$$a = \frac{V_e^2}{2Lg} \quad (3)$$

Donde:

a = desaceleración media (g)

V_e = Velocidad de entrada a la rampa (m/s)

L = Longitud de detención (m)

g = aceleración de la gravedad ($9,81\text{m/s}^2$)

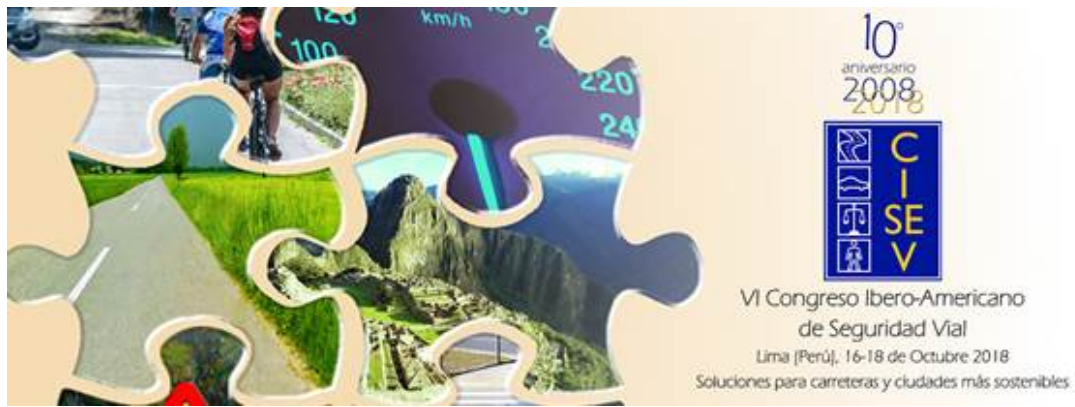


Tabla 13: Desaceleraciones Rampa 73.600

Velocidad de ingreso de archivo (km/h)	Velocidad de ingreso de archivo (m/s)	Desaceleración (g)
30,5	8,472	0,170
38,21	10,614	0,186
34,84	9,678	0,163
36,48	10,133	0,162
35,58	9,883	0,171
41,01	11,392	0,178
49	13,611	0,231
53,69	14,914	0,247
58,28	16,189	0,252
49,18	13,661	0,248
59,18	16,439	0,279
71,72	19,922	0,299
69,19	19,219	0,295
67,13	18,647	0,270
71,7	19,917	0,311
73,09	20,303	0,268

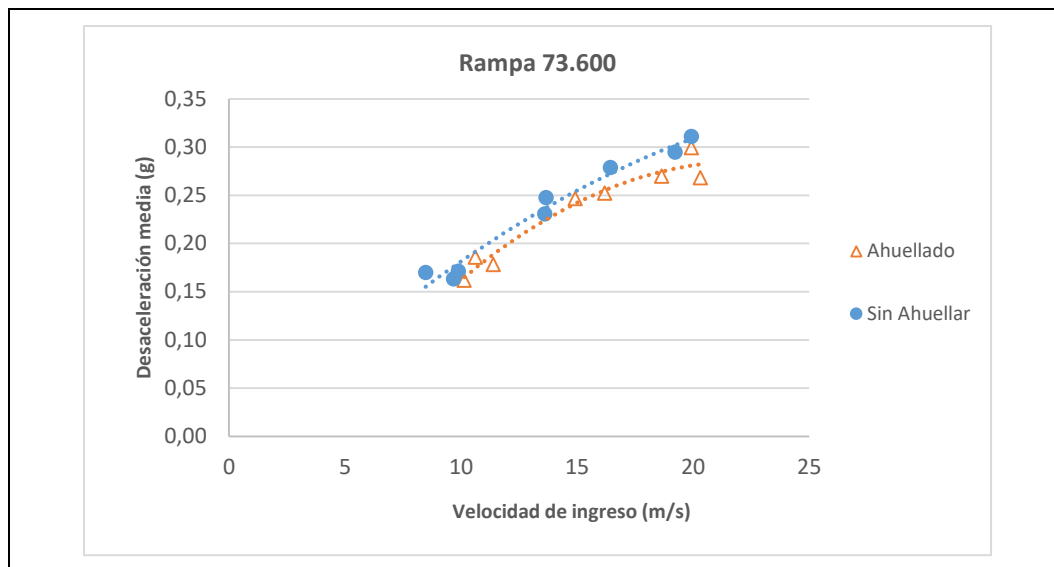


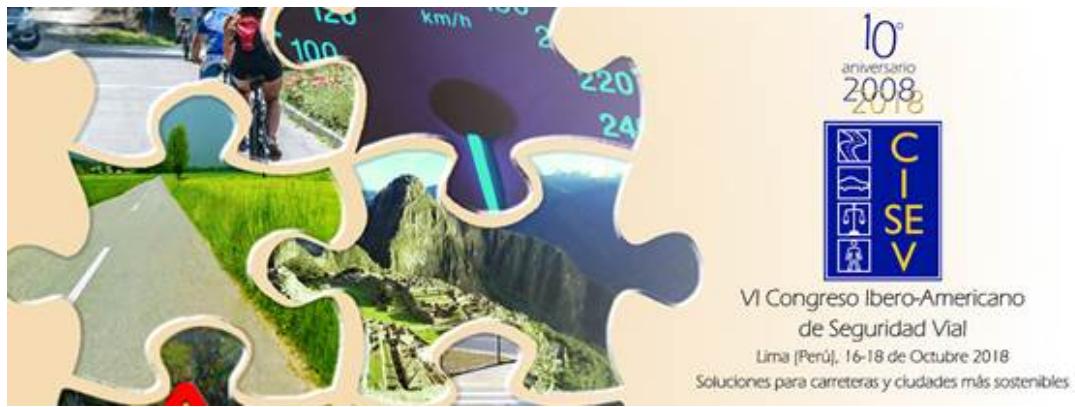
Figura 9: Velocidad de ingreso vs Desaceleración. Rampa 73.600

La Figura 9 muestra el estado Sin Ahuellar y el estado Ahuellado. En el gráfico se observa que pese a que la desaceleración media aumenta con la velocidad de ingreso, la tasa de crecimiento disminuye con el aumento de la velocidad de ingreso y parece estabilizarse para las más altas velocidades. Esto es más notorio en el estado Ahuellado. Las desaceleraciones son mayores para el estado Sin Ahuellar, afirmando la importancia del mantenimiento.

6.1.7. Velocidad de ingreso vs Coeficiente de Resistencia a la Rodadura

El cálculo para obtener el coeficiente de resistencia a la rodadura (R) se realizó a partir del modelo 1, (apartado 2.1). Como se observa en la Tabla 14, R es función de la velocidad de ingreso.

El coeficiente de resistencia a la rodadura que se adopta para el material del LF es el menor entre los calculados para las pruebas realizadas a las más altas velocidades, ya que eso implica adoptar una mayor seguridad para la determinación de la longitud de detención



requerida. Este cálculo se basó en el estudio realizado en el estado de Arizona (Dwight Metcalf, 1992). El R adoptado es 0,25 para estado Sin Ahuellar y 0,26 para estado Ahuellado.

Tabla 14: Coeficiente de resistencia a la rodadura (R) pruebas Rampa 73.600

Velocidad de ingreso de archivo (km/h)	Longitud de detención de archivo (m)	R
30,5	21,53	0,15
38,21	30,91	0,17
34,84	29,26	0,15
36,48	32,31	0,14
35,58	29,05	0,15
41,01	37,13	0,16
49	40,94	0,21
53,69	45,99	0,23
58,28	52,95	0,23
49,18	38,4	0,23
59,18	49,41	0,26
71,72	67,55	0,28
69,19	63,84	0,28
67,13	65,69	0,25
71,7	65,01	0,29
73,09	78,33	0,25

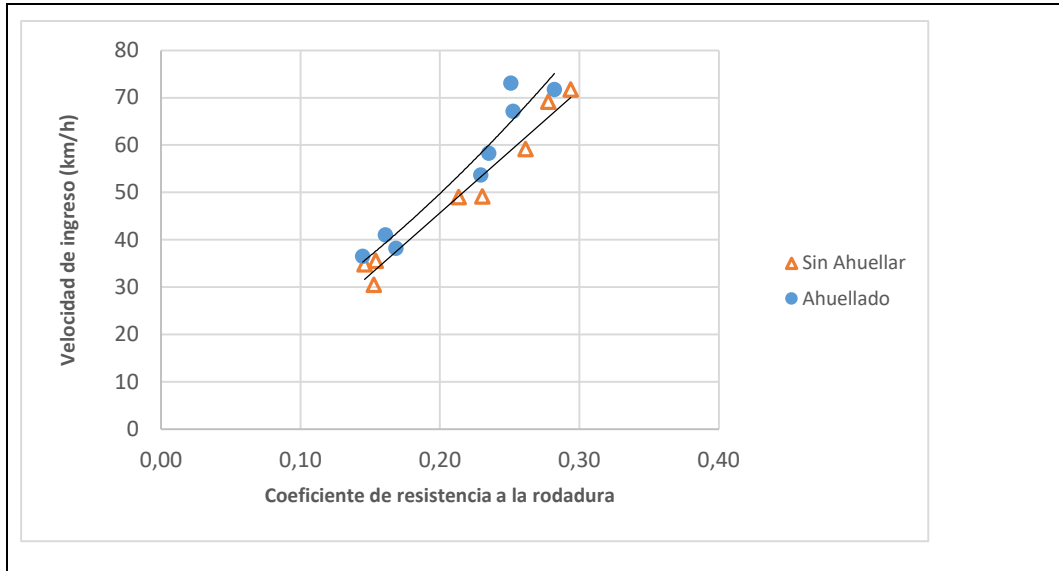
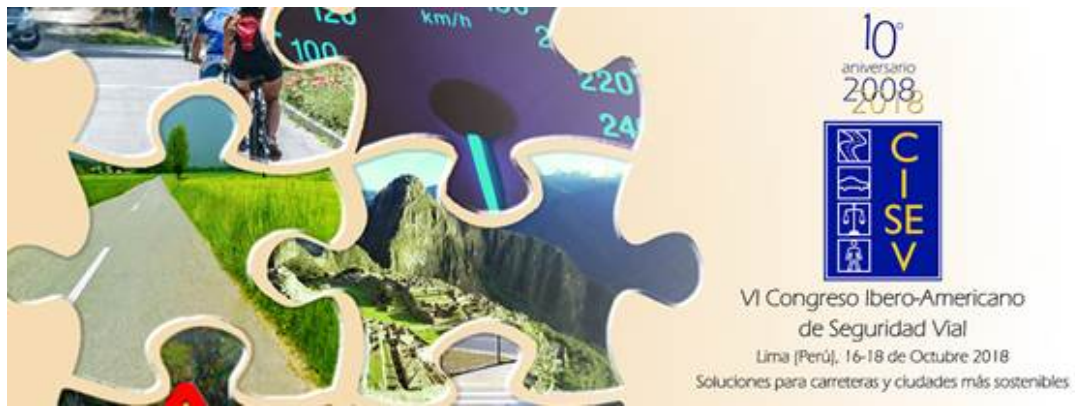


Figura 10: Coeficiente de resistencia a la rodadura vs Velocidad de ingreso. Rampa 73.600

La Figura 10 muestra el estado Sin Ahuellar y Ahuellado. Se observa que R generalmente crece con la velocidad de ingreso, dado que el material ejerce una mayor oposición cuando el vehículo ingresa más rápido, se mueve más masa de material delante de las ruedas del vehículo generando una mayor fuerza de resistencia al desplazamiento.

Se observa claramente el efecto del mantenimiento, a iguales velocidades de ingreso el estado Sin Ahuellar posee mayores coeficientes de resistencia a la rodadura que en estado Ahuellado.

6.2. Rampa 66.300

La Figura 11 a, b, c y d presenta los gráficos del estudio de variables realizado para la Rampa 66.300. El análisis particular para cada una de las variables en cuestión se muestra en los apartados 6.2.1, 6.2.2, 6.2.3 y 6.2.4.



La variable mantenimiento no se tuvo en cuenta para esta rampa dado que es una rampa categorizada como gravitacional y no tiene un lecho de material granular conformado en su superficie, por lo tanto hay un solo gráfico para cada análisis funcional de variables.

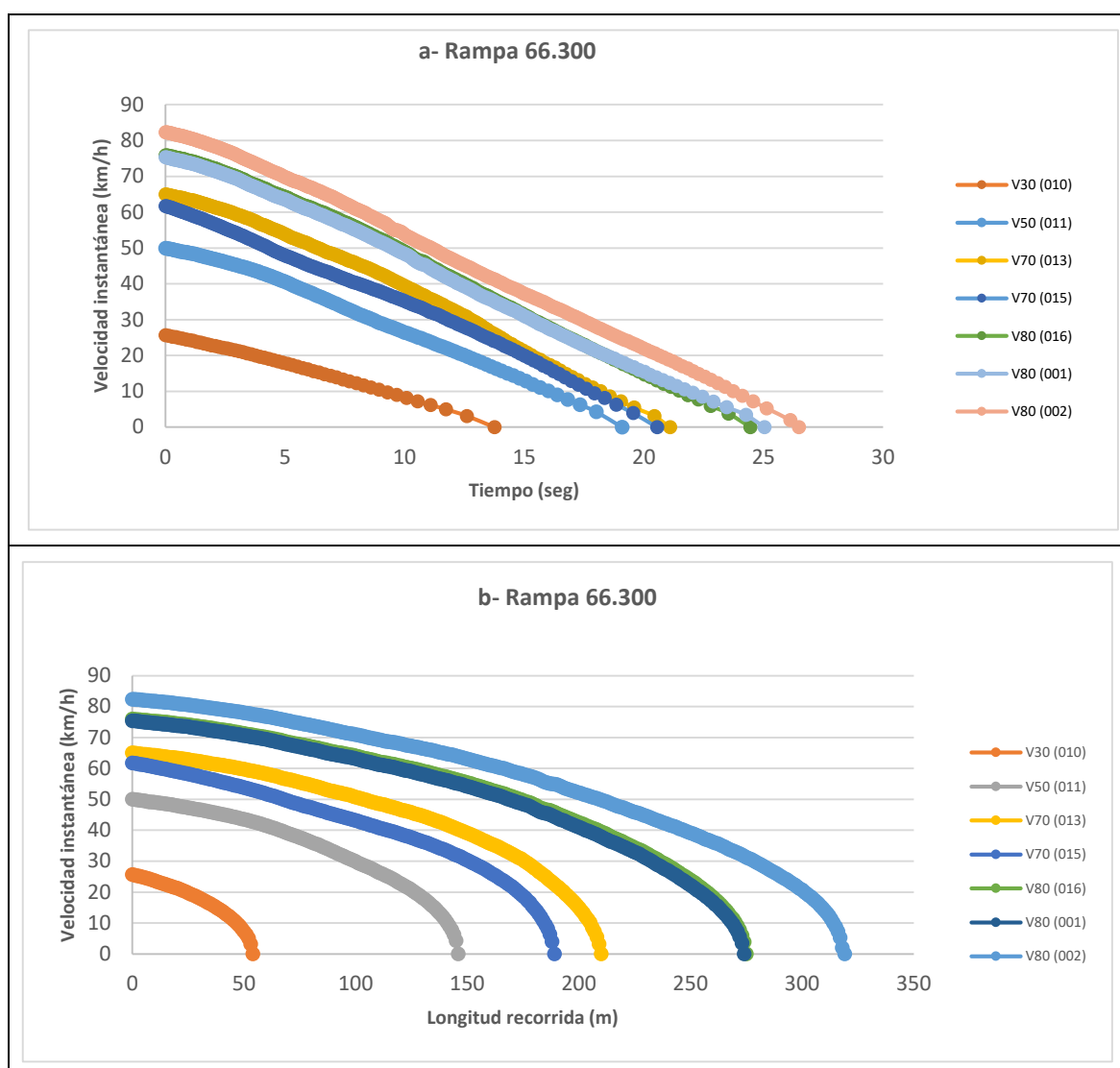


Figura 11 (a) y (b): Comportamiento variables. Rampa 66.300

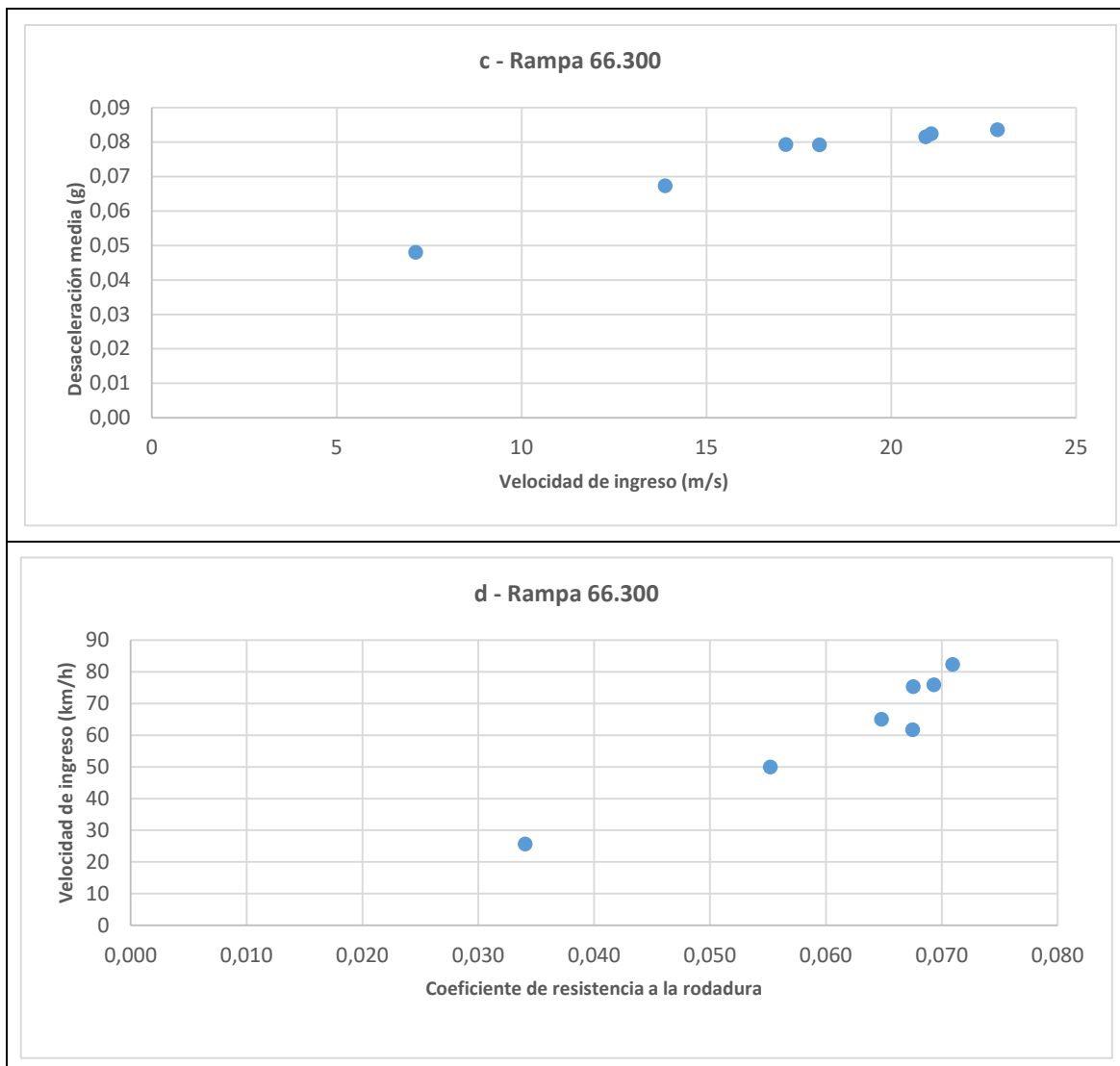


Figura 11 (c) y (d): Comportamiento variables. Rampa 66.300

6.2.1. Velocidad instantánea vs Tiempo

En la Figura 11- a puede advertirse como varía la velocidad instantánea en función del tiempo transcurrido. El camión, ingresando a 30 km/h requiere 13,75 seg. para detener su movimiento, en la prueba realizada a 50 km/h, el tiempo transcurrido fue de 19,08 seg., para



las pruebas realizadas a 70 km/h el tiempo promedio transcurrido fue de 20,82 seg. y para las pruebas realizadas a 80 km/h el tiempo promedio transcurrido fue de 25,32 seg.

Se observa una tendencia de tipo lineal, esto se debe a que esta rampa es de tipo gravitacional y no tiene un lecho de material granular, es decir, la desaceleración en cada caso es prácticamente constante, ya que el material no contribuye sustancialmente a frenar el vehículo, sólo se va frenando por efecto de la gravedad en una pendiente ascendente.

6.2.2. Velocidad instantánea vs Longitud recorrida

En la Figura 11- b se muestra como varía la longitud recorrida en función de la velocidad instantánea para cada una de las pruebas realizadas. Se observa una tendencia a que la velocidad tenga mayor variación al final.

6.2.3. Velocidad de ingreso vs Desaceleración

El cálculo de la desaceleración media se realizó usando la ecuación (3). En la Figura 11- c se observa que a pesar de que la desaceleración media aumenta con la velocidad de ingreso, la tasa de crecimiento disminuye con el aumento de la velocidad de ingreso y parece estabilizarse para las velocidades más altas.



Tabla 15: Desaceleraciones pruebas Rampa 66.300

Velocidad de ingreso de archivo (km/h)	Velocidad de ingreso de archivo (m/s)	Desaceleración (g)
25,68	7,133	0.048
49,98	13,883	0.069
65,02	18,061	0.079
61,74	17,150	0.081
75,9	21,083	0.083
75,37	20,936	0.082
82,34	22,872	0.085

6.2.4. Velocidad de ingreso vs Coeficiente de Resistencia a la Rodadura

Para obtener el valor del coeficiente de resistencia a la rodadura (R) se realizó el cálculo para cada prueba a partir del modelo clásico (1). Puede observarse en la Tabla 16 que R es función de la velocidad de ingreso. El R adoptado es 0,07.

En la Figura 11- d se observa que R generalmente crece con la velocidad de ingreso. Los valores de R son mucho más bajos que los obtenidos en la Rampa 73.600 con material granular suelto en superficie.

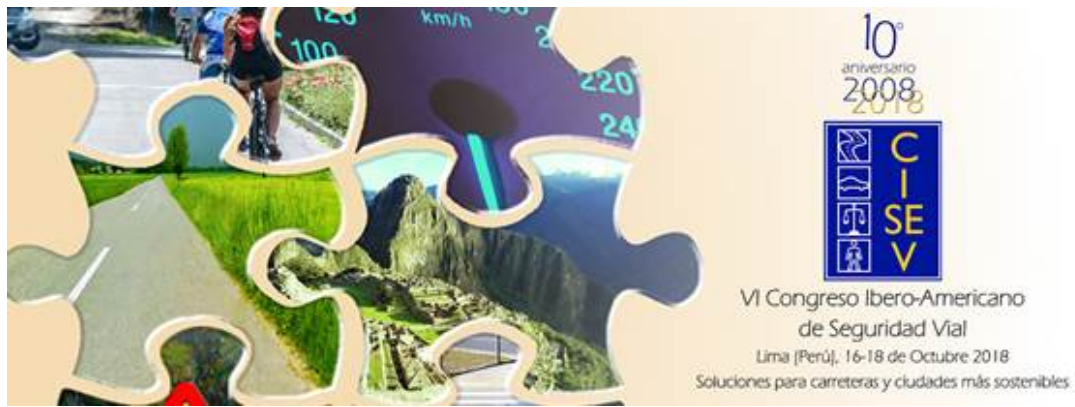


Tabla 16: Coeficiente de resistencia a la rodadura pruebas Rampa 66.300

Velocidad de ingreso de archivo (km/h)	Longitud de detención de archivo (m)	R
25,68	54	0.034
49,98	146	0.055
65,02	210	0.065
-61,74	189	0.067
75,9	275	0.069
75,37	274	0.068
82,34	319	0.071

6.3. Rampa 48.300

No se expone este análisis individual dado que solo se realizaron tres pruebas en esta rampa. Los gráficos no resultan representativos. Si se incluyó esta rampa para hacer comparaciones.

6.4. Rampas 73.600 – 66.300 – 48.300

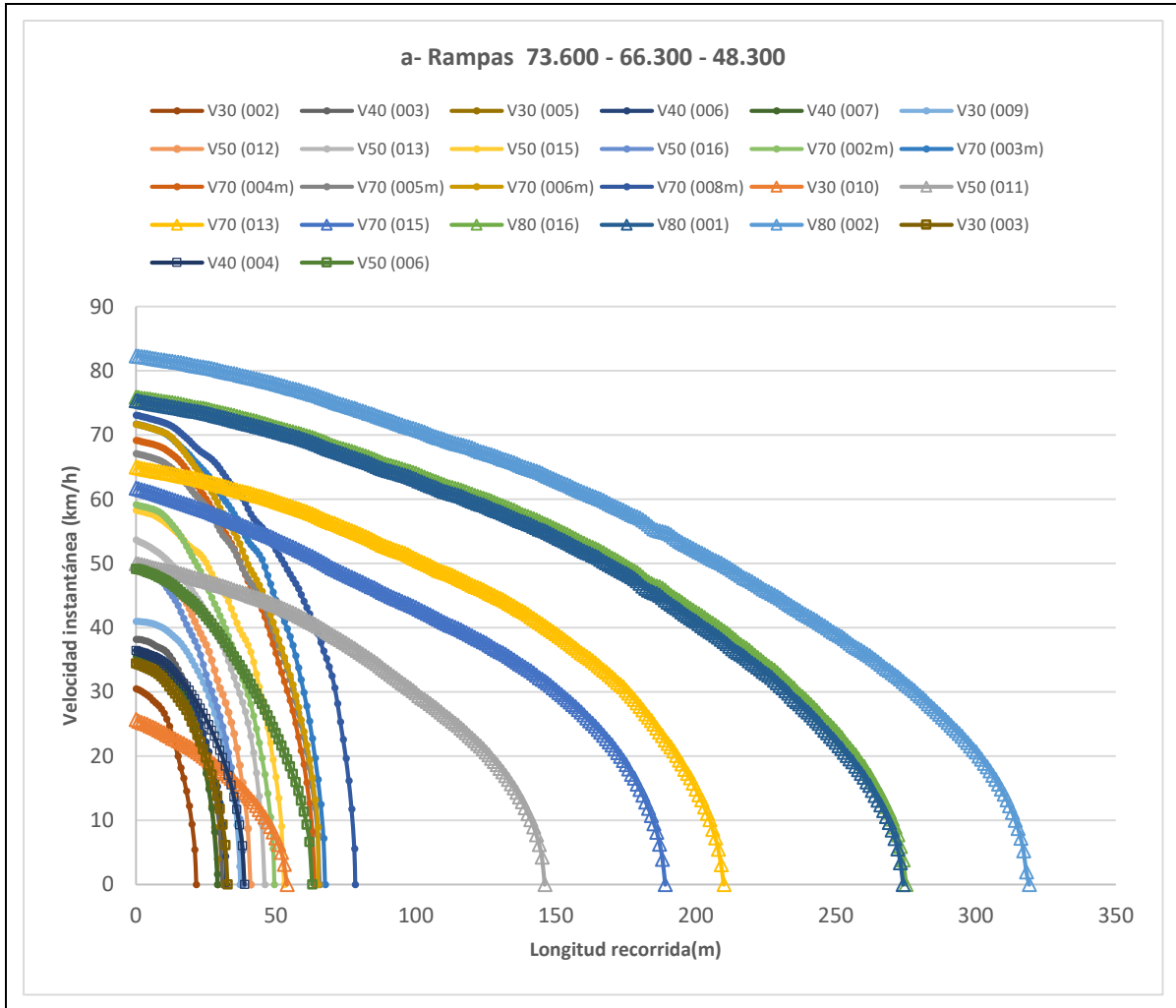


Figura 12 (a): Gráficos Rampas 73.600-66.300-48.300

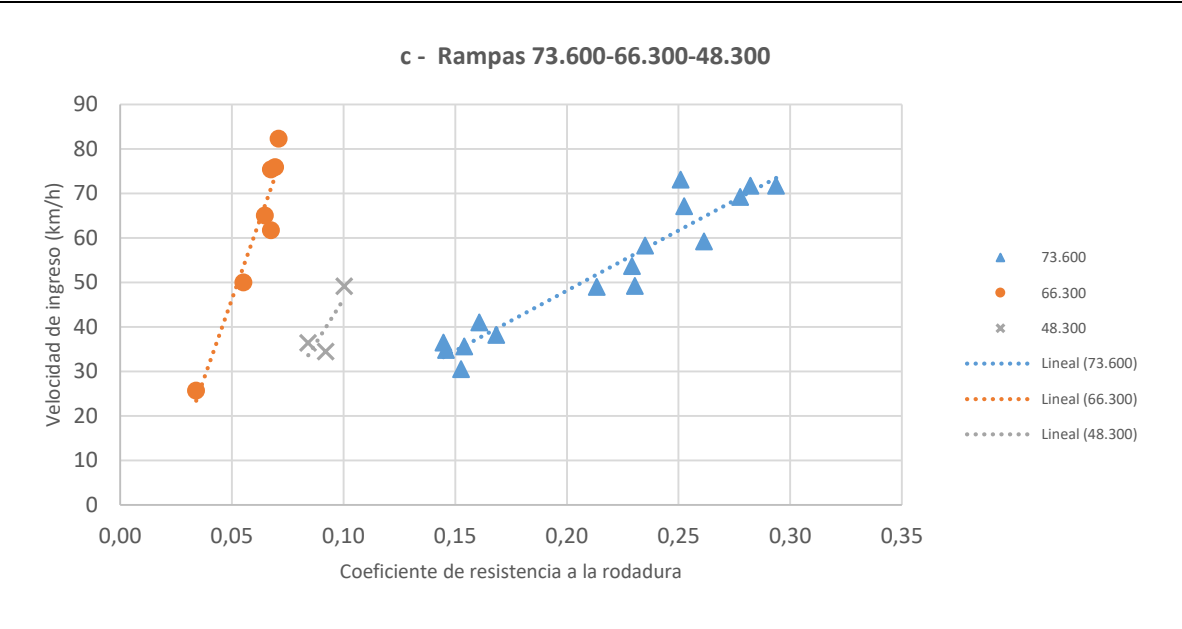
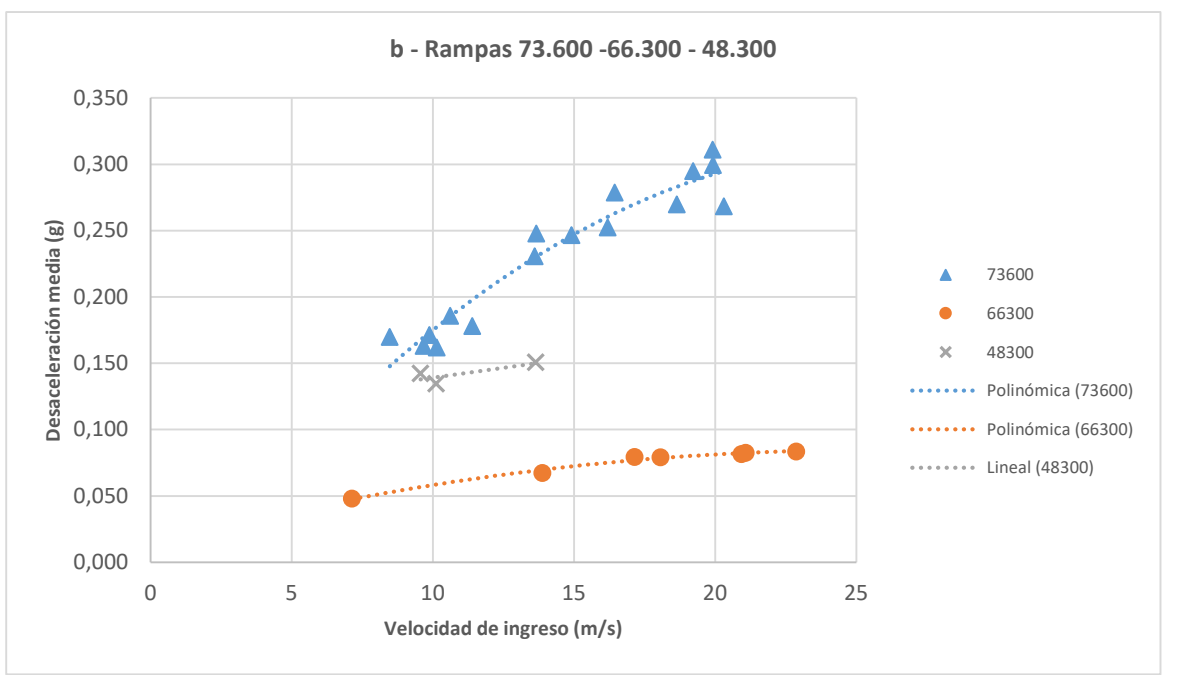
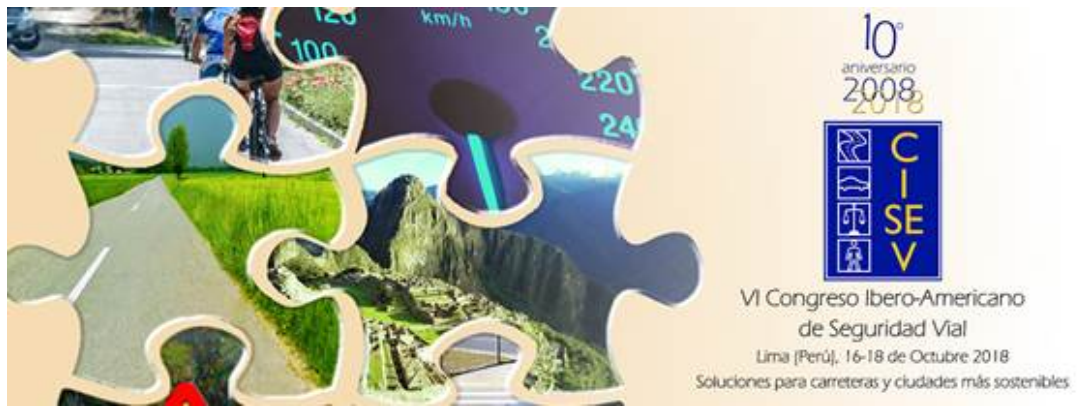


Figura 12-(b) a 12-(c): Gráficos Rampas 73.600-66.300-48.300



6.4.1. Velocidad instantánea vs Longitud recorrida.

La Figura 12- a muestra la relación existente entre la velocidad instantánea y las longitudes recorridas para cada una de las tres rampas estudiadas. Claramente se observa que las dos rampas (73.600 y 48.300) que tienen un material granular en su superficie (lecho de frenado) provocan longitudes de detención inferiores a la rampa (66.300) que no tiene material granular en su superficie (gravitacional). Salvando las diferencias de pendientes que tienen las tres. Esto muestra la importancia de tener un material granular en su superficie.

6.4.2. Velocidad de ingreso vs Desaceleración

La Figura 12- b muestra la relación existente entre la velocidad de ingreso y la desaceleración media producida en la totalidad de las pruebas realizadas. El gráfico permite apreciar el efecto que provoca el material granular sobre la superficie de la rampa de escape. Aquellas que tienen material sobre su superficie provocan desaceleraciones claramente superiores a aquellas que no tienen material sobre su superficie. También se observa que la desaceleración es función de la velocidad de ingreso a la rampa.

6.4.3. Velocidad de ingreso vs Coeficiente de Resistencia a la Rodadura

La Figura 12- c muestra todas las pruebas realizadas. La diferencia entre las pendientes de las líneas de regresión de cada rampa indica la relación entre el coeficiente de resistencia a la rodadura y la velocidad. El material de la rampa 66.300 es menos sensitivo a la velocidad que el material de la rampa 73.600 y que el de la rampa 48.300.

7. OBTENCIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Debido a que no pudieron realizarse todas las pruebas programadas la matriz factorial quedó desbalanceada. Por esta razón se aborda el análisis del problema considerando una sola



rampa, la 73.600, donde la longitud depende solamente de la velocidad y del mantenimiento por lo tanto se propone un ajuste de modelos estadísticos exclusivamente sobre la rampa 73.600. Las rampas 66.300 y 48.300 no se tuvieron en cuenta en el análisis dado que el número de pruebas realizadas es insuficiente para un análisis estadístico.

7.1. Calidad de los modelos

La calidad de los modelos se evaluó teniendo en cuenta el análisis de regresión y el análisis residual.

En el análisis de regresión se observó la significancia de los coeficientes del modelo (analizando el valor p que es la probabilidad de mantener erróneamente una variable explicativa en el modelo, por lo tanto esta probabilidad debe ser pequeña $p \leq 5\%$) y el valor de coeficiente de determinación R^2 (medida de la calidad del ajuste del modelo).

El análisis residual tiene como objetivo verificar los supuestos de los errores de modelo. La verificación de los supuestos puede analizarse con los gráficos de: probabilidad normal, residuos estandarizados versus valor ajustado y residuos estandarizados versus orden de observación.

7.2. Modelos formulados. Resumen

El análisis de las variables lleva al ajuste de modelos estadísticos considerando diferentes situaciones:

- Sin tener en cuenta la variable mantenimiento (16 pruebas).
- Teniendo en cuenta el mantenimiento, estado Sin Ahuellar (8 pruebas).
- Teniendo en cuenta el mantenimiento, estado Ahuellado (8 pruebas).

En la Tabla 17 puede encontrarse un resumen de los modelos:



Tabla 17: Ecuaciones de regresión para longitudes de detención

	Modelo	Ecuación	R²	Tamaño de muestra
1	Lineal	$L = -11,198 + 1,06 V$	96,01	16
2	Polinómico de segundo orden	$L = -14,3 + 0,06 V + 0,00991 V^2$	96,86	16
3	Lineal - Estado Sin Ahuellar	$L = -8,48 + 1,02 V$	98,49	8
4	Lineal - Estado Ahuellado	$L = -12,35 + 1,159 V$	96,53	8
5	Polinómico de segundo orden - Estado Sin Ahuellar	$L = 6,9 + 0,359 V + 0,0064 V^2$	98,97	8
6	Polinómico de segundo orden - Estado Ahuellado	$L = 30,2 - 0,511 V + 0,0153 V^2$	97,87	8
7	Lineal (Velocidad ²)	$L = 15,742 + 0,01 V^2$	96,86	16
8	Lineal - Estado Sin Ahuellar (Velocidad ²)	$L = 15,469 + 0,010 V^2$	98,83	8
9	Lineal - Estado Ahuellado (Velocidad ²)	$L = 17,080 + 0,011 V^2$	97,74	8
10	Lineal (2 Factores) Velocidad ² - Mantenimiento	$L = 14,39 + 3,94 M + 0,0102 V^2$	98,24	16

L: Longitud de detención

V: Velocidad de ingreso

M: Mantenimiento Estado Sin Ahuellar: M= 0 Estado Ahuellado: M= 1

7.3. Modelo definitivo propuesto

Después de analizar todos los modelos formulados se concluyó que el más adecuado es el modelo lineal de dos factores, dado que incluye los dos factores de interés, sus coeficientes



son estadísticamente significativos al 95% de confianza y su R^2 es alto. Se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18: Ecuaciones de regresión modelos elegidos

Modelo	Ecuación	R^2	Tamaño de muestra
Lineal – 2 factores	$L(m) = 14,39 + 3,94 M + 0,0102 V^2(km/h)$	98,24	16

Este modelo tiene la limitación de haber sido obtenido para un estado de carga "vacío", un valor constante de pendiente y un sólo tipo de material. La pendiente longitudinal no pudo evaluarse como variable del análisis dado que si bien se ensayaron tres rampas con pendientes distintas, al momento de modelar solo pudieron usarse los datos de una sola de las rampas ensayadas. Por ese motivo es que el modelo queda limitado a un valor de pendiente fijo.

Este modelo es más adecuado para ser aplicado en forma general al funcionamiento del lecho en cualquier situación de mantenimiento, dado que incluye a los dos factores estudiados: Velocidad de Ingreso y Mantenimiento.

7.3.1. Modelo lineal dos factores (Velocidad²)

Tamaño muestra=16 pruebas

La variable velocidad se ingresó con su valor elevado a la segunda potencia.

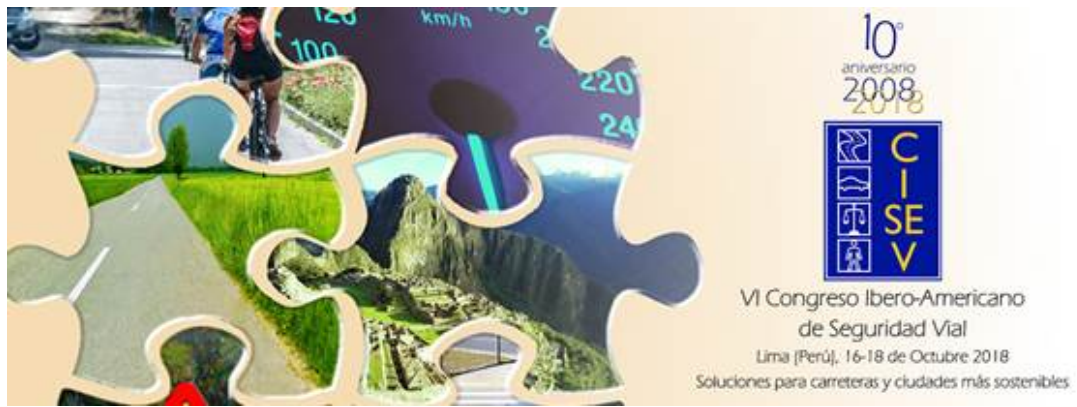


Tabla 19: Regresión modelo lineal dos factores.

L = 14,39 + 3,94 M + 0,0102 V ²				
Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p
Constante	14,39	1,38	10,45	0,00
Mantenimiento	3,94	1,23	3,19	0,01
Velocidad ²	0,01	0,00	25,85	0,00
S = 2,43				
R ² = 98,23%				

Gráfico	Interpretación
<p>Gráfica de probabilidad normal</p>	<p>La observación del gráfico QQPlot indica normalidad de los errores.</p>
<p>vs. ajustes</p>	<p>La gráfica errores estandarizados versus valor ajustado indica varianza constante.</p>

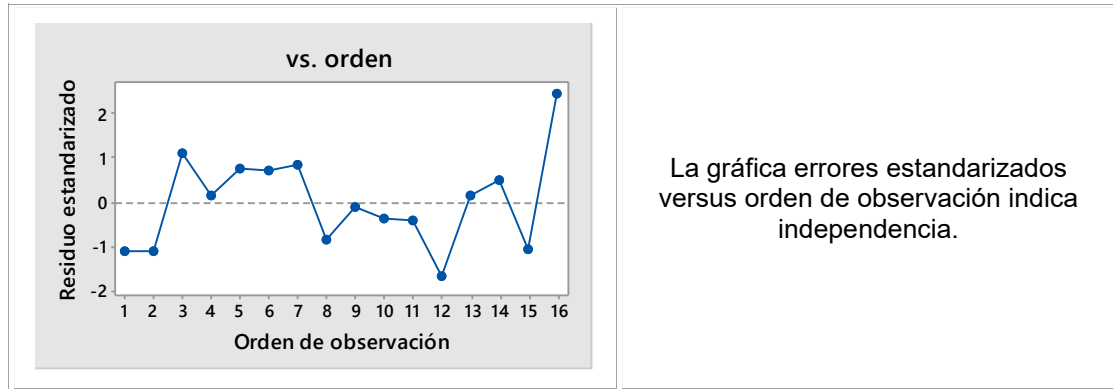
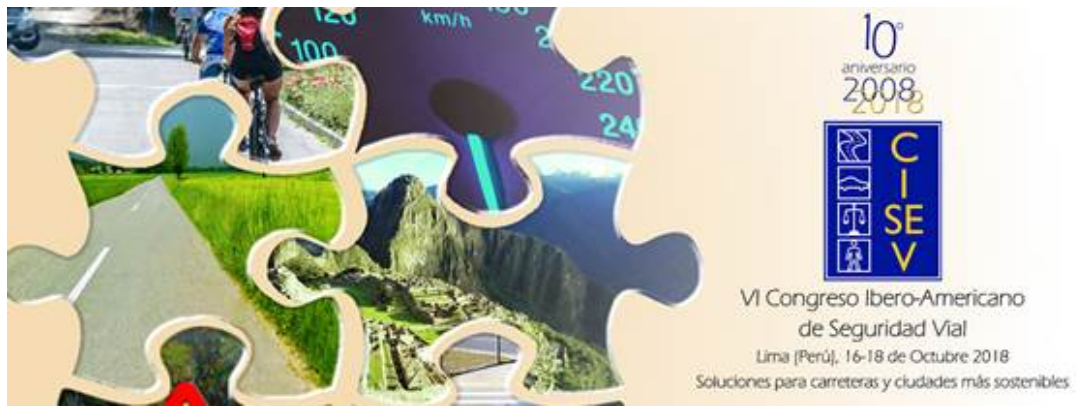


Figura 13: Análisis residual modelo lineal dos factores (Velocidad²)

Los valores p de los coeficientes del modelo indican que los coeficientes son significativos. El valor del coeficiente de determinación es alto. Del análisis de regresión y residual puede concluirse que este modelo puede considerarse **ADECUADO**.

7.4. Comparación de modelos

7.4.1. Modelo propuesto y pruebas a escala real

Estado Sin Ahuellar

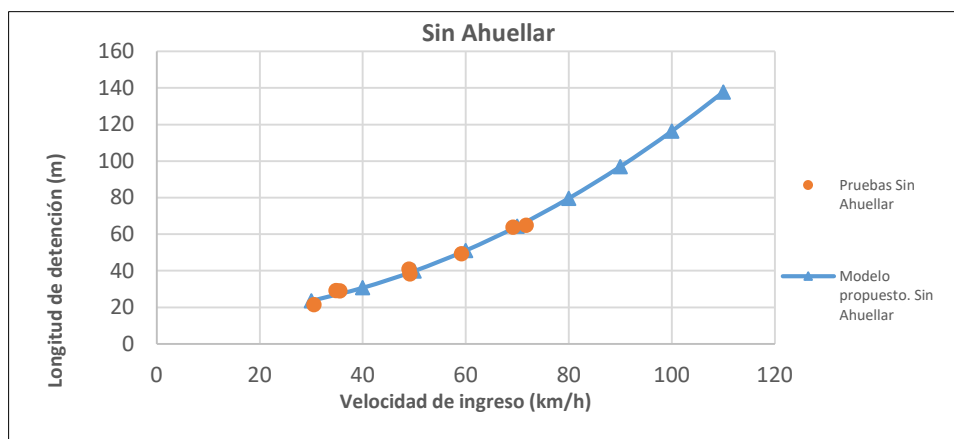


Figura 14: Modelo propuesto. Estado Sin Ahuellar - pruebas escala real



Estado Ahuellado

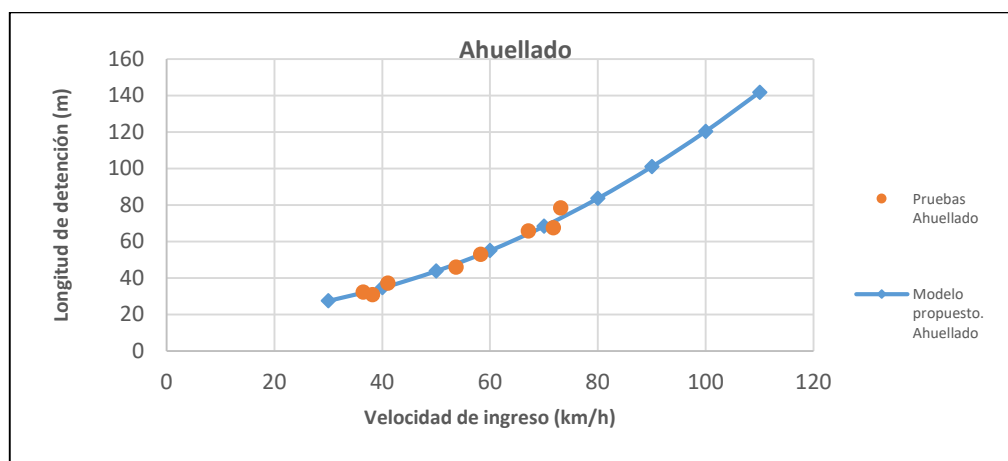


Figura 15: Modelo propuesto. Estado Sin Ahuellar - pruebas escala real

En las Figuras 14 y 15 puede observarse las pruebas de la Rampa 73.600. Se superpone el modelo propuesto (obtenido con estas pruebas) para un intervalo de velocidades de ingreso entre los 30 y los 120 km/h. Puede advertirse un muy buen ajuste.

7.4.2. Comparación entre modelo propuesto y modelo clásico

Sin Ahuellar

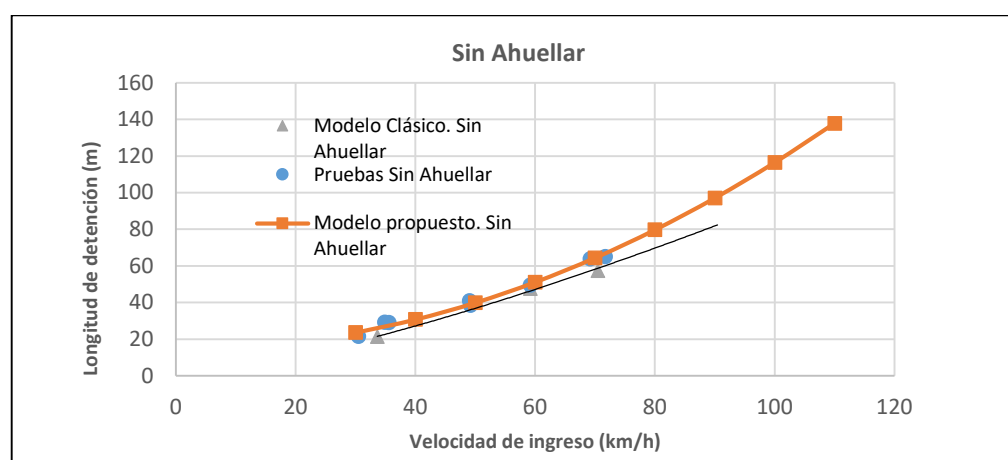


Figura 16: Modelo propuesto-Pruebas escala real. Estado Sin Ahuellar



Ahuellado

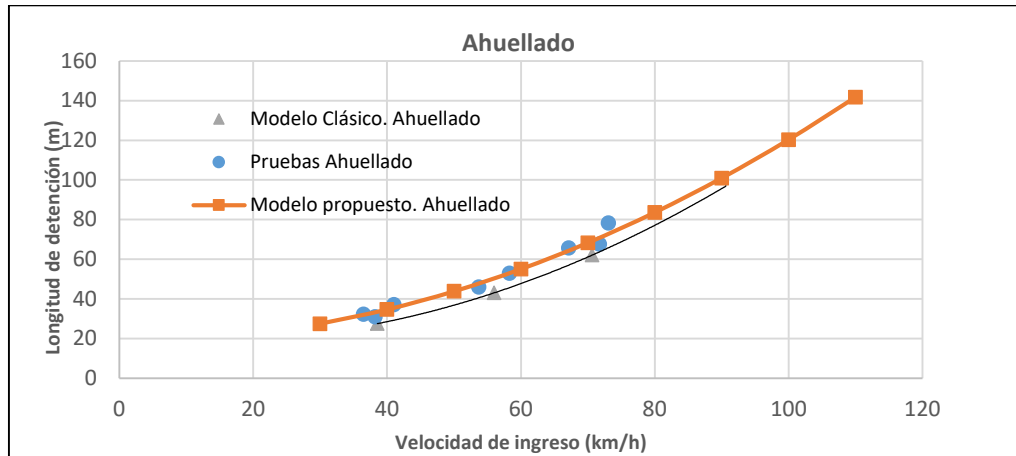


Figura 17: Modelo propuesto-Pruebas escala real. Estado Ahuellado

En las Figuras 16 y 17 puede apreciarse que el modelo clásico arroja longitudes de detención inferiores a las calculadas con el modelo propuesto, tanto para el estado Sin Ahuellar como para el estado Ahuellado.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

Con la finalidad de estudiar el comportamiento de rampas de escape se llevó a cabo esta investigación, que involucró la elaboración de una metodología para la ejecución de una serie de pruebas a escala real. La metodología resultó exitosa pues se pudo determinar que:

- Una rampa con un material granular en su superficie provoca longitudes de detención inferiores a las que provoca una rampa gravitacional. Este resultado está en acuerdo con lo antecedentes, y también demuestran la importancia de tener un material granular en su superficie.
- El coeficiente de resistencia a la rodadura generalmente crece con la velocidad de entrada, su tasa de crecimiento es función del material, para lechos de frenado la



tasa es más suave que para una rampa gravitacional cuya tasa de crecimiento es mayor.

- El mantenimiento es un factor muy influyente sobre la longitud de detención. Los ensayos demuestran que cuando el material está Ahuellado aumenta la longitud de detención en aproximadamente un 24%. La diferencia es estadísticamente significativa.
- La tasa de desaceleración es función de la velocidad de ingreso, a velocidades bajas su tasa de crecimiento es más suave, a velocidades más altas su tasa de crecimiento disminuye. Las tasas de desaceleraciones más altas medidas en esta investigación fueron de 0,3g. Este valor está dentro del rango de los valores obtenidos en otras pruebas a escala real mencionadas en los antecedentes.
- La tasa de desaceleración es función del material: mientras el coeficiente de resistencia a la rodadura es más alto produce desaceleraciones mayores.
- Las pruebas a escala real pudieron realizarse con el instrumental, el vehículo, el personal y las consideraciones de seguridad previstas.
- El instrumental permitió determinar el desplazamiento del vehículo, su velocidad en todo momento, y luego poder realizar el procesamiento de datos, su análisis y posterior modelación.
- Los materiales empleados en las rampas pudieron caracterizarse con los ensayos y se los comparó con las recomendaciones para su utilización. Aunque los resultados de los ensayos del material en la Rampa 73.600 no se ajustaban estrictamente a los límites de las recomendaciones, el material resultó adecuado pues logró detener al vehículo. Por esto es importante tener en cuenta que es posible utilizar otros materiales diferentes a los normalmente propuestos. Sobre todo considerando que no siempre se puede contar con la provisión de los materiales recomendados, ya sea por cuestiones de lugar o de costos.
- El camión sobre la rampa se detuvo pero no se enterró. Una vez lograda la detención el conductor tuvo que aplicar los frenos para que no se inicie el retroceso del camión.



- Hay dos probables razones por la cual el camión no se enterraba: el material no era redondeado sino que provenía de la trituración de la cantera, y el espesor del lecho era insuficiente (50 cm según lo establecido para su construcción).
- En medida que la velocidad de ingreso se incrementaba, la longitud de detención también aumentaba. Lo cual está de acuerdo con los antecedentes.
- Los datos observados permitieron construir un modelo de funcionamiento de un lecho de frenado que incluye los factores mantenimiento y velocidad. Los coeficientes del modelo resultaron significativos.
- El modelo calculado con los datos observados arroja longitudes de detención mayores a las calculadas con el modelo clásico en el rango de 30 a 70 km/h.

8.2. Recomendaciones

- Estudiar el efecto de distintas pendientes longitudinales dado que los datos obtenidos de la rampa con mayor pendiente fueron insuficientes. Estos mostraban que las longitudes de detención eran menores. Por lo tanto es aconsejable hacer futuras pruebas con distintas pendientes longitudinales.
- Estudiar el efecto de mayores espesores del material del lecho dado que el camión se detuvo pero no se enterró.
- Realizar pruebas con estado de carga "cargado", las pruebas fueron ejecutadas con el camión vacío por motivos de seguridad.
- Realizar futuras pruebas a velocidades más altas. Por seguridad no se hicieron pruebas a velocidades superiores a los 70km/h.
- Hacer pruebas con distintos tipos de vehículos. En esta investigación se usó un solo tipo de vehículo.
- Se considera adecuado utilizar otros materiales diferentes a los normalmente propuestos. Es decir al realizar ensayos de laboratorio (Granulometrías, Desgaste Los Ángeles, Elongación y Lajosidad) los resultados podrían estar ligeramente fuera de los



límites propuestos. No obstante su aptitud debiera estar sustentada finalmente mediante las pruebas a escala real.

- El comportamiento del material de la Rampa 73.600 podría mejorarse sacando la fracción fina, eliminando el retenido en tamiz 1^{1/2}" y aumentando su espesor, dado que el vehículo no se enterró al momento de la prueba.

9. BIBLIOGRAFÍA

AASHTO. (2010). *A policy on geometric design of highway and street*. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Design Manual for Roads and Bridges. Volume 6 Section 3. TA 57/87. (1989). Reino Unido.

DNV. (2010). *Actualización de las Normas de Diseño Geométrico de Carreteras (aprobadas pero no vigentes)*. Buenos Aires.

DNV. (2013). Análisis mecánico de materiales granulares.VN-E7-65. En *Normas de Ensayo de la Dirección Nacional de Vialidad* (págs. 56-63). Buenos Aires.

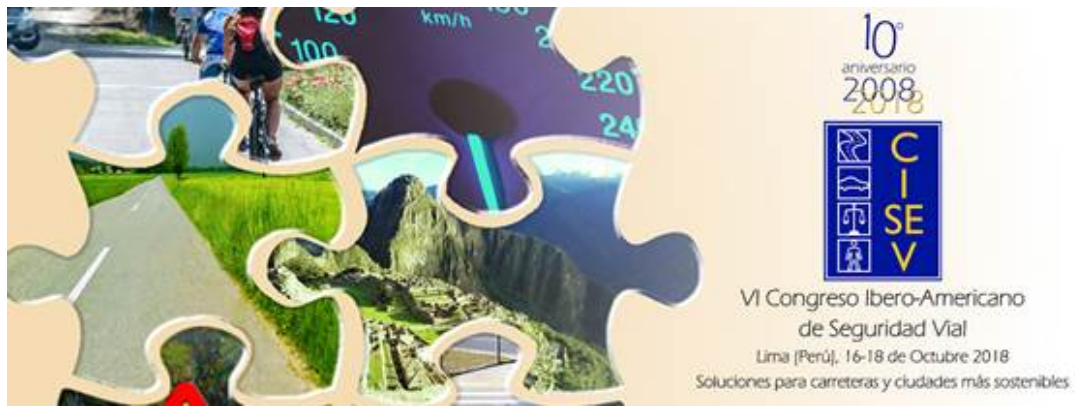
DNV. (2013). Determinación de la lajosidad y elongación en agregados. VN-E38-86. En *Normas de Ensayos de la Dirección nacional de Vialidad* (págs. 188-192). Buenos Aires.

Dwight Metcalf, J. Z. (1992). *Analysis of Arizona arrestor bed performance. Report N°:FHWA-AZ- SP-9204*. Arizona Transportation Research Center.

Echaveguren, T. (2011). *Diseño Vial Avanzado. Apuntes de Clase*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil.

Geometric Design Guidelines – South African National Roads Agency Limited. (2010). Sudáfrica.

Instrucción de Carreteras. Norma 3.1 - I.C.: Trazado. (1999). España.: Ministerio de Fomento de España. Dirección General de Carreteras.



IRAM. (1975). *Determinación de la resistencia a la fragmentación por el método "Los Ángeles"*. IRAM 1532. Buenos Aires: Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.

Manual de Carreteras de Chile. MOP. (2014). Santiago de Chile: MOP - DGOP - Dirección de Vialidad - Chile.

Norma Oficial Mexicana NOM-036-SCT2. Rampas de emergencia para frenado en carreteras. (2009). México D.F.