Escuela Politécnica Superior

Departamento de Ingeniería Mecánica

Grado en Ingeniería Mecánica

Curso 2019-2020

Trabajo Fin de Grado

Análisis del contacto rueda-carril aplicando la teoría simplificada y la exacta

Autor

David Viaji Pérez

Tutores

Dr. Alejandro Bustos Caballero

Dr. Higinio Rubio Alonso

Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada

Título: ANÁLISIS DEL CONTACTO RUEDA-CARRIL APLICANDO LA TEORÍA SIMPLIFICADA Y LA EXACTA.

Autor: David Viaji Pérez.

Tutor: Alejandro Bustos Caballero.

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Grado el día ___ de _____ de 20___ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de: _____

SECRETARIO VOCAL PRESIDENTE

Agradecimientos

Es difícil condensar en unas líneas recordar a todas las personas que me han acompañado en el inicio de mi no-madurez adulta, por tanto invito a toda persona que no sea nombrada y que se considere digna, a sentirse aludida por estos agradecimientos.

En primer lugar quiero agradecer el esfuerzo desempeñado a dos de los mejores profesionales del equipo docente de la Universidad Carlos III de Madrid que he tenido el placer de conocer; Alejandro e Higinio. Personas con una calidad humana y profesional de la que no es tan común encontrarse en estos tiempos. Ha sido todo un honor ser tutelado bajo su responsabilidad.

En segundo lugar esto va por mi familia; a los que están y a los que desgraciadamente no se lo puedo contar cara cara. Espero que estéis orgullosos de ver como por fin el pequeño ha acabado la carrera.

En último y no por ello menos importante lugar, dedico este logro al verdadero tesoro que me llevo de esta etapa, cuyo valor es incuantificable para mí puesto que gracias a ellos soy una persona completamente diferente a aquella que entró en primero de carrera. Mi conciencia tiene dos rostros que se llaman Ana y Alejandro, de estos aprendo en cada buen o malo momento el valor de la amistad.

Mención al *Kurt Cobain de los Grupos* y sus locos momentos, a Irene y su ayuda sin la cual igual no estaba escribiendo esto, a la falta de aparcamientos en el campus y al resto de sitios que han puesto sabor a mi vida universitaria todos estos años: la biblio de humanidades, el spa, cierto callejón donde salvas convocatorias de junio, las copas de la rusa y su terraza, el *Dealz*, los pisos francos de Claudia, el combo Chupi-Garaje y las incontables paradas tácticas.

A todos vosotros, gracias.

Resumen del proyecto

El presente trabajo de fin de grado tiene como principal objetivo el análisis del contacto rueda-carril aplicando la teoría exacta y dos teorías derivadas, con una finalidad comparativa para averiguar sus fortalezas e inconvenientes dependiendo del tipo de variable que se quiera parametrizar.

Previo al análisis, se presentan una serie de conceptos teóricos donde se explica la base del problema del contacto rueda-carril así como de las tres teorías que se usarán posteriormente en un software de sistemas multicuerpo.

Universal Mechanism es el programa que se usará para realizar un modelo simplificado de un caso real: un vehículo ferroviario compuesto de dos bogies que circulará en un rango de velocidades por un tramo curvo a derechas de diferentes radios longitud.

Este modelo se simulará mediante las tres teorías de contacto con el fin de obtener suficiente información de las variables más significativas del contacto rueda-carril que sirvan para su exportación a una hoja de cálculo que permita mostrar una serie de comparativas de forma gráfica y numérica.

Palabras clave: CONTACT, FASTSIM, Kik-Piotrowski, Universal Mechanism, contacto rueda-carril.

Abstract

The main objective of this final degree project is the analysis of the wheel-rail contact by the use of the exact contact theory and two other theories derived from the first one, with the comparative purpose of finding out their strenghts and disadvantages, depending of the type of variable it is needed to parameterize.

Preceding the simulation, a series of theoretical concepts are introduced for the explanation of the wheel-rail problem, in addition to the three theories that will be used hereinafter in a multibody systems software.

Universal Mechanism will be the program used to make a simplified model of an hypothetical real case: a railway vehicle composed of a pair of bogies that will run with a wide range of speed, through a curved section that is pointed to the right with different lenght radii.

This model will be simulated by the three contact theories presented, in order to obtain sufficient information of the most significant variables of the wheel-rail contact that will be exported to a spreadsheet which allows to show a series of graphical and numerical comparatives.

Key words: CONTACT, FASTSIM, Kik-Piotrowski, Universal Mechanism, Wheel-rail contact.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. Ámbito y motivación 1
1.2. Objetivos 3
2. DESCRIPCIÓN DEL CONTACTO RUEDA CARRIL 4
2.1. Contacto Hertziano 4
2.1.1. Relación de los coeficientes A y B 7
2.1.2. Cálculo de los semiejes de la superficie de contacto 7
2.1.3. Presión de contacto 9
2.2. Utilización del contacto en el caso ferroviario 9
2.3. Contacto No-Hertziano 11
2.3.1. Teoría de Kalker para modelos no-Hertzianos 11
2.4. Resolución del problema del contacto 15
2.4.1. Mecánica continua 17
2.4.2. Aproximación de los semiespacios 17
2.4.3. Resolución mediante CONTACT 19
2.4.4. Resolución mediante el método simplificado de Kalker (FASTSIM) 20
2.4.4. Resolución mediante el método Kik-Piotrowski 24
2.5. Irregularidades geométricas en el raíl 30
3. DESCRIPCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS EMPLEADAS 32
3.1. Universal Mechanism 32
3.1.1. Universal Mechanism Input 34
3.1.2. Universal Mechanism Simulation 34
3.1.3. Microsoft Excel 35
4. METODOLOGÍA 37
4.1. Antecedentes 37
4.2. Normativa 39
4.3. Planificación 41
4.4. Resultados esperados 42
5. DESARROLLO DEL PROYECTO Y RESULTADOS 43
5.1. Desarrollo del proyecto 43
5.2. Resultados 55
5.2.1. Evolución de los parámetros con el aumento del radio de la curva 58
5.2.2. Comparativa mediante los métodos de resolución 65
5.2.3. Coste computacional de las simulaciones 81

6. PRESUPUESTO Y ENTORNO SOCIOECONOMICO 83
7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS 85
7.1. Conclusiones 85
7.2. Trabajos futuros 87
8. REFERENCIAS 88
9. ANEXOS 91
9.1. Tablas del Anexo I 91
9.2. Graficas del anexo II 97
9.2. Gráficas del Anexo III 129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de la alta velocidad española en 2019 [3]. 1
Figura 2. Talgo Serie 112 con serigrafía AVLO [5]. 2
Figura 3. Zona de contacto hertziano [8]. 5
Figura 4. Contacto rueda-rail [9]. 6
Figura 5. Pendiente de la zona de contacto rail-rueda. 9
Figura 6. Curvatura longitudinal a partir del radio de curvatura. 11
Figura 7. Representación de la fuerza tangencial en un sistema rígido y en un sistema elástico. 12
Figura 8. Instrucción de pseudo-deslizamiento [12]. 13
Figura 9. Velocidades absolutas y angulares aplicadas en el contacto. 14
Figura 10. Geometrías del contacto raíl-rueda. Ctro: en términos indeformables. Dcha: en términos deformables. 15
Figura 11. Área de contacto temporal y la enumeración de sus elementos. 19
Figura 12. Área de contacto dividida según el método FASTSIM [11]. 22
Figura 13. Área de influencia del polo de giro [11]. 22
Figura 14. Método Kik-Piotrowski [15]. 24
Figura 15. Comparativa de área de contacto entre CONTACT y Kik-Piotrowski 28
Figura 16. Bosquejo de una irregularidad vertical en la vía. 30
Figura 17. Irregularidad horizontal en la vía. 31
Figura 18. Logotipo oficial del programa Universal Mechanism [17]. 32
Figura 19. Vista de la interfaz del módulo UM Input. 34
Figura 20. Interfaz de UM Simulation. 35
Figura 21. Ejemplo de tabla obtenida en Excel, en este caso muestra los valores pico en la presión en el contacto. 36
Figura 22. Integrantes del congreso celebrado en Manchester en junio de 1997 [23]. 38
Figura 23. Desglose de la nomenclatura aplicada a cada magnitud obtenida. 44
Figura 24. Variables recogidas con el selector. 44
Figura 25. Object Simulation Inspector. 45
Figura 26. Desglose de Rail/Wheel. 46
Figura 27. Vista semitransparente del modelo Vehículo 1. 47
Figura 28. Cambio de posición del contacto simulado por FASTSIM al entrar en curva. 48

Figura 29. Macrogeometría para el caso de una curva de 1000 metros de radio. 48
Figura 30. Leyenda de los parámetros de Macrogeometry [20]. 49
Figura 31. Vista aérea del trazado curvo con radio de 1000 metros. 51
Figura 32. Vista de Universal Mechanism con la irregularidad elegida cargada. 51
Figura 33. Vista gráfica de los valores de la irregularidad vertical en el carril izquierdo. 52
Figura 34. Perfil de rueda S-1002 [26]. 53
Figura 35. Perfil de la vía UIC-60 [27]. 53
Figura 36. FASTSIM y sus parámetros de contacto. 54
Figura 37. Elección de teorías de contacto para raíles inerciales. 55
Figura 38. Esquema seguido para la creación de las gráficas de datos. 56
Figura 39. Ejes cartesianos del vehículo 1. 57
Figura 40. Contacto rueda-carril del wheelset delantero para la velocidad crítica de 47,78 m/s en un tramo curvo de 500 metros de radio. 60
Figura 41. Superficies de contacto del wheelset delantero mediante FASTSIM. 68
Figura 42. Superficies de contacto del wheelset delantero mediante CONTACT. 69
Figura 43. Superficies de contacto del wheelset delantero mediante Kik-Piotrowski. 69
Figura 44. Comparativa gráfica de las superficies de contacto obtenidas mediante las diferentes teorías propuestas. CONTACT (morado), FASTSIM (amarillo) y Kik-Piotrowski (marrón). 70
Figura 45. Sentido de los pseudo-deslizamientos y sus fuerzas [20]. 79
Figura 46. Estadísticas de procesado mediante CONTACT. 81
Figura 47. Estadísticas de procesado mediante FASTSIM. 82
Figura 48. Estadísticas de procesado mediante Kik-Piotrowski. 82
Figura 49. Tiempo de dedicación empleado en la realización del proyecto. 83

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Evolución de la superficie 1_1L contra la velocidad mediante FASTSIM. 58
Gráfica 2. Evolución de la superficie 1_1R contra la velocidad mediante FASTSIM. 59
Gráfica 3. Evolución del área en una curva de radio 1000 m para una 60 m/s (FASTSIM). 59
Gráfica 4. Evolución de la normal para 1_1L frente a la velocidad. 61
Gráfica 5. Evolución de la normal para 1_1R frente a la velocidad. 61
Gráfica 6. Evolución de la presión para 1_1L frente a la velocidad. 62
Gráfica 7. Evolución de la presión para 1_1R frente a la velocidad. 62
Gráfica 8. Evolución del pseudo-deslizamiento X para 1_1L frente a la velocidad. 63
Gráfica 9. Evolución del pseudo-deslizamiento X para 1_1R frente a la velocidad. 63
Gráfica 10. Evolución del pseudo-deslizamiento Y para 1_1L frente a la velocidad. 64
Gráfica 11. Evolución del pseudo-deslizamiento Y para 1_1R frente a la velocidad. 64
Gráfica 12. Comparativa del área de contacto 1_1L para un radio de 1000 m. 65
Gráfica 13. Comparativa del área de contacto 1_1L para un radio de 3000 m. 66
Gráfica 14. Comparativa del área de contacto 1_1R para un radio de 1000 m. 67
Gráfica 15. Comparativa del área de contacto 1_1R para un radio de 3000 m. 68
Gráfica 16. Comparativa de la fuerza normal 1_1L para un radio de 1000 m. 71
Gráfica 17. Comparativa de la fuerza normal 1_1R para un radio de 1000 m. 71
Gráfica 18. Comparativa de la fuerza normal 1_1L para un radio de 3000 m. 72
Gráfica 19. Comparativa de la presión máxima 1_1L para un radio de 1000 m. 73
Gráfica 20. Comparativa de la presión máxima 1_1R para un radio de 1000 m. 73
Gráfica 21. Comparativa del spin en 1_1L para un radio de 1000 m. 74
Gráfica 22. Comparativa del spin en 1_RL para un radio de 1000 m. 74
Gráfica 23.Comparativa del spin en 1_1R para un radio de 3000 m. 75
Gráfica 24. Comparativa del pseudo-deslizamiento X en 1_1L para un radio de 1000 m. 76
Gráfica 25. Comparativa del pseudo-deslizamiento X en 1_1R para un radio de 1000 m. 76
Gráfica 26. Comparativa del pseudo-deslizamiento Y en 1_1L para un radio de 1000 m. 77
Gráfica 27. Comparativa del pseudo-deslizamiento Y en 1_1R para un radio de 1000 m. 77
Gráfica 28. Comparativa de la fuerza de pseudo-deslizamiento X en 1_1L para radio 1000 m. 78
Gráfica 29. Comparativa de la fuerza de pseudo-deslizamiento X en 1_1R para radio 1000 m. 78
Gráfica 30. Comparativa de la fuerza de pseudo-deslizamiento Y en 1_1L para radio 1000 m. 80
Gráfica 31. Comparativa de la fuerza de pseudo-deslizamiento Y en 1_1R para radio 1000 m. 80

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Ámbito y motivación

En estos inicios del siglo XXI, España como país plenamente integrado en una economía cada vez más globalizada y competitiva, es admirada y reconocida por la calidad y profesionalidad de sus profesionales. Esto ha permitido a las empresas españolas ganar contratos alrededor del mundo frente a otros competidores; véase el caso del AVE Meca-Medina por valor de 6.736 millones de euros [1],o la pugna del consorcio Navantia en el suministro a Australia de fragatas F-100 de última generación por valor de 22.500 millones de euros que finalmente fue descartado por motivos controvertidos [2].

En el ámbito ferroviario, nacionalmente se ha experimentado un desarrollo muy acentuado. La introducción de la alta velocidad con un primer tramo Madrid-Sevilla, la expansión de los trenes interurbanos y la búsqueda para facilitar nuevas formas de transporte han dinamizado el sector ferroviario español de una manera impensable a lo que cabría esperar hace un par de décadas.

Figura 1. Mapa de la alta velocidad española en 2019 [3].

A nivel estatal, el sector ferroviario factura una cifra aproximada de 6.500 millones de euros, donde 2.150 millones se destinan al transporte de bienes y pasajeros y los restantes 4.350 millones en la industria que engloba todo el ámbito ferroviario, donde casi el 57,5 % corresponde a la exportación internacional [4].

La maestría en materia ferroviaria ha alcanzado cotas de competencia que se necesitan cuidar y potenciar. Para ello se debe de impulsar desde el inicio de esta cadena profesional que son las universidades y centros formativos, una nueva generación de profesionales que dote a este sector de vigor para encadenar los retos incipientes de comienzo de siglo como la utilización de energías limpias o la democratización de las líneas de alta velocidad.

Figura 2. Talgo Serie 112 con serigrafía AVLO [5].

1.2. Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo final de carrera es el estudio de las fortalezas e inconvenientes de tres reconocidas teorías de contacto rueda-carril mediante diferentes simulaciones en un programa multicuerpo.

El modelaje del problema se realizará con la ayuda del programa de simulación Universal Mechanism y sus diversos módulos de trabajo. Además, se utilizará un *add-on* más especializado desarrollado por el matemático y físico neerlandés Joost Jacques Kalker, contribuyente esencial en la mecánica de contacto.

Para alcanzar este objetivo principal, previamente se deberán superar una serie de objetivos secundarios, a saber:

- El establecimiento teórico de las teorías de contacto a estudiar, exponiéndose las expresiones matemáticas pertinentes que faciliten la compresión y seguimiento de estas.

- La definición del vehículo ferroviario involucrado en los ensayos realizados en base a dimensiones acordes a un caso real, con la pretensión de obtener una serie de valores que puedan servir para otros proyectos.

- La identificación y selección de los parámetros exportados por el programa a comparar. A título de ejemplo: la superficie de contacto, la presión máxima, la fuerza normal en el punto de contacto o los diferentes pseudo-deslizamientos.

- La generación de la geometría de la vía para la que se pretenderá asemejar lo máximo posible con un caso real, estableciendo tramos curvo e irregularidades en el carril.

- Ejecución de las simulaciones particularizando a cada uno de los tres metros para un distinto rango de velocidades y de tamaños del tramo a ensayar.

- Procesado de gráficas mediante la exportación de los datos obtenidos a una hoja de cálculo con la intención de generar las gráficas pertinentes que permitan realizar el estudio comparativo.

Además de completar cada uno de los pasos previos necesarios para alcanzar la meta principal, se intentará obtener material gráfico que permita la divulgación de estas simulaciones con fines didácticos.

2. DESCRIPCIÓN DEL CONTACTO RUEDA CARRIL

Uno de los pilares que apuntala la seguridad de los pasajeros y bienes transportados desde el inicio en el que se comenzaron a utilizar los ferrocarriles, es el conjunto rueda-raíl.

Se tiende a pensar que el comportamiento entre el raíl y la rueda es un mero deslizamiento, pero para toda persona con conocimientos técnicos debido a la importancia en garantizar el mayor confort y seguridad a los pasajeros, piensa de una manera distinta: el punto de contacto entre la rueda del tren y la cabeza del carril es crítico debido la concentración de tensiones que se dan en él y que son convenientes de parametrizar.

En situaciones donde la tracción entre estos dos elementos es muy baja, las ruedas pueden llegar a patinar. Este contratiempo puede ocasionar situaciones en las que el vehículo no está bajo control, debido a que actualmente se utiliza el peso del vehículo ferroviario como adherente que evite el deslizamiento, como consecuencia del aumento de la potencia en las locomotoras, la adherencia; o más bien la pérdida de ella se convierte en uno de los grandes escollos en la evolución del diseño ferroviario [6].

Debido a la complejidad del problema de contacto, es importante aceptar como válidas una serie de simplificaciones que permiten facilitar la resolución de este.

2.1. Contacto Hertziano

Toda información referente al contacto hertziano está obtenida de la siguiente fuente [7].

Para este caso se toman en práctica una serie de consideraciones con el fin de facilitar la complejidad del cálculo.

Si el contacto entre dos cuerpos elásticos se realiza bajo estos términos:

- Comportamiento elástico.
- Curvatura constante dentro de la zona de contacto.
- Espacio semi-infinito.
- Curvatura del radio muy superior al área de contacto.

Hertz demuestra que el contacto entre dos superficies cumple las siguientes características:

- El área de contacto es una elipse.
- El área de contacto se considera plana.
- La presión de contacto tiene forma semi-elipsoide.

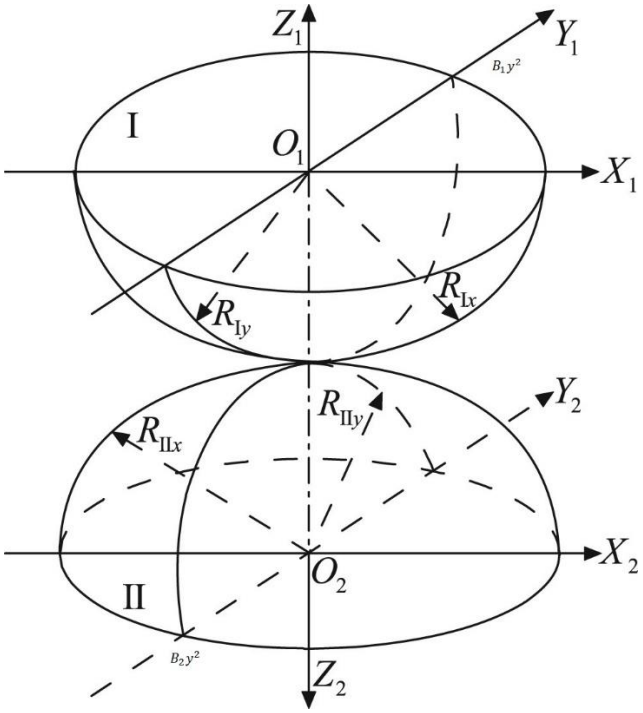


Figura 3. Zona de contacto hertziano [8].

Para el cálculo de las dimensiones del área de contacto y su presión análoga, se requiere obtener la curvatura principal de los dos semi-espacios. Particularizando en el campo ferroviario, las cuatro curvaturas principales se consideran en planos perpendiculares donde sus direcciones coinciden con los ejes principales de los planos XY.

Los dos cuerpos elásticos entrarán en contacto en un sólo punto donde su distancia sea nula. Cerca de este punto de contacto, las formas de las superficies se representan por los siguientes polinomios de segundo orden:

$$z_1 = A_1x^2 + B_1y^2 \quad (1)$$

$$z_2 = A_2x^2 + B_2y^2 \quad (2)$$

Los coeficientes A_1, B_1, A_2, B_2 se asumen como constantes en el punto de contacto y están conectados a las curvaturas principales por la *Ecuación 2.*

Particularizando en el ámbito ferroviario, las curvaturas principales de rueda y raíl se pueden expresar como:

Rueda:

$$\frac{d^2 z_1}{dx^2} = 2A_1 \approx \frac{1}{r_n} \tag{3}$$

$$\frac{d^2 z_1}{dy^2} = 2B_1 \approx \frac{1}{R_{wx}} \tag{4}$$

Raíl:

$$\frac{d^2 z_2}{dy^2} = 2B_2 \approx \frac{1}{R_{rx}} \tag{5}$$

Donde r_n es el radio normal de la rueda y R_{wx} y R_{rx} son los radios de curvatura de la rueda y del raíl respectivamente.

Nótese que en el caso del raíl, la curvatura A_2 se suele suprimir debido a que el raíl tiene forma recta; por ende, el valor de su radio es infinito.

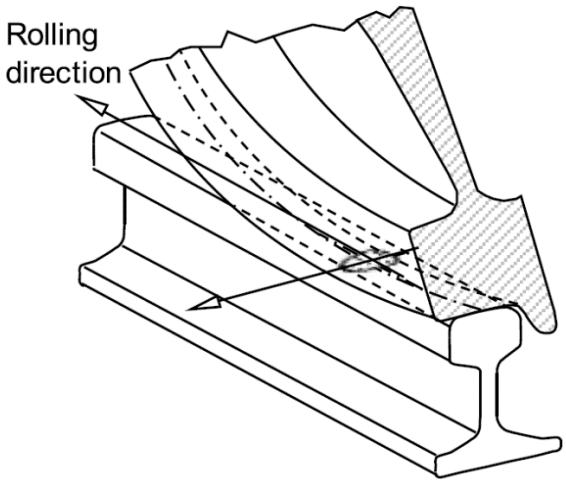


Figura 4. Contacto rueda-rail [9].

2.1.1. Relación de los coeficientes A y B

Antes de estar aplicada la carga, la distancia vertical relativa *d(x,y)* se puede escribir como:

$$z_1 + z_2 = d = Ax^2 + By^2 \tag{6}$$

Donde $A = \frac{1}{2r_n}$ y $B = \frac{1}{2}(\frac{1}{R_{wx}} + \frac{1}{R_{rx}})$. Siendo estos dos coeficientes positivos.

2.1.2. Cálculo de los semiejes de la superficie de contacto

Los semiejes de contacto son necesarios para describir el área de contacto. Se pueden definir como bajo estas ecuaciones siempre que *a* sea mayor que *b.*

$$a = m\left[\frac{3}{2}N\frac{1-\nu^2}{E}\frac{1}{A+B}\right]^{1/3} \tag{7}$$

$$b = n\left[\frac{3}{2}N\frac{1-\nu^2}{E}\frac{1}{A+B}\right]^{1/3} \tag{8}$$

$$\delta = r\left[\left(\frac{3}{2}N\frac{1-\nu^2}{E}\right)^2(A+B)\right]^{1/3} \tag{9}$$

Donde *E* corresponde con el módulo de Young, ν es el coeficiente de Poisson, *m, n, r* son coeficientes adimensionales cuyo valor se encuentran tabulados en la Tabla 1 dependiendo de la ratio *g=n/m* o del ángulo *Θ.*

El ángulo Θ se define como

$$\cos\Theta = \frac{|B-A|}{B+A} \tag{10}$$

Los valores *m, n, r* se encuentran en la siguiente tabla:

$\theta(deg)$	M	N	$\theta(deg)$	M	N
0.5	61.4	0.1018	40	2.136	0.567
1	36.89	0.1314	45	1.926	0.604
1.5	27.48	0.1522	50	1.754	0.641
2	22.26	0.1691	55	1.611	0.678
3	16.5	0.1964	60	1.4186	0.717
4	13.31	0.2188	65	1.378	0.759
6	9.79	0.2552	70	1.284	0.802
8	7.86	0.285	75	1.202	0.846
10	6.604	0.3112	80	1.128	0.893
20	3.813	0.4125	85	1.061	0.944
30	2.731	0.493	90	1.0	1.0
35	2.397	0.530			

Tabla 1. Coeficientes hertzianos en función del ángulo Θ.

Obteniendo estos valores, el área de la elipse se define como:

$$ab = mn\left[\frac{3}{2}N\frac{1-\nu^2}{E}\frac{1}{A+B}\right]^{2/3}N^{2/3} \tag{11}$$

Donde se puede comprobar que el área depende tanto de las propiedades materiales como de las geométricas, siendo *N* la fuerza normal incidente en el punto de contacto.

Es importante explicar que en el momento que la rueda y raíl se ajustan; tienen valores iguales de curvatura lateral con sentido contrario, el valor de *B* es nulo y el contacto se describe como un modelo en dos dimensiones. Se puede facilitar el cálculo de este tipo de elipses limitando el valor de *g.*

2.1.3. Presión de contacto

La presión media es descrita como *N/πab,* donde ab es el área de la elipse (ver *Ecuación 11)*, siguiendo una distribución elíptica. La presión máxima tendrá un margen de un 50% más del valor medio representándose como:

$$\sigma_{max} = 1.5/\pi ab \tag{12}$$

En el caso ferroviario este superará los 1000MPa (no se alcanza el límite elástico a compresión).

2.2. Utilización del contacto en el caso ferroviario

Es necesario explicar que existe un amplio abanico de perfiles de rueda para los que todavía no se sabe graficar el contacto entre rueda y raíl, esto es debido a que durante la mayor parte del tiempo el contacto no está en la parte cónica de la rueda.

Si la rueda es cónica, la zona de contacto en el raíl es un punto con la misma pendiente que la rueda (*Figura 5*) medida en el plano YZ [10].

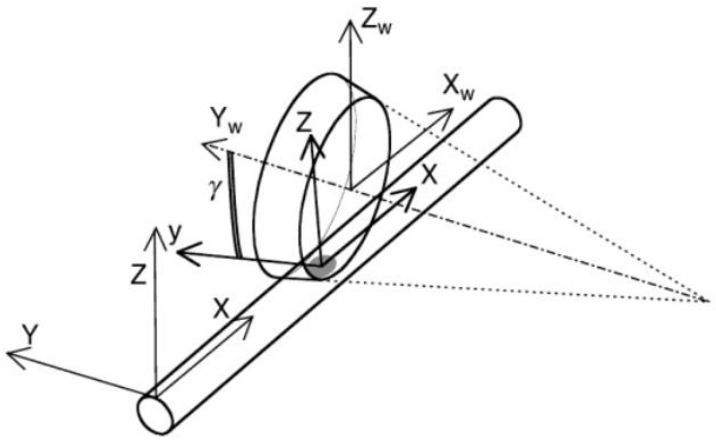


Figura 5. Pendiente de la zona de contacto rail-rueda.

Para determinar el punto de contacto, los perfiles de la rueda y del raíl, tienen que estar alineados respectivamente. El conjunto de las ruedas, centrado en la vía como función del ancho del conjunto de las ruedas y el ancho del raíl, se moverá de forma lateral con la traslación del tren. En un caso ideal en el que se tiene una rueda perfectamente cónica de 1:20 circulando por raíles inclinados con una relación 1:20, el punto de contacto estará en medio del raíl (*Tabla 2*).

Rail Inclinations and Wheel Cone Values

	Intercity and Freight	Metros	Tramway
Wheel cone	1/20th to 1/40th for HST	1/20th	1/20th to flat
Rail tilt	1/20th France, England 1/30th Sweden 1/40th Germany	1/20th	Flat
Wheelset load	22.5 t/wheelset but 17 t/wheelset HST	10 t/wheelset	6 t/wheelset

Tabla 2.Valores de inclinaciones del rail para trenes de mercancía e interurbanos [7].

Con el tren en marcha, con ruedas de baja conicidad, la fuerza normal *N* tiene un valor muy similar a la carga vertical de la rueda. En el caso ideal expuesto con anterioridad de una rueda perfectamente cónica con relación 1:20, *N* se obtiene con la siguiente expresión:

$$N = Q\cos[tan^{-1}(1{:}20)] = 0.998\,Q \tag{13}$$

Se puede comprobar que en estas condiciones *N* tiene un valor muy parejo a la fuerza vertical de la rueda *Q.*

Para determinar la curvatura longitudinal de la rueda; longitudinal debido a que el perfil de una rueda cilíndrica está en el plano XOZ. Pero al ser ruedas normalmente cónicas (de relación 1:20) el ángulo de contacto (*Ecuación 14*) no es nulo.

$$\gamma = tan^{-1}(relación\ cónica)$$

$$\frac{1}{r_n} = \frac{\cos\gamma}{r_0} \tag{14}$$

En la figura de abajo (*Figura 6*) la confluencia entre el plano XOZ y el cono de la rueda es una elipse y se puede ver representada la curvatura del radio (*Ecuación 14*).

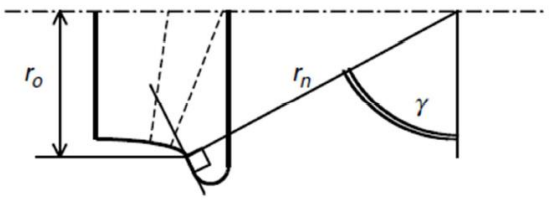


Figura 6. Curvatura longitudinal a partir del radio de curvatura.

Para concluir este epígrafe, tanto la forma del perfil (conicidad) como la sutileza de las inclinaciones tienen un gran impacto en el cálculo del punto de contacto.

2.3. Contacto No-Hertziano

Uno de los principales escollos en la aplicación de los postulados de Hertz es que se simplifica el contacto entre los dos cuerpos en un solo punto, sin embargo, puede aparecer más de un punto de contacto. Otra simplificación que difiere del caso real es la diferencia de tamaño entre el área Hertziana y el área real, las magnitudes dadas por Hertz son más pequeñas debido al asumirse un solo punto de contacto y las curvaturas calculadas son constantes, cuando en el caso real varían debido a múltiples puntos de contacto [11]

Para corregir esta imprecisión se han propuesto varias teorías alternativas, enunciándose la teoría de Kalker para modelos no-Hertzianos.

2.3.1. Teoría de Kalker para modelos no-Hertzianos

Kalker se basa en los mismos principios propuestos por Hertz donde la superficie de curvatura del radio es mucho mayor que la superficie de contacto, pero los modifica de forma que se permita el cálculo de áreas no-elípticas y múltiples.

La zona de contacto se forma entre los dos cuerpos elásticos (rueda y raíl), pero las fuerzas tangenciales *T* se distribuyen por la región y por dentro del conjunto rueda-raíl. En un sistema rígido con fricción, los cuerpos o deslizan uno con el otro, o la propia fricción los mantiene pegados. Por otra parte, en un sistema elástico con fricción, puede producirse que una parte de la zona de contacto resbale mientras que en el resto de la zona se encuentre unida (*Figura 7*).

Como consecuencia de esto, los dos cuerpos parecen que deslizan lentamente en la zona de contacto en un fenómeno conocido como pseudo-deslizamiento (*Figura 8*).

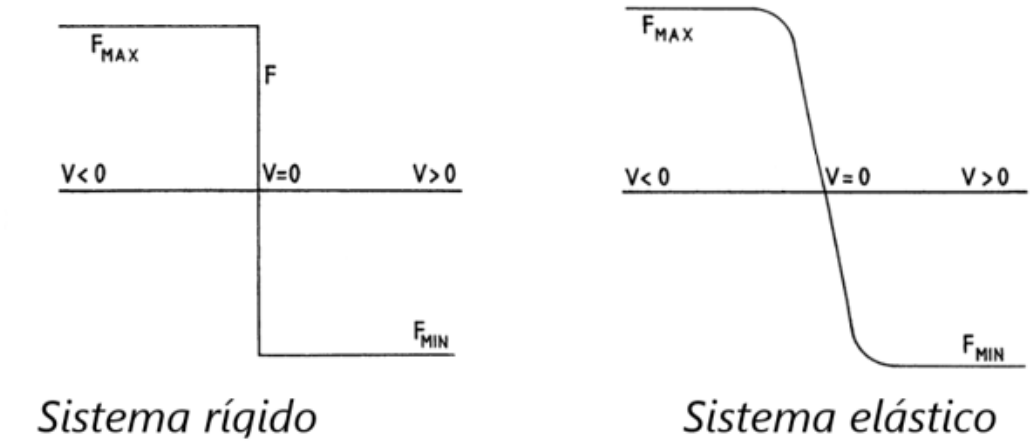


Figura 7. Representación de la fuerza tangencial en un sistema rígido y en un sistema elástico.

La figura expuesta con anterioridad muestra la fuerza tangencial *F* cuando resbala una parte de la zona de contacto. Cuando ocurre, en el caso del sistema rígido la fuerza tangencial realiza un salto hasta alcanzar su valor máximo, en la otra coyuntura cuando nos encontramos con un sistema elástico, la fuerza crece de forma continua. Dependiendo de la naturaleza que se tome en consideración y del grado de exactitud que se requiera, la fuerza tangencial *F* se aproximará a un caso o a otro [12].

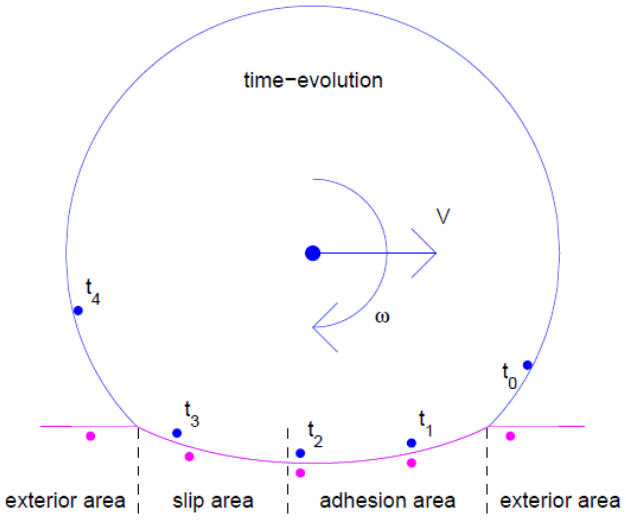


Figura 8. Instrucción de pseudo-deslizamiento [12].

Se pueden describir los diferentes deslizamientos cuasiestáticos "pseudo-deslizamientos" que sufren dos cuerpos, mediante las proyecciones en los ejes cartesianos del vector velocidad.

- Pseudo-deslizamiento longitudinal $$\nu_x = \frac{proj./x(\vec{V}_0 - \vec{V}_1)}{\frac{1}{2}(\vec{V}_0 + \vec{V}_1)} \quad (15)$$

- Pseudo-deslizamiento lateral $$\nu_y = \frac{proj./y(\vec{V}_0 - \vec{V}_1)}{\frac{1}{2}(\vec{V}_0 + \vec{V}_1)} \quad (16)$$

- Pseudo-deslizamiento rotacional $$\varphi = \frac{proj./z\,(\vec{\Omega}_0 - \vec{\Omega}_1)}{\frac{1}{2}(\vec{V}_0 + \vec{V}_1)} \quad (17)$$

Donde V_0 y V_1 forman la velocidad absoluta en el contacto, $\frac{1}{2}(\vec{V}_0 + \vec{V}_1)$ es la media de las velocidades, mientras que Ω_1 y Ω_2 son sus respectivas velocidades angulares que actúan sobre la perpendicular al contacto como se comprueba en la figura siguiente.

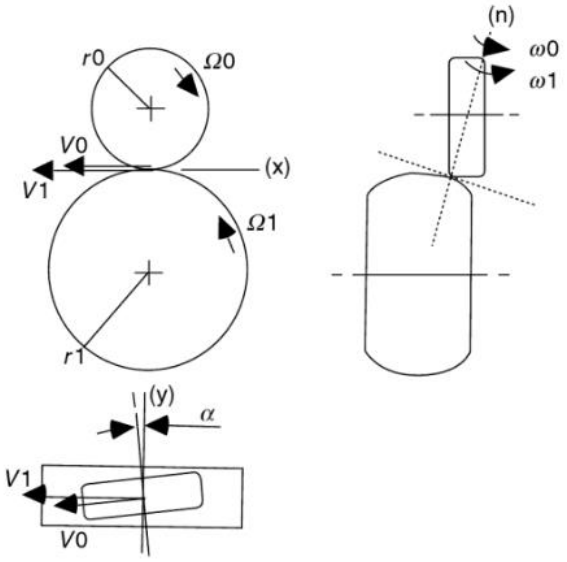


Figura 9. Velocidades absolutas y angulares aplicadas en el contacto.

En el caso de deslizamientos dinámicos, sus expresiones se componen de términos elásticos y de términos amortiguados, siguiendo un patrón exacto al resto de uniones dinámicas.

- Pseudo-deslizamiento longitudinal $$\nu_x = -\left(\frac{\Delta r}{r_0} + \frac{D_C}{2}\frac{\dot{\alpha}}{\dot{x}}\right) \quad (18)$$

- Pseudo-deslizamiento lateral $$\nu_y = \frac{\dot{y}}{\dot{x}} - \alpha \quad (19)$$

- Pseudo-deslizamiento rotacional $$\varphi = \frac{\sin\gamma}{r_0} - \frac{\dot{\alpha}}{\dot{x}}\cos\gamma \quad (20)$$

Nótese que en el caso del deslizamiento longitudinal dinámico (*Ecuaciones 18-20*), su expresión debe particularizarse en función de si se desea estudiar la rueda derecha o la rueda izquierda (en el caso de la rueda derecha se omitiría el término negativo). Los parámetros $\frac{\dot{y}}{\dot{x}}$ y $\frac{\dot{\alpha}}{\dot{x}}$ son los referentes a la amortiguación y se van reduciendo a medida que disminuye la velocidad absoluta del conjunto, mientras que $\dot{\alpha}$ y $\dot{y}$ es la velocidad relativa en el sistema de referencia del carril.

2.4. Resolución del problema del contacto

El primer problema en la mecánica del contacto en tres dimensiones; ya formulado por Hertz, puede ser formulado de la siguiente forma [13]:

Dos cuerpos están presionados juntos de modo que en el área de contacto la fricción es supuesta como ausente. El radio de curvatura de los dos cuerpos es asumido como constante en la zona de contacto (se asume que el contacto es muy pequeño en comparación con el diámetro de los dos cuerpos). Por ello los cuerpos se pueden aproximar como semiespacios.

Esta aproximación sigue el método de elementos finitos donde las variantes del problema son discretizadas, y el semiespacio lo componen todos los puntos de un espacio dividido por un plano, y tienen la ventaja de que en la mayoría de las geometrías se pueden tratar elásticamente igual. El área de contacto es una elipse y la presión de contacto sigue una forma semi elipsoidal.

Con el método de elementos finitos, estos cuerpos elásticos son divididos en un número finito de regiones no solapadas entre ellas; sus formas normalmente suelen ser triángulos o tetraedros. En estas regiones más pequeñas que el cuerpo original, el campo elástico es simplificado, por lo que contribuye a su resolución [12].

El propósito principal para la que es utilizada la teoría CONTACT de Kalker, es la evaluación de todas las fuerzas que actúan en el área de contacto entre los dos cuerpos. El conocer estas fuerzas, permite predecir con más seguridad muchos de los comportamientos dinámicos de los trenes, siendo uno de los más significativos el comportamiento del tren al entrar en una curva; el punto de contacto en el raíl más externo se trasladará a la esquina de la cabeza del raíl donde su superficie es curva respecto al plano horizontal, para así cambiar la dirección de la fuerza de contacto, lo que facilitará el desplazamiento del tren.

Conviene introducir primero la geometría del problema del contacto entre la rueda y el raíl mediante la siguiente figura:

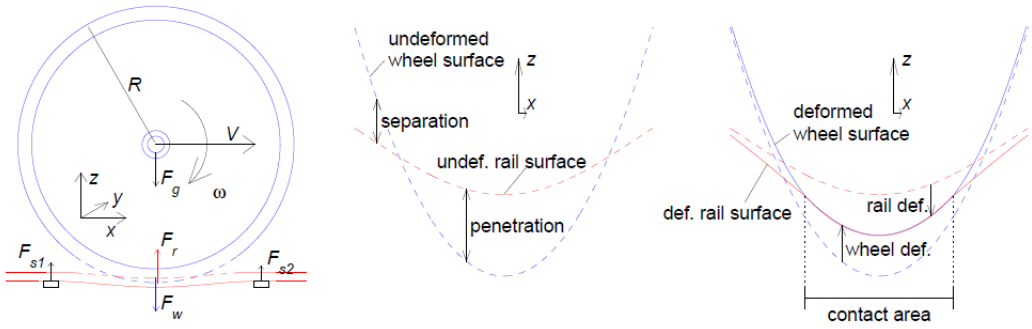


Figura 10. Geometrías del contacto raíl-rueda. Ctro: en términos indeformables. Dcha: en términos deformables.

En la figura de arriba (*Figura 10*), la geometría en términos generales es introducida: la rueda de radio *R,* velocidades lineales y angulares *V* y *ω,* está posicionada sobre el raíl. El raíl está deformado debido a las fuerzas que inciden sobre las traviesas (F_{S1} y F_{S2}) y la propia fuerza de la rueda F_w. En términos indeformables (figura izquierda) la rueda se mueve hacia abajo hasta que ocurre la penetración con el raíl, donde la distancia vertical que se desplaza la rueda equivale a la penetración máxima conocida como δ_n. Este término descrito es interesante puesto que, en función de este parámetro junto con otros como el tiempo, o la propia geometría de los dos cuerpos, podremos obtener las fuerzas del sistema (como $F_w(t)$ o F_r(t)), que permitirán calcular lo que se dobla el raíl.

Las deformaciones elásticas y su consiguiente área de contacto están ilustradas en la *Figura 10.Dcha.* Existe una presión de compresión entre las superficies que se desvanece fuera de la zona de contacto. En dicha zona se encuentra el equilibrio $F_w = -F_r$; empuja la superficie de la rueda hacia arriba y la superficie del raíl hacia abajo.

Si la rueda y el raíl tienen los mismos parámetros elásticos, sus deformaciones locales son iguales con sentido diferente, y su máxima deformación es $\pm\delta_n/2$, esta deformación también afectará fuera del área de contacto, aunque no halla presión incidiendo ahí. Un tamaño típico del área de contacto es 8*mm*x8*mm* con una aproximación de 1*mm* [28]. Las deformaciones elásticas decrecen desde la zona de contacto *1/r* y las tensiones en una proporción $1/r^2$ debido a esto, tanto tensiones como deformaciones se pueden despreciar a partir de unos pocos centímetros alejados de la zona de contacto.

En el caso del sistema rígido con fricción, como hemos visto con anterioridad (*Figura* 8) las fuerzas tangenciales causan el fenómeno de pseudo-deslizamiento entre la rueda y el raíl. Cuando se aplica una fuerza tractora (un torque), se forma una pequeña diferencia entre la velocidad absoluta *V* de la rueda y la velocidad circunferencial, *ωR.* Esta diferencia restringida por la fuerza de fricción F_w se identifica como pseudo-deslizamiento longitudinal (*Ecuación 21*).

$$\xi = (V + \omega R)/V \tag{21}$$

Para resolver el problema en el contacto, hay que determinar varios aspectos del fenómeno de contacto: el área de contacto, las presiones, las tensiones de tracción y las deformaciones.

2.4.1. Mecánica continua

Cuando los cuerpos se encuentran en contacto, desplazamientos *u(x,t),* tensiones *σ(x,t),* y deformaciones *Ɛ (x,t)* surgen en las superficies de los cuerpos. Estas están relacionadas con el comportamiento del material [13].

Para formular el problema del contacto, es particularmente interesante la cantidad de superficie. Como el desplazamiento *u(x,t)* de las partículas *x* de los dos cuerpos y las tracciones de superficie, se obtiene la relación:

$$p_{(a)}(x) = \sigma(x)\, n_{(a)}(x) \tag{22}$$

Donde el subíndice *(a)* identifica o la rueda o el raíl, y $n_{(a)}(x)$ siendo la normal del cuerpo *a* en *x.* Como $p_{(2)} = -p_{(1)}$ en todas las posiciones superficiales *x* donde los cuerpos permanecen en contacto (*Figura 10*), se puede eliminar $p_{(2)}$ y considerar solamente una variable *p(x)* para el área de contacto. Además, es importante introducir la diferencia de desplazamientos *u(x)* que es el fenómeno que ocasiona los desplazamientos.

$$u(x) = u_{(1)}(x) - u_{(2)}(x) \tag{23}$$

Los elementos introducidos con anterioridad son tensores (*σ*) o vectores (*x, u, p*) en el espacio tridimensional.

2.4.2. Aproximación de los semiespacios

El método CONTACT, está basado en un método de elementos de contorno; que se puede particularizar como una aproximación de los semiespacios, donde las ecuaciones de elásticas de dos elementos en contacto se particularizan para el caso de sus dos superficies de contacto. Obteniéndose la relación entre las tensiones superficiales *p* y sus desplazamientos *u,* donde *C* hace mención de la región de contacto [13].

$$u(x,t) = \int_{x' \in C} A(x,x')p(x',t)dC \tag{24}$$

La relación mostrada depende de las ecuaciones constitutivas que describen el comportamiento del material además de las geometrías de los dos cuerpos.

En el método CONTACT se asumen las siguientes simplificaciones [13]:

- Ambos cuerpos están formados por materiales elásticamente lineales.
- Ambos cuerpos son homogéneos.
- La geometría del contacto es plana y pequeña respecto a ambas geometrías de sus cuerpos.
- No existen variaciones en las geometrías de los cuerpos.
- Los efectos inerciales son despreciables respecto a las tensiones en el contacto.

Estas simplificaciones mencionadas permiten usar la aproximación por semiespacios. Esto permite que la solución del problema del contacto se afronte de una forma mecánica superficial.

Para poderse usar el método correctamente, hay una serie de condiciones que deben de cumplirse [7].

- Ambos cuerpos siempre tienen que pertenecer a la región elástica, nunca pueden pasar a la región plástica.
- La atracción entre superficies debe de ser ignorada.
- El área exterior está libre de tracción alguna.
- No ocurre un deslizamiento cuando la tensión tangencial alcanza un valor por debajo del límite de tracción.
- Si hay un deslizamiento, entonces las tensiones están en el límite de tracción y opuestas a la dirección del deslizamiento.

En los epígrafes restantes a esta introducción teórica de la resolución del problema del contacto, se enunciarán los tres métodos utilizados en las comparativas que servirán para alcanzar los objetivos principales del presente trabajo de fin de grado.

2.4.3. Resolución mediante CONTACT

En CONTACT, la resolución comienza esbozando un área de contacto temporal, la cual abarca el área que se crea en la realidad. Esta área temporal se expresa como *N=mx· my* donde *mx* y *ny* son el número de elementos rectangulares en las direcciones *x* e *y* respectivamente.

Para la siguiente figura (*Figura 11*) se puede apreciar tanto el área de contacto real con una forma parecida a un elipsoide, como al esbozo de área de contacto temporal con todos sus elementos rectangulares del tamaño *δx* y *δy* [13].

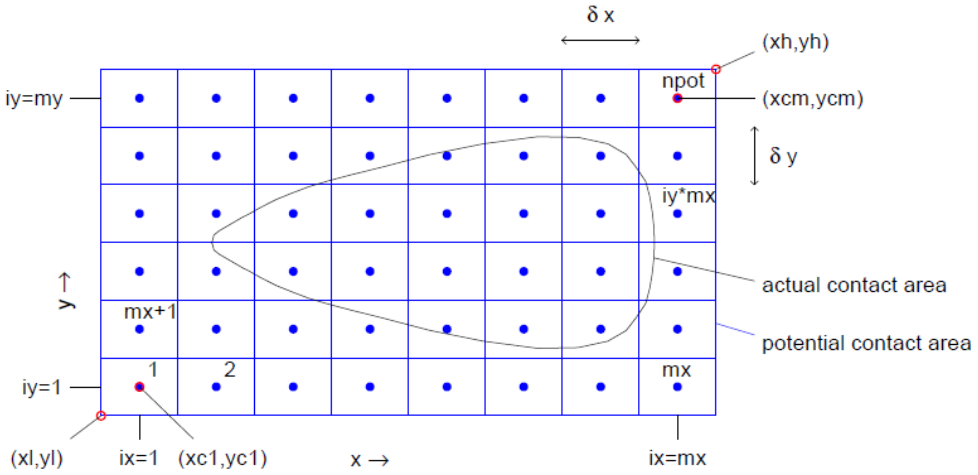


Figura 11. Área de contacto temporal y la enumeración de sus elementos.

Gracias a estos elementos infinitesimales, las tensiones superficiales se pueden definir trozo a trozo como funciones constantes por cada elemento. Esto genera la siguiente conclusión.

$$u_i(X_I) = \sum_{j\in\{n,x,y\}} \sum_{J=1}^{N} A_{IiJj}(X_I, X_J) p_j(X_J) \tag{25}$$

Esta ecuación particulariza aún más la *Ecuación 23* que representa la diferencia de desplazamientos *u(x)*. X_I y X_J corresponden a las coordenadas de los elementos *I* y *J* mientras que A_{IiJj} corresponde a los coeficientes de influencia obtenidos tras integrar la *Ecuación 24* y $p_j(X_J)$ es el vector de la tensión de superficie actuando en el elemento *J* en la coordenada *X.*

2.4.4. Resolución mediante el método simplificado de Kalker (FASTSIM)

Tras desarrollar su teoría CONTACT, Kalker postula una simplificación de esta con el fin de reducir el tiempo computacional de cálculo. Esto supuso una revolución en la época de 1982 en la que los ordenadores estaban más limitados técnicamente.

Si el deslizamiento verdadero se expresa como función de la velocidad v, el desplazamiento *u,* y los pseudo-deslizamientos [11].

$$s = \mathrm{v}\left[(v_x - \varphi y)i + \left(v_y + \varphi x\right)j\right] - \mathrm{v}(\delta u/\delta x) + (\delta u/\delta t) \tag{26}$$

Kalker asume en FASTSIM el siguiente postulado en un desplazamiento de tracción simple

$$u = \begin{bmatrix} L_x\sigma_x & L_y\sigma_{ty} \end{bmatrix}^T \tag{27}$$

Combinando las dos ecuaciones enunciadas anteriormente y dividiendo el resultado por el parámetro elástico *L* y la velocidad v, se obtienen los deslizamientos verdaderos tanto en dirección longitudinal como lateral.

$$\frac{s_x}{\mathrm{v}L} = \frac{v_x}{L_1} - \frac{\varphi y}{L_3} - \frac{\delta\sigma_{tx}}{\delta x} \tag{28}$$

$$\frac{s_y}{\mathrm{v}L} = \frac{v_y}{L_2} - \frac{\varphi x}{L_3} - \frac{\delta\sigma_{ty}}{\delta x} \tag{29}$$

La obtención de los parámetros elásticos *L* se realiza siguiendo la teoría lineal de Kalker donde se asume que el deslizamiento se desprecia y la distribución de tensiones es continua en los bordes del contacto, obteniéndose

$$\begin{cases} L_1 = \dfrac{8a}{3Gc_{11}} \\ L_2 = \dfrac{8a}{3Gc_{22}} \\ L_3 = \dfrac{\pi a\sqrt{ab}}{4Gc_{23}} \end{cases} \tag{30}$$

En el conjunto de ecuaciones expresadas, se comprueba cómo el parámetro elástico se relaciona con los parámetros geométricos de la superficie y los coeficientes de Kalker.

2.4.4.1. Coeficientes de Kalker

Los coeficientes mencionados anteriormente, toman su valor en función de los semiejes *a* y *b* (*Epígrafe 2.1.2*) en forma *a/b* y *b/a.* Además, se seleccionan según el módulo de Poisson *v* el cual oscilará entre el valor nulo, 0,25 y 0,5 dependiendo del material. En el caso de materiales usados en el campo ferroviario como el acero cuyo módulo oscila el valor de 0,28 (dependiendo de la aleación), el valor obtenido en las tablas requerirá de una interpolación [7].

	C_{11}			C_{22}			C_{23}		
a/b	**$\sigma = 0$**	**0.25**	**0.5**	**$\sigma = 0$**	**0.25**	**0.5**	**$\sigma = 0$**	**0.25**	**0.5**
0.1	2.51	3.31	4.85	2.51	2.52	2.53	0.334	0.473	0.731
0.2	2.59	3.37	4.81	2.59	2.63	2.66	0.483	0.603	0.809
0.3	2.68	3.44	4.80	2.68	2.75	2.81	0.607	0.715	0.889
0.4	2.78	3.53	4.82	2.78	2.88	2.98	0.720	0.823	0.977
0.5	2.88	3.62	4.83	2.88	3.01	3.14	0.827	0.929	1.07
0.6	2.98	3.72	4.91	2.98	3.14	3.31	0.930	1.03	1.18
0.7	3.09	3.81	4.97	3.09	3.28	3.48	1.03	1.14	1.29
0.8	3.19	3.91	5.05	3.19	3.41	3.65	1.13	1.25	1.40
0.9	3.29	4.01	5.12	3.29	3.54	3.82	1.23	1.36	1.51
1.0	3.40	4.12	5.20	3.40	3.67	3.98	1.33	1.47	1.63
1.11	3.51	4.22	5.30	3.51	3.81	4.16	1.44	1.59	1.77
1.25	3.65	4.36	5.42	3.65	3.99	4.39	1.58	1.75	1.94
1.43	3.82	4.54	5.58	3.82	4.21	4.67	1.76	1.95	2.18
1.67	4.06	4.78	5.80	4.06	4.50	5.04	2.01	2.23	2.50
2.00	4.37	5.10	6.11	4.37	4.90	5.56	2.35	2.62	2.96
2.50	4.84	5.57	6.57	4.84	5.48	6.31	2.88	3.24	3.70
3.33	5.57	6.34	7.34	5.57	6.40	7.51	3.79	4.32	5.01
5.0	6.96	7.78	8.82	6.96	8.14	9.79	5.72	6.63	7.89
10	10.7	11.7	12.9	10.7	12.8	16.0	12.2	14.6	18.0

Tabla 3. Coeficientes de Kalker.

Kalker con su teoría simplificada, transforma el problema del contacto en uno adimensional reformando la forma de la superficie de contacto en una de forma esférica. Con el FASTSIM, el área de contacto se divide en elementos colineales con la dirección de movimiento de la rueda.

El algoritmo simplificado se ha extendido ampliamente en multitud de programas de simulación de la dinámica ferroviaria como Universal Mechanism. Si el área de contacto tiene una forma elíptica, el error se predice menor del 15 % [12].

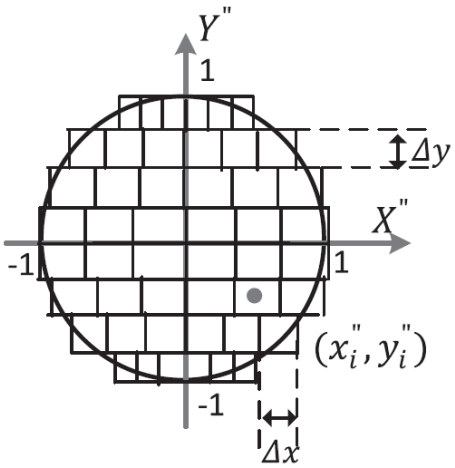


Figura 12. Área de contacto dividida según el método FASTSIM [11].

Al igual que con el método exacto, los elementos tendrán unas dimensiones diferenciales tanto de altura como de anchura. Mediante cálculo numérico, las tensiones en ambas direcciones de cada elemento se multiplican por su área *δxδy*, estas tracciones de cada rebanada se suman hasta obtener las fuerzas de pseudo-deslizamiento longitudinales y laterales del contacto. Kalker predice el mallado en torno a un punto en concreto dentro del área donde no existe el deslizamiento, llamándolo polo de giro donde las tensiones sufren un cambio más abrupto.

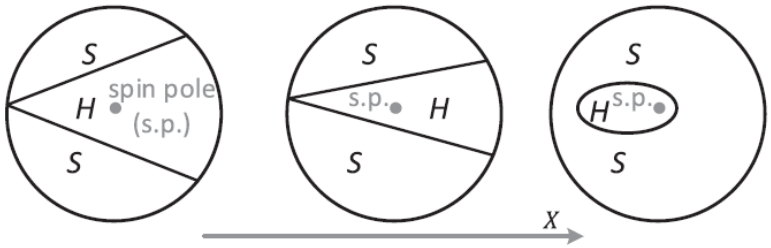


Figura 13. Área de influencia del polo de giro [11].

La figura de arriba (*Figura 13*) muestra el cambio a medida que se aumenta el pseudo-deslizamiento de giro (de izquierda a derecha) marcando la zona alrededor del polo donde sufren más cambio las tensiones.

2.4.4.2. Tensiones tangenciales

La distribución de tensiones tangenciales en dirección longitudinal y tangencial sigue la siguiente distribución [7].

$$p_x\,(x, y_i) = \left(\frac{v_x}{L_1} - y_1\frac{\varphi}{L_3}\right)(x - a_i) \tag{31}$$

$$p_y(x, y) = \frac{v_y}{L_2}(x - a_i) + \frac{\varphi}{2L_3}(x^2 - a_i^2) \tag{32}$$

Los segundos términos de ambas ecuaciones representan el efecto del deslizamiento de giro como un deslizamiento local en cada elemento infinitesimal de la superficie siendo a_i el borde más avanzado del área.

2.4.4.3. Cálculo de las fuerzas de pseudo-deslizamiento mediante FASTSIM.

Al igual que en el resto de los métodos, para obtener las fuerzas de pseudo-deslizamiento, es necesario integrar la distribución de tensiones.

$$F_x = -\iint p_x(x)dxdy = \frac{-8a^2bv_x}{3L_1} \tag{33}$$

$$F_y = -\iint p_y(x)dxdy = \frac{-8a^2bv_y}{3L_2} - \frac{\pi a^3 b\varphi}{4L_3} \tag{34}$$

Quedarán las fuerzas en función de los pseudo-deslizamientos y los parámetros elásticos.

2.4.4. Resolución mediante el método Kik-Piotrowski

El modelo Kik-Piotrowski es un rápido método no iterativo para resolver el problema del contacto. La idea de este método se puede transmitir a través de la siguiente figura [15].

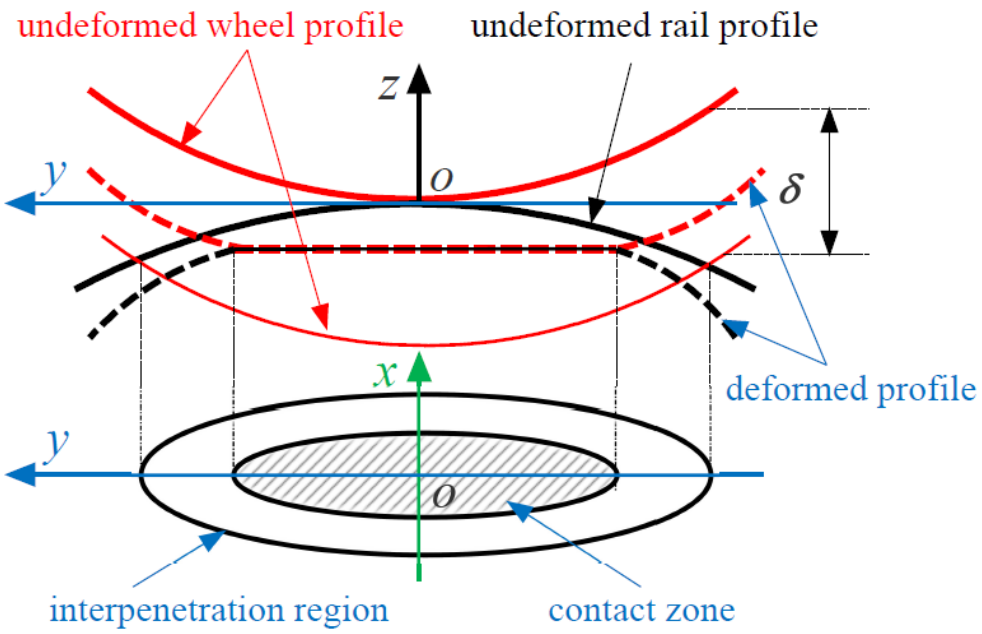


Figura 14. Método Kik-Piotrowski [15].

Cuando las superficies no deformadas del raíl y la rueda; tocándose en el punto inicial del contacto *O* siendo este último determinado por un análisis geométrico, se trasladan entre ellos una distancia δ conocida también como "penetración", los dos cuerpos penetran y se cruzan en una línea cerrada cuya proyección el plano XY se nombrará *región de interpenetración* (ver figura de arriba). En realidad, los cuerpos no pueden penetrar, ocurren desviaciones y así aparece la superficie de contacto. Esta superficie de contacto se obtiene a partir de la aproximación de la región de interpenetración $\delta_0 = \epsilon\delta$ con el factor $\epsilon = 0.55$; siendo este obtenido más adelante particularizando la aproximación de Boussinesq [16].

La separación de puntos entre el raíl y la rueda en estado deformado se enuncia como

$$s(x,y) = z(x,y) - \delta + \omega_1(x,y) + \omega_2(x,y) \geq 0 \tag{35}$$

En donde *z* es la sección trasversal de la superficie rodante de la rueda en el punto *O*, ω_1 y ω_2 son los desplazamientos de los puntos en las superficies de los cuerpos debido a las desviaciones. En este caso, $\omega_1=\omega_2=\omega$, además de que para cada punto que esté dentro del área de contacto, $s(x,y)$= 0 y *z(0,0)* = 0. Por lo que se obtiene

$$\delta = 2\omega(0,0) = 2\omega_0 \tag{36}$$

El desplazamiento $\omega\,(x,y)$ depende de la presión $p\,(x,y)$ actuando en la superficie de contacto y conociendo esta, es `posible determinar el desplazamiento ω a usando la aproximación de Boussinesq.

$$\omega(x,y) = \frac{1-\nu^2}{\pi\, E}\iint_C \frac{p(x',y')}{\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2}}dx'dy' \tag{37}$$

Como la adhesión en el área de contacto es despreciable, $p(x,y) \geq 0$ en toda el área. Las condiciones de contacto serán las siguientes.

$$\begin{cases} p(x,y) \geq 0 \\ p(x,y) \cdot s(x,y) = 0 \end{cases} \tag{38}$$

Por tanto, para solucionar el problema del contacto, se necesita satisfacer las condiciones expuestas.

2.4.5.1. Método aproximado para resolver el problema del contacto normal

La idea del método es encontrar un valor de penetración virtual δ_0 para que la región de interpenetración se parezca todo lo posible a la región real del contacto. La distribución de presión normal se calculará mediante las oportunas simplificaciones. Una vez obtenida la presión, se permitirá calcular la carga normal integrando la presión [16].

Primero hay que determinar la región de interpenetración virtual, avanzando las superficies del raíl y la rueda hasta una profundidad δ_0. La región de interpenetración resultante se toma como como el área de contacto. Para este fin, la función de interpenetración *g(y)* se define con la fórmula adyacente.

$$g(y) = \begin{cases} \delta_0 - f(y) & si \quad f(y) \leq \delta_0 \\ 0 & si \quad f(y) > \delta_0 \end{cases} \tag{39}$$

Como la rueda es un cuerpo de revolución, se asume que el contacto posee algunas propiedades del contacto hertziano; se toma que la distribución de presiones sigue una forma semielíptica en la dirección que rueda.

Si se conoce la presión máxima, entonces la carga normal se puede obtener integrando la presión máxima de la siguiente manera.

$$N = \frac{p_0}{x_l(0)} \int_{y_r}^{y_1} \int_{-x_l}^{x_l} \sqrt{x_l^2(y) - x^2}\, dx dy \tag{40}$$

Con el fin de satisfacer la presión máxima estimada y las condiciones de contacto se usará el punto de contacto (0,0). Con este punto se particulariza la aproximación de Boussinesq (*Ecuación 37*) obteniéndose el desplazamiento en (0,0)

$$\omega(0,0) = \omega_0 = \frac{1-\nu^2}{\pi E} \frac{p_0}{x_l(0)} \int_{y_r}^{y_l} \int_{-x_l}^{x_l} \frac{\sqrt{x_l^2(y) - x^2}}{\sqrt{x^2 + y^2}}\, dx dy \tag{41}$$

Si se aplica la expresión (*Ecuación 36*) $\delta = 2\omega_0$ en las dos anteriores ecuaciones, se obtiene la carga normal y la presión máxima. Las dos fórmulas permiten un método fiable y rápido para la resolución del problema del contacto normal.

2.4.5.2. Corrección de la forma del área de contacto

Usando el método expuesto por Kik y Piotrowski, la aproximación del área de contacto mediante la región de interpenetración virtual nunca muestra la geometría correcta de área, excepto si el área de contacto es circular.

Se puede rediseñar la forma del área de contacto a partir de la teoría de Hertz.

Si se considera el ancho y la longitud de la región virtual de interpenetración como *L* y *W* respectivamente, las curvaturas hertzianas en el punto de contacto se identifican como (*Epígrafe 2.1.1*)

$$A = \frac{1}{2R_x} = \frac{4\delta_0}{L^2} \tag{42}$$

$$B = \frac{1}{2R_y} = \frac{4\delta_0}{W^2} \tag{43}$$

Como está expresado en el *Epígrafe 2.1.2,* la ratio *A/B* se usa para determinar los semiejes de la elipse de contacto. Los coeficientes n_a y n_b se utilizan para corregir la región virtual de interpenetración. Si $\beta_0 = n_a / n_b$ además de

$$\beta = \begin{cases} \beta_0 & si \quad {}^{W}/_{L} \leq 1 \\ \dfrac{1}{\beta_0} & si \quad {}^{W}/_{L} > 1 \end{cases} \tag{44}$$

Las siguientes ecuaciones son propuestas para la corrección en la forma del área de contacto:

$${}^{L_C}/_{W_C} = \beta \tag{45}$$

$$L_C W_C = LW \tag{46}$$

Estas relaciones que muestran el ancho y la longitud corregidas como W_c y L_c respectivamente, permiten obtener

$$W_C = \sqrt{LW/\beta} \tag{47}$$

$$L_C = \sqrt{\beta LW} \tag{48}$$

Este suavizado en la forma del área de contacto, permite homogeneizar toda la superficie como se puede comprobar en la figura siguiente que muestra una comparativa entre el método exacto CONTACT y el método propuesto por los matemáticos Kik y Piotrowski. Se alienta a prestar atención en la primera parte de la figura donde CONTACT considera dos superficies de contacto independientes en oposición a la simplificación resultante de Kik-Piotrowski donde solamente considera un área de contacto.

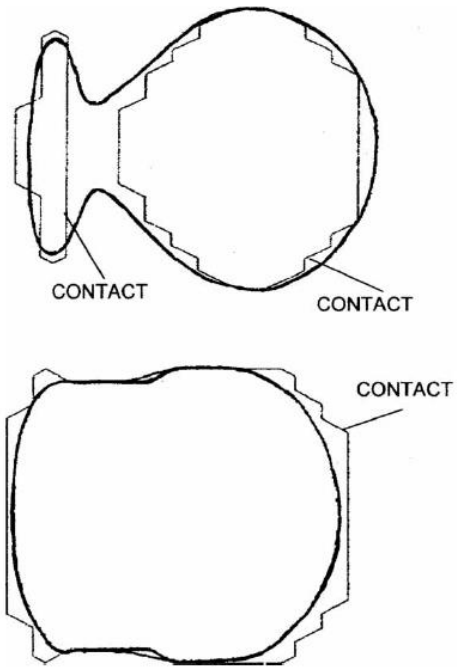


Figura 15. Comparativa de área de contacto entre CONTACT y Kik-Piotrowski

2.4.5.3. Cálculo de las fuerzas de pseudo-deslizamiento mediante Kik-Piotrowski

Para el cálculo de las fuerzas de pseudo-deslizamiento durante el avance de las ruedas, aplicamos la teoría FASTSIM de Kalker para el área calculada por Kik-Piotrowski mediante la penetración virtual δ_0. Aunque esta teoría no esté restringida para áreas de contacto no-elípticas

El parámetro elástico *L* no es de fácil cálculo en este tipo de áreas. Se toma el deslizamiento como despreciable en el área de contacto y la distribución de tensiones tangenciales se dispone de la siguiente manera con todos los pseudo-deslizamientos influyendo en estas.

$$p_x(x,y) = \frac{1}{L}(x - x_l)(v_x - y\varphi) \tag{49}$$

$$p_y(x,y) = \frac{1}{L}\left[(x - x_l)v_y + \frac{1}{2}(x^2 - x_l^2)\varphi\right] \tag{50}$$

Con las distribuciones de tensiones enunciadas es posible calcular las fuerzas de pseudo-deslizamiento resultantes. Como la superficie de contacto puede consistir en una o múltiples zonas, se integran las tensiones en cada zona permitiendo diferentes valores en el parámetro *L*.

$$F_{xi} = -\frac{4R}{L_i}v_x\int_{y_{ri}}^{y_{li}} g(y)\,dy + \frac{4R}{3L_i}\varphi\int_{y_{ri}}^{y_{li}} y g(y)\,dy \tag{51}$$

$$F_{yi} = -\frac{4R}{L_i}v_y\int_{y_{ri}}^{y_{li}} g(y)\,dy - \frac{4\sqrt{2}}{3L_i}\varphi\int_{y_{ri}}^{y_{li}} [Rg(y)]^{3/2}dy \tag{52}$$

Donde *i* toma el valor del número de zonas de contacto separadas. De la primera ecuación se puede analizar cómo el pseudo-deslizamiento de giro genera fuerza de pseudo-deslizamiento si la zona de contacto no es simétrica respecto al eje X. Para determinar el parámetro *L,* en este caso no se hace distinción entre las direcciones *x* e *y*, se toma la siguiente aproximación.

$$L_{xi} = L_{yi} = L = \frac{4\pi R}{GA_i c_i} \int_{y_{ri}}^{y_{li}} g(y)\, dy \tag{53}$$

2.5. Irregularidades geométricas en el raíl

Debido al desgaste que sufren los raíles por efecto de su uso y de las inclemencias del tiempo, pueden aparecer irregularidades en la vía que propician distintos inconvenientes que van desde la disminución de confort en los usuarios a efecto de las vibraciones ocasionadas o incluso un aumento en la seguridad del vehículo ferroviario que incluso puede escalar en un descarrilamiento [10].

Estas irregularidades aparecen en forma de abrasiones en la superficie del raíl o desniveles ya sea en el terreno o en el propio raíl.

Las irregularidades verticales se definen como las variaciones tanto positivas como negativas que sufre la superficie del raíl soportando una carga uniforme en dirección del sentido de desplazamiento.

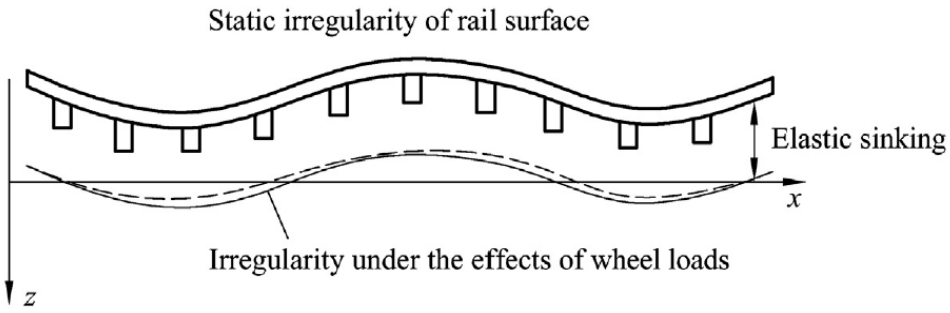


Figura 16. Bosquejo de una irregularidad vertical en la vía.

El valor z_v de la irregularidad vertical, se puede determinar con una media entre la irregularidad vertical del raíl izquierdo y derecho.

$$z_v = \frac{z_L + z_R}{2} \tag{54}$$

Además de verticales, se pueden ocasionar irregularidades horizontales que corresponden a una discontinuidad de altura entre el raíl derecho y el izquierdo. El valor de la irregularidad horizontal z_c se decreta de la siguiente forma.

$$z_C = \frac{z_L - z_R}{2} \tag{55}$$

Las irregularidades horizontales se muestran de forma gráfica en la siguiente figura.

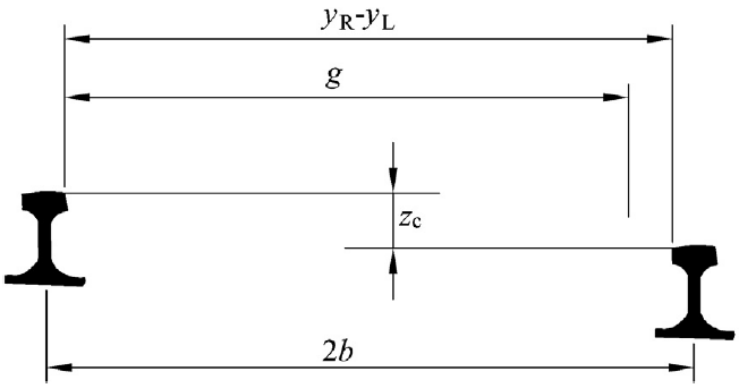


Figura 17. Irregularidad horizontal en la vía.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS EMPLEADAS

Con el fin de facilitar los ensayos de vehículos ferroviarios, una de las herramientas más potente se introdujo con la aparición de los primeros programas de cálculo. Este hito permite el estudio del comportamiento de trenes en un entorno escogido y parametrizado por el ingeniero, sin tener que invertir dinero en realizar experimentos sobre campo hasta conseguir una aproximación razonable de los resultados a lo que se espera obtener.

Una simulación no se debe tratar como una imagen de lo que ocurre fuera de ella, puesto que tendrán en cuenta ciertos detalles macro que se trasladarán al entorno micro, no obstante, existirán multitud de variables complejas de parametrizar como puede ser el nivel de ocupación en los coches de pasajeros o la meteorología cambiante del entorno, que sin duda afecta al tren y con ello al problema del contacto, pero en aras de facilitar los cálculos, se obvian en los diferentes softwares.

3.1. Universal Mechanism

Existen multitud de programas de simulación donde se puede computar el problema de contacto tales como el software desarrollado por los británicos de la compañía Resonate Group llamado *Vampire*, o el programa conocido como *ADAMS/Rail* lanzado por el grupo americano MSC Software Corporation. Sin embargo, con el fin de la elaboración de este trabajo, se usará principalmente el software *Universal Mechanism* en dos de sus principales módulos, junto con una extensión compatible con él del programa independiente CONTACT.

Figura 18. Logotipo oficial del programa Universal Mechanism [17].

Universal Mechanism (UM) es un software ruso de simulación multicuerpo (MBS) diseñado en conjunto por un equipo multidisciplinar de docentes de la Universidad Técnica de Briansk, supervisado por el doctor Dimitri Pogorelov [18]

Este software permite representar diferentes sistemas de cuerpos diseñados en su módulo CAD, conectados entre sí por diferentes elementos cinemáticos. El abanico de problemas que se pueden resolver con este programa abarca una multitud de fenómenos en la mecánica en dos o tres dimensiones, lo que simplifica muchos de los problemas cinéticos que se puede encontrar un ingeniero.

Universal Mechanism está enfocado en automatizar procedimientos con el consiguiente ahorro de tiempo que hace aumentar la productividad del usuario. Este hecho, se puede referenciar si al tener un sistema de cuerpos; como puede ser un convoy en el caso ferroviario, con sólo meter las propiedades inerciales y cinemáticas de uno de ellos; en el caso expuesto serían las propiedades de un coche, UM automatiza ese proceso si se le asignan los subsistemas correspondientes [18].

El uso de los diferentes módulos del programa, que en el caso de este trabajo se ceñirán a UM Input y UM Simulation, incrementan las posibilidades de uso del software, permitiendo entre otras opciones:

- Esquematizar sistemas para vehículos de emergencia.
- Optimizar la resolución de ecuaciones de movimiento para cuerpo de largas dimensiones.
- Modificación del método BDF para la resolución directa de ecuaciones diferenciales no-rígidas de movimiento.
- Determinación mediante el método Park de soluciones a ecuaciones diferenciales no-rígidas de movimiento.

A continuación, se presentarán brevemente los dos diferentes módulos con los que se ha realizado este proyecto. Cada módulo del programa sirve para un propósito diferente. Para el análisis del problema del contacto, se ha usado UM Input para la creación del sistema multicuerpo y su modificación, además de UM Simulation para la simulación del sistema en un entorno parametrizado.

3.1.1. Universal Mechanism Input

Este módulo permite el diseño de cuerpos *objects,* a través de elementos llamados *Graphics Objects* (*GO*) que en su conjunto establecerán el *object* deseado. UM Input pone a disposición una serie de geometrías para facilitar el diseño del *GO* requerido, como pueden ser formas helicoidales o cónicas [19]

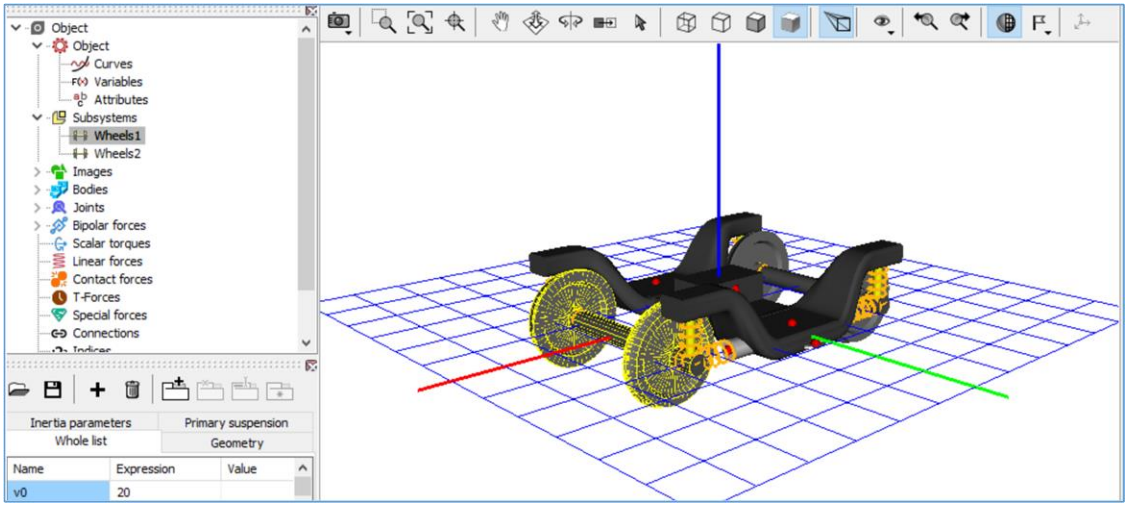


Figura 19. Vista de la interfaz del módulo UM Input.

Como se puede identificar en la figura anterior, el *Object* que en este caso es uno de los dos bogies que componen el tren usado, se compone de dos subsistemas que serán cada uno de los pares de ruedas delanteras y traseras que lo componen. En el caso de los elementos amortiguadores que conforman este bogie como los distintos muelles o los dampers, tras haber descrito sus diferentes propiedades tales como el coeficiente de amortiguación o el de rigidez, se asignarán en el grupo *Bipolar Forces* donde se ensamblarán al cuerpo principal.

3.1.2. Universal Mechanism Simulation

Con este módulo de Universal Mechanism, se realizará el grueso del estudio del problema del contacto, debido a que en se realizará el conjunto de simulaciones dentro de su entorno [20]. Procesa el problema descrito dentro del módulo y obtiene una solución en forma de una serie de datos que se podrán extrapolar a un programa de tratamiento tipo Excel.

UM Simulation importa desde UM Input el *object* creado con un archivo de extensión .dll, que en nuestro caso como se comenta en el epígrafe relacionado a la planificación del proyecto (*Epígrafe 4.3*) será un coche del tipo *vehículo 1* usado como modelo, con el fin de homogeneizar

los estudios posteriores. Tras cargar el archivo, el programa generará las ecuaciones de movimiento de forma iterativa en función de los parámetros indicados.

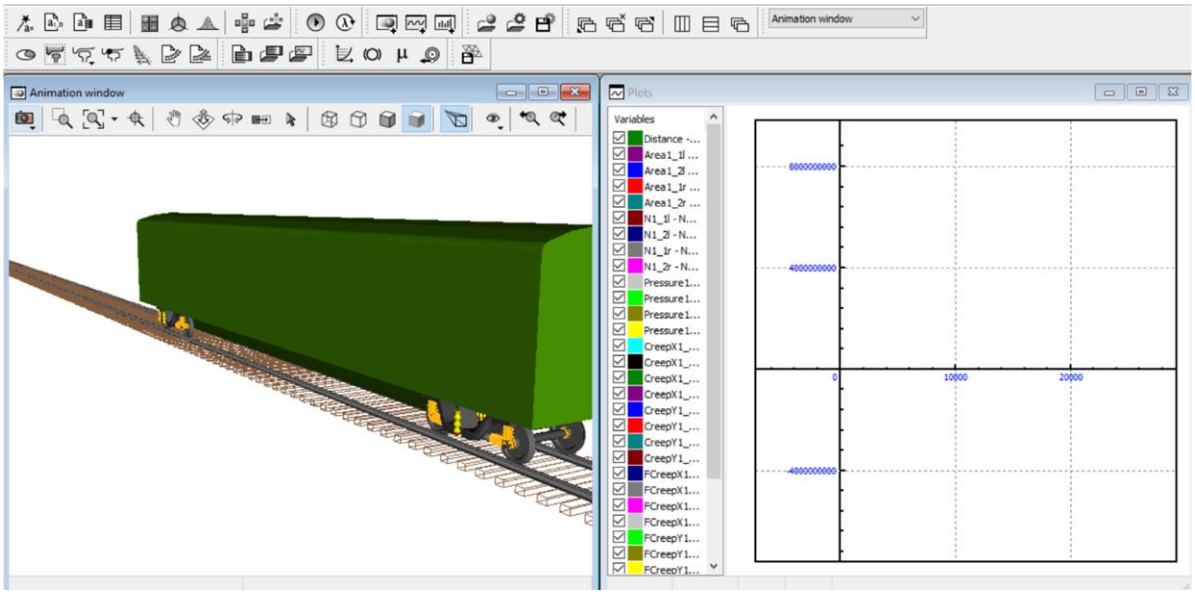


Figura 20. Interfaz de UM Simulation.

De este módulo en particular, se hará uso de una serie de comandos que permitirán la modelización del problema y de su recolección de resultados.

3.1.3. Microsoft Excel

La hoja de cálculo y tratamiento de datos servirá esencialmente en el caso de este proyecto, para importar los grupos de datos representativos de las diferentes variables expuestas a estudio del contacto rueda-raíl, se organizarán según la rueda afectada (*Figura 23)* y la macrogeometría del trazado. La posibilidad de crear fórmulas en el software permitirá obtener un promedio en los datos, que sirva para más adelante contrastar grupos de datos obtenidos en diferentes velocidades del vehículo frente a sus análogos derivados de otras teorías de contacto.

Como se muestra en la ilustración que se continúa estas líneas, Excel es capaz de aceptar fórmulas que permitan obtener los valores máximos y mínimos de un grupo de datos; en este caso los de la presión en el contacto de las diferentes ruedas que conforman el bogie delantero, mediante la teoría simplificada y la exacta en un tramo de prueba recto a una velocidad de 60 metros por segundo.

[60 m/s] PRESIÓN	1_1L		1_2L		1_1R		2_2R	
	TIEMPO (s)	V.MAX (Pa)	TIEMPO (s)	V.MAX (Pa)	TIEMPO (s)	V.MAX (Pa)	TIEMPO (s)	V.MAX (Pa)
CONTACT	2.75	1388554112	2.80	1176742912	2.65	1270359040	2.65	1420093824
FASTSIM	2.75	1090996352	2.79	1110352768	2.70	1158631936	2.70	1164117632
	1_1L		1_2L		1_1R		2_2R	
	TIEMPO (s)	V.MIN (Pa)	TIEMPO (s)	V.MIN (Pa)	TIEMPO (s)	V.MIN (Pa)	TIEMPO (s)	V.MIN (Pa)
CONTACT	0	644834816	0	644834816	3.20	727322688	3.20	741272896
FASTSIM	2.79	674320192	2.90	764064128	3.29	460790368	2.75	507752128

Figura 21. Ejemplo de tabla obtenida en Excel, en este caso muestra los valores pico en la presión en el contacto.

4. METODOLOGÍA

Este capítulo versará sobre el bagaje pasado que mantiene el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad, sirviendo este de partida para enfocar el proyecto con una profesionalidad adecuada respetando el marco normativo referente al sector ferroviario en España. Además, se estructurará la planificación del trabajo anotando los pasos a seguir para lograr los objetivos.

4.1. Antecedentes

El trabajo de investigación y desarrollo en el campo ferroviario no es ajeno para los profesores del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III. Se han publicado multitud de proyectos a diferente escala en los que se ha visto implicada la Universidad.

Proyectos como el propuesto por el ingeniero Enrique Junquera donde analiza los parámetros ferroviarios de un vehículo en curva [21] o el desarrollado por la ingeniero Marta Laporte con temática de simulación del contacto en un sistema multicuerpo [22], han servido para obtener un bagaje amplio en el estudio de la dinámica ferroviaria y sus efectos físicos más determinantes, así como el uso de diversos softwares de simulación entre los que se encuentra Universal Mechanism.

Debido a la proliferación de diferentes softwares multicuerpo ha habido numerosas propuestas para homogeneizar un estándar de vehículo ferroviario que sirviese como patrón para normalizar todos los programas de cálculo ferroviario.

El objetivo de obtener un estándar común es el siguiente:

- Explorar la posibilidad de crear paquetes de datos intercambiables entre distintos softwares.

- Permitir a los ingenieros y profesores investigar diferentes fenómenos ferroviarios con la certeza de obtener una fiabilidad profesional sin importar el programa que decidan utilizar.

En junio de 1997, se alcanzó un acuerdo en el congreso celebrado en la Universidad Metropolitana de Manchester [23] entre los responsables de los programas *VAMPIRE, GENSYS, SIMPACK, NUCARS y ADAMS/RAIL* con el fin de estandarizar los diferentes ensayos.

Para ello, se diseñó un modelo de tren nuevo creado con el único propósito de servir como modelo para las empresas que participaron en el congreso [23].

Figura 22. Integrantes del congreso celebrado en Manchester en junio de 1997 [23].

El vehículo se compone de un vagón de pasajeros, simplificado como una caja rígida a la que están fijados dos bogies con una suspensión primaria simple. Este vagón conocido como *vehículo 1* por los desarrolladores, tiene las siguientes características técnicas [23]:

Caja		**Bogie (x1)**		**Wheelset (x1)**	
Masa (Kg)	3200	Masa (Kg)	2615	Masa (Kg)	1813
Inercia de alabeo (Kgm^2)	56800	Inercia de alabeo (Kgm^2)	1722	Inercia de alabeo (Kgm^2)	1120
Inercia de cabeceo (Kgm^2)	1970000	Inercia de cabeceo (Kgm^2)	1476	Inercia de cabeceo (Kgm^2)	112
Inercia de guiñada (Kgm^2)	1970000	Inercia de guiñada (Kgm^2)	3067	Inercia de guiñada (Kgm^2)	1120

Tabla 4. Masas e inercias de los elementos que conforman el vehículo simulado.

A la caja que simula el vagón le corresponde una pareja de bogies quienes a su vez se componen de un par de wheelsets por cada uno de ellos.

4.2. Normativa

A lo largo del siglo XX, con la transición de muchos países que practicaban una economía autárquica hacia la competencia en un ámbito global, la industria se ha visto empujada a cumplir una serie de requisitos que permiten el acceso a mercados en otros estados.

El caso del sector ferroviario no es ninguna excepción. Particularizando para España, los proyectos con fines lucrativos cumplen con la normativa UNE [24] que actúa como un regulador estatal de los estándares de calidad mínimos que tendrían que cumplir los fabricantes de sistemas de transporte férreos como Renfe o Adif. En el ámbito internacional, además obtienen el visto bueno por el organismo competente que permitirá el libre trayecto de trenes entre los distintos estados miembros tras el acuerdo del espacio de Schengen [25].

Aunque el siguiente trabajo verse sobre un análisis en el entorno carril-rueda, a continuación, se enunciarán una serie de normas que garantizan la seguridad y el confort que deben de cumplir los vehículos en los ámbitos mencionados en el párrafo anterior [24]:

UNE-EN 13848-1:2020 Aplicaciones ferroviarias. Vía. Calidad de la geometría de vía. Parte 1: Caracterización de la geometría de vía.

UNE-EN 14817:2007 Aplicaciones ferroviarias. Componentes de suspensión. Elementos de control de muelle neumático.

UNE-EN 12080:2018 Aplicaciones ferroviarias. Cajas de grasa. Rodamientos.

UNE-EN 12082:2018 Aplicaciones ferroviarias. Cajas de grasa. Ensayo de funcionamiento.

UNE-EN 15437-1:2010 Aplicaciones ferroviarias. Monitorización de la condición de las cajas de grasa. Requisitos de interfaz y diseño. Parte 1: Equipo al lado de la vía y cajas de grasa del material rodante.

UNE-EN 15313:2017 Aplicaciones ferroviarias. Requisitos de funcionamiento de los ejes montados en servicio. Mantenimiento de los ejes montados en servicio y fuera del vehículo.

UNE-EN 13749:2012 Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Métodos para especificar los requisitos estructurales de los bastidores de bogie.

UNE-EN 15827:2011 Aplicaciones ferroviarias. Requisitos para bogies y órganos de rodadura.

UNE-EN 13775-2:2004 Aplicaciones ferroviarias. Medición de los vagones de mercancías nuevos y modificados. Parte 2: Vagones de mercancías con bogies.

UNE-EN 15427:2009+A1:2011 Aplicaciones ferroviarias. Gestión de la fricción rueda/carril. Lubricación de la pestaña de la rueda.

UNE-EN 15049:2008 Aplicaciones ferroviarias. Elementos de suspensión. Barra de torsión, en acero.

UNE-CEN/TS 15718:2013 EX Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Requisitos de producto para ruedas en acero moldeado.

UNE-EN 17018:2019 Aplicaciones ferroviarias. Mantenimiento del material rodante. Términos y definiciones.

UNE-EN 16727-1:2019 Aplicaciones ferroviarias. Vía. Barreras acústicas y dispositivos relacionados que actúan sobre la propagación aérea del sonido. Rendimiento no acústico. Parte 1: Rendimiento mecánico bajo cargas estáticas. Cálculo y métodos de ensayo.

UNE-EN 16727-2-1:2019 Aplicaciones ferroviarias. Vía. Barreras acústicas y dispositivos relacionados que actúan sobre la propagación aérea del sonido. Rendimiento no acústico. Parte 2-1: Prestaciones mecánicas bajo cargas dinámicas producidas por el paso de trenes. Resistencia a la fatiga.

UNE-EN 15654-2:2020 Aplicaciones ferroviarias. Medición de las fuerzas verticales en ruedas y ejes. Parte 2: Ensayo en taller de vehículos nuevos, modificados y mantenidos

UNE-EN 12299:2010 Aplicaciones ferroviarias. Comodidad de viaje para los pasajeros. Medición y evaluación.

4.3. Planificación

Tras haber presentado en los capítulos anteriores de este proyecto tanto la motivación del estudio del problema rueda-carril, así como la base teórica que refuerza la investigación realizada además de las herramientas informáticas empleadas, es necesario enunciar cómo se va a abordar el estudio, planificando cada uno de los pasos a seguir para así facilitar el desarrollo del presente proyecto.

1. Con el fin de familiarizarse con el programa y obtener soltura en la parametrización de las distintas simulaciones, se esquematiza una recta por la que transitará nuestro modelo de tren *vehículo 1* (*Tabla 4*) a diferentes velocidades con el fin de compararlas más adelante mediante gráficas creadas a partir de los datos importados al software Excel.

   Es importante mencionar que, con el fin de simplificar el proyecto, solamente se estudiarán las cuatro ruedas que componen los dos *wheelsets* del bogie delantero. Como el fin de este trabajo es comparar las magnitudes físicas más importantes en el contacto rueda-carril mediante los diversos métodos enunciados con anterioridad, no es necesario abarcar los dos bogies al completo para obtener una comparativa clara.

2. Una vez se ha alcanzado la práctica necesaria para afrontar el proyecto, el modelo *vehículo 1* se probará en un trazado más realista. Para ello se añade una irregularidad vertical (*Epígrafe 2.*5) en el raíl izquierdo de una profundidad de 20 mm que desequilibrará tanto las cargas como los esfuerzos soportados por las ruedas izquierdas frente a sus análogas del lado derecho. Además, el tramo recto se modificará hasta alcanzar una forma curva con un radio que abarque desde 1000 metros hasta 3000 metros con el fin de adquirir una muestra más amplia de datos. Este proceso se repetirá hasta tres veces con cada una de las teorías de contacto: Kik-Piotrowski, CONTACT y FASTSIM.

3. Después de haber realizado cada una de las simulaciones del contacto, mediante el comando de variables de Universal Mechanism, se recopilarán las siguientes variables: superficies de contacto, pseudo-deslizamientos (laterales y longitudinales), fuerzas de pseudo-deslizamiento (laterales y longitudinales), normales, pseudo-deslizamientos de giro y presiones en el punto de contacto.

   Además, por medio del visualizador gráfico que dispone el programa, es posible obtener una animación del cambio contante que sufre el área de contacto mientras el vehículo circula por el trazado, se capturará mediante un editor de videos como referencia para analizar las diferencias geométricas y aproximativas entre las distintas teorías del contacto.

4. El método que se propone para realizar el estudio entre las diversas teorías se planteará como una comparativa gráfica, para ello se importaran los datos de los valores que alcanzan las variables correspondientes al bogie delantero a una hoja de cálculo donde se ordenará por radio de curvatura del trazado férreo y se insertarán dentro de diferentes gráficas donde se cruzarán los datos de diferentes formas: comparando valores según el trazado, o según el método seguido en el estudio.

4.4. Resultados esperados

Tras haber planificado cómo enfocar el estudio mediante los tres métodos presentados del contacto entre las ruedas y el raíl por el que transita nuestro vehículo modelo, se espera obtener de esta tarea una serie de conclusiones que virarán desde el objetivo principal, hasta otros más secundarios.

- La comparativa gráfica entre los promedios de las superficies de contacto calculadas por los tres métodos diferentes mediante Universal Mechanism, que una vez superpuestos estos, se asemejen a la representación plasmada por las comparativas de Kik y Piotrowski (*Figura 14).*

- Obtener una semejanza de resultados en las variables de estudio que afectan al bogie delantero usando cada uno de los diferentes métodos propuestos.

- Comprender la influencia de la irregularidad vertical creada en el carril izquierdo y cómo esta modifica la tendencia de los valores expuestos a estudio al transitar el vehículo por los diferentes trazados propuestos.

- Observar el efecto del trazado curvo en la superficie de contacto, comprobando cómo se traslada el punto de contacto hacia la parte interior del raíl y se mantiene estático hasta que la curvatura empieza a decaer.

- Concluir si es efectivo usar la teoría exacta en detrimento de un mayor tiempo de procesado, frente a las teorías simplificadas.

5. DESARROLLO DEL PROYECTO Y RESULTADOS

En el capítulo que comienza, se presentarán las pautas específicas que se han seguido para la consecución de los diferentes resultados a partir del programa multicuerpo y su tratamiento de forma gráfica para realización de las comparativas.

Posteriormente se comentarán las gráficas que se ha considerado que contienen la información más trascendente como meta para alcanzar el objetivo principal propuesto para este proyecto.

5.1. Desarrollo del proyecto

Por orden de uso, se mencionarán brevemente cada uno de los comandos en el orden que han sido utilizados para la consecución del proyecto.

1. *Wizard of Variables.*
2. *Object Simulation Inspector.*
   - 2.1. *Indentifiers.*
   - 2.2. *Rail/Wheel.*
     - 2.2.1. *Track.*
     - 2.2.2. *Profiles.*
     - *2.2.3.* *Contact.*

1. Wizard of variables

Wizard of Variables es el nombre del selector de variables de UM, permite navegar entre un amplio abanico de magnitudes físicas más características del problema dinámico de un vehículo ferroviario si se aplica al proyecto actual. En este selector es posible particularizar las variables para cada una de las ruedas. La nomenclatura usada en el presente trabajo para identificar dónde se aplica cada variable será la siguiente:

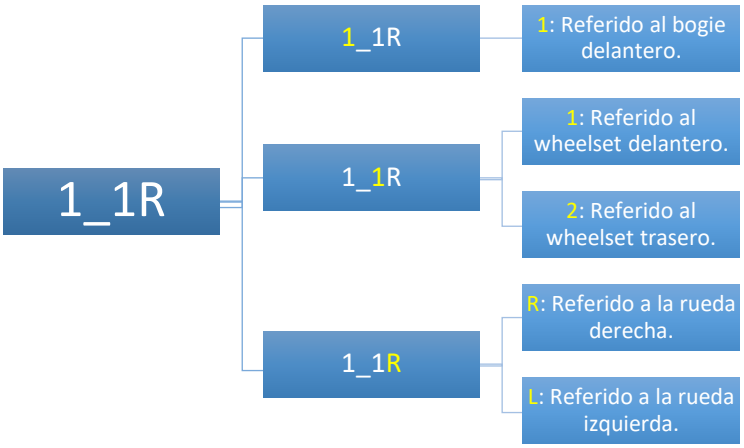


Figura 23. Desglose de la nomenclatura aplicada a cada magnitud obtenida.

Una vez ha sido definida esta, se dará uso de ella en tablas y gráficos en los que se discutirán los resultados obtenidos de la simulación. Las variables seleccionadas para el estudio son las siguientes:

La distancia recorrida por el tren *distance;* la cual se usará de guía para acotar la simulación dependiendo de las dimensiones impuestas del trazado por el que circulará el tren. El resto de las variables serán exclusivamente del contacto entre la rueda y el raíl, siendo estas los sendos pseudo-deslizamientos longitudinales *creepx* y laterales *creepy*, el pseudo-deslizamiento de giro *spin*, las fuerzas longitudinales *fcreepx* y laterales *fcreepy* correspondientes a los pseudo-deslizamientos, la *presión* y la *normal* en el punto de contacto y finalmente el tamaño de la superficie de contacto nombrado *área*. Todas estas variables han sido explicadas pertinentemente en los epígrafes teóricos.

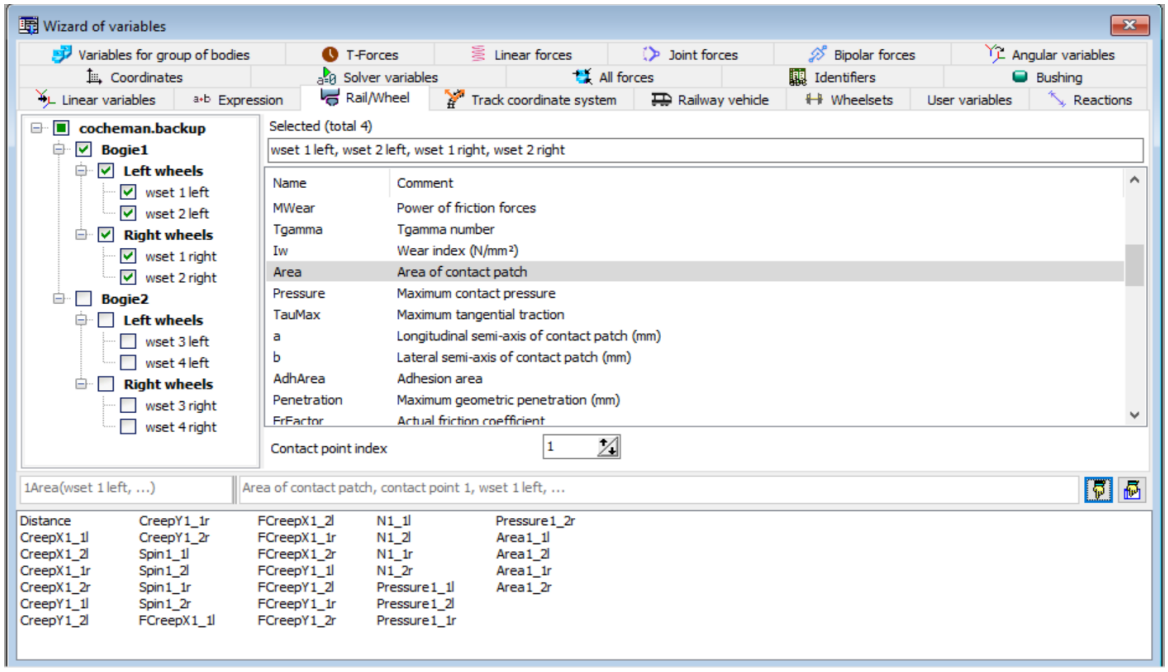


Figura 24. Variables recogidas con el selector.

Aunque no aparezcan en la captura de pantalla expuesta anteriormente, además de las variables anteriores, inicialmente se incluyeron dos derivadas de la superficie de contacto, que son el semieje longitudinal *a* de la superficie y el semieje lateral *b*. Ambos se han excluido de las tablas de datos finales y de sus gráficas comparativas, al no considerarlas relevantes frente a una comparativa directa de las diferentes áreas de contacto.

2. Object Simulation Inspector

Desplegando este inspector, se encuentran la mayoría de los comandos necesarios tanto para parametrizar el problema, como para realizar su simulación. A continuación, se darán unas pautas sobre estos últimos donde se describirán sus utilidades.

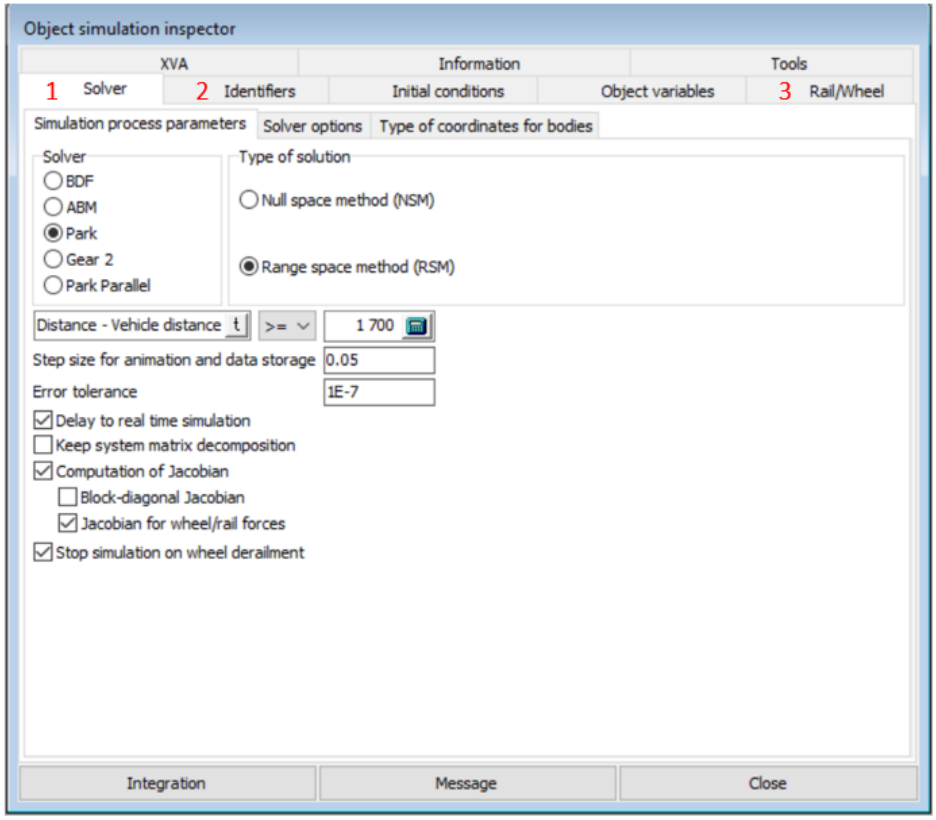


Figura 25. Object Simulation Inspector.

- ***Solver*** (1) permite concretar la condición de finalización de la simulación, se usará para ello la variable *distance* con el fin de simplificar la integración en lugar de otras como el tiempo de recorrido. La tolerancia de error se mantendrá con los valores predeterminados, para así aliviar la carga de procesamiento a la CPU.

- La condición para la finalización de la simulación está establecida tras asignarse a la variable *distance,* dependiendo de la longitud del trazado se cambiará su valor por los metros en que el vehículo ha necesitado en recorrer la curvatura de la vía.

Radio de curvatura (90^0)

$$\begin{cases} 1000 \text{ metros} \Rightarrow \text{distancia final} = 1571 \text{ m.} \\ 1500 \text{ metros} \Rightarrow \text{distancia final} = 2356 \text{ m.} \\ 2000 \text{ metros} \Rightarrow \text{distancia final} = 3142 \text{ m.} \\ 2500 \text{ metros} \Rightarrow \text{distancia final} = 3920 \text{ m.} \\ 3000 \text{ metros} \Rightarrow \text{distancia final} = 4712 \text{ m.} \end{cases}$$

- ***Indentifiers*** (2), solamente se usará para cambiar la velocidad que circulará el tren. Esta abarcará desde los 10 m/s hasta los 60 m/s aumentando en rangos de 10 m/s en cada simulación. Esta velocidad se mantendrá constante durante todo el recorrido puesto que así se le ha impuesto al vehículo con el fin de simular un escenario genérico que podría ocurrir en un caso realista.

- ***Rail/Wheel*** (3) desplegará la mayor parte de los comandos que modifican tanto características técnicas en la vía, como de los bogies del tren, así como la selección del modelo teórico de resolución del problema del contacto (Kik-Piotrowski, Fastsim o CONTACT) que se usará en la simulación. El siguiente esquema que continua estas líneas facilitará la explicación de cada uno de los comandos.

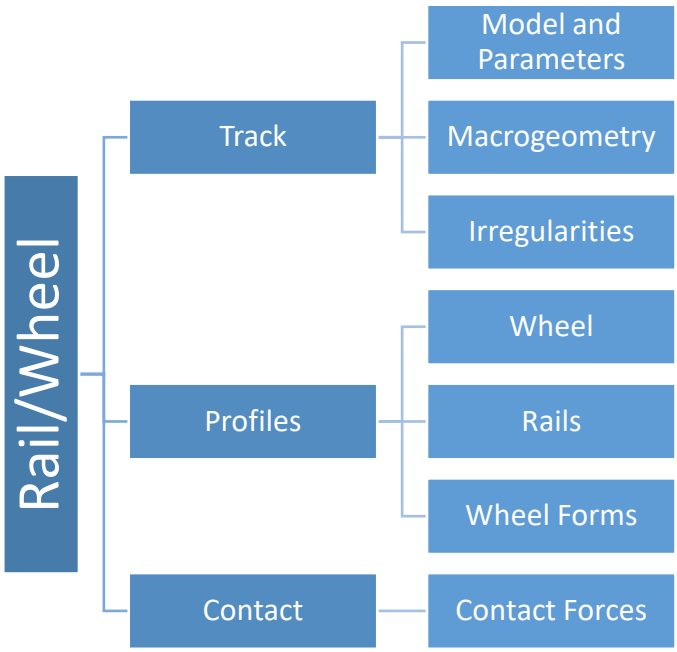


Figura 26. Desglose de Rail/Wheel.

- ***Track*** abarca el diseño de la geometría del raíl por el que circulará nuestro vehículo. Desde el peralte que tomará en curva el trazado, hasta decidir si existen irregularidades o no la propia vía. En ***Models and Parameters,*** se elegirá entre dos distintos tipos de vía que influenciarán en el tipo de método para resolver el problema.
  Massless Rail trata los raíles como elementos sin masa. Recomendado si se requiriese simular trenes de rodaje (oruga) debido a que la dinámica en el raíl apenas afecta en este tipo de vehículos [20].
  Inertial Rail trata los raíles como cuerpos rígidos debajo de cada rueda, esta opción está mejor enfocada en la simulación en trazados más complejos como pueden ser cambios de agujas. En el caso de este proyecto, marcar esta opción, permitirá implementar las teorías CONTACT y Kik-Piotrowski.

  Es importante aclarar que en un primer momento aparecieron dificultades al seleccionar la opción de *Inertial Rails*, ya que el programa se interrumpía cada vez que se realizaba la selección. Tras un análisis, se llegó a la conclusión de que el error residía en que el modelo *vehículo 1* se desacoplaban todas sus partes; desde los bogies hasta los diferentes elementos de amortiguación. Se solventó reacoplándolos desde el módulo UM Input uno a uno hasta la caja central. En la figura que se expone a continuación, se comprueba a continuación el acople satisfactorio de todos los elementos entre sí del *vehículo 1*.

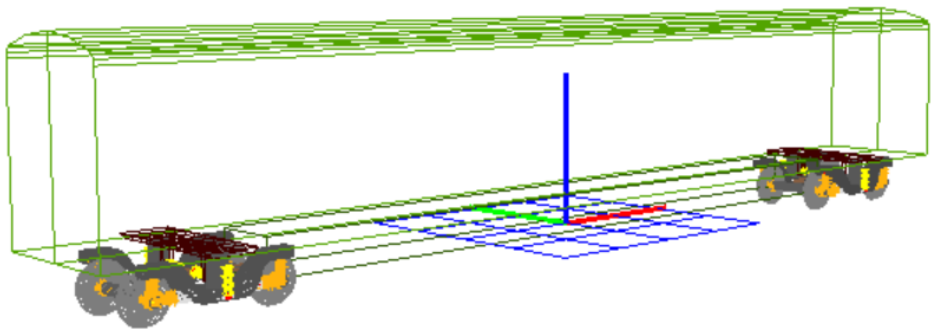


Figura 27. Vista semitransparente del modelo Vehículo 1.

La pestaña ***Macrogeometry*** permite describir el trazado de la vía, permitiendo modificarla en forma de tramos rectos, curvos, desvíos y otras diversas geometrías.
Para los primeros ensayos realizados con la finalidad de familiarizarse con el programa se realizó una recta de 1500 metros de longitud con la que probar las simulaciones.

En los estudios relevantes para los objetivos del proyecto, se optó por un trazado curvo de diversos tamaños. Se eligió una curva a derechas Tras haber recorrido un tramo recto con el fin de obtener en las animaciones, la traslación de la superficie de contacto del lado central del carril hasta la derecha debido al efecto centrífugo que toma en la curva el vehículo.

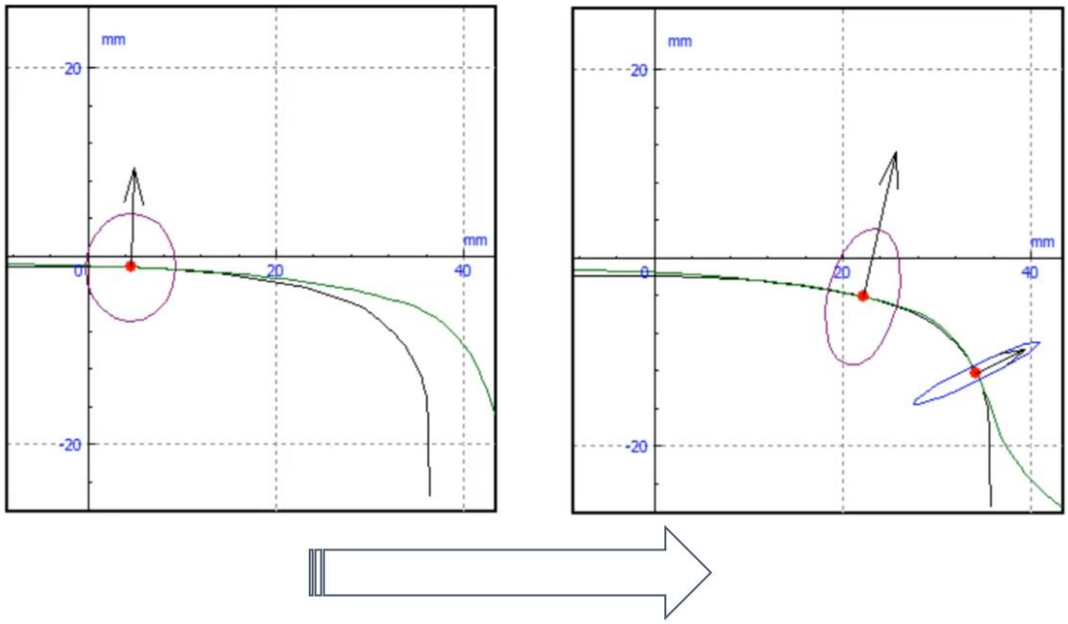


Figura 28. Cambio de posición del contacto simulado por FASTSIM al entrar en curva.

En la *Figura 28* se aprecia el cambio en la posición que padece el contacto de la rueda izquierda del *wheelset* delantero del primer bogie. Antes de entrar en curva, el contacto se origina en un único punto de la cabeza del carril, además se puede comprobar que circula en línea recta al ver como la normal de la fuerza es casi perpendicular a la horizontal de la tierra. Por otro lado, en la imagen del lado derecho, en la cabeza del raíl se originan dos puntos de contacto, el más cercano al interior de la curva teniendo un área mucho menor que el otro, las normales en este caso están inclinadas adaptándose a la curvatura del trazado.

Con el fin de modificar la geometría de la vía y convertirla en una con curvatura, es importante comprender las opciones que ofrece *Macrogeometry* como en la próxima del comando usado para representar una curva de radio 1000 metros cuyo arco solamente recorra un cuarto de circunferencia.

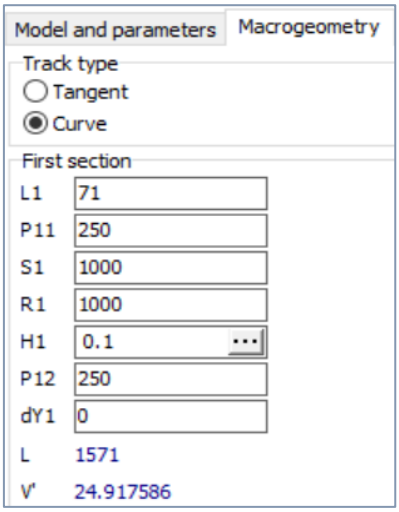


Figura 29. Macrogeometría para el caso de una curva de 1000 metros de radio.

En la imagen superior (*Figura 29)* se puede comprobar cómo se deben de completar una serie de comandos para obtener la forma deseada,

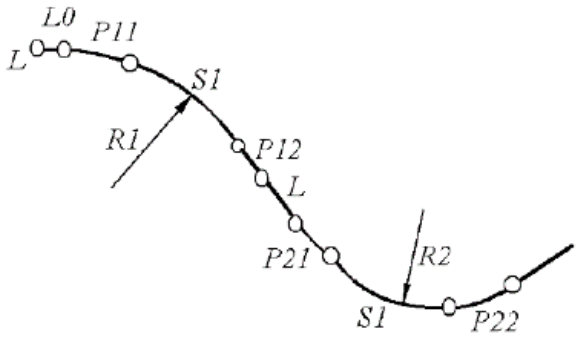


Figura 30. Leyenda de los parámetros de Macrogeometry [20].

Presentándoles en orden de aparición de la pestaña *Macrogeometry* se parametriza:

L1: esta longitud representa el tramo recto antes de tomar la curva; en todas las simulaciones se incluyó unos pocos metros con la finalidad de observar el cambio de posición del contacto (*Figura 28*)

P11: esta longitud testifica la transición que ocurre desde el tramo recto al trazado curvo.

S1: representa la longitud del tramo curvo.

R1: es la abreviatura del radio del tramo curvo.

H1: se mantendrá en todo momento con valor 0,1. Se refiere al peralte que toma en el tramo curvo el raíl exterior; en este caso el raíl izquierdo, con el fin de mejorar la estabilidad del vehículo al transitar por la vía.

P12: al igual que *P11*, representa la transición del tramo curvo hacia el trazado recto.

Con la finalidad de obtener los trazados deseados que satisfagan los radios de curva que medirá la vía de forma que cambie de sentido 90^0, es preciso presentar las expresiones que permitan el cálculo de los parámetros mencionados anteriormente.

$$L = 2\pi R \rightarrow (90^0) \rightarrow L_{(90^0)} = \frac{\pi R}{2}$$

$$R_1 = S_1 \ \ (condición\ impuesta)$$

$$L_1 = \frac{\pi R_1}{2} - \frac{3R_1}{2} = \frac{R_1}{2}(\pi - 3)$$

$$P_{11} = P_{12} = \frac{R_1}{4} \tag{56}$$

Seguidamente, se recogerán en esta tabla todos los parámetros para esquematizar las curvas de radio 1000, 1500, 2000, 2500 y 3000 metros.

Parámetros (metros)	1000 m	1500 m	2000 m	2500 m	3000 m
L_1	71	106,2	142	177	212,3
P_{11}	250	375	500	625	750
S_1	1000	1500	2000	2500	3000
R_1	1000	1500	2000	2500	3000
P_{12}	250	375	500	625	750

Tabla 5. Valores de los parámetros para curvas de radio 1000, 1500, 2000, 2500 y 3000 metros.

La esquematización de las curvas que marcan un cambio de sentido de 90 grados se podrá comprobar de forma gráfica con el comando *Animation Window*, el cual además de mostrar el trazado presenta el modelo *vehículo 1* matizado en color verdoso.

Figura 31. Vista aérea del trazado curvo con radio de 1000 metros.

La pestaña ***Irregularities*** permite introducir diferentes irregularidades en la vía ya sean de carácter horizontal o vertical (*Epígrafe 2.5*). Con la intención de obtener simulaciones más realistas, se introduce en todos los trazados una pequeña irregularidad vertical en el lado izquierdo del carril.

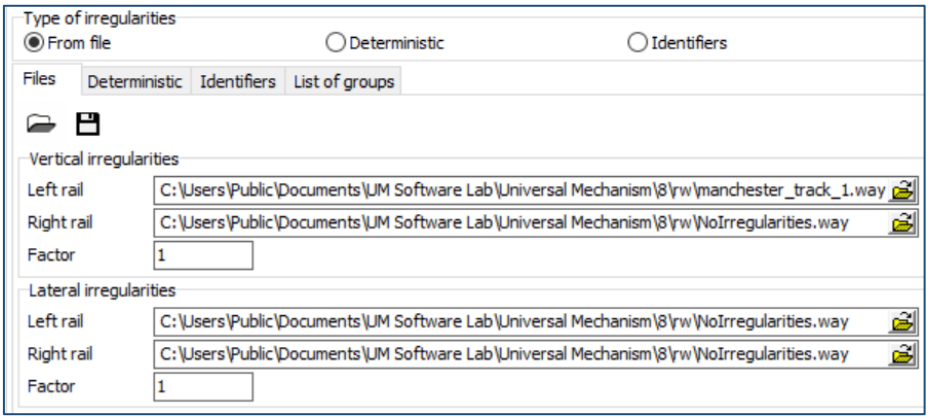


Figura 32. Vista de Universal Mechanism con la irregularidad elegida cargada.

Arriba se identifica detrás de ambas irregularidades el factor multiplicador. Este se deja con un valor unidad de forma predeterminada.

La irregularidad vertical creada, está situada desde los 155,5 metros del inicio hasta los 167,5 metros iniciales de cada uno de los cinco trazados curvos simulados. Tiene el propósito de que en ninguno de los casos se encuentren en zona predominantemente curva para que esta irregularidad no cree interferencias en la comparativa de las variables entre los distintos trazados. En el caso de las vías con menor longitud como son las de 1000, 1500 y 2000 metros de radio, la irregularidad alcanzará la zona de transición de tramo recto a curvo, mientras que en los trazados más grandes que son los de 2500 y 3000 metros de radio, la irregularidad se salvará en el propio tramo recto.

Desde los 155,5 metros de longitud, la irregularidad vertical va creciendo linealmente hasta alcanzar un máximo de 20 milímetros de profundidad en la cabeza del carril a los 161,6 metros de longitud. Tras esta distancia el carril comienza a recuperar su forma estándar hasta alcanzarla completamente a los 167,5 metros. Se expone tras estas líneas un esquema gráfico donde muestra su tendencia visualmente que ha sido exportado del visualizador de Universal Mechanism; en este caso de un trazado de 500 metros.

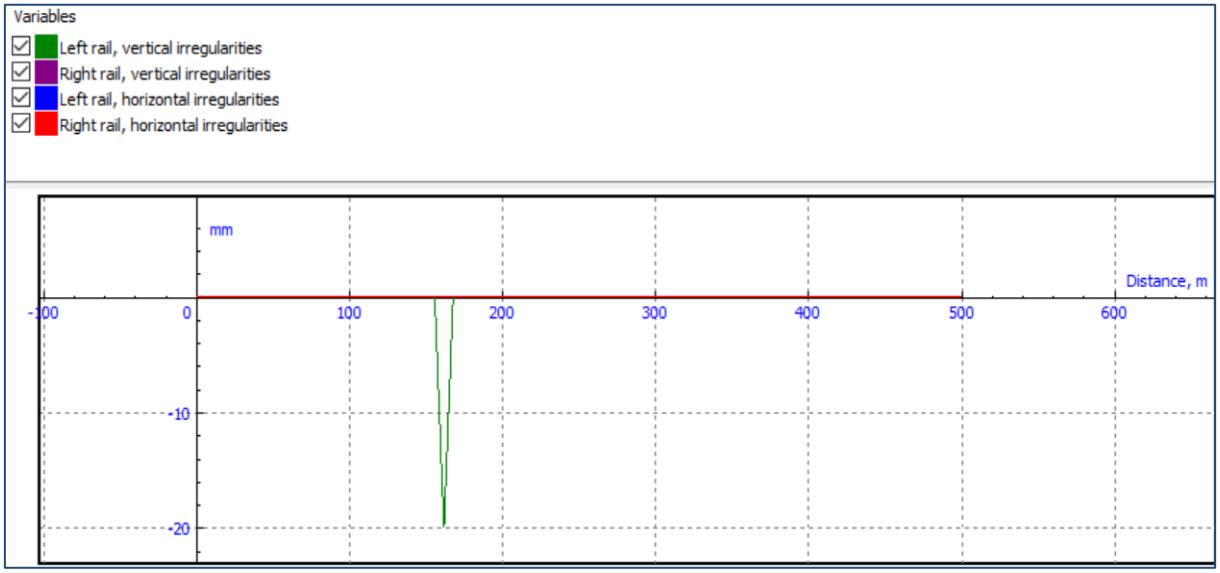


Figura 33. Vista gráfica de los valores de la irregularidad vertical en el carril izquierdo.

- **Profiles** engloba tanto los perfiles de las ruedas que utilizará nuestro vehículo a simular, así como los perfiles de la vía por la que circulará.

  El perfil de la rueda a usar en caso del *vehículo 1* a probar es el perfil estandarizado S-1002 el cual tiene un diámetro de 92 cm.

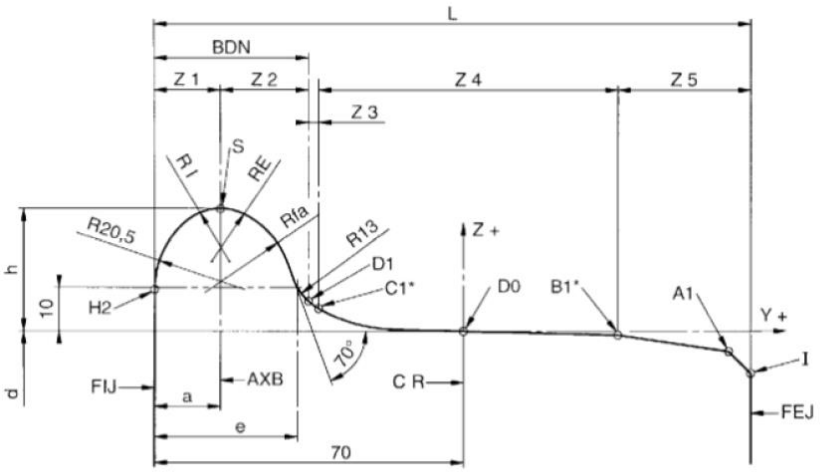


Figura 34. Perfil de rueda S-1002 [26].

Por otra parte, el perfil a utilizar en la vía será el también estandarizado perfil UIC-60, el cual es nombrado a partir de las siglas UIC, las cuales engloban *Union Internationale des Chemins de Fer* [27]; Unión Internacional de Ferrocarriles que engloban dentro de la organización a los principales participantes del sector Ferroviario en Europa y Asia con el fin de estandarizar vías férreas y ruedas con el fin de conseguir una intercompatibilidad entre diferentes naciones. Uno de los modelos de carril más comunes y que se ha dispuesto para los distintos experimentos tendrá las siguientes cotas.

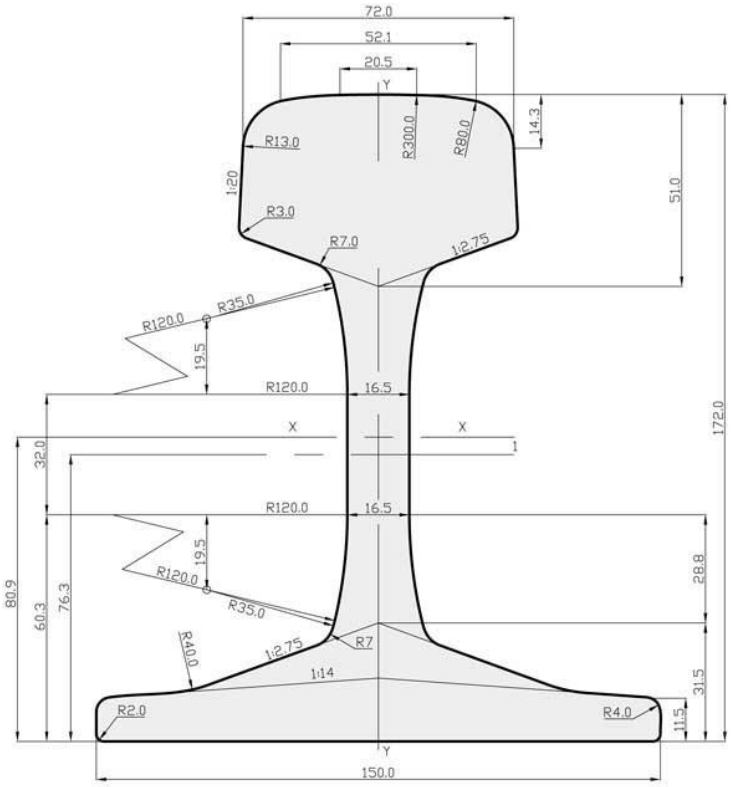


Figura 35. Perfil de la vía UIC-60 [27].

En la siguiente pestaña ***Wheel Forms*** se pueden crear defectos en las ruedas del vehículo. Como este estudio no se centra en la defectología de las ruedas, no se considera necesario incluir alguna de ellas, por lo que se marcará como wheelsets sin defecto,

- **Contact** es la pestaña que engloba el grueso de este trabajo, permite cambiar la teoría de cálculo del problema del contacto raíl-rueda.

  El método por defecto que incluye el programa es FASTSIM, que como se ha mencionado con anterioridad, funciona para raíles sin masa.

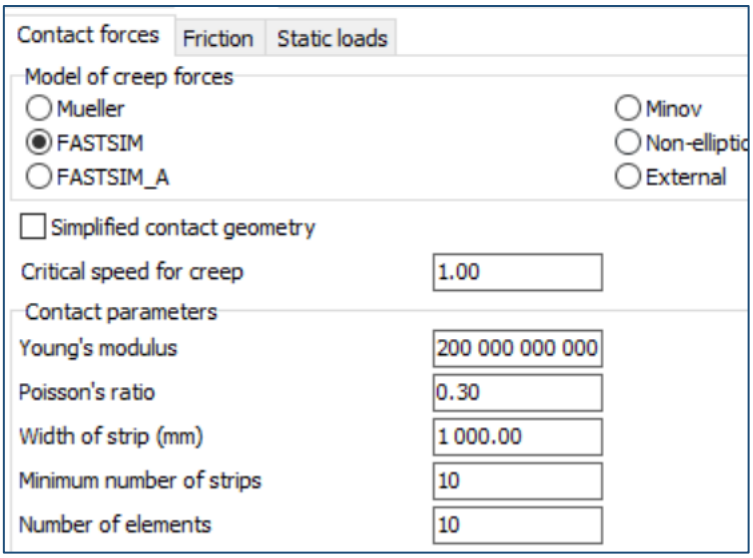


Figura 36. FASTSIM y sus parámetros de contacto.

Entre los parámetros se incluye el número de elementos de discretización además de coeficientes pertenecientes al material por el que está fabricado la rueda como el módulo de Young o el coeficiente de Poisson parametrizándose como 200 GPa y 0,30 respectivamente, por lo que se trata de acero en su composición.

Si se cambia el tipo de raíl por uno inercial, se accede al comando donde se encontrará la teoría de Kik-Piotrowski. En el caso de querer usar la teoría de contacto exacta desarrollada por Kalker, es necesario añadir un *add-on* que permite implementar su teoría de contacto en UM Simulation.

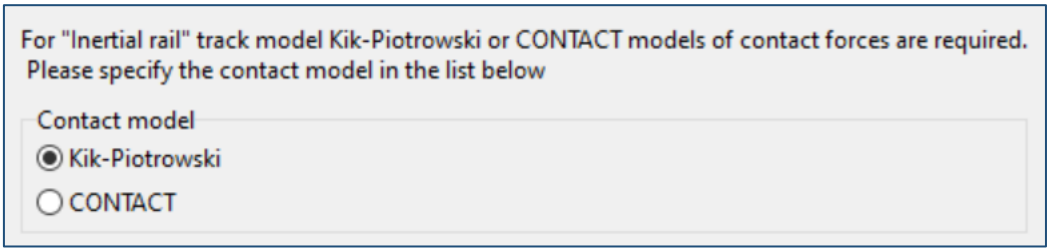


Figura 37. Elección de teorías de contacto para raíles inerciales.

Habiendo presentado el desarrollo del proyecto, se procederá a analizar los resultados obtenidos.

5.2. Resultados

La obtención de resultados se realiza combinando las opciones a elegir entre la macrogeometría de la vía, la velocidad de ensayo del vehículo y el método resolutivo del contacto rueda-raíl. A partir de estas pausas que se esquematizan en la figura siguiente, se procede a obtener gráficas para cada una de las variables:

- Superficie de contacto.
- Normal en el contacto.
- Pseudo-deslizamiento longitudinal.
- Pseudo-deslizamiento lateral.
- Fuerza de pseudo-deslizamiento longitudinal.
- Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral.
- Pseudo-deslizamiento de giro
- Presión en el contacto.

Para cada una de estas variables se ha obtenido el valor pertinente a las ruedas apropiables al bogie delantero del *vehículo 1*. Su exportación se ha realizado en la hoja de cálculo Excel creando cinco tablas en función del radio que toma el tramo curvo del vehículo, con el fin de cotejar mejor los datos importados, se ha realizado un promedio de estos para cada velocidad de ensayo (ver *Anexo I*).

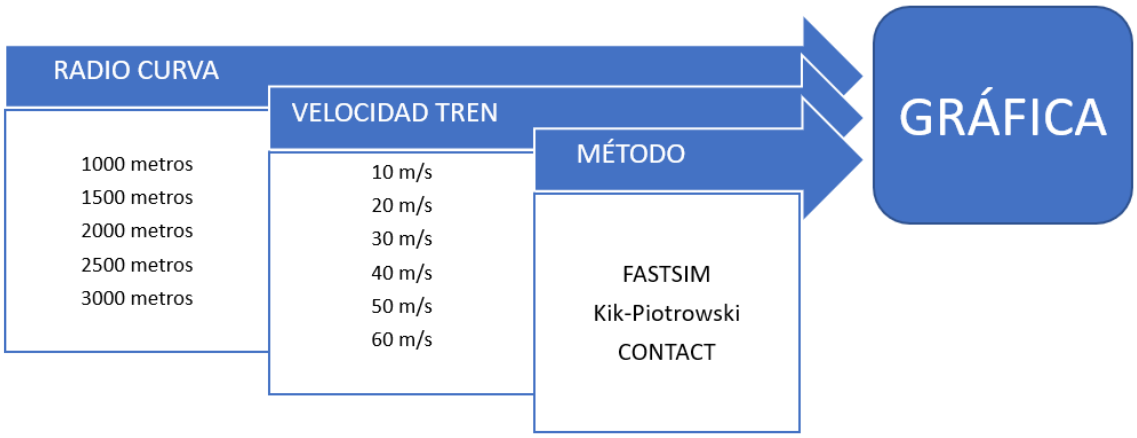


Figura 38. Esquema seguido para la creación de las gráficas de datos.

Es conveniente enunciar que, para la comparativa entre los tres métodos de contacto, se tomará como modelo el método simplificado de Kalker; FASTSIM, este ha sido escogido debido a la experiencia del departamento de Ingeniería Mecánica en su uso para diferentes labores. Su cotejo con el resto de los métodos servirá para comprobar su posible sustitución por ellos en base a precisión y tiempo de cálculo.

A continuación, se comentarán alguno de los gráficos más relevantes con la finalidad de presentar un método que se pueda replicar para el resto de las gráficas.

Se dividirán en dos bloques donde se presentarán:

A. La evolución de los parámetros con el aumento de radio en la curva.

B. La comparativa de los parámetros entre los tres métodos diferentes por los que han sido simulados (FASTSIM, Kik-Piotrowski y CONTACT)

Algunos de los valores que se mostrarán a continuación pueden tomar un valor negativo, lo que indica la dirección que toman algunas de las variables tales como los pseudo-deslizamientos o sus fuerzas correspondientes debido a la fenología del problema en un tramo curvo.

Con el fin de facilitar la comprensión de los gráficos que aparecen en este capítulo, así como el resto del conjunto que se incluye en los anexos, se presenta la *Figura 39* donde se personifican los ejes cartesianos para los que se miden las variables así como la dirección de la marcha del *vehículo 1*.

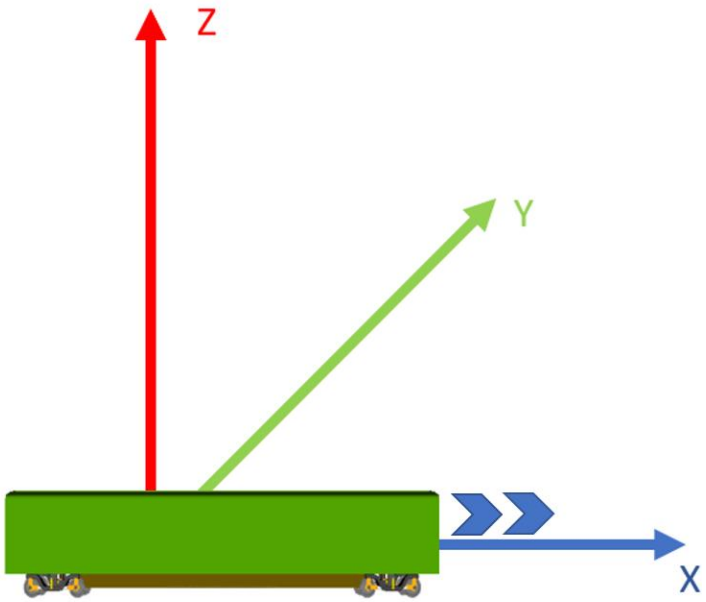
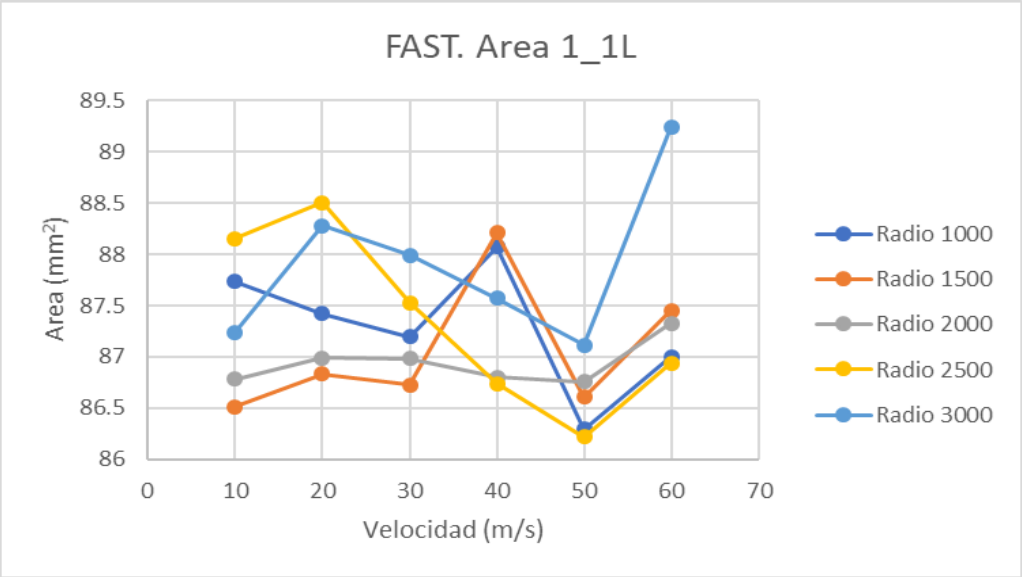


Figura 39. Ejes cartesianos del vehículo 1.

5.2.1. Evolución de los parámetros con el aumento del radio de la curva

- Superficie de contacto

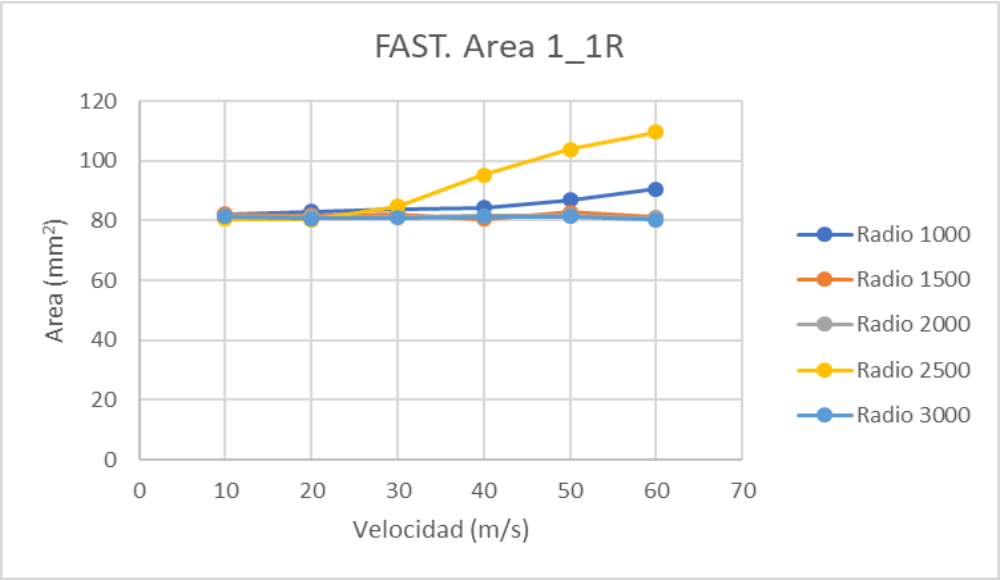


Gráfica 1. Evolución de la superficie 1_1L contra la velocidad mediante FASTSIM.

La *Gráfica 1* muestra los valores promedio del área de contacto frente a diferentes tamaños de curva mediante el método de cálculo FASTSIM. Como se trata de los valores para la rueda izquierda delantera del primer bogie, y las curvas son hacia la derecha, esta rueda tomará el exterior de la curva y soportará más peso que su análogo interior, por lo que su área será mayor.

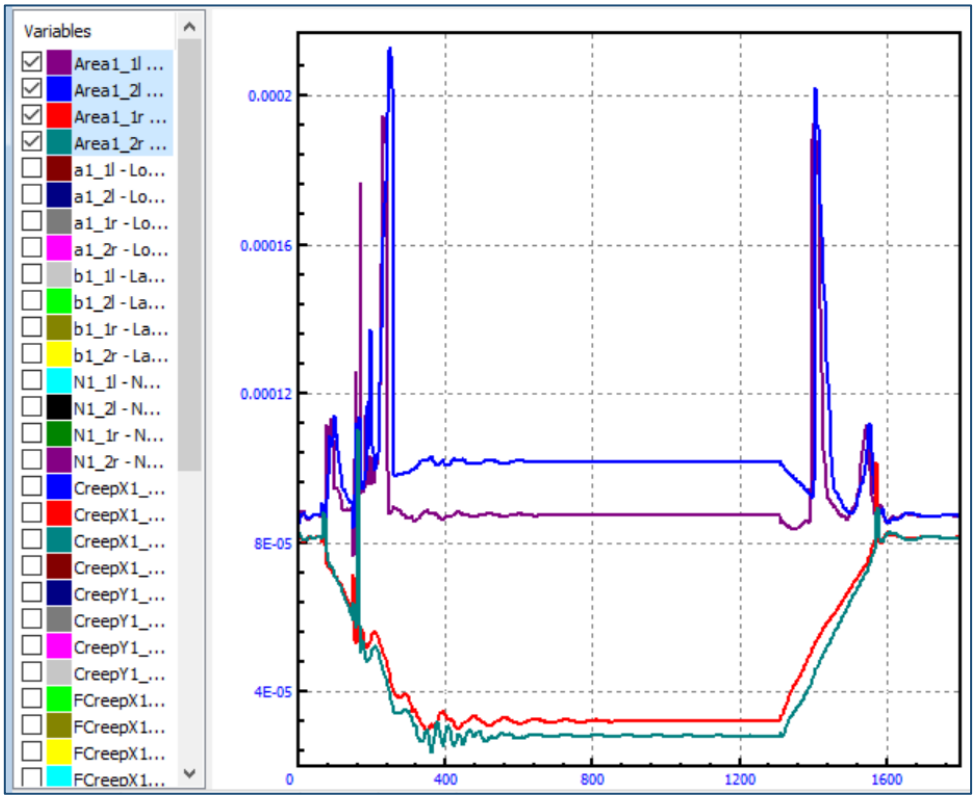
Es importante tener en cuenta que los valores mostrados en la gráfica apenas varían puesto que entre el mayor valor de 89,2 mm^2 (curva de radio 3000m a 60 m/s) y el menor valor de 86,2 mm^2 (radio de 2500 m a 50 m/s) solamente hay una diferencia de 3 mm^2; o un 3,3% de contraste entre ambos valores. Algo relativamente parejo.

En 50 m/s suceden los valores más bajos del área, sufriendo estos un repunte si el tren circulase a 60 m/s.



Gráfica 2. Evolución de la superficie 1_1R contra la velocidad mediante FASTSIM.

En la *gráfica 2*, se aprecia cómo el área se mantiene casi constante para cada promedio de velocidad en todas las funciones, menos en la asignada al radio de 2500 metros que alcanza un valor de 109,63 mm^2 para 60 m/s tras empezar a crecer a partir de los 30 m/s. El resto de los valores apenas varían oscilando entre los 80 mm^2 y los 90,56 mm^2.



Gráfica 3. Evolución del área en una curva de radio 1000 m para una velocidad de 60 m/s (FASTSIM).

Para concluir, en la *gráfica 3* se muestra de forma clara la diferencia de superficies entre las ruedas exteriores e interiores; sufriendo mucho más el peso del vehículo debido a la transferencia de masas en el tramo curvo que las ruedas interiores. Si se tomase la curva con demasiada velocidad, el carril exterior estaría solicitado en exceso debido al incremento de la aceleración lateral lo que se traduce en un malestar entre los viajeros, movimiento excesivo de los bienes a transportar, o en el peor de los casos, el descarrilamiento.

Tras estas líneas se incluye la *Figura 40* que muestra la inestabilidad del contacto rueda-raíl entre el wheelset delantero para una curva a derechas de radio 500m, a la velocidad máxima de paso sin descarrilar de 47,78 m/s. La rueda 1_1L mantiene en todo momento un doble contacto con el carril izquierdo, mientras que la derecha 1_1R a partir de los 5,3 segundos de iniciar la marcha, pierde en repetidas veces la adherencia con el carril derecho, lo que provoca una gran inestabilidad hasta los 13 segundos de marcha cuando se estabiliza el wheelset.

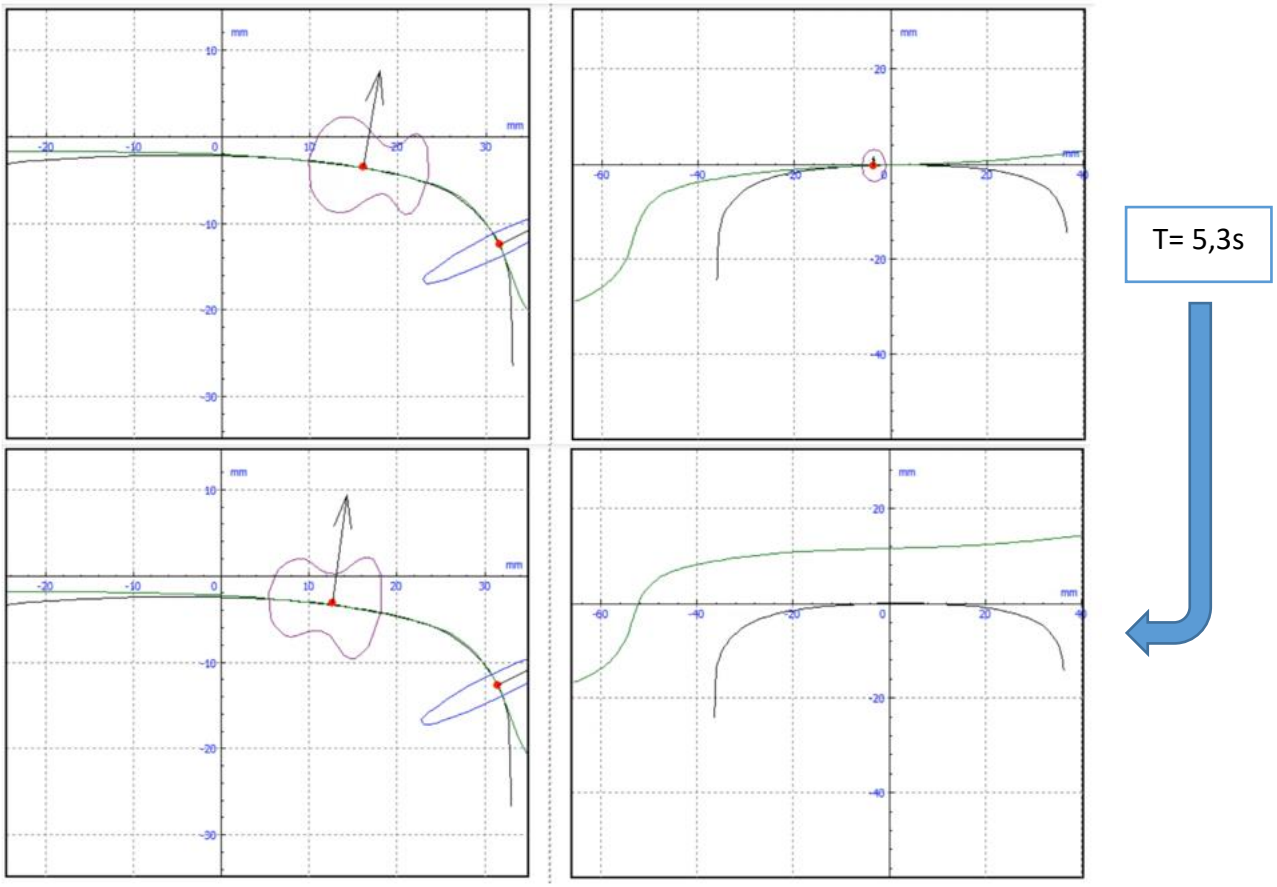


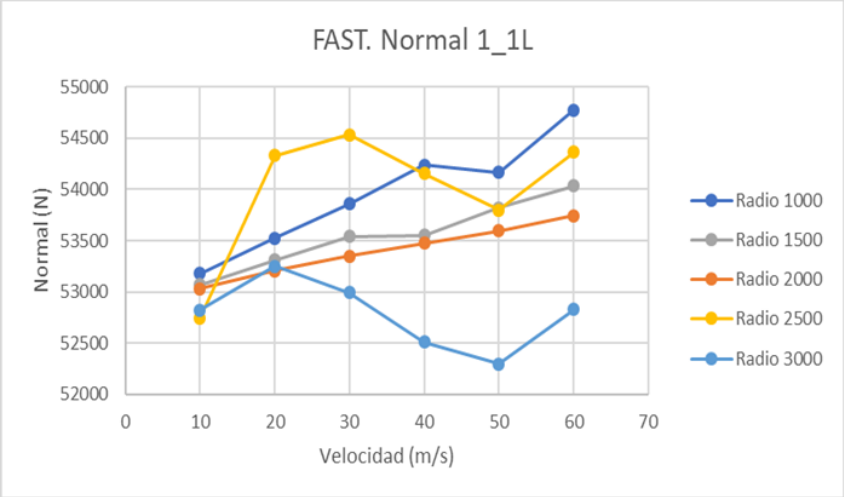
Figura 40. Contacto rueda-carril del wheelset delantero para la velocidad crítica de 47,78 m/s en un tramo curvo de 500 metros de radio.

El peralte usado en esta vía es de 10 cm, adecuado para garantizar el confort del pasajero, se podría aumentar ligeramente la velocidad crítica aumentando el peraltado de la curva, pero no se considera necesario puesto que tiene un mayor peso la seguridad del trayecto que el tiempo en el que se realiza este.

- Fuerza normal en el contacto

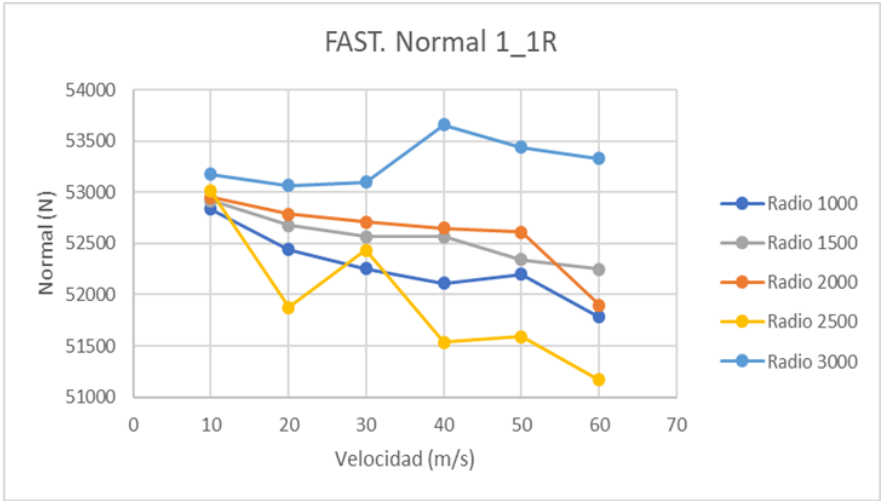
En el caso de la rueda 1_1L los valores de la fuerza normal tienen una tendencia creciente en las radios 1000, 1500 y 2000 metros alcanzando sus valores máximos en la velocidad promedio de 60 m/s con una equivalencia de 54776 N, 54036 N y 53744 N respectivamente.

Esta tendencia creciente desaparece en los radios superiores destacándose en el radio 3000 con un valor de 52825 N.



Gráfica 4. Evolución de la normal para 1_1L frente a la velocidad.

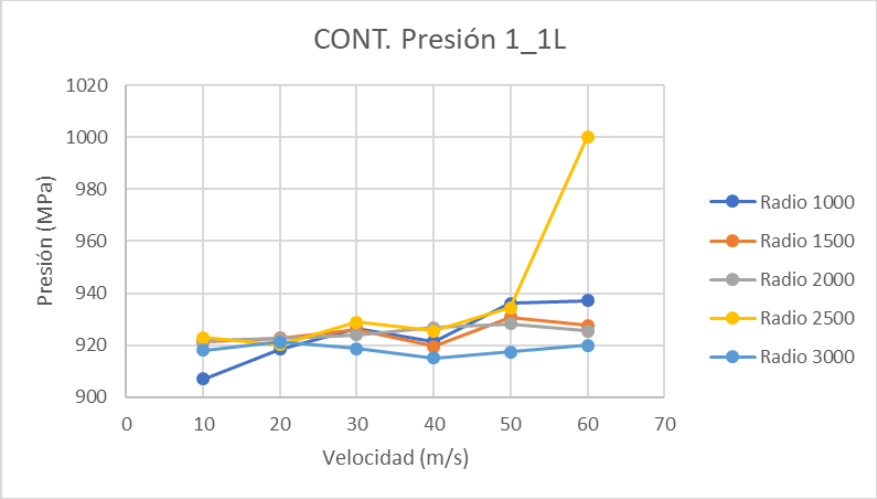
Como se podría esperar, en su contrapartida la rueda 1_1R sufre una tendencia de creciente en todas sus funciones exceptuando la curva de 3000 metros donde ocurre lo inverso a la gráfica anterior, la normal es la más grande alcanzando el máximo absoluto a 50 m/s con un valor pico de 53658 Newtons.



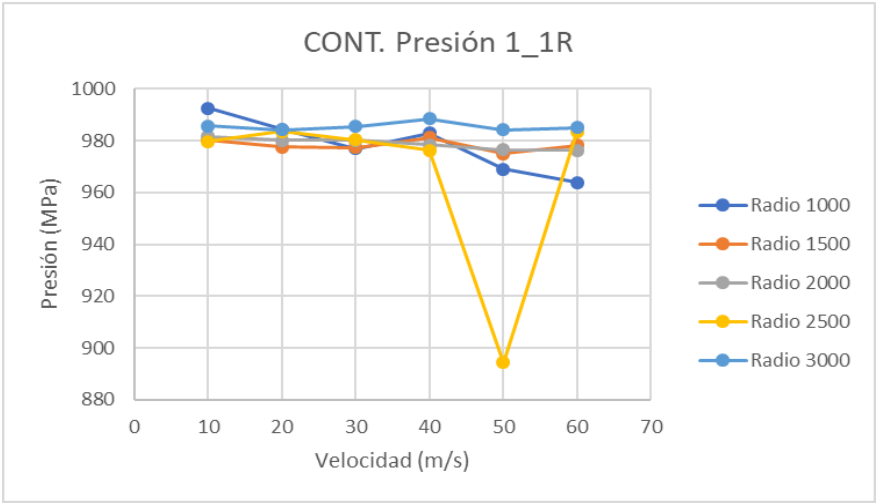
Gráfica 5. Evolución de la normal para 1_1R frente a la velocidad.

Presión máxima en el contacto

La presión en el contacto está estrechamente relacionada con el área de contacto. Al aumentar esta, aumenta la superficie. En la siguiente pareja de gráficas se enseña el desarrollo del primer wheelset del bogie delantero mediante CONTACT.



Gráfica 6. Evolución de la presión para 1_1L frente a la velocidad.

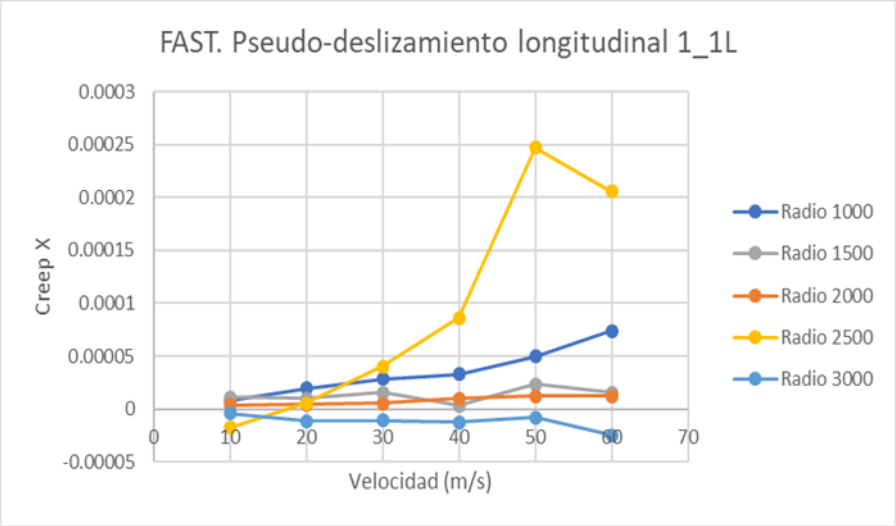


Gráfica 7. Evolución de la presión para 1_1R frente a la velocidad.

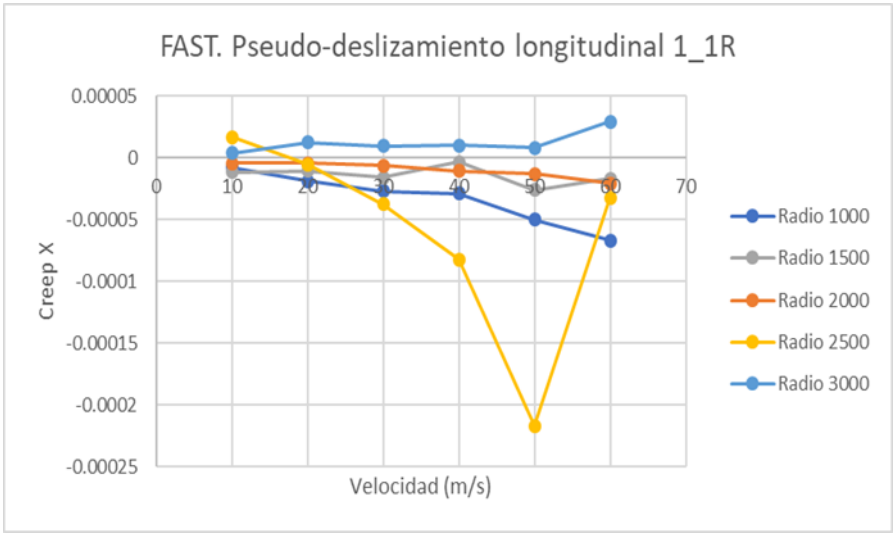
Pseudo-deslizamiento longitudinal

Los pseudo-deslizamientos longitudinales en la rueda 1_1L van a tener un valor que se mantiene prácticamente estable con el cambio de velocidad. Para el radio de 1000 metros, el pseudo-deslizamiento oscila entre 7,9 $x10^{-6}$ y 73 $x10^{-6}$ unidades. Para la función de radio 2500 sí que sufre un crecimiento elevado, valiendo el promedio 8,6 $x10^{-5}$ en 40 m/s y alcanzando a continuación el máximo de 24,7 $x10^{-5}$ unidades.

En el caso de su rueda opuesta, las funciones ofrecen una tendencia inversa a la gráfica 8. Esto se explica con la unión entre las dos ruedas 1_1L y 1_1R por un eje rígido. Al comenzar el vehículo a transitar por la curva, la rueda exterior 1_1L gira más rápido que la rueda interior 1_1R.



Gráfica 8. Evolución del pseudo-deslizamiento X para 1_1L frente a la velocidad.

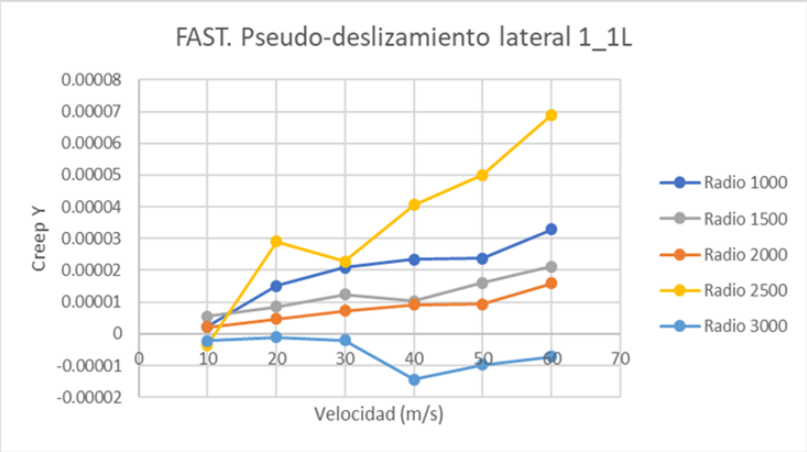


Gráfica 9. Evolución del pseudo-deslizamiento X para 1_1R frente a la velocidad.

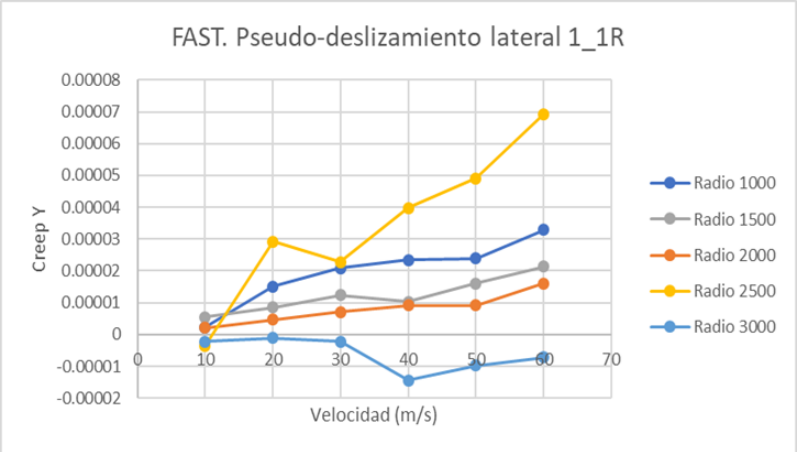
Pseudo-deslizamiento lateral

Para los pseudo-deslizamientos laterales; *Gráfica 10* y *Gráfica 11*, no aparecen tendencias opuestas en la evolución de los valores como sí aparecían en el pseudo-deslizamiento longitudinal.

Esto se debe a que en la curva, en la dirección lateral "*y*", ambas ruedas se desplazan al exterior de la curva por lo que ambos pseudo-deslizamientos en las ruedas 1_1R y 1_1L son prácticamente iguales. A medida que el radio de la curva disminuye, el pseudo-deslizamiento lateral aumenta, exceptuando esta hipótesis al radio de 2500 metros (funciones de color amarillo) cuyos resultados resultan incoherentes en estas y el resto de las gráficas si se estudia la tendencia del resto de radios. Convendría realizar un estudio aproximativo para valores de curva cercanos a 2500 metros para comprobar más exhaustivamente la validez de los datos obtenidos con Universal Mechanism.



Gráfica 10. Evolución del pseudo-deslizamiento Y para 1_1L frente a la velocidad.



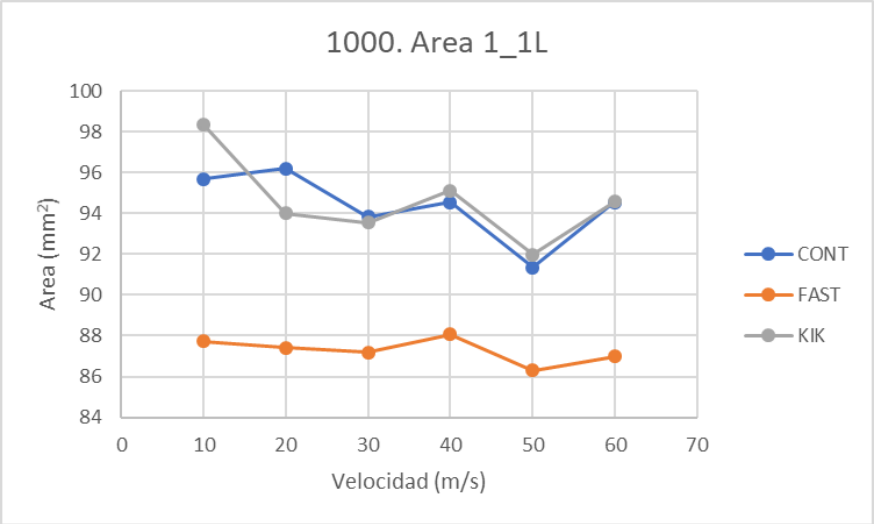
Gráfica 11. Evolución del pseudo-deslizamiento Y para 1_1R frente a la velocidad.

5.2.2. Comparativa mediante los métodos de resolución

Con la finalidad de contrastar los resultados entre las tres teorías que resuelven el problema del contacto rueda-carril, se ha elaborado la cantidad total de 160 gráficas (*Anexo II*) divididas en cuatro bloques según la macrogeometría de la curva. En cada bloque se coteja para cada una de las cuatro ruedas que conforman el bogie delantero las ocho variables: superficie, normal, presión, giro, los pseudo-deslizamientos y sus fuerzas.

Seguidamente, se describirán brevemente algunas de estas gráficas con el fin de advertir similitudes y diferencias entre estos tres métodos.

Superficie de contacto



Gráfica 12. Comparativa del área de contacto 1_1L para un radio de 1000 m.

A simple vista se puede observar cómo las tres funciones siguen una tendencia parecida, acentuándose a partir de los 30 m/s donde en el caso del método CONTACT Y Kik-Piotrowski los valores están muy cerca de confluir (*Tabla 6*)

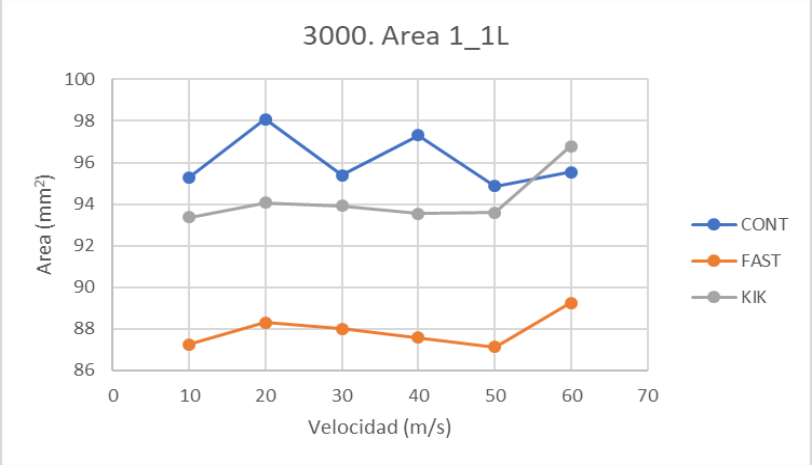
1_1L	FASTSIM $[mm^2]$	KIK $[mm^2]$	CONTACT $[mm^2]$
10 m/s	87.74	98.34	95.69
20 m/s	87.42	94.01	96.20
30 m/s	87.20	93.56	93.83
40 m/s	88.07	85.12	94.55
50 m/s	86.29	91.98	91.36
60 m/s	86.99	94.57	94.55

Tabla 6. Valores obtenidos de la Gráfica 12 y su confluencia.

Con la finalidad de resaltar los puntos donde coinciden los métodos Kik-Piotrowski y CONTACT se ha creado la tabla superior. En 30 m/s estos dos valores apenas difieren un 2,88 %, en 50 m/s un 6,78 % y en el último valor de 60 m/s se obtienen los valores más parejos con una diferencia del 2,11 %.

Tanto la función de la teoría exacta como la de Kik-Piotrowski, se alejan en los valores con la teoría simplificada FASTSIM de forma más abultada para 10 m/s con un 12,08 % respecto a Kik y un 9,06 % en comparativa con la teoría exacta. El punto en que las tres teorías son más parecidas es en 40 m/s con un contraste del 3,34 % con Kik-Piotrowski y de un 7,35 % con CONTACT.

Para consolidar estos porcentajes, se elige probar el *vehículo 1* en la vía con geometría más grande; la curva de radio 3000 metros (ver *Gráfica 13*).



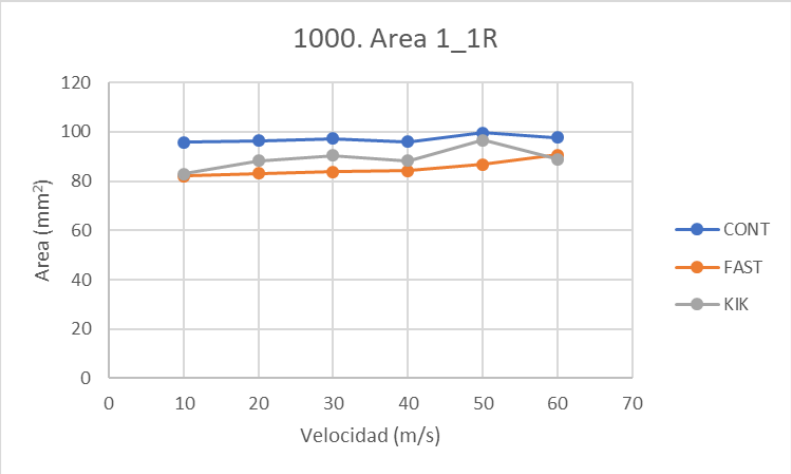
Gráfica 13. Comparativa del área de contacto 1_1L para un radio de 3000 m.

En este caso los valores entre CONTACT y Kik-Piotrowski difieren más que en radios más pequeños, no convergiendo ninguno de los valores para los promedios de velocidades descritos. En los puntos más lejanos; que ocurren a una velocidad de 20 m/s, del modelo estándar FASTSIM que predice un área de 88,28 mm^2, CONTACT pronostica una huella un 10,01 % mayor, mientras que Kik-Piotrowski impone un tamaño mayor en un 6,16 % (*Tabla 7*).

1_1L	**FASTSIM** $[mm^2]$	**KIK** $[mm^2]$	**CONTACT** $[mm^2]$
10 m/s	87.24	93.36	95.28
20 m/s	88.28	94.07	98.08
30 m/s	87.99	93.92	95.40
40 m/s	87.57	93.54	97.31
50 m/s	87.11	93.58	94.86
60 m/s	89.25	96.78	95.55

Tabla 7. Valores obtenidos de la Gráfica 13 y su confluencia.

En el caso de las ruedas interiores, la diferencia que sufren las tres teorías de contacto es mucho menor, apreciándose a simple vista cómo la superficie de contacto es muy parecida (*Gráfica 14*), incluso confluyendo la función FASTSIM con la función de Kik-Piotrowski en 10, 40 y 60 m/s con una diferencia del 1,01 %, 1,12 % y un 1,01 % respectivamente (*Tabla 8).*

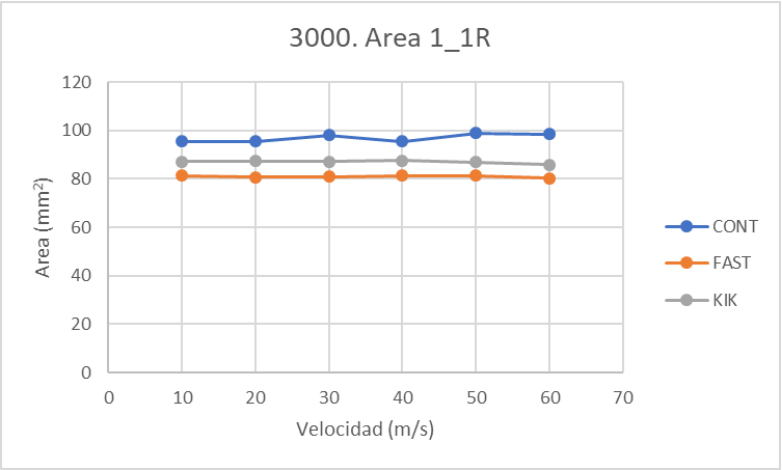


Gráfica 14. Comparativa del área de contacto 1_1R para un radio de 1000 m.

1_1R	**FASTSIM** $[mm^2]$	**KIK** $[mm^2]$	**CONTACT** $[mm^2]$
10 m/s	82.07	82.86	95.84
20 m/s	83.11	88.16	96.44
30 m/s	83.81	90.32	97.31
40 m/s	84.29	88.25	95.88
50 m/s	86.79	96.52	99.64
60 m/s	90.56	88.84	97.66

Tabla 8. Valores obtenidos de la Gráfica 14 y sus confluencias.

Para la curva con radio mayor (3000 metros), la confluencia entre valores se aleja un poco más, pero sin llegar a los porcentajes que describen a la rueda 1_1L. Se prueba cómo el área de contacto de esta rueda interior se mantiene cuasi-constante (*Gráfica 15*) sin que apenas influencie la velocidad debido a la amplitud de la curva. La diferencia entre métodos en esta ocasión es constante y de poco valor (tabla 9), obteniéndose un promedio de 80,99 mm^2 para FASTSIM, 86,99 mm^2 para Kik-Piotrowski y 97,03 mm^2 para CONTACT; lo que supone una diferencia en proporción a FASTSIM de un 7,4 % y un 19,8 % respectivamente.



Gráfica 15. Comparativa del área de contacto 1_1R para un radio de 3000 m.

1_1R	**FASTSIM** $[mm^2]$	**KIK** $[mm^2]$	**CONTACT** $[mm^2]$
10 m/s	81.31	87.14	95.55
20 m/s	80.79	87.26	95.42
30 m/s	80.84	87.18	98.11
40 m/s	81.36	87.57	95.58
50 m/s	81.29	86.99	98.96
60 m/s	80.36	85.85	98.57

Tabla 9. Valores obtenidos de la Gráfica 15.

Además de haber presentado los valores del tamaño del contacto rueda-carril (para el resto de las ruedas y radios se invita a leer el anexo), es interesante mostrar la forma gráfica que exportan los tres métodos diferentes al realizar la simulación con *Universal Mechanism*.

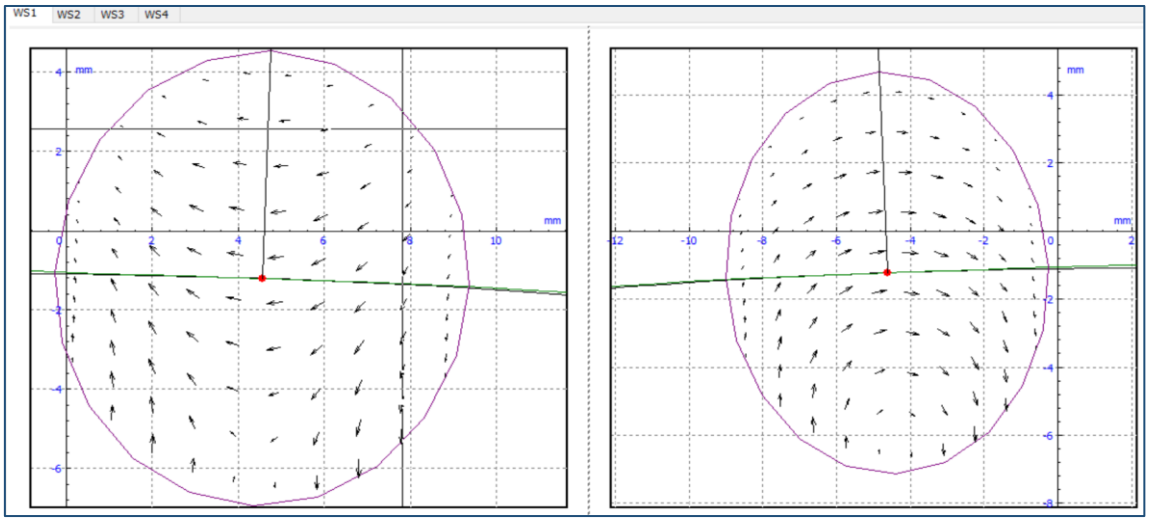


Figura 41. Superficies de contacto del wheelset delantero mediante FASTSIM.

En la *Figura 41* se exhiben las superficies de contacto (color violáceo) 1_1L y 1_1R para una curva de 1000 metros simulada a 60 m/s mediante FASTSIM. A parte de apreciar la elipse de contacto con la representación de la dirección de sus fuerzas tangenciales, se aprecia la dirección de la fuerza normal y del contorno del carril y de la rueda (color verdoso).

Las próximas imágenes; *Figura 42* y *Figura 43,* se aportan sendas representaciones del contacto en este caso mediante CONTACT y Kik-Piotrowski.

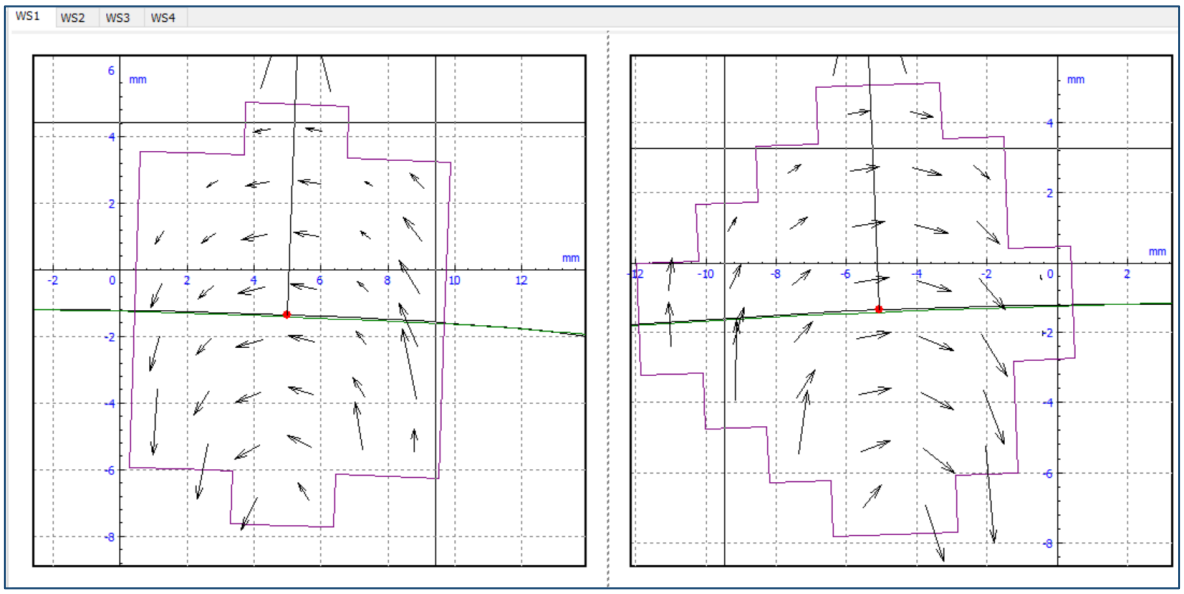


Figura 42. Superficies de contacto del wheelset delantero mediante CONTACT.

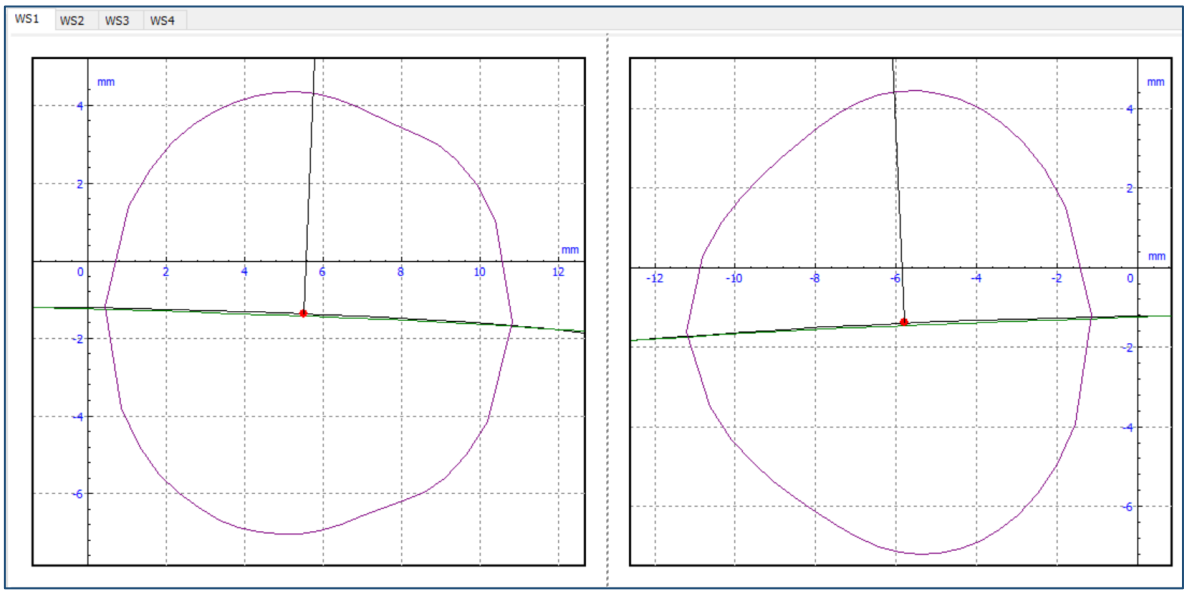


Figura 43. Superficies de contacto del wheelset delantero mediante Kik-Piotrowski.

Para facilitar una mejor comprensión de las diferencias de tamaño entre las superficies obtenidas por cada uno de los tres métodos, se han superpuesto las tres imágenes anteriores de forma que coincidan en la misma escala (*Figura 44)*. Es importante recordar que el momento exacto en el que fueron tomadas estas figuras es el mismo a 1571 metros del inicio de la vía.

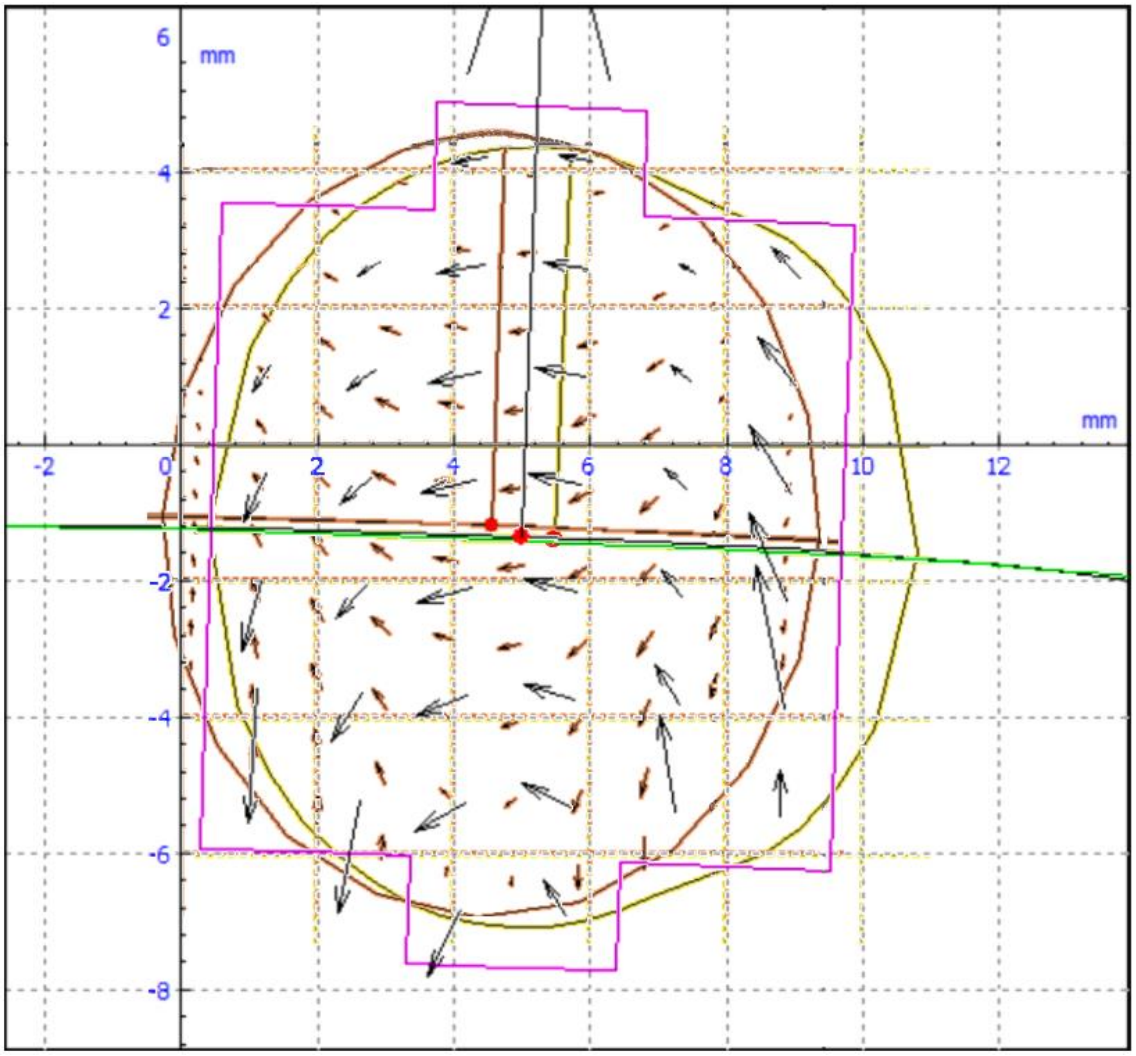


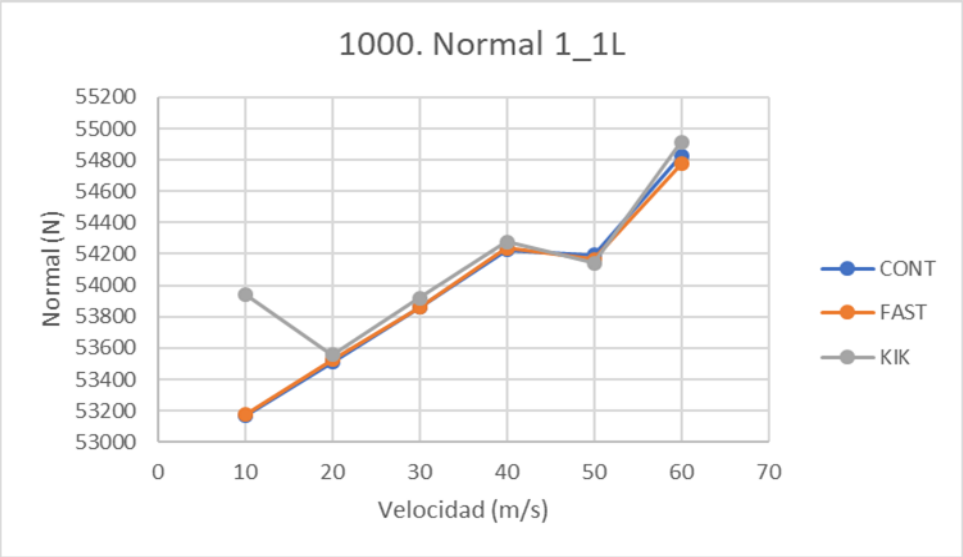
Figura 44. Comparativa gráfica de las superficies de contacto obtenidas mediante las diferentes teorías propuestas. CONTACT (morado), FASTSIM (amarillo) y Kik-Piotrowski (marrón).

El área de color rosa que aparece en la *Figura 44*, es la correspondiente a la teoría CONTACT. Se puede apreciar cómo tiene una forma burda y poco realista respecto al resto de métodos utilizados. Esto puede deberse al modo en que CONTACT discretiza los elementos en *Universal Mechanism*. En este software, tanto FASTSIM como Kik-Piotrowski están implementados de forma nativa mientras que en el caso de la teoría exacta, se requirió pedir un *add-on* a uno de los propietarios de los derechos de la teoría, el doctor Edwin Vollebregt de la Universidad de Delft.

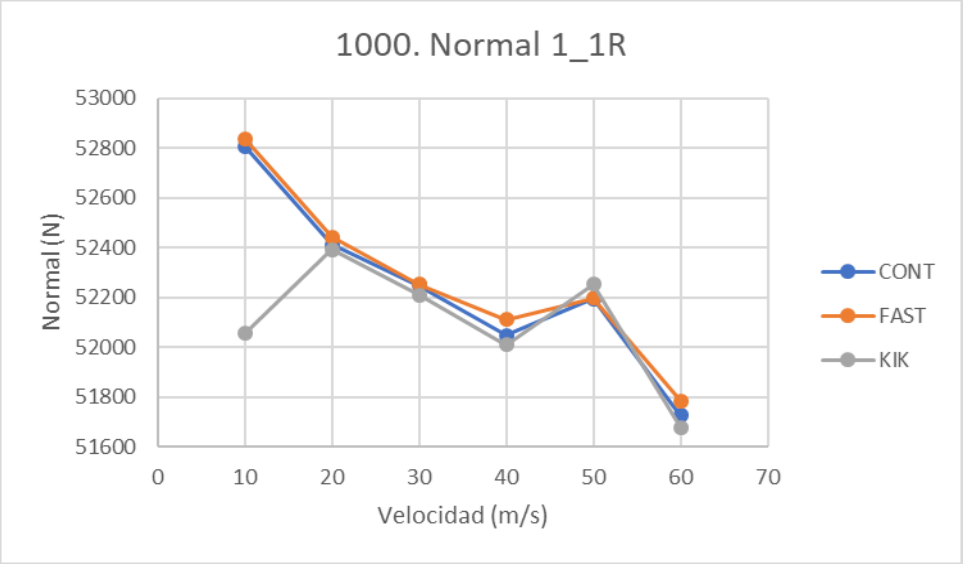
Además de las limitaciones que sufre un código que no ha sido programado de forma natural para el software en el que se han corrido estas simulaciones, se presupone que esta licencia gratuita no explota completamente las ventajas que ofrece el método exacto respecto a una licencia de pago.

Por ello, en base a esta imagen, no se considera óptimo utilizar el método CONTACT para analizar superficies rueda-carril en favor de utilizar el método simplificado FASTSIM.

Fuerza normal de contacto



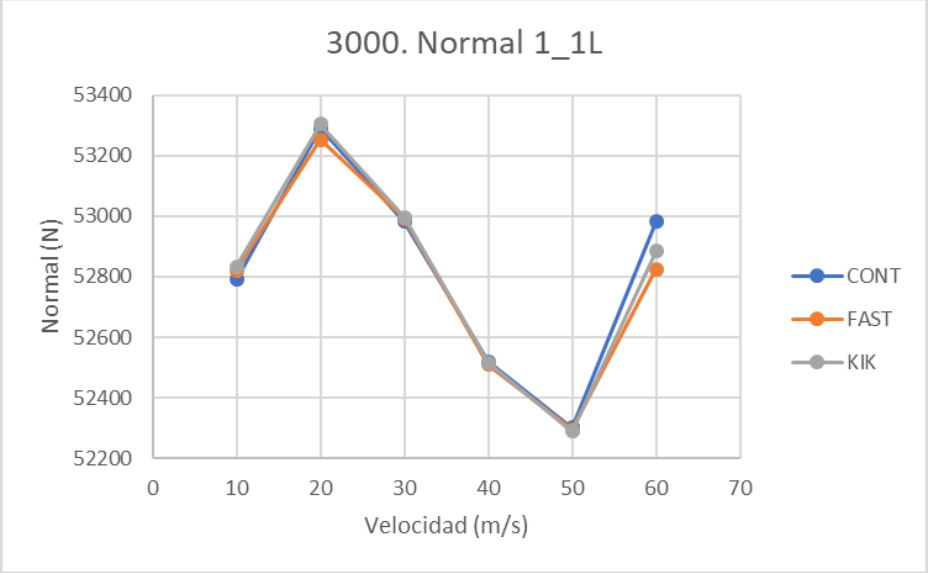
Gráfica 16. Comparativa de la fuerza normal 1_1L para un radio de 1000 m.



Gráfica 17. Comparativa de la fuerza normal 1_1R para un radio de 1000 m.

En el caso de las gráficas que estudian la fuerza normal (Gráfica 16 y Gráfica 17) del wheelset delantero para una curva de radio 1000 metros, las tendencias que sufren las tres teorías son muy parecidas respectivamente. En el caso de la rueda 1_1L, sufren tendencias crecientes, para su contrapartida la rueda 1_1R, la tendencia es decreciente. Este fenómeno se explica por la transferencia de masas al pasar por un tramo curvo.

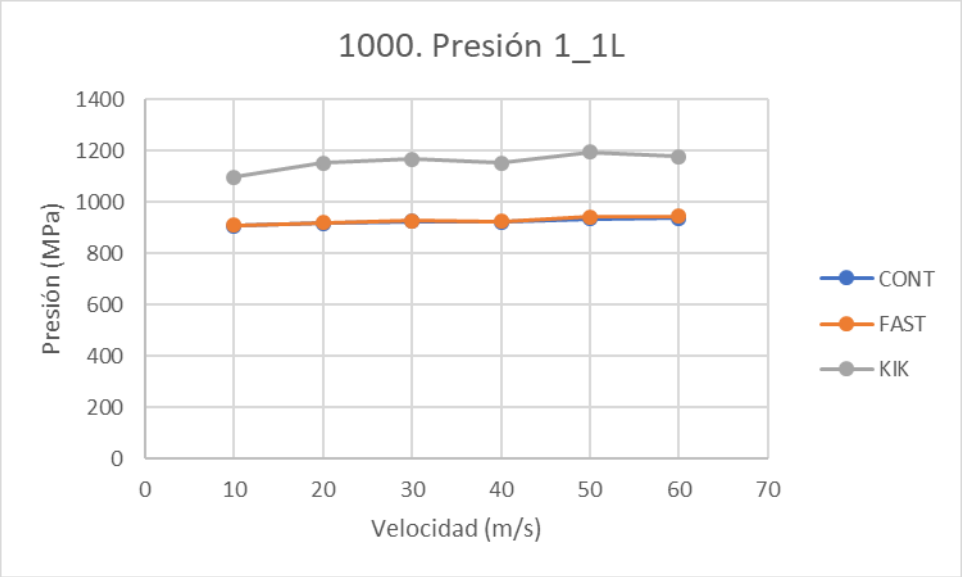
En ambas gráficas sobresale de forma extraña el valor a 10 m/s calculado por Kik-Piotrowski. Mientras que para 1_1L la normal por FASTSIM vale 53176 N y la calculada por CONTACT apenas difiere un 0,01 % de diferencia, la fuerza normal calculada por Kik-Piotrowski dista un 1,44 % con un valor de 53943 Newtons. Realmente sigue siendo un porcentaje muy pequeño, pero al contrastarlo con el resto de los métodos se determina que es más apropiado usar la teoría exacta o FASTSIM al menos para rangos más dinámicos; que particularizando a las gráficas expuestas comenzarían a partir de los 20 m/s.



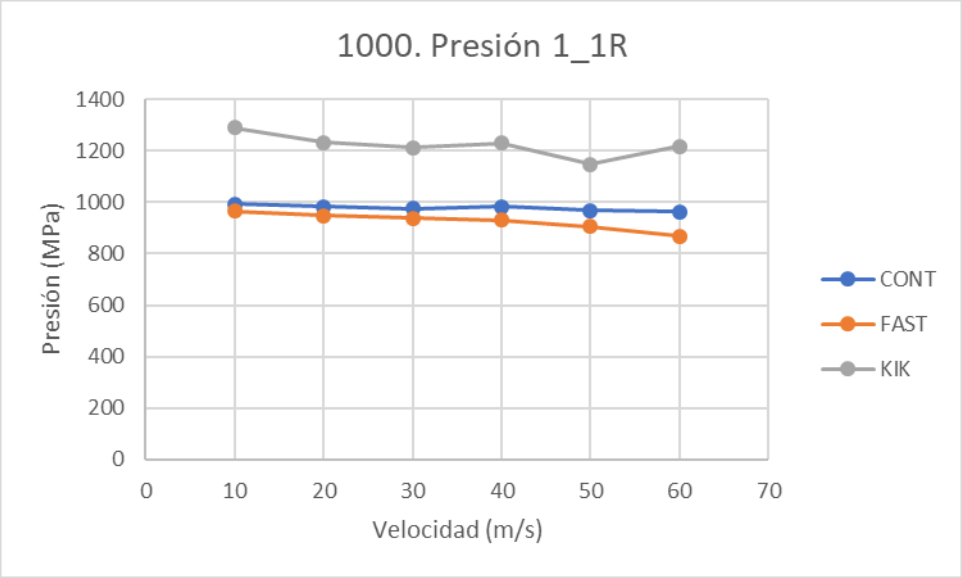
Gráfica 18. Comparativa de la fuerza normal 1_1L para un radio de 3000 m.

Se ha querido comprobar el comportamiento del punto divergente en 10 m/s en radios más grandes; en este caso para el radio de 3000 metros en la *Gráfica 18*. En este caso la normal no difiere tanto entre métodos, por lo que se aproxima mejor a una divergencia de la teoría Kik-Piotrowski en tramos de vías cortos.

Presión máxima en el contacto



Gráfica 19. Comparativa de la presión máxima 1_1L para un radio de 1000 m.



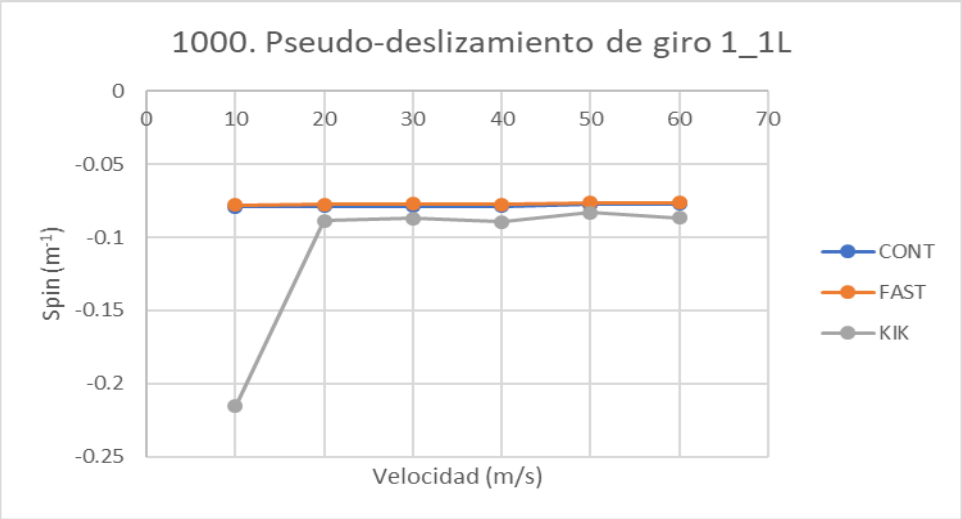
Gráfica 20. Comparativa de la presión máxima 1_1R para un radio de 1000 m.

Con la variable de la presión máxima en el contacto tanto para la rueda exterior 1_1L (*Gráfica 19*)como para la rueda interior 1_1R (*Gráfica 20*) del primer bogie, la teoría exacta y la teoría FASTSIM muestran valores muy parecidos; precisando para 1_1L ambas funciones se superponen de forma que es complicado distinguirlas.

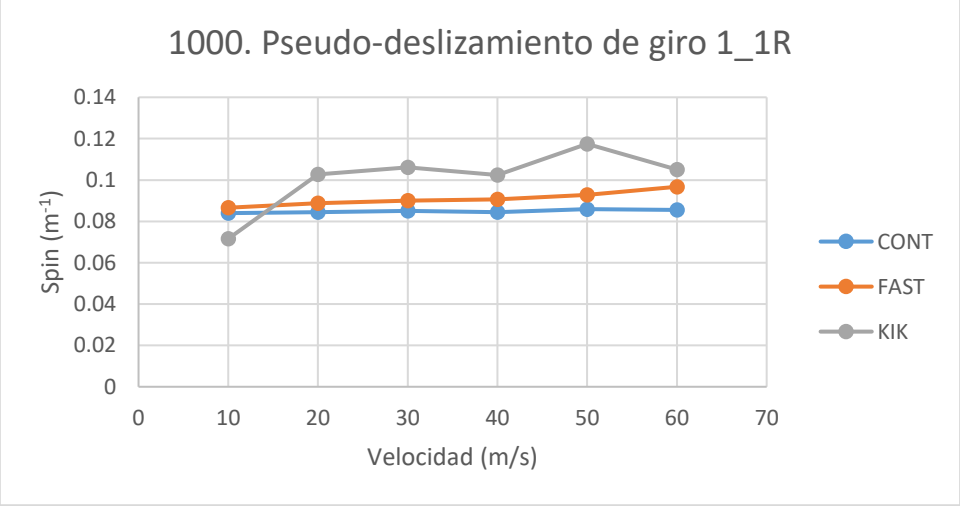
No ocurre lo mismo con el método Kik-Piotrowski el cual difiere una media de un 20,71 % respecto a FASTSIM para 1_1L y un 30,6 % en el caso de la rueda interna, por lo que se concluye que es más apropiado usar FASTSIM o CONTACT prevaleciendo el primero debido al menor coste computacional.

Pseudo-deslizamiento de giro

Para la simulación del pseudo-deslizamiento de giro o spin, Kik-Piotrowski vuelve a ser una opción poco recomendada (*Gráfica 21*).



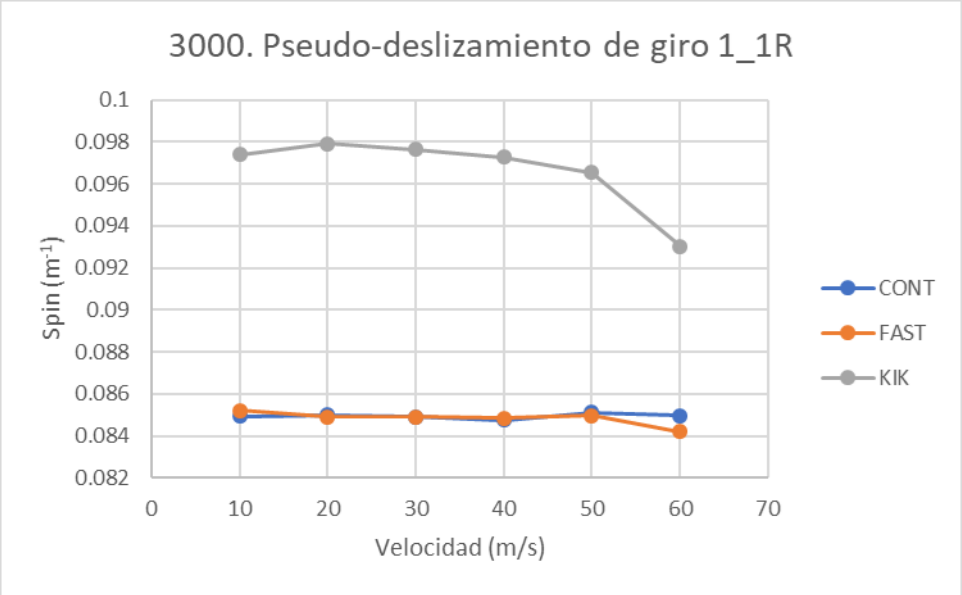
Gráfica 21. Comparativa del spin en 1_1L para un radio de 1000 m.



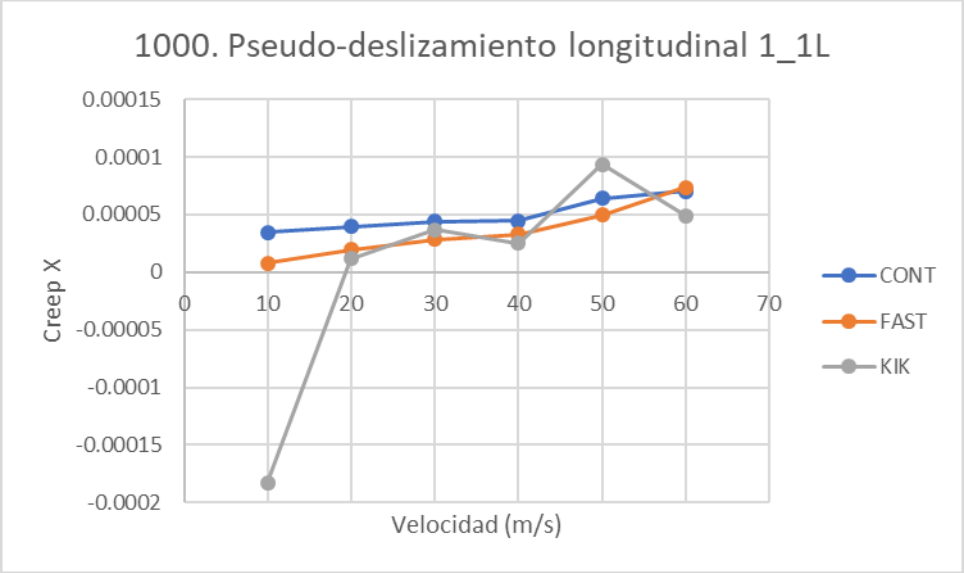
Gráfica 22. Comparativa del spin en 1_RL para un radio de 1000 m.

En el caso de la rueda 1_1L (*Gráfica 21*) a 10 m/s el valor conseguido con Kik-Piotrowski de -0,215 m^{-1} difiere un 63,67 % de los -0,078 m^{-1} simulados por FASTSIM, este contraste es demasiado alto para darlo por válido, por lo que se recomienda usar en el caso del spin FASTSIM o CONTACT.

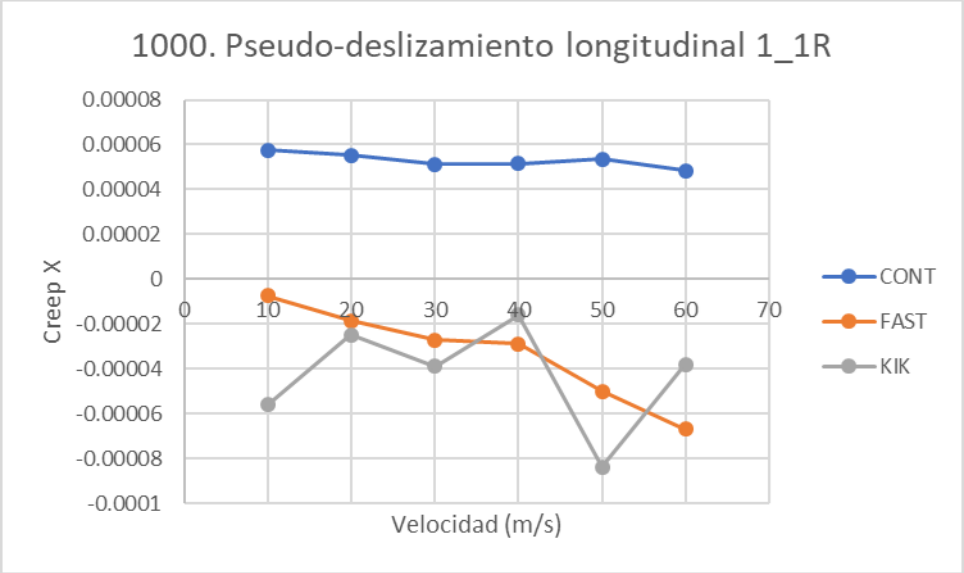
Para la rueda derecha 1_1R (*Gráfica 22*) la diferencia entre valores en 10 m/s es de un 17,43 % respecto a los restantes métodos, aunque este porcentaje se descendería hasta el 14,31 % en el caso del radio de curvatura más amplio. Para un radio más amplio como es el de 3000 metros (*Gráfica 23*), tanto CONTACT como FASTSIM siguen teniendo tendencias muy parecidas.



Gráfica 23.Comparativa del spin en 1_1R para un radio de 3000 m.



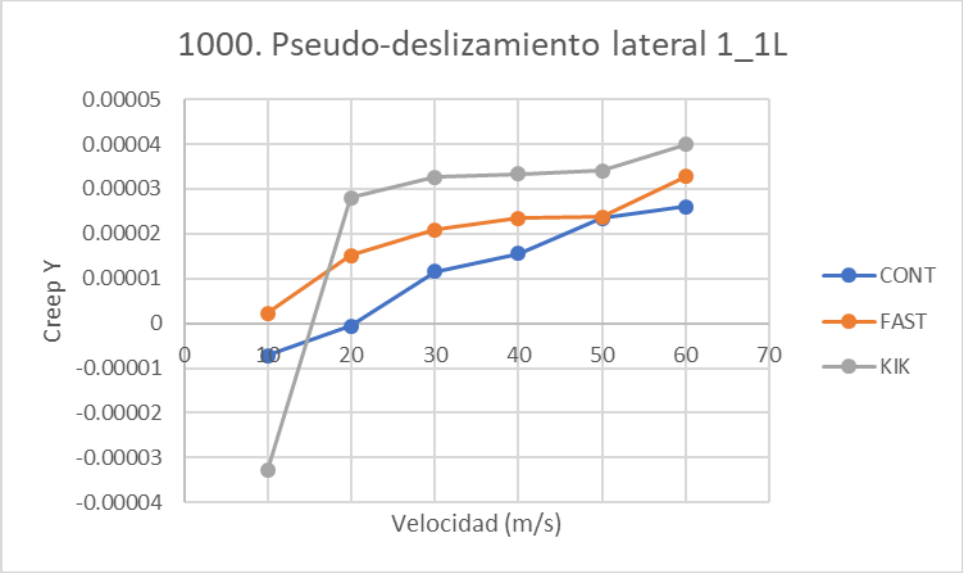
Gráfica 24. Comparativa del pseudo-deslizamiento X en 1_1L para un radio de 1000 m.



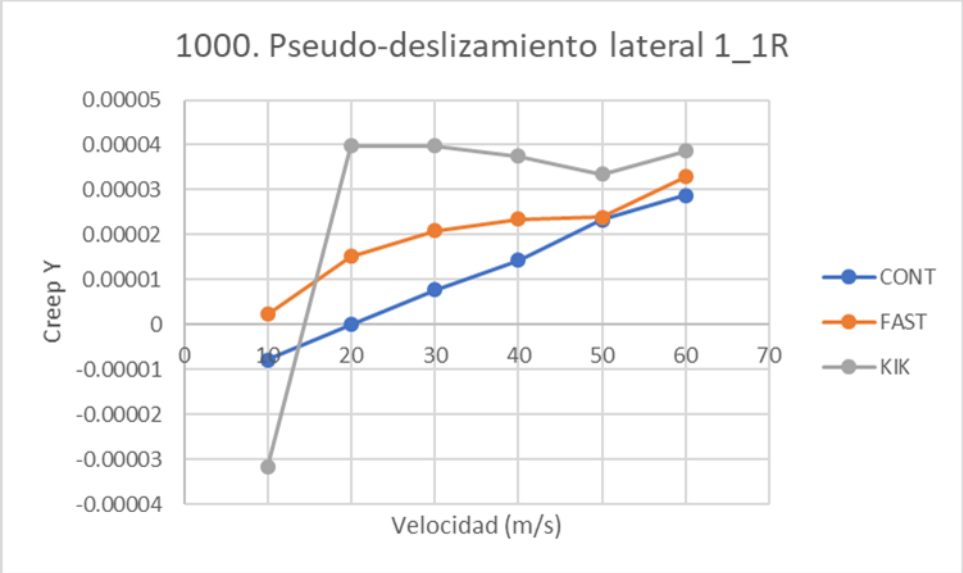
Gráfica 25. Comparativa del pseudo-deslizamiento X en 1_1R para un radio de 1000 m.

En la *Gráfica 24*, tanto FASTSIM como CONTACT siguen una pequeña tendencia creciente que culmina en su convergencia en 60 m/s con un valor de 7,0 x10^{-5}. En el resto de los valores CONTACT se aproxima en un rango entre el 54,5 % del valor; los porcentajes son tan amplios al ser valores de un orden de magnitud muy pequeño. Kik-Piotrowski vuelve a exportar un valor muy alejado de la tendencia para un rango poco dinámico.

Pseudo-deslizamiento lateral



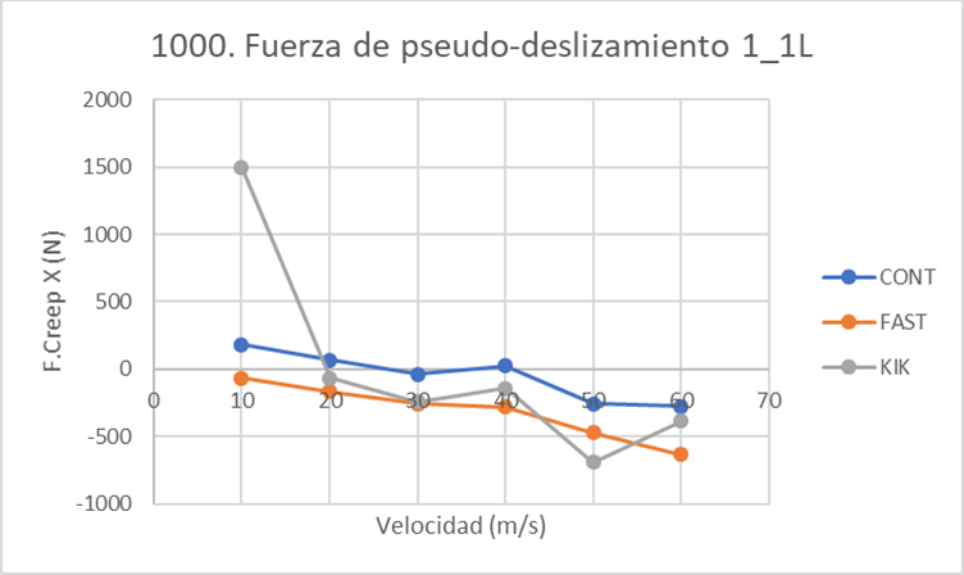
Gráfica 26. Comparativa del pseudo-deslizamiento Y en 1_1L para un radio de 1000 m.



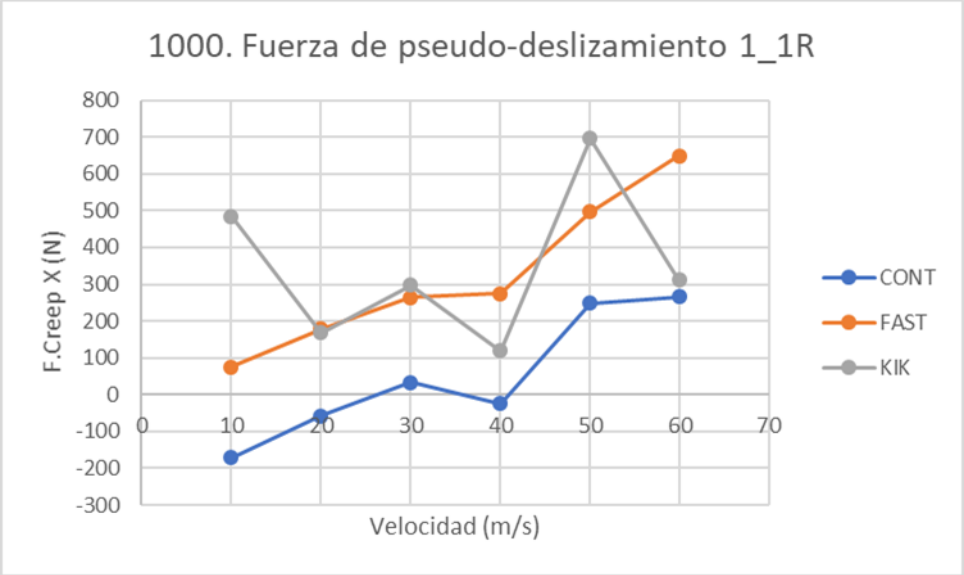
Gráfica 27. Comparativa del pseudo-deslizamiento Y en 1_1R para un radio de 1000 m.

En el caso del pseudo-deslizamiento lateral, para la rueda 1_1L (*Gráfica 26)* el análisis es parecido al que se ha hecho para Creep X. Kik-Piotrowski vuelve a desviarse de los valores simulados por las otras dos teorías en 10 m/s. En esta misma velocidad, la teoría simplificada y la exacta tienen valores virtualmente nulos. Su diferencia en 20 m/s pesa un 51,96 % y se va reduciendo hasta converger en 50 m/s. En la (*Gráfica 27*), se puede deducir el mismo comentario en referencia a las tendencias de los tres métodos.

Fuerza de pseudo-deslizamiento longitudinal



Gráfica 28. Comparativa de la fuerza de pseudo-deslizamiento X en 1_1L para un radio de 1000 m.



Gráfica 29. Comparativa de la fuerza de pseudo-deslizamiento X en 1_1R para un radio de 1000 m.

Para las fuerzas del pseudo-deslizamiento longitudinal se considera propicio que las tendencias de las funciones sean opuestas a las de su pseudo-deslizamiento (Gráfica 24). Como se puede atestiguar en la figura posterior donde además de los pseudo-deslizamientos ν_x, ν_y (en la figura aparecen con la notación "ξ") y sus fuerzas F_x, F_y correspondientes, se visualiza el sentido del pseudo-deslizamiento de giro φ.

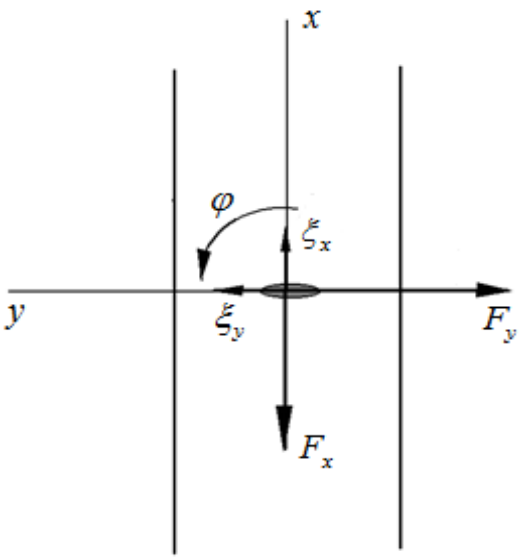
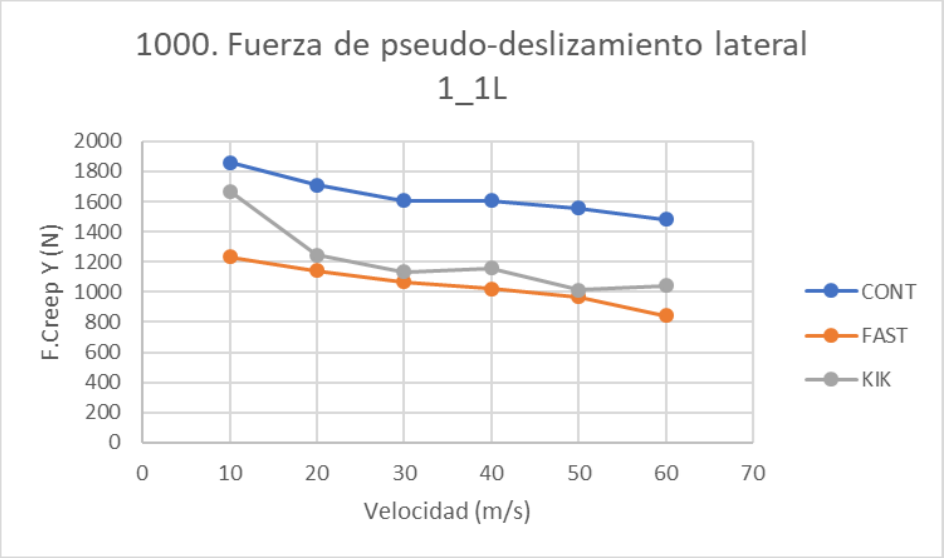


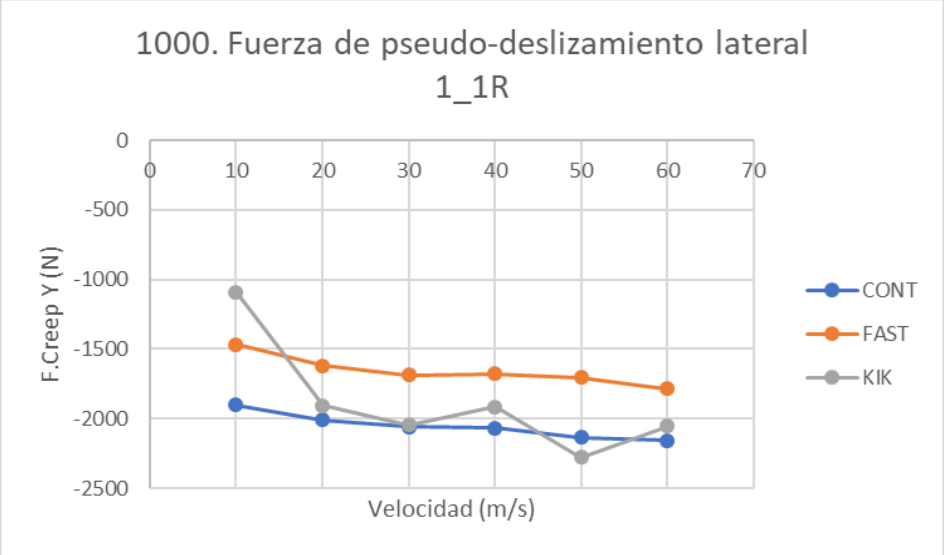
Figura 45. Sentido de los pseudo-deslizamientos y sus fuerzas [20].

Los valores que sigue la función FASTSIM en 1_1L (*Gráfica 28*) comienzan en -64,77 Newtons y van descendiendo conforme aumenta la velocidad hasta obtener un valor en 60 m/s de -635,43 Newtons. A su vez la función CONTACT presenta una función parecida que diverge un 64,15 % en valor absoluto. El método Kik-Piotrowski continúa apercibiendo valores extraños para el rango de 10 m/s, a partir de ahí sus valores se acercan al resto de métodos.

En la rueda derecha 1_1R (*Gráfica 29*), la aproximación del método exacto hasta el simplificado aumenta hasta un 34,74 % más que para la rueda izquierda, elevándose en mayor medida en 40 m/s.



Gráfica 30. Comparativa de la fuerza de pseudo-deslizamiento Y en 1_1L para un radio de 1000 m.



Gráfica 31. Comparativa de la fuerza de pseudo-deslizamiento Y en 1_1R para un radio de 1000 m.

Para la fuerza Y (*Gráfica 30*), la diferencia de Kik-Piotrowski y CONTACT con FASTSIM está más difuminada. En 20 m/s; punto en el cual se estabiliza la función proporcionada por Kik-Piotrowski se proporciona un valor de 1245,41 N el cual es un 9 % más grande que el proporcionado por el método aproximado. Esta proporción llega a reducirse en 30 m/s y recuperar la diferencia en 50 m/s con un 6,49 % y un 11,8 % respectivamente. En el caso del CONTACT estos porcentajes suben hasta un 50,10 % en 20 m/s, un 50,84 % en 30 m/s y un 60,68 % en 50 m/s.

5.2.3. Coste computacional de las simulaciones

Además de la concordancia o discrepancia entre los resultados de los tres métodos, otro factor muy importante que influye en la elección de un método u otro es el coste computacional de cada una de las tres teorías.

Si se considera que para cada tipo de simulación se ha usado el mismo equipo informático con las características técnicas que se incluyen a continuación, se puede establecer una relación que cuantifique el coste de procesamiento.

Equipo	Lenovo Thinkpad T440P
Procesador	Intel Core i5-4210M (2,60 GHz)
Memoria RAM	8,00 Gb
Procesador Gráfico	Intel HD Graphics 4600

Tabla 10. Descripción del equipo utilizado.

La variable que se toma para analizar este coste es el tiempo que ha necesitado el procesador hasta finalizar la operación de cálculo. Este puede darse en diferentes magnitudes como segundos u horas dependiendo de la complejidad del entorno a simular.

Seguidamente se presentarán los tiempos de procesado necesarios para la simulación de los tres modelos en la vía de tramo curvo de radio 1500 metros a una velocidad de 60 m/s.

- CONTACT

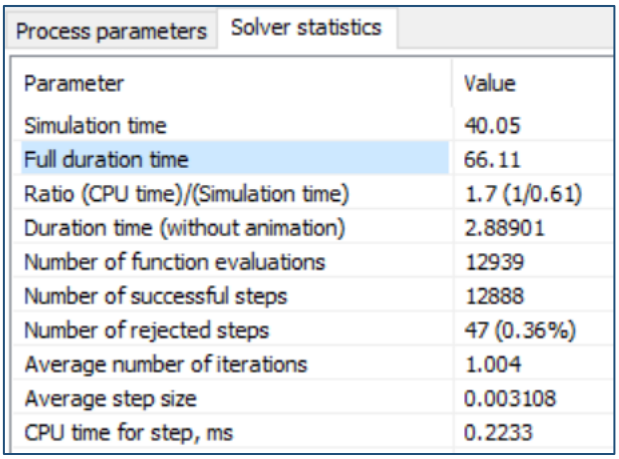
Process parameters | Solver statistics

Parameter	Value
Simulation time	39.4
Full duration time	643.9
Ratio (CPU time)/(Simulation time)	16 (1/0.061)
Duration time (without animation)	644.976
Number of function evaluations	77331
Number of successful steps	73639
Number of rejected steps	3686 (5%)
Average number of iterations	1.05
Average step size	0.000535
CPU time for step, ms	8.34

Figura 46. Estadísticas de procesado mediante CONTACT.

Tiempo de duración completo $\Rightarrow$ **643,9 s** (10,73 minutos).

- FASTSIM



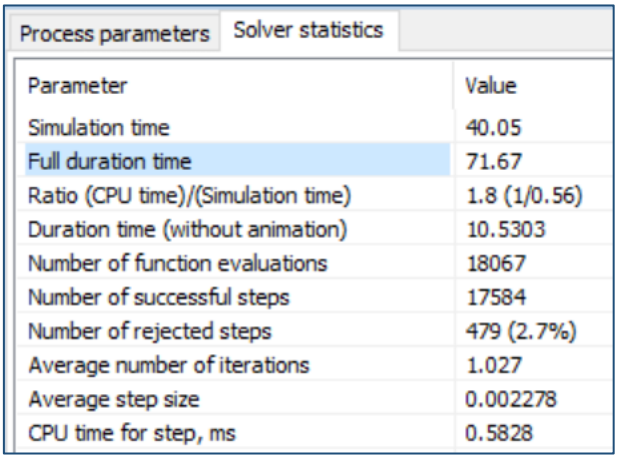
Process parameters | Solver statistics

Parameter	Value
Simulation time	40.05
Full duration time	66.11
Ratio (CPU time)/(Simulation time)	1.7 (1/0.61)
Duration time (without animation)	2.88901
Number of function evaluations	12939
Number of successful steps	12888
Number of rejected steps	47 (0.36%)
Average number of iterations	1.004
Average step size	0.003108
CPU time for step, ms	0.2233

Figura 47. Estadísticas de procesado mediante FASTSIM.

Tiempo de duración completo ⇒ **66,11 s** (1,10 minutos).

- KIK-PIOTROWSKI



Process parameters | Solver statistics

Parameter	Value
Simulation time	40.05
Full duration time	71.67
Ratio (CPU time)/(Simulation time)	1.8 (1/0.56)
Duration time (without animation)	10.5303
Number of function evaluations	18067
Number of successful steps	17584
Number of rejected steps	479 (2.7%)
Average number of iterations	1.027
Average step size	0.002278
CPU time for step, ms	0.5828

Figura 48. Estadísticas de procesado mediante Kik-Piotrowski.

Tiempo de duración completo ⇒ **71,67 s** (1,19 minutos).

Para una simulación de un recorrido de 40 segundos de duración, el método exacto tarda un 1600 %, FASTSIM un 165 % y Kik-Piotrowski un 179 %. Para simulaciones donde se requiera rapidez por encima de la precisión que pueda ofrecer CONTACT, **la teoría simplificada es el método más recomendable** (un 974 % más rápida para estas condiciones de simulación).

6. PRESUPUESTO Y ENTORNO SOCIOECONOMICO

Este capítulo versa sobre los costes ocasionados para la realización del proyecto de investigación. Para ello se tendrán en cuenta todos los gastos generados en el transcurso de los cinco meses requeridos para completar satisfactoriamente con los objetivos impuestos por el grupo de personas que han participado en el proyecto.

Se tendrán en cuenta los recursos humanos en los cuales se incluyen los gastos eléctricos y de tarifa de línea de internet, además de los recursos materiales donde se distinguen la parte de hardware y la de software. A todos ellos se le incorporará el impuesto sobre el valor agregado.

Con motivo del cálculo de las horas de trabajo, a continuación se agrega un **diagrama de Gantt** (*Figura 49*) que permite visualizar de forma clara el tiempo empleado en cada una de las partes del proyecto.

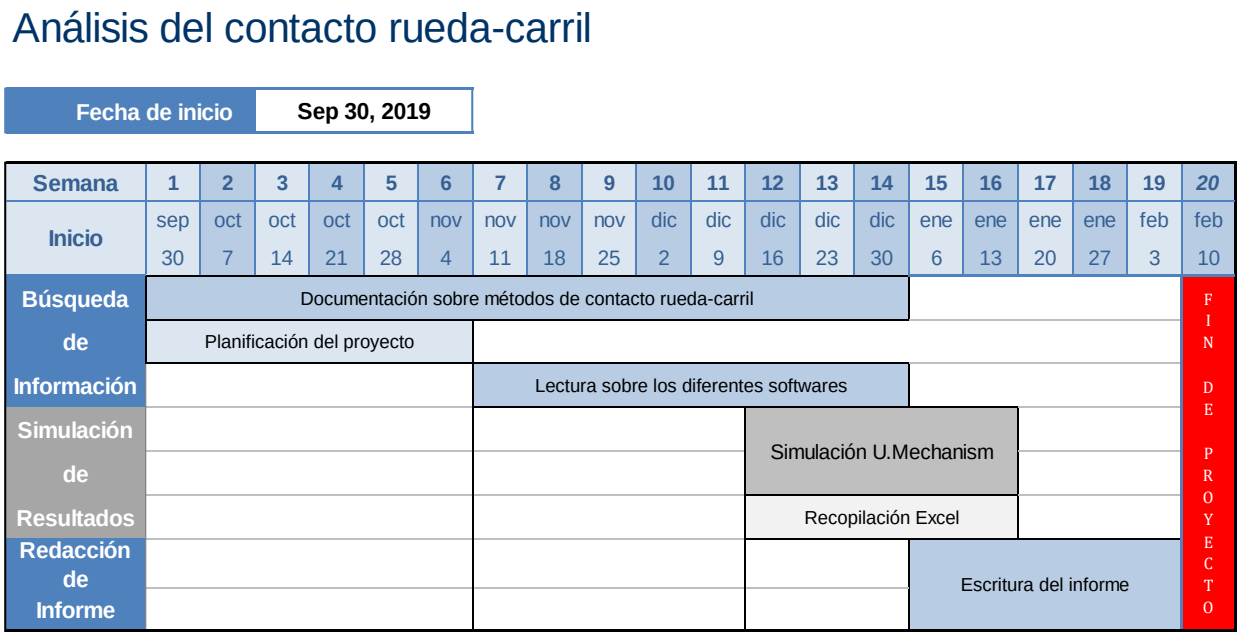


Figura 49. Tiempo de dedicación empleado en la realización del proyecto.

El presupuesto estimado en la realización del trabajo se presenta a continuación de una forma desglosada.

Gastos en Personal				
Apellidos, Nombre	Categoría	Tiempo de trabajo (h)	Salario (€/h)	Total (€)
Bustos Caballero, Alejandro	Dr. Ingeniero	60	25.00	1500.00
Rubio Alonso, Higinio	Dr. Ingeniero	60	25.00	1500.00
Viaji Pérez, David	Ingeniero	360	15.00	5400.00
TOTAL PERSONAL				**8 400.00 €**
Gastos en Hardware				
Concepto	Coste total (€)	Vida útil (años)	Amortización anual (%)	Coste anual (€)
Lenovo Thinkpad T440P (2ª Mano)	350.00	5	20	70.00
Ratón óptico M235	20.00	5	20	4.00
TOTAL HARDWARE				**74.00 €**
Gastos en Software				
Concepto	Coste total (€)	Vida útil (años)	Amortización anual (%)	Coste anual (€)
Licencia de Microsoft Office	80.00	4	25	12.50
Licencia de Universal Mechanism	6000.00	1	20	1200.00
Licencia *add-on* de CONTACT	500.00	1	20	100.00
TOTAL SOFTWARE				**1 312.50 €**
TOTAL BRUTO				9 786.50 €
IMPUESTOS (21%)				2 055.16 €
TOTAL IMPUTABLE				**11 841.67 €**

Tabla 11. Costes estimados del proyecto.

El proyecto abarcado en estas líneas puede sugerir un interés en aquellas personas o empresas relacionadas con el sector ferroviario.

Existe un alto grado de precisión adoptado en el análisis de fuerzas y tensiones concentradas en los puntos de contacto rueda-carril, que garantiza la seguridad y confort de los pasajeros y bienes transportados por vehículos ferroviarios. Debido a esta premisa, las teorías de contacto deben de satisfacer en la mayor forma posible un parecido con la realidad.

Antes de realizar pruebas de campo, es interesante simular los casos mediante software del problema de forma simplificada, lo que permite acotar las posibles vías de desarrollo ahorrando capital humano y dinero. Elegir una teoría de contacto u otra es crucial para la optimización de los recursos según las necesidades del proyecto en cuestión, pudiendo optar entre una mayor precisión en los resultados o un menor coste computacional; dependiendo la elección de los requerimientos que se den en cada particularización.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1. Conclusiones

Terminada la exposición de los resultados del proyecto, así como de su interpretación, se llegan a una serie de conclusiones con relación a la posible elección de una de las tres teorías de contacto con prioridad respecto a las restantes, para usarla en una simulación mediante software, de la evolución de las variables más influyentes en el estudio del contacto rueda-carril. Es decir, se ha cumplido el objetivo principal de este TFG.

Antes de comenzar los ensayos mediante el programa Universal Mechanism; teniendo en cuenta la base teórica del problema de contacto, se propicia a especular que el método exacto; también llamado CONTACT, es el más indicado para realizar estas iteraciones. Lo que podría llegar a plantear al grupo de doctores ingenieros de la Universidad Carlos III de Madrid en el ámbito ferroviario, su implantación en detrimento de la teoría FASTSIM usada actualmente (año 2020).

Asimismo se propone como complemento la teoría Kik-Piotrowski para obtener una alternativa poco explorada frente a las otras dos más extendidas.

En base los datos extraídos de los experimentos, y su análisis mediante las diferentes gráficas comparativas añadidas en su conjunto en los anexos del presente proyecto, se obtienen una serie de premisas:

1. <u>En un contexto general, FASTSIM es la opción óptima en la simulación del contacto rueda-carril.</u>
   El ahorro de esta en coste computacional frente a la teoría exacta es muy pronunciado (974 % para la comparativa realizada), este hecho se traduce en una mayor versatilidad, puesto que se podrá invertir ese tiempo salvado en otras tareas.
   En la simulación de superficies de contacto, los valores mostrados por FASTSIM respecto a CONTACT apenas difieren un rango de 9-10 % en contraste con la teoría exacta, disminuyendo la diferencia del 15 % que marcan otros estudios (*Epígrafe 2.4.4*).
   Para las fuerzas normales y presiones, FASTSIM es muy similar a la teoría exacta (1-2 %).

2. <u>CONTACT es más apropiado para la simulación de pseudo-deslizamientos.</u>
   En el caso de los pseudo-deslizamientos longitudinales y laterales, así como en sus fuerzas correspondientes, en términos generales FASTSIM sigue unas tendencias más cercanas a Kik-Piotrowski que al método exacto, por lo que se toma como recomendación el uso de este último sobre los otros dos.

3. Kik-Piotrowski sufre comportamientos anómalos para rangos bajos de velocidad
   Se intuye que este método ha sido programado para rangos más dinámicos, por eso en las simulaciones a 10 m/s, el programa arroja valores extraños que rompen la tendencia de los datos en el resto del rango de velocidades.

4. La versión de CONTACT utilizada sufre una discretización de área tosca
   En la comparativa gráfica entre superficies de contacto, se denota que el método exacto discretiza de forma burda el área más allá de lo que cabría esperar. Se puede achacar a una limitación en la licencia usada que afecta a la simplificación de elementos en su método de simulación.

5. La tendencia en las funciones para radios de 2500 metros sobrellevan comportamientos extraños.
   En las comparativas entre los distintos rangos de radios de curvatura, la función representante del radio 2500m sufre de un comportamiento desviado del resto de funciones para la mayoría de las variables estudiadas.

6. Se ha generado satisfactoriamente material multimedia del estudio.
   Todo material gráfico se puede utilizar con fines didácticos para explicar la fenomenología del contacto rueda-carril de forma introductoria a toda persona que esté interesada. En caso de sentirse aludido, por favor contacten con el autor de este proyecto.

7.2. Trabajos futuros

En base a las líneas de trabajo introducidas con este proyecto, se alienta a crear y divulgar más profundamente la simulación y estudio entre las diferentes teorías de contacto rueda carril.

Se propone entre otros trabajos a futuro ampliar la comparativa de la teoría exacta y simplificada a otras no estudiadas como Minov o Mueller con el fin de disponer de más alternativas.

Asimismo, es recomendable indagar en el origen de los resultados anómalos en algunos gráficos, como puede ser los valores que suceden para radios de curvatura de 2500 metros, donde se intentaría realizar varias simulaciones en los valores adyacentes a 2500 m con la finalidad de intentar sacar un patrón que muestre a partir de qué valor de radio, Universal Mechanism no trabaja como debería.

Otros modos de ampliar los conceptos presentados en este proyecto es la repetición de las simulaciones mediante perfiles de rueda desgastados debido a la premisa del posible cambio en la huella del contacto, pudiendo aparecer más de dos puntos de apoyo con el raíl. Igualmente, se puede añadir al vehículo ferroviario otros perfiles de ruedas con diferentes conicidades. Lo que modificará las variables estudiadas.

La ampliación de un estudio de tiempos más detallado del gasto computacional de los tres métodos de resolución, puede ser atrayente para un mejor criterio en la selección de equipos de ensayo.

Para concluir, cualquier otra propuesta que no esté incluida en estas líneas y que el lector considere interesante de construir para profundizar en las premisas que acompañan a este trabajo, es promovida a su desarrollo en aras de la investigación del contacto rueda-carril.

8. REFERENCIAS

[1] Diario El País. M. J. | Madrid, «Un consorcio español se adjudica el macrocontrato del AVE La Meca-Medina por 6.736 millones», *El País*, Madrid, 26-oct-2011.

[2] Diario El Confidencial. C. Digital, «El "Brexit" ha dejado a Navantia sin el contrato del siglo en Australia», *Confidencial Digital*, 03-jul-2018. [En línea]. Disponible en: https://www.elconfidencialdigital.com/articulo/defensa/Brexit-dejado-Navantia-contrato-Australia/20180703165602113753.html. [Accedido: feb 2020].

[3] Página Web Adif «Adif - Declaración sobre la red». [En línea]. Disponible en: http://www.adif.es/es_ES/conoceradif/declaracion_de_la_red.shtml. [Accedido: 20-feb-2020].

[4] Ministerio de Fomento «Informe de la Comisión técnico-científica para el estudio de mejoras en el sector ferroviario», p. 414.

[5] Página Web Renfe «Avlo». [En línea]. Disponible en: https://www.renfe.com/viajeros/AVLO/index.html. [Accedido: 20-feb-2020].

[6] DÍAZ LÓPEZ, Vicente *et al.*, *Automóviles y ferrocarriles | varios autores*. UNED Editorial, 2012.

[7] S. Iwnicki, M. Spiryagin, C. Cole, y T. McSweeney, *Handbook of railway vehicle dynamics*. CRC press, 2019.

[8] K. He, X. Zhou, y Q. Lin, «High accuracy complete elliptic integrals for solving the Hertzian elliptical contact problems», *Comput. Math. Appl.*, vol. 73, n.º 1, pp. 122-128, ene. 2017, doi: 10.1016/j.camwa.2016.11.003.

[9] F. Marques *et al.*, *On the generation of enhanced lookup tables for wheel-rail contact models*, vol. 434-435. 2019.

[10] Álvarez Rodríguez, J., *Ingeniería Ferroviaria*, vol. 1. Universidad Carlos III de Madrid, 2010.

[11] S. Z. Meymand, A. Keylin, y M. Ahmadian, «A survey of wheel–rail contact models for rail vehicles», *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 54, n.º 3, pp. 386-428, mar. 2016, doi: 10.1080/00423114.2015.1137956.

[12] J. J. Kalker, *Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact*. Springer Netherlands, 1990.

[13] E. A. H. Vollebregt, «User guide for CONTACT, Rolling and sliding contact with friction», Technical Report TR09-03, version 16.1, VORtech, 2016. See www …, 2015.

[14] M. Pau, F. Aymerich, y F. Ginesu, «Distribution of contact pressure in wheel–rail contact area», *Wear*, vol. 253, n.º 1-2, pp. 265-274, jul. 2002, doi: 10.1016/S0043-1648(02)00112-6.

[15] B. Liu, «Study of rail vehicle dynamics and wheel-rail contact using full-scale roller rigs», 2016.

[16] J. Piotrowski y W. Kik, «A simplified model of wheel/rail contact mechanics for non-Hertzian problems and its application in rail vehicle dynamic simulations», *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 46, n.º 1-2, pp. 27-48, feb. 2008, doi: 10.1080/00423110701586444.

[17] «Universal Mechanism - the software for modeling of dynamics of mechanical systems: Download». [En línea]. Disponible en: http://www.universalmechanism.com/en/pages/index.php?id=3. [Accedido: 20-feb-2020].

[18] Pogorelov D., «Universal Mechanism Introduction User Manual». Universal Mechanism, 2018.

[19] Pogorelov D., «UM Input Program». Universal Mechanism, 2015.

[20] Pogorelov D., «UM Simulation User Program». Universal Mechanism, 2015.

[21] E. J. Meana, «ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE CONTACTO DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO EN CURVA», p. 1397.

[22] Laporte, M., «TFM. Estudio y simulación del contacto Rueda-Raíl en un sistema multicuerpo ferroviario.» Universidad Carlos III de Madrid, 2017.

[23] Iwnicki, Simon D.The Manchester Benchmarks for Rail Vehicle Simulation (1999) (Vol1) - Google Libros». [En línea]. Disponible en: https://books.google.es/books?id=NFU8DwAAQBAJ&pg=PP7&dq=manchester+benchmarks&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj2_e3m8-DnAhVQ9IUKHc0ABEkQ6AEIKDAA#v=onepage&q=manchester%20benchmarks&f=false. [Accedido: feb 2020].

[24] «UNE - Asociación Española de Normalización». [En línea]. Disponible en: https://www.une.org/. [Accedido: feb 2020].

[25] «Acuerdo de Schengen», *Servicios al Ciudadano*. [En línea]. Disponible en: http://www.interior.gob.es/web/servicios-al-ciudadano/extranjeria/acuerdo-de-schengen. [Accedido: feb 2020].

[26] «UNE-EN 13715:2007+A1:2011 Aplicaciones ferroviarias. Ejes mont...» [En línea]. Disponible en: https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0047890. [Accedido: feb 2020].

[27] «UIC - International union of railways. The worldwide railway organisation». [En línea]. Disponible en: https://uic.org/. [Accedido: feb 2020].

[28] «Carril y secciones especiales de ArcelorMIttal Rails - Home». [En línea]. Disponible en: https://rails.arcelormittal.com/es. [Accedido: feb 2020].

9. ANEXOS

9.1. Tablas del Anexo I

CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
AREA	10	9.569E-05	9.2189E-05	9.584E-05	0.00010367	AREA	10	8.7737E-05	8.483E-05	8.2072E-05	8.3534E-05	AREA	10	9.8343E-05	9.1554E-05	8.2867E-05	8.9966E-05
	20	9.6202E-05	9.2435E-05	9.6444E-05	0.00010368		20	8.7423E-05	8.5276E-05	8.3112E-05	8.2843E-05		20	9.4008E-05	9.1429E-05	8.8816E-05	9.0733E-05
	30	9.3828E-05	9.2532E-05	9.7315E-05	0.00010083		30	8.7196E-05	8.5503E-05	8.3811E-05	8.3009E-05		30	9.3558E-05	9.1487E-05	9.0323E-05	9.1232E-05
	40	9.4546E-05	9.5293E-05	9.5881E-05	0.00010313		40	8.8074E-05	8.5647E-05	8.4299E-05	8.3484E-05		40	9.5121E-05	9.1847E-05	8.8256E-05	9.0947E-05
	50	9.1356E-05	9.0185E-05	9.9642E-05	0.00010397		50	8.6295E-05	8.5348E-05	8.6795E-05	8.4743E-05		50	9.198E-05	9.0478E-05	9.6526E-05	9.4171E-05
	60	9.4547E-05	8.8074E-05	9.7666E-05	0.00010398		60	8.7E-05	8.5157E-05	9.056E-05	8.7611E-05		60	9.4567E-05	9.0807E-05	8.884E-05	9.4156E-05
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
NORMAL	10	53167.5938	52517.0625	52805.7227	53452.9805	NORMAL	10	53176.1094	52461.834	52836.0605	53547.4551	NORMAL	10	53942.7734	52750.7344	52054.8008	53243.125
	20	53510.6797	52836.5391	52412.1582	53086.0508		20	53525.1523	52825.0254	52442.5996	53134.8926		20	53556.8008	52768.7617	52392.5898	53176.959
	30	53860.5293	53163.207	52248.3516	52929.6367		30	53859.9063	53145.3262	52252.7109	52953.2539		30	53919.4961	53069.9531	52209.3555	53052.2227
	40	54224.2832	53521.7773	52047.8594	52718.9961		40	54237.4609	53488.2793	52111.0918	52846.127		40	54277.7129	53427.6641	52008.9063	52856.4414
	50	54195.373	53416.1406	52193.3945	52916.6055		50	54166.9453	53402.1719	52196.7246	52891.2441		50	54141.916	53138.5547	52253.1777	53220.5371
	60	54825.1953	53907.123	51726.6875	52501.832		60	54775.6953	53823.3809	51784.9277	52588.5996		60	54912.7539	53683.1816	51678.3438	52764.2422
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
CREEP X	10	3.4424E-05	7.1905E-05	5.7657E-05	3.8732E-05	CREEP X	10	7.9252E-06	3.1592E-05	-7.52E-06	-3.257E-05	CREEP X	10	-0.0001824	0.00018557	-5.613E-05	4.6137E-05
	20	3.9751E-05	6.8222E-05	5.5266E-05	4.1737E-05		20	1.956E-05	2.3843E-05	-1.869E-05	-2.535E-05		20	1.1989E-05	6.2019E-05	-2.474E-05	-5.441E-05
	30	4.3926E-05	6.8389E-05	5.1403E-05	4.3359E-05		30	2.8439E-05	2.5621E-05	-2.703E-05	-2.616E-05		30	3.6668E-05	6.0821E-05	-3.894E-05	-5.73E-05
	40	4.4534E-05	7.357E-05	5.1624E-05	3.6236E-05		40	3.2701E-05	3.6421E-05	-2.885E-05	-3.631E-05		40	2.4952E-05	7.3006E-05	-1.594E-05	-7.21E-05
	50	6.4166E-05	7.2225E-05	5.3673E-05	4.6769E-05		50	4.9898E-05	3.4058E-05	-5.012E-05	-3.454E-05		50	9.3834E-05	6.3947E-05	-8.385E-05	-6.945E-05
	60	7.0429E-05	8.8745E-05	4.8544E-05	3.1288E-05		60	7.3668E-05	6.377E-05	-6.697E-05	-6.488E-05		60	4.9081E-05	0.00012163	-3.79E-05	-0.0001105
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
CREEP Y	10	-7.237E-06	-8.681E-06	-7.869E-06	-1.302E-05	CREEP Y	10	2.3137E-06	-1.396E-05	2.3066E-06	-1.397E-05	CREEP Y	10	-3.29E-05	-1.472E-05	-3.176E-05	-2.265E-05
	20	-5.717E-07	-4.936E-06	4.0443E-08	-1.326E-05		20	1.5134E-05	-6.39E-06	1.5107E-05	-6.419E-06		20	2.7988E-05	-1.981E-05	3.9852E-05	-8.983E-06
	30	1.155E-05	4.3478E-06	7.7019E-06	-1.311E-06		30	2.0909E-05	-3.904E-06	2.0876E-05	-3.947E-06		30	3.2622E-05	-1.785E-05	3.9818E-05	-9.956E-06
	40	1.5624E-05	6.0039E-06	1.4374E-05	1.2378E-06		40	2.3521E-05	-4.772E-06	2.3491E-05	-4.824E-06		40	3.3303E-05	-1.057E-05	3.7451E-05	-5.422E-06
	50	2.3515E-05	-7.079E-06	2.3308E-05	-2.794E-06		50	2.3789E-05	-7.295E-06	2.3886E-05	-7.343E-06		50	3.4076E-05	-4.589E-05	3.3481E-05	-3.688E-05
	60	2.6021E-05	-8.462E-06	2.8786E-05	-2.649E-06		60	3.283E-05	-1.952E-05	3.2883E-05	-1.957E-05		60	3.9954E-05	-5.544E-05	3.8643E-05	-4.863E-05
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
F.CREEP X	10	180.74411	-359.895	-171.43357	371.355972	F.CREEP X	10	-64.779099	-327.76639	74.9305725	338.033966	F.CREEP X	10	1497.39233	-1478.3031	485.163208	-475.68884
	20	67.2455978	-357.12833	-57.486191	370.372704		20	-167.186	-254.21386	178.005775	266.011517		20	-64.695404	-564.87814	168.692505	483.340668
	30	-37.081505	-369.06898	33.3432312	372.849922		30	-257.78378	-269.73251	264.188713	270.249104		30	-244.24219	-563.93555	297.486282	511.995758
	40	25.791687	-430.94236	-24.399521	422.857399		40	-279.11269	-373.61262	274.955482	366.53669		40	-143.9201	-638.99823	118.362701	617.557037
	50	-254.57408	-429.00885	248.821724	430.07773		50	-469.72144	-332.25979	497.43042	342.412701		50	-692.55326	-574.73408	696.583139	603.143387
	60	-277.64729	-600.76231	265.534645	588.321159		60	-635.43671	-593.31107	649.565277	619.489746		60	-384.73164	-953.7298	310.94574	905.114288
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
F.CREEPY	10	1858.52014	1859.27338	-1899.5014	-1923.782	F.CREEPY	10	1234.94452	1403.40454	-1467.7609	-1295.6207	F.CREEPY	10	1668.13403	1251.09131	-1089.6603	-1560.0712
	20	1708.32111	1779.41071	-2009.0615	-1984.6564		20	1141.22891	1385.7002	-1616.7034	-1424.6373		20	1245.41815	1480.4917	-1907.4877	-1712.6293
	30	1605.36133	1751.48651	-2057.0931	-1958.011		30	1064.97787	1364.4942	-1685.8578	-1457.3452		30	1133.11996	1476.93951	-2045.0211	-1706.9291
	40	1606.51831	1714.74146	-2065.1617	-2011.2986		40	1023.25446	1290.44727	-1677.8271	-1370.8098		40	1159.01407	1334.15689	-1916.2314	-1618.2061
	50	1557.54944	1775.06824	-2133.875	-1893.4149		50	969.066223	1337.67438	-1701.8557	-1399.7554		50	1011.41742	1637.80469	-2278.5225	-1488.8041
	60	1482.9845	1770.57037	-2158.2954	-1790.7616		60	841.760376	1299.05865	-1786.2417	-1217.1512		60	1041.2197	1492.18726	-2054.4292	-1269.4456
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
SPIN	10	-0.0791393	-0.0787125	0.08397568	0.08578288	SPIN	10	-0.0781015	-0.0766525	0.0866001	0.08685364	SPIN	10	-0.215404	-0.1014528	0.07159005	0.08630475
	20	-0.0789016	-0.0786156	0.08448282	0.08588871		20	-0.0776697	-0.0766538	0.08878219	0.08634702		20	-0.0885663	-0.0827516	0.1027177	0.10631682
	30	-0.0786446	-0.0783584	0.08499289	0.08599414		30	-0.0772843	-0.0765834	0.08996179	0.08694407		30	-0.0871306	-0.0825096	0.10618505	0.1074797
	40	-0.0788062	-0.0785291	0.08444141	0.08596746		40	-0.0775441	-0.0764615	0.09057009	0.08769783		40	-0.0894464	-0.0829472	0.10234947	0.10665609
	50	-0.0774707	-0.0771131	0.08590952	0.08629871		50	-0.0763631	-0.076323	0.09276106	0.08959479		50	-0.082949	-0.0820254	0.11745885	0.11320538
	60	-0.077267	-0.0763985	0.08547264	0.08638993		60	-0.0762801	-0.0759351	0.09672344	0.09452915		60	-0.0866748	-0.0816658	0.10509869	0.11378879
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
PRESION	10	906862560	925012640	992694272	979968960	PRESION	10	910080064	927653632	966769856	961566912	PRESION	10	1098638976	1171262592	1291898240	1236423680
	20	918332320	928401152	984561856	976455776		20	919199104	929185888	948486720	962082816		20	1152359424	1173323264	1232889856	1227059072
	30	926372064	931679584	976979200	973594016		30	927109024	932335072	937520768	956883264		30	1167639488	1179260352	1212108864	1219075264
	40	921393952	933713280	983040416	974408768		40	924709024	936771104	931101344	949607712		40	1152427456	1182354560	1231354816	1218130432
	50	936187040	936765440	968990528	969719424		50	941750624	938562976	906165632	936671488		50	1195115392	1194008128	1147162816	1190080832
	60	937121728	940925504	963897312	966828928		60	944836352	948061600	869277952	900380832		60	1176838208	1201964288	1217565888	1180671680

Tabla 12. Resultados para curva de radio 1000 metros.

CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
AREA	10	9.7969E-05	9.2294E-05	9.8157E-05	0.00010348	AREA	10	8.6513E-05	8.5374E-05	8.215E-05	8.2771E-05	AREA	10	9.3493E-05	9.1712E-05	8.7252E-05	8.9577E-05
	20	9.5837E-05	9.2589E-05	9.8171E-05	0.00010276		20	8.6833E-05	8.5828E-05	8.186E-05	8.2345E-05		20	9.3992E-05	9.2358E-05	8.7139E-05	8.9103E-05
	30	9.3553E-05	9.3069E-05	9.8705E-05	0.00010295		30	8.6725E-05	8.5943E-05	8.2164E-05	8.2365E-05		30	9.4023E-05	9.2486E-05	8.7257E-05	8.9182E-05
	40	9.8552E-05	9.4188E-05	9.3559E-05	9.8034E-05		40	8.8214E-05	8.9168E-05	8.0527E-05	8.1195E-05		40	9.3559E-05	9.4423E-05	8.8736E-05	8.8439E-05
	50	9.3566E-05	9.5233E-05	9.8875E-05	0.00010316		50	8.6609E-05	8.6123E-05	8.2806E-05	8.2682E-05		50	9.4166E-05	9.2591E-05	8.7387E-05	8.9407E-05
	60	9.6658E-05	9.3749E-05	9.8035E-05	9.8355E-05		60	8.7453E-05	8.7631E-05	8.122E-05	8.2416E-05		60	9.3372E-05	9.2529E-05	8.9815E-05	8.9838E-05
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
NORMAL	10	53058.4277	52607.4238	52895.4219	53342.7754	NORMAL	10	53067.6895	52592.1777	52919.709	53393.7969	NORMAL	10	53087.041	52590.9531	52908.7656	53400.0449
	20	53305.2988	52875.9336	52644.918	53072.168		20	53309.9375	52854.6836	52676.4863	53124.4238		20	53323.7109	52819.7852	52649.2285	53148.9023
	30	53533.543	53089.1875	52539.6855	52980.9453		30	53543.002	53081.3281	52567.0898	53022.0527		30	53567.7305	53039.832	52530.0293	53047.082
	40	53526.9297	54090.5625	52537.8711	52949.4102		40	53553.5605	54327.7324	52567.5918	52986.2031		40	53550.9453	54423.7051	52547.6816	53064.7129
	50	53801.2441	53411.9297	52344.4453	52850.4785		50	53823.043	53413.6758	52343.8574	52849.0977		50	53881.7598	53365.8223	52293.0664	52912.9453
	60	54094.1094	53818.8906	52310.0723	52658.5664		60	54036.0879	53738.6074	52250.0742	52650.0215		60	54037.8887	53509.4355	52288.1973	52911.5078
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
CREEP X	10	4.3097E-05	5.9119E-05	5.8333E-05	5.1672E-05	CREEP X	10	1.1E-05	1.7097E-05	-1.146E-05	-1.792E-05	CREEP X	10	-6.671E-06	5.9309E-05	-1.874E-05	-3.37E-05
	20	4.2167E-05	5.7777E-05	5.7623E-05	5.2889E-05		20	1.0107E-05	1.4227E-05	-1.062E-05	-1.51E-05		20	3.1187E-06	2.8644E-05	-8.234E-07	-3.606E-05
	30	4.7071E-05	5.6496E-05	5.6503E-05	5.2281E-05		30	1.5451E-05	1.4859E-05	-1.602E-05	-1.569E-05		30	6.8469E-06	3.607E-05	-9.351E-06	-3.752E-05
	40	4.4429E-05	5.3248E-05	5.1134E-05	4.331E-05		40	3.4195E-06	5.7483E-06	-3.507E-06	-5.245E-06		40	2.3409E-05	1.7814E-05	-2.483E-05	-1.724E-05
	50	5.1912E-05	5.7874E-05	5.4518E-05	5.1434E-05		50	2.3557E-05	2.0147E-05	-2.621E-05	-2.04E-05		50	1.4912E-05	4.3564E-05	-1.598E-05	-4.773E-05
	60	5.5574E-05	5.8779E-05	5.0916E-05	4.0907E-05		60	1.5402E-05	1.7262E-05	-1.69E-05	-1.576E-05		60	4.1302E-05	4.3382E-05	-4.068E-05	-4.546E-05
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
CREEP Y	10	-1.772E-05	-9.236E-06	4.6544E-07	-7.495E-06	CREEP Y	10	5.5251E-06	-9.321E-06	5.5288E-06	-9.319E-06	CREEP Y	10	-5.539E-06	-1.914E-05	1.3587E-05	3.1875E-06
	20	-9.791E-06	-4.07E-06	-1.4E-05	-8.687E-06		20	8.5847E-06	-3.458E-06	8.5602E-06	-3.471E-06		20	1.2387E-05	1.6864E-06	4.5784E-06	-3.021E-06
	30	4.6838E-06	-1.594E-06	7.8058E-06	-1.976E-06		30	1.2336E-05	-1.571E-06	1.2314E-05	-1.578E-06		30	1.7732E-05	-2.011E-06	1.6538E-05	-1.142E-06
	40	4.0859E-06	9.1144E-06	3.281E-06	5.5114E-06		40	1.033E-05	4.9394E-06	1.0288E-05	9.7792E-06		40	1.7678E-05	5.6831E-06	2.5204E-05	-1.032E-06
	50	1.176E-05	3.7238E-06	1.7288E-05	-6.062E-07		50	1.6016E-05	8.4777E-07	1.5993E-05	8.4544E-07		50	2.28E-05	-4.493E-06	2.1506E-05	-6.109E-07
	60	2.0684E-05	2.6852E-05	1.8679E-05	2.4397E-05		60	2.1258E-05	2.4271E-05	2.1306E-05	2.4145E-05		60	3.1564E-05	1.7513E-07	3.1534E-05	1.0993E-06
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
F.CREEP X	10	27.9635162	-217.50188	-19.874687	225.050917	F.CREEP X	10	-112.33587	-183.68381	119.504574	190.723057	F.CREEP X	10	57.3419189	-358.15808	102.939453	198.836182
	20	28.6903152	-178.6846	-20.495934	183.896799		20	-102.94704	-154.49261	110.0968	160.639058		20	-14.403168	-294.80639	-14.10025	335.850693
	30	-26.875183	-211.41561	31.1568642	212.170925		30	-161.99951	-162.31137	167.951294	166.718439		30	-57.394089	-368.23732	66.3495483	342.715073
	40	79.8159688	-96.288437	-83.105528	100.949844		40	-38.405574	-54.355804	38.5636969	54.9517517		40	-186.31012	-170.19803	194.916565	130.763374
	50	-119.66693	-239.46173	123.486797	253.504995		50	-247.68107	-208.63903	271.180328	207.70599		50	-134.92626	-423.40694	132.829689	426.630051
	60	-71.164379	-177.2805	86.1636314	209.293182		60	-166.46087	-177.60234	174.015854	167.586517		60	-335.91801	-416.40283	335.071877	399.855194
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
F.CREEPY	10	1914.7229	1857.57434	-2021.5951	-1987.3069	F.CREEPY	10	1296.18164	1428.15289	-1576.6705	-1411.0141	F.CREEPY	10	1217.36511	1267.52942	-1528.6599	-1532.0527
	20	1838.93201	1836.97308	-1870.5986	-1961.3251		20	1269.89124	1408.87939	-1604.792	-1502.8113		20	1422.1084	1521.83575	-1849.1113	-1813.7332
	30	1726.7323	1787.45245	-2089.5676	-2019.7286		30	1213.96509	1396.72186	-1633.2997	-1524.8977		30	1380.6532	1508.19849	-1911.1597	-1816.4147
	40	1730.50311	1690.47021	-2014.1712	-2063.5775		40	1300.47894	1317.00195	-1636.7841	-1538.0883		40	1319.82333	1517.6792	-1945.0922	-1734.8145
	50	1663.84637	1744.5528	-2107.6833	-2006.6396		50	1131.19293	1333.33325	-1632.3929	-1519.7739		50	1299.53802	1456.94745	-1951.1979	-1751.1122
	60	1661.78833	1473.91144	-2188.4618	-2196.6571		60	1091.2149	982.585266	-1659.4138	-1609.3505		60	1140.29272	1434.18091	-2062.1924	-1806.1323
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
SPIN	10	-0.0789089	-0.078778	0.08504287	0.08574293	SPIN	10	-0.0774058	-0.0769405	0.08638557	0.08612566	SPIN	10	-0.087199	-0.0835901	0.0985144	0.10278798
	20	-0.0788906	-0.0788259	0.08501808	0.08568069		20	-0.0774367	-0.0770671	0.08634633	0.0860252		20	-0.0876427	-0.0844979	0.0989305	0.10213671
	30	-0.0788205	-0.0787455	0.08526712	0.0857632		30	-0.0771884	-0.0769571	0.08682074	0.08611333		30	-0.0870544	-0.0841683	0.0995813	0.10267694
	40	-0.0789836	-0.0788583	0.08454642	0.08487393		40	-0.0783675	-0.0783724	0.08509739	0.08513917		40	-0.0869528	-0.0854853	0.10240586	0.10051428
	50	-0.0784438	-0.0785375	0.08554632	0.08590164		50	-0.0769035	-0.0768595	0.08788495	0.08688625		50	-0.0866694	-0.0834393	0.10071497	0.10389479
	60	-0.0789761	-0.0782851	0.0852273	0.08525057		60	-0.0772707	-0.0777035	0.08583406	0.08725074		60	-0.0861201	-0.0830252	0.10588504	0.10502367
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
PRESION	10	921297792	924948640	980496928	979678880	PRESION	10	920338624	924026688	966561504	967618112	PRESION	10	1151393728	1165607744	1259708160	1243982528
	20	922701152	925595584	977588960	978566112		20	921147648	923736576	965538368	967717728		20	1149847744	1162603840	1255845120	1244107200
	30	926171936	927972096	977364096	977378336		30	926248704	926456736	959984032	965619840		30	1155314048	1165678016	1252008768	1241347008
	40	919406560	926106336	981221312	980247552		40	910570624	914532704	979146592	979106368		40	1160096320	1170043392	1236472832	1249854656
	50	930724352	931852992	975030208	974886912		50	932304672	930332160	948740000	958850912		50	1160029888	1171845376	1245891904	1235875648
	60	927568640	928882048	978222688	975800288		60	927787808	921704928	966046784	959278560		60	1173919104	1175548096	1219076288	1231414080

Tabla 13. Resultados para curva de radio 1500 metros.

CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
AREA	10	9.5371E-05	9.5085E-05	9.8982E-05	0.00010017	AREA	10	8.6779E-05	8.6097E-05	8.1564E-05	8.2148E-05	AREA	10	9.3501E-05	9.2443E-05	8.7035E-05	8.8395E-05
	20	9.5466E-05	9.7407E-05	9.8564E-05	9.9752E-05		20	8.6991E-05	8.6336E-05	8.1377E-05	8.1936E-05		20	9.386E-05	9.2892E-05	8.7207E-05	8.8303E-05
	30	9.8367E-05	9.2863E-05	9.8605E-05	9.976E-05		30	8.6985E-05	8.6496E-05	8.1401E-05	8.1863E-05		30	9.3948E-05	9.3129E-05	8.7241E-05	8.815E-05
	40	9.8193E-05	9.5441E-05	0.00010211	0.00010265		40	8.6798E-05	8.6473E-05	8.1589E-05	8.1969E-05		40	9.3896E-05	9.3177E-05	8.7429E-05	8.8246E-05
	50	9.8071E-05	9.2911E-05	9.6614E-05	0.00010233		50	8.6754E-05	8.6559E-05	8.1684E-05	8.2051E-05		50	9.4084E-05	9.3444E-05	8.726E-05	8.7918E-05
	60	9.6411E-05	9.5684E-05	9.4621E-05	9.8379E-05		60	8.7325E-05	8.7306E-05	8.1001E-05	8.1886E-05		60	9.4916E-05	9.4697E-05	8.5245E-05	8.6623E-05
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
NORMAL	10	53023.3242	52705.373	52929.7246	53243.7891	NORMAL	10	53032.0254	52709.207	52951.7715	53274.4707	NORMAL	10	53048.7793	52740.5176	52912.7813	53217.4688
	20	53198.0391	52877.3516	52762.8652	53065.9336		20	53206.9863	52891.8516	52786.1777	53105.4238		20	53176.9941	52891.3457	52794.5273	53087.0547
	30	53329.0879	53034.791	52696.8809	52994.9375		30	53351.3301	53043.8945	52707.5488	53020.8652		30	53316.75	53051.4551	52719.9336	53001.2305
	40	53444.2383	53143.4961	52639.2734	52970.4844		40	53477.5605	53171.8164	52650.3906	52979.8125		40	53454.6602	53185.8438	52651.2949	52951.918
	50	53566.9395	53267.4043	52580.9219	52870.4414		50	53593.3145	53292.457	52609.6699	52919.3535		50	53583.8301	53345.9805	52585.4043	52837.2988
	60	53734.6914	53527.5957	51850.2852	52736.9688		60	53744.6816	53551	51897.207	52734.2305		60	53773.6953	53705.5586	51820.6367	52607.4023
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
CREEP X	10	4.2785E-05	5.4213E-05	6.0435E-05	5.5775E-05	CREEP X	10	3.7187E-06	8.5315E-06	-4.174E-06	-9.142E-06	CREEP X	10	-0.0001956	0.00020717	-0.0001825	0.00016157
	20	4.3237E-05	5.4714E-05	5.9724E-05	5.6017E-05		20	3.9912E-06	8.4022E-06	-4.26E-06	-8.863E-06		20	-2.244E-05	2.5038E-05	-1.277E-05	3.8219E-06
	30	4.4145E-05	5.1068E-05	5.9455E-05	5.5428E-05		30	5.5569E-06	7.6521E-06	-6.423E-06	-8.588E-06		30	-5.963E-06	8.8132E-06	7.3755E-07	-1.209E-05
	40	5.0012E-05	5.2155E-05	5.9387E-05	5.649E-05		40	9.8163E-06	9.5156E-06	-1.059E-05	-1.019E-05		40	3.444E-07	1.1586E-05	-3.492E-06	-1.38E-05
	50	5.0941E-05	5.2904E-05	5.8515E-05	5.3461E-05		50	1.222E-05	1.1061E-05	-1.312E-05	-1.153E-05		50	2.7288E-07	9.8211E-06	-4.247E-06	-1.373E-05
	60	5.3864E-05	5.4449E-05	5.1043E-05	4.6643E-05		60	1.1977E-05	1.2773E-05	-2.088E-05	-1.243E-05		60	-7.858E-06	-9.002E-07	4.6169E-06	-1.892E-06
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
CREEP Y	10	-4.467E-05	-1.891E-05	1.2365E-06	-2.058E-06	CREEP Y	10	2.1918E-06	-4.08E-06	2.1876E-06	-4.088E-06	CREEP Y	10	-5.681E-06	-9.061E-06	9.735E-06	3.6945E-06
	20	-5.5E-08	-8.632E-07	-4.49E-07	-2.368E-06		20	4.685E-06	-7.457E-07	4.6704E-06	-7.602E-07		20	4.2572E-06	5.5924E-06	7.7974E-06	6.4524E-06
	30	-3.06E-07	2.8121E-06	-9.037E-07	3.7213E-07		30	7.1773E-06	1.9976E-06	7.1729E-06	1.9746E-06		30	5.839E-06	7.9334E-06	6.484E-06	6.3255E-06
	40	6.3307E-06	1.2825E-06	7.1134E-06	-2.096E-07		40	9.2012E-06	2.4158E-06	9.1948E-06	2.3983E-06		40	9.0315E-06	9.3077E-06	7.8006E-06	7.7676E-06
	50	7.0206E-06	7.1242E-06	6.4022E-06	3.6852E-06		50	9.2607E-06	3.2436E-06	9.197E-06	3.2748E-06		50	1.0968E-05	1.5265E-05	6.0702E-06	1.3871E-05
	60	1.8201E-05	1.9808E-05	1.5562E-05	1.473E-05		60	1.5899E-05	1.5881E-05	1.6097E-05	1.5822E-05		60	1.6936E-05	4.2645E-05	1.6994E-05	4.6716E-05
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
F.CREEP X	10	38.1872406	-136.71782	-31.283203	141.290693	F.CREEP X	10	-41.064281	-90.981426	46.3497338	96.184742	F.CREEP X	10	1560.50769	-1603.8674	1446.49823	-1386.5787
	20	34.9609032	-122.92636	-31.413769	120.599514		20	-43.796624	-91.065695	46.9445024	94.0980663		20	236.878349	-263.26491	98.3451729	-60.054665
	30	3.71535492	-95.608173	3.71858978	104.933273		30	-62.983503	-83.358421	71.1250687	91.2089958		30	63.1729927	-91.176399	-33.447878	91.5358658
	40	-54.662138	-132.42268	74.4919682	138.855007		40	-110.23803	-103.54116	115.413773	108.246414		40	-5.6566467	-117.71387	9.01379967	105.959412
	50	-94.18972	-136.62457	100.10001	162.953468		50	-136.12615	-118.70281	141.260098	121.064049		50	-5.0287352	-99.079041	17.7186518	107.058037
	60	-46.386224	-122.85843	73.2189865	136.436424		60	-131.08476	-137.19389	215.923294	132.501442		60	83.8964844	-16.589172	-65.093704	28.0531769
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
F.CREEPY	10	2204.15662	1966.76465	-2041.9648	-2034.2011	F.CREEPY	10	1389.40741	1418.2088	-1587.8723	-1497.707	F.CREEPY	10	1260.67944	1227.71704	-1461.7452	-1513.4916
	20	1797.70319	1814.70435	-2017.9844	-2022.8613		20	1360.12915	1388.1228	-1607.2118	-1530.6984		20	1585.40558	1507.26428	-1851.1397	-1860.932
	30	1791.66608	1773.74023	-2013.2498	-2047.003		30	1322.01965	1350.26196	-1619.0706	-1547.9345		30	1609.32709	1478.21704	-1922.1725	-1899.7899
	40	1765.84808	1777.40967	-2099.8508	-2034.1519		40	1272.93219	1343.25189	-1616.754	-1553		40	1565.86346	1448.09692	-1948.4143	-1890.7233
	50	1759.0946	1727.32318	-2093.9718	-2043.9337		50	1264.75165	1320.76886	-1606.9925	-1547.493		50	1554.01794	1352.22284	-1933.2158	-1890.8316
	60	1684.09369	1573.42279	-2140.3376	-2127.5416		60	1175.1181	1119.12766	-1600.3909	-1588.9013		60	1492.49109	1037.53055	-1912.5724	-1940.9459
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
SPIN	10	-0.0789278	-0.0788653	0.08516673	0.08559819	SPIN	10	-0.0776426	-0.0774399	0.08559007	0.08577923	SPIN	10	-0.0875556	-0.0853554	0.09778723	0.10014386
	20	-0.0789254	-0.078891	0.08513792	0.08555679		20	-0.0776425	-0.0774549	0.0855754	0.08575147		20	-0.0879377	-0.0860976	0.09845246	0.10011588
	30	-0.0789264	-0.078858	0.0852524	0.08555605		30	-0.0775239	-0.0774491	0.08566148	0.08575787		30	-0.0877454	-0.086228	0.09870824	0.10003359
	40	-0.0788983	-0.078767	0.08547197	0.08565505		40	-0.0772747	-0.077307	0.08584505	0.08586076		40	-0.0871067	-0.0859124	0.09928301	0.10048424
	50	-0.0788761	-0.0786682	0.08557096	0.08566149		50	-0.0771481	-0.0772977	0.08594484	0.08606492		50	-0.0872704	-0.0862214	0.09900719	0.10024459
	60	-0.0789825	-0.0786694	0.08519568	0.08524173		60	-0.0774813	-0.0776759	0.085986	0.08637479		60	-0.0892439	-0.0883685	0.09656657	0.09761633
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
PRESION	10	921594496	923586880	981590144	980160640	PRESION	10	916721408	918326816	973842080	972790976	PRESION	10	1150732928	1158706304	1262175104	1253282176
	20	922453440	924144736	980142528	979330528		20	917516224	918965408	973031936	972213440		20	1149035520	1156310400	1257971008	1251794752
	30	924025408	925096704	980263776	978948800		30	920030624	919918848	971270720	971538912		30	1151181952	1156839040	1255948480	1251719360
	40	926629376	927016704	978515840	978817184		40	924171232	922395040	967967712	969550496		40	1155400256	1159231232	1252469696	1249742848
	50	928259328	928097280	976478656	978064288		50	926625184	923609472	966078176	967530848		50	1155678400	1158712192	1253105600	1250886336
	60	925497536	926783904	976235392	978410464		60	923179872	920371744	961052160	966364992		60	1147413888	1147680064	1259857792	1260769920

Tabla 14. Resultados para curva de radio 2000 metros.

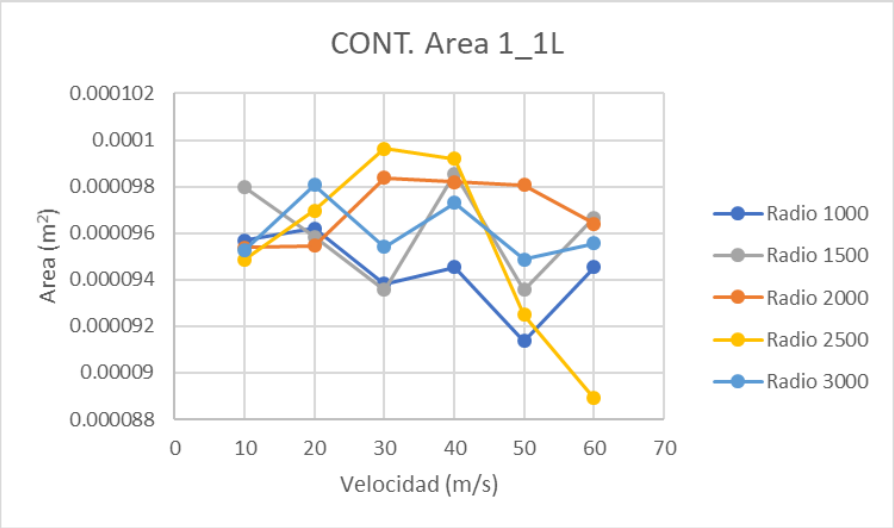
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
AREA	10	9.4878E-05	9.5287E-05	9.9337E-05	9.8491E-05	AREA	10	8.8157E-05	8.9817E-05	8.0519E-05	7.9699E-05	AREA	10	9.2582E-05	9.3627E-05	8.8364E-05	8.6673E-05
	20	9.6966E-05	9.9335E-05	9.2037E-05	9.6554E-05		20	8.8506E-05	8.8455E-05	8.0182E-05	8.0313E-05		20	9.6269E-05	9.5305E-05	8.4875E-05	8.5483E-05
	30	9.9622E-05	9.6746E-05	9.4846E-05	9.8778E-05		30	8.7527E-05	8.7568E-05	8.47E-05	8.5126E-05		30	9.3879E-05	9.3724E-05	8.9236E-05	8.9564E-05
	40	9.9187E-05	9.137E-05	9.3316E-05	9.7563E-05		40	8.6738E-05	8.6815E-05	9.5167E-05	9.0847E-05		40	9.1806E-05	9.2215E-05	9.6111E-05	9.2808E-05
	50	9.2501E-05	9.0895E-05	0.00010511	0.00010627		50	8.6216E-05	8.673E-05	0.00010376	8.4671E-05		50	9.0902E-05	9.0682E-05	8.3066E-05	0.00010695
	60	8.8908E-05	9.8283E-05	8.3935E-05	8.9331E-05		60	8.6941E-05	8.5151E-05	0.00010964	7.845E-05		60	9.1885E-05	9.0114E-05	9.347E-05	7.9902E-05
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
NORMAL	10	52761.8457	52775.1172	52966.1328	52943.7539	NORMAL	10	52743.0273	52891.9297	53011.6504	52873.7109	NORMAL	10	52792.1133	52844.1309	52956.1406	52904.8223
	20	54320.2598	54273.2383	51834.3457	51851.3809		20	54327.791	54297.6777	51876.8086	51876.291		20	54331.332	54325.6152	51842.6875	51827.6387
	30	54541.0723	54246.0762	52382.6738	52685.4414		30	54533.9297	54183.9727	52432.5273	52785.2129		30	54521.2109	54205.1758	52421.8828	52751.0273
	40	54170.3887	53884.4629	51522.2285	51824.3066		40	54156.707	53670.543	51534.6934	52119.1445		40	54027.9258	53606.6406	51657.0234	52171.9336
	50	54034.0234	52609.7754	51259.3047	52461.5781		50	53799.3691	53208.2637	51589.4395	51849.8594		50	53543.5703	52858.1973	51725.0723	52405.3047
	60	54924.1172	54867.7598	50503.6621	50744.416		60	54363.1895	52150.3926	51169.0977	53427.2617		60	54065.8379	52312.5371	51456.748	53369.791
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
CREEP X	10	4.3349E-05	3.6972E-05	6.2962E-05	6.7382E-05	CREEP X	10	-1.748E-05	-3.092E-05	1.6601E-05	3.1156E-05	CREEP X	10	-4.827E-05	2.942E-05	-6.562E-05	7.7872E-05
	20	4.1444E-05	5.7615E-05	5.1176E-05	4.5128E-05		20	5.2695E-06	6.3778E-06	-5.254E-06	-6.137E-06		20	-2.99E-05	1.2359E-05	8.1525E-06	1.0902E-05
	30	6.1039E-05	7.4892E-05	4.4613E-05	3.0587E-05		30	4.0082E-05	3.3924E-05	-3.753E-05	-3.072E-05		30	3.3435E-05	2.7912E-05	-3.76E-05	-2.848E-05
	40	5.926E-05	7.7822E-05	3.6602E-05	2.115E-05		40	8.6045E-05	4.7389E-05	-8.228E-05	-5.533E-05		40	9.5449E-05	3.7271E-05	-9.978E-05	-5.171E-05
	50	0.00014233	0.00016057	5.093E-05	6.2434E-05		50	0.0002471	-3.588E-05	-0.000217	4.5734E-05		50	0.00026678	9.944E-05	-0.0002201	-8.331E-05
	60	-0.0002381	3.3892E-05	0.00028291	-9.884E-05		60	0.00020566	0.00039031	-3.207E-05	-0.0004098		60	8.502E-05	0.00045216	-4.568E-05	-0.0004921
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
CREEP Y	10	-1.26E-05	-3.231E-06	1.1154E-06	6.8566E-06	CREEP Y	10	-3.556E-06	2.176E-05	-3.53E-06	2.1776E-05	CREEP Y	10	1.7384E-05	3.1819E-05	7.8078E-06	6.9354E-06
	20	1.448E-05	3.378E-05	9.4315E-06	2.6258E-05		20	2.9132E-05	2.5508E-05	2.9178E-05	2.5413E-05		20	2.0529E-05	3.8561E-05	3.2677E-05	4.5548E-05
	30	1.6816E-05	-6.602E-06	9.1219E-06	-1.107E-05		30	2.2819E-05	-1.576E-05	2.2847E-05	-1.568E-05		30	1.9392E-05	-1.314E-05	2.3288E-05	-1.393E-05
	40	2.0006E-05	-1.338E-05	1.1296E-05	-1.57E-05		40	4.0573E-05	-4.321E-05	3.9801E-05	-4.315E-05		40	3.6783E-05	-6.045E-05	3.8759E-05	-4.721E-05
	50	6.1768E-05	-0.0001235	8.3078E-05	-0.0001092		50	4.9987E-05	-4.892E-05	4.9162E-05	-4.876E-05		50	7.1339E-05	-0.0001061	7.8097E-05	-8.399E-05
	60	3.4713E-05	8.7345E-05	3.7788E-05	6.33E-05		60	6.8927E-05	-0.0003193	6.9346E-05	-0.0003224		60	3.2943E-05	-0.0003502	1.3528E-06	-0.0003646
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
F.CREEP X	10	-11.242279	123.383339	9.29884338	-127.42895	F.CREEP X	10	192.936802	317.03405	-177.07278	-305.75419	F.CREEP X	10	462.578354	-289.55193	579.446548	-737.5358
	20	129.790985	-80.742195	-143.02091	68.385643		20	-49.946285	-57.87059	41.7960815	45.5867767		20	301.981674	-117.6751	-65.801819	-129.63951
	30	-100.59913	-350.10621	92.9973717	336.015427		30	-370.13531	-298.15729	346.077695	280.309471		30	-316.66095	-238.83364	309.886237	220.333885
	40	-73.937286	-355.16458	121.960701	393.395355		40	-642.8372	-325.03915	715.830235	447.957153		40	-660.4605	-207.00186	727.753586	349.300278
	50	-1109.7894	-1299.1212	900.243004	1116.88895		50	-1686.6694	335.051346	1769.03186	-419.81609		50	-1608.835	-463.86938	1309.38274	623.351303
	60	2316.91692	-1058.6137	-2208.3229	1015.47694		60	-1356.0094	-2033.0493	309.446495	2153.32788		60	-613.97504	-2147.5527	372.083622	2196.90056
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
F.CREEPY	10	1882.60956	1804.26221	-2043.4752	-2090.2617	F.CREEPY	10	1429.35266	1076.81619	-1465.9636	-1581.9093	F.CREEPY	10	1269.01617	1183.38635	-1715.0529	-1641.7892
	20	1649.19977	1496.97717	-2020.1436	-2226.4647		20	1030.94083	1036.17856	-1671.3785	-1625.2103		20	1420.86816	1189.8576	-1862.836	-1929.0806
	30	1700.47656	1812.33923	-2089.0405	-1825.68		30	1059.89429	1386.06738	-1701.7122	-1310.4738		30	1334.63043	1578.70599	-2018.2634	-1633.5023
	40	1641.24268	1846.09833	-2065.6818	-1727.6147		40	806.458954	1446.3075	-1864.0815	-1026.0112		40	1033.50017	1669.39453	-2218.3683	-1289.8362
	50	1140.74802	2699.69177	-2702.7913	-862.56564		50	671.040405	1563.68805	-2206.1412	-929.75363		50	717.828186	1661.06226	-2315.8405	-1249.8191
	60	2903.27057	1361.6087	-1936.3146	-2398.8638		60	622.339577	2659.20343	-2412.1622	-2.2659302		60	1072.12701	2717.61188	-2021.2087	61.6391602
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
SPIN	10	-0.0788069	-0.0789485	0.0854547	0.08503599	SPIN	10	-0.0790162	-0.07988	0.08467466	0.08398101	SPIN	10	-0.0858373	-0.0884834	0.10142042	0.09703039
	20	-0.0790293	-0.0789861	0.08422156	0.08492228		20	-0.0780181	-0.0779591	0.08540793	0.08544216		20	-0.0907851	-0.0886511	0.09513647	0.09703741
	30	-0.0789924	-0.0779234	0.08500051	0.0853882		30	-0.0771893	-0.0774746	0.0908324	0.09080353		30	-0.0850103	-0.0860818	0.10407001	0.10380216
	40	-0.0789951	-0.0776998	0.08481782	0.08533669		40	-0.0765287	-0.077106	0.10011739	0.09655373		40	-0.0828889	-0.0849581	0.11810382	0.11120567
	50	-0.0763883	-0.0763194	0.08693529	0.08807678		50	-0.0741888	-0.0774665	0.12648317	0.09144459		50	-0.0774136	-0.0808243	0.13423434	0.13031857
	60	-0.1410062	-0.0996621	0.07500472	0.08167044		60	-0.0760129	-0.0737995	0.10704439	0.1469589		60	-0.0830372	-0.0765287	0.11433362	0.14075325
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
PRESION	10	922933568	918747040	979837312	983314400	PRESION	10	897493440	883556544	987575104	995195232	PRESION	10	1157308864	1143650688	1248145088	1265876992
	20	920225760	926872736	983718848	977206432		20	920411808	920739616	970143264	968799232		20	1140382400	1154573184	1264594496	1256910976
	30	928772800	932217408	980305280	977156800		30	934471712	928440768	930671200	933116800		30	1178776832	1173513920	1227923904	1230915712
	40	925416576	929898112	976278656	971358784		40	936872928	928088384	834649920	874093728		40	1194536960	1180012096	1137295872	1183338048
	50	934392288	926756544	894249312	872661152		50	936748896	921004832	789239520	922273824		50	1192977920	1178963968	1307598080	1019418624
	60	1000194592	905487168	983465536	989260928		60	938407424	920084576	759803504	1022137760		60	1194767936	1174645312	1160750272	1398290624

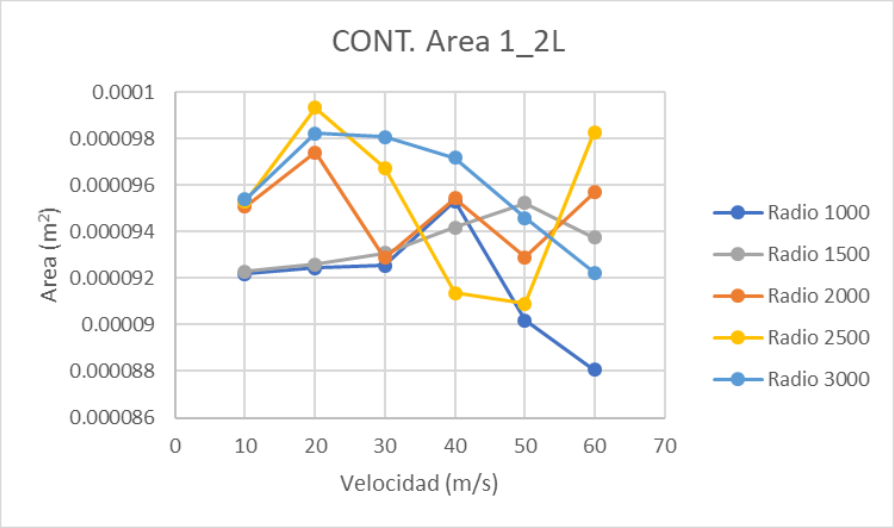
Tabla 15. Resultados para curva de radio 2500 metros.

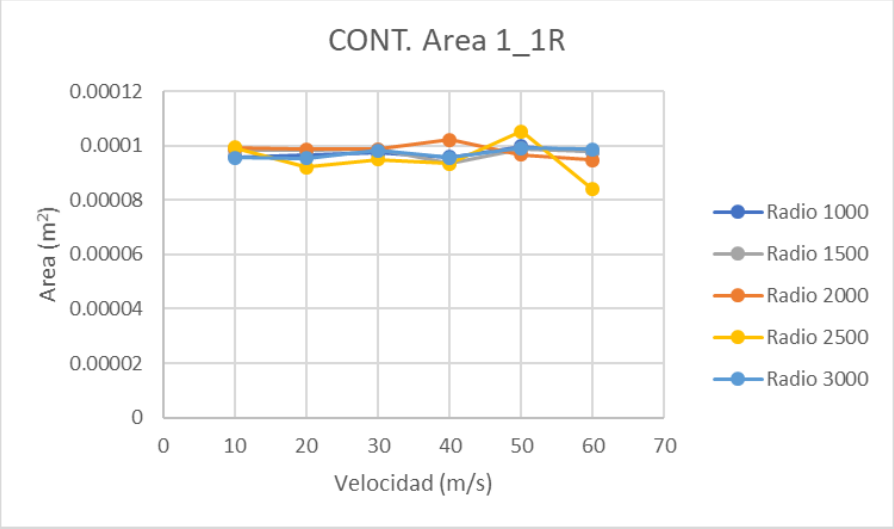
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
AREA	10	9.5283E-05	9.5371E-05	9.5551E-05	9.8893E-05	AREA	10	8.7240E-05	8.7085E-05	8.1308E-05	8.149E-05	AREA	10	9.336E-05	9.34E-05	8.7144E-05	8.717E-05
	20	9.808E-05	9.8235E-05	9.5418E-05	9.8658E-05		20	8.8282E-05	8.8311E-05	8.0792E-05	8.0753E-05		20	9.4066E-05	9.4004E-05	8.7256E-05	8.7331E-05
	30	9.5397E-05	9.8064E-05	9.8106E-05	9.8759E-05		30	8.7991E-05	8.767E-05	8.0837E-05	8.1087E-05		30	9.3918E-05	9.3644E-05	8.7175E-05	8.7501E-05
	40	9.7307E-05	9.7162E-05	9.5579E-05	9.9461E-05		40	8.7571E-05	8.6776E-05	8.1361E-05	8.2032E-05		40	9.3544E-05	9.2868E-05	8.7573E-05	8.844E-05
	50	9.4858E-05	9.4591E-05	9.8963E-05	9.9164E-05		50	8.7112E-05	8.6383E-05	8.1288E-05	8.216E-05		50	9.3581E-05	9.3105E-05	8.6993E-05	8.7496E-05
	60	9.5548E-05	9.2224E-05	9.8574E-05	0.00010199		60	8.9249E-05	8.9525E-05	8.0363E-05	7.9997E-05		60	9.6784E-05	9.8408E-05	8.5846E-05	8.4374E-05
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
NORMAL	10	52789.8281	52835.9707	53170.4453	53123.25	NORMAL	10	52821.8828	52829.9355	53174.291	53167.8418	NORMAL	10	52834.1953	52887.7051	53173.3301	53118.2539
	20	53289.8066	53312.0879	52987.7305	52960.6875		20	53252.2266	53332.1582	53063.2773	52976.0664		20	53302.9902	53350.1973	52998.0371	52946.0684
	30	52982.1895	53010.9004	53060.0664	53039.2285		30	52992.5566	53042.0391	53097.0059	53060.5801		30	52997.041	53044.8086	53072.6992	53032.625
	40	52519.6523	52529.4512	53630.709	53630.4531		40	52510.3633	52532.8516	53658.502	53660.0547		40	52516.3301	52547.4238	53635.793	53632.2773
	50	52302.3848	52275.6445	53380.4512	53456.0195		50	52295.8086	52281.0586	53440.1289	53468.5527		50	52289.9082	52414.668	53410.4883	53332.9844
	60	52982.125	52740.2441	53181.25	53284.0898		60	52825.1875	53029.6406	53329.8359	53068.752		60	52883.9258	53153.834	53277.9297	52921.0879
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
CREEP X	10	3.9986E-05	4.3157E-05	6.4008E-05	6.138E-05	CREEP X	10	-3.871E-06	-2.773E-07	3.9051E-06	4.5023E-07	CREEP X	10	-3.898E-05	1.8835E-05	-1.723E-05	3.5239E-05
	20	4.2297E-05	4.4542E-05	6.1463E-05	5.9257E-05		20	-1.123E-05	-1.008E-05	1.2325E-05	1.1088E-05		20	-5.339E-07	-1.334E-05	1.5233E-05	-5.5E-06
	30	3.9533E-05	4.2825E-05	6.1787E-05	5.703E-05		30	-1.083E-05	-4.737E-06	9.5401E-06	3.1994E-06		30	-1.226E-05	-4.073E-06	9.7984E-06	4.7127E-07
	40	3.7167E-05	4.9047E-05	6.1027E-05	5.5313E-05		40	-1.249E-05	1.3531E-06	1.0273E-05	-3.776E-06		40	-1.739E-05	2.7078E-06	1.2636E-05	-7.663E-06
	50	4.1819E-05	4.8436E-05	5.8385E-05	5.0619E-05		50	-7.95E-06	8.5692E-06	8.3117E-06	-5.779E-06		50	-2.426E-05	-8.563E-06	1.7211E-05	1.8514E-06
	60	5.5973E-05	7.0933E-05	6.0778E-05	4.8678E-05		60	-2.483E-05	-2.618E-05	2.9276E-05	3.0309E-05		60	-5.985E-05	-7.119E-05	6.8366E-05	8.0791E-05
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
CREEP Y	10	-3.764E-08	-2.57E-06	-1.457E-05	-1.464E-07	CREEP Y	10	-2.217E-06	-1.016E-07	-2.241E-06	-1.243E-07	CREEP Y	10	1.737E-05	2.8767E-05	-2.457E-05	-1.136E-05
	20	4.3476E-06	1.3682E-06	1.2225E-05	-2.26E-07		20	-1.007E-06	1.0835E-05	-1.057E-06	1.0787E-05		20	8.9748E-06	1.0536E-05	3.9008E-06	5.6703E-06
	30	-5.679E-06	-3.844E-06	-4.877E-06	-3.563E-06		30	-2.099E-06	6.2912E-06	-2.21E-06	6.1764E-06		30	-2.434E-07	8.6562E-06	2.6104E-07	9.7034E-06
	40	-2.246E-05	-1.576E-05	-2.23E-05	-1.783E-05		40	-1.44E-05	-9.16E-06	-1.437E-05	-9.131E-06		40	-1.332E-05	-3.049E-06	-1.199E-05	-5.478E-06
	50	-1.326E-05	-1.869E-05	-1.533E-05	-1.805E-05		50	-9.696E-06	-1.103E-05	-9.731E-06	-1.107E-05		50	-1.312E-05	1.0158E-05	-1.16E-05	3.2934E-06
	60	5.9288E-06	-1.708E-05	-2.579E-06	-1.849E-05		60	-7.162E-06	2.7388E-05	-7.217E-06	2.7348E-05		60	-2.831E-06	4.6459E-05	-5.372E-06	3.971E-05
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
F.CREEP X	10	113.014198	45.460247	-113.10244	-45.530041	F.CREEP X	10	41.2016869	4.2459259	-41.313671	-4.4432602	F.CREEP X	10	351.672737	-177.07549	137.774139	-321.37402
	20	75.2686477	14.3750381	-80.515188	-20.830544		20	126.553349	111.016567	-134.10099	-118.67711		20	4.92253494	128.731842	-179.616	29.2571335
	30	116.476345	3.46915436	-99.858809	10.9225311		30	122.728619	49.9738159	-104.6779	-31.994637		30	131.913734	38.389389	-125.96423	-27.771271
	40	142.661419	-40.195236	-139.83757	52.1817474		40	137.597736	-4.7735138	-111.57208	33.7240753		40	181.167931	-22.138412	-152.27286	48.6964417
	50	43.2134285	-60.428238	-1.8121567	103.552002		50	88.9236546	-65.482605	-90.453925	50.2856445		50	240.523586	86.7246513	-194.21928	-38.247002
	60	-69.430328	-302.17346	-64.387249	131.304199		60	271.307274	273.322289	-305.12009	-303.96078		60	546.825034	624.379257	-562.50977	-626.80447
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
F.CREEPY	10	1792.58105	1800.19379	-1882.7574	-2030.8281	F.CREEPY	10	1411.63422	1349.46643	-1497.7815	-1484.7781	F.CREEPY	10	1298.94653	1186.87726	-1376.1391	-1481.0279
	20	1777.69244	1779.12408	-2142.0951	-2023.6985		20	1413.4389	1266.89905	-1497.3239	-1617.5723		20	1603.12567	1477.14087	-1843.6509	-1891.5388
	30	1848.75275	1800.35809	-1972.6888	-1993.571		30	1433.96204	1304.45508	-1510.098	-1558.2962		30	1680.18512	1517.51648	-1824.5804	-1878.2722
	40	1959.57922	1876.3042	-1813.598	-1867.5504		40	1514.83423	1371.99536	-1343.2058	-1335.928		40	1764.29291	1550.00006	-1674.5916	-1694.2954
	50	1862.09906	1839.13397	-1887.0531	-1801.3892		50	1482.70966	1335.43866	-1406.3362	-1296.5807		50	1739.63635	1499.00201	-1646.717	-1825.0818
	60	1726.55896	1841.03101	-2003.4509	-1750.5699		60	1442.49988	1004.46503	-1367.4686	-1627.014		60	1681.18915	1159.32578	-1532.2441	-1638.1743
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
SPIN	10	-0.0789643	-0.0789435	0.0849386	0.08508974	SPIN	10	-0.078297	-0.0781237	0.0852095	0.08531002	SPIN	10	-0.0879635	-0.0877237	0.09740012	0.09764135
	20	-0.078967	-0.0789326	0.08498417	0.08511214		20	-0.0787019	-0.0786192	0.08489254	0.08491768		20	-0.0883233	-0.0878727	0.09792148	0.09838463
	30	-0.078965	-0.0789195	0.08490682	0.08512606		30	-0.078707	-0.078388	0.08489833	0.08509928		30	-0.0888087	-0.087784	0.09762872	0.09856007
	40	-0.0789625	-0.0788122	0.08473852	0.08517248		40	-0.0789104	-0.0781311	0.0848548	0.08530802		40	-0.0893044	-0.0871053	0.09728166	0.09952717
	50	-0.0789112	-0.0782964	0.08511836	0.08523304		50	-0.0787175	-0.0780456	0.08497706	0.08574859		50	-0.090017	-0.0884605	0.09654789	0.09774322
	60	-0.0789683	-0.0778094	0.08497206	0.08526706		60	-0.079722	-0.0797782	0.08421167	0.08412172		60	-0.093914	-0.0961041	0.09302292	0.08970776
CONT	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	FAST	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R	KIK	VELOCIDAD	1_1L	1_2L	1_1R	1_2R
PRESION	10	917918368	919860096	985832576	983598496	PRESION	10	908235200	910179168	980967360	978792512	PRESION	10	1147654272	1148272320	1266007680	1264682688
	20	921125312	922950784	984235904	982420032		20	904736928	905879136	985146976	984055776		20	1148893440	1150722240	1261441152	1259479104
	30	918698752	921472480	985436512	982247392		30	903341888	907638144	985239296	981607328		30	1144037120	1148864000	1263727040	1259410240
	40	914991488	920020608	988513632	983439136		40	899454464	908404864	989275072	981405472		40	1137761344	1147942400	1270590464	1260907968
	50	917471904	920254496	984240384	980729344		50	900533504	908320544	986135712	976553632		50	1131225536	1141573376	1272390016	1265425920
	60	919866048	923579680	985200736	979239680		60	1093705952	1074257984	1282209728	1290130304		60	887949664	888528160	995456288	995071968

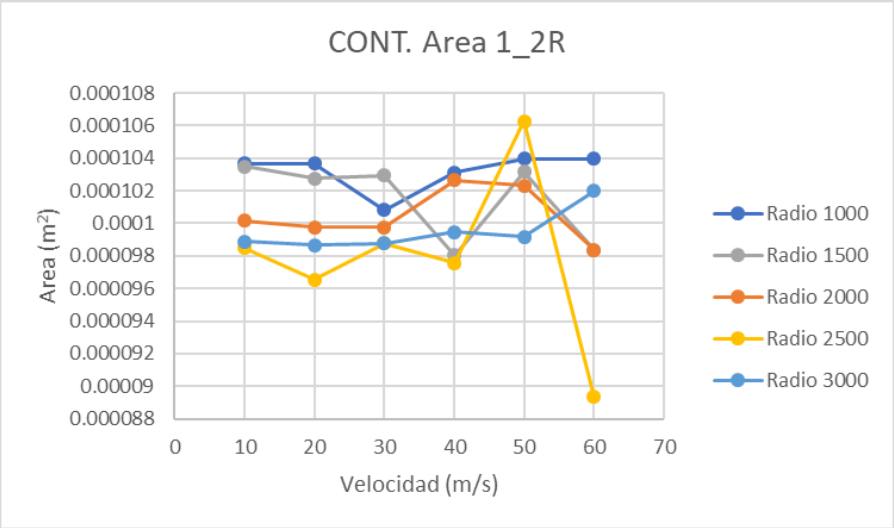
Tabla 16. Resultados para curva de radio 2500 metros.

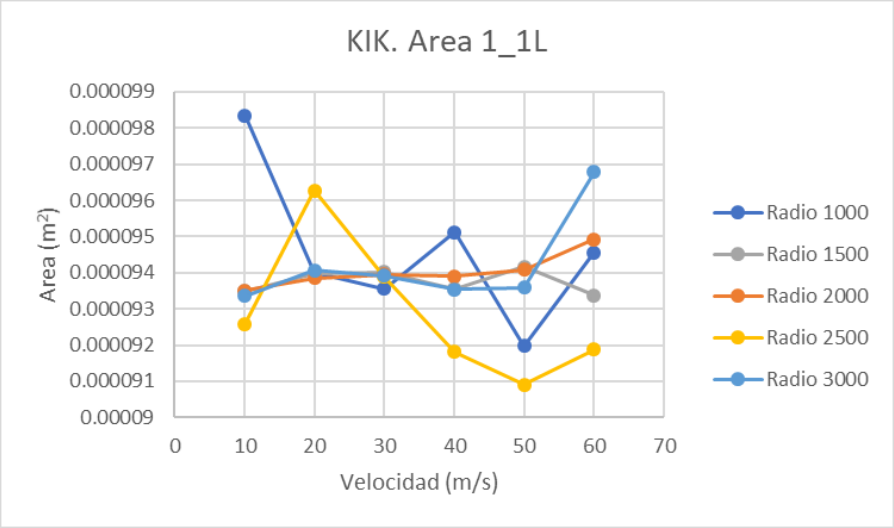
9.2. Graficas del anexo II

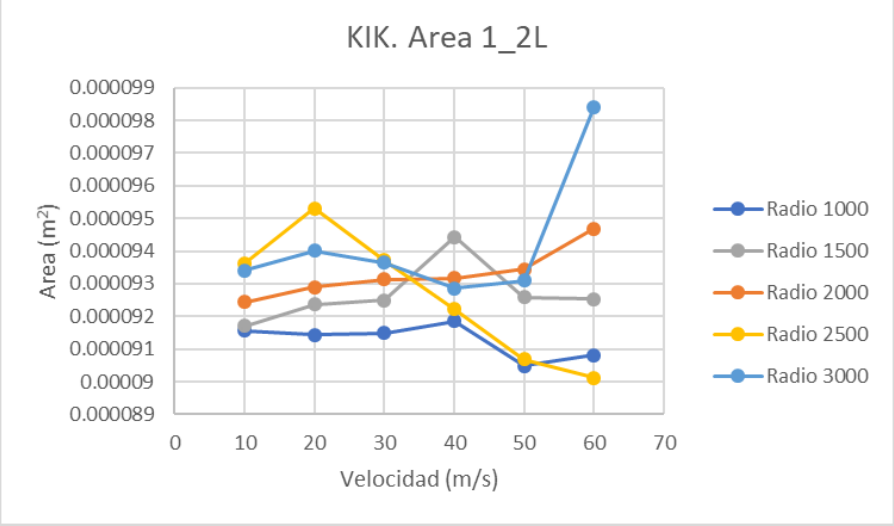

CONT. Area 1_1L
0.000102
0.0001
0.000098
0.000096
0.000094
0.000092
0.00009
0.000088
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

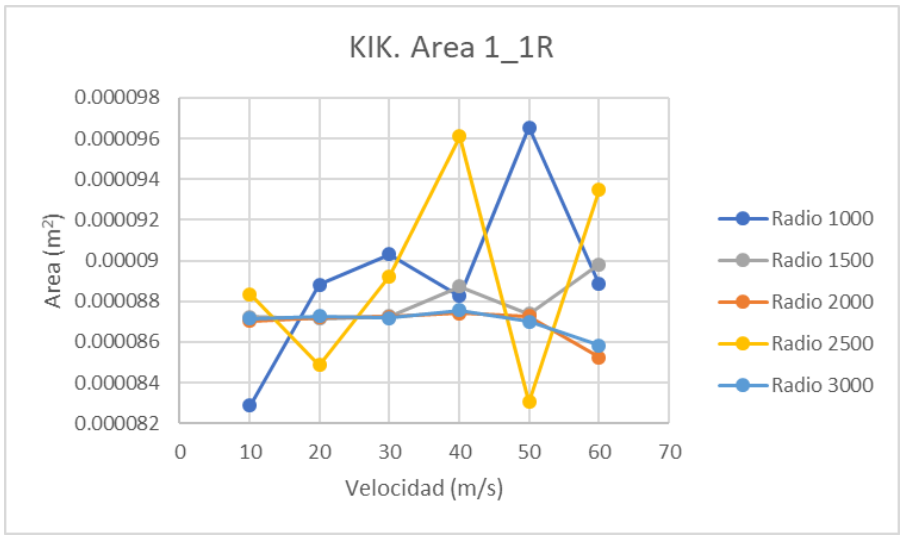

CONT. Area 1_2L
0.0001
0.000098
0.000096
0.000094
0.000092
0.00009
0.000088
0.000086
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

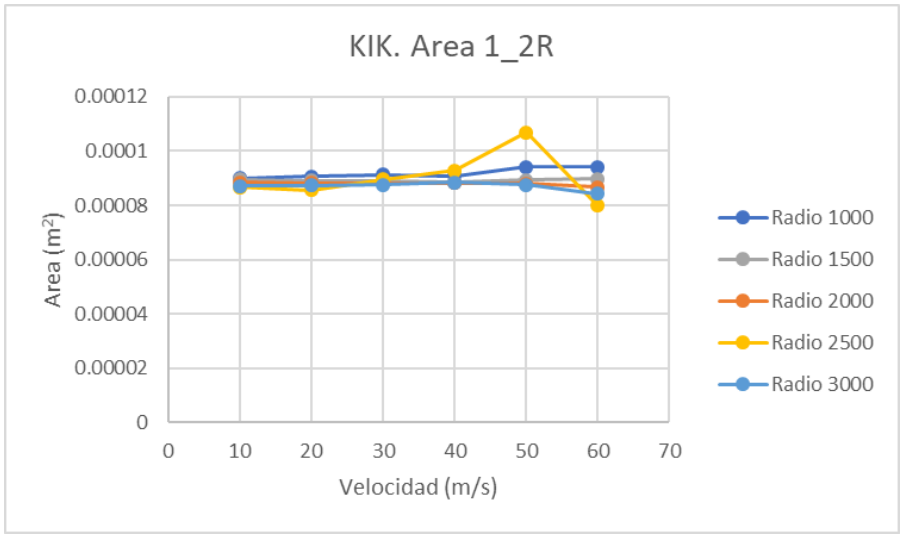

CONT. Area 1_1R
0.00012
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

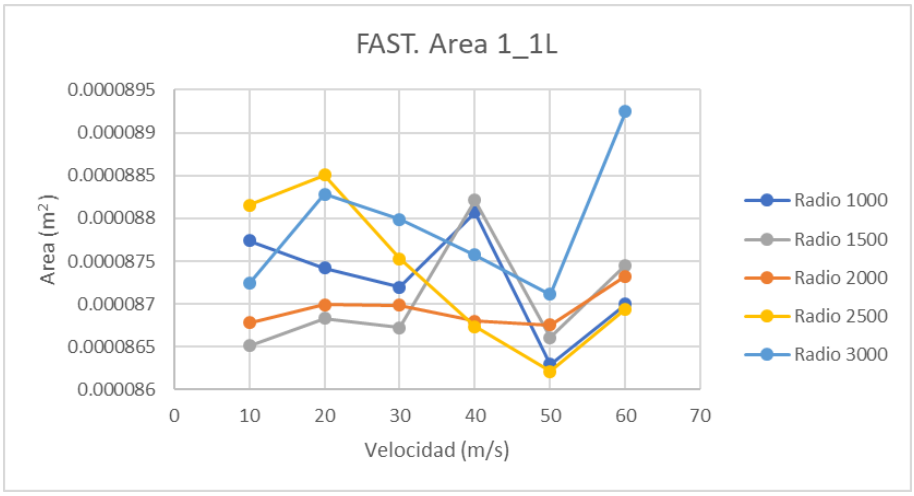

CONT. Area 1_2R
0.000108
0.000106
0.000104
0.000102
0.0001
0.000098
0.000096
0.000094
0.000092
0.00009
0.000088
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

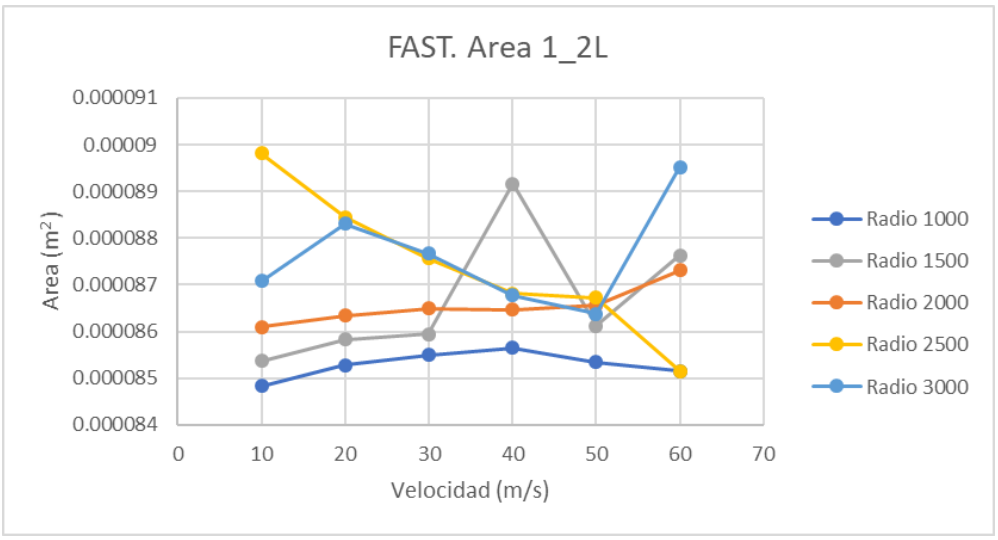

KIK. Area 1_1L
0.000099
0.000098
0.000097
0.000096
0.000095
0.000094
0.000093
0.000092
0.000091
0.00009
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

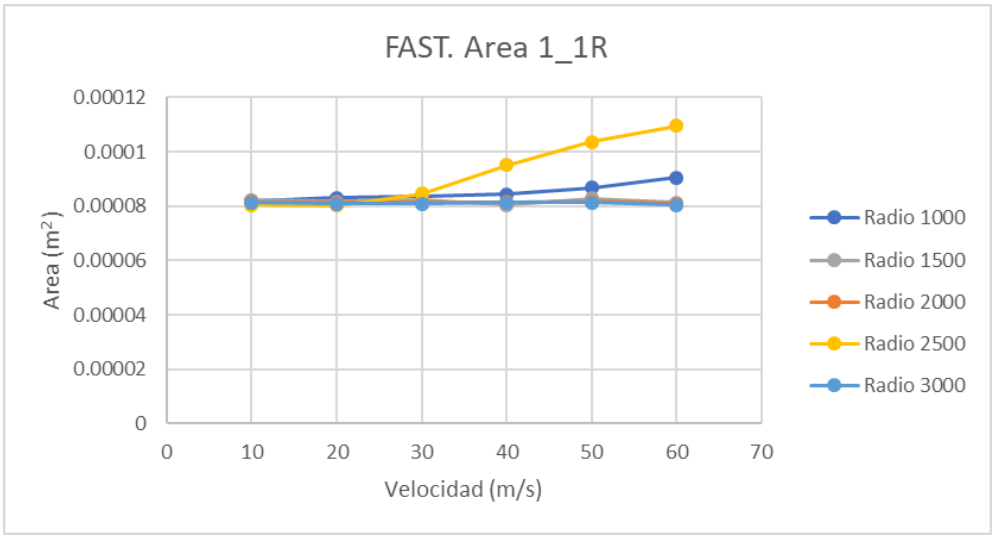

KIK. Area 1_2L
0.000099
0.000098
0.000097
0.000096
0.000095
0.000094
0.000093
0.000092
0.000091
0.00009
0.000089
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

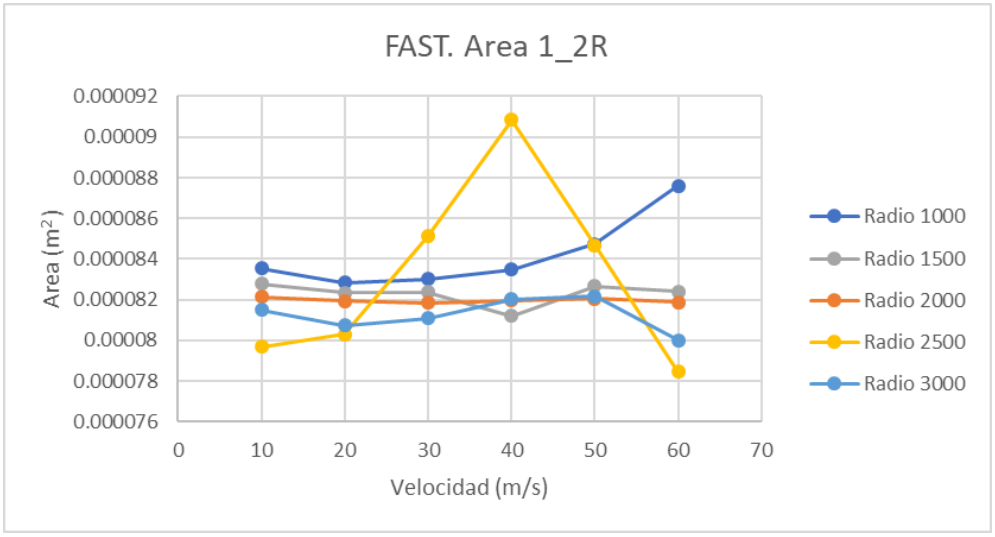

KIK. Area 1_1R
0.000098
0.000096
0.000094
0.000092
0.00009
0.000088
0.000086
0.000084
0.000082
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

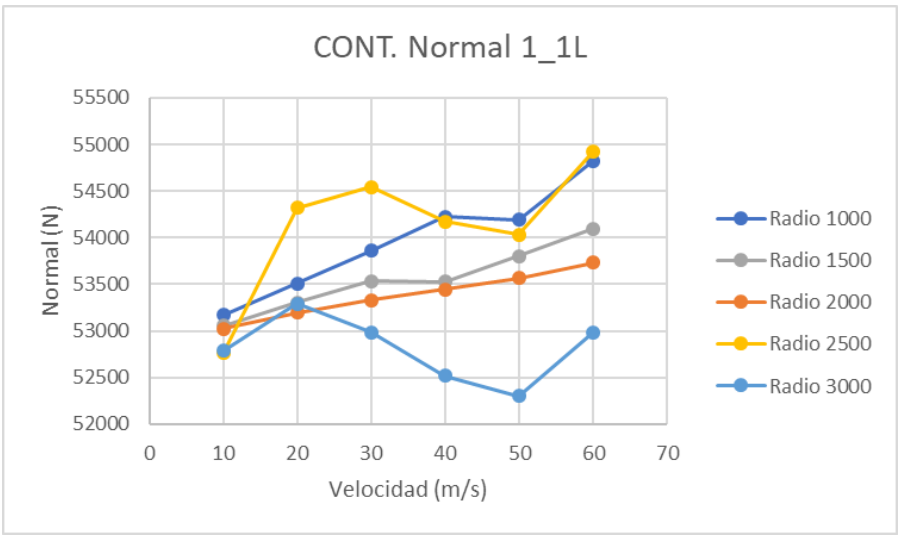

KIK. Area 1_2R
0.00012
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

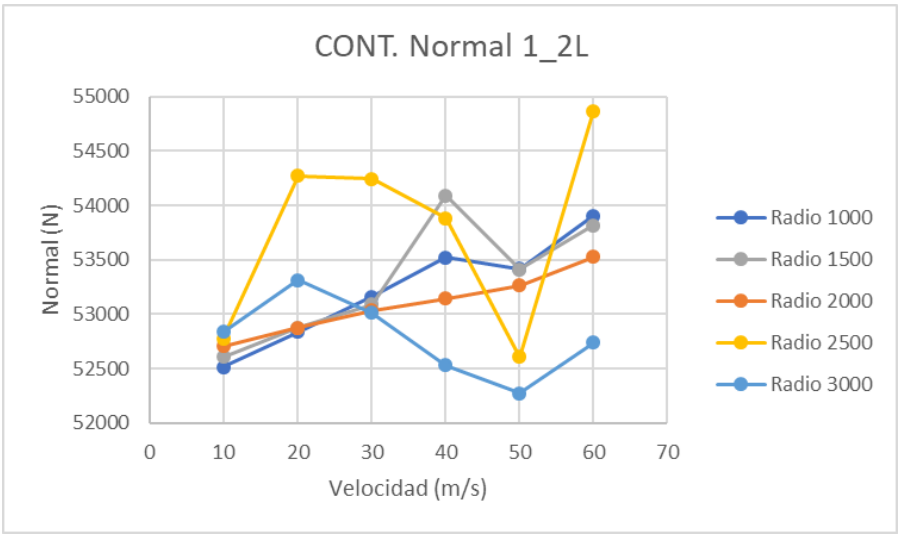

FAST. Area 1_1L
0.0000895
0.000089
0.0000885
0.000088
0.0000875
0.000087
0.0000865
0.000086
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

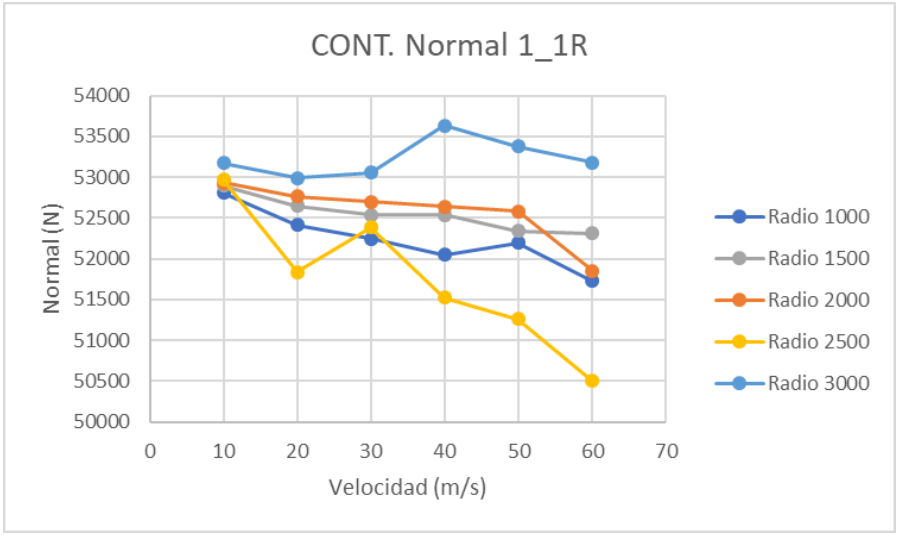

FAST. Area 1_2L
0.000091
0.00009
0.000089
0.000088
0.000087
0.000086
0.000085
0.000084
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

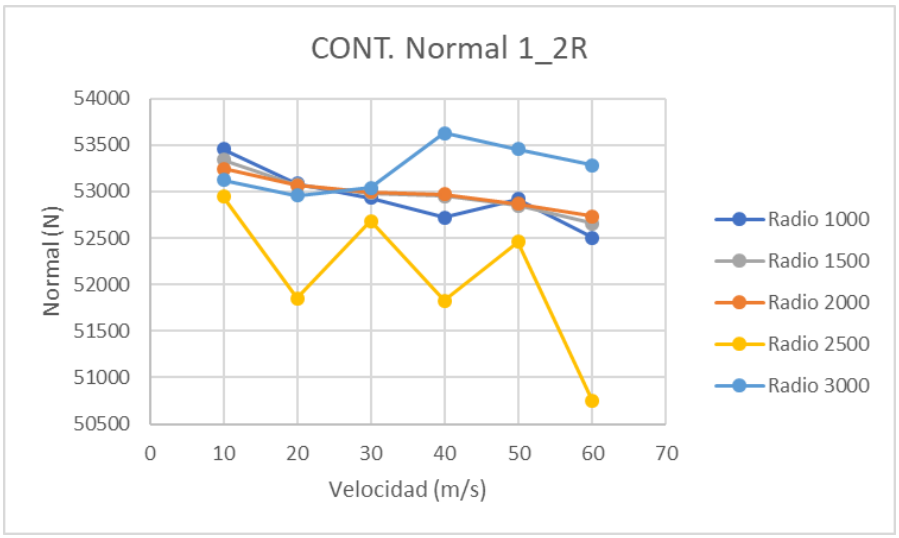

FAST. Area 1_1R
0.00012
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

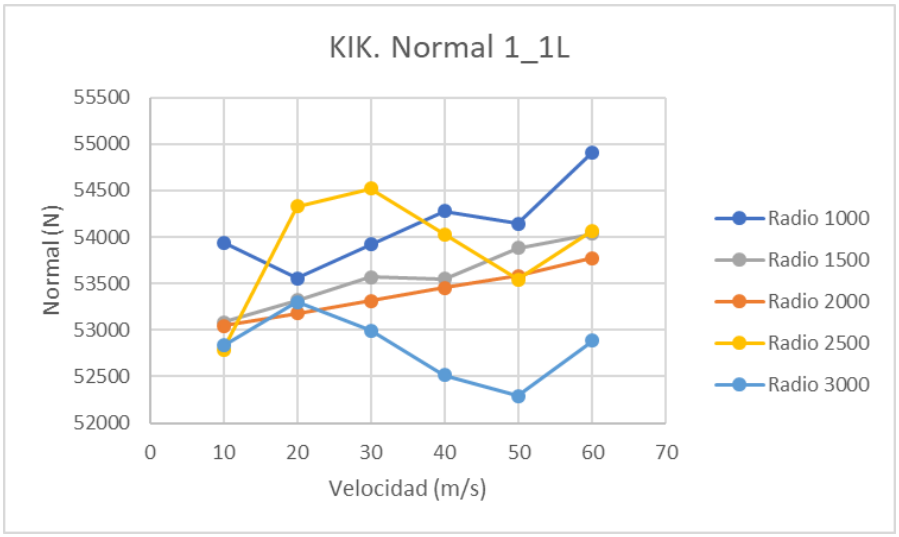

FAST. Area 1_2R
0.000092
0.00009
0.000088
0.000086
0.000084
0.000082
0.00008
0.000078
0.000076
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

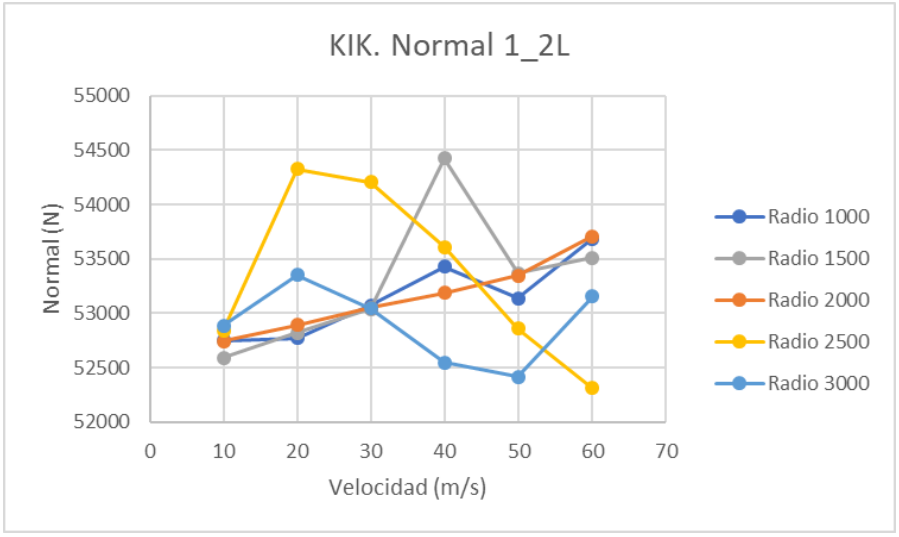

CONT. Normal 1_1L
Normal (N)
55500
55000
54500
54000
53500
53000
52500
52000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

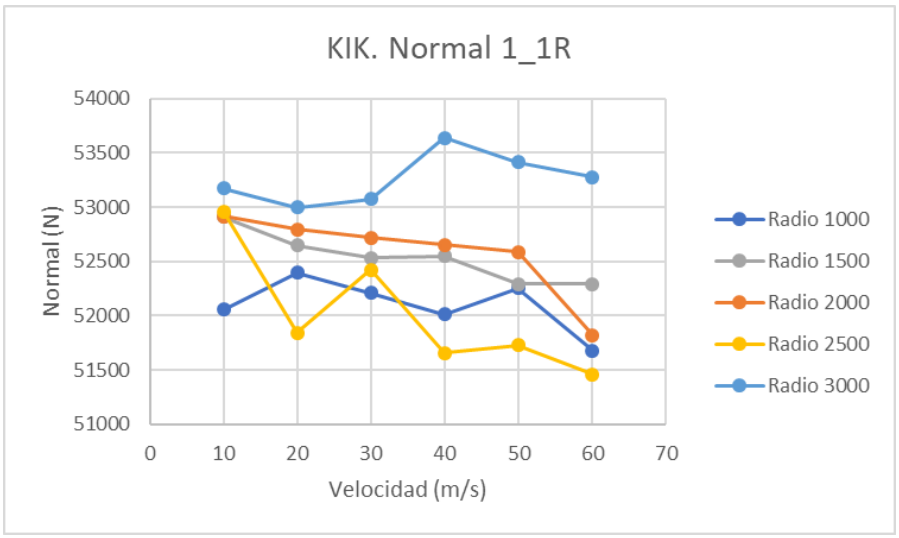

CONT. Normal 1_2L
Normal (N)
55000
54500
54000
53500
53000
52500
52000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

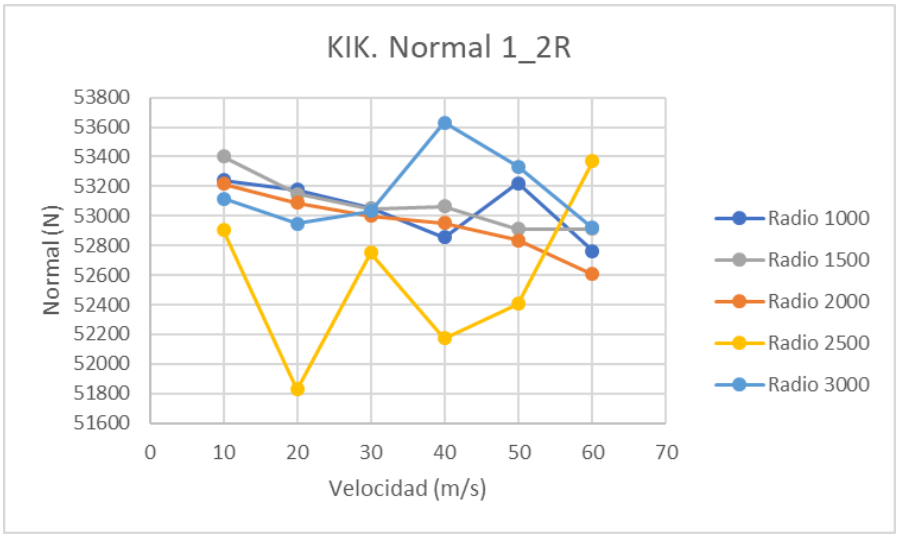

CONT. Normal 1_1R
Normal (N)
54000
53500
53000
52500
52000
51500
51000
50500
50000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

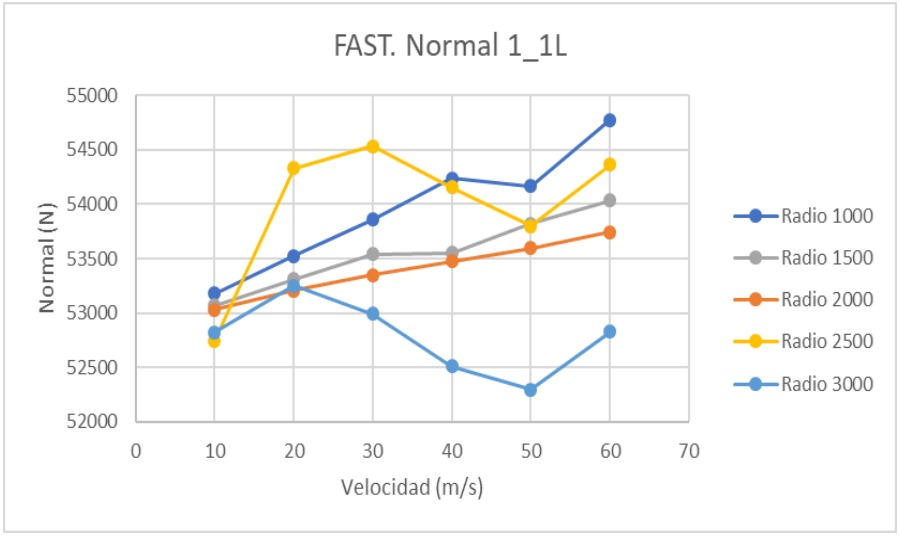

CONT. Normal 1_2R
Normal (N)
54000
53500
53000
52500
52000
51500
51000
50500
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

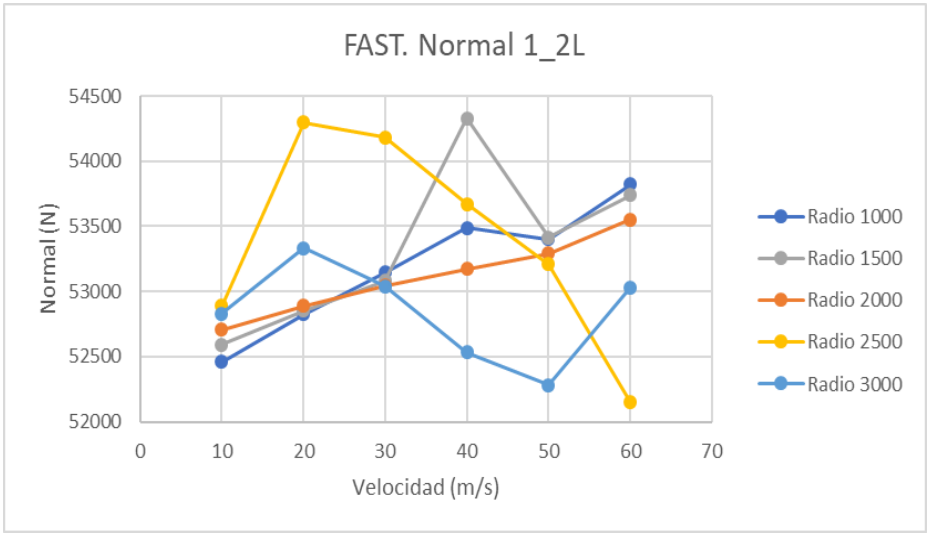

KIK. Normal 1_1L
Normal (N)
55500
55000
54500
54000
53500
53000
52500
52000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

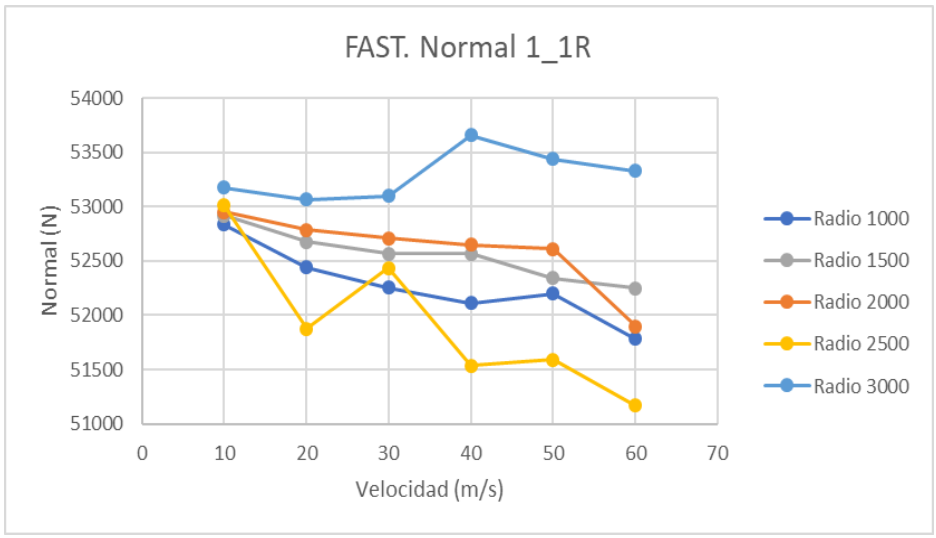

KIK. Normal 1_2L
Normal (N)
55000
54500
54000
53500
53000
52500
52000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

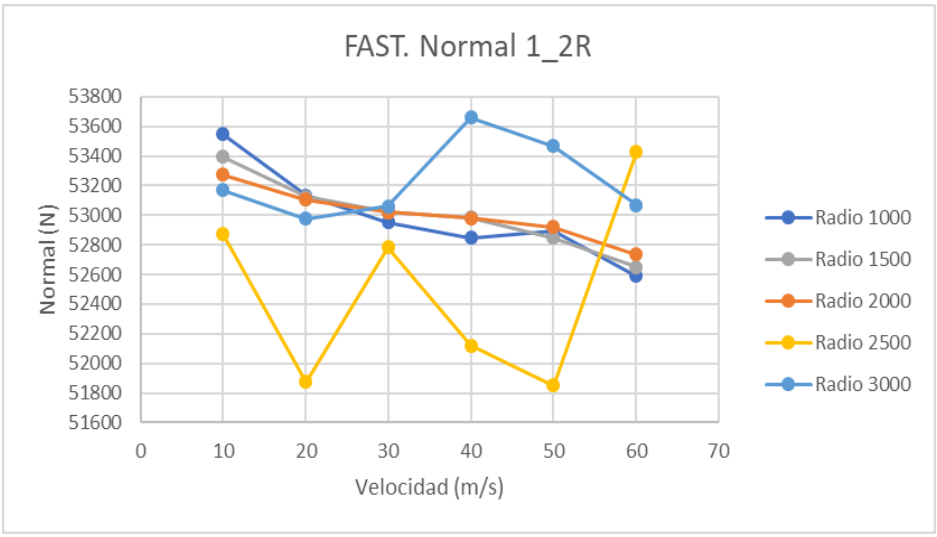

KIK. Normal 1_1R
Normal (N)
54000
53500
53000
52500
52000
51500
51000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

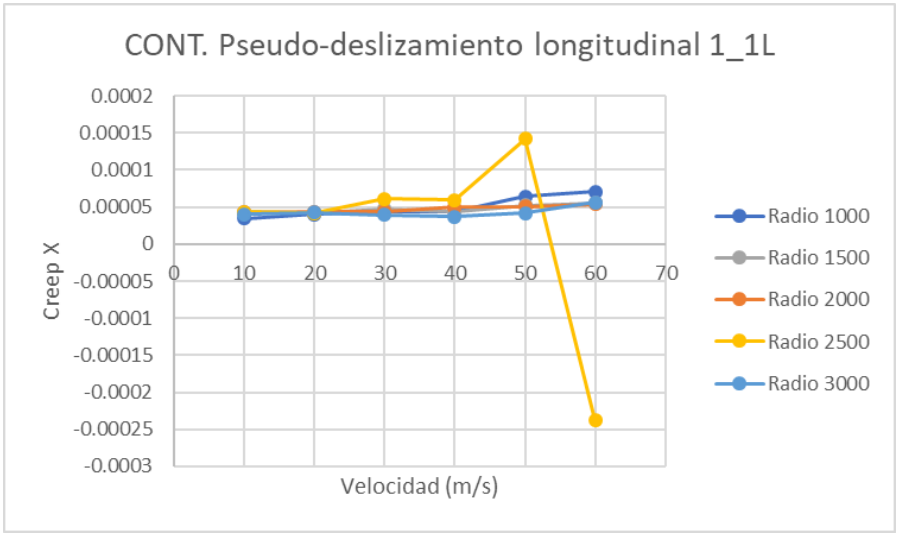

KIK. Normal 1_2R
Normal (N)
53800
53600
53400
53200
53000
52800
52600
52400
52200
52000
51800
51600
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

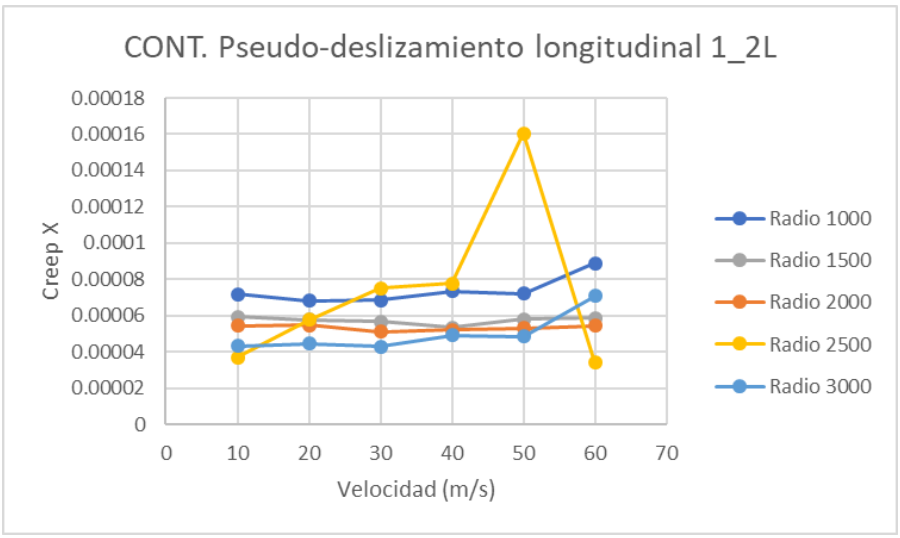

FAST. Normal 1_1L
Normal (N)
55000
54500
54000
53500
53000
52500
52000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

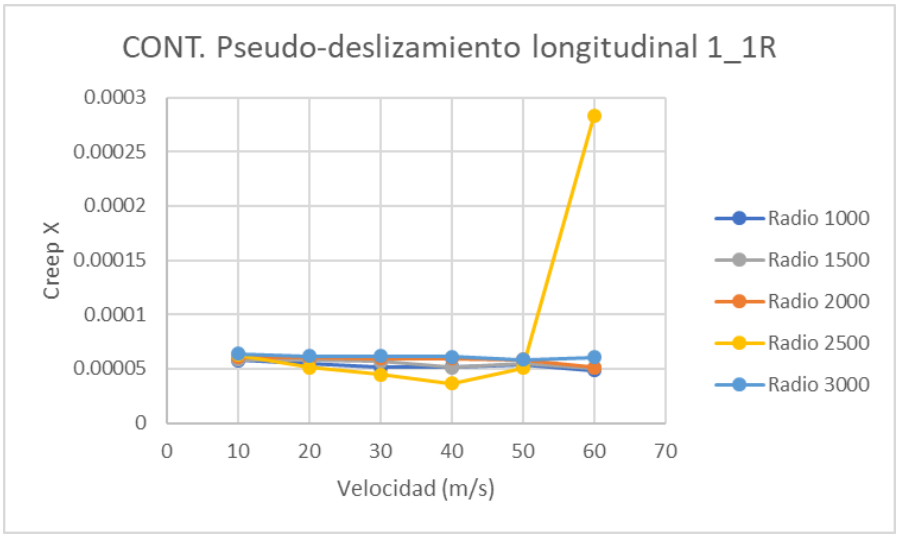

FAST. Normal 1_2L
Normal (N)
54500
54000
53500
53000
52500
52000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

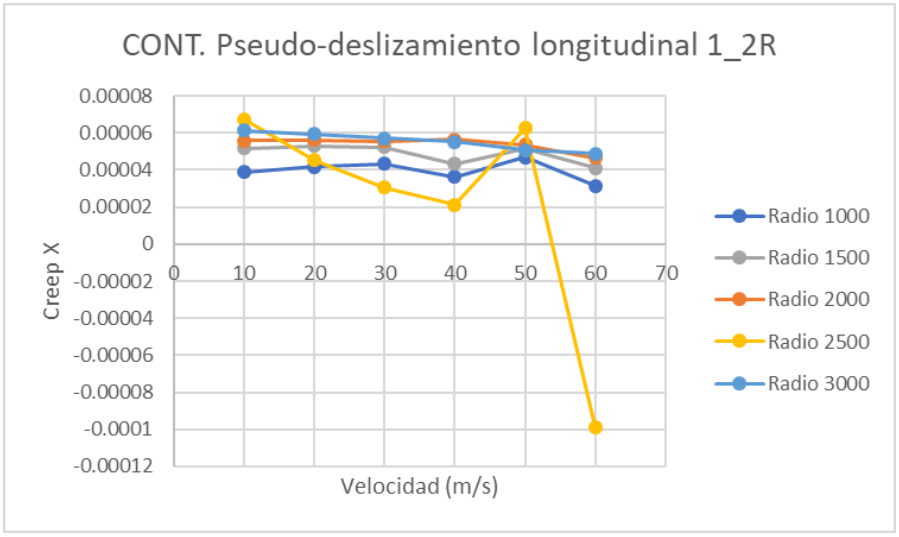

FAST. Normal 1_1R
Normal (N)
54000
53500
53000
52500
52000
51500
51000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

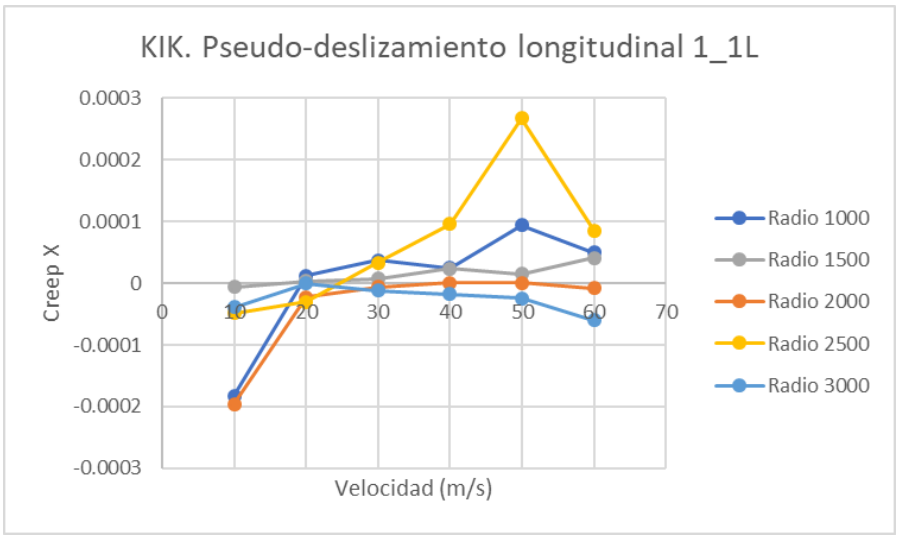

FAST. Normal 1_2R
Normal (N)
53800
53600
53400
53200
53000
52800
52600
52400
52200
52000
51800
51600
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

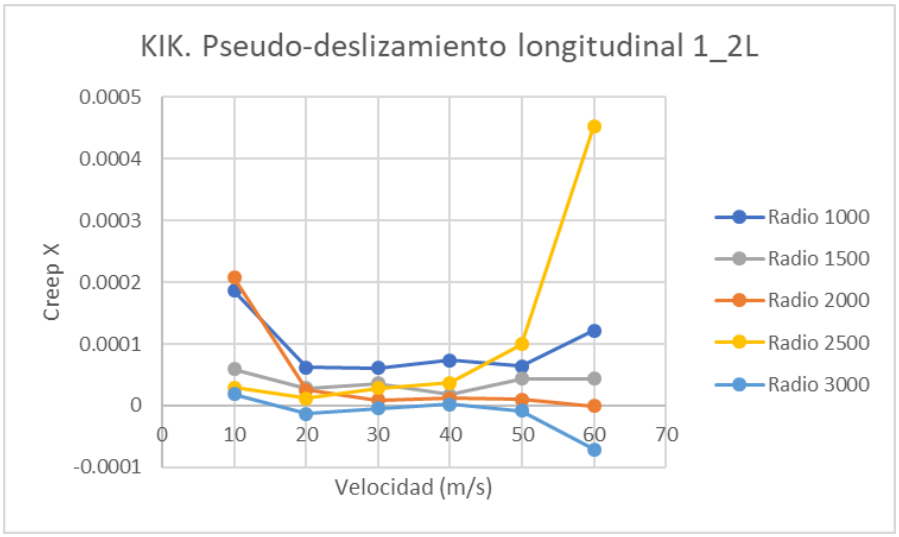

CONT. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1L
Creep X
0.0002
0.00015
0.0001
0.00005
0
-0.00005
-0.0001
-0.00015
-0.0002
-0.00025
-0.0003
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

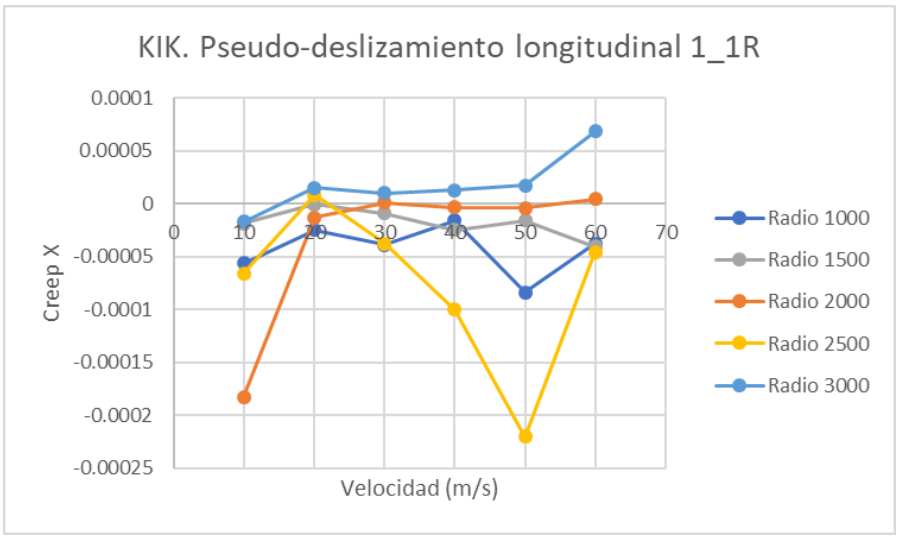

CONT. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_2L
Creep X
0.00018
0.00016
0.00014
0.00012
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

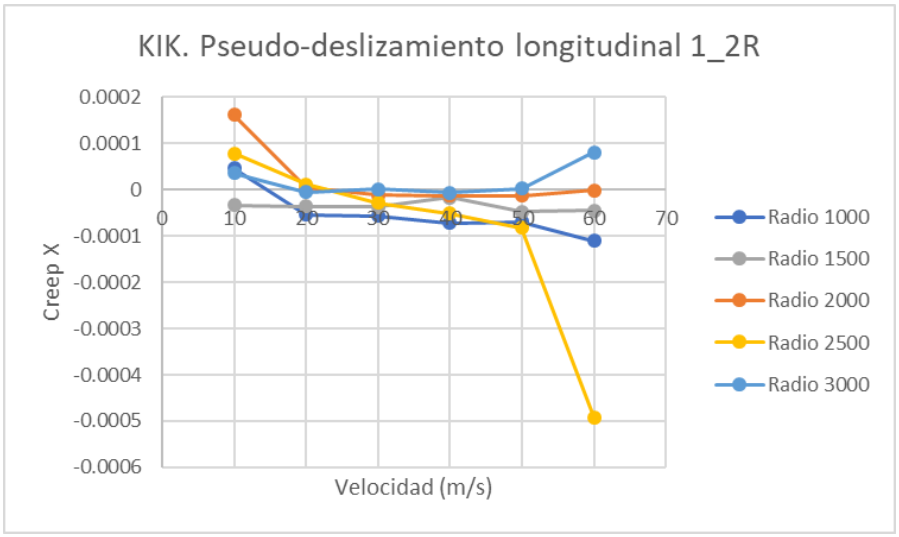

CONT. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1R
Creep X
0.0003
0.00025
0.0002
0.00015
0.0001
0.00005
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

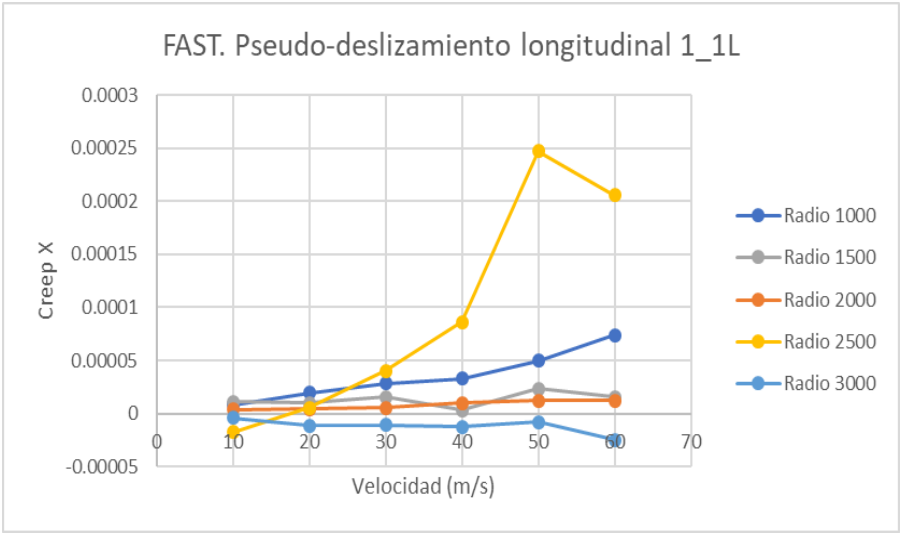

CONT. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_2R
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
-0.00002
-0.00004
-0.00006
-0.00008
-0.0001
-0.00012
Creep X
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

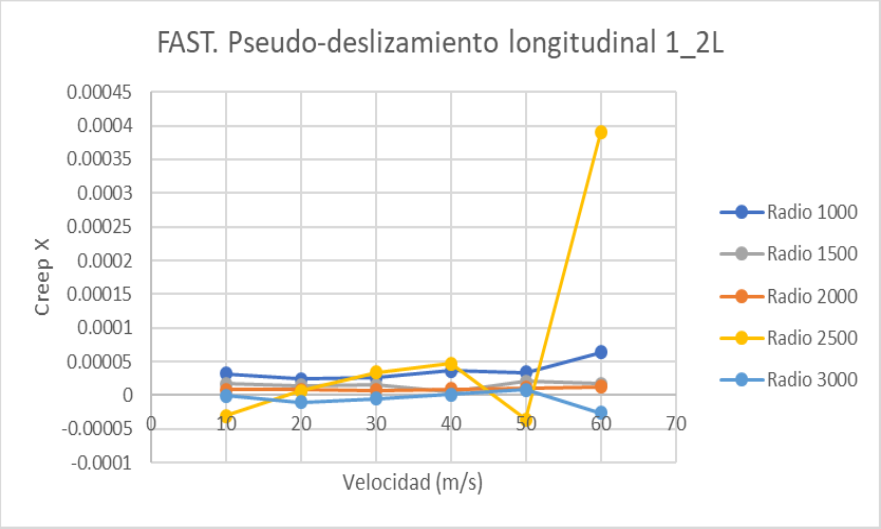

KIK. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1L
0.0003
0.0002
0.0001
0
-0.0001
-0.0002
-0.0003
Creep X
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

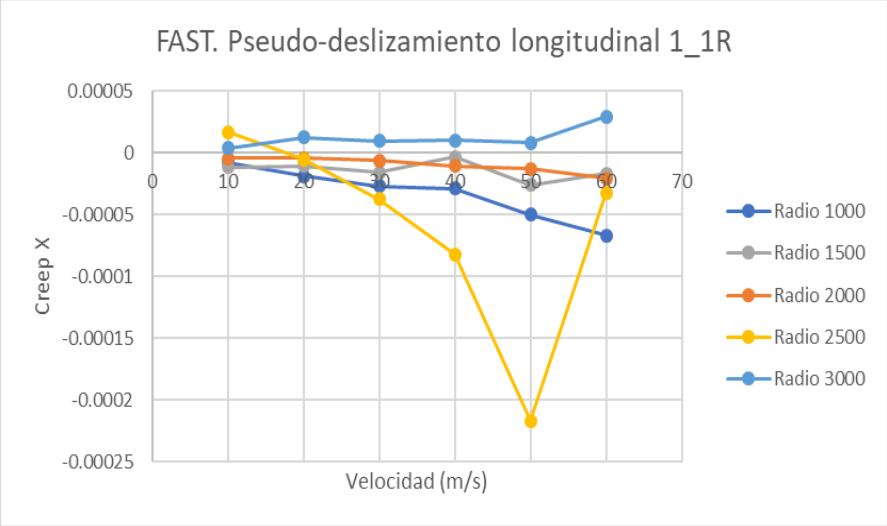

KIK. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_2L
0.0005
0.0004
0.0003
0.0002
0.0001
0
-0.0001
Creep X
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

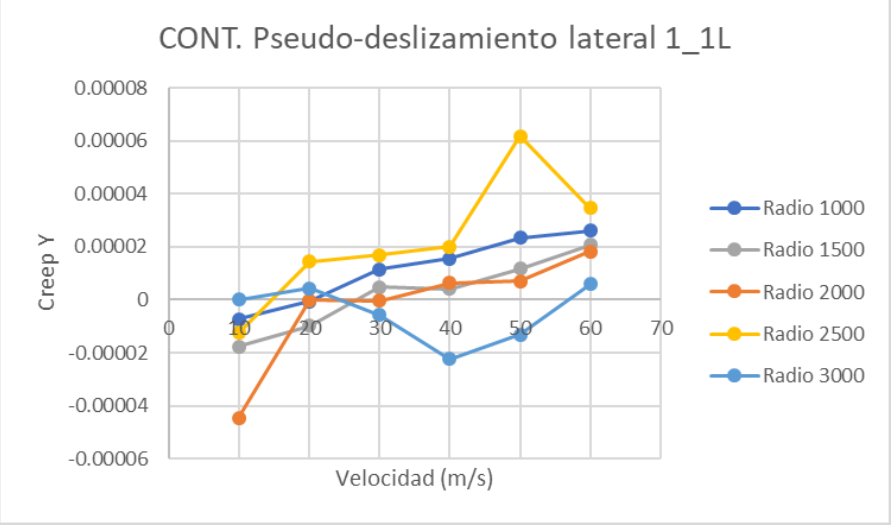

KIK. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1R
0.0001
0.00005
0
-0.00005
-0.0001
-0.00015
-0.0002
-0.00025
Creep X
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

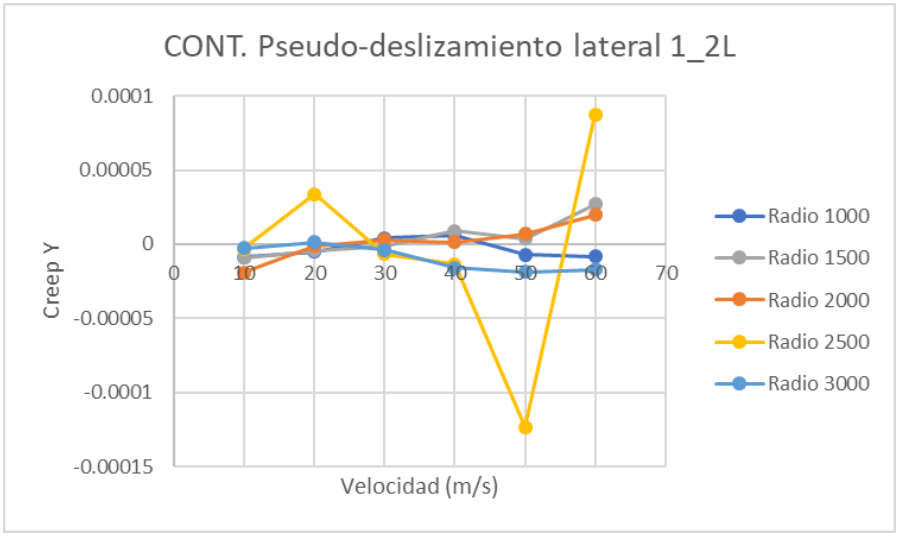

KIK. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_2R
0.0002
0.0001
0
-0.0001
-0.0002
-0.0003
-0.0004
-0.0005
-0.0006
Creep X
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

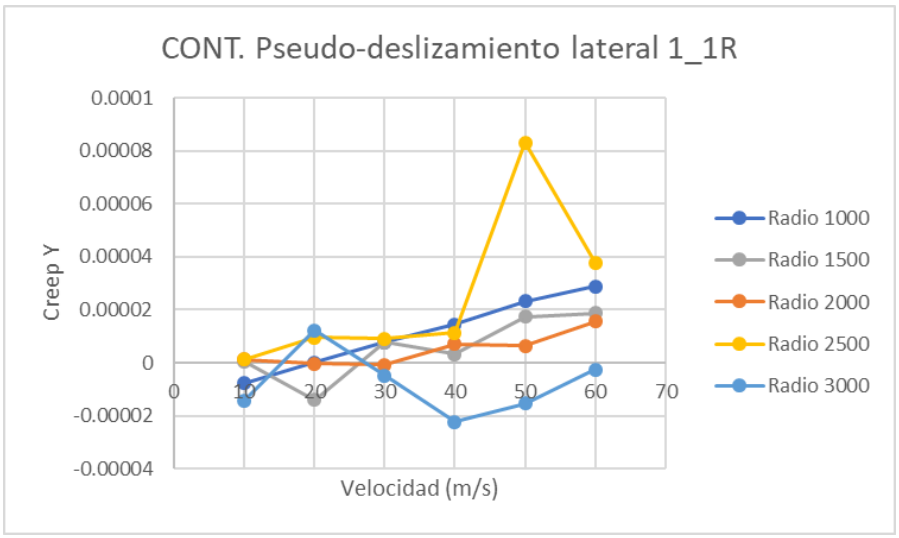

FAST. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1L
0.0003
0.00025
0.0002
0.00015
0.0001
0.00005
0
-0.00005
Creep X
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

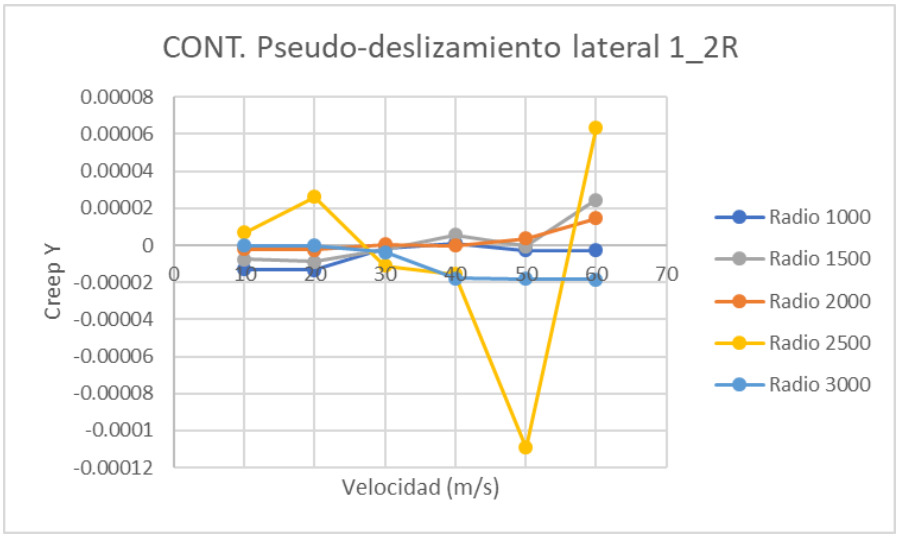

FAST. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_2L
Creep X
0.00045
0.0004
0.00035
0.0003
0.00025
0.0002
0.00015
0.0001
0.00005
0
-0.00005
-0.0001
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

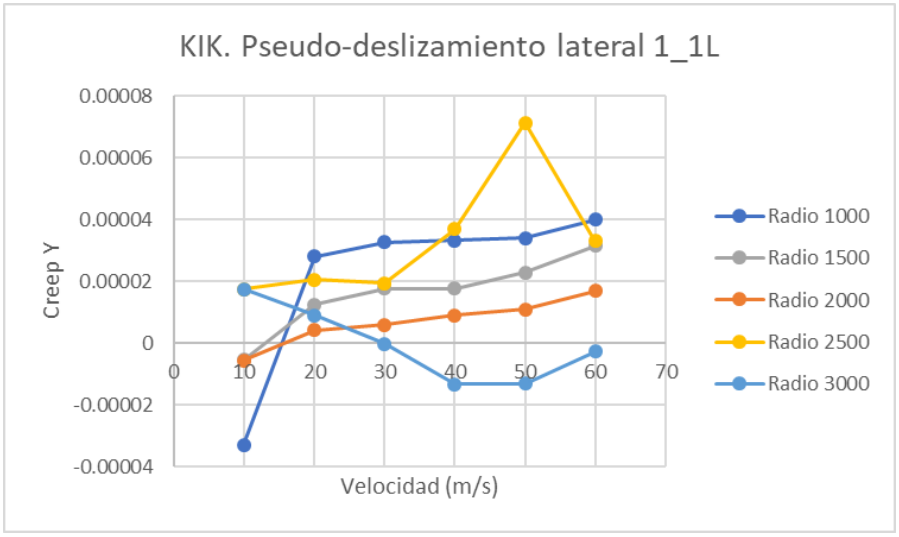

FAST. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1R
Creep X
0.00005
0
-0.00005
-0.0001
-0.00015
-0.0002
-0.00025
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

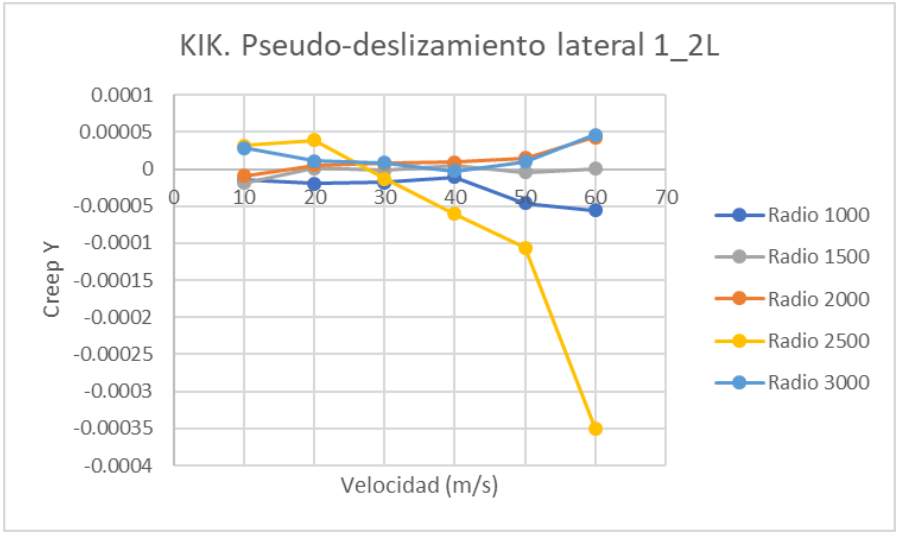

CONT. Pseudo-deslizamiento lateral 1_1L
Creep Y
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
-0.00002
-0.00004
-0.00006
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

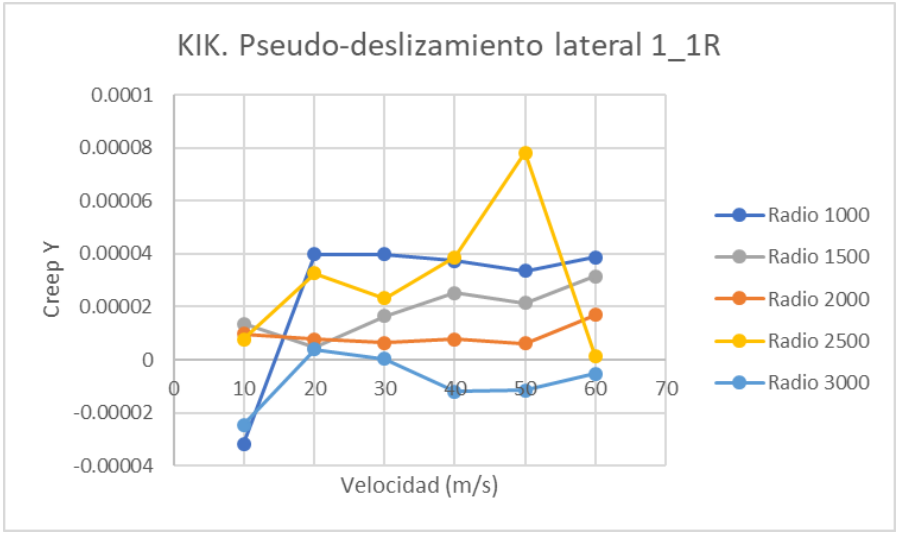

CONT. Pseudo-deslizamiento lateral 1_2L
0.0001
0.00005
0
-0.00005
-0.0001
-0.00015
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

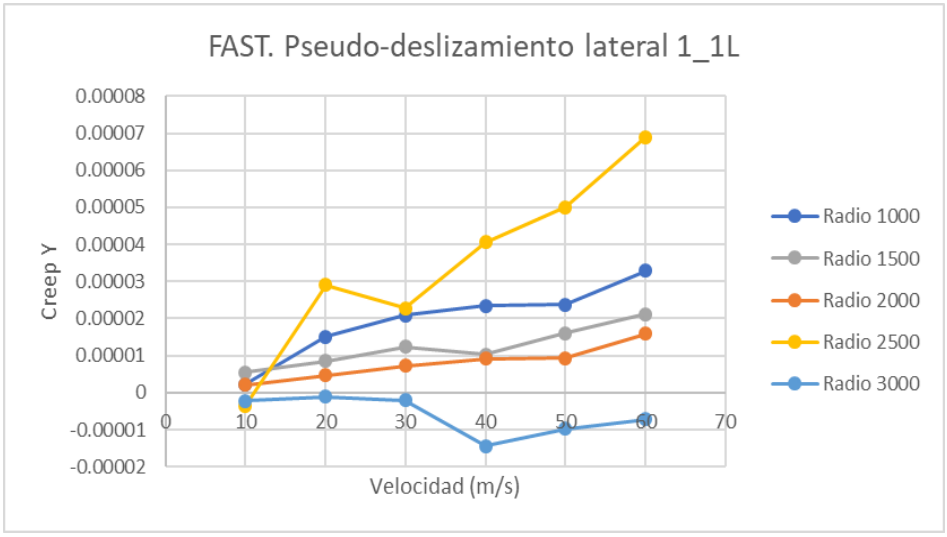

CONT. Pseudo-deslizamiento lateral 1_1R
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
-0.00002
-0.00004
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

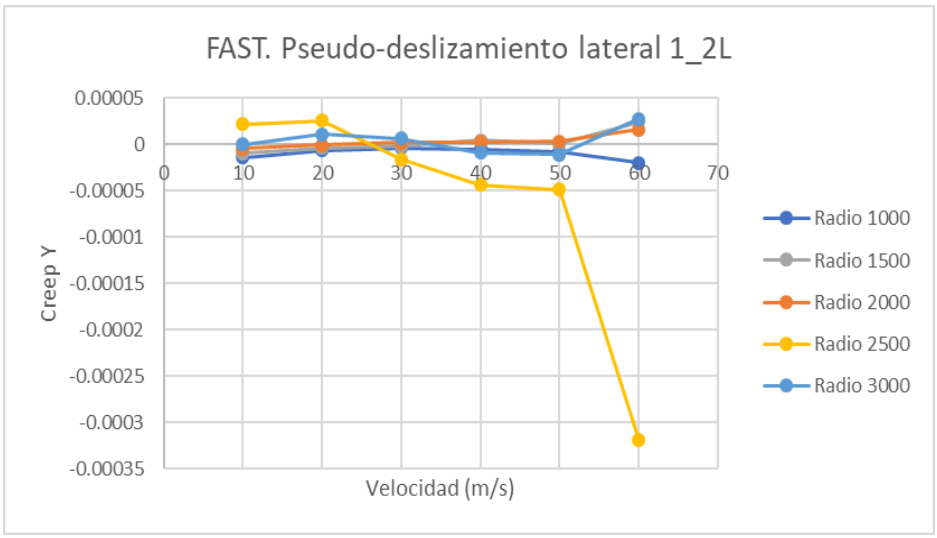

CONT. Pseudo-deslizamiento lateral 1_2R
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
-0.00002
-0.00004
-0.00006
-0.00008
-0.0001
-0.00012
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

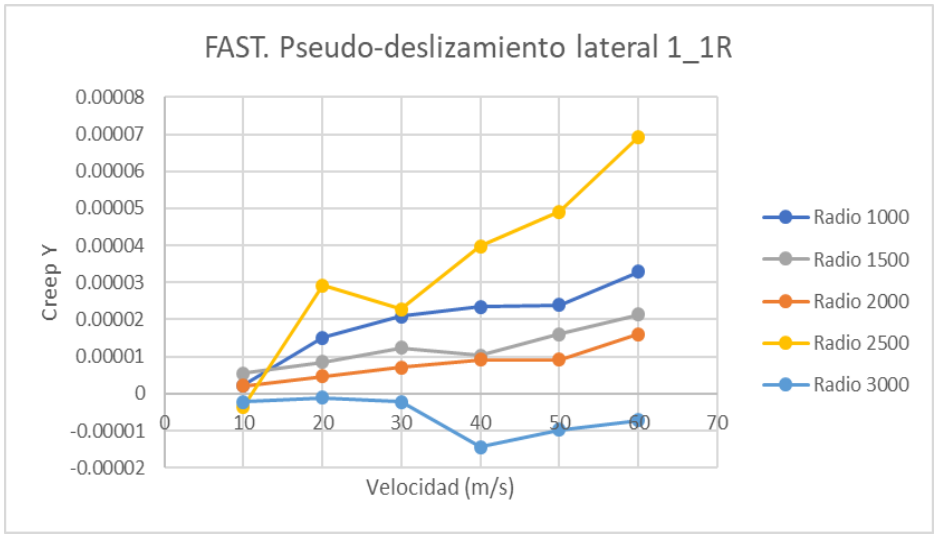

KIK. Pseudo-deslizamiento lateral 1_1L
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
-0.00002
-0.00004
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

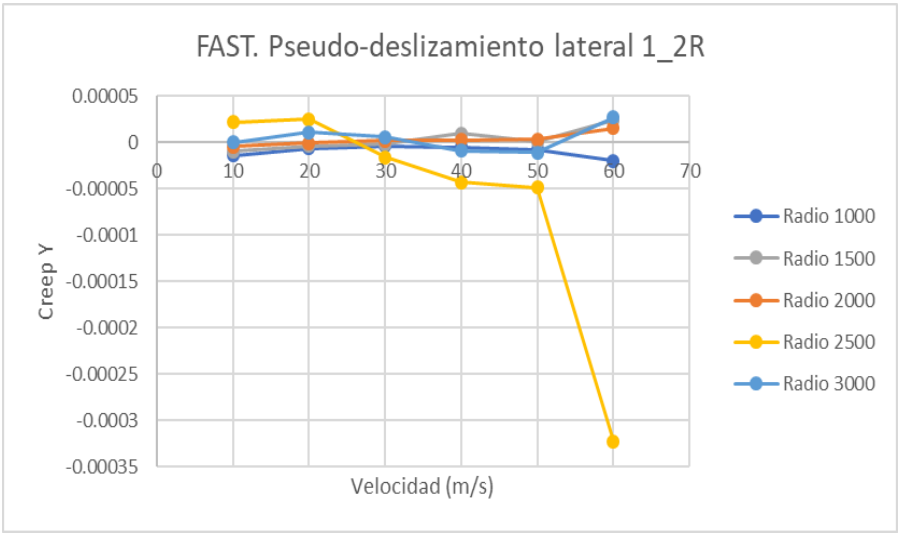

KIK. Pseudo-deslizamiento lateral 1_2L
0.0001
0.00005
0
-0.00005
-0.0001
-0.00015
-0.0002
-0.00025
-0.0003
-0.00035
-0.0004
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

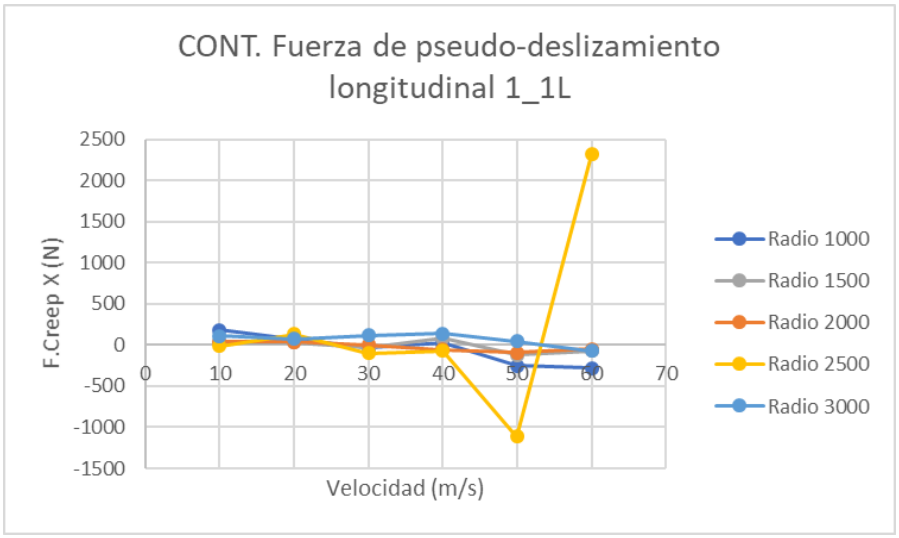

KIK. Pseudo-deslizamiento lateral 1_1R
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
-0.00002
-0.00004
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

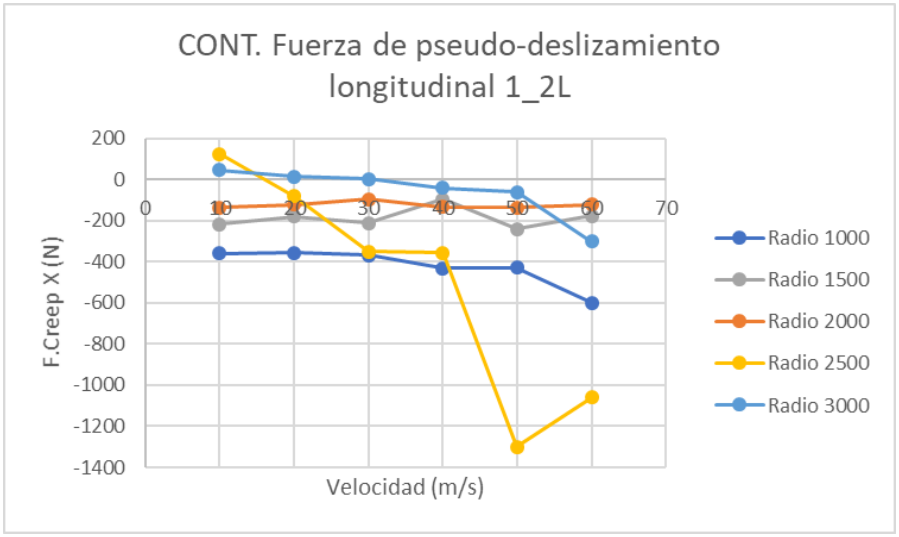

FAST. Pseudo-deslizamiento lateral 1_1L
Creep Y
0.00008
0.00007
0.00006
0.00005
0.00004
0.00003
0.00002
0.00001
0
-0.00001
-0.00002
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

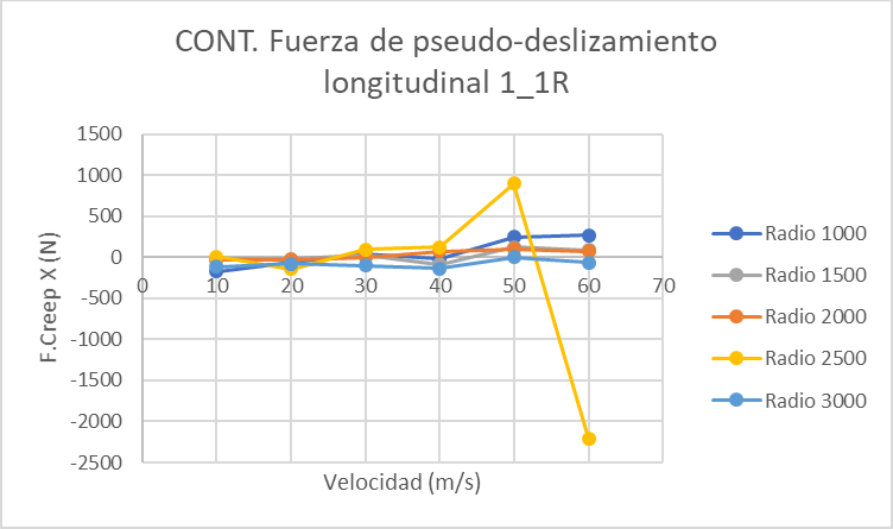

FAST. Pseudo-deslizamiento lateral 1_2L
Creep Y
0.00005
0
-0.00005
-0.0001
-0.00015
-0.0002
-0.00025
-0.0003
-0.00035
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

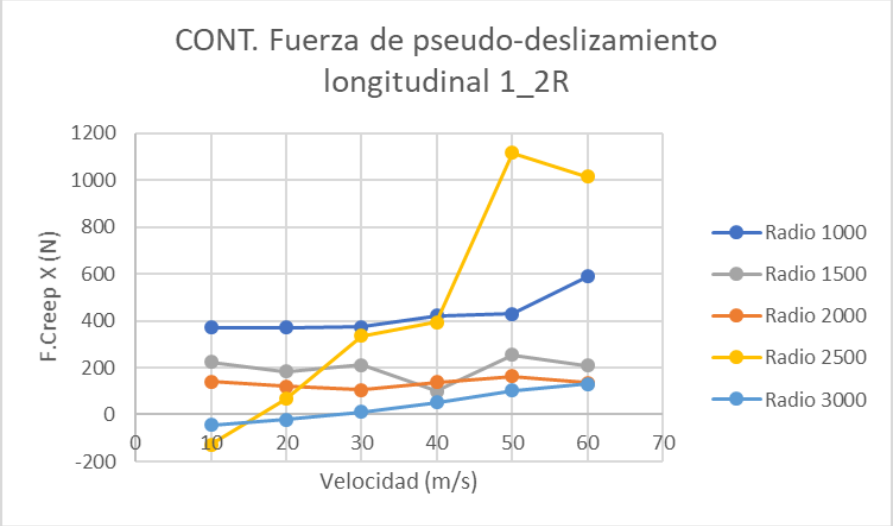

FAST. Pseudo-deslizamiento lateral 1_1R
Creep Y
0.00008
0.00007
0.00006
0.00005
0.00004
0.00003
0.00002
0.00001
0
-0.00001
-0.00002
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

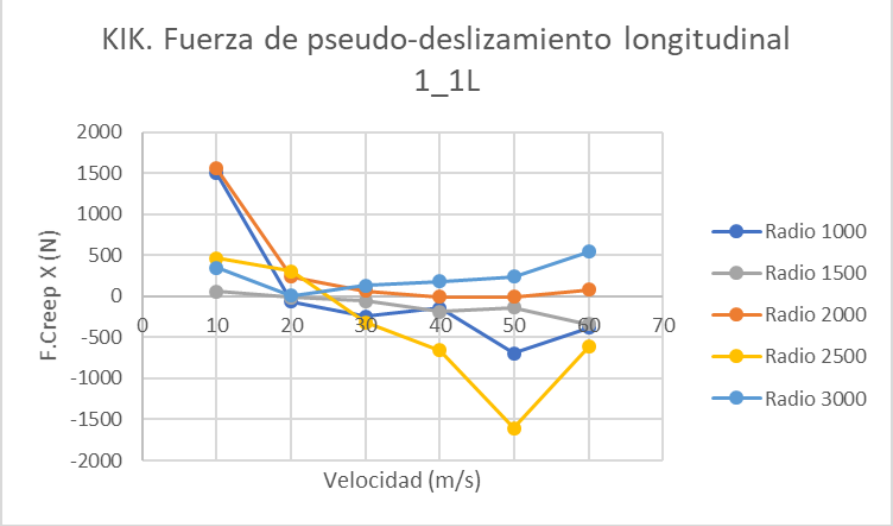

FAST. Pseudo-deslizamiento lateral 1_2R
0.00005
0
-0.00005
-0.0001
-0.00015
-0.0002
-0.00025
-0.0003
-0.00035
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

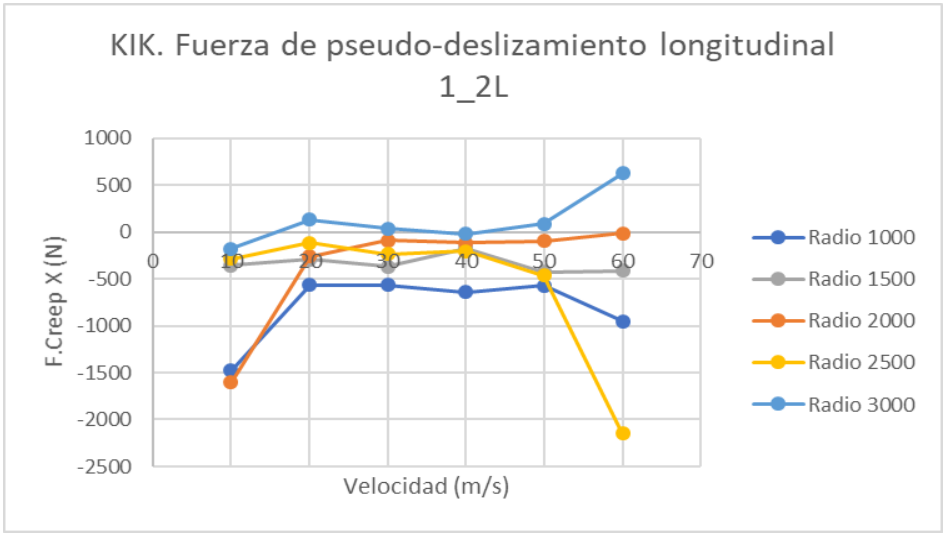

CONT. Fuerza de pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1L
2500
2000
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
F.Creep X (N)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

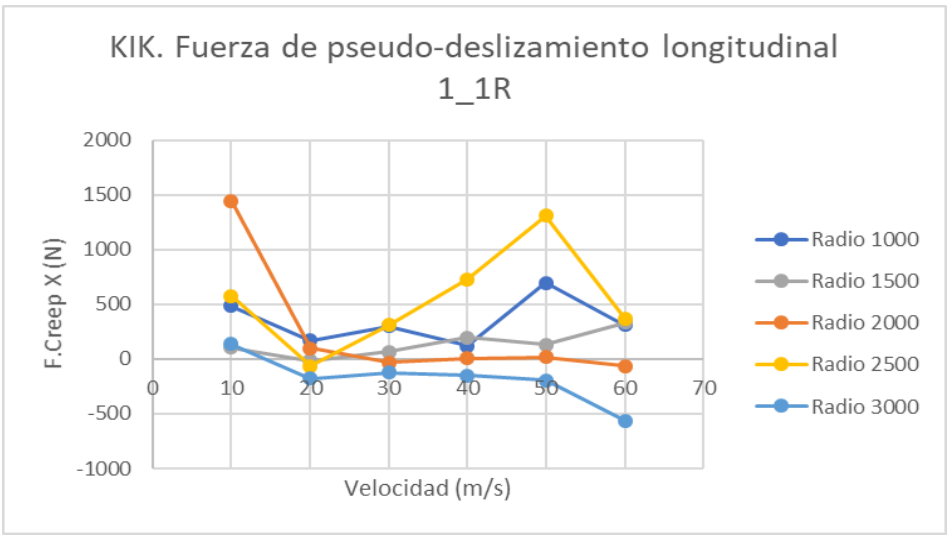

CONT. Fuerza de pseudo-deslizamiento longitudinal 1_2L
200
0
-200
-400
-600
-800
-1000
-1200
-1400
F.Creep X (N)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

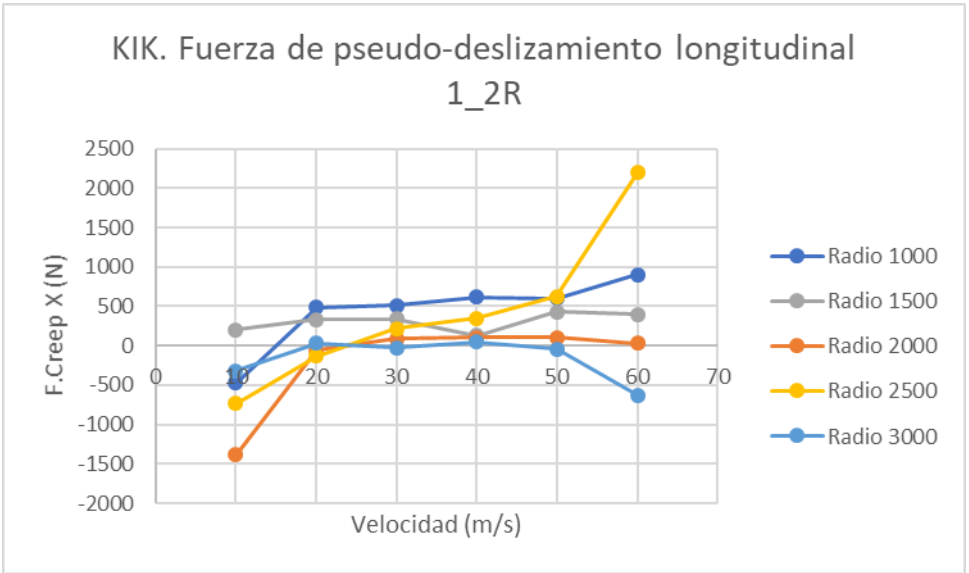

CONT. Fuerza de pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1R
F.Creep X (N)
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

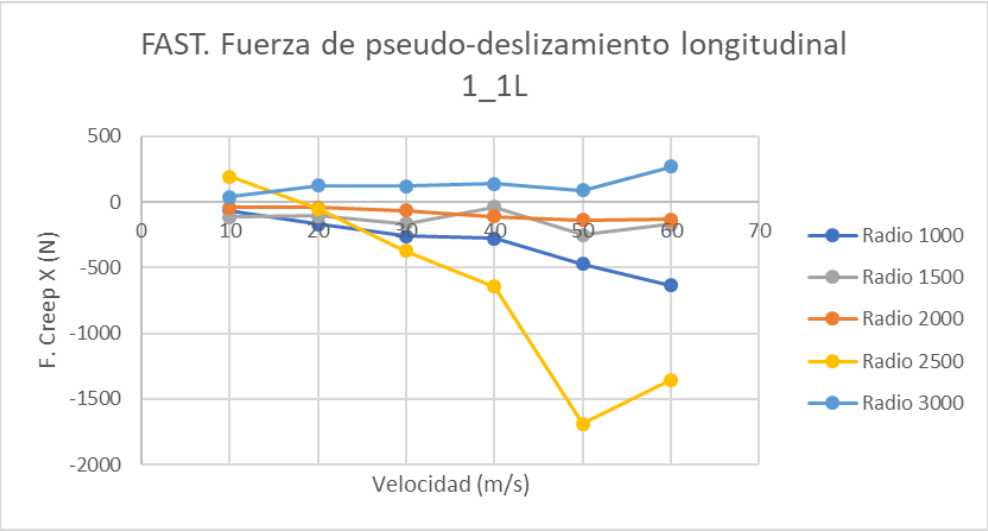

CONT. Fuerza de pseudo-deslizamiento longitudinal 1_2R
F.Creep X (N)
1200
1000
800
600
400
200
0
-200
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

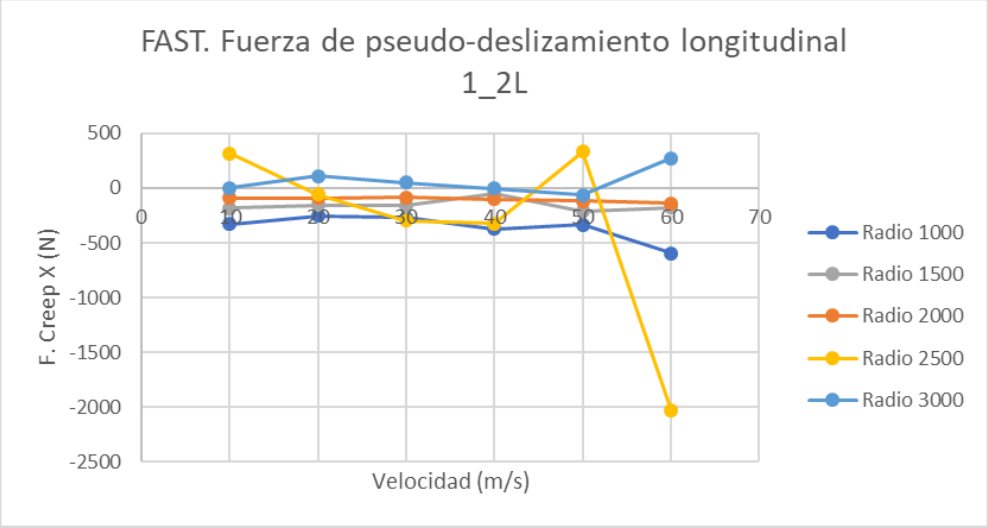

KIK. Fuerza de pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1L
F.Creep X (N)
2000
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-2000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

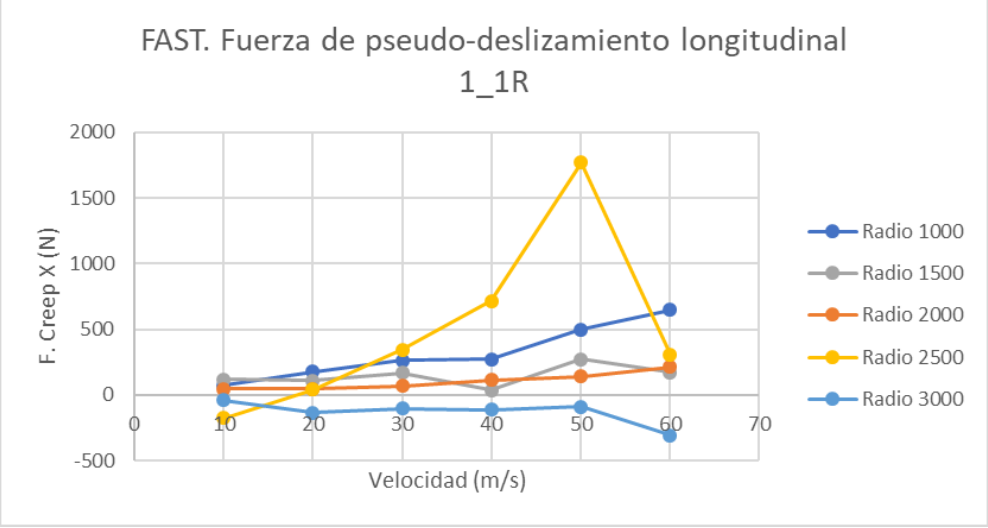

KIK. Fuerza de pseudo-deslizamiento longitudinal
1_2L
F.Creep X (N)
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

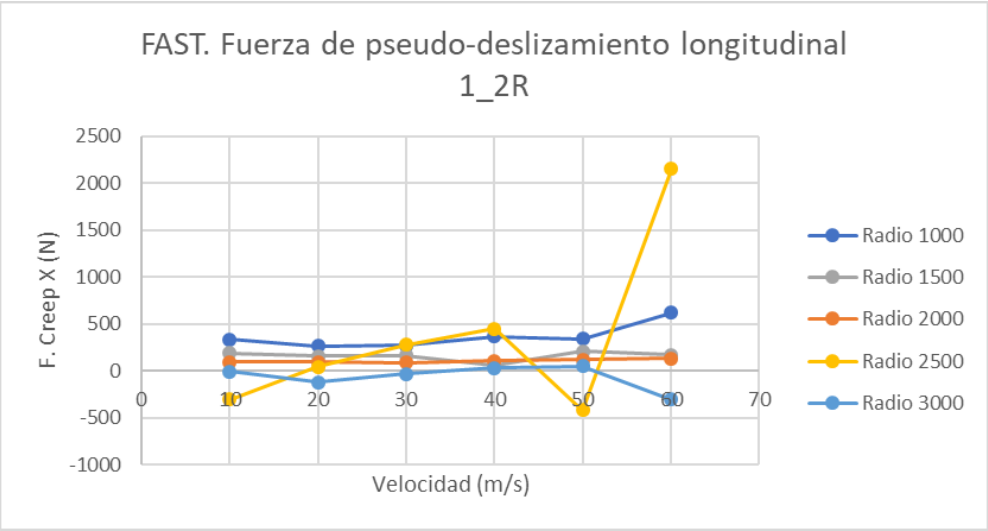

KIK. Fuerza de pseudo-deslizamiento longitudinal
1_1R
F.Creep X (N)
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

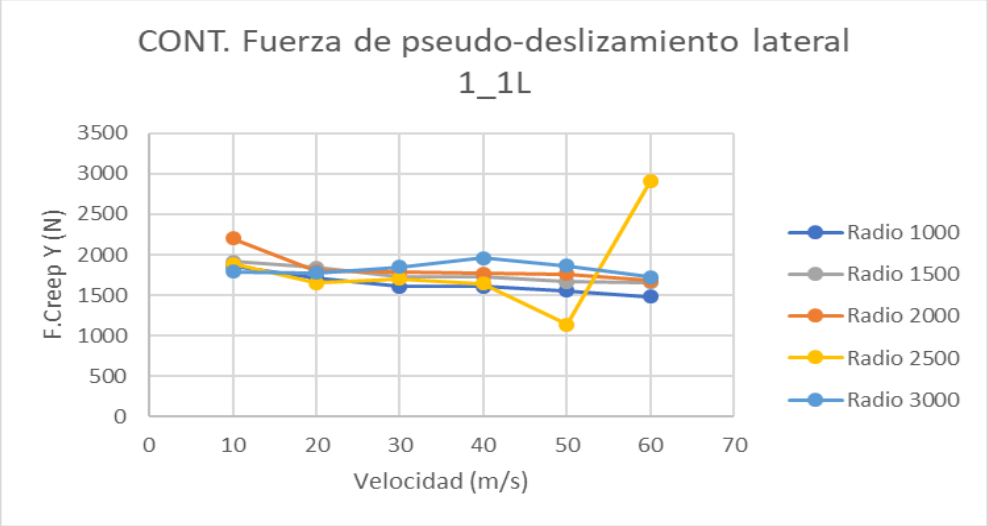

KIK. Fuerza de pseudo-deslizamiento longitudinal
1_2R
F.Creep X (N)
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

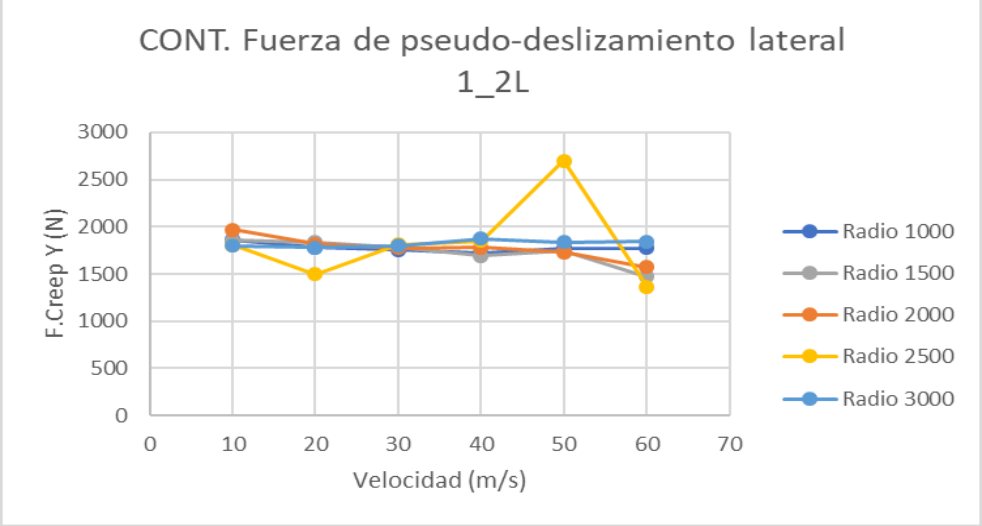

FAST. Fuerza de pseudo-deslizamiento longitudinal
1_1L
F. Creep X (N)
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

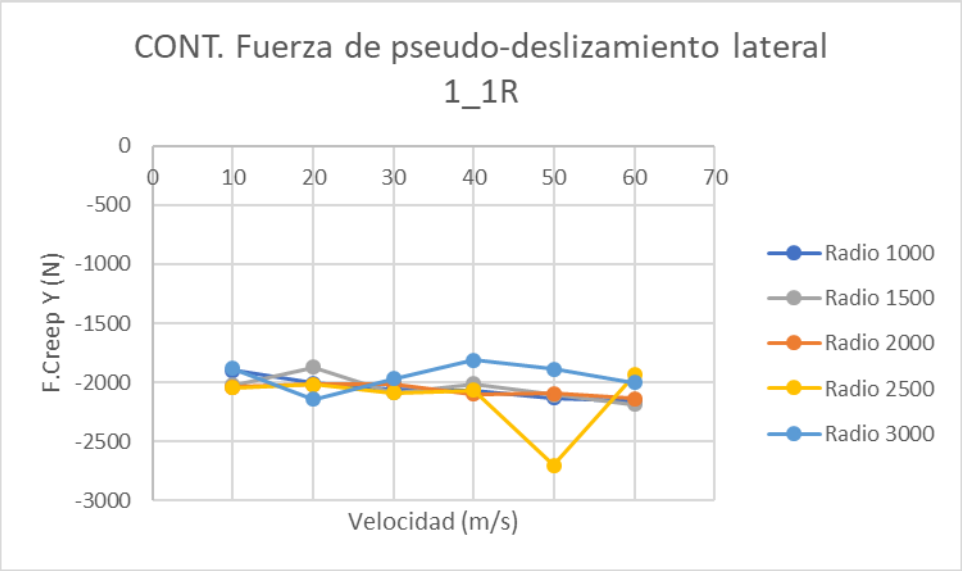

FAST. Fuerza de pseudo-deslizamiento longitudinal
1_2L
F. Creep X (N)
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

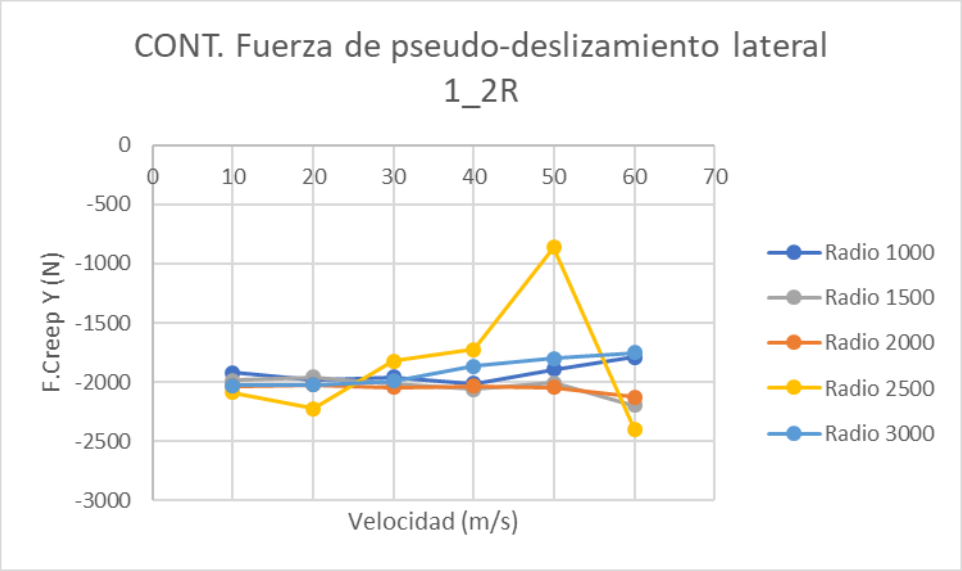

FAST. Fuerza de pseudo-deslizamiento longitudinal
1_1R
F. Creep X (N)
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

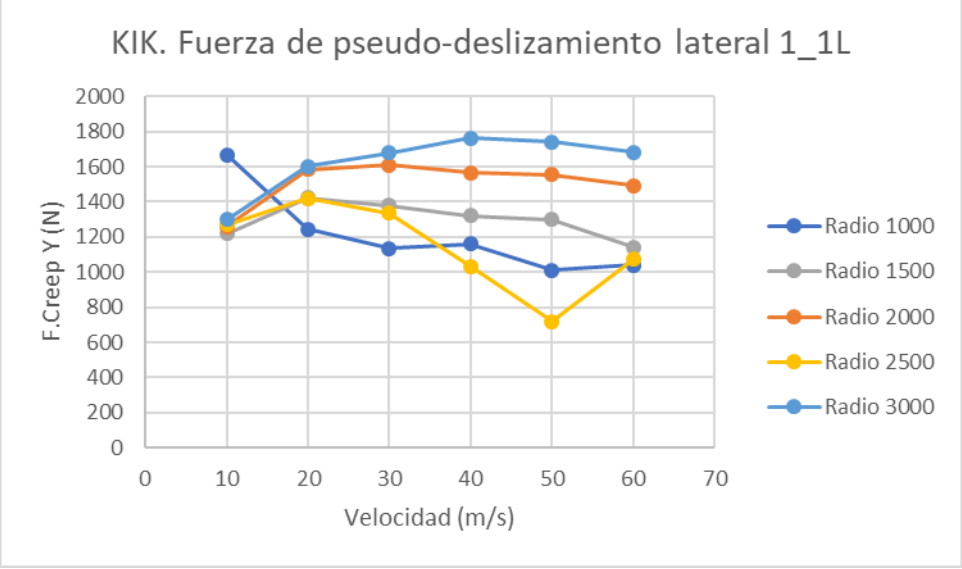

FAST. Fuerza de pseudo-deslizamiento longitudinal
1_2R
F. Creep X (N)
2500
2000
1500
1000
500
0
-500
-1000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

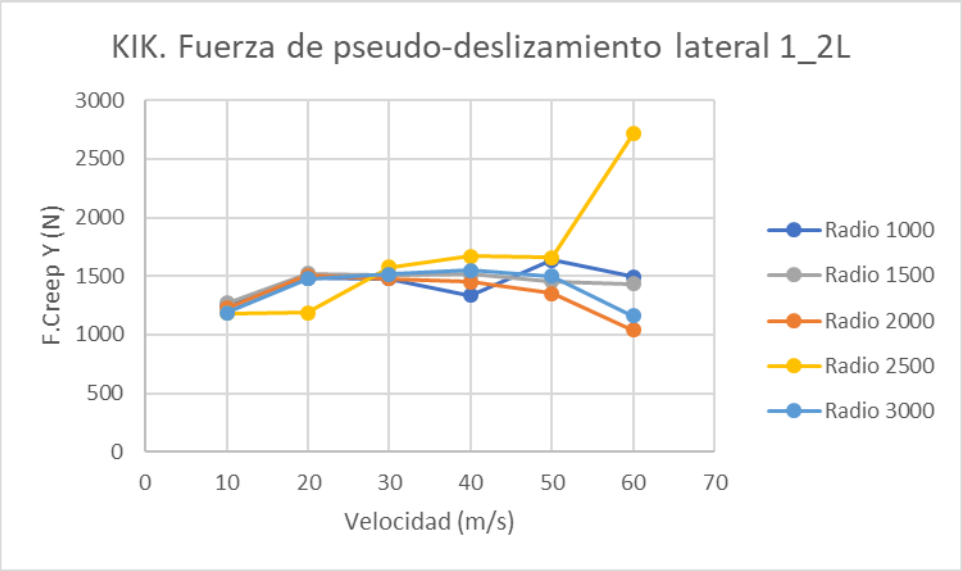

CONT. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral
1_1L
F.Creep Y (N)
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

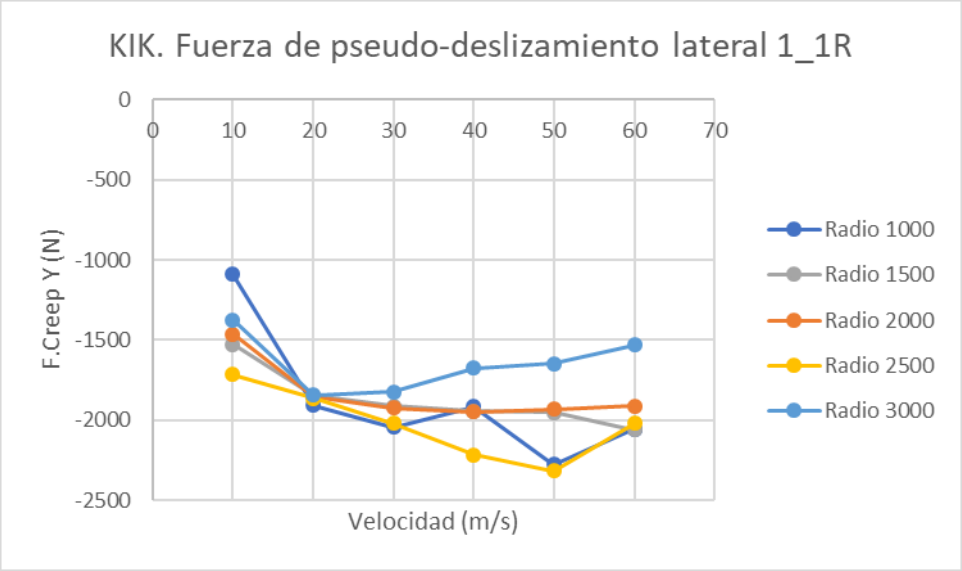

CONT. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral
1_2L
F.Creep Y (N)
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

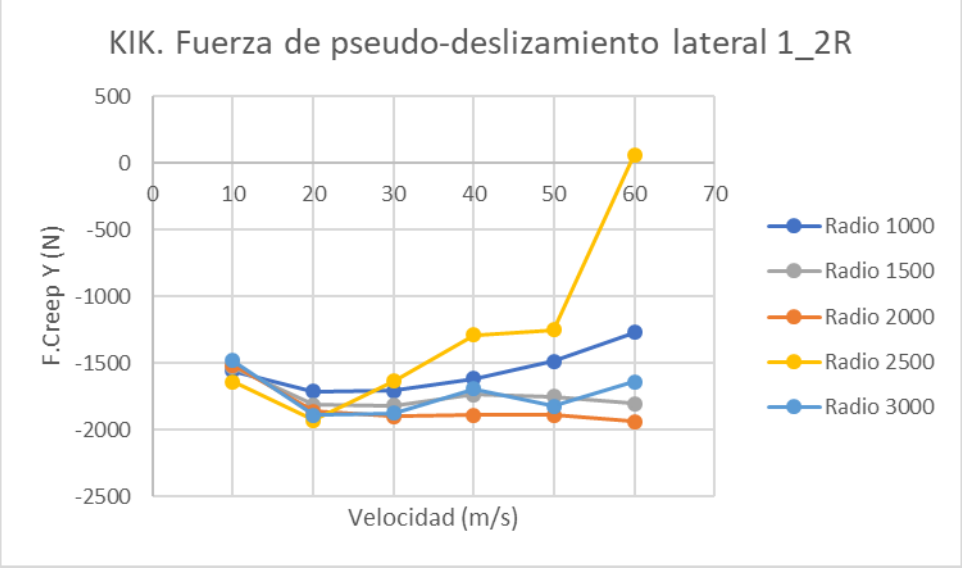

CONT. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral 1_1R
F.Creep Y (N)
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
-3000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

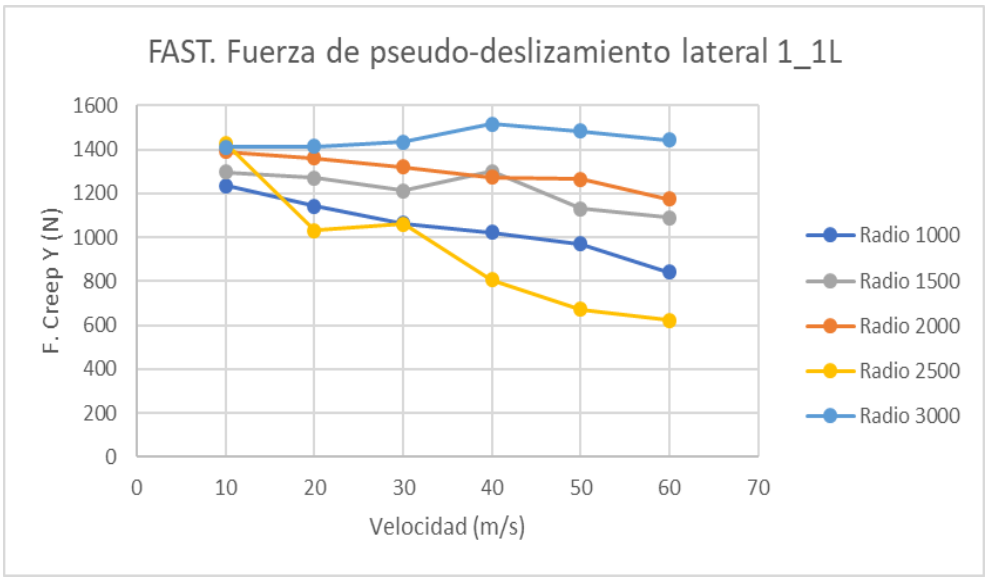

CONT. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral 1_2R
F.Creep Y (N)
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
-3000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

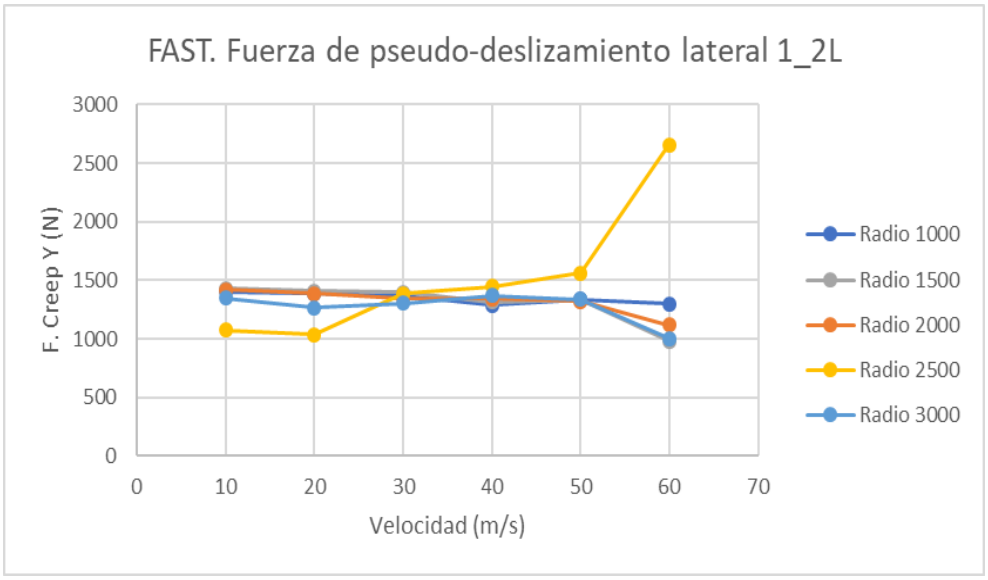

KIK. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral 1_1L
F.Creep Y (N)
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

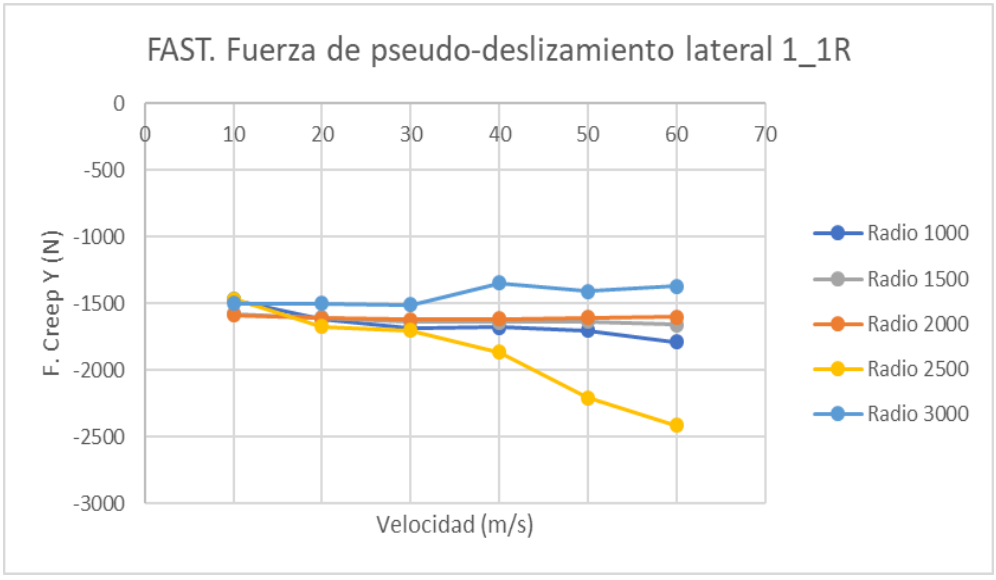

KIK. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral 1_2L
F.Creep Y (N)
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

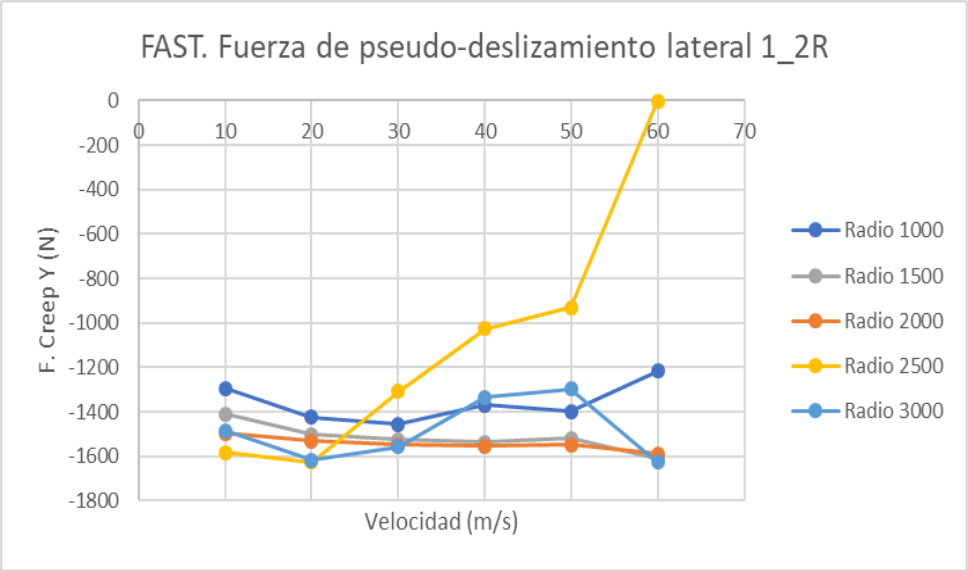

KIK. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral 1_1R
F.Creep Y (N)
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

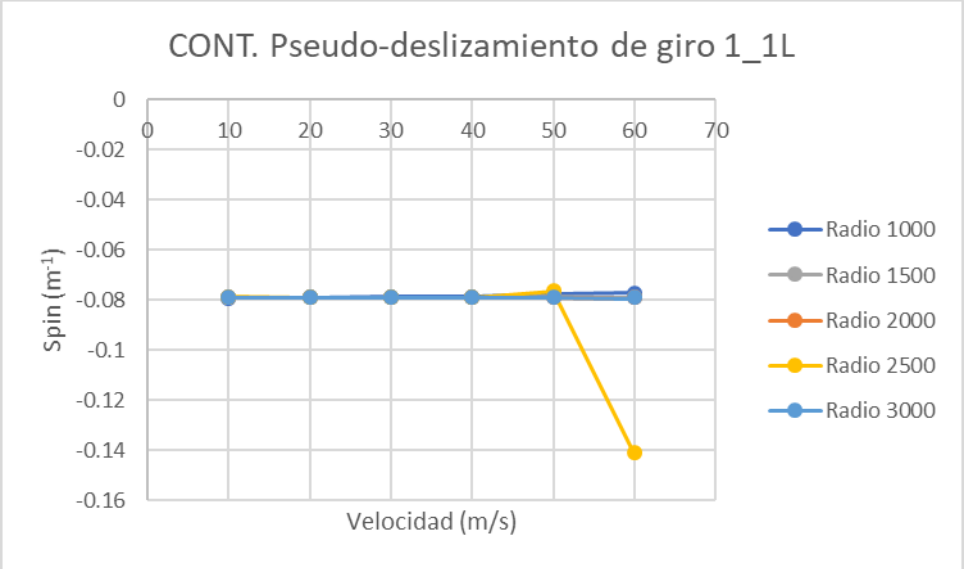

KIK. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral 1_2R
F.Creep Y (N)
500
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

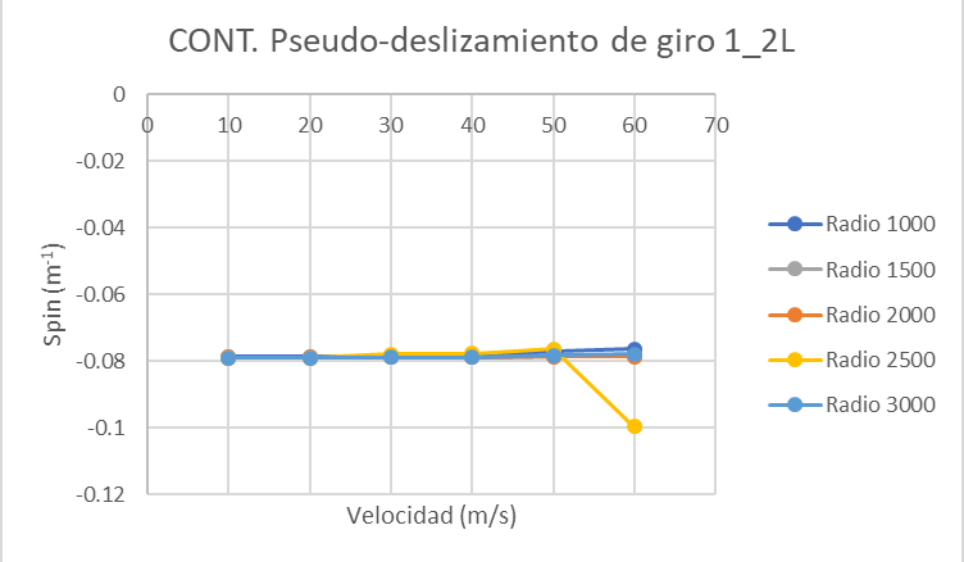

FAST. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral 1_1L
F. Creep Y (N)
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

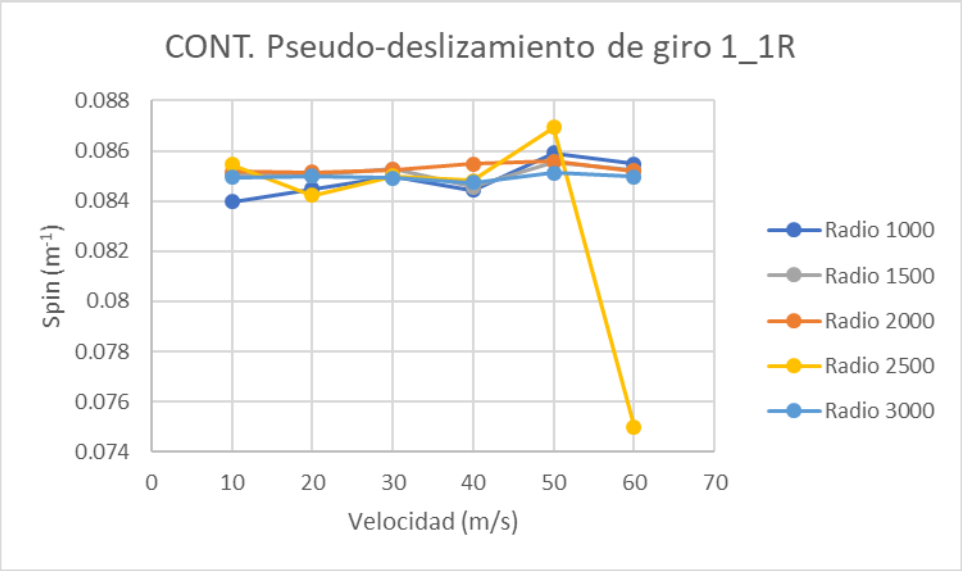

FAST. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral 1_2L
F. Creep Y (N)
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

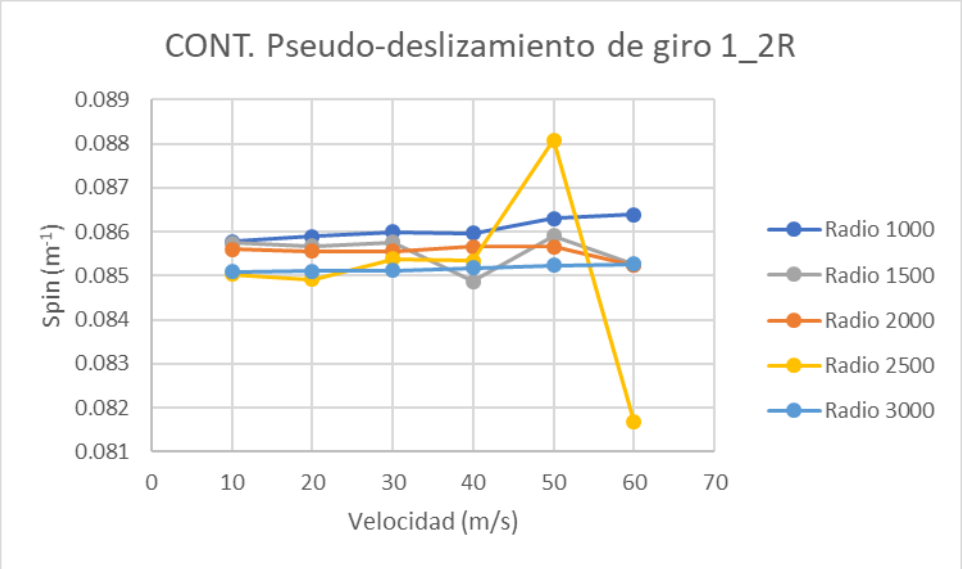

FAST. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral 1_1R
F. Creep Y (N)
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
-3000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

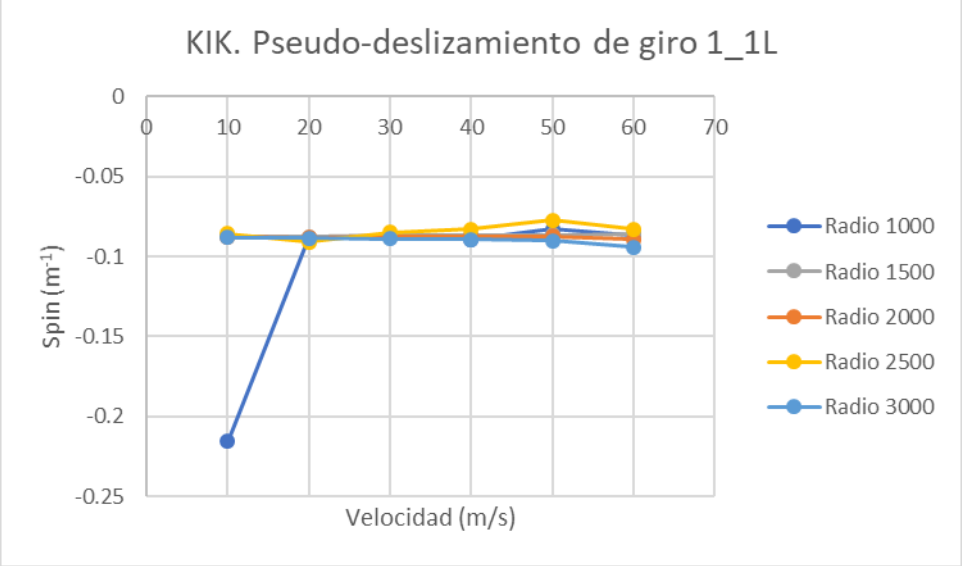

FAST. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral 1_2R
F. Creep Y (N)
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

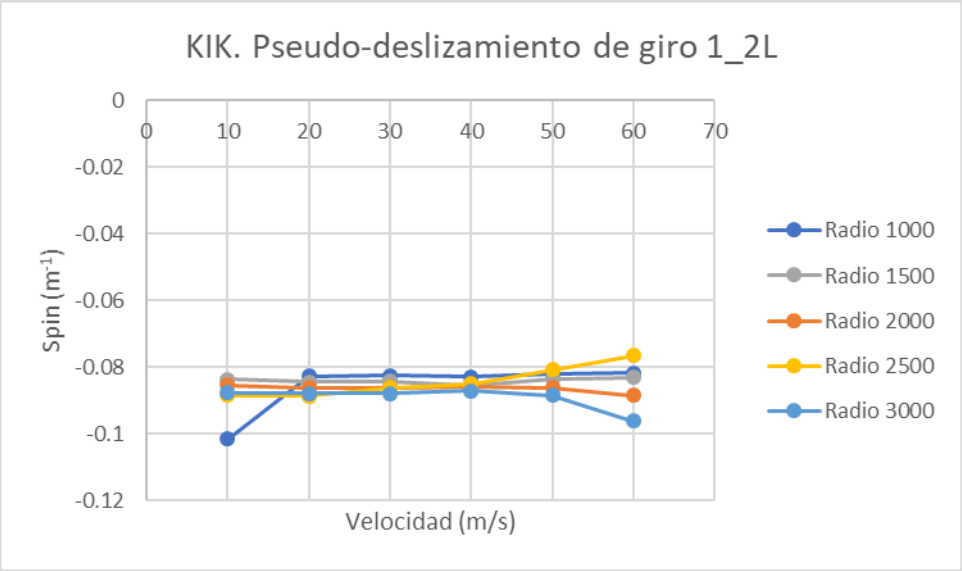

CONT. Pseudo-deslizamiento de giro 1_1L
Spin (m-1)
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

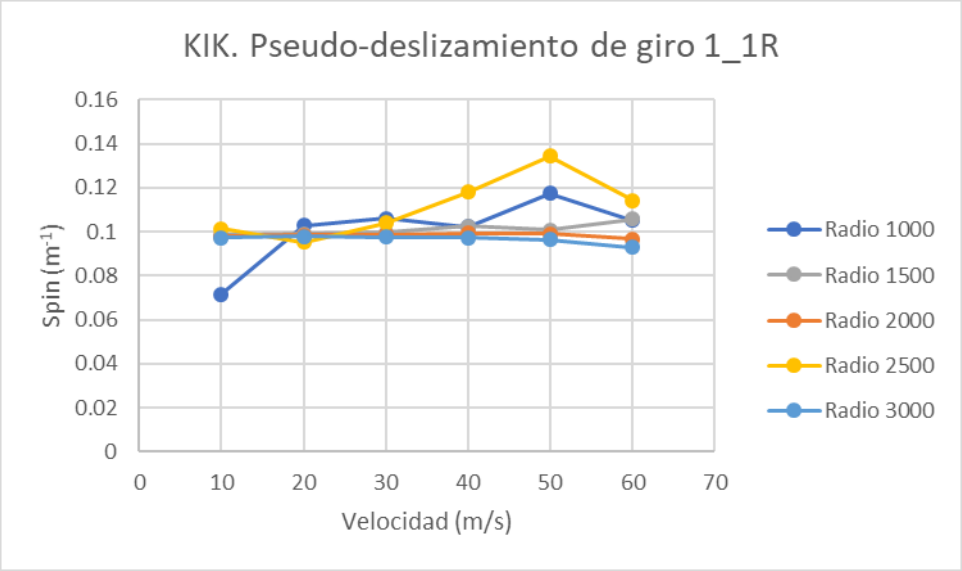

CONT. Pseudo-deslizamiento de giro 1_2L
Spin (m-1)
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

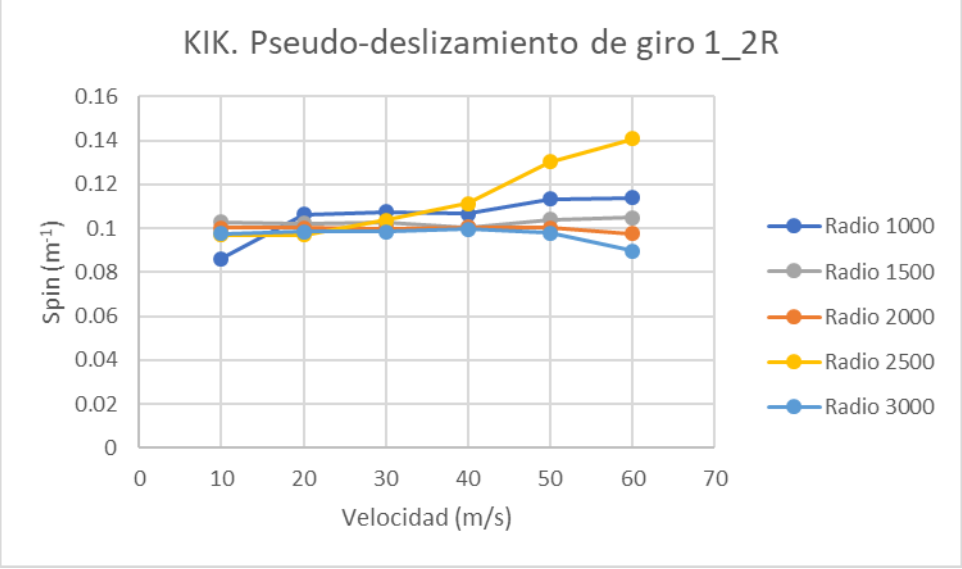

CONT. Pseudo-deslizamiento de giro 1_1R
0.088
0.086
0.084
0.082
0.08
0.078
0.076
0.074
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

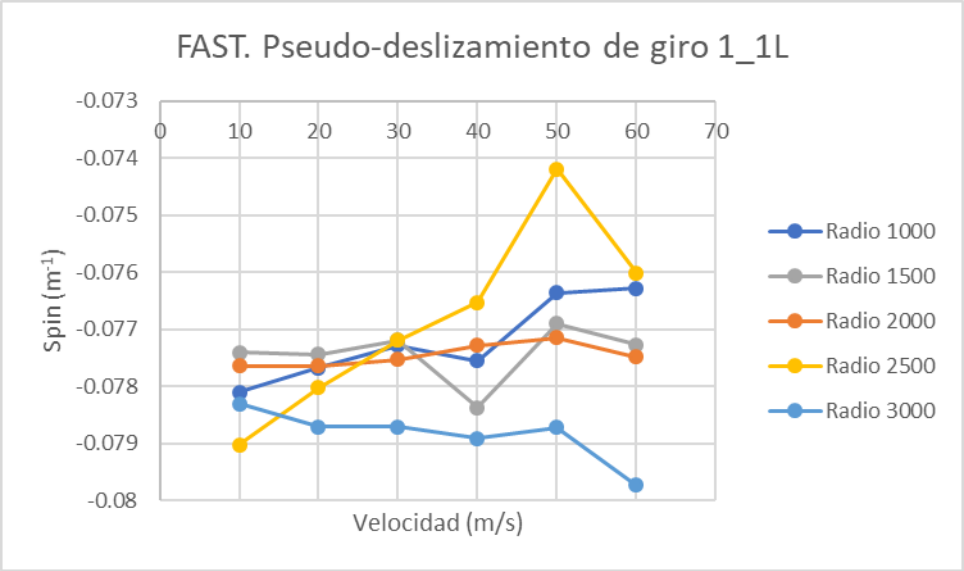

CONT. Pseudo-deslizamiento de giro 1_2R
0.089
0.088
0.087
0.086
0.085
0.084
0.083
0.082
0.081
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

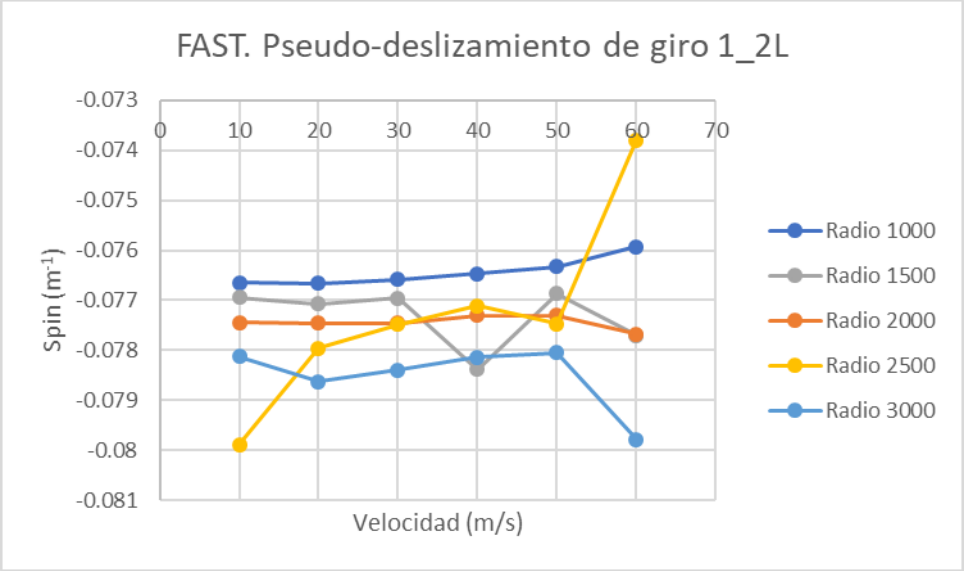

KIK. Pseudo-deslizamiento de giro 1_1L
0
-0.05
-0.1
-0.15
-0.2
-0.25
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

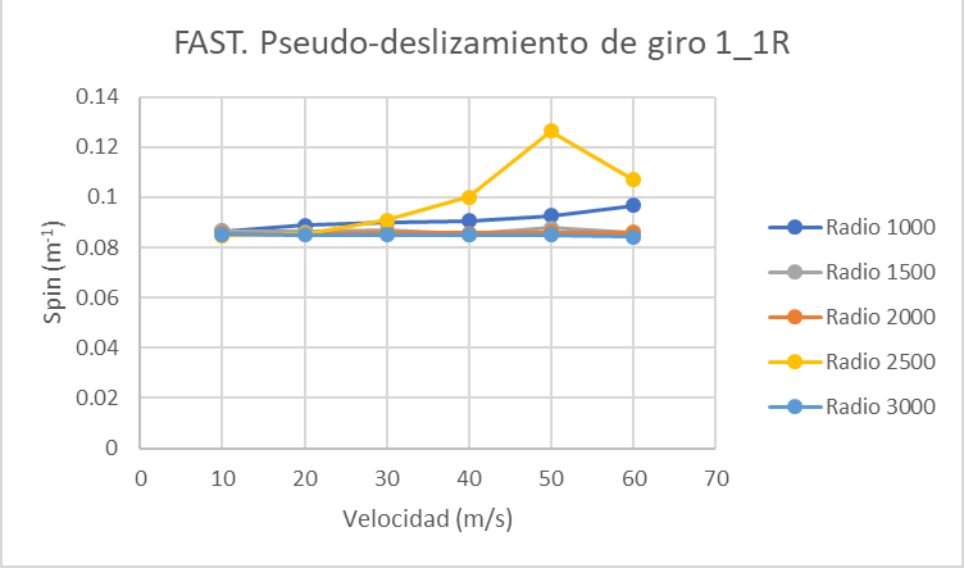

KIK. Pseudo-deslizamiento de giro 1_2L
0
-0.02
-0.04
-0.06
-0.08
-0.1
-0.12
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

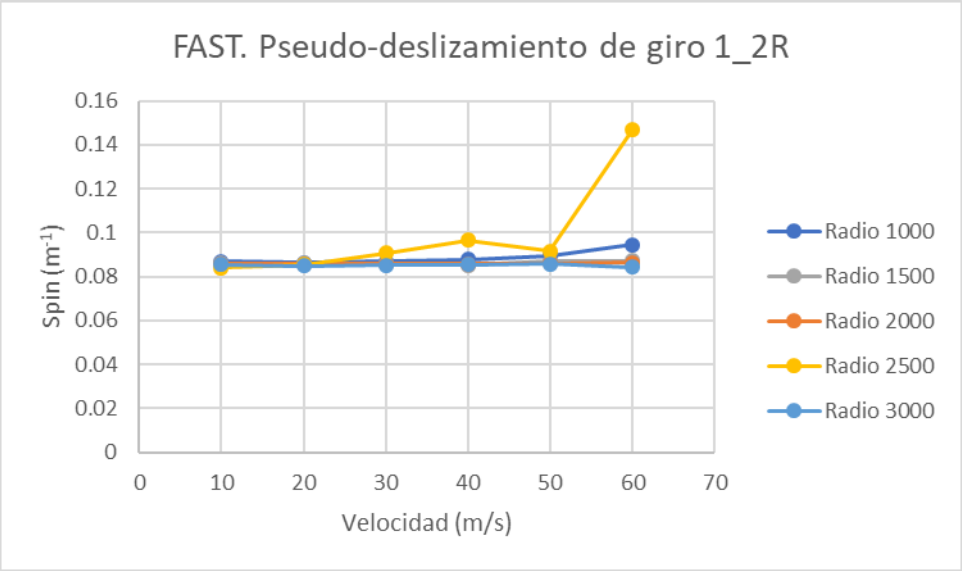

KIK. Pseudo-deslizamiento de giro 1_1R
0.16
0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

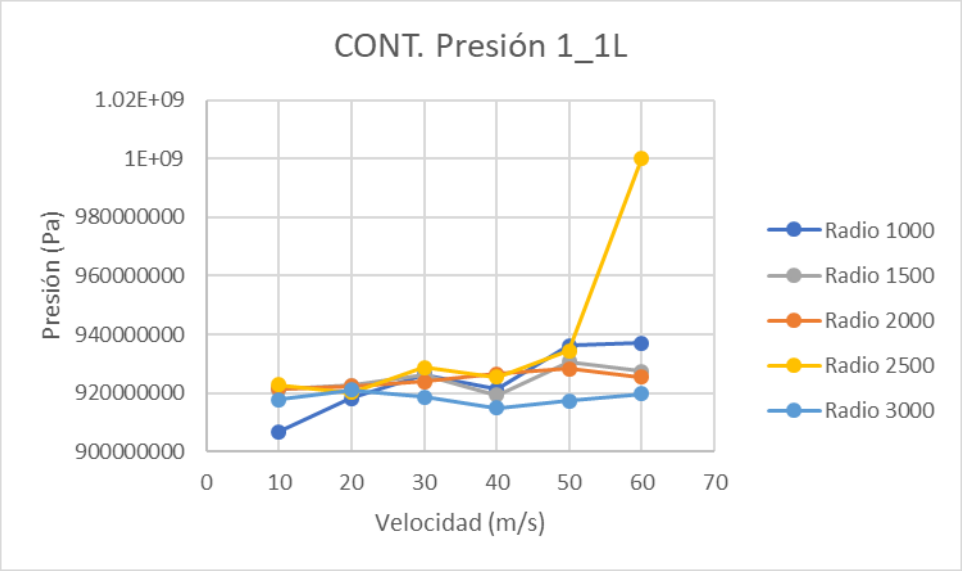

KIK. Pseudo-deslizamiento de giro 1_2R
0.16
0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

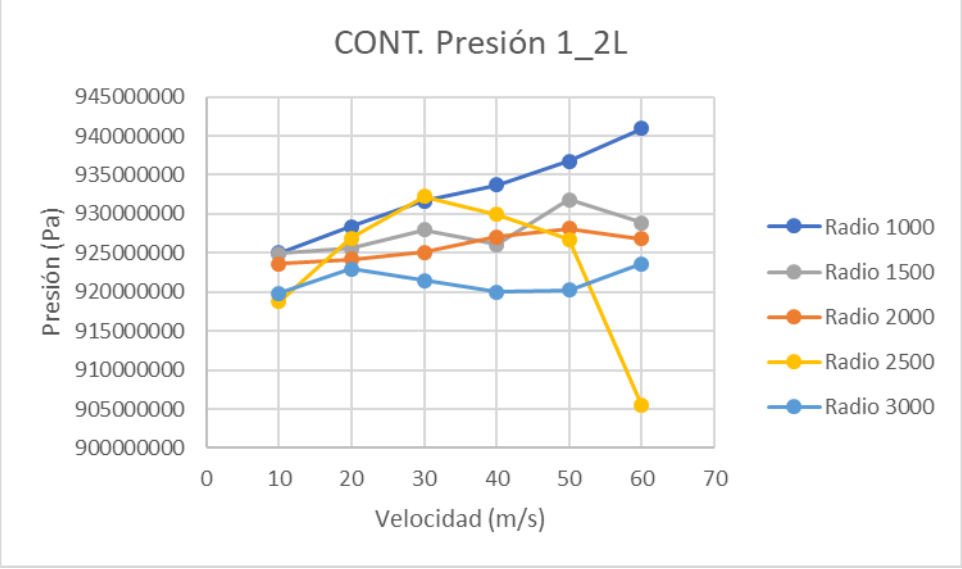

FAST. Pseudo-deslizamiento de giro 1_1L
-0.073
-0.074
-0.075
-0.076
-0.077
-0.078
-0.079
-0.08
0
10
20
30
40
50
60
70
Spin (m-1)
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

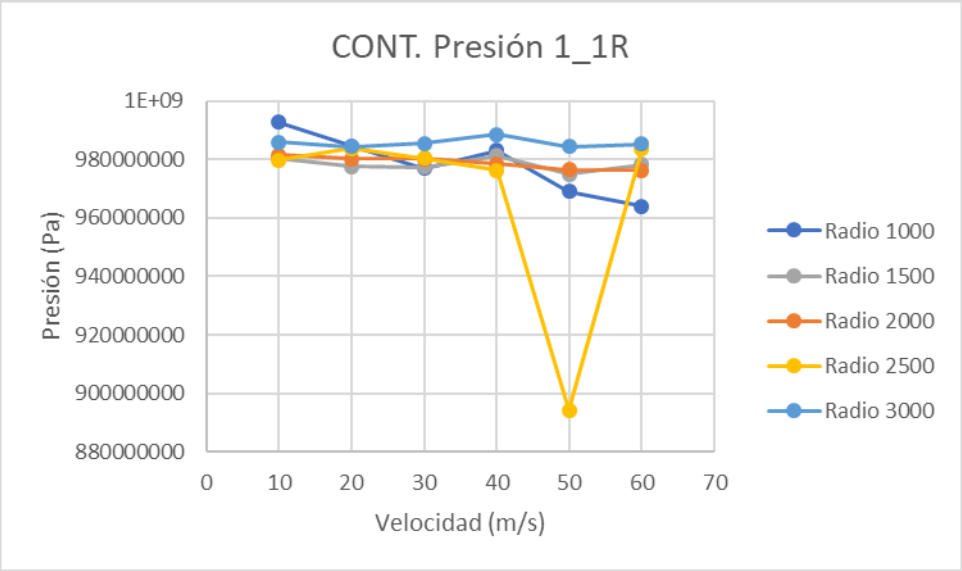

FAST. Pseudo-deslizamiento de giro 1_2L
-0.073
-0.074
-0.075
-0.076
-0.077
-0.078
-0.079
-0.08
-0.081
0
10
20
30
40
50
60
70
Spin (m-1)
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

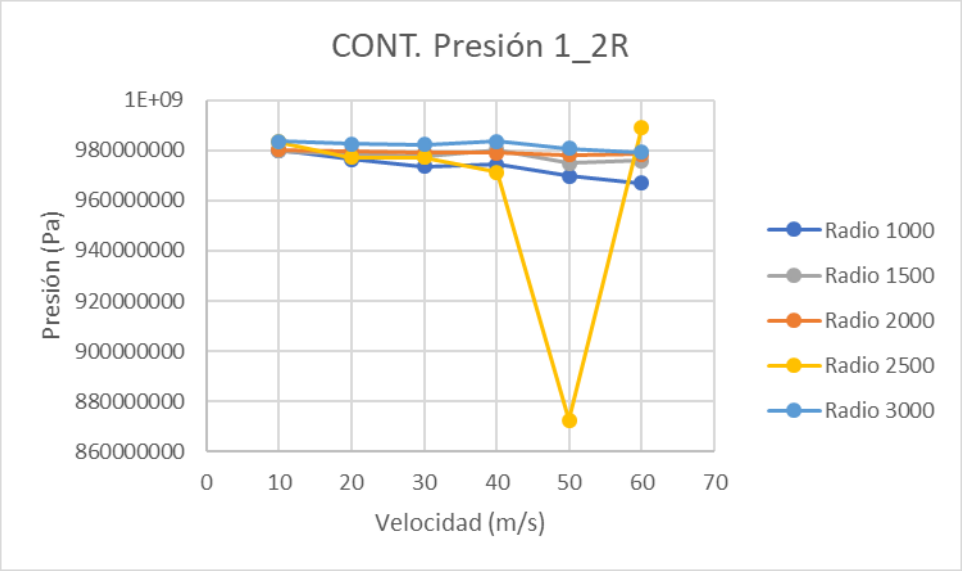

FAST. Pseudo-deslizamiento de giro 1_1R
0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Spin (m-1)
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

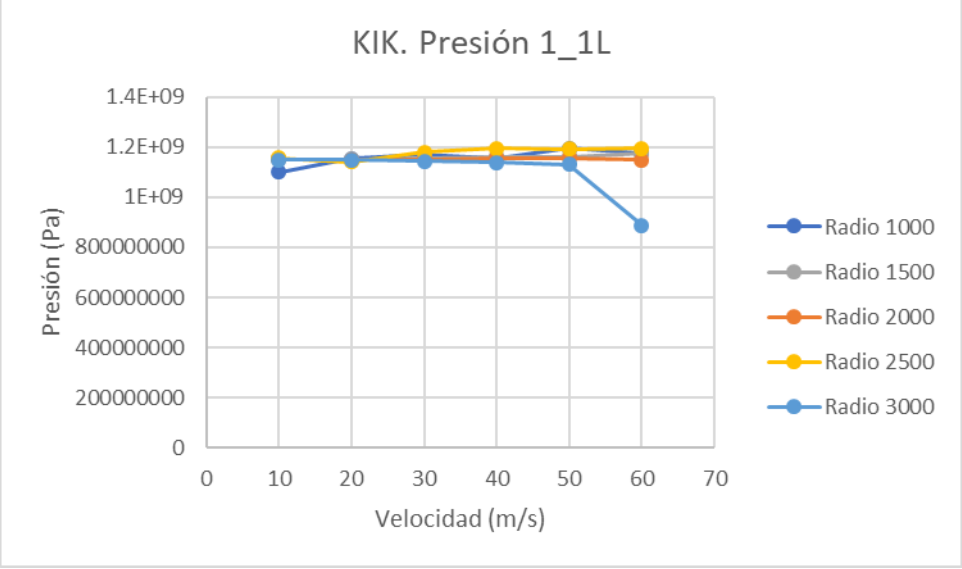

FAST. Pseudo-deslizamiento de giro 1_2R
Spin (m-1)
0.16
0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

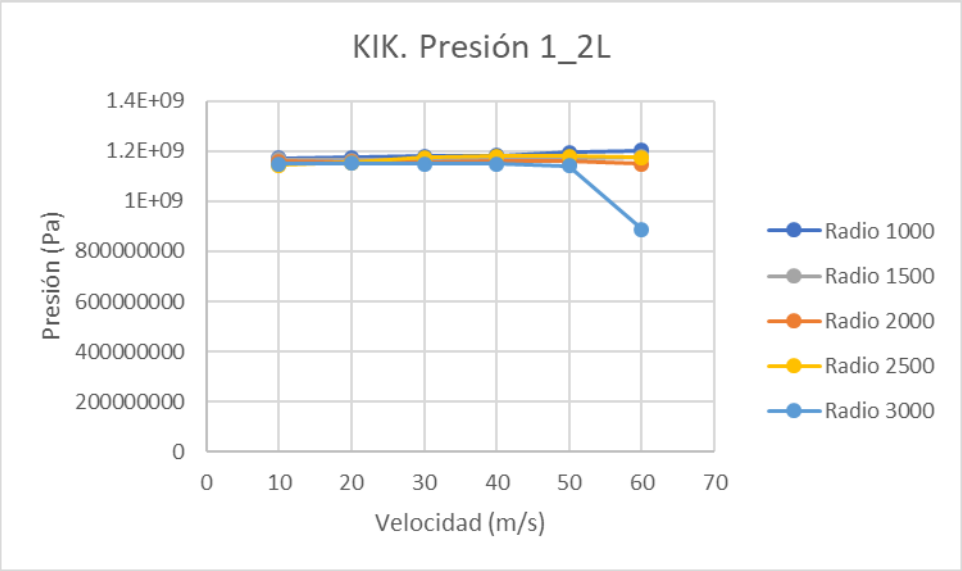

CONT. Presión 1_1L
Presión (Pa)
1.02E+09
1E+09
980000000
960000000
940000000
920000000
900000000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

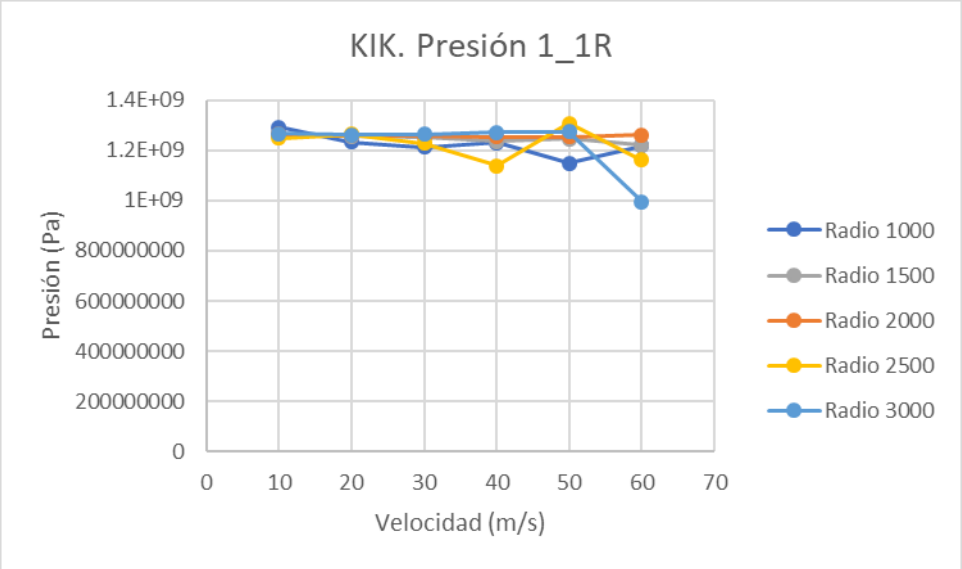

CONT. Presión 1_2L
Presión (Pa)
945000000
940000000
935000000
930000000
925000000
920000000
915000000
910000000
905000000
900000000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

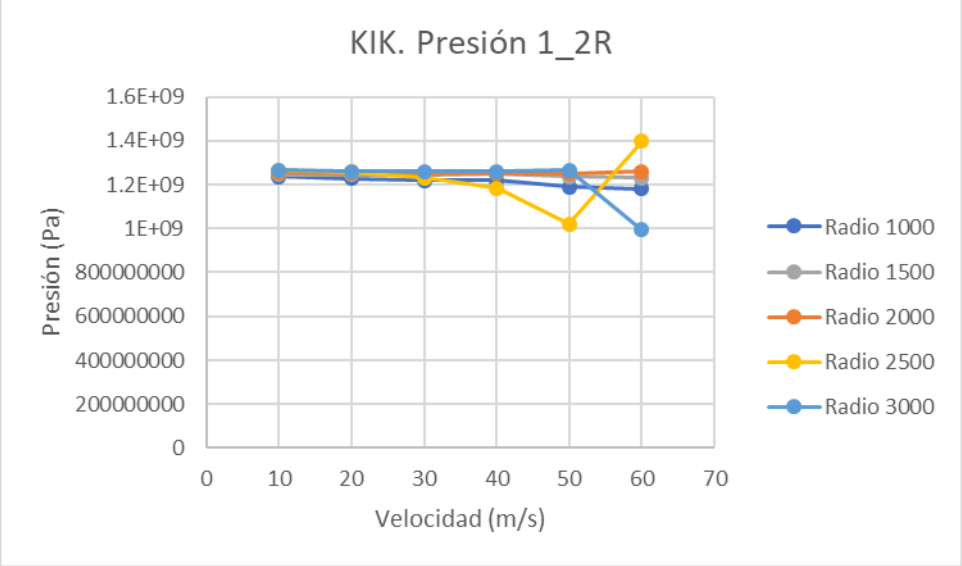

CONT. Presión 1_1R
1E+09
980000000
960000000
940000000
920000000
900000000
880000000
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

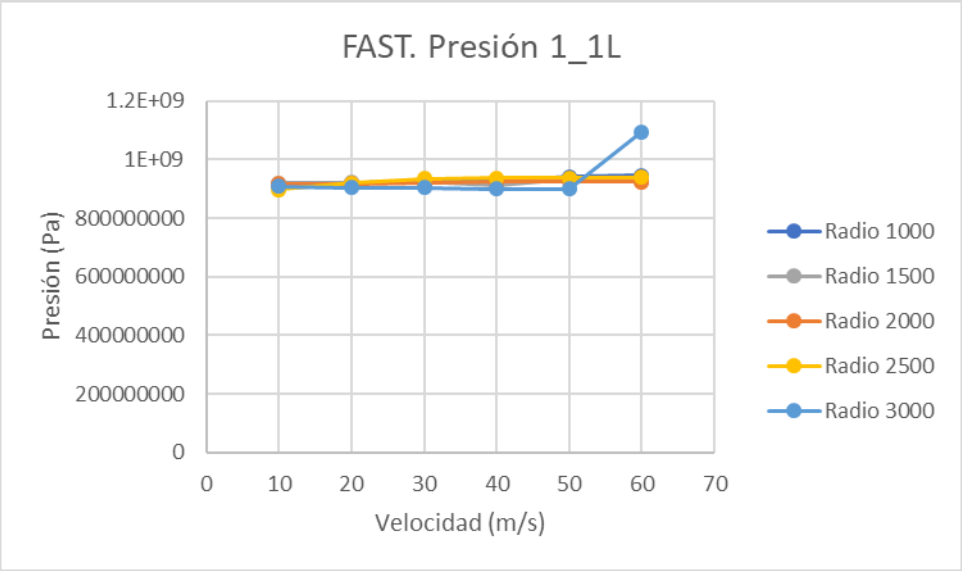

CONT. Presión 1_2R
1E+09
980000000
960000000
940000000
920000000
900000000
880000000
860000000
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

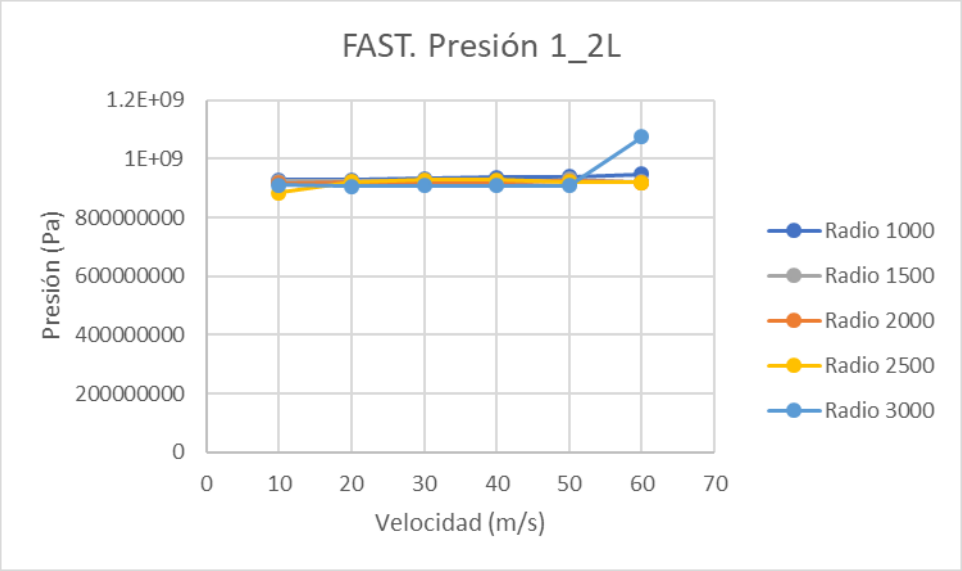

KIK. Presión 1_1L
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000


KIK. Presión 1_2L
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

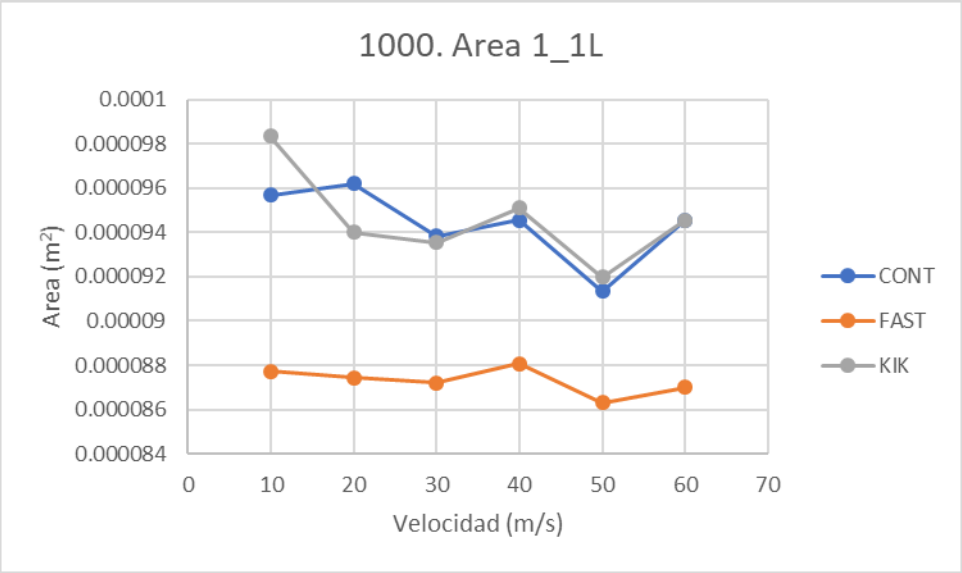

KIK. Presión 1_1R
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

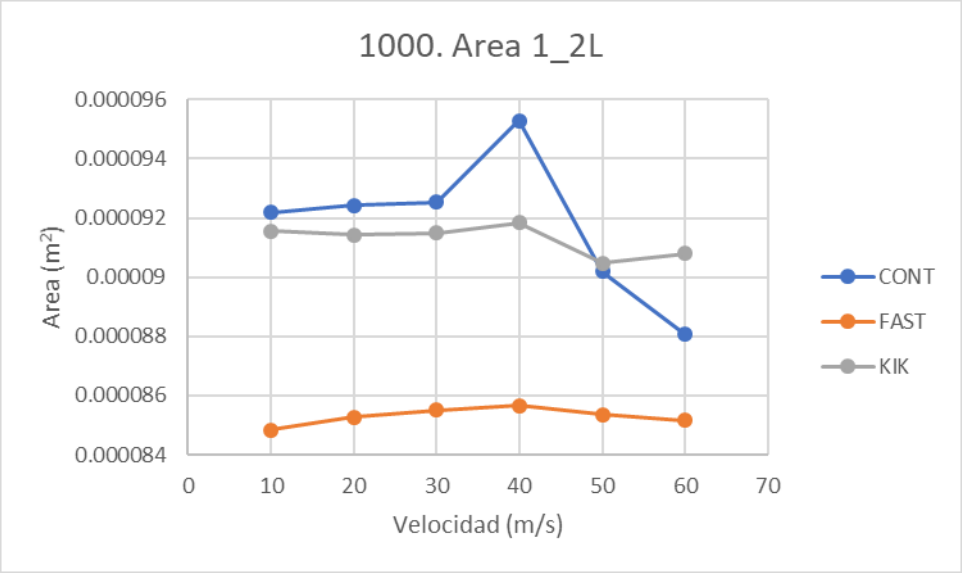

KIK. Presión 1_2R
1.6E+09
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

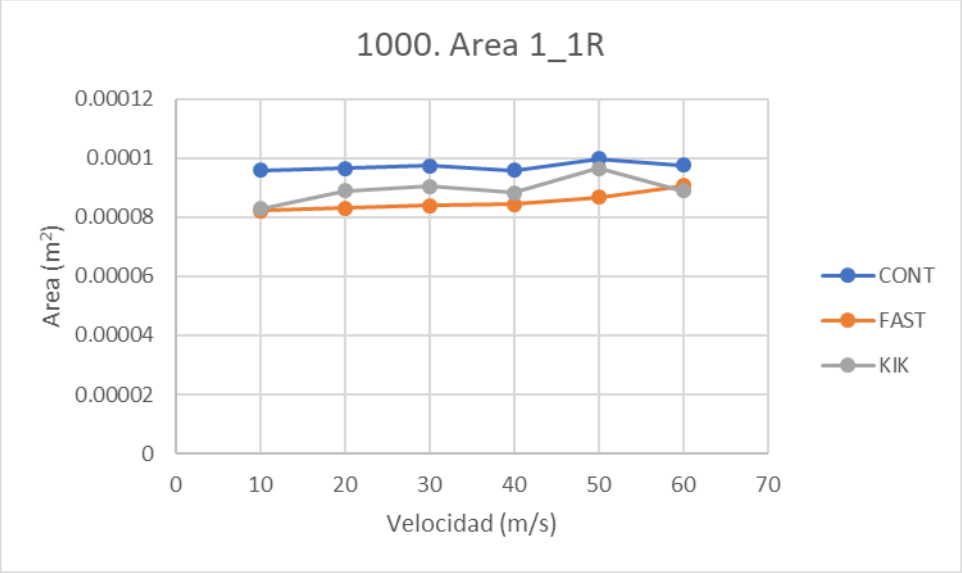

FAST. Presión 1_1L
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

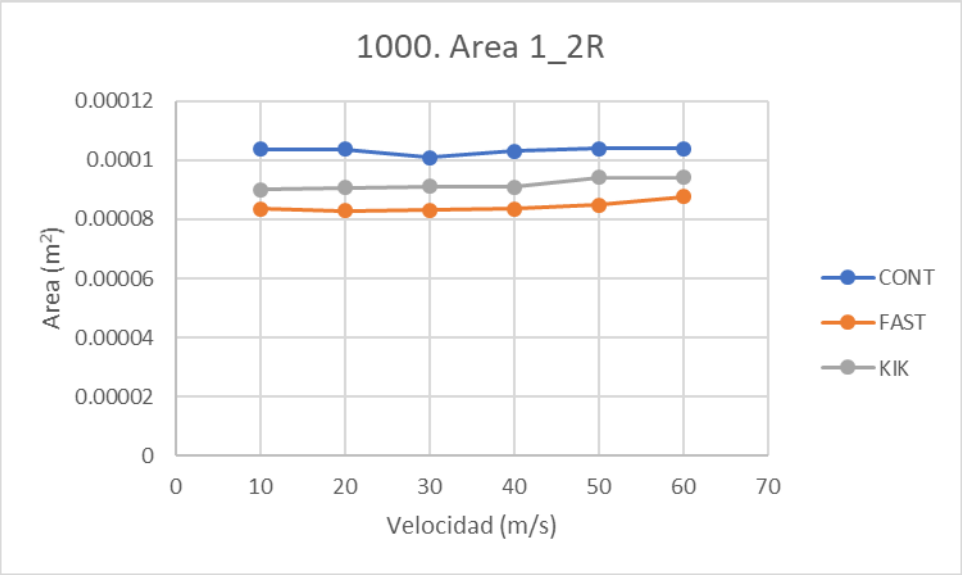

FAST. Presión 1_2L
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
Radio 1000
Radio 1500
Radio 2000
Radio 2500
Radio 3000

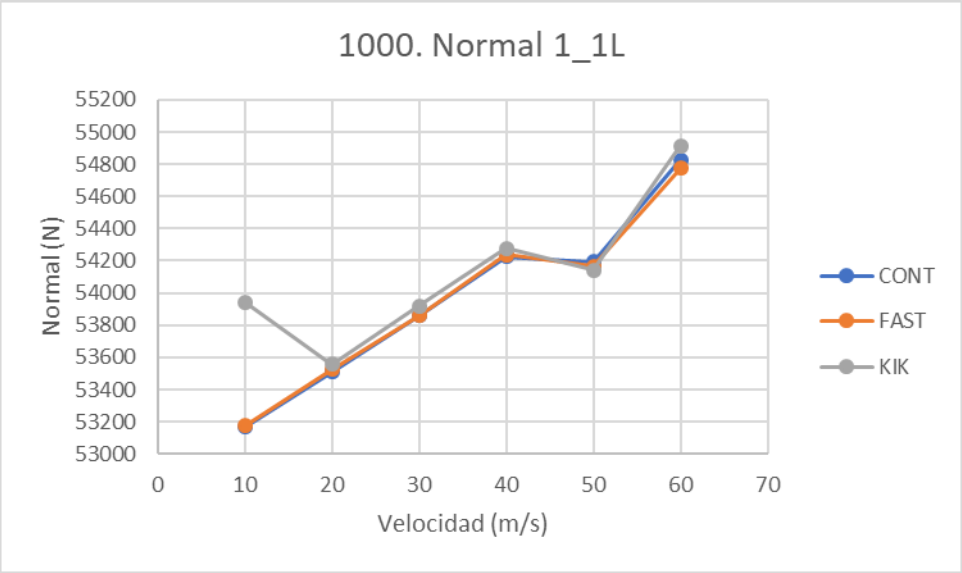
9.2. Gráficas del Anexo III

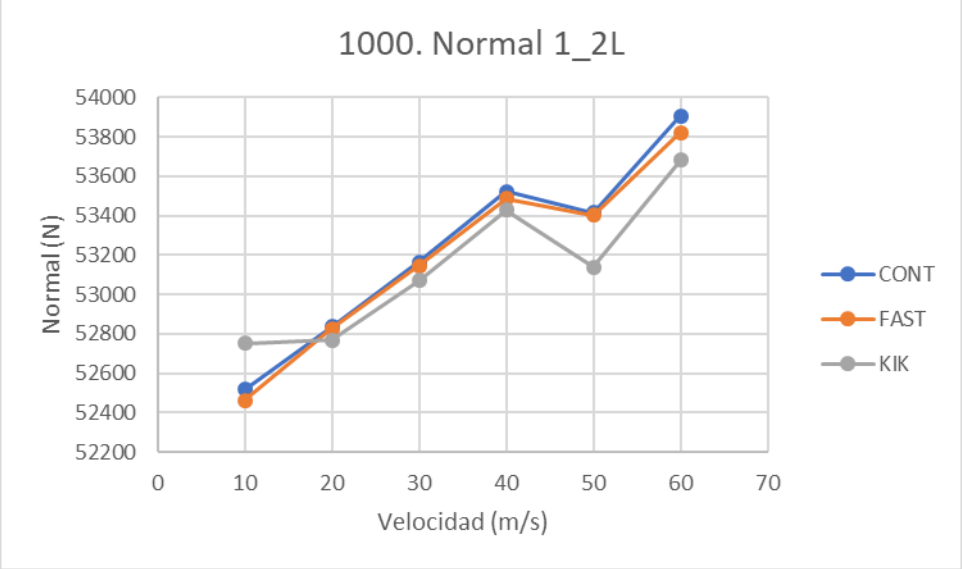

1000. Area 1_1L
0.0001
0.000098
0.000096
0.000094
0.000092
0.00009
0.000088
0.000086
0.000084
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

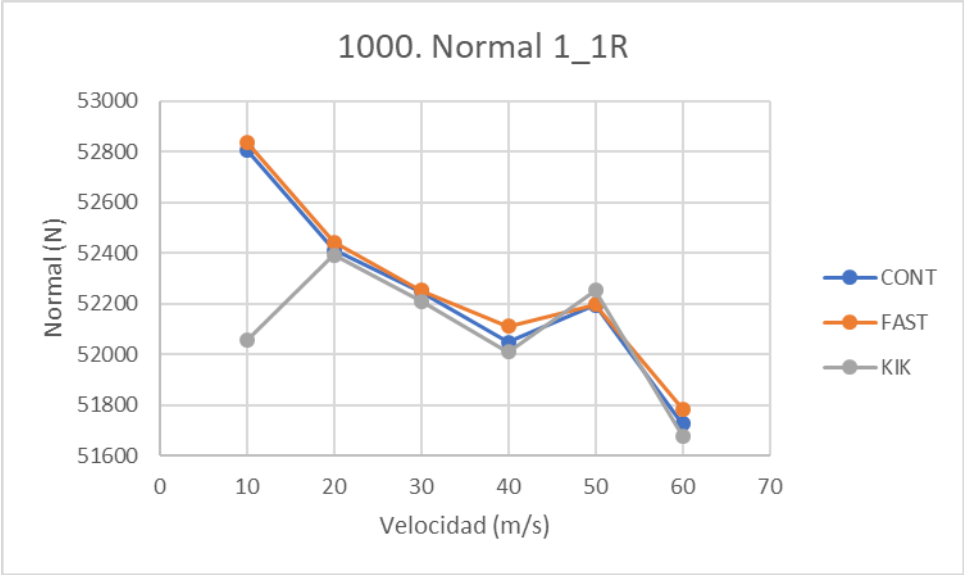

1000. Area 1_2L
0.000096
0.000094
0.000092
0.00009
0.000088
0.000086
0.000084
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

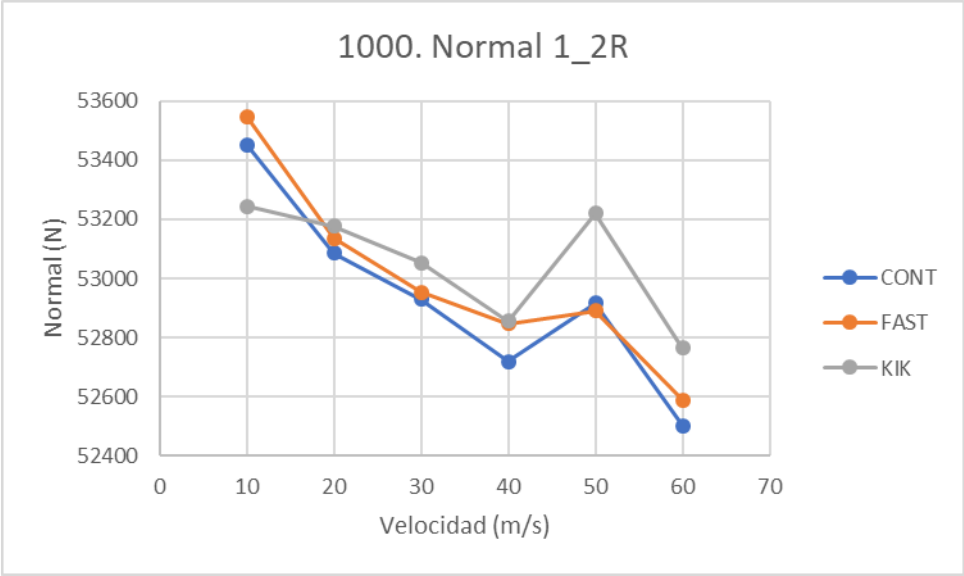

1000. Area 1_1R
0.00012
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

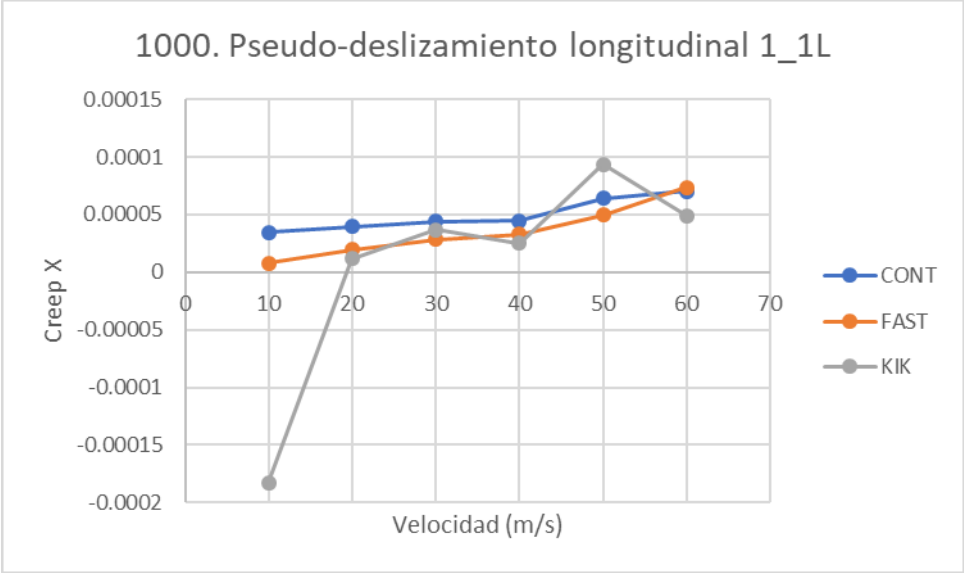

1000. Area 1_2R
0.00012
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

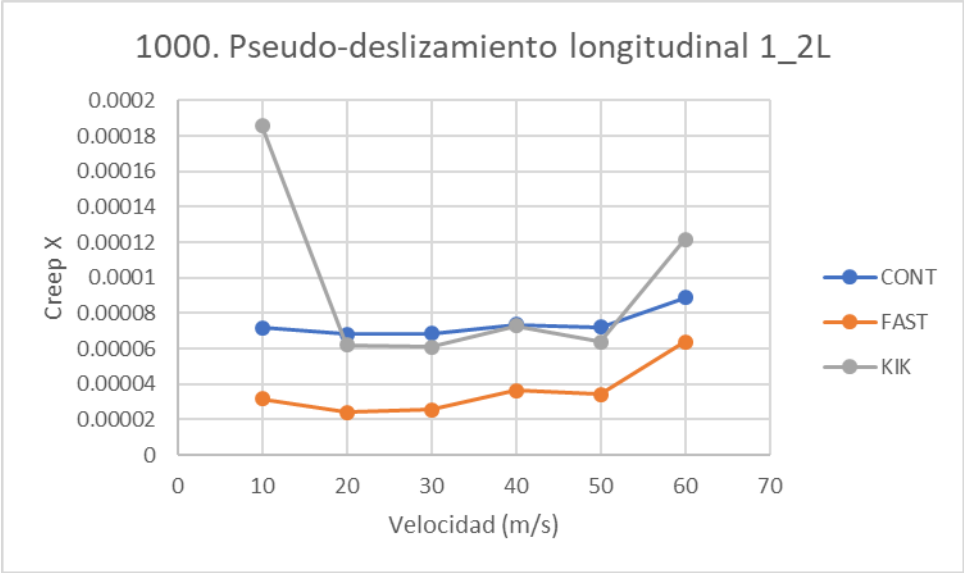

1000. Normal 1_1L
55200
55000
54800
54600
54400
54200
54000
53800
53600
53400
53200
53000
Normal (N)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

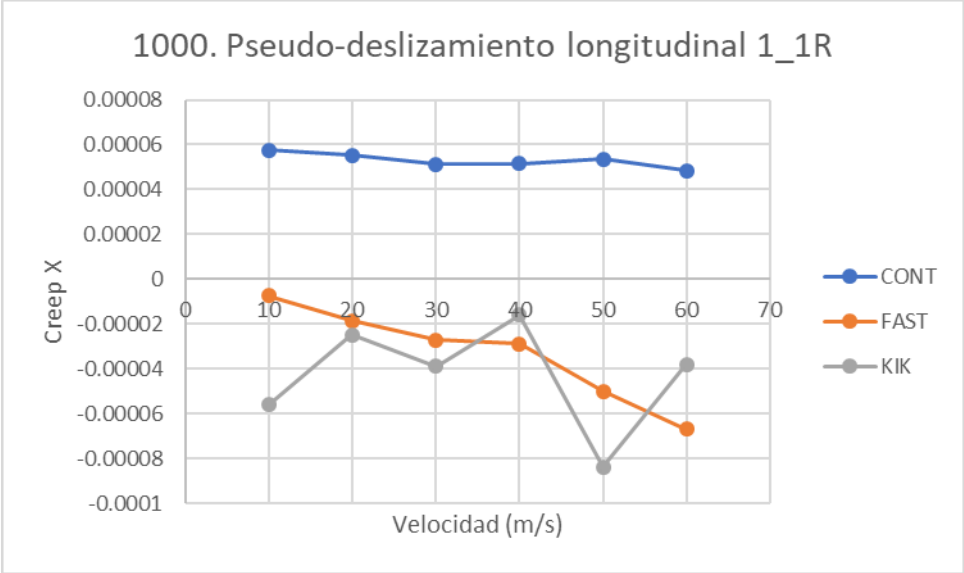

1000. Normal 1_2L
54000
53800
53600
53400
53200
53000
52800
52600
52400
52200
Normal (N)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

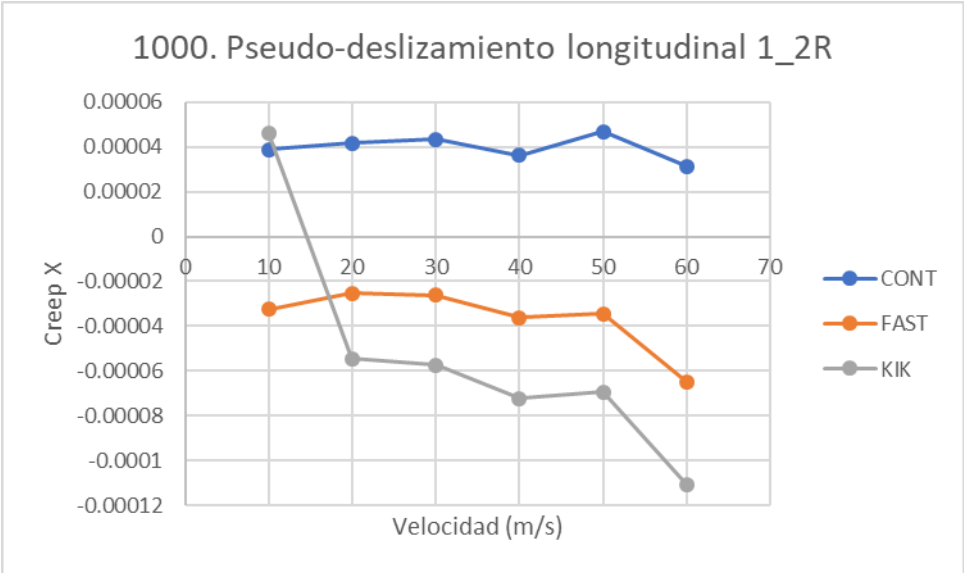

1000. Normal 1_1R
Normal (N)
53000
52800
52600
52400
52200
52000
51800
51600
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

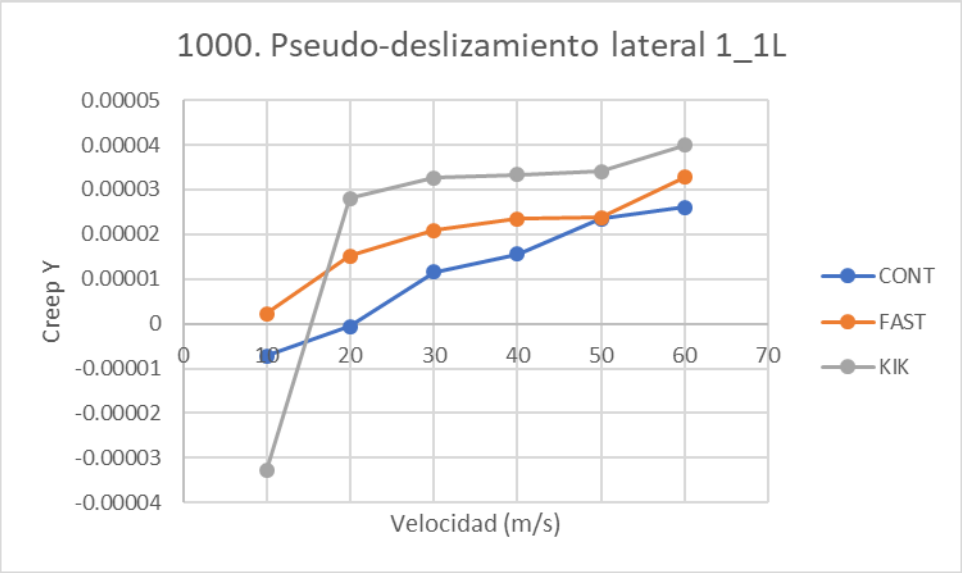

1000. Normal 1_2R
Normal (N)
53600
53400
53200
53000
52800
52600
52400
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

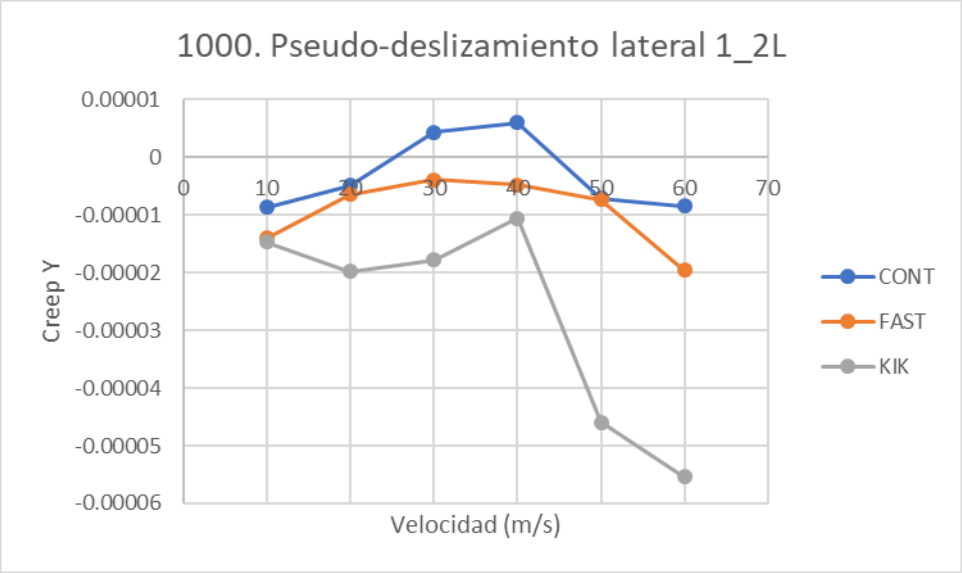

1000. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1L
Creep X
0.00015
0.0001
0.00005
0
-0.00005
-0.0001
-0.00015
-0.0002
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

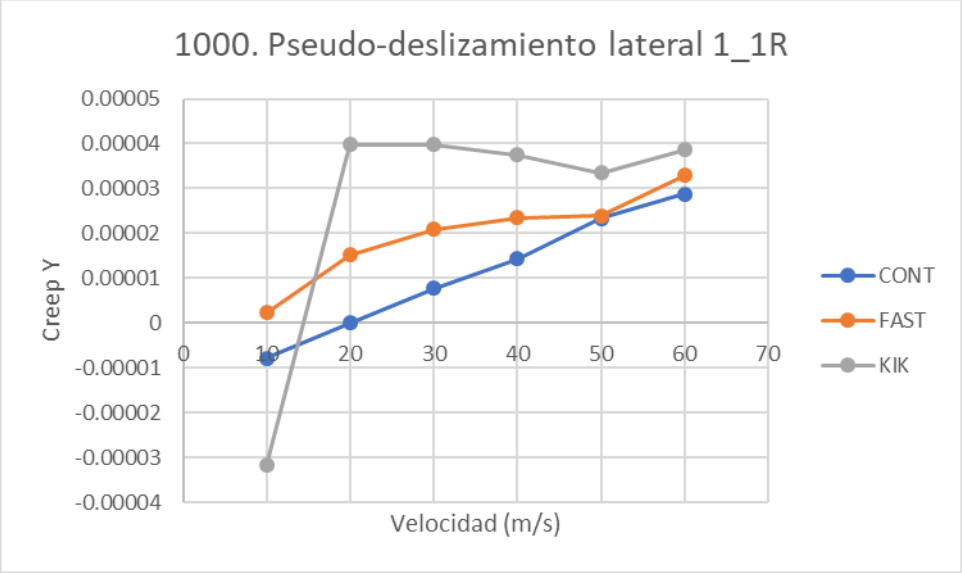

1000. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_2L
Creep X
0.0002
0.00018
0.00016
0.00014
0.00012
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

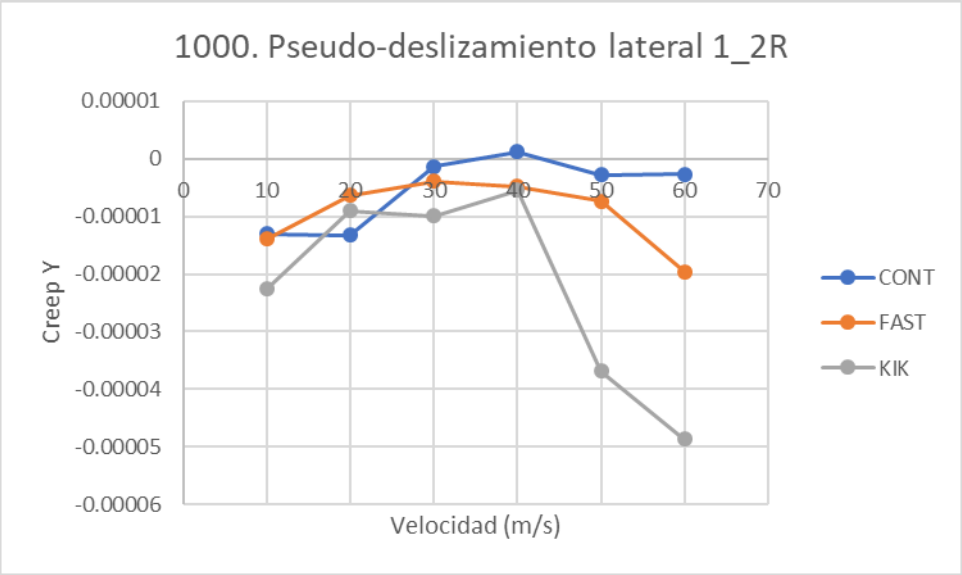

1000. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1R
Creep X
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
-0.00002
-0.00004
-0.00006
-0.00008
-0.0001
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

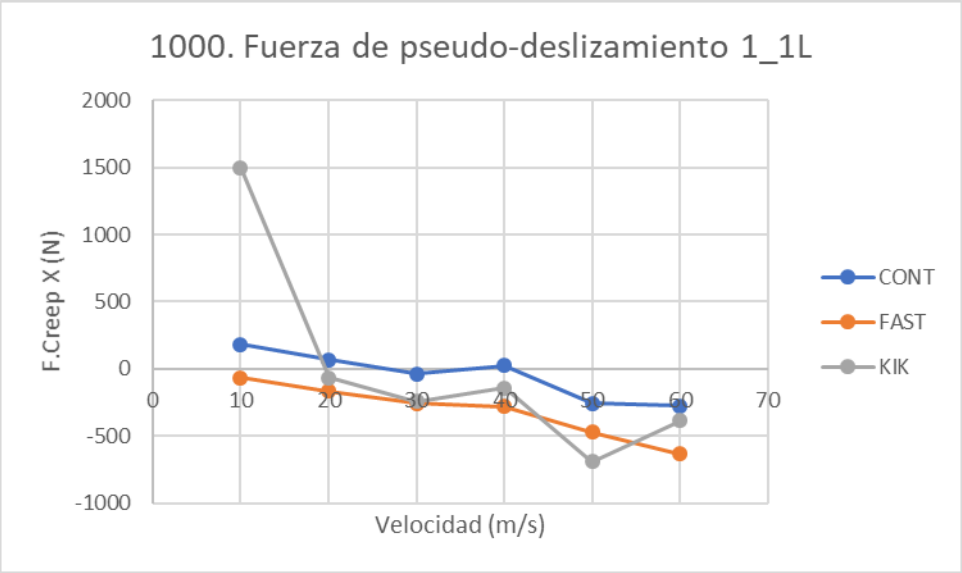

1000. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_2R
Creep X
0.00006
0.00004
0.00002
0
-0.00002
-0.00004
-0.00006
-0.00008
-0.0001
-0.00012
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

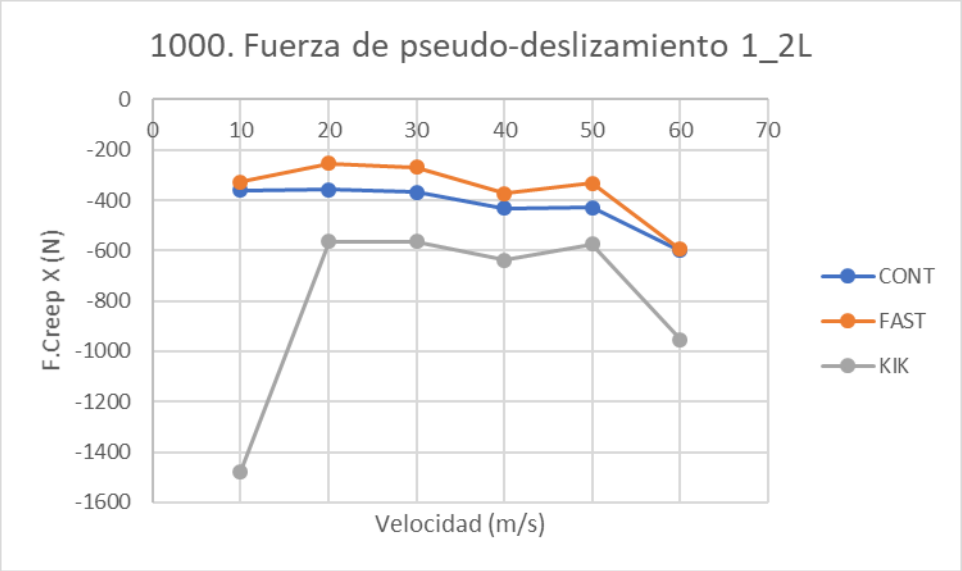

1000. Pseudo-deslizamiento lateral 1_1L
0.00005
0.00004
0.00003
0.00002
0.00001
0
-0.00001
-0.00002
-0.00003
-0.00004
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

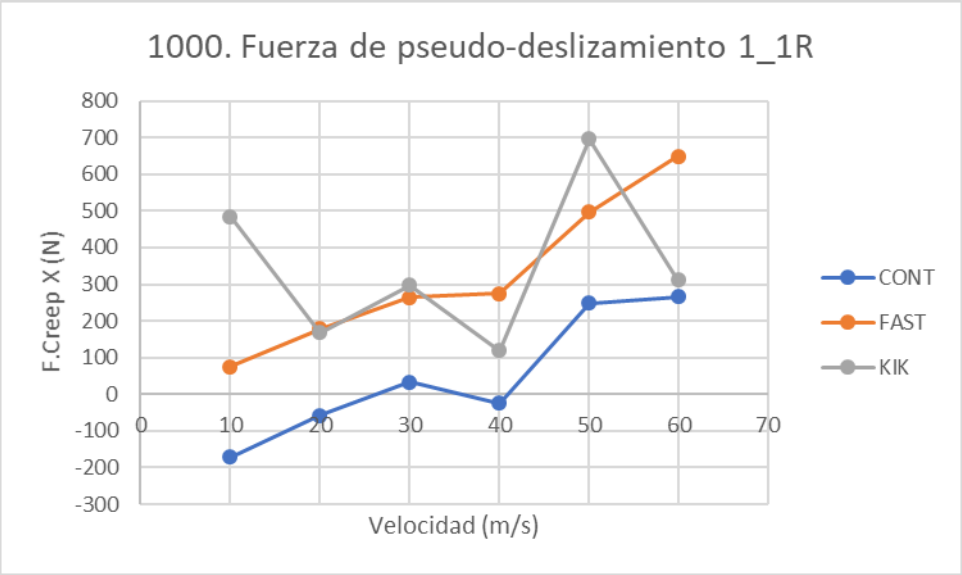

1000. Pseudo-deslizamiento lateral 1_2L
0.00001
0
-0.00001
-0.00002
-0.00003
-0.00004
-0.00005
-0.00006
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

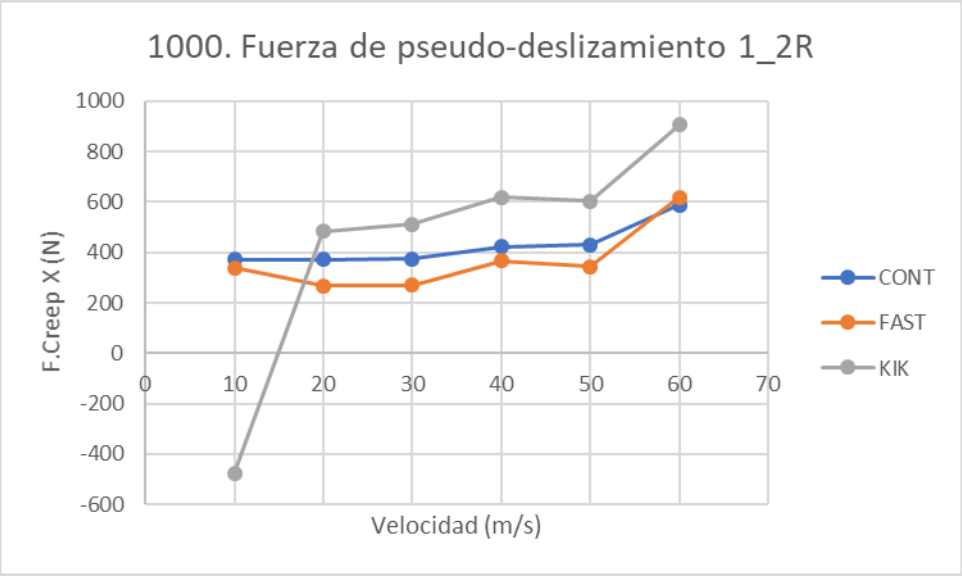

1000. Pseudo-deslizamiento lateral 1_1R
0.00005
0.00004
0.00003
0.00002
0.00001
0
-0.00001
-0.00002
-0.00003
-0.00004
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

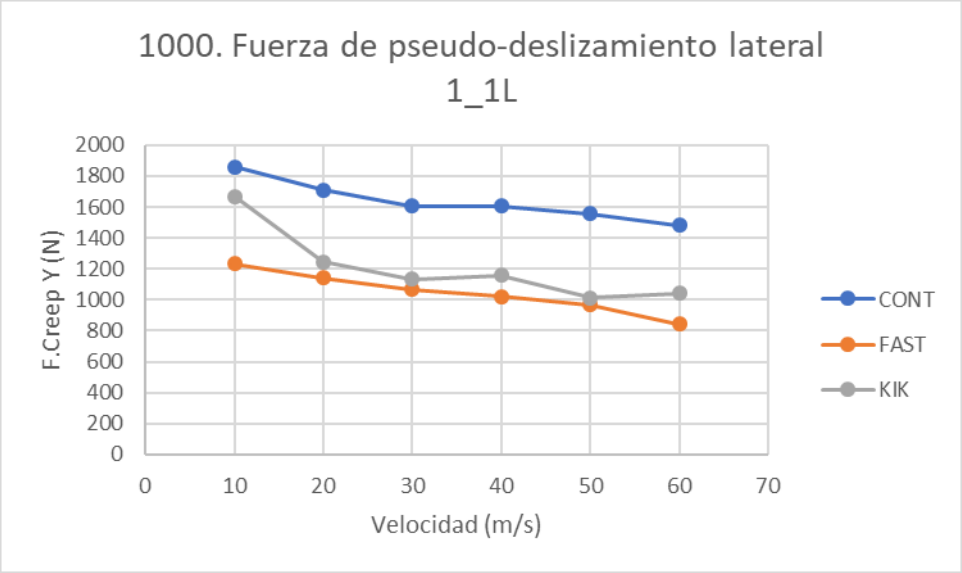

1000. Pseudo-deslizamiento lateral 1_2R
0.00001
0
-0.00001
-0.00002
-0.00003
-0.00004
-0.00005
-0.00006
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

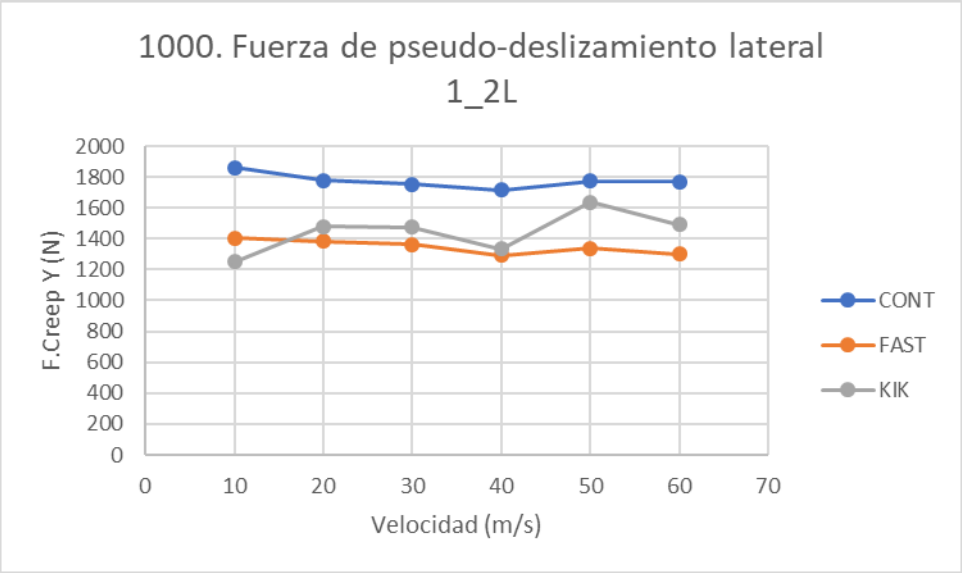

1000. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_1L
2000
1500
1000
500
0
-500
-1000
F.Creep X (N)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

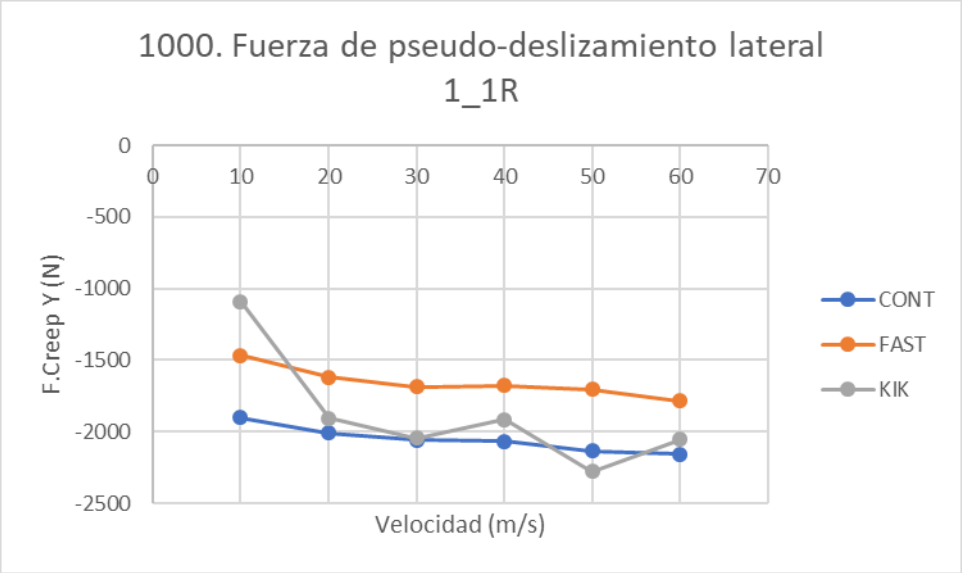

1000. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_2L
0
-200
-400
-600
-800
-1000
-1200
-1400
-1600
F.Creep X (N)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

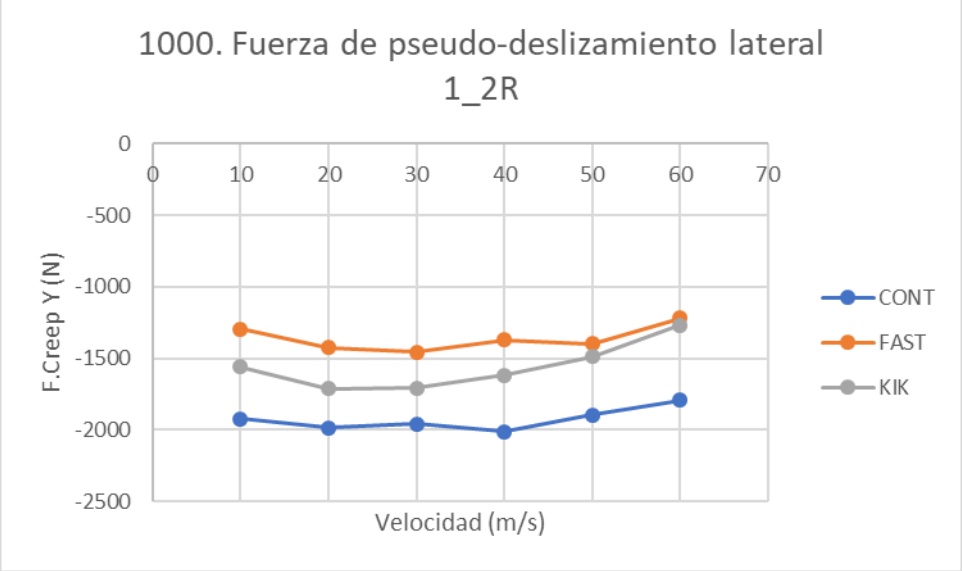

1000. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_1R
F.Creep X (N)
800
700
600
500
400
300
200
100
0
-100
-200
-300
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

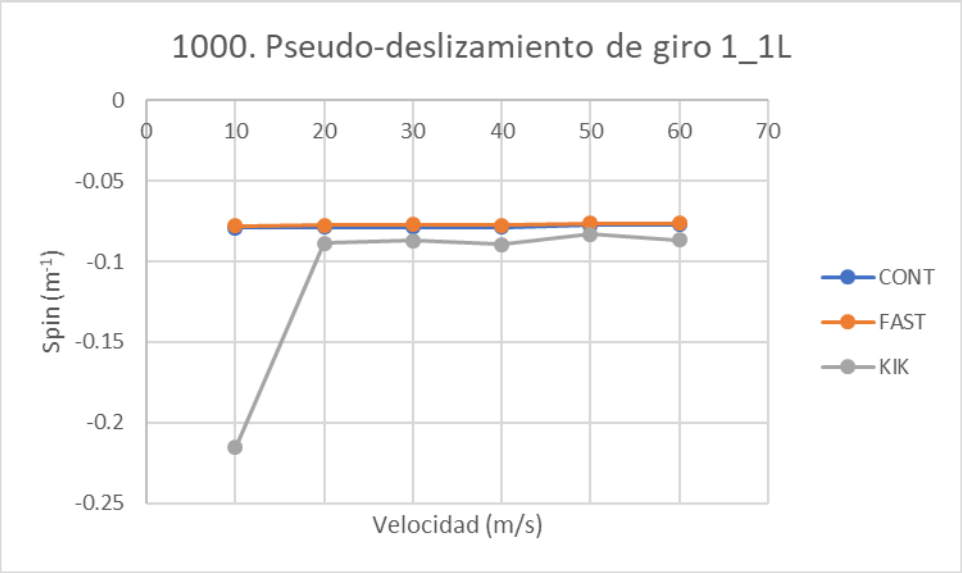

1000. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_2R
F.Creep X (N)
1000
800
600
400
200
0
-200
-400
-600
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

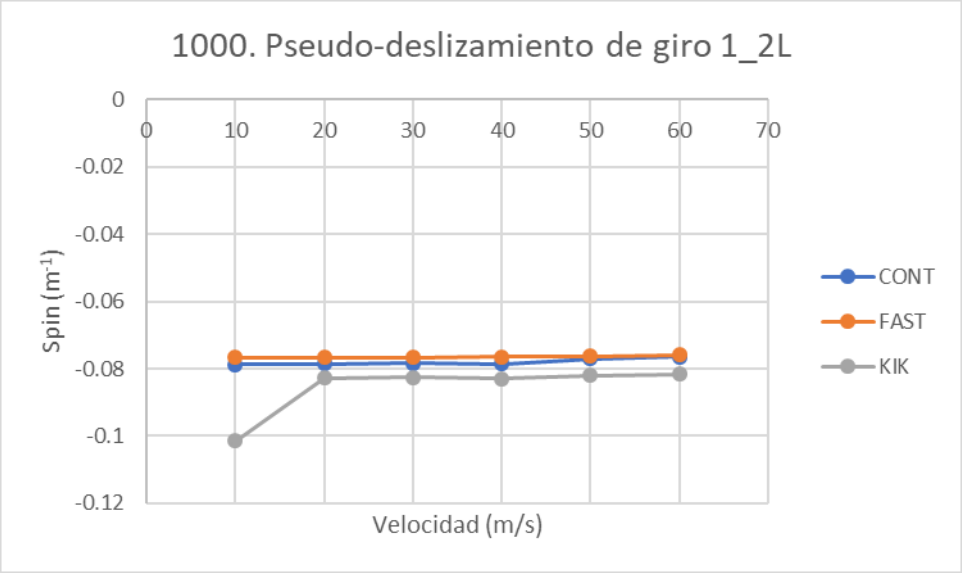

1000. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral 1_1L
F.Creep Y (N)
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

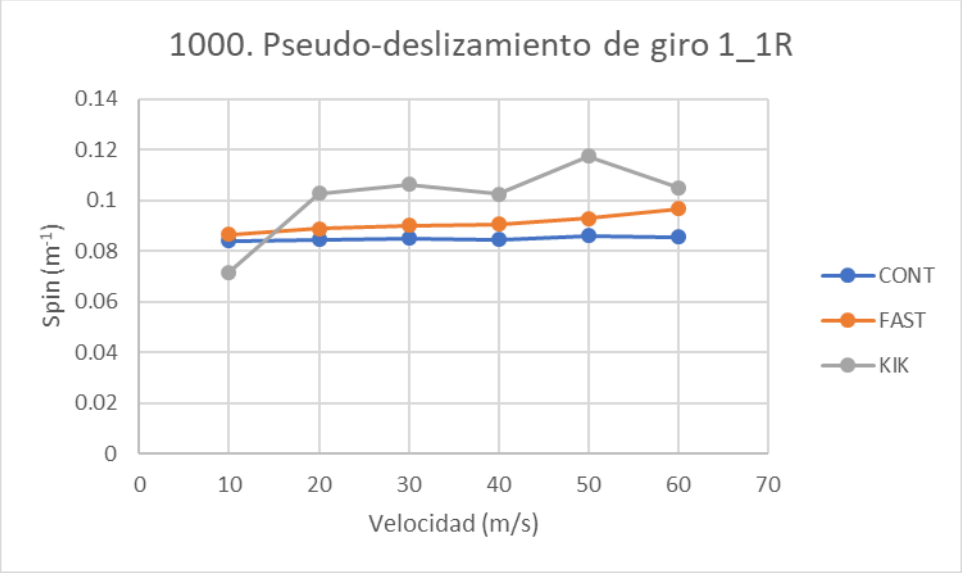

1000. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral
1_2L
F.Creep Y (N)
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

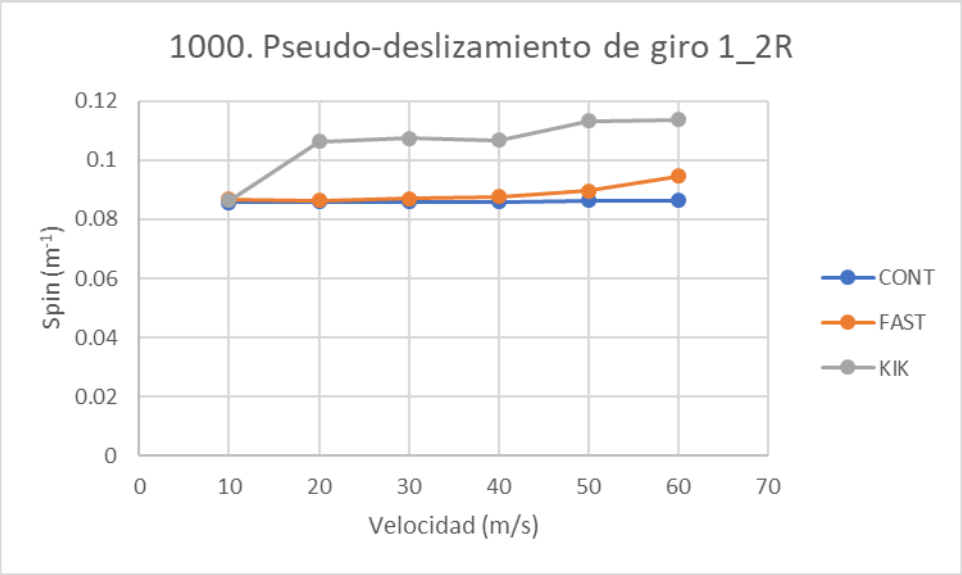

1000. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral
1_1R
F.Creep Y (N)
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

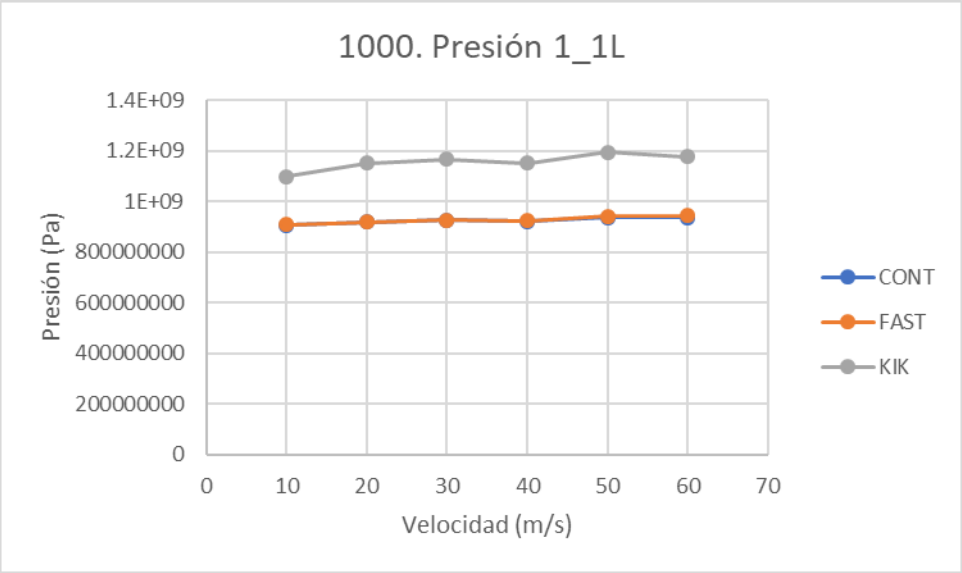

1000. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral
1_2R
F.Creep Y (N)
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

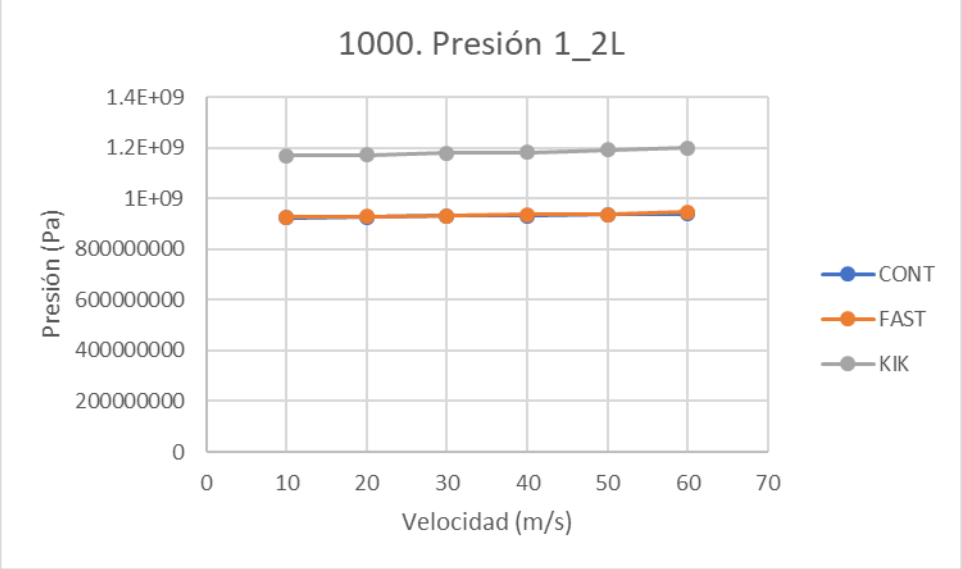

1000. Pseudo-deslizamiento de giro 1_1L
0
-0.05
-0.1
-0.15
-0.2
-0.25
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

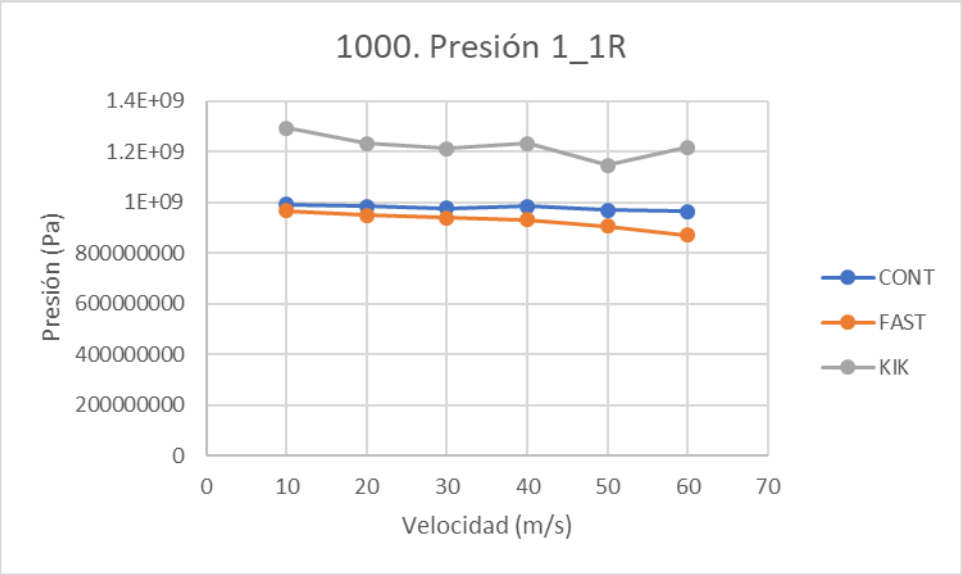

1000. Pseudo-deslizamiento de giro 1_2L
0
-0.02
-0.04
-0.06
-0.08
-0.1
-0.12
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

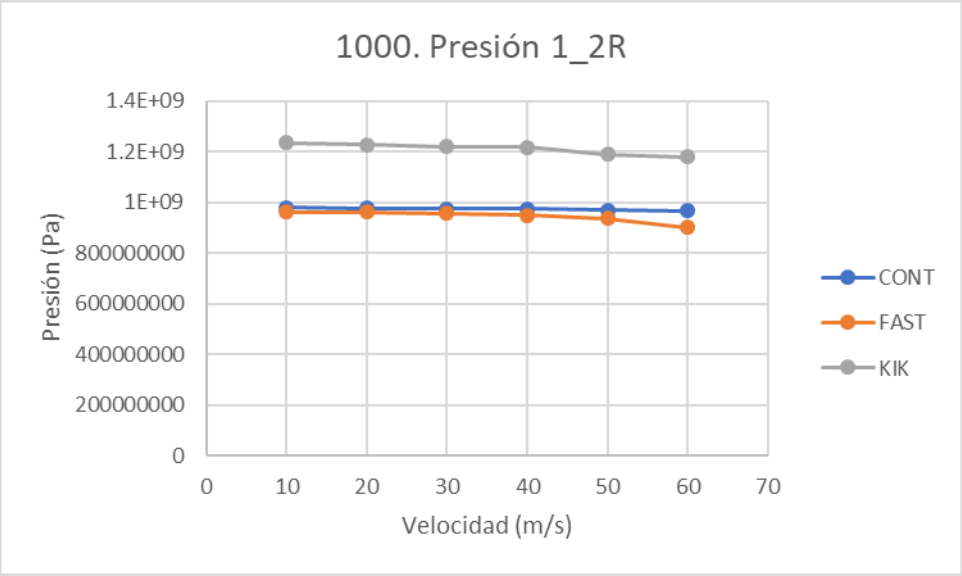

1000. Pseudo-deslizamiento de giro 1_1R
0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

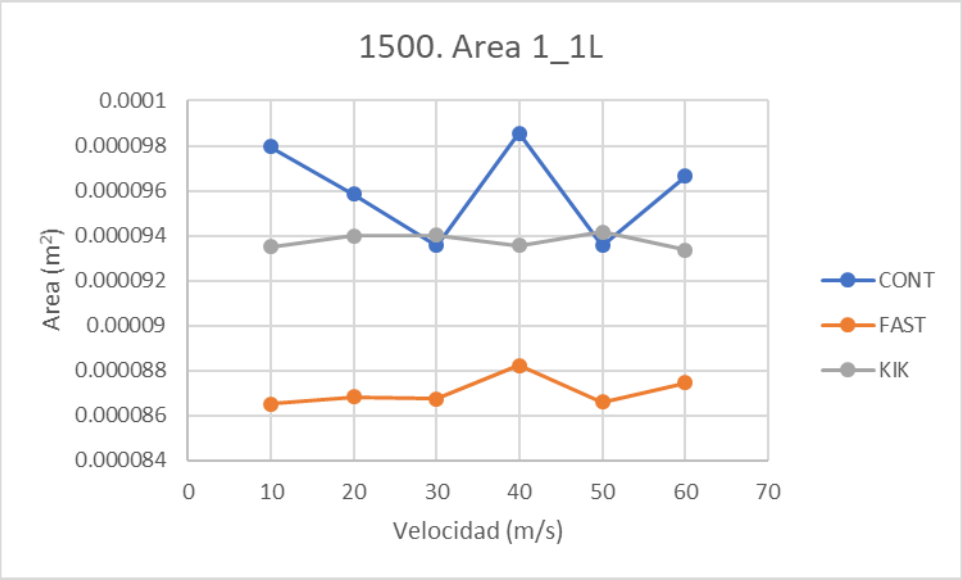

1000. Pseudo-deslizamiento de giro 1_2R
Spin (m-1)
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

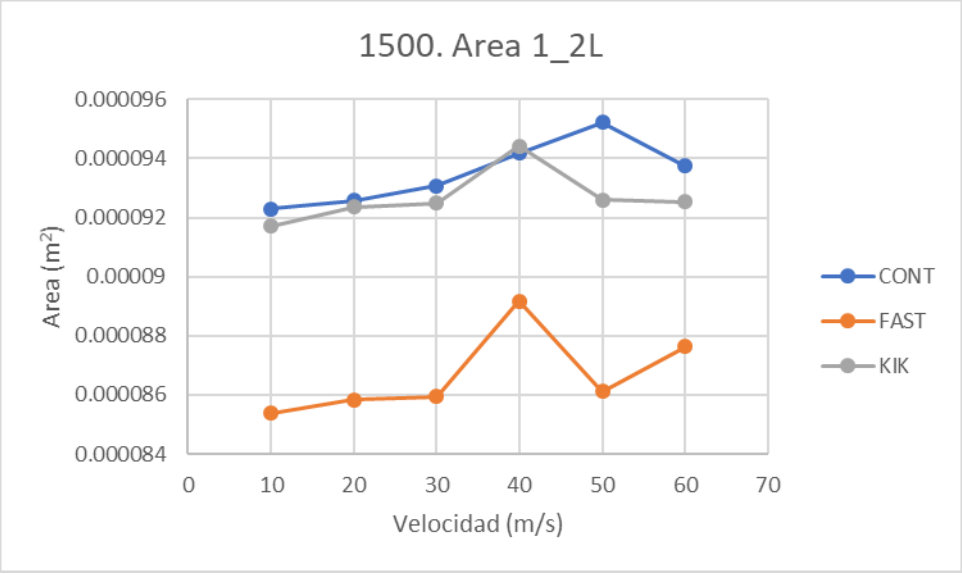

1000. Presión 1_1L
Presión (Pa)
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

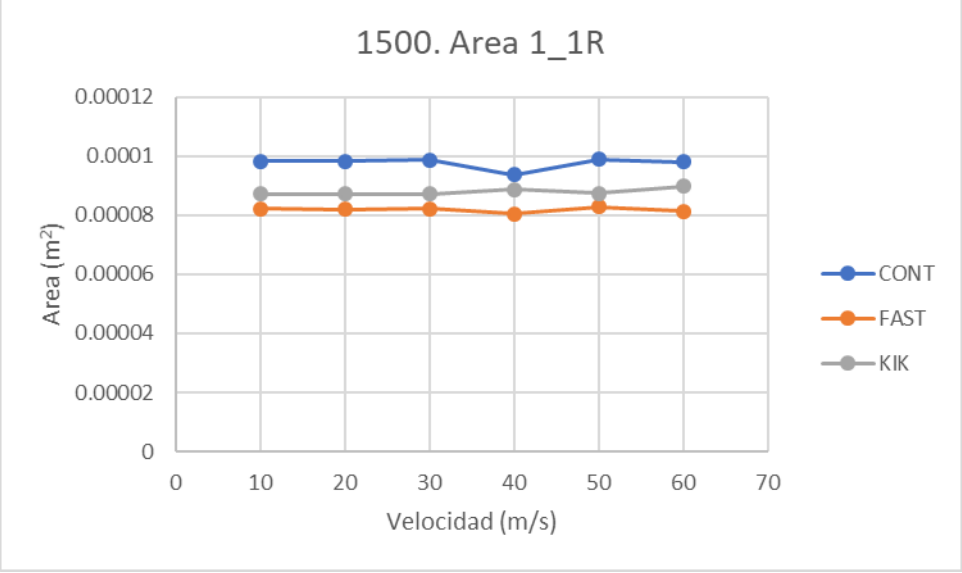

1000. Presión 1_2L
Presión (Pa)
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

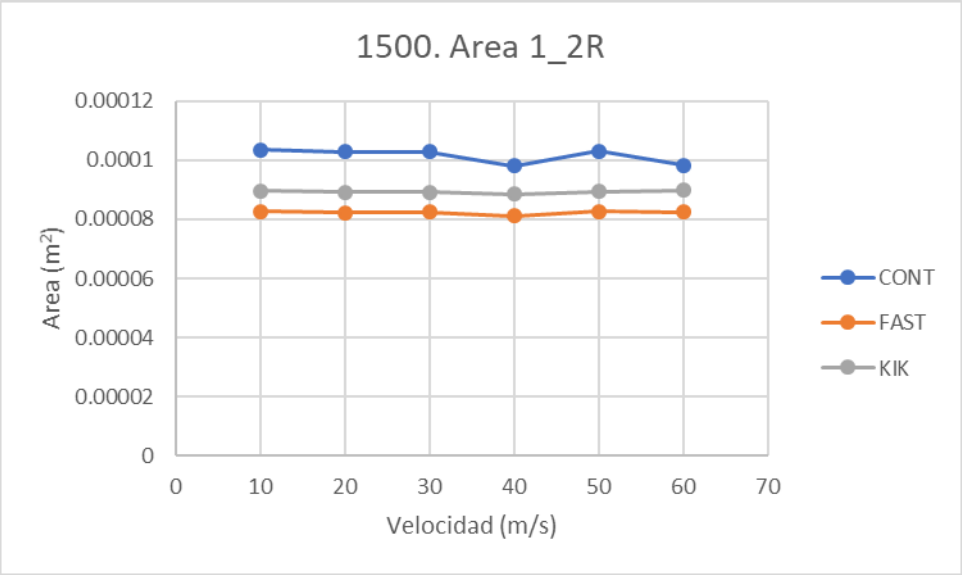

1000. Presión 1_1R
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

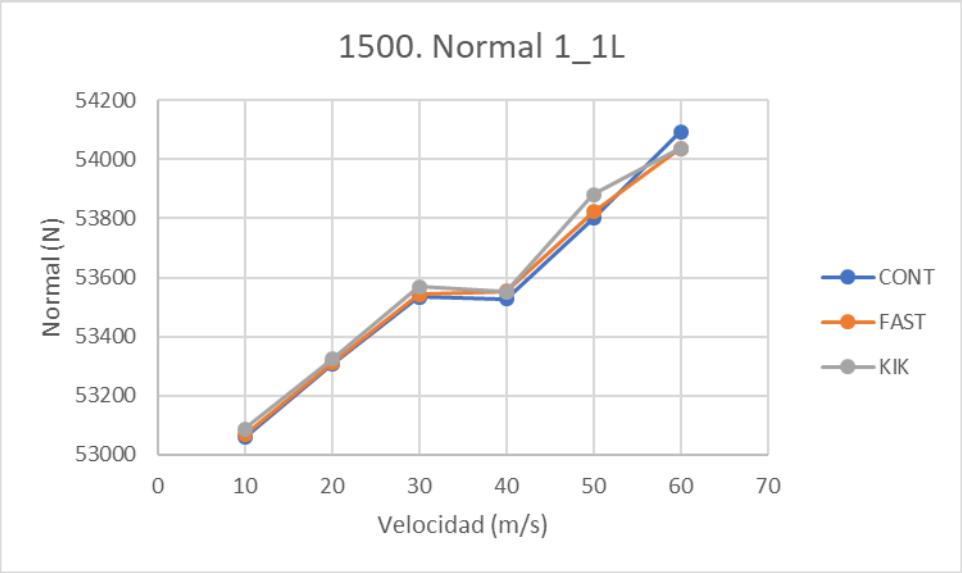

1000. Presión 1_2R
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

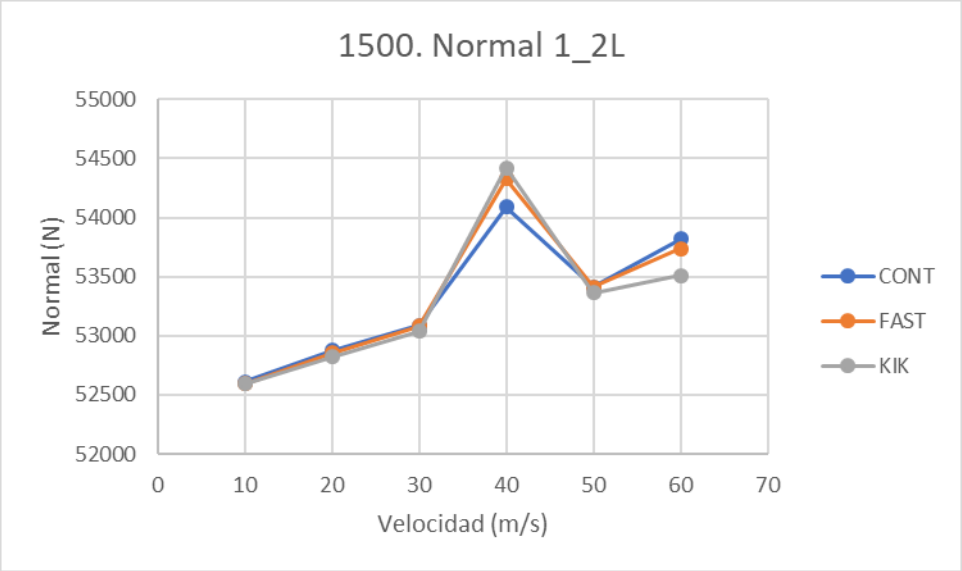

1500. Area 1_1L
0.0001
0.000098
0.000096
0.000094
0.000092
0.00009
0.000088
0.000086
0.000084
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

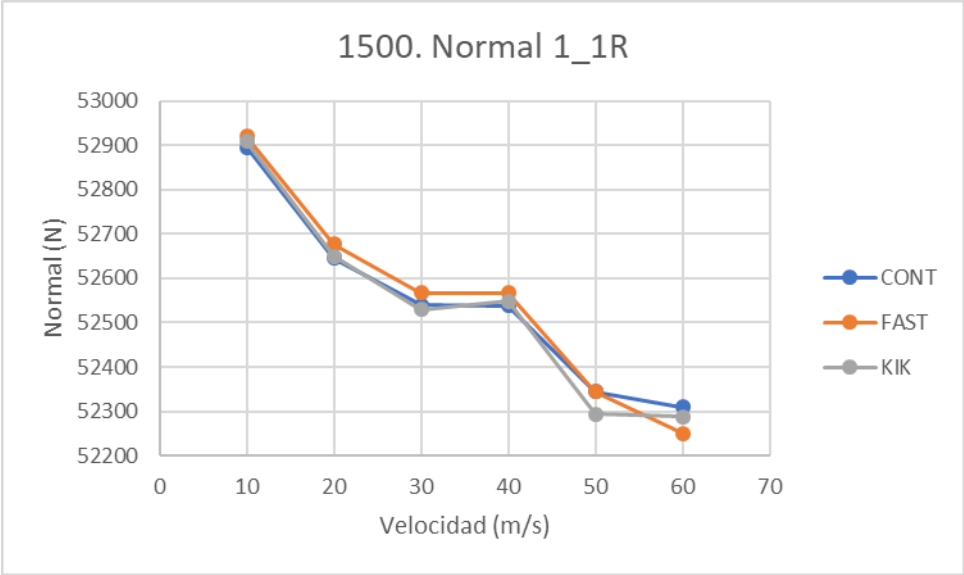

1500. Area 1_2L
0.000096
0.000094
0.000092
0.00009
0.000088
0.000086
0.000084
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

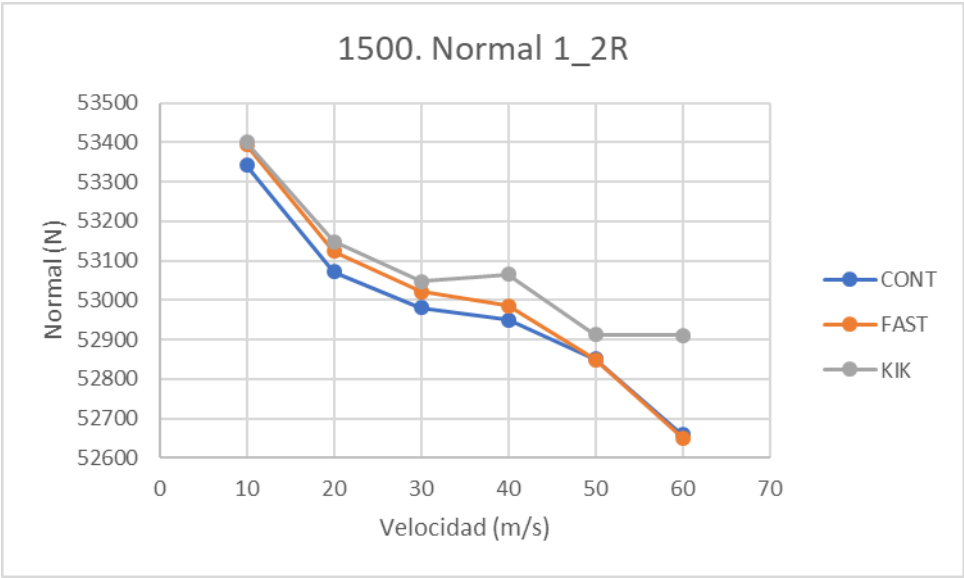

1500. Area 1_1R
0.00012
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

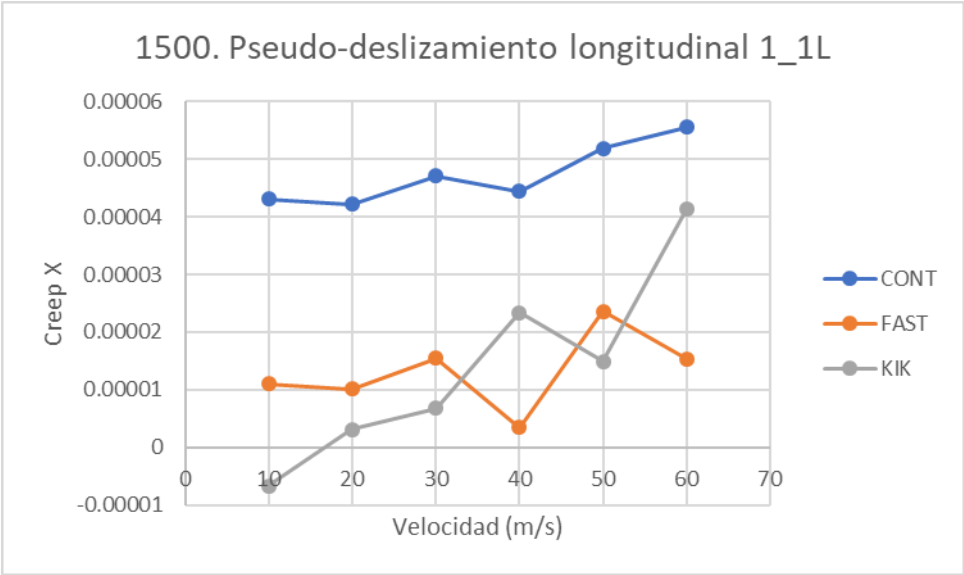

1500. Area 1_2R
0.00012
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

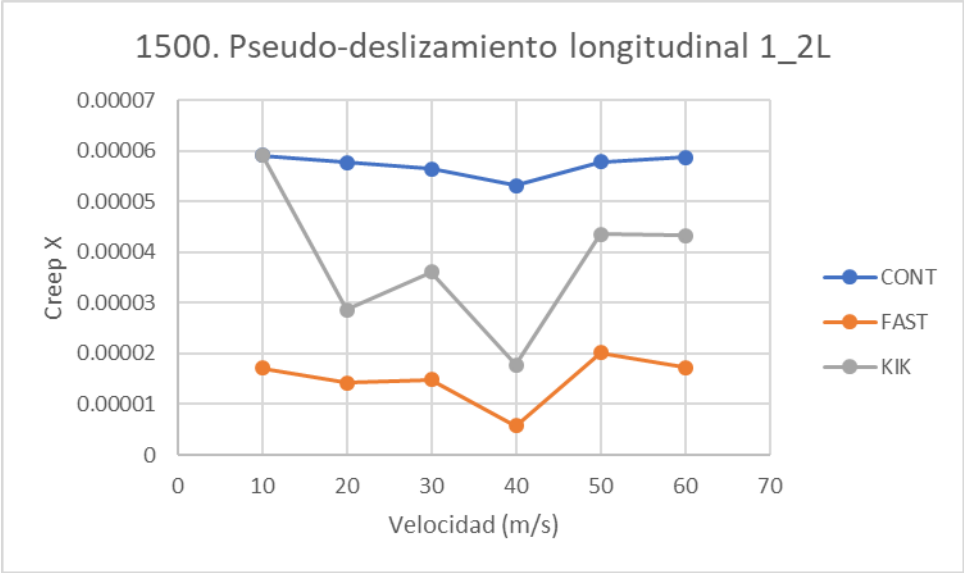

1500. Normal 1_1L
54200
54000
53800
53600
53400
53200
53000
Normal (N)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

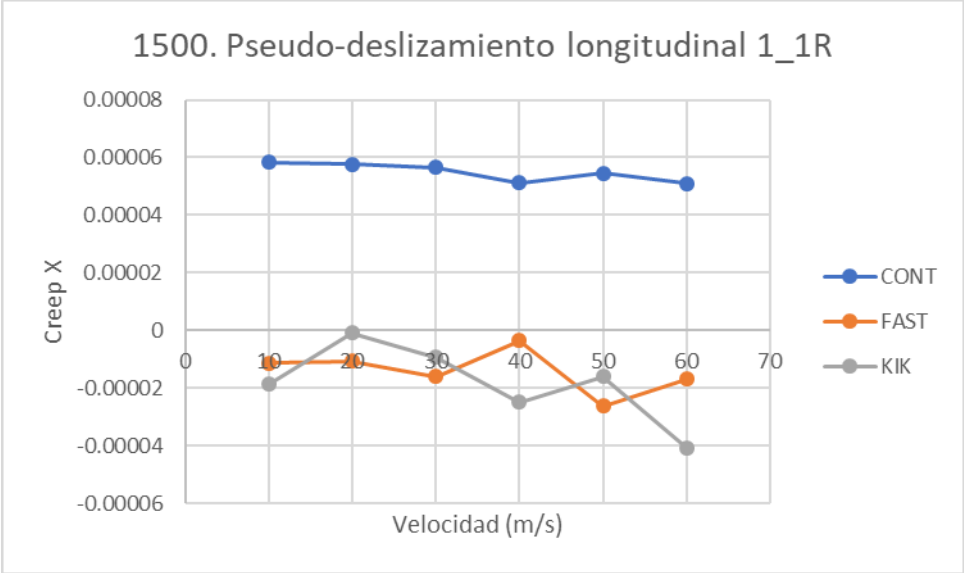

1500. Normal 1_2L
55000
54500
54000
53500
53000
52500
52000
Normal (N)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

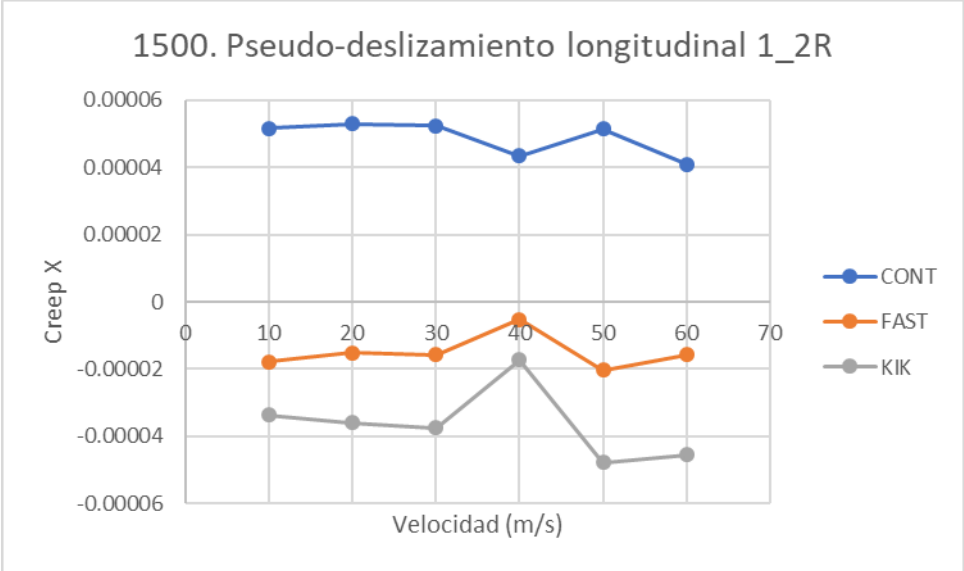

1500. Normal 1_1R
Normal (N)
53000
52900
52800
52700
52600
52500
52400
52300
52200
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

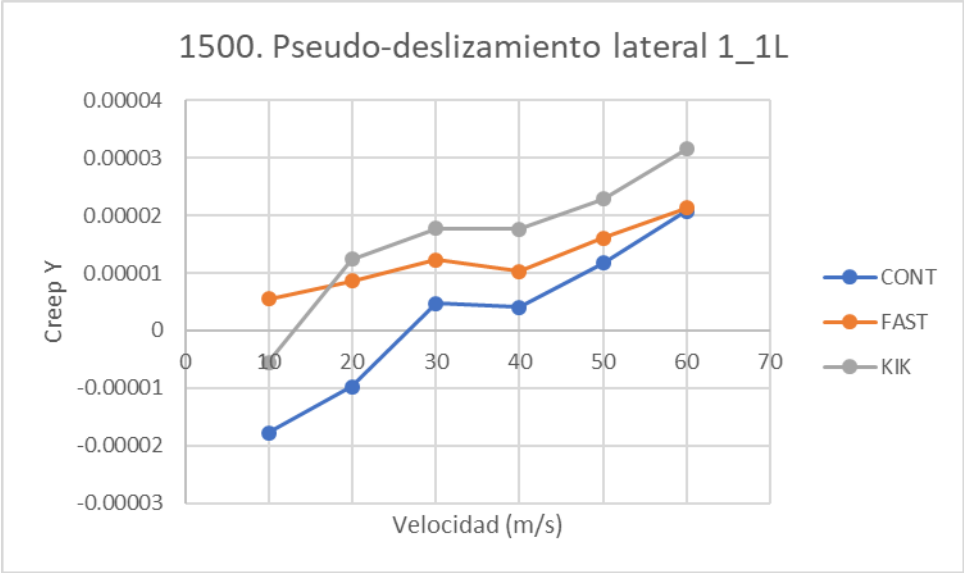

1500. Normal 1_2R
Normal (N)
53500
53400
53300
53200
53100
53000
52900
52800
52700
52600
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

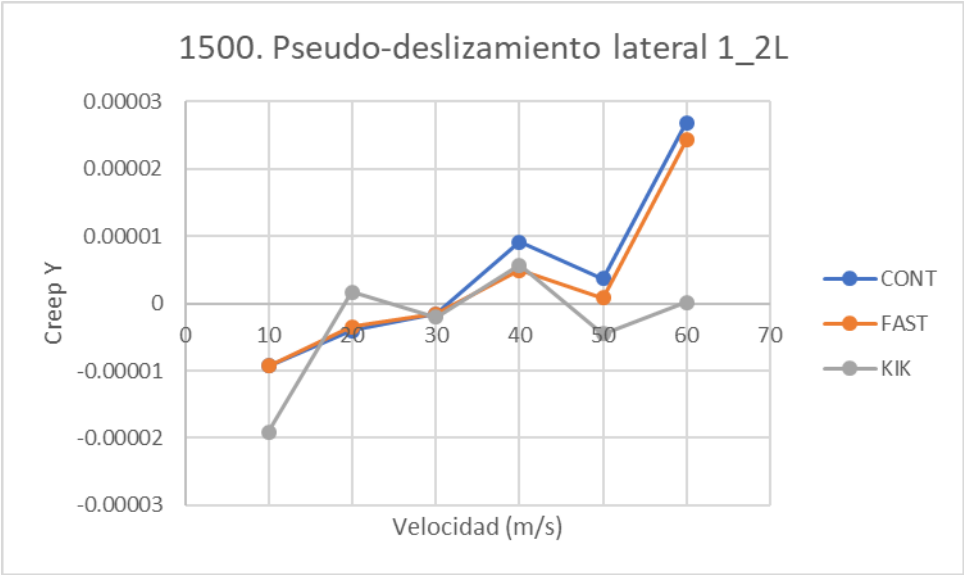

1500. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1L
Creep X
0.00006
0.00005
0.00004
0.00003
0.00002
0.00001
0
-0.00001
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

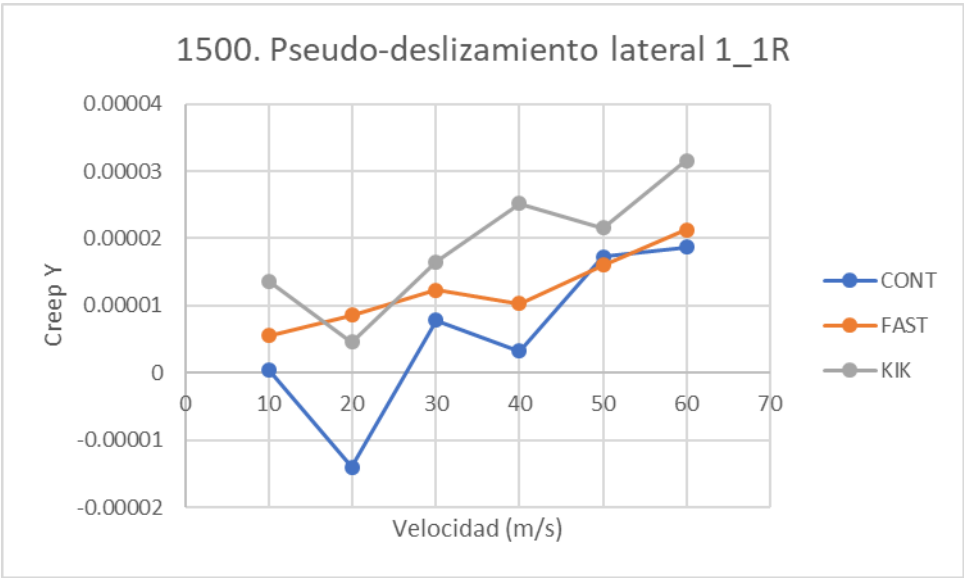

1500. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_2L
0.00007
0.00006
0.00005
0.00004
0.00003
0.00002
0.00001
0
Creep X
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

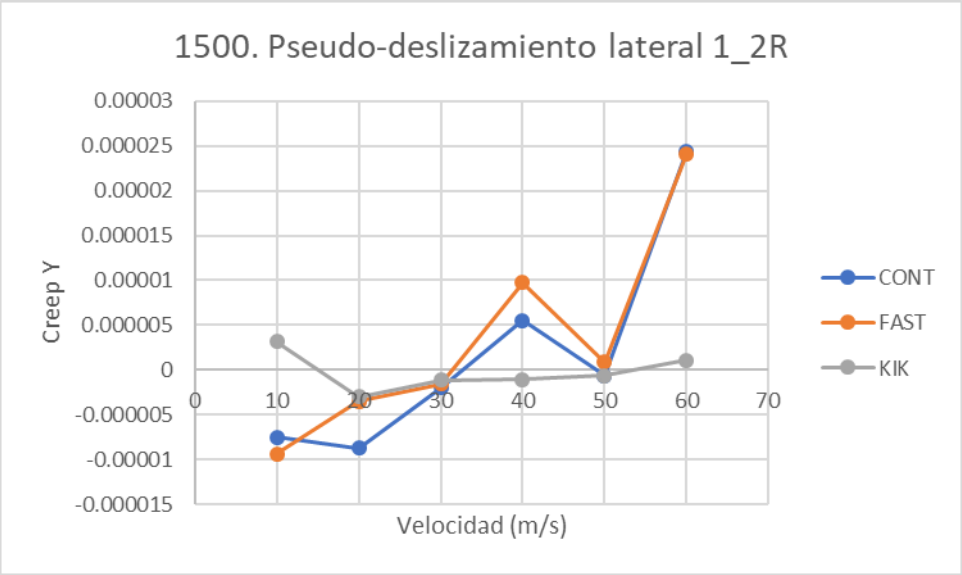

1500. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1R
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
-0.00002
-0.00004
-0.00006
Creep X
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

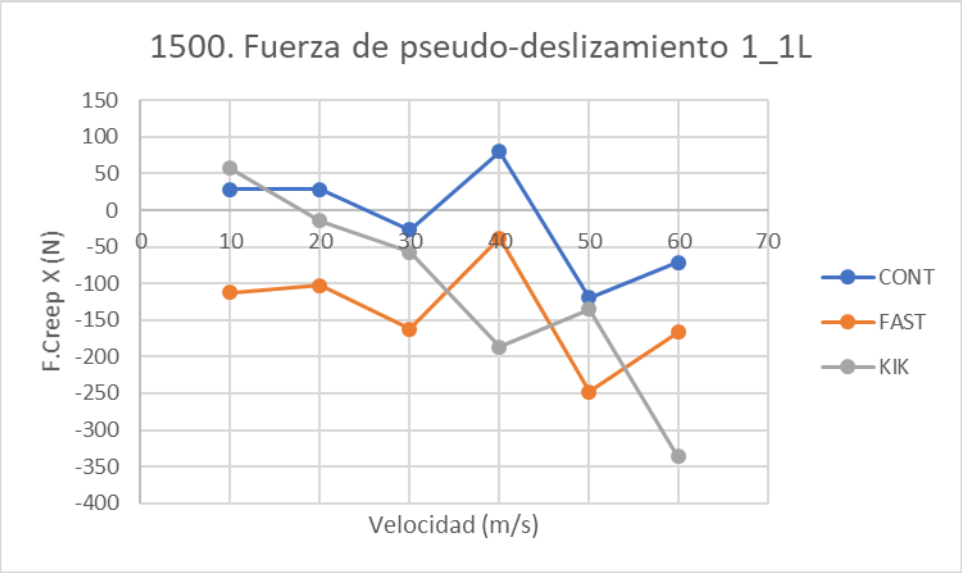

1500. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_2R
0.00006
0.00004
0.00002
0
-0.00002
-0.00004
-0.00006
Creep X
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

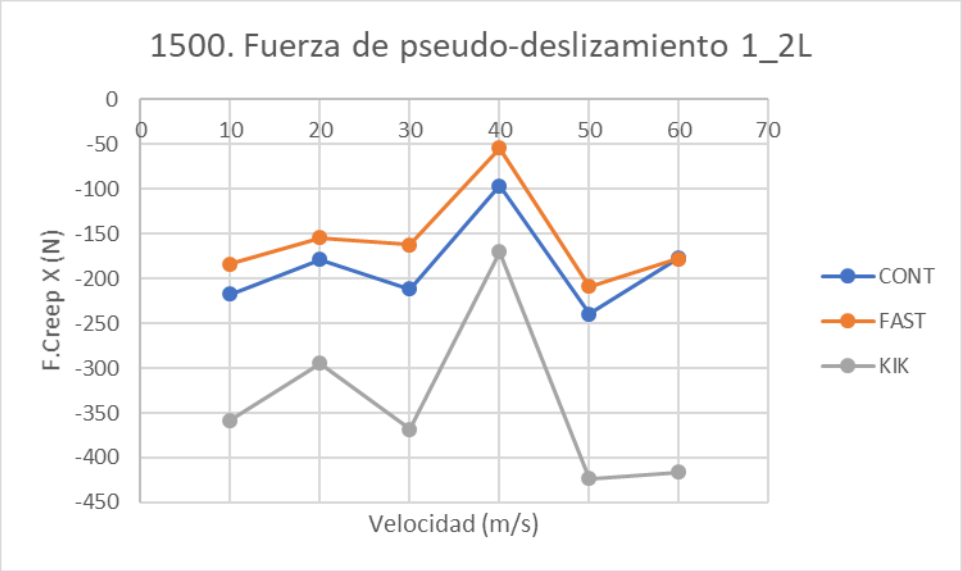

1500. Pseudo-deslizamiento lateral 1_1L
0.00004
0.00003
0.00002
0.00001
0
-0.00001
-0.00002
-0.00003
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

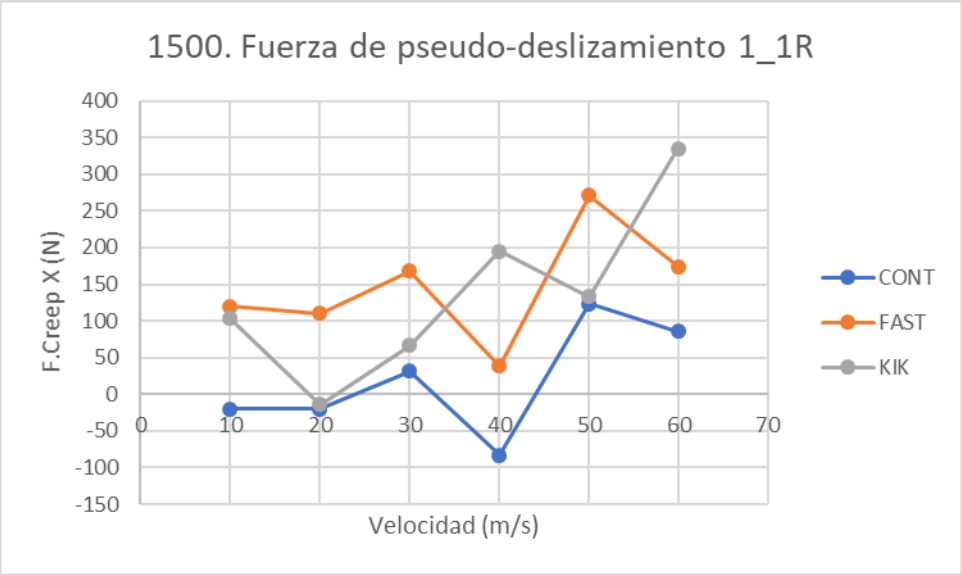

1500. Pseudo-deslizamiento lateral 1_2L
0.00003
0.00002
0.00001
0
-0.00001
-0.00002
-0.00003
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

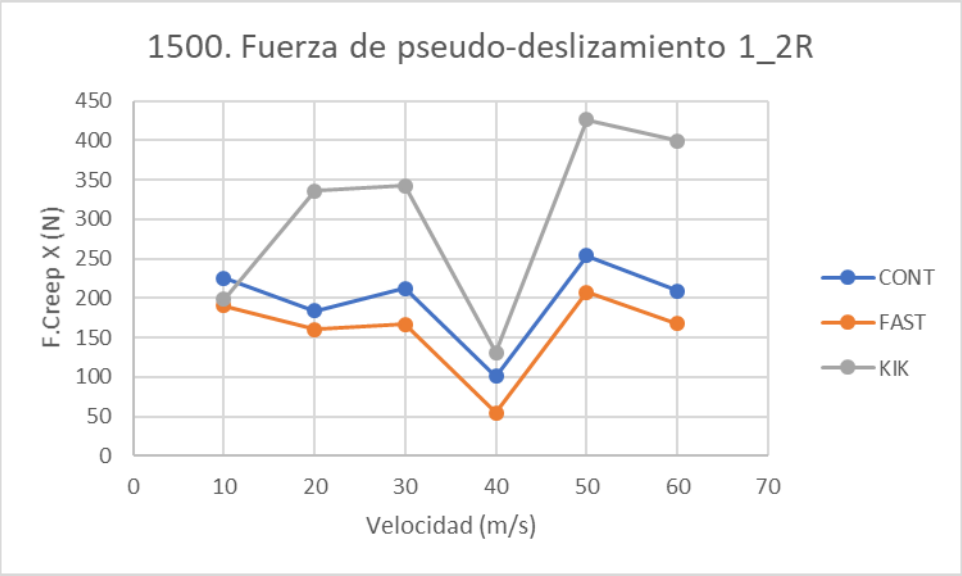

1500. Pseudo-deslizamiento lateral 1_1R
0.00004
0.00003
0.00002
0.00001
0
-0.00001
-0.00002
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

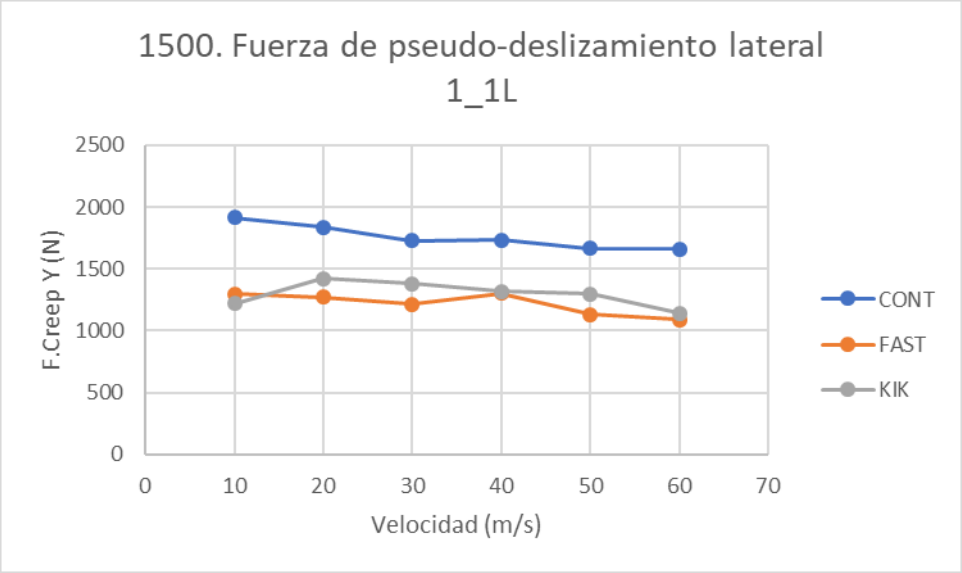

1500. Pseudo-deslizamiento lateral 1_2R
Creep Y
0.00003
0.000025
0.00002
0.000015
0.00001
0.000005
0
-0.000005
-0.00001
-0.000015
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

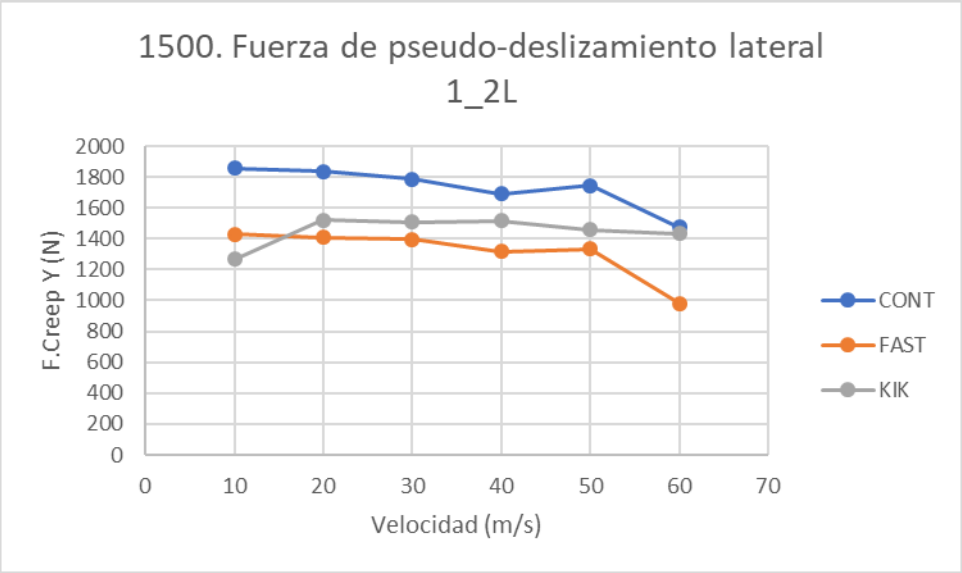

1500. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_1L
F.Creep X (N)
150
100
50
0
-50
-100
-150
-200
-250
-300
-350
-400
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

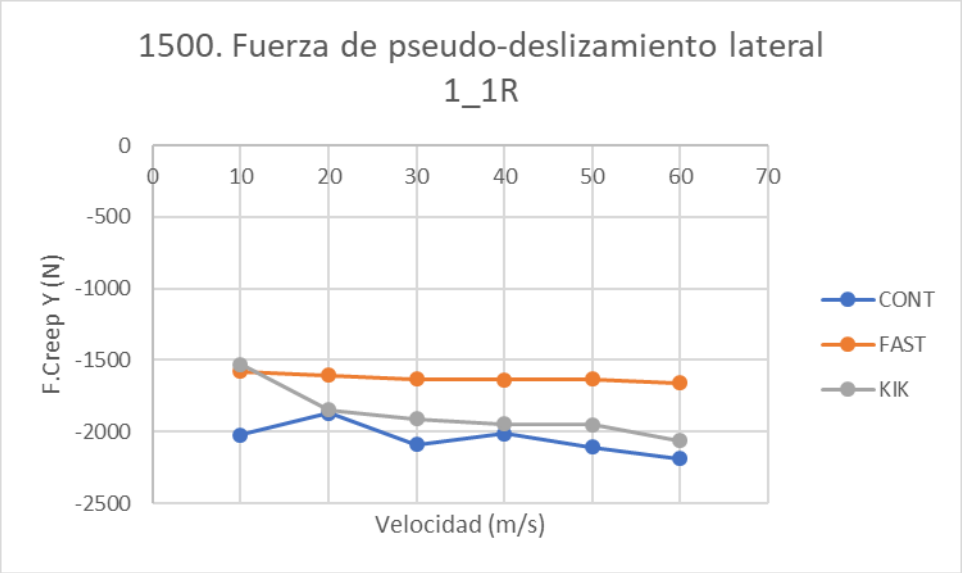

1500. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_2L
F.Creep X (N)
0
-50
-100
-150
-200
-250
-300
-350
-400
-450
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

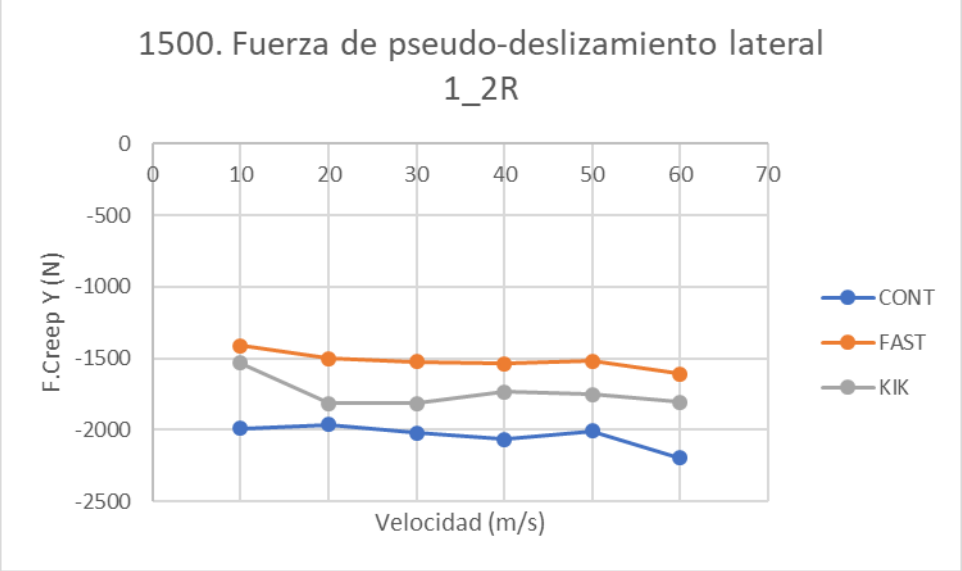

1500. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_1R
F.Creep X (N)
400
350
300
250
200
150
100
50
0
-50
-100
-150
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

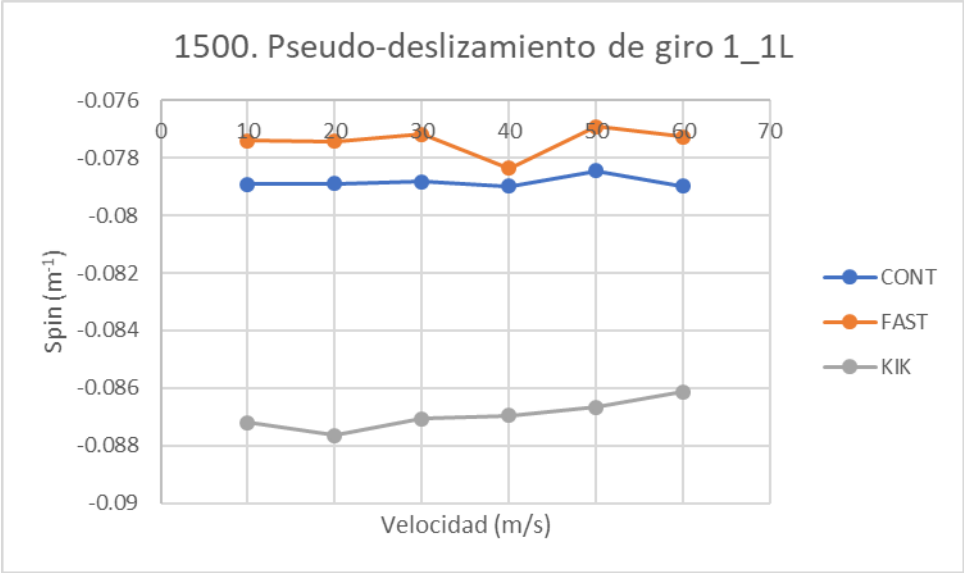

1500. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_2R
F.Creep X (N)
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

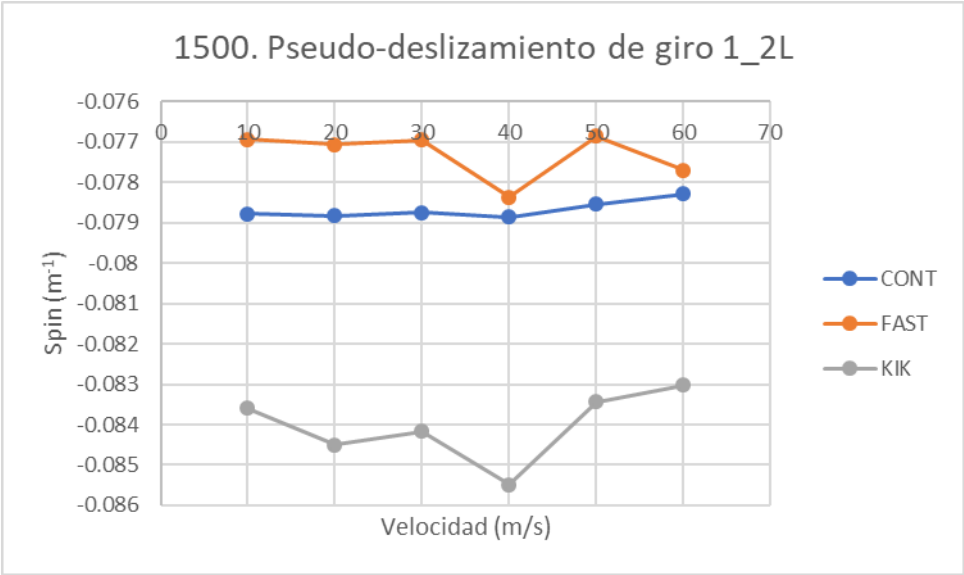

1500. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral 1_1L
F.Creep Y (N)
2500
2000
1500
1000
500
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

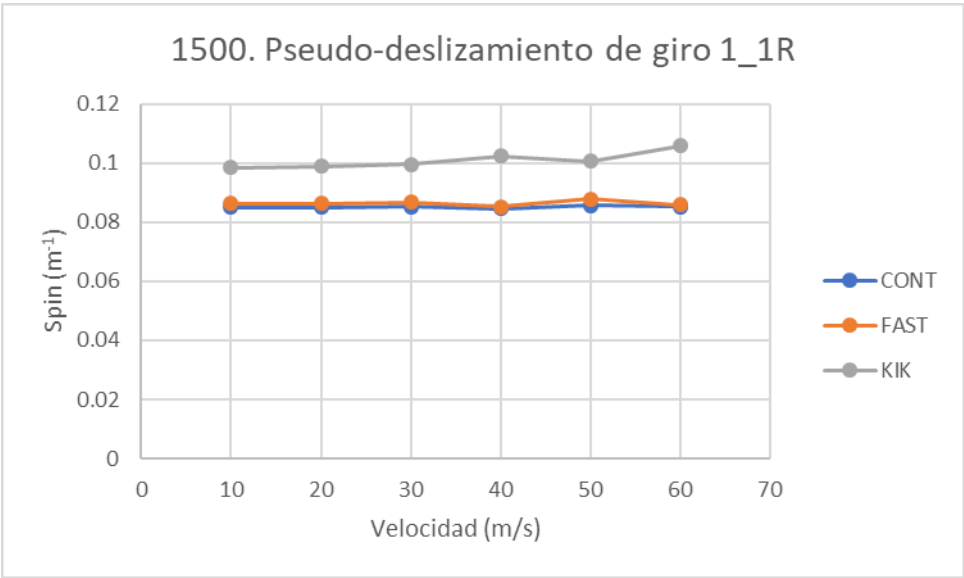

1500. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral
1_2L
F.Creep Y (N)
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

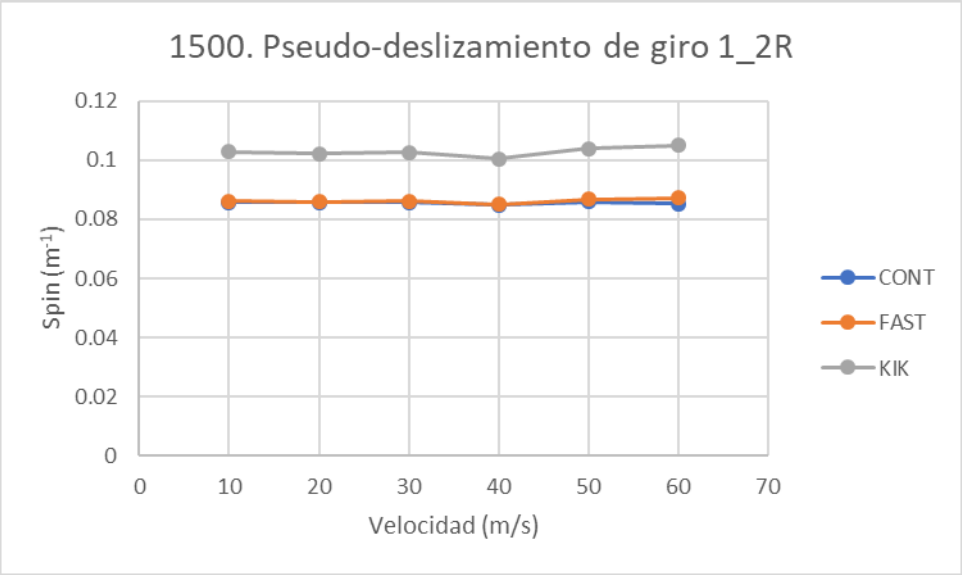

1500. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral
1_1R
F.Creep Y (N)
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

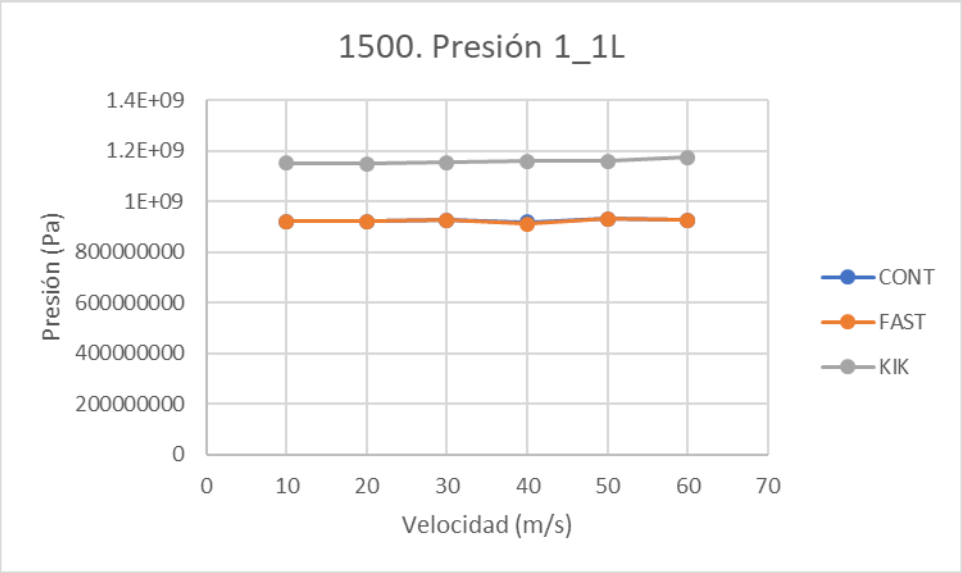

1500. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral
1_2R
F.Creep Y (N)
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

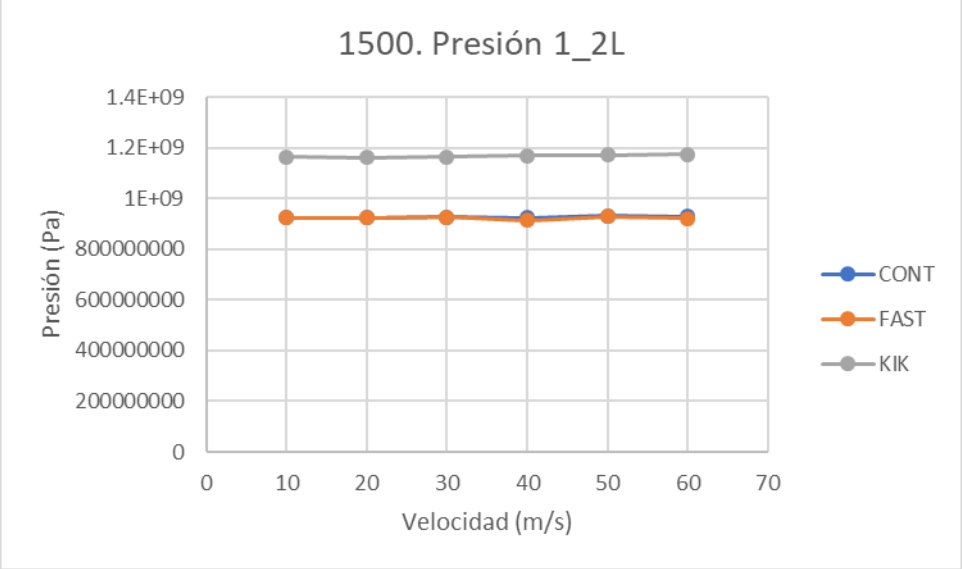

1500. Pseudo-deslizamiento de giro 1_1L
-0.076
-0.078
-0.08
-0.082
-0.084
-0.086
-0.088
-0.09
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

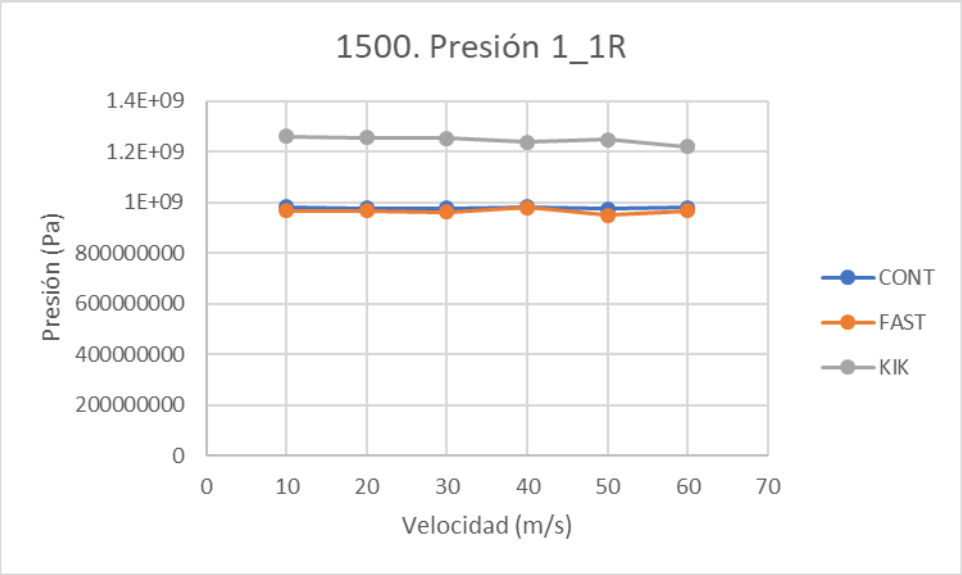

1500. Pseudo-deslizamiento de giro 1_2L
-0.076
-0.077
-0.078
-0.079
-0.08
-0.081
-0.082
-0.083
-0.084
-0.085
-0.086
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

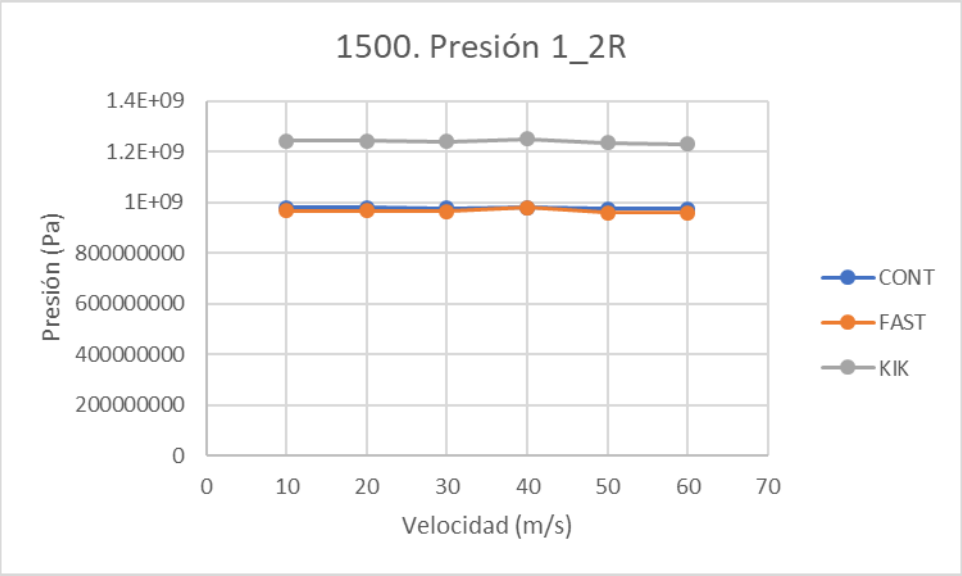

1500. Pseudo-deslizamiento de giro 1_1R
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

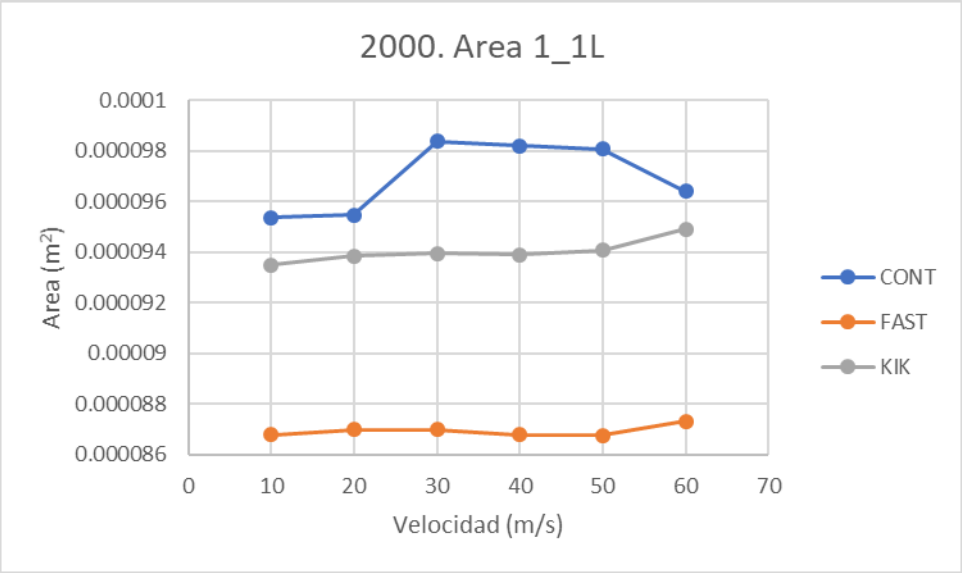

1500. Pseudo-deslizamiento de giro 1_2R
Spin (m-1)
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

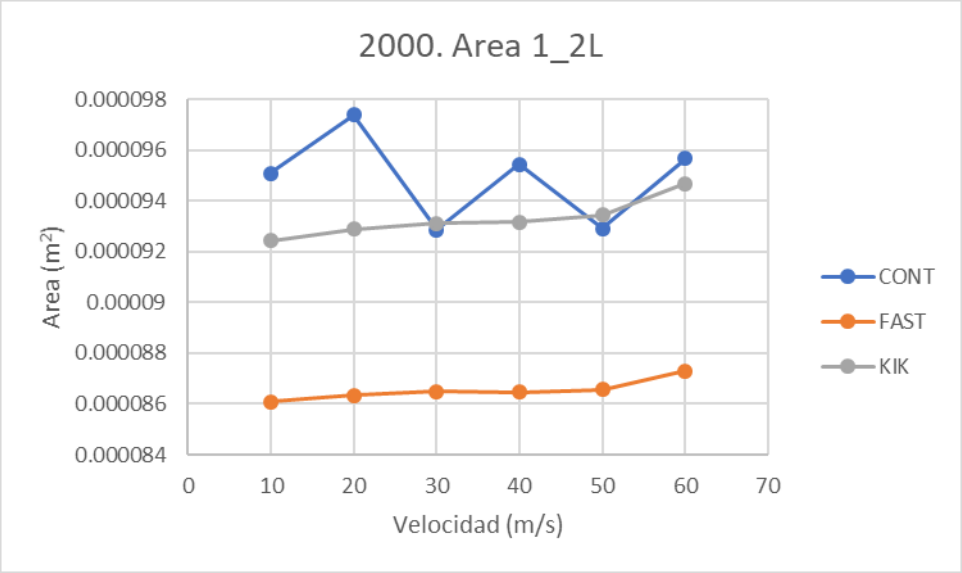

1500. Presión 1_1L
Presión (Pa)
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

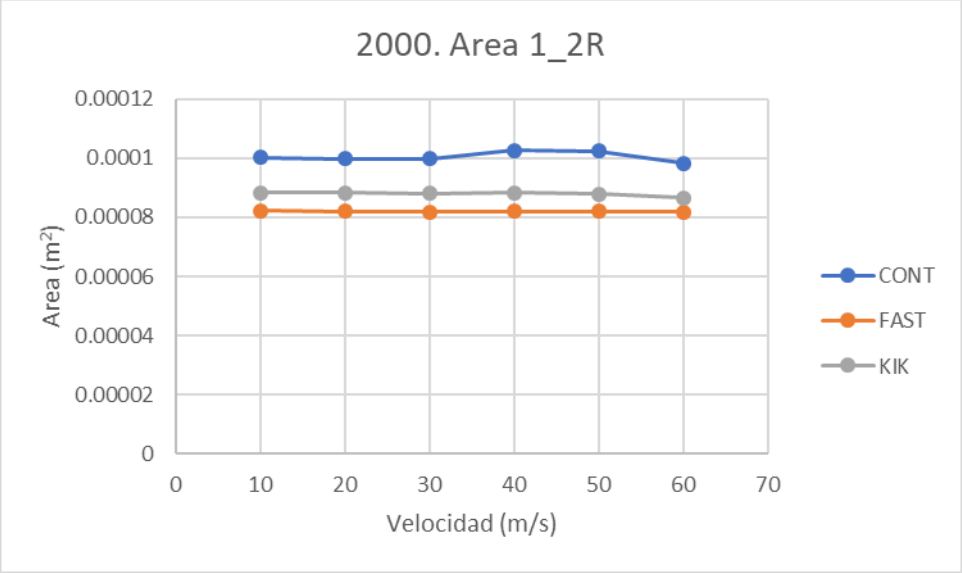

1500. Presión 1_2L
Presión (Pa)
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

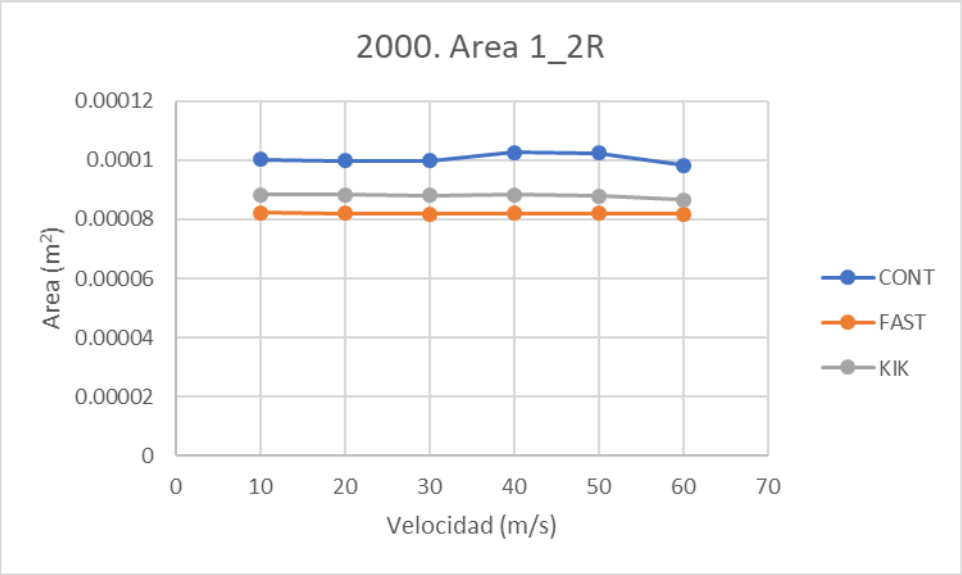

1500. Presión 1_1R
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

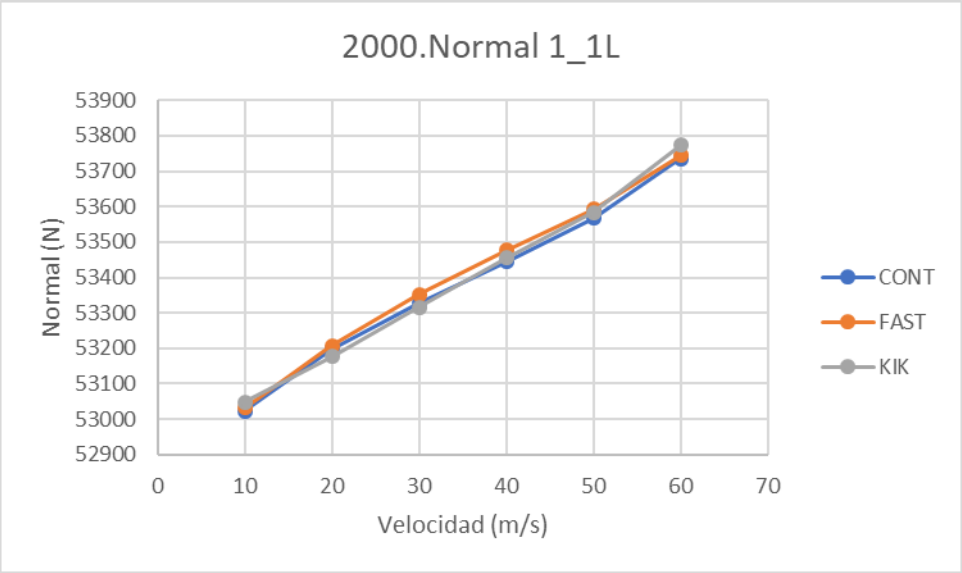

1500. Presión 1_2R
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

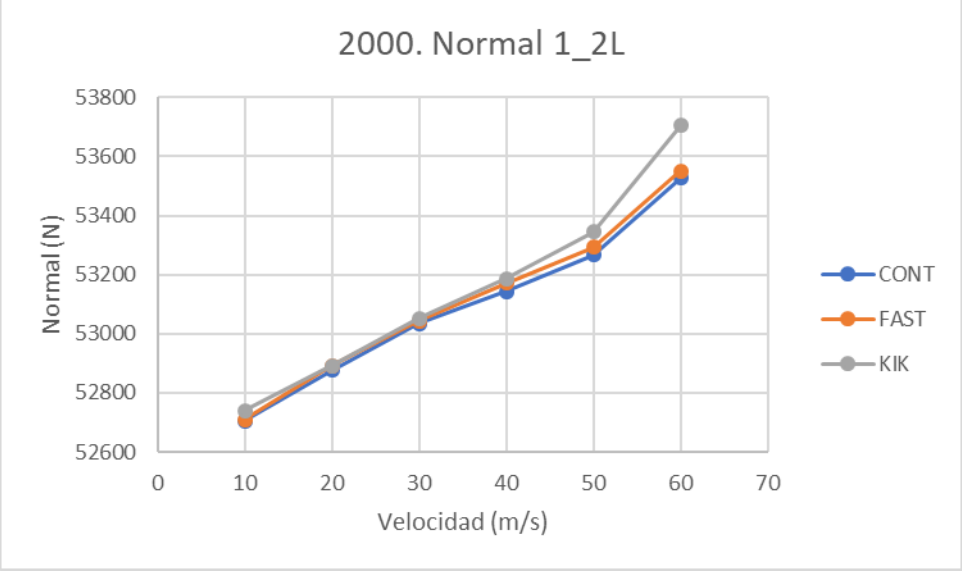

2000. Area 1_1L
0.0001
0.000098
0.000096
0.000094
0.000092
0.00009
0.000088
0.000086
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

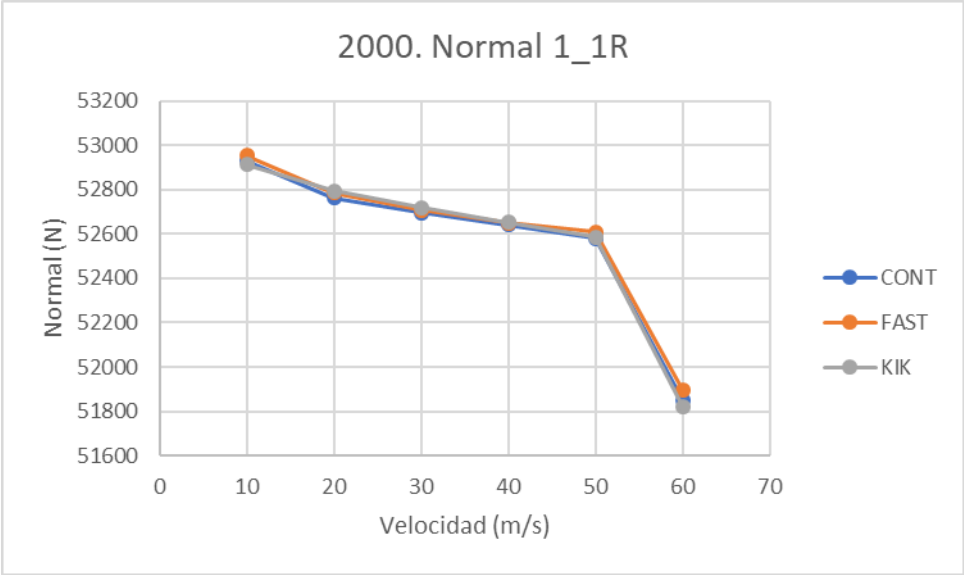

2000. Area 1_2L
0.000098
0.000096
0.000094
0.000092
0.00009
0.000088
0.000086
0.000084
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

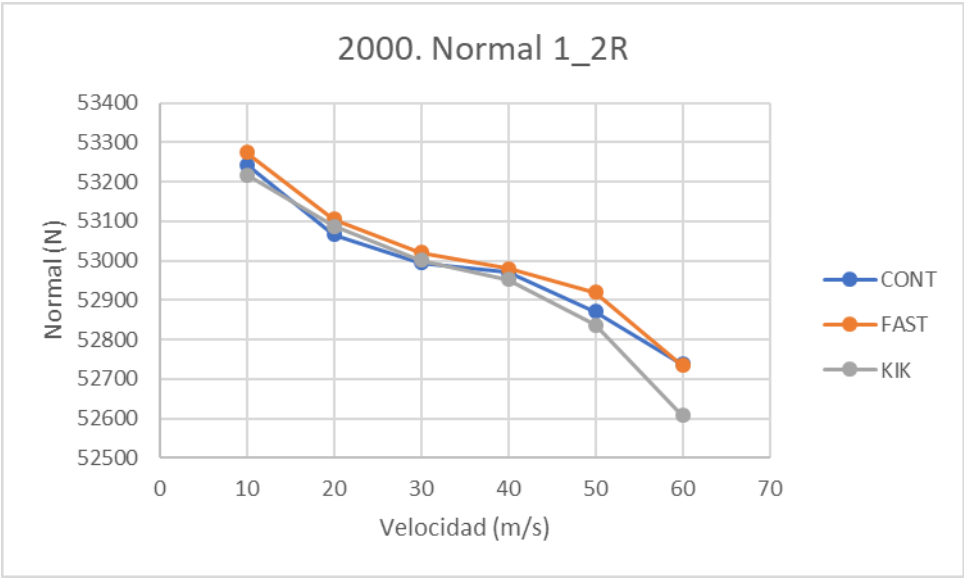

2000. Area 1_2R
0.00012
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

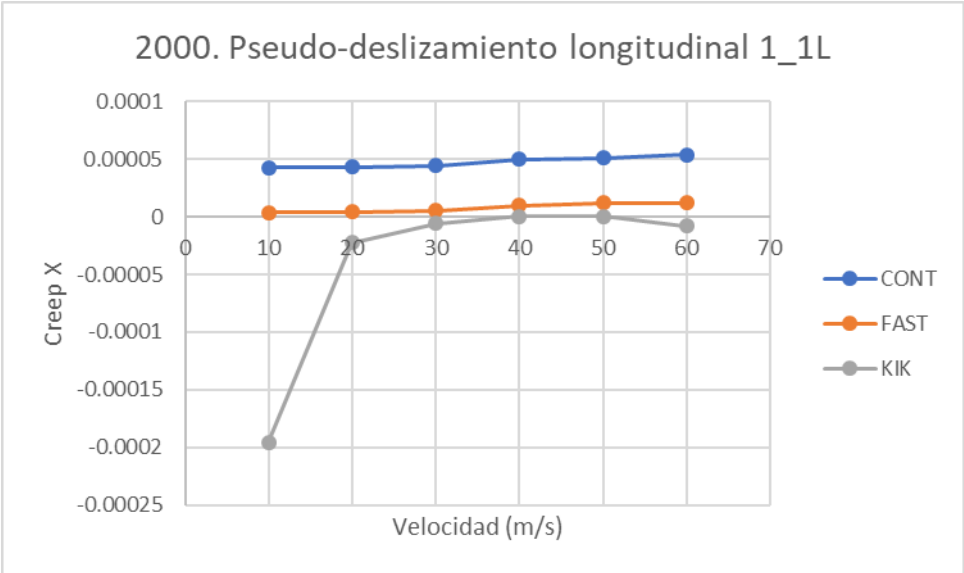

2000. Area 1_2R
0.00012
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

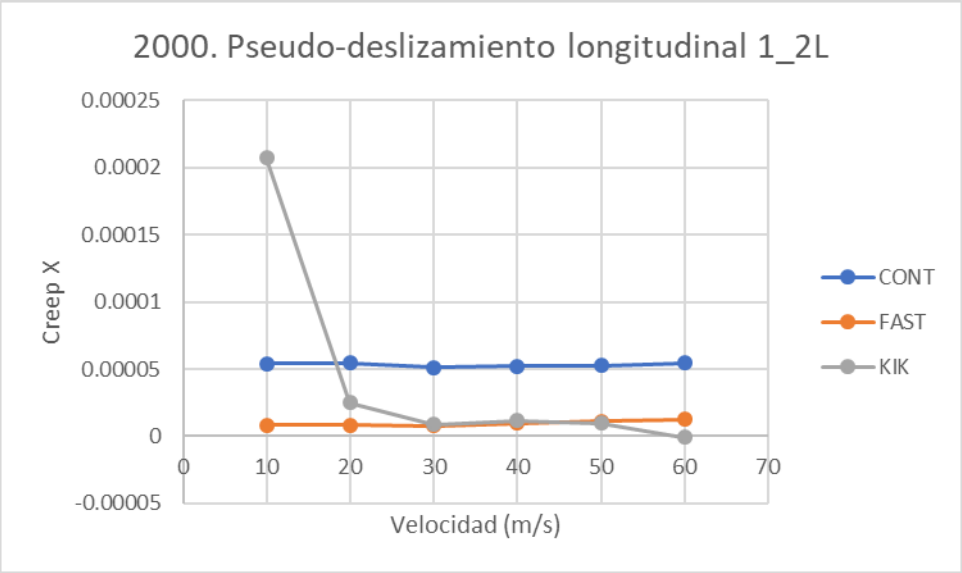

2000.Normal 1_1L
53900
53800
53700
53600
53500
53400
53300
53200
53100
53000
52900
Normal (N)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

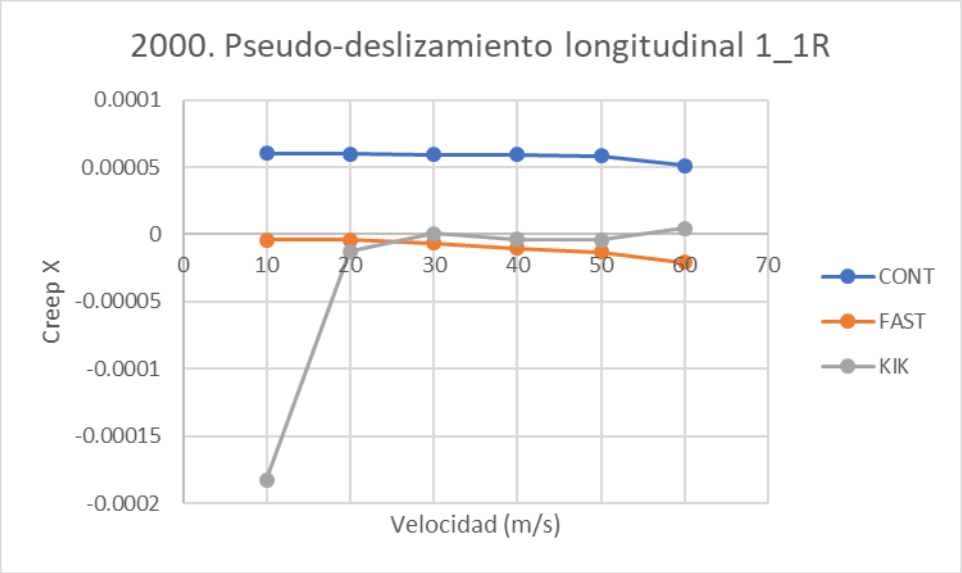

2000. Normal 1_2L
53800
53600
53400
53200
53000
52800
52600
Normal (N)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

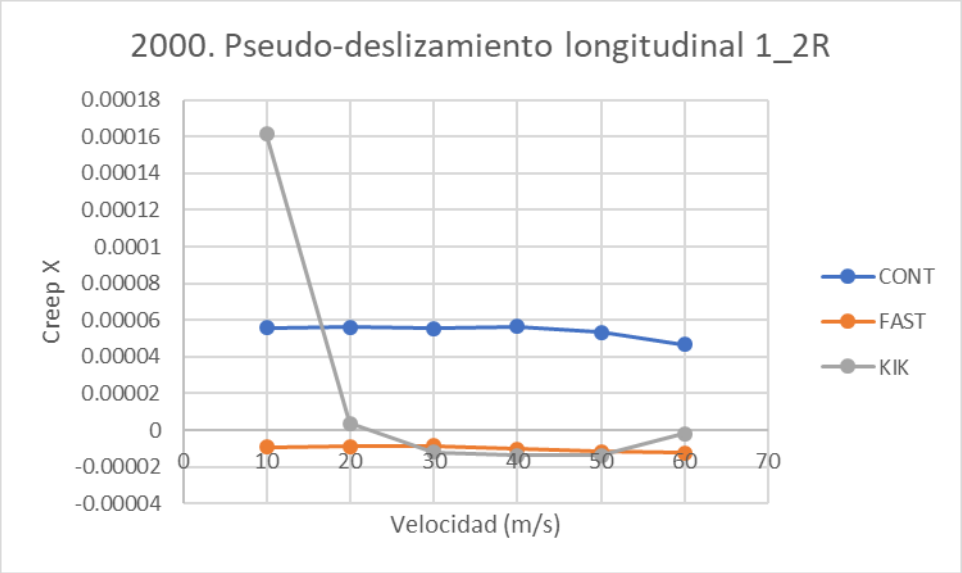

2000. Normal 1_1R
Normal (N)
53200
53000
52800
52600
52400
52200
52000
51800
51600
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

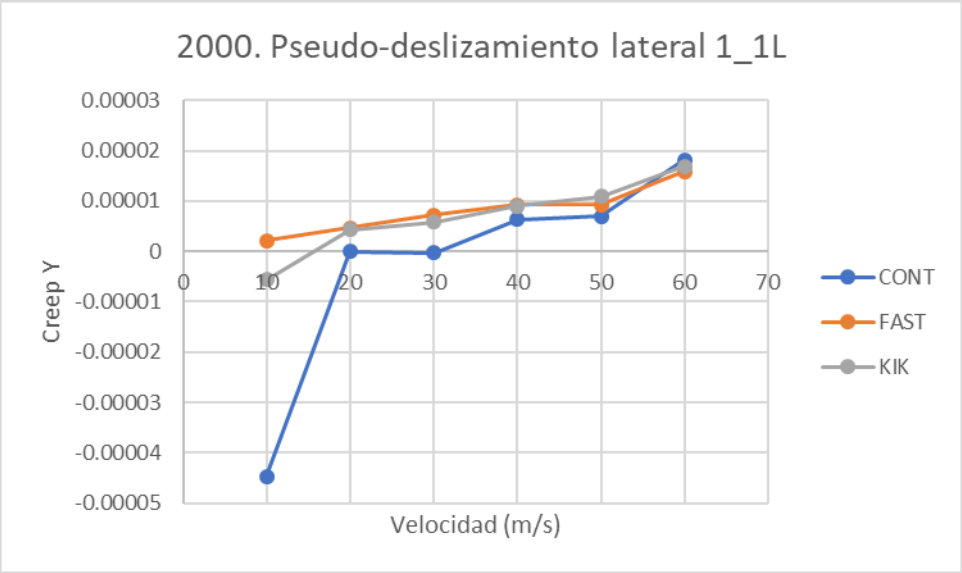

2000. Normal 1_2R
Normal (N)
53400
53300
53200
53100
53000
52900
52800
52700
52600
52500
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

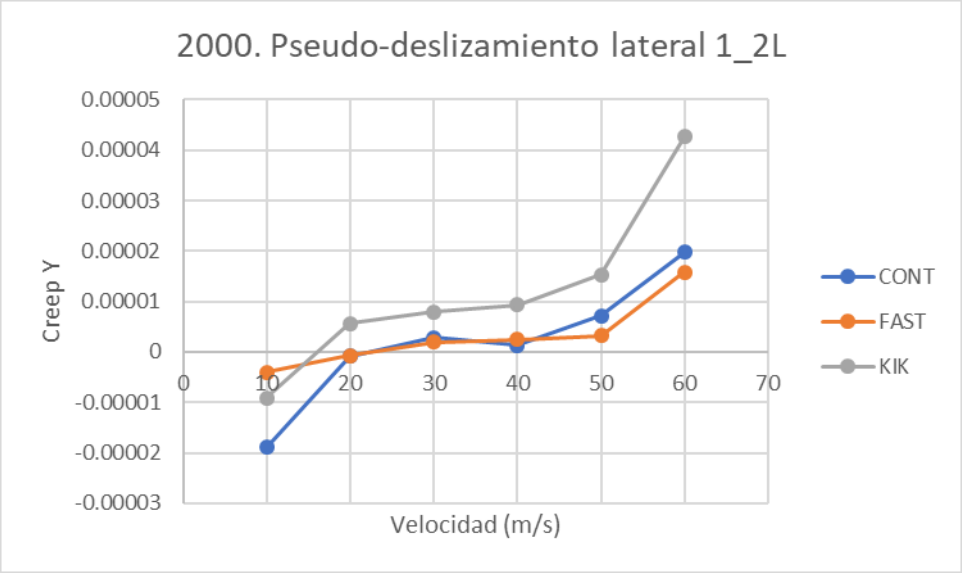

2000. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1L
Creep X
0.0001
0.00005
0
-0.00005
-0.0001
-0.00015
-0.0002
-0.00025
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

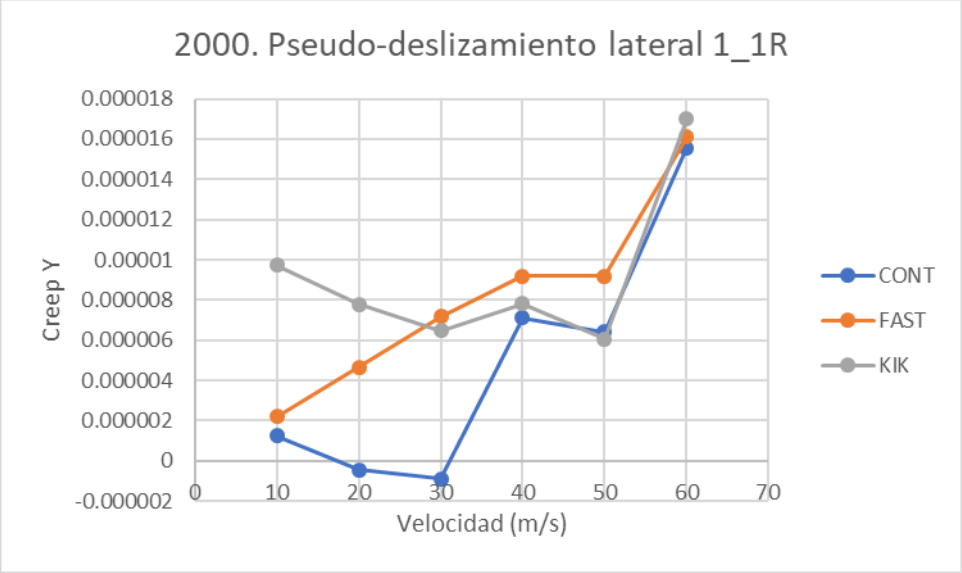

2000. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_2L
Creep X
0.00025
0.0002
0.00015
0.0001
0.00005
0
-0.00005
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

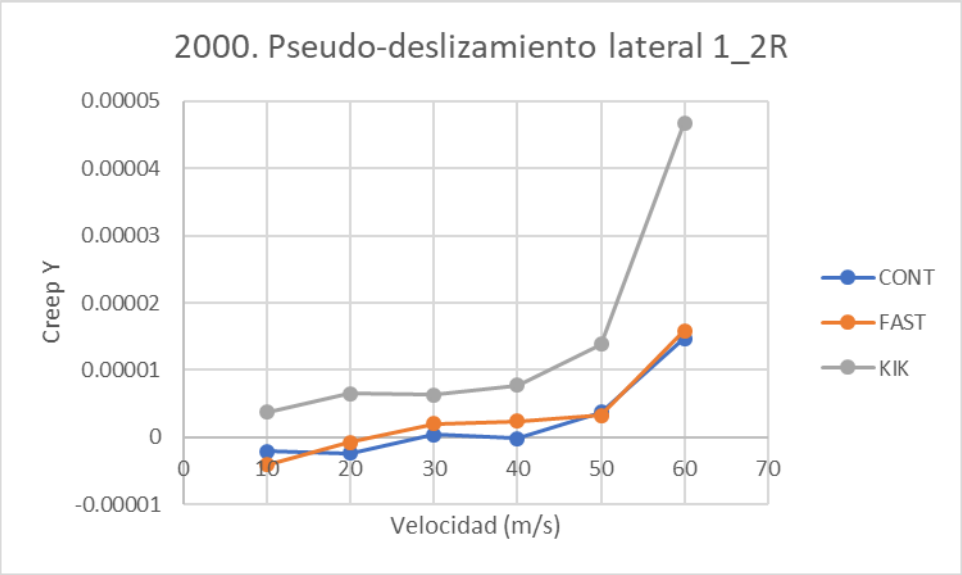

2000. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1R
Creep X
0.0001
0.00005
0
-0.00005
-0.0001
-0.00015
-0.0002
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

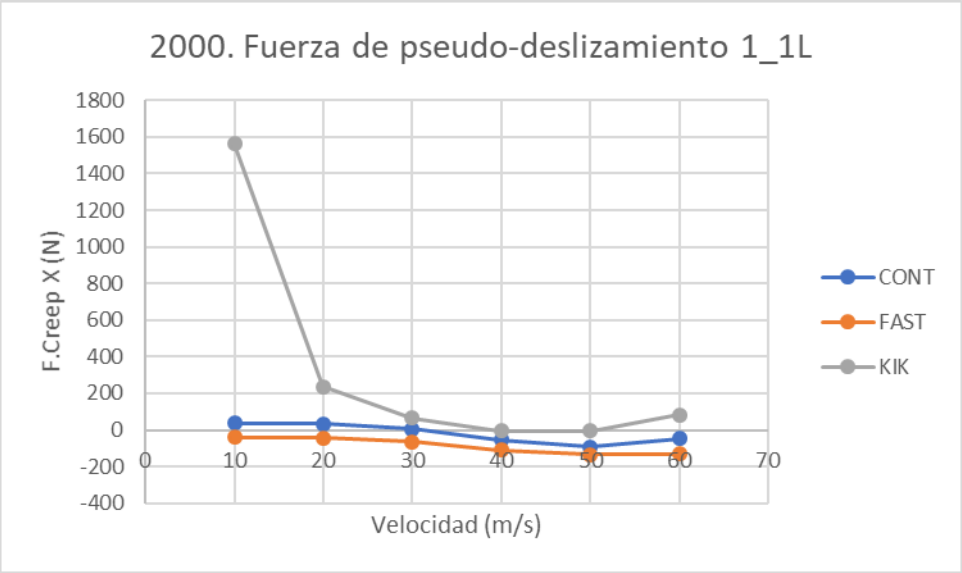

2000. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_2R
Creep X
0.00018
0.00016
0.00014
0.00012
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
-0.00002
-0.00004
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

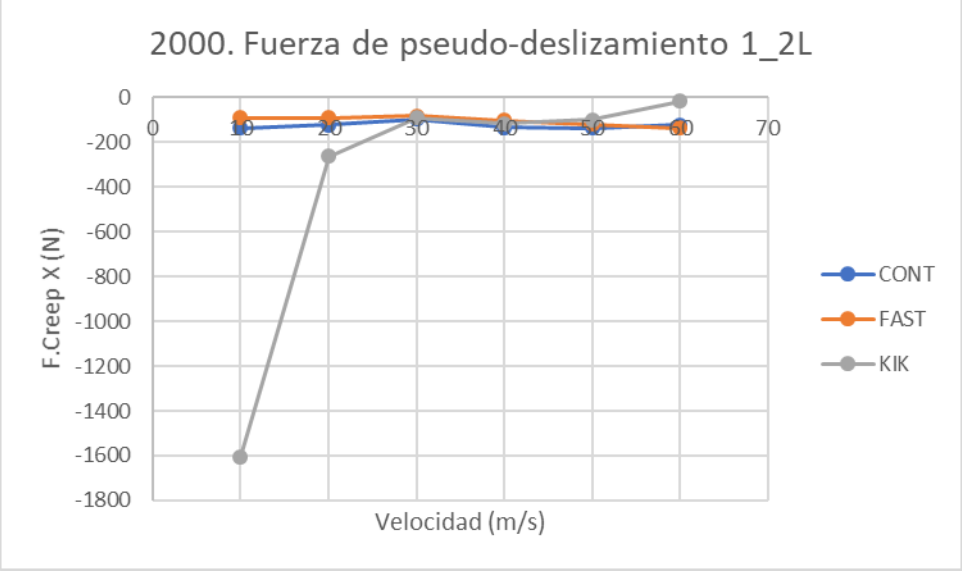

2000. Pseudo-deslizamiento lateral 1_1L
0.00003
0.00002
0.00001
0
-0.00001
-0.00002
-0.00003
-0.00004
-0.00005
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

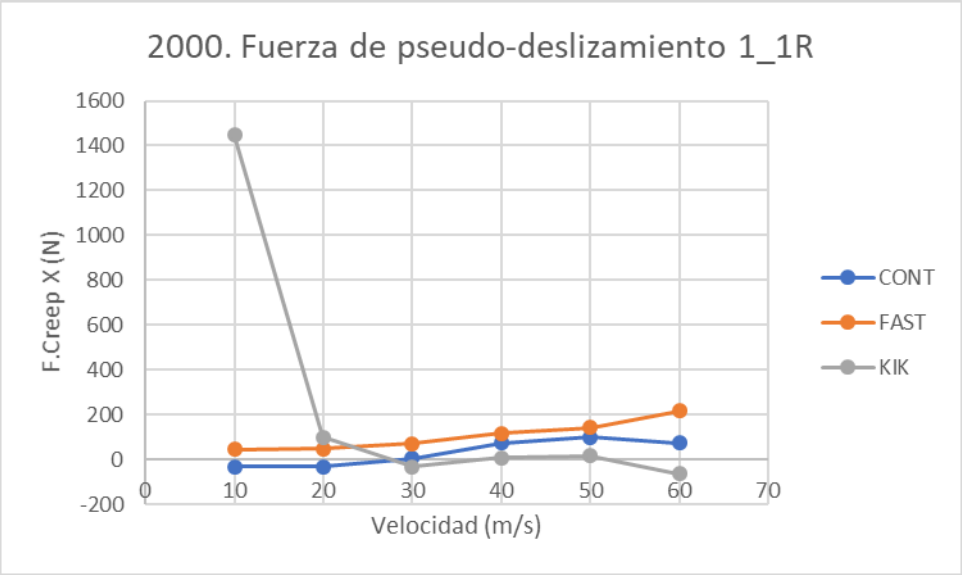

2000. Pseudo-deslizamiento lateral 1_2L
0.00005
0.00004
0.00003
0.00002
0.00001
0
-0.00001
-0.00002
-0.00003
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

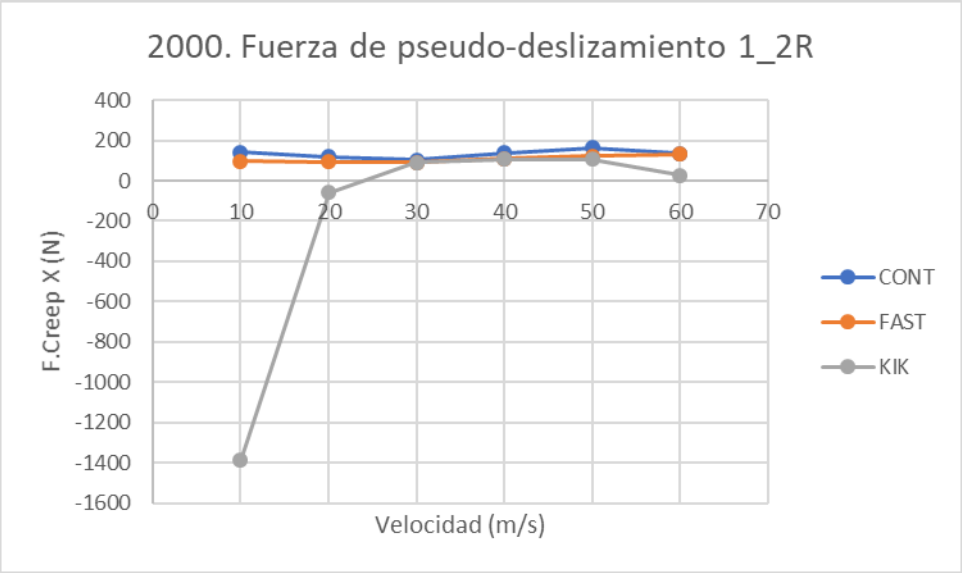

2000. Pseudo-deslizamiento lateral 1_1R
0.000018
0.000016
0.000014
0.000012
0.00001
0.000008
0.000006
0.000004
0.000002
0
-0.000002
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

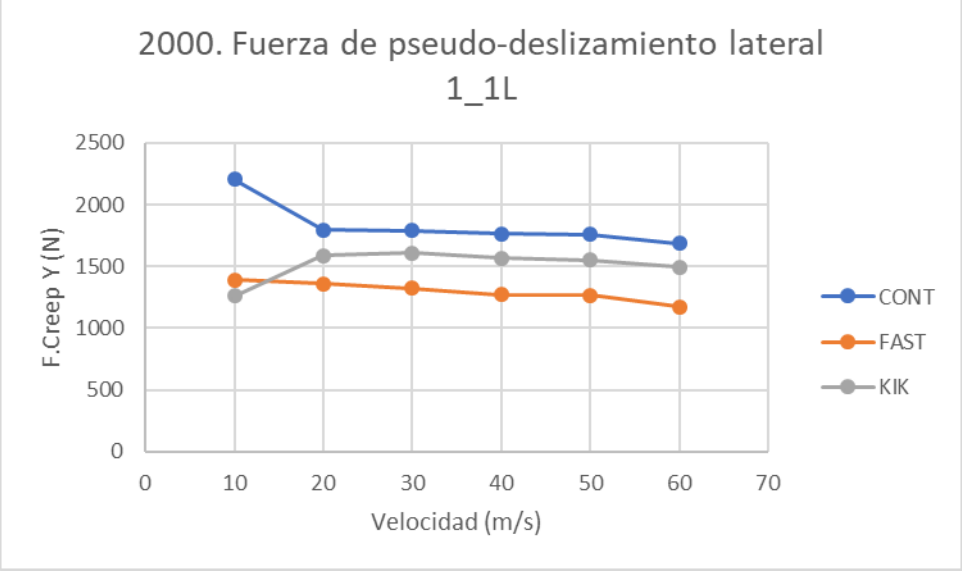

2000. Pseudo-deslizamiento lateral 1_2R
Creep Y
0.00005
0.00004
0.00003
0.00002
0.00001
0
-0.00001
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

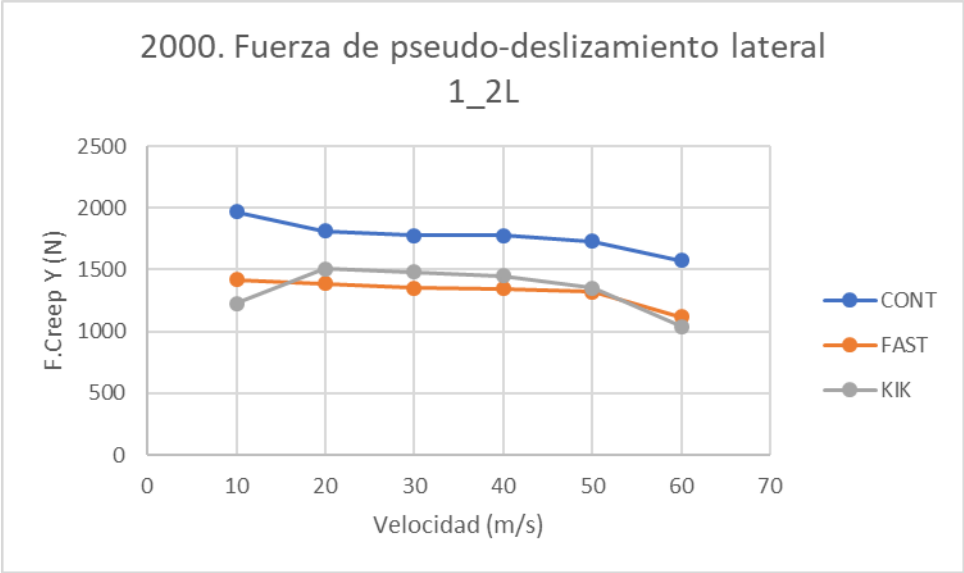

2000. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_1L
F.Creep X (N)
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
-200
-400
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

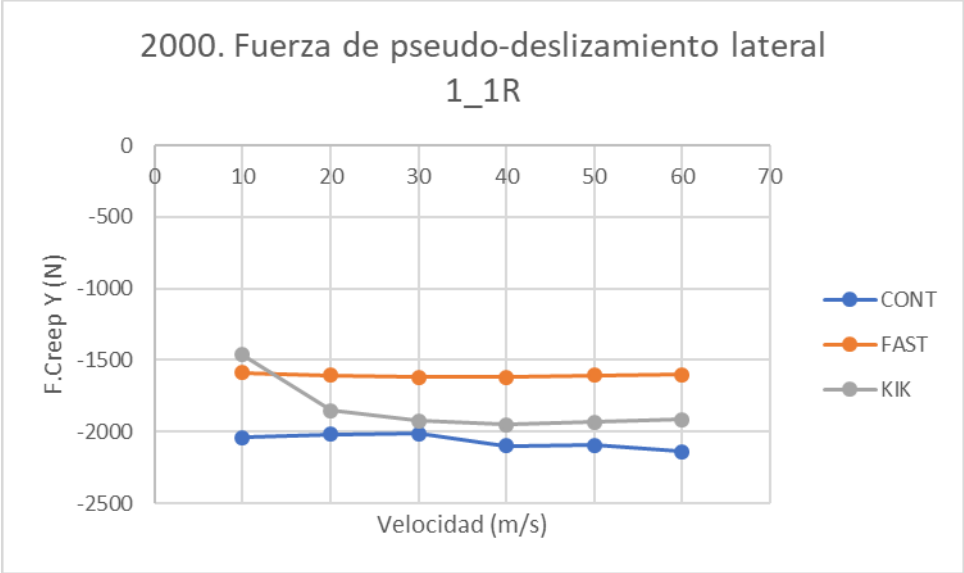

2000. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_2L
F.Creep X (N)
0
-200
-400
-600
-800
-1000
-1200
-1400
-1600
-1800
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

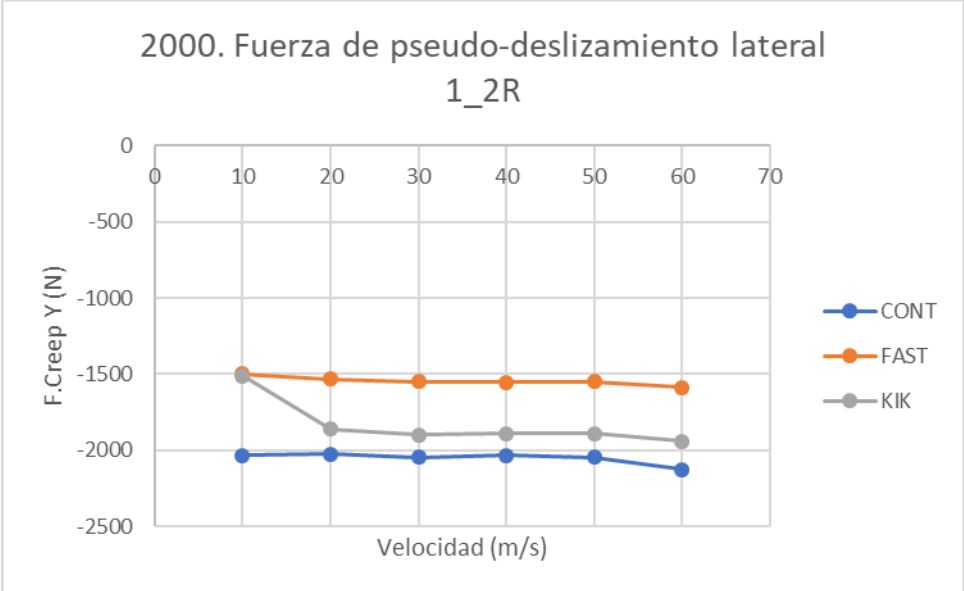

2000. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_1R
F.Creep X (N)
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
-200
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

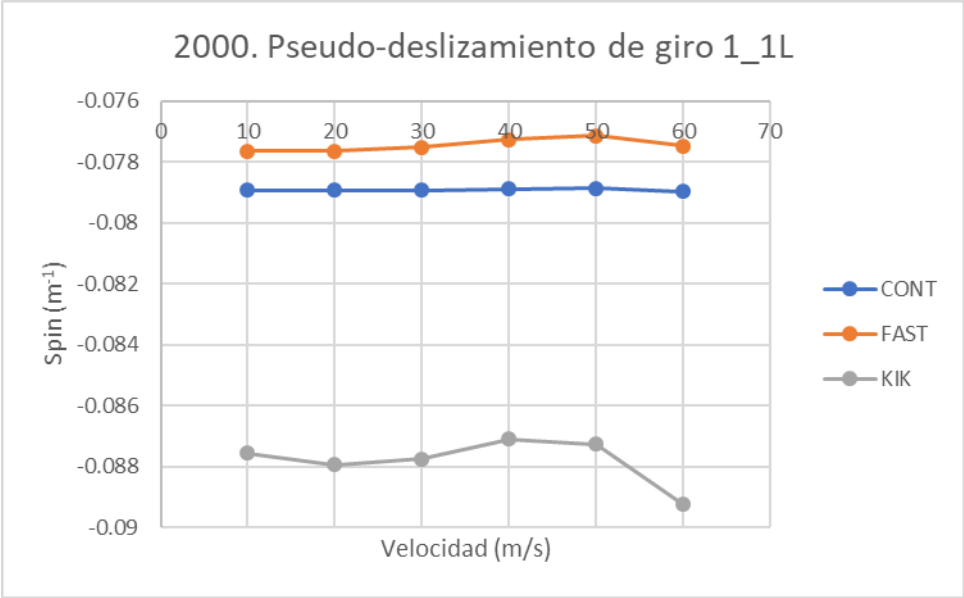

2000. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_2R
F.Creep X (N)
400
200
0
-200
-400
-600
-800
-1000
-1200
-1400
-1600
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

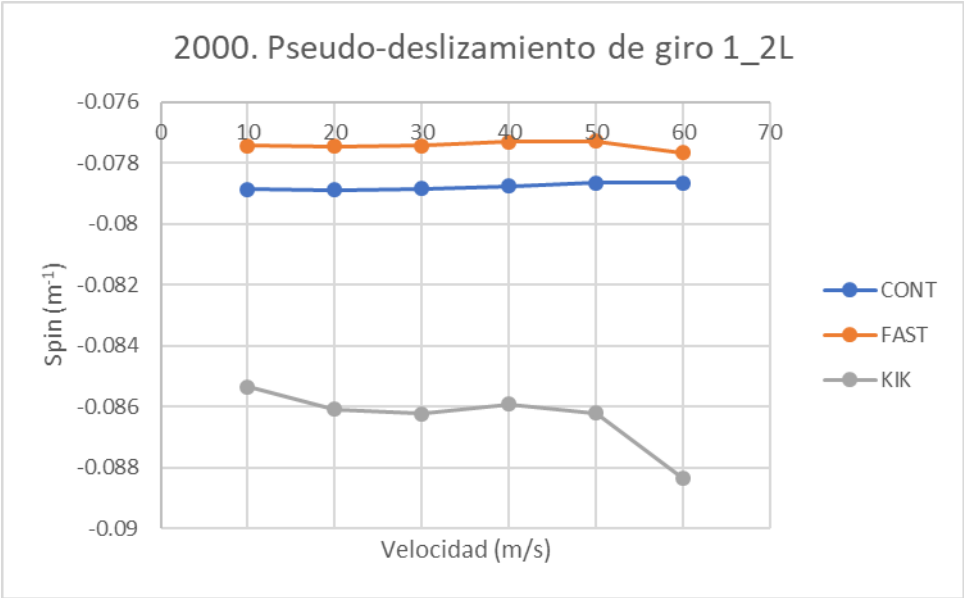

2000. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral 1_1L
F.Creep Y (N)
2500
2000
1500
1000
500
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

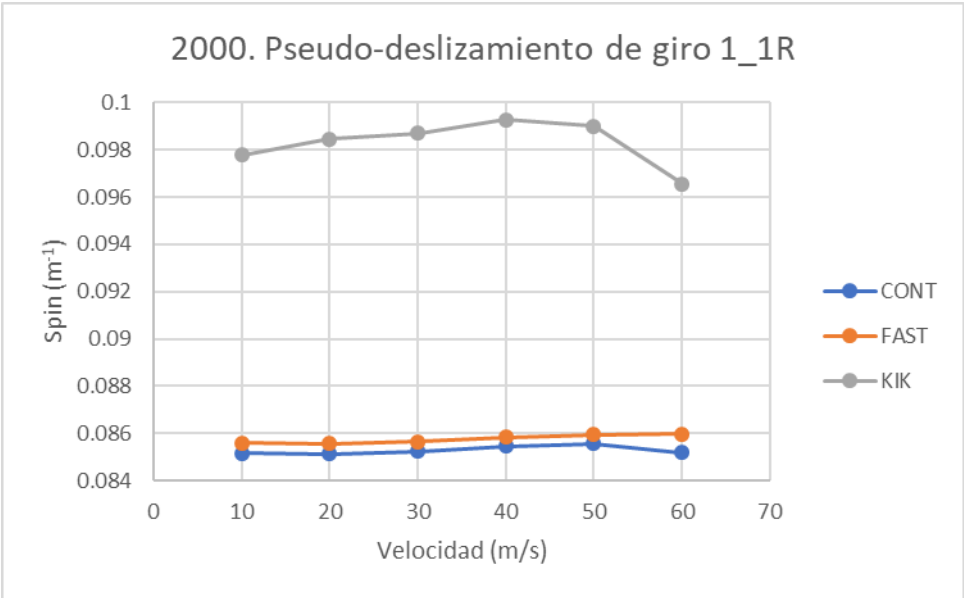

2000. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral
1_2L
F.Creep Y (N)
2500
2000
1500
1000
500
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

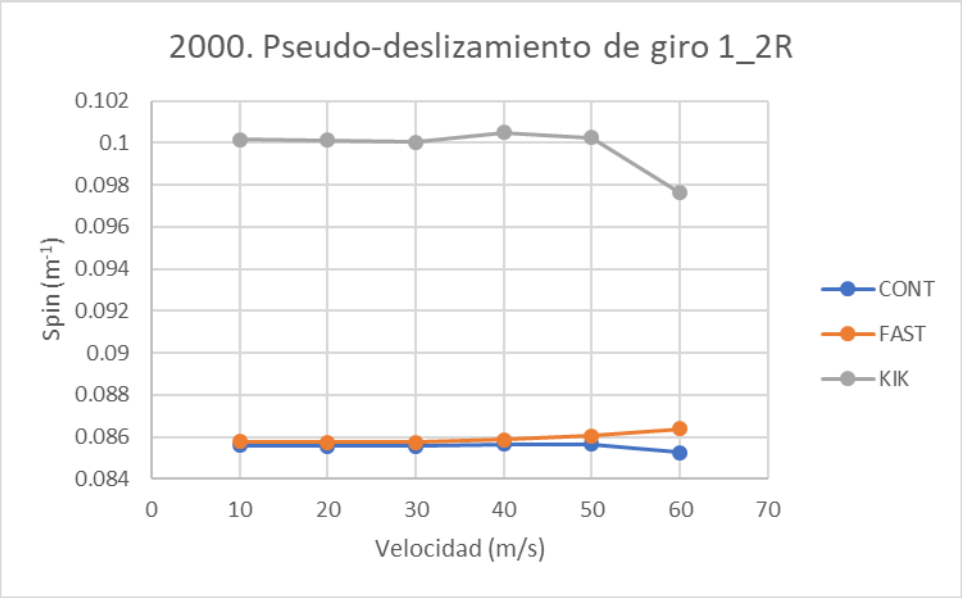

2000. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral
1_1R
F.Creep Y (N)
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

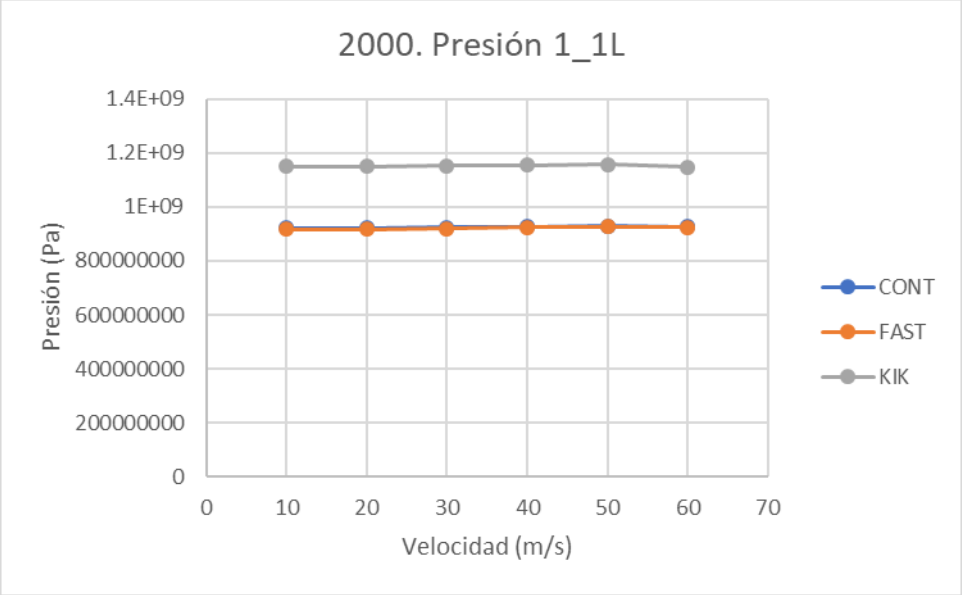

2000. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral
1_2R
F.Creep Y (N)
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

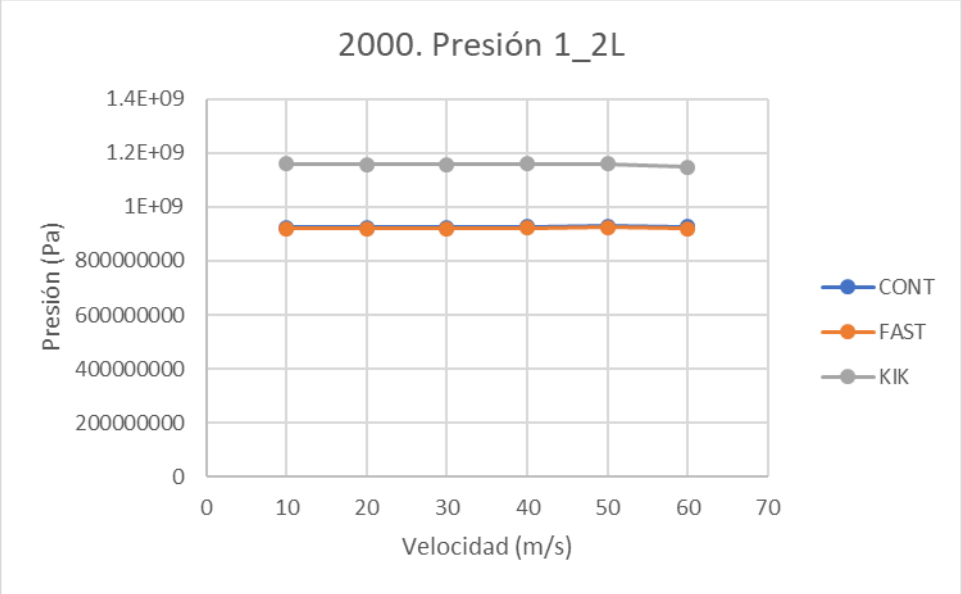

2000. Pseudo-deslizamiento de giro 1_1L
-0.076
-0.078
-0.08
-0.082
-0.084
-0.086
-0.088
-0.09
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

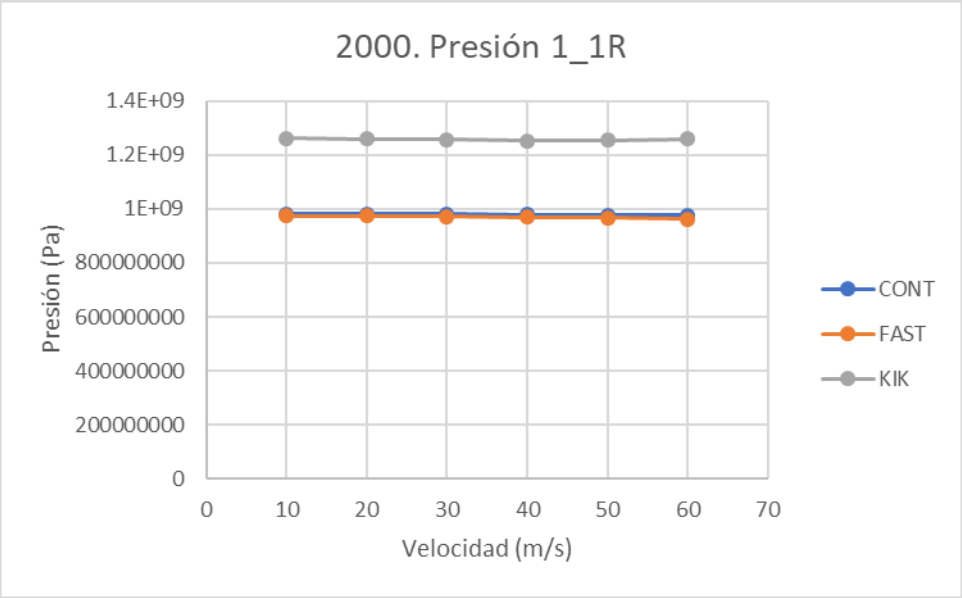

2000. Pseudo-deslizamiento de giro 1_2L
-0.076
-0.078
-0.08
-0.082
-0.084
-0.086
-0.088
-0.09
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

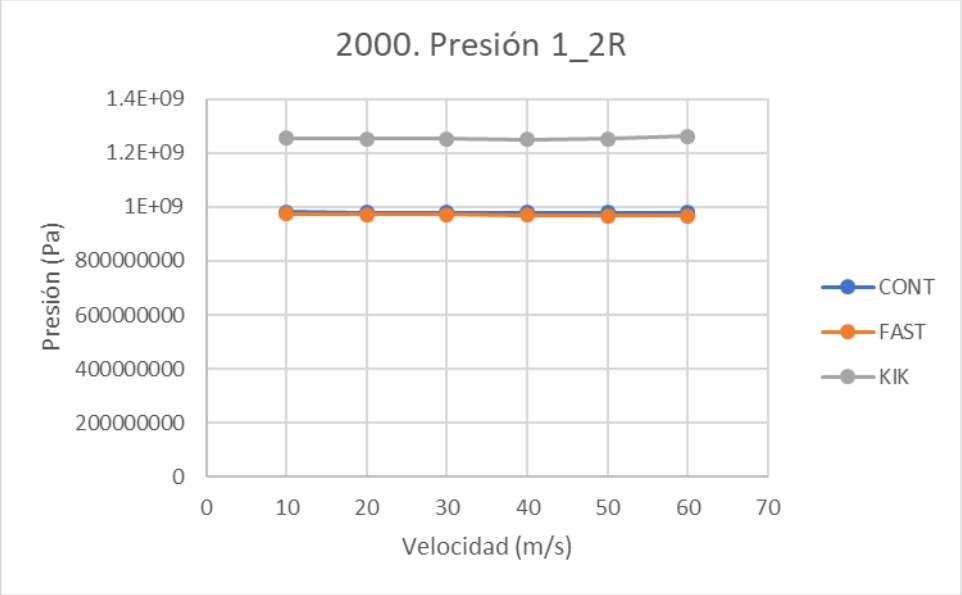

2000. Pseudo-deslizamiento de giro 1_1R
0.1
0.098
0.096
0.094
0.092
0.09
0.088
0.086
0.084
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

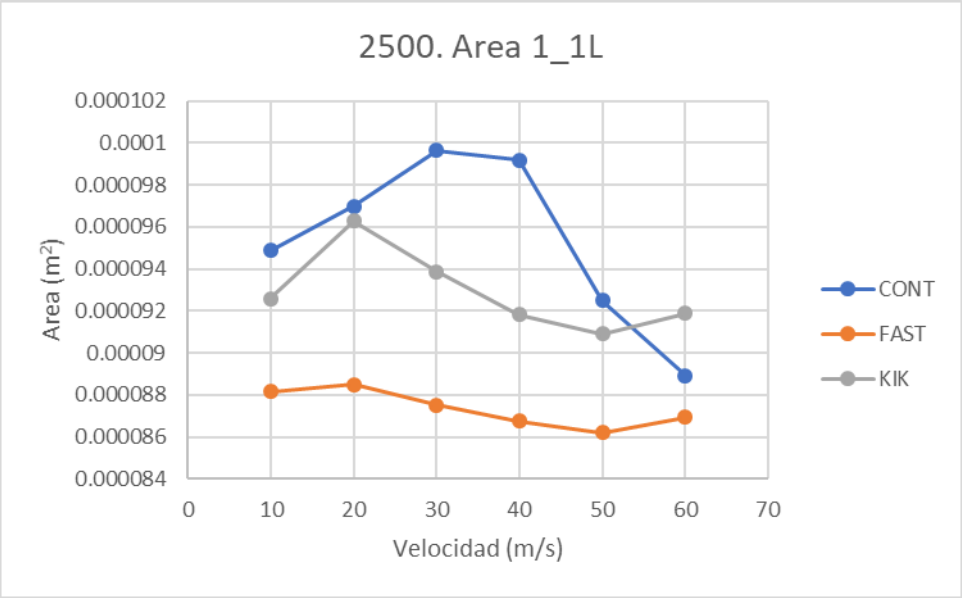

2000. Pseudo-deslizamiento de giro 1_2R
Spin (m-1)
0.102
0.1
0.098
0.096
0.094
0.092
0.09
0.088
0.086
0.084
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

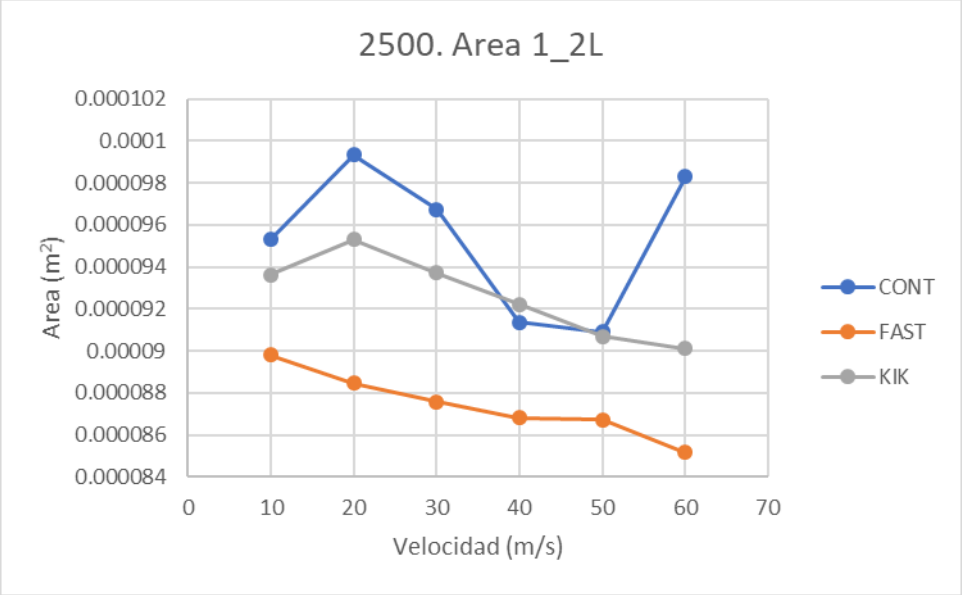

2000. Presión 1_1L
Presión (Pa)
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

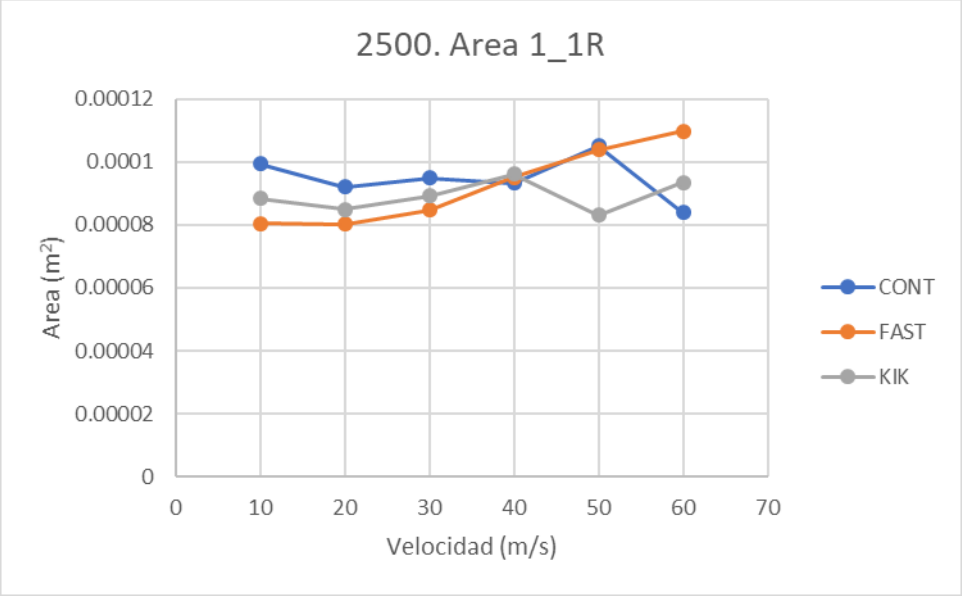

2000. Presión 1_2L
Presión (Pa)
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

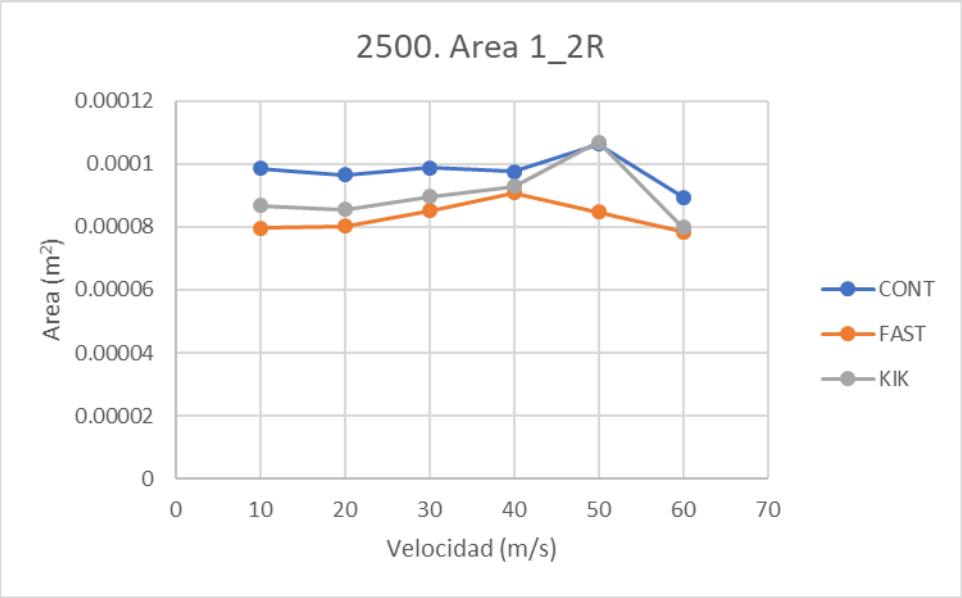

2000. Presión 1_1R
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

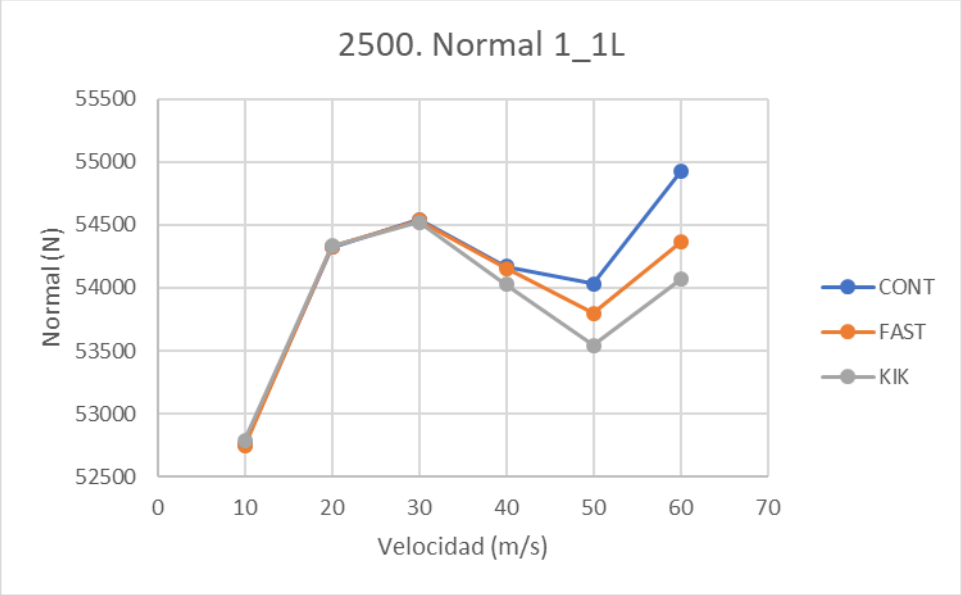

2000. Presión 1_2R
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

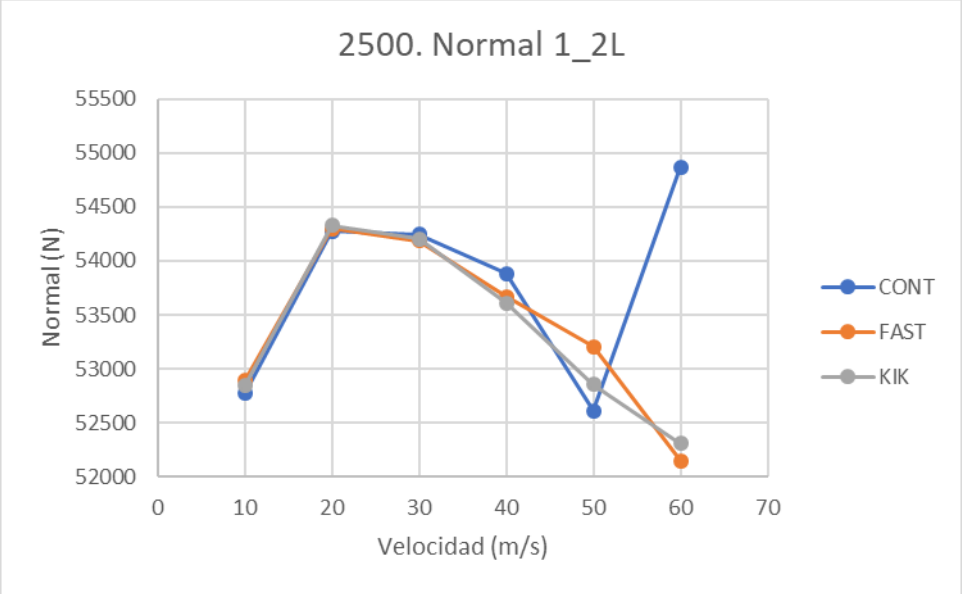

2500. Area 1_1L
0.000102
0.0001
0.000098
0.000096
0.000094
0.000092
0.00009
0.000088
0.000086
0.000084
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

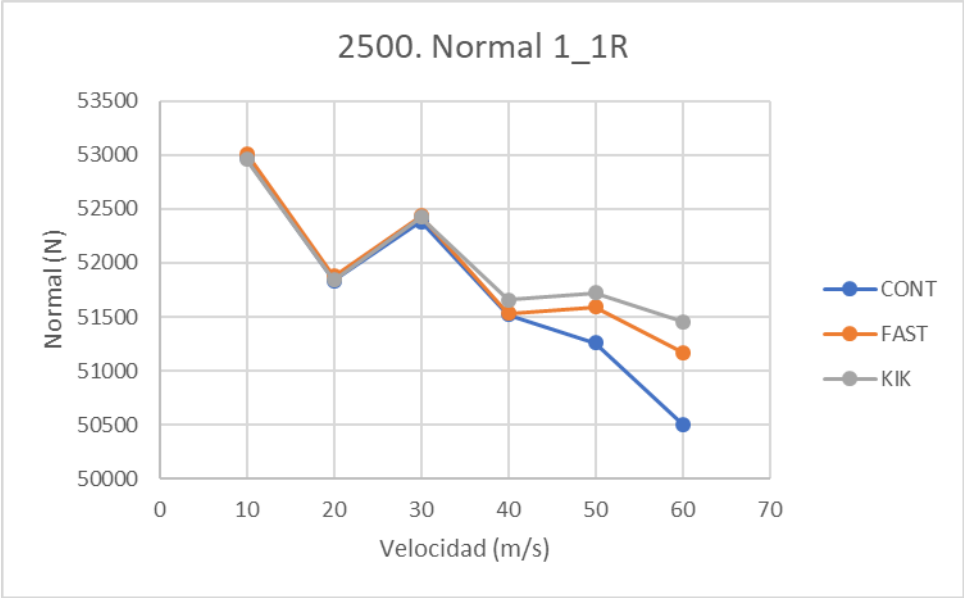

2500. Area 1_2L
0.000102
0.0001
0.000098
0.000096
0.000094
0.000092
0.00009
0.000088
0.000086
0.000084
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

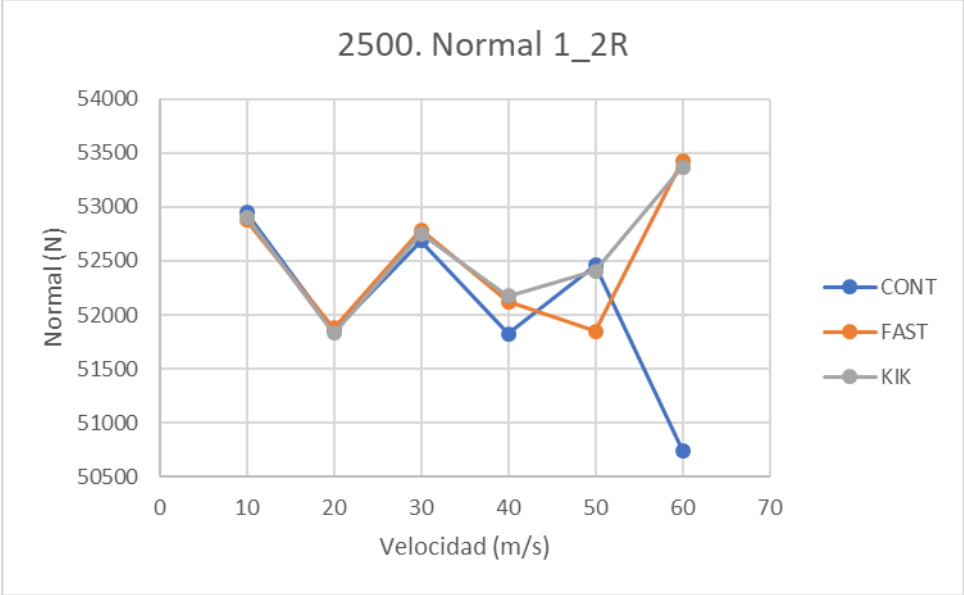

2500. Area 1_1R
0.00012
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

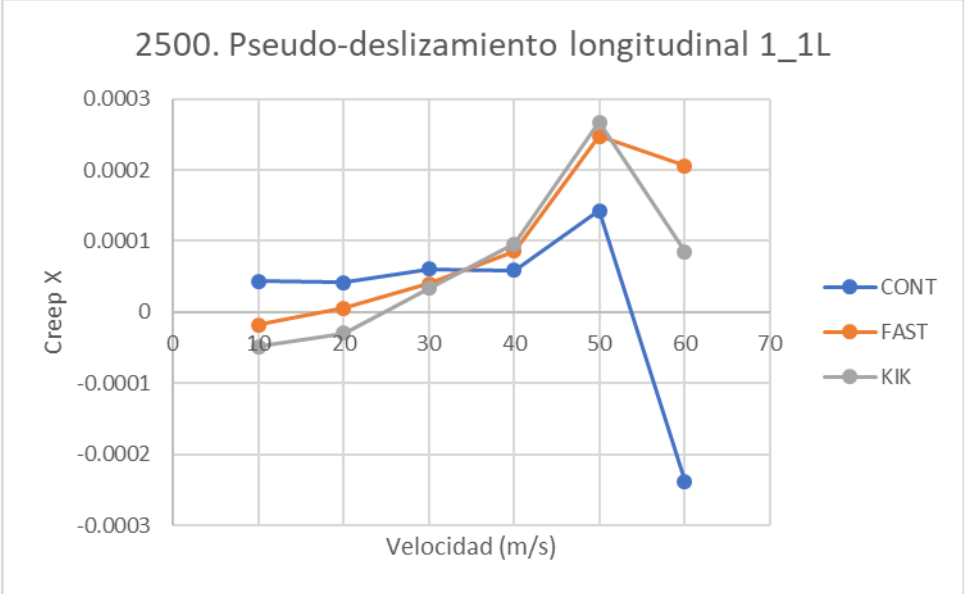

2500. Area 1_2R
0.00012
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

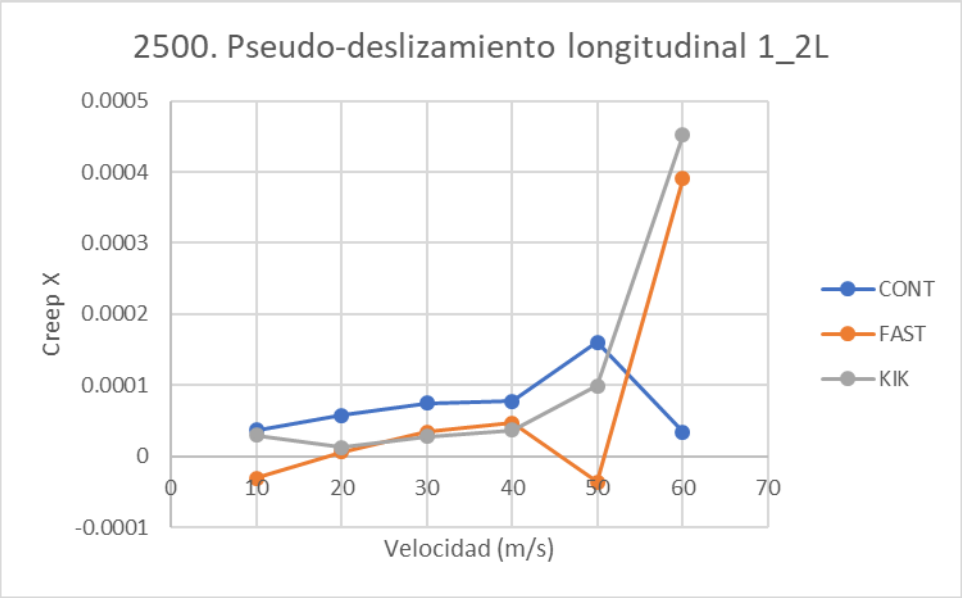

2500. Normal 1_1L
55500
55000
54500
54000
53500
53000
52500
Normal (N)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

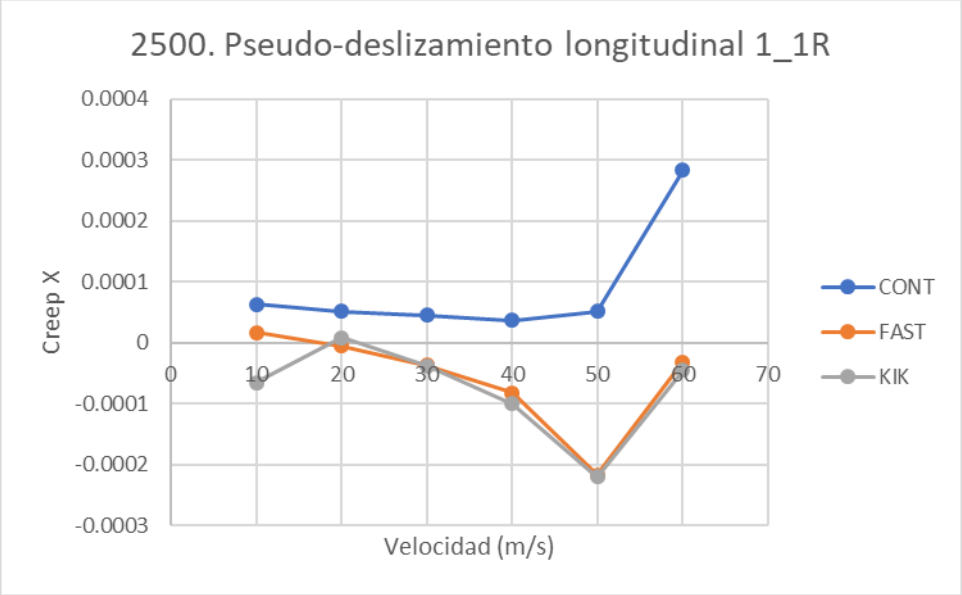

2500. Normal 1_2L
55500
55000
54500
54000
53500
53000
52500
52000
Normal (N)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

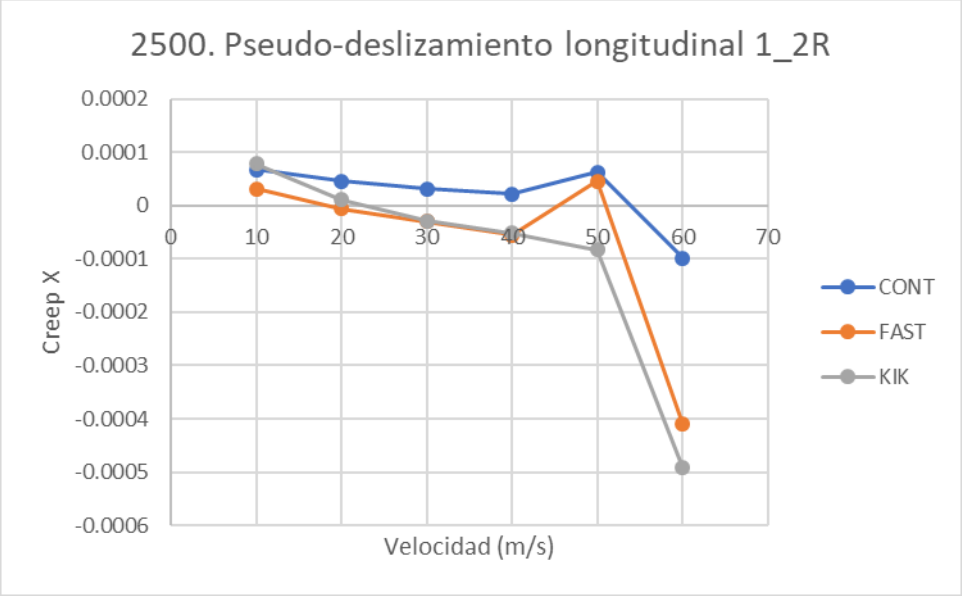

2500. Normal 1_1R
Normal (N)
53500
53000
52500
52000
51500
51000
50500
50000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

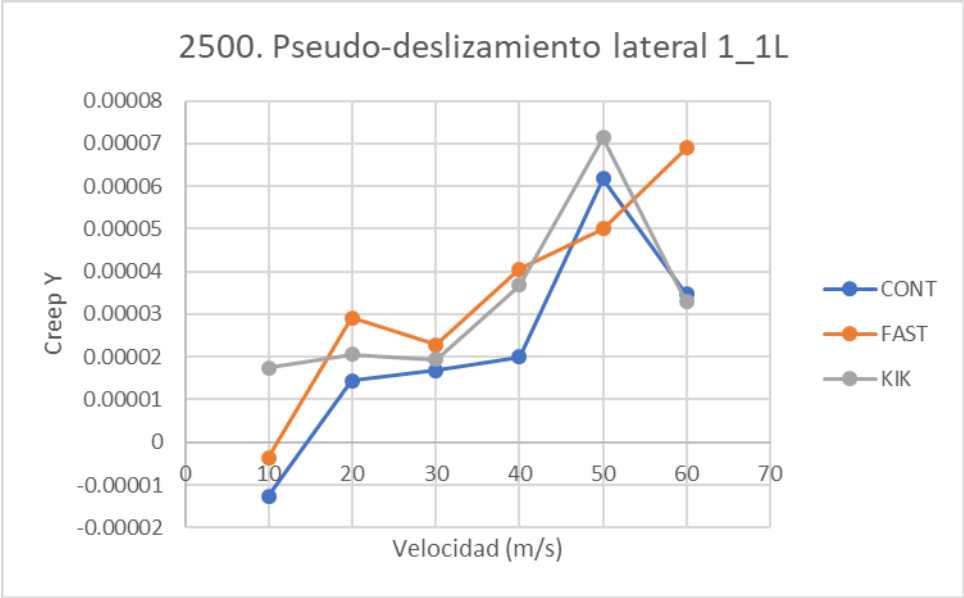

2500. Normal 1_2R
Normal (N)
54000
53500
53000
52500
52000
51500
51000
50500
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

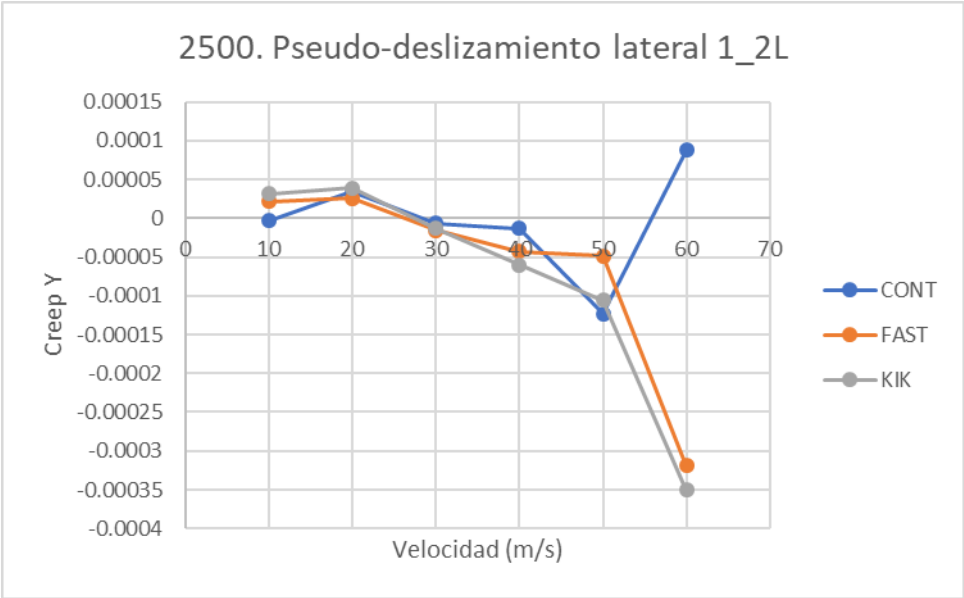

2500. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1L
Creep X
0.0003
0.0002
0.0001
0
-0.0001
-0.0002
-0.0003
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

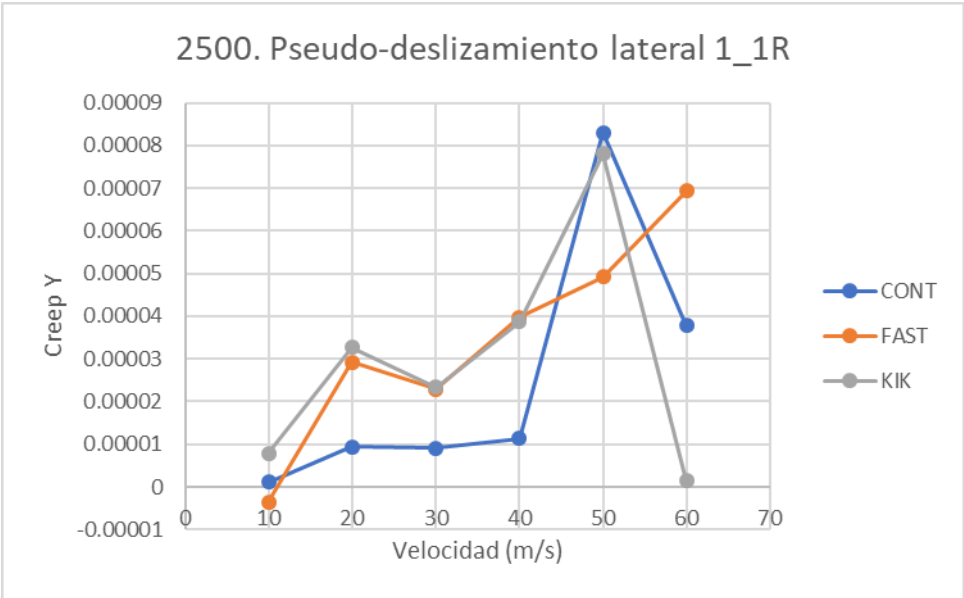

2500. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_2L
0.0005
0.0004
0.0003
0.0002
0.0001
0
-0.0001
Creep X
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

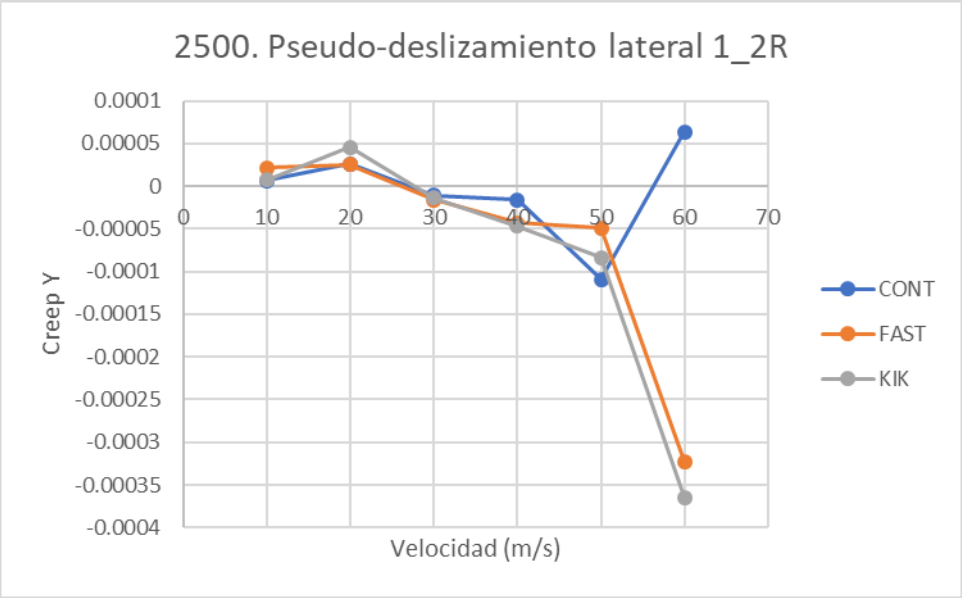

2500. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1R
0.0004
0.0003
0.0002
0.0001
0
-0.0001
-0.0002
-0.0003
Creep X
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

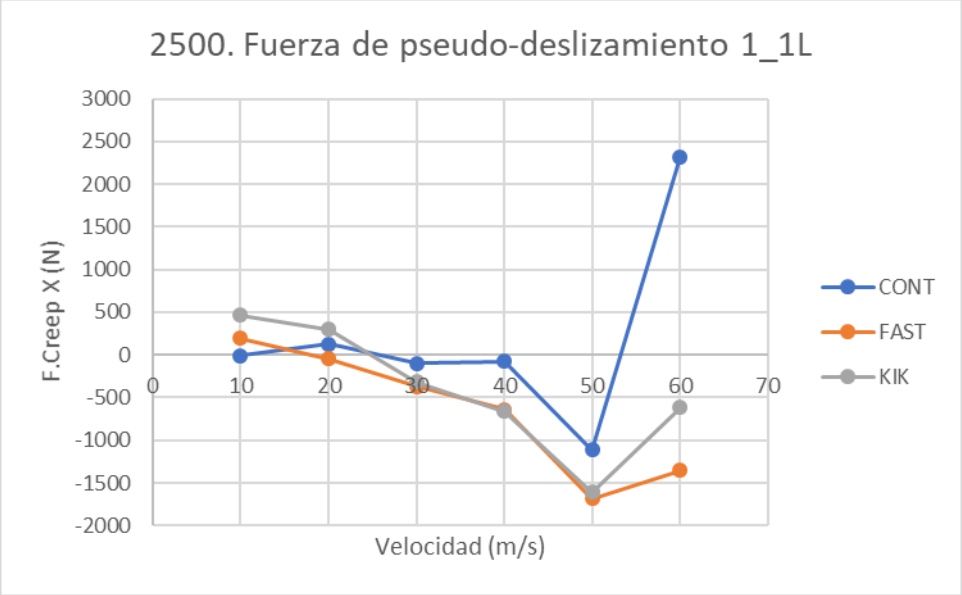

2500. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_2R
0.0002
0.0001
0
-0.0001
-0.0002
-0.0003
-0.0004
-0.0005
-0.0006
Creep X
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

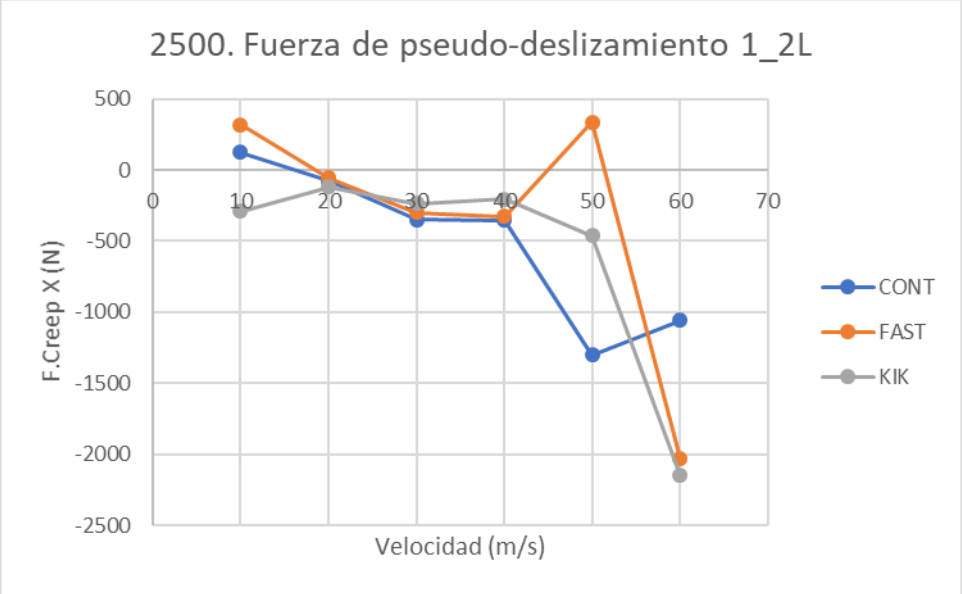

2500. Pseudo-deslizamiento lateral 1_1L
0.00008
0.00007
0.00006
0.00005
0.00004
0.00003
0.00002
0.00001
0
-0.00001
-0.00002
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

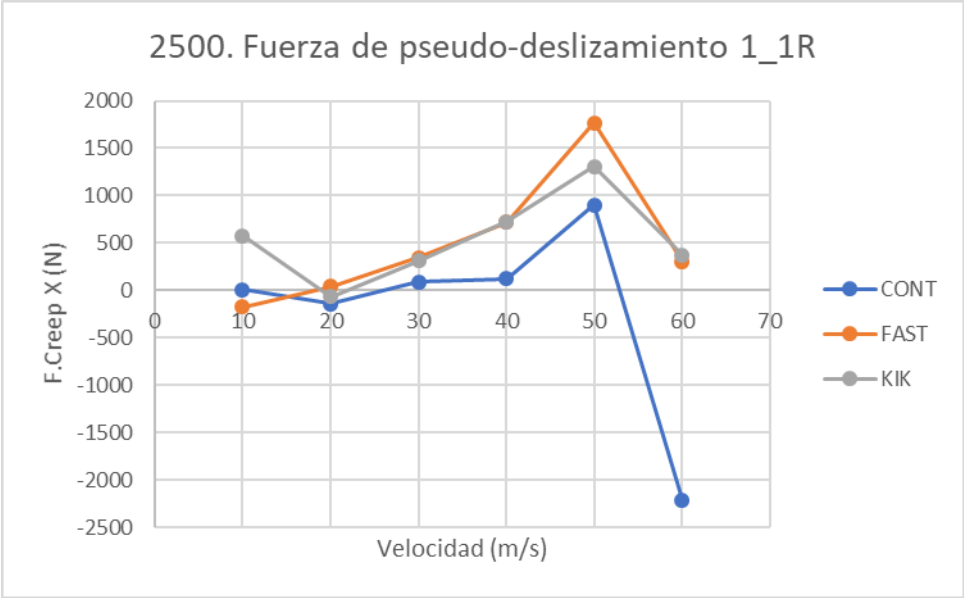

2500. Pseudo-deslizamiento lateral 1_2L
0.00015
0.0001
0.00005
0
-0.00005
-0.0001
-0.00015
-0.0002
-0.00025
-0.0003
-0.00035
-0.0004
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

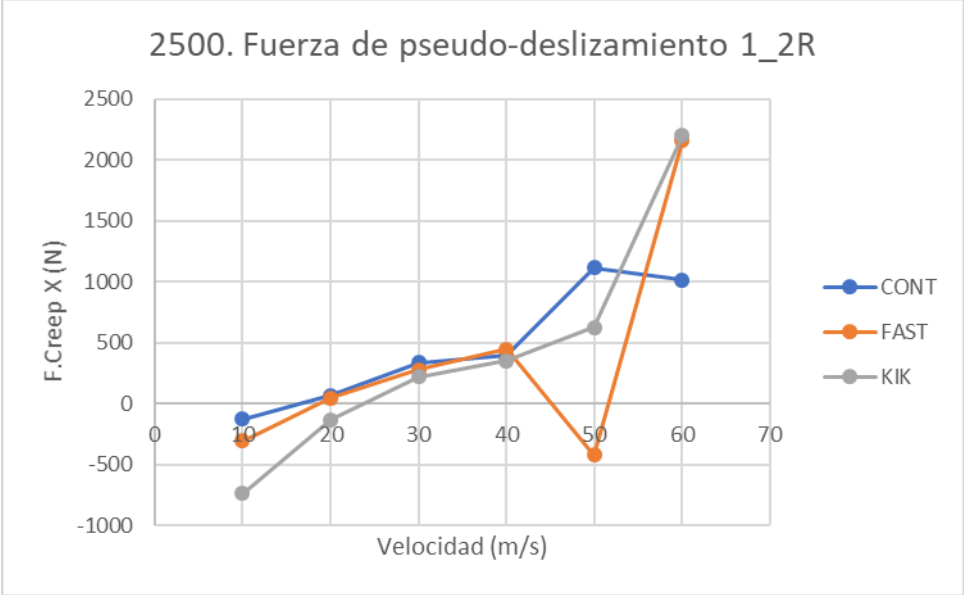

2500. Pseudo-deslizamiento lateral 1_1R
0.00009
0.00008
0.00007
0.00006
0.00005
0.00004
0.00003
0.00002
0.00001
0
-0.00001
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

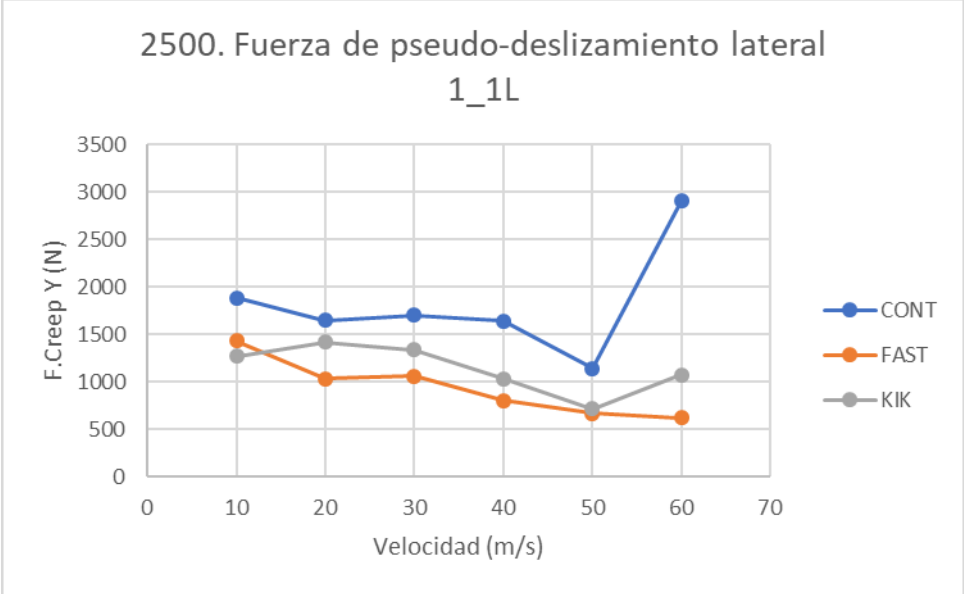

2500. Pseudo-deslizamiento lateral 1_2R
0.0001
0.00005
0
-0.00005
-0.0001
-0.00015
-0.0002
-0.00025
-0.0003
-0.00035
-0.0004
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

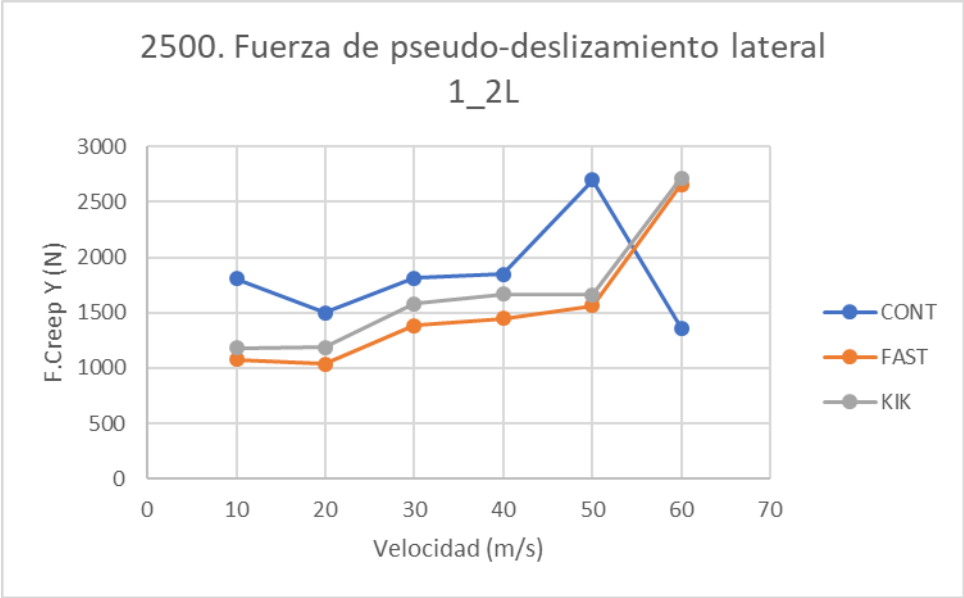

2500. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_1L
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-2000
F.Creep X (N)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

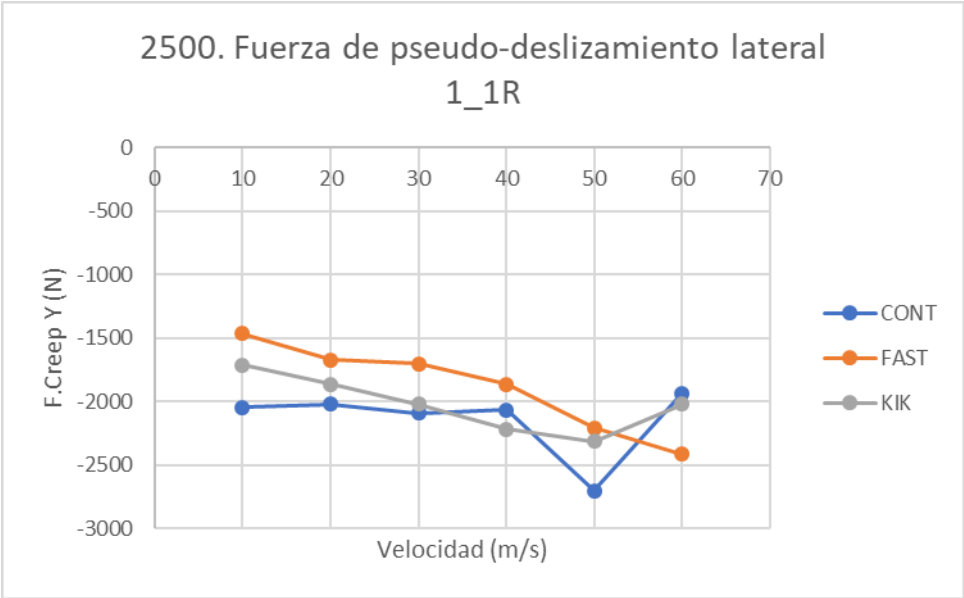

2500. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_2L
500
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
F.Creep X (N)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

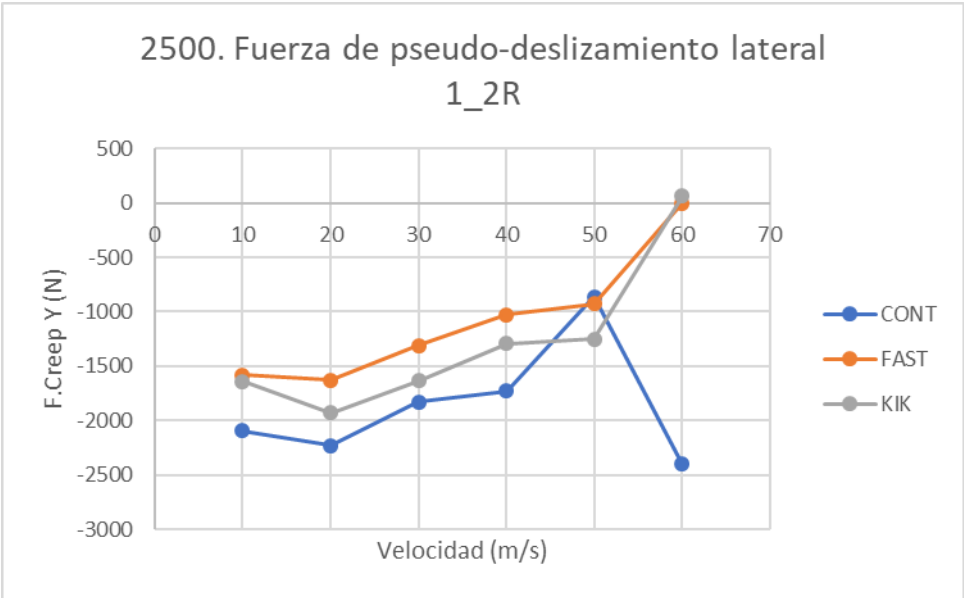

2500. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_1R
F.Creep X (N)
2000
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

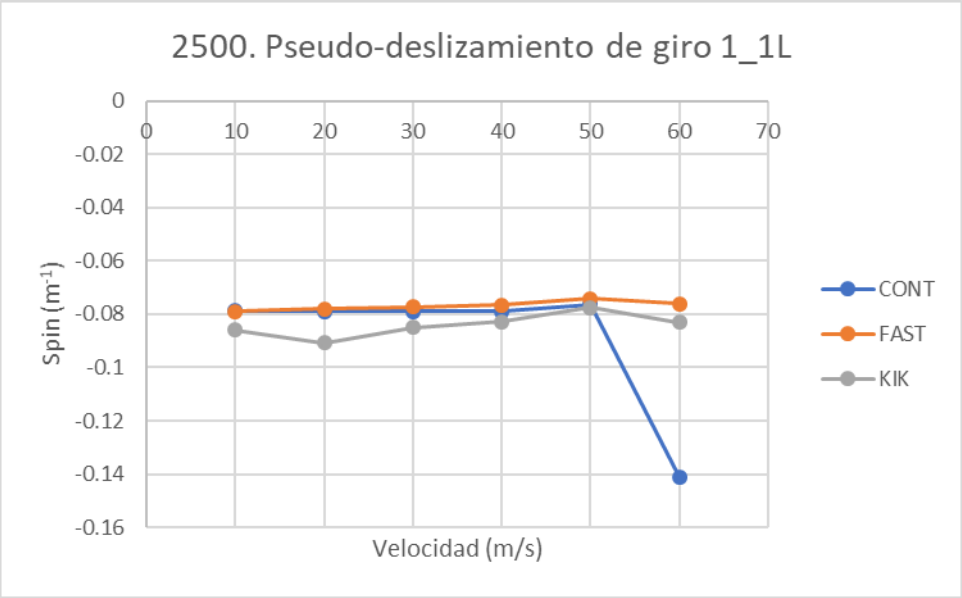

2500. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_2R
F.Creep X (N)
2500
2000
1500
1000
500
0
-500
-1000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

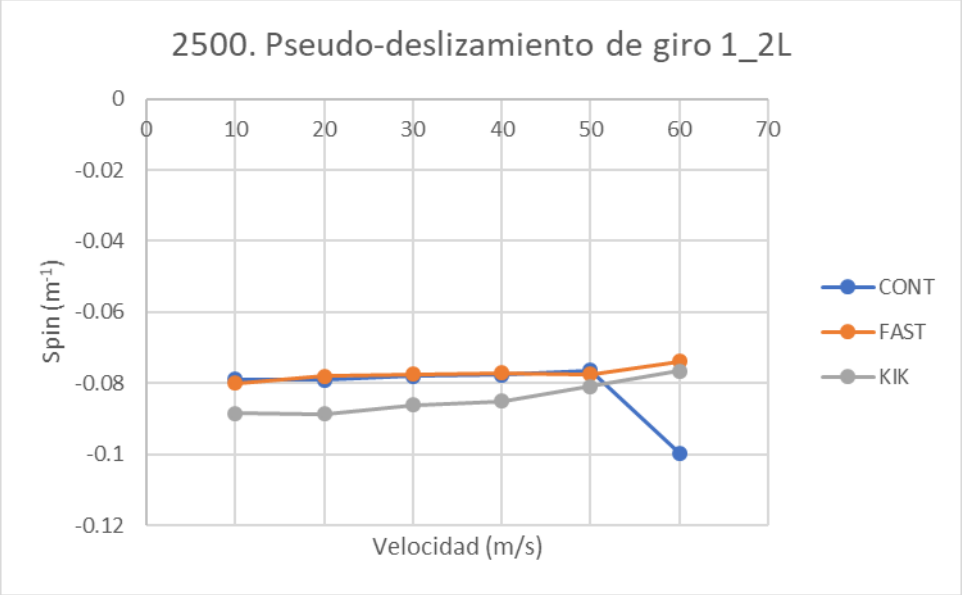

2500. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral 1_1L
F.Creep Y (N)
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

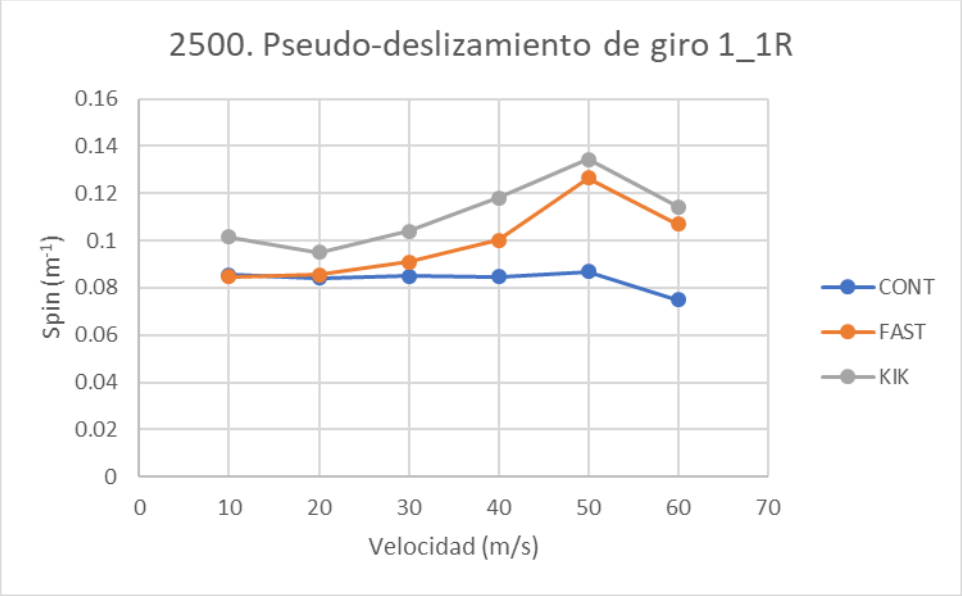

2500. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral
1_2L
F.Creep Y (N)
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

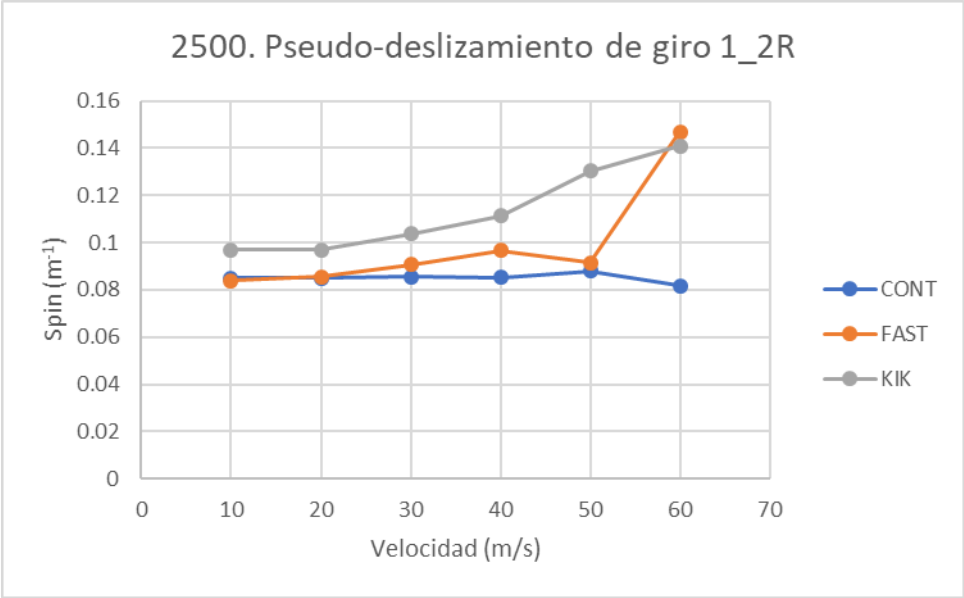

2500. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral
1_1R
F.Creep Y (N)
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
-3000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

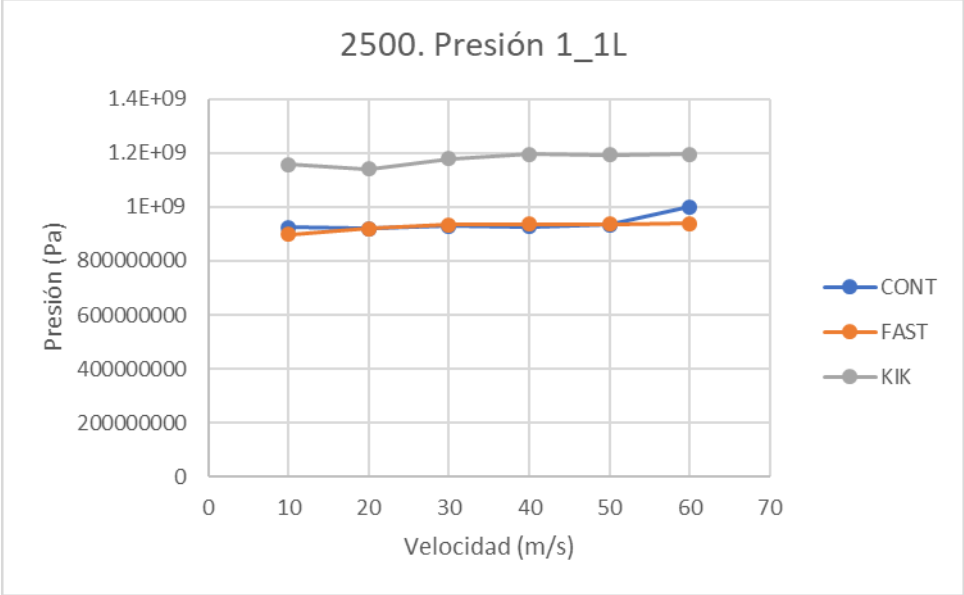

2500. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral
1_2R
F.Creep Y (N)
500
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
-3000
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

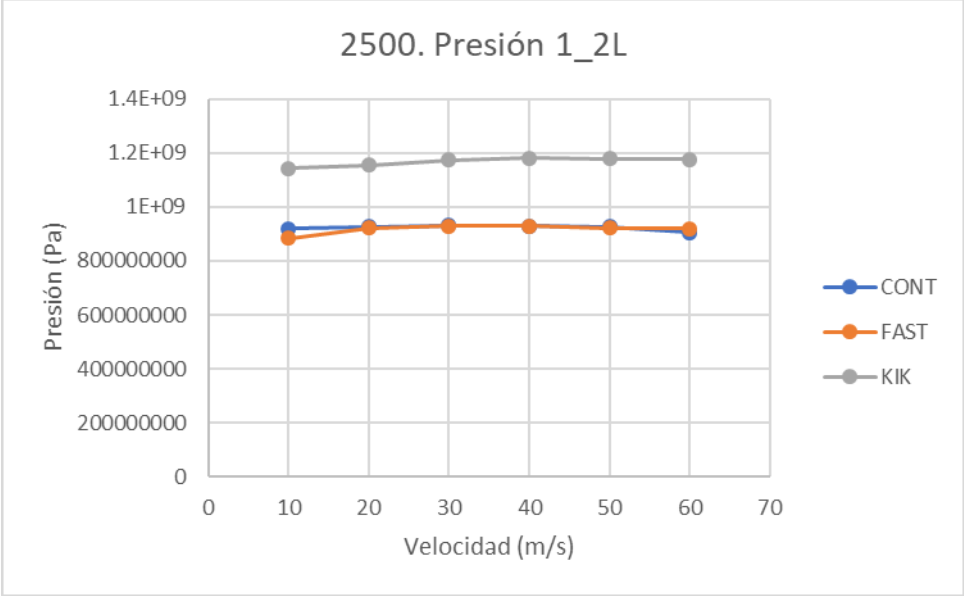

2500. Pseudo-deslizamiento de giro 1_1L
0
-0.02
-0.04
-0.06
-0.08
-0.1
-0.12
-0.14
-0.16
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

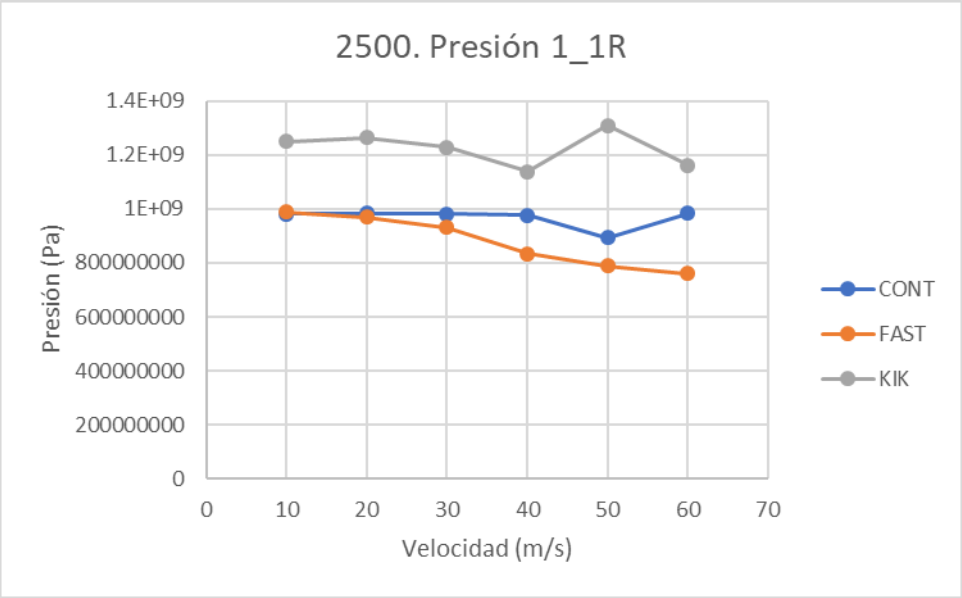

2500. Pseudo-deslizamiento de giro 1_2L
0
-0.02
-0.04
-0.06
-0.08
-0.1
-0.12
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

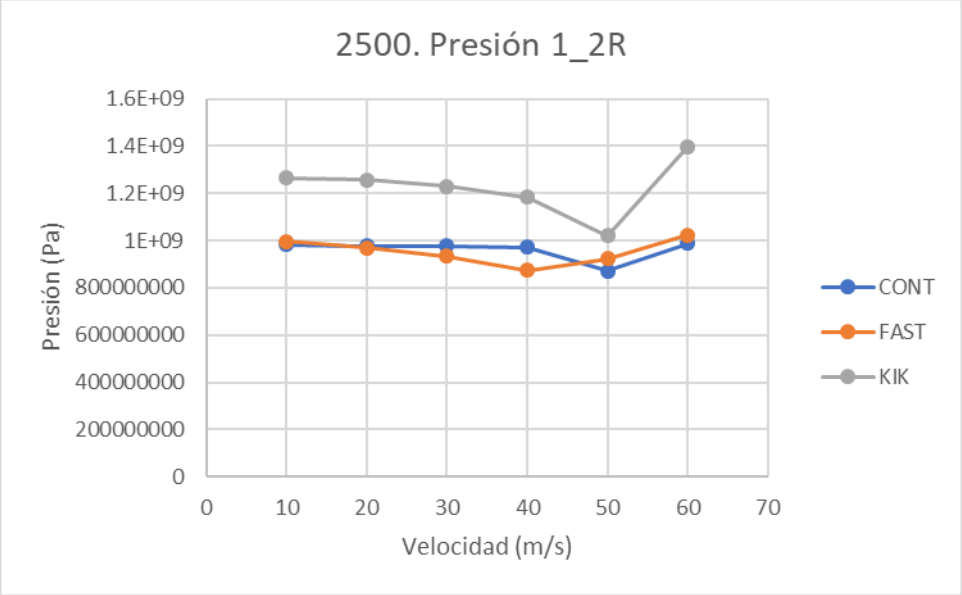

2500. Pseudo-deslizamiento de giro 1_1R
0.16
0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
Spin (m-1)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

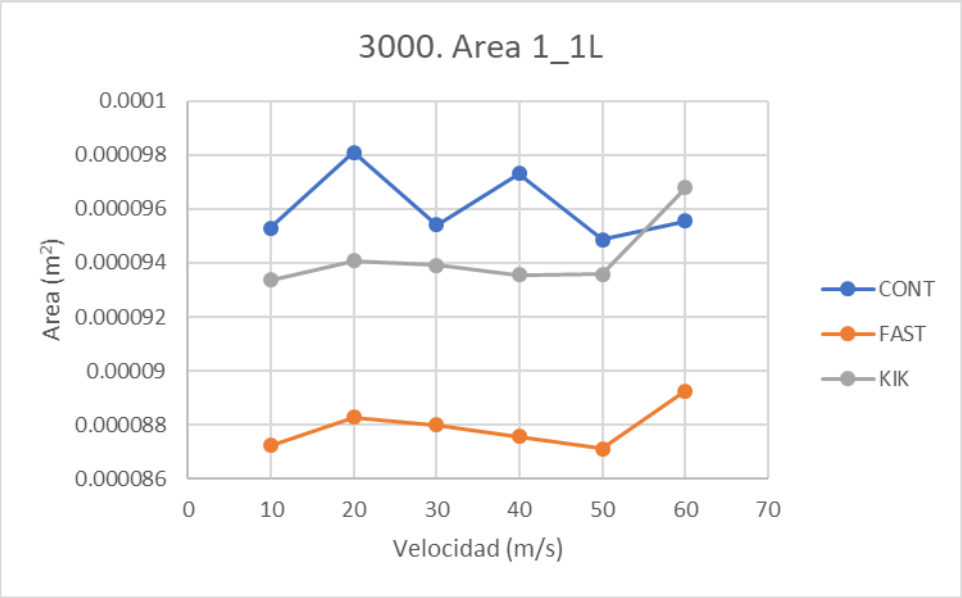

2500. Pseudo-deslizamiento de giro 1_2R
Spin (m-1)
0.16
0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

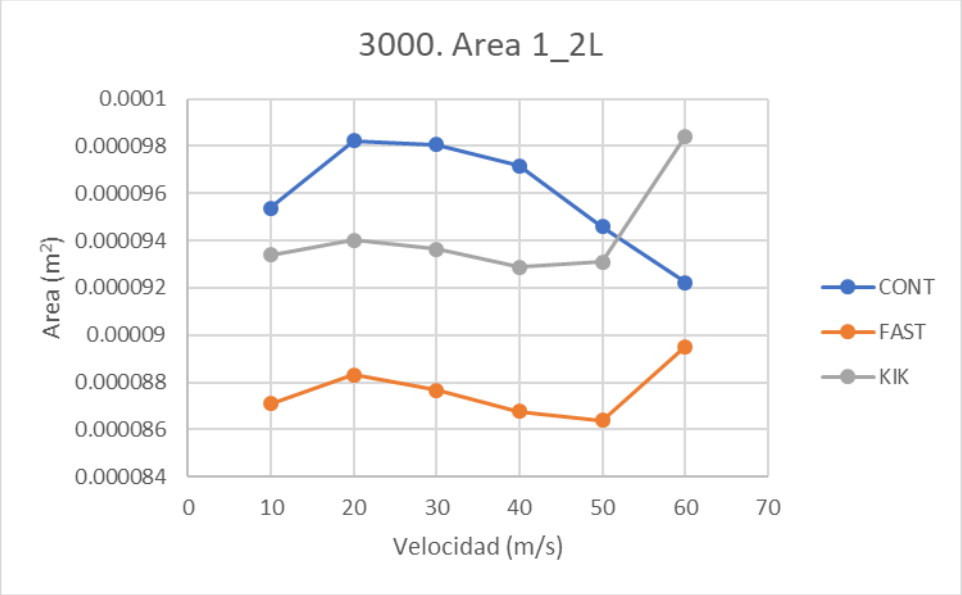

2500. Presión 1_1L
Presión (Pa)
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

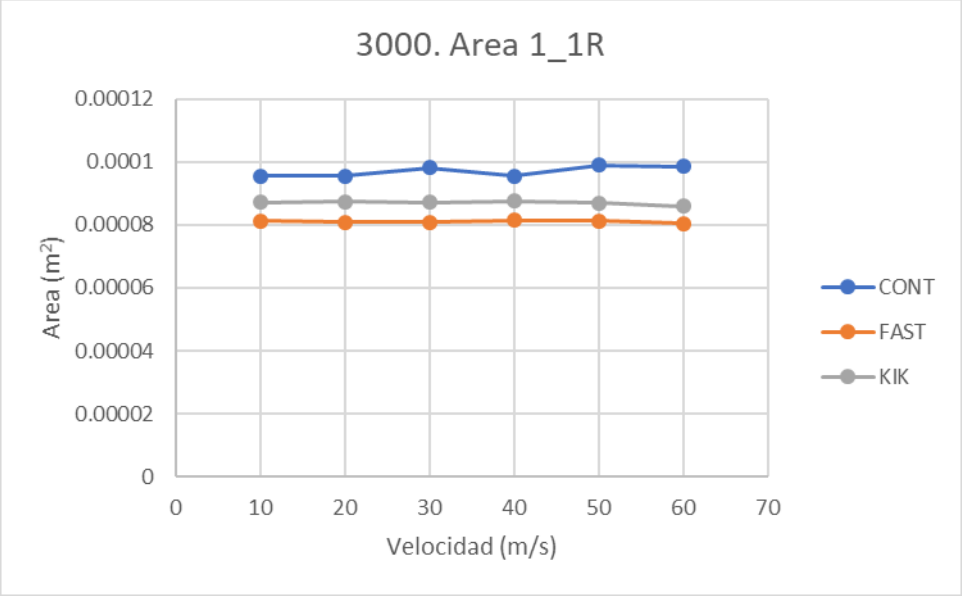

2500. Presión 1_2L
Presión (Pa)
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

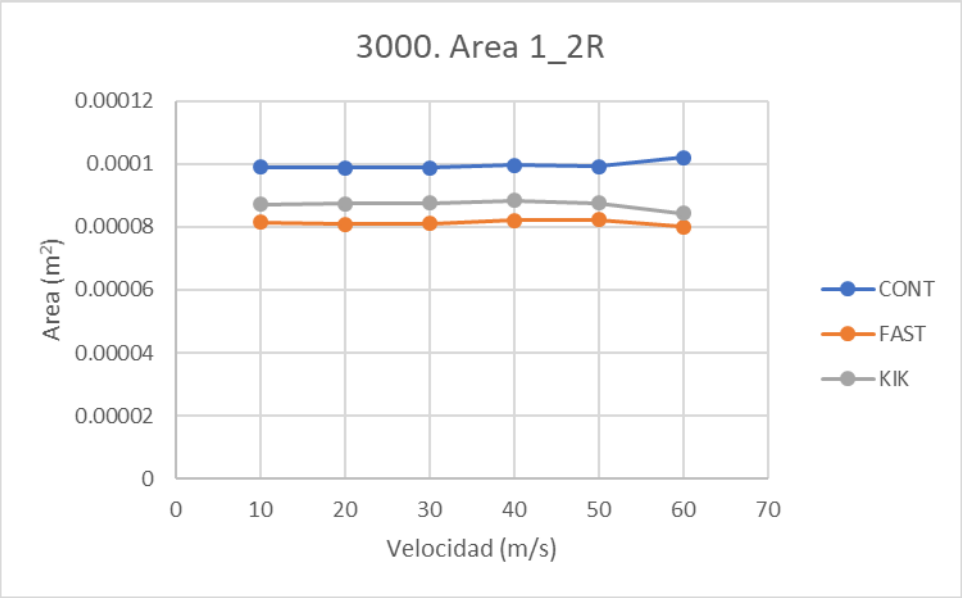

2500. Presión 1_1R
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

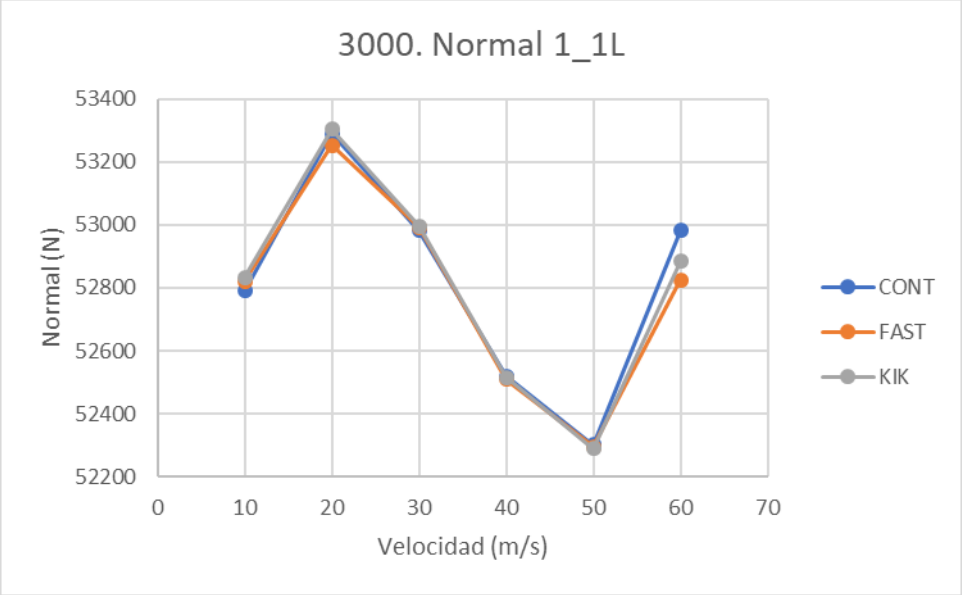

2500. Presión 1_2R
1.6E+09
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

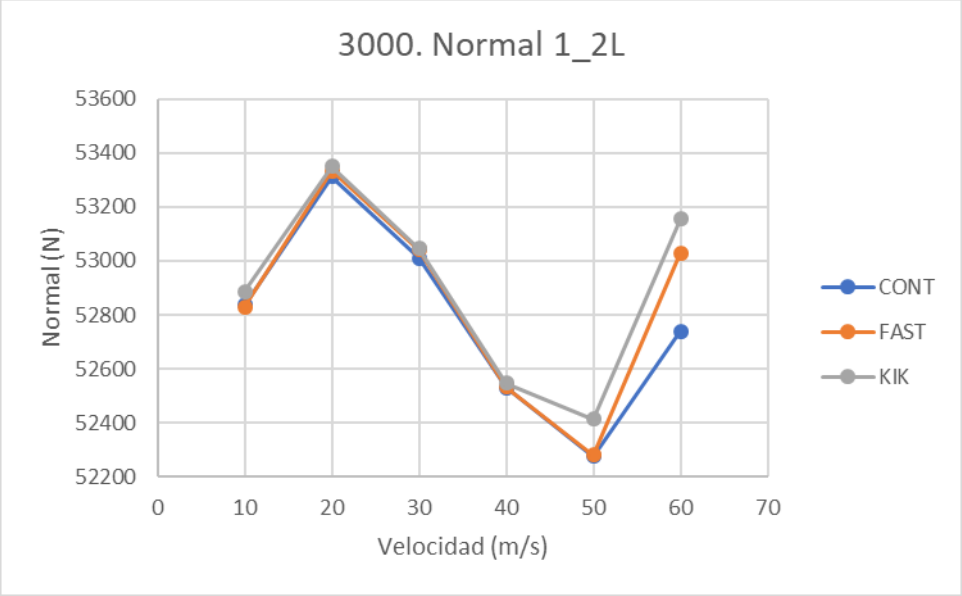

3000. Area 1_1L
0.0001
0.000098
0.000096
0.000094
0.000092
0.00009
0.000088
0.000086
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

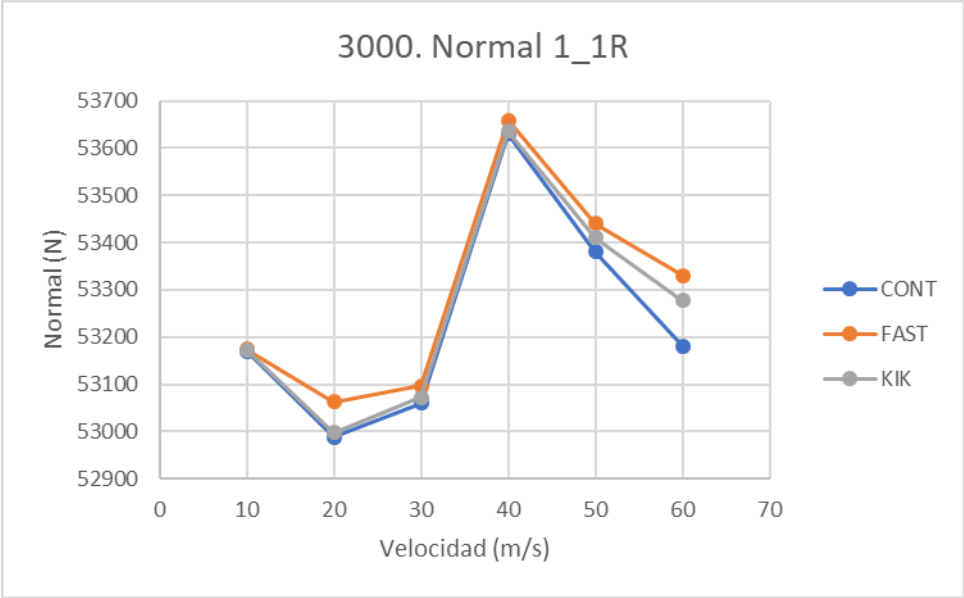

3000. Area 1_2L
0.0001
0.000098
0.000096
0.000094
0.000092
0.00009
0.000088
0.000086
0.000084
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

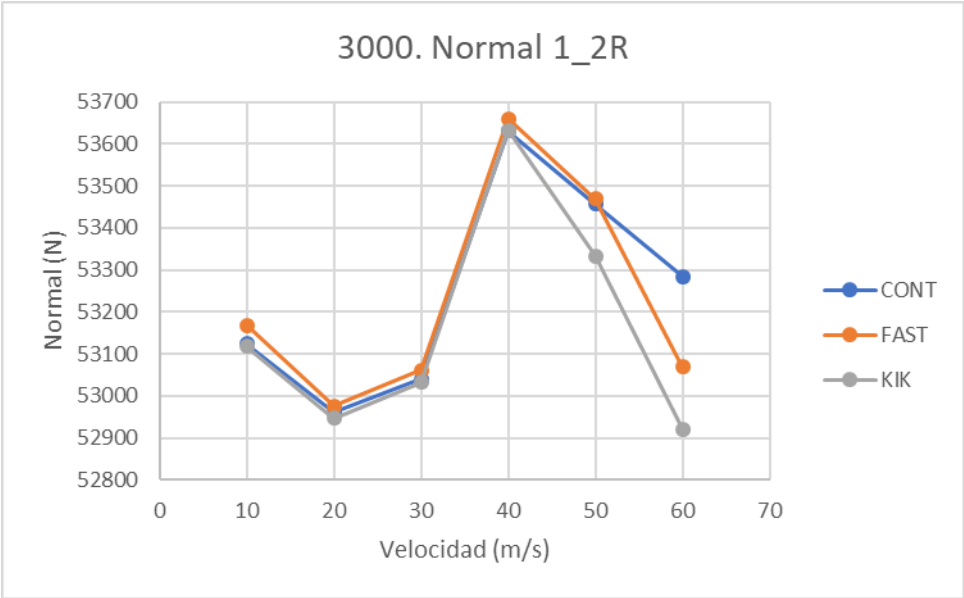

3000. Area 1_1R
0.00012
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

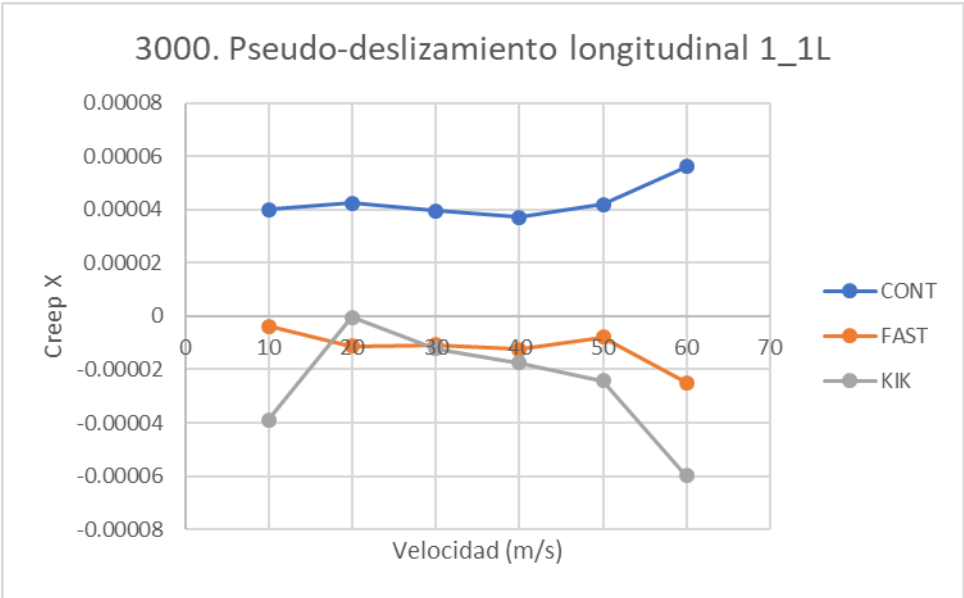

3000. Area 1_2R
0.00012
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
Area (m²)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

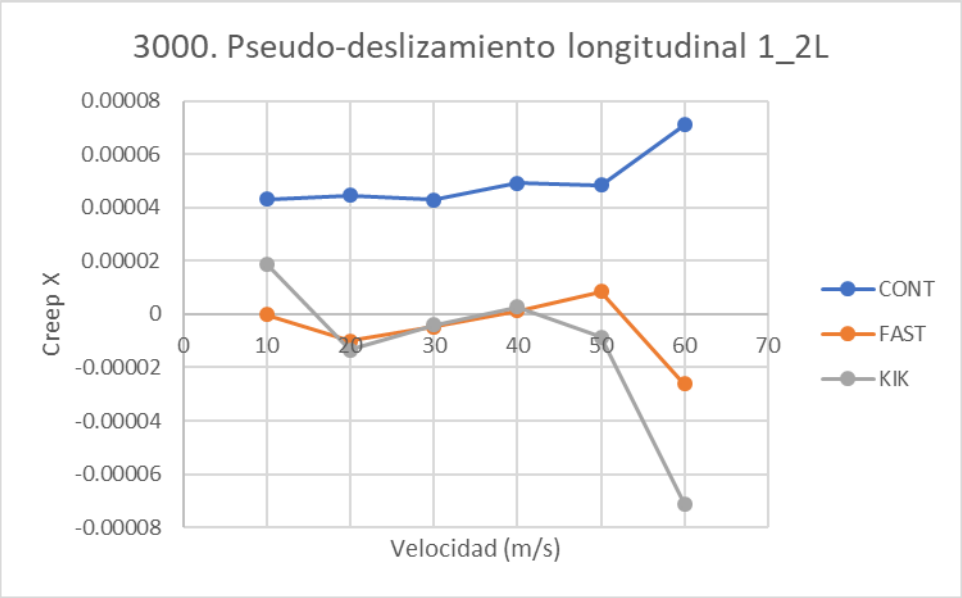

3000. Normal 1_1L
53400
53200
53000
52800
52600
52400
52200
Normal (N)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

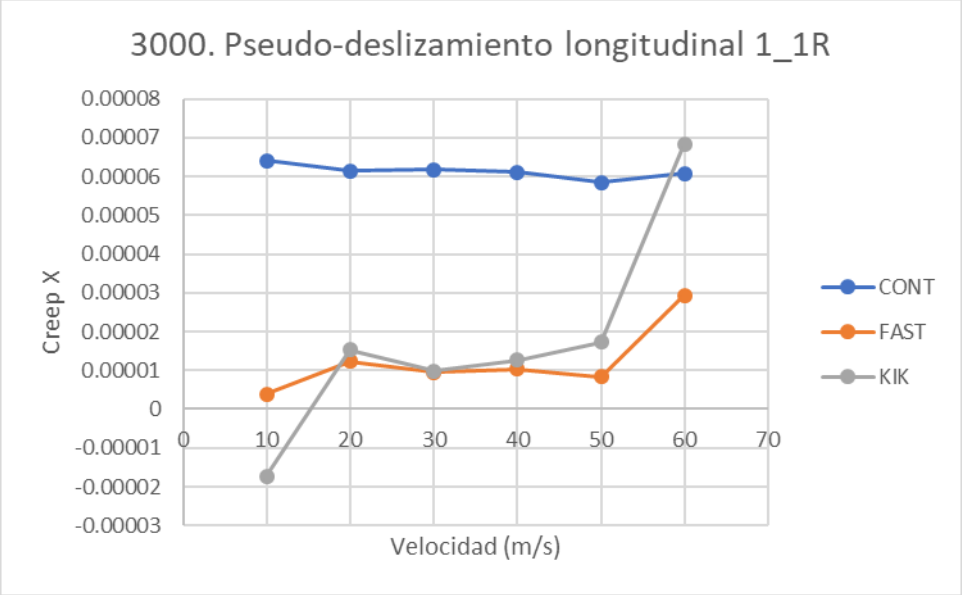

3000. Normal 1_2L
53600
53400
53200
53000
52800
52600
52400
52200
Normal (N)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

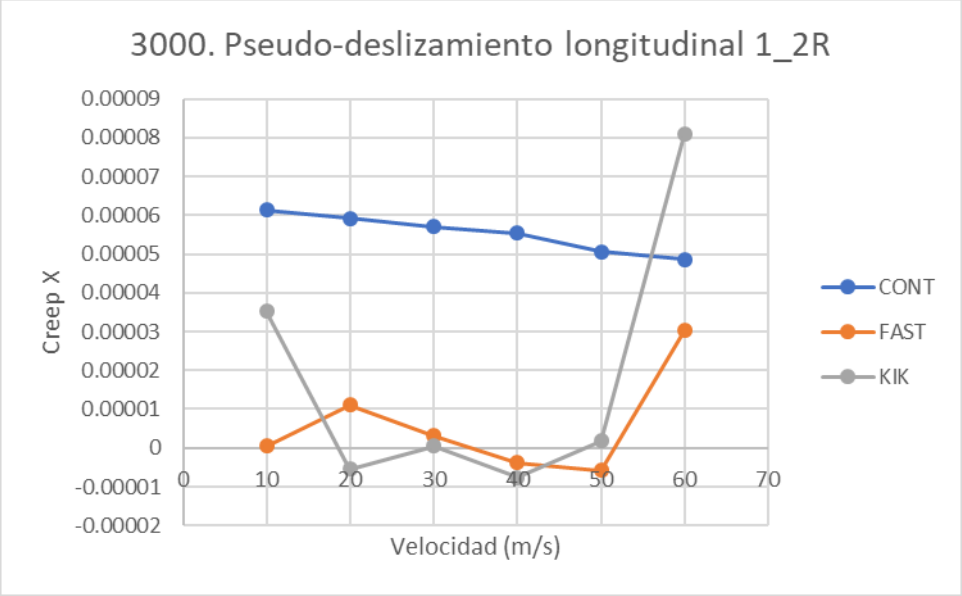

3000. Normal 1_1R
Normal (N)
53700
53600
53500
53400
53300
53200
53100
53000
52900
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

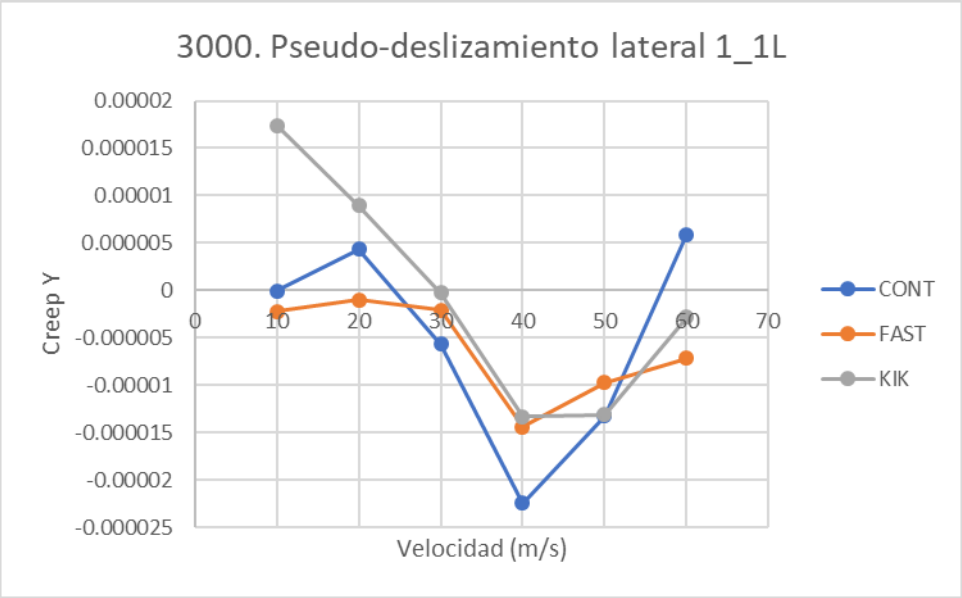

3000. Normal 1_2R
Normal (N)
53700
53600
53500
53400
53300
53200
53100
53000
52900
52800
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

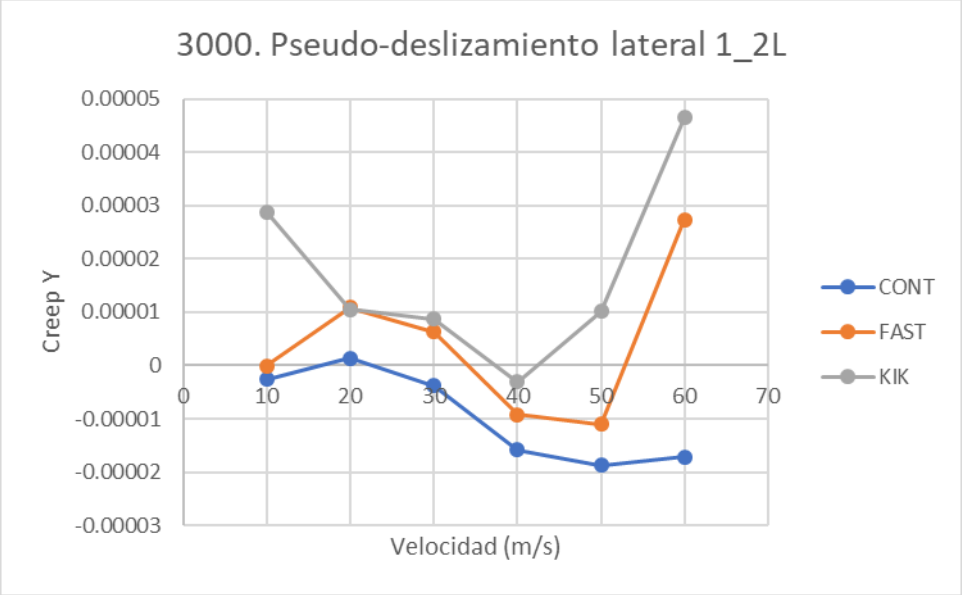

3000. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1L
Creep X
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
-0.00002
-0.00004
-0.00006
-0.00008
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

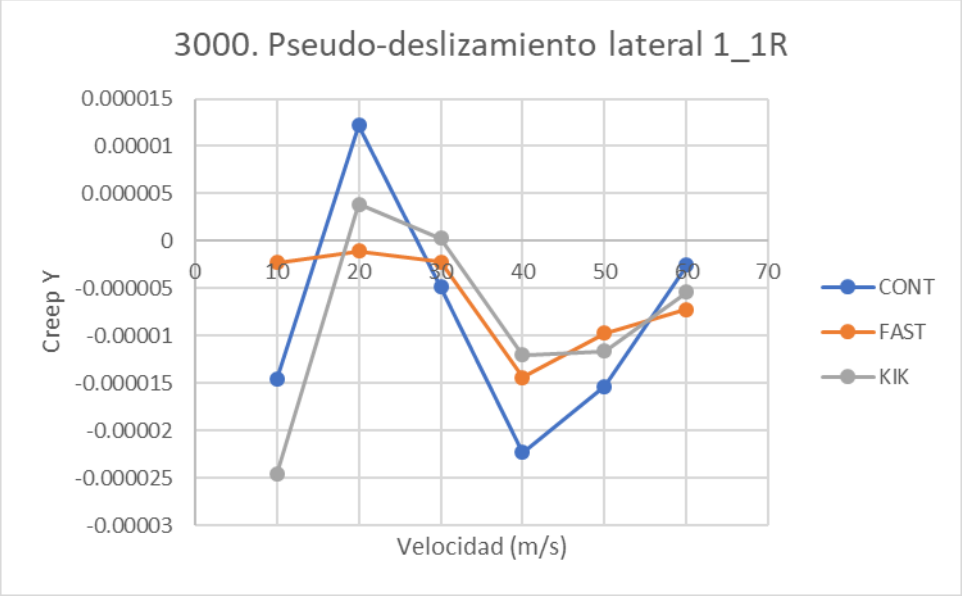

3000. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_2L
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
-0.00002
-0.00004
-0.00006
-0.00008
Creep X
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

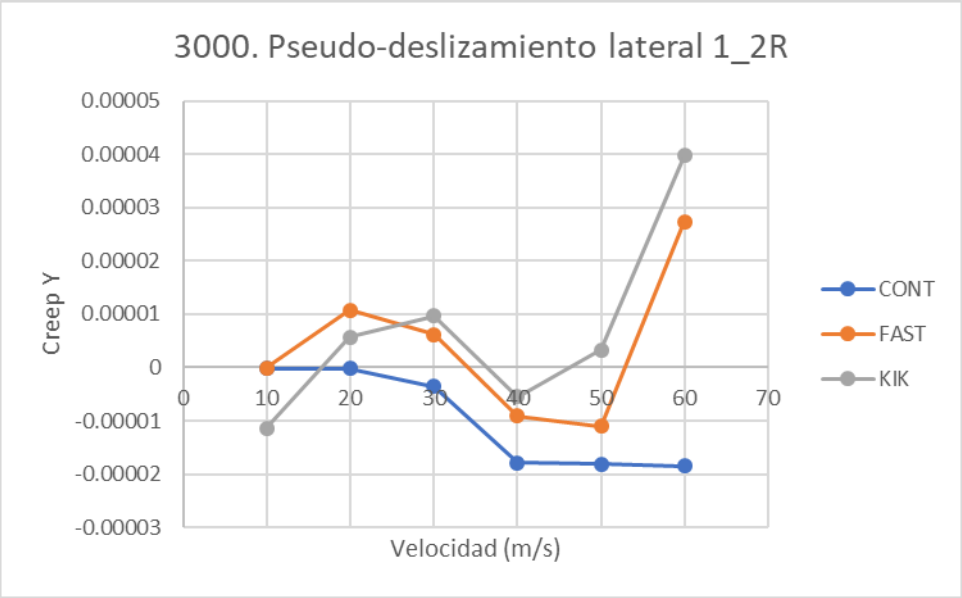

3000. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_1R
0.00008
0.00007
0.00006
0.00005
0.00004
0.00003
0.00002
0.00001
0
-0.00001
-0.00002
-0.00003
Creep X
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

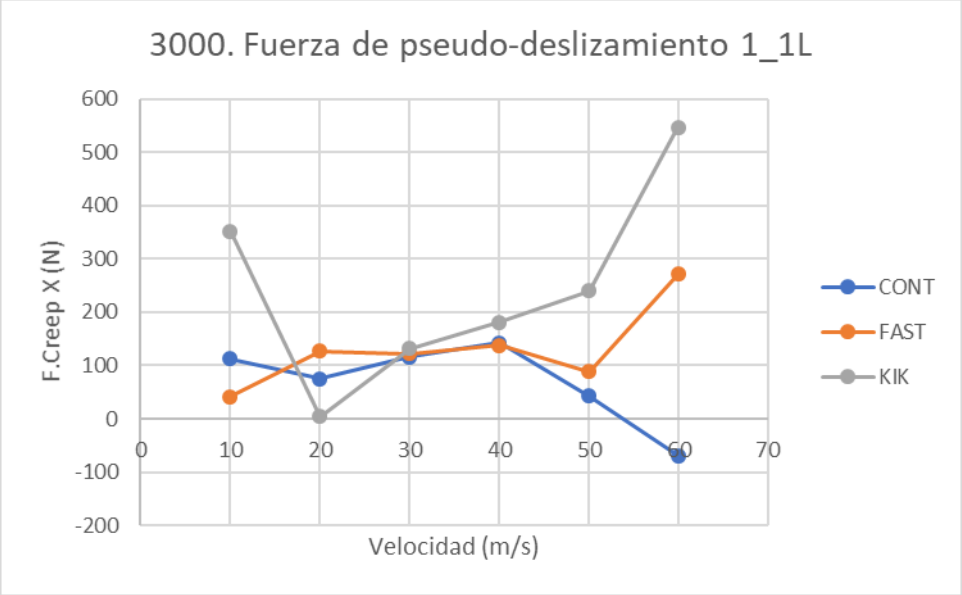

3000. Pseudo-deslizamiento longitudinal 1_2R
0.00009
0.00008
0.00007
0.00006
0.00005
0.00004
0.00003
0.00002
0.00001
0
-0.00001
-0.00002
Creep X
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

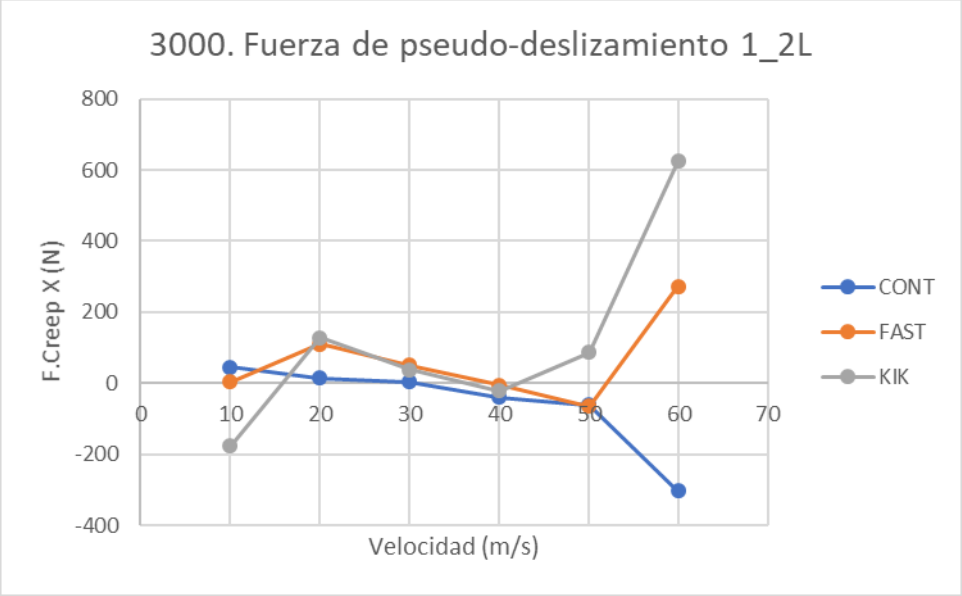

3000. Pseudo-deslizamiento lateral 1_1L
0.00002
0.000015
0.00001
0.000005
0
-0.000005
-0.00001
-0.000015
-0.00002
-0.000025
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

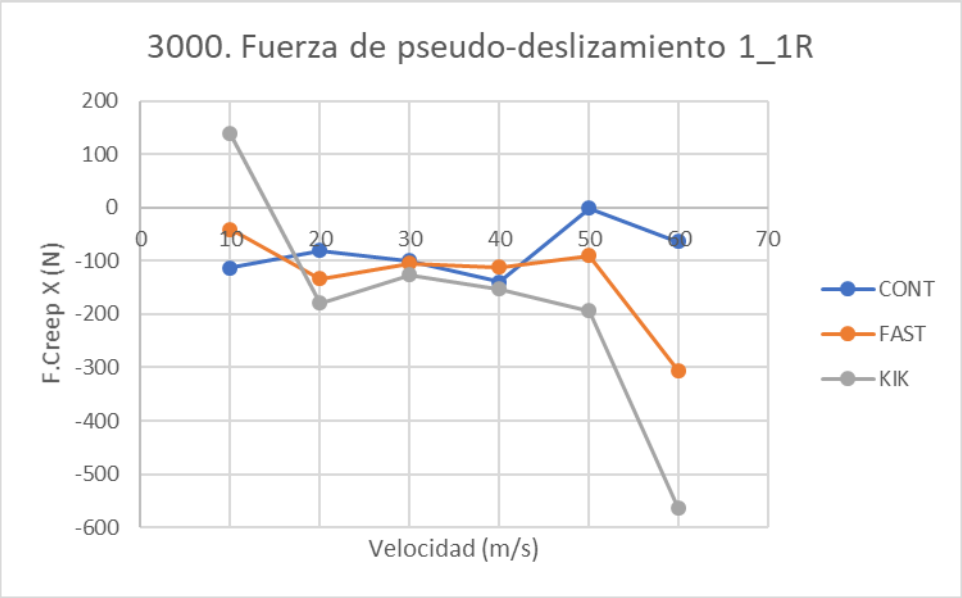

3000. Pseudo-deslizamiento lateral 1_2L
0.00005
0.00004
0.00003
0.00002
0.00001
0
-0.00001
-0.00002
-0.00003
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

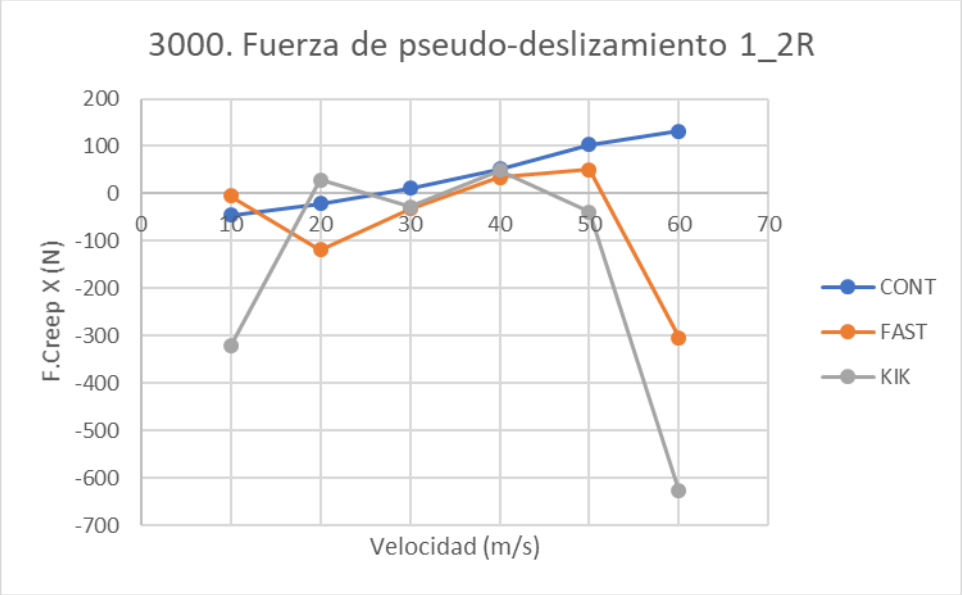

3000. Pseudo-deslizamiento lateral 1_1R
0.000015
0.00001
0.000005
0
-0.000005
-0.00001
-0.000015
-0.00002
-0.000025
-0.00003
Creep Y
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

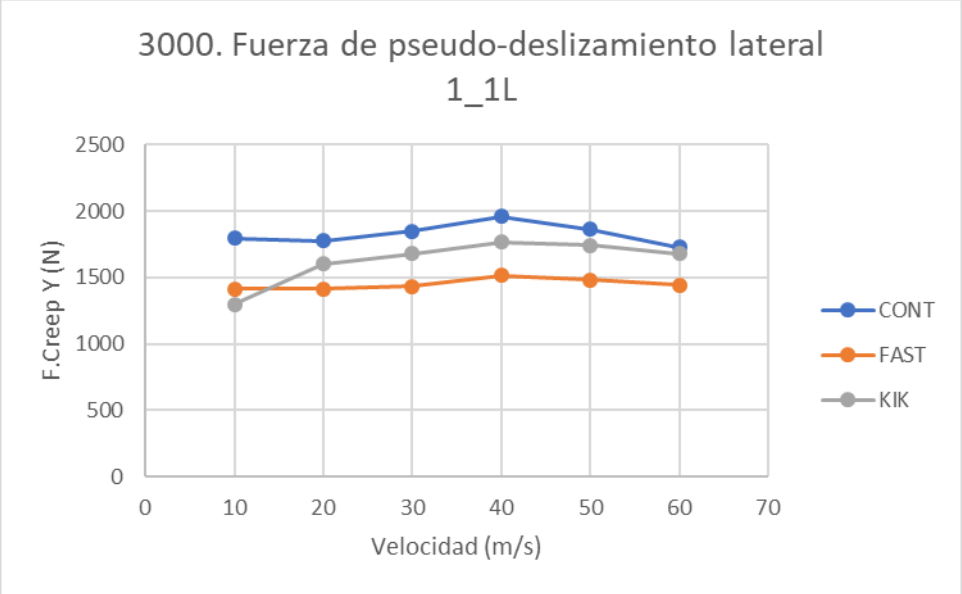

3000. Pseudo-deslizamiento lateral 1_2R
Creep Y
0.00005
0.00004
0.00003
0.00002
0.00001
0
-0.00001
-0.00002
-0.00003
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

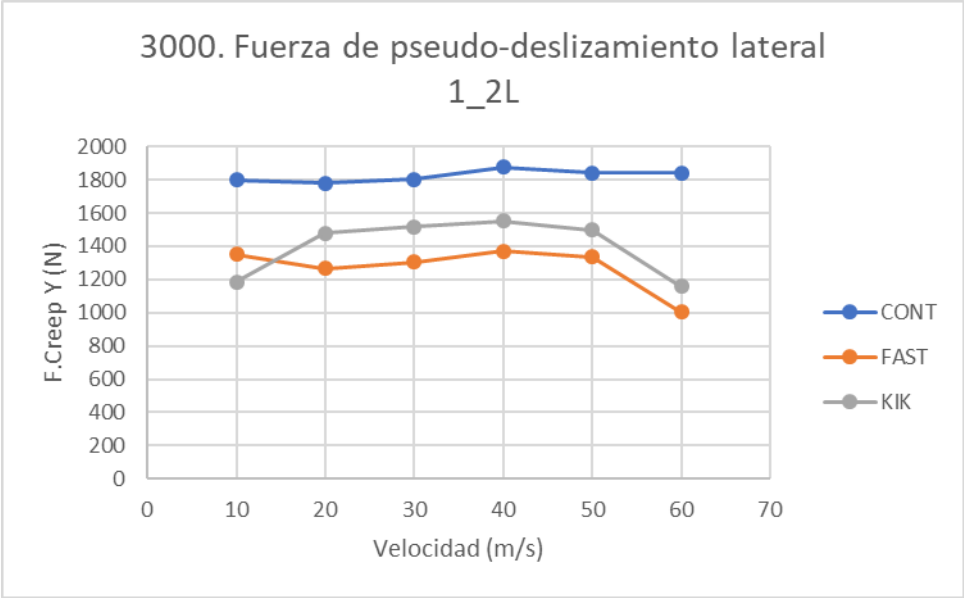

3000. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_1L
F.Creep X (N)
600
500
400
300
200
100
0
-100
-200
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

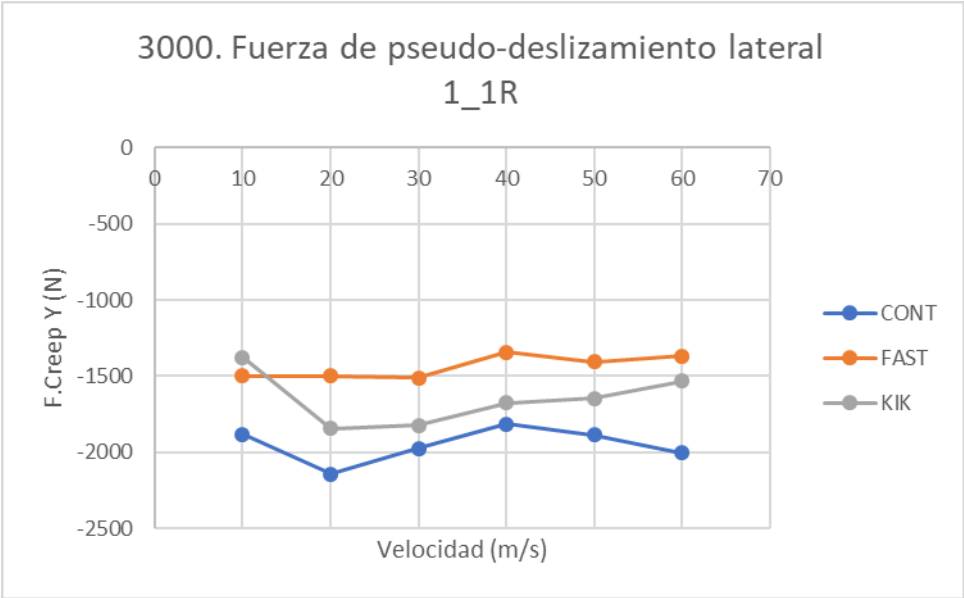

3000. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_2L
F.Creep X (N)
800
600
400
200
0
-200
-400
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

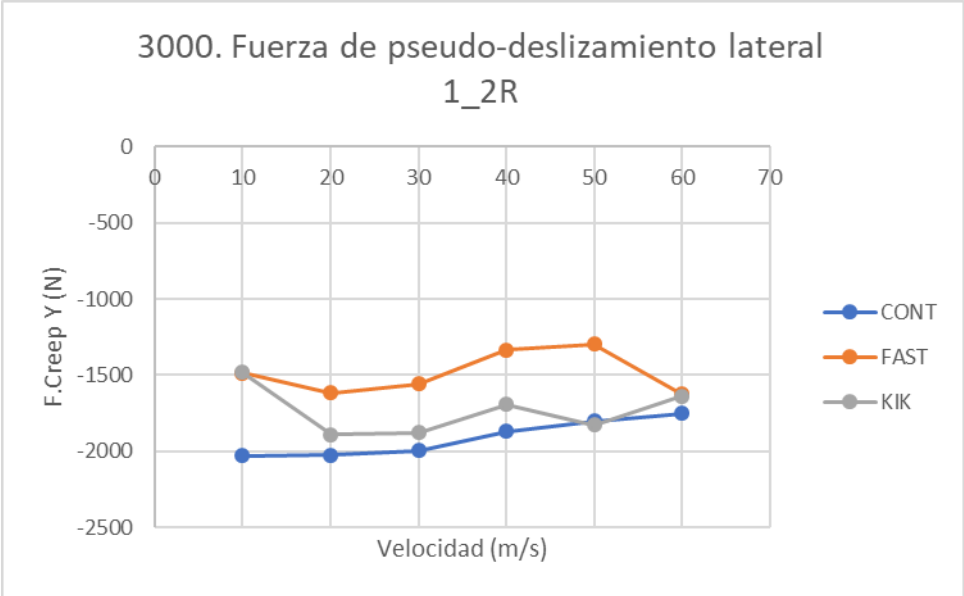

3000. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_1R
F.Creep X (N)
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

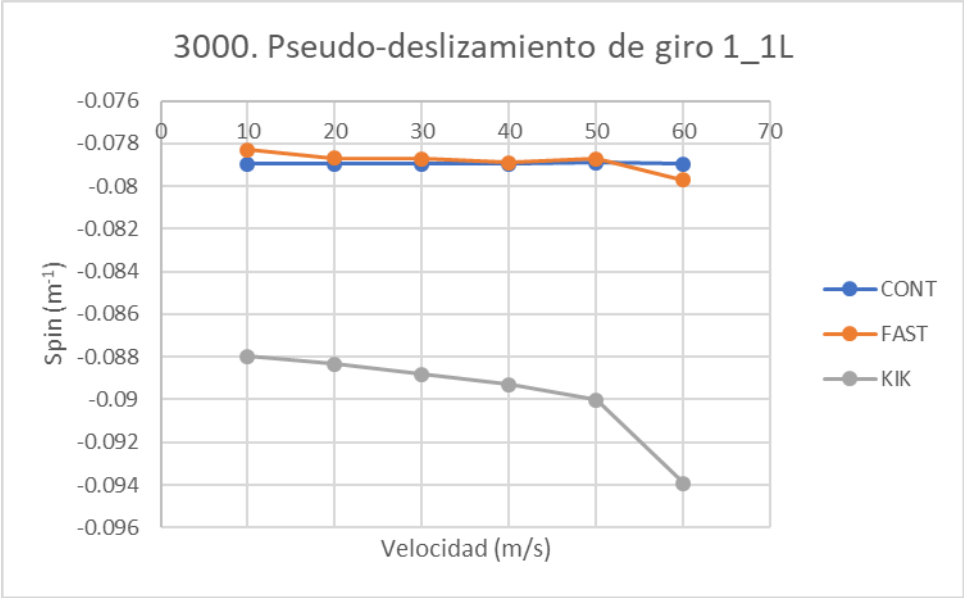

3000. Fuerza de pseudo-deslizamiento 1_2R
F.Creep X (N)
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

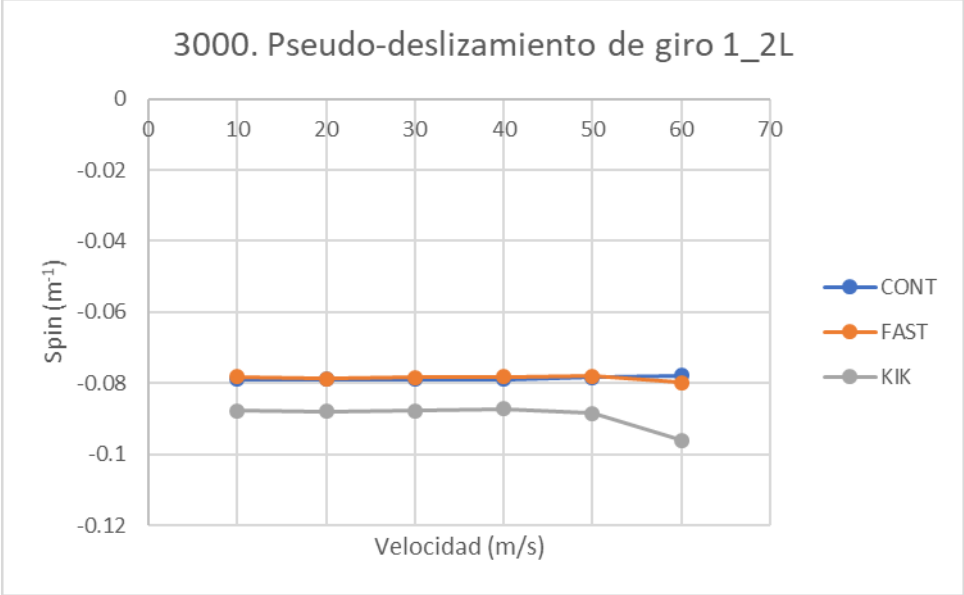

3000. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral 1_1L
F.Creep Y (N)
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

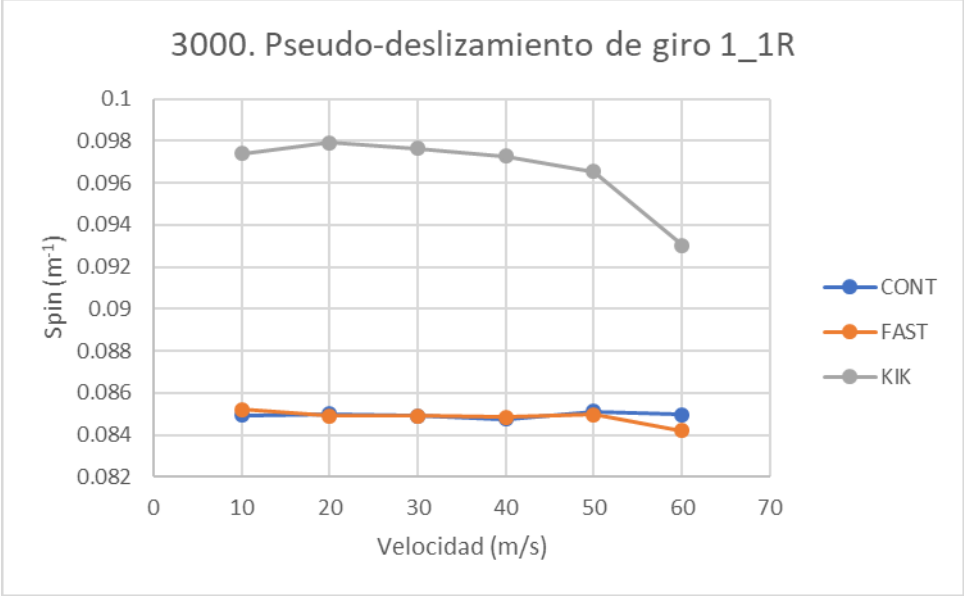

3000. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral
1_2L
F.Creep Y (N)
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

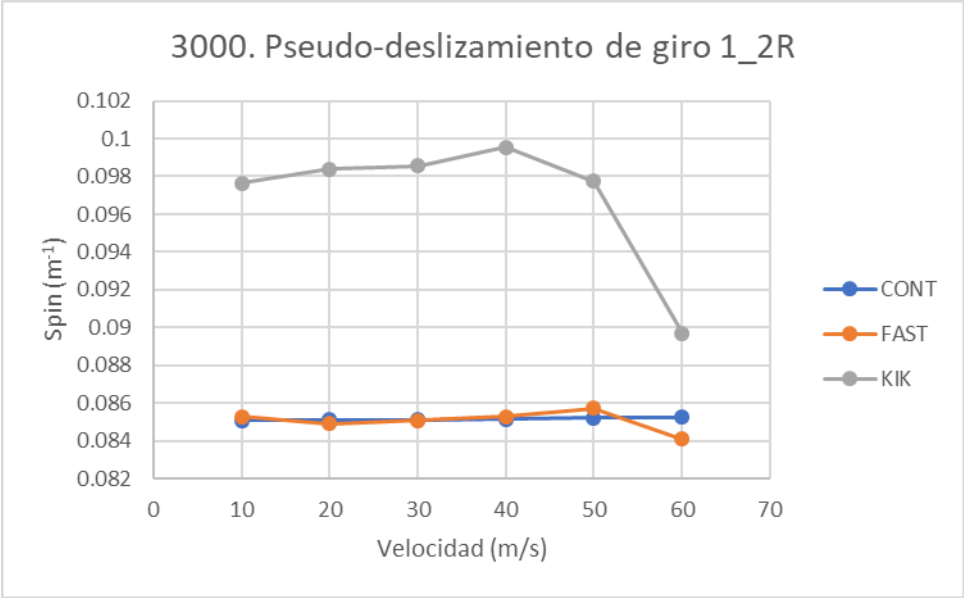

3000. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral
1_1R
F.Creep Y (N)
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

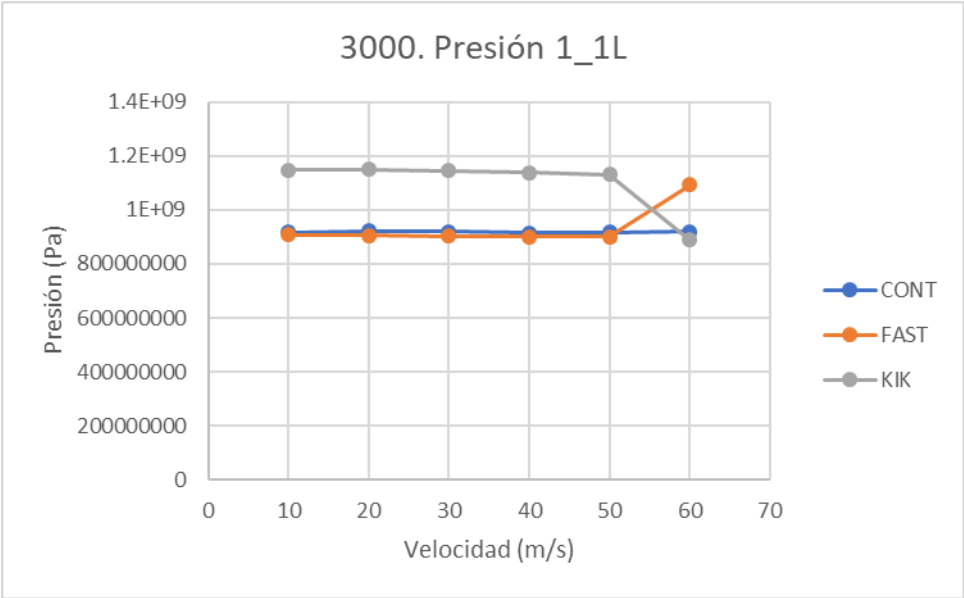

3000. Fuerza de pseudo-deslizamiento lateral
1_2R
F.Creep Y (N)
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

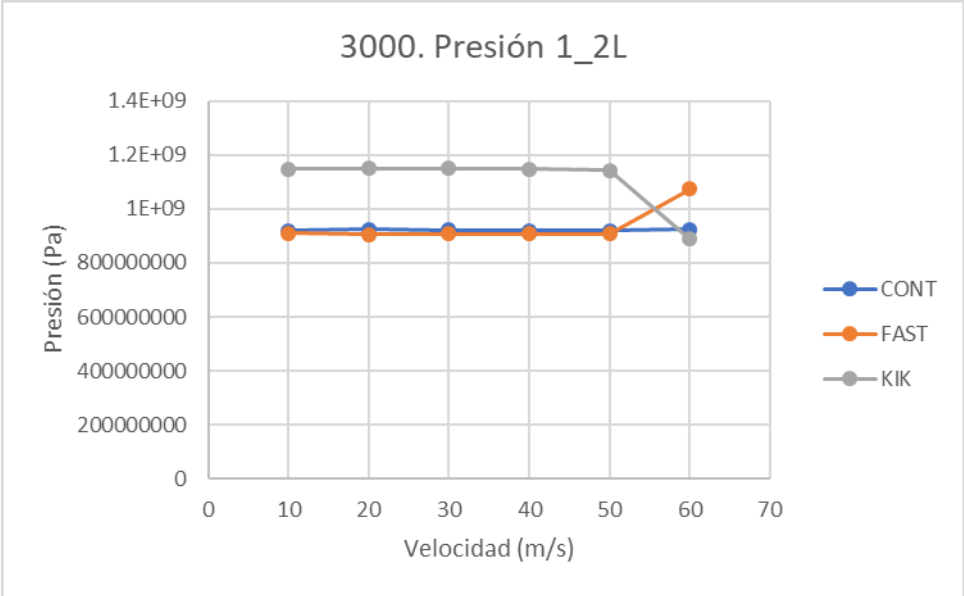

3000. Pseudo-deslizamiento de giro 1_1L
-0.076
-0.078
-0.08
-0.082
-0.084
-0.086
-0.088
-0.09
-0.092
-0.094
-0.096
0
10
20
30
40
50
60
70
Spin (m-1)
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

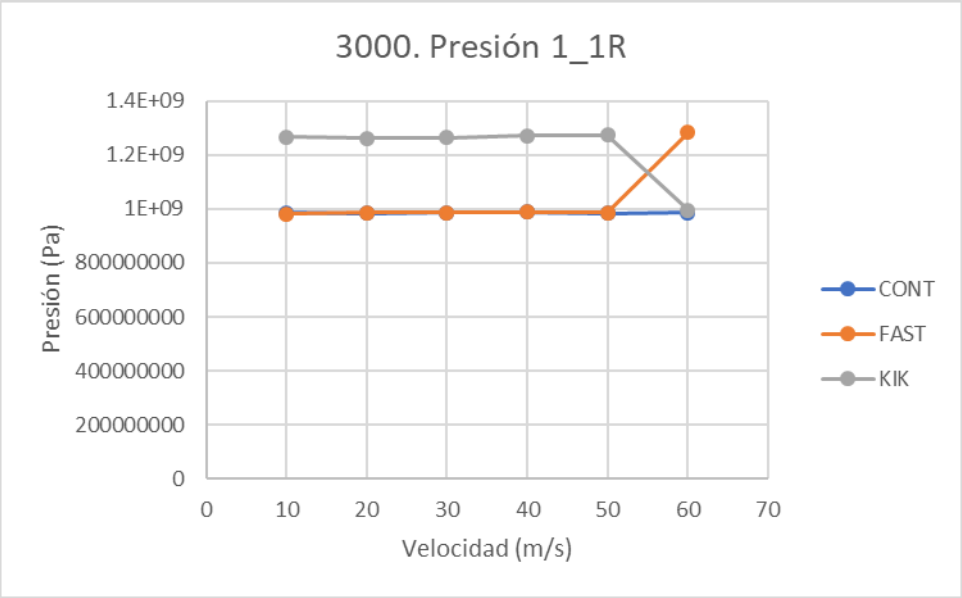

3000. Pseudo-deslizamiento de giro 1_2L
0
-0.02
-0.04
-0.06
-0.08
-0.1
-0.12
0
10
20
30
40
50
60
70
Spin (m-1)
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK

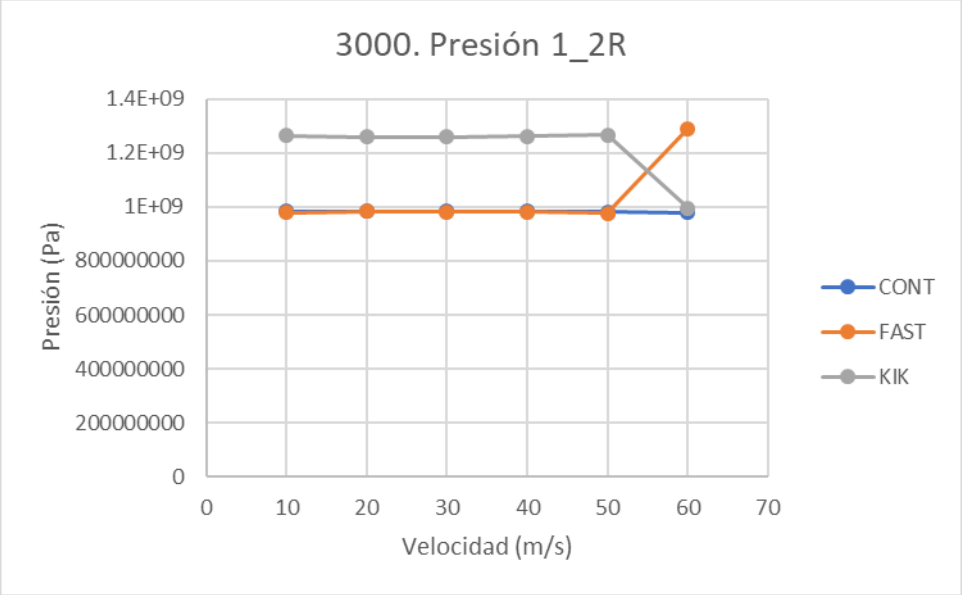

3000. Pseudo-deslizamiento de giro 1_1R
0.1
0.098
0.096
0.094
0.092
0.09
0.088
0.086
0.084
0.082
0
10
20
30
40
50
60
70
Spin (m-1)
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK


3000. Pseudo-deslizamiento de giro 1_2R
Spin (m-1)
0.102
0.1
0.098
0.096
0.094
0.092
0.09
0.088
0.086
0.084
0.082
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK


3000. Presión 1_1L
Presión (Pa)
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK


3000. Presión 1_2L
Presión (Pa)
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK


3000. Presión 1_1R
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK


3000. Presión 1_2R
1.4E+09
1.2E+09
1E+09
800000000
600000000
400000000
200000000
0
Presión (Pa)
0
10
20
30
40
50
60
70
Velocidad (m/s)
CONT
FAST
KIK