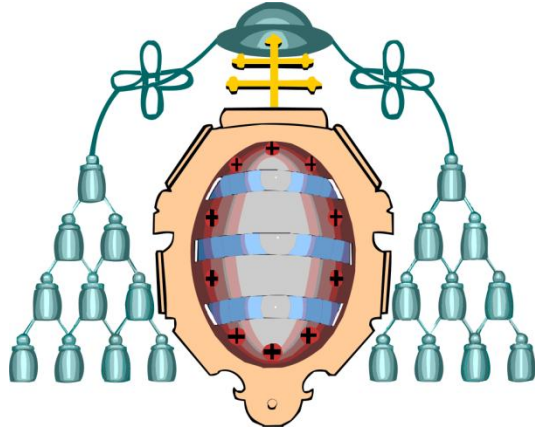


UNIVERSIDAD DE OVIEDO



TESIS DOCTORAL

**NUEVO SISTEMA DE EMPUJE
CONTINUO DE PUENTES: DISEÑO Y
ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN
NUMÉRICA.**

Autora

Mar Alonso Martínez

Directores

Dr. Juan José del Coz Díaz

Dr. Daniel Castro Fresno

2013

La inspiración existe, pero debe encontrarte trabajando (C.J. C.)

así que...

You must work hard and smart (F.S.)

y...

Debes darle al cuerpo lo que no te pide, nada de pereza (M.I.M.L)

Y entonces....comprobarás que...

FELICIDAD no es hacer lo que uno quiere, sino querer lo que uno hace.

(J.M.A.C.)

AGRADECIMIENTOS

Esta Tesis Doctoral no hubiera sido posible sin la gran colaboración de importantes empresas a las que debo agradecer su interés, su gran labor y su paciencia.

- CONSTRUCCIONES Y PROMOCIONES COPROSA S.A.
- José María Martínez Gutiérrez en representación de VSL Heavy Lifting
- AST Ingeniería
- Oficina Técnica Astur, OTA
- Talleres PLA S.L.
- Swanson Analysis Inc. (ANSYS Mechanical and ANSYS Workbench)

Asimismo, debo agradecer todo el apoyo brindado por el departamento de Construcción e Ingeniería de la Fabricación y a todas las entidades investigadoras que han colaborado en esta Tesis:

- GICONSIME (Grupo de Investigación de la Construcción Sostenible, Simulación y Ensayo de la Universidad de Oviedo)
- GITECO (Grupo de Investigación de las Tecnologías de la Construcción de la Universidad de Cantabria)
- METL (Laboratorio de Tribología en Ingeniería Mecánica de Purdue University)

También debo agradecer la ayuda que me han dado durante este largo proceso todo el personal del área de Construcción de la Universidad de Oviedo y otras áreas afines, Eduardo Rodríguez (profesor de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Oviedo), Elsa Díaz Garea (administrativa y amiga), Cristina Rodríguez González (coordinadora del Programa de Doctorado), Professor Sadeghi (profesor at Purdue University), gracias a ellos y a todos aquellos que me “dejo en el tintero”.

A título personal, me gustaría dar las gracias a las personas que me han acompañado y me han apoyado incondicionalmente, mi familia, la familia Sadeghi, mis directores de Tesis, Juanjo y Dani, mis “compañeros de batallas” americanos y por supuesto, a los que aguantan mis voces diarias, Antonio y Felipe.

Gracias a todos los aquí mencionados y a los que ahora mismo se me han olvidado, pero también estuvieron presentes.

ACKNOWLEDGMENTS

This Doctoral Thesis has been possible due to the collaboration of private companies:

- CONSTRUCCIONES Y PROMOCIONES COPROSA S.A.
- José María Martínez Gutiérrez de VSL Heavy Lifting.
- AST Ingeniería
- Oficina Técnica Astur, OTA
- Talleres PLA S.L.
- Swanson Analysis Inc. (ANSYS Mechanical and ANSYS Workbench)

Furthermore, I am grateful with the support of other research entities which have helped me in my research works:

- GICONSIME (Construction, Simulation and Testing Research Group from University of Oviedo)
- GITECO (Construction Technology Research Group from University of Cantabria)
- METL (Mechanical Engineering Tribology Laboratory from Purdue University)

Moreover, I have to give thanks to other people who have helped me in different steps of this so hard process they are mainly: my colleagues from the Area of Construction at the University of Oviedo, Eduardo Rodríguez Ordóñez (professor from Mechanical Engineering at the University of Oviedo), Elsa Díaz Garea (administrative personal at the University of Oviedo and my friend), Cristina Rodríguez González (head of my Doctoral Program), Professor Sadeghi (Professor at Purdue University and my director during my stay in the USA) and others that I've forgotten (I'm so sorry).

Personally, I sincerely thank to people who has made this possible: my family, Sadeghi's family, my Thesis directors, Juanjo and Dani, my American lab mates, and of course daily lab mates who "resist" to me every day, Antonio y Felipe.

RESUMEN

La Tesis Doctoral presenta un estudio del diseño y análisis numérico de un nuevo mecanismo de empuje de estructuras que permite la construcción de puentes de grandes luces utilizando un nuevo método constructivo.

El lanzamiento de puentes es un método muy utilizado en la actualidad aunque tiene importantes inconvenientes que las empresas del sector requieren solventar. Entre las principales demandas de los sistemas actuales se encuentra la continuidad, reversibilidad y seguridad en el empuje, así como la sostenibilidad, el aumento de la velocidad media de lanzamiento y la innovación en los métodos constructivos. Para lograr estos objetivos se diseñó un nuevo mecanismo basado en una oruga de tracción invertida, que en grupos sincronizados o no y desde el estribo, permite el desplazamiento de grandes estructuras utilizando la fuerza de fricción.

El diseño del mecanismo es llevado a cabo combinando métodos de la mecánica tradicional con métodos avanzados como las herramientas CAD y la simulación numérica mediante elementos finitos.

Los principales estudios realizados sobre el nuevo mecanismo de empuje son:

- Pre-diseño mecánico en función de los criterios de diseño utilizando un método multicriterio.
- Análisis no lineales mediante elementos finitos sobre los principales componentes del mecanismo.
- Estudio experimental mediante la técnica *pin-on-disc* del fenómeno de fricción entre el acero del puente y los elastómeros utilizados en el mecanismo.
- Análisis de la interacción estructural entre el puente y el mecanismo de empuje mediante elementos finitos aplicando la técnica de sub-estructuración.
- Análisis cinemático del mecanismo de empuje mediante elementos finitos.
- Optimización topológica mediante modelos numéricos de varios elementos resistentes del mecanismo.

Por último, esta Tesis se cierra con el desarrollo de un prototipo a escala 1:15 que permitirá, en posteriores trabajos de investigación realizar ensayos de laboratorio sobre el mismo.

En resumen, este trabajo desarrolla un nuevo mecanismo de empuje de puentes que es capaz de soportar el peso de la estructura a desplazar y aprovecha dicho esfuerzo para producir el desplazamiento mediante fricción. El caso extremo de lanzamiento se realizará por medio de cuatro dispositivos de empuje dispuestos en serie dos a dos bajo las almas del puente, capaces de soportar hasta 3000 Toneladas en total, alcanzando

velocidades medias de 20 m/h y permitiendo el desplazamiento en avance y retroceso de manera continua, controlada y segura. Además, se extrae una ley de comportamiento friccional para los elastómeros utilizados en el mecanismo en contacto con el material de la estructura, siendo este comportamiento dependiente de la carga normal aplicada y la velocidad. Asimismo, se expone un innovador sistema de compensación de carga que permite un control de seguridad activo, capaz de detectar sobrecargas durante el proceso de lanzamiento y permite detener el empuje en caso necesario evitando así accidentes importantes.

Este mecanismo, junto con un nuevo procedimiento de lanzamiento de puentes, fue patentado por la autora y otros investigadores. Asimismo, el proyecto que da origen a esta Tesis fue 1er Premio Nacional Arquímedes 2012 en la modalidad de Arquitectura y Construcción. En la actualidad, la divulgación continua a través de publicaciones y congresos.

ABSTRACT

The aim of this Doctoral Thesis provides a design and numerical analysis of a new mechanism for launching bridge structures. This new mechanism allows building large span bridges by means of a new launching procedure based on the Incremental Launching Method (ILM)

The ILM is a very useful method, but it presents several disadvantages such as: discontinuous displacement of bridge structure, no backward movement (needs expensive auxiliary equipment) and the systems to control the normal load and the security during the launching process are unlinked of the launching devices. Besides, other contributions are important in order to improve the current launching devices: sustainability, increasing of the average launching speed and the innovation in the construction methods. In this Doctoral Thesis to achieve these goals it has been designed a new continuous launching device which is based on a reverted track crawler. This new launching device uses the force of friction to provide the launching force.

The design of the new launching device has been carried out combining traditional mechanics methods with advanced tools as numerical simulations by finite element method (FEM). The main studies that have been developed are:

- Mechanical pre-design using a multicriteria method.
- Nonlinear analysis by FEM of the main components of the new mechanism. For this, more than ten numerical models have been carried out.
- Experimental study of the frictional behavior of the bridge steel in contact with several elastomers using *pin-on-disc* technique. It has been needed about 2000 laboratory tests.
- Structural interaction analysis between the bridge structure and the launching mechanism using the sub-structuring technique by FEM.
- Kinematic explicit analysis of the launching device using the FEM.
- Topological optimization using FEM of several elements of the launching mechanism.
- 1:15 Scale prototype in order to do laboratory tests in future research works.

The largest span that this mechanism can push is about 150 m. In this case, the launching process is carried out using four mechanisms which are placed under the bridge webs combined in pairs. The maximum normal load is up to $3 \cdot 10^7$ N and the launching speed is about 20 m/h. The new mechanism provides a continuous displacement, forward and backward directions in a secure way. Moreover, a new law of frictional behavior has been obtained from the experimental tests and the influence of

the speed and the normal load in the coefficient of friction between steel and elastomers has been proved.

In addition, a new system for load compensation has been included into the new mechanism. In this way, the new device can control the normal load during the launching process, as well as stop the displacement in case of overload or risks. It allows avoiding many catastrophic accidents.

In this Doctoral Thesis construction companies and research public entities have collaborated and it has led to two international patents and a National Prize (1st Prize from Arquimedes 2012 in the field of Architecture and Construction).

Finally, the disclosure process has been begun through papers, international congresses and conferences.

TABLA DE CONTENIDOS

1	Presentación de la Tesis Doctoral	1
1.1	Motivación	2
1.2	Objetivos generales	3
1.3	Estructura de la tesis.....	4
2	Estado del arte	7
2.1	El método constructivo de empuje de puentes	7
2.2	Clasificación de los puentes empujados.....	9
2.3	Sistemas de empuje	10
2.4	Ventajas e inconvenientes de los sistemas actuales	16
3	Estudio conceptual y requisitos de diseño.....	19
3.1	Estudio de alternativas	20
3.2	Requisitos de diseño para la alternativa seleccionada.....	29
3.3	Justificaciones de la solución adoptada según Electra-I	32
3.4	Patentes	34
4	Pre-diseño mecánico	37
4.1	Estudio de solicitaciones	37
4.2	Pre-dimensionamiento de los elementos básicos	42
4.3	Materiales en contacto: fenómeno de fricción	61
4.4	Descripción del funcionamiento del mecanismo y sus elementos	79
4.5	Modelo geométrico en 3-D	84
5	Simulación numérica del dispositivo	87

5.1	Métodos numéricos utilizados.....	87
5.2	Análisis no lineales del dispositivo	93
5.3	Análisis estático de la interacción estructural	105
5.4	Análisis cinemático	117
5.5	Optimización de los principales elementos resistentes del dispositivo.....	124
6	Fabricación del prototipo a escala 1:15	129
6.1	Proceso de fabricación aditiva y materiales empleados	129
6.2	Desarrollo del prototipo a escala 1:15	132
7	Conclusiones y líneas futuras de investigación.....	139
7.1	Conclusiones	139
7.2	Líneas futuras	144
7.3	Divulgación	145
1	State of art	153
1.1	Launching bridges classification.....	155
1.2	Launching systems	155
1.3	Advantages and disadvantages of current systems	157
2	Conceptual study and design requirements	159
2.1	Design alternatives	159
2.2	Design criteria	161
2.3	Reasons for selected solution	162
3	Mechanical design.....	163
3.1	Study of the static loads	163
3.2	Design of main elements	164
3.3	Materials in contact: friction in polymers	165

3.4	Three-dimensional geometrical model.....	174
4	Numerical Simulation	177
4.1	Non-linear analysis of launching device	177
4.2	Structural interaction analysis	182
4.3	Kinematic analysis	185
4.4	Shape optimization of main resistant elements of mechanism	186
5	1:15 Scale Prototype.....	189
6	Conclusions and future lines	193
6.1	Conclusions	193
6.2	Future research lines	197
6.3	Publications	197

TABLA DE CONTENIDOS DE FIGURAS

Figura 1. Procedimiento de lanzamiento de puentes: (a) esquema principales elementos auxiliares; (b) esquema ILM.....	8
Figura 2. Transporte del puente sobre raíles utilizando locomotora.....	11
Figura 3. Plataformas de transporte: (a) Taiwan High Speed Contract C210-2015 by VSL; (b) Taiwan High Speed Contract C260-270 by Continental Engineering Corp.	13
Figura 4. Puente Öresund (Suecia – Dinamarca): (a) fotografía del transporte de la estructura durante su construcción; (b) fotografía del puente en servicio.	13
Figura 5. Procedimiento de empuje mediante gatos de fricción: (a) esquema; (b) gatos hidráulicos utilizados.....	14
Figura 6. Sistema de tiro con cable.	15
Figura 7. Sistema actual mediante gatos de fricción: (a) en funcionamiento; (b) sin carga.	23
Figura 8. Sistema actual mediante tiro con cable.....	24
Figura 9. Orugas de tracción: (a) adaptación a superficies irregulares; (b) ejemplo de soporte de grandes cargas.	25
Figura 10. Colapsos: (a) Viaducto sobre el Río Verde, Almuñecar, Granada.; (b) viaducto Ignacio Zaragoza en Puebla, Zaragoza.	30
Figura 11. Bocetos iniciales de la alternativa seleccionada: (a) vista frontal; (b) vista en planta; (c) perspectiva del conjunto.	33
Figura 12. Esquema de solicitaciones para la fase de empuje más desfavorable para el mecanismo de empuje.....	38
Figura 13. Secuencia de lanzamiento estudiada.....	39
Figura 14. Reacción normal sobre el mecanismo de empuje para la primera fase de lanzamiento.....	39
Figura 15. Imagen del nuevo mecanismo de empuje de puentes.	42
Figura 16. Identificación de los elementos principales: (a) perspectiva del conjunto; (b) vista frontal del mecanismo.	43

Figura 17. Esfuerzos verticales considerados en el pre-dimensionamiento de los bulones.	44
Figura 18. Valores de los diámetros para las diferentes secciones del bulón.	46
Figura 19. Modelo numérico del bulón: (a) mala de elementos finitos; (b) condiciones de carga; (c) deformación total; (d) tensión equivalente de Von Mises; (e) factor de seguridad.	47
Figura 20. Geometría normalizada de ruedas dentadas para cadenas de rodillos: (a) teórica; (b) mediante el procedimiento gráfico de la herramienta CAD utilizada.	49
Figura 21. Secuencia del desarrollo geométrico de la rueda dentada mediante herramientas CAD: (a) croquis utilizados; (b) generación de rueda de diámetro exterior; (c) croquis geometría dentado; (d) operación de corte de dentado; (e) generación completa del dentado; (f) chaveta, eje y rueda final.....	51
Figura 22. Modelo numérico del conjunto rueda dentada – rodillo: (a) malla de elementos finitos; (b) condiciones de carga; (c) contacto friccional.	52
Figura 23. Resultados obtenidos en el modelo numérico: (a) tensión equivalente de Von-Mises; (b) factor de seguridad en el cálculo; (c) presión en el contacto; (d) tensión friccional en el contacto.	53
Figura 24. Diagrama de momentos flectores resultantes en los ejes de transmisión. ..	54
Figura 25. Modelo geométrico del eslabón de apoyo: (a) perspectiva isométrica; (b) vista frontal.	58
Figura 26. Malla del eslabón de apoyo.....	59
Figura 27. Condiciones de contorno del eslabón de apoyo.....	60
Figura 28. Deformación total del elemento: a) perspectiva isométrica; b) vista frontal.	60
Figura 29. Tensión equivalente de Von-Mises del eslabón de apoyo: a) perspectiva isométrica; b) vista frontal; c) factor de seguridad en el cálculo a tensión.....	61
Figura 30. Ensayo <i>pin-on-disc</i> : (a) diagrama del ensayo; (b) secciones de las formas del pin.	63
Figura 31. Fotografías de los ensayos reales realizados en Purdue University.....	63

Figura 32. Materiales utilizados en los ensayos <i>pin-on-disc</i> : (a) elastómeros; (b) discos de acero.	64
Figura 33. Fotografías de las probetas utilizadas en los ensayos de fricción: (a) herramienta de corte; (b) mordaza del pin; (c) probetas de elastómeros.	65
Figura 34. Proceso de envejecimiento de los elastómeros: (a) equipo empleado; (b) material elastómero en el interior del horno.	66
Figura 35. Resultados obtenidos en los ensayos <i>pin-on-disc</i> para el neopreno CR60 sobre el disco de acero liso (CR60_1) para diferentes condiciones de carga y velocidad.	69
Figura 36. Representación del coeficiente de fricción (COF) en función de la carga normal y de la velocidad para el neopreno CR60: (a) y (b) sobre el disco S1; (c) y (d) sobre el disco S2.	70
Figura 37. Representación del coeficiente de fricción (COF) en función de la carga normal y de la velocidad para el neopreno CR45: (a) y (b) sobre el disco S1; (c) y (d) sobre el disco S2.	71
Figura 38. Representación del coeficiente de fricción (μ) en función de la carga normal y de la velocidad para el neopreno NR60: (a) y (b) sobre el disco S1; (c) y (d) sobre el disco S2.	72
Figura 39. Representación del coeficiente de fricción (μ) en función de la carga normal y de la velocidad para el neopreno CR50: (a) y (b) sobre el disco S1; (c) y (d) sobre el disco S2.	73
Figura 40. Superficies de representación del coeficiente de fricción en función de dos variables, carga normal (N) y velocidad (v).	76
Figura 41. Vistas del conjunto del mecanismo diseñado: (a) perfil; (b) vista frontal; (c) perspectiva; (d) planta.	79
Figura 42. Indicación de los principales elementos resistentes sobre el diseño del mecanismo.	80
Figura 43. Imagen de apoyo del puente sobre el mecanismo de empuje: (a) perspectiva isométrica; (b) vista frontal.	81
Figura 44. Sistema de compensación de carga: (a) perspectiva del sistema; (b) ubicación del sistema en el conjunto del mecanismo; (c) vista de perfil; (d) vista frontal.	82

Figura 45. Mecanismo con carcasa: (a) conjunto; (b) carcasa exterior transparente; (c) vista frontal del conjunto; (d) accionamientos y placas anclajes.	82
Figura 46. Láminas anti-fricción laterales entre los bulones y la carcasa metálica protectora: (a) localización en el conjunto; (b) detalle; (c) perspectiva del conjunto...	83
Figura 47. Fases del modelo geométrico tridimensional: (a) croquis inicial; (b) elemento patrón de las cadenas de tracción; (c) eslabones de apoyo; (d) conjunto cerrado de las cadenas; (e) carriles de apoyo, carriles tensores y ejes de transmisión; (f) carcasa exterior del mecanismo; (g) motores hidráulicos y soportes.	85
Figura 48. Modelo geométrico tridimensional del sistema de compensación de carga: (a) identificación de los elementos principales; (b) perspectiva del conjunto; (c) vista frontal del conjunto con transparencia de uno de los actuadores; (d) perspectiva del conjunto.	86
Figura 49. Modelo geométrico del conjunto de eslabones estudiados a tracción.	94
Figura 50. Contactos utilizados en el modelo numérico entre: a) eslabones de tracción y bulones; b) eslabones de apoyo y bulones; c) placa de apoyo de neopreno y eslabón de apoyo; d) ruedas y bulones.....	95
Figura 51. Malla de elementos finitos de un tramo de las cadenas.	95
Figura 52. Condiciones de contorno del modelo de la cadena de tracción.	96
Figura 53. Fuerza de reacción frente a desplazamiento.	97
Figura 54. Resultados del análisis no lineal de los elementos sometidos a tracción: (a) deformación total; (b) tensión equivalente de Von-Mises.	97
Figura 55. Modelo geométrico del estudio de los eslabones de apoyo.	98
Figura 56. Contactos utilizados en el modelo numérico entre: (a) eslabones de tracción y bulones; (b) eslabones de apoyo y bulones; (c) placa de apoyo y eslabón de apoyo; (d) rodillos y bulones; (e) rodillos y carriles.....	100
Figura 57. Malla de elementos finitos del modelo de los eslabones de apoyo.....	100
Figura 58. Solicitaciones y restricciones de movimiento del modelo numérico: (a) perspectiva isométrica; (b) vista perfil izquierdo.....	101

Figura 59. Tensión equivalente de Von-Mises y deformación total de los principales elementos del dispositivo de empuje: (a) deformación total del conjunto; (b) tensión equivalente del conjunto; (c) tensión equivalente de los bulones; (d) tensión equivalente de los eslabones de apoyo; (e) deformación total de los rodillos sobre los carriles; (f) tensión equivalente de los eslabones de tracción sobre los bulones.	102
Figura 60. Representación y valores de las reacciones normales obtenidas sobre los carriles.	103
Figura 61. Modelo del sistema de compensación de carga: (a), (b) y (c) modelo geométrico; (d) mallado del modelo numérico por elementos finitos.	104
Figura 62. Solicitaciones sobre el modelo numérico del sistema de compensación de carga: (a) cargas aplicadas; (b) condiciones de contorno.	105
Figura 63. Resultados obtenidos en la simulación numérica no-lineal del dispositivo de compensación de carga: (a) deformación total; (b) factor de seguridad para tensiones.	105
Figura 64. Modelo geométrico simplificado para el estudio de la interacción estructural.	107
Figura 65. Estado inicial de los contactos.	108
Figura 66. Malla de elementos finitos del modelo geométrico.	109
Figura 67. Condiciones de contorno sobre el dispositivo de desplazamiento: (a) sobre superficie; (b) sobre líneas.	109
Figura 68. Simplificación de carga, media superestructura sobre mecanismos de empuje dispuestos en: (a) paralelo; (b) serie.	110
Figura 69. Reacciones teóricas durante la secuencia de empuje para puente de 150m de vano.	111
Figura 70. Secuencia de empuje para el cálculo de la interacción estructural.	112
Figura 71. Disposiciones de los dispositivos de empuje: (a) en paralelo con el exterior atrasado; (b) en paralelo con el exterior adelantado; (c) en serie.	113
Figura 72. Solución global adoptada: a) vista frontal; b) vista lateral.	115
Figura 73. Resultados obtenidos en la simulación numérica de la interacción estructural mediante sub-estructuración (valor máximo indicado en rojo).	116

Figura 74. Contactos mecánicos entre elementos.	118
Figura 75. Accionamientos de par en el modelo cinemático del mecanismo.	120
Figura 76. Muelles introducidos en la simulación cinemática para ejercer la función de tensor.	120
Figura 77. Cargas normales aplicadas sobre los eslabones de apoyo.	121
Figura 78. Secuencia de capturas del movimiento del mecanismo en la simulación cinemática a diferentes instantes de tiempo.....	123
Figura 79. Malla de elementos finitos del eslabón de apoyo.	124
Figura 80. Cargas aplicadas: (a) vista frontal; (b) perspectiva isométrica.	125
Figura 81. Resultados de la optimización topológica: (a) vista frontal; (b) perspectiva isométrica.	125
Figura 82. Resultados del análisis estructural estático: (a) deformación total; (b) tensión equivalente de Von-Mises.	126
Figura 83. Modelo numérico de la optimización topológica: (a) modelo geométrico; (b) malla de elementos finitos; (c) condiciones de contorno; (d) resultados de la optimización.....	127
Figura 84. Resultados obtenidos en el análisis estático estructural del elemento optimizado: (a) deformación total; (b) tensión equivalente de Von-Mises; (c) factor de seguridad para el material de acero estructural.....	128
Figura 85. Ensayos de tracción del plástico de ABS: (a) probetas; (b) ensayo.....	130
Figura 86. Resultados obtenidos en los ensayos de tracción sobre probetas normalizadas de plástico ABS.	131
Figura 87. Montaje de 4 m. del prototipo del puente: (a) canto; (b) vista longitudinal. ..	132
Figura 88. Técnica de fabricación aditiva: (a) eslabones de la cadena de transmisión; (b) eslabones de apoyo durante su proceso de fabricación.	133
Figura 89. Principales elementos del ensamblaje del prototipo a escala 1:5	133

Figura 90. Modelo numérico de la estructura del tablero del puente a escala 1:15: (a) modelo geométrico; (b) canto del modelo; (c) malla de elementos finitos; (d) condiciones de contorno; (e) deformación total; (f) reacciones obtenidas.	134
Figura 91. Características técnicas del motor utilizado como accionamiento del prototipo.	136
Figura 92. Soportes de los rodamientos utilizados en los ejes tractores.	136
Figura 93. Soportes tensores utilizados en los ejes no tractores.	137
Figura 94. Elementos del prototipo del mecanismo: (a) motor; (b) soportes de los rodamientos de los ejes de transmisión.....	137
Figura 95. Sensores para los ensayos del prototipo a escala 1:15.....	138
Figura 96. Modelo tridimensional del prototipo a escala 1:15.....	138

TABLA DE CONTENIDOS DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de evaluación de alternativas.	32
Tabla 2. Matrices de concordancia y discordancia obtenidas en la evaluación de las alternativas según el método Electra I.	33
Tabla 3. Valores de las reacciones sobre el mecanismo de empuje para las diferentes etapas de la primera fase de lanzamiento.	40
Tabla 4. Valores de los esfuerzos verticales sobre los bulones de las cadenas.	44
Tabla 5. Diámetro mínimo obtenido para las secciones de los bulones.	46
Tabla 6. Cálculo del diámetro mínimo para las secciones de los ejes de transmisión.	56
Tabla 7. Materiales utilizados en los ensayos <i>pin-on-disc</i> y condiciones de carga y velocidad estudiadas.	66
Tabla 8. Ensayos realizados para el elastómero CR60_n en el disco S1.	67
Tabla 9. Ecuaciones de coeficiente de fricción en función de la carga normal y la velocidad utilizadas en la obtención de la superficie tridimensional $\mu(N,v)$	75
Tabla 10. Ecuaciones de las superficies de representación del coeficiente de fricción en función de dos variables, la carga normal (N) y la velocidad (v).	76
Tabla 11. Valores de coeficiente de fricción mínimos.	78
Tabla 12. Características de los contactos.	95
Tabla 13. Características de los contactos en el modelo numérico sometido a tracción y flexión.	99
Tabla 14. Valores máximos de las reacciones.	112
Tabla 15. Parámetros de configuración de la rigidez de los contactos mecánicos en la simulación cinemática.	118
Tabla 16. Parámetros del SOLVER utilizados en la simulación cinemática.	121
Tabla 17. Valores obtenidos en los ensayos de tracción sobre las probetas de ABS.	131

SIMBOLOGÍA

A	coeficientes de la superficie que representa $\mu(N,v)$
B	coeficientes de la superficie que representa $\mu(N,v)$
$D_{norm\ min}$	diámetro normalizado mínimo
D_r	diámetro nominal del rodillo de la cadena de transmisión
D_s	diámetro primitivo de la rueda dentada
F	carga soportada por el bulón
F_H	fuerza horizontal necesaria para desplazar la estructura por rozamiento
$F_{N/unit}$	carga normal por dispositivo de empuje
F_N	carga normal total ejercida por el puente a desplazar
F_n	fuerza de impacto entre sólidos en contacto
l	distancia desde el punto de aplicación de la carga hasta la sección de momento nulo
m	módulo de la rueda dentada
M_f	momento flector
M_t	momento torsor en el eje
N	número de dientes de la rueda dentada
p	paso de la rueda dentada y la cadena de transmisión
R	resistencia a tracción del cable utilizado
R_{10}	valor de la reacción en el bulón fijo para un desplazamiento de 10 mm. (simulación numérica cadena de transmisión)
R_r	reacción real sobre el mecanismo de empuje [N]
R_t	reacción teórica calculada sobre el mecanismo de empuje [N]
$Tiro$	valor de la fuerza de tracción en la cadena (simulación numérica cadena de transmisión)

Tr	tiro real necesario para desarrollar el empuje
Tt	tiro teórico necesario para desarrollar el empuje
W_f	momento resistente a flexión
W_t	momento resistente torsor
d	diámetro del bulón
dg/dt	velocidad de penetración en el punto de contacto
$disp$	desplazamiento inicial impuesto arbitrariamente (10 mm) (simulación numérica cadena de transmisión)
$disp'$	desplazamiento buscado (simulación numérica cadena de transmisión)
f	factor de seguridad
g	penetración de un cuerpo en otro en los contactos mecánicos de la simulación cinemática
σ_a	tensión admisible del material
σ_f	tensión a flexión ejercida por el momento flector
σ_{r_c}	tensión combinada, considera esfuerzos de tensión y torsión
σ_{r_l}	tensión relativa al alargamiento
σ_{r_s}	tensión relativa a la forma del eje
τ	tensión debida al momento torsor en el eje
$\mu(N)$	dependencia del coeficiente de fricción con respecto a la carga normal
$\mu(v)$	dependencia del coeficiente de fricción respecto a la velocidad
$\mu(N,v)$	ecuación del coeficiente de fricción considerando dos variables

1

Presentación de la Tesis Doctoral

Una de las obras de construcción más emblemáticas la constituyen los puentes. Por ello, desde sus inicios, la construcción y montaje de estructuras ha sido una línea de investigación importante en la ingeniería industrial y civil. Las empresas de construcción se encuentran obligadas a invertir en el desarrollo de nuevas técnicas, sistemas y métodos constructivos que mejoren los plazos de ejecución de las obras, la seguridad en las mismas y sus costes. Asimismo, cada una de las empresas del sector, busca diferenciarse en un determinado campo de actuación, con el fin de conseguir la distinción entre sus competidoras. Para ello, las compañías tienden a buscar líneas de investigación y desarrollo propias que puedan generar diferentes métodos y sistemas constructivos innovadores y optimizados. En este sentido, existen ciertas preocupaciones en el sector, difíciles de solventar, que motivaron esta Tesis Doctoral y dieron lugar a las innovadoras soluciones. Aspectos tales como la eficiencia o la seguridad de la ejecución, la sostenibilidad, la calidad o la innovación del método constructivo son los factores que hacen hoy en día una solución competitiva.

Dentro de los sistemas constructivos de estas estructuras, el “*empuje o lanzamiento de puentes*” es uno de los métodos más utilizados en la actualidad. Su campo de aplicación es amplio aunque se utiliza principalmente para puentes de hormigón, de acero o mixtos de grandes luces. Si bien es cierto que este método ha sido utilizado para brillantes y complejas obras civiles, también lo es que es un método que ha dado lugar a importantes accidentes, en los cuales se llegó a lamentar la pérdida de vidas humanas. Las grandes ventajas de este sistema hacen que las empresas sigan utilizándolo, incluso a pesar de que en algunas ocasiones estas obras resulten muy costosas. Aumentar la seguridad y la eficiencia de estos métodos es en la actualidad una de las principales

inquietudes del sector, y uno de los motivos por los que las empresas privadas y las entidades públicas se unen para trabajar en una misma dirección.

En esta Tesis Doctoral se lleva a cabo una revisión del estado del arte relativo al empuje de puentes, con el objeto de conocer las soluciones actuales y el fundamento de la técnica. En base a las dificultades que estos muestran y considerando los objetivos de este trabajo de investigación se expone un nuevo procedimiento de empuje, así como un diseño y pre-dimensionamiento de un nuevo mecanismo de empuje continuo de puentes. Este mecanismo es analizado en profundidad mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM). Asimismo, se realiza un prototipo a escala del propio mecanismo y del puente a empujar. Este documento finaliza con las principales conclusiones del trabajo de investigación desarrollado y las líneas futuras de planteadas.

1.1 Motivación

En el marco actual económico-social en el que nos encontramos es difícil pensar en inversiones económicas. Si bien es sabido por todos la difícil situación en la que el sector de la construcción se encuentra, es igualmente conocido que la vía de escape es la innovación. El diseño de nuevos métodos constructivos más eficaces y consecuentemente menos costosos son algunas de las demandas de este sector.

Esta tesis doctoral surge de un proyecto de investigación de gran envergadura titulado “*Diseño de un nuevo sistema de empuje de puentes metálicos (mixtos) y sección constante mediante métodos numéricos y validación experimental - Proyecto ALCANZA*”. Se trata de un proyecto de cooperación público-privada perteneciente al Sub-Programa INNPACTO 2010. En esta convocatoria se promueve la colaboración de organismos investigadores y empresas privadas en el desarrollo de proyectos de I+D+i los cuales deben potenciar la innovación y la inversión privada, así como generar empleo y mejorar el balance tecnológico nacional. El proyecto ALCANZA fue planificado para afrontar estos objetivos, y cumple, actualmente ya finalizado, con los hitos y exigencias programadas.

La colaboración de la Empresa COPROSA (Construcciones y Promociones S.A.) con la Universidad de Cantabria, a través del grupo de investigación GITECO (Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción), así como con la Universidad de Oviedo, mediante el grupo de investigación GICONSIME (Grupo de Investigación de Construcción Sostenible, Simulación y Ensayo), permitió crear un equipo de investigación cuya línea de trabajo encontró un balance “teórico-práctico” que superó los objetivos del proyecto y generó una importante aportación tecnológica.

Esta investigación, en la que se aprovechó al máximo la sinergia entre la empresa privada y dos entidades públicas investigadoras, consiguió importantes reconocimientos que constatan el buen trabajo realizado: dos patentes, un premio Nacional (1er Premio Arquímedes 2012), dos tesis doctorales, varias publicaciones y varios proyectos fin de carrera. Todo esto, acompañado de la correspondiente divulgación científico-tecnológica, tan necesaria hoy en día, generó cierto interés en otras empresas del sector dando lugar a colaboraciones nacionales e internacionales que permitieron el progreso y desarrollo de esta línea de investigación.

1.2 Objetivos generales

Esta tesis doctoral persigue dar un salto tecnológico en los sistemas constructivos de puentes, mejorando los actuales métodos de empuje a través de uno nuevo que permita solventar la problemática actual. Este nuevo sistema será desarrollado en base al cumplimiento de los objetivos marcados en el Proyecto ALCANZA, los cuales se pueden resumir en los siguientes:

- ***Aumento de luces***: desde las actuales en torno a 60 – 80 m hasta el reto de 150 m de luz.
- ***Ampliación del campo de aplicación a obras ferroviarias***: desde las estructuras empujadas actualmente, mayoritariamente de hormigón, hasta conseguir el empuje de puentes metálicos o mixtos de carreteras y/o vías férreas.
- ***Empuje continuo***: continuidad del proceso actual, el cual posee tiempos muertos que aumentan notablemente el coste de la construcción.
- ***Incorporación de sistemas de seguridad activa***: se introducen en el proceso sistemas de control de carga y de actuación en tiempo real que permiten evitar accidentes que actualmente han tenido lugar durante la ejecución del lanzamiento de estructuras.
- ***Aumento de la velocidad media del empuje***: mejorando las velocidades puntas y medias del empuje se consigue disminuir el tiempo de empuje con la consiguiente mejora en la eficiencia del proceso.
- ***Construcción sostenible***: desarrollo de un nuevo método constructivo de empuje de puentes que disminuya el impacto medioambiental de la obra civil.
- ***Innovación y calidad***: contribuir a la tecnología de construcción aportando innovación y calidad a nuevos o mejorados métodos constructivos.

El nuevo sistema de empuje de puentes garantizará un empuje seguro reduciendo costes e impacto medioambiental. De este modo, las empresas de obra civil dispondrán de una innovadora tecnología competitiva y sostenible de gran aplicación.

1.3 Estructura de la tesis

El presente documento comienza con un resumen general en dos idiomas, español e inglés. A continuación, se encuentran los índices: índice de contenidos, índice de figuras e índice de tablas, así como la lista de la simbología utilizada en todo el documento. Posteriormente, los siete capítulos que componen la Tesis Doctoral seguidos por un resumen de los mismos en inglés. Finalmente, se incluyen varios anexos donde se puede encontrar información complementaria, ANEXO I y ANEXO II patentes desarrolladas y ANEXO III resultados de los ensayos de fricción mediante la técnica *pin-on-disc*. El contenido de cada capítulo se expone a continuación:

Capítulo 1. Presentación de la Tesis. Se encuentra el marco en el que se alberga el proyecto, con sus componentes, sus objetivos y sus motivaciones.

Capítulo 2. Estado del arte. Se abordan las técnicas actuales de manera breve. Se comentan diferentes técnicas de empuje de puentes con el fin de presentar al lector las actuales posibilidades y limitaciones.

Capítulo 3. Estudio conceptual y requisitos diseño. Se estudian las diferentes alternativas propuestas para solventar el problema en base a unas condiciones impuestas por éste. Después de estudiar las diferentes posibilidades, se selecciona una de ellas. A partir de este estudio conceptual surge el diseño de dos sistemas: por un lado el sistema de lanzamiento de puentes; es decir, *cómo* empujar el puente, y por otro el sistema de desplazamiento continuo de estructuras, es decir; *con qué* hacerlo. Estos dos sistemas dan lugar a dos patentes, la patente DCNLBS y la patente DCACLM, las cuales también son comentadas en este capítulo y adjuntadas en los anexos.

Capítulo 4. Pre-diseño mecánico. Se exponen los cálculos relativos al pre-dimensionamiento del mecanismo desarrollado en esta tesis y correspondiente a la patente DCACLM. Se lleva a cabo un pre-dimensionamiento de los elementos básicos, se describe el funcionamiento del mecanismo y se muestra el modelo paramétrico tri-dimensional del mecanismo después de haber sido calculado.

Capítulo 5. Simulación Numérica del dispositivo. Se realizan simulaciones numéricas mediante elementos finitos del mecanismo diseñado. En primer lugar, se llevan a cabo análisis estáticos estructurales no lineales sobre los diferentes elementos resistentes del dispositivo. Posteriormente, se realiza un análisis de la interacción entre la estructura del puente y el dispositivo a través de la técnica de sub-estructuración utilizando superelementos. Además también se lleva a cabo un análisis cinemático en el que se analiza el movimiento del mecanismo y la interacción entre sus componentes. Y por último, se realizan optimizaciones mediante elementos finitos que permiten ajustar el diseño final a la solución óptima.

Capítulo 6. Fabricación del prototipo a escala 1:15. Se construye un modelo a escala 1:15 tanto del nuevo dispositivo de lanzamiento como de la estructura metálica del puente, con el fin de estudiar diferentes fenómenos sobre el mecanismo, y en la interacción entre ambos. El prototipo se construye mediante fabricación aditiva y mecanizado.

Capítulo 7. Conclusiones y líneas futuras de investigación. Se exponen las conclusiones del proyecto y se dejan abiertas futuras líneas de investigación que surgen en este proyecto.

Finalmente, este documento presenta un resumen en inglés de los principales puntos de la presente Tesis Doctoral y concluye la misma con los ANEXOS en los que se recogen las patentes publicadas y los resultados de los principales ensayos de laboratorio.

2

Estado del arte

En el presente capítulo se expone un resumen del método constructivo de empuje de puentes.

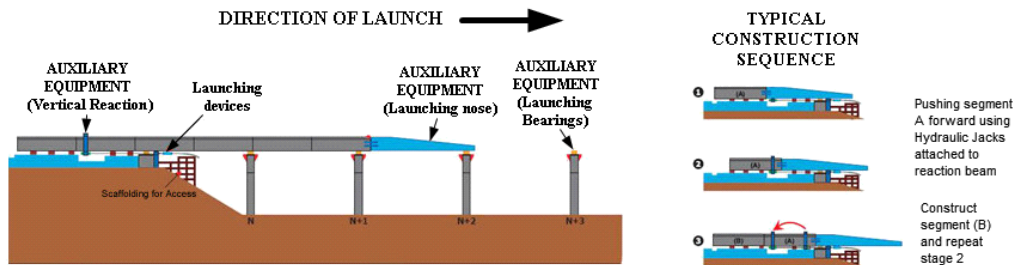
En primer lugar, se realiza una revisión del método constructivo y posteriormente se presenta una posible clasificación de los mismos explicando algunos de los principales sistemas actuales. Por último, el capítulo se concluye con las principales ventajas e inconvenientes de estos procedimientos [1]-[19].

2.1 El método constructivo de empuje de puentes

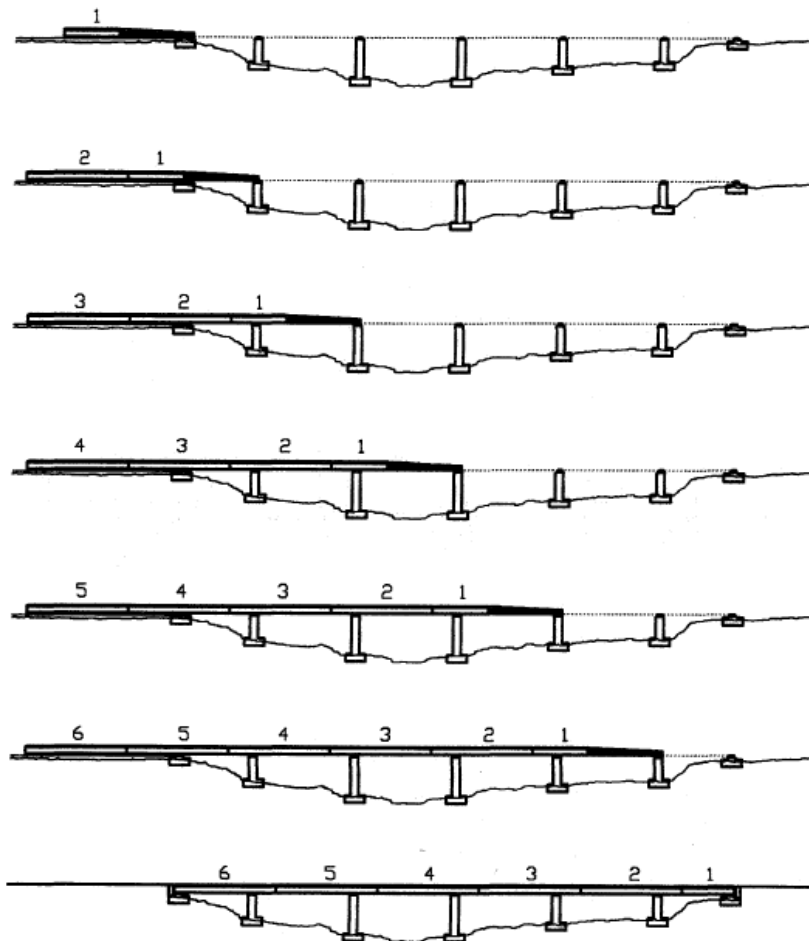
El empuje o lanzamiento de puentes es un método constructivo que consiste en desplazar una estructura, ya construida, hasta su posición definitiva utilizando una fuerza que puede ser aplicada a través de diferentes medios. En la ejecución de este método existen diferentes modalidades, tanto en el tipo de estructura a empujar, que puede ser una estructura completa, una estructura por segmentos, etc.; como en los medios utilizados para realizarlo: empuje por cable, plataformas de transporte, gatos de fricción, entre otros. Este método es habitualmente utilizado para puentes cuya ejecución es compleja, tales como puentes de gran longitud y/o elevada altitud, construcciones en orografías del terreno complejas, condiciones medioambientales delicadas y/o protegidas, etc.

A pesar de que se encuentran algunas referencias anteriores, el auge del lanzamiento de puentes en celosía metálica comienza en el siglo XIX. Este método ha sido muy desarrollado a lo largo de la historia. Entre 1963 y 1965, los ingenieros F. Leonhardt y Willi Baur llevaron a cabo el diseño básico del “*Puente sobre el río Inn*” en la localidad de Kufstein, Austria y del “*Puente sobre el río Caroni*” en Venezuela. Surge así, el método de empuje incremental *ILM* (Incremental Launching Method), ver Figura 1. Este método está basado en una optimización del método de empuje original que

consiste en lanzar consecutivamente el puente por tramos previamente ejecutados y unidos. La aparición de nuevos métodos de construcción y diferentes variantes mostró la importancia de considerar en el diseño del puente el proceso constructivo del mismo dado que los esfuerzos a los que se ve sometida la estructura durante su colocación son normalmente superiores a los que soporta posteriormente en servicio [7], [8], [13]-[19].



(a) Imagen extraída de [2].



(b) Imagen extraída de [1]

Figura 1. Procedimiento de lanzamiento de puentes: (a) esquema principales elementos auxiliares; (b) esquema ILM.

2.2 Clasificación de los puentes empujados

El método constructivo de los puentes puede ser objeto de clasificación de los mismos, distinguiéndose de manera particular los “*puentes empujados o lanzados*”. Dentro del método de puentes empujados es posible diferenciar cuatro técnicas de posicionamiento de la estructura en su ubicación definitiva:

- ***Lanzamiento por segmentos***: en el que se fabrica un segmento del puente y se lanza. Esta operación se repite sucesivamente hasta completar la estructura final.
- ***Lanzamiento completo***: consiste en la fabricación del puente completo y su colocación. También contempla la posibilidad de fabricar la estructura completa en dos partes y colocarlas desde los extremos en sentido opuesto hasta unir las en el centro.
- ***Giro completo***: en este caso, se fabrica el puente, completo o en dos mitades, y se gira por completo o cada mitad hasta hacerlas coincidentes en el centro.
- ***Traslación transversal***: con la que se fabrica el puente en una posición paralela a la deseada y se traslada a través de un movimiento transversal hasta su ubicación final.

Asimismo, los tipos de puentes que pueden ser empujados se pueden clasificar siguiendo varios criterios. Se debe tener en cuenta que un mismo puente puede pertenecer a más de una de las siguientes categorías dado que la clasificación se realiza en función de diferentes aspectos constructivos:

- ***En función del trazado***: es posible lanzar puentes tanto rectos como curvos y con diferentes pendientes en sentido tanto longitudinal como transversal.
- ***En función del canto***: es posible empujar puentes de canto constante y de canto variable, aunque lo más frecuente es hacerlo con puentes de canto constante.
- ***En función de los medios auxiliares utilizados***: estos medios ayudan a desarrollar el empuje, distinguiendo puentes con nariz de lanzamiento, puentes con torre de atirantamiento, con pilas auxiliares, etc.
- ***En función del material del tablero***: es posible lanzar puentes de hormigón pretensado, metálicos o mixtos.
- ***En función de la tipología de la estructura***: en algunas ocasiones, es posible empujar puentes arco, o lanzar puentes atirantados, normalmente aprovechando elementos que serán definitivos como auxiliares, tales como los tirantes. Pese a estas características, lo más habitual es realizar lanzamiento de tableros continuos.

Además de estas clasificaciones en base a diferentes criterios, los propios sistemas de empuje también pueden ser clasificados. En el siguiente apartado, se exponen los principales sistemas de empuje utilizados actualmente [1]-[15].

2.3 Sistemas de empuje

Los diferentes sistemas de empuje se han separado en dos grupos principales: sistemas de empuje sin punto de anclaje y sistemas de empuje con punto de anclaje.

Sistemas de empuje sin punto de anclaje:

- Sistemas de deslizamiento, Figura 2.
- Plataformas de transporte, Figura 3.
- Barcazas o pontonas, Figura 4.

Sistemas de empuje que precisan punto de anclaje:

- Gatos de fricción, Figura 5
- Barras (con equipo hidráulico)
- Cables (con equipo hidráulico), Figura 6
- Sistemas con retenida y viga carril.

2.3.1 Sistemas de empuje sin punto de anclaje:

Sistemas de deslizamiento

Los sistemas de deslizamiento son un conjunto de elementos que permiten soportar la carga que ejerce la estructura y desplazarla en la dirección deseada, ver Figura 2. Sus elementos principales son:

- ***Carriles de deslizamiento***: carriles embulonados en los que apoya y desliza la carga. Estos carriles no requieren punto de anclaje si la estructura a lanzar es recta y con poca pendiente. Poseen unos topes laterales equidistantes donde se conectan el resto de elementos necesarios.
- ***Patines de deslizamiento***: pequeña estructura metálica que se encuentra en contacto con la estructura a desplazar y con los carriles de deslizamiento. La superficie inferior de esta estructura se encuentra completamente pulida para facilitar su deslizamiento sobre los carriles.

- **Pastillas de teflón:** placas de neopreno zunchado con la superficie superior cubierta de teflón. Estas pastillas favorecen el deslizamiento de los patines sobre los carriles.
- **Gatos de empuje:** gatos hidráulicos de doble efecto horizontal que ejercen la fuerza de empuje y por lo tanto, desplazan la estructura. Estos gatos se encuentran fijados a los topes laterales de los carriles de deslizamiento. Los gatos desarrollan su carrera y se recogen automáticamente dejando la estructura en la posición alcanzada en el avance. Para continuar el proceso se conectan los gatos, una vez retraídos a los siguientes topes, y se comienza el avance de nuevo.
- **Lubricantes:** componente que se aplica sobre los teflones de las pastillas para mejorar el deslizamiento de los patines.
- **Generador hidráulico:** elemento que proporciona la potencia necesaria para desarrollar el empuje.



Figura 2. Transporte del puente sobre raíles utilizando locomotora.

Plataformas de transporte

Las plataformas de transporte son elementos que permiten soportar grandes cargas y desplazarlas por rodadura, ver Figura 3. El movimiento de la estructura en la dirección deseada lo realizan por medios propios por lo que se consideran “*maquinaria autopropulsada*”. Sus principales elementos son:

- **Ruedas:** se distinguen dos tipos de ruedas, las tractoras y las no tractoras, ambas muy semejantes exteriormente a las ruedas utilizadas en maquinaria pesada. Las ruedas no tractoras se encargan de la capacidad de frenado.
- **Bastidor metálico superior:** estructura metálica sobre la que se apoya la estructura. Debe ser lo suficientemente rígida como para permitir una distribución equilibrada de la carga. Se conecta a las ruedas a través de los ejes hidráulicos.
- **Ejes hidráulicos:** estos actúan entre las ruedas y el bastidor metálico. Cada eje comprende dos ruedas en el sentido transversal del avance. Poseen un gato hidráulico que actúa entre las ruedas y el bastidor. En una plataforma se combinan ejes tractoras con otros que no lo son, siendo estos últimos los que aportan al conjunto la capacidad de frenado. La capacidad de carga depende de la capacidad de estos ejes y de la velocidad de avance que se requiera.
- **Línea de ejes:** dos ruedas se encuentran unidas por un eje, y al conjunto de dos ejes y sus correspondientes ruedas se les denomina línea de ejes. Una plataforma está compuesta por varias líneas de ejes, habitualmente agrupadas en múltiplos de dos, ver Figura 3 (a).
- **Generador o motor:** elemento que proporciona la potencia necesaria para llevar a cabo la traslación.
- **Ordenador/panel de control:** dispositivo de control que conectado a la plataforma y controlado externamente por un operario permite examinar electrónicamente aspectos como la distribución de carga en los ejes, la nivelación de la plataforma o la velocidad de desplazamiento.



Figura 3. Plataformas de transporte: (a) Taiwan High Speed Contract C210-2015 by VSL; (b) Taiwan High Speed Contract C260-270 by Continental Engineering Corp.

Barcazas o pontonas

Las barcazas o pontonas son un conjunto de elementos flotantes que permiten el transporte de una estructura por un medio acuático, ver Figura 4. Las barcazas se encuentran parcialmente sumergidas en el agua, por lo que en su desplazamiento se deben tener en cuenta seis grados de libertad. Con este método no es necesario realizar el sobredimensionamiento que requiere la estructura durante el empuje. No obstante, las barcazas tienen un coste elevado, lo que hace que este método resulte difícil de rentabilizar.



Figura 4. Puente Öresund (Suecia – Dinamarca): (a) fotografía del transporte de la estructura durante su construcción; (b) fotografía del puente en servicio.

2.3.2 Sistemas de empuje que precisan punto de anclaje

Gatos de fricción

El empuje de puentes mediante gatos de fricción es uno de los métodos más utilizados hoy en día. La fuerza de empuje es desarrollada por dos parejas de “*gatos hidráulicos*”, una de ellas dispuesta en dirección horizontal y la otra en vertical. El procedimiento de lanzamiento es el siguiente: por un lado, la pareja de gatos horizontales se encargan de transmitir el movimiento en la dirección de lanzamiento, y por otro, la pareja vertical permite la elevación y el apoyo de la estructura a desplazar.

El proceso constructivo de un puente empujado mediante gatos de fricción se ilustra en la Figura 5. Los cilindros hidráulicos verticales se extienden para ejercer presión entre el dispositivo de empuje y el puente. Esta presión, que es variada y controlada durante todo el proceso de lanzamiento por estos cilindros verticales, es necesaria para desplazar la estructura por fricción sin movimiento relativo entre los cuerpos. El avance del puente se desarrolla con la pareja de cilindros hidráulicos horizontales. Estos se extienden, desplazando consigo los cilindros verticales y por tanto, la estructura del puente que se encuentra apoyada sobre ellos. Una vez que los cilindros hidráulicos horizontales se encuentran completamente extendidos, deben ser recogidos para comenzar de nuevo la operación. Durante la retracción de los cilindros horizontales, el puente se apoya sobre medios auxiliares y los cilindros verticales descenden perdiendo el contacto con el puente y así, manteniendo su posición sin retroceder con la recogida de los hidráulicos.

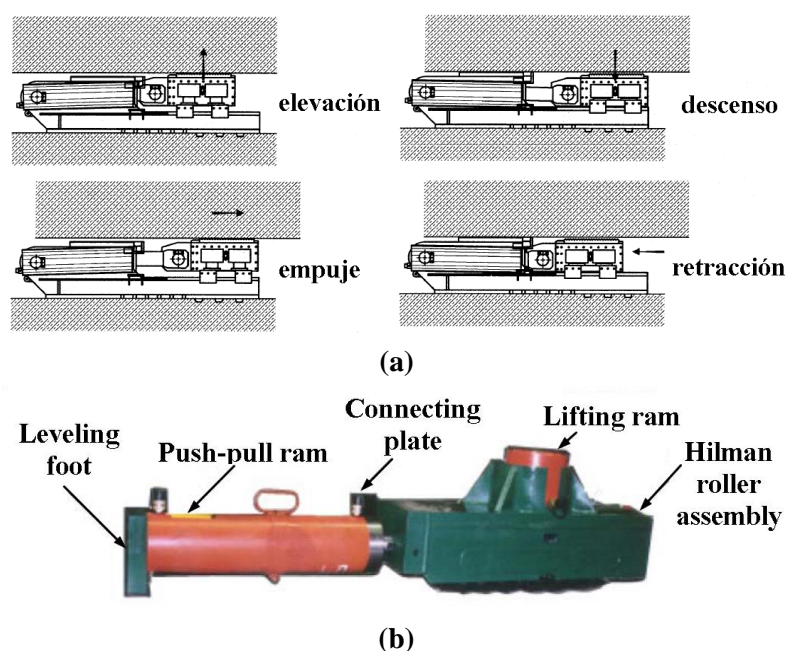


Figura 5. Procedimiento de empuje mediante gatos de fricción: (a) esquema; (b) gatos hidráulicos utilizados.

Los gatos de fricción suelen estar ubicados en el estribo; es decir, después del parque de fabricación, donde se fija la placa de freno y se ejecuta la fuerza de empuje.

Barras (con equipo hidráulico)

El equipo de empuje de puentes mediante barras está compuesto principalmente por una o varias barras de tiro que se encuentran roscadas a unos cilindros hidráulicos huecos que se encargan de transmitir el movimiento lineal a la superestructura a transportar. Este método es muy utilizado dada la generalidad de su aplicación, su facilidad de uso y su bajo coste. Sin embargo, sus aplicaciones se encuentran limitadas a estructuras de corta longitud.

Cables (con equipo hidráulico)

El sistema de tiro con cable es muy similar al de tiro con barras. En este caso, los esfuerzos de tiro son soportados por uno o varios cordones de cable. Los cables también se introducen en unos gatos hidráulicos que con su extensión producen el avance de la estructura a desplazar, ver Figura 6. El tiro con cable es un método económico y con un amplio rango de aplicaciones que puede ser utilizado en una sola línea de tiro o varias para ampliar la capacidad. No obstante, de igual manera que el sistema de empuje con barras, no es recomendado para el empuje de estructuras largas. Los cilindros hidráulicos utilizados en el tiro con cables son más complejos que los utilizados en el tiro con barras y los equipos precisan mayor limpieza y mantenimiento.



Figura 6. Sistema de tiro con cable.

Sistemas con retenida y viga carril

El sistema de retenida y viga carril utiliza la plataforma de construcción del tablero como parque de fabricación del mismo, y posteriormente como soporte de ubicación de los sistemas de empuje. Los equipos de empuje se disponen sobre unas vigas carril, habitualmente dos y lo más separadas posible, que permiten la construcción del tablero. Estos sirven de pista de deslizamiento cuando se empuja el puente y actúan como sistema de reacción para anclar los dispositivos de empuje. En función de la estructura a empujar las vigas pueden anclarse al estribo o al terreno.

Entre todos los sistemas expuestos anteriormente, los más utilizados en la actualidad son los dispositivos de tiro con ayuda de equipo hidráulico, bien sea con cable o con barra y los gatos de fricción.

2.4 Ventajas e inconvenientes de los sistemas actuales

En este apartado se realiza una reflexión sobre la problemática actual de los principales sistemas de empuje. Este método constructivo es muy empleado debido a sus importantes ventajas respecto a otros métodos:

- La mano de obra necesaria es notablemente inferior a la de otros métodos como por ejemplo, la construcción “in-situ”. En este aspecto, su repetitividad hace que el operario, tras un aprendizaje inicial, mejore su experiencia y eficiencia rápidamente.
- La inversión en maquinaria especializada es menor que en otros métodos. Además, la mayor parte de los elementos son válidos para empujes futuros. Este aspecto mejora la rentabilidad del método frente a otros.
- El entorno de trabajo es, habitualmente, reducido, protegido e industrializado lo que permite que el control de la ejecución sea más sencillo y de mayor calidad que en otros métodos.
- Para puentes de hormigón pretensado, es posible aprovechar las ventajas de los métodos de construcción por dovelas prefabricadas con los métodos de construcción “in-situ” gracias al parque de fabricación.
- Las cimbras de sustentación del encofrado en puentes de hormigón armado se hacen innecesarias.

No obstante, la construcción de puentes empujados también se encuentra limitada por ciertos inconvenientes como los expuestos a continuación:

- Es indispensable un control muy estricto de la superficie de deslizamiento durante el lanzamiento con el fin de evitar deformaciones inadmisibles tanto en la estructura a desplazar como en las pilas de apoyo. El dispositivo de control suele ser electrónico y, ubicado sobre la cabeza de la pila, detiene los gatos de empuje cuando detecta algún giro superior al admisible.
- El orden de magnitud del error admisible de replanteo es del milímetro, por lo que se requiere un replanteo muy preciso para que el proceso se desarrolle sin problemas. Para ello es necesario un equipo topográfico de gran precisión.
- El método constructivo mediante empuje no es aplicable a todos los tipos de geometrías.
- La ejecución del método de empuje en ocasiones es inviable debido a las grandes deformaciones que sufre la estructura del puente. Para llevar a cabo el lanzamiento mediante fricción, es necesaria una superficie de contacto mínima entre el puente y el dispositivo de empuje. Si el puente se encuentra muy deformado, los dispositivos de empuje actuales no garantizan esa superficie de contacto mínima durante todo el proceso, por lo que se hacen necesarios elementos auxiliares que aumenten la rigidez de la estructura y disminuyan su deformación.
- No es un sistema continuo. El lanzamiento de puentes suele llevar asociados elementos hidráulicos para transmitir la fuerza de empuje. En estos casos, el desplazamiento de la estructura se ve limitado por la carrera de los cilindros, que deben ser recogidos después de cada extensión provocando la parada del lanzamiento.
- La operación de retroceso del puente, que en ocasiones es necesaria, es compleja y costosa dado que se requieren sistemas auxiliares que desplacen el puente hacia atrás. Es posible también modificar el dispositivo de empuje para realizar el desplazamiento en sentido opuesto. En cualquier caso, ambas soluciones son lentas y costosas.
- El control de carga que debe realizarse durante todo el proceso de lanzamiento. Sin embargo, los sistemas de control no están incorporados en el dispositivo de empuje, por lo que se requieren medios auxiliares que también repercuten en el coste general de la obra.

La presente Tesis Doctoral aprovecha los principios de este método y sus ventajas y persigue resolver sus inconvenientes. Para conseguirlo se diseñará, calculará y estudiará en profundidad un nuevo mecanismo y sistema de empuje de puentes que permitirá el desplazamiento continuo y bidireccional de estructuras de manera eficiente y segura.

3

Estudio conceptual y requisitos de diseño

En este capítulo se expone el proceso de diseño del dispositivo objeto de estudio en esta Tesis Doctoral. De una de las referencias esenciales, [20] “*Diseño en Ingeniería Mecánica*”, se extrae el concepto de diseñar: “*Diseñar (o idear) es formular un plan para satisfacer una necesidad*”. En este libro, los autores dejan claro cómo los problemas de diseño no son de solución única, y cómo ante una necesidad no existe “*una respuesta correcta*” o “*una buena y otra mala*”, simplemente existe “*la solución*”, que es aquella que el equipo investigador considera óptima para solventar un situación problemática. Esta “*solución*” es una idea que pese a lo que se pueda creer, no es “*divina*”, pues las ideas, el diseño o las soluciones a los problemas son el fruto de un proceso de aprendizaje. La experiencia, la dedicación, el trabajo, el interés, la motivación, entre otros, son algunas de las cualidades de las que nace una solución a un problema, es decir, una idea.

En primer lugar, se exponen las alternativas estudiadas para solventar algunas de las necesidades actuales en los sistemas de empuje de puentes, las cuales ya han sido apuntadas en el capítulo anterior. Entre las alternativas estudiadas se selecciona una, que después de un exhaustivo trabajo de búsqueda de información, es patentada junto con un nuevo e innovador procedimiento de empuje de puentes capaz de conseguir luces de 150 m de manera eficiente, segura, y sostenible.

3.1 Estudio de alternativas

En el presente sub-apartado se abordan las diferentes alternativas estudiadas ante el problema planteado: un sistema de empuje de puentes capaz de solventar la problemática actual expuesta en el apartado 2.4. de este documento.

3.1.1 Consideraciones generales

Con el fin de solventar de una forma eficiente los inconvenientes actuales en el lanzamiento de puentes se abordaron de forma simultánea dos estudios de investigación paralelos y completamente vinculados.

Por un lado, se encuentra la estructura a desplazar y el procedimiento para realizarlo con el fin de salvar luces de 150 m. Por otro lado, se encuentra el dispositivo de empuje, el cual debe ser capaz de desplazar dicha estructura, siguiendo el procedimiento indicado y mejorando los medios actuales.

Estos objetivos dan lugar a dos líneas de investigación vinculadas durante todo su desarrollo que deben ser consideradas durante el proceso de diseño. En el estudio de un nuevo dispositivo de empuje es muy importante considerar las cargas impuestas por la estructura a desplazar, su forma y tipología, así como las diferentes fases que tienen lugar al desarrollar el método de lanzamiento, puesto que estas imponen condiciones variables de carga sobre los dispositivos de lanzamiento.

El proceso de diseño comienza con el análisis de la problemática actual y la propuesta de diferentes soluciones. Cada una de estas alternativas es valorada por el equipo y se decide cuál es la solución óptima. Una de las fases más importantes en el diseño de una solución es la selección de los criterios de diseño, que son los parámetros que responden a las necesidades del proyecto. Estas necesidades son las características principales que cada solución debe ser capaz de resolver, y las diferentes formas de hacerlo distinguen una alternativa de otra. El dispositivo diseñado debe dar solución a los siguientes requerimientos:

- ***Empuje de grandes estructuras.*** Este estudio pretende dar un salto tecnológico en la ingeniería civil y aportar una solución segura, sostenible y económica a la construcción de puentes de grandes luces. Para lograrlo se diseña una estructura no convencional formada por un doble cajón que aumenta la rigidez durante el empuje y disminuye los elementos auxiliares necesarios. Este doble cajón, así como la gran longitud de la estructura, producen importantes esfuerzos sobre el dispositivo de lanzamiento que debe desarrollar la fuerza de empuje.

- **Reacción normal variable.** Debido a las características del proceso constructivo y a las grandes dimensiones de la estructura a desplazar los valores de la reacción en el dispositivo de empuje tienen un amplio rango de variación, desde valores muy elevados cuando existe mucho voladizo, hasta valores muy bajos a medida que la estructura se va apoyando en las pilas.
- **Desplazamiento discontinuo.** Las características de los sistemas actuales impiden que los desplazamientos de grandes estructuras se desarrollen de manera continua. Los sistemas más utilizados, por sus importantes ventajas, su rentabilidad y su sencillez son los gatos de fricción. Sin embargo, este sistema, al estar formado por cilindros hidráulicos, genera importantes tiempos muertos asociados a las recogidas de los cilindros. Estos tiempos muertos ralentizan el proceso disminuyendo su eficiencia, puesto que la mitad del tiempo empleado en el lanzamiento es tiempo no útil.
- **Velocidades de empuje bajas.** Las velocidades de empuje actuales no superan los 12 m/h. El aumento de la velocidad media de empuje supondría un ahorro considerable en tiempo de ejecución y por lo tanto, en toda la obra.
- **Prevención de accidentes.** En los últimos años han tenido lugar algunos accidentes, en los que se han lamentado incluso pérdidas humanas. La mayoría de ellos podrían haber sido evitados incorporando sistemas de seguridad activos capaces de detener el lanzamiento cuando se detectasen sobrecargas, impidiendo estados críticos en la estructura que provocan su colapso.

Las posibles soluciones que permiten solventar estas necesidades dan lugar a las alternativas que posteriormente serán valoradas. Asimismo, de cada una de estas necesidades se obtienen criterios de diseño que nos han permitido comparar las diferentes alternativas propuestas de manera objetiva y cuantificada. Los criterios de diseño que se han considerado más significativos son:

- **Continuidad y bidireccionalidad:** el nuevo diseño debe ser tal que permita el empuje continuo de la estructura, evitando los tiempos muertos actuales. Asimismo, se valora la posibilidad de crear una solución que facilite el retroceso de la estructura dada su importancia desde el punto de vista de la seguridad.
- **Reacción ejercida por el puente durante el empuje:** la carga normal que deben soportar las soluciones es elevada, por lo que se debe recurrir a diseños robustos y resistentes.
- **Tipología de la sección transversal:** el nuevo diseño debe ser apto para desarrollar el empuje de diferentes tipologías, e incluso de diferentes materiales. Es necesario también contemplar las dimensiones de la propia estructura y así acotar el pre-diseño del nuevo dispositivo de empuje.

- **Velocidades lineales de desplazamiento:** el nuevo diseño debe ser capaz de superar las velocidades de empuje actuales sin que ello afecte a la seguridad y viabilidad del empuje.
- **Ubicación y colocación en obra del sistema de empuje:** las diferentes propuestas deben considerar la ubicación del sistema y su montaje y/o colocación en obra.
- **Sostenibilidad:** el nuevo diseño debe contemplar la sostenibilidad del sistema, de modo que sus elementos, o el propio dispositivo puedan ser utilizados en diferentes obras y situaciones. El aprovechamiento de los medios que se utilizan durante la ejecución de una obra mejora la amortización de los propios medios, así como su rentabilidad y eficiencia, y por supuesto, disminuye los residuos generados, aspecto muy importante en obra civil.

Las diferentes alternativas contempladas como solución surgen del trabajo en conjunto del grupo investigador, de la experiencia de los Directores de esta Tesis, la creatividad de los nuevos investigadores, así como de la vinculación a varias empresas privadas con amplia experiencia en ejecución de obra, como son *COPROSA S.A.* y *VSL Heavy Lifting*. Las alternativas propuestas fueron esencialmente tres:

- Empuje continuo utilizando gatos de fricción dispuestos en paralelo.
- Empuje continuo por tambor de arrollamiento de cable.
- Empuje continuo mediante “*orugas de tracción*”.

Cada una de estas alternativas es estudiada en detalle en los siguientes sub-apartados.

3.1.2 Alternativas de diseño

Las alternativas de diseño estudiadas inicialmente para cumplir los requisitos impuestos son las que se enumeran a continuación:

- Alternativa 1: Gatos de fricción dispuestos en paralelo
- Alternativa 2: Tambor de arrollamiento en cable
- Alternativa 3: Nuevo mecanismo de empuje continuo

Cada una de ellas se detalla en este apartado:

Alternativa 1: Gatos de fricción dispuestos en paralelo

Esta alternativa surge de las soluciones actuales, ver Figura 7. En base a los exitosos lanzamientos llevados a cabo mediante gatos de fricción, como por ejemplo el “*Viaducto de Millau*”, se considera la posibilidad de mejorar el método actual utilizando dispositivos paralelos que permitan la continuidad del movimiento. Esta técnica se basa en aprovechar la recogida de unos gatos mientras los otros avanzan. De esta manera se consigue el empuje continuo del puente con un método que aprovecha las ventajas de un sistema que ya se utiliza actualmente, y además, permite solventar el importante problema de discontinuidad en el procedimiento.

El empuje mediante gatos de fricción es un método de lanzamiento de puentes que requiere un punto de anclaje. Es un procedimiento clásico en el empuje de tableros de hormigón, puesto que éstos producen una elevada reacción sobre el sistema y favorecen el empuje por fricción. El sistema requiere un par de gatos que realizan el empuje horizontal y otros cuya acción es vertical. En este caso, se plantea la posibilidad de realizar el empuje continuo utilizando cilindros paralelos invertidos capaces de desplazar la estructura horizontalmente. De este modo, mientras una pareja de gatos hidráulicos se expande, la otra pareja se recoge consiguiendo así el lanzamiento continuo del tablero. Este sistema debe completarse con una placa fija de frenado que permita el anclaje de los gatos hidráulicos. La nueva solución se sitúa en el estribo al igual que los dispositivos actuales y es de igual manera aplicable a grandes estructuras con diferentes tipologías.



Figura 7. Sistema actual mediante gatos de fricción: (a) en funcionamiento; (b) sin carga.

Alternativa 2: Tambor de arrollamiento de cable

La segunda alternativa se basa en el uso del cable para el desplazamiento de pesos de manera continua, ver Figura 8. Este sistema es un conjunto de cables que, unido a la estructura mediante uno o varios enganches, permite el empuje del puente gracias al tiro con actuadores hidráulicos. Mediante la solución propuesta, estos cables se enrollan en uno o varios tambores en los que se recoge y suelta el cable dependiendo del desplazamiento necesario. Enrollando el cable en el tambor se obtiene movimiento continuo de la estructura, aunque puede presentar importantes problemas en casos de grandes luces y/o cargas elevadas puesto que la longitud de cable y el tamaño de los mismos pueden alcanzar valores demasiado elevados.



Figura 8. Sistema actual mediante tiro con cable.

Alternativa 3: Nuevo mecanismo de empuje continuo

Esta alternativa de diseño surge de la combinación de dos mecanismos actuales, las orugas de tracción y las cintas transportadoras. Actualmente, existen cintas transportadoras capaces de desplazar materiales de diferentes pesos y dimensiones [21]-[22]. Este principio combinado con las diferentes propiedades de las orugas de tracción, tales como la adaptabilidad a terrenos irregulares, dan lugar a esta propuesta [23]-[25].

Las orugas de tracción de los vehículos terrestres son diseñadas para desplazar grandes cargas a altas velocidades adaptándose a superficies muy irregulares, ver Figura 9. La idea de este nuevo mecanismo de empuje de puentes se basa en la idea conceptual de la oruga de tracción invertida. Es decir, la superficie con la que contacta el mecanismo se encuentra en la parte superior y no en la inferior como ocurre en las orugas. Esta “*oruga invertida*” debe ser capaz de soportar la elevada carga vertical que ejerce el puente y a su vez, desarrollar el movimiento de tracción necesario mediante una transmisión de cadena-piñón.



Figura 9. Orugas de tracción: (a) adaptación a superficies irregulares; (b) ejemplo de soporte de grandes cargas.

El empuje continuo del tablero mediante este nuevo mecanismo puede dar lugar al desplazamiento continuo en dos direcciones, avance y retroceso, consiguiendo velocidades muy superiores a las obtenidas con los dispositivos actuales y soportando cargas elevadas superiores a 10^6 kg.

3.1.3 Selección de la solución

Las tres alternativas propuestas anteriormente son evaluadas en base a los criterios de diseño comentados a continuación.

Continuidad y bidireccionalidad

Todas las alternativas pretenden resolver uno de los principales problemas del empuje de puentes, la discontinuidad del proceso, evitando los tiempos muertos y la ineficiencia que esto conlleva. A pesar de la importancia de este criterio no resulta decisiva, dado que no descarta ninguna de las alternativas valoradas.

Reacción ejercida por el puente

La elevada carga normal que la estructura del puente con doble cajón ejerce sobre el mecanismo, en torno a 3000 toneladas, dificulta la posibilidad del empuje utilizando el tambor de arrollamiento. El tiro necesario en el cable ante estructuras de grandes dimensiones, como es el caso estudiado en esta Tesis Doctoral, requiere un número de cables tal que la alternativa resulta inviable [26].

Considerando que el factor de seguridad para cables debe estar entre 6 y 10, para obtener la fuerza de avance requerida de $1.5 \cdot 10^7$ N el tiro real necesario es calculado siguiendo la ecuación 1.

$$T_r = T_t \cdot f \qquad T_r = 1.5 \cdot 10^7 \cdot 8 = 1.2 \cdot 10^8 [N] \qquad (1)$$

Siendo:

T_r : Tiro real necesario para desarrollar el empuje.

T_t : Tiro teórico necesario para desarrollar el empuje.

f : factor de seguridad.

El tipo de cable más utilizado en obra civil es el cable de acero tipo 6x19x1 de diámetro $2.2 \cdot 10^{-2}$ m compuestos por alambre de resistencia a tracción de $1.8 \cdot 10^9$ N/m², siendo necesarios 400 cables para soportar la resistencia total a tracción, tal y como se obtiene aplicando la ecuación 2.

$$N^\circ \text{ cables} = \frac{T_r}{R} \qquad N^\circ \text{ cables} = \frac{1.2 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^4} = 400 \text{ cables} \qquad (2)$$

Siendo:

T_r : tiro necesario para desarrollar el empuje

R : resistencia a tracción del cable utilizado

El resultado obtenido obliga a descartar esta alternativa debido a la complejidad de ejecución y su inviabilidad para un número de cables tan elevado: las dimensiones del tambor son demasiado elevadas, el entramado de cables es muy complejo y problemático, y debido a su longitud y su peso es difícil de controlar.

Esta variable de diseño, descarta la alternativa 2: empuje mediante cables enrollados a un tambor.

Tipología de la sección transversal

Tanto la alternativa 1 como la 3 permiten el lanzamiento de estructuras de diferentes tipologías. La alternativa 1, los gatos de fricción en paralelo, son capaces de empujar incluso tipologías transversales siempre y cuando exista superficie de contacto suficiente entre los gatos y la estructura a desplazar. Esto lleva a pensar que la disposición de los gatos hidráulicos debe ser estudiada exhaustivamente hasta llegar a una solución que no sobrecargue ni el puente, ni los dispositivos de empuje.

Asimismo, la alternativa 3, por su posibilidad de adaptación a diferentes terrenos y su capacidad de adherencia, también parece poder afrontar esta necesidad sin dificultad.

Velocidades lineales de desplazamiento

Las velocidades de desplazamiento que suministra la alternativa de los gatos de fricción en paralelo se mantienen como en la actualidad. La modificación propuesta hace posible el empuje bidireccional, pero no aumenta la velocidad de desplazamiento. Sin embargo, la potencia de las “*orugas*” en los vehículos de tracción terrestres es mucho más elevada que la suministrada por los cilindros hidráulicos, y por tanto, con respecto al aumento de la velocidad de empuje, la propuesta de la “*oruga invertida*” resulta mejor que la de los gatos de fricción dispuestos en paralelo.

Ubicación y colocación en obra del sistema de empuje

Las dos alternativas candidatas se ubican en el estribo delante del parque de fabricación. Ambas poseen el mismo principio de funcionamiento, aprovechar la fuerza normal ejercida por el puente para generar una fuerza de fricción que permita desplazar el puente. Esta fuerza normal condiciona las dimensiones del dispositivo de empuje en ambos casos.

Ambas propuestas parecen ser compactas y relativamente sencillas de colocar. Los gatos hidráulicos, al igual que los actuales, deben encontrarse anclados en el estribo. Lo mismo se prevé que ocurra con la “*oruga invertida*” dado que conceptualmente se concibe como una cinta transportadora, con una posición fija en la que se desplazan masas mediante una fuerza de fricción y sin movimiento relativo entre el objeto a desplazar y el elemento en el que apoya.

La ubicación y colocación de las soluciones en obra tampoco parece ser una variable decisiva, por lo que se debe seguir avanzando en el proceso de análisis.

Sostenibilidad

Ante la posibilidad de aprovechamiento de los dispositivos propuestos en las alternativas 1 y 3, ambos resultan aprovechables. Parece que uno de los elementos más desgastados podrían ser aquellos que se encuentran en contacto con el puente y que proporcionan un alto rozamiento superficial para facilitar la adherencia y por tanto el desplazamiento. Estos elementos son placas de neopreno en los actuales gatos de fricción, y también podrían serlo en la “*oruga invertida*”. En ambos casos se trata de elementos fácilmente reemplazables, de manera que solamente es necesario desechar el material desgastado. El conjunto total de la oruga invertida es modular y reutilizable en otras obras, siempre y cuando las variaciones entre ellas no sean sustancialmente significativas. Los gatos de fricción, sin embargo, no son tan fácilmente reutilizables.

En definitiva, el criterio de diseño sostenibilidad tampoco parece ser decisivo para descartar una de las dos alternativas, aunque evalúa más positivamente la “*oruga invertida*”

Características propias del proyecto de investigación desarrollado

Tras un análisis en detalle de las diferentes opciones en función de los criterios de diseño considerados, tanto la alternativa 1, gatos de fricción paralelos, como la alternativa 3, “*oruga invertida*”, parecen ser aptas para resolver los problemas planteados. No obstante, existen otros factores, asociados al proyecto de investigación que enmarca esta Tesis Doctoral tales como la innovación, que colaboran en la selección de una de las alternativas.

La opción de utilizar gatos de fricción en paralelo resulta viable y segura, pero no tiene en cuenta el carácter innovador del proyecto y, por supuesto, mantiene muchos de los inconvenientes en los medios actuales. Esta alternativa solventa algunas de las necesidades existentes a base de aumentar costes, complejidad en la instalación, tamaño del grupo hidráulico, y por tanto, disminuir el rendimiento global del equipo, lo cual disminuye la eficacia de un sistema conceptualmente válido. En consecuencia, como solución innovadora y capaz de solventar la mayoría de los problemas actuales, encontramos la “*oruga invertida*”.

Una vez se ha decidido que el empuje mediante *orugas invertidas* es la solución óptima, es necesario un análisis más profundo en el que se considere el cumplimiento de todos los requisitos de diseño. De este estudio surgen los primeros bocetos, las primeras puntualizaciones de la solución, y con ello, la solución en detalle. Posteriormente, se debe confirmar si la propuesta es efectivamente viable o por el contrario es necesario comenzar de nuevo el proceso de propuesta de alternativas y selección de las mismas.

3.2 Requisitos de diseño para la alternativa seleccionada

A continuación, se expone cómo la alternativa seleccionada da solución a los requisitos de diseño impuestos por las necesidades del proyecto. Se obtiene así un primer diseño de detalle aunque este puede ser modificado posteriormente tras los cálculos realizados durante su dimensionamiento.

Los principales requisitos de diseño que se han considerado inicialmente han sido tres:

- las cargas máximas ejercidas por el puente
- la seguridad durante el empuje y la reversibilidad
- continuidad del lanzamiento.

Cargas máximas ejercidas por el puente

En el estudio de este nuevo sistema de empuje de puentes la estructura a desplazar posee ciertas modificaciones respecto a las estructuras de puentes convencionales. En este caso, se debe empujar una estructura de doble cajón que, en ciertas fases del proceso de lanzamiento, ejerce sobre el dispositivo reacciones normales muy elevadas.

Partiendo de la hipótesis inicial en la que el mecanismo empuja una estructura superior aprovechando el peso de esta para obtener la fuerza de fricción, es necesario que esta estructura superior ejerza una fuerza vertical suficiente como para hacer posible el empuje, sin exceder el umbral resistente de los elementos que componen el mecanismo. La estructura a desplazar ejerce sobre el dispositivo de empuje una carga normal máxima de $3 \cdot 10^7$ N. Inicialmente, parece coherente que la carga total se distribuya en varios dispositivos de empuje, “*orugas invertidas*” en este caso. Por ello, se considera la posibilidad de utilizar cuatro mecanismos iguales de modo que cada uno de ellos debe soportar $7.5 \cdot 10^6$ N.

El concepto de funcionamiento del mecanismo de empuje por fricción fue concebido en base a las “*orugas de tracción*” de los vehículos terrestres, en las que el movimiento continuo se produce por una transmisión cadena-piñón. No obstante, en este caso debe considerarse que este mecanismo, además del tiro propio de la cadena, también debe soportar grandes cargas verticales debidas al peso de la estructura a desplazar. Este requerimiento especial da lugar a una modificación específica sobre el modelo convencional de “*oruga de tracción*”. En este caso, la cadena de tracción por sí misma o combinada con otros elementos, debe ser capaz de soportar la elevada carga normal. Durante el pre-dimensionamiento del elemento se comprueba si las cadenas de tracción son capaces de hacerlo o requieren elementos resistentes adicionales que permitan absorber esfuerzos normales elevados.

En el caso del empuje mediante “*orugas invertidas*”, la carga que ejerce la estructura a desplazar es una ventaja para obtener la fuerza de fricción, dado que esta es suficiente para ejercer la presión necesaria en la mayoría de las fases del empuje. Sin embargo, este factor es también un condicionante en el diseño y dimensionamiento de los principales elementos resistentes del mecanismo.

Seguridad en el empuje

La seguridad en el empuje es un aspecto muy importante que puede prevenir y evitar daños, accidentes y sobrecostos. La necesidad actual de incorporar sistemas de seguridad que detecten problemas durante el proceso de lanzamiento es cada vez más notable tras los importantes accidentes producidos en los últimos tiempos. Algunos de los fallos fueron debidos a errores humanos de ejecución y/o revisión. Uno de los accidentes más importantes en España tuvo lugar en el año 2005 durante la construcción de un viaducto de la Autovía del Mediterráneo (A-7) a su paso por Almuñécar, Granada. Este fatal accidente le costó la vida de seis trabajadores. Como otro posible ejemplo, se encuentra el viaducto Ignacio Zaragoza en la localidad de Puebla. En este reciente accidente, año 2012, la estructura se desplomó causando importantes daños materiales aunque afortunadamente, sin lamentar pérdidas humanas, ver Figura 10.



Figura 10. Colapsos: (a) Viaducto sobre el Río Verde, Almuñécar, Granada.; (b) viaducto Ignacio Zaragoza en Puebla, Zaragoza.

Entre los principales motivos de los desplomes y colapsos se encuentran:

- Sobrecargas en los elementos de empuje.
- Cargas inadmisibles sobre la estructura del puente que implican su colapso durante su lanzamiento.
- Cargas excesivas sobre los sistemas de retención que provocan desplazamientos indeseados, o disminución de la superficie de contacto entre el tablero y el dispositivo de empuje.

En la actualidad, el control de seguridad se realiza desde sistemas auxiliares que no están incorporados en los propios dispositivos de empuje. Estos medios auxiliares controlan la carga e indican si se superan ciertos umbrales durante el lanzamiento.

La idea inicial de este mecanismo es controlar de manera activa el estado del empuje durante su desarrollo. En un primer diseño conceptual se plantea la idea de incorporar en los elementos sobre los que apoya el puente dispositivos que controlen la carga en tiempo real durante todo el proceso y detecten niveles de carga indeseados, bien por exceso o defecto. Ante estas situaciones, el sistema de seguridad, vinculado a los accionamientos del mecanismo, ordena la detención del empuje ante situaciones críticas. Esta es la idea inicial de partida que va a ser desarrollada posteriormente tras un primer diseño y pre-dimensionamiento del mecanismo.

Bidireccionalidad o reversibilidad del empuje

La bidireccionalidad del empuje en el lanzamiento de puentes es un aspecto complejo en la actualidad. A pesar de que el procedimiento constructivo consiste por definición en el avance de la estructura, existen situaciones concretas en las que es necesario incluir el retroceso de la misma. El cambio de sentido en el empuje de la estructura mediante los sistemas actuales no es sencillo. Aún así, el retroceso de la estructura, necesario en ocasiones, se lleva a cabo mediante el uso de medios auxiliares, que tras sufrir las modificaciones pertinentes realizan la operación aumentando dificultad, tiempo y costes en la ejecución. Las dificultades que supone hacer que la estructura retroceda hacen que esta sea una operación poco deseada, aunque necesaria en toda obra civil por contratiempos durante la ejecución, inclemencias del tiempo, oscuridad, etc.

La mejora en los sistemas para conseguir el desplazamiento de una estructura de manera continua y bidireccional es demandada por las empresas que utilizan el lanzamiento de puentes. Este mecanismo, pensado conceptualmente como una “*oruga de tracción*”, permite solventar este problema. De la misma manera que una “*oruga*” de un vehículo terrestre es capaz de desplazarse en cualquier sentido y trayectoria, este dispositivo, cuyo fundamento mecánico es muy semejante, puede desarrollar el empuje en avance o retroceso, añadiendo importantes ventajas como el trazado de una curva o la transmisión de fuerza en pendiente. En el desarrollo de este mecanismo se calculan accionamientos reversibles, hidráulicos o eléctricos capaces de modificar su sentido de giro de manera sencilla.

3.3 Justificaciones de la solución adoptada según Electra-I

La selección de la solución se lleva a cabo siguiendo el método ELECTRA. Este es un método multicriterio que permite realizar una valoración objetiva de las diferentes alternativas en función de los criterios de diseño considerados [27].

Mediante este método se evalúan las 3 alternativas ya comentadas en el apartado 3.1.2. Cada una de estas es calificada según los criterios de diseño en función de su nivel de idoneidad. Las valoraciones son las siguientes:

5: Muy bueno.

4: Bueno.

3: Regular.

2: Malo.

1: Muy malo.

Las calificaciones y pesos del conjunto de criterios evaluados para cada alternativa son indicados en la Tabla 1:

Tabla 1. Matriz de evaluación de alternativas.

CRITERIOS	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Peso
Continuidad y bidireccionalidad	4	5	5	25
Reacción normal	4	1	4	25
Tipologías	3	4	4	10
Velocidades	2	3	5	15
Ubicación y colocación en obra	4	3	4	10
Sostenibilidad	2	2	4	15

Los resultados obtenidos mediante el método de evaluación multicriterio ELECTRA I son indicados en las matrices de concordancia y discordancia que se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2. Matrices de concordancia y discordancia obtenidas en la evaluación de las alternativas según el método Electra I.

MATRIZ DE CONCORDANCIA			MATRIZ DE DISCORDANCIA		
0	50	35	0	1	3
65	0	35	3	0	3
100	100	0	0	0	0
p = 65			q = 2		

En el análisis objetivo de evaluación de las diferentes alternativas se observa que la alternativa 3, “*oruga invertida*”, domina a todas las demás, tal y como se observa en la Tabla 2 de matriz de concordancias, en la que los valores obtenidos para esta alternativa son superiores al parámetro estadístico p ($100 > 65$). Asimismo, de la matriz de discordancias podemos deducir que esta alternativa no es dominada por ninguna otra, al ser inferior al parámetro estadístico q ($0 < 2$).

Por consiguiente, la solución óptima adoptada es la “*oruga de tracción invertida*” sobre la que apoya la estructura a desplazar con la que es posible resolver algunas de las necesidades actuales. Su principio de funcionamiento está basado en una cinta transportadora localizada en una posición fija, y capaz de desplazar masas mediante fricción. Este principio se combina con las características de las orugas de tracción, robustas y compactas, que permiten desplazar y soportar grandes cargas adaptándose a superficies irregulares y compensando la carga absorbida con sus elementos resistentes.

Las ideas iniciales de diseño fueron ilustradas en bocetos como los mostrados en la Figura 11.

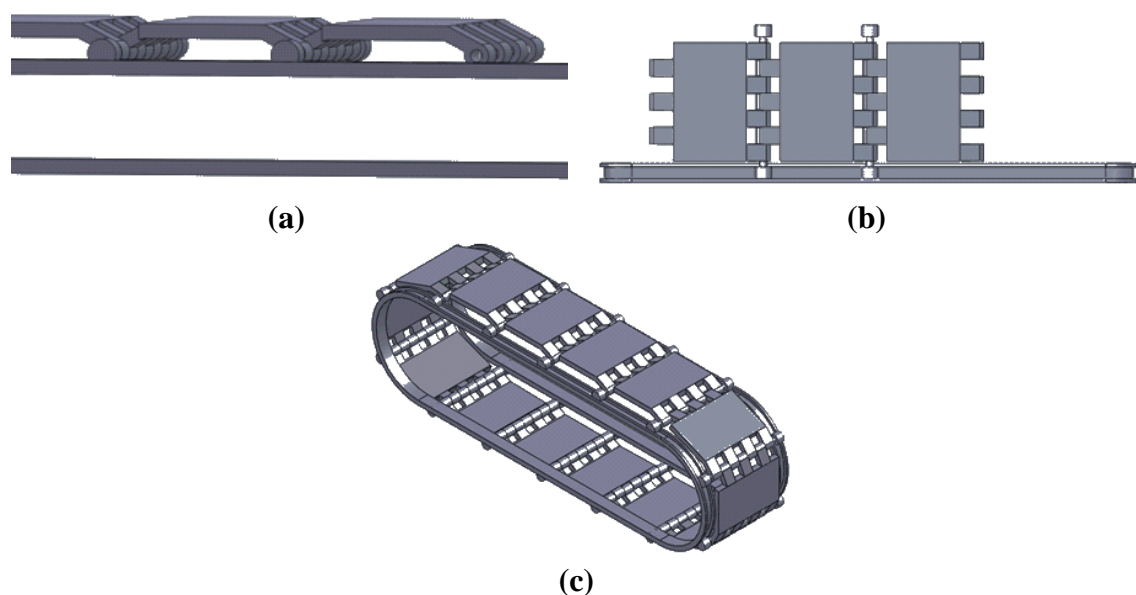


Figura 11. Bocetos iniciales de la alternativa seleccionada: (a) vista frontal; (b) vista en planta; (c) perspectiva del conjunto.

Este primer modelo resuelve de manera cualitativa alguno de los requisitos impuestos:

- Lleva a cabo el desplazamiento de la estructura ubicada sobre el dispositivo mediante la fuerza de fricción entre los dos materiales en contacto.
- Permite el desplazamiento bidireccional, colocando accionamientos de doble sentido de giro y de manera continua evitando así los tiempos muertos.
- La cadena sobre la que apoya la superestructura es una transmisión de cadena – piñón capaz de desplazar la estructura soportando las grandes cargas que esta produce.

Esta solución propuesta y estudiada en la presente Tesis Doctoral compone, junto con el estudio de un nuevo procedimiento de lanzamiento de puentes mixtos, dos líneas de investigación que suponen una importante aportación en el ámbito de la obra civil. Ambas fueron estudiadas en profundidad por el equipo investigador del Proyecto y, dadas las características innovadoras de las soluciones, se contempló la posibilidad de patentarlas. Tras el largo y duro proceso que conlleva el desarrollo de las patentes, estudio del estado del arte, desarrollo de la idea, viabilidad del producto, composición escrita del documento, etc, se desarrollaron dos patentes internacionales:

- Sistema y método de lanzamiento de estructuras: Patente DCNLBS
- Dispositivo de desplazamiento continuo de estructuras: Patente DCACLM

El desarrollo de estas patentes, así como el contenido de las mismas es el expuesto en los siguientes sub-apartados.

3.4 Patentes

Patentar una idea es un proceso lento y laborioso en el que además de tener una idea innovadora, diferente y válida es necesario verificar que lo es, así como entender y clasificar ideas similares o relacionadas. En este caso particular se realizó una búsqueda de patentes en detalle en la que se comprobó que no existen soluciones semejantes y que en efecto, la idea es original. De esta búsqueda se seleccionan aquellas más relevantes que de algún modo pueden ser referentes. Para ello se recurrió a bases de datos nacionales e internacionales tales como OMPI (Organización Mundial de la Propiedad Intelectual), USPTO (United States Patent and Trademark Office), SIPO (State Intellectual Propertie Office of P.R.C.), ESPACEnet (European Patent Office), PAJ (Patent Abstracts of Japan) y OEPM (Oficina Española de Patentes y Marcas), [28]-[42].

A continuación, se redactó un borrador de la patente en la que se consideraron los principios patentables y se protegieron las ideas innovadoras. Este proceso se alargó durante meses y para obtener un buen documento fue necesario recurrir a la ayuda de expertos. En este caso, las entidades colaboradoras en el proceso de elaboración de ambas patentes fueron OTRI (Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación) de la Universidad de Oviedo y la Oficina de Valorización de la Universidad de Cantabria.

Tras varios meses de búsqueda, preparación, redacción y revisión de los documentos se solicitaron las patentes nacionales. Después de ser revisadas y evaluadas positivamente, fueron concedidas en mayo del 2012 y publicadas en junio de ese mismo año:

- Sistema y método de lanzamiento de estructuras: ES-2368318
- Dispositivo de desplazamiento continuo de estructuras: ES-2367737

Asimismo, y dada la posible internalización de aplicación del procedimiento se solicitó la extensión a patente internacional, y ambas fueron publicadas como patentes Internacionales en enero de 2013.

- System and method for launching structures: WO-2013001115
- Device for continuous movement of structures: WO-2013001114

Las concesiones de estas dos patentes a nivel nacional e internacional manifiestan el carácter original e innovador de los resultados obtenidos, habiendo sido valoradas y evaluadas positivamente por una entidad externa.

3.4.1 Nuevo sistema de lanzamiento de puentes: patente DCNLBS

La patente “*Sistema de lanzamiento de puentes*”, coloquialmente identificada como “*DCNLBS*”, se basa en una estructura de doble cajón, un cajón superior que se desplaza solidario a otro cajón inferior. El cajón superior forma parte del último vano del tablero a lanzar, por lo que posee dos funciones principales:

- Durante el lanzamiento mejora el comportamiento de la estructura ayudando a resistir los esfuerzos en las fases de máximo voladizo.
- En el último tramo de lanzamiento, se separa del cajón inferior y se coloca en punta pasando este a formar parte del tablero principal.

En la búsqueda de patentes desarrollada por los inventores, y así lo corroboran los evaluadores, no se detecta ninguna patente asociada a doble cajón colaborante. No obstante, sí existen ciertos mecanismos de lanzamiento de vigas similares a la invención

propuesta aunque no se consideran relevantes. Sin embargo, las patentes referenciadas son desarrolladas para otras aplicaciones y no extrapolables al caso concreto que se desea afrontar mediante *DCNLBS*: la construcción mediante empuje de puentes metálicos de 150 m. de manera continua aprovechando los beneficios de utilizar un doble cajón colaborante.

Esta patente, cuyo idioma es el español, se encuentra en el Anexo I de la presente Tesis Doctoral.

3.4.2 Nuevo sistema de empuje continuo de puentes: patente DCACLM

La patente “*Dispositivo de desplazamiento continuo de estructuras*”, cuyo nombre abreviado es “*DCACLM*”, consiste en un dispositivo capaz de desplazar una estructura utilizando la fuerza de fricción entre materiales en contacto sometidos a importantes presiones normales. Sus principales características son que permite el movimiento continuo y bidireccional, así como su diseño compacto y modular. Destaca también la incorporación de un sistema de compensación de carga que permite adaptar el dispositivo a superficies irregulares, así como controlar la carga sobre el dispositivo de manera segura, activa y eficiente.

Esta patente se estudia en detalle en esta Tesis, en la que se diseña, calcula y desarrolla el sistema DCACLM. Asimismo, el documento de esta patente, cuyo idioma es el español, se adjunta en el Anexo II de esta Tesis Doctoral.

4

Pre-diseño mecánico

En este capítulo se lleva a cabo el pre-dimensionamiento de los elementos básicos del mecanismo de empuje, patente *DCACLM*, a partir de las solicitaciones variables debidas a la estructura a desplazar. En este caso, las condiciones de carga son impuestas por una estructura concreta que es empujada mediante un sistema de lanzamiento específico, patente *DCNLBS*.

Debido a las características de diseño del dispositivo, el pre-dimensionamiento mecánico se lleva a cabo considerando dos hipótesis de carga principales:

- La carga vertical durante el empuje, que variará durante todo el proceso entre los valores de la “*Reacción Máxima*” y la “*Reacción Mínima*”.
- La carga horizontal necesaria para trasladar la estructura mediante fricción, que será transmitida por una cadena de tracción de la que dispone el mecanismo.

Por consiguiente, en primer lugar se muestra el estudio de las solicitaciones sobre el dispositivo. Posteriormente, se exponen los cálculos de los elementos básicos del mecanismo, así como los diferentes ensayos realizados, y por último, se explica el funcionamiento del mecanismo acompañado del modelo geométrico tridimensional del mismo.

4.1 Estudio de solicitaciones

Las solicitaciones de carga a las que está sometido el mecanismo de empuje están determinadas por la superestructura a desplazar y por las condiciones específicas del

procedimiento de empuje a realizar [43]. Desde el punto de vista del dispositivo de empuje, la situación más desfavorable tiene lugar durante la primera fase de lanzamiento en la que la estructura se encuentra salvando el primer vano y muy cerca de apoyar sobre la primera pila.

La evolución de las solicitaciones sobre el mecanismo de empuje durante la primera fase de lanzamiento se lleva a cabo sobre un modelo de puente con doble cajón que se encuentra soportado por dos apoyos, uno es el propio mecanismo y el otro es un sustento adicional que se encuentra en el parque de fabricación y permite evitar el vuelco de la estructura. En la Figura 12 se aprecia la situación más desfavorable para el dispositivo de empuje, así como la ubicación de los apoyos que soportan la estructura. La mayor solicitación obtenida en esta fase de empuje es tomada como dato de partida en el pre-dimensionamiento mecánico.

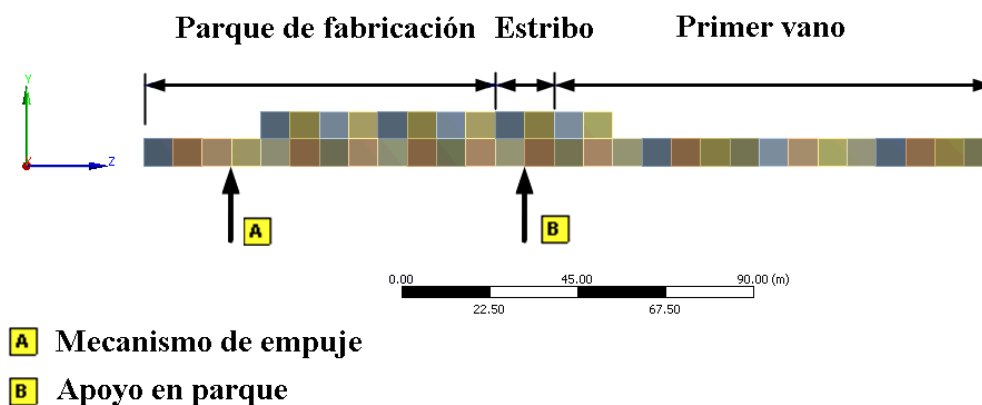


Figura 12. Esquema de solicitaciones para la fase de empuje más desfavorable para el mecanismo de empuje.

La secuencia estudiada con el fin de obtener la evolución de las reacciones durante la primera fase de lanzamiento es mostrada en la Figura 13.

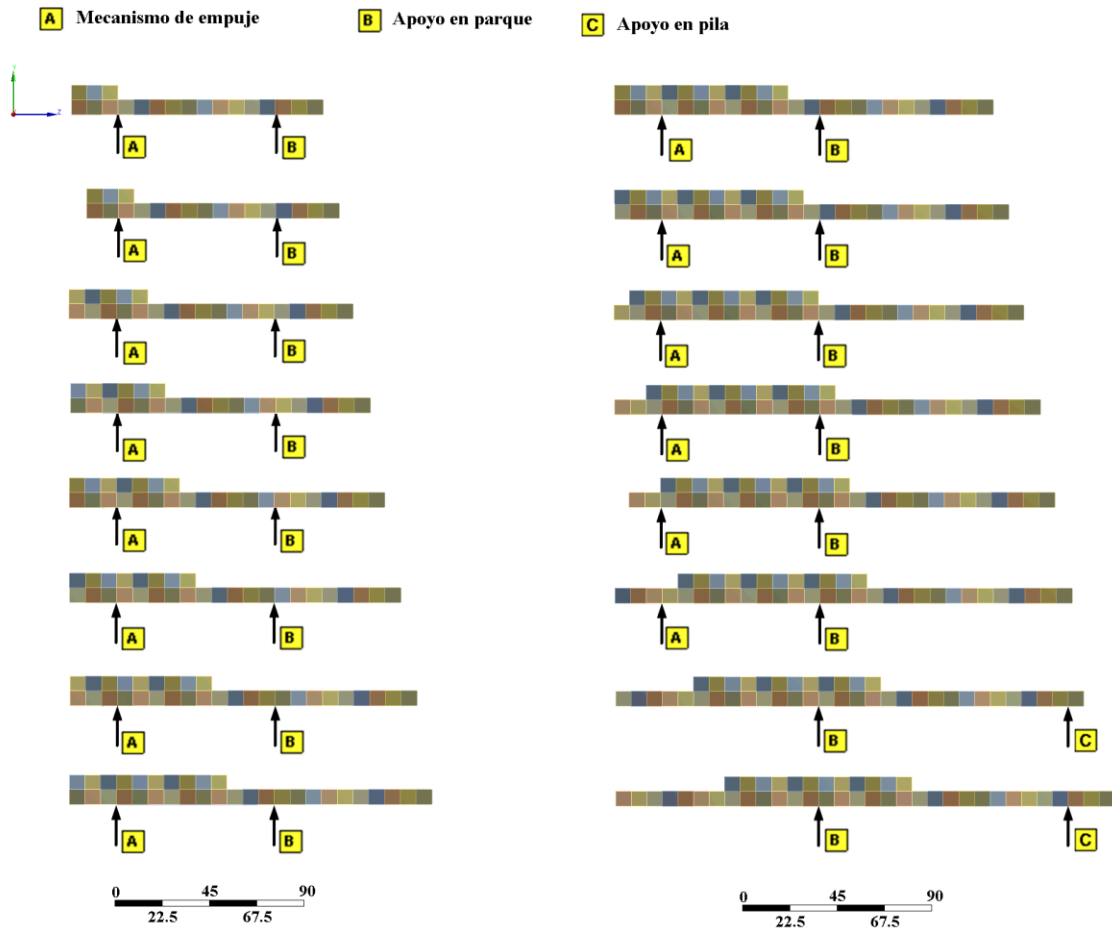


Figura 13. Secuencia de lanzamiento estudiada.

Para esta secuencia de lanzamiento se obtiene la evolución de carga normal sobre el mecanismo de empuje. La gráfica de esta evolución es mostrada en la Figura 14, cuyos valores son especificados en la Tabla 3.

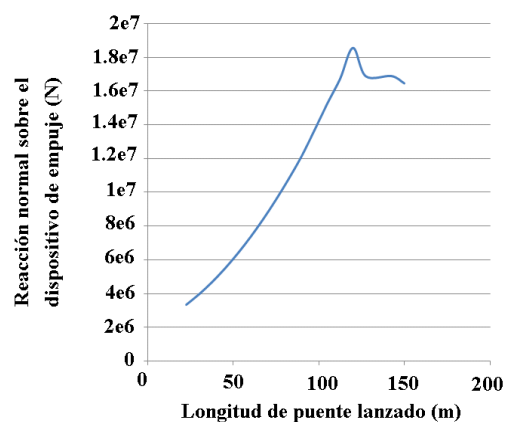


Figura 14. Reacción normal sobre el mecanismo de empuje para la primera fase de lanzamiento.

Tabla 3. Valores de las reacciones sobre el mecanismo de empuje para las diferentes etapas de la primera fase de lanzamiento.

Dist Lanzada [m]	Reacción Oruga [N]
22.5	$3.357 \cdot 10^6$
30	$3.980 \cdot 10^6$
37.5	$4.691 \cdot 10^6$
45	$5.491 \cdot 10^6$
52.5	$6.381 \cdot 10^6$
60	$7.359 \cdot 10^6$
67.5	$8.426 \cdot 10^6$
75	$9.582 \cdot 10^6$
82.5	$1.083 \cdot 10^7$
90	$1.216 \cdot 10^7$
97.5	$1.370 \cdot 10^7$
105	$1.527 \cdot 10^7$
112.5	$1.674 \cdot 10^7$
120	$1.856 \cdot 10^7$
127.5	$1.688 \cdot 10^7$
142.5	$1.690 \cdot 10^7$
150	$1.647 \cdot 10^7$

Tal y como se muestra en la Figura 14, la situación más desfavorable para el mecanismo de empuje es el instante en el que se llega a la primera pila. En este caso, el voladizo de la estructura es de 120 m, lo que provoca un importante cortante sobre el dispositivo de empuje. Esta carga normal, cuyo valor es $1.86 \cdot 10^7$ N, es tomado como dato de partida en el pre-dimensionamiento de dicho mecanismo, sobre el que es necesario aplicar el coeficiente de seguridad correspondiente. En este caso, el valor tomado como dato de partida del pre-diseño viene dado por la ecuación 3.

$$R_r = R_t \cdot f \quad 1.86 \cdot 10^7 \cdot 1.5 = 2.79 \cdot 10^7 [N]; \quad 3 \cdot 10^7 [N] \quad (3)$$

Donde:

R_r: reacción real sobre el mecanismo de empuje [N].

R_t: reacción teórica calculada sobre el mecanismo de empuje [N].

f: factor de seguridad.

Para esta reacción normal, se realiza el pre-dimensionamiento de los elementos del dispositivo diseñado. Debido a la elevada reacción que tiene lugar en un determinado instante del proceso de lanzamiento, se plantea la hipótesis inicial de empujar el puente mediante cuatro mecanismos iguales con el fin de reducir las dimensiones de cada uno de ellos. De este modo, la reacción normal que debe soportar cada uno de los dispositivos se divide entre cuatro tal y como se indica en la ecuación 4.

$$F_{N/unit} = F_N / 4 \qquad 3 \cdot 10^7 / 4 = 7.5 \cdot 10^6 [N] \qquad (4)$$

Donde:

$F_{N/unit}$: carga normal por dispositivo de empuje.

F_N : carga normal total ejercida por el puente a desplazar.

Por otro lado, es necesario considerar también la fuerza horizontal que este dispositivo debe proporcionar durante el lanzamiento. En base a experiencias previas, se considera razonable un coeficiente de rozamiento medio entre el puente y el dispositivo de empuje de 0.5. Por tanto, el esfuerzo horizontal al que está sometido el mecanismo de empuje es dado por la ecuación 5.

$$F_H = F_N \cdot \mu \qquad 7.5 \cdot 10^6 \cdot 0.5 = 3.75 \cdot 10^6 [N] \qquad (5)$$

Donde:

F_H : fuerza horizontal necesaria para desplazar la estructura por rozamiento.

F_N : carga normal total ejercida por el puente a desplazar.

Inicialmente, se pretende abordar la situación mediante una cadena de tracción capaz de soportar ambos esfuerzos, por un lado el tiro para empujar el puente y por otro, la reacción normal debida al peso de la estructura. Sin embargo, esta idea es descartada tras varias comprobaciones realizadas [26],[44], puesto que los esfuerzos se encuentran muy por encima de los valores admisibles en las cadenas de transmisión actuales. Para solventar este problema se diseña una cadena de eslabones de apoyo de gran rigidez capaz de soportar una gran carga vertical sin apenas deformación. A su vez, se disponen dos cadenas de tracción, una a cada lado de la cadena de eslabones de apoyo, que permiten la transmisión del tiro horizontal. De este modo, surgen dos de los elementos principales del dispositivo: las cadenas de tracción y la cadena de eslabones de apoyo.

4.2 Pre-dimensionamiento de los elementos básicos

En este sub-apartado se lleva a cabo el pre-dimensionamiento de los elementos básicos del dispositivo de empuje en base a los esfuerzos impuestos por la estructura a desplazar.

La idea inicial del mecanismo mostrada en la Figura 15 y recogida en la patente *DCACLM* es desarrollada en esta Tesis Doctoral hasta llegar al dispositivo final.

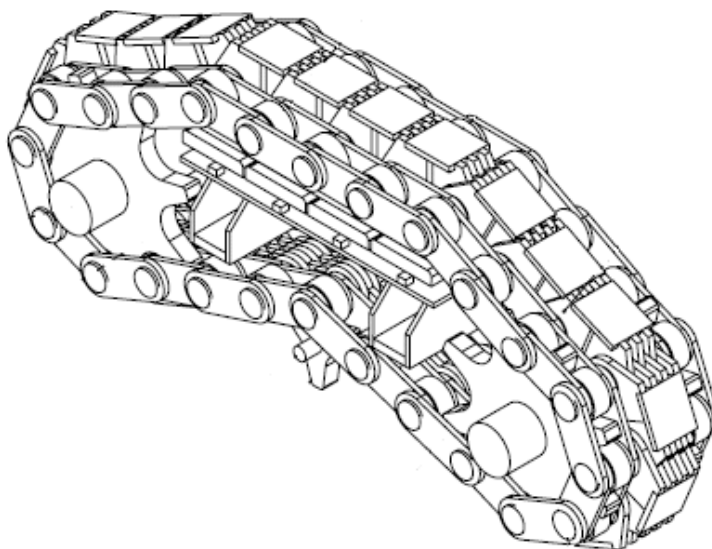
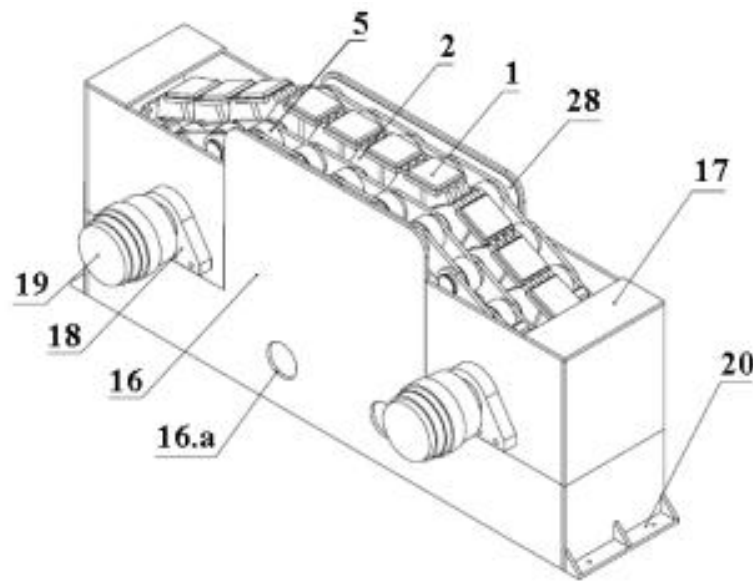


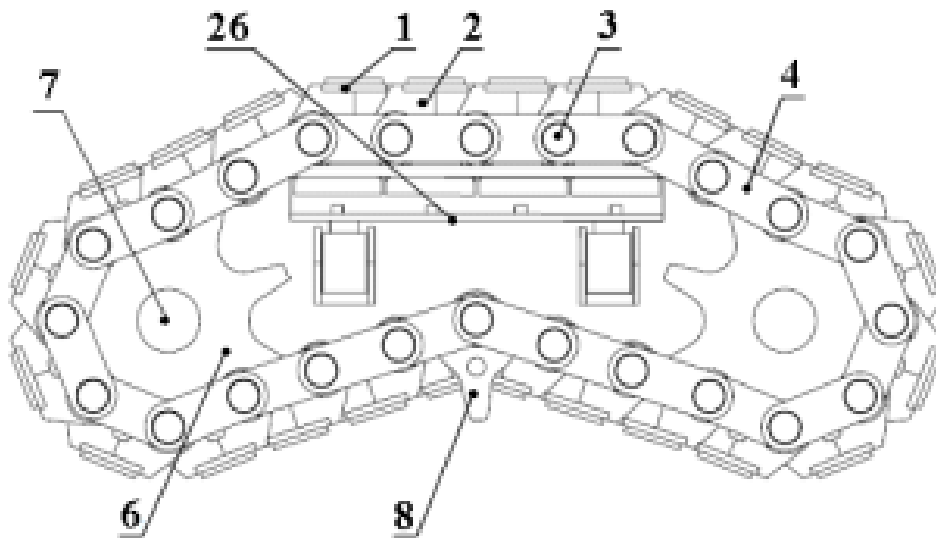
Figura 15. Imagen del nuevo mecanismo de empuje de puentes.

La estructura pesada que se desplazada mediante este mecanismo se apoya sobre unas placas de apoyo (1). Estas placas se sitúan sobre unos eslabones de apoyo (2) que se encuentran unidos entre sí mediante bulones (3). Estos bulones conectan también los eslabones de las cadenas de tracción (4). En los extremos de estos bulones se encuentran los rodillos (5), que engranan en las ruedas dentadas (6), los cuales a través de un eje (7) son accionados. La tensión de la cadena de transmisión es controlada por un tensor (8). El mecanismo se encuentra accionado por dos motores (19). Estos motores requieren un soporte (18) para ser acoplados a la carcasa (16) en la que se realiza una boca de hombre (16.a) para permitir el acceso al interior una vez está colocado en obra. Esta carcasa también está dotada de chapas superiores (17) que aíslan el mecanismo del exterior cuando este se encuentra en funcionamiento. La carcasa se encuentra anclada al suelo mediante unos pernos de gran resistencia (20). El dispositivo incorpora dos sistemas auxiliares que facilitan el buen funcionamiento del mismo, por un lado un sistema anti-fricción que favorece el deslizamiento entre los elementos y la carcasa (28) y por otro lado, un sistema de compensación de carga (26) que permite la adaptación de los eslabones de apoyo a la deformada de la estructura.

Los principales elementos de este dispositivo son comentados en la patente DCACLM en la que se protege y describe el mecanismo en detalle, ver Figura 16.



(a)



(b)

Figura 16. Identificación de los elementos principales: (a) perspectiva del conjunto; (b) vista frontal del mecanismo.

Con el fin de facilitar la comprensión de los cálculos realizados así como de los resultados, en los siguientes sub-apartados se expone el pre-dimensionamiento inicial de los principales elementos resistentes del mecanismo así como los resultados más relevantes. Tras estos cálculos iniciales se consigue el diseño final de la solución.

4.2.1 Bulones

Los ejes son elementos críticos en la mayoría de los componentes mecánicos. En este caso particular, los ejes o bulones conectan los eslabones de las cadenas, tal y como se explica en el sub-apartado anterior. Las sollicitaciones sobre estos elementos resistentes son debidas al peso de la estructura a desplazar. Estos esfuerzos son representados en la Figura 17, cuyos valores se encuentran indicados en la Tabla 4.

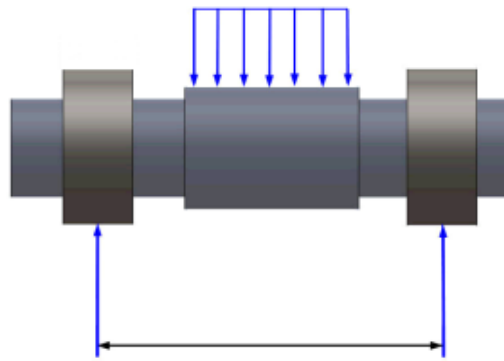


Figura 17. Esfuerzos verticales considerados en el pre-dimensionamiento de los bulones.

Tabla 4. Valores de los esfuerzos verticales sobre los bulones de las cadenas.

CARGA VERTICAL [N]	
R_{AV}	$9.38 \cdot 10^5$
R_{BV}	$9.38 \cdot 10^5$
R_{1V}	$2.678 \cdot 10^5$
R_{2V}	$2.678 \cdot 10^5$
R_{3V}	$2.678 \cdot 10^5$
R_{4V}	$2.678 \cdot 10^5$
R_{5V}	$2.678 \cdot 10^5$
R_{6V}	$2.678 \cdot 10^5$
R_{7V}	$2.678 \cdot 10^5$

Sabiendo las fuerzas a las que están sometidos estos elementos, se obtienen los momentos flectores que soportan a partir de los cuales se obtiene el diámetro mínimo del bulón. El momento flector y su tensión a flexión vienen dados por la ecuación 6.

$$M_f = F \cdot l \qquad \sigma_f = \frac{M_f}{W_f} \qquad (6)$$

Siendo:

M_f : momento flector.

F : carga soportada por el bulón.

l : distancia desde el punto de aplicación de la carga hasta la sección de momento nulo.

W_f : momento resistente a flexión.

El diámetro obtenido a partir del momento resistente a flexión viene dado por la ecuación 7:

$$W_f = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \qquad d^3 = \frac{32 \cdot W_f}{\pi} \qquad (7)$$

Considerando como criterio de cálculo que la tensión a flexión del material debe ser 4.5 veces menor que la tensión admisible del material [20], ver ecuación 8:

$$\sigma_f < \frac{\sigma_a}{4.5} \qquad (8)$$

Siendo:

σ_a : tensión admisible del material.

σ_f : tensión a flexión ejercida por el momento flector.

d : diámetro del bulón.

A partir de la Tabla 4 en la que se encuentran los valores de las fuerzas a las que están sometidos los bulones, de la longitud de los mismos y de la tensión admisible del material es posible calcular el diámetro mínimo de los bulones para las diferentes secciones a partir de la ecuación 9:

$$W_f = \frac{32 \cdot F \cdot l}{\pi \cdot d^3} < \frac{700}{4.5} \qquad d > \sqrt[3]{\frac{32 \cdot F \cdot l \cdot 4.5}{\pi \cdot 750}} \qquad (9)$$

Los diámetros obtenidos aplicando la ecuación 9 son valores teóricos que deben ser aproximados al valor normalizado inmediatamente superior, dn . Asimismo, también es importante contemplar el factor de continuidad en el eje, por lo que se han utilizado únicamente dos secciones diferentes con el fin de disminuir los escalones que actúan

como concentradores de tensiones. Ambos resultados, los teóricos y los normalizados, son recogidos en la Tabla 5.

Tabla 5. Diámetro mínimo obtenido para las secciones de los bulones.

	F [N]	M_f [N·mm]	d [mm]	d_n [mm]
Sección A	$9.38 \cdot 10^5$	0	280	280
Sección 1	$2.678 \cdot 10^5$	$4.085 \cdot 10^8$	299	360
Sección 2	$2.678 \cdot 10^5$	$4.563 \cdot 10^8$	310	360
Sección 3	$2.678 \cdot 10^5$	$4.850 \cdot 10^8$	317	360
Sección 4	$2.678 \cdot 10^5$	$4.946 \cdot 10^8$	319	360
Sección 5	$2.678 \cdot 10^5$	$4.850 \cdot 10^8$	317	360
Sección 6	$2.678 \cdot 10^5$	$4.563 \cdot 10^8$	310	360
Sección 7	$2.678 \cdot 10^5$	$4.085 \cdot 10^8$	299	360
Sección B	$9.38 \cdot 10^5$	0	280	280

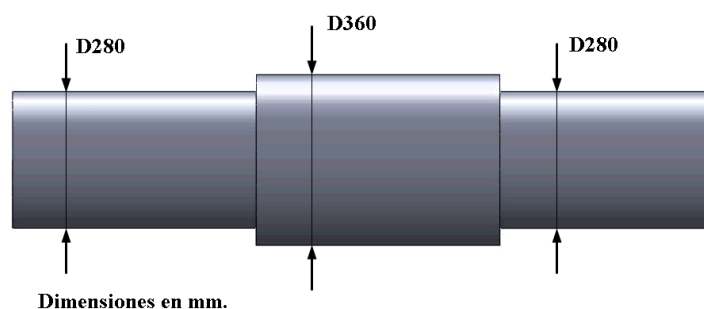


Figura 18. Valores de los diámetros para las diferentes secciones del bulón.

Estos primeros cálculos mediante mecánica tradicional se verifican utilizando el método de los elementos finitos, FEM (Finite Element Method). A partir de estos modelos numéricos es posible realizar optimizaciones que mejoran el diseño inicial. En este caso, se estudia un modelo numérico del bulón previamente pre-diseñado con el que se obtienen tensiones según Von Mises y deformaciones del elemento. Este es un modelo simplificado debido a las condiciones de simetría del bulón tanto geométricas como de carga. Esta simplificación divide el bulón por un plano central y permite analizar únicamente uno de los extremos. No obstante, con el fin de obtener una simulación numérica ajustada a la realidad, se incluyen los rodillos de los extremos de los bulones y un aumento del diámetro exterior que es necesario para mantener el bulón posicionado durante el funcionamiento del mecanismo. El modelo geométrico, ver

Figura 19(a), es mallado con 1522 elementos de tipo SOLID 187 y SOLID 186. Las condiciones de carga impuestas, ver Figura 19(b), fijan el bulón en su extremo, donde irá encajado el rodillo y se aplica, en el centro, una fuerza equivalente a la fuerza de tiro de la cadena de tracción. Los resultados obtenidos son mostrados en la Figura 19(c) y (d), en las que es posible verificar el diseño del elemento apreciando valores de tensiones y deformaciones admisibles, cuyos valores máximos son 1 mm de deformación máxima del bulón y 152 MPa de tensión máxima equivalente de Von-Mises. En la Figura 19(e) se muestra el factor de seguridad en el cálculo considerando como material de fabricación el acero estructural.

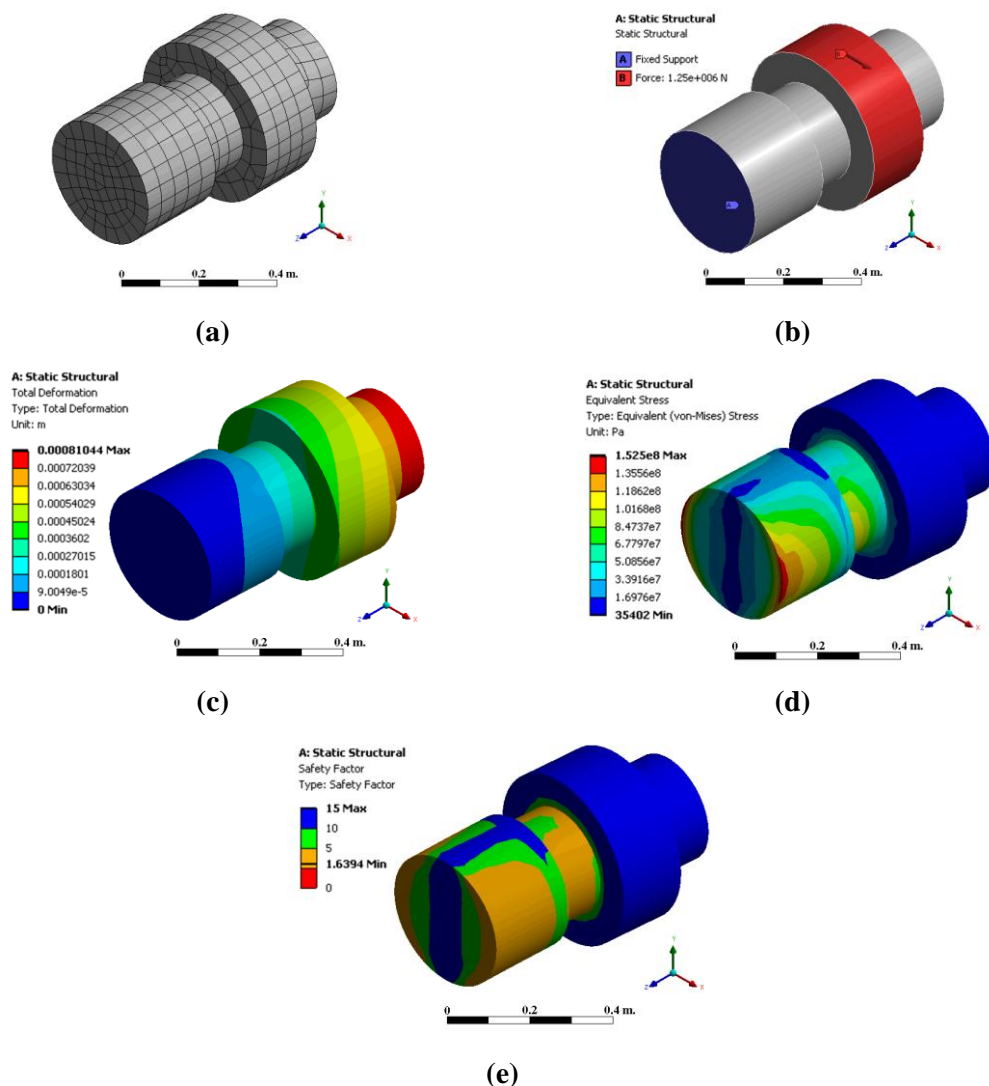


Figura 19. Modelo numérico del bulón: (a) mala de elementos finitos; (b) condiciones de carga; (c) deformación total; (d) tensión equivalente de Von Mises; (e) factor de seguridad.

4.2.2 Ruedas dentadas

Las ruedas dentadas o engranes son los elementos encargados de transmitir el movimiento desde el motor hasta la cadena de transmisión, y de ésta a la estructura a desplazar. Debido a la elevada fuerza de empuje que cada mecanismo debe transmitir se disponen cuatro engranes iguales para cada dispositivo, dos en cada una de las cadenas de tracción, con el fin de distribuir los esfuerzos de un modo óptimo. Los principales parámetros de diseño de las ruedas dentadas son:

- **La circunferencia de paso:** circunferencia base sobre la que se inician todos los cálculos. Geométricamente, es importante considerar que las circunferencias de paso de dos ruedas dentadas engranadas son tangentes.
- **El paso, p :** distancia medida sobre la circunferencia de paso desde un punto de un diente hasta el punto correspondiente de su diente contiguo.
- **El módulo, m :** es la relación entre el diámetro de paso y el número de dientes y representa el índice del tamaño de los dientes.
- **Diámetro del rodillo exterior, d_r :** diámetro del elemento que engrana con la rueda.

El diseño de estos elementos no es básico. El buen funcionamiento del mecanismo depende en gran medida de la exactitud en su geometría y dimensiones. Por este motivo, se realiza un exhaustivo estudio sobre los engranes donde, por un lado, se desarrolla la geometría de las ruedas dentadas y sus dientes y, por otro, se comprueba la resistencia del diseño mediante elementos finitos, verificando que el elemento resiste los esfuerzos a los que se encuentra sometido al desplazar la cadena de transmisión.

Respecto a la geometría de las ruedas dentadas, es importante considerar que ésta depende tanto de la aplicación como de los niveles de carga en servicio. Para encontrar la más adecuada a este dispositivo se recurre a los elementos utilizados en grandes cadenas de transmisión, o “*heavy sprockets*”, normalizados en base al correspondiente estándar de ASME [45]. En este se especifican los parámetros básicos de la geometría de los engranes de cadenas de rodillo, así como sus dimensiones normalizadas y las herramientas necesarias para su mecanizado. Teniendo en cuenta todo lo anterior, la geometría del dentado de estos engranes es desarrollada mediante una herramienta CAD cuya base de datos aporta la programación básica necesaria para llevar a cabo la representación gráfica. Los parámetros utilizados, tanto teóricos como de la base de datos CAD, se indican en la Figura 20.

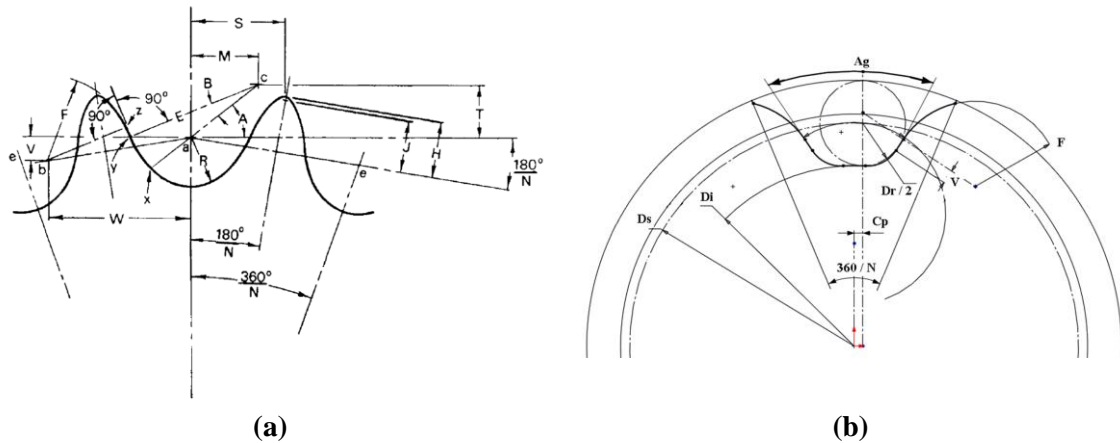


Figura 20. Geometría normalizada de ruedas dentadas para cadenas de rodillos: (a) teórica; (b) mediante el procedimiento gráfico de la herramienta CAD utilizada.

Siendo:

p : paso (ae)

N : número de dientes

Dr : diámetro nominal del rodillo

Ds : diámetro de configuración de la curva ($Ds = 1.005 \cdot Dr + 0.003$, valores en pulgadas)

Di : $Ds/2 + Dr/2 - 0.03$, (valores en pulgadas)

R : $1/2 \cdot Ds$

A : $35^\circ + (60^\circ/N)$

B : $18^\circ - (56^\circ/N)$

ac : $0.8 \cdot Dr$

M : $0.8 \cdot Dr \cdot \cos [(35^\circ + (60^\circ/N))]$

T : $0.8 \cdot Dr \cdot \sin (35^\circ + (60^\circ/N))$

E : $1.3025 \cdot Dr + 0.0015$, (valores en pulgadas)

Cuerda xy : $(2.605 \cdot Dr + 0.003) \cdot \sin (9^\circ - (28^\circ/N))$, (valores en pulgadas)

yz : $Dr \{ 1.4 \cdot \sin [17^\circ - (64^\circ/N)] - 0.8 \cdot \sin (18^\circ - (56^\circ/N)) \}$

Longitud del segmento ab: $1.4 \cdot Dr$

W: $1.4 \cdot Dr \cdot \cos (180^\circ/N)$

V: $1.4 \cdot Dr \cdot \sin (180^\circ/N)$

F: $Dr \cdot \{0.8 \cdot \cos [18^\circ - (56^\circ/N)] + 1.4 \cdot \cos [17^\circ - (64^\circ/N)] - 1.3025\}$
 -0.0015 (valores en pulgadas)

H: $\sqrt{F^2 - 1.4 \cdot Dr - 0.5 \cdot P^2}$

S: $0.5 \cdot P \cdot \cos (180^\circ/N) + H \cdot \sin (180^\circ/N)$

Cp: $0.05 \cdot P$

Aproximación o.d. cuando J es $0.3P = P \cdot [0.6 + \cot (180^\circ/N)]$

Diámetro exterior de la rueda dentada: $p \cdot \cot (180^\circ/N) + \cos (180^\circ/N) \cdot (Ds - Dr) + 2 \cdot H$

Ángulo de presión de la nueva cadena: $x_{ab} = 35^\circ - (120^\circ/N)$

Ángulo de presión mínima: $x_{ab} - B = 17^\circ - (64^\circ/N)$

Ángulo de presión medio (Ap): $26^\circ - (92^\circ/N)$

Ag: $2 \cdot Ap + 360/N$

Mediante el uso de las ecuaciones que generan el modelo geométrico, y tomando como datos de entrada los principales parámetros, se genera la geometría completa de la rueda dentada del dispositivo. Los parámetros de entrada utilizados en este diseño son:

- Diámetro del rodillo, Dr : 450 mm
- Diámetro primitivo de la rueda dentada, Ds : 900 mm
- Número de dientes, N : 8
- Paso de la cadena, p : 688.83 mm

La programación gráfica de la herramienta CAD utilizada permite realizar un modelo geométrico tridimensional y paramétrico de la rueda dentada. Este proceso se lleva a cabo mediante un conjunto de ecuaciones que, siendo dependientes de unos parámetros de entrada, generan la geometría de la rueda dentada a partir de tres croquis en tres planos diferentes. La secuencia de generación del modelo mediante esta herramienta es mostrada en la Figura 21.

Las dimensiones de la rueda dentada son determinadas a partir del diámetro de los rodillos de los bulones y considerando las relaciones geométricas del conjunto.

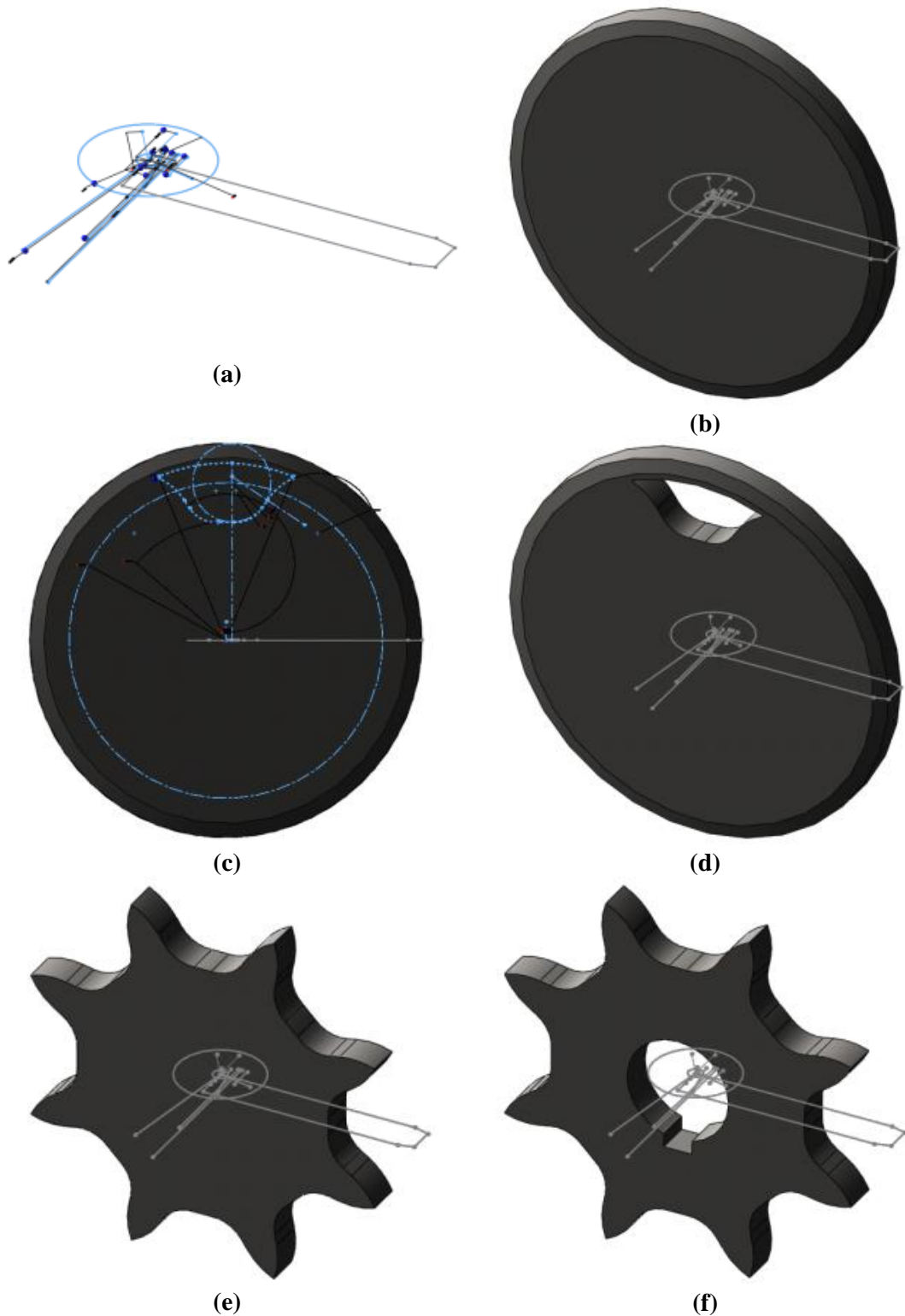


Figura 21. Secuencia del desarrollo geométrico de la rueda dentada mediante herramientas CAD: (a) croquis utilizados; (b) generación de rueda de diámetro exterior; (c) croquis geometría dentado; (d) operación de corte de dentado; (e) generación completa del dentado; (f) chaveta, eje y rueda final.

El número de dientes para la rueda dentada se limita entre seis y doce, con el fin de obtener una cadena que sea capaz de girar de manera estable a bajas revoluciones. La selección del diámetro primitivo, así como del número de dientes de la rueda se realiza siguiendo el criterio de la autora, en base a las condiciones geométricas del conjunto del dispositivo. Finalmente, se opta por una rueda dentada de ocho dientes cuyo diámetro primitivo es de 1.800 m. Sobre la circunferencia primitiva se inscribe un octaedro que permite, gracias a la distancia entre sus vértices, obtener el paso de la cadena.

Una vez se encuentra dimensionada la rueda dentada, se aplica el método gráfico indicado en la Figura 21, con la que se obtiene una geometría normalizada en base al estándar ASME, adaptada a nuestro mecanismo y que, en consecuencia, permite la transmisión cinemática de movimiento de manera estable.

A partir del modelo geométrico tridimensional se lleva a cabo un análisis con elementos finitos con el fin de verificar la resistencia del elemento cuando este desplaza la cadena de rodillos. El modelo geométrico utilizado está formado por la rueda dentada y uno de los rodillos de la cadena de tracción, ver Figura 22(a). Se atribuyen las condiciones de contorno y desplazamiento, ver Figura 22(b), y se reproduce el fenómeno de contacto entre los rodillos y la rueda dentada, ver Figura 22(c). El modelo desarrollado es el indicado a continuación:

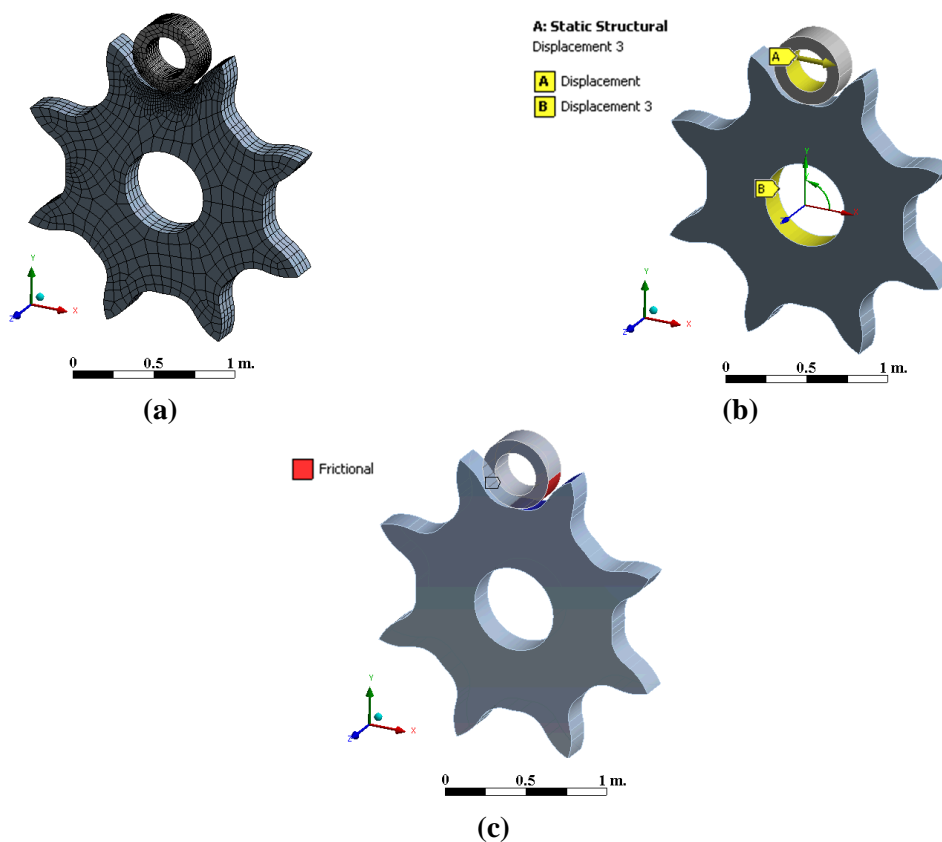


Figura 22. Modelo numérico del conjunto rueda dentada – rodillo: (a) malla de elementos finitos; (b) condiciones de carga; (c) contacto friccional.

Las condiciones de contorno y carga aplicadas al modelo numérico son:

- Desplazamiento horizontal del rodillo: a través del cual se genera la reacción equivalente al tiro.
- Desplazamiento restringido en la dirección del eje de la rueda dentada, con lo que se impide el desplazamiento axial del conjunto.
- Giro restringido del eje de la rueda dentada: con el fin de reproducir el efecto producido por el tiro de la cadena.
- El contacto entre los dos elementos, el rodillo del bulón y la rueda dentada, es un contacto no lineal de fricción en el que la zona de contacto varía a medida que se desplaza el rodillo.

Los resultados obtenidos en este modelo numérico muestran niveles admisibles de tensiones, tanto sobre la rueda dentada como sobre el rodillo. En la Figura 23(a) se representa la distribución de la tensión equivalente de Von-Mises, cuyo valor máximo es 972 MPa, admisible para el acero habitualmente utilizado en elementos mecánicos mecanizados. En la Figura 23(b), se representa el valor del coeficiente de seguridad en el cálculo, donde se aprecia que siempre es superior a 1, tomando como base el límite elástico del material.

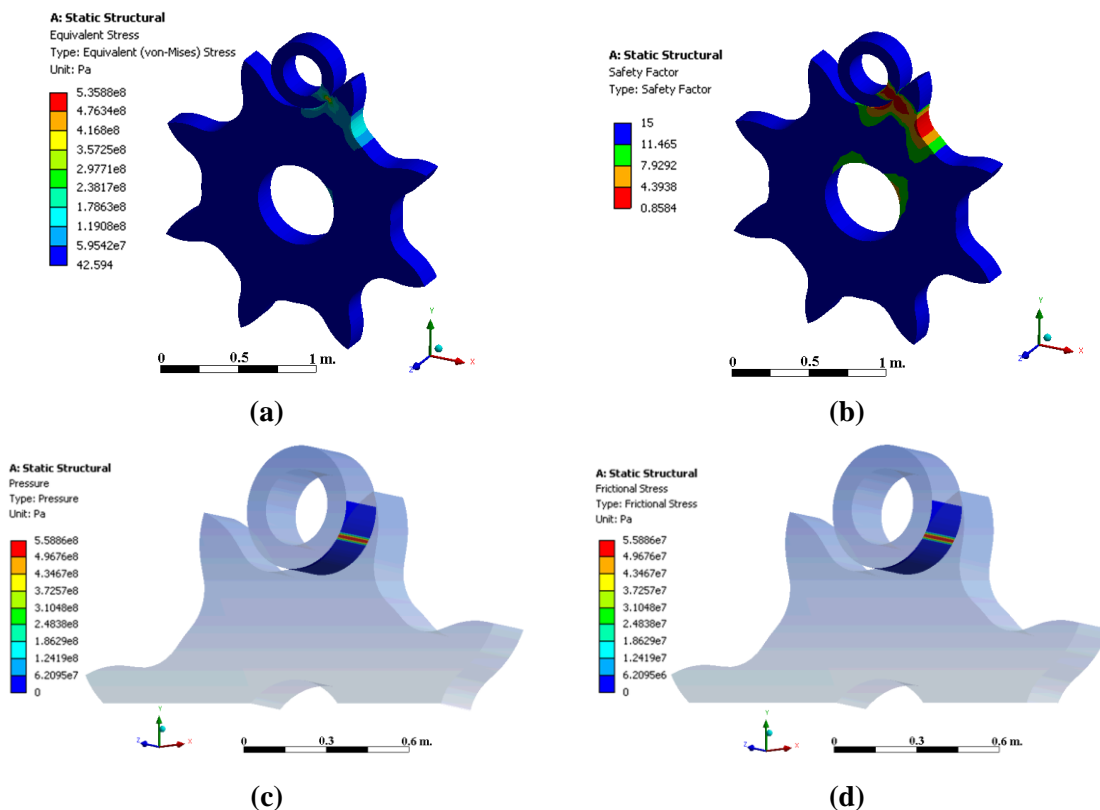


Figura 23. Resultados obtenidos en el modelo numérico: (a) tensión equivalente de Von-Mises; (b) factor de seguridad en el cálculo; (c) presión en el contacto; (d) tensión friccional en el contacto.

4.2.3 Ejes de transmisión

Los ejes de transmisión son los ejes que unen los accionamientos y las ruedas dentadas. A través de estos ejes se transmite el par necesario para desarrollar la fuerza de empuje horizontal a la cadena tracción de rodillos. Estos ejes se ven sometidos a importantes esfuerzos de torsión, por lo que es importante realizar un pre-dimensionamiento inicial que indique el diámetro mínimo de los mismos. En posteriores fases de desarrollo es posible que estos ejes sufran modificaciones en función de otros elementos, tales como el acoplamiento con los accionamientos, la unión a las ruedas dentadas, etc.

El extremo del eje en el que se sitúa el accionamiento se ve sometido a un par torsor que compensa el par ejercido por el propio accionamiento y permite que el eje de transmisión gire con el piñón, ver ecuación 10.

$$Par\ motor = F_H \cdot D_s \quad Par = 3.75 \cdot 10^6 \cdot 0.9 = 3.375 \cdot 10^6 [N \cdot m] \quad (10)$$

Siendo:

F_H : fuerza horizontal requerida para desarrollar el empuje.

D_s : diámetro primitivo de la rueda dentada.

Los diagramas de esfuerzos son representados en la Figura 24.

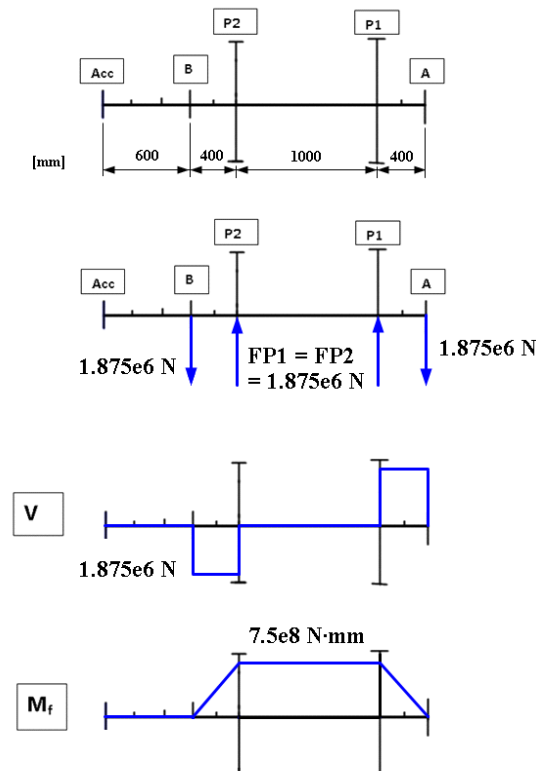


Figura 24. Diagrama de momentos flectores resultantes en los ejes de transmisión.

En estos ejes es necesario realizar una hipótesis de carga combinada en la que se consideren los principales esfuerzos a los que estos elementos están sometidos. Por un lado, se encuentra el momento flector provocado por el tiro de la cadena de rodillos, ver ecuación 11. Por otro lado, en el eje existen otros esfuerzos importantes debidos al momento torsor provocado por los accionamientos, ver ecuación 12. En consecuencia, el pre-dimensionamiento debe tener en cuenta la hipótesis de carga combinada, ver ecuación 13. Considerando ambos esfuerzos, momento flector y torsor, se calcula el diámetro mínimo. Asimismo, el dimensionamiento de estos ejes debe tener en cuenta la forma del mismo, el alargamiento y la tensión transversal a la que está sometido, ver Tabla 6.

$$\sigma_f = \frac{M_f}{W_f} \qquad M_f = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \qquad (11)$$

$$\tau = \frac{M_t}{W_t} \qquad M_t = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \qquad (12)$$

$$\sigma_{r_c} = \sqrt{\sigma_f^2 + 1.56 \tau^2} \qquad (13)$$

Donde:

τ : tensión debida al momento torsor en el eje

M_t : Momento torsor en el eje

W_t : Momento resistente torsor

Además de las tensiones correspondientes a los esfuerzos de flexión y torsión en el eje, deben ser considerados otros factores que afectan a la resistencia del mismo, tales como la forma y el alargamiento. Estos se contemplan en las ecuaciones 14 y 15, [20].

$$\sigma_{r_l} = \frac{M}{W} (0.35 + 0.65) \sqrt{1 + \left(\alpha \frac{M_t}{2W} \right)^2} \qquad (14)$$

$$\sigma_{r_s} = \frac{M}{W} \sqrt{1 + 0.75 \left(\alpha \frac{M_t}{2W} \right)^2} \qquad (15)$$

Donde:

σ_{r_l} : tensión relativa al alargamiento

σ_{r_s} : tensión relativa a la forma del eje

σ_{r_c} : tensión combinada, contempla esfuerzos de tensión y torsión

Finalmente, considerando todos los factores mencionados previamente, el diámetro mínimo nominal, $D_{nom\ min}$, para cada una de las secciones es indicado en la Tabla 6.

Tabla 6. Cálculo del diámetro mínimo para las secciones de los ejes de transmisión.

	Acc	B	P1	P2	A
M_f [N mm]	0	0	$7.50 \cdot 10^8$	$7.50 \cdot 10^8$	0
M_t [N mm]	$3.38 \cdot 10^9$	$3.38 \cdot 10^9$	$1.69 \cdot 10^9$	0	0
W [mm ³]	$1.36 \cdot 10^7$	$1.36 \cdot 10^7$	$9.16 \cdot 10^6$	$4.82 \cdot 10^6$	$2.65 \cdot 10^6$
W_t [mm ³]	$2.72 \cdot 10^7$	$2.72 \cdot 10^7$	$1.83 \cdot 10^7$	$9.64 \cdot 10^6$	$5.30 \cdot 10^6$
σ [N/mm ²]	0	0	$8.19 \cdot 10^1$	$1.56 \cdot 10^2$	0
τ [N/mm ²]	$1.24 \cdot 10^2$	$1.24 \cdot 10^2$	$9.21 \cdot 10^1$	0	0
σ_{r_l} [N/mm ²]	$1.55 \cdot 10^2$	$1.55 \cdot 10^2$	$1.56 \cdot 10^2$	$1.56 \cdot 10^2$	0
σ_{r_c} [N/mm ²]	$-1.55 \cdot 10^2$	$-1.55 \cdot 10^2$	$-9.82 \cdot 10^1$	$-4.67 \cdot 10^1$	0
σ_{r_s} [N/mm ²]	$1.55 \cdot 10^2$	$1.55 \cdot 10^2$	$1.41 \cdot 10^2$	$1.56 \cdot 10^2$	0
σ_{adm} [N/mm ²]	$1.56 \cdot 10^2$	$1.56 \cdot 10^2$	$1.42 \cdot 10^2$	$1.56 \cdot 10^2$	0
$\text{Max}[\sigma, \tau, \sigma_{r_l}, \sigma_{r_c}, \sigma_{r_s}] - \sigma_{adm}$	$6.56 \cdot 10^{-5}$	$-1.55 \cdot 10^{-4}$	$9.14 \cdot 10^{-5}$	$4.62 \cdot 10^{-6}$	$-1.56 \cdot 10^2$
D [mm]	517.33	517.33	453.52	366.20	300
$D_{norm\ min}$ [mm]	530	560	460	400	300

Donde:

M_f : momento flector.

M_t : momento torsor.

W : momento resistente a flexión para una sección circular.

W_t : módulo de torsión para una sección circular.

σ : tensión debida a esfuerzos de flexión.

τ : tensión debida a esfuerzos cortantes.

- σ_{r_l} : tensión debida al alargamiento.
- σ_{r_c} : tensión debida a los esfuerzos combinados.
- σ_{r_s} : tensión debida a la forma del eje.
- σ_a : tensión admisible del material.
- D : diámetro.
- $D_{norm\ min}$: diámetro normalizado mínimo.

4.2.4 Eslabones de apoyo

Los eslabones de apoyo son los eslabones que componen la cadena central en la que apoya la estructura del puente. Estos elementos se diseñan para soportar las elevadas cargas verticales que ejerce la estructura durante el proceso de lanzamiento. Sobre cada uno de estos eslabones se ubican las placas de neopreno que en contacto con el metal permiten el empuje mediante fricción.

El diseño de estos eslabones de apoyo está limitado por dos factores condicionantes:

- El diámetro del bulón, puesto que son los elementos que conectan los eslabones entre sí.
- El paso de la cadena de transmisión debido a la conexión que existe entre las cadenas de transmisión y la cadena de eslabones de apoyo. En este aspecto, al desplazarse solidarias ambas debe respetar el paso impuesto por las ruedas dentadas.

El estudio de los eslabones de apoyo se lleva a cabo numéricamente mediante elementos finitos con el fin de posteriormente optimizar el modelo inicial. Las placas de apoyo de neopreno son también estudiadas de manera individual siguiendo la “*Nota Técnica sobre Aparatos de Apoyo para Puentes de Carretera*” [46], debido a las similitudes conceptuales en el principio de trabajo de las placas apoyo con estos elementos.

A continuación, se muestra el modelo numérico desarrollado con el que se justifica el diseño de los eslabones de apoyo del mecanismo.

4.2.4.1 Apoyos de neopreno

El diseño de los eslabones de apoyo se hace en base a la elevada carga normal que estos deben soportar. Con el fin de conseguir un elemento resistente de gran rigidez se recurre a una forma geométrica trapezoidal. A partir de esta geometría especial, se lleva a cabo el modelo geométrico que se utiliza para el posterior análisis numérico. Los eslabones de apoyo se encuentran unidos entre sí mediante bulones. El diseño de la geometría de estos eslabones es realizado para conseguir que el sistema aporte rigidez suficiente y soporte las elevadas cargas verticales a las que se encuentra sometido el dispositivo. En la Figura 25, se muestra el modelo geométrico utilizado y el modelo numérico desarrollado, así como los principales resultados obtenidos.

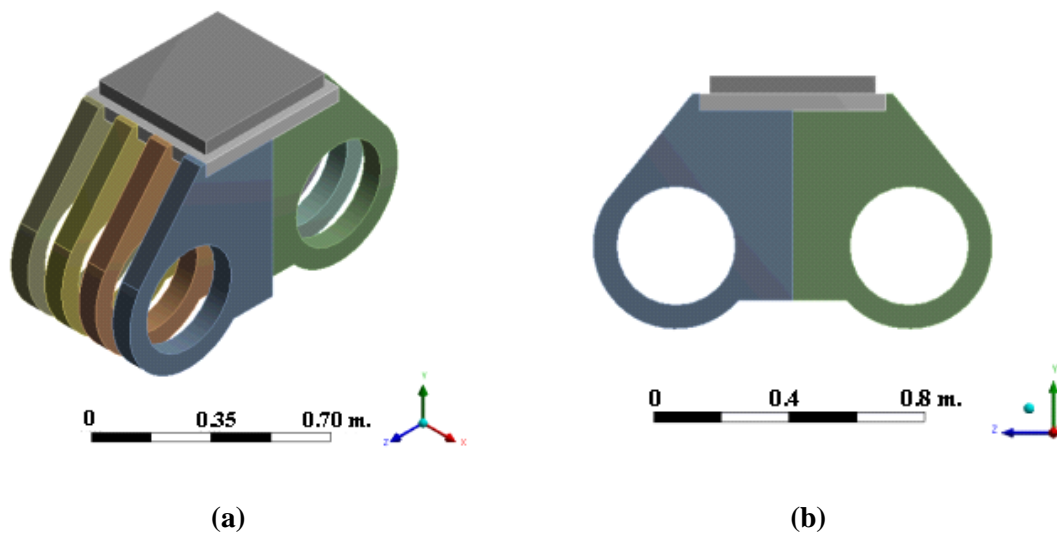


Figura 25. Modelo geométrico del eslabón de apoyo: (a) perspectiva isométrica; (b) vista frontal.

El modelo geométrico es mallado de manera regular mayoritariamente mediante elementos finitos hexaédricos de tipo SOLID186. El modelo numérico de elementos finitos que se estudia está compuesto por 29110 nodos y 5133 elementos finitos, ver Figura 26.

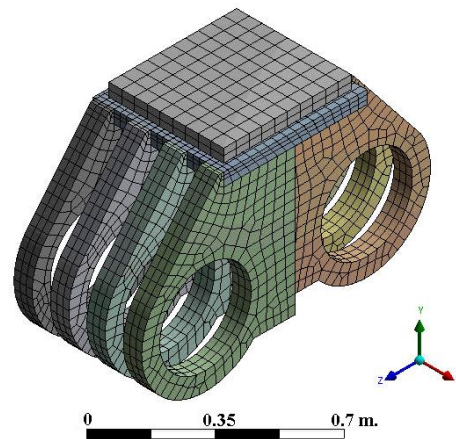


Figura 26. Malla del eslabón de apoyo.

Las condiciones de contorno del modelo numérico se basan en las siguientes consideraciones:

- **Reacción:** la reacción normal sobre los eslabones de apoyo es determinada considerando que cuatro dispositivos llevan a cabo el empuje de la estructura completa, en consecuencia cada dispositivo recibe $7.5 \cdot 10^6$ N. Sin embargo, sólo cuatro de los eslabones de apoyo de cada uno de los dispositivos se encuentra en contacto con la estructura, por lo que la carga normal máxima sobre ellos es $1.875 \cdot 10^6$ N. La carga vertical que soportan los eslabones de apoyo es transmitida a través de los bulones. En el modelo numérico por elementos finitos se aplica la reacción vertical sobre el hueco en el que se introducen los bulones de manera que el eslabón de apoyo se comprime en sentido inverso.
- **Desplazamiento limitado:** se restringe el desplazamiento de la placa superior del eslabón de apoyo en su parte superior. La restricción del desplazamiento vertical del eslabón de apoyo permite simular las condiciones de trabajo a compresión, así como verificar la rigidez del diseño y comprobar el estado de carga del componente.

Las condiciones de contorno y las sollicitaciones del modelo numérico son indicadas en la Figura 27.

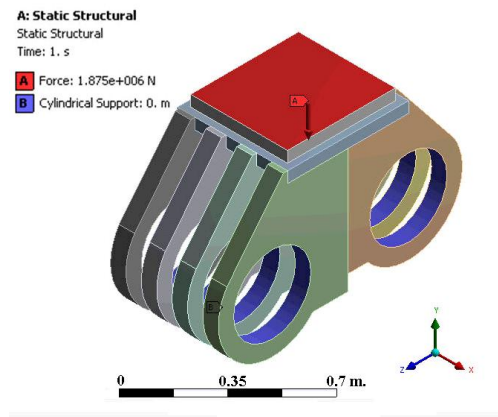


Figura 27. Condiciones de contorno del eslabón de apoyo.

Este modelo numérico se resuelve mediante el método directo de *Newton Raphson* de manera sencilla y rápida.

Los resultados obtenidos se representan en la Figura 28 y la Figura 29. En la Figura 28 se muestran los resultados de deformación obtenidos; en la Figura 29, se indica la distribución de tensión equivalente de Von-Mises. En ambos casos los valores obtenidos son admisibles:

- Menos de 0.5 mm de deformación total para la deformación máxima del bulón.
- Menos de 110 MPa para la tensión equivalente máxima de Von-Mises.

Con el fin de facilitar la comprensión de los resultados se representan dos vistas, una perspectiva isométrica y una vista frontal:

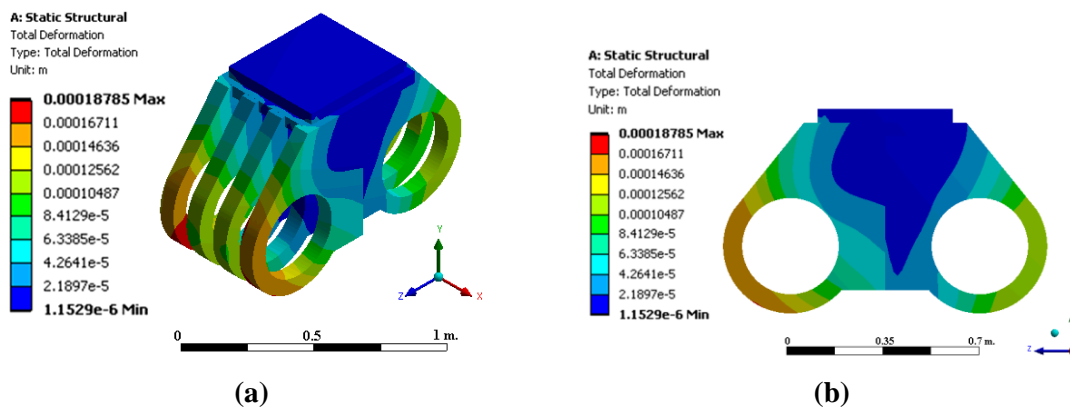


Figura 28. Deformación total del elemento: a) perspectiva isométrica; b) vista frontal.

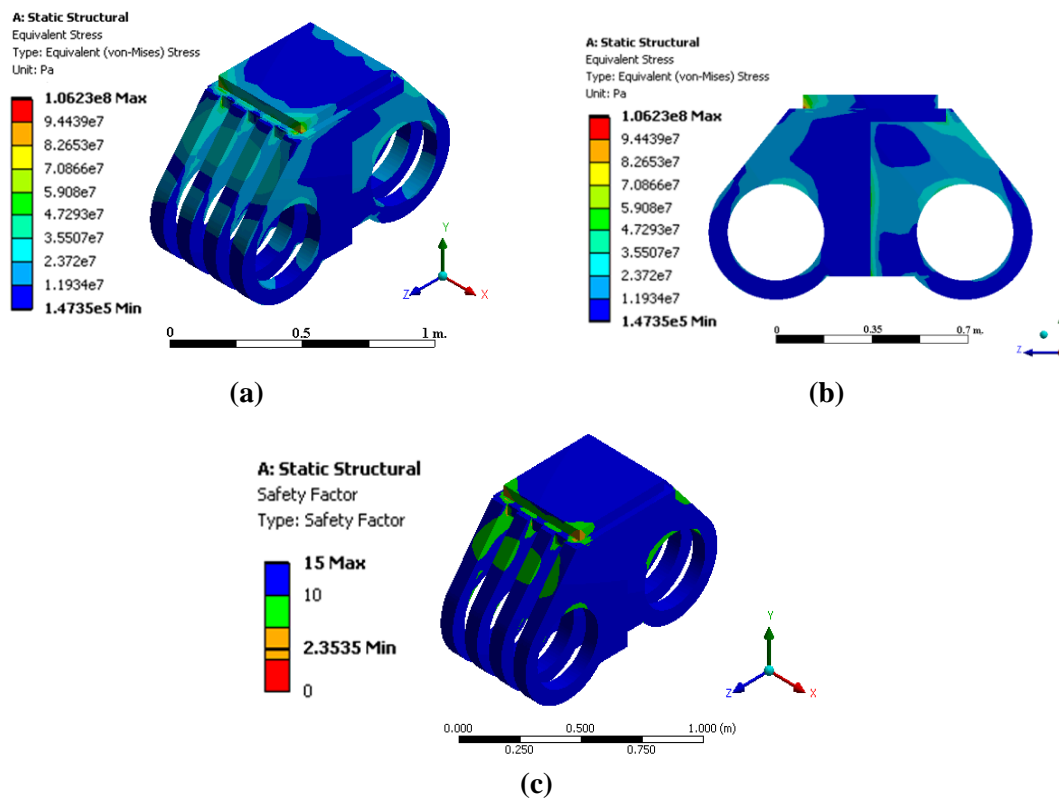


Figura 29. Tensión equivalente de Von-Mises del eslabón de apoyo: a) perspectiva isométrica; b) vista frontal; c) factor de seguridad en el cálculo a tensión.

4.3 Materiales en contacto: fenómeno de fricción

El principio de funcionamiento del mecanismo diseñado en la presente Tesis Doctoral se basa en el desplazamiento de estructuras mediante fricción. Por este motivo, una parte importante del diseño y estudio del dispositivo se centra en el comportamiento friccional de los diferentes materiales en contacto: por un lado el material del puente, acero estructural, y por otro, el material de las placas de apoyo del mecanismo.

El comportamiento friccional de los eslabones de apoyo de este mecanismo con el puente a desplazar es muy semejante a las placas utilizadas en los gatos de fricción, o incluso en los apoyos de las pilas de los puentes. Por este motivo, los materiales estudiados son elastómeros, puesto que son capaces de absorber cargas elevadas y poseen altos coeficientes de fricción en contacto con metales. En consecuencia, se estudiaron dos tipos diferentes de elastómeros: goma natural, NR (Natural Rubber) y neopreno, CR (Chloroprene Rubber). Cada uno de estos elastómeros se analizó para diferentes durezas tipo Shore, antes y después de ser sometidos a varios tratamientos de envejecimiento, con el fin de estudiar la influencia de la dureza y el desgaste en el comportamiento de fricción.

El estudio del comportamiento de fricción entre el acero y los diferentes neoprenos estudiados, cuyas propiedades son diferentes, se llevó a cabo mediante ensayos de fricción de tipo *pin-on-disc* [48]-[50].

A continuación, se expone el desarrollo de estos ensayos, así como los resultados obtenidos:

- Técnica *pin-on-disc*: donde se realiza una descripción de la técnica en los ensayos y el equipo utilizado.
- Ensayos: se indica la planificación para las diferentes probetas analizadas, la normativa utilizada y el desarrollo de los mismos.
- Resultados: se representan los principales resultados obtenidos en los ensayos.

4.3.1 Técnica *pin-on-disc*.

La técnica *pin-on-disc* es muy utilizada en el estudio del comportamiento de fricción entre varios materiales, debido a su eficiencia y la sencillez tanto del equipo como del tipo de ensayo. Sin embargo, todos los ensayos de fricción conllevan las dificultades asociadas a la variación del comportamiento del material con factores externos, que en muchas ocasiones son difíciles de controlar. Esta dificultad general es aún mayor en el caso de los elastómeros por su alto grado de hiperelasticidad.

Los ensayos mediante *pin-on-disc* permiten el estudio del desgaste entre dos materiales que deslizan entre sí. El ensayo se basa en un “*pin*” que se encuentra en contacto con un disco que se mantiene girando. Sobre el pin se aplica una fuerza conocida con la que se obtiene la presión normal necesaria para obtener el coeficiente de fricción dinámico. La velocidad de giro del disco es controlada y variada en función de las necesidades. El movimiento relativo entre los dos cuerpos es tal que se produce un desgaste que permite el coeficiente de fricción entre ambos materiales bajo unas condiciones impuestas de velocidad y carga normal. El disco, cuya forma es circular, se mantiene girando a velocidad constante durante todo el ensayo. Sin embargo, la geometría del pin puede variar en función del tipo de contacto que se desee estudiar, ver Figura 30.

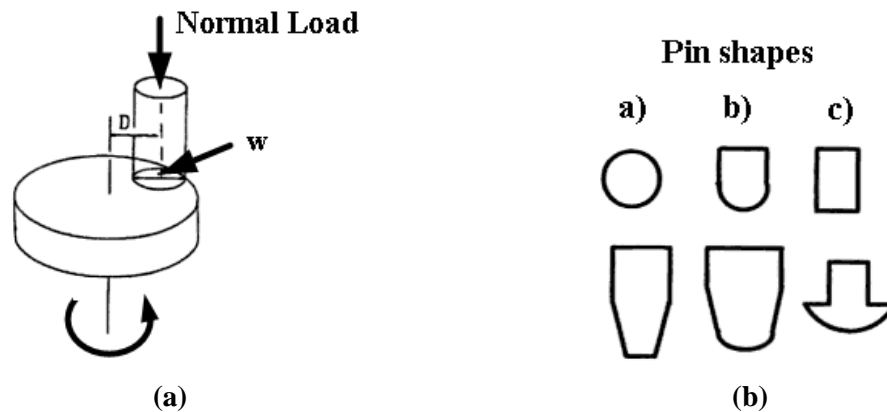


Figura 30. Ensayo *pin-on-disc*: (a) diagrama del ensayo; (b) secciones de las formas del pin.

Los ensayos realizados con esta técnica se llevaron a cabo en la Escuela de Ingeniería Mecánica de Purdue University, Indiana, USA, entre los meses de agosto y diciembre de 2012, siguiendo la normativa ASTM G99: *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus* [51], ver Figura 31. El grupo de investigación METL (Mechanical Engineering Tribology Laboratory) puso a disposición de la autora de esta Tesis Doctoral sus equipos de ensayo. De este modo fue posible llevar a cabo un estudio colaborando con un prestigioso grupo de investigadores y profesores expertos en la materia cuyo respaldo fue muy importante en la presente Tesis [52]-[54].



Figura 31. Fotografías de los ensayos reales realizados en Purdue University.

Estos ensayos permitieron obtener el valor del coeficiente de fricción para cada tipo de elastómero, en función de la velocidad de giro del disco y de la carga normal aplicada sobre el pin.

4.3.2 Ensayos realizados: materiales y método

Los ensayos de fricción realizados mediante la técnica *pin-on-disc* se desarrollaron sobre diferentes probetas de elastómeros y aceros estructurales, ambos proporcionados de manera altruista por la empresa *VSL Heavy Lifting* del grupo *Bouygues*.

Los materiales utilizados en los ensayos mediante *pin-on-disc* son elastómeros y aceros estructurales. Se analizaron cuatro clases de elastómeros, por un lado goma natural, NR (Natural Rubber) con dos durezas Shore diferentes, NR50 y NR60; y por otro lado neopreno, CR (Cloropreno) con durezas Shore CR45 y CR60, ver Figura 32(a). En cuanto a los discos de acero estudiados se distinguen tres tipos: dos discos de acero estructural, ver Figura 32(b), uno de ellos con acabado liso y otro con acabado rugoso, y un tercer disco de acero cuyo acabado superficial es de alta calidad utilizado en la máquina *pin-on-disc* para su calibración. En este caso, los ensayos sobre este último disco no se realizaron con el fin de calibrar, puesto que el comportamiento elastómero-acero era en un principio desconocido. Sin embargo, fue posible comprobar dos aspectos importantes:

- los valores del coeficiente de fricción sobre un disco caracterizado.
- las causas de algunos errores en los discos estructurales debidos a imperfecciones superficiales en los mismos.

El disco de referencia posee una rugosidad uniforme y conocida; sin embargo, los discos estructurales de obra civil utilizados no tienen un acabado preciso, ni superficies uniformes, por lo que los resultados sobre estos últimos son más variables.

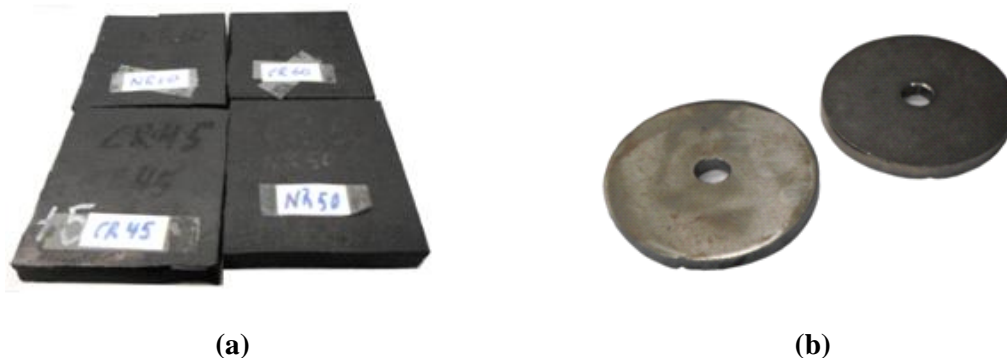


Figura 32. Materiales utilizados en los ensayos *pin-on-disc*: (a) elastómeros; (b) discos de acero.

Las probetas utilizadas en los ensayos con la técnica tipo *pin-on-disc* son de dos tipos:

- **Elastómeros**: son probetas cilíndricas con un diámetro de 7.5 mm y 12 mm de altura. La extracción de las probetas se lleva a cabo mediante una herramienta

de corte que penetra en el material en bruto obteniendo las muestras de las dimensiones deseadas. En la máquina *pin-on-disc*, estos cilindros se introducen en una mordaza en forma de “pen” que sujeta las muestras durante todo el ensayo, ver Figura 33(b). En la Figura 33(c) se muestra una fotografía de algunas de las probetas de los elastómeros una vez cortadas y clasificadas.

- **Discos de acero:** estos son discos circulares de 89 mm de diámetro exterior y 8 mm de espesor, con un agujero central, de 13 mm de diámetro, que permite su sujeción a la máquina y su rotación durante el ensayo.

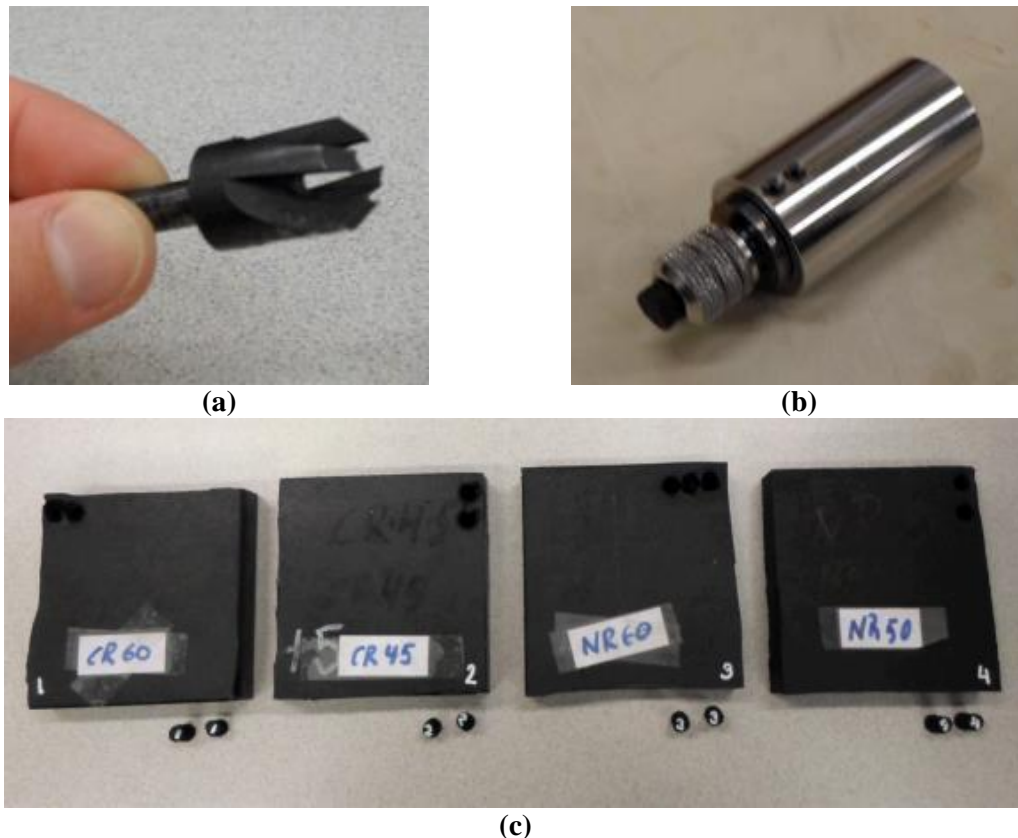


Figura 33. Fotografías de las probetas utilizadas en los ensayos de fricción: (a) herramienta de corte; (b) mordaza del pin; (c) probetas de elastómeros.

Los elastómeros estudiados, además de su estado natural tal como son enviados por la empresa suministradora, se trataron térmicamente con el fin de estudiar la influencia de su envejecimiento en el comportamiento de fricción. Estos ensayos de envejecimiento se desarrollaron siguiendo las siguientes normas:

- UNE-ISO 188:2009. *Elastómeros, vulcanizados o termoplásticos. Envejecimiento acelerado y ensayos de resistencia al calor.* [55]
- UNE-ISO 23529:2008. *Elastómeros. Procedimientos generales de preparación y acondicionamiento de probetas para ensayos físicos.* [56]
- ASTM D573 - 04(2010). *Standard Test Method for Rubber — Deterioration in an Air Oven.* [57]

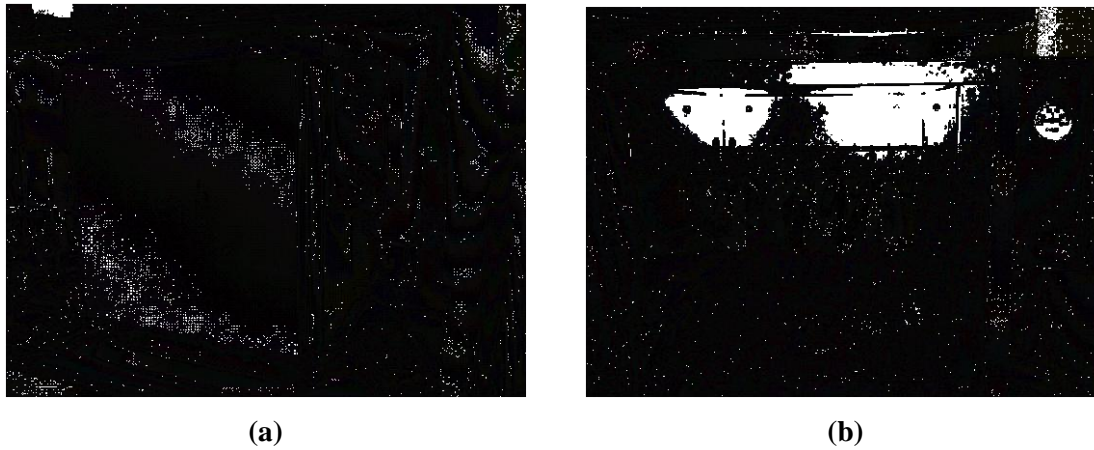


Figura 34. Proceso de envejecimiento de los elastómeros: (a) equipo empleado; (b) material elastómero en el interior del horno.

Tabla 7. Materiales utilizados en los ensayos *pin-on-disc* y condiciones de carga y velocidad estudiadas.

ELASTÓMEROS	DISCOS	CARGA NORMAL	VELOCIDAD
NR50_n	Acero Liso: S1	L3 = 1.361 [kg]	v2 = 14 [m/h]
NR60_n	Acero Rugoso: S2	L5 = 2.268 [kg]	v3 = 20 [m/h]
CR45_n	Disco de referencia: Ref	L7 = 3.175 [kg]	v4 = 27.14 [m/h]
CR60_n		L9 = 4.082 [kg]	v5 = 34 [m/h]
NR50_1w			
NR60_1w			
CR45_1w			
CR60_1w			
NR50_2w			
NR60_2w			
CR45_2w			
CR60_2w			
NR50_3w			
NR60_3w			
CR45_3w			
CR60_3w			

En la Tabla 7 se indican todos los materiales estudiados, así como las diferentes situaciones de carga sobre el pin y velocidades en el disco que se tuvieron en cuenta para realizar los ensayos. Cada elastómero fue estudiado sobre los dos discos de acero

estructural bajo cuatro niveles de carga y para cuatro velocidades de rotación de disco. Además, con el fin de estudiar el comportamiento friccional de los elastómeros en contacto con el disco de referencia, se realizaron ensayos sobre este con los elastómeros en estado natural para un solo nivel de carga y una velocidad, la carga de 2.268 kg y la velocidad lineal de 34 m/h. En consecuencia, la obtención del comportamiento de fricción entre los elastómeros y los aceros estudiados se realizó con 640 ensayos sobre cada elastómero en el equipo *pin-on-disc*, un total de 2640 ensayos para los cuatro tipos de elastómeros. El número total de ensayos realizados fue superior, casi 3000 ensayos, debido a que algunos de ellos no pudieron ser analizados por fallos en el equipo o en el desarrollo del ensayo.

Correspondiendo la nomenclatura empleada a:



Siendo los estados estudiados:

- n:** estado natural
- 1w:** envejecimiento de una semana
- 2w:** envejecimiento de dos semanas
- 3w:** envejecimiento de tres semanas

Cada una de las combinaciones indicadas en Tabla 8 se repitió 20 veces con el fin de obtener un valor medio del coeficiente de rozamiento. Este procedimiento se llevó a cabo para cada elastómero ensayado hasta completar casi 700 ensayos.

Tabla 8. Ensayos realizados para el elastómero CR60_n en el disco S1.

	V2	V3	V4	V5
CR60_n_S1	L3	L3	L3	L3
	L5	L5	L5	L5
	L7	L7	L7	L7
	L9	L9	L9	L9

Durante el desarrollo de estos ensayos se consultaron referencias bibliográficas del campo, así como expertos en la materia como los investigadores de METL, [52]-[54], [59]-[61].

4.3.3 Resultados experimentales.

Los resultados obtenidos de los ensayos de fricción mediante la técnica *pin-on-disc* son mostrados en este apartado. En primer lugar, es importante hacer referencia a una característica peculiar obtenida en estos ensayos: la variabilidad del coeficiente de fricción en función de la velocidad y la carga normal. El coeficiente de fricción entre dos materiales metálicos es una propiedad propia de cada par de materiales e independiente de las condiciones de carga y velocidad, sin embargo, en el caso de los polímeros, esto no se cumple. El coeficiente de fricción de polímeros en contacto con metales depende de tres factores principales: la velocidad de desplazamiento, la presión aplicada en la superficie de contacto y la temperatura. Esta dependencia es de gran importancia en el caso de aplicación práctica del mecanismo estudiado en la presente Tesis Doctoral, dado que en el empuje de puentes por fricción, tanto la carga normal aplicada sobre el mecanismo como la velocidad de empuje es variable durante todo el proceso de lanzamiento. En consecuencia, es necesario conocer el coeficiente de fricción entre el tablero y el mecanismo para conseguir un empuje mediante fricción exitoso.

La utilización del equipo *pin-on-disc* para la obtención del coeficiente de fricción entre los neoprenos y el acero es una tarea muy compleja. La hiperelasticidad del neopreno, el reducido tamaño de las probetas “*pin*” y las reducidas velocidades estudiadas son algunos de los factores que más dificultan los ensayos y la obtención de resultados de calidad. Con el fin de extraer un valor medio del coeficiente de fricción que aumente la fiabilidad de los valores obtenidos, el ensayo sobre cada uno de los neoprenos es repetido 20 veces para cada disco de acero bajo las mismas condiciones de carga y velocidad, ver Figura 35.

Los resultados mostrados en la Figura 35 indican solamente algunas de las combinaciones estudiadas. El procedimiento completo, cuyos resultados se adjuntan en el ANEXO III, fue desarrollado para todas las combinaciones posibles, dando lugar a 56 gráficas diferentes para cada neopreno, un total de 224 gráficas. Con estos resultados se obtienen los valores de los coeficientes de fricción variables en función de las condiciones de carga y velocidad para las diferentes combinaciones neopreno-acero [58].

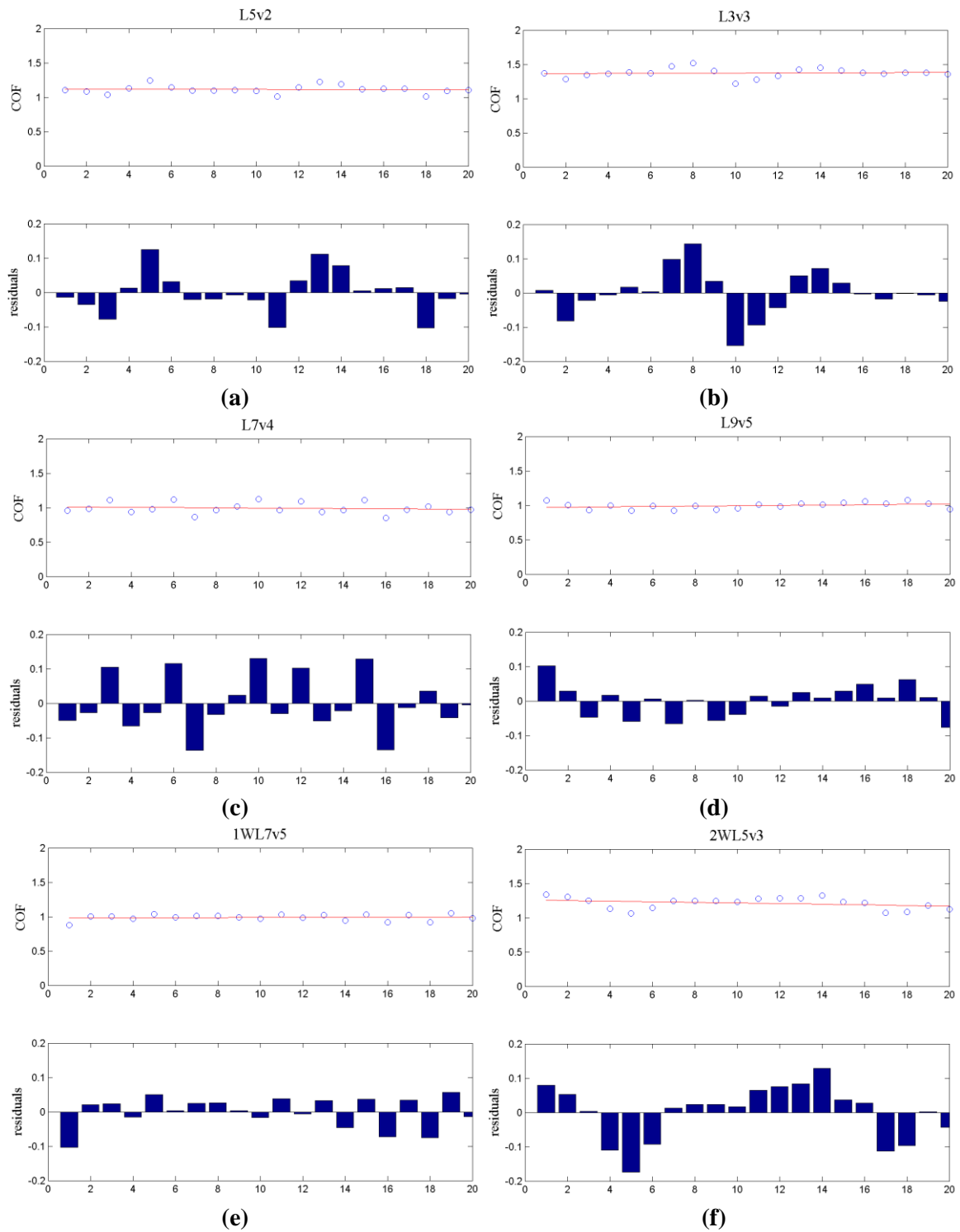


Figura 35. Resultados obtenidos en los ensayos *pin-on-disc* para el neopreno CR60 sobre el disco de acero liso (CR60_1) para diferentes condiciones de carga y velocidad.

La influencia de la carga normal y la velocidad en el valor del coeficiente de fricción entre los cuatro elastómeros estudiados y los aceros puede ser apreciada en la Figura 36, la Figura 37, la Figura 38 y la Figura 39.

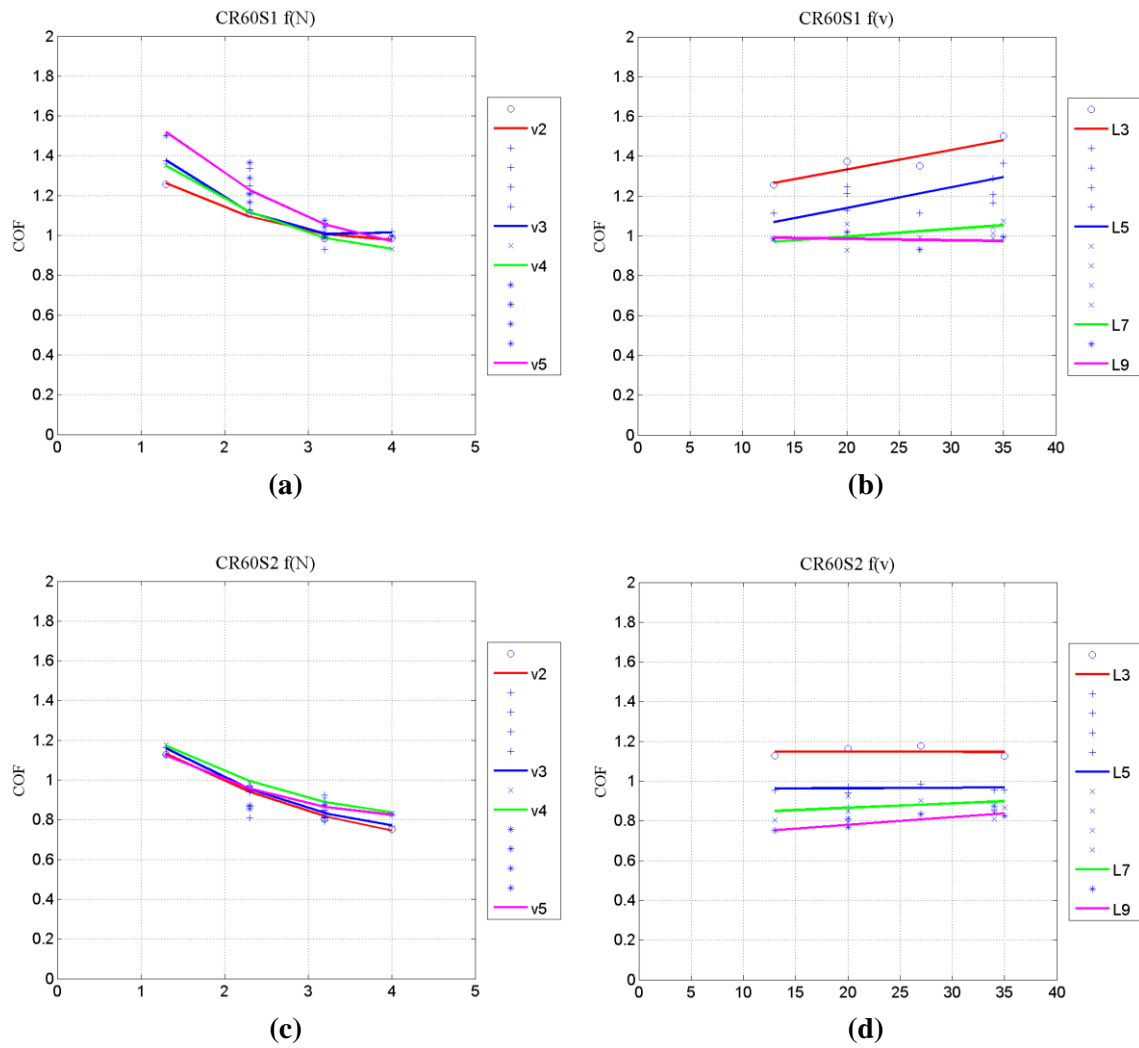


Figura 36. Representación del coeficiente de fricción (COF) en función de la carga normal y de la velocidad para el neopreno CR60: (a) y (b) sobre el disco S1; (c) y (d) sobre el disco S2.

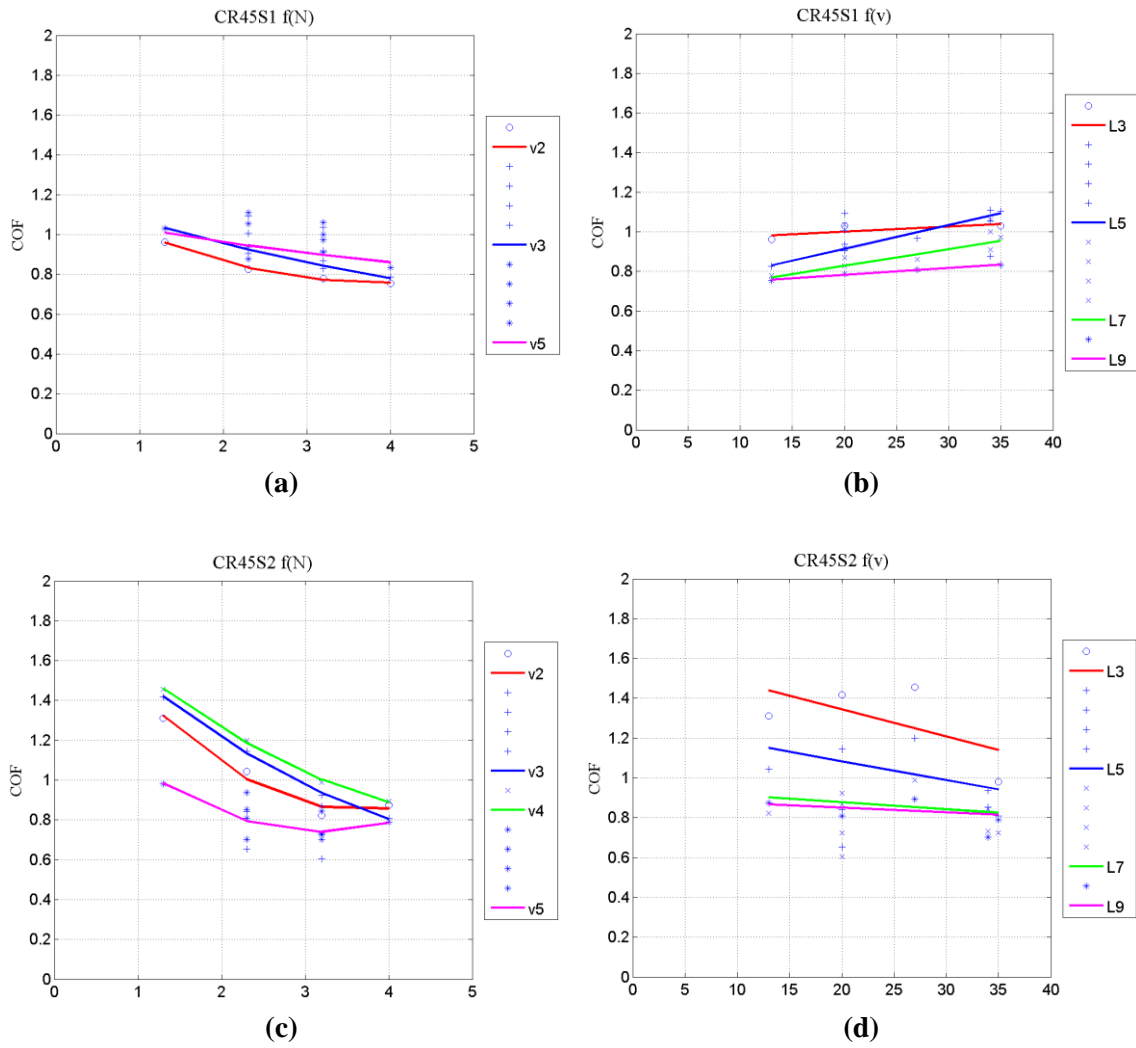


Figura 37. Representación del coeficiente de fricción (COF) en función de la carga normal y de la velocidad para el neopreno CR45: (a) y (b) sobre el disco S1; (c) y (d) sobre el disco S2.

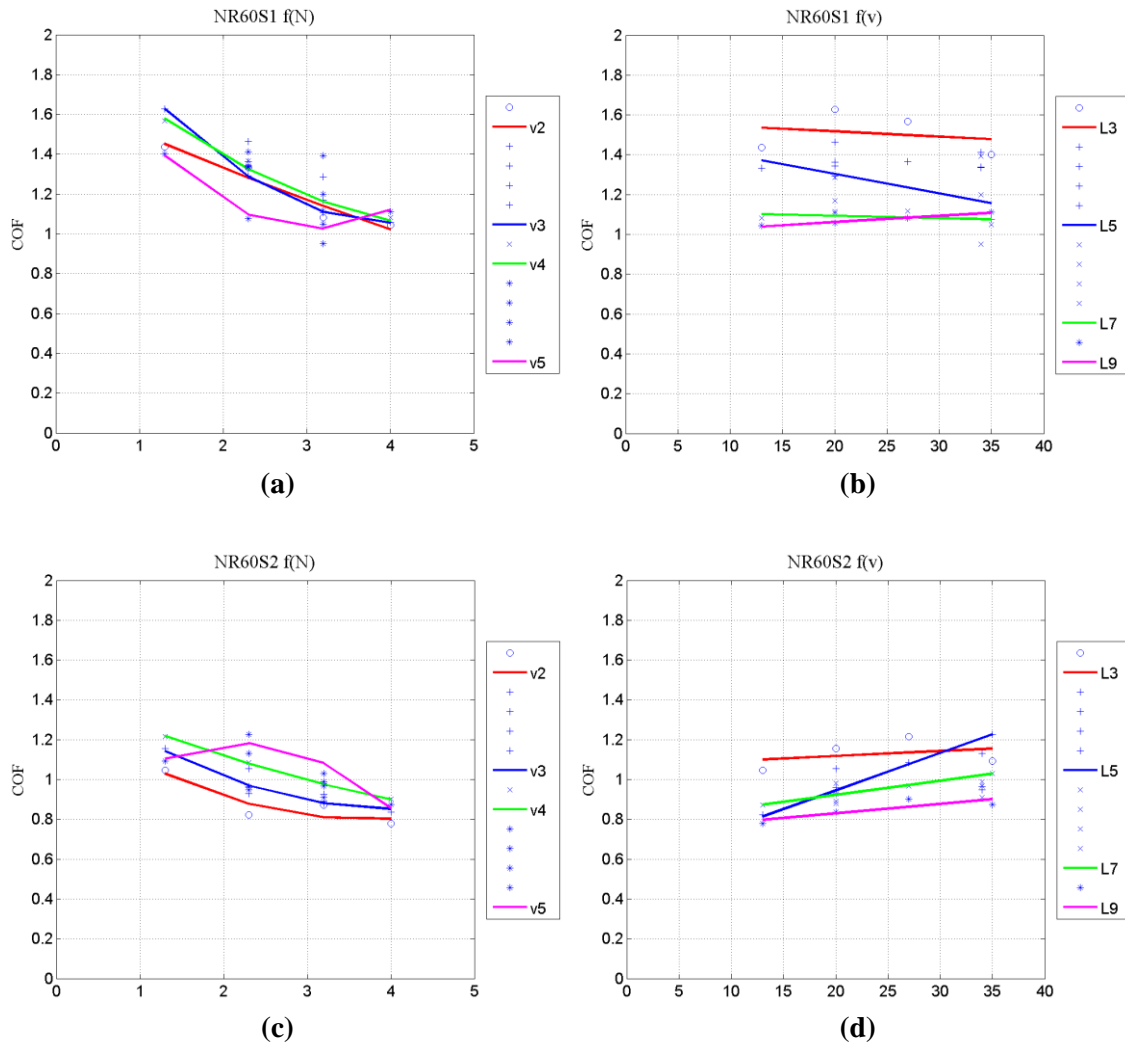


Figura 38. Representación del coeficiente de fricción (μ) en función de la carga normal y de la velocidad para el neopreno NR60: (a) y (b) sobre el disco S1; (c) y (d) sobre el disco S2.

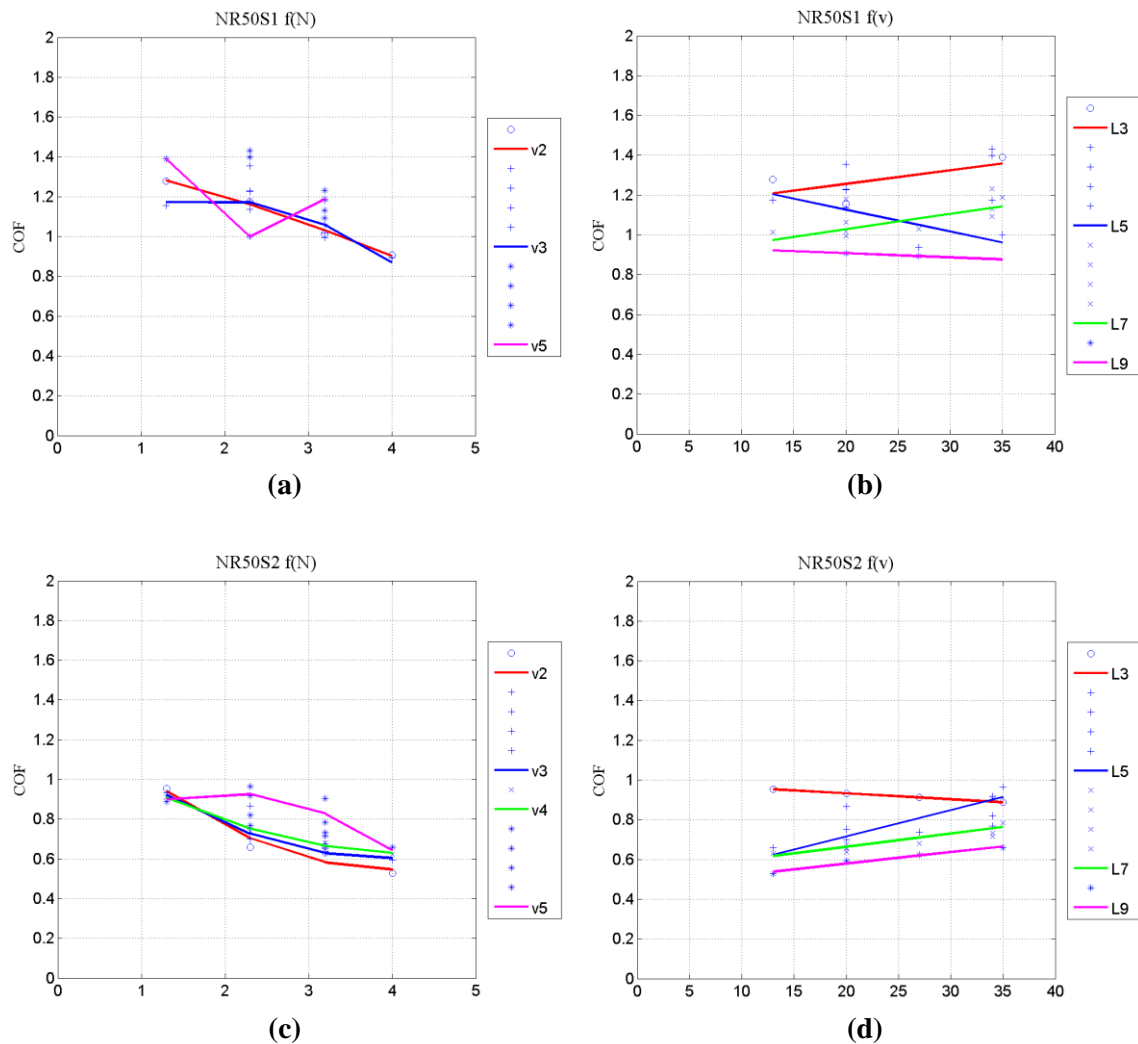


Figura 39. Representación del coeficiente de fricción (μ) en función de la carga normal y de la velocidad para el neopreno CR50: (a) y (b) sobre el disco S1; (c) y (d) sobre el disco S2.

La interpretación de los resultados mostrados en las figuras anteriores debe tener en cuenta las siguientes observaciones:

- Por un lado, el tamaño de las probetas utilizadas en la técnica *pin-on-disc* es muy reducido y, al tratarse de un material hiperelástico, la ejecución de los ensayos es compleja dada la gran deformabilidad de las mismas. En consecuencia, los resultados obtenidos se sometieron a un proceso de análisis de datos en el que se descartaron aquellos que mostraban un comportamiento incoherente.
- Por otro lado, a la vista de los resultados obtenidos se desarrollaron varias leyes de comportamiento friccional que suponen una importante aportación al estudio del mecanismo y a la presente Tesis Doctoral. Esta ley de comportamiento fue obtenida en el rango de valores estudiado, entre 1 y 4 kg para la carga normal y entre 14 y 35 m/h para la velocidad.

- Finalmente, para poder extrapolar esta ley de comportamiento friccional a otros rangos de carga y/o velocidad, así como a otros elastómeros de características semejantes, será necesario ampliar estos ensayos a rangos más elevados, de modo que se complemente la información obtenida.

En base a lo anterior, se reflejan aquí las principales conclusiones extraídas de los resultados sobre los ensayos realizados:

- Los elastómeros tipo CR muestran tendencias claras de las que es posible extraer leyes que caractericen su comportamiento friccional. En el caso de los elastómeros NR, los resultados carecen de uniformidad y no es factible extraer una ley de comportamiento en base a los mismos. Como consecuencia de lo anterior, en esta Tesis Doctoral se considera el neopreno como el material más adecuado para el desarrollo del empuje mediante fricción del dispositivo estudiado.
- Las leyes de comportamiento extraídas de los ensayos realizados sobre el CR son justificadas con las tendencias a las que se ajustan las gráficas mostradas en la Figura 36 y en la Figura 37. En ambas se aprecia la evolución del coeficiente de fricción en función de la carga normal, que se ajusta a una curva de segundo grado en todos los casos de velocidad estudiados. Del mismo modo, es posible apreciar que para todos los casos de carga analizados la dependencia con la velocidad es lineal.
- Los cuatro casos estudiados, CR60 y CR45 sobre los discos 1 y 2, a excepción de uno de ellos, CR45 sobre el disco 2, comparten condición de carga mínima. Es decir, en la mayoría de los casos se muestra que la carga máxima y la velocidad mínima dan lugar a valores de coeficiente de fricción mínimos. En el caso CR45 sobre el disco 2, no se cumple esta hipótesis, puesto que para esta situación los valores mínimos vienen especificados por la curva de máxima velocidad. En cualquier caso los resultados dan lugar a valores del coeficiente de fricción superiores a los empleados en los cálculos de pre-dimensionamiento del mecanismo de empuje.
- Finalmente, la influencia de la carga normal y de la velocidad en el coeficiente de fricción se expresa en una ecuación de dos variables (N , v), con la que es posible representar una superficie. La superficie tridimensional obtenida en el rango estudiado viene dada por la ecuación 16:

$$\mu(N, v) = A \cdot \mu(N) + B \cdot \mu(v) \quad (16)$$

Siendo:

$\mu(N,v)$: ecuación del coeficiente de fricción considerando dos variables.

A y B : coeficientes de la superficie.

$\mu(N)$: dependencia del coeficiente de fricción con respecto a la carga normal.

$\mu(v)$: dependencia del coeficiente de fricción respecto a la velocidad.

La obtención de $\mu(N)$ y $\mu(v)$ se lleva a cabo a partir de las gráficas mínimas de la representación correspondiente a cada caso, ver Figura 36 y Figura 37. Los ajustes de cada una de esas ecuaciones se encuentran indicados en la Tabla 9, donde se puede observar un valor de coeficiente de ajuste, R^2 , superior a 0.91.

Tabla 9. Ecuaciones de coeficiente de fricción en función de la carga normal y la velocidad utilizadas en la obtención de la superficie tridimensional $\mu(N,v)$.

CR60 sobre disco 1	Para $v2$, $R^2 = 0.9745$	$\mu(N) = 0.03725 \cdot N^2 - 0.303 \cdot N + 1.5947$	(17)
	Para L9, $R^2 = 0.9409$:	$\mu(v) = -0.0007 \cdot v + 1.0007$	(18)
CR60 sobre disco 2	Para $v2$, $R^2 = 0.9794$:	$\mu(N) = 0.02835 \cdot N^2 - 0.2929 \cdot N + 1.4638$	(19)
	Para L9, $R^2 = 0.9621$:	$\mu(v) = -0.038 \cdot v + 0.7027$	(20)
CR45 sobre disco 1	Para $v2$, $R^2 = 0.9877$:	$\mu(N) = 0.0309 \cdot N^2 - 0.2383 \cdot N + 1.2174$	(21)
	Para L9, $R^2 = 0.9939$:	$\mu(v) = 0.0035 \cdot v + 0.7134$	(22)
CR45 sobre disco 2	Para $v5$, $R^2 = 0.9398$:	$\mu(N) = 0.1049 \cdot N^2 - 0.5927 \cdot N + 1.5840$	(23)
	Para L9, $R^2 = 0.9174$:	$\mu(v) = -0.0024 \cdot v + 0.8987$	(24)

A partir de las ecuaciones anteriores, se obtiene la representación tridimensional de las superficies en las que se consideran las dos variables estudiadas (N , v). Los valores obtenidos experimentalmente permiten obtener los parámetros A y B de la ecuación $\mu(N,v)$. Una vez calculados estos parámetros se generan las superficies

correspondientes a cada una de las combinaciones estudiadas, CR60-S1, CR60-S2, CR45-S1 y CR45-S2, tal y como se muestra en la Figura 40. Las ecuaciones que representan las superficies anteriores son indicadas en la Tabla 10.

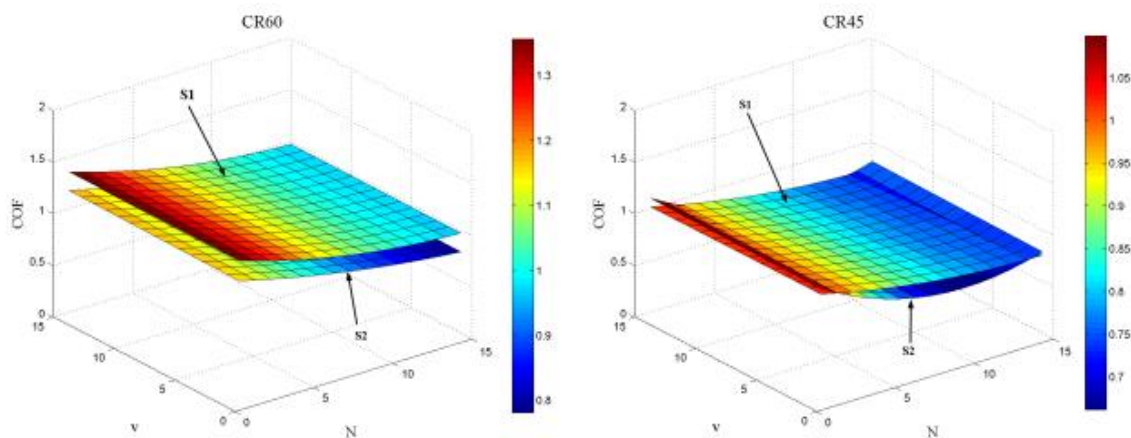


Figura 40. Superficies de representación del coeficiente de fricción en función de dos variables, carga normal (N) y velocidad (v).

Tabla 10. Ecuaciones de las superficies de representación del coeficiente de fricción en función de dos variables, la carga normal (N) y la velocidad (v).

Para CR60 sobre disco 1:

$$\mu(N, v) = 1.1213 \cdot 0.03725 \cdot N^2 - 0.303 \cdot N + 1.5947 + -0.1393 \cdot -0.0007 \cdot v + 1.0007$$

Para CR60 sobre disco 2:

$$\mu(N, v) = 0.8537 \cdot 0.02835 \cdot N^2 - 0.2929 \cdot N + 1.4638 + 0.1766 \cdot 0.0038 \cdot v + 0.7027$$

Para CR45 sobre disco 1:

$$\mu(N, v) = 1.1109 \cdot 0.0309 \cdot N^2 - 0.2383 \cdot N + 1.2174 + -0.1260 \cdot 0.0035 \cdot v + 0.7134$$

Para CR45 sobre disco 2:

$$\mu(N, v) = 0.9886 \cdot 0.1049 \cdot N^2 - 0.5927 \cdot N + 1.5840 + 0.03 \cdot -0.0024 \cdot v + 0.899$$

Finalmente, se concluye el estudio del coeficiente de fricción entre los neoprenos estudiados y los discos de acero observando el valor mínimo que estos llegan a alcanzar en el rango de cargas externas en el que se mueve el dispositivo diseñado en esta Tesis Doctoral. Las superficies tridimensionales que representan las cuatro situaciones

críticas indican cómo, en el rango estudiado, el coeficiente de fricción es superior a 0.7 en todos los casos. Asimismo, y considerando la aplicación del mecanismo a empuje de puentes, la velocidad no es una variable crítica, puesto que esta no excederá los 30 m/h. Sin embargo, respecto a la carga normal, sí pueden existir variaciones que afecten al coeficiente de fricción y puedan llegar a provocar la interrupción del empuje. Con el fin de determinar esto, y considerando válidos los ajustes a las curvas de segundo orden representadas en la Figura 36 y en la Figura 37, es posible determinar los valores mínimos de dichas curvas y comprobar si es posible realizar el empuje bajo tales condiciones.

Con el fin de calcular los mínimos de las curvas de ajuste de $\mu(N)$ para CR60 y CR45 sobre los discos 1 y 2 se iguala a cero la derivada de las ecuaciones.

$$\mu(N, v) = 0.0417 \cdot N^2 - 0.3397 \cdot N + 1.7881 + 0.000097 \cdot v - 0.1394 \quad (25)$$

$$\mu \cdot N = 0 \quad 2 \cdot 0.0417 \cdot N - 0.3397 = 0 \quad (26)$$

$$\mu \text{ min para } N = 4.069 \quad \mu \text{ min} = 0.9591 > 0.5 \quad (27)$$

Este proceso se repite para todas las curvas de $\mu(N)$ para los cuatro niveles de velocidades estudiados. Los valores mínimos del coeficiente de fricción obtenidos por los valores de carga crítica son indicados en la Tabla 11.

Se aprecia cómo todos los valores de μ_{min} obtenidos son superiores a 0.5, valor considerado en los cálculos de diseño del mecanismo de empuje, lo cual significa que para la ley establecida a partir de los ensayos realizados, el comportamiento de fricción entre ambos neoprenos, CR45 y CR60 y los aceros estudiados es válido para desarrollar el empuje mediante fricción. Con estos estudios, queda constatada, desde el punto de vista tribológico, la posibilidad de llevar a cabo el empuje de la estructura del puente de doble cajón colaborante mediante el procedimiento indicado en la patente DCNLBS utilizando el nuevo dispositivo de empuje continuo de estructuras, patente DCACLM, cuyas placas de apoyo deben ser, preferentemente, de neopreno tipo CR60 o CR45.

Tabla 11. Valores de coeficiente de fricción mínimos.

CR60_S1 para v2	Ncrit = 4.069	$\mu_{\min} = 0.9591$
CR60_S1 para v3	Ncrit = 4.069	$\mu_{\min} = 0.9598$
CR60_S1 para v4	Ncrit = 4.069	$\mu_{\min} = 0.9604$
CR60_S1 para v5	Ncrit = 4.069	$\mu_{\min} = 0.9611$
CR60_S2 para v2	Ncrit = 5.165	$\mu_{\min} = 0.737$
CR60_S2 para v3	Ncrit = 5.165	$\mu_{\min} = 0.742$
CR60_S2 para v4	Ncrit = 5.165	$\mu_{\min} = 0.746$
CR60_S2 para v5	Ncrit = 5.165	$\mu_{\min} = 0.751$
CR45_S1 para v2	Ncrit = 3.856	$\mu_{\min} = 0.746$
CR45_S1 para v3	Ncrit = 3.856	$\mu_{\min} = 0.743$
CR45_S1 para v4	Ncrit = 3.856	$\mu_{\min} = 0.740$
CR45_S1 para v5	Ncrit = 3.856	$\mu_{\min} = 0.737$
CR45_S2 para v2	Ncrit = 3.856	$\mu_{\min} = 0.764$
CR45_S2 para v3	Ncrit = 3.856	$\mu_{\min} = 0.764$
CR45_S2 para v4	Ncrit = 3.856	$\mu_{\min} = 0.763$
CR45_S2 para v5	Ncrit = 3.856	$\mu_{\min} = 0.763$

4.4 Descripción del funcionamiento del mecanismo y sus elementos

El mecanismo diseñado una vez dimensionados sus elementos principales es el mostrado en la Figura 41.

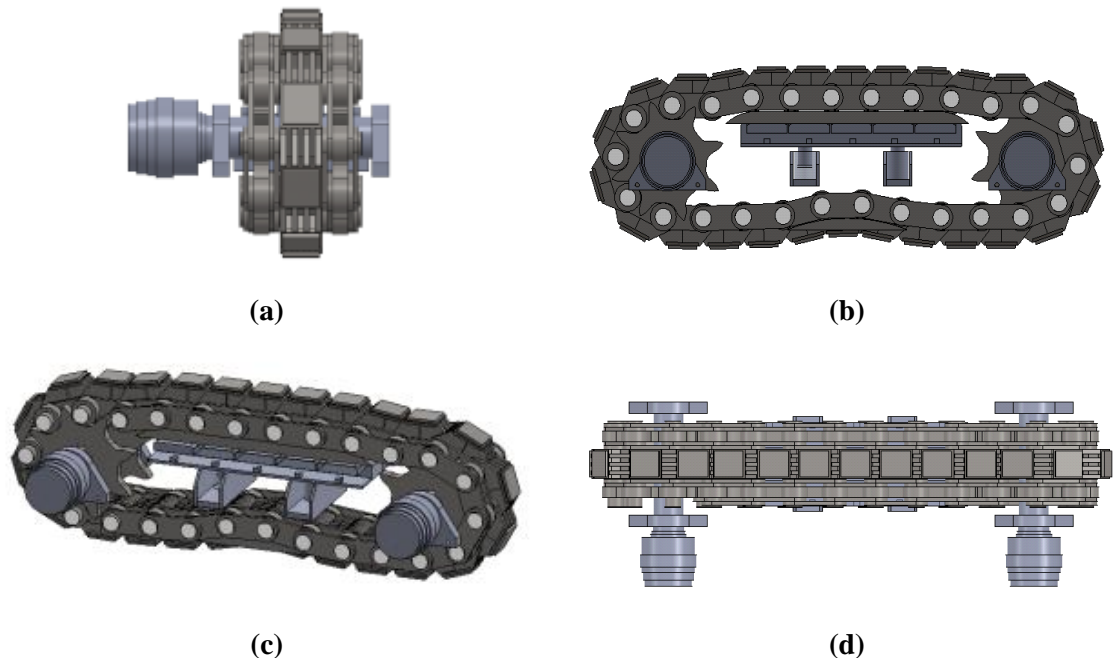


Figura 41. Vistas del conjunto del mecanismo diseñado: (a) perfil; (b) vista frontal; (c) perspectiva; (d) planta.

El principio de funcionamiento del mecanismo es el siguiente, ver Figura 42: un par de accionamientos hidráulicos (1) que transmiten su movimiento a través de un eje (2) ponen en funcionamiento un conjunto de cuatro piñones (3) que engranan en dos cadenas de tracción (4). Estas cadenas están formadas por eslabones convencionales enlazados por bulones (5) que a su vez unen la cadena central de gran rigidez. Esta cadena central, denominada cadena de eslabones de apoyo (6) está compuesta por unos eslabones no convencionales que soportan la estructura sin sufrir grandes deformaciones. La cadena de eslabones de apoyo incorpora las placas de apoyo de neopreno zunchado (7), que al entrar en contacto con el metal de la estructura a desplazar hacen posible el empuje mediante fricción. Este conjunto de cadenas se encuentran guiadas por un par de carriles de rodadura (8) que ayudan a tensar la cadena en su parte inferior. Los rodillos (9) de los extremos de los bulones se desplazan sobre estos carriles.

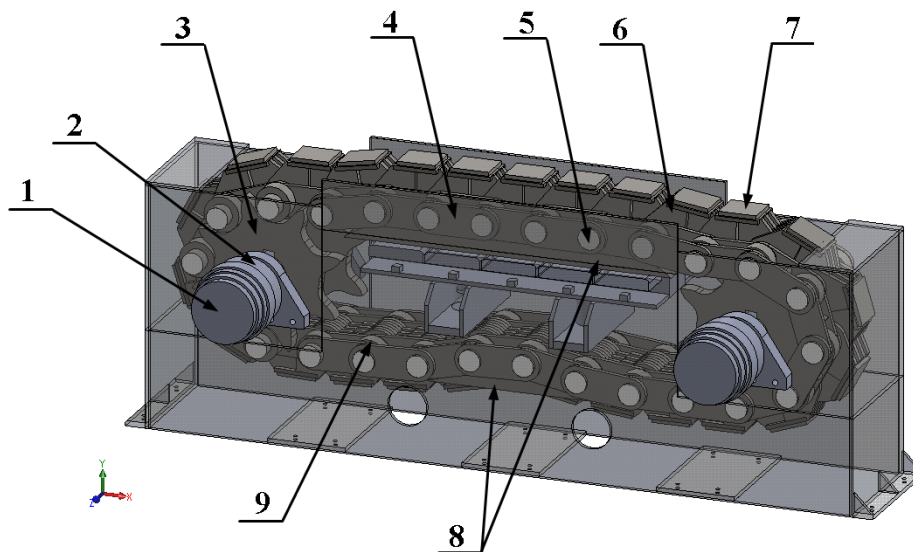


Figura 42. Indicación de los principales elementos resistentes sobre el diseño del mecanismo.

El diseño y dimensionamiento de los elementos resistentes del mecanismo se lleva a cabo considerando que al menos cuatro eslabones de apoyo deben soportar la estructura. Con el fin de garantizar que esto ocurra es necesario configurar el mecanismo tal que en la parte superior del mismo se ubiquen al menos cinco eslabones de cada uno de los dispositivos, tal y como se muestra en la Figura 43(a). Asimismo, para realizar el lanzamiento completo de la estructura del puente se requieren cuatro dispositivos de empuje, cuya disposición será estudiada en posteriores capítulos de esta Tesis Doctoral. En la Figura 43(b) se indica una posible colocación de los mecanismos de empuje.

Uno de los principales inconvenientes en el empuje de estructuras es la adaptación de los apoyos a la deformada de la estructura a desplazar, la cual es variable a lo largo del proceso. En esta Tesis Doctoral se resuelve este problema con un sistema de control y seguridad activo con el que se comprueban los valores de carga en tiempo real. Este sistema es un dispositivo de rigidez variable que situado bajo los carriles de rodadura superiores se adapta a la superficie en contacto con la estructura a desplazar, que es necesaria para desarrollar el empuje mediante fricción. El modo de operación del dispositivo de compensación de carga es el siguiente: cuando la estructura a desplazar se deforma, la carga que recibe cada uno de los eslabones de apoyo es diferente y, por tanto, la reacción sobre los carriles de rodadura no es uniforme. Estos carriles se encuentran apoyados sobre unos listones transversales empotrados en una viga central, cuya rigidez es menor en los listones de los extremos que en los internos. En consecuencia, el desplazamiento vertical para un mismo valor de carga de los listones

transversales extremos es mayor que el de los internos, con lo que se consigue una adaptación de los eslabones de apoyo a la estructura a desplazar.

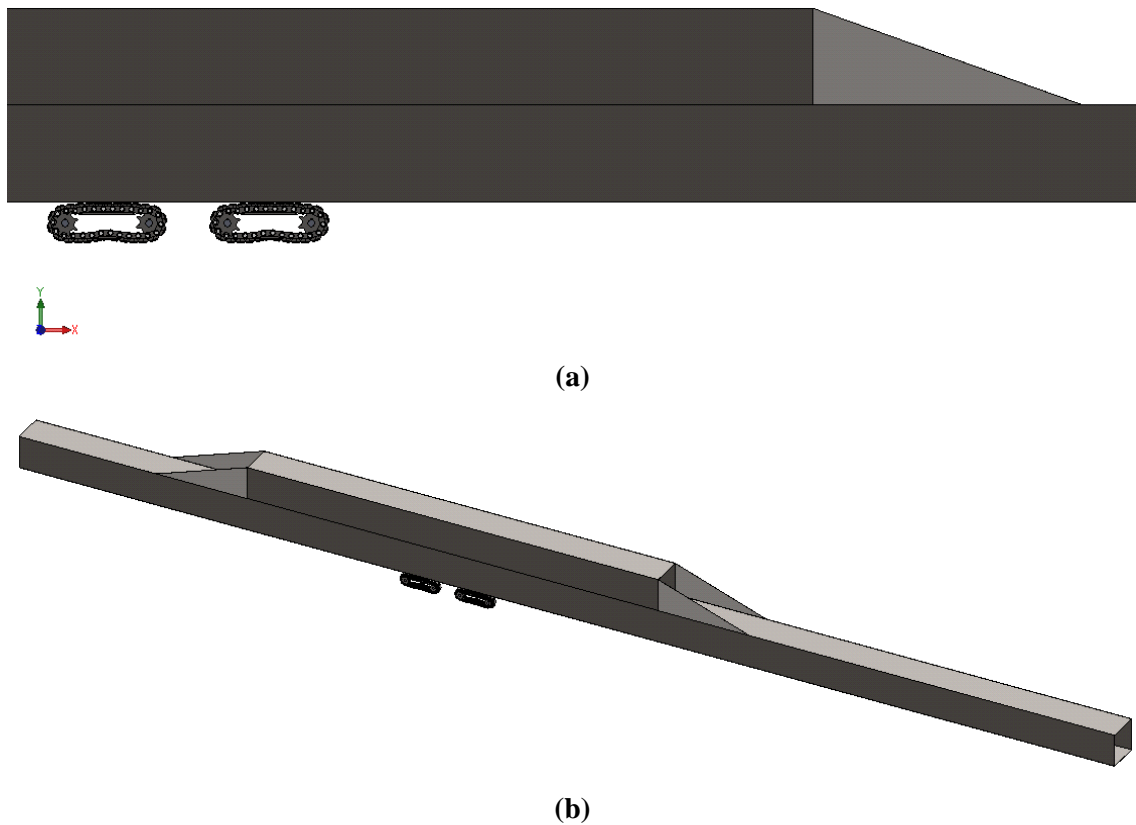


Figura 43. Imagen de apoyo del puente sobre el mecanismo de empuje: (a) perspectiva isométrica; (b) vista frontal.

Por otro lado, con el fin de detectar sobrecargas en el proceso de empuje, el desplazamiento vertical de los largueros transversales es controlado mediante unos sensores de desplazamiento que detectan la flecha de los mismos y permiten detener el lanzamiento si fuera necesario.

Este dispositivo de compensación de carga incluyendo el mecanismo de seguridad es mostrado en la Figura 44 con la que se puede comprender mejor su funcionamiento.

Este mecanismo se ubica en el estribo donde habitualmente se encuentran los dispositivos de empuje actuales. Con el fin de impedir que los elementos del mecanismo se vean afectados por agentes externos y viceversa, se incorpora una protección exterior formada por una carcasa metálica, ver Figura 45. Esta estructura alberga en su interior el mecanismo y además de protegerlo, permite fijarlo al terreno mediante anclajes de fácil montaje. Esto hace la solución compacta, segura y modular.

Además de esta carcasa se incorporan unos acoplamientos entre los ejes de transmisión y los piñones que unen los accionamientos hidráulicos.

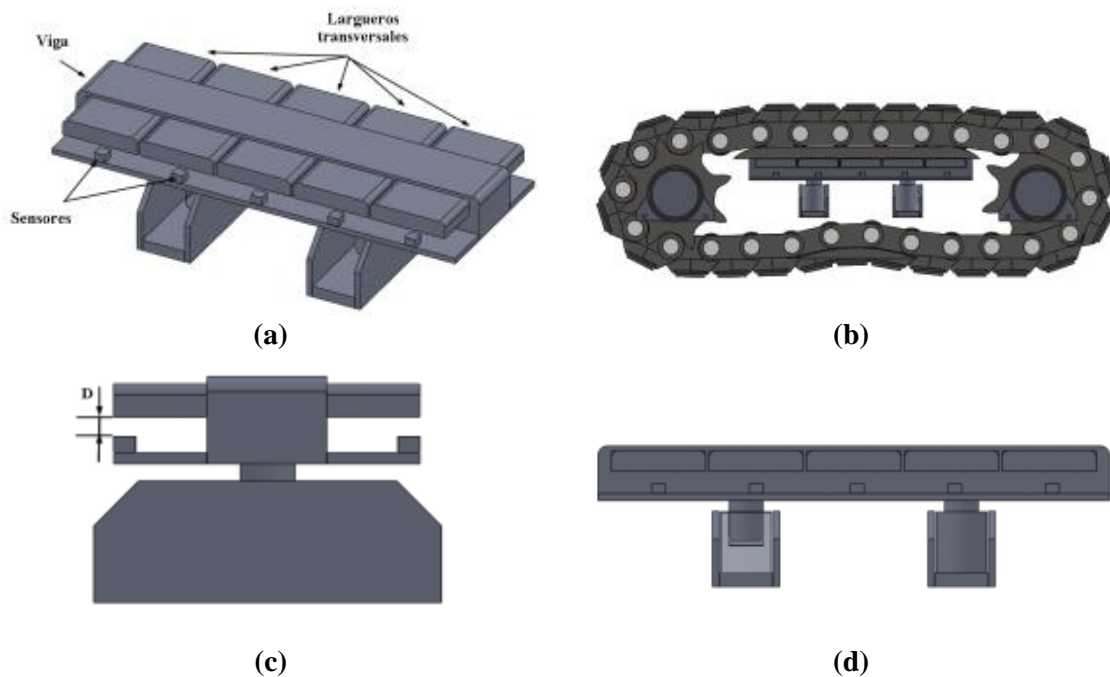


Figura 44. Sistema de compensación de carga: (a) perspectiva del sistema; (b) ubicación del sistema en el conjunto del mecanismo; (c) vista de perfil; (d) vista frontal.

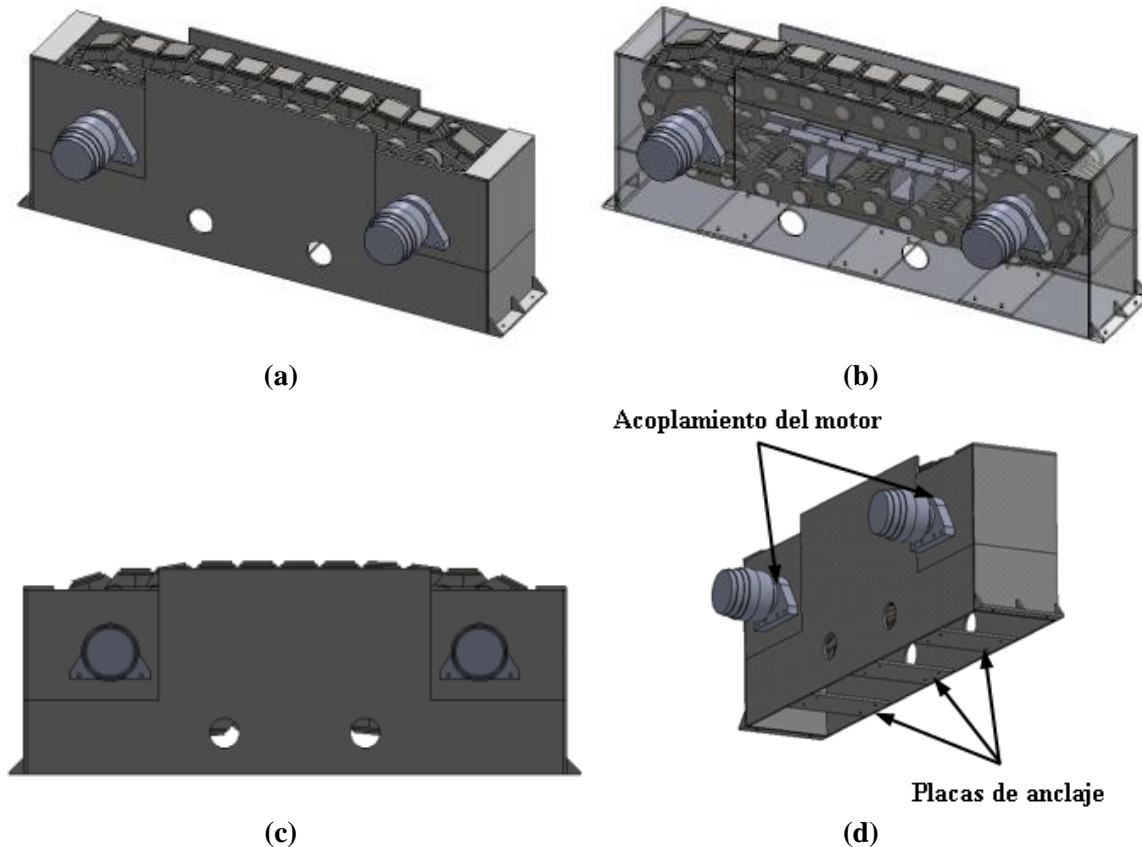


Figura 45. Mecanismo con carcasa: (a) conjunto; (b) carcasa exterior transparente; (c) vista frontal del conjunto; (d) accionamientos y placas anclajes.

Cuando el mecanismo se encuentra en funcionamiento pueden aparecer cargas transversales debidas a diferentes motivos, tales como viento, descentramientos de la carga, etc. En consecuencia, la carcasa exterior puede entrar en contacto con los bulones de las cadenas. Para evitar daños en los extremos de los mismos, así como para favorecer el deslizamiento entre ambos componentes, se introducen láminas de teflón en los extremos de los bulones y placas de acero inoxidable en las caras internas de la carcasa metálica, tal y como se muestra en la Figura 46.

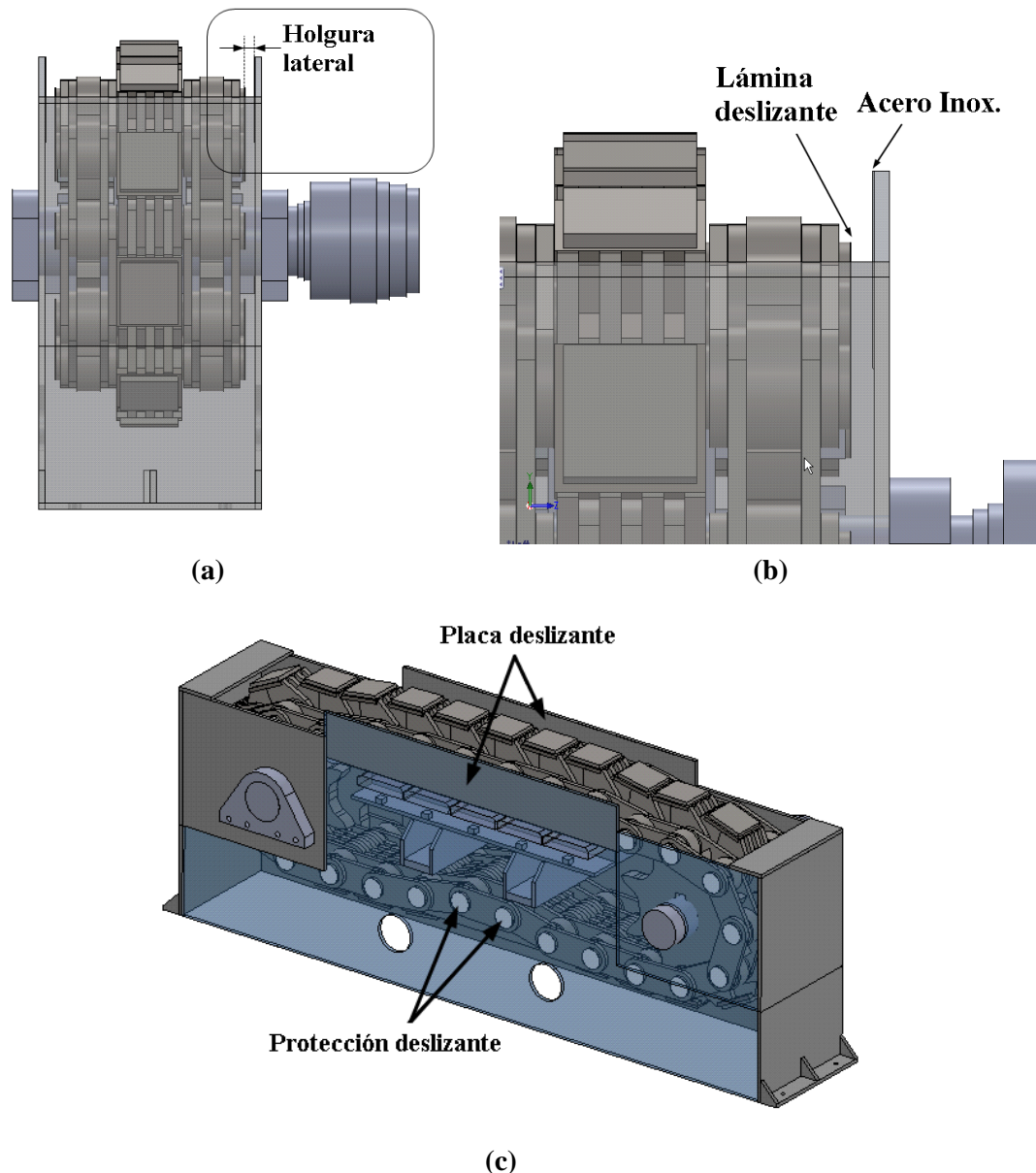


Figura 46. Láminas anti-fricción laterales entre los bulones y la carcasa metálica protectora: (a) localización en el conjunto; (b) detalle; (c) perspectiva del conjunto.

Con el fin de estudiar en detalle el mecanismo es necesario realizar un modelo tridimensional del mismo que fue utilizado en este apartado para ayudar al lector a comprender su funcionamiento. El modelo geométrico desarrollado es un modelo paramétrico tridimensional que es expuesto en el siguiente sub-apartado.

4.5 Modelo geométrico en 3-D

El desarrollo del modelo geométrico en 3D es un aspecto muy importante una vez finalizado el pre-dimensionamiento del mecanismo, puesto que este será utilizado posteriormente para realizar análisis numéricos, simulaciones cinemáticas y optimización del diseño por el método de los elementos finitos. Asimismo, el modelo geométrico es posteriormente utilizado para realizar el prototipo a escala.

El modelo paramétrico fue desarrollado mediante el programa SolidWorks®. Este software de *Diseño Asistido por Computadora, CAD (Computer-Aided Design)* es útil para realizar modelos paramétricos formados por numerosos elementos con muchas relaciones entre ellos, tal y como es el caso del modelo llevado a cabo en esta Tesis Doctoral.

Las diferentes fases de desarrollo del modelo geométrico final se muestran en la secuencia de imágenes de la Figura 47. El modelo comienza con un boceto de la trayectoria de la cadena cerrada en posición natural que es definida a partir de la distancia entre ejes y del radio primitivo de las ruedas dentadas, ver Figura 47(a). Se dibujan las cadenas de tracción unidas, a partir de un conjunto base de eslabones identificado en la Figura 47(b) en color azul y formado por los eslabones de la cadena de tracción y los ejes que las unen. Una vez se completa la cadena de tracción se añaden los eslabones de apoyo hasta completar el conjunto de cadenas que componen el mecanismo, ver Figura 47(c) y Figura 47(d). A continuación, se añaden los carriles de rodadura superiores sobre los que se desplazan los rodillos de los bulones y los inferiores que actúan como tensores de las cadenas, asimismo se acoplan los ejes de los piñones que transmitirán el par del motor, ver Figura 47(e). Posteriormente, se diseña la carcasa exterior de protección formada por chapas metálicas con el fin de que esta estructura sea de fácil montaje. Se incorporan también dos bocas de hombre necesarias para acceder al interior del dispositivo si es necesario, una vez colocado en obra, ver Figura 47(f). Una vez que el conjunto está prácticamente finalizado, ver Figura 47(g), se añaden los motores de par y sus soportes, estas dimensiones son aproximadas en base a las consultas realizadas para dichos componentes, no obstante tanto las dimensiones como la geometría pueden ser ligeramente modificadas dependiendo del suministrador de los mismos.

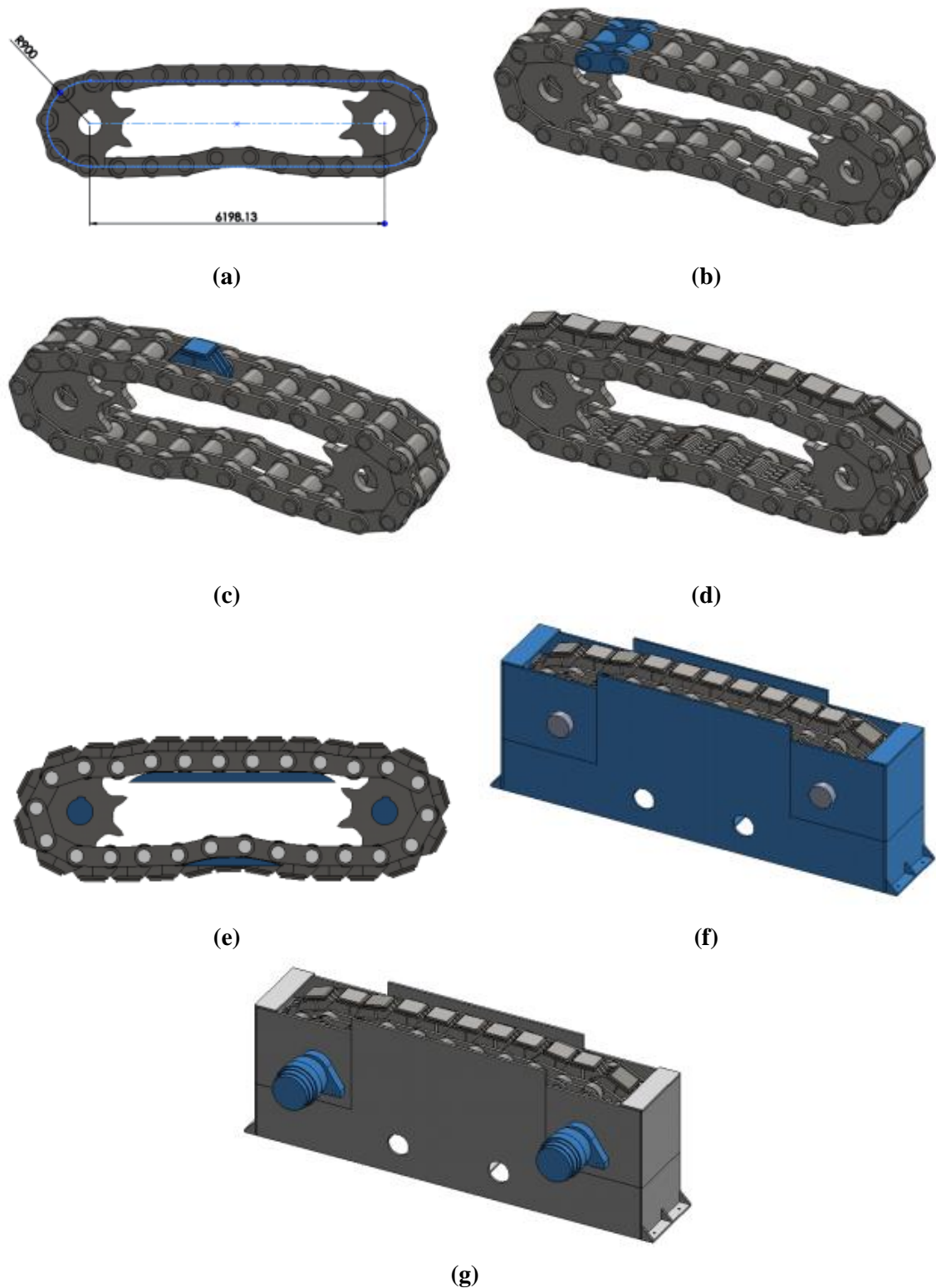


Figura 47. Fases del modelo geométrico tridimensional: (a) croquis inicial; (b) elemento patrón de las cadenas de tracción; (c) eslabones de apoyo; (d) conjunto cerrado de las cadenas; (e) carriles de apoyo, carriles tensores y ejes de transmisión; (f) carcasa exterior del mecanismo; (g) motores hidráulicos y soportes.

Por otro lado, se encuentra también el sistema de compensación de carga que también se incorpora al modelo geométrico total, pero se muestra por separado para facilitar la comprensión de su funcionamiento.

El sistema de compensación de carga, mostrado en la Figura 48, está formado por:

- *listones* de sección rectangular empotrados en una viga central que soporta los esfuerzos.
- *sensores* ubicados bajo los listones en voladizo que controlan el desplazamiento de los mismos, detectando desplazamientos inadmisibles y por tanto, sobrecarga en el dispositivo de empuje.
- *actuadores hidráulicos* que permiten aportar reacción al mecanismo si es necesario y ajustar el dispositivo a empujes con ligera inclinación.

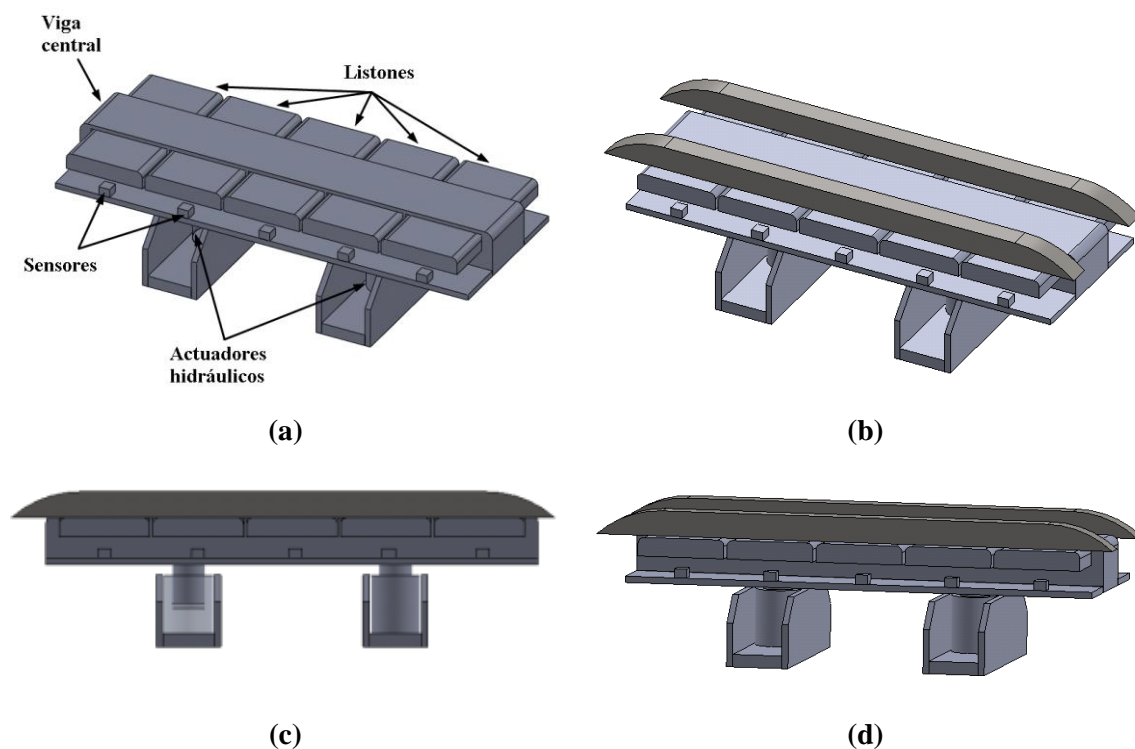


Figura 48. Modelo geométrico tridimensional del sistema de compensación de carga: (a) identificación de los elementos principales; (b) perspectiva del conjunto; (c) vista frontal del conjunto con transparencia de uno de los actuadores; (d) perspectiva del conjunto.

5

Simulación numérica del dispositivo

En este capítulo se exponen los cálculos numéricos mediante elementos finitos llevados a cabo sobre el dispositivo de empuje. Estos pueden diferenciarse en tres grandes grupos:

- Simulaciones numéricas no lineales.
- Simulaciones cinemáticas.
- Optimización mediante elementos finitos.

Los modelos numéricos utilizados en este estudio, así como los métodos empleados se explican en los diferentes sub-apartados de este capítulo. En primer lugar, se realiza una breve explicación de cada una de las técnicas utilizadas. Posteriormente, se exponen los análisis realizados y los modelos numéricos utilizados para llevarlos a cabo. Por último, se presenta la optimización del modelo inicial realizado mediante elementos finitos.

5.1 Métodos numéricos utilizados

A continuación se realiza una breve explicación de los fundamentos de los métodos numéricos utilizados.

5.1.1 Introducción

El Método de los Elementos Finitos (FEM) es un método muy extendido actualmente por su rapidez y eficacia. La capacidad computacional de los equipos informáticos de los que se dispone hoy en día permite su uso para multitud de campos de aplicación: análisis térmicos, estructurales, mecánica de fluidos, problemas electromagnéticos, problemas acústicos, etc. Sin embargo, el principio del FEM se remonta siglos atrás. Los egipcios ya empleaban métodos de discretizado para determinar el volumen de las pirámides. Arquímedes empleaba también este método para calcular volúmenes de sólidos y superficies de áreas [62].

Sin embargo, el FEM, tal y como se conoce actualmente, nace ligado al cálculo estructural como demanda del campo aeroespacial y nuclear donde el estudio de las estructuras era una cuestión crítica. En 1943 *Courant* utilizó el método de análisis numérico para obtener soluciones aproximadas a un problema vibratorio. Posteriormente, *Turner, Clough, Martin and Topp* establecían el FEM de la forma aceptada hoy en día a través del paper: “*Stiffness and deflection analysis of complex structures*” [63]. Los autores introdujeron la aplicación de elementos finitos sencillos, tales como barras y placas triangulares, al análisis estructural utilizando conceptos que en la actualidad se conocen como discretizado y funciones de forma. Hasta principios de los años 60, la técnica de elementos finitos se enfocó hacia la modelación matemática de problemas mecánicos considerando únicamente deformaciones elásticas, desplazamientos cortos y concentraciones de esfuerzos bajos para cargas estáticas y materiales elásticos. Posteriormente, *Zienkiewicz* y otros autores aplicaron la tecnología a problemas generales y demostraron que las ecuaciones de los *Elementos Finitos* pueden ser obtenidas por aproximación de pesos residuales, tales como el *Método de Garlekin* o el de mínimos cuadrados [64]-[65]. De este modo, el FEM daba solución a ecuaciones diferenciales tanto lineales como no lineales y se constataba como una de las herramientas más potentes y probadas en la solución de problemas de ingeniería y ciencia aplicada.

Durante el progreso del propio método de los elementos finitos, otras áreas de la ciencia crecían paralelamente. De este modo el desarrollo del álgebra matricial permitió la aparición de potentes algoritmos capaces de generar la malla de elementos finitos, incluso para las geometrías más complejas. Asimismo, los sofisticados paquetes gráficos desarrollados aumentaron su campo de aplicación hasta llegar a ser herramientas de modelización paramétrica muy útiles en los métodos numéricos. No obstante, esta nueva tecnología requiere mucha experiencia para poder llevar a cabo cálculos de calidad. Los métodos numéricos requieren un largo y duro proceso de aprendizaje que le aporta al diseñador la experiencia necesaria. Sin ella, un uso erróneo de la tecnología puede traer consecuencias muy graves. Por este motivo, el uso de los

métodos numéricos para cálculos, análisis o comprobaciones debe estar siempre supervisado por un experto en la materia que esté respaldado por trabajos previos reconocidos.

Tanto GITECO como GICONSIME, grupos de investigación Españoles con los que la autora de esta Tesis colabora desde hace años, enfocan la gran mayoría de sus trabajos a la simulación numérica mediante FEM y otros métodos numéricos tales como FVM (*Finite Volume Method*), CFD (*Computational Fluid Dynamics*) y/o DEM (*Discrete Element Method*). Estos grupos de investigación poseen multitud de proyectos, publicaciones, ponencias en congresos, etc., en los que exponen su remarcada experiencia en el cálculo numérico [66]-[69].

En la presente tesis, se llevan a cabo varios tipos de análisis numéricos mediante diferentes técnicas empleando programas comerciales avanzados tales como ANSYS o SolidWorks [70]-[72]:

- Análisis no lineal estático estructural mediante elementos finitos para el cálculo resistente de los principales elementos del mecanismo.
- Proceso de sub-estructuración utilizando el lenguaje APDL para analizar la interacción no lineal entre el puente a desplazar y el mecanismo de empuje.
- Análisis cinemático mediante SolidWorks Motion para analizar el movimiento del mecanismo y la interacción entre sus elementos.
- Optimización topológica para optimizar la geometría de los principales elementos del mecanismo.

5.1.2 Análisis no-lineal estático estructural

El análisis estático estructural permite determinar los desplazamientos, las tensiones, las deformaciones y las fuerzas en estructuras o elementos sometidos a cargas que no transmiten efectos de inercia y/o amortiguación significantes. Estos análisis asumen que las cargas y las respuestas de la estructura varían muy lentamente en función del tiempo, por lo que se consideran problemas estáticos.

Las cargas que pueden ser introducidas en estos análisis son: fuerzas externas o presiones, fuerzas inerciales estáticas, desplazamientos y/o temperaturas.

Los análisis estáticos pueden ser lineales o no lineales dependiendo del tipo de problema a considerar. Las no linealidades pueden venir dadas por diferentes motivos: grandes deformaciones, plasticidad en el material, contactos entre elementos, hiperelasticidad, entre otros. En este caso, los análisis realizados son de tipo no-lineal principalmente por la existencia de contactos y grandes deformaciones [73]-[75].

En el presente trabajo se han llevado a cabo varios análisis estáticos estructurales, pero todos ellos siguen el mismo esquema básico, el cual se aplica a las diferentes geometrías y condiciones de carga. Este análisis consta de tres bloques principales: Pre-procesado; Solución y Post-procesado.

Pre-Procesado:

- Modelo geométrico y definición de materiales
- Diseño del mallado y ejecución del mismo.
- Establecimiento del modelo físico: condiciones de contorno, solicitaciones e hipótesis de carga.

Solución:

- Configuración: selección del método numérico más apropiado, controles de convergencia del método, etc.
- Solución computacional de las ecuaciones.

Post-procesado:

- Obtención de los resultados.
- Interpretación de los resultados.

El investigador debe interpretar los resultados obtenidos y decidir si son válidos o es necesario llevar a cabo alguna modificación en el modelo, lo que llevaría a comenzar el proceso de nuevo en el nivel en el que se considere necesario realizar la modificación. En este aspecto, la experiencia del investigador en cálculo numérico es muy importante, dado que pequeñas modificaciones en aspectos clave, como por ejemplo el mallado del modelo geométrico, hacen variar de manera notable los resultados.

5.1.3 Proceso de sub-estructuración

El proceso de sub-estructuración, en este caso particular, permite simplificar notablemente el estudio numérico de la interacción estructural entre dos modelos numéricos muy complejos: el puente y el mecanismo de empuje. Mediante este proceso se divide el modelo total en dos partes: por un lado, el modelo numérico del puente que es tratado como un solo elemento, formado por un conjunto de nodos con unas determinadas características, al que se denomina “superelemento”; por otro lado, el modelo del mecanismo de empuje que se ve afectado por el superelemento. Este proceso es muy útil cuando existen varias estructuras grandes y/o complejas que interactúan entre sí, tal y como ocurre en este caso

Este proceso permite simplificar el modelo inicial del puente a un sólo superelemento, el cual transmite al dispositivo de empuje las cargas durante todo el proceso de lanzamiento estudiado. El modelo simplificado aplica las cargas del puente sobre el mecanismo de empuje con varios grados de libertad que se configuran estratégicamente. Este proceso ha sido llevado a cabo para reducir tiempo computacional, así como recursos necesarios. El superelemento creado puede ser duplicado, cambiado de posición y/o girado tantas veces se desee.

El proceso de sub-estructuración se desarrolla en tres operaciones fundamentales:

Fase de Generación (“*Generation Pass*”): Se genera un modelo numérico de la misma forma que en cualquier otro análisis mediante elementos finitos. Se aplican cargas y se definen los denominados grados de libertad maestros. Estos se crean en los nodos que unen el superelemento con otros elementos o superelementos del modelo global formando la interfase. Al solucionar el problema se elige un análisis de subestructuras en lugar de un típico análisis estructural. La salida de solución consiste, de esta forma, en el fichero de la matriz del superelemento con extensión .SUB (por ejemplo *puente.SUB*.)

Fase de Uso (“*Use Pass*”): Se usa el superelemento como un elemento más del modelo global que contiene el resto de elementos numéricos y sus cargas. El tipo de elemento que define el superelemento se denomina MATRIX50. Este superelemento se conecta a través de sus grados de libertad maestros previamente definidos. La solución consiste en una solución completa del modelo global y una solución reducida para los grados de libertad maestros del superelemento.

Fase de Expansión (“*Expansion Pass*”): La solución reducida de los grados de libertad maestros obtenida en la Fase de Uso, se extiende al modelo origen que dio lugar al superelemento en la Fase de Generación. De este modo, es posible estudiar la interacción entre dos modelos complejos.

El proceso seguido y descrito anteriormente es del tipo “*bottom-up*”. Este método define el superelemento separadamente en un paso de generación y luego, mediante el paso de uso se ensambla al modelo global. En este caso particular, se ha generado el superelemento a partir del modelo del puente, y posteriormente, en la fase de uso, se ensambla con el modelo del dispositivo de empuje.

5.1.4 Simulación cinemática

La simulación cinemática llevada a cabo sobre el mecanismo permite comprobar la interacción entre los diferentes elementos que lo componen cuando el dispositivo se

encuentra en movimiento. Esta simulación numérica permite realizar análisis de movimiento de ensamblajes considerando relaciones geométricas, propiedades físicas de los componentes y relaciones mecánicas. Además de esto, también es posible realizar análisis estructurales transitorios de los elementos y obtener animaciones del dispositivo que reproducen su funcionamiento real.

El soporte utilizado para realizar la simulación cinemática es SolidWorks Motion en el cual es posible realizar varios tipos de análisis:

- **Animation**: donde se realiza la animación de un ensamblaje sin considerar la masa de los elementos, ni la gravedad.
- **Basic Motion**: permite estudiar motores, muelles, contactos y gravedad en los ensamblajes, teniendo en cuenta las masas de los elementos en los cálculos.
- **Motion Analysis**: utiliza “*solvers*” cinemáticos que requieren gran potencia computacional. En este caso, además de tener en cuenta la masa de los elementos se considera también la inercia de los mismos y las propiedades del material.

Este último, “*motion analysis*” o “*análisis de movimiento*” fue utilizado para desarrollar la simulación cinemática del dispositivo de empuje. Mediante este análisis es posible llevar a cabo una simulación precisa y analizar el movimiento del ensamblaje teniendo en cuenta fenómenos físicos como fricción, rigidez, amortiguación, etc, así como contactos entre los elementos, restricciones de movimiento y propiedades de los materiales.

Los cuerpos a utilizar pueden ser rígidos o flexibles. En este caso, se utilizaron cuerpos rígidos caracterizados por tener seis grados de libertad, “*Degrees of Freedom*”(DOF).

El análisis de movimiento realizado permite controlar las relaciones de posición entre los elementos del conjunto. Asimismo, es posible configurar la rigidez de los contactos mecánicos entre los cuerpos.

Para resolver la simulación cinemática que utilizan sistemas rígidos de ecuaciones diferenciales, debido a su aplicación en analizar el movimiento de sistemas masa-resorte con constantes de resorte de gran magnitud. La solución se obtiene mediante la integración de las ecuaciones diferenciales y cumpliendo las condiciones de contorno impuestas por las ecuaciones algebraicas en cada paso de tiempo. En este caso, el método utilizado es el “*GSTIFF*”, método desarrollado por C.W. Gear [46]. Es un método rápido y fiable para calcular desplazamientos en análisis de movimiento. Existen otros parámetros que deben ser considerados a la hora de obtener la solución tales como el número máximo de iteraciones, el tamaño del paso inicial de integración o el tamaño del paso mínimo de integración, entre otros.

La simulación cinemática permite también detectar interferencias entre los cuerpos que componen el ensamblaje cuando estos se encuentran en movimiento. De esta manera, es posible detectar los cuerpos que interfieren entre sí y el instante de tiempo en el que lo hacen. Obtener un modelo cinemático complejo, como el estudiado en esta Tesis Doctoral, es una tarea dura y lenta debido a la multitud de contactos físicos y relaciones entre elementos que dificultan obtener una solución global sin interacciones. No obstante, después de un arduo proceso se consigue una buena simulación de movimiento con contacto físico entre los elementos.

5.1.5 Optimización topológica

El objetivo de la optimización topológica es encontrar la mejor distribución de material posible dentro de una región. Uno de los ejemplos más claros de esto, es la distribución de agujeros que aligeran una viga. En este caso, se persigue disminuir peso reduciendo material sin afectar a las propiedades resistentes de la propia viga. A través del software de análisis por elementos finitos es posible utilizar diferentes procedimientos de optimización.

El proceso de optimización topológica se compone de los siguientes pasos:

- Definir el modelo a optimizar.
- Seleccionar los elementos adecuados: la optimización topológica solo puede realizarse sobre unos tipos de elementos determinados.
- Indicar las regiones que se desean optimizar.
- Definir los casos de carga a estudiar
- Desarrollar el proceso de optimización, definiendo las funciones de optimización, los objetivos y las restricciones y ejecutando el proceso de optimización topológica.
- Interpretación de los resultados.

El programa de cálculo numérico utilizado posee varios métodos de optimización, cada uno de ellos apropiado para un caso de estudio. En este caso, se ha utilizado el método “*Preconditioned Conjugate Gradient Solver*” (PCG).

5.2 Análisis no lineales del dispositivo

En el presente apartado se muestran los estudios no lineales que se llevan a cabo sobre los elementos resistentes del dispositivo. Sobre éste se llevan a cabo los análisis numéricos mediante el FEM que, por claridad, se han separado en varios apartados:

- Cadenas de tracción: se analiza la resistencia a tracción de la cadena de transmisión y se obtiene el desplazamiento necesario que hay que aplicar para transmitir entre los eslabones el esfuerzo ejercido por los engranes durante el lanzamiento.
- Eslabones de apoyo: se estudia el conjunto de eslabones de apoyo junto con la cadena de tracción cuando se aplican solicitaciones horizontales y verticales. Las cargas horizontales son debidas al tiro que la cadena debe transmitir para desplazar la estructura. Las cargas verticales son relativas al peso de la estructura del puente que se lanza.
- Sistema de compensación de carga: se realiza un estudio del sistema de compensación de carga cuando se encuentra sometido a solicitaciones no distribuidas uniformemente.

En cada uno de ellos se aprecian los diferentes componentes resistentes del nuevo sistema de empuje sometidos a sus correspondientes esfuerzos.

5.2.1 Cadenas de tracción

La cadena de tracción debe soportar el esfuerzo producido por el tiro necesario para desplazar la superestructura. El conjunto de eslabones de la cadena de tracción y eslabones de apoyo que se muestran en la Figura 49 son analizados mediante simulación numérica por FEM. Este conjunto de eslabones se somete a un esfuerzo de tracción fijando uno de los extremos y aplicando un desplazamiento horizontal en el extremo opuesto.

La simulación desarrollada es altamente no lineal debido a la existencia de contactos friccionales. Con el fin de obtener el valor del desplazamiento equivalente a la fuerza de tiro requerida en el empuje, se definen los contactos necesarios para transmitir el tiro entre los eslabones de la cadena, ver Tabla 12 y Figura 50.

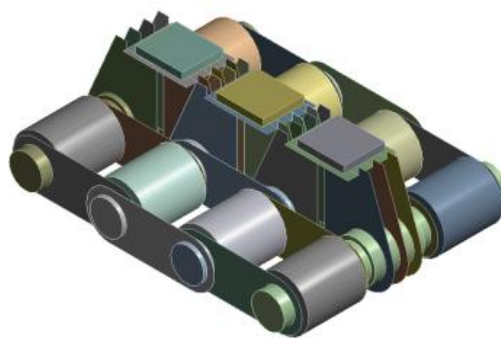


Figura 49. Modelo geométrico del conjunto de eslabones estudiados a tracción.

Tabla 12. Características de los contactos.

Numeración	Elementos en contacto	Tipo	Características
A	Eslabón de tracción - Bulón	Frictional	Coefficiente de fricción 0.1
A'	Eslabón de tracción - Bulón	Bonded	
B	Eslabón de apoyo - Bulón	Frictional	Coefficiente de fricción 0.1
C	Apoyo de neopreno – Eslabón de apoyo	Bonded	
D	Rueda - Bulón	Frictional	Coefficiente de fricción 0.1

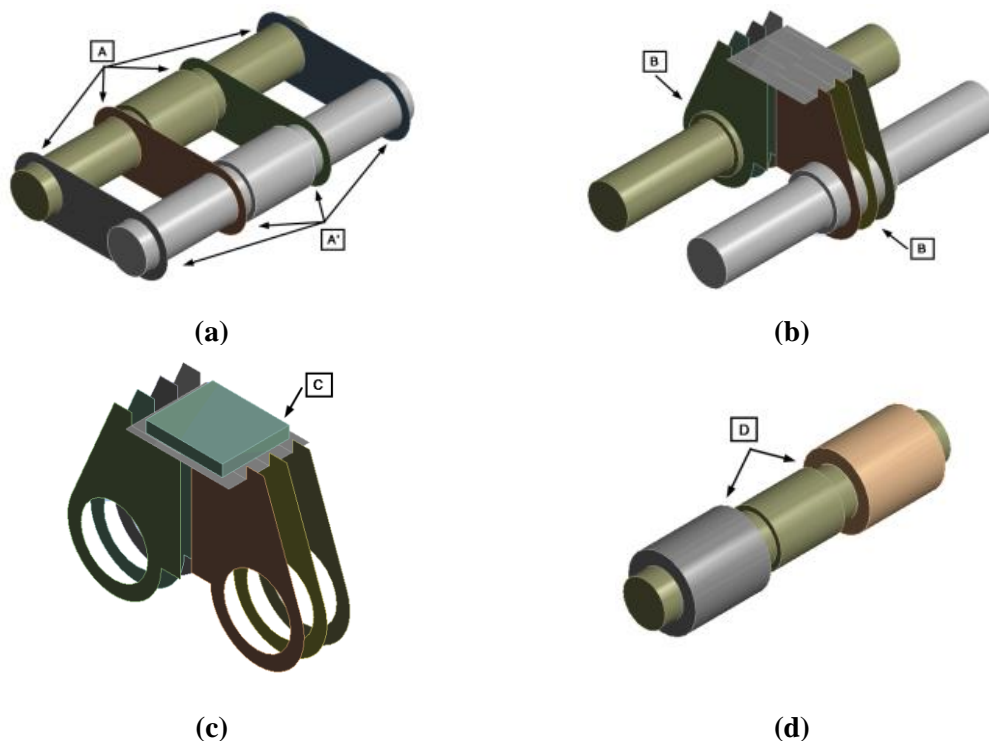


Figura 50. Contactos utilizados en el modelo numérico entre: a) eslabones de tracción y bulones; b) eslabones de apoyo y bulones; c) placa de apoyo de neopreno y eslabón de apoyo; d) ruedas y bulones.

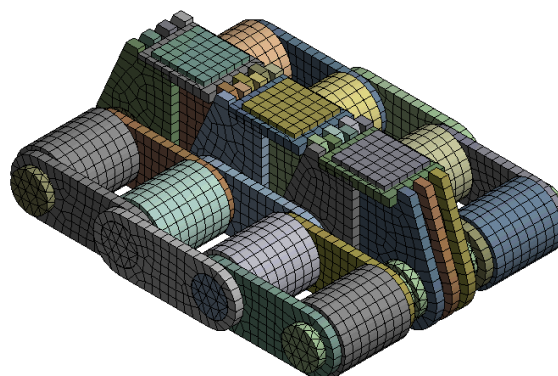


Figura 51. Malla de elementos finitos de un tramo de las cadenas.

El modelo geométrico mostrado en la Figura 51 es mallado mediante elementos finitos del tipo SOLID186, con un total de 24861 elementos y 50077 nodos.

Los esfuerzos de transmisión o tiro que tienen lugar en la cadena de tracción son simulados mediante la aplicación de un desplazamiento horizontal desde uno de los extremos del modelo, mientras que el bulón del extremo contrario se mantiene fijo. Debido a los contactos no lineales introducidos en el modelo es posible la transmisión de esfuerzo entre los eslabones. El tiro en la cadena viene dado por el valor de la reacción en el extremo fijo, de modo que conociendo el tiro máximo que debe soportar la cadena es posible obtener el desplazamiento equivalente al esfuerzo de transmisión, ver Figura 52.

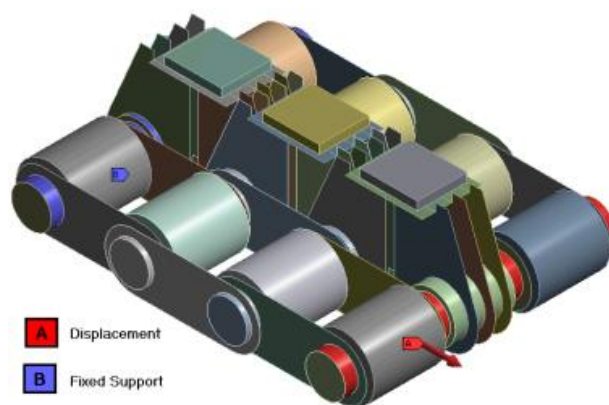


Figura 52. Condiciones de contorno del modelo de la cadena de tracción.

Sabiendo que el tiro necesario es $3.75 \cdot 10^6$ N, inicialmente se introduce un desplazamiento en “A” cuyo valor es seleccionado arbitrariamente, $disp$, para el cual se realiza el cálculo mediante elementos finitos obteniéndose una reacción, $Reacc$, en el extremo fijo. Con los resultados obtenidos y el tiro en la cadena se obtiene el desplazamiento buscado, $disp'$, equivalente a dicho tiro. Los valores obtenidos se indican en la ecuación 28.

$$disp' = \frac{disp \cdot Tiro}{R_{10}} \quad disp' = \frac{0.01 \cdot 3.75 \cdot 10^6}{2.8614 \cdot 10^7} = 0.0013 [m] \quad (28)$$

Siendo:

$disp'$: desplazamiento buscado.

$disp$:: desplazamiento inicial impuesto arbitrariamente (10 mm)

$Tiro$: Valor de la fuerza de tracción en la cadena.

R_{10} : Valor de la reacción en el bulón fijo para un desplazamiento de 10 mm.

Finalmente, se aplica un desplazamiento ligeramente superior al obtenido mediante cálculos, 2 mm, con el que se obtiene una reacción de $5.76 \cdot 10^6$ N.

En la Figura 53 se muestra el valor de la reacción en el extremo fijo cuando se aplica un determinado desplazamiento en el extremo libre. En este caso el desplazamiento aplicado en las simulaciones con el fin de reproducir el tiro en la cadena es $1.58 \cdot 10^{-3}$ m, y la reacción obtenida, $4.2921 \cdot 10^6$ N, es ligeramente superior al límite.

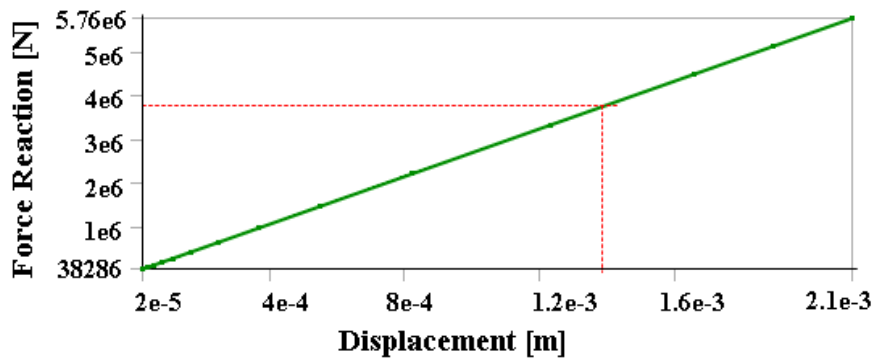


Figura 53. Fuerza de reacción frente a desplazamiento.

Este desplazamiento es combinado con las cargas normales ejercidas por el puente con el fin de estudiar la respuesta de las cadenas cuando el mecanismo se encuentra sometido a ambos esfuerzos simultáneamente.

Los resultados obtenidos en esta simulación numérica no lineal son los mostrados en la Figura 54. En ellas se aprecia cómo la cadena de transmisión es la que soporta mayoritariamente los esfuerzos de tracción. Se observa también cómo los esfuerzos máximos de tensión equivalente de Von-Mises y las deformaciones del conjunto son admisibles:

- 2 mm de deformación, impuesta como carga externa en el extremo de la cadena.
- 355 MPa de tensión máxima equivalente de Von-Mises.

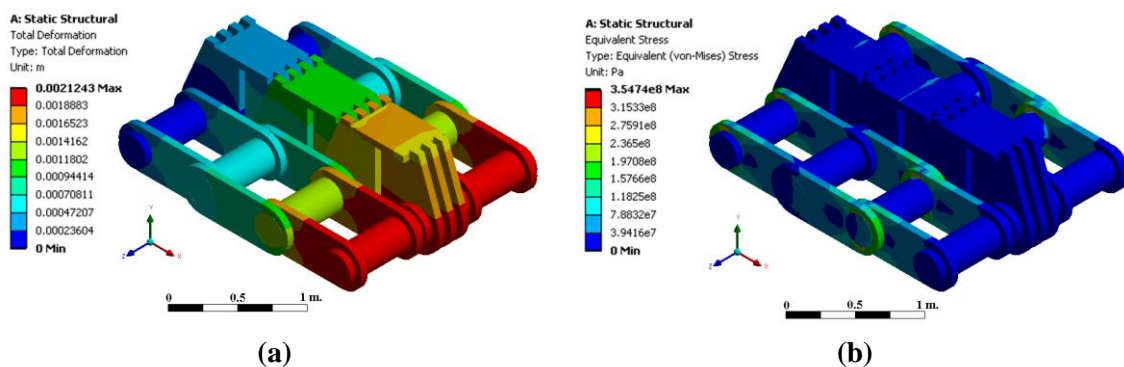


Figura 54. Resultados del análisis no lineal de los elementos sometidos a tracción: (a) deformación total; (b) tensión equivalente de Von-Mises.

5.2.2 Eslabones de apoyo

Los eslabones de apoyo deben tener la capacidad de soportar los grandes esfuerzos normales a los que se ven sometidos cuando la superestructura a desplazar se apoya sobre ellos. Estos eslabones se encuentran unidos entre sí por unos bulones que a su vez deben transmitir estos esfuerzos normales a los carriles donde apoyan las ruedas. El dispositivo durante su funcionamiento debe soportar la carga normal debida al puente, así como la tracción necesaria para trasladarlo. En la simulación numérica expuesta en este apartado cuatro eslabones de apoyo y dos cadenas de tracción laterales, unidos por bulones, se someten al esfuerzo de presión que ejerce el puente sobre el dispositivo de empuje y al desplazamiento equivalente al tiro requerido para desplazarlo mediante la fuerza de fricción.

El modelo geométrico de esta simulación, mostrado en la Figura 55, es un modelo paramétrico sobre el que es posible realizar una optimización.

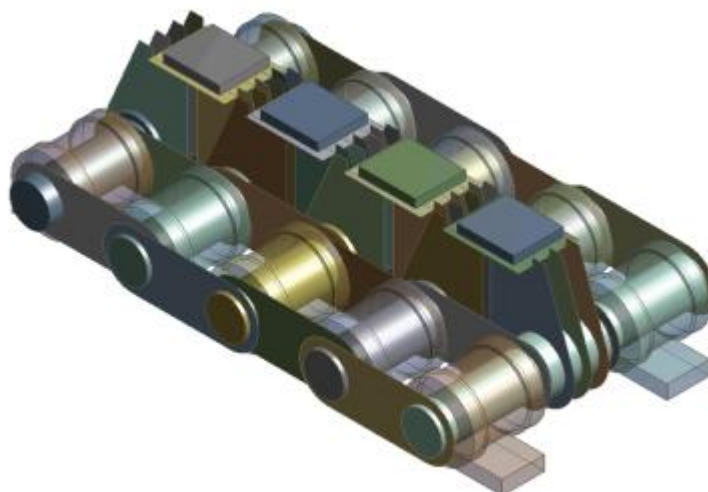


Figura 55. Modelo geométrico del estudio de los eslabones de apoyo.

En este caso, las solicitaciones que se aplican sobre el modelo son cargas normales sobre los eslabones de apoyo y desplazamiento aplicado en uno de los bulones con el fin de ejercer tracción en la cadena de transmisión. Los contactos entre los diferentes elementos poseen un alto grado de no linealidad. El número de contactos en el modelo es más elevado que en el modelo sometido a tracción simple y además, se debe hacer especial hincapié en el contacto entre el rodillo y el carril de deslizamiento. Las características de los contactos utilizados vienen reflejadas en la Tabla 13 y en la Figura 56.

Tabla 13. Características de los contactos en el modelo numérico sometido a tracción y flexión.

Numeración	Elementos en contacto	Tipo	Características
A	Eslabón de tracción - Bulón	Frictional	Coeficiente de fricción 0.1
A'	Eslabón de tracción - Bulón	Bonded	
B	Eslabón de apoyo - Bulón	Frictional	Coeficiente de fricción 0.1
C	Apoyo de neopreno – Eslabón de apoyo	Bonded	
D	Rodillo - Bulón	Frictional	Coeficiente de fricción 0.1
E	Rodillo - Carril	Frictional	Coeficiente de fricción 0.1

El contacto más problemático es el identificado con la letra “E”, contacto entre los rodillos y el carril. Este contacto debe permitir la transmisión de la carga vertical de los eslabones de apoyo a los carriles, manteniendo la rueda apoyada sobre los mismos sin que se produzcan errores de penetración entre ambos sólidos. Este contacto se realiza entre las superficies de dos cuerpos, la cara exterior de las ruedas que actúa como “*contact*” y la cara superior del carril que actúa como “*target*”. Este contacto obliga a realizar un “*face sizing*”, técnica mediante la que se disminuye el tamaño de los elementos finitos de las superficies de dos sólidos que se encuentran en contacto.

En este caso, se ha reducido el tamaño de los elementos finitos que definen el contacto a un valor de 0.02 m. Después de esta modificación sobre la malla el modelo geométrico de elementos finitos es el mostrado en la Figura 57.

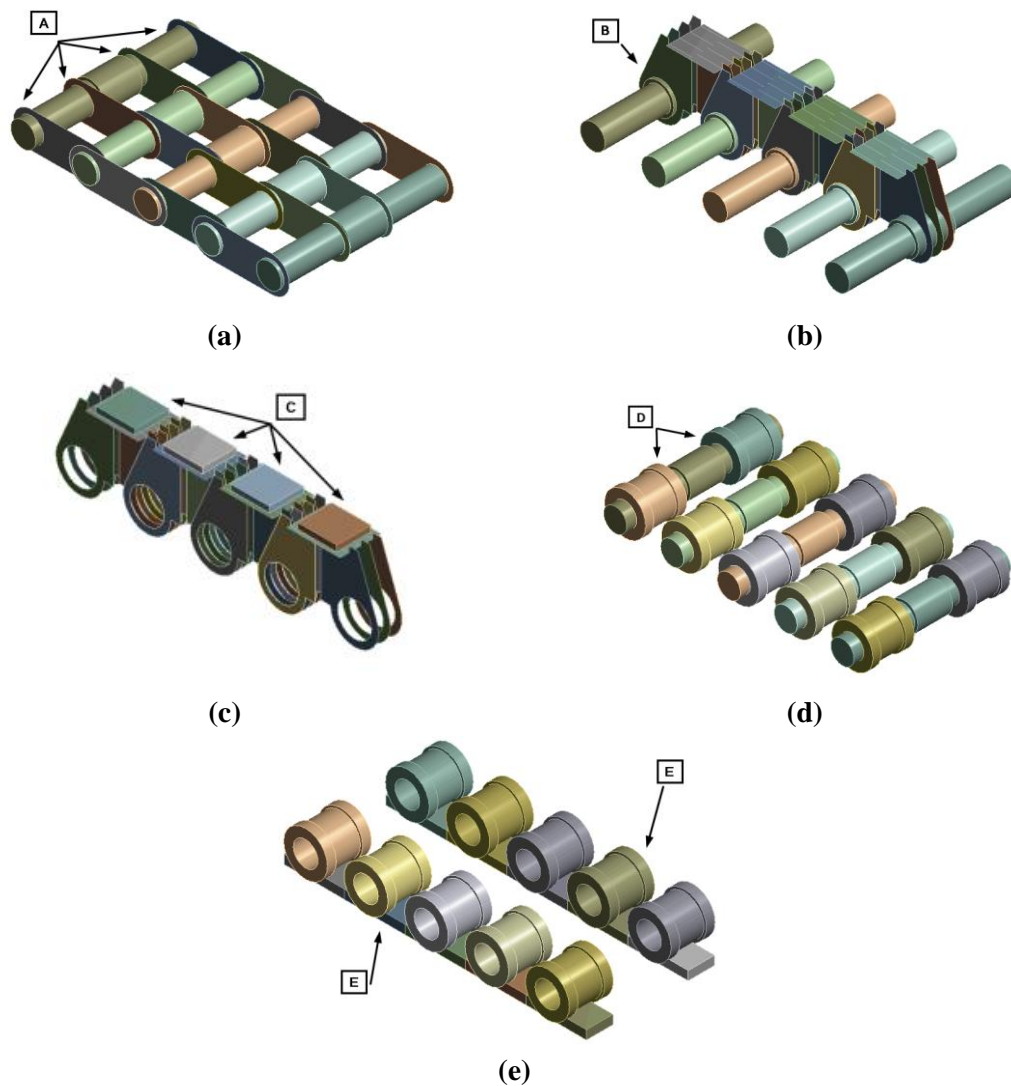


Figura 56. Contactos utilizados en el modelo numérico entre: (a) eslabones de tracción y bulones; (b) eslabones de apoyo y bulones; (c) placa de apoyo y eslabón de apoyo; (d) rodillos y bulones; (e) rodillos y carriles.



Figura 57. Malla de elementos finitos del modelo de los eslabones de apoyo.

La malla que se aprecia en la Figura 57 está compuesta por 690134 nodos y 412388 elementos de tipo SOLID186.

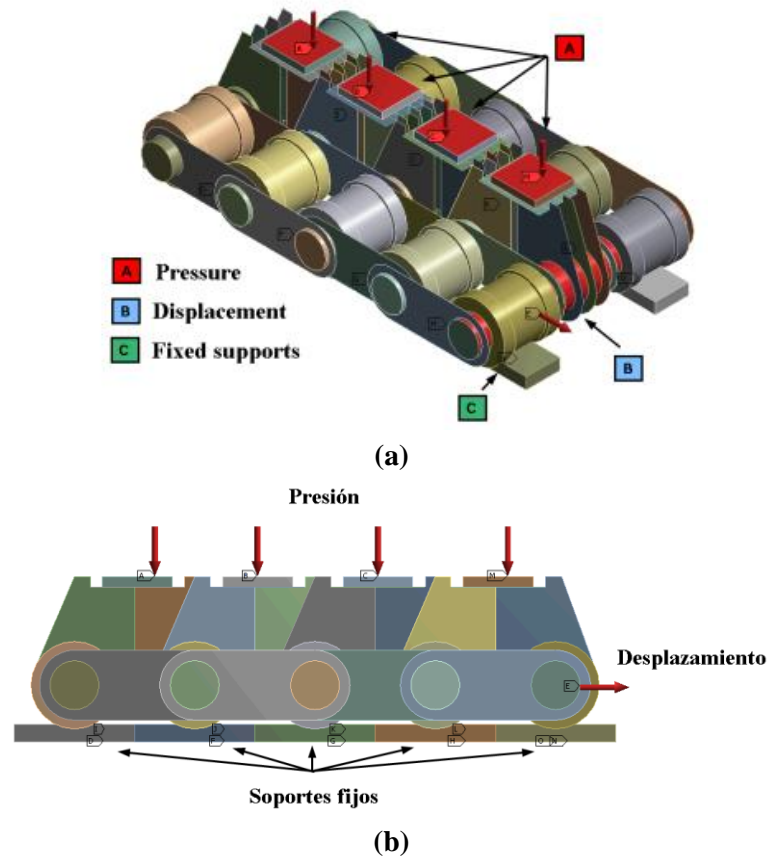


Figura 58. Solicitaciones y restricciones de movimiento del modelo numérico: (a) perspectiva isométrica; (b) vista perfil izquierdo.

La carga normal se aplica sobre la placa situada sobre los eslabones de apoyo. Esta carga es transmitida por los elementos del conjunto hasta los rodillos que apoyan sobre los carriles de rodadura que se encuentran fijos en su superficie inferior, con lo que se impide su desplazamiento vertical. Simultáneamente, el conjunto se ve sometido a tracción aplicando el desplazamiento equivalente al tiro de la transmisión de la fuerza horizontal comentado en el apartado 5.2.1. Estas condiciones de carga y restricciones de desplazamientos son mostradas en la Figura 58.

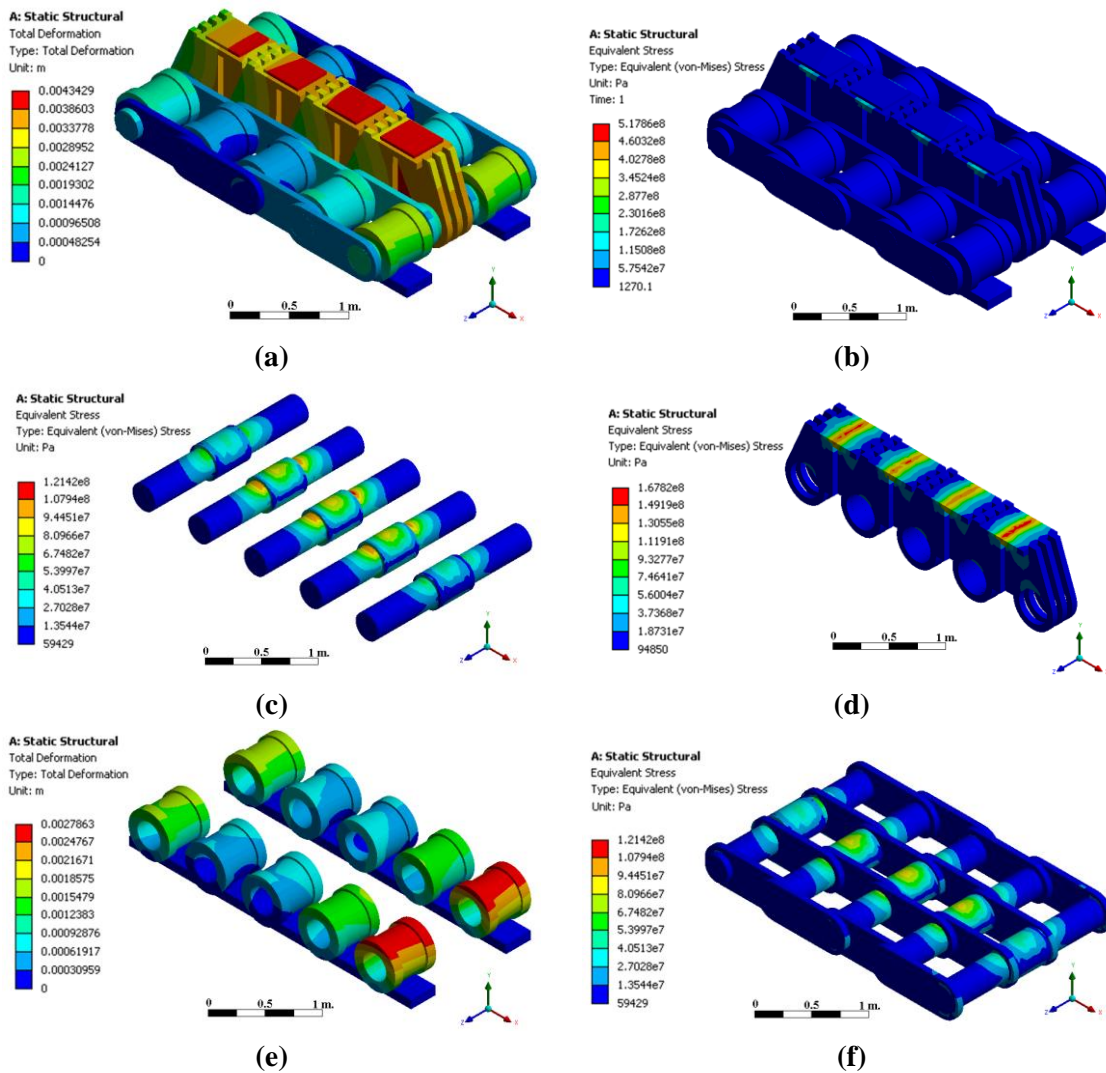


Figura 59. Tensión equivalente de Von-Mises y deformación total de los principales elementos del dispositivo de empuje: (a) deformación total del conjunto; (b) tensión equivalente del conjunto; (c) tensión equivalente de los bulones; (d) tensión equivalente de los eslabones de apoyo; (e) deformación total de los rodillos sobre los carriles; (f) tensión equivalente de los eslabones de tracción sobre los bulones.

Los resultados obtenidos en esta simulación numérica son mostrados en la Figura 59, en ellos se representa la deformación total y la tensión de Von Mises para el conjunto, así como los esfuerzos de tensión de cada uno los elementos individualmente. Se comprueba que los resultados obtenidos son admisibles tanto en tensión como en deformación, dado que los valores máximos son:

- 4.3 mm de deformación total máxima en el conjunto.
- 518 MPa de tensión equivalente máxima de Von-Mises.

Otro de los resultados analizados en esta simulación son las reacciones en cada uno de los apoyos de los rodillos sobre los carriles de rodadura, en los que se puede verificar que el modelo se encuentra en equilibrio, ver Figura 60.

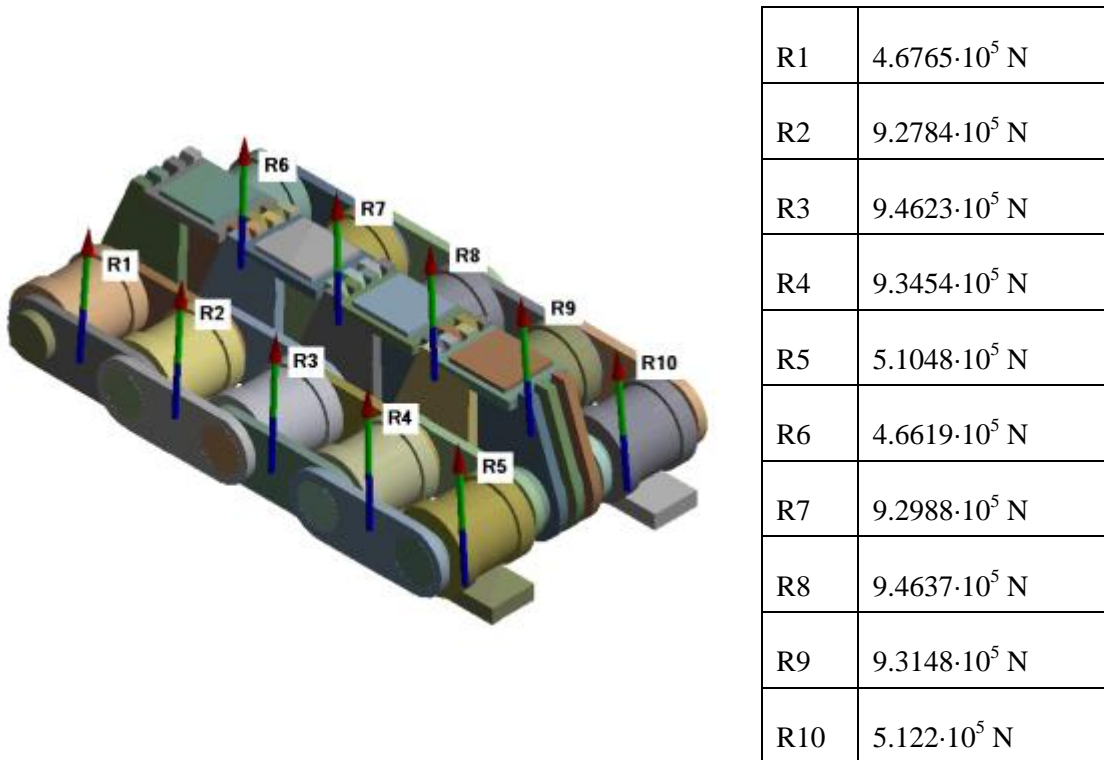


Figura 60. Representación y valores de las reacciones normales obtenidas sobre los carriles.

En la figura anterior se puede comprobar que la presión ejercida por el puente sobre el dispositivo es mayor que el esfuerzo de tracción, dado que la componente de la reacción es mayoritariamente vertical. Se puede apreciar también cómo el comportamiento del dispositivo respecto al eje de avance es simétrico.

5.2.3 Sistema de compensación de carga

Una parte importante del dispositivo diseñado es el sistema de compensación de carga, que permite adaptar los eslabones de apoyo del mecanismo a la deformada de la estructura a desplazar, así como controlar el proceso de empuje mediante un sistema de seguridad activo.

El modelo geométrico está formado por una viga cargadera compuesta por dos partes, una superior y otra inferior, que albergan en su interior los listones en voladizo sobre

los que se ubican los carriles de rodadura. Esta viga cargadera se encuentra apoyada en dos cilindros hidráulicos que soportan toda la carga. Esta geometría se malla utilizando 86951 nodos y 20934 elementos finitos del tipo SOLID186 y SOLID187. El modelo geométrico utilizado, así como la malla de elementos finitos se aprecia en la Figura 61.

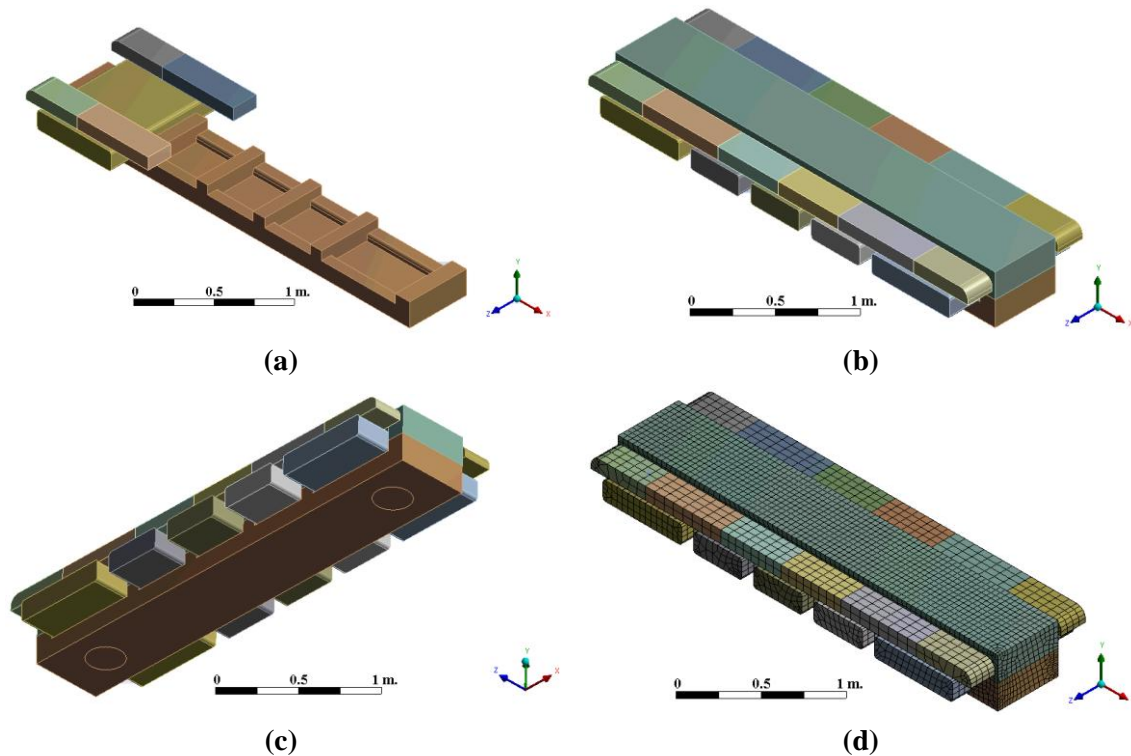


Figura 61. Modelo del sistema de compensación de carga: (a), (b) y (c) modelo geométrico; (d) mallado del modelo numérico por elementos finitos.

Los contactos utilizados en este modelo para reproducir el empotramiento de los listones en el interior de la viga cargadera son no lineales de tipo “*bonded*”. Asimismo, entre la superficie inferior del carril de rodadura y la superior de los listones sobre los que apoya se utilizan contactos no lineales del tipo “*frictionless*”.

Las cargas aplicadas sobre este modelo numérico se corresponden con las cargas verticales ejercidas por la estructura a desplazar. Estos valores son tomados del modelo numérico anteriormente expuesto en el sub-apartado 5.2.2, donde se obtienen los valores de las reacciones sobre los carriles de rodadura cuando se aplica la carga normal sobre los eslabones de apoyo y el esfuerzo de tracción en la cadena de transmisión. Los valores de estas reacciones, indicados en la Figura 60, son las cargas aplicadas sobre el sistema de compensación de carga. Asimismo, el sistema se soporta con cilindros hidráulicos que sustentan el sistema y permiten elevar el conjunto si es necesario. Estas superficies se fijan mediante soportes fijos, “*fixed supports*”, impidiendo el desplazamiento vertical del conjunto.

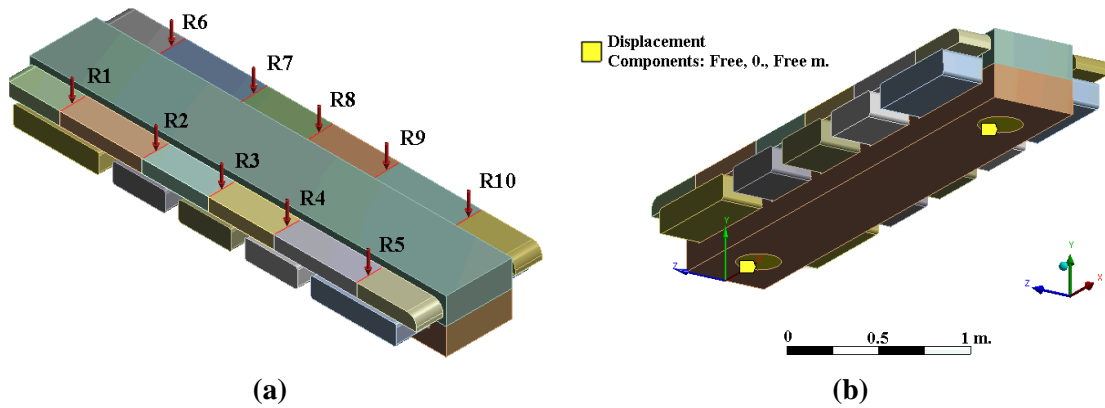


Figura 62. Solicitaciones sobre el modelo numérico del sistema de compensación de carga: (a) cargas aplicadas; (b) condiciones de contorno.

En el análisis numérico realizado se muestra la respuesta del sistema ante solicitaciones que no están distribuidas uniformemente. La distribución de tensiones es singular, ver Figura 63; no obstante, se aprecia que las deformaciones en el sistema debidas a las condiciones críticas estudiadas son admisibles, siendo inferiores a 4.4 mm. Asimismo los valores del coeficiente de seguridad con respecto a las tensiones en los elementos son superiores a 1.

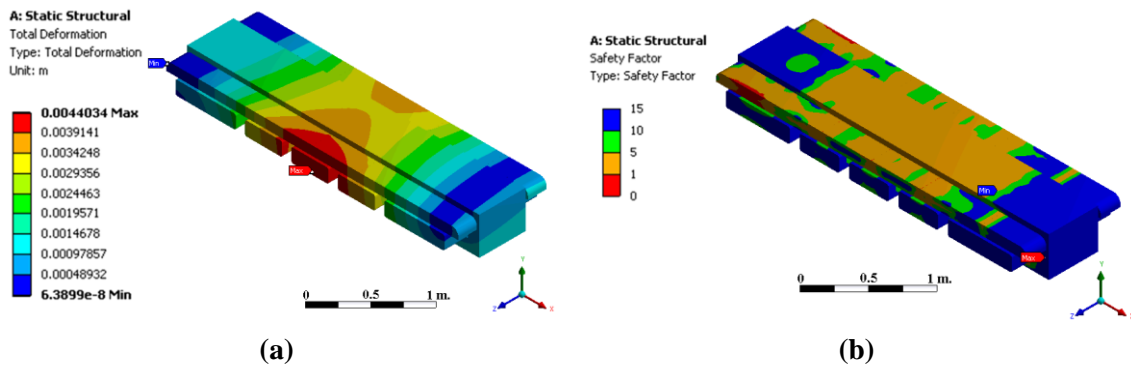


Figura 63. Resultados obtenidos en la simulación numérica no-lineal del dispositivo de compensación de carga: (a) deformación total; (b) factor de seguridad para tensiones.

5.3 Análisis estático de la interacción estructural

La interacción estructural entre el dispositivo de empuje y la estructura a empujar es uno de los aspectos más importantes en el lanzamiento de puentes. El nuevo mecanismo debe ser capaz de mantenerse en contacto con el puente durante todo el empuje para evitar cargas excesivas en sus elementos resistentes. Asimismo, la ausencia de superficie de contacto entre el puente y el mecanismo impide el empuje por fricción. Del mismo modo, también es necesario controlar los esfuerzos puntuales que ejerce el

mecanismo sobre el puente, dado que pueden generar efectos de abolladura sobre el puente.

Los estudios llevados a cabo sobre la estructura a desplazar son utilizados para calcular la respuesta del mecanismo diseñado en esta Tesis Doctoral. En este apartado se desarrolla un modelo numérico en el que se estudia la interacción estructural y el comportamiento del dispositivo de empuje cuando sobre este se aplican los esfuerzos existentes durante el lanzamiento. La estructura que debe ser desplazada por el mecanismo es un sistema de doble cajón colaborante desarrollado y patentado, ver Anexo I. Esta estructura se construye mediante empuje por fricción, pudiendo superar luces de 150 m. Varios trabajos previos realizados sobre el puente a desplazar se toman como referencia a la hora de realizar el estudio de la interacción estructural entre el puente y el mecanismo en la presente Tesis Doctoral.

El estudio numérico de la interacción estructural entre el dispositivo de empuje y el puente a desplazar es llevado a cabo mediante el proceso de sub-estructuración explicado en el apartado 5.1.3.

5.3.1 Simplificación del modelo global

La solución del modelo global mediante el proceso de sub-estructuración se lleva a cabo durante la fase de uso. En esta fase, se definen unos elementos denominados superelementos que representan al puente, y otros elementos finitos que forman el dispositivo de empuje objeto de estudio.

Una vez calculado el modelo numérico mediante el proceso de sub-estructuración es posible obtener la solución completa y una solución reducida para el superelemento, que en este caso son los desplazamientos de los nodos del puente en contacto con el mecanismo de empuje, que son los puntos de interacción entre ambas estructuras. Los valores obtenidos deben ser comparados y verificados en cada modelo individualmente para asegurar que la interacción se produce correctamente.

En el estudio de la interacción estructural se utiliza un modelo de mecanismo de empuje simplificado que permite realizar un cálculo más sencillo, reduciendo tiempo y coste computacional sin afectar al comportamiento estructural del propio mecanismo. En ningún caso estas simplificaciones sobre el modelo numérico global repercuten sobre los resultados obtenidos o modifican el comportamiento de los elementos resistentes, simplemente reducen el número de elementos y contactos sin alterar el objeto de estudio.

Las simplificaciones realizadas, y sus justificaciones son expuestas en este apartado.

- **Condición de simetría:** debido a las condiciones de simetría tanto geométricas como de carga que tienen lugar en la estructura a desplazar, es posible realizar el estudio de la mitad del puente reduciendo, por tanto, la carga del mismo y la complejidad del modelo numérico. Por consiguiente, el estudio de la interacción estructural comienza con un sólo mecanismo de empuje. Una vez resuelto este problema, se desarrolla un modelo posterior más complejo con dos mecanismos de empuje dispuestos bajo los rigidizadores longitudinales del puente. El modelo completo requeriría cuatro mecanismos de empuje.
- **Eliminación de rodillos y carriles:** los carriles, y consecuentemente los rodillos que apoyan sobre ellos, son prescindibles en el estudio de la interacción estructural. El apoyo del mecanismo sobre los carriles puede ser reproducido en el modelo numérico mediante condiciones de contorno. En este caso, se ha simulado el apoyo de todo el mecanismo sobre los bulones, obteniendo las reacciones en los extremos de cada uno de ellos. En este modelo numérico no es necesario incluir los rodillos, puesto que se trata de un cálculo estático en el que se analiza la distribución de la carga en la parte del mecanismo sobre la que se encuentra la estructura a desplazar. Los rodillos en los extremos de los bulones, así como los carriles inferiores, añaden contactos complejos que dificultan mucho la solución del modelo numérico, siendo ambos, sustituidos por restricciones de contorno en el modelo de elementos finitos.

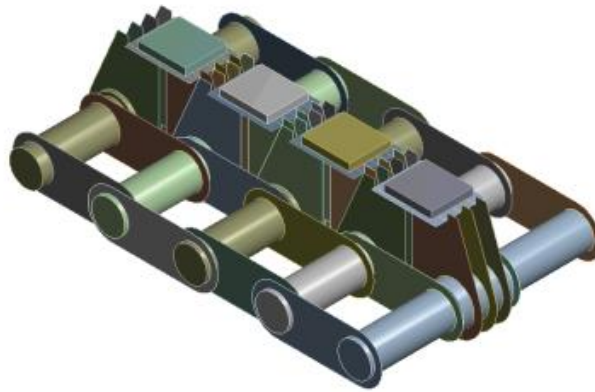


Figura 64. Modelo geométrico simplificado para el estudio de la interacción estructural.

- **Modificación de los contactos:** el proceso de sub-estructuración pretende obtener la transmisión de carga entre la superestructura a desplazar y el mecanismo de empuje, sin ser necesario para ello realizar un estudio cinemático del mecanismo. Por este motivo, se ha realizado una simplificación en los contactos entre los elementos del mecanismo de empuje. El modelo numérico con contactos complejos se analiza de manera aislada donde se comprueba que el mecanismo se comporta correctamente. Sin embargo, en el problema global en el que se estudia el puente y el mecanismo no es necesario complicar el modelo numérico incluyendo contactos no-lineales, puesto que simplemente con

contactos lineales se consiguen soluciones válidas para el modelo global objeto de estudio. Con esta simplificación se facilita mucho la convergencia del problema global sin perjudicar la solución y exactitud del mismo.

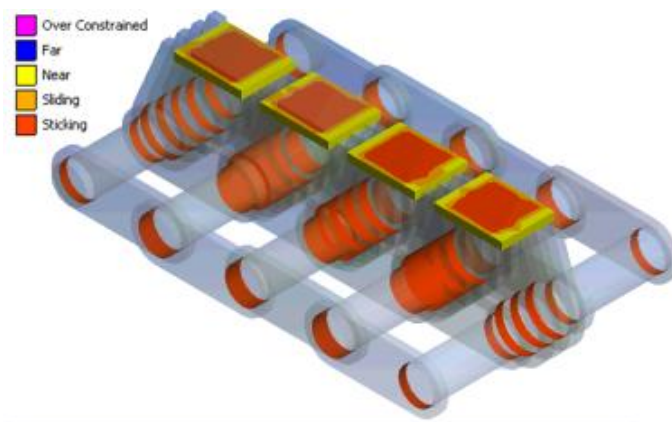


Figura 65. Estado inicial de los contactos.

- **Sistema de compensación de carga de rigidez variable:** este sistema es simulado mediante elementos tipo viga (BEAM) que conectados entre sí reproducen el comportamiento de rigidez variable del mismo. En sub-apartados posteriores, se explicará en detalle los elementos utilizados y las conexiones entre ellos.

5.3.2 Modelo numérico

El modelo numérico desarrollado, con las simplificaciones expuestas en el apartado anterior, se expone a continuación:

- **Mallado:** la discretización del modelo geométrico en elementos finitos es sencilla, quedando todo el modelo representado por 45722 elementos y 69097 nodos. Los tipos de elementos utilizados son de tipo SHELL181, SOLID185, CONTA175, CONTA178 TARGE170, COMBIN14, BEAM4 y MATRIX50, este último para el superelemento. Este modelo numérico es mostrado en la Figura 66.

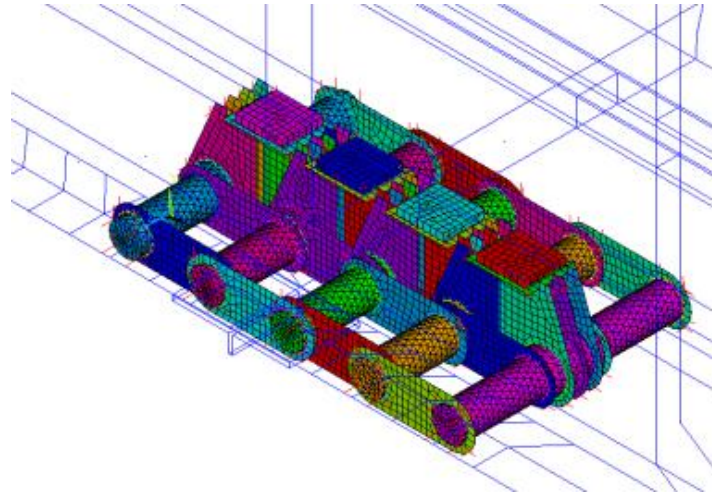


Figura 66. Malla de elementos finitos del modelo geométrico.

- **Condiciones de contorno:** las cargas y restricciones que se imponen sobre el modelo se pueden separar en dos grupos: las impuestas por el superelemento y las correspondientes al apoyo del dispositivo de empuje. La aplicación de las cargas en el modelo global se realiza a través de los nudos “*master*” del superelemento creado. Asimismo, debido a la eliminación de las ruedas y los carriles, es necesario fijar el mecanismo imponiendo restricciones de desplazamiento. La solución adoptada es la limitación del desplazamiento de los bulones en la dirección Z, normal al plano de desplazamiento del puente, y en la dirección Y, perpendicular a la dirección de desplazamiento del puente, ver Figura 67. En la Figura 67(a) se indica la restricción de toda la superficie de los extremos de los bulones, lo que implica el empotramiento de los mismos lo cual difiere de la realidad. Sin embargo, en esta misma figura, ver Figura 67(b), se ilustra la solución final adoptada, en la que se impide el desplazamiento transversal de los bulones en una sola línea. En consecuencia, se disminuye el efecto de empotramiento y la simulación reproduce la situación real.

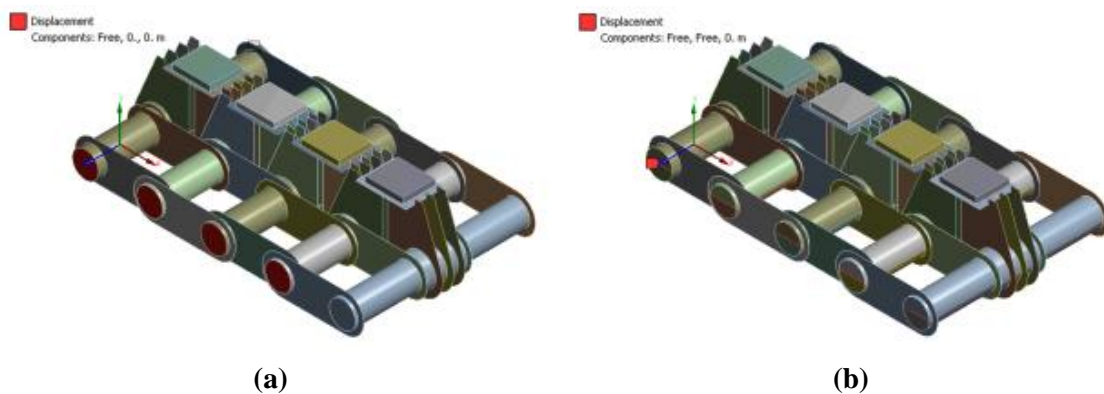


Figura 67. Condiciones de contorno sobre el dispositivo de desplazamiento: (a) sobre superficie; (b) sobre líneas.

5.3.3 Solución del modelo global

Una vez simplificado el modelo global y determinadas las restricciones necesarias para simular las condiciones de contorno más adecuadas en el modelo numérico, se estudian diferentes disposiciones del mecanismo de empuje con el fin de obtener la configuración óptima para ambos.

En primer lugar, se ha desarrollado un modelo con los mecanismos de empuje en paralelo, un dispositivo exterior bajo el alma del puente y otro interior bajo los rigidizadores longitudinales dispuestos en la estructura del puente, ver Figura 68(a).

En segundo lugar, se ha estudiado también la disposición de los dos mecanismos de empuje en serie, ver Figura 68(b).

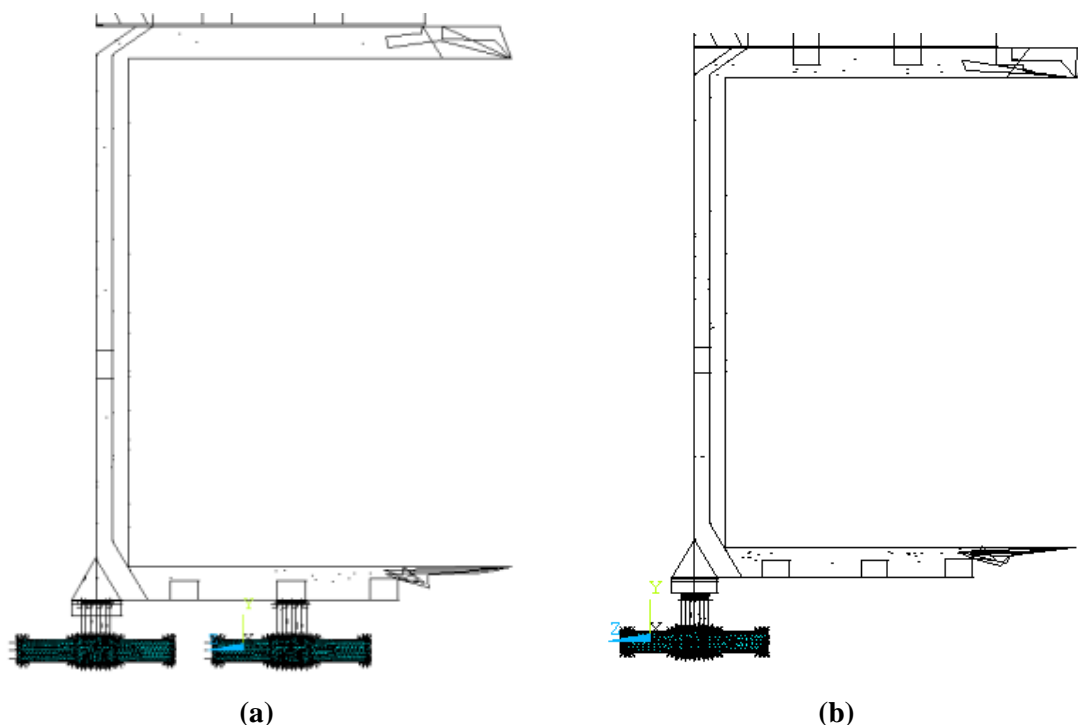


Figura 68. Simplificación de carga, media superestructura sobre mecanismos de empuje dispuestos en: (a) paralelo; (b) serie.

Ambas configuraciones han sido calculadas para la secuencia de empuje considerada como la más desfavorable, la cual se expone a continuación:

5.3.3.1 Fases de empuje estudiadas

El mecanismo de empuje objeto de estudio en este trabajo se encuentra dentro del proyecto Alcanza ya comentado en la introducción de este documento. Siguiendo este proyecto, y teniendo en cuenta que el mecanismo diseñado debe ser capaz de empujar puentes de grandes luces, se ha diseñado una secuencia de empuje específica para el cálculo de la interacción estructural. Esta secuencia está basada en estudios estructurales sobre el puente en los que se aprecia que el caso más desfavorable para el mecanismo de empuje se produce entre el lanzamiento del primer vano y el segundo. En la Figura 69 se puede ver el gráfico de las reacciones durante la secuencia de empuje. En rojo, se indican la reacción sobre el mecanismo de empuje, donde se aprecia que la situación más desfavorable tiene lugar cuando el puente llega a la primera pila.

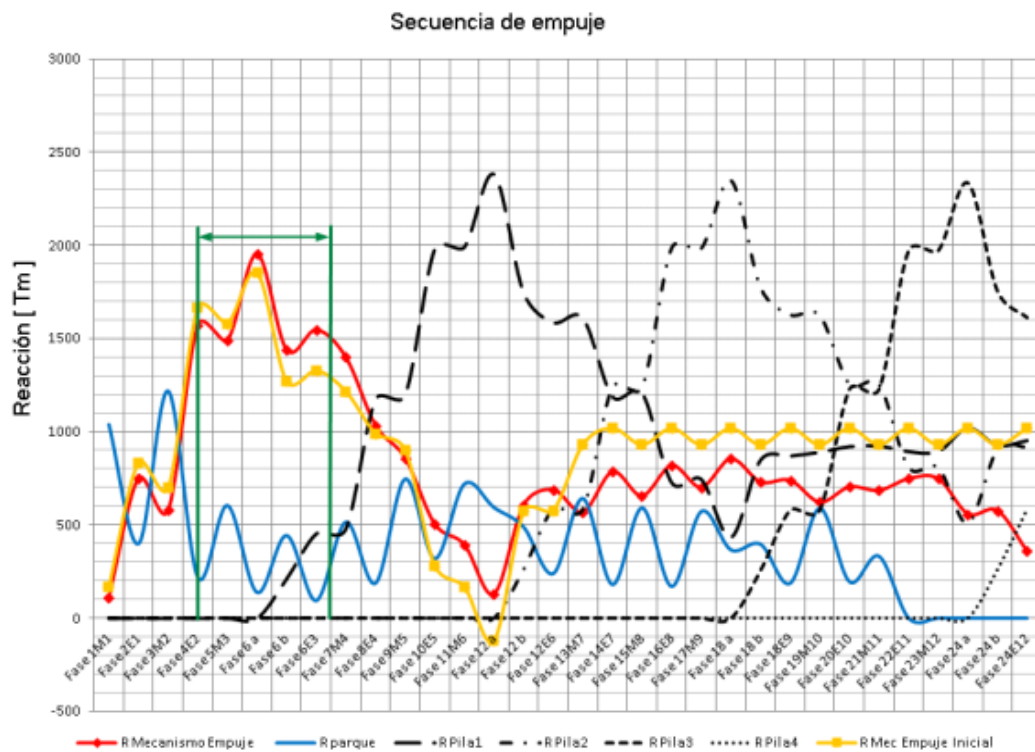


Figura 69. Reacciones teóricas durante la secuencia de empuje para puente de 150m de vano.

Con estos datos, se desarrolla una secuencia de empuje específica para estudiar la óptima disposición de los dos mecanismos de empuje. La secuencia desarrollada se muestra en la Figura 70.

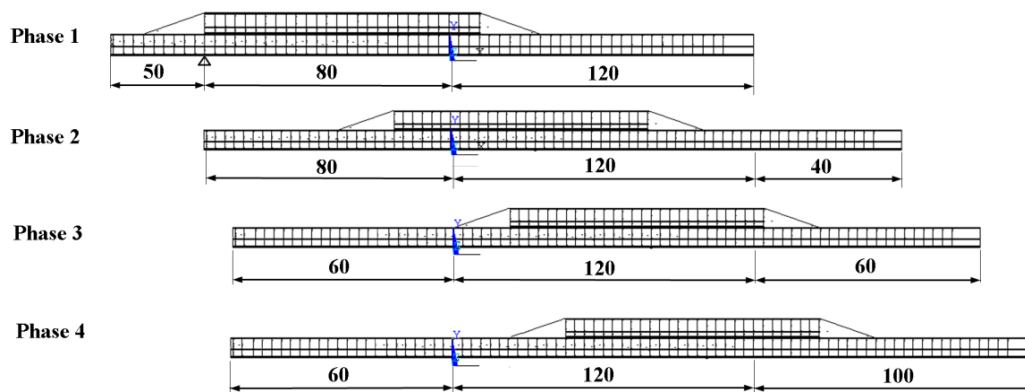


Figura 70. Secuencia de empuje para el cálculo de la interacción estructural.

La fase 1, en la que la se encuentran 120 m. en voladizo y 90 m. de puente en parque, es la más desfavorable. Las siguientes fases, fase 2, fase 3 y fase 4, son menos críticas desde el punto de vista del diseño del mecanismo de empuje, puesto que el esfuerzo que ejercen sobre este es mucho menor.

Para estas cuatro fases, se realizan diferentes análisis para determinar la mejor disposición de las “*orugas*”. Las opciones barajadas, tal y como se comentó con anterioridad, son mostradas en la Figura 71:

- Mecanismos de empuje en paralelo:
 - Con el mecanismo exterior, debajo del alma, adelantado: Figura 71(a).
 - Con el mecanismo exterior, debajo del alma, atrasado: Figura 71(b).
- Mecanismo de empuje en serie: Figura 71(c).

La comparación entre los casos estudiados se lleva a cabo para la fase de empuje más desfavorable. Tras los estudios realizados se obtienen diferentes valores de esfuerzos sobre los elementos del mecanismo, así como sobre cada uno de los mecanismos de empuje. Los esfuerzos que se obtienen se muestran en la Tabla 14:

Tabla 14. Valores máximos de las reacciones.

	PARALELO		SERIE
	Mecanismo ext atrasado	Mecanismo ext adelantado	
Reacción máx por eslabón de apoyo [N]	$3.42 \cdot 10^6$	$3.26 \cdot 10^6$	$2.09 \cdot 10^6$
Reacción máxima por mecanismo de empuje [N]	$13.29 \cdot 10^6$	$12.65 \cdot 10^6$	$7.86 \cdot 10^6$

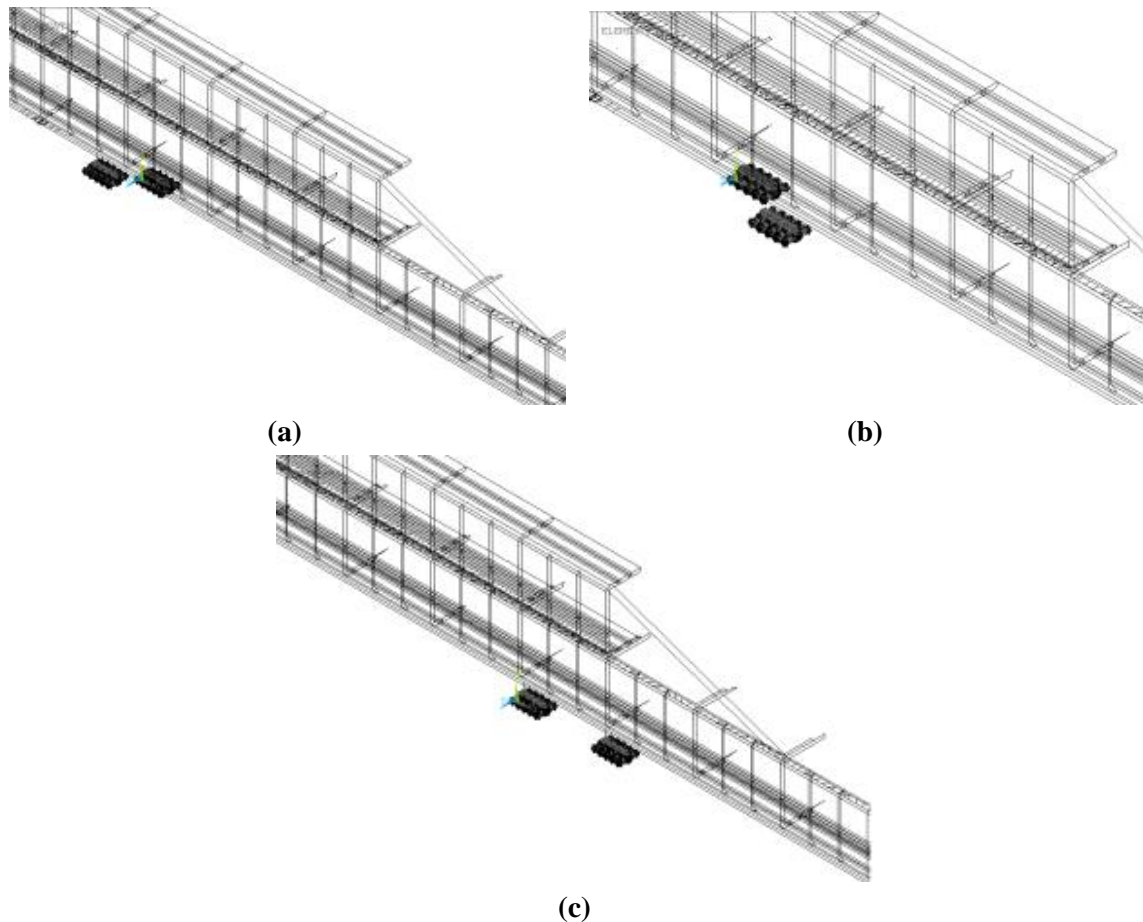


Figura 71. Disposiciones de los dispositivos de empuje: (a) en paralelo con el exterior atrasado; (b) en paralelo con el exterior adelantado; (c) en serie.

El valor máximo que se utiliza en el pre-diseño del mecanismo es $0.1875 \cdot 10^7$ N sobre cada uno de los eslabones de apoyo de neopreno zunchado. En el caso de la disposición en paralelo, en ambos casos se excede notablemente la fuerza máxima de diseño. Para la disposición en serie de los dispositivos de empuje, la carga ejercida por la estructura es ligeramente superior a la soportada por el mecanismo. Esta diferencia, correspondiente al 10% de la carga total, puede ser corregida y compensada de manera sencilla si esta situación crítica llegase a producirse.

En cualquier caso, la disposición de los mecanismos de empuje en serie soporta mejor los grandes esfuerzos normales que ejerce el puente de doble cajón colaborante. Finalmente, el empuje se desarrolla mediante cuatro mecanismos iguales, emparejados en serie dos a dos bajo cada una de las almas del puente. Cada grupo de dos mecanismos alineados bajo el alma se encuentran separados en la dirección de lanzamiento del puente una distancia de aproximadamente 9.5 m.

5.3.3.2 Solución adoptada

Finalmente, se selecciona el modelo global más adecuado para cumplir con los requisitos del problema. Esta solución, cuya justificación viene detallada en el subapartado anterior, consta de dos dispositivos de empuje dispuestos en serie. Sobre estos dispositivos se ubica el superelemento, que representa la estructura de puente con doble cajón de 120 m de voladizo y 90 m en parque. El acoplamiento entre el superelemento y los dispositivos de empuje se lleva a cabo mediante elementos finitos de tipo CONTA178. Estos elementos permiten conectar un nodo máster del superelemento “puente” con el apoyo del mecanismo de empuje objeto de estudio transmitiendo la carga entre dos nodos en la dirección que los une.

Una de las características de este elemento CONTA178 es su rigidez, que puede ser introducida como propiedad física a través de su constante real. Incluir el neopreno zunchado en la simulación numérica es muy complejo debido a las no-linealidades que introduce un material hiperelástico como es el neopreno. La rigidez del neopreno zunchado puede ser simulada numéricamente introduciendo su valor de rigidez como una constante real del elemento CONTA178. Asimismo, la carga que se transmite entre el superelemento y el mecanismo de empuje tiene en cuenta la rigidez del neopreno sin complicar demasiado la solución.

Las simplificaciones que se llevan a cabo en el modelo real, y que son justificadas en el apartado 5.3.1., dan lugar a un modelo global que se muestra en la Figura 72.

El modelo numérico del puente, superelemento en el proceso de sub-estructuración, transmite su carga al mecanismo de empuje a través de los elementos CONTA178. Estos elementos sólo transmiten carga en dirección vertical, pero poseen como parámetro de entrada la rigidez del propio elemento, de modo que es posible calcular el modelo global simplificado para diferentes valores de rigidez en el conjunto o incluso en cada uno de los elementos.

Los esfuerzos que soporta el mecanismo de empuje son transmitidos a un conjunto de elementos tipo BEAM4 mediante un acoplamiento de nodos, “*COUPLING*”, que se utiliza para vincular cada uno de los extremos de los elementos tipo BEAM4 con los bulones correspondientes del mecanismo de empuje. Tal y como se aprecia en la Figura 72(a), los elementos de los extremos poseen dos nodos intermedios en los que se concentran los esfuerzos transmitidos por los desplazamientos. Con el fin de transmitir dichos esfuerzos, estos nodos intermedios se unen a dos elementos tipo BEAM4 mediante elementos tipo CONTA178 que controlan la compensación de carga en el sistema y permiten obtener la carga vertical del modelo global. Los dos elementos tipo BEAM4 se encuentran unidos por una “*rótula perfecta*”, es decir restringiendo los desplazamientos en las tres direcciones y libres todas las rotaciones, ver Figura 72(a).

El modelo numérico se implementó mediante código APDL, y se comprobó que la modelización fue correcta al existir equilibrio en el sistema.

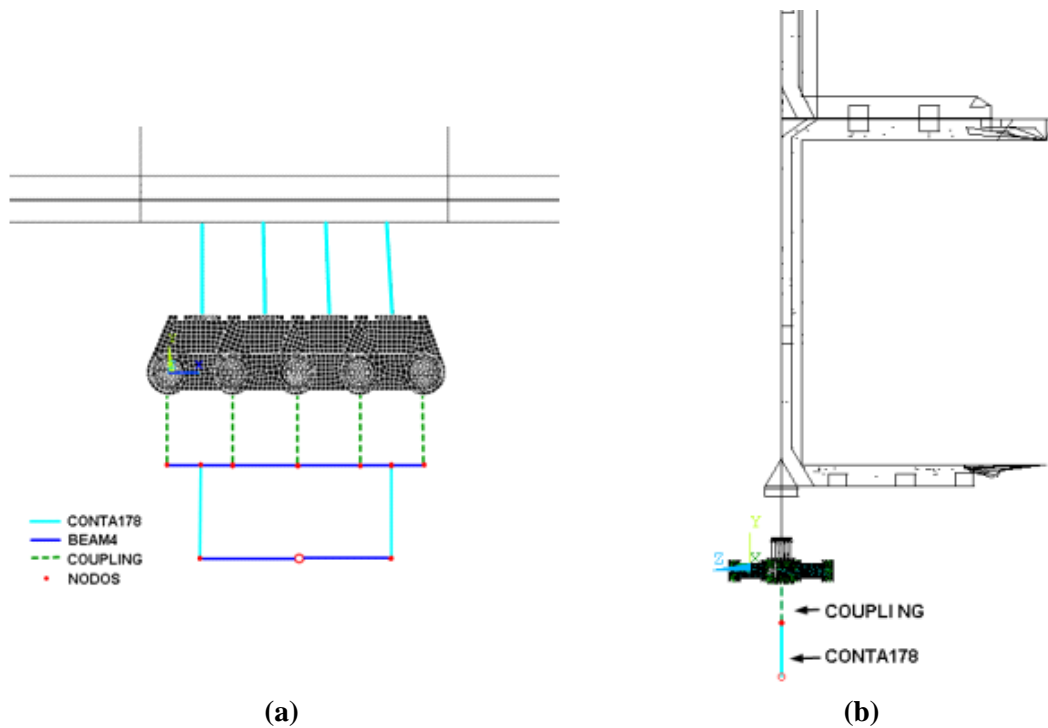
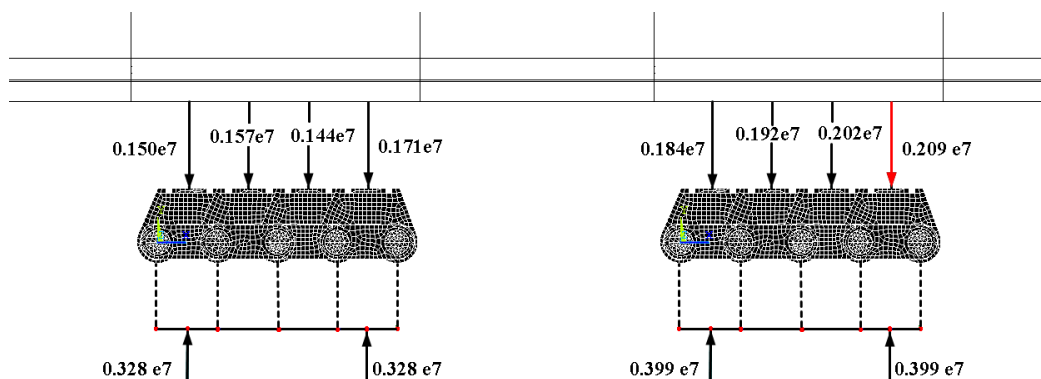


Figura 72. Solución global adoptada: a) vista frontal; b) vista lateral.

Sobre el modelo numérico explicado anteriormente se obtienen las reacciones en varios puntos. Por un lado, se extrae la reacción en la rótula perfecta con el fin de verificar que existe equilibrio. Asimismo, se obtienen las reacciones en los elementos que conectan el superelemento con el mecanismo de empuje, ver Figura 73, con los que es posible obtener el esfuerzo máximo en cada una de las placas de apoyo. Por último, se obtienen las reacciones en los elementos tipo CONTA178 que reproducen el sistema de compensación de carga. Los elementos BEAM4 se desplazan en función de la reacción que soportan los bulones del mecanismo.

FASE 1: 120 [m] lanzados.

LAUNCHING DIRECTION



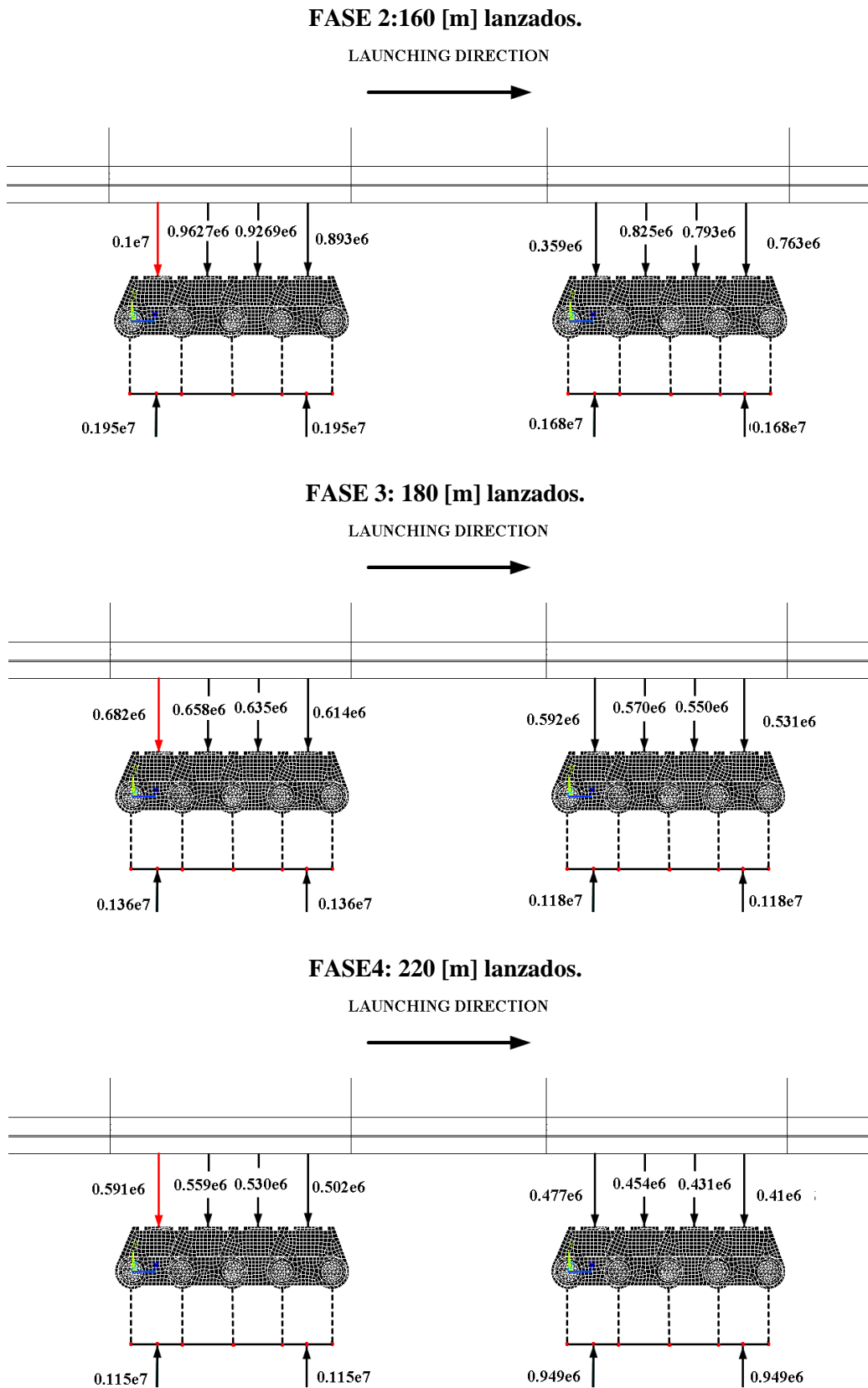


Figura 73. Resultados obtenidos en la simulación numérica de la interacción estructural mediante sub-estructuración (valor máximo indicado en rojo).

En la Figura 73 se muestra que la fase más desfavorable para el mecanismo de empuje es la fase 1, en la que la estructura del puente de doble cajón se encuentra antes de la primera pila de apoyo. En esta situación, el mecanismo debe soportar los esfuerzos de la estructura con un voladizo de 120 m, lo que implica un esfuerzo máximo sobre el eslabón de apoyo más solicitado de $2 \cdot 10^6$ N. En este análisis es posible apreciar también la distribución no uniforme de la carga normal sobre los eslabones de apoyo.

5.4 Análisis cinemático

El análisis cinemático del mecanismo diseñado en la presente Tesis Doctoral se lleva a cabo a través de un análisis de movimiento utilizando el módulo “*motion analysis*” del programa SolidWorks. En este caso, se desarrolló un estudio del comportamiento cinemático del mecanismo con el fin de estudiar la transmisión del movimiento entre los piñones y las cadenas de tracción, así como el estado de los elementos resistentes del dispositivo al aplicar una carga normal elevada.

Asimismo, este análisis permite comprobar la interacción entre cuerpos y verificar el ensamblaje del conjunto del mecanismo durante su desplazamiento. Los resultados obtenidos dan lugar a videos y animaciones en las que se aprecia el mecanismo en funcionamiento.

En el siguiente sub-apartado se indica el procedimiento del análisis de movimiento realizado, así como las imágenes obtenidas del programa utilizado.

5.4.1 Análisis cinemático del mecanismo

El análisis cinemático del dispositivo se lleva a cabo sobre el modelo geométrico tridimensional del mecanismo de empuje. En este modelo geométrico se aplican relaciones mecánicas que permiten identificar contactos entre cuerpos de manera que estos se comporten como sólidos y no permitan la penetración entre ellos. Los contactos mecánicos mostrados en la Figura 74 transmiten los esfuerzos entre los piñones y los rodillos de los bulones de la cadena de transmisión, interactuando entre sí como cuerpos sólidos y provocando el movimiento del conjunto.

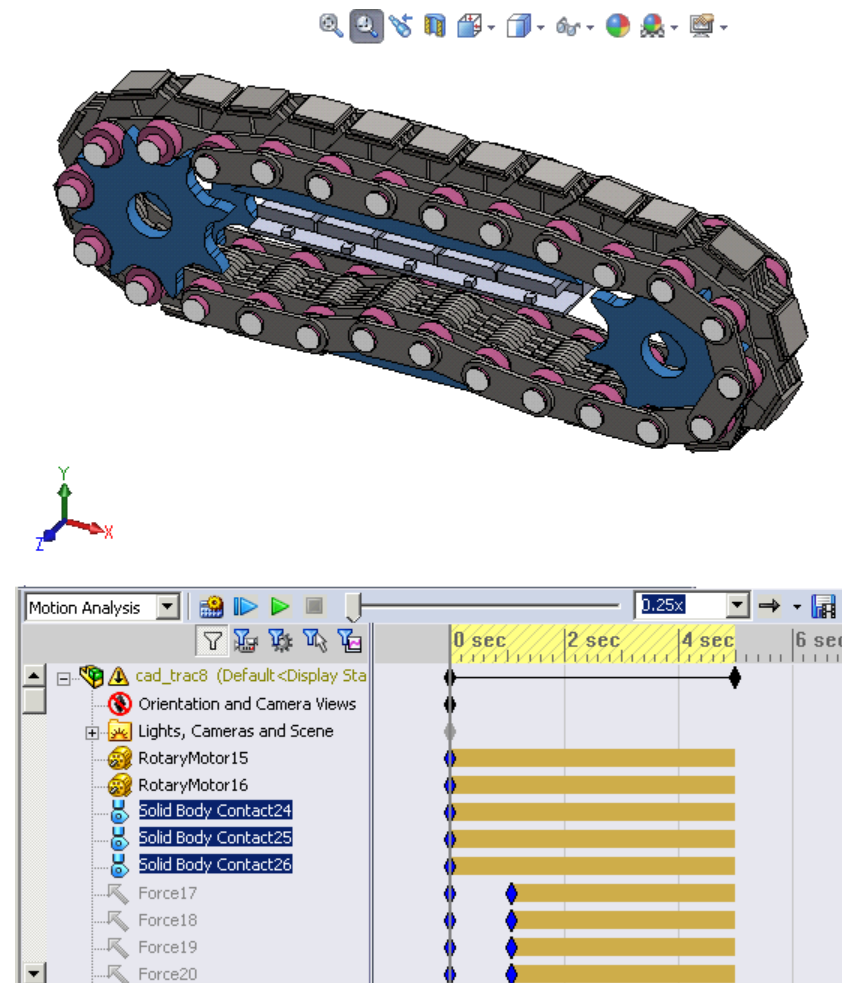


Figura 74. Contactos mecánicos entre elementos.

Estos contactos mecánicos son configurados mediante contactos friccionales cuyo material es acero para ambos elementos. Un aspecto importante a considerar en los contactos mecánicos es la configuración de su rigidez. Esta es controlada mediante varios parámetros cuyos valores, en este caso particular, son los indicados en la Tabla 15:

Tabla 15. Parámetros de configuración de la rigidez de los contactos mecánicos en la simulación cinemática.

PROPIEDADES ELÁSTICAS	
Rigidez	$1 \cdot 10^5$ [N/mm]
Exponente	1.5
Amortiguación máxima	50 [N/(mm/s)]
Penetración	0.10 [mm]

Donde:

Rigidez: configura la rigidez del contacto entre los dos materiales que interaccionan cuando se produce la colisión de ambas partes.

Exponente: controla la relación exponencial existente entre la fuerza y el desplazamiento del modelo en los contactos.

Amortiguación máxima: configura el coeficiente de amortiguación en el contacto cuando existe interacción entre cuerpos.

Penetración: determina el valor máximo de penetración entre dos cuerpos para el solver utilizado. Cuando el contacto alcanza este valor máximo, el solver aplica el valor de máxima amortiguación.

La ecuación de impacto utilizada en los contactos empleados en la simulación cinemática del mecanismo es la siguiente:

$$F_n = k \cdot (g_e) + \text{step}(g, 0, 0, d_{\max}, c_{\max}) \cdot d_g / d_t \quad (29)$$

Donde:

F_n : fuerza de impacto entre sólidos en contacto.

g : penetración de un cuerpo en otro.

dg/dt : velocidad de penetración en el punto de contacto.

El movimiento del mecanismo es generado en este estudio mediante motores de par que se introducen, en este caso, en el centro de los piñones, ver Figura 75. En el funcionamiento real del mecanismo los accionamientos se encuentran acoplados a un eje que transmite el movimiento a los piñones.

Un aspecto importante en la simulación cinemática del mecanismo se encuentra en la zona tensora de la cadena. Para que el mecanismo transmita movimiento y se desplace es necesario introducir un elemento que permita tensar o aflojar el conjunto según se requiera. En la simulación realizada se introducen dos muelles que ejercen de elementos tensores, ver Figura 76. Los muelles utilizados son lineales y su rigidez es controlada por el usuario permitiendo tensar y destensar la cadena de transmisión. Cuando la rueda dentada comienza a transmitir el movimiento, estos muelles se adaptan a la demanda de las cadenas de transmisión aportando la reacción necesaria para que se produzca su avance.

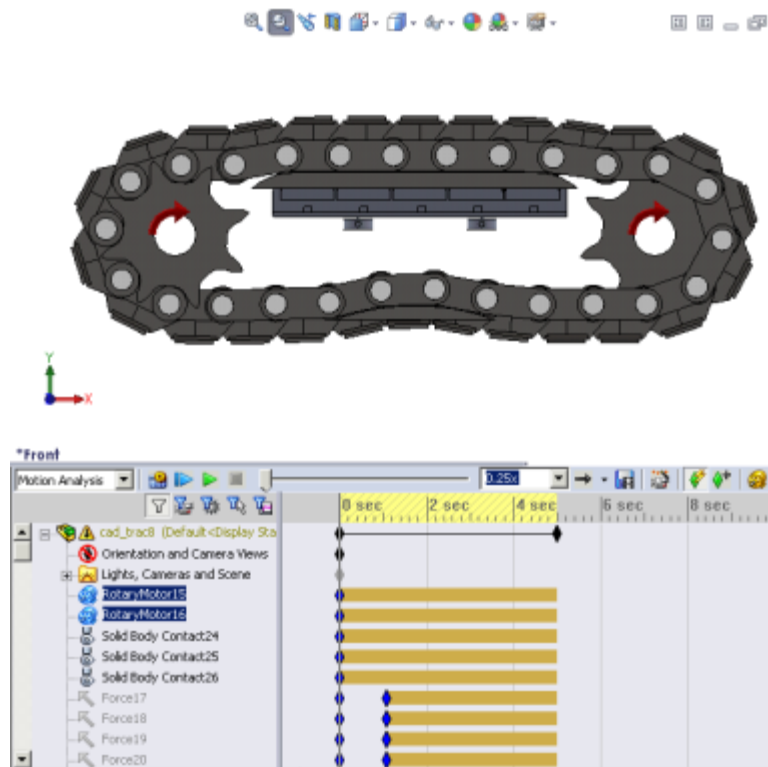


Figura 75. Accionamientos de par en el modelo cinemático del mecanismo.

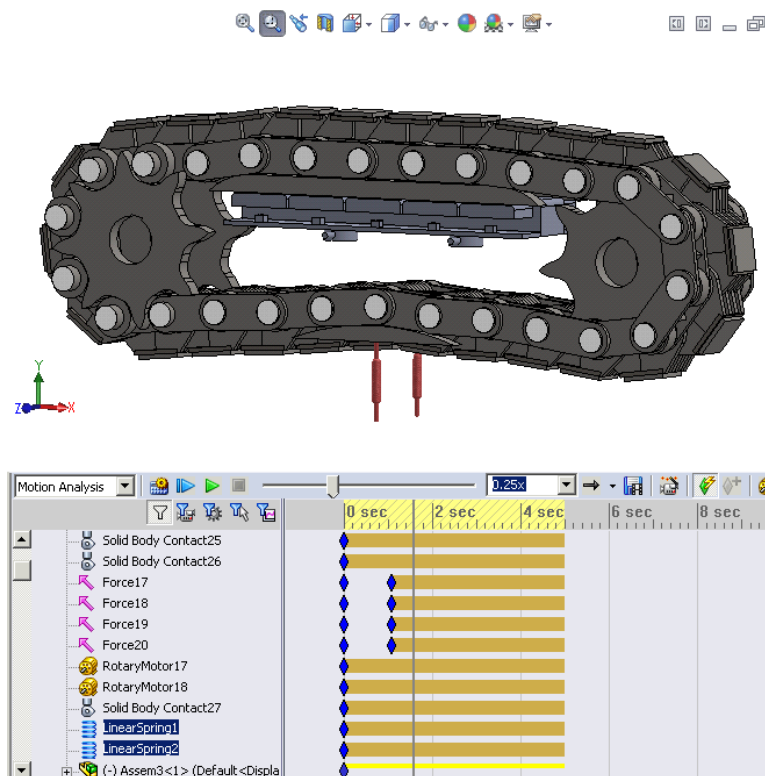


Figura 76. Muelles introducidos en la simulación cinemática para ejercer la función de tensor.

Finalmente, la simulación cinemática se completa mediante la aplicación de cargas normales sobre los eslabones de apoyo una vez que el mecanismo se encuentra en movimiento. Al igual que en el modelo real, el arranque del mecanismo se realiza en vacío, es decir, sin carga normal aplicada. Una vez el motor se encuentra en régimen de funcionamiento, los elementos del mecanismo contactan correctamente produciéndose la transmisión de movimiento. Las cargas normales se aplican sobre los eslabones de apoyo simulando los esfuerzos ejercidos por la estructura a desplazar.

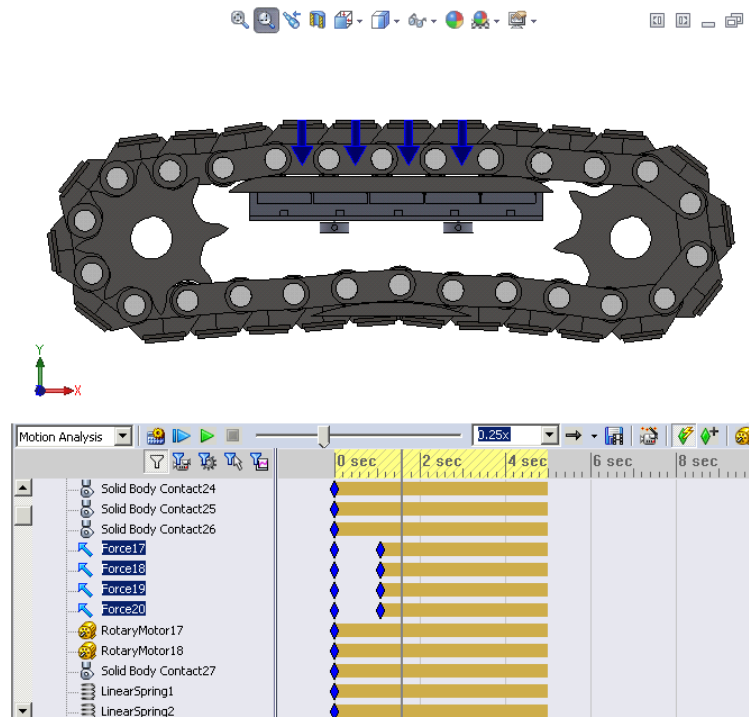


Figura 77. Cargas normales aplicadas sobre los eslabones de apoyo.

Una vez configurado el modelo se procede a calcular la simulación cinemática para lo que es necesario configurar el “solver”. En este caso, los parámetros considerados y sus principales valores son mostrados en la Tabla 16:

Tabla 16. Parámetros del SOLVER utilizados en la simulación cinemática.

PARÁMETROS DEL SOLVER	
Accuracy	0.001
Integrator type	GSTIFF
Max. Iterations	25
Initial Integration Step	0.0001
Minimum Integration Step	$1 \cdot 10^7$
Maximum Integration Step	0.01
Jacobian Re-evaluation value	Maximum

Los resultados obtenidos en esta simulación cinemática muestran el comportamiento del mecanismo diseñado: el movimiento es transmitido desde los piñones hasta las cadenas de transmisión desplazando el conjunto de eslabones de apoyo. Se aprecia también cómo los bulones de las cadenas de transmisión engranan correctamente en los piñones. Finalmente, en este análisis se aprecia cómo los muelles hacen variar la tensión de la cadena en función de las necesidades de la misma según su posición y las cargas normales aplicadas.

Como resultado de esta simulación cinemática, en la Figura 78 se aprecia varias capturas del dispositivo en diferentes instantes de la misma.

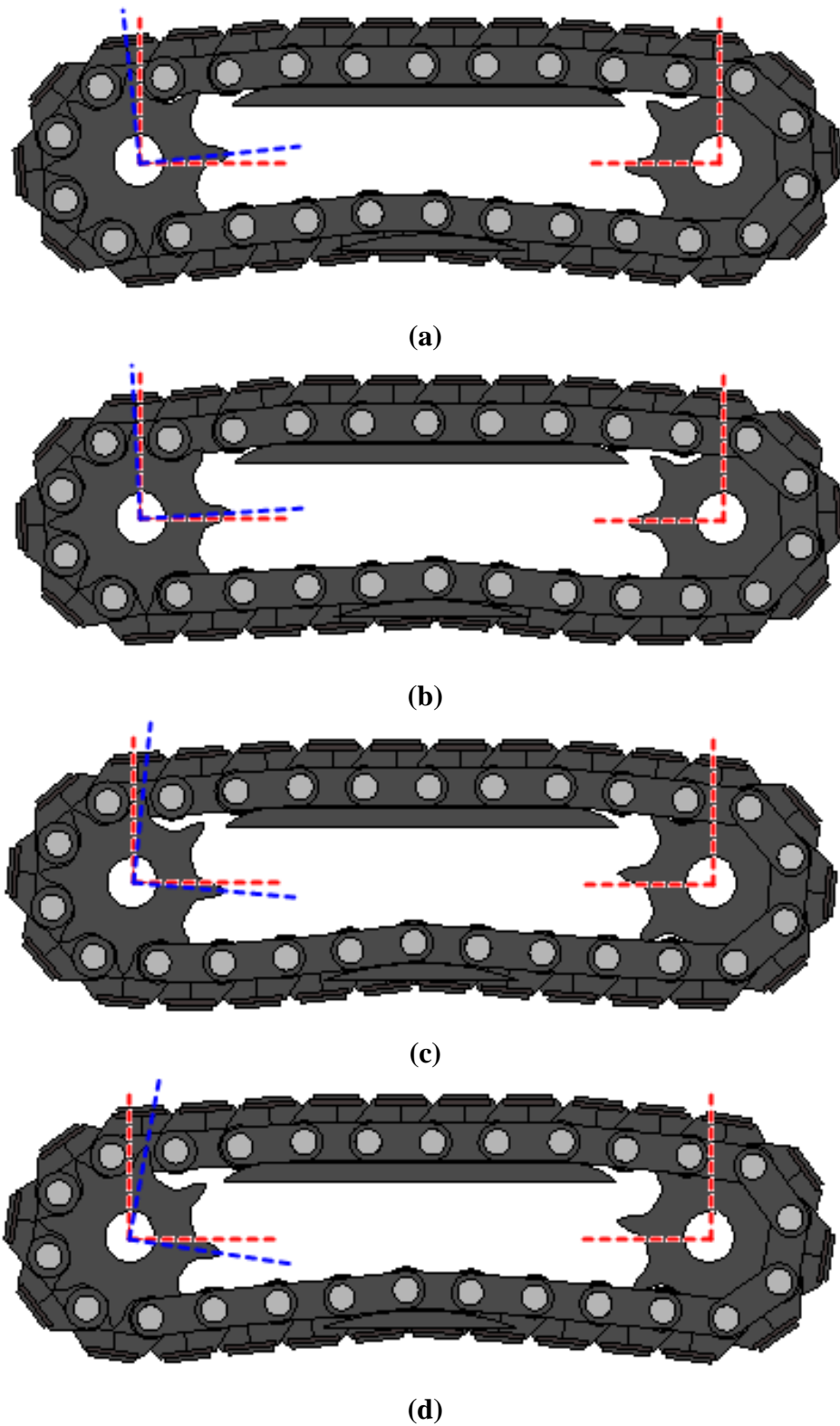


Figura 78. Secuencia de capturas del movimiento del mecanismo en la simulación cinemática a diferentes instantes de tiempo.

5.5 Optimización de los principales elementos resistentes del dispositivo

En este sub-apartado se muestra la optimización de forma realizada mediante elementos finitos sobre dos de los principales elementos del mecanismo: los eslabones de apoyo y los eslabones de la cadena de transmisión.

5.5.1 Eslabones de apoyo

Los eslabones de apoyo se optimizaron topológicamente con el fin de aligerar el elemento, reduciendo así el material requerido sin modificar sus condiciones resistentes. La optimización llevada a cabo es de tipo “*Shape Optimization*” con la que se mejora la geometría del elemento a analizar, identificando las zonas que pueden ser eliminadas sin repercutir en la capacidad resistente del elemento.

La optimización de forma o topológica se realiza elemento a elemento, es decir, se analiza cada uno de los elementos que componen el modelo numérico y se comprueba si ese elemento es necesario o puede ser eliminado. Después de un exhaustivo análisis de cada uno de los elementos se identificaron aquellas zonas del modelo geométrico que pueden ser eliminadas sin afectar a las propiedades resistentes del mismo.

El modelo numérico que se utiliza para llevar a cabo la optimización topológica es el mostrado en la Figura 79.

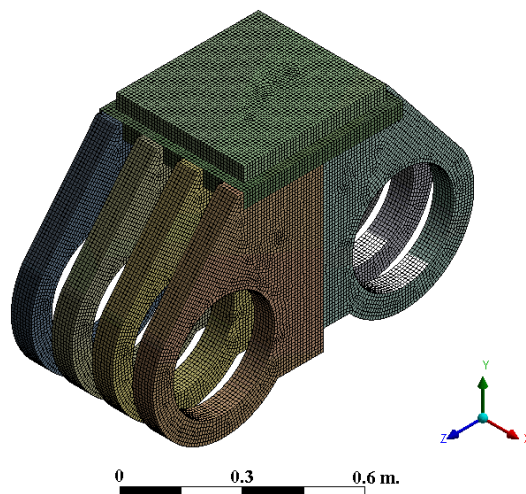


Figura 79. Malla de elementos finitos del eslabón de apoyo.

Tal y como se aprecia en la Figura 79, la malla utilizada es muy densa y regular. Debido al análisis individual de cada uno de los elementos finitos de la malla, la calidad de la optimización está notablemente condicionada por el tamaño del propio elemento. El modelo que se estudia posee una malla desarrollada mediante el método de mallado

“Hex Dominant” en el que se combinan varios tipos de elementos tanto para la geometría como para la reproducción posterior de los contactos. Los tipos de elementos utilizados son SOLID 95, CONTA 174, TARGE 170, SURF 154 y COMBIN 14, todos ellos formando una malla de 148003 elementos y 654382 nodos.

Las cargas aplicadas sobre este modelo numérico se muestran en la Figura 80.

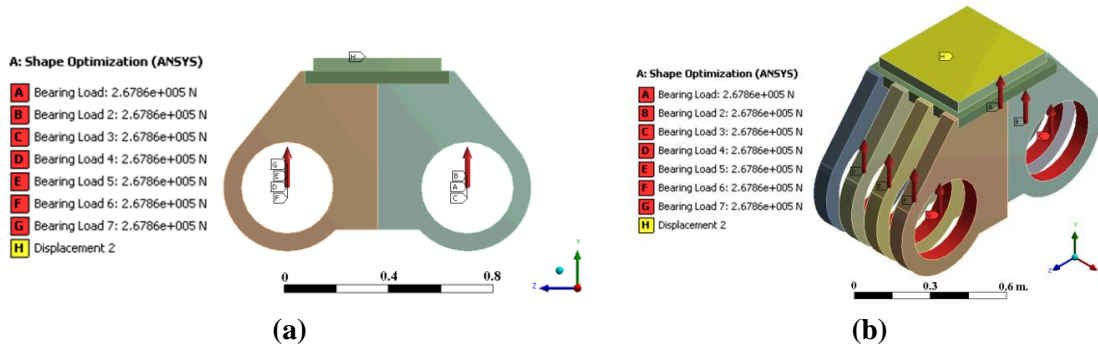


Figura 80. Cargas aplicadas: (a) vista frontal; (b) perspectiva isométrica.

Este problema no-lineal se resuelve mediante el método “*Newton-Raphson*” y se utiliza el algoritmo “*Augmented Lagrange*” para resolver los contactos. El problema requirió de cinco iteraciones, para lo que se emplearon 1015 segundos de CPU, y 3025 MB de memoria.

La solución obtenida para este problema se muestra en la Figura 81.

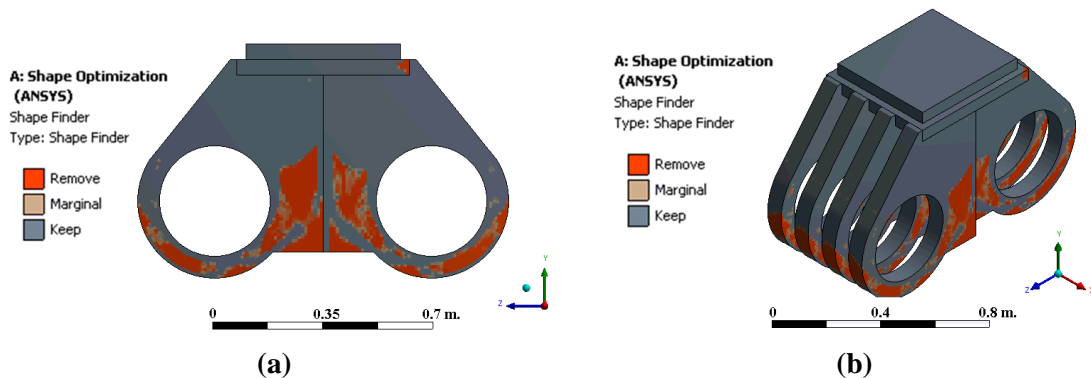


Figura 81. Resultados de la optimización topológica: (a) vista frontal; (b) perspectiva isométrica.

En los resultados obtenidos se aprecia cómo existen zonas que pueden ser eliminadas sin afectar a la capacidad resistente del elemento. En base a esta optimización se plantea una modificación de la forma de los eslabones de apoyo que permite un ahorro de tiempo y material sin afectar su capacidad resistente.

Este análisis de optimización de forma es completado con un análisis estático estructural mediante el cual es posible analizar el estado tensional del elemento después de la optimización. Los resultados obtenidos en este caso se muestran en la Figura 82.

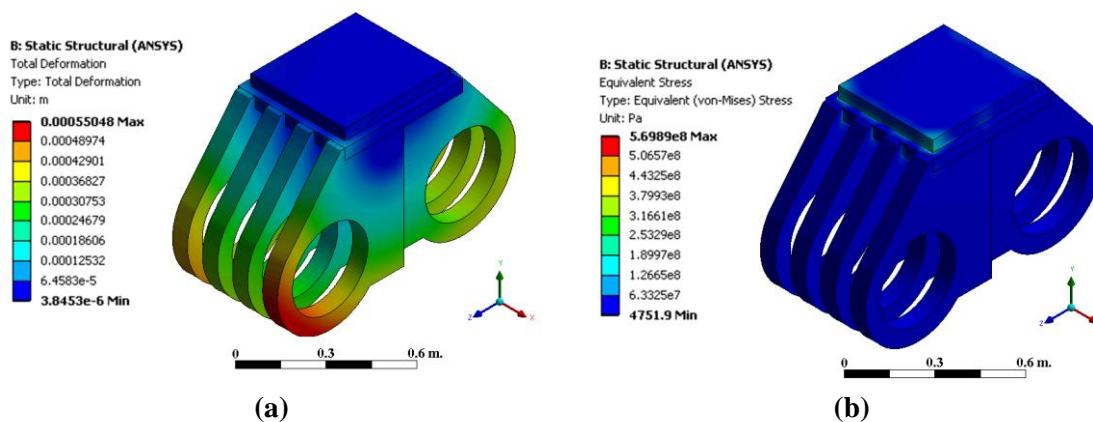


Figura 82. Resultados del análisis estructural estático: (a) deformación total; (b) tensión equivalente de Von-Mises.

5.5.2 Eslabones de la cadena de tracción

Los eslabones de la cadena de tracción son elementos resistentes sometidos a elevados esfuerzos debido a que son los encargados de soportar el tiro horizontal en la cadena, así como la tensión requerida en la misma durante su desplazamiento. Estos elementos se diseñan considerando el paso de la cadena y un espesor de chapa coherente con los elementos resistentes semejantes en el mecanismo, tales como los eslabones de apoyo.

Con el fin de mejorar el diseño inicial y disminuir los costes en la fabricación del mecanismo se realiza sobre los eslabones una optimización topológica con la que es posible modificar la forma de los mismos empleando menos material sin afectar a sus propiedades resistentes.

Esta optimización topológica se lleva a cabo sobre un modelo de elementos finitos. El modelo geométrico utilizado, ver Figura 83(a), se malla combinando elementos finitos tipo SOLID 95, SURF 154, COMBIN 14 generando una malla de 21267 elementos y 89375 nodos, ver Figura 83(b).

Las cargas aplicadas sobre el modelo son las representadas en la Figura 83(c). Por un lado, se aplica un soporte cilíndrico en uno de los huecos con el fin de mantener fijo ese extremo sin impedir su giro. Por otro lado, se aplica una fuerza horizontal en el otro extremo cuyo valor es equivalente al tiro en la cadena de transmisión con el fin de reproducir los esfuerzos de tracción a los que está sometido este elemento resistente.

Los resultados obtenidos en esta optimización topológica son mostrados en la Figura 83(d), donde se aprecia cómo se podría aligerar el eslabón en su zona central.

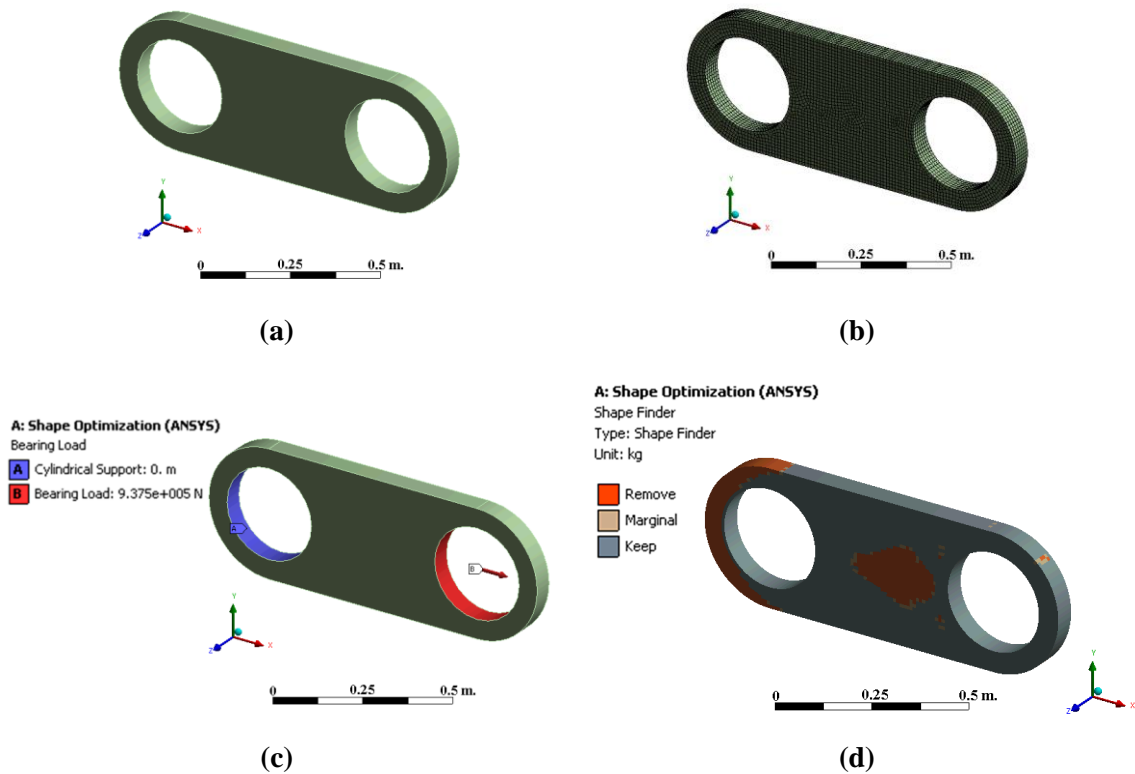


Figura 83. Modelo numérico de la optimización topológica: (a) modelo geométrico; (b) malla de elementos finitos; (c) condiciones de contorno; (d) resultados de la optimización.

Después de la optimización se realiza un análisis estático estructural mediante el FEM en el que se comprueba el estado tensional del elemento una vez optimizado. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 84.

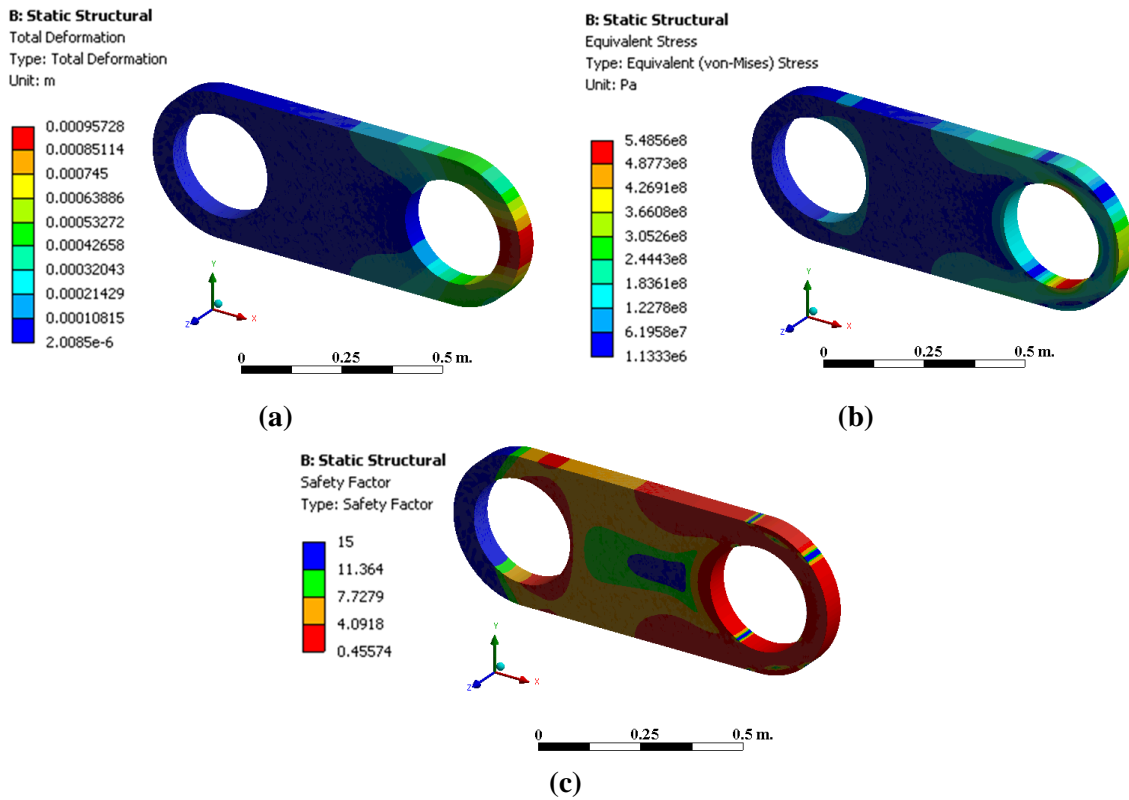


Figura 84. Resultados obtenidos en el análisis estático estructural del elemento optimizado: (a) deformación total; (b) tensión equivalente de Von-Mises; (c) factor de seguridad para el material de acero estructural.

6

Fabricación del prototipo a escala 1:15

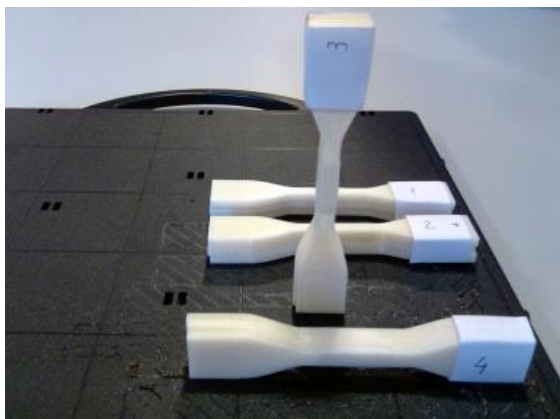
En el presente capítulo se realiza una descripción del prototipo a escala desarrollado en la presente tesis. Este prototipo permite comprobar el funcionamiento del mecanismo y sus principales elementos. Asimismo, es útil también para comprobar algunos de los estudios desarrollados mediante simulación numérica contrastando los resultados de estos con el comportamiento real del prototipo.

El prototipo realizado es desarrollado combinando principalmente dos técnicas: fabricación aditiva para la mayor parte de los elementos del dispositivo y mecanizado para otros.

6.1 Proceso de fabricación aditiva y materiales empleados

El proceso de fabricación aditiva, también conocido como impresión 3D es muy utilizado en el desarrollo de prototipos por su rapidez y capacidad de reproducir piezas de geometrías complejas sin dificultad. El proceso tiene lugar a partir de un archivo CAD que es analizado y estratificado. Esta técnica permite la fabricación de modelos tridimensionales depositando capas de material que serán perfectamente consolidadas. Esta técnica no requiere moldes ni utillajes, simplemente una base sobre la que se depositan las diferentes capas.

El prototipo desarrollado en la presente Tesis Doctoral es realizado con plástico ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno). Las piezas fabricadas mediante esta técnica están caracterizadas por su anisotropía que hace necesario estudiar su comportamiento en varias direcciones. Para ello, se ensayaron a tracción varias probetas fabricadas en cuatro direcciones diferentes. La caracterización de este material se llevó a cabo en base a la norma ISO 527: “*Plastics – Determination of tensile properties*” [76]. En la Figura 85(a) se muestran las probetas colocadas tal y como fueron fabricadas. En la Figura 85(b) se muestra una fotografía durante el ensayo a tracción de dichas probetas.



(a)



(b)

Figura 85. Ensayos de tracción del plástico de ABS: (a) probetas; (b) ensayo.

Los resultados obtenidos en estos ensayos son representados en la Figura 86. Se ensayaron tres probetas iguales con el fin de determinar un valor medio de resistencia a tracción. En las gráficas se muestra la poca variabilidad que existe entre las tres muestras.

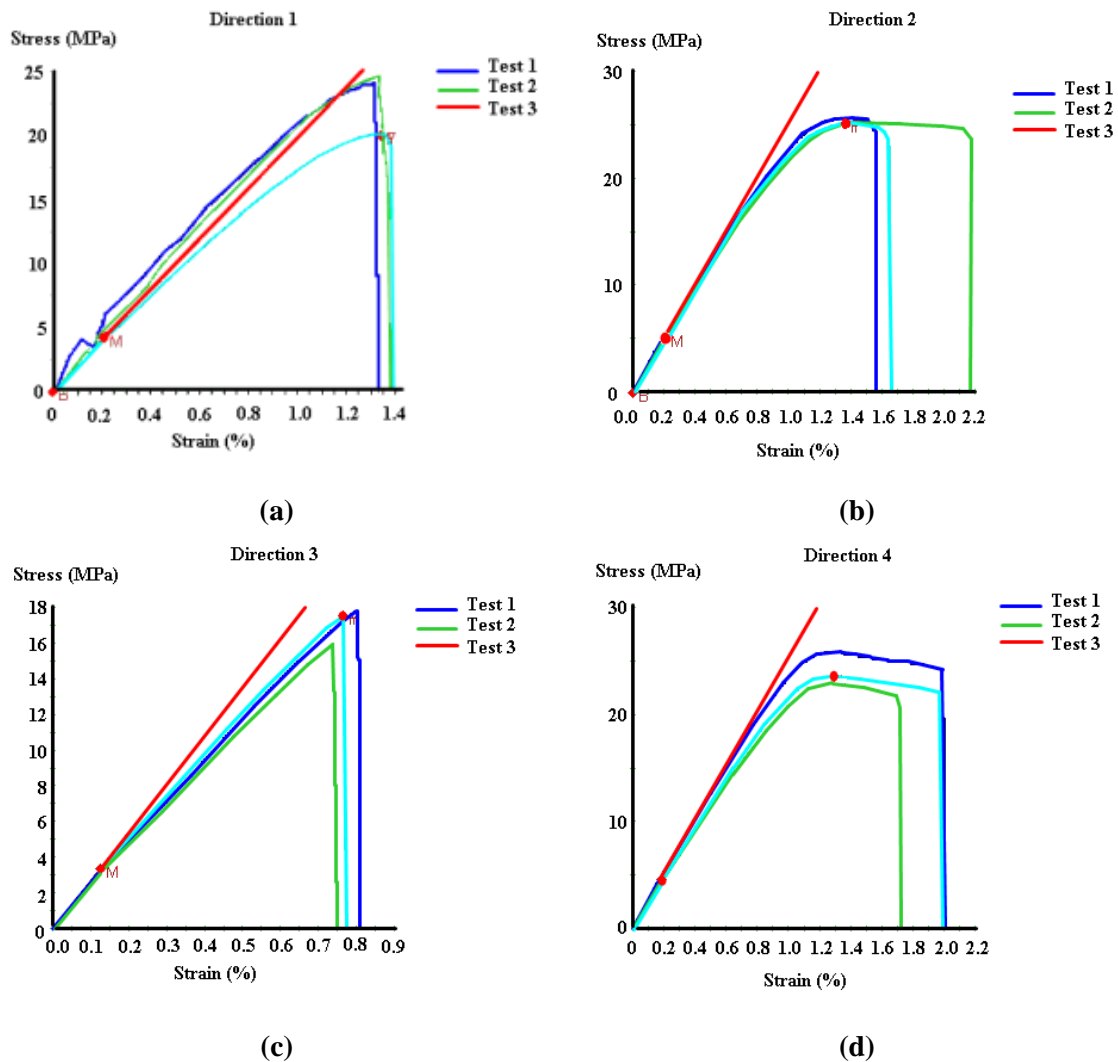


Figura 86. Resultados obtenidos en los ensayos de tracción sobre probetas normalizadas de plástico ABS.

La dirección 3 posee menor resistencia a tracción que las demás, cuyos valores se encuentran alrededor de los 25 MPa. Esto parece coherente, puesto que en este caso, la fuerza de tracción ejercida es aplicada perpendicularmente a las capas de adherencia entre capas. Por este motivo, la dirección 3 de adición de material en la máquina de fabricación aditiva se descarta para llevar a cabo la fabricación de las piezas por prototipado.

En resumen, a partir de los ensayos efectuados, podemos considerar los siguientes valores elásticos para el material analizado:

Tabla 17. Valores obtenidos en los ensayos de tracción sobre las probetas de ABS.

	Dirección 1	Dirección 2	Dirección 3	Dirección 4
Módulo Elástico, E [MPa]	2552.64	2560.569	2596.99	2574.08
Resistencia a tracción [MPa]	24	25	18	24

6.2 Desarrollo del prototipo a escala 1:15

El desarrollo de un prototipo a escala del modelo real permite realizar estudios sobre el comportamiento real del mecanismo y con ello, identificar algunos de los problemas que en estudios teóricos no son detectados pero que tienen lugar durante el funcionamiento real del dispositivo.

El prototipo es realizado a escala 1:15 con el fin de obtener un mecanismo cuyas dimensiones sean aceptables para fabricar la mayoría de sus elementos mediante prototipado. Además, esta escala permite el desarrollo de ensayos sobre este dispositivo a un tamaño suficiente como para reproducir de manera fiable el comportamiento real del conjunto puente – mecanismo. Además del prototipo a escala del mecanismo de empuje, también se lleva a cabo un modelo escalado de la estructura metálica del puente a desplazar, ver Figura 87. De este modo, los ensayos a realizar permitirán el estudio del comportamiento del mecanismo, del procedimiento de lanzamiento y de la interacción entre ambos.



Figura 87. Montaje de 4 m. del prototipo del puente: (a) canto; (b) vista longitudinal.

La técnica de fabricación aditiva fue seleccionada por su rapidez e idoneidad para aquellos elementos del mecanismo cuya geometría no es sencilla, como por ejemplo las ruedas dentadas. Además, el material utilizado por esta técnica es ligero a la vez que resistente. Los elementos elaborados mediante prototipado son los siguientes:

- Ruedas dentadas.
- Eslabones de la cadena de transmisión.
- Eslabones de la cadena de apoyo.
- Soporte exterior del mecanismo.

En la Figura 88(a) se muestra una fotografía de la bandeja de salida en la que se ubican un conjunto de eslabones de la cadena de tracción. Estos elementos se fabricaron

mediante la adición de material sobre estas bandejas soporte. Posteriormente, es necesario limpiar el material sobrante que permite sujetar las piezas mediante un tratamiento ácido. En la Figura 88(b) se muestran los eslabones de apoyo durante su fabricación.

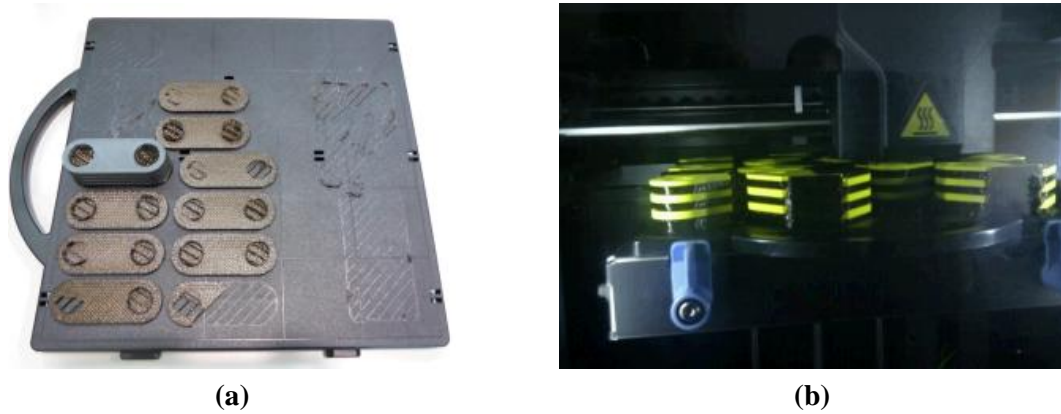


Figura 88. Técnica de fabricación aditiva: (a) eslabones de la cadena de transmisión; (b) eslabones de apoyo durante su proceso de fabricación.

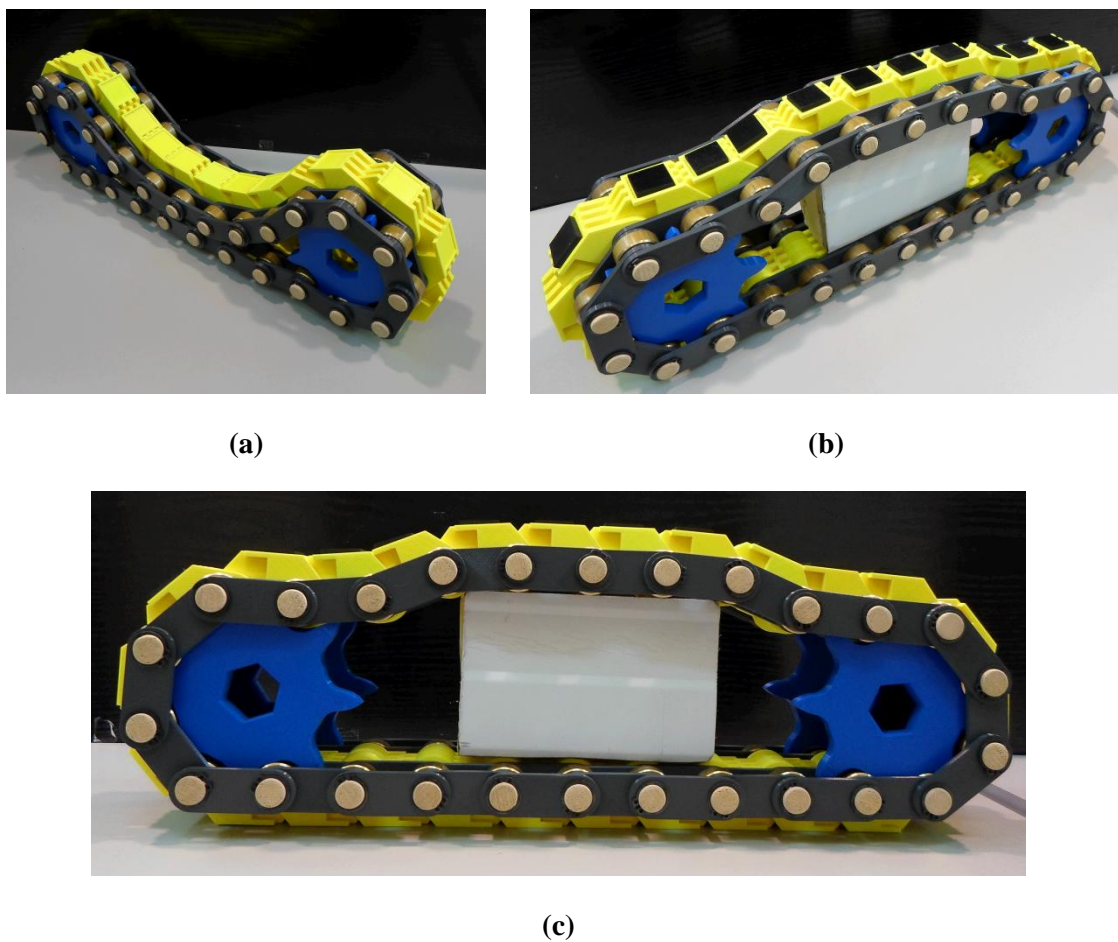


Figura 89. Principales elementos del ensamblaje del prototipo a escala 1:5

Los eslabones de apoyo y los eslabones de la cadena de transmisión se ensamblaron mediante bulones de madera que aportan rigidez al conjunto sin añadir mucho peso. Los rodillos de la cadena de transmisión que encajan en los extremos de los bulones y permiten el engrane de dicha cadena en las ruedas dentadas se fabricaron mediante mecanizado a partir de una barra maciza. Estos elementos principales del prototipo se aprecian ensamblados en la Figura 89.

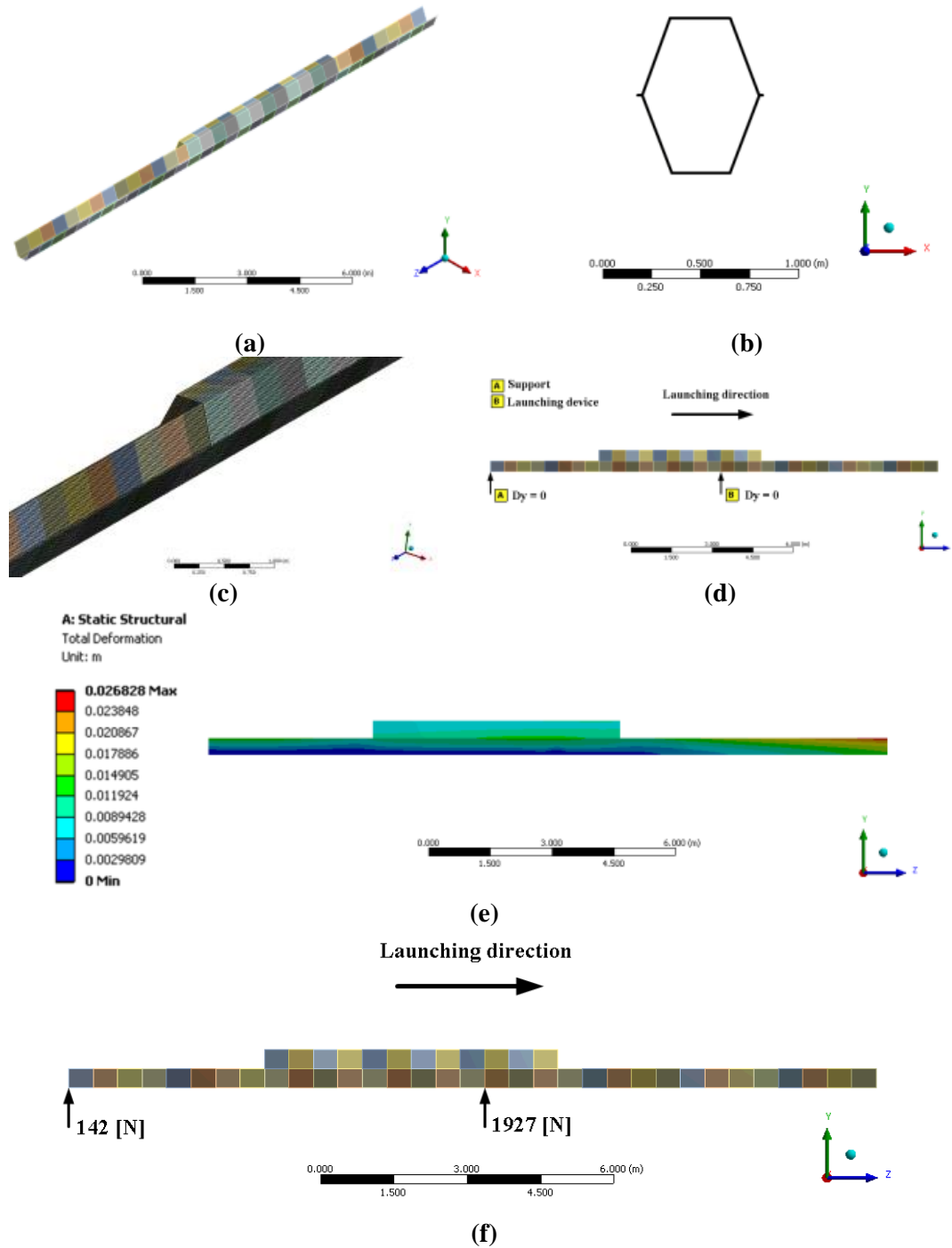


Figura 90. Modelo numérico de la estructura del tablero del puente a escala 1:15: (a) modelo geométrico; (b) canto del modelo; (c) malla de elementos finitos; (d) condiciones de contorno; (e) deformación total; (f) reacciones obtenidas.

El modelo escalado de la estructura del puente es desarrollado mediante chapa de acero de un 1 mm de espesor. La longitud total de esta estructura es 18 m, siendo un conjunto de chapas de 1 m unidas entre sí. La carga normal máxima ejercida por esta estructura sobre el mecanismo de empuje es obtenida mediante un modelo numérico sencillo de elementos finitos en el que se calculan los esfuerzos en la estructura metálica para la situación de lanzamiento más desfavorable. Este modelo numérico es ilustrado en la Figura 90.

En base al modelo numérico, es posible calcular el par motor requerido por los accionamientos del mecanismo de empuje en los ensayos a realizar. En este caso, la reacción máxima ejercida por la estructura metálica del tablero es 1927 N. En el caso de los ensayos sobre los prototipos a escala, el lanzamiento se llevará a cabo por dos mecanismos de empuje dispuestos bajo las almas de la estructura. Considerando un coeficiente de fricción mínimo de 0.5 la fuerza de lanzamiento máxima es obtenida según la ecuación 30:

$$F_H = F_N \cdot \mu \qquad F_H = 1927 \cdot 0.5 = 963.5 [N] \qquad (30)$$

$$F_H / \text{dispositivo} = 963.5 / 2 = 481.75 [N]$$

Sabiendo la fuerza de empuje que le corresponde a cada dispositivo y el radio de la rueda dentada que es la encargada de transmitir el empuje gracias al par del accionamiento, es posible obtener el par máximo requerido por los motores, ver ecuación 31:

$$\text{Par motor} = F_H \cdot d_s \qquad \text{Par motor} = 481.75 \cdot 0.06 = 28.905 [N \cdot m] \qquad (31)$$

Debido al alto par requerido y a las bajas velocidades lineales a las que se debe desarrollar el lanzamiento, se recurre a un conjunto motor-reductor. La solución adoptada es utilizar un motor-reductor por mecanismo, de manera que sólo un eje es tractor. En el otro eje se ubicará un soporte de rodamiento tensor con el que es posible controlar la tensión en la cadena. Los motores son de tipo *brushless*, adquiridos en MAXON MOTOR©, cuyas características son mostradas en la Figura 91.

Motor Data (provisional)		
Values at nominal voltage		
1 Nominal voltage	V	24
2 No load speed	rpm	6110
3 No load current	mA	234
4 Nominal speed	rpm	4860
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	128
6 Nominal current (max. continuous current)	A	3.21
7 Stall torque	mNm	1150
8 Starting current	A	39.5
9 Max. efficiency	%	85
Characteristics		
10 Terminal resistance phase to phase	Ω	0.608
11 Terminal inductance phase to phase	mH	0.463
12 Torque constant	mNm / A	36.9
13 Speed constant	rpm / V	259
14 Speed / torque gradient	rpm / mNm	4.26
15 Mechanical time constant	ms	8.07
16 Rotor inertia	gcm ²	181

Figura 91. Características técnicas del motor utilizado como accionamiento del prototipo.

El reductor acoplado a este motor permite una reducción de 230:1 respondiendo a los requerimientos del lanzamiento a realizar. El motor es mostrado en la Figura 94(a).

En este dispositivo se incorporan también rodamientos y soportes para los mismos, ver Figura 94(b). Los soportes del eje de transmisión en los que se ubica el motor son soportes de rodamiento de acero inoxidable cuya geometría es indicada en la Figura 92. Sin embargo, los soportes utilizados en los ejes no tractores son soportes tensores que permite tensar la cadena modificando la distancia entre los ejes de la misma. La geometría de estos apoyos así como sus dimensiones principales son identificadas en la Figura 93.

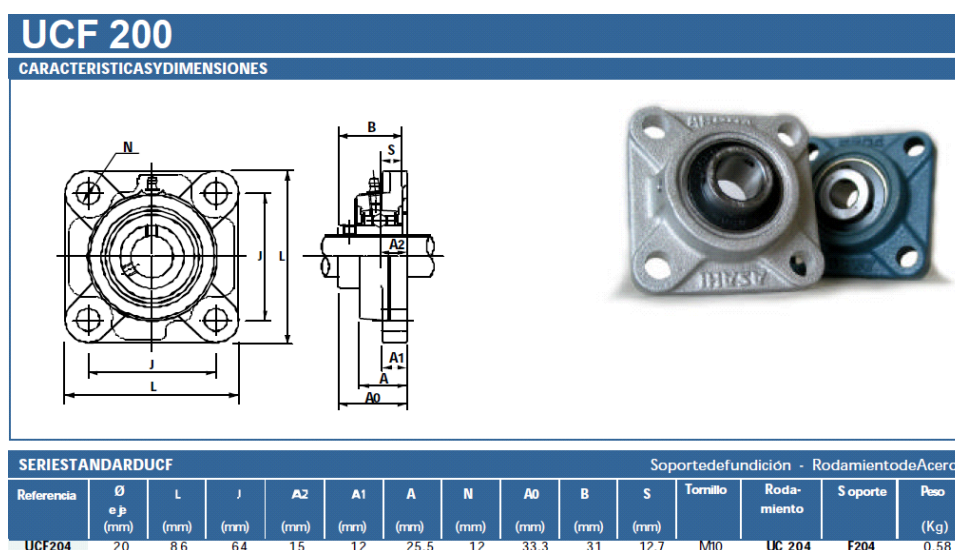


Figura 92. Soportes de los rodamientos utilizados en los ejes tractores.

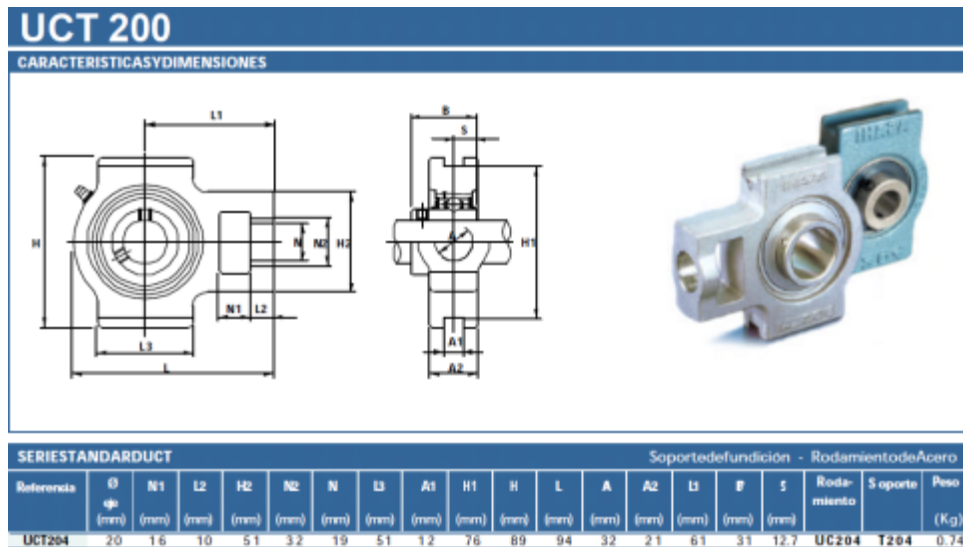


Figura 93. Soportes tensores utilizados en los ejes no tractores.



Figura 94. Elementos del prototipo del mecanismo: (a) motor; (b) soportes de los rodamientos de los ejes de transmisión.

Por último, se incorporarán sensores al prototipo del mecanismo de empuje con el fin de obtener esfuerzos durante los ensayos a realizar con la maqueta metálica del puente. Los sensores utilizados son de dos tipos, ver Figura 95:

- Sensores de presión, ubicados debajo de las placas de apoyo, que proporcionan el valor de la fuerza media ejercida sobre su superficie. En este caso, se utilizarán cuatro sensores para los cuatro eslabones de apoyo en cada mecanismo de empuje.
- Sensores de carga, ubicados en el dispositivo de compensación de carga que permiten obtener la reacción del puente sobre el dispositivo. Están formados por dos células de carga de 200 Kg que permitirán obtener la carga total.

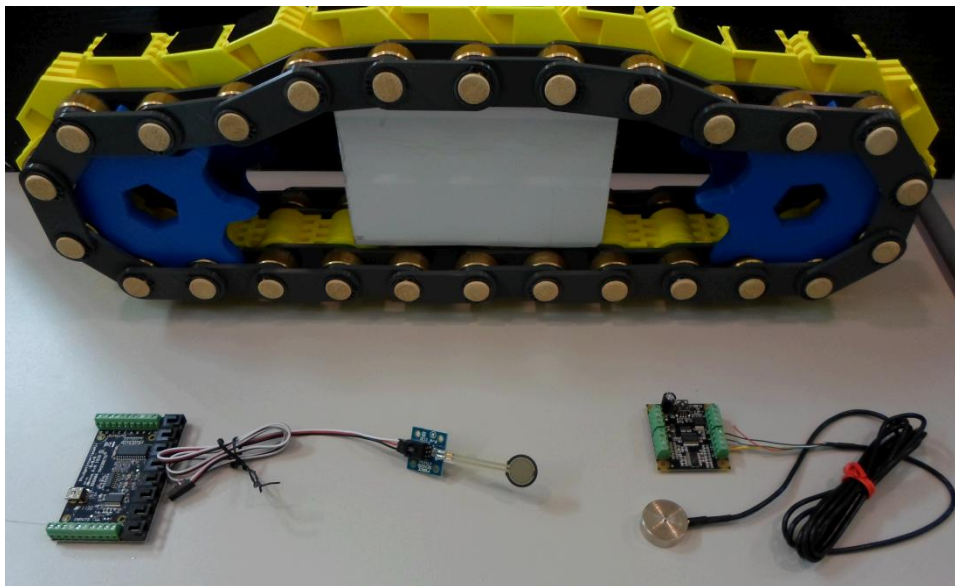


Figura 95. Sensores para los ensayos del prototipo a escala 1:15.

A los elementos comentados anteriormente es necesario añadir un soporte en poliamida que permitirá sujetar todo el ensamblaje durante su funcionamiento. Para ello, la empresa *TALLERES PLA S.L.*, se encuentra desarrollando mediante mecanizado un soporte rígido y resistente que albergue todo el mecanismo y permita su fijación.

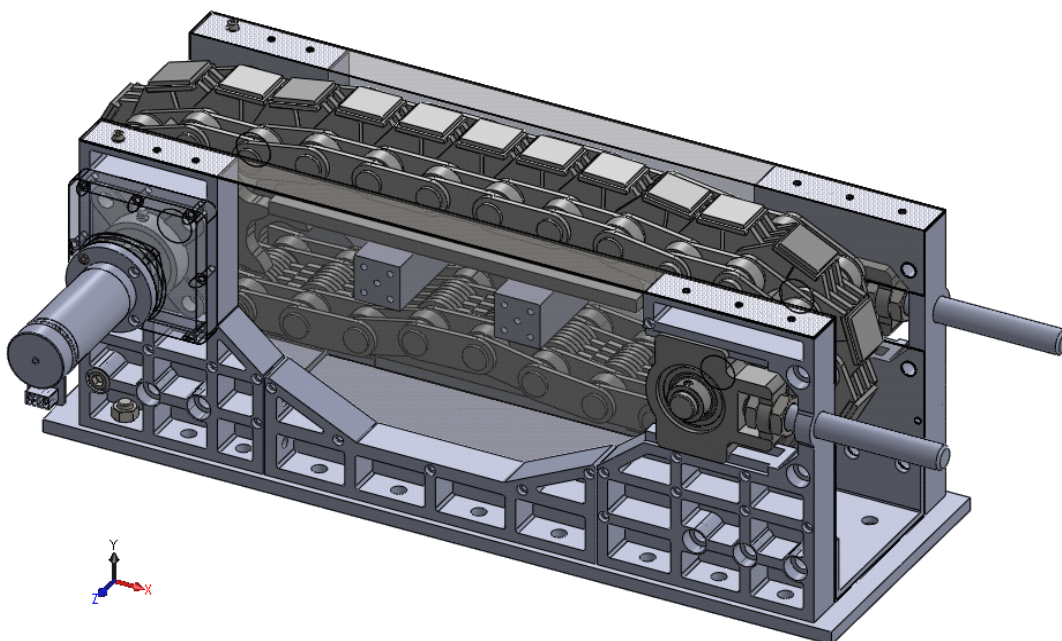


Figura 96. Modelo tridimensional del prototipo a escala 1:15.

Se prevé finalizar el conjunto en el mes de Julio de 2013, con el fin de comenzar los ensayos con la maqueta de puente metálico en ese mismo mes.

7

Conclusiones y líneas futuras de investigación

En este capítulo se exponen las conclusiones de esta Tesis Doctoral y se proponen algunas de las líneas futuras de investigación que quedan abiertas tras la finalización del presente. Asimismo, en este capítulo se indican también las que han sido las primeras tareas de divulgación de los conocimientos adquiridos en esta Tesis Doctoral, así como algunos que están en curso.

7.1 Conclusiones

Las conclusiones de esta Tesis Doctoral son presentadas en varios puntos:

- conclusiones del estado del arte realizado.
- conclusiones relativas a los estudios sobre materiales.
- conclusiones de la fase de diseño del nuevo mecanismo de empuje.
- conclusiones relativas al uso de las herramientas de simulación numérica y diseño empleadas.
- finalmente las conclusiones generales.

En la revisión del estado del arte queda constatado que el método constructivo basado en el empuje de grandes estructuras, tales como los puentes, es muy importante hoy en día. En especial, en aquellos casos donde la orografía del terreno es compleja, no es posible utilizar apoyos intermedios, se requiere superar grandes luces, etc. La mejora de los procedimientos constructivos es un reclamo de las empresas del sector en los últimos años, y todas ellas comparten el interés por el desarrollo de nuevos procedimientos más seguros, eficaces y sostenibles que los actuales.

A pesar de las grandes ventajas que tienen estos sistemas constructivos también poseen importantes necesidades que deben ser solventadas. El sector, actualmente afectado por la crisis económica global que está teniendo lugar, se expande hacia países en vías de desarrollo en los que existe la imperiosa necesidad de mejorar las comunicaciones, a pesar de la limitación de los recursos o de la protección de los entornos, entre otras dificultades. En este sentido, el estado del arte de esta Tesis Doctoral concluye con las siguientes necesidades que deben ser solventadas, con el fin de promover la construcción y rentabilizar los procedimientos:

- Es necesario mejorar la eficiencia de los sistemas de empuje actuales, dado que éstos poseen importantes tiempos muertos que alargan el tiempo de ejecución de la obra.
- Las exigencias, cada vez mayores, de la normativa relativa al impacto medioambiental de las obras civiles obligan a evolucionar las técnicas actuales con el objetivo de desarrollar procedimientos constructivos más sostenibles y menos lesivos para el entorno.
- En esta línea de sostenibilidad, tras el análisis de las técnicas actuales se aprecia que un número importante de los elementos auxiliares utilizados en las obras no son reutilizados, puesto que son desarrollados para trabajar en condiciones específicas. En algunas ocasiones, los elementos se reciclan o se utilizan para otros propósitos, mientras que en otras, simplemente se desechan. La actual concienciación social con el ecosistema es crítica con estos hábitos e incorpora la reducción del impacto ambiental en todas las nuevas líneas de investigación.
- En la última década se han producido accidentes mortales que han originado preocupación entre las empresas de construcción. Después de un estudio en profundidad de los métodos actuales de puentes empujados se extraen dos conclusiones principales: por un lado, el mayor número de accidentes tienen lugar durante su ejecución y no en servicio; por otro lado, los sistemas de control y seguridad actuales son medios auxiliares añadidos a los sistemas de empuje, no existiendo un método de seguridad activo incorporado en el propio dispositivo de empuje. Esto último supone un sobre coste adicional y una dificultad añadida al procedimiento.

- Los métodos actuales de empuje de puentes son conceptualmente diseñados para desplazar la estructura en una sola dirección. Desde el punto de vista de la ejecución, existen ciertas situaciones, tales como las adversidades meteorológicas, el riesgo de sobrecarga, la oscuridad, etc., en las que es necesario detener y retroceder. Los sistemas actuales deben recurrir a medios auxiliares que, además de suponer un importante coste adicional, ralentizan notablemente el proceso. Es una necesidad por tanto, el desarrollo de nuevos sistemas bidireccionales capaces de desplazar la estructura en ambos sentidos, avance y retroceso.

Del exhaustivo análisis realizado sobre los materiales estudiados en esta Tesis Doctoral se extraen las siguientes conclusiones:

- Los valores del coeficiente de fricción entre los elastómeros y el acero estructural son suficientemente elevados como para desarrollar el empuje de estructuras pesadas por fricción. En esta Tesis se estudiaron dos tipos de elastómeros, Natural Ruber (NR) y Neopreno (CR), con dos durezas shore diferentes para cada uno de ellos, NR60, NR50, CR60 y CR45 y bajo diferentes condiciones de envejecimiento. El coeficiente de fricción obtenido en todos los ensayos siempre ha sido superior a 0.5. Se comprueba también cómo este coeficiente no es constante, tal y como ocurre entre metales, presentando un fuerte comportamiento no lineal dependiente de la velocidad, la carga normal y la temperatura.
- Los resultados obtenidos de los ensayos realizados mediante la técnica *pin-on-disc* muestran una clara tendencia en el comportamiento friccional de los elastómeros CR sobre los aceros estudiados. Esta tendencia hace posible obtener una ley de comportamiento que representa la influencia de la carga normal y la velocidad en el coeficiente de fricción en el rango estudiado. Por el contrario, esto no fue posible en el caso del elastómero tipo NR cuyos resultados carecen de uniformidad y no existe una tendencia evidente en el comportamiento friccional. Por este motivo, en este caso no fue posible extraer una ley de comportamiento en función de la carga normal y la velocidad.
- Se realizaron varios ensayos de envejecimiento de las probetas de elastómeros con el fin de estudiar las variaciones de sus propiedades. Se comprobó que el envejecimiento de las gomas estudiadas apenas repercute en sus propiedades de fricción y su comportamiento a compresión.
- El material con el que se fabricaron los elementos principales del prototipo se ensayó a partir de probetas de tracción normalizadas. Estos elementos deben soportar importantes esfuerzos, por lo que se comprueba experimentalmente la resistencia del material utilizado, plástico ABS. Se realizaron varias probetas de tracción normalizadas mediante fabricación aditiva en las tres direcciones

espaciales, con el fin de comprobar la anisotropía del material. Las conclusiones obtenidas a partir de los ensayos realizados son: por un lado, la dirección de deposición del material influye en la resistencia a tracción del mismo; por otro, las probetas son suficientemente resistentes como para soportar los esfuerzos a los que están sometidos los elementos principales del mecanismo durante el empuje mediante fricción detectando dos de las direcciones más resistentes que otras (probetas tipo 2 y probetas tipo 4, ver apartado 6.1).

La fase de diseño de esta Tesis Doctoral demuestra que las ideas innovadoras y originales objeto de patente surgen de un proceso de aprendizaje y desarrollo en el que se combina la experiencia con el estudio en profundidad del estado de la técnica actual. Con respecto a las herramientas utilizadas para el diseño se destaca:

- La herramienta de evaluación de alternativas mediante criterios de diseño, ELECTRA, permite la selección de una de las soluciones propuestas de manera objetiva y fiable.
- Las herramientas CAD (Computer Aided Design) permiten realizar modelos geométricos paramétricos que pueden ser modificados con facilidad debido a la relación que mantienen los componentes de un conjunto. Es una herramienta muy eficaz cuando se evoluciona un modelo geométrico detallado a partir de otro inicial, tal y como es el caso de esta Tesis Doctoral, en la que se desarrollan las ideas iniciales utilizados en las patentes.
- Las herramientas CAD son muy útiles para combinar modelos geométricos complejos y análisis numéricos mediante elementos finitos de dichas geometrías.

Del uso de la simulación numérica mediante elementos finitos como herramienta de análisis, cálculo y optimización, mediante los programas ANSYS® y Solidworks®, se extraen las siguientes conclusiones:

- La simulación numérica mediante elementos finitos es una buena herramienta de cálculo y estudio de mecanismos complejos, como el desarrollado en la presente Tesis Doctoral, puesto que los resultados obtenidos en las simulaciones se ajustan a las respuestas reales.
- La experiencia del investigador en el trabajo con herramientas de simulación es muy importante a la hora de realizar un análisis profundo de los resultados, así como una interpretación objetiva de los mismos. La simulación numérica puede dar lugar a resultados erróneos que en ocasiones no son evidentes.
- Los cálculos estructurales realizados mediante la mecánica clásica verifican los desarrollados mediante técnicas numéricas por el método de los elementos finitos (FEM).

- La sub-estructuración permitió estudiar la interacción estructural entre el tablero y el mecanismo de empuje, reduciendo el modelo numérico global del puente de doble cajón a un solo elemento finito – el superelemento - de múltiples grados de libertad en unos nodos máster, los cuales son conectados con el modelo numérico del mecanismo de empuje. Mediante esta técnica es posible abordar el estudio de problemas no lineales complejos.
- De la interacción estructural estudiada en esta Tesis aplicando la técnica anterior se ha comprobado que los modelos numéricos se encuentran en equilibrio y trabajando correctamente. Estos modelos permiten comprobar cómo afecta el comportamiento estructural del puente al mecanismo de empuje, y viceversa, durante todas las fases del proceso de lanzamiento estudiadas.
- Las simulaciones cinemáticas son útiles para estudiar y reproducir el comportamiento mecánico de cuerpos en movimiento que interactúan entre sí. En esta Tesis Doctoral se utilizó la simulación cinemática para estudiar el comportamiento de los componentes del dispositivo de empuje cuando este se encuentra en movimiento. El contacto múltiple entre cuerpos se reproduce de manera correcta consiguiendo la transmisión de esfuerzos entre los diferentes elementos del mecanismo. Los eslabones de apoyo son capaces de soportar la elevada carga vertical mientras son desplazados horizontalmente por la cadena de tracción que es accionada por los piñones. Se demuestra también que los esfuerzos sobre los dientes de las ruedas dentadas son admisibles durante todo el proceso de lanzamiento estudiado.

Como conclusiones generales se finaliza comentando que el mecanismo de empuje continuo diseñado en esta Tesis Doctoral consigue los propósitos inicialmente planteados: empuje continuo y bidireccional de estructuras pesadas, adaptándose a la deformada de las mismas y permitiendo la reutilización del mecanismo completo en otros usos. El mecanismo diseñado, es modular y puede ser utilizado individualmente o agrupado en función de las necesidades siempre y cuando se respeten los límites admisibles por dispositivo, carga normal máxima de $7.5 \cdot 10^6$ N por dispositivo de empuje. El mecanismo es apto también para todas aquellas tipologías de estructuras que permitan el contacto superficial para desarrollar la fuerza de fricción.

Se demuestra mediante la simulación numérica de la interacción estructural que para diferentes fases del proceso de lanzamiento la distribución de carga entre los eslabones de apoyo no es uniforme. Se comprueba cómo el sistema de compensación de carga diseñado es capaz de suministrar la reacción necesaria a cada uno de los eslabones de apoyo para adaptarlos a la deformada de la estructura. Y se aprecia que la técnica de sub-estructuración es muy útil para combinar problemas numéricos con muchos grados de libertad, puesto que permite la simplificación de varios problemas complejos y el estudio de la influencia entre ellos.

En esta Tesis Doctoral, se pone de manifiesto que la combinación de las herramientas CAD, con la simulación numérica por elementos finitos y los ensayos experimentales componen una metodología útil y eficaz en diseño, cálculo y análisis de problemas complejos, como es en este caso el desarrollo de un nuevo procedimiento de lanzamiento de puentes mediante un nuevo dispositivo de empuje por fricción continuo y bidireccional.

7.2 Líneas futuras

Las líneas futuras que quedan abiertas en esta Tesis Doctoral son indicadas a continuación:

- El prototipo a escala que ha sido desarrollado en esta Tesis Doctoral será ensayado junto con el prototipo de la estructura metálica a desplazar, también a escala. Se prevé realizar estos ensayos en los próximos meses en los laboratorios del Grupo de Investigación GICONSIME de la Universidad de Oviedo. En ellos, será posible estudiar el funcionamiento del mecanismo diseñado así como la interacción entre el puente y el mismo y diferentes procedimientos de lanzamiento. Estos ensayos, además de contribuir notablemente en el desarrollo de un futuro prototipo a tamaño real, suponen una importante aportación a estudios sobre métodos de construcción de puentes. Asimismo, se propone también realizar ensayos del nuevo procedimiento de lanzamiento utilizando el prototipo del mecanismo de lanzamiento y el prototipo del puente. En estos últimos, sería posible estudiar importantes aspectos como los apoyos en el parque de fabricación, la deformación del puente durante el lanzamiento, reacciones máximas y mínimas sobre el dispositivo de empuje, entre otros.
- Una de las líneas que se propone, es emplear los modelos numéricos obtenidos en la presente Tesis Doctoral para estudiar la aplicación de este nuevo mecanismo de empuje de puentes a obras conocidas y ejecutadas. En base a esto, será posible realizar una comparación objetiva entre los sistemas actuales y las ventajas que supondría utilizar el nuevo dispositivo. Al mismo tiempo, será posible extraer datos de viabilidad económica, amortización y rentabilidad.
- A pesar de que el dispositivo actual fue desarrollado para el empuje por fricción entre elastómeros y acero, como línea de investigación futura se plantea la posibilidad de ampliar su aplicación a otros materiales, tanto para la estructura del puente, como para las placas de apoyo del dispositivo. El mecanismo de empuje podría ser utilizado en el lanzamiento de puentes de hormigón, así como otros materiales menos frecuentes que comenzaron a ser utilizados en los últimos años, tales como polímeros reforzados con fibra de carbono, etc. En el

campo de la tribología existe una amplia línea de investigación que puede ser desarrollada a partir de este dispositivo.

- Relativo a los materiales, también se proponen un estudio en profundidad de los elastómeros analizados con el fin de caracterizar los mismos. De este modo, será posible realizar modelos numéricos en los que intervengan las no-linealidades debidas al material, así como modelos de las placas de apoyo zunchado compuestas por neopreno y láminas de acero. La caracterización de los elastómeros permitiría el desarrollo de modelos numéricos validados que consideren las propiedades del material hiperelástico.

7.3 Divulgación

La divulgación de las tareas desarrolladas en esta Tesis Doctoral y sus resultados se ha realizado principalmente a través de congresos, conferencias y publicaciones:

- “*Nuevos sistema de lanzamiento de puentes basado en doble cajón colaborante*” presentado en las Jornadas Internacionales de Investigación en Construcción. Madrid. Noviembre 2011. ISSN/ISBN 84-7292-401-7.
- “*Numerical analysis of a new continuous and bidirectional launching bridge device: contact-friction phenomenon*” presentado en Mechanical Engineering Tribology Laboratory(METL) Advisory Committee Meeting. Purdue University, IN, USA. Noviembre 2012.
- Navarro-Manso A., del Coz Díaz J.J., Alonso-Martinez M., Castro-Fresno D., Blanco-Fernandez E. “*New launching method for steel bridges based on a self supporting deck system: FEM and DOE analysis*”. Automation in Construction. Julio 2012. Under review.
- “Structural interaction analysis between the bridge and a new bidirectional and continuous launching device.” Engineering Structures. In progress.
- “Non linear FEM analysis of a new bidirectional and continuous launching bridge device”. Automation in Construction. In progress.

Asimismo, este nuevo mecanismo de empuje, tal y como ya se ha comentado en el presente documento fue patentado como Patente Nacional e Internacional, ver ANEXO I y ANEXO II, lo cual es un importante indicativo de la originalidad y capacidad innovadora de esta Tesis. Estas patentes fueron presentadas al Certamen Universitario Arquímedes 2012, habiendo obtenido el 1^o Premio en la categoría de Ingeniería e Arquitectura.

Por otro lado, la autora de esta Tesis Doctoral ha estado trabajando para los grupos de investigación GITECO y GICONSIME desde Enero del 2011. Desde entonces ha tenido oportunidad de colaborar con investigadores de prestigio en el campo de la

Ingeniería de la Construcción, la Ingeniería Civil y la Ingeniería Mecánica y como resultado de las mismas también han surgido participaciones en congresos y publicaciones de artículos en revistas indexadas:

- Castro-Fresno D., del Coz Díaz J.J., Alonso-Martinez M., Blanco-Fernandez E., Polanco Madrazo J.A., “*Numerical and experimental study of a new type of clip for joining cables*”. Engineering Structures 2012. 44: 107-121.
- “*Hygrothermal properties of lightweight aggregate concrete and their influence in a new hollow block manufacturing*”. 4th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management. Mérida. Mayo 2011. ISBN: 978-84-9978-014-6
- del Coz Diaz J.J., Garcia Nieto P.J., Vilan Vilan J.A., Alvarez Rabanal F.P., Navarro Manso A., Alonso Martínez M. “*Nonlinear analysis of the pressure field in industrial buildings with curved metallic roofs due to the wind effect by FEM*”. Applied Mathematics and Computation. April 2012. R1
- Alonso-Martinez M., Navarro Manso A., Castro-Fresno D., Alvarez Rabanal F.P., del Coz Díaz J.J. “*Particle collection efficiency of a new urban sustainable gravity settler: numerical analyses and experimental study*”. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. April 2013. Under review.
- Alvarez Rabanal F.P., Gencel O., García Nieto P.J., Alonso Martinez M., Navarro Manso A., del Coz Diaz J.J. “*Hygrothermal study of lightweight concrete hollow bricks: a new experimental and numerical procedure.*” Energy and Buildings. April 2013. Under review.

Thesis summary

**NEW DEVICE FOR CONTINUOUS LAUNCHING OF
BRIDGE STRUCTURES: DESIGN AND ANALYSIS USING
NUMERICAL SIMULATION.**

FIGURE INDEX

Figure 1. Launching method procedure: (a) launching method and auxiliary systems; (b) Incremental Launching Method diagram.	154
Figure 2. Placing of bridge structure using railway.	155
Figure 3. Full span precast erection using carriers: (a) Taiwan High Speed Contract C210-2015 by VSL; (b) Taiwan High Speed Contract C260-270 by Continental Engineering Corp.....	156
Figure 4. Öresund bridge (Sweden – Denmark): (a) photograph of ship which is carrying bridge structure during its construction; (b) photograph of final bridge in service.	156
Figure 5. Process of launching jacks technique.	157
Figure 6. Tow System using cable.	157
Figure 7. Collapses during bridge construction in Spain: (a) Almuñecar, Granada. 2005 where eight workers dead; (b) Puebla, Zaragoza 2012, where there were not death.	160
Figure 8. Tow System using cable.	160
Figure 9. Track crawlers: (a) adjusted to irregular surfaces; (b) track crawler as support of heavy cranes.	161
Figure 10. Main areas of launching process in the worst load conditions for launching device.	163
Figure 11. Launching phases studied.	164
Figure 12. Main components of launching device, pictures from DCACLM patent: (a) isometric perspective; (b) frontal view.	164
Figure 13. <i>Pin-on-disc</i> test: (a) schematic diagram of pin-on-disk test; (b) cross-sections of pin shapes.	166
Figure 14. Photos from actual pin on disk tests at Purdue University	167
Figure 15. Pin-on-disk results for CR60 on smooth steel disk (CR60_1) for different conditions of normal load and velocity.....	170

Figure 16. COF value as function of normal load and velocity for CR60: (a) and (b) on smooth disk, S1; (c) and (d) on rough disk, S2.....	171
Figure 17. COF value as function of normal load and velocity for CR45: (a) and (b) on smooth disk, S1; (c) and (d) on rough disk, S2.....	171
Figure 18. COF value as function of normal load and velocity for NR60: (a) and (b) on smooth disk, S1; (c) and (d) on rough disk, S2.....	172
Figure 19. COF value as function of normal load and velocity for NR50: (a) and (b) on smooth disk, S1; (c) and (d) on rough disk, S2.....	172
Figure 20. Surface representation of COF as function of two variables load, (N) and velocity (v).....	173
Figure 21. Procedure of design of tridimensional geometric model of mechanism: (a) initial sketch; (b) pattern of chain of transmission; (d) closed chains; (e) roller rails; chain tightener and gear shafts; (f) external chase; (g) engines and bearing supports.	175
Figure 22. Three-dimensional geometric model of system for load compensation: (a) main elements; (b) perspective view; (c) front view with transparence appearance of one of the hydraulic cylinders; (d) other perspective view.....	176
Figure 23. Non-linear numerical analysis of the transmission chain with traction loads: (a) geometrical model; (b) finite element mesh; (c) boundary conditions; (d) total deformation results; (e) Von-Mises stress results.....	178
Figure 24. Non-linear numerical simulation of the transmission chain and support with traction and vertical loads: (a) geometrical model; (b) finite element mesh; (c) boundary conditions, perspective view; (d) boundary conditions, front view.....	179
Figure 25. Results of non-linear numerical simulation of the transmission chain and support with traction and vertical loads: (a) total deformation results; (b) Von-Mises equivalent stress results; (c) Von-Mises equivalent stress results of bolts; (d) Von-Mises equivalent stress results of support links; (e) total deformation results of rollers; (f) Von-Mises equivalent stress of traction chain links and bolts.....	180
Figure 26. Numerical simulation of system for load compensation: (a), (b) and (c) different views of geometrical model; (d) finite element mesh; (e) loads; (f) boundary conditions; (f) total deformation results; (g) stress safety factor.	181
Figure 27. Numerical analysis of structural interaction between the bridge structure and the launching device: (a) finite element model; (b) boundary conditions; (c) serie disposition of launching device; (d) parallel disposition of launching device.....	182

Figure 28. Structural interaction studied using sub-structuring technique: (a) launching sequence calculated; (b); (c) and (d) launching device positions studied.. 183

Figure 29. Numerical model of global solution for structural interaction: (a) and (b) finite element used; results of reactions obtained for different length of bridge launching: (c) 120 m. launched; (d) 160 m. launched; (e) 180 m. launched and (f) 220 m. launched..... 184

Figure 30. Kinematic model of the launching device: (a) mechanical contacts between main elements; (b) engines used; (c) springs used to modify the tension of the chain; (d) vertical load applied on the support links. 185

Figure 31. Numerical model of support links used in the shape optimization: (a) finite element model; (b) boundary conditions; (c) optimization results; (d) total deformation results for the optimized shape. 187

Figure 32. Numerical model of transmission chain links used in the shape optimization: (a) finite element model; (b) boundary conditions; (c) optimization results; (d) total deformation results for the optimized shape. 187

Figure 33. Material used for manufacturing by additive fabrication, ABS plastic: (a) specimens studied which were manufactured in four directions; (b) photo of traction tests; (c), (d), (e) and (f) results obtained in the traction tests. 190

Figure 34. Elements of the prototype of launching device made of ABS: (a) closed chains; (b) chains and gears. 191

Figure 35. Numerical model of the bridge structure prototype: (a) geometrical model; (b) cross section of the geometrical model; (c) detail of the finite element mesh; (d) boundary conditions of the numerical model; (e) total deformation results; (f) launching device reaction and prefabrication area reaction..... 192

TABLE INDEX

Table 1. Materials used in pin-on-disk tests; normal loads and velocity conditions.	167
Table 2. Equations of COF as function of two variables, normal load (N) and velocity (v).	173
Table 3. Minimum values of the coefficient of friction (COF)	174
Table 4. Parameters of configuration for contact properties in the kinematic simulation.....	186

1

State of art

Launching Method is a common technique used in bridge construction. The method consists of placing bridge structures to its final position using launching devices. Bridge structure is manufactured in the prefabrication area and then, it can be launched using a force provided by different systems. Launching Method is used for building high bridges or large spans, as well as difficult landscapes or protected environment.

The peak of launching method was reached in the XIX century with steel bridge launching. This technique was developed and perfected over the centuries. In 1965, an optimization of this method appeared, it was called Incremental Launching Method (ILM). This construction method was based on launching method where the bridge is slid forwards. In ILM, joint segments of bridge structure are displaced to their final position. Structure of the bridge is manufactured before starting the construction procedure, see Figure 1, [1]-[19].

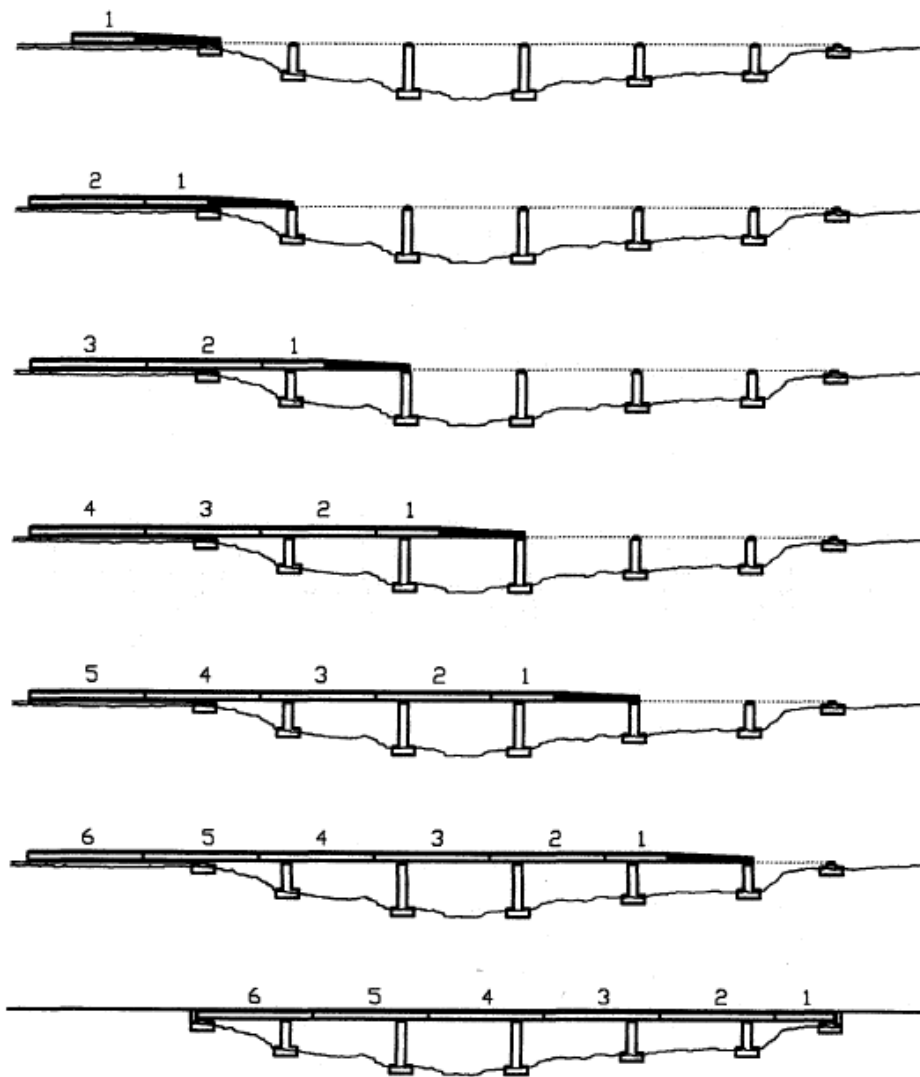
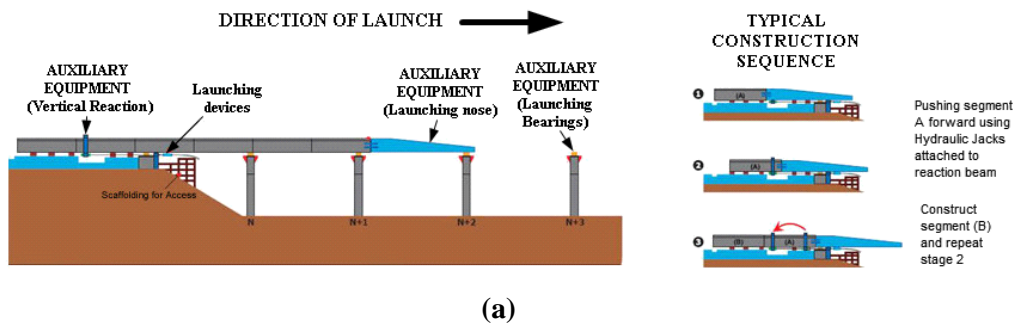


Figure 1. Launching method procedure: (a) launching method and auxiliary systems; (b) Incremental Launching Method diagram.

1.1 Launching bridges classification

There are four different techniques to place bridge structures from prefabrication area to their final position:

- **Segment launching**: bridge structures are launched segment by segment.
- **Full Span Launching**: entire span is manufactured away from construction area and then carried to the site for erection.
- **Rotation**: the bridge structure is manufactured and then it is turned around vertical axis in order to place it in its final position.
- **Transverse movement**: the bridge structure is made parallel to final position then; it is moved transversally to its final position.

1.2 Launching systems

The main launching systems are divided in two groups: launching systems without anchor and launching systems with anchor.

1.2.1 Launching systems without anchor devices:

- Sliding devices: hold structure of bridge and move it forward by rollers on rail, frictionless surface, etc., see Figure 2.
- Carriers: the bridge structure is moved by trailers, see Figure 3.
- Pontoon: displacement device to move bridge structure over water, see Figure 4.



Figure 2. Placing of bridge structure using railway.



Figure 3. Full span precast erection using carriers: (a) Taiwan High Speed Contract C210-2015 by VSL; (b) Taiwan High Speed Contract C260-270 by Continental Engineering Corp



Figure 4. Öresund bridge (Sweden – Denmark): (a) photograph of ship which is carrying bridge structure during its construction; (b) photograph of final bridge in service.

1.2.2 Launching systems with anchor devices

- Launching jacks: devices to move forward the bridge structure using the force of friction, see Figure 5.
- Tow systems (using bars): this system consist of several bars screwed to hollow hydraulic jacks with which the bridge structure is pulled.
- Tow systems (using cable): the principle of operation is the same as tow with previous system with cables instead of bars, see Figure 6.
- Roller path: this system uses bridge path as prefabrication, and then as support of launching device.

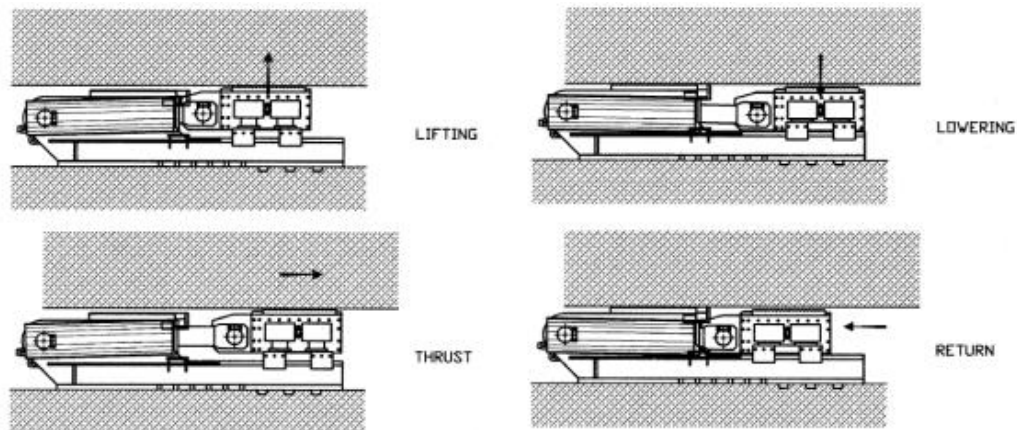


Figure 5. Process of launching jacks technique.



Figure 6. Tow System using cable.

1.3 Advantages and disadvantages of current systems

Most important advantages of this method are the following:

- Skilled labor is not needed because operations are a repetitive process.
- Specific equipment is less than in other methods.
- Safe work environment.
- Decrease need of auxiliary systems as compared to other current systems.

Launching method has the following disadvantages:

- Accurate control of normal load during launching procedure is needed in order to avoid the collapse of the bridge structure.
- It cannot be used for bridge structures made up of different kinds of materials or geometries.
- The system is not continuous; there are dead times due to retraction of hydraulic jacks.
- Backward displacement is difficult. Many auxiliary systems are needed in order to move the structure in backward direction.

2

Conceptual study and design requirements

2.1 Design alternatives

Three design alternatives were studied in this Doctoral Thesis [20]-[27]:

- Parallel launching jacks.
- Cable around *a winding drum*
- *Inverted crawler*

- **Parallel launching jacks:** this method is based on the current system to displace the bridge structure using launching jacks. This solution consists of parallel jacks. While some parts are moving forward, the others are retracting. In this approach, there are not dead times due to jacks retraction, see Figure 7.



Figure 7. Collapses during bridge construction in Spain: (a) Almuñecar, Granada. 2005 where eight workers dead; (b) Puebla, Zaragoza 2012, where there were not death.

- **Cable around a winding drum:** this is a continuous system currently in use. This is a rotating drum to wrap a wire rope. Structure and cable are joined, so the bridge structure is displaced with the cable , see Figure 8.



Figure 8. Tow System using cable.

- ***Inverted crawler***: this solution is based on the mechanism of crawler tracks and the principle of operation of conveyor. Ground vehicles as crawlers move heavy loads with relatively high speeds. Other important aspect of these devices is the capability of adjusting them to uneven grounds, see Figure 9. These mechanisms is placed in the abutment and it pushes the bridge structure using force of friction as it occurs in conveyors.



Figure 9. Track crawlers: (a) adjusted to irregular surfaces; (b) track crawler as support of heavy cranes.

2.2 Design criteria

The design criteria considered in order to evaluate all proposed solutions are the followings:

- ***Continuity and reversibility***: bridge launching has to be continuous and reversible. So, the new system has to provide a movement without dead times, as well as forward and backward displacements.
- ***Normal load due to double deck bridge structure***: new launching devices must support high normal loads which are provided by bridge structure, besides horizontal force needed to push it.
- ***Cross-section shape***: different shapes of cross section have to be launched by the new system.
- ***Displacement speed***: launch speed of new systems should be higher than current systems.
- ***Placed in working site***: the place where the new system is located must be taken into account. Furthermore, its dimensions and the way to put it up have to be considered.

- *Sustainability*: the new mechanism should protect the geographic area in order to reduce the environmental impact of current civil construction.

Other aspects that should be considered are own characteristics of research project which gives rise to this Doctoral Thesis: innovation; viability of selected solution, efficiency of new system, and so on.

2.3 Reasons for selected solution

The best solution was the reverse crawler. This mechanism solves all of the design criteria previously presented. The choice was carried out using multi-criteria method which evaluates, in an objective way, all solutions considering all design criteria. This method is called ELECTRA I Method. Results of this analysis indicate that the reverse crawler clearly dominate the other solutions offered.

3

Mechanical design

New devices for continuous displacement and new procedure to launch very large bridges were patented as National Patent number ES 2367737 and ES 2368318. Then, they were extended to International Patent, WO 2013/001114 and WO 2013/001115. Mechanical components of launching device patented were developed in this Doctoral Thesis. In this design process bridge structure and construction procedure were taken in account [28]-[42].

3.1 Study of the static loads

The new launching device was designed for high vertical and horizontal forces. The bridge structure, which consists of double deck structure provides high vertical load over this mechanism [43]. For this reason, the launching device is designed to support the dead weight of the bridge structure during launching process.

Figure 10 shows the worst launching stage from the displacement device point of view, as well as the boundary conditions used in the numerical simulation for studying normal reactions. Launching device is designed taking into account the highest normal reaction obtained in this study. Furthermore, other launching stages are studied to understand how the variation of normal load is.

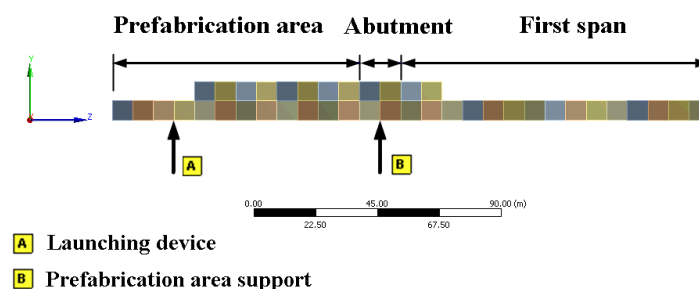


Figure 10. Main areas of launching process in the worst load conditions for launching device.

Launching phases studied in this Doctoral Thesis are presented in Figure 11.

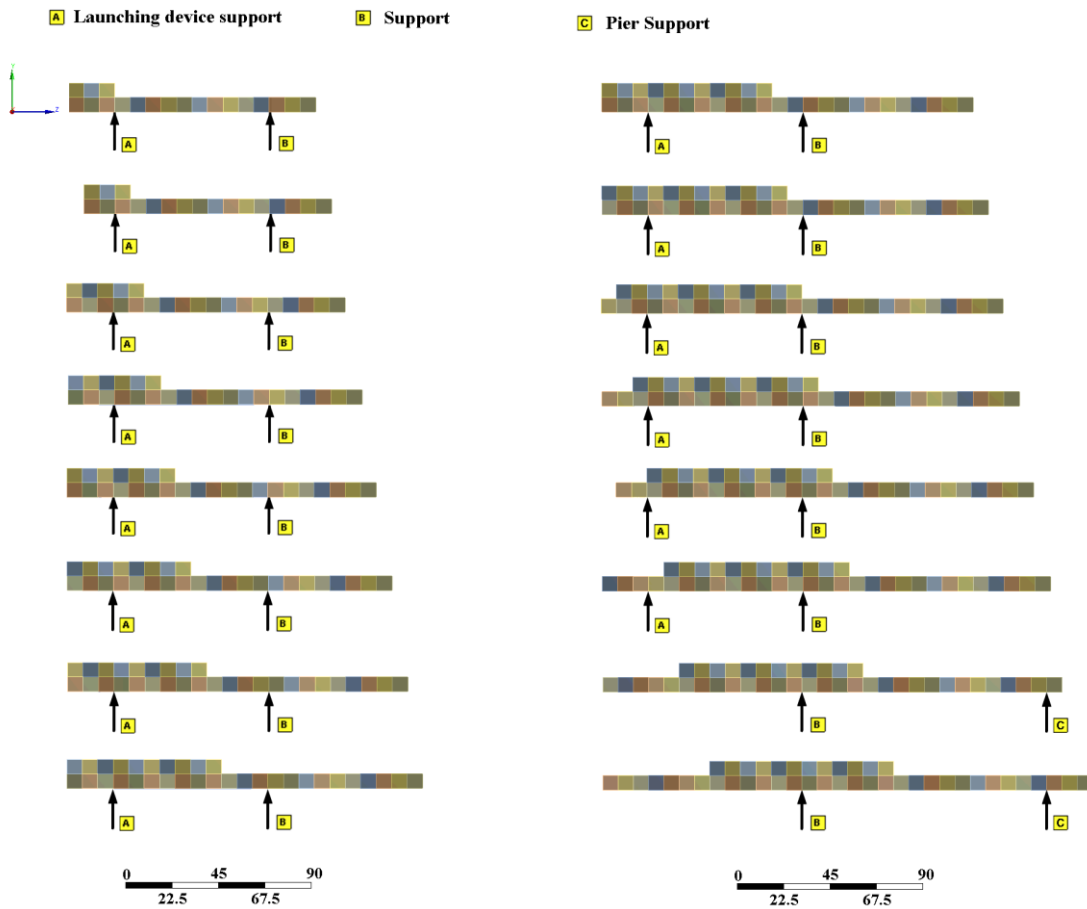


Figure 11. Launching phases studied.

3.2 Design of main elements

New launching device is presented in Figure 12.

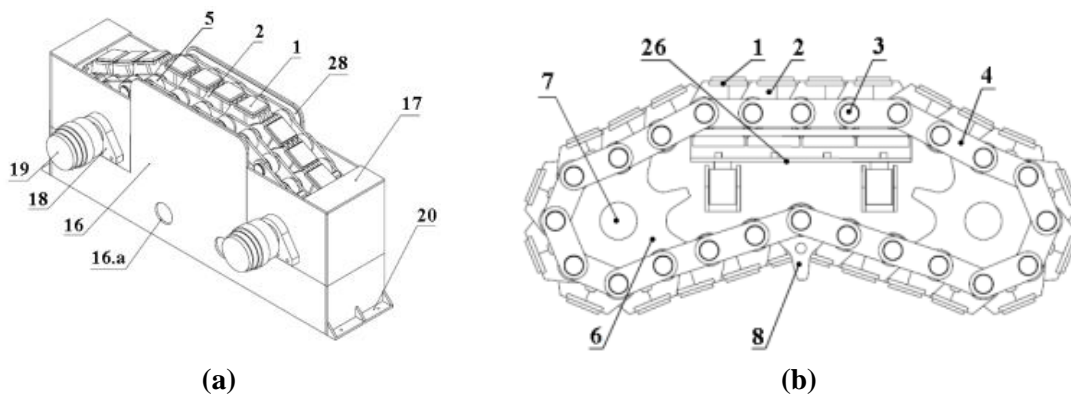


Figure 12. Main components of launching device, pictures from DCACLM patent: (a) isometric perspective; (b) frontal view.

Main components of this mechanism are numbered as follow:

- 1: support plates
- 2: support links
- 3: bolts
- 4: transmission chain links
- 5: rollers of the transmission chain
- 6: sprocket gear
- 7: gear shaft
- 8: chain tightener
- 16: lateral part of chasing mechanism
- 17: top part of chasing mechanism
- 18: bearing supports
- 19: engine
- 20: anchor plates of chasing
- 26: system for load compensation
- 28: anti-friction sheet

The design of main elements of this device is shown in several sub-sections:

- ***Design of the bolts***: traditional mechanical design, as well as its verification using numerical simulation and main results obtained, see sub-chapter 3.2.1.
- ***Design of the gears***: geometrical design, validation using numerical simulation and results, see sub-chapter 3.2.2.
- ***Gear shafts***: traditional mechanical design, see sub-chapter 3.2.3.
- ***Support links***: numerical simulation using FEM, see sub-chapter 3.2.4.

3.3 Materials in contact: friction in polymers

An important study carried out in this Doctoral Thesis was related with tribological behavior in polymers. As was explained in previous chapters, the new launching device moves the bridge structure by means of force of friction. In this case, it was necessary

to study of frictional behavior for contact-pair materials: polymers of support links in the launching mechanism and the steel of bridge structure.

In this case, two kinds of polymers were studied with two Shore Hardness for each other:

- Chloroprene Rubber, CR: CR56 and CR60
- Natural Rubber, NR: NR50 and NR60

Frictional behavior laboratory tests were performed using a pin-on-disk tribometer [48]-[50]. Neoprene cylindrical specimens with a 8 mm in diameter were prepared. They were placed in the pin holder of the tribometer. Pin is then brought in contact with a disk which is moving at a constant velocity. Normal load is applied on the pin specimen in order to induce pressure and bring the pin in contact with the disk. The schematic diagram is showed in Figure 13. These tests were carried out at the Mechanical Engineering Tribology Laboratory at Purdue University, IN, USA between August and December of 2012 following ASTM G99: “Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus”, see Figure 14. In this sense, the collaboration with an expert and professional research group in USA was possible [52]-[54].

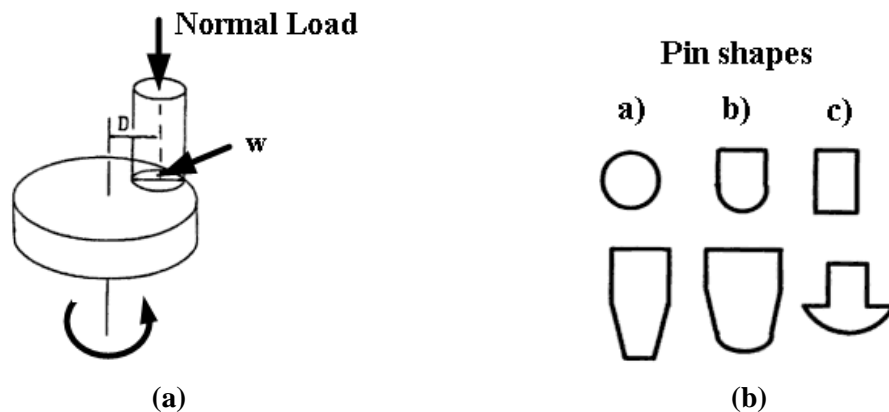


Figure 13. *Pin-on-disc* test: (a) schematic diagram of pin-on-disk test; (b) cross-sections of pin shapes.

In this sub-chapter, the materials used in frictional tests are showed, as well as load conditions studied, see Table 1.

As results of these tests the coefficient of friction were obtained between four elastomers on two different steels. The most important conclusion is that the coefficient of friction between elastomers and steels depends of the velocity and the normal load applied.

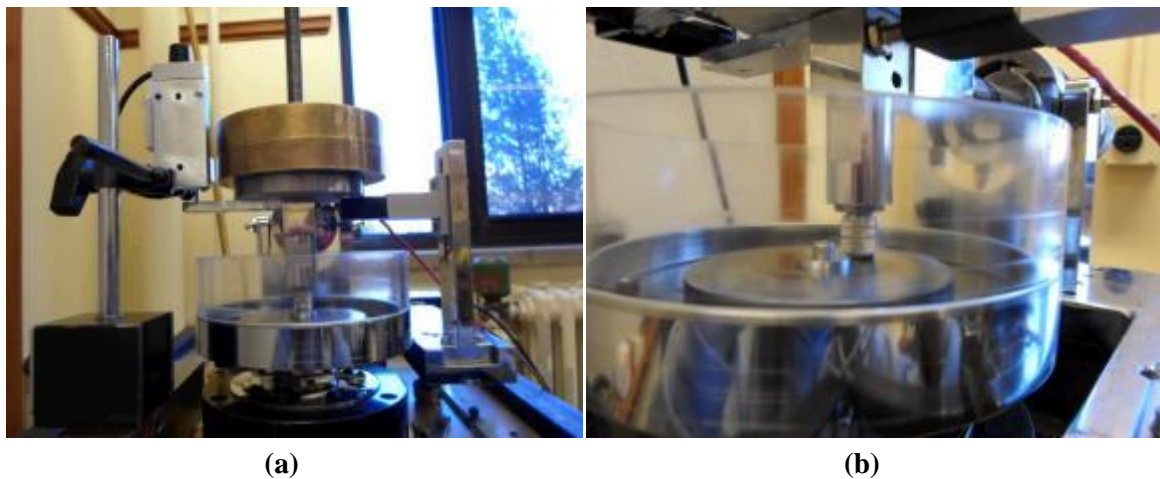
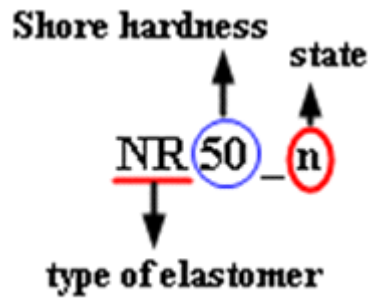


Figure 14. Photos from actual pin on disk tests at Purdue University

Table 1. Materials used in pin-on-disk tests; normal loads and velocity conditions.

ELASTOMERS	DISKS	NORMAL LOAD	VELOCITY
NR50_n	Smooth steel: S1	L3 = 1.361 kg	v2 = 14 m/h
NR60_n	Rough steel: S2	L5 = 2.268 kg	v3 = 20 m/h
CR45_n	Reference disk: Ref	L7 = 3.175 kg	v4 = 27.14 m/h
CR60_n		L9 = 4.082 kg	v5 = 34 m/h
NR50_1w			
NR60_1w			
CR45_1w			
CR60_1w			
NR50_2w			
NR60_2w			
CR45_2w			
CR60_2w			
NR50_3w			
NR60_3w			
CR45_3w			
CR60_3w			



Where:

NR: Natural Rubber

CR: Neoprene, Chloropreno

n: Natural state

1w: 1 week of aging treatment

2w: 2 weeks of aging treatment

3w: 3 weeks of aging treatment

L3: normal load of 3 lb

L5: normal load of 5 lb

L7: normal load of 7 lb

L9: normal load of 9 lb

v2: disk rotational speed of 2 rpm

v3: disk rotational speed of 3 rpm

v4: disk rotational speed of 4 rpm

v5: disk rotational speed of 5 rpm

Each normal load and velocity conditions provide a different value of the coefficient of friction for each elastomers. The hyperelastic properties of elastomers make the pin-on-disk tests complex. As a consequence, the actual value of the coefficient of friction is obtained as the average of twenty tests which were done under the same laboratory

conditions of velocity and load. In this sense, it is possible to know a more reliable value of COF, see Figure 15.

The influence of both, normal load, N , and velocity, v , in the coefficient of friction value is showed in several graphics which represent COF value as a function of both of them, $f(N)$ and $f(v)$.

CR60, see Figure 16 CR45, see Figure 17

NR60, see Figure 18 NR50, see Figure 19

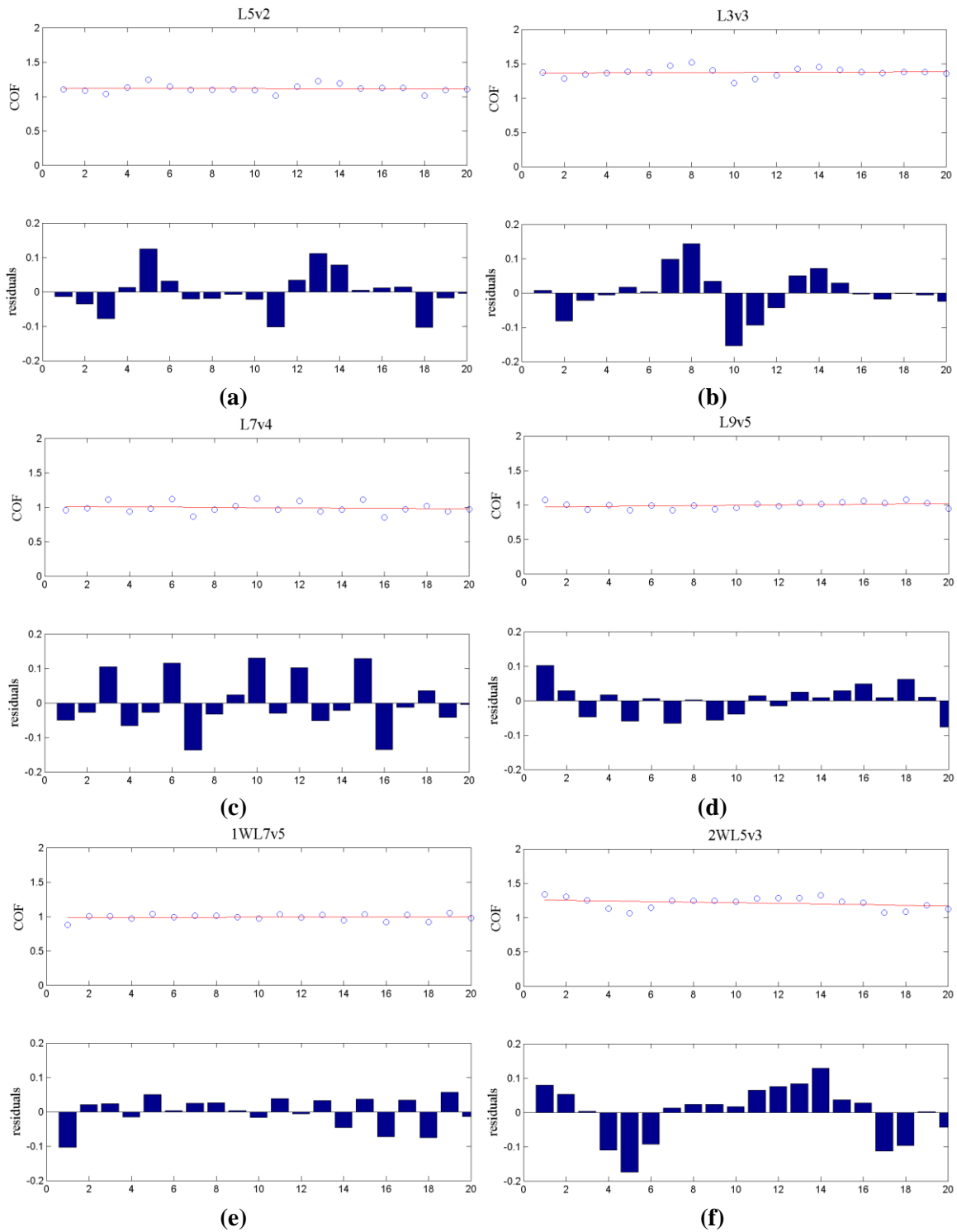


Figure 15. Pin-on-disk results for CR60 on smooth steel disk (CR60_1) for different conditions of normal load and velocity.

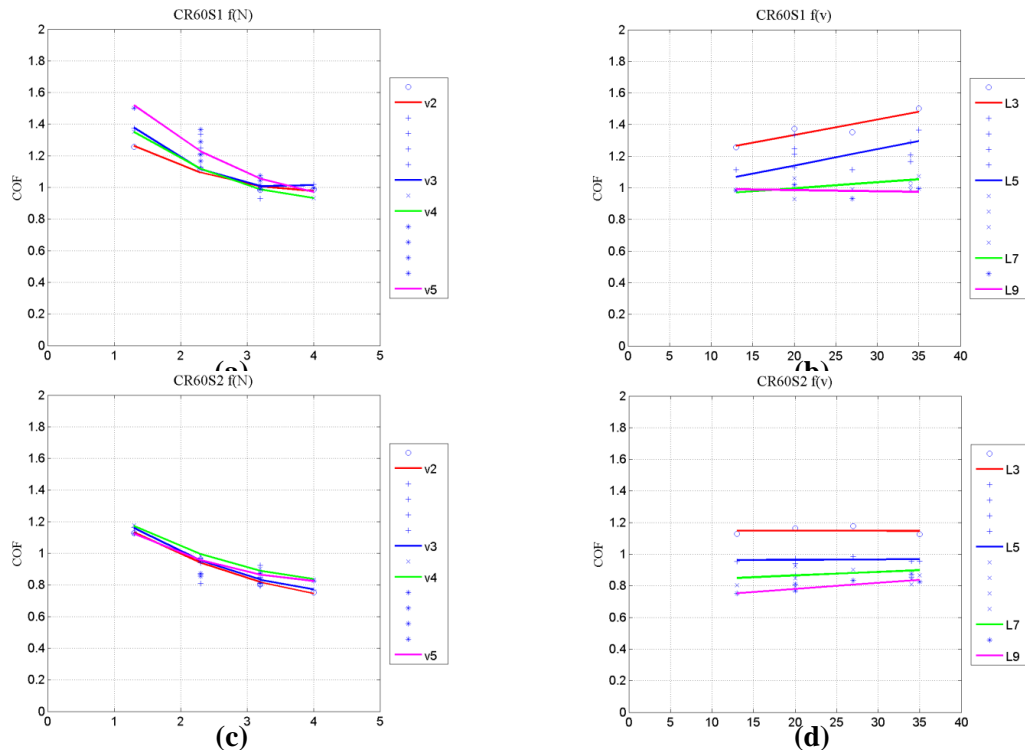


Figure 16. COF value as function of normal load and velocity for CR60: (a) and (b) on smooth disk, S1; (c) and (d) on rough disk, S2.

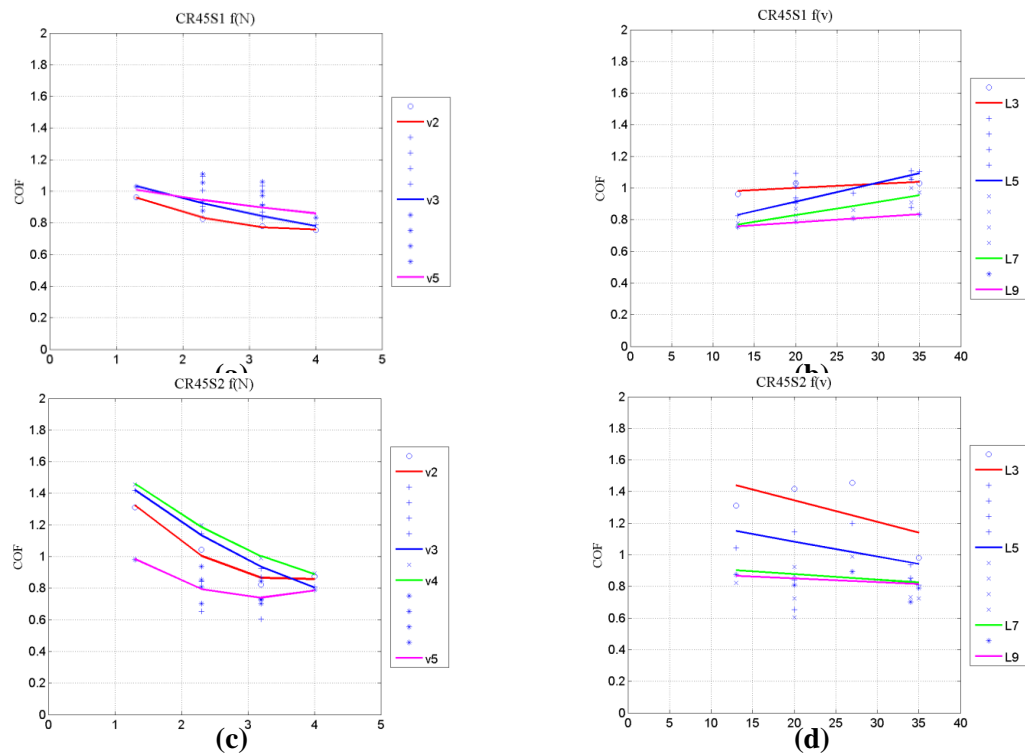


Figure 17. COF value as function of normal load and velocity for CR45: (a) and (b) on smooth disk, S1; (c) and (d) on rough disk, S2.

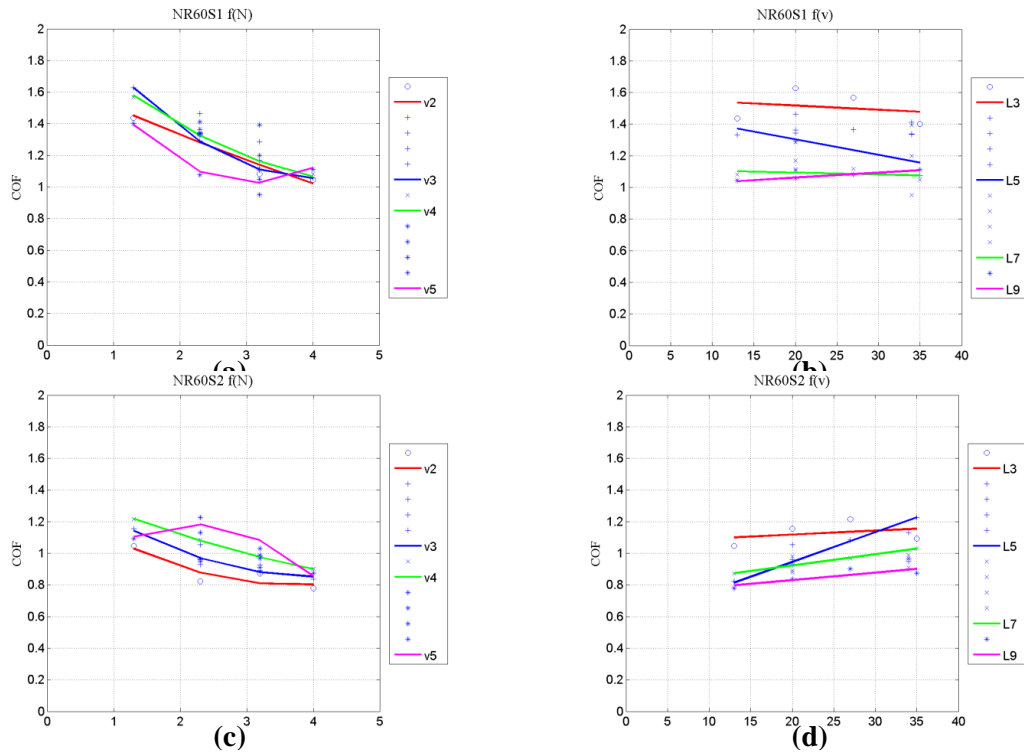


Figure 18. COF value as function of normal load and velocity for NR60: (a) and (b) on smooth disk, S1; (c) and (d) on rough disk, S2.

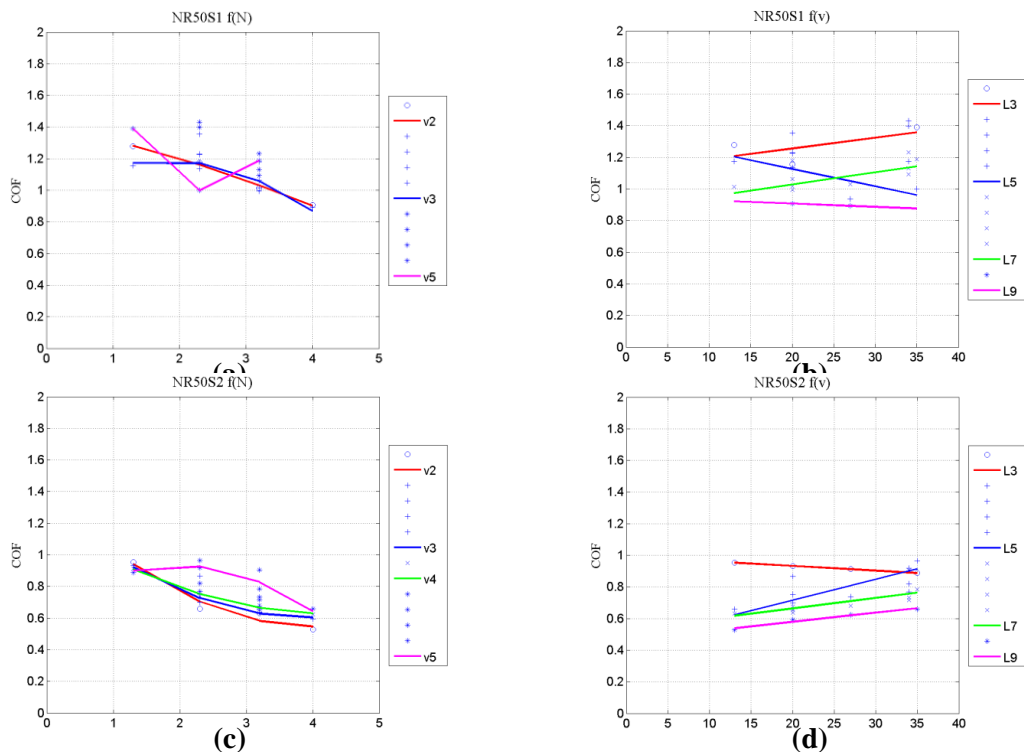


Figure 19. COF value as function of normal load and velocity for NR50: (a) and (b) on smooth disk, S1; (c) and (d) on rough disk, S2.

Results obtained set out the trend of frictional behavior depending on the normal load and velocity in case of CR elastomers. Instead, this is different for NR whose results are not homogeneous.

In the case of CR, a new law was developed which allows defining the CR frictional behavior in the range of load and velocity considered, see Figure 20. This law was written as equation in Table 2 for each pair of materials in contact.

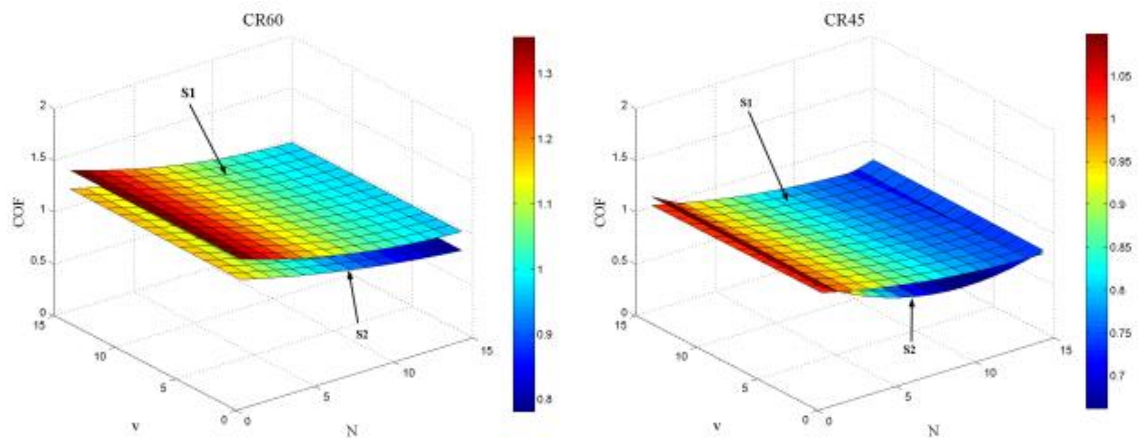


Figure 20. Surface representation of COF as function of two variables load, (N) and velocity (v).

Table 2. Equations of COF as function of two variables, normal load (N) and velocity (v).

Para CR60 sobre disco 1:

$$\mu(N, v) = 1.1213 \cdot 0.03725 \cdot N^2 - 0.303 \cdot N + 1.5947 + -0.1393 \cdot -0.0007 \cdot v + 1.0007$$

Para CR60 sobre disco 2:

$$\mu(N, v) = 0.8537 \cdot 0.02835 \cdot N^2 - 0.2929 \cdot N + 1.4638 + 0.1766 \cdot 0.0038 \cdot v + 0.7027$$

Para CR45 sobre disco 1:

$$\mu(N, v) = 1.1109 \cdot 0.0309 \cdot N^2 - 0.2383 \cdot N + 1.2174 + -0.1260 \cdot 0.0035 \cdot v + 0.7134$$

Para CR45 sobre disco 2:

$$\mu(N, v) = 0.9886 \cdot 0.1049 \cdot N^2 - 0.5927 \cdot N + 1.5840 + 0.03 \cdot -0.0024 \cdot v + 0.899$$

Finally, tribological studies were concluded with a normal load determination which provides the minimum value of coefficient of friction, see Table 3.

Table 3. Minimum values of the coefficient of friction (COF)

CR60_S1 para v2	Ncrit = 4.069	$\mu_{\min} = 0.9591$
CR60_S1 para v3	Ncrit = 4.069	$\mu_{\min} = 0.9598$
CR60_S1 para v4	Ncrit = 4.069	$\mu_{\min} = 0.9604$
CR60_S1 para v5	Ncrit = 4.069	$\mu_{\min} = 0.9611$
CR60_S2 para v2	Ncrit = 5.165	$\mu_{\min} = 0.737$
CR60_S2 para v3	Ncrit = 5.165	$\mu_{\min} = 0.742$
CR60_S2 para v4	Ncrit = 5.165	$\mu_{\min} = 0.746$
CR60_S2 para v5	Ncrit = 5.165	$\mu_{\min} = 0.751$
CR45_S1 para v2	Ncrit = 3.856	$\mu_{\min} = 0.746$
CR45_S1 para v3	Ncrit = 3.856	$\mu_{\min} = 0.743$
CR45_S1 para v4	Ncrit = 3.856	$\mu_{\min} = 0.740$
CR45_S1 para v5	Ncrit = 3.856	$\mu_{\min} = 0.737$
CR45_S2 para v2	Ncrit = 3.856	$\mu_{\min} = 0.764$
CR45_S2 para v3	Ncrit = 3.856	$\mu_{\min} = 0.764$
CR45_S2 para v4	Ncrit = 3.856	$\mu_{\min} = 0.763$
CR45_S2 para v5	Ncrit = 3.856	$\mu_{\min} = 0.763$

3.4 Three-dimensional geometrical model

When main dimensions of elements are designed, a 3D model of the new devices is developed using CAD tools. In this case, SolidWorks® was used as a CAD tool. This three-dimensional and parametric model is useful for next studies using numerical simulation by FEM.

The process of 3D drawing is shown in Figure 21.

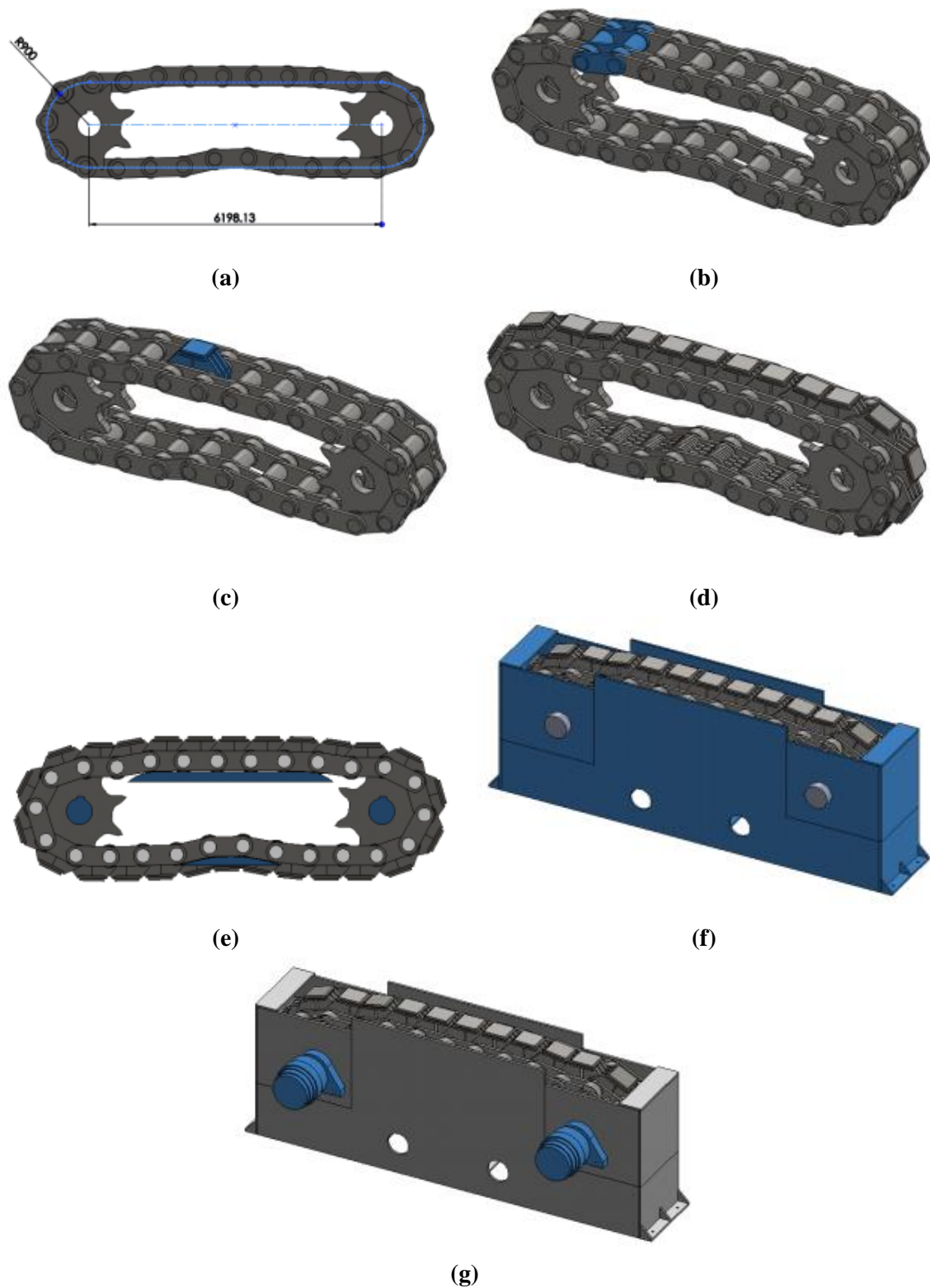


Figure 21. Procedure of design of tridimensional geometric model of mechanism: (a) initial sketch; (b) pattern of chain of transmission; (c) closed chains; (d) roller rails; chain tightener and gear shafts; (e) external chase; (f) engines and bearing supports.

Furthermore, other important system is added to the new launching mechanism. This is the system for load compensation with which the new device can adjust support links to the shape of the bridge structure during the launching process. Three-dimensional and parametric geometrical model of the system for load compensation is showed in Figure 22 where main elements of this system are pointed, as well as several views.

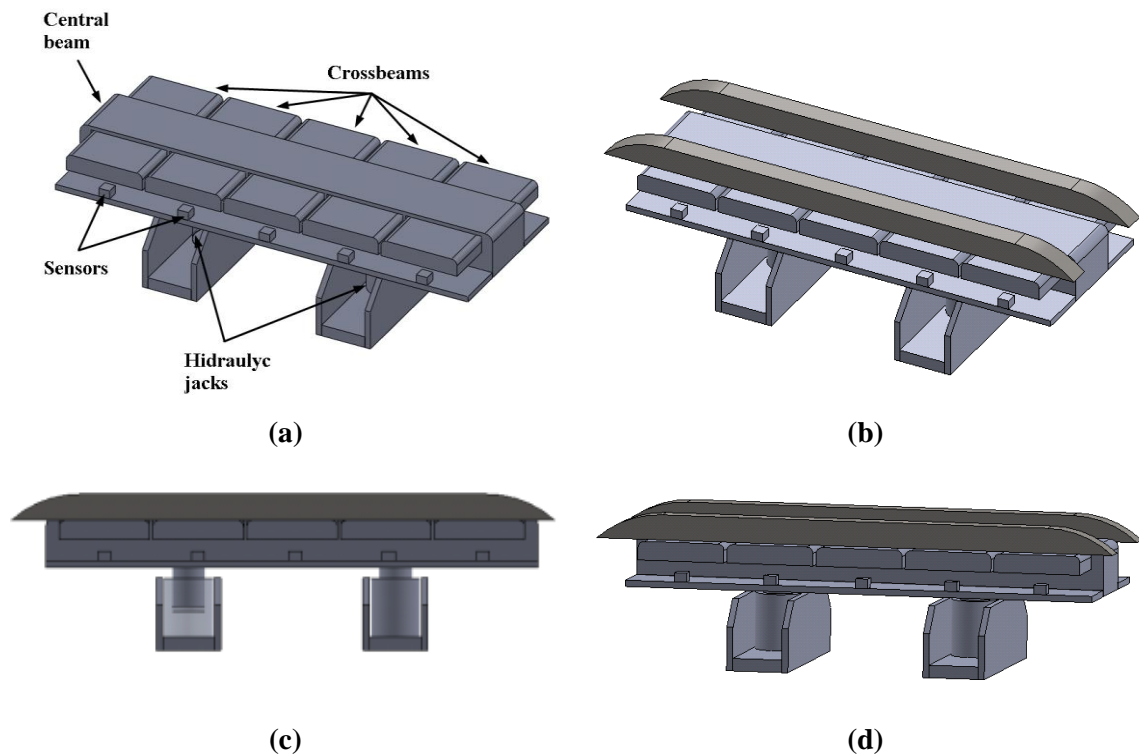


Figure 22. Three-dimensional geometric model of system for load compensation: (a) main elements; (b) perspective view; (c) front view with transparency appearance of one of the hydraulic cylinders; (d) other perspective view.

4

Numerical Simulation

Several studies using numerical methods were carried out on the new launching device. In this sense, three different methods were used:

- Non-linear numerical simulation by Finite Element Method (FEM)
- Kinematic simulation to study the new launching device when it is working.
- Shape optimization of several elements using FEM.

The author of this Doctoral Thesis is a member of two important Spanish Research Groups that have been working in numerical simulation for many years. They are GITECO from University of Cantabria and GICONSIME from University of Oviedo. Both have proven experience in finite element method (FEM), Finite Volume Methods (FVM), Computational Fluid Dynamics (CFD) and other numerical analysis, [66]-[69].

4.1 Non-linear analysis of launching device

Non-linear analysis by FEM was performed in order to study the structural behavior of main elements of launching device [73]-[75].

- Transmission chain was studied in traction conditions. In this way it was possible to know the imposed displacement values equivalents to the traction effort in the transmission chain during launching process, see Figure 23.

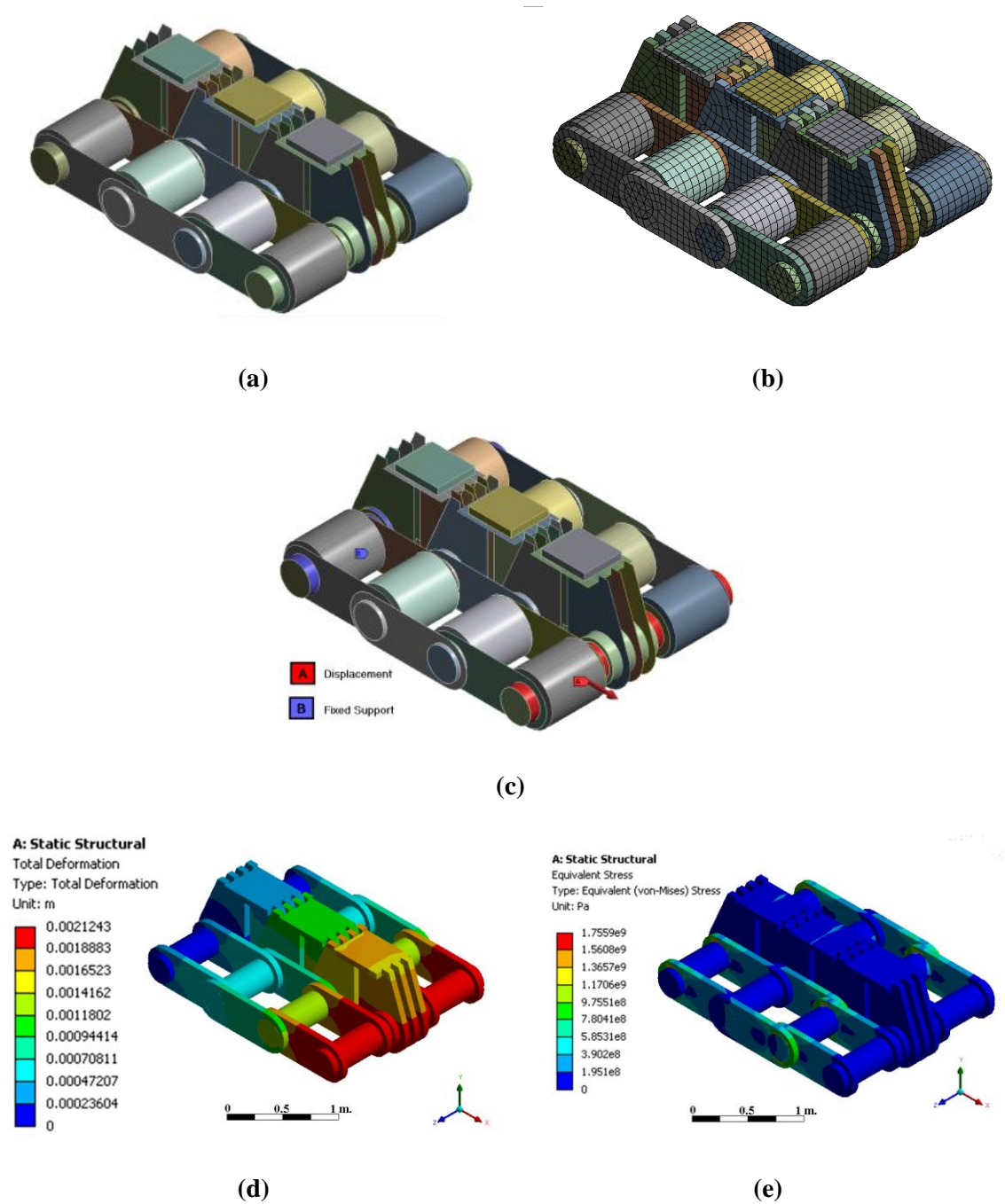


Figure 23. Non-linear numerical analysis of the transmission chain with traction loads: (a) geometrical model; (b) finite element mesh; (c) boundary conditions; (d) total deformation results; (e) Von-Mises stress results.

Support links must bear high normal loads. In this case, the normal load value was equal to the maximum bridge reaction during the launching process, and it was applied over the top of support links. As well as the normal load, the transmission chain has to resist traction strain due to the launching force. In consequence, in this numerical study, horizontal displacement and normal load were applied over the FEM model, see Figure 24.

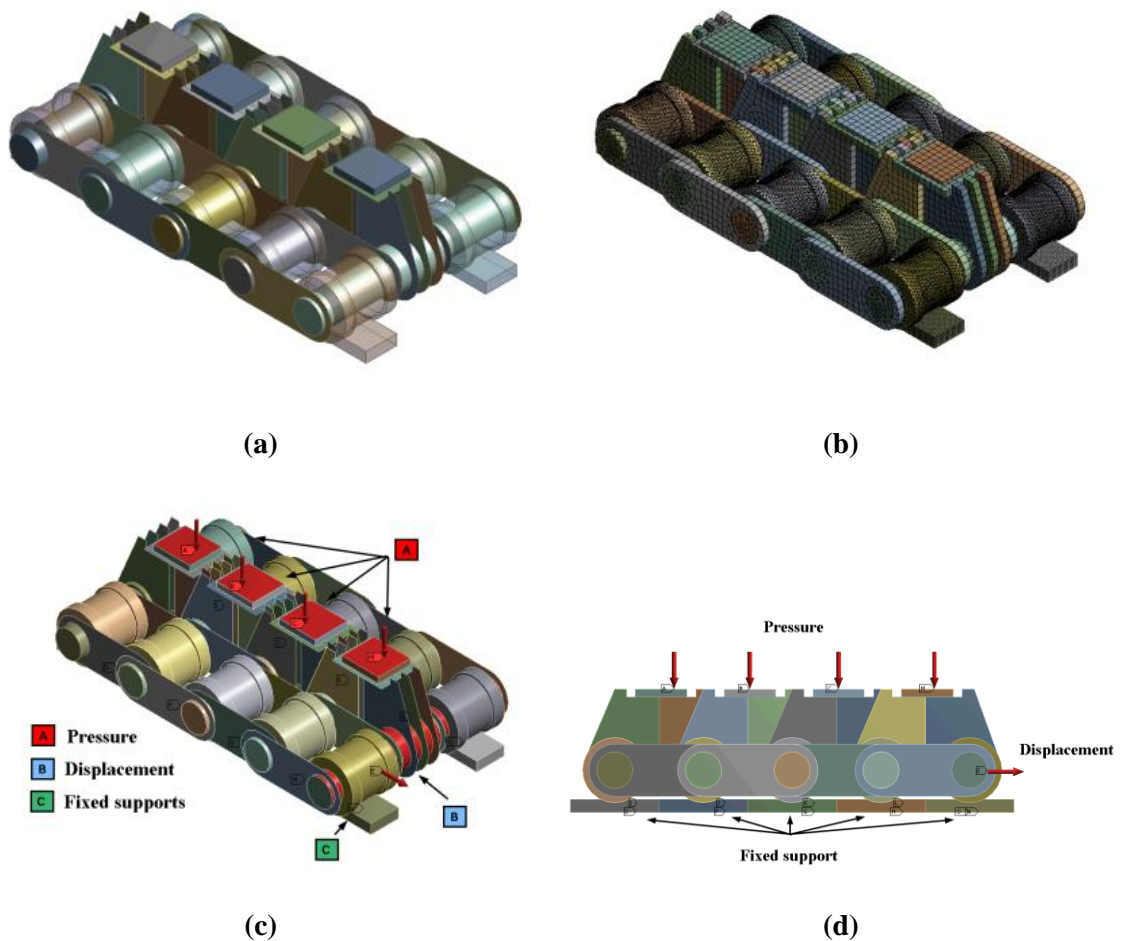


Figure 24. Non-linear numerical simulation of the transmission chain and support with traction and vertical loads: (a) geometrical model; (b) finite element mesh; (c) boundary conditions, perspective view; (d) boundary conditions, front view.

Results obtained in the non-linear numerical model of transmission chain and supports are showed in Figure 25.

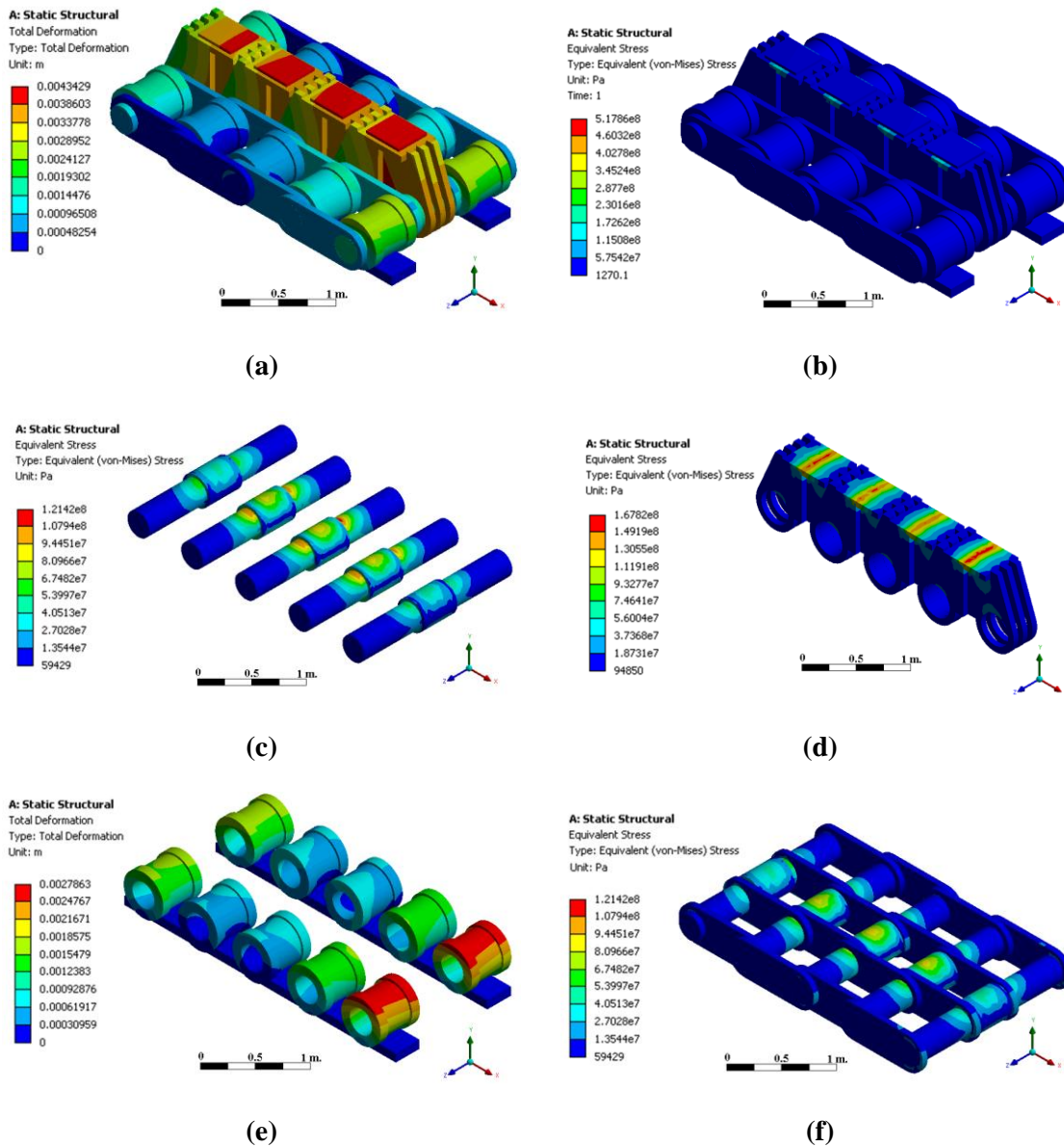


Figure 25. Results of non-linear numerical simulation of the transmission chain and support with traction and vertical loads: (a) total deformation results; (b) Von-Mises equivalent stress results; (c) Von-Mises equivalent stress results of bolts; (d) Von-Mises equivalent stress results of support links; (e) total deformation results of rollers; (f) Von-Mises equivalent stress of traction chain links and bolts.

- System for load compensation was studied through a non-linear structural analysis. The reactions which were obtained from support links analysis were taken as input load in this numerical model. In this case, normal load calculated over rails in the previous study were applied to study the structural response of system for load compensation, see Figure 26.

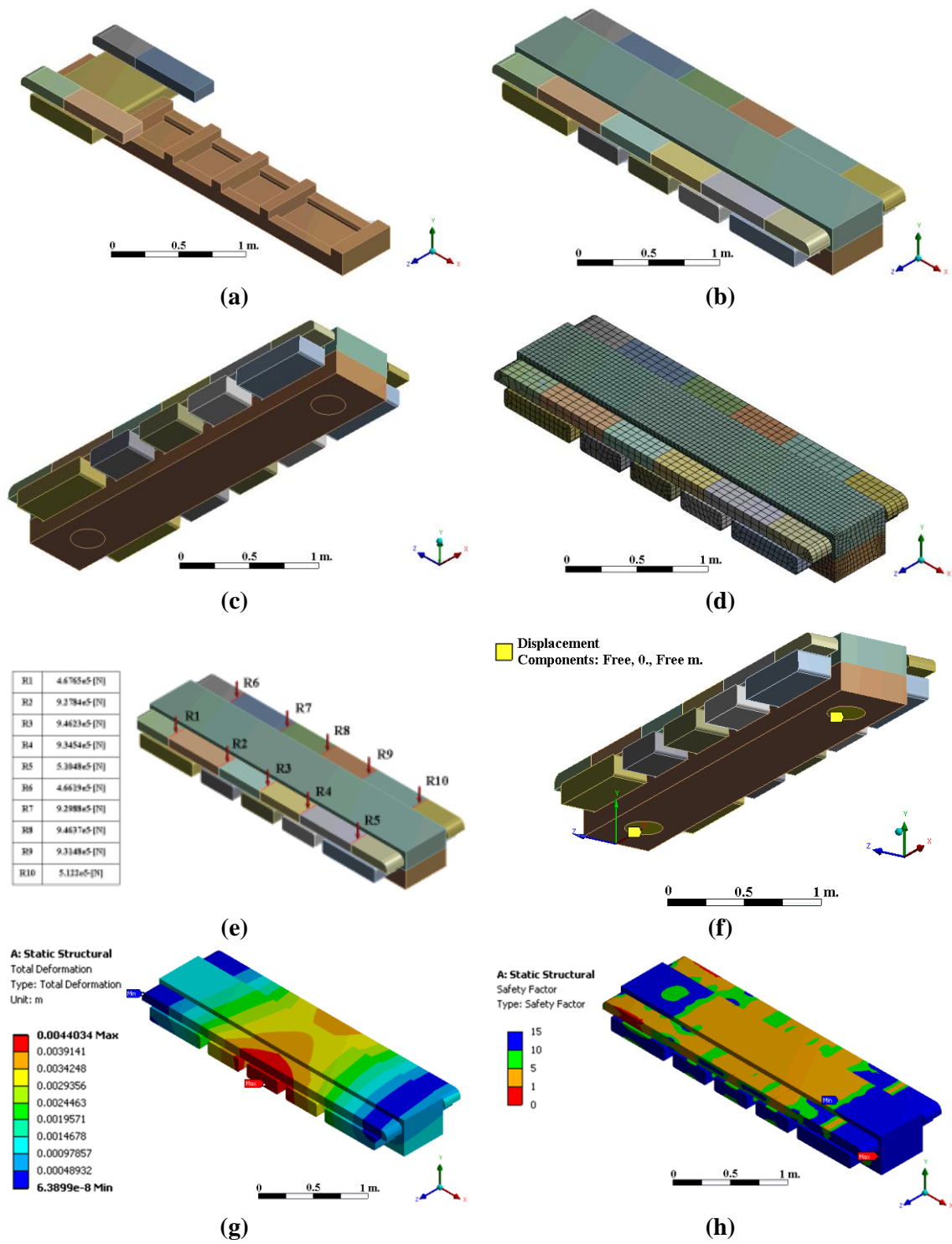


Figure 26. Numerical simulation of system for load compensation: (a), (b) and (c) different views of geometrical model; (d) finite element mesh; (e) loads; (f) boundary conditions; (f) total deformation results; (g) stress safety factor.

4.2 Structural interaction analysis

Structural interaction analysis between the bridge structure and the new launching device was carried out by the sub-structuring method.

In this process, a complex numerical model of the bridge structure was generated as one finite element with several “master nodes”. This element was connected to other simplified FEM model of launching device in order to study the structural interaction among them. Finally, different positions of the launching device under the bridge structure were analyzed, see Figure 27.

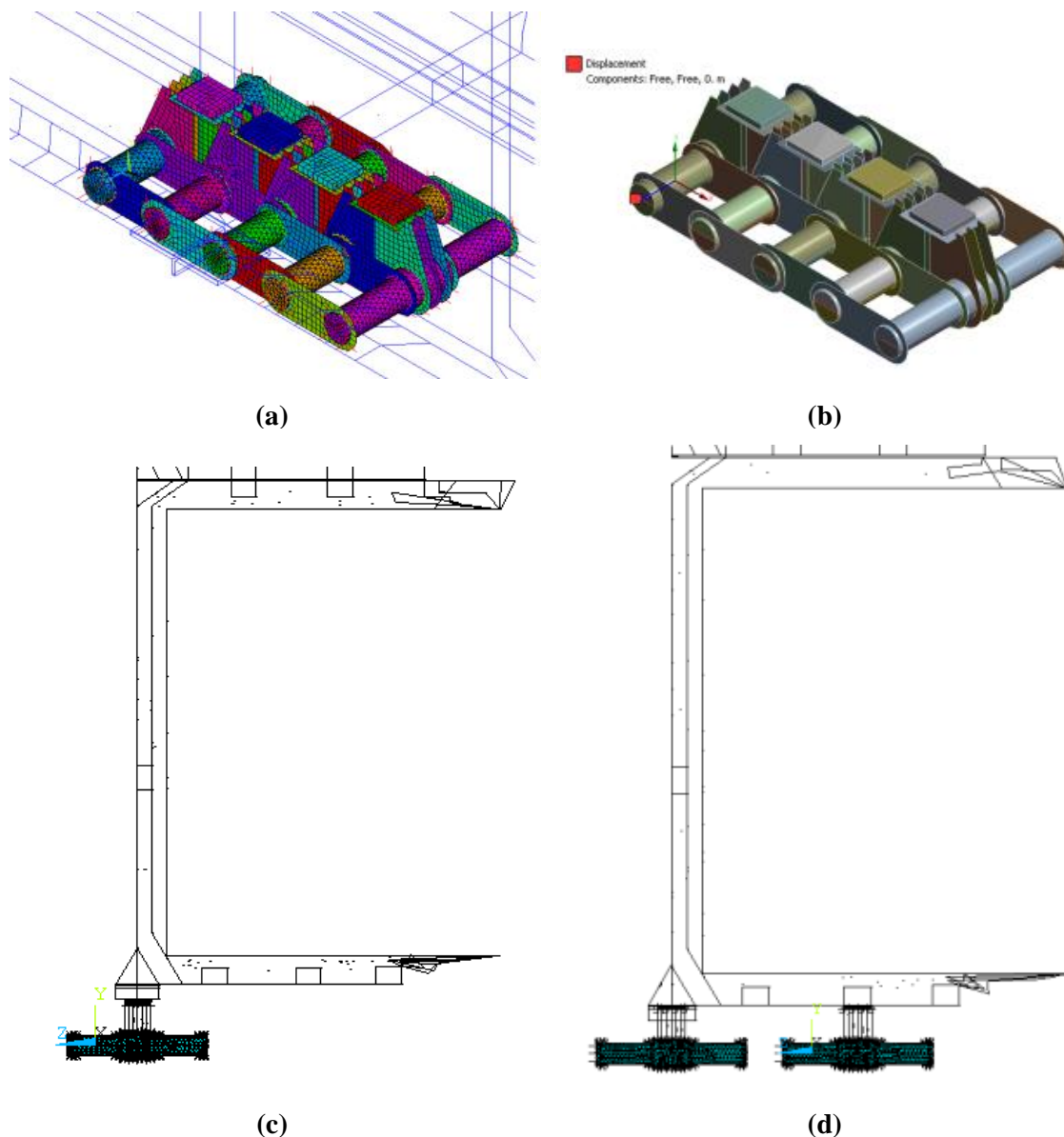


Figure 27. Numerical analysis of structural interaction between the bridge structure and the launching device: (a) finite element model; (b) boundary conditions; (c) serie disposition of launching device; (d) parallel disposition of launching device.

Several phases of launching process were studied, see Figure 28(a). Furthermore, different positions of the launching device were considered, see Figure 28(b), (c) and (d). Next, the best placing for both of them, from the bridge structure and launching devices points of view were established: two mechanisms on line under each of laterals of the girder.

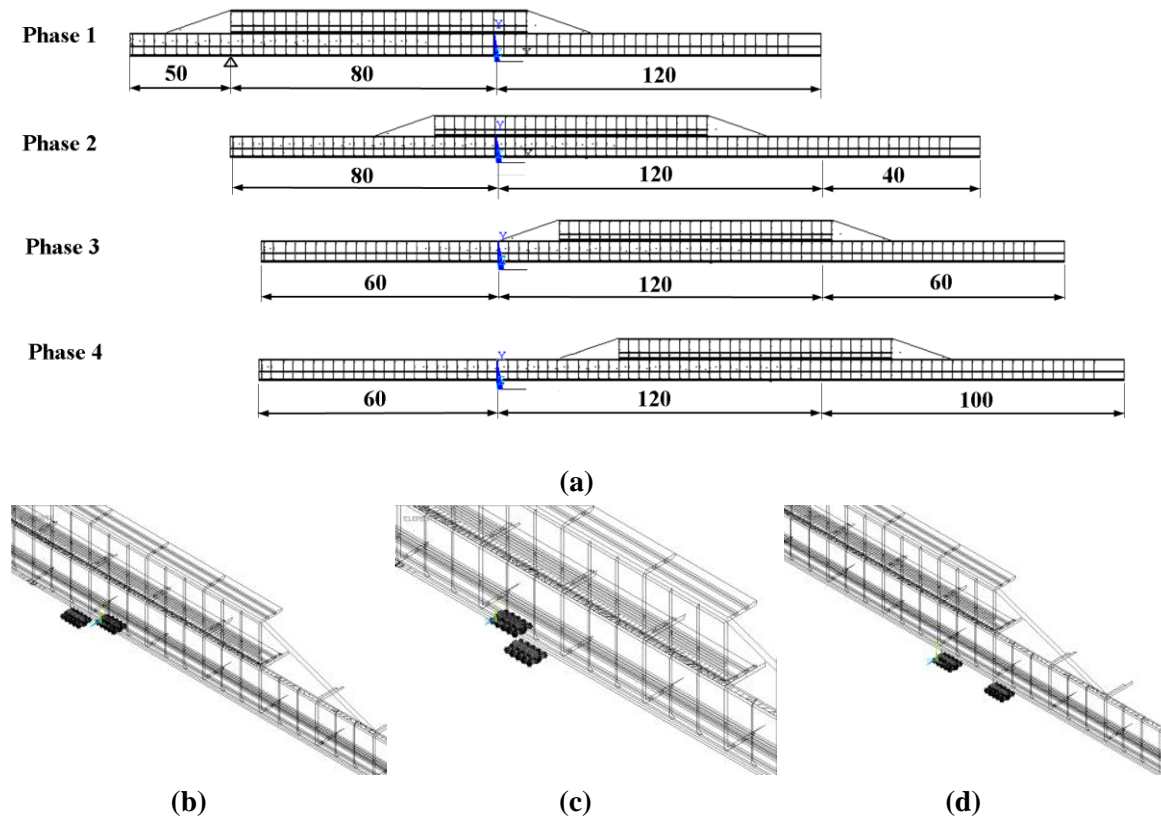


Figure 28. Structural interaction studied using sub-structuring technique: (a) launching sequence calculated; (b); (c) and (d) launching device positions studied.

Finally, the numerical model used is shown in Figure 29(a) and (b). The results obtained for the different launching phases are illustrated in Figure 29(c), (d), (e) and (f), which provides the worst launching phase from the launching device point of view is the first one.

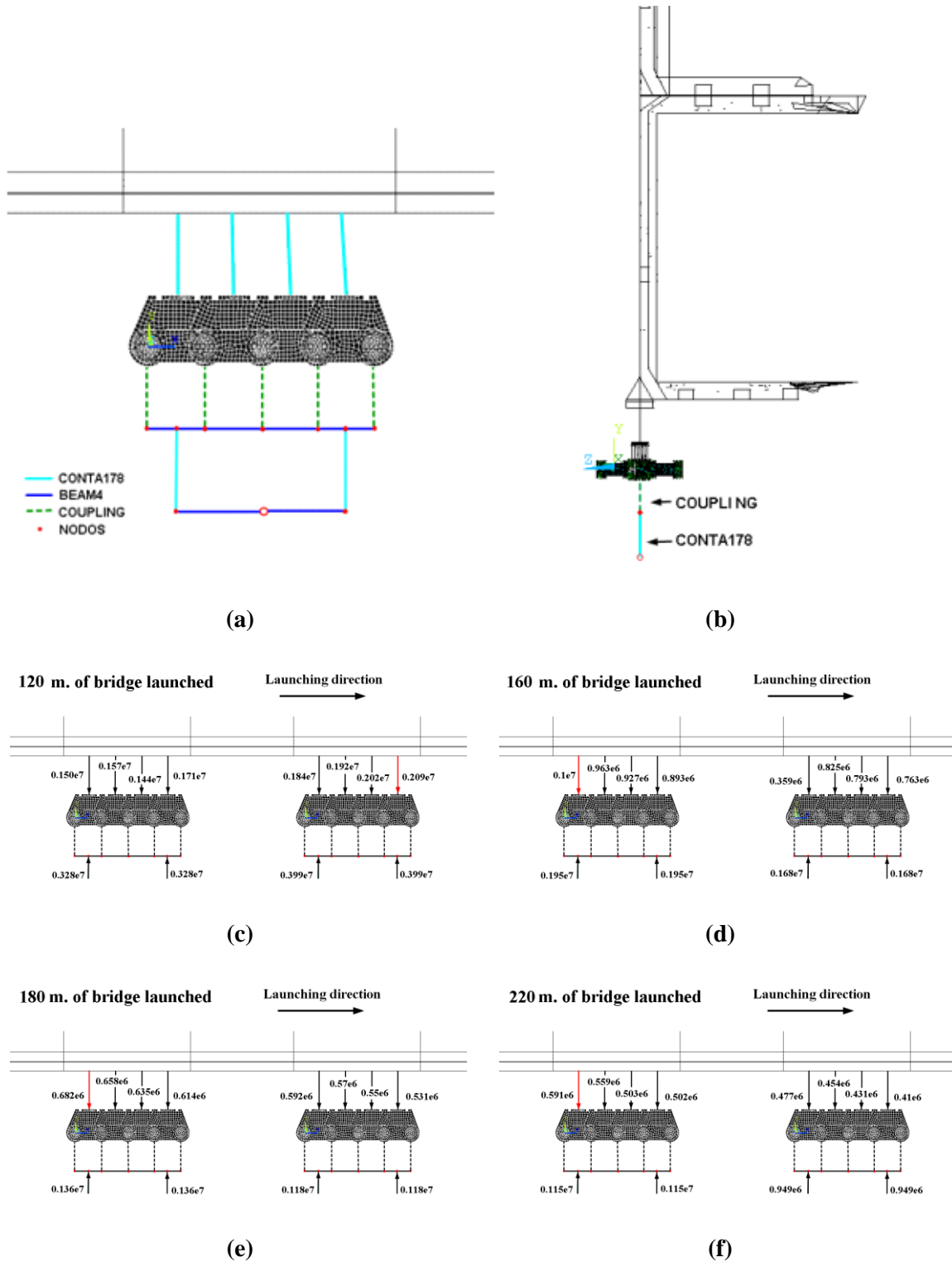


Figure 29. Numerical model of global solution for structural interaction: (a) and (b) finite element used; results of reactions obtained for different length of bridge launching: (c) 120 m. launched; (d) 160 m. launched; (e) 180 m. launched and (f) 220 m. launched.

4.3 Kinematic analysis

Motion analysis developed in this Doctoral Thesis provides the kinematic behavior of launching device. Mechanical contact-pairs between main elements of mechanism were considered in this model, see Figure 30 (a) and Table 4. For this reason, the motion of the mechanism was developed by contact force and transmission effort. Displacement is provided by rotational engines placed in the center of gears, see Figure 30 (b). The track tension was gotten using two springs which stiffness can be controlled by user, see Figure 30 (c). The model was solved taking into account the normal load applied on the supports links, see Figure 30 (d).

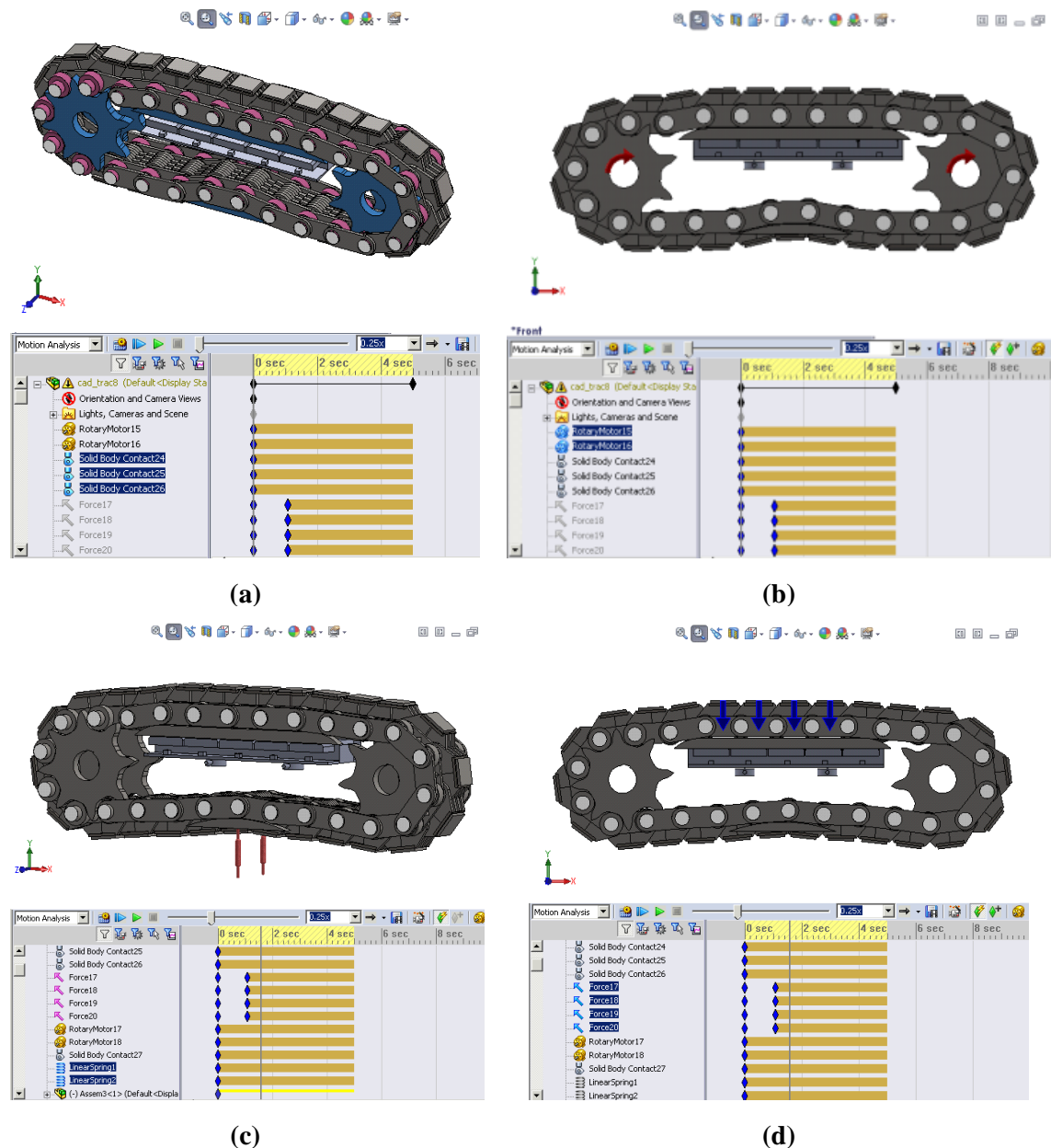


Figure 30. Kinematic model of the launching device: (a) mechanical contacts between main elements; (b) engines used; (c) springs used to modify the tension of the chain; (d) vertical load applied on the support links.

Table 4. Parameters of configuration for contact properties in the kinematic simulation.

ELASTIC PROPERTIES	
Stiffness	$1 \cdot 10^5$ [N/mm]
Exponent	1.5
Max damping	50 [N/(mm/s)]
Penetration	0.10 [mm]

Where:

Stiffness set up stiffness of contacts and elements interactions when there is a collision.

Exponent control the exponential relation between the contact force and displacement in the contact.

Max damping is the max coefficient of damping allowed in a collision of bodies.

Penetration is the maximum value of penetration allowed by the solver when two bodies in contact. When this value is reached, the solver applies the maximum damping.

4.4 Shape optimization of main resistant elements of mechanism

Shape optimization analyses were developed in order to reduce material in these elements without affecting their strength properties. The elements were optimized using numerical shape optimization method:

- Support links, see Figure 31.
- Links of the transmission chain, see Figure 32.

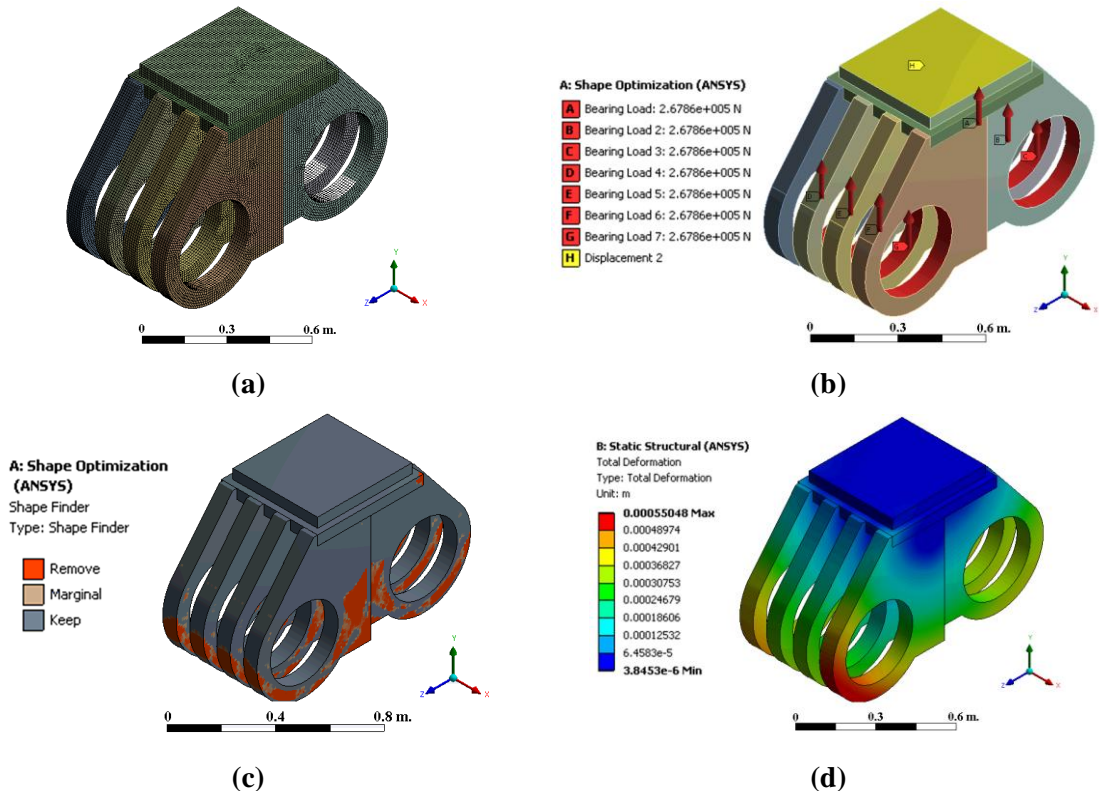


Figure 31. Numerical model of support links used in the shape optimization: (a) finite element model; (b) boundary conditions; (c) optimization results; (d) total deformation results for the optimized shape.

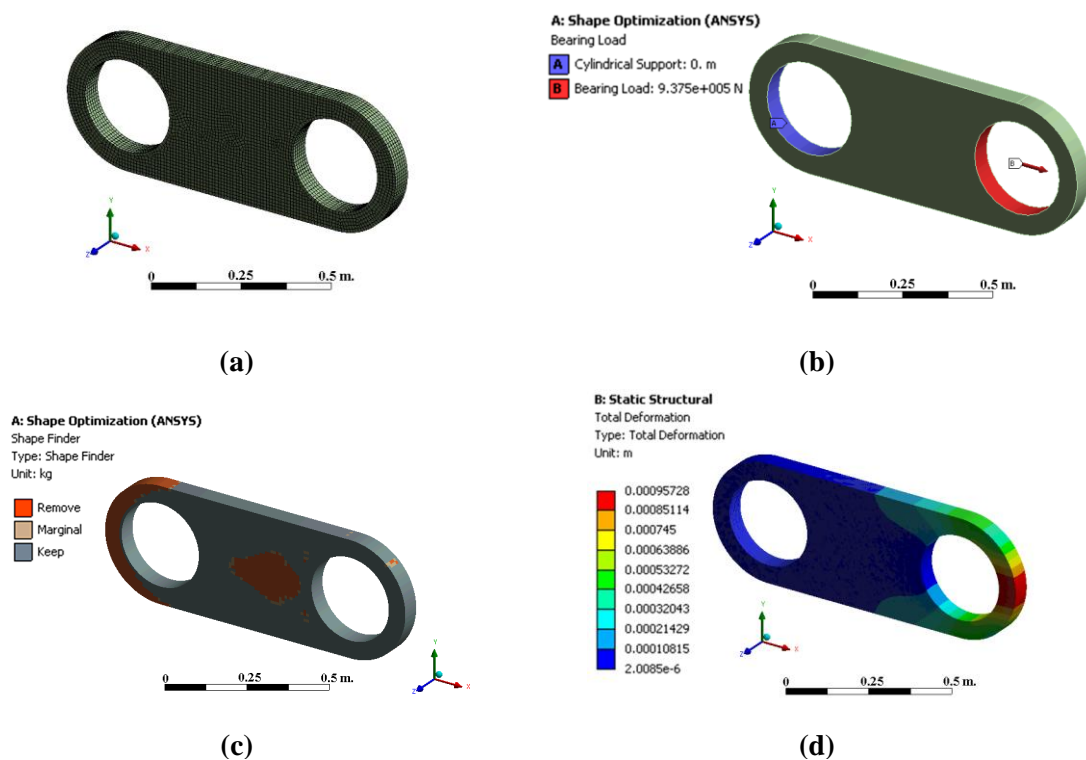


Figure 32. Numerical model of transmission chain links used in the shape optimization: (a) finite element model; (b) boundary conditions; (c) optimization results; (d) total deformation results for the optimized shape.

5

1:15 Scale Prototype

In this Doctoral Thesis a scale prototype of the new launching device was made in order to develop several laboratory tests.

This prototype was made by an additive fabrication technique, also called 3D printing. Materials used were mainly ABS plastic (Acrylonitrile Butadiene Styrene). By this technique it is possible to manufacture complex geometrical pieces by addition of layers of material. Several specimens with different directions of material layers were tested on traction tests, see Figure 33, [76].

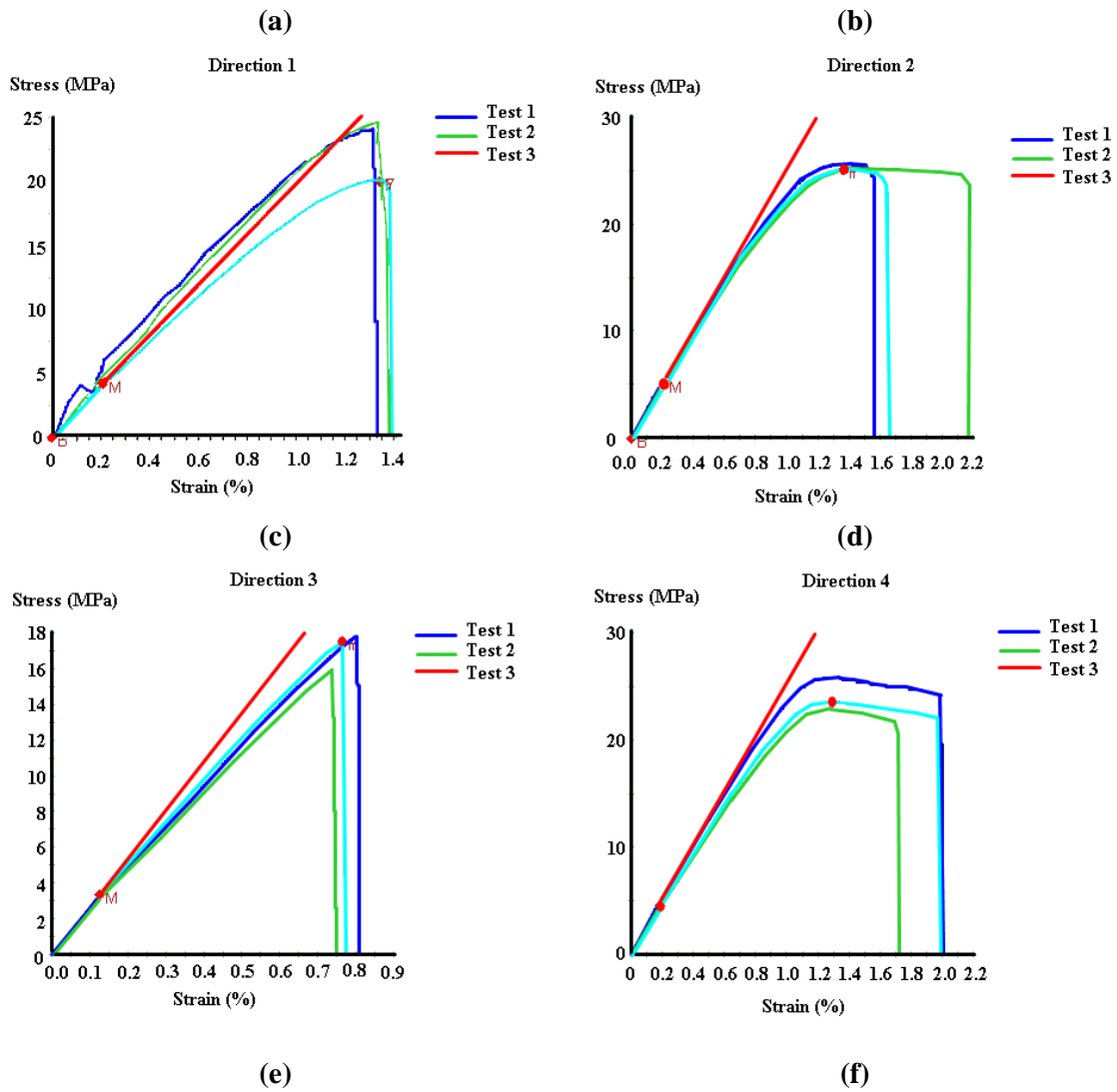
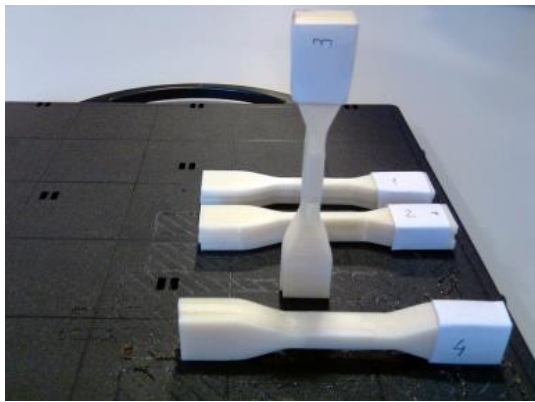


Figure 33. Material used for manufacturing by additive fabrication, ABS plastic: (a) specimens studied which were manufactured in four directions; (b) photo of traction tests; (c), (d), (e) and (f) results obtained in the traction tests.

Assembly of the majority of prototype components is shown in Figure 34.

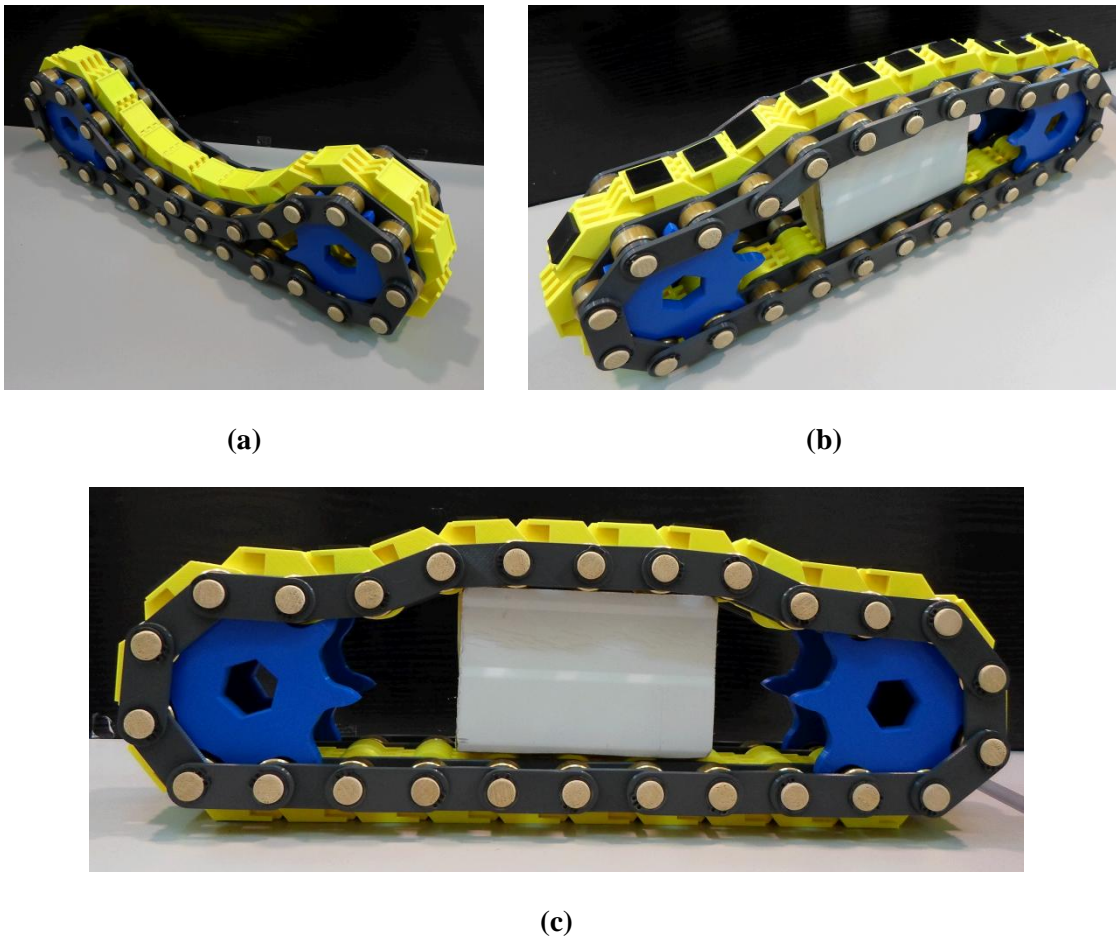


Figure 34. Elements of the prototype of launching device made of ABS: (a) closed chains; (b) chains and gears.

Furthermore, a scale prototype of bridge structure was manufactured in order to test both the interaction and launching procedure.

The engines of the launching mechanism prototype were calculated taking into account normal loads provided from scale bridge structure. These reactions from the scale bridge were obtained using numerical methods, see Figure 35.

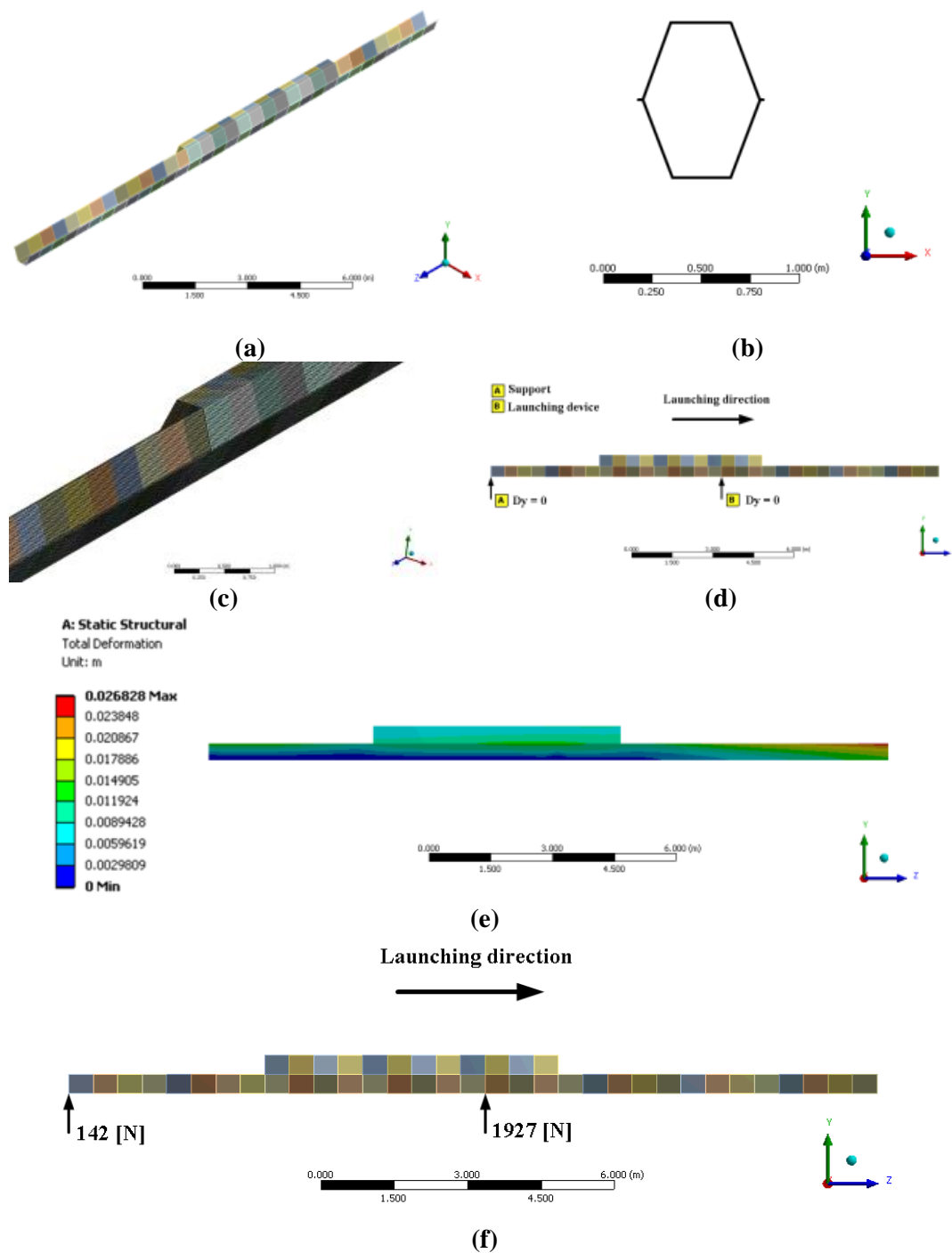


Figure 35. Numerical model of the bridge structure prototype: (a) geometrical model; (b) cross section of the geometrical model; (c) detail of the finite element mesh; (d) boundary conditions of the numerical model; (e) total deformation results; (f) launching device reaction and prefabrication area reaction.

A scale prototype of the bridge structure was manufactured in order to do experimental tests with the launching mechanism prototype.

6

Conclusions and future lines

In this chapter, conclusions of this Doctoral Thesis and some future research lines are presented.

6.1 Conclusions

Conclusions of the present Doctoral Thesis were set out on several topics:

- Conclusions from the state of the art
- Conclusions related with materials tests. These conclusions are mainly focused on results obtained from elastomers tests conclusions of design process of the new launching device.
- Conclusions about use of numerical simulation and CAD tools.
- Finally, general conclusions are presented.

The review of the launching bridge procedure, studied in this Doctoral Thesis, describes the importance of the method. The launching bridge procedure is a useful technique to construct bridges in difficult landscapes, i.e., landscapes wherein many piles cannot be used, large spans have to be saved, etc. In spite of advantages of this technique, there are several aspects which have to be improved. Construction companies are focused on the improvement of this method in order to develop new building procedures which are more secure, more efficient and more sustainable than current ones.

The recent global economic crisis has required the construction companies to employ an international expansion strategy. For this reason, most of the current works are in developing countries where new constructions are needed. However, these places have limited resources, protected environments and other problems which are the reasons

why improvement of procedures and development of new techniques are necessary. This Doctoral Thesis identified the following items which have to be taken in account in order to achieve both, new and better methods:

- Avoid dead times in order to decrease launching time.
- Sustainable methods are required by new standards to reduce environmental impact of civil constructions.
- Current systems use many auxiliary systems which cannot be used for other purposes. Sometimes, they are reused for other operations, other times they are discarded at the end of launching. This is not a good practice from the sustainable point of view. This social concern provides new research lines to decrease environment damages.
- Fatal accidents have occurred in the last decade is another important problem in the launching bridge procedure. Following this document review on current launching methods, two important conclusions were reached: on the one hand, most causes of fatalities were during erection time and were not during service life of a bridge; on the other hand, security systems are auxiliary equipment which is added to launching systems and makes the operation more difficult and expensive.
- Present launching systems are designed to work in forward direction. Nevertheless, there are occasions when backward displacement is needed considering bad weather conditions, overload risk, darkness, etc. Changes in launching displacement are difficult as well as increase cost and time of operation. New systems with the capacity to provide displacement in both directions, forward and backward are an important resource to improve erection methods.

Studies conducted on the materials provide the following conclusions:

- Coefficient of friction between neoprene and steel is high enough to launch a structure using the force of friction. In this Doctoral Thesis two elastomers were studied: Natural Rubber (NR) and Neoprene (CR: synthetic rubber which is produced by polymerization of chloroprene). There are two Shore Hardness values for each one of these specimens: NR60 and NR50 for NR and CR60 and CR45 for CR. Furthermore, the specimens were treated by an aging process. The coefficient of friction obtained in all tests was higher than 0.5. From the friction tests it could be concluded that coefficient of friction is not constant. In this case, frictional behavior for elastomers and metals depends on normal load, speed and temperature.

- *Pin-on-disc* tests provide consistent results for CR. Results show clear tendency in frictional behavior of this kind of elastomers in contact with steels studied. This trend makes possible to formulate several laws that represent the frictional behavior of CR as a function of normal load and velocity. However, NR results present important variations why which it is not possible to formulate a behavior law.
- Several aging treatments were applied in order to study changes of properties in elastomers. It was observed that friction behavior and compression strength is the same after this maturing process.
- The material used to make scale prototype was ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene). Most prototype elements are required to resist high tensile tension, for this reason tensile strength was evaluated using standards specimens. Several ABS specimens were made by additive manufacturing in order to study anisotropic behavior of each specimen. Results show that tensile strength of ABS specimens is enough for prototype load conditions.

Design process of this Doctoral Thesis shows how original and innovative ideas are subject of patent that resulted from learning and developing process. In this way, combination of researcher experience at design and knowledge of state of technique are very influential for new ideas. The following design tools were used in the present work.

- ELECTRA was used for selecting the best solution in an objective way following design criteria.
- CAD tools (Computer Aided Design) allowed the generation of parametric geometry models which can be used in other studies. This kind of geometry models are assembled using a lot of interactions between elements. This resource is useful for developing and improving initial proposal.
- Use of complex geometry models in numerical analysis by FEM (Finite Element Method) is possible through CAD tools.

Conclusions obtained from the use of Finite Element Method using software as ANSYS Inc. and SolidWorks ® are the following:

- Correctly use numerical simulation by FEM allows to study mechanisms. In this Doctoral Thesis numerical results are found to be in good agreement with actual behavior of the mechanical device.
- Numerical simulations provide wrong results which are not always obvious, so detection of mistaken simulations is not usually easy. For this reason, the researcher experience is important to analyze results obtained by numerical simulation.

- Numerical studies using finite elements method (FEM) were verified to be consistent with mechanical calculations by classical theory.
- Sub-structuring technique is useful to solve numerical problems with many degrees of freedom. Through this technique, complex studies can be simplified and the influence between two highly non-linear problems can be analyzed. Sub-structuring technique was used to study the interaction between bridge structure and launching device. In order to do this, the bridge structure was reduced to only one finite element -super element- which has multiple degrees of freedom with several master nodes. These master nodes provided bridge loads to launching device. In this way, difficult non-linear problems can be studied.
- Structural interaction by sub-structuring technique revealed the influence of bridge structure on displacement mechanism along different phases of the launching process.
- Dynamic simulations were useful to study mechanical movement of the launching device. Mechanical connections were reproduced using physical contacts between elements. The gear wheel provides displacement to traction chain and this chain moves support chain which consists of support links. These links can bear the weight of the bridge structure while they displace it. Furthermore, the tensional state of gear wheel is shown when the mechanism is moving.

Finally, as a general conclusion, the numerical simulation and experimental tests are consistent; the new device to launch bridges works as it was expected, that is continuous and in a bidirectional way. The new device can support the weight of the bridge structure and it can be adjusted to the shape of the deformed structure. This new device is also a sustainable system because it is reusable and it does not need auxiliary equipment. Moreover, the new launching device can be used alone with others due to its modular design. Admissible normal load over this new mechanism is $7.5 \cdot 10^6$ N. This new launching device can be used for many different types of structures which can be made of varied materials.

The load distribution in support links is variable along the launching process. Structural interaction studies show how the new device can compensate normal load adjusting chain of support to bridge shape.

The present Doctoral Thesis reveals how the use of CAD tools with numerical simulations using FEM and experimental tests is a great methodology to design, calculate and analyze complex problems. In this study, this combined approach was used to develop a new procedure for launching bridges using a new device which moves the structure in continuous and bidirectional ways using frictional force.

6.2 Future research lines

Future research lines are commented in this sub-chapter:

- Scale prototype manufactured in this Doctoral Thesis is being tested during the next months by the research group GICONSIME at the University of Oviedo. The new launching device and bridge structure are going to be tested in order to study mechanism operation, as well as structure and mechanism interaction and launching procedures. These tests will be an important contribution for future actual prototypes and civil construction methods.
- In order to compare the new launching device with other actual launching system would be interesting the real application of the new launching device. In this way, it could be possible to study the economical viability of the new mechanism as well as its profitability.
- A future interesting study is related with the materials. The study of different materials which could be used for the bridge and for the support plates in the new launching device is proposed.
- Related with materials, a deep study of elastomers properties using experimental tests would be useful in order to consider the materials in the numerical analysis. The numerical model of the hyperelastic materials is very difficult because it is highly nonlinearity properties. For this reason, a good experimental data are needed.

6.3 Publications

The results of this Doctoral Thesis were presented in several conference and scientific publications:

- “*Nuevos sistema de lanzamiento de puentes basado en doble cajón colaborante*” presented at the International Conference on research in construction. Madrid. November 2011. ISSN/ISBN 84-7292-401-7.
- “*Numerical analysis of a new continuous and bidirectional launching bridge device: contact-friction phenomenon*” presented at the Mechanical Engineering Tribology (METL) Advisory Committee Meeting. Purdue University, IN, USA. November 2012.
- Navarro-Manso A., del Coz Díaz J.J., Alonso-Martinez M., Castro-Fresno D., Blanco-Fernandez E. “*New launching method for steel bridges based on a self supporting deck system: FEM and DOE analysis*”. Automation in Construction. July 2012. Under review.

- “Structural interaction analysis between the bridge and a new bidirectional and continuous launching device.” *Engineering Structures*. In progress.
- “Non linear FEM analysis of a new bidirectional and continuous launching bridge device”. *Automation in Construction*. In progress.

Furthermore, both systems presented in this Doctoral Thesis, the new launching device and the new launching method based on double deck, were patented as National and International patent, see ANEXO I and ANEXO II. These patents were priced with the first position in the “Arquimides Prix” at Engineering and Architecture in 2012.

On the other hand, the author of the Doctoral Thesis has been working for GITECO and GICONSIME research group since January of 2011. Ever since, she has had the opportunity to work with famous researchers at Construction, Mechanical Engineering and Civil Engineering. These research works provide some publication:

- Castro-Fresno D., del Coz Díaz J.J., Alonso-Martinez M., Blanco-Fernandez E., Polanco Madrazo J.A., “*Numerical and experimental study of a new type of clip for joining cables*”. *Engineering Structures* 2012. 44: 107-121.
- “*Hygrothermal properties of lightweight aggregate concrete and their influence in a new hollow block manufacturing*”. 4th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management. Mérida. Mayo 2011. ISBN: 978-84-9978-014-6
- del Coz Diaz J.J., Garcia Nieto P.J., Vilan Vilan J.A., Alvarez Rabanal F.P., Navarro Manso A., Alonso Martínez M. “*Nonlinear analysis of the pressure field in industrial buildings with curved metallic roofs due to the wind effect by FEM*”. *Applied Mathematics and Computation*. April 2012. R1
- Alonso-Martinez M., Navarro Manso A., Castro-Fresno D., Alvarez Rabanal F.P., del Coz Díaz J.J. “*Particle collection efficiency of a new urban sustainable gravity settler: numerical analyses and experimental study*”. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. April 2013. Under review.
- Alvarez Rabanal F.P., Gencel O., García Nieto P.J., Alonso Martinez M., Navarro Manso A., del Coz Diaz J.J. “*Hygrothermal study of lightweight concrete hollow bricks: a new experimental and numerical procedure.*” *Energy and Buildings*. April 2013. Under review.

REFERENCIAS

- [1] Rosignoli M. *Bridge Launching*. Italy. Thomas Telford. 2002. ISBN: 727731467
- [2] VSL International LTD. *The incremental launching method in prestressed concrete bridge construction*. Schwarzenburg. Gerber AG. 1977
- [3] Rosignoli M. *Bridge erection machines*. USA. HNTB Corp. 2012
- [4] Manterola Armisén J., Siegrist Fernández C., Gil Ginés M.A. *Puentes*. Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. ETSICCP. 2000. ISBN: 978-84-7493-301-7
- [5] Fernández Troyano L. *Tierra sobre el agua*. Madrid. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 1999. ISBN: 84-380-0148-3.
- [6] IABSE: International Association for Bridge and Structural Engineers. *Guide for design of competitions for bridges*. Zurich. IABSE. 2013. ISBN: 978-3-85748-131-4
- [7] Castañón Jiménez C. *Aspectos condicionantes del diseño y análisis de puentes construidos por empuje*. Trabajo de Investigación. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. 2008
- [8] Wardhana K., Hadipriono F.C. *Analysis of recent bridge faillures in the United States*. Journal of Performance of Constructed Facilities. 17: 144-150. 2003
- [9] Pérez-Fadón Martínez S. *Construcción de viaductos para líneas de FF.CC. Tableros empujados*. Revista de Obras Públicas. 3445: 47-52 2004
- [10] Wahab M.M.A., Roeck G.D. *Damage detection in bridges using modal curvatures: application to a real damage scenario*. Journal of Sound Vibration. 226: 217-235. 1999
- [11] Bernabéu Larena J. *Evolución tipológica y estética de los puentes mixtos en Europa*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. 2004
- [12] Gerardino Perdomo M. *Estudio comparativo de puentes construidos por voladizos sucesivos*. Tesis de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 2011
- [13] Uribe Sasiain N. *Reproducción numérica y experimental del proceso de lanzamiento de un puente metálico por empujes sucesivos*. Tesis de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 2012
- [14] Fontán Pérez A.N. *Optimización de la sección transversal y del pico de lanzamiento de puentes lanzados de hormigón pretensado*. Tesis Doctoral. Universidad de La Coruña. La Coruña. 2009
- [15] Serrano Sánchez G., Obregón Cobos J., Rodríguez Santiago J., Trigo Tomey P., Hué García F., Peset González L. *Fabricación de tableros para el puente de Öresund entre Dinamarca y Suecia*. Hormigón y Acero. 230: 3-42. 2003
- [16] Millanes Mato F. *Puentes mixtos para ferrocarril*. Jornada Técnica Anual ACHE: Puentes para el Ferrocarril de Alta Velocidad. Madrid. 2009

- [17]LaViolette M., Wipf T., Yoon-Si Lee, Bigelow J., Phares B. *Bridge construction practices using incremental launching*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2007
- [18]Oliveira J.J., Reis A.J. *Nonlinear analysis of composite steel-concrete cable-stayed bridges*. Engineering Structures. 32: 2702-2716. 2010
- [19]Somja H., Ville de Goyet V. *A new strategy for analysis of erection stages including an efficient method for creep analysis*. Engineering Structures. 30: 2871-2883. 2008
- [20]Shigley J.E., Mitchell L.D. *Diseño en ingeniería mecánica*. 3ª Ed. En Español, México. McGrawHill. 1985. ISBN: 0-07-056888-X
- [21]Miravete A.; Larrodé E., Castejón L., Cuartero J. *Los transportes en la ingeniería industrial (teoría)*. Barcelona. Reverte. 1998. ISBN: 84-921349-5-X
- [22]López Roa A. *Cintas transportadoras*. CIE Dossat 2000. 2002. ISBN: 978-84-95312-99-0
- [23]Wong J.Y. *Theory of ground vehicles*. USA. John Wiley and sons, Inc. 1978. ISBN: 0-47-03470-3
- [24]Popp K., Schiehlen W. *Ground vehicle dynamics*. Germany. Springer. 2010 ISBN: 978-3-540-68553-1
- [25]Muro T., O'Brien J. *Terramechanics. Land locomotion mechanics*. Taylor and Francis. 2004. ISBN: 90-5809-572-X
- [26]Larburu N. *Máquinas. Prontuario*. Madrid. Paraninfo. 2008. ISBN: 978-84-283-1968-3
- [27]Romero C. *Análisis de las decisiones multicriterio*. Madrid. Isdefe. 1996 ISBN: 84-89338-14-0
- [28]GB940345. *Launching machine for a bridge beam*. 1963
- [29]FR2437466 (B3). *Procede et appareil pour la construction de ponts*. 1982
- [30]US004519465. *Track type four sprocket wheel drive crawler tractor*. 1985
- [31]CA1302666. *Bridgelaying vehicle with a launching assembly for bridges or bridge sections carried one on top of the other*. 1992
- [32]EP0447825 (B2). *Dismountable trackway bridge with a launching rail arranged between the trackways*. 1997
- [33]JP10-219628. *Girder sending-out device*. 1998
- [34]US005732430. *Device for assembling and laying track support and launching support sections into a bridge support structure*. 1998
- [35]GR990100215. *Bridge-launching vehicle*. 1998
- [36]WO 00/73589(A1). *Device for supporting a moving load*. 2000
- [37]JP2001063999(A). *Moving device for heavy object*. 2001
- [38]US2002/0178518(A1). *Military quick launching bridge system*. 2002
- [39]JP2004019126 (A). *Incremental launching erection method of composite PC bridge and composite PC structure*. 2004

- [40]KR20050009891 (A). *Launching system to push an upper girder in a bridge to be constructed through an incremental launching method by including a molding place*. 2005
- [41]WO2009142395 (A3). *Automatic girder launching apparatus for incremental launching*. 2010
- [42]CN101818481 (B). *Device for performing incremental launching construction on bridge by using multi-roller sliding ways and construction method thereof*. 2011.
- [43]Navarro-Manso A., del Coz Díaz J.J., Alonso-Martínez M., Castro-Fresno D.; Blanco-Fernández E. *New launching method for steel bridges based on a self-supporting deck system: FEM and DOE analysis*. Automation in Construction. Under-review.
- [44]UNE 18002:1990. “*Transmisión de precisión. Cadenas de rodillos de paso corto y ruedas dentadas correspondientes.*” 1990-09-18.
- [45]ASME B 29.1 *Precision Power Transmission Roller Chains, Attachments, and Sprockets*. 2011
- [46]Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. *Nota técnica sobre aparatos de apoyo para puentes de carretera*. Madrid. Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. MOPTMA. 1995. ISBN: 84-498-1980-6
- [47]Gear C.W. *Numerical initial value problems in ordinary differential equations*. New Jersey. Prentice-Hall. 1971
- [48]Grellmann W., Seidler S. *Polymer testing*. Carl Hanser GmbH. 2007. ISBN: 978-3446409002
- [49]Bayer R.G. *Mechanical wear fundamentals and testing*. CRC Press. 2004. ISBN: 978-0824746209
- [50]Czichos H. *Tribology a systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear*. USA. Elsevier Scientific Publishing Company. 1978 ISBN: 0-444-41677-3
- [51]ASTM G99-05. *Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus*. 2010
- [52]Berger E.J., Sadeghi F., Krousgrill C.M. *Torque transmission characteristics of automatic transmission wet clutches: experimental results and numerical comparison*. Tribology Transactions. 40: 539-548. 1997
- [53]Leonard B.D., Sadeghi F., Shinde S., Mittelbach M. *A numerical and experimental investigation of fretting wear and a new procedure for fretting wear maps*. Tribology Transactions. 55: 313-324. 2012
- [54]Bomidi J.A.R., Weinzapfel N., Sadeghi F., Liebel A., Weber J. *An improved approach for 3D rolling contact fatigue simulations with microstructure topology*. Tribology Transactions. 56: 385-399. 2013

- [55]UNE-ISO 188:2009. *Elastómeros, vulcanizados o termoplásticos. Envejecimiento acelerado y ensayos de resistencia al calor*. 2009
- [56]UNE-ISO 23529:2008. *Elastómeros. Procedimiento general de preparación y acondicionamiento de probetas para ensayos físicos*. 2008
- [57]ASTM D573-04. *Standard tests method for rubber. Deterioration in an air oven*. 2010
- [58]Myshkin N.K., Petrokovets M.I., Kovalev A.V. "Tribology of polymers: adhesion, friction, wear and mass-transfer." *Tribology International*. 38: 910-921. 2006.
- [59]Gopal R.R., Blau P.J., Eal H.L. *Friction microprobe studies of ion implanted polymer surfaces*. *Wear*. 184: 213-222. 1995
- [60]Samyn P., Schoukens G. *Experimental extrapolation model for friction and wear of polymers on different testing scales*. *International Journal of Mechanical Sciences*. 50: 1390-1403. 2008
- [61]Boissonnet L., Duffau B., Montmitonnet P. *A wear particle-based model of friction in a polymer-metal high pressure contact*. *Wear*. 286: 55-65. 2012
- [62]Prado Tamargo J.R. *Sistema de diseño, optimización y cálculo de maquinaria de mantenimiento continua por el método de los elementos finitos*. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. Gijón. 2006
- [63]Turner M.J., Clough R.W., Martin H.C., Topp L.J. *Stiffness and deflection analysis of complex structures*. *Journal of the aeronautical sciences*. 9: 805-823. 1956.
- [64]Zeinkiewick O.C., Cheung Y.K. *The finite element method in structural and continuum mechanics*. McGraw Hill. London. 1967
- [65]Zeinkiewick O.C., Taylor R.L. *El método de los elementos finitos: mecánica de sólidos y fluido. Dinámica y no linealidades*. McGraw Hill. ISBN: 84-481-0178-2
- [66]Alvarez Rabanal F.P. *Análisis del comportamiento acústico mediante simulación numérica de la interacción fluido estructura*. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. Gijón. 2009
- [67]Blanco Fenández E. *Sistemas flexibles de alta resistencia para la estabilización de taludes. Revisión de los métodos de diseño existentes y propuestas de una nueva metodología de dimensionamiento*. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. Santander. 2011
- [68]Castro-Fresno D., del Coz Díaz J.J., Alonso Martínez M., Blanco-Fernandez E., Polanco Madrazo J.A. *Numerical and experimental study of a new type of clip for joining cables*. *Engineering Structures*. 44: 107-121. 2012

- [69]del Coz Díaz J.J., Álvarez Rabanal F.P., García Nieto P.J., Roces-García J., Alonso-Estébanez A. *Nonlinear buckling and failure analysis of a self-weighted metallic roof with and without skylights by FEM*. Engineering Failure Analysis. 26: 65-80. 2012
- [70]Moaveni S. *Finite Element Analysis: Theory and applications with ANSYS*. New York. Prentice-Hall 2007. ISBN: 978-0131890800
- [71]Madenci E., Guven I. *The finite element method and applications in engineering using ANSYS*. New York. Springer. 2007. ISBN 978-0-387-28290-9
- [72]Gómez González S. *El gran libro de SolidWorks office professional*. Barcelona. Marcombo.S.A. 2010. ISBN: 978-84-267-1458-9
- [73]Bathe K.J. *Finite element procedures*. New Jersey. Prentice-Hall. 2007. ISBN: 0-13-301458-4
- [74]Laursen T.A. *Computational contact and impact mechanics*. New York. Springer. 2003. ISBN: 978-3540429067
- [75]Wriggers P. *Computational contact mechanics*. New York. Springer. 2006. ISBN: 978-3540326083
- [76]ISO 527:2009. *Plastics. Determination of tensile properties*. 2009

ANEXO I

PATENTE WO-2013001115:

“Sistema y método de lanzamiento de estructuras”

(12) SOLICITUD INTERNACIONAL PUBLICADA EN VIRTUD DEL TRATADO DE COOPERACIÓN EN MATERIA DE PATENTES (PCT)

(19) Organización Mundial de la Propiedad Intelectual
Oficina internacional



(10) Número de Publicación Internacional
WO 2013/001115 A1

(43) Fecha de publicación internacional
3 de enero de 2013 (03.01.2013)

WIPO | PCT

- (51) Clasificación Internacional de Patentes:
E01D 21/06 (2006.01)
- (21) Número de la solicitud internacional:
PCT/ES2012/000183
- (22) Fecha de presentación internacional:
29 de junio de 2012 (29.06.2012)
- (25) Idioma de presentación: español
- (26) Idioma de publicación: español
- (30) Datos relativos a la prioridad:
P201100755 30 de junio de 2011 (30.06.2011) ES
- (71) Solicitantes (para todos los Estados designados salvo US):
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA [ES/ES]; Pabellón de Gobierno, Avda. de los Castros, E-39005 Santander, Cantabria (ES). **UNIVERSIDAD DE OVIEDO** [ES/ES]; Edificio Severo Ochoa, planta baja, Campus de "El Cristo", E-33006 Oviedo (Asturias) (ES).
- (72) Inventores; e
- (75) Inventores/Solicitantes (para US solamente): **COZ DIAZ, Juan José del** [ES/ES]; Edificio Severo Ochoa, planta baja, Campus de "El Cristo", E-33006 Oviedo (Asturias) (ES). **CASTRO FRESNO, Daniel** [ES/ES]; Dpto. Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos., Avda.

de los Castros 44, E-39005 Santander. Cantabria (ES). **Navarro Manso, Antonio** [ES/ES]; Edificio Severo Ochoa, planta baja, Campus de "El Cristo", E-33006 Oviedo (Asturias) (ES). **ALONSO, Martinez, Mar** [ES/ES]; Edificio Severo Ochoa, planta baja, Campus de "El Cristo", E-33006 Oviedo (Asturias) (ES).

- (81) Estados designados (a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección nacional admisible): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) Estados designados (a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección regional admisible): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), euroasiática (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europea (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,

[Continúa en la página siguiente]

(54) Title: SYSTEM AND METHOD FOR LAUNCHING STRUCTURES

(54) Título : SISTEMA Y MÉTODO DE LANZAMIENTO DE ESTRUCTURAS



FIGURA 1-A

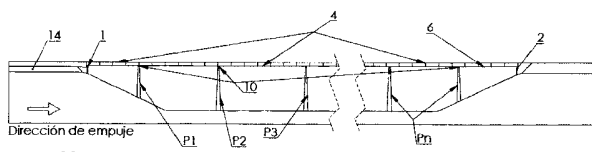


FIGURA 1-B

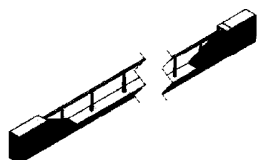


FIGURA 1-C

AA pushing direction

(57) Abstract: The invention relates to a system for launching a structure, comprising: a first deck (4) produced and mounted by means of the successive addition of voussoirs and designed to be longitudinally moved up to stacks by means of at least one pushing system (18); and a second deck (6) placed on the upper part of the first deck, or lower deck (4), and securely connected to said lower deck (4) by means of dismantlable connecting means (8). The second deck, or upper deck, is designed to be the last span of the structure and, when securely fixed to the lower deck (4), is designed to be pushed over the stacks together with the lower deck. The connection means (8) are designed to transmit the force from the lower deck to the upper deck, in such a way that the two decks work together in a joint manner, collaborating in order to resist the overall shear, flexion and torsion forces that are produced during the launching. The invention also relates to a method for launching a structure by pushing.

(57) Resumen: Un sistema de lanzamiento de una estructura, que comprende: un primer tablero (4) fabricado y montado mediante la adición sucesiva de dovelas y configurado para desplazarse longitudinalmente hacia unas pilas mediante uno o varios sistemas

[Continúa en la página siguiente]

WO 2013/001115 A1



RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

— *antes de la expiración del plazo para modificar las reivindicaciones y para ser republicada si se reciben modificaciones (Regla 48.2(h))*

Publicada:

— *con informe de búsqueda internacional (Art. 21(3))*

de empuje (18); y un segundo tablero (6) colocado sobre la parte superior del primer tablero o tablero inferior (4), y unido solidariamente al inferior (4) mediante medios de unión (8) desmontables. El segundo tablero o tablero superior está diseñado para ser el último vano de la estructura y, al estar unido solidariamente al inferior (4), está configurado para ser empujado sobre las pilas conjuntamente con el tablero inferior. Los medios de unión (8) están configurados para transmitir el esfuerzo desde el tablero inferior al superior, de forma que ambos trabajan de forma solidaria colaborando para resistir los esfuerzos globales de cortante, flexión y torsión que se producen durante el lanzamiento. Un método de lanzamiento de una estructura mediante empuje.

SISTEMA Y MÉTODO DE LANZAMIENTO DE ESTRUCTURAS

CAMPO DE LA INVENCIÓN

5 La presente invención pertenece al sector de las obras públicas, para la planificación, proyecto y construcción de infraestructuras del transporte terrestre; y en concreto, a la construcción de puentes y viaductos, especialmente de gran longitud, para carretera y ferrocarril.

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

10 La técnica de construcción de puentes por empuje nace en el siglo XIX para los grandes viaductos en celosía metálicos, necesarios en la incipiente red de ferrocarril europea de la época. No es hasta mediados del siglo XX cuando este sistema constructivo alcanza su racionalización y popularidad, también para viaductos de hormigón. La primera
15 aplicación moderna de este método data de 1961 (Puente sobre el río Caroní, Venezuela, Leonhardt y Baur) y considera la construcción de todo el viaducto de hormigón en la plataforma de acceso de uno de los estribos, en un emplazamiento fijo, y su posterior empuje sobre las pilas ya construidas. Muy pronto se vio la necesidad de
20 la mejora del método, adoptando lo que hoy en día se conoce como “Incremental Launching Method”, que se describe en la patente DE-1237603-B y que consiste en la construcción y empuje sucesivo de tramos más cortos de puente, denominados dovelas, y que se empalman en obra antes de cada lanzamiento (la unión es de variada tipología, como soldadura, pretensado, u otras). Un ejemplo de esta aplicación es el puente sobre
25 el río Innm en Kufstein, Austria, en 1965 (Leonhardt y Baur).

Hoy en día es un proceso habitual para la construcción de puentes, sobre todo si tienen un número suficiente de vanos iguales. El sistema de construcción de estructuras por empuje se puede resumir en las siguientes actividades: construcción de tramos de

5 tablero, de longitudes variables (en función de la tipología de la estructura y de otros factores de planificación), en un emplazamiento fijo, habilitado a tal efecto en una zona (parque) adyacente a la ubicación definitiva de la estructura; una vez ejecutado el tramo determinado, es necesaria la liberación de espacio en el parque, para la construcción del siguiente tramo, por lo que se desplaza hacia adelante el tablero construido hasta el momento, deslizándose sobre todos los apoyos de la estructura en pilas y estribos, y sobre aquellos otros provisionales que haya sido necesario disponer entre los mismos. Esta técnica es aplicable especialmente a estructuras con una gran longitud, de forma que la repetitividad de las tareas justifique la implantación del sistema referido; y también en aquellas otras en las que por su altura, dificultad de acceso o protección ambiental del entorno sea recomendable independizar la construcción del suelo; permitiendo, además, un elevado nivel de calidad y seguridad en los trabajos, gracias a la ejecución de los mimos de forma repetitiva en una instalación fija.

15 La tendencia de la técnica es la extensión de dicho procedimiento a un mayor número de casos, ampliando el rango de luces, tipologías y longitudes de las estructuras “empujables”.

20 Los sistemas de lanzamiento utilizados actualmente para tableros de puentes o viaductos, se distinguen primeramente por el material de su sección, ya sea metálica o de hormigón. El parámetro más importante que determina el sistema más aconsejable en cada caso es la luz máxima que se debe empujar. Ejemplos de documentos que describen los sistemas existentes empleados en el lanzamiento de tableros metálicos, con independencia del sistema de empuje utilizado, que no es objeto de la presente invención, se citan a continuación: Rosignoli, Marco. 2002. “Bridge launching”. Thomas Telford; Association Française de Génie Civil. 1999. “Guide des ponts poussés”. Varios autores; Tesis Doctoral “Evolución tipológica y estética de los puentes mixtos en Europa”, Jorge Bernabéu Larena, ETSICCP, Madrid, 2004; Trabajo de Investigación “Aspectos condicionantes del diseño y análisis de puentes construidos por empuje.”, Carlos Castañón Jiménez, ETSICCP, Madrid, 2008.

Uno de los principales problemas de los sistemas de lanzamiento se deriva de la diferencia existente entre el esquema resistente de la estructura durante el proceso constructivo (voladizo) y durante su vida útil o situación de servicio (viga continua).
5 Además, la naturaleza evolutiva del lanzamiento implica que todas las secciones del tablero soportarán esfuerzos alternos de flexión positiva y negativa, siendo muy elevados (superiores a los esfuerzos en servicio) en los dos primeros vanos de avance. Además, todas las secciones del puente pasaran durante su movimiento por los apoyos de cada pila, por lo que todas deberán ser capaces de soportar el esfuerzo cortante y el
10 efecto local de la carga concentrada, y no solo las secciones que se diseñan para apoyo definitivo de la estructura.

Para dotar de la resistencia necesaria a estos dos primeros vanos, existen actualmente dos posibles soluciones:

15 La primera solución consiste en reducir la luz máxima a empujar, mediante la disposición de pilas provisionales intermedias (tal y como se muestra, por ejemplo, en Fernández Troyano, Leonardo. 1999, 1ª ed. "Tierra sobre el agua". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Colección de Ciencias Humanidades e
20 Ingeniería N°55, ISBN: 84-380-0143-3 y D.L.: M.10.000-1999. Pág 404, F.6-41 Puente sobre el río Caroní, Venezuela; y en la solicitud de patente china CN101324054-A). El principal problema de este sistema es la necesidad de duplicar las cimentaciones de pilas y la construcción de elementos verticales de soporte importantes, debido a las elevadas fuerzas horizontales y verticales que se producen durante el lanzamiento. En
25 ocasiones, no es posible acceder al fondo y laderas del valle para la construcción de las pilas provisionales, por la orografía del mismo o la especial protección ambiental del entorno.

La segunda solución consiste en disponer ciertos elementos auxiliares que permitan al
30 voladizo soportar los grandes esfuerzos que se producen en fase de avance máximo, tales como los siguientes:

-Nariz de empuje (también llamada pico de lanzamiento): estructura metálica anclada en la sección frontal de empuje, cuya principal característica es su reducido peso propio con respecto al tablero definitivo que se empuja. Suele tener una longitud variable entre el 30% y 60% de la luz máxima a empujar y una relación adecuada de rigidez con respecto al tablero para que los esfuerzos que se generan en la fase más larga del empuje no penalicen el dimensionamiento definitivo de la sección del tablero en sus dos primeros vanos, o encarezcan de forma excesiva la propia nariz. Por este motivo, para cada empuje particular, se necesita una nariz diferente; siendo también variable la tipología de unión de ésta a la sección frontal del tablero (Manterola Armisén, Javier. 2000 "Puentes". ETSICCP). Ejemplos de narices de empuje pueden encontrarse: en Fernández Troyano, Leonardo. 1999, 1ª ed. "Tierra sobre el agua". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Colección de Ciencias Humanidades e Ingeniería Nº55, ISBN: 84-380-0143-3 y D.L.: M.10.000-1999. Pág 404, F.6-42, Acueducto del Alcandre, Huesca; y en las solicitudes de patente japonesas JP2004107972-A y JP2001193016-A y en la solicitud de patente coreana KR20030022941-A. El inconveniente fundamental es la necesidad de adaptar la nariz a cada caso concreto, para optimizar el lanzamiento, hecho que dificulta la reutilización del pico en otras estructuras diferentes.

-Aligeramiento del tramo frontal (volado) de avance: es un caso particular del anterior, en el cual se lanza el tablero con solo una parte de su sección resistente final, y completando la construcción una vez la estructura ha sido colocado en su posición definitiva entre ambos estribos. Un ejemplo clásico es el lanzamiento de los dos primeros vanos de un puente metálico mixto sin la parte correspondiente de hormigón (ya sean prelosas o losa in situ). Generalmente se utiliza para luces cortas o medias (40-70 m.) (Millanes Mato, Francisco. 2007. "Viaducto Arroyo Las Piedra, primer viaducto mixto de las líneas de alta velocidad españolas. Hormigón y Acero, 243, 5-38.). Ejemplos de esta técnica se pueden encontrar en la patente rusa RU2390601-C1 y en la solicitud de patente japonesa JP2006348650. No todas las tipologías de secciones para estructuras permiten el aligeramiento de la sección

frontal.

-Torre de atirantamiento provisional: situada aproximadamente sobre la sección que se encuentra sobre la pila de avance durante la situación de empuje máximo, soporta mediante cables dorsales y frontales la punta de avance, constituyendo un sistema activo de control de flecha en la llegada a pila. Para optimizar la eficiencia estructural del sistema es frecuente variar la tensión de los cables, según las diferentes situaciones de avance; con los inconvenientes de la necesidad de disponer de elementos activos para variar la tensión en los mismos, y de introducir una mayor complejidad en la operación de empuje. Aunque también sería posible diseñarlo como un atirantamiento pasivo que recoja la carga del voladizo en la peor situación; perdiendo entonces parte de su eficacia. Como en los casos anteriores, el número de cables, tipología de la torre, etc... es variable según la sección y la luz del tablero a lanzar (Fernández Troyano, Leonardo. 2004, 2ª ed. "Tierra sobre el agua". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos). Un ejemplo de esta técnica se puede encontrar en Fernández Troyano, Leonardo. 1999, 1ª ed. "Tierra sobre el agua". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Colección de Ciencias Humanidades e Ingeniería N°55, ISBN: 84-380-0143-3 y D.L.: M.10.000-1999. Pág 402, F.6-39, Viaducto de la Bouble, Francia; y en la solicitud de patente alemana DE2703822-A1, que describe una combinación de nariz de empuje más atirantamiento provisional, para puente de hormigón.

-Torre de atirantamiento definitiva: constituye un caso particular, cuando el diseño del tablero de la estructura no es una viga continua, sino que se trata de una estructura concebida como atirantada. En este caso es posible contar con la presencia de este elemento definitivo de la estructura para empujar el tablero (de forma análoga al sistema constructivo de avance en voladizo para puentes o viaductos atirantados). Esta tipología especial no se encuentra contemplada en el objeto de la presente patente. Un ejemplo de esta técnica se puede encontrar en Fernández Troyano, Leonardo. 1999, 1ª ed. "Tierra sobre el agua". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Colección de Ciencias Humanidades e Ingeniería N°55, ISBN: 84-380-0143-3 y D.L.:

M.10.000-1999. Pág 651, F.8-225, Puentes de las Calles Franklin y Düsseldorf, Alemania; y en la solicitud de patente francesa FR2465835-A1, que describe una combinación de nariz de empuje más atirantado definitivo.

5 -Disposición de un tirante de tracción superior: esta solución permite soportar la fuerte flexión negativa que se produce en situación de máximo avance sobre la sección de pila. Usualmente se utiliza en el rango de luces inferior para este tipo de puentes o viaductos, ya que el sobredimensionamiento del tirante es excesivo para luces superiores a 50 ó 60 m. (Fernández Troyano, Leonardo. 2004, 2ª ed. “Tierra sobre el
10 agua”. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos). El campo de aplicación de este sistema se reduce a un subconjunto de casos relativamente pequeño. Un ejemplo de realización es el Viaducto de Cándano, en la A-8. Autovía del Cantábrico. Tramo Novellana-Ballota, cuya estructura metálica fue ejecutada por JOAMA, S. L.

15 -Sistema ábaco: se dispone sobre las pilas un capitel, generalmente de hormigón y de longitud máxima en torno al 20% de la luz a lanzar; con el doble objetivo de disminuir la longitud máxima de voladizo y de simplificar el empuje de tableros de canto variable (Martínez Calzón, Julio. 2002. “El sistema ábaco para el lanzamiento de puentes
20 Mixtos, estado actual de su tecnología y análisis). El principal inconveniente de este sistema es la modificación de las pilas, y en especial la unión de la cabeza de las mismas con el tablero o dintel, debiendo ejecutar una conexión compleja y específica.

25 -Refuerzo de las secciones de los dos primeros vanos del tablero: solución en general antieconómica, solo justificable en casos muy particulares y de poca luz, ya que el encarecimiento y aumento de peso propio derivado del incremento de espesores de acero puede hacer inviable la construcción. Además, estas secciones reforzadas se sitúan en las proximidades de los vanos laterales o cortos, donde los esfuerzos a
30 puente terminado son, en general inferiores con respecto al resto de la estructura (Manterola Armisén, Javier. 2000 “Puentes”. ETSICCP).

- Empuje desde ambos estribos simultáneamente: a pesar del coste que representa duplicar el dispositivo de empuje, así como el preparar dos parques de fabricación y lanzamiento, este sistema permite duplicar prácticamente las luces a empujar, siendo realmente efectivo cuando no se utiliza ningún otro medio auxiliar, o cuando se trata de empuje de tableros con atirantamiento definitivo (Fernández Troyano, Leonardo. 2004, 2ª ed. "Tierra sobre el agua". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos). Ejemplos de realizaciones se pueden encontrar en Fernández Troyano, Leonardo. 1999, 1ª ed. "Tierra sobre el agua". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Colección de Ciencias Humanidades e Ingeniería N°55, ISBN: 84-380-0143-3 y D.L.: M.10.000-1999. Pág 653, F.8-227, Puente sobre el Nudo Ferroviario Milán-Certosa, Italia; y en Viaducto de Alvares, en la A-8. Autovía del Cantábrico. Tramo Tamón-Villalegre, cuya estructura metálica fue ejecutada por JOAMA, S. L.

- Finalmente, se menciona la posibilidad de combinar varios de los métodos anteriores, por lo general destinada a obras de gran envergadura y donde el coste de la estructura se sale del orden de magnitud aplicable a un método general. Además, la multiplicidad de medios auxiliares penaliza en exceso la prefabricación y racionalización del proceso constructivo, constando éste de multitud de operaciones particulares, y en general, no automatizables; y también la extensión del método desde el lanzamiento de un tablero de tipología viga continua hasta empuje de tableros sobre arcos, tableros arco "bow-string", etc. (Fernández Troyano, Leonardo. 2004, 2ª ed. "Tierra sobre el agua". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos). Ejemplos de estas técnicas se ilustran en , por ejemplo en Fernández Troyano, Leonardo. 1999, 1ª ed. "Tierra sobre el agua". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Colección de Ciencias Humanidades e Ingeniería N°55, ISBN: 84-380-0143-3 y D.L.: M.10.000-1999. Pág 463, F.6-142, Viaducto de Ferrocarril sobre el Main, Veitshöclein, Alemania; , por ejemplo en Fernández Troyano, Leonardo. 1999, 1ª ed. "Tierra sobre el agua". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Colección de Ciencias Humanidades e Ingeniería N°55, ISBN: 84-380-0143-3 y D.L.: M.10.000-1999. Pág 463, F.6-141, Viaducto de Canero, Asturias; y en las patentes alemanas DE1175262-B y DE3616109-C1.

La característica común de todos estos sistemas es que representan un coste importante en tiempo de ejecución y presupuesto, y que posteriormente hay que retirar estos medios auxiliares, es decir, que no formarán parte de la estructura definitiva. Además, todos estos sistemas se caracterizan por su poca adaptabilidad a la generalidad de los casos, siendo lo más normal el utilizarlos y particularizarlos solo para una estructura concreta. La implementación de los mismos materiales a otros casos, aunque posible, en general es más costosa que la nueva fabricación de estos elementos (Rosignoli, Marco. 2002. "Bridge launching". Thomas Telford; Association Française de Génie Civil. 1999. "Guide des ponts poussés". Varios autores; Marchetti, M. E. 1984. "Specific design problems related to bridges built using the incremental launching method." Engineering Structures, 6 (july), 185-210). Por último, las operaciones intermedias que requieren la mayoría de los métodos analizados anteriormente, también suponen incrementos en los tiempos de lanzamiento y excesiva diversificación en las tareas, perjudicando la racionalización que el método de empuje incremental de puentes permite.

Considerando el estado actual de la técnica, se puede concluir que las luces máximas de empuje se sitúan, en el mejor de los casos, para puentes o viaductos metálicos en el entorno de los 80 – 100 m de luz, aunque es posible llegar con una combinación de medios auxiliares singular y particular para cada caso (con los inconvenientes que ello implica) a luces en el entorno de los 140 m, consumiendo un porcentaje significativo del tiempo de ejecución en el montaje y posterior retirada de elementos auxiliares costosos y complejos, que no formarán parte de la estructura definitiva.

RESUMEN DE LA INVENCION

La presente invención trata de resolver los inconvenientes mencionados anteriormente mediante un sistema de lanzamiento de tableros de puentes o viaductos y un método de lanzamiento de los mismos. Gracias a la disposición del último vano de la estructura

definitiva encima del tablero a empujar, y materializando una unión entre ambas partes capaz de transmitir los esfuerzos globales de flexión, cortante y torsión a través de un mecanismo fundamentalmente de rasante, se consigue el refuerzo de las secciones pésimas en situación de máximo voladizo durante el avance, trabajando ambas partes de forma solidaria y colaborando para resistir los esfuerzos mencionados. Y con una repercusión positiva en la economía y plazos de la ejecución.

Concretamente, en un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un sistema de lanzamiento de una estructura, que comprende: un primer tablero que ha sido fabricado y montado en un parque de lanzamiento mediante la adición sucesiva de dovelas en su parte posterior, y configurado para ser desplazado longitudinalmente hacia una pluralidad de pilas que constituyen los vanos de la estructura, mediante uno o varios sistemas de empuje diseñados para lanzar dicho primer tablero sobre dicha pluralidad de pilas. El sistema comprende también un segundo tablero, constituido por una o varias dovelas, colocado sobre la parte superior del primer tablero o tablero inferior a cierta distancia del extremo de avance, y unido solidariamente al tablero inferior mediante unos medios de unión desmontables, donde dicho segundo tablero o tablero superior está diseñado para ser el último vano de la estructura una vez ésta se haya construido totalmente y, donde dicho tablero superior, al estar unido solidariamente al tablero inferior, está configurado para ser empujado sobre dicha pluralidad de pilas conjuntamente con el tablero inferior. Los medios de unión están configurados para transmitir el esfuerzo desde el tablero inferior al tablero superior dispuesto sobre aquel, de forma que ambos trabajan de forma solidaria colaborando para resistir los esfuerzos globales de cortante, flexión y torsión que se producen durante el lanzamiento del tablero inferior.

En una realización particular, el sistema comprende además al menos una cartela delantera y al menos una cartela trasera, para unir el tablero inferior con el tablero superior, configuradas para transmitir los esfuerzos desde el primer tablero al segundo tablero dispuesto sobre aquel, de forma que ambos colaboran para resistir esfuerzos globales de cortante, flexión y torsión.

En una realización particular, el sistema comprende una percha delantera situada en la parte frontal de dicho tablero inferior.

5 En una realización particular, el sistema comprende una contranariz para completar el avance de la estructura.

10 En una realización particular, el sistema comprende un segundo sistema de montaje configurado para colocar el vano lateral formado por dicho tablero superior en su posición definitiva en la estructura.

15 En una realización particular, el sistema comprende unos elementos auxiliares de conexión entre el tablero inferior y el tablero superior con el fin de desmontar la unión entre el tablero inferior y el tablero superior.

20 En otro aspecto de la invención, se proporciona un método de lanzamiento de una estructura mediante empuje, donde el método comprende la etapa de: en un parque de lanzamiento, fabricar y montar un primer tramo de un primer tablero o tablero inferior sobre una pluralidad de apoyos. El método comprende también las etapas de: en el mismo parque de lanzamiento, fabricar y montar un primer tramo de un segundo tablero o tablero superior sobre el primer tramo del tablero inferior; unir dicho tablero superior a dicho tablero inferior mediante medios de unión; empujar y mover longitudinalmente el conjunto formado por el primer tramo del tablero inferior y el primer tramo del tablero superior, de forma que se desplace longitudinalmente dicho conjunto hacia una primera pila de apoyo.

25 En una realización particular, el método comprende además la etapa de, tras el montaje del primer tramo del tablero superior sobre el primer tramo del tablero inferior, montar y unir al menos una cartela de unión delantera para unir el primer tramo del tablero inferior con el primer tramo del tablero superior.

30

En una realización particular, el método comprende además la etapa de colocar una percha delantera en la sección frontal del tablero inferior, antes de empujar y mover longitudinalmente el conjunto.

5 En una realización particular, el método comprende además las etapas de, en el mismo parque de lanzamiento: fabricar y montar un segundo tramo del tablero inferior, unido al primer tramo del tablero inferior, sobre la pluralidad de apoyos; fabricar y montar un segundo tramo de dicho segundo tablero sobre dicho segundo tramo del primer tablero, uniéndolos ambos, mediante medios de unión; empujar y mover longitudinalmente el
10 conjunto de tramos de ambos tableros construido hasta el momento, de forma que se desplace longitudinalmente toda la estructura ya fabricada, apoyándose en una pluralidad de apoyos de lanzamiento sobre pilas sucesivas; repetir las etapas anteriores hasta completar el tablero superior sobre el inferior.

15 En una realización particular, el método comprende además la etapa de, una vez completado el tablero superior sobre el inferior, montar y unir al menos una cartela de unión trasera para unir el tablero inferior con el último tramo del tablero superior.

20 En una realización particular, el método comprende además fabricar sucesivos tramos del tablero inferior y lanzarlos unidos a los tramos ya lanzados a medida que se completa su fabricación.

25 En una realización particular, el método comprende además la etapa de colocar el tablero superior sobre un estribo de salida, de forma que dicho tablero superior forma el último vano lateral de la estructura completa.

30 En otro aspecto de la presente invención, se proporciona una estructura que ha sido lanzada mediante el método descrito anteriormente. Preferentemente, esa estructura es un puente o un viaducto.

Esta técnica es aplicable al lanzamiento de estructuras, tales como puentes metálicos o

mixtos, con independencia de su sección, ya sea esta: losa ortótropa o sección mixta con losa de hormigón, incluso con doble acción mixta; tipo cajón, cajón multicelular, bijnácena incluso multiviga o emparrillado; de ancho variable, preferentemente entre 14 y 25 m. El canto puede ser constante o variable. Además, la directriz del tablero del puente o viaducto puede ser recta o curva, tanto en planta como en alzado. El empuje puede ser con o sin losa superior (ídem losa inferior, para doble acción mixta). El método constructivo es aplicable a viaductos tanto de carretera como de ferrocarril.

Las ventajas de la invención se harán evidentes en la descripción siguiente.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica del mismo, y para complementar esta descripción, se acompaña como parte integrante de la misma, un juego de dibujos, cuyo carácter es ilustrativo y no limitativo. En estos dibujos:

Las figuras 1-A a 1-C muestran un esquema de una estructura cuya construcción ha sido realizada por el sistema y método de lanzamiento propuestos.

Las figuras 2-A a 2-E muestran un esquema del método de empuje o lanzamiento de estructuras tradicional, reflejando los principales parámetros que condicionan el sistema constructivo de puentes o viaductos por el sistema de empuje o lanzamiento convencional.

Las figuras 3-A a 3-D muestran un esquema de una estructura construida según una posible realización de la invención.

Las figuras 4 a 18 muestran una posible sucesión temporal de las fases que componen el sistema y método de lanzamiento de la invención. En concreto:

Las figuras 4-A a 4-C muestran la ejecución de cimentaciones.

5 Las figuras 5-A a 5-D muestran el acondicionamiento de la explanada del parque de fabricación y lanzamiento.

Las figuras 6-A a 6-D muestran la fabricación y montaje de un primer tramo del tablero inferior.

10 Las figuras 7-A a 7-D muestran la fabricación, montaje y unión del primer tramo del tablero superior.

Las figuras 8-A a 8-D muestran el montaje y unión de las cartelas delanteras.

15 Las figuras 9-A a 9-D muestran la colocación de la percha delantera en la sección frontal del tablero.

20 Las figuras 10-A a 10-D muestran el empuje y movimiento del tramo fabricado (conjunto formado por el primer tramo del primer tablero y el primer tramo del segundo tablero, unidos).

Las figuras 11-A a 11-D muestran la fabricación y montaje de un segundo tramo 4 del primer tablero, adyacente al tramo ya lanzado.

25 Las figuras 12-A a 12-D muestran la fabricación, montaje y unión de un segundo tramo del tablero superior sobre el inferior.

Las figuras 13-A a 13-D muestran el montaje y unión de las cartelas traseras.

30 Las figuras 14-A a 14-C muestran el lanzamiento de la estructura con todos los elementos principales.

Las figuras 15-A a 15-C muestran una fase genérica de montaje de dovelas.

Las figuras 16-A a 16-C muestran una fase genérica de empuje de la estructura.

5

Las figuras 17-A a 17-C muestran la situación de empuje de máxima luz en voladizo.

Las figuras 18-A a 18-D muestran la última fase del empuje del tablero inferior y del tablero superior fabricados, incluyendo la eventual contranariz.

10

Las figuras 19-A a 19-D muestran uno de los diversos sistemas posibles para el montaje del último vano lateral en su posición definitiva dentro de la estructura.

15

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

En este texto, el término “comprende” y sus variantes no deben entenderse en un sentido excluyente, es decir, estos términos no pretenden excluir otras características técnicas, aditivos, componentes o pasos.

20

Además, los términos “aproximadamente”, “sustancialmente”, “alrededor de”, “unos”, etc. deben entenderse como indicando valores próximos a los que dichos términos acompañen, ya que por errores de cálculo o de medida, resulte imposible conseguir esos valores con total exactitud.

25

A su vez, a lo largo de este texto los términos desplazamiento, lanzamiento y empuje (de una estructura, ya sea un puente, viaducto, etc.) se utilizan indistintamente, debiéndose considerar los tres términos como sinónimos. El procedimiento de empuje o lanzamiento consiste en la utilización de una instalación de prefabricación en un parque, junto a la zona que va a ocupar el propio puente o viaducto final, en el que se construye el tablero. Pueden construirse tramos de diversas longitudes (en función de la tipología de la sección, de la disponibilidad de espacio, del diseño de las fases de

30

empuje y de otros detalles de diseño). Así, cuando cada tramo se ha terminado de construir en el parque, es necesario liberar el espacio que ocupa para construir otro tramo, consiguiéndose esta liberación de espacio desplazando hacia adelante todo el puente o viaducto construido hasta el momento, avanzando sobre las pilas ya construidas.

También se consideran sinónimos los términos: nariz y pico, por una parte; y velas de unión y cartelas de unión, por otra parte.

Además, en este texto se emplea la siguiente terminología propia de la ingeniería de la construcción, tal y como reconocerá cualquier experto en esta materia:

Estructura: puente o viaducto en su conjunto, compuesto de cimentaciones, pilas, estribos, apoyos y tablero. En general, cuando el puente o viaducto está acabado.

Vano: tramo entre dos apoyos (ya sean pilas o estribos). La estructura tiene dos vanos laterales (desde cada estribo a la pila adyacente) y un número indeterminado de vanos centrales (en función de la longitud del puente o viaducto).

Luz: longitud en metros de cada vano. De todas las luces, la más importante es la máxima (y que habitualmente está hacia el centro de la estructura, aunque depende lógicamente de la configuración del valle, río u obstáculos a salvar). Cuando de forma genérica se dice luz del puente, se hace referencia implícita a esta luz máxima, que es la que condiciona todo el proyecto y construcción.

Puente/Viaducto: la luz del primero viene condicionada exclusivamente por el curso de agua que salva. El segundo, aún salvando un curso de agua, no está condicionado por este elemento natural, sino por otros factores, tales como valles amplios, vías de comunicación, etc..

Tablero: el elemento longitudinal que apoya en las pilas y estribos, y que está

constituido por una viga continua. Es el que materializa el camino de rodadura para los vehículos carreteros o ferroviarios, y en nuestro caso, es “lo que se empuja”. Para su construcción, puede subdividirse en elementos de longitud inferior a un vano, llamados dovelas.

5

Longitud: se refiere a la distancia en metros del tablero de la estructura entre ambos estribos.

10

Sección: se habla de sección de forma análoga para los siguientes conceptos: corte perpendicular al eje del tablero, elemento de cálculo de tensiones, tipología de la sección (en cajón, de vigas, etc.) y por último, haciendo referencia al material (acero u hormigón).

15

Flecha: mide la deformación del tablero, en vertical. El tablero inicialmente recto, cuando se carga se deforma de una determinada manera, según las características de la sección (inercia, material, etc.) y según los apoyos. La distancia entre la línea deformada y sin deformar del tablero, medida en el eje y (vertical) es la flecha. Para los empujes, el parámetro importante es la flecha en la punta del avance cuando el tablero está llegando a una pila, y en concreto, cuando estás llegando a la segunda pila del vano más largo.

20

25

Esfuerzos: en cada sección y en cada etapa del proceso constructivo de un tablero, se producen unas fuerzas, que son las que el material y la forma de la sección debe resistir. En empujes, suele pasar que los mayores esfuerzos se dan en las fases de construcción y no cuando el puente está acabado. Si se dimensiona la sección para el proceso de empuje, el puente quedaría sobredimensionado, es decir, estaríamos poniendo un exceso de material y que trabajará muy por debajo de sus características mecánicas y resistentes. En nuestro caso la sección de referencia es la que queda encima de una pila, cuando la punta del tablero está llegando a la siguiente pila; y esto, para la luz más larga. Se dice entonces que este tramo está en voladizo.

30

Punta de avance y cola de empuje: en cada una de las fases, la parte de delantera y trasera, respectivamente, del tramo de tablero construido.

5 Fases: llamamos fase a cada una de las etapas por las que pasa la construcción del tablero. En empujes, hay dos tipos de fases: cuando se monta una dovela nueva por la cola; y cuando se empuja o avanza el tramo que ya se encuentra construido. El conjunto del proceso se compone así de de muchas fases alternas de montaje-empuje. Hay una técnica actualmente en desuso (aunque se utilizó en los primeros empujes modernos, aplicados a estructuras de hormigón), consistente en la construcción de la longitud completa del tablero en tierra, y su posterior empuje en una única fase; de cara a la literatura lo podemos considerar un caso particular del empuje por dovelas, empuje incremental o ILM, ya que sería una fase de montaje y otra de empuje, en vez de una sucesión alterna de ambas.

15 ILM (Método de Lanzamiento Incremental, del inglés *Incremental Launching Method*): es la técnica actual de empuje, en la que se construye una parte del tablero por dovelas en tierra, y posteriormente se empuja el tramo así fabricado; realizando ciclos montaje-empuje sucesivamente, hasta que todo el tablero se encuentra fabricado y situado en su posición definitiva. Es interesante apuntar que dichos ciclos pueden estar constituidos por una o varias dovelas. Actualmente, es el sistema de lanzamiento utilizado de forma mayoritaria, y es frecuente considerar incluidos en el mismo aquellos casos en los que se construye el tablero en una única fase de montaje; por lo que se puede utilizar esta denominación ("Incremental Launching Method", LM) para referirse a cualquier estructura que haya sido construida mediante empuje o bien mencionar simplemente "Launching Method", con independencia del número de fases empleadas, así como del número de dovelas en que se divide el tablero para su construcción.

30 Las siguientes realizaciones preferidas se proporcionan a modo de ilustración, y no se pretende que sean limitativos de la presente invención. Además, la presente invención cubre todas las posibles combinaciones de realizaciones particulares y preferidas aquí indicadas. Para los expertos en la materia, otros objetos, ventajas y características de la

invención se desprenderán en parte de la descripción y en parte de la práctica de la invención.

5 El sistema de empuje o lanzamiento de la invención se basa en la disposición de la dovela (o conjunto de dovelas) que constituye el último vano de la estructura, sobre el tablero a empujar, de tal forma que la una unión de ambos elementos sea capaz de transmitir todos los esfuerzos producidos por el propio sistema constructivo y cualesquiera otras acciones exteriores, con lo que se consigue el refuerzo efectivo de las secciones pésimas en situación de máximo voladizo durante el avance. De esta manera, 10 el material es aprovechado al máximo, debido a que una vez finalizado el empuje del tablero, se coloca el último vano lateral en su posición definitiva, en el extremo final del puente o viaducto. Además, no es necesario modificar en ningún modo la posición ni la unión de ambos elementos (tablero y último vano lateral) durante toda la fase de lanzamiento, por lo que el plazo de ejecución se puede reducir de forma significativa, y 15 las operaciones necesarias se pueden sistematizar y monitorizar fácilmente. Asimismo, el sistema y método propuesto puede ser utilizado para diferentes tipologías de sección transversal, geometrías rectas o curvas, tanto en planta como en alzado; y para uso carretero o ferroviario.

20 Las figuras 1-A a 1-C muestran un esquema de una estructura cuya construcción ha sido realizada por el sistema y método de lanzamiento que se va a describir a continuación. En concreto, la figura 1-A muestra una vista en planta de la estructura, la figura 1-B muestra una vista en alzado de la misma y la figura 1-C muestra una vista en perfil de la misma. La estructura acabada, que puede ser un puente o un viaducto, está 25 formada por un tablero 4 y un último tramo lateral 6 unido al tablero 4. El conjunto formado por ambos descansa en sus extremos en sendos estribos de salida 1 y llegada 2. La estructura se apoya también en pilares intermedios $P_1, P_2, \dots P_n$). Los vanos limitados por los estribos de salida 1 y llegada 2 se llaman vanos laterales. La estructura puede tener un número variable de vanos centrales (entre pilares $P_1, P_2, \dots P_n$).

30 Las figuras 2-A a 2-E muestran un sistema de empuje convencional, en el que la

estructura se lanza mediante un único tablero 4 que se va empujando a medida que se va fabricando en un parque de fabricación y montaje 14. En concreto, la figura 2-A muestra una vista en planta de la estructura, la figura 2-B muestra una vista en alzado de la misma, la figura 1-C muestra una vista en perfil de la misma, la figura 2-D muestra un detalle (detalle B) de la figura 2-B y la figura 2-E muestra otro detalle (detalle A) de la figura 2-B. Las figuras muestran un estribo de salida 1, unos apoyos provisionales 17 de montaje y empuje, unos elementos fijos del sistema de empuje 18, sobre los que se va apoyando el tablero 4 a medida que se va construyendo, y unos apoyos de empuje sobre las pilas 11, sobre los que se va apoyando el tablero 4 a medida que se va empujando. Las pilas se separan entre sí una cierta distancia, determinando al menos dos de ellas la luz máxima 13. En el detalle A de la figura 2-E se muestra también la sección pésima 12 del tablero 4, la deformada 15 de la estructura, y la flecha o descenso vertical 16 de la sección frontal de avance. La flecha indica la dirección de empuje.

Las figuras 3-A a 3-D muestran un esquema del sistema de empuje de la invención, mientras que en las figuras 4 (4-A a 4-C) a 18 (18-A a 18-D) se ilustran las fases que componen el método de lanzamiento de la invención. En concreto, la figura 3-A muestra una vista en planta del sistema de empuje, la figura 3-B muestra una vista en alzado del mismo, la figura 3-C muestra una vista en perfil del mismo y la figura 3-D muestra un detalle (detalle c) de la figura 3-B. La figura 19 muestra un posible sistema para el montaje del último vano lateral en su posición definitiva dentro de la estructura. En estas figuras se muestran:

-Un tablero 4 del puente o viaducto, también llamado primer tablero o tablero inferior 4. Este tablero 4 puede estar formado por una pluralidad de dovelas 5 o por un único tramo. Este tablero 4 se sitúa inicialmente sobre los apoyos de montaje y lanzamiento 17 (ver por ejemplo figura 2-D) dispuestos en el parque de empuje 14, tras el estribo de salida 1.

-Una dovela (o conjunto de dovelas) especial o tablero superior 6 o segundo tablero 6,

que será el último vano lateral 6 de la estructura, (una vez la estructura adopte su posición definitiva y el puente o viaducto se encuentre construido totalmente) a una cierta distancia de la percha delantera 19. Durante el montaje y lanzamiento del puente, se calcula la posición del tablero superior 6 sobre el tramo de tablero inferior 4 de tal forma que preferentemente se encuentra encima de la pila de avance $P_1, P_2, \dots P_n$) correspondiente a la fase de lanzamiento en la que se produce el máximo voladizo 13 (ilustrado por ejemplo en la figura 2-B). Reforzando así el tablero inferior 4 para que resista las acciones que actúan durante el proceso constructivo. Esta dovela (o conjunto de dovelas) especial (tablero superior o segundo tablero 6) está constituida por el último vano 6 del puente o viaducto, teniendo por tanto una tipología de sección análoga a la del tablero inferior 4, y su longitud es variable entre ese valor y un cierto porcentaje de la luz lateral del mismo (preferentemente aproximadamente el 75%); así la unión 8 definitiva entre el tablero inferior 4 y el tablero superior 6 se ejecuta en una sección que posteriormente soportará un bajo nivel de esfuerzos bajo carga permanente.

-Cartelas de unión al tablero inferior 4 delanteras 7a (ver figura 3-D). Tienen como misión la transmisión gradual de los esfuerzos desde el tablero inferior 4 al tablero superior 6, colaborando así con el mecanismo principal de rasante proporcionado por la unión del tablero inferior 4 y tablero superior 6, utilizado para reforzar la sección pésima 12 del tablero (ilustrada por ejemplo en la figura 2-E).

-Cartelas de unión al tablero inferior 4 traseras 7b. Igual que las cartelas delanteras 7a, las traseras 7b transmiten de una forma adecuada las tensiones.

-Percha delantera 19, conectada en la punta de avance del tablero inferior 4 (o sección frontal de empuje). Preferentemente debe alojar los gatos de recuperación de flecha para la llegada a la pila siguiente P_i , o cualquier sistema de levantamiento equivalente. Preferentemente dispone de patines inferiores inclinados para facilitar su progresiva entrada en carga. Sirve también como soporte del eventual arrollamiento de cable empleado en el montaje del vano lateral 6 en su posición definitiva, una vez finalizado el empuje de la estructura.

-De forma optativa, una contranariz 20 (ilustrada en la figura 18-D). En función del sistema de empuje 18 empleado (que queda fuera de la presente invención) puede ser necesaria una contranariz 20 situada en la cola de empuje, para completar la última de las fases de avance. Eventualmente, puede estar formada por una dovela del propio puente, que se traslada a su posición definitiva en el último vano lateral, o por una pequeña estructura auxiliar.

-Un sistema de empuje principal 18, cuyos detalles específicos quedan fuera de la presente invención. La función de este sistema es la de realizar el avance, lanzamiento o empuje del tablero construido en cada fase, desplazándolo sobre los apoyos provisionales de empuje 11 sobre las pilas $P_1, P_2, \dots P_n$) y sobre los apoyos de montaje y empuje 17 situados en el parque 14, hasta completar el ciclo de avance que se considera en cada fase.

-Un sistema de montaje secundario (ver figura 19), para el último vano lateral 6 (tablero superior 6). Una vez realizada la desconexión de la unión 8 del último vano lateral 6 sobre el tablero 4 del puente o viaducto, se debe colocar el vano lateral 6 en su posición definitiva para completar la construcción de la estructura. Este sistema secundario se realiza mediante sistemas convencionales para tal efecto. Sin carácter limitativo, sino simplemente ilustrativo, se menciona que el montaje secundario puede realizarse bien mediante posicionamiento convencional con grúas, bien mediante empuje del vano lateral (tablero superior), bien mediante un sistema de pesca. A modo de ejemplo, las figuras 19-A a 19-D muestran un sistema con grúas 21 que eleva el tablero superior 6. También a modo de ejemplo, se describe el sistema de empuje del vano lateral (tablero superior 6) que se realiza como sigue (no ilustrado): sobre unos carriles dispuestos sobre la chapa de cierre superior del tablero inferior 4, en función del peso a movilizar (luz del puente o viaducto) se puede realizar el deslizamiento sobre acero o con la ayuda de unos carretones. El cable de tiro se arrolla en la percha delantera 19, pasando por unas poleas situadas en el borde delantero del tablero inferior 4. Las cartelas delanteras 7a cumplen la misión de pico de lanzamiento; y puede ser

necesario instalar (en función de la geometría del mismo) un pórtico en el estribo de llegada 2, de una altura igual al canto del puente o viaducto, así como un sistema de descenso del vano lateral (tablero superior 6) hasta su posición sobre apoyos definitivos 10.

5

-Refuerzos en el tablero inferior 4 y en el tablero superior 6 sobre el tablero inferior 4. Opcionalmente se dispone un arriostramiento, preferentemente mediante tirantes y barras o chapa continua, en el tablero superior 6 y en el tablero inferior 4 que componen la punta de avance. De este modo, se consigue aumentar la resistencia de la sección a torsión en los dos vanos de avance, facilitando así el empuje de directriz curva. En el caso del primer tramo de tablero inferior 4, este refuerzo permite colocar los sistemas de deslizamiento del tablero superior 6 (en el caso de que el sistema de montaje secundario sea tiro con cable o empuje) hasta su posición definitiva.

10

15

-La unión del tablero inferior 4 y del tablero superior 6 durante el proceso constructivo de empuje se realiza preferentemente mediante tornillos de alta resistencia o soldadura. Alternativamente pueden usarse otros medios de unión convencionales.

20

-La unión entre las cartelas 7a, 7b al tablero inferior 4 y al tablero superior 6 se realiza preferentemente mediante soldadura y tornillos de alta resistencia. Alternativamente pueden usarse otros medios de unión convencionales.

25

-La unión de los refuerzos en el tablero inferior 4 y el tablero superior 6 se realiza preferentemente mediante soldadura o tornillos. Alternativamente pueden usarse otros medios de unión convencionales.

30

-La unión entre percha delantera 19 y tablero inferior 4 se realiza preferentemente mediante soldadura o tornillos o barras de alta resistencia. Alternativamente pueden usarse otros medios de unión convencionales.

-La unión entre contranariz y tablero inferior 4 se realiza preferentemente mediante

soldadura o tornillos de alta resistencia. Alternativamente pueden usarse otros medios de unión convencionales.

5 -En función de la magnitud de los esfuerzos, puede ser necesario disponer unos dispositivos de transferencia de carga (no ilustrados) durante la operación de separación entre el tablero inferior 4 y tablero superior 6. Estos dispositivos de transferencia de carga quedan fuera del alcance de la presente invención. Como ejemplo se describe someramente un dispositivo de cuelgue del tablero inferior desde el superior, dispuesto a intervalos regulares a lo largo de las dos partes unidas y compuesto de: elementos preferentemente hidráulicos tales como cilindros, para recoger de forma gradual la carga que dejan los dispositivos de unión 8 durante su desconexión; estructura preferentemente de barras, cables o elementos elásticos; y una serie de ménsulas, placas y rigidizadores para la correcta transmisión de las carga.

10 Se resuelven así los problemas derivados de la utilización de medios auxiliares costosos y singulares, con escaso aprovechamiento del material y sin una reutilización en posteriores estructuras, y con procesos intermedios que restan rapidez y seguridad al método de lanzamiento.

15 A continuación se describe el método o proceso de empuje de puentes o viaductos de la invención, que como ha podido apreciarse en la descripción del sistema, se realiza mediante la unión 8 del tablero superior 6 sobre el tablero inferior 4. El método se ilustra en relación con las figuras 4 a 18.

20 En una primera etapa (fase 1), se realiza la ejecución de cimentaciones, colocando un estribo de salida 1, una pluralidad de pilas P_1, P_2, P_3, \dots y un estribo de llegada 2 (éste último no ilustrado en las figuras 4-A 4-B 4-C). Esto se ilustra en las figuras 4-A 4-B 4-C, en las que la 4-A muestra una vista en planta de la construcción de una estructura (en adelante planta) la 4-B muestra un vista de alzado longitudinal de dicha construcción (en adelante alzado) y la 4-C muestra una perspectiva del conjunto de elementos (en adelante perspectiva). Estas figuras muestran también las

cimentaciones 3.

En una segunda etapa (fase 2), se realiza el acondicionamiento de la explanada del
parque de fabricación y lanzamiento 14, que incluye el posicionamiento de los
5 apoyos provisionales 17 de montaje y empuje, la colocación de los elementos fijos
del sistema de empuje 18 y la colocación de los apoyos de empuje 11 (éstos no
ilustrados aquí pero sí, por ejemplo, en la figura 10-D) sobre las pilas y estribos, tal y
como se ilustra en las figuras 5-A 5-B 5-C 5-D. En concreto, la figura 5-A muestra la
planta, la figura 5-B muestra el alzado, la figura 5-C muestra una perspectiva y la
10 figura 5-D muestra un detalle (detalle D) de la figura 5-B.

A continuación, en una tercera etapa (fase 3), ilustrada en las figuras 6-A, 6-B, 6-C y
6-D), se realiza la fabricación y montaje de un primer tramo del tablero inferior 4
sobre los apoyos 17 del parque. Cada tramo puede tener una longitud variable (o
15 también fija) con respecto a los sucesivos siguientes tramos. El tablero inferior 4 está
formado por uno o varios tramos o dovelas 5, siendo también posible su construcción
en toda la longitud de la estructura. Se incluyen los eventuales cierres de chapa de
acero superior o arriostramientos de barras y tirantes, para la rigidización longitudinal
y transversal de la estructura. En concreto, la figura 6-A muestra la planta, la figura
20 6-B muestra el alzado, la figura 6-C muestra una perspectiva y la figura 6-D muestra
un detalle (detalle E) de la figura 6-B.

Posteriormente, en una cuarta etapa (fase 4), ilustrada en las figuras 7-A, 7-B, 7-C y
7-D, y a diferencia de los métodos y sistemas de empuje convencionales, se realiza la
25 fabricación y montaje de una primera parte del tablero superior o segundo tablero 6
sobre el tramo del tablero inferior 4 ya fabricado. En concreto, la figura 7-A muestra
la planta, la figura 7-B muestra el alzado, la figura 7-C muestra una perspectiva y la
figura 7-D muestra un detalle (detalle F) de la figura 7-B. La unión 8 del tablero
inferior 4 y del tablero superior 6 se realiza preferentemente mediante tornillos de
30 alta resistencia o soldadura. Otros métodos de unión alternativos son posibles. Se
incluyen los eventuales cierres de chapa superior o arriostramientos de barras y

tirantes para la rigidización longitudinal y transversal de la estructura. Como puede observarse en las figuras, el primer tramo del tablero superior 6 no tiene por qué ser de igual tamaño que el primer tramo del tablero inferior 4. En general, preferentemente el primer tramo del tablero superior 6 es menor que el primer tramo del tablero inferior 4.

Después, en una quinta etapa (fase 5), y también a diferencia de los métodos y sistemas de empuje convencionales, se realiza el montaje y unión de las cartelas delanteras 7a (ilustradas en las figuras 8-A 8-B 8-C 8-D). Esta unión se realiza preferentemente mediante soldadura o tornillos de alta resistencia. En concreto, la figura 8-A muestra la planta, la figura 8-B muestra el alzado la figura 8-C muestra la perspectiva y la figura 8-D muestra un detalle (detalle G) de la figura 8-B.

A continuación, una sexta etapa (fase 6), se realiza la colocación de la percha delantera 19 en la sección frontal del tablero inferior 4 (ilustrado en las figuras 9-A 9-B 9-C 9-D). La unión se realiza preferentemente mediante soldadura, barras o tornillos de alta resistencia. En concreto, la figura 9-A muestra la planta, la figura 9-B muestra el alzado, la figura 9-C muestra una perspectiva y la figura 9-D muestra un detalle (detalle H) de la figura 9-B.

Posteriormente, en una séptima etapa (fase 7), tal y como se muestra en las figuras 10-A 10-B 10-c 10-D, y a diferencia de los métodos y sistemas de empuje convencionales, se realiza el empuje y movimiento del tramo fabricado (conjunto formado por el primer tramo del primer tablero 4 y el primer tramo del segundo tablero 6, de forma que se desplaza longitudinalmente dicho conjunto hacia una primera pila de apoyo P_1 , mediante cualquier método o sistema de empuje 18 convencional de los conocidos por un experto en la material. En concreto, la figura 10-A muestra la planta, la figura 10-B muestra el alzado la figura 10-C muestra una perspectiva y la figura 10-D muestra un detalle (detalle I) de la figura 10-B. Ejemplos no limitativos de estos sistemas de empuje 18 son tiro con cable, empuje con gatos, entre otros. Cada empuje se mueve un incremento de longitud que no tiene por qué

coincidir en longitud en cada empuje. El bloque se desplaza hacia la primera pila de apoyo P₁, pero no tiene por qué llegar hasta ésta ni detenerse en la misma.

5 Seguidamente, en una octava etapa (fase 8), ilustrada en las figuras 11-A 11-B 11-C 11-D, se realiza la fabricación, montaje y unión de un segundo tramo del primer tablero 4, adyacente al tramo ya lanzado, sobre los apoyos 17 del parque (no referenciados en estas figuras). Este segundo tramo no tiene por qué ser igual al anterior en longitud. En concreto, la figura 11-A muestra la planta, la figura 11-B muestra el alzado la figura 11-C muestra una perspectiva y la figura 11-D muestra un
10 detalle (detalle J) de la figura 11-B.

Y a continuación, en una novena etapa (fase 9), mostrada en las figuras 12-A 12-B 12-C 12-D, y a diferencia de los métodos y sistemas de empuje convencionales, se realiza la fabricación, montaje y unión de un segundo tramo del tablero superior 6
15 sobre el tablero inferior 4. En concreto, la figura 12-A muestra la planta la figura 12-B muestra el alzado la figura 12-C muestra una perspectiva y la figura 12-D muestra un detalle (detalle K) de la figura 12-B. Se realiza también la unión 8 de ambos tramos del tablero inferior 4 y del tablero superior 6 preferentemente mediante tornillos de alta resistencia o soldadura. Se incluyen los eventuales cierres de chapa
20 de acero superior o arisotramientos de barras y tirantes para la rigidización longitudinal y transversal de la estructura.

Las etapas de construir un nuevo tramo de tablero inferior 4, construir un nuevo tramo de tablero superior 6 y unirlo al tablero inferior 4 y lanzamiento del conjunto
25 construido se van repitiendo hasta que se haya terminado de construir y unir el tablero superior 6.

Las etapas siguientes son:

30 Etapa o fase 10: Montaje y unión de las cartelas traseras 7b, ilustrada en las figuras 13-A, 13-B 13-C y 13-D. La unión se realiza preferentemente mediante soldadura o tronillos de alta resistencia. En concreto, la figura 13-A muestra la planta, la figura

13-B muestra el alzado, la figura 13-C muestra una perspectiva y la figura 13-D muestra un detalle (detalle L) de la figura 13-B.

5 Etapa o fase 11: se realiza el empuje y movimiento del conjunto fabricado hasta el momento, formado por tramos del primer tablero 4 y el segundo tablero 6 completo, de forma que se desplaza longitudinalmente dicho conjunto hacia la siguiente pila de apoyo P_i , mediante cualquier método o sistema de empuje 18 convencional de los conocidos por un experto en la material. Ejemplos no limitativos de estos métodos son tiro con cable, empuje con gatos, entre otros. En cada empuje se avanza una fase de determinada longitud, que no tiene por qué ser igual en cada fase de empuje. Se ilustra en la figuras 14-A 14-B 14-C. En concreto, la figura 14-A muestra la planta, la figura 14-B muestra el alzado y la figura 14-C muestra una perspectiva.

15 A continuación, se repite una sucesión de etapas o fases 12 y 13, ilustradas respectivamente en las figuras 15-A 15-B 15-C y 16-A 16-B 16-C. Las etapas 12 se refieren al montaje de dovelas 5 del tablero inferior 4 (nótese que el tablero superior 6 ya ha sido totalmente lanzado). Las etapas 13 se refieren al empuje del conjunto (en este caso, nuevos tramos del tablero inferior 4), hasta que se completa la longitud total de la estructura, a excepción del último vano o último vano lateral 6 (que es el tablero superior 6 que se porta unido sobre el tablero inferior 4, y colaborando para resistir los esfuerzos que se producen en las fases del proceso constructivo) en un número de ciclos montaje-avance que es función de las longitudes (fijas o variables) de cada dovela, del avance realizado en cada empuje (también puede ser variable), de la longitud del puente o viaducto y de otros factores secundarios. Las figuras 17-A, 20 17-B y 17-C muestran un ejemplo de fase de empuje del vano de mayor luz de la estructura. Las figuras 18-A 18-b 18-C 18-D muestran la última fase de avance de la estructura.

25 Se incluyen aquí también las operaciones de recuperación de flecha, entrada de la percha delantera 19 en la pila de avance y los eventuales movimientos en horizontal o vertical necesarios para regular la cota de los apoyos de lanzamiento 11.

A diferencia de los métodos y sistemas de empuje convencionales, en una etapa o fase 14 se produce el corte de las cartelas traseras 7b (no ilustrado), y en una etapa o fase 15 se realiza la separación de las cartelas delanteras 7a del tablero inferior 4 (en el caso de que no sea necesario utilizarlas como eventual pico de lanzamiento para el montaje secundario del último vano lateral, no ilustrado).

Seguidamente, en una etapa o fase 16 se procede a montar los dispositivos de transferencia de carga para realizar la desconexión de la unión 8 entre el tablero inferior 4 y el último vano lateral 6 (tablero superior 6). Este proceso se puede realizar de varias maneras y se describe una a modo de ejemplo: en unas ménsulas y en unas placas de apoyo, colocadas en las chapas que componen el alma de la sección transversal del segundo tablero 6; y en unas ménsulas y en unas placas de apoyo, colocadas en las chapas que componen el alma de la sección transversal del primer tablero 4 se anclan unas barras, cables o dispositivos elásticos, que al unir los tableros 4 y 6 a través de uno orificios practicados en dichos tableros, recogen la carga de los medios de unión 8 con la ayuda de unos elementos, preferentemente hidráulicos o mecánicos, de tesado; procediendo a continuación a retirar los medios de unión 8 y al posterior destesado de las barras, cables o dispositivos elásticos de forma gradual. Los dispositivos de transferencia de carga se dispondrán a todo lo largo del último vano lateral (tablero superior 6) en un número suficiente para garantizar la seguridad de la operación, preferentemente en las secciones con un rigidizador vertical. Y en una etapa o fase 17 se coloca el último vano lateral 6 mediante grúa 21(ver figuras 19-A 19-B 19-C 19-D) o mediante un sistema de empuje secundario de los mencionados anteriormente, por ejemplo, tiro con cable.

Etapa o fase 18: Maniobras necesarias (gateo) para colocar el puente sobre los apoyos definitivos 10 (no ilustrado).

Por último, en una etapa o fase 19 se finaliza el resto de operaciones: losas superior e inferior, en su caso, pretiles, etc. Estas últimas fases, todas convencionales, no se

ilustran en las figuras, siendo el resultado de la operación la figura 1.

La presente invención tiene aplicación en el lanzamiento de estructuras, tales como puentes metálicos o mixtos, con independencia de su sección, ya sea esta losa ortótropa o sección mixta con losa de hormigón, incluso con doble acción mixta. La sección transversal puede ser tipo cajón, cajón multicelular, bijácena incluso multiviga o emparrillado; de ancho variable, preferentemente entre 14 y 25 m. En el caso de que la sección transversal sea de tipo cajón de paredes verticales el vano lateral (6) podrá ir orientado en su posición definitiva de montaje. En otros casos de secciones transversales (por ejemplo en secciones tipo artesa o bijácena), el vano lateral (6) podrá ir orientado bien en su posición definitiva o girado 180 grados sobre el tablero (4). El canto puede ser constante o variable mediante cartelas en pila, adosadas al fondo de la sección metálica, incluso linealmente variable mediante la adaptación de los capiteles de las pilas y la modificación de los apoyos de lanzamiento 11. Se alcanzan luces de hasta unos 150 m. Además la directriz del tablero del puente o viaducto puede ser recta o curva, tanto en planta como en alzado. El empuje puede ser con o sin losa superior (ídem losa inferior, para doble acción mixta). El método constructivo es aplicable a viaductos tanto de carretera como de ferrocarril.

Entre las ventajas de la invención, destacan: que se refuerzan las secciones críticas durante el proceso constructivo de empuje, en especial la sección sobre la pila 12 durante el máximo voladizo, condicionadas de forma determinante por el sistema constructivo; además, el vano lateral 6 no forma parte del frente de avance (como en los empujes tradicionales) y no es necesario sobredimensionarlo con respecto al cálculo en servicio. Este refuerzo se realiza en su mayor parte mediante una pieza integrante de la estructura definitiva, por lo que el aprovechamiento del material es máximo y se evita la utilización de otros medios auxiliares.

Por otra parte, se mejora enormemente el comportamiento a torsión de los dos primeros vanos lanzados, ya que se cierra la sección con el último vano lateral 6 sobre el tablero 4, además de la eventual chapa de acero de pequeño espesor para facilitar la colocación

del último vano; esta chapa sirve también como encofrado perdido para la losa y/o apoyo de las prelosas, en su caso.

5 Se facilita además el encaje de geometrías no canónicas de lanzamiento, al montar el último vano de forma independiente al empuje general.

10 No es necesario modificar ningún elemento del sistema, ni su posición, una vez que se inicia el lanzamiento, ni realizar ninguna corrección en la unión 8 entre el tablero 4 y el último vano lateral 6.

15 De forma general, también se consiguen las siguientes ventajas: el proceso de construcción es seguro y estable en todas sus fases, compuesto por operaciones simples y repetitivas (con un grado de prefabricación elevado), susceptibles de automatización y monitorización continua, y que redunda en unos menores plazos y costes de ejecución.

20

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de lanzamiento de una estructura, que comprende:

5 -un primer tablero (4) que ha sido fabricado y montado en un parque de lanzamiento (14) mediante la adición sucesiva de dovelas (5) en su parte posterior, y configurado para ser desplazado longitudinalmente hacia una pluralidad de pilas ($P_1 P_2 \dots P_n$) que constituyen los vanos de la estructura, mediante uno o varios sistemas de empuje (18) diseñados para lanzar dicho primer tablero (4) sobre dicha pluralidad de pilas (P_1
10 $P_2 \dots P_n$);

caracterizado por:

15 -un segundo tablero (6), constituido por una o varias dovelas, colocado sobre la parte superior del primer tablero o tablero inferior (4) a cierta distancia del extremo de avance, y unido solidariamente al tablero inferior (4) mediante unos medios de unión (8) desmontables, donde dicho segundo tablero o tablero superior (6) está diseñado para ser el último vano de la estructura una vez ésta se haya construido totalmente y, donde dicho tablero superior (6), al estar unido solidariamente al tablero inferior (4)
20 está configurado para ser empujado sobre dicha pluralidad de pilas ($P_1 P_2 \dots P_n$) conjuntamente con el tablero inferior (4), estando dichos medios de unión (8) configurados para transmitir el esfuerzo desde el tablero inferior (4) al tablero superior (6) dispuesto sobre aquel, de forma que ambos trabajan de forma solidaria colaborando para resistir los esfuerzos globales de cortante, flexión y torsión que se
25 producen durante el lanzamiento del tablero inferior (4).

2. El sistema de la reivindicación 1, que comprende además al menos una cartela delantera (7a) y al menos una cartela trasera (7b), para unir el tablero inferior (4) con el tablero superior (6), configuradas para transmitir los esfuerzos desde el primer tablero
30 (4) al segundo tablero (6) dispuesto sobre aquel, de forma que ambos (4, 6) colaboran para resistir esfuerzos globales de cortante, flexión y torsión.

3. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende una percha delantera (19) situada en la parte frontal de dicho tablero inferior (4).

5 4. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además una contranariz (20) para completar el avance de la estructura.

10 5. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además un segundo sistema de montaje configurado para colocar el vano lateral formado por dicho tablero superior (6) en su posición definitiva en la estructura.

15 6. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende unos elementos auxiliares de conexión entre el tablero inferior (4) y el tablero superior (6) con el fin de desmontar la unión entre el tablero inferior (4) y el tablero superior (6).

7. Un método de lanzamiento de una estructura mediante empuje, donde el método comprende la etapa de:

20 -en un parque de lanzamiento (14), fabricar y montar un primer tramo de un primer tablero o tablero inferior (4) sobre una pluralidad de apoyos (17);

estando el método caracterizado por las etapas de:

25 -en el mismo parque de lanzamiento (14), fabricar y montar un primer tramo de un segundo tablero o tablero superior (6) sobre el primer tramo del tablero inferior (4);

-unir dicho tablero superior (6) a dicho tablero inferior (4) mediante medios de unión (8);

30 -empujar y mover longitudinalmente el conjunto formado por el primer tramo del tablero inferior (4) y el primer tramo del tablero superior (6), de forma que se desplace

longitudinalmente dicho conjunto hacia una primera pila de apoyo (P_1).

5 8. El método de la reivindicación 7, que comprende además la etapa de, tras el montaje del primer tramo del tablero superior (6) sobre el primer tramo del tablero inferior (4), montar y unir al menos una cartela de unión delantera (7a) para unir el primer tramo del tablero inferior (4) con el primer tramo del tablero superior (6).

10 9. El método de cualquiera de las reivindicaciones 7 u 8, que comprende además la etapa de colocar una percha delantera (19) en la sección frontal del tablero inferior (4), antes de empujar y mover longitudinalmente el conjunto.

10. El método de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 9, que comprende además las etapas de, en el mismo parque de lanzamiento (14):

15 -fabricar y montar un segundo tramo del tablero inferior (4), unido al primer tramo del tablero inferior (4), sobre la pluralidad de apoyos (17);

20 - fabricar y montar un segundo tramo de dicho segundo tablero (6) sobre dicho segundo tramo del primer tablero (4), uniendo ambos, mediante medios de unión (8);

25 -empujar y mover longitudinalmente el conjunto de tramos de ambos tableros (4, 6) construido hasta el momento, de forma que se desplace longitudinalmente toda la estructura ya fabricada, apoyándose en una pluralidad de apoyos de lanzamiento (11) sobre pilas sucesivas ($P_1 P_2 \dots P_n$);

-repetir las etapas anteriores hasta completar el tablero superior (6) sobre el inferior (4).

30 11. El método de la reivindicación 10, que comprende la etapa de, una vez completado el tablero superior (6) sobre el inferior (4), montar y unir al menos una cartela de unión trasera (7b) para unir el tablero inferior (4) con el último tramo del tablero superior (6).

12. El método de cualquiera de las reivindicaciones 10 u 11, que comprende además fabricar sucesivos tramos del tablero inferior (4) y lanzarlos unidos a los tramos ya lanzados a medida que se completa su fabricación.
- 5 13. El método de la reivindicación 12, que comprende además la etapa de colocar el tablero superior (6) sobre un estribo de salida (2), de forma que dicho tablero superior (6) forma el último vano lateral de la estructura completa.
- 10 14. Estructura lanzada de acuerdo con el método de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 13, donde dicha estructura es un puente o un viaducto.

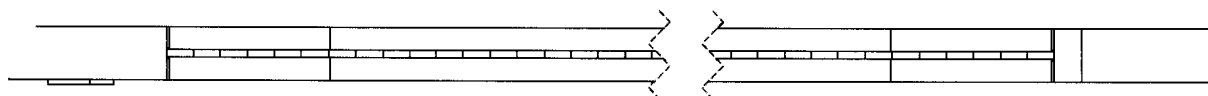


FIGURA 1-A

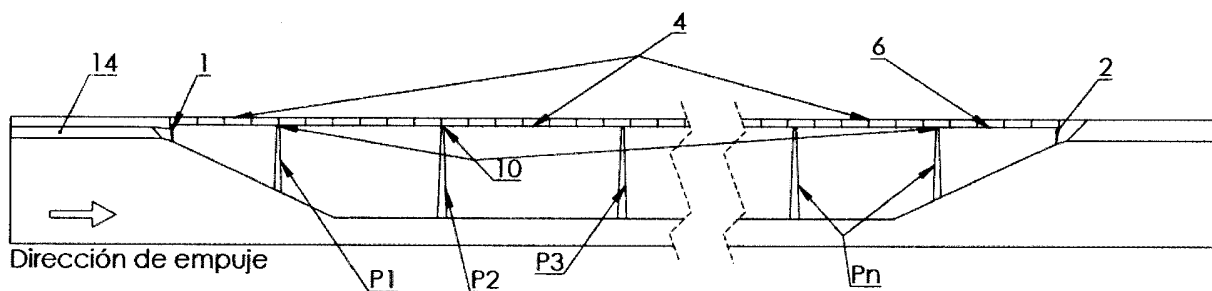


FIGURA 1-B

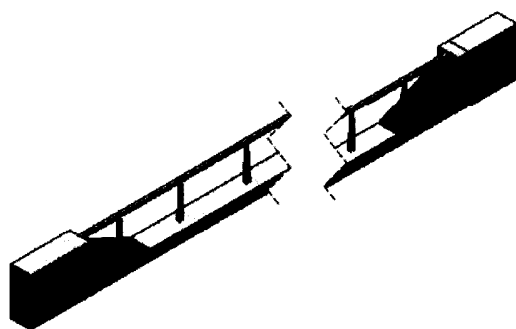


FIGURA 1-C

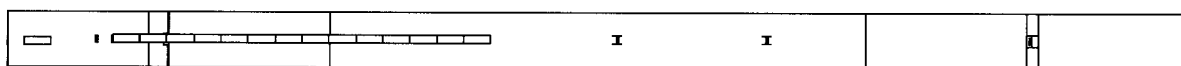


FIGURA 2-A

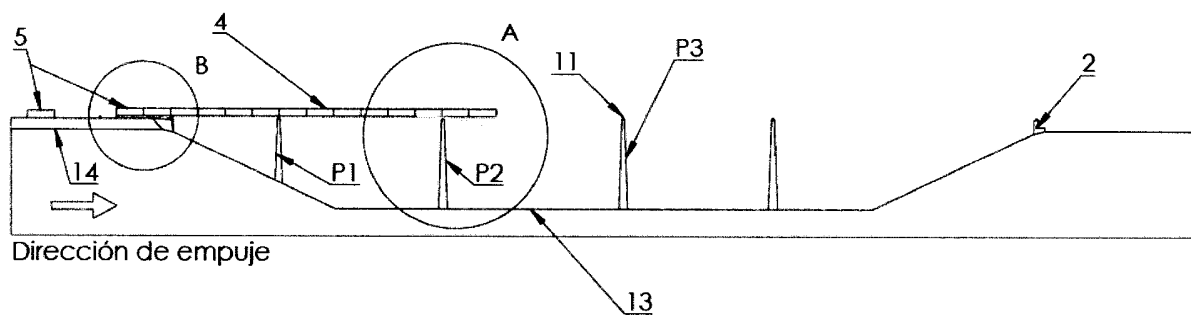


FIGURA 2-B

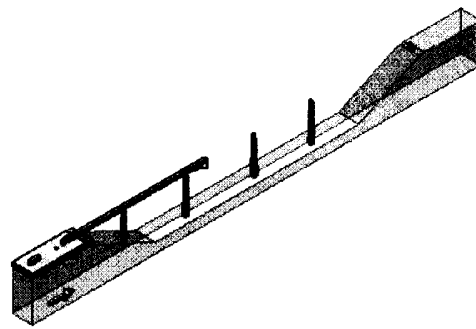
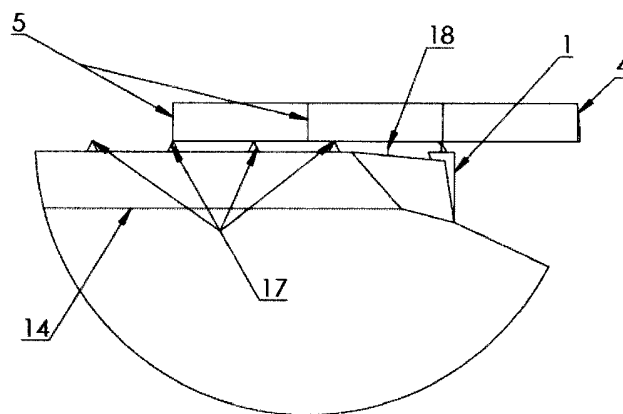
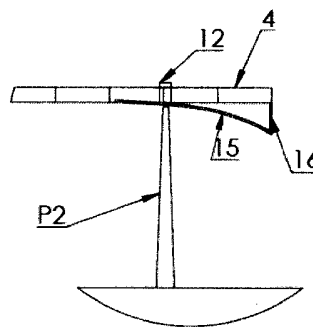


FIGURA 2-C



Detalle B

FIGURA 2-D



Detalle A

FIGURA 2-E



FIGURA 3-A

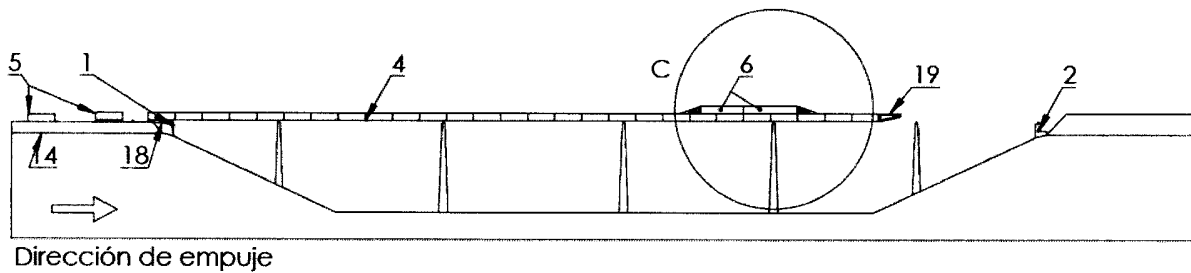
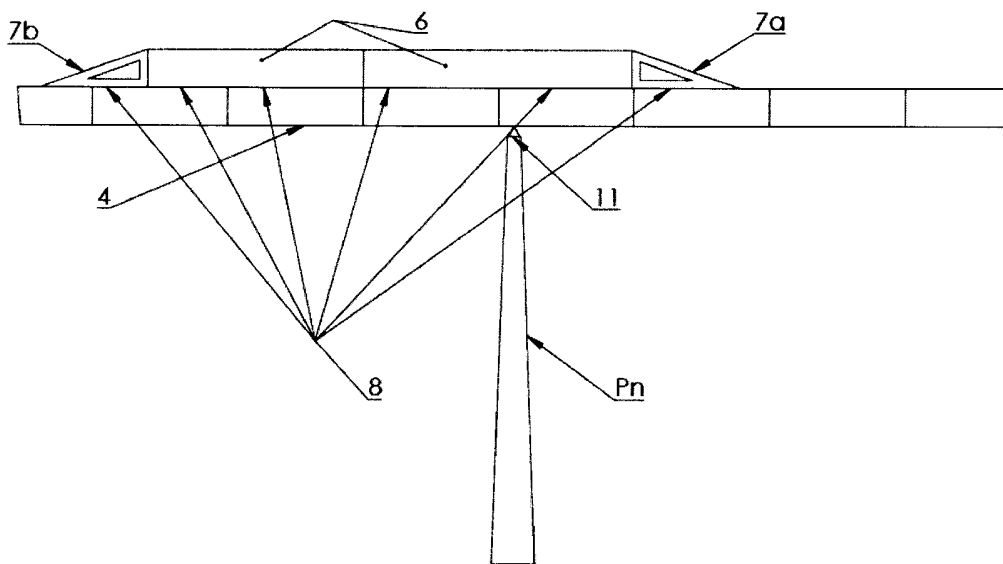


FIGURA 3-B



Detalle C

FIGURA 3-C

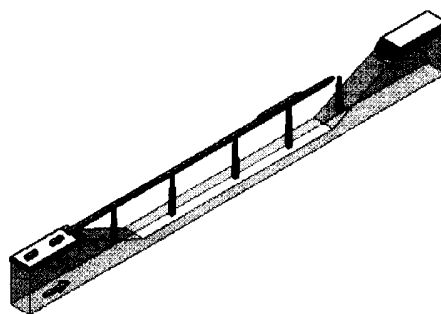


FIGURA 3-D

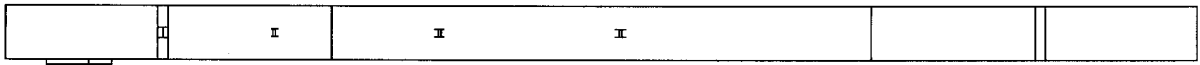


FIGURA 4-A

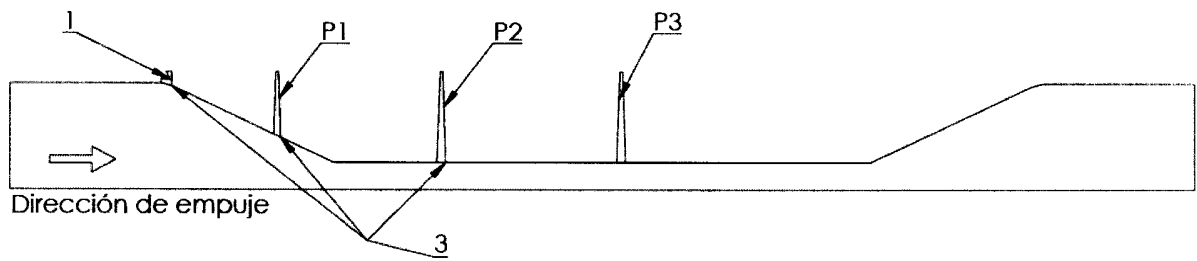


FIGURA 4-B

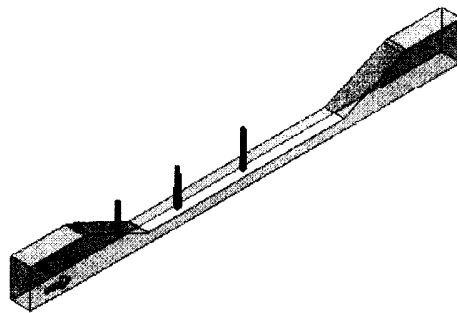


FIGURA 4-C

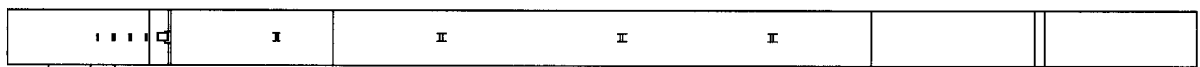


FIGURA 5-A

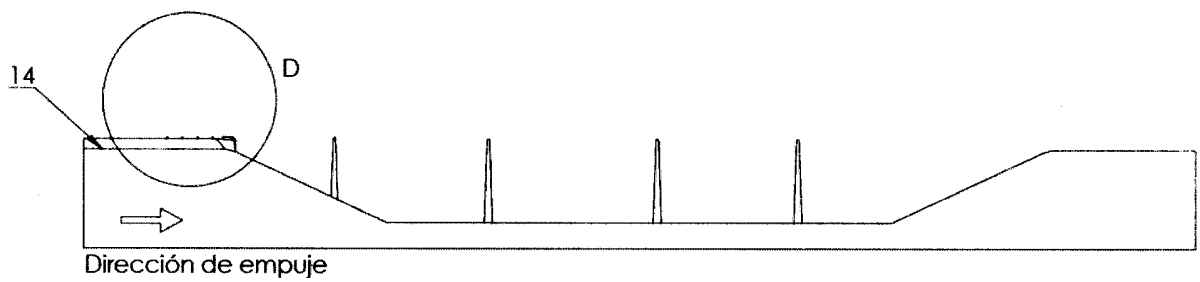


FIGURA 5-B

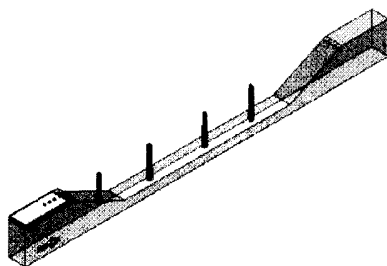
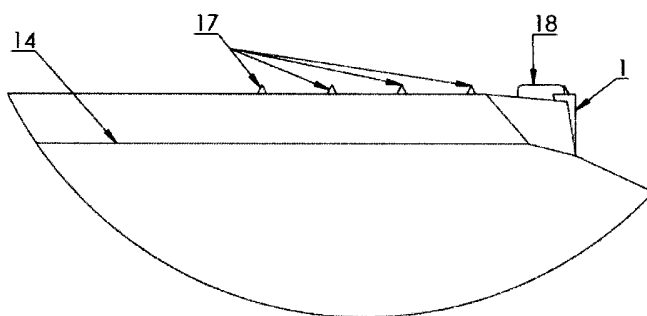


FIGURA 5-C



Detalle D

FIGURA 5-D

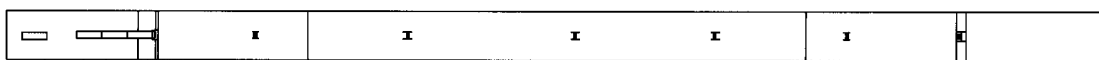


FIGURA 6-A

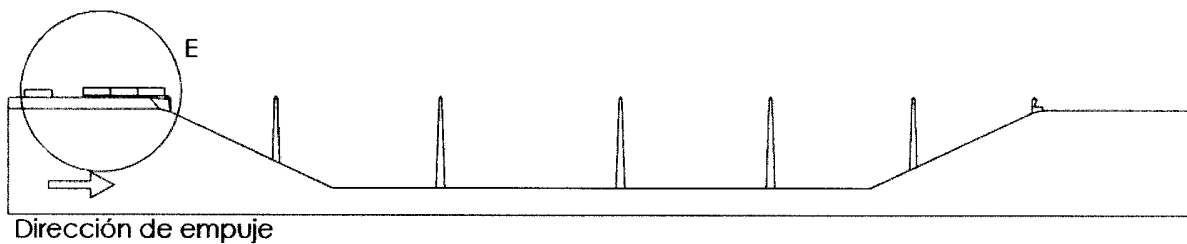


FIGURA 6-B

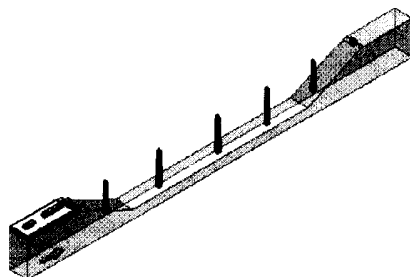
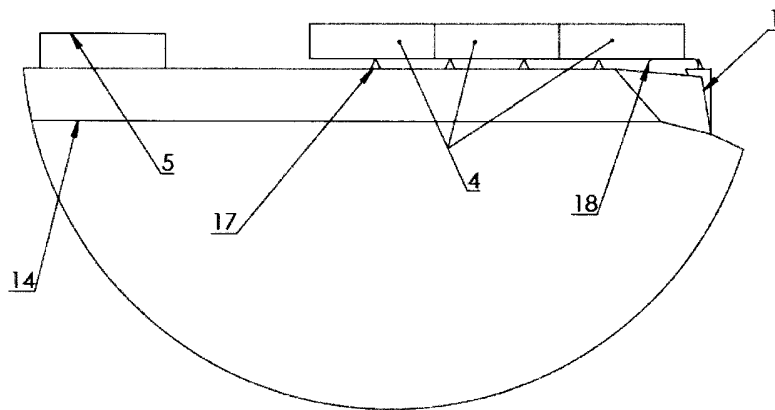


FIGURA 6-C



Detalle E

FIGURA 6-D

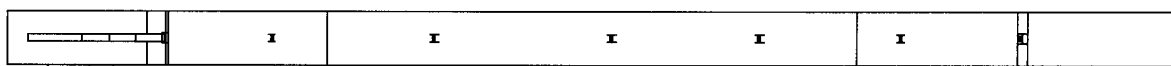
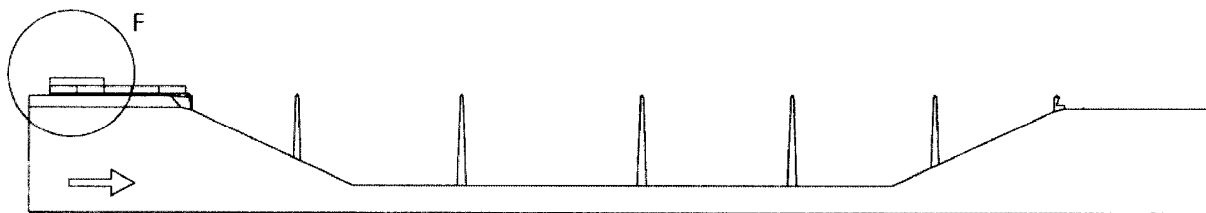


FIGURA 7-A



Dirección de empuje

FIGURA 7-B

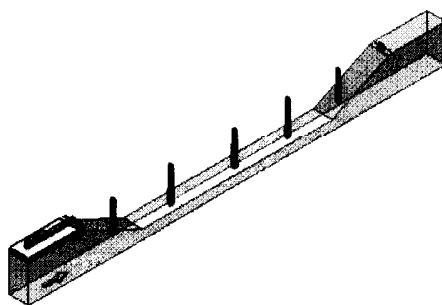
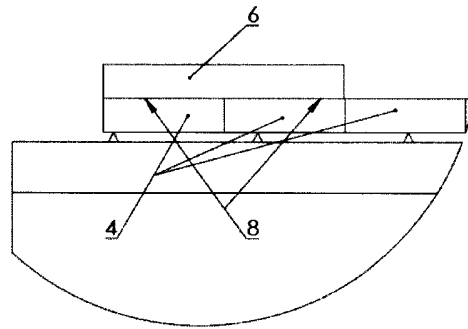


FIGURA 7-C



Detalle F

FIGURA 7-D

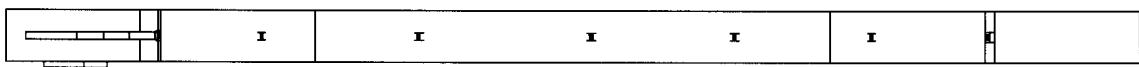


FIGURA 8-A

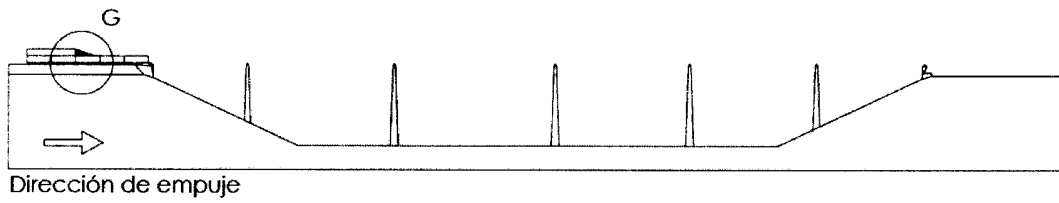


FIGURA 8-B

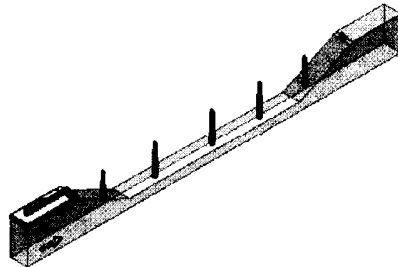
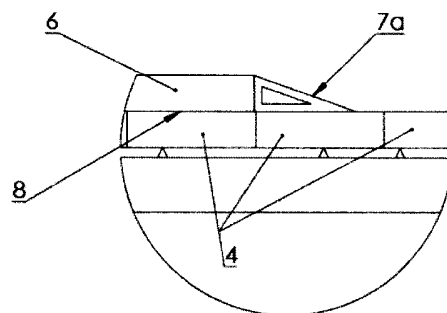


FIGURA 8-C



Detalle G

FIGURA 8-D

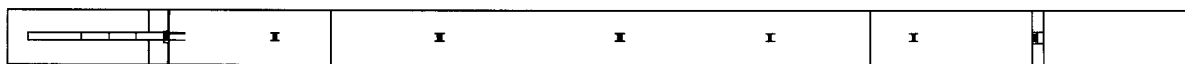


FIGURA 9-A

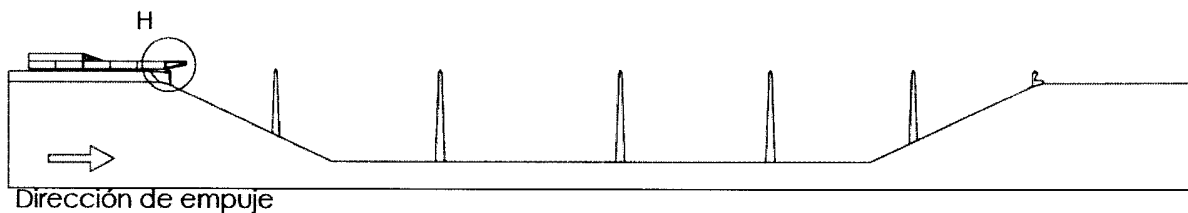


FIGURA 9-B

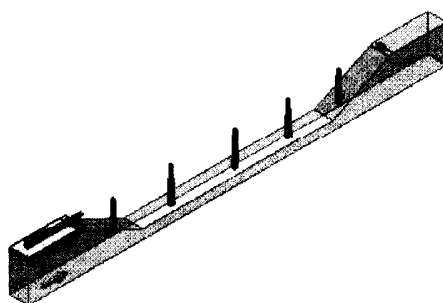
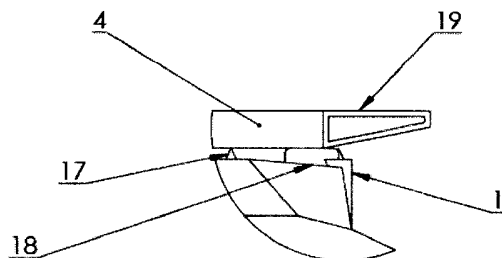


FIGURA 9-C



Detalle H

FIGURA 9-D

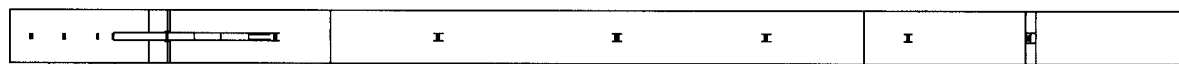


FIGURA 10-A

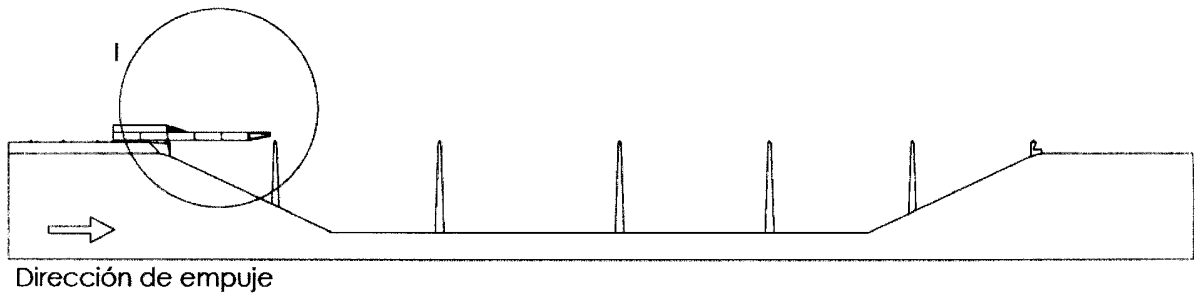


FIGURA 10-B

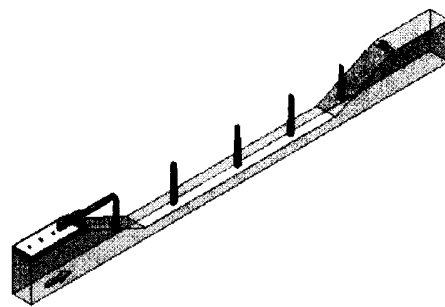


FIGURA 10-C

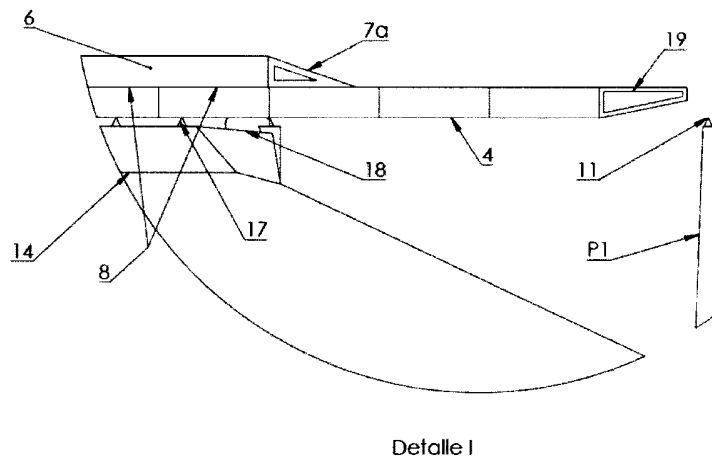


FIGURA 10-D

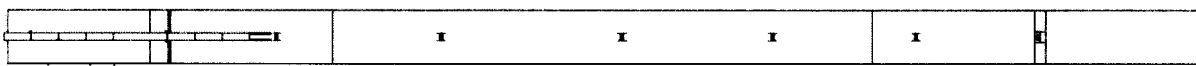


FIGURA 11-A

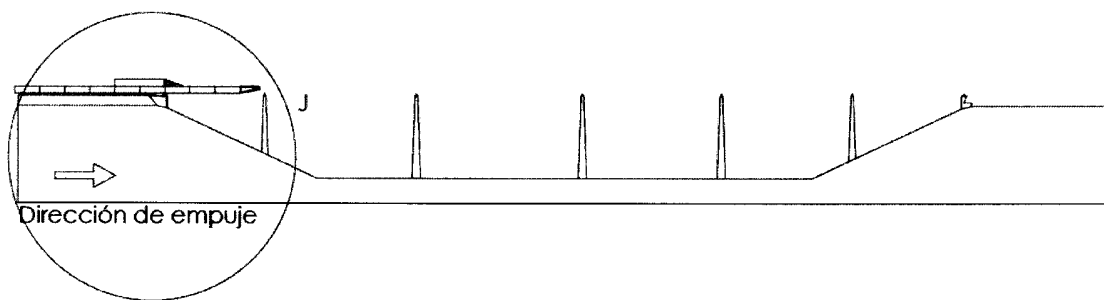


FIGURA 11-B

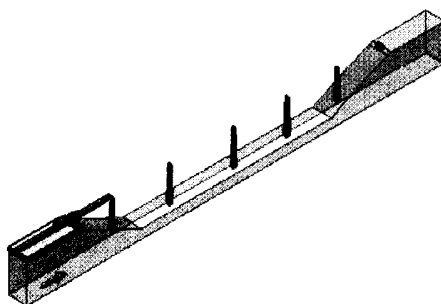
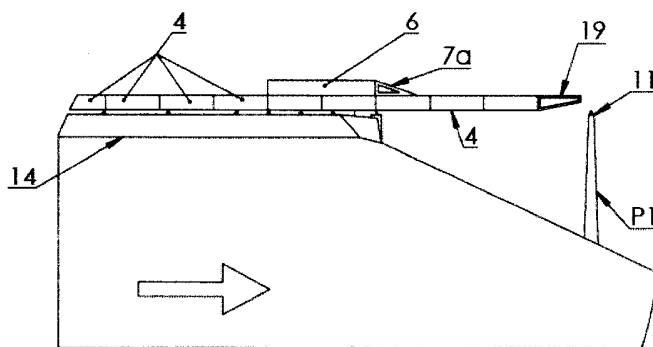


FIGURA 11-C



Detalle J

FIGURA 11-D

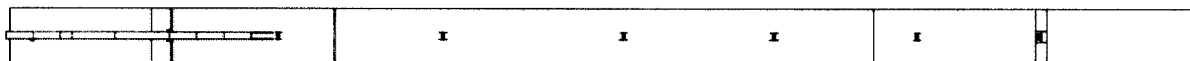


FIGURA 12-A

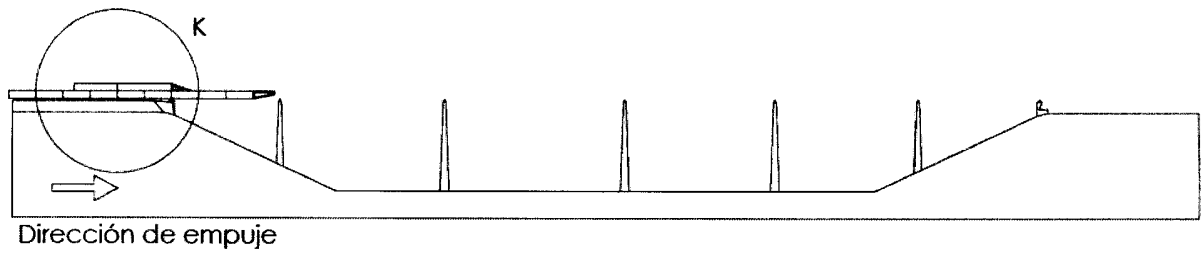


FIGURA 12-B

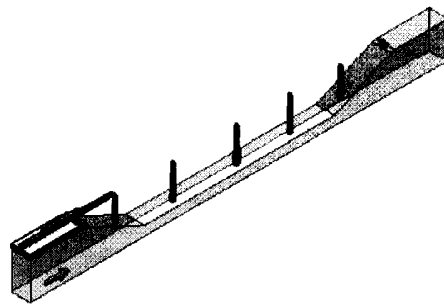
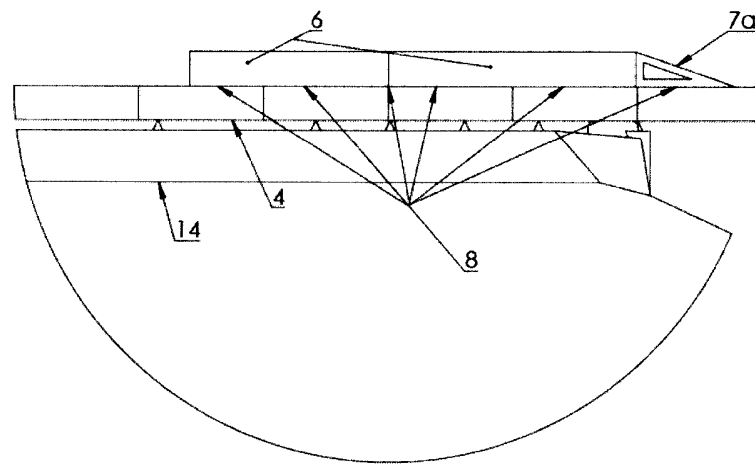


FIGURA 12-C



Detalle K

FIGURA 12-D

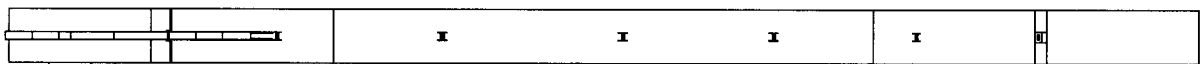


FIGURA 13-A

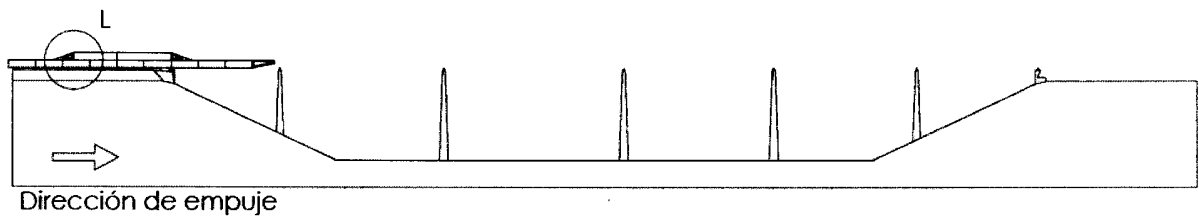


FIGURA 13-B

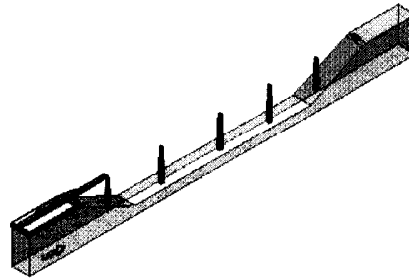
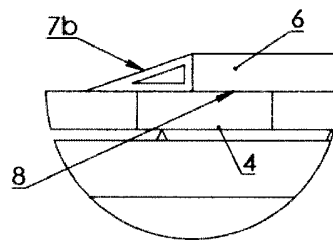


FIGURA 13-C



Detalle L

FIGURA 13-D

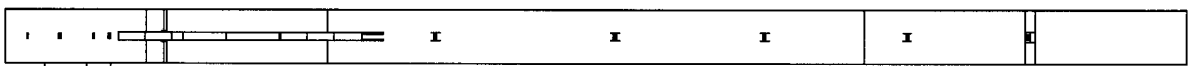


FIGURA 14-A

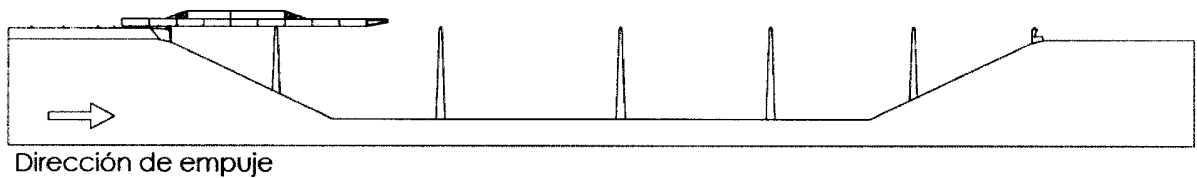


FIGURA 14-B

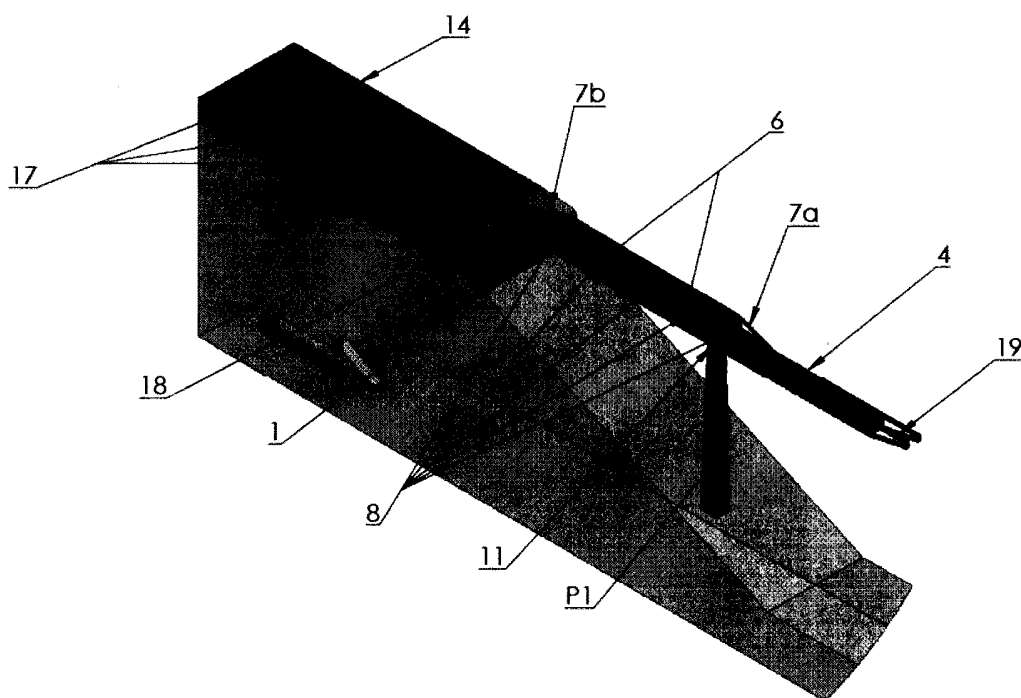


FIGURA 14-C

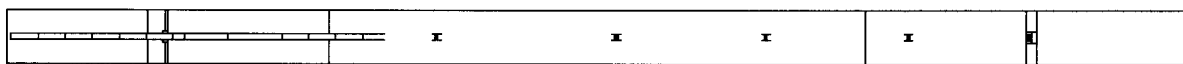


FIGURA 15-A

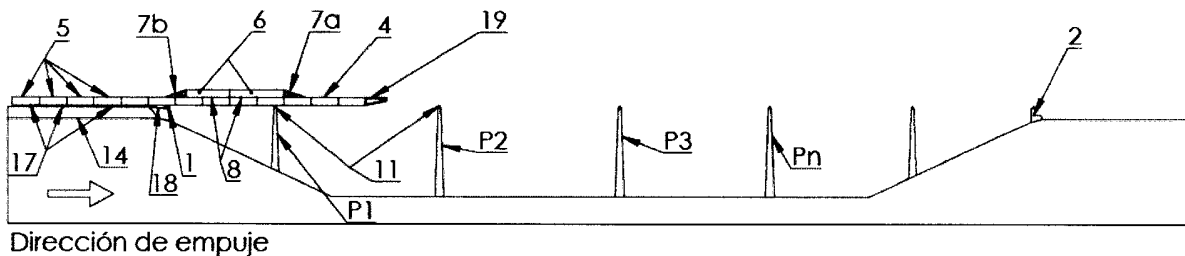


FIGURA 15-B

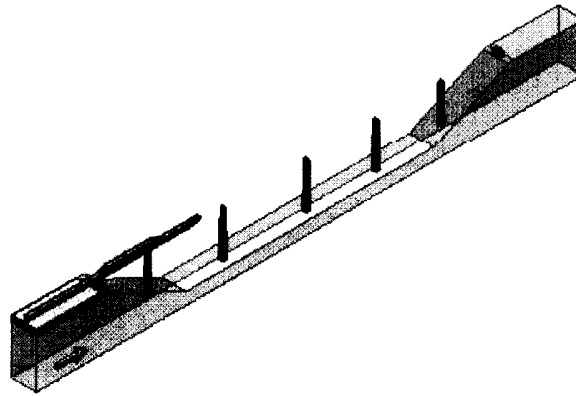


FIGURA 15-C

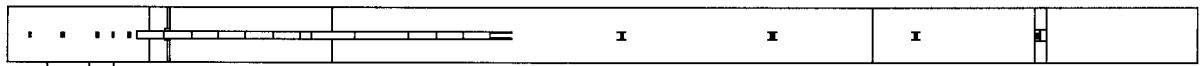


FIGURA 16-A

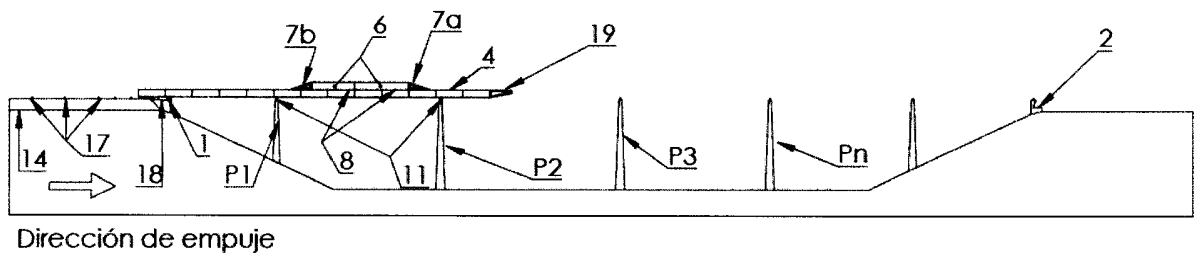


FIGURA 16-B

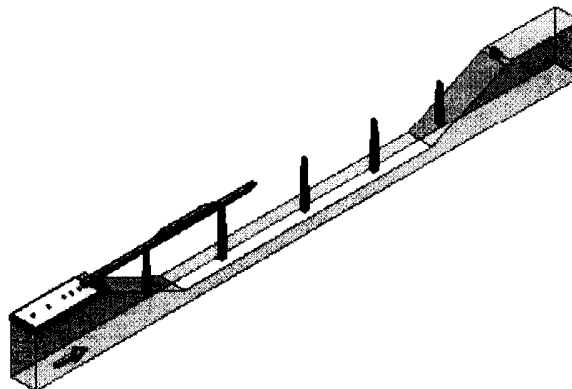


FIGURA 16-C

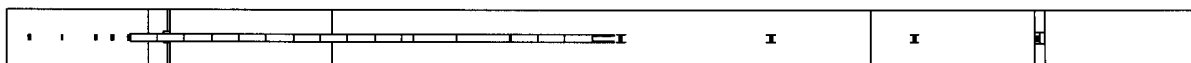


FIGURA 17-A

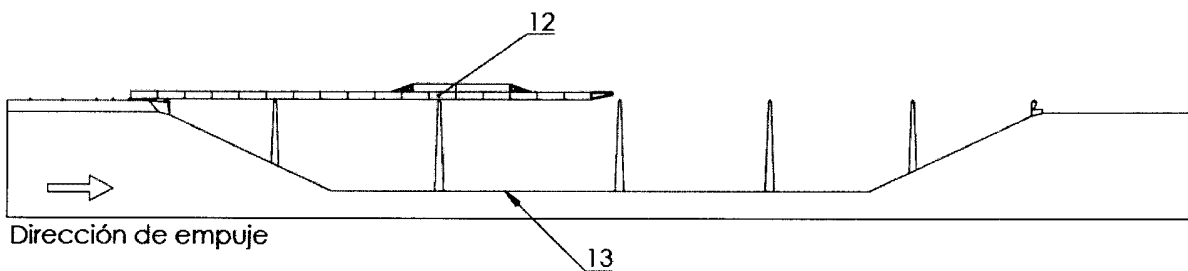


FIGURA 17-B

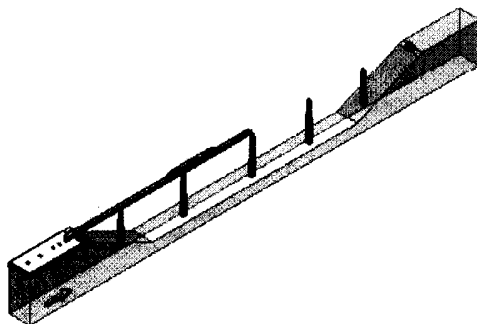


FIGURA 17-C

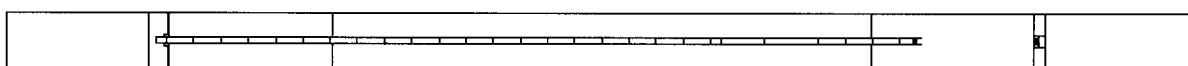


FIGURA 18-A

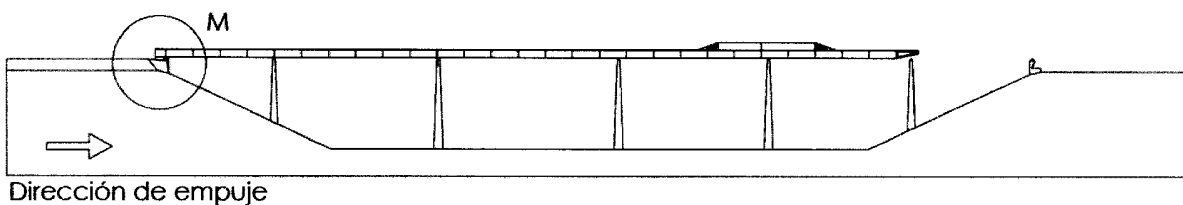


FIGURA 18-B

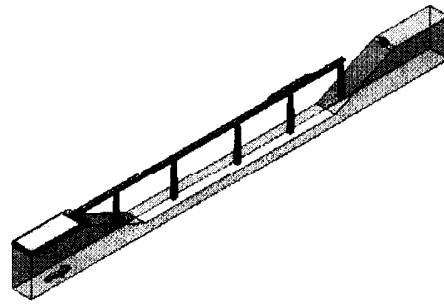
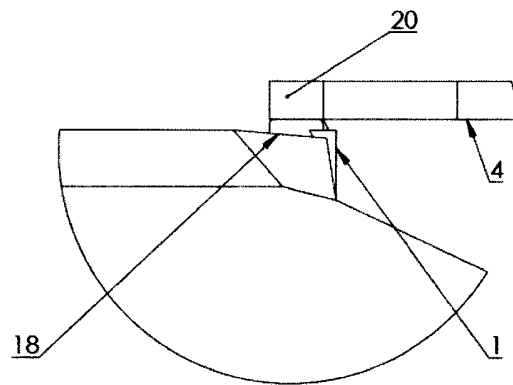


FIGURA 18-C



Detalle M

FIGURA 18-D

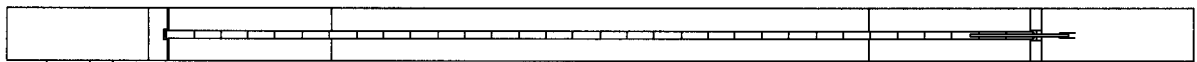


FIGURA 19-A

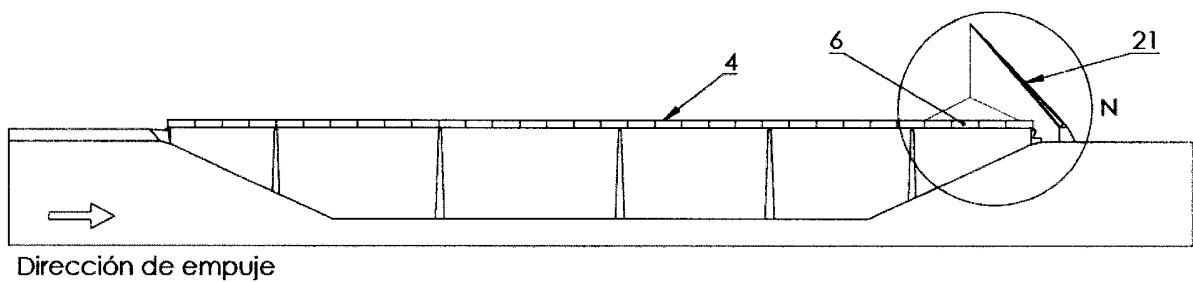


FIGURA 19-B

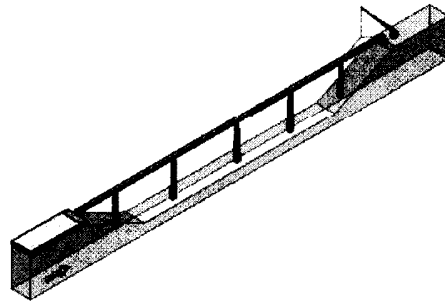
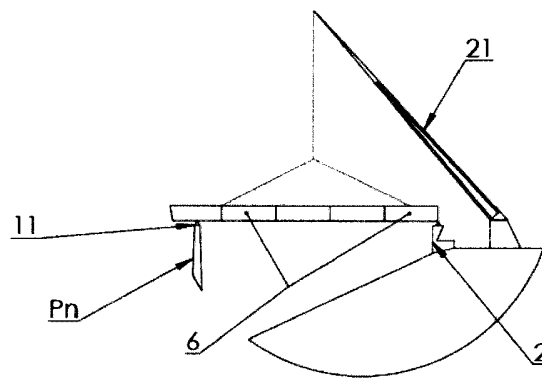


FIGURA 19-C



Detalle N

FIGURA 19-D

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/ES2012/000183

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

E01D21/06 (2006.01)

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

E01D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPODOC, INVENES

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	DE 3435112 A1 (SCHLAICH JOERG ET AL.) 03/04/1986, figures & Abstract from DataBase WPI. Retrieved from EPOQUE; AN 1986-094734.	1-14
A	JP 2000265418 A (SANSHIN KOGYO KK) 26/09/2000, figures & Abstract from DataBase WPI. Retrieved from EPOQUE; AN 2000-635307.	1-14
A	JP 2001348816 A (PS CORP) 21/12/2001, figures & Abstract from DataBase WPI. Retrieved of EPOQUE; AN 2002-127581.	1-14
A	DE 1658607 A1 (KONEZ DR ING TIHAMER) 22/10/1970, figures & Abstract from DataBase WPI. Retrieved from EPOQUE; AN 1975-F1544W	1-14

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance.</p> <p>"E" earlier document but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure use, exhibition, or other means.</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other documents , such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>"&" document member of the same patent family</p>
--	---

Date of the actual completion of the international search
16/10/2012

Date of mailing of the international search report
(22/10/2012)

Name and mailing address of the ISA/

OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS
Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)
Facsimile No.: 91 349 53 04

Authorized officer
M. Castañón Chicharro

Telephone No. 91 3493261

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/ES2012/000183

Information on patent family members

Patent document cited in the search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE3435112 A	03.04.1986	NONE	
----- JP2000265418 A	----- 26.09.2000	----- JP4097836B2 B	----- 11.06.2008
----- JP2001348816 A	----- 21.12.2001	----- NONE	-----
----- DE1658607 ABC	----- 22.10.1970	----- CH509473 A	----- 30.06.1971
-----	-----	-----	-----

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº

PCT/ES2012/000183

A. CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD

E01D21/06 (2006.01)

De acuerdo con la Clasificación Internacional de Patentes (CIP) o según la clasificación nacional y CIP.

B. SECTORES COMPRENDIDOS POR LA BÚSQUEDA

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

E01D

Otra documentación consultada, además de la documentación mínima, en la medida en que tales documentos formen parte de los sectores comprendidos por la búsqueda

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda internacional (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

EPODOC, INVENES

C. DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES

Categoría*	Documentos citados, con indicación, si procede, de las partes relevantes	Relevante para las reivindicaciones nº
A	DE 3435112 A1 (SCHLAICH JOERG ET AL.) 03/04/1986, figuras & Resumen de la base de datos WPI. Recuperado de EPOQUE; AN 1986-094734.	1-14
A	JP 2000265418 A (SANSIN KOGYO KK) 26/09/2000, figuras & Resumen de la base de datos WPI. Recuperado de EPOQUE; AN 2000-635307.	1-14
A	JP 2001348816 A (PS CORP) 21/12/2001, figuras & Resumen de la base de datos WPI. Recuperado de EPOQUE; AN 2002-127581.	1-14
A	DE 1658607 A1 (KONEZ DR ING TIHAMER) 22/10/1970, figuras & Resumen de la base de datos WPI. Recuperado de EPOQUE; AN 1975-F1544W	1-14

En la continuación del recuadro C se relacionan otros documentos Los documentos de familias de patentes se indican en el anexo

<p>* Categorías especiales de documentos citados:</p> <p>"A" documento que define el estado general de la técnica no considerado como particularmente relevante.</p> <p>"E" solicitud de patente o patente anterior pero publicada en la fecha de presentación internacional o en fecha posterior.</p> <p>"L" documento que puede plantear dudas sobre una reivindicación de prioridad o que se cita para determinar la fecha de publicación de otra cita o por una razón especial (como la indicada).</p> <p>"O" documento que se refiere a una divulgación oral, a una utilización, a una exposición o a cualquier otro medio.</p> <p>"P" documento publicado antes de la fecha de presentación internacional pero con posterioridad a la fecha de prioridad reivindicada.</p>	<p>"T" documento ulterior publicado con posterioridad a la fecha de presentación internacional o de prioridad que no pertenece al estado de la técnica pertinente pero que se cita por permitir la comprensión del principio o teoría que constituye la base de la invención.</p> <p>"X" documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse nueva o que implique una actividad inventiva por referencia al documento aisladamente considerado.</p> <p>"Y" documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse que implique una actividad inventiva cuando el documento se asocia a otro u otros documentos de la misma naturaleza, cuya combinación resulta evidente para un experto en la materia.</p> <p>"&" documento que forma parte de la misma familia de patentes.</p>
--	--

Fecha en que se ha concluido efectivamente la búsqueda internacional.
16/10/2012

Fecha de expedición del informe de búsqueda internacional.
22 de octubre de 2012 (22/10/2012)

Nombre y dirección postal de la Administración encargada de la búsqueda internacional
OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS
Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)
Nº de fax: 91 349 53 04

Funcionario autorizado
M. Castañón Chicharro

Nº de teléfono 91 3493261

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº

Informaciones relativas a los miembros de familias de patentes

PCT/ES2012/000183

Documento de patente citado en el informe de búsqueda	Fecha de Publicación	Miembro(s) de la familia de patentes	Fecha de Publicación
DE3435112 A	03.04.1986	NINGUNO	
-----	-----	-----	-----
JP2000265418 A	26.09.2000	JP4097836B2 B	11.06.2008
-----	-----	-----	-----
JP2001348816 A	21.12.2001	NINGUNO	
-----	-----	-----	-----
DE1658607 ABC	22.10.1970	CH509473 A	30.06.1971
-----	-----	-----	-----

ANEXO II

PATENTE WO-2013001114:

*“Dispositivo de desplazamiento continuo de
estructuras”*

(12) SOLICITUD INTERNACIONAL PUBLICADA EN VIRTUD DEL TRATADO DE COOPERACIÓN EN MATERIA DE PATENTES (PCT)

(19) Organización Mundial de la Propiedad Intelectual
Oficina internacional



(10) Número de Publicación Internacional
WO 2013/001114 A1

(43) Fecha de publicación internacional
3 de enero de 2013 (03.01.2013)

WIPO | PCT

- (51) Clasificación Internacional de Patentes:
E01D 21/00 (2006.01) *E01D 21/06* (2006.01)
- (21) Número de la solicitud internacional:
PCT/ES2012/000182
- (22) Fecha de presentación internacional:
29 de junio de 2012 (29.06.2012)
- (25) Idioma de presentación: español
- (26) Idioma de publicación: español
- (30) Datos relativos a la prioridad:
P201100754 30 de junio de 2011 (30.06.2011) ES
- (71) Solicitantes (para todos los Estados designados salvo US):
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA [ES/ES]; Pabellón de Gobierno, Avda. de los Castros, E-39005 Santander, Cantabria (ES). **UNIVERSIDAD DE OVIEDO** [ES/ES]; Edificio Severo Ochoa, planta baja, Campus de "El Cristo", E-33006 Oviedo (Asturias) (ES).
- (72) Inventores; e
- (75) Inventores/Solicitantes (para US solamente): **COZ DIAZ, Juan José del** [ES/ES]; Edificio Severo Ochoa, planta baja, Campus de "El Cristo", E-33006 Oviedo (Asturias) (ES). **CASTRO FRESNO, Daniel** [ES/ES]; Dpto. Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos,

E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos., Avda. de los Castros 44, E-39005 Santander - Cantabria (ES). **NAVARRO MANSO, Antonio** [ES/ES]; Edificio Severo Ochoa, planta baja, Campus de "El Cristo", E-33006 Oviedo (Asturias) (ES). **ALONSO MARTINEZ, Mar** [ES/ES]; Edificio Severo Ochoa, planta baja, Campus de "El Cristo", E-33006 Oviedo (Asturias) (ES).

(81) Estados designados (a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección nacional admisible): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Estados designados (a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección regional admisible): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), euroasiática (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europea (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,

[Continúa en la página siguiente]

(54) Title: DEVICE FOR CONTINUOUS MOVEMENT OF STRUCTURES

(54) Título : DISPOSITIVO DE DESPLAZAMIENTO CONTINUO DE ESTRUCTURAS

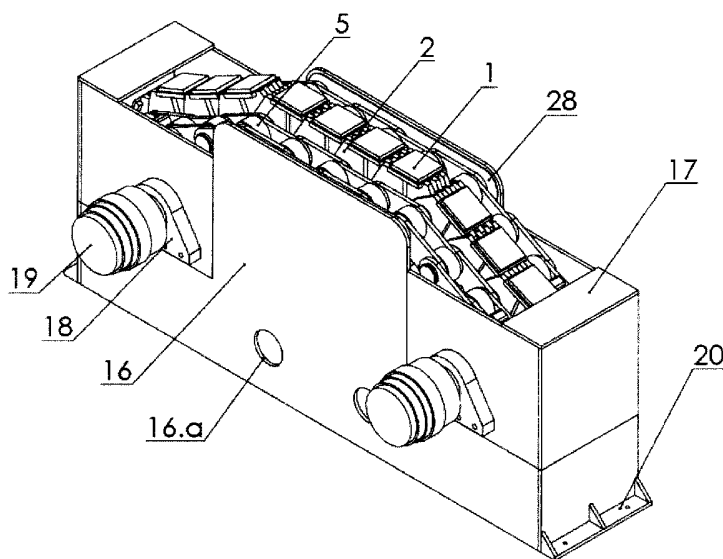


FIGURA 1

(57) Abstract: The invention relates to a device for the continuous movement of a structure by means of a friction force, said device comprising drive mechanisms (19) configured to rotate pinions (6) in two directions, that in turn entrain traction chains (4); and a chain of highly rigid supporting links (2) for supporting vertical loads, connected to the traction chains (4) by means of bolts (3) that support vertical and horizontal loads. The ends of said bolts (3) receive said traction chains (4) and wheels (5) that are designed to support vertical loads and are in contact with said traction pinions (6), the supporting links (2) remaining in the central area of the bolts (3).

(57) Resumen: Un dispositivo de desplazamiento continuo de una estructura por medio de una fuerza de fricción, que comprende unos accionamientos (19) configurados para girar unos piñones (6) en dos sentidos, donde dichos piñones (6) a su vez arrastran unas cadenas de tracción (4); y una cadena de eslabones de apoyo (2) de gran rigidez diseñados para soportar cargas

verticales, unida a las cadenas de tracción (4) mediante unos bulones (3) que soportan cargas verticales y horizontales. En dichos bulones (3) se encajan, en sus extremos,

[Continúa en la página siguiente]



IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG,
CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

— *antes de la expiración del plazo para modificar las reivindicaciones y para ser republicada si se reciben modificaciones (Regla 48.2(h))*

Publicada:

— *con informe de búsqueda internacional (Art. 21(3))*

DISPOSITIVO DE DESPLAZAMIENTO CONTINUO DE ESTRUCTURAS

CAMPO DE LA INVENCION

5

La presente invención pertenece al sector de la Ingeniería de la Construcción, y en concreto, permite el desplazamiento continuo mediante fricción de estructuras pesadas, tales como puentes o viaductos.

10

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

15

Tradicionalmente los mecanismos de tracción que permiten el transporte por rodadura de grandes cargas se denominan "orugas". Estos elementos mecánicos son capaces de adaptarse a diferentes superficies, distribuyendo uniformemente la carga sobre el terreno y permitiendo el desplazamiento por terrenos muy deformables, lo que resulta imposible con otros sistemas de rodadura. Estas orugas se emplean como medios de transporte de grandes cargas por terrenos irregulares, tales como maquinaria de construcción, vehículos militares, transportes sobre nieve, etc. La solicitud de patente europea EP0974510A1 describe un vehículo de tracción con oruga que mejora el comportamiento de las vibraciones aumentando la masa vibrante e introduciendo elementos de amortiguación en el chasis de unión. Esta invención se enfoca principalmente a vehículos militares.

20

25

El desplazamiento por fricción posee muchas aplicaciones en diversos campos. Este desplazamiento por fricción consiste en llevar a cabo el movimiento de un objeto aprovechando el rozamiento entre dos superficies con el fin de transmitir cierto esfuerzo horizontal, sin movimiento relativo entre los cuerpos. El elemento tractor transmite el esfuerzo horizontal siempre que el producto de la carga normal por el coeficiente de rozamiento entre superficies en contacto sea inferior a la fuerza horizontal necesaria para producir el movimiento del objeto. Este tipo de aplicaciones

30

son frecuentes en minería, para la extracción de material, en el sector industrial para desplazamientos de elementos en producciones en cadena, etc. aunque son utilizadas con cargas verticales pequeñas puesto que sus objetivos suelen ser salvar distancias y transportar material de manera continua, por lo que alcanzan un gran tamaño longitudinal. La solicitud de patente EP2326579A1 describe un sistema de desplazamiento por fricción de longitud variable que aumenta la vida útil de la cinta ante ambientes abrasivos, pero no permite el desplazamiento de cargas elevadas.

En la línea de empuje de grandes cargas mediante fricción se puede incluir el empuje de puentes. Este es un método muy empleado en la actualidad, en el que el empuje se realiza mediante unos cilindros hidráulicos denominados gatos de fricción. Generalmente se utiliza una pareja de cilindros para realizar el desplazamiento horizontal y otra pareja para el movimiento vertical. Este sistema, junto con una placa de frenado, permite el empuje de puentes mediante ciclos sucesivos de lanzamiento y recogida de los cilindros hidráulicos. Mediante esta técnica se han llegado a empujar vanos de hasta 70 m. En muchos casos este sistema requiere de otros métodos auxiliares para completar el lanzamiento, tales como sistemas de empuje de fricción con retenida pasiva, o activa, etc. Este método de empuje no proporciona un movimiento continuo y dobla el tiempo de lanzamiento debido a los períodos de recogida de los gatos, consiguiendo velocidades máximas de hasta 12 m/h.

La solicitud de patente coreana KR20050009891A describe un empuje por fricción puro mediante gatos de fricción. Este sistema no es capaz de proporcionar un empuje continuo del tablero, sino que lo hace por secuencias de avance limitadas por la carrera de los gatos. La solicitud de patente FR2437466A1 contempla un sistema compuesto por dos cadenas de tracción laterales que arrastran unas placas. Este sistema está pensado para disminuir el rozamiento entre la superestructura a desplazar y los apoyos del mismo, sin desarrollar el propio sistema el empuje capaz de desplazar la estructura. Este sistema puede disponerse en horizontal y en vertical, pero no para desarrollar la fuerza de empuje sino para guiar y facilitar el desplazamiento disminuyendo el rozamiento entre las dos superficies, las placas del mecanismo y la superficie de la

superestructura. De la misma manera, en la solicitud de patente WO00/73589A1 se describe un dispositivo que soporta cargas en movimiento, pero el dispositivo no realiza el desplazamiento de la carga, sino que es un medio auxiliar, en este caso cable. El dispositivo descrito en este documento presenta importantes problemas, como por ejemplo la alimentación manual de las placas de apoyo al sistema.

Sin embargo, los sistemas actuales de empuje de estructuras pesadas o grandes masas, presentan una serie de limitaciones:

10 -Las orugas utilizadas como mecanismos de tracción para el transporte por rodadura están pensadas para resolver problemas de adaptación a terrenos deformables y no uniformes. Para ello distribuyen la carga sobre el terreno por el que circulan permitiendo el desplazamiento del sistema. Este sistema presenta dos grandes inconvenientes. Por un lado no es capaz de transportar cargas elevadas debido al fallo del terreno sobre el que circula. Por otro lado, el sistema se desplaza con la carga, por lo que precisa de un camino sobre el que pueda circular, lo que en algunos casos no resulta posible.

20 -En cuanto a los sistemas que utilizan dispositivos de desplazamiento continuo por fricción, tales como las cintas transportadoras, caminos de rodillos, etc. aunque desplazan masas distribuidas en toda su superficie, no son capaces de soportar cargas concentradas, y requieren de importantes longitudes.

25 -Por otra parte, los sistemas actuales de empuje de puentes son capaces de soportar importantes esfuerzos verticales y, a su vez, desplazar la estructura. Sin embargo, el inconveniente más importante de este sistema es la discontinuidad en el movimiento y la baja velocidad de desplazamiento, dado que el empuje se realiza mediante ciclos sucesivos de expansión y recogida de cilindros hidráulicos. Asimismo, estos sistemas de empuje no incorporan ningún mecanismo propio de seguridad que permita la detención automática y el control de la carga. Este hecho obliga a adoptar medidas adicionales a los medios de empuje para controlar la estabilidad y seguridad del puente

30

o viaducto durante sus diferentes fases de lanzamiento. Finalmente, los empujes actuales son unidireccionales, teniendo que recurrir a operaciones costosas y a medios auxiliares cuando se desea invertir el sentido de empuje.

5

RESUMEN DE LA INVENCION

La presente invención trata de resolver los inconvenientes mencionados anteriormente mediante un dispositivo de desplazamiento continuo bidireccional por fricción de estructuras pesadas (como pueden ser puentes o viaductos, entre otras) que reduce el tiempo total de movimiento.

10

Concretamente, en un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un dispositivo de desplazamiento continuo de una estructura por medio de una fuerza de fricción que comprende unos accionamientos configurados para girar unos piñones en dos sentidos, donde dichos piñones a su vez arrastran unas cadenas de tracción. El dispositivo comprende una cadena de eslabones de apoyo de gran rigidez diseñados para soportar cargas verticales, unida a las cadenas de tracción mediante unos bulones que soportan cargas verticales y horizontales.

15

20

En una posible realización, el dispositivo comprende una pluralidad de placas de apoyo sobre los eslabones de apoyo, estando dichas placas de apoyo en contacto con la estructura a desplazar transmitiendo la fuerza de empuje por fricción.

25

En una posible realización, en los bulones se encajan, en sus extremos, las cadenas de tracción y unas ruedas configuradas para soportar cargas verticales y que están en contacto con dichos piñones tractores, quedando en la zona central de los bulones los eslabones de apoyo.

30

En una posible realización, la tensión de dichas cadenas de tracción es modificada por medio de un tensor.

En una posible realización, los accionamientos hacen girar los piñones transmitiendo el movimiento a través de un eje y dichos piñones a su vez, engranan en las ruedas de las cadenas de tracción.

5

Los accionamientos pueden ser hidráulicos, eléctricos, neumáticos o magnéticos.

En una posible realización, el dispositivo comprende además medios de adaptación a la geometría de la superficie en contacto de la estructura a empujar.

10

En ese caso, los medios de adaptación pueden comprender un carril de rodadura apoyado sobre unos largueros, empotrados en una viga cargadero, configurados para permitir el desplazamiento vertical de los eslabones de apoyo.

15

Los medios de adaptación pueden comprender además unos elementos de desplazamiento, que hacen posible la adaptación de los eslabones de apoyo a la deformada y movimientos de la estructura a desplazar, y una estructura soporte.

20

En una posible realización, el dispositivo comprende además unos dispositivos de seguridad configurados para detectar sobrecargas sobre los eslabones de apoyo, deteniendo el accionamiento del dispositivo en caso necesario.

25

En una posible realización, el dispositivo comprende además una carcasa que aloja todo el mecanismo y a su vez lo protege, disponiendo esta carcasa de tapa de seguridad, de uno o varios pasos de hombre y de unos medios de anclaje para mantener la carcasa fija.

30

En el caso anterior, el dispositivo comprende además un sistema antifricción configurado para soportar las acciones horizontales transversales transmitidas por la estructura, entre la cadena de tracción y la carcasa soporte, donde dicho sistema antifricción comprende una lámina de material deslizante, sobre los extremos de los

bulones, y una lámina de material antidesgaste sobre la carcasa.

Además, el dispositivo puede ir ubicado tanto en la parte inferior, como en los laterales o en la parte superior de la estructura que el dispositivo va a desplazar.

5

En otro aspecto de la presente invención, se proporciona una instalación que comprende al menos dos dispositivos de los descritos anteriormente, donde cada uno de dichos dispositivos comprende medios de control configurados para sincronizar dichos dispositivo entre sí.

10

El mecanismo propuesto permite realizar una fase completa del desplazamiento de una estructura de manera continua, posibilitando el desplazamiento de la estructura en dos sentidos, tanto avance como retroceso, y con geometrías rectas o curvas, con el consiguiente ahorro de tiempo en este tipo de construcciones sin incrementar su coste.

15

El mecanismo que se propone se adapta a diversas tipologías de estructuras pesadas, así como a diferentes trayectorias y materiales. Es capaz de desplazar de manera continua y a diferentes velocidades. Permite el avance y el retroceso de la estructura sin necesidad de elementos adicionales u operaciones complejas y además incorpora un sistema activo de seguridad.

20

Otras ventajas de la invención se harán evidentes en la descripción siguiente.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

25

Con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica del mismo, y para complementar esta descripción, se acompaña como parte integrante de la misma, un juego de dibujos, cuyo carácter es ilustrativo y no limitativo. En estos dibujos:

30

Las figuras 1 a 3 muestran diversas vistas de posibles realizaciones del dispositivo de desplazamiento continuo de la invención. Las figuras 4 a 14 muestran detalles de diferentes partes del conjunto. En concreto:

5 La figura 1 muestra un esquema de una posible implementación del mecanismo o dispositivo de desplazamiento de la invención.

La figura 2 muestra una vista frontal de la implementación del mecanismo o dispositivo de desplazamiento de la figura 1.

10

Las figuras 3 y 4 muestran un corte de perfil de la implementación del mecanismo o dispositivo de desplazamiento de la figura 1.

15

La figura 5 muestra un detalle de la sección de perfil del mecanismo o dispositivo de desplazamiento en el que se aprecia el sistema antifricción que soporta las cargas horizontales de acuerdo con una posible implementación del mecanismo o sistema de desplazamiento de la invención.

20

La figura 6 muestra el mecanismo de desplazamiento sin la carcasa externa de acuerdo con una posible implementación del mecanismo o sistema de desplazamiento de la invención.

La figura 7 muestra una posible geometría del eslabón de apoyo.

25

La figura 8 muestra una vista frontal del eslabón de apoyo de la figura 7.

La figura 9 muestra una vista superior del eslabón de apoyo de la figura 7.

30

La figura 10 muestra una vista frontal del mecanismo de desplazamiento sin la carcasa externa de acuerdo con una posible implementación del mecanismo o sistema de desplazamiento de la invención.

La figura 11 muestra un posible sistema activo de seguridad y compensación de carga del mecanismo de empuje de la invención.

5 La figura 12 muestra una vista lateral del sistema activo de seguridad y compensación de carga de la figura 11.

La figura 13 muestra una vista frontal del sistema activo de seguridad y compensación de carga de la figura 11.

10

La figura 14 muestra un esquema de una posible aplicación del dispositivo de empuje continuo de la presente invención, el lanzamiento de un puente o viaducto.

15

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

En este texto, el término “comprende” y sus variantes no deben entenderse en un sentido excluyente, es decir, estos términos no pretenden excluir otras características técnicas, aditivos, componentes o pasos.

20

Además, los términos “aproximadamente”, “sustancialmente”, “alrededor de”, “unos”, etc. deben entenderse como indicando valores próximos a los que dichos términos acompañen, ya que por errores de cálculo o de medida, resulte imposible conseguir esos valores con total exactitud.

25

A su vez, a lo largo de este texto los términos desplazamiento, lanzamiento y empuje (de una estructura, ya sea un puente, viaducto, etc.) se utilizan indistintamente, debiéndose considerar los tres términos como sinónimos.

30

Además, en este texto se emplea la siguiente terminología propia de la ingeniería de la construcción, tal y como reconocerá cualquier experto en esta materia:

Estructura pesada: puede ser cualquier elemento constructivo, equipo, edificación, contenedor, puente, viaducto etc. cuyo peso supere los 10.000 Kg.

5 Mecanismo: conjunto de sólidos resistentes, móviles unos respecto de otros, unidos entre sí mediante diferentes tipos de uniones, llamadas pares cinemáticos (pernos, uniones de contacto, bulones, pasadores, etc.), cuyo propósito es la transmisión del movimiento en las máquinas.

10 Eslabón: Cada uno de los anillos o elementos que forman una cadena.

Oruga: Dispositivo de transporte por rodadura utilizado principalmente en vehículos pesados o grandes cargas, como tanques y tractores, u otro tipo de vehículos.

15 Rigidez: Capacidad de un objeto sólido o elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos. En el contexto de la invención, la expresión “gran rigidez” asociada a los eslabones de apoyo debe considerarse como un término absoluto, ya que se entiende por “gran rigidez” aquella que supera los 20.000 kilogramos por milímetro.

20 Fricción, fuerza de rozamiento o fuerza de fricción: Se define como la acción entre dos superficies en contacto, que se opone al movimiento entre las mismas.

25 Las siguientes realizaciones preferidas se proporcionan a modo de ilustración, y no se pretende que sean limitativos de la presente invención. Además, la presente invención cubre todas las posibles combinaciones de realizaciones particulares y preferidas aquí indicadas. Para los expertos en la materia, otros objetos, ventajas y características de la invención se desprenderán en parte de la descripción y en parte de la práctica de la invención.

30 A continuación, se describe el dispositivo, sistema o mecanismo de desplazamiento de la invención. Se trata de un mecanismo de desplazamiento bidireccional continuo que

permite transportar por fricción estructuras pesadas, como puede ser cualquier elemento constructivo, equipo, edificación, contenedor, puente, viaducto etc. El desplazamiento se consigue mediante una fuerza de fricción entre el mecanismo y la estructura en la dirección del desplazamiento deseado sin movimiento relativo entre los mismos. La estructura puede estar formada por una única pieza o por varios tramos unidos entre sí.

El dispositivo de desplazamiento bidireccional continuo de la invención está formado por uno o dos accionamientos que pueden girar en ambos sentidos, horario y antihorario y mueven unos piñones tractores. Estos piñones transmiten su movimiento a unas cadenas de tracción que incorporan un tensor. Los eslabones de estas cadenas están unidos por unos bulones, preferentemente de sección circular, que soportan las grandes cargas verticales y horizontales y unen las cadenas de tracción, los eslabones de apoyo y las ruedas, haciendo que se desplacen conjuntamente. Los bulones poseen en sus extremos unas placas de material deslizante. Sobre los eslabones de apoyo se disponen unas placas de apoyo las cuales desarrollan una importante capacidad de empuje por rozamiento, como consecuencia del peso de la estructura. Asimismo, el mecanismo dispone de un sistema de compensación de carga y seguridad, así como de una carcasa, que alberga y soporta todas las partes móviles del mismo, protegiéndolas de factores ambientales externos y evitando accidentes. En la parte interior superior de los laterales de esta carcasa se disponen unas chapas antidesgaste que permiten el deslizamiento de la cadena sin dificultad. El dispositivo de la invención es modular y puede utilizarse individualmente o en parejas, y es posible utilizar varios dispositivos independientes o síncronos, según requiera la situación. El sentido de giro de los piñones tractores, y por tanto el del desplazamiento de la cadena, depende del sentido de giro de los accionamientos, que puede ser horario y antihorario. De esta manera, se produce la fuerza de empuje hacia adelante o hacia atrás, dando lugar al avance o retroceso respectivamente, de la estructura a desplazar.

Las figuras 1 y 2 muestran un esquema de una posible implementación del mecanismo o sistema de la invención. La estructura pesada que será desplazada mediante este mecanismo se apoya sobre unas placas de apoyo 1. Estas placas de apoyo 1 son

preferentemente de elastómero reforzado y desmontables, aportando un alto coeficiente de rozamiento. Alternativamente, pueden ser de composite, acero moleteado, aluminio, etc., con o sin refuerzo. Las placas de apoyo 1 se sitúan sobre unos eslabones de apoyo 2 que se encuentran unidos entre sí mediante bulones 3. Estos eslabones de apoyo 2 son de gran rigidez para poder soportar los grandes esfuerzos a los que están sometidos sin deformarse. Estos eslabones poseen una geometría específica que les aporta gran rigidez, permitiendo que estos soporten cargas verticales elevadas sin deformarse, a diferencia de los eslabones convencionales pensados principalmente para soportar esfuerzos en la dirección del tiro o desplazamiento. Las figuras 7 a 9 muestran distintas vistas de una realización preferida del eslabón diseñado para este mecanismo. Alternativamente, el eslabón puede tomar otras posibles geometrías cuyas propiedades estructurales sean semejantes o válidas para la aplicación. Las figuras 6 y 10 muestran el mecanismo de la oruga sin la carcasa externa, para facilitar su descripción.

En los extremos de estos bulones 3 se encuentran encajadas unas ruedas 5 que soportan la carga vertical y una cadena de tracción 4 que transmite el movimiento. Las ruedas 5 engranan en unos piñones 6 que reciben el movimiento de unos accionamientos 19, que pueden ser hidráulicos, eléctricos, neumáticos o magnéticos, a través de un eje 7 que se encuentra acoplado a la carcasa 16 mediante un soporte 18. Los piñones 6 al girar transmiten su movimiento a dos cadenas de tracción 4. Estas cadenas arrastran los eslabones de apoyo 2 que contienen las placas de apoyo 1 y desplazan la estructura mediante fricción.

Todo el dispositivo se encuentra alojado en una carcasa 16 que soporta todos los esfuerzos horizontales y verticales del mecanismo y lo aloja en su interior. Posee preferentemente una tapa de seguridad 17 así como unos pasos de hombre 16.a. Además, alberga en su interior todos los componentes mejorando las condiciones de funcionamiento y seguridad. Esta carcasa comprende medios de anclaje 20 para mantener la carcasa fija. Así, la carcasa se encuentra anclada al terreno preferentemente en tres zonas de apoyo mediante por ejemplo pernos y chapas de fijación 20.

El dispositivo tiene un sistema antifricción, configurado para soportar las acciones horizontales transversales transmitidas por la estructura, entre la cadena de tracción 4 y la carcasa soporte 16. Este sistema antifricción tiene una lámina de material deslizante 27, preferentemente de teflón (ilustrada en el detalle de la figura 5), en la parte exterior de cada uno de los bulones 3 (sobre los extremos de los bulones) que permite el deslizamiento de la cadena 4 aunque ésta entre en contacto directo con la carcasa 16 debido a esfuerzos horizontales que puedan producirse sobre el mecanismo. Con la misma finalidad, en la carcasa, y formando parte de este sistema antifricción, se introducen una o dos placas de material antidesgaste 28, preferentemente de acero inoxidable, en la parte superior interior de los laterales de la carcasa (sobre la carcasa).

En este mecanismo bidireccional continuo de desplazamiento de estructuras se incorpora un sistema de compensación de carga o medios de adaptación 26, que se muestra en detalle en las figuras 11, 12 y 13. Este sistema 26 está constituido por unos largueros transversales 12, cuya disposición dota al sistema de rigidez variable, apoyados sobre una viga cargadero 11 que descansa sobre unos elementos de desplazamiento 14, preferentemente cilindros hidráulicos. Estos elementos de desplazamiento 14 hacen posible la adaptación de los eslabones de apoyo 2 a la deformada y movimientos de la estructura a desplazar, evitando la deformación de la estructura. Las ruedas 5 se desplazan sobre un carril de rodadura 10 que se encuentra apoyado sobre los largueros 12. Los largueros transversales 12 se fijan sobre la viga cargadero central 11, y soportan en voladizo el carril de rodadura 10. Estos largueros 12 tienen las mismas dimensiones exteriores pero, la longitud en voladizo que poseen es diferente de tal manera que la capacidad de deformación también. De esta manera, estos largueros se deforman más o menos en función de la sollicitación de cada una de las placas de apoyo produciéndose así, la adaptación de los eslabones de apoyo a la geometría de la superficie en contacto con los mismos. La carga sobre la placa de apoyo 1 se transmite a los largueros 12 a través del carril de rodadura 10, sobre el que apoyan las ruedas 5 que están unidas a los eslabones de apoyo 2 mediante los bulones 3. Aquella placa de apoyo 1 que reciba más reacción vertical tendrá una deformación proporcional a la rigidez del larguero 12 sobre el que se encuentre, adaptándose así el

conjunto a la deformada de la estructura a desplazar. Para garantizar la completa adaptación de las placas de apoyo 1 ante movimientos de la estructura a desplazar se disponen unos elementos de desplazamiento 14, preferiblemente dos cilindros hidráulicos, que aportan mayores desplazamientos verticales al conjunto de compensación de carga. Los medios de adaptación 26 tienen también una estructura soporte (15).

El sistema de compensación de carga o medios de adaptación 26 incorpora además unos dispositivos de seguridad 13 configurados para detectar sobrecargas sobre los eslabones de apoyo 2, deteniendo el accionamiento del dispositivo en caso necesario.

En la cadena de tracción se introduce un tensor 8 que permite modificar la tensión de la cadena de tracción 4 en función de los requerimientos del mecanismo, así como garantizar una tensión mínima en dicha cadena. Asimismo, este tensor es capaz de adaptarse al desplazamiento de la cadena producido por el dispositivo de compensación de carga mostrado en la figura 11.

En este sistema de compensación se incluyen unos dispositivos de seguridad 13 que controlan la deformación de los largueros transversales 12 y ordenan la parada del mecanismo en el caso de sobrepasar ciertos límites.

Todo este sistema de compensación y seguridad va fijado sobre una estructura inferior 15 anclada a la carcasa soporte 16, capaz de soportar y transmitir los diferentes esfuerzos a los que se encuentra sometida.

Una posible aplicación de este nuevo dispositivo se esquematiza en la figura 14. Se trata del lanzamiento mediante fricción de un puente, construido por tramos. La estructura a empujar se almacena en un parque y el dispositivo de la invención (referenciado en la figura 14 como 25) realiza el empuje desde un estribo 24. El puente es empujado mediante la fuerza de fricción que le transmite el dispositivo hasta llegar a la pila 23 más próxima. Una vez lanzado un tramo 21, se procede al lanzamiento del

siguiente 22 del mismo modo.

Esta invención permite el desplazamiento de puentes o viaductos en dos sentidos: avance o retroceso. Los elementos que componen el mecanismo son capaces de realizar el desplazamiento en ambos sentidos simplemente con invertir el sentido de giro del accionamiento. Además, es capaz de realizar un empuje continuo puesto que el movimiento del mecanismo es continuo en el tiempo, y es posible pararlo o accionarlo cuando se desee. Normalmente, es un problema cómo empujar estructuras de gran longitud por su gran peso. Esto se puede resolver utilizando varios dispositivos de desplazamiento trabajando de manera síncrona o independiente, con lo que se pueden empujar grandes estructuras de gran tonelaje y por tanto, salvar grandes luces sin recurrir a sistemas auxiliares.

Si se lleva a cabo el movimiento de una estructura mediante dispositivos de desplazamiento ubicados en diferentes puntos de la misma, es necesario un sistema de sincronización (o medios de control) que permite controlar la velocidad de cada uno de los dispositivos por separado y todo ello controlarlo desde una central en la que se ordena el desplazamiento síncrono o no, según se requiera. Entre las posibles aplicaciones del dispositivo de desplazamiento se encuentra el lanzamiento de puentes. Si por ejemplo se dispone un dispositivo de desplazamiento en cada una de las pilas (ver figura 14), es necesario que todos ellos giren a la misma velocidad para evitar esfuerzos sobre las mismas. En este caso, el control de la instalación debe ordenar la sincronización de todos los dispositivos dispuestos en serie.

La presente invención tiene aplicación en el desplazamiento de todo tipo de estructuras pesadas, tales como pueden ser puentes o viaductos de diferentes tipologías y materiales.

Entre las ventajas de la invención, destacan las siguientes:

a) Permite el desplazamiento bidireccional continuo de estructuras de diferentes tipologías y materiales.

b) Disminuye el tiempo de desplazamiento de todo tipo de estructuras pesadas debido a la eliminación de tiempos muertos y al aumento de la velocidad media.

5 c) Este dispositivo de desplazamiento puede incluirse en uno de los extremos de la estructura a desplazar, como por ejemplo el estribo definitivo de un puente, con lo que se evita multiplicar las cimentaciones provisionales o grandes explanadas de empuje, tal y como requieren otros métodos.

10 d) El sistema propuesto puede ser reutilizado en multitud de aplicaciones diversas, tanto en estructuras complejas (grandes luces, puentes curvos, etc.) como sencillas (contenedores, vigas, etc.)

15 e) Este dispositivo incorpora un sistema de control de seguridad que permitirá acotar las fuerzas de empuje en el rango deseado, siendo capaz de detectar si los esfuerzos exceden los límites establecidos y detiene el mecanismo si esto ocurre. De este modo, el desplazamiento en todas sus fases se lleva a cabo de manera segura.

20 f) El dispositivo incorpora un sistema de compensación de carga entre los eslabones de apoyo sobre los que se encuentra la estructura, que permiten la adaptación de éstos a la geometría deformada de la misma.

25

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo de desplazamiento continuo de una estructura por medio de una fuerza de fricción, que comprende:

5 -unos accionamientos (19) configurados para girar unos piñones (6) en dos sentidos, donde dichos piñones (6) a su vez arrastran unas cadenas de tracción (4); y

-una cadena de eslabones de apoyo (2) de gran rigidez diseñados para soportar cargas verticales, unida a las cadenas de tracción (4) mediante unos bulones (3) que soportan cargas verticales y horizontales;

10

caracterizado por que en dichos bulones (3) se encajan, en sus extremos, dichas cadenas de tracción (4) y unas ruedas (5) configuradas para soportar cargas verticales y que están en contacto con dichos piñones tractores (6), quedando en la zona central de los bulones (3) los eslabones de apoyo (2).

15

2. El dispositivo de la reivindicación 1, que comprende una pluralidad de placas de apoyo (1) sobre los eslabones de apoyo (2), estando dichas placas de apoyo (1) en contacto con la estructura a desplazar transmitiendo la fuerza de empuje por fricción.

20

3. El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la tensión de dichas cadenas de tracción (4) es modificada por medio de un tensor (8).

4. El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde los accionamientos (19) hacen girar los piñones (6) transmitiendo el movimiento a través de un eje (7) y dichos piñones (6) a su vez, engranan en las ruedas (5) de las cadenas de tracción (4).

25

5. El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde dichos accionamientos (19) pueden ser hidráulicos, eléctricos, neumáticos o magnéticos.

30

6. El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende

además medios de adaptación (26) del dispositivo a la geometría de la superficie en contacto de la estructura a empujar.

5 7. El dispositivo de la reivindicación 6, donde dichos medios de adaptación (26) comprenden un carril de rodadura (10) apoyado sobre unos largueros (12), empotrados en una viga cargadero (11), configurados para permitir el desplazamiento vertical de los eslabones de apoyo (2).

10 8. El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones 6 o 7, donde dichos medios de adaptación (26) comprenden además unos elementos de desplazamiento (14), que hacen posible la adaptación de los eslabones de apoyo (2) a la deformada y a los movimientos de la estructura a desplazar, así como una estructura soporte (15).

15 9. El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además unos dispositivos de seguridad (13) configurados para detectar sobrecargas sobre los eslabones de apoyo (2), deteniendo el accionamiento del dispositivo en caso necesario.

20 10. El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además una carcasa (16) que aloja todo el mecanismo y a su vez lo protege, disponiendo esta carcasa de tapa de seguridad (17), de uno o varios pasos de hombre (16.a) y de unos medios de anclaje (20) para mantener la carcasa fija.

25 11. El dispositivo de la reivindicación 10, que comprende además un sistema antifricción configurado para soportar las acciones horizontales transversales transmitidas por la estructura, entre la cadena de tracción (4) y la carcasa soporte (16), donde dicho sistema antifricción comprende una lámina de material deslizante (27), sobre los extremos de los bulones (3), y una lámina de material antidesgaste (28) sobre la carcasa (16).

30 12. El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que puede ir

ubicado tanto en la parte inferior, como en los laterales o en la parte superior de la estructura que el dispositivo va a desplazar.

- 5 13. Instalación que comprende al menos dos dispositivos de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde cada uno de dichos dispositivos comprende medios de control configurados para sincronizar dichos dispositivos entre sí.

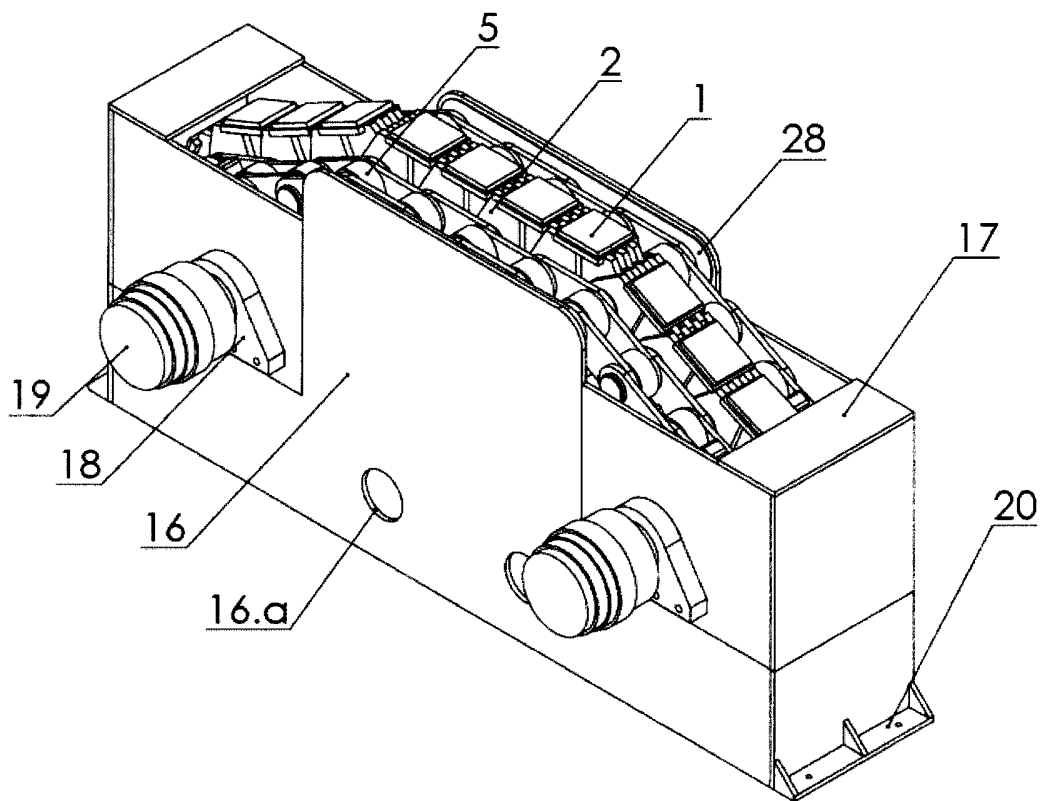


FIGURA 1

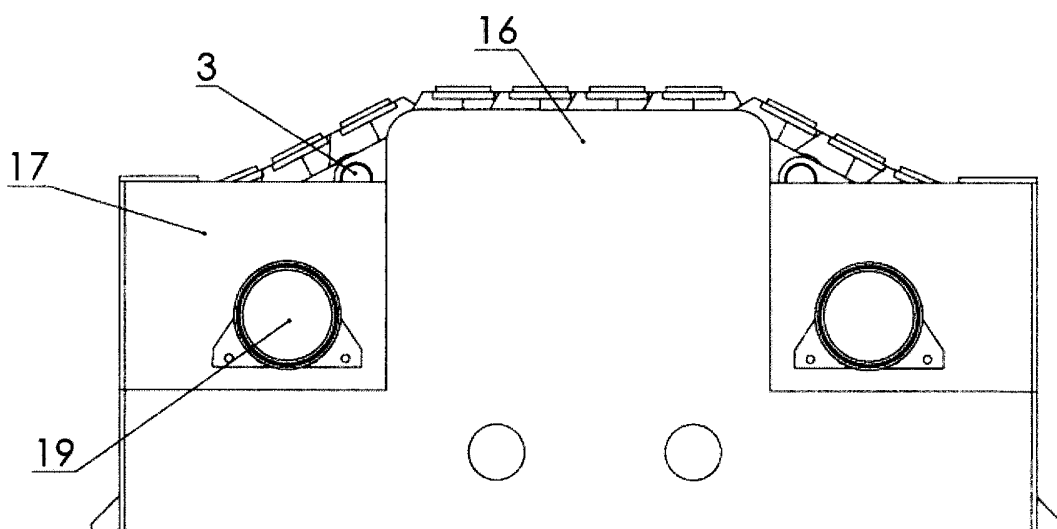


FIGURA 2

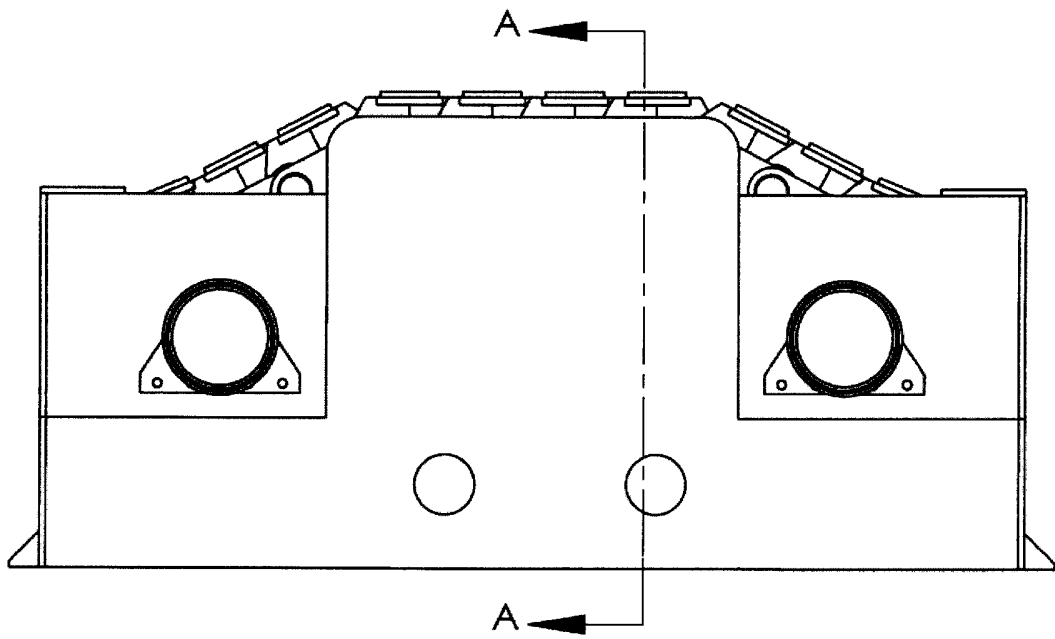


FIGURA 3

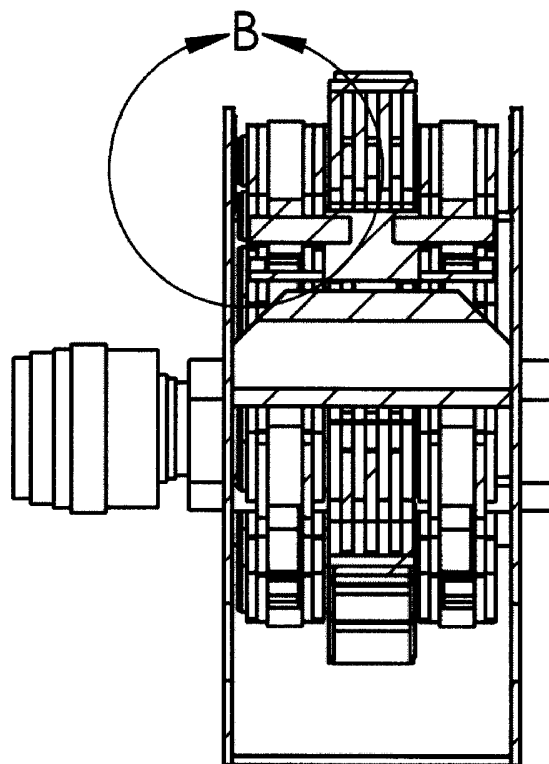


FIGURA 4

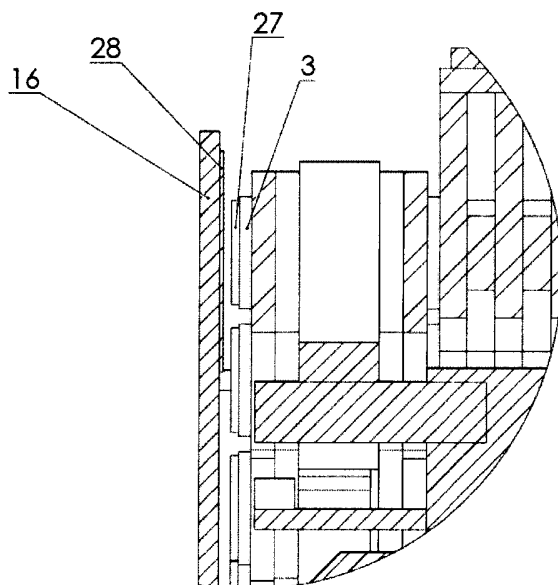


FIGURA 5

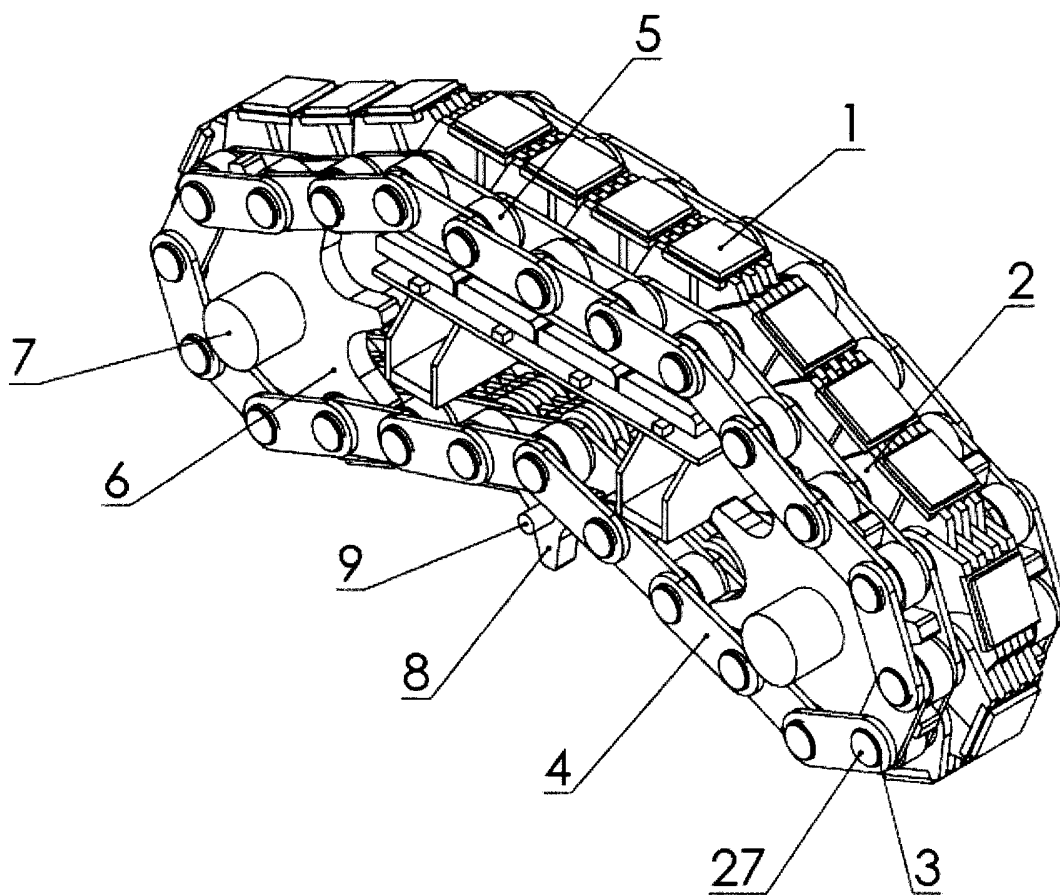


FIGURA 6

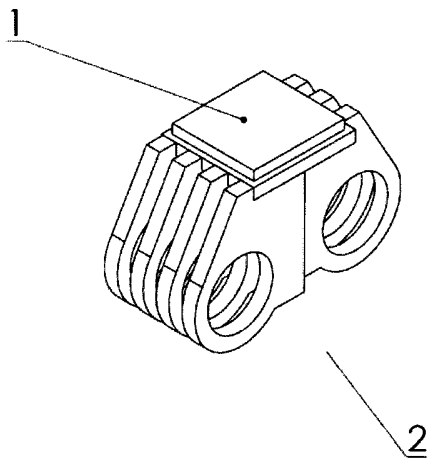


FIGURA 7

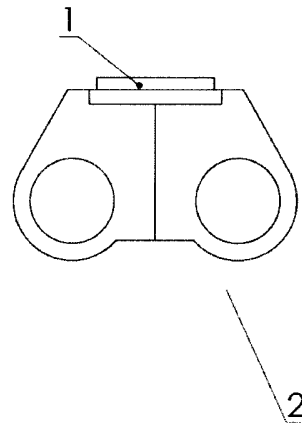


FIGURA 8

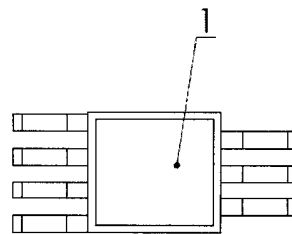


FIGURA 9

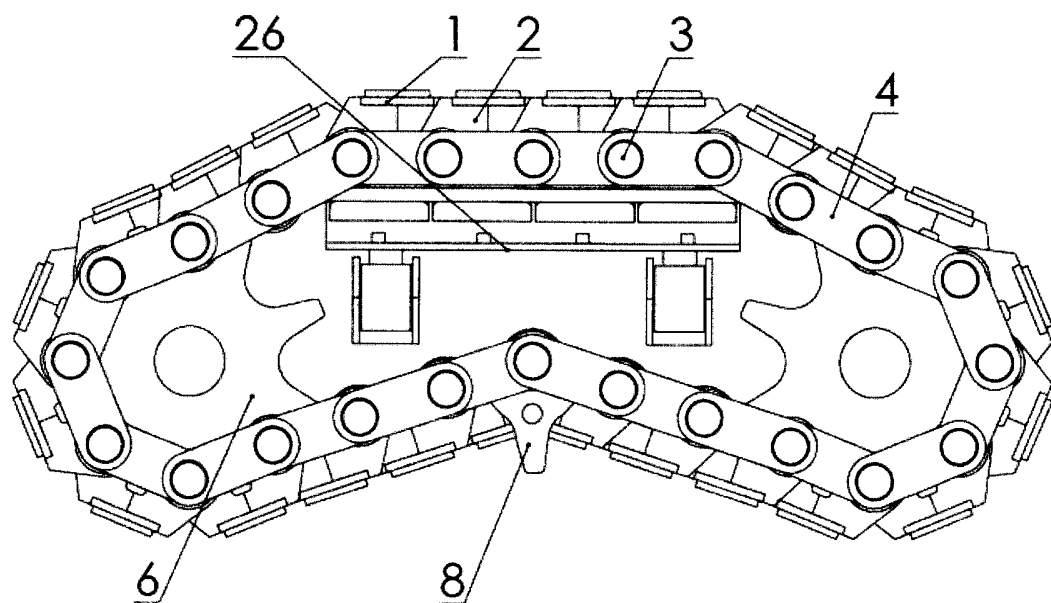


FIGURA 10

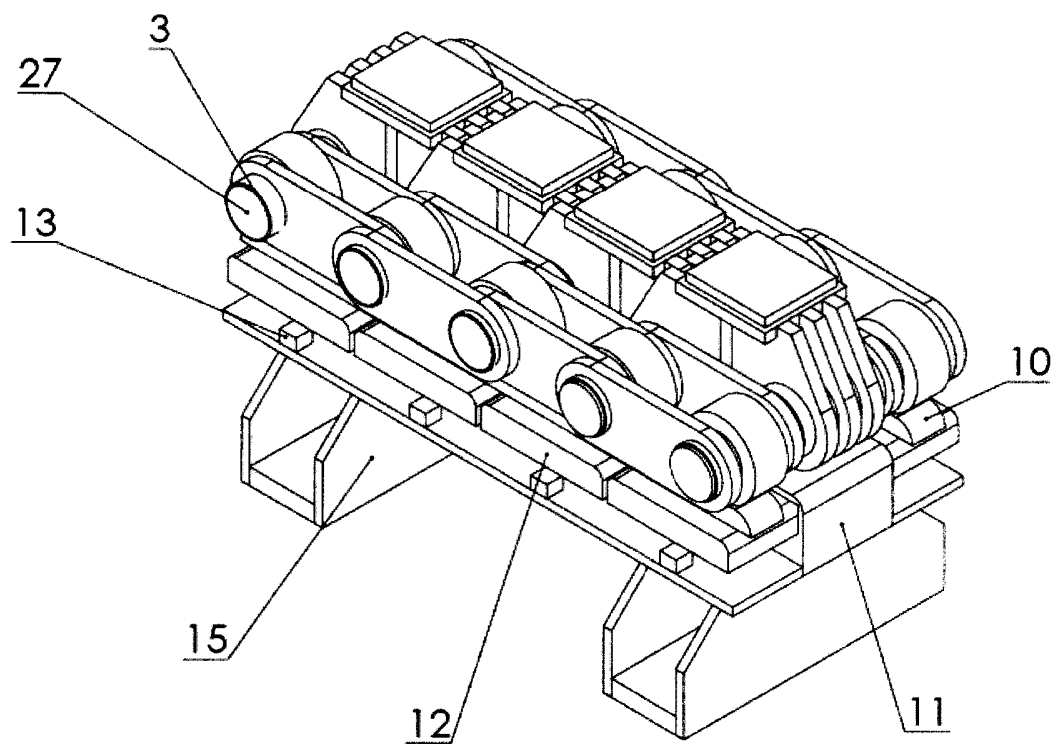


FIGURA 11

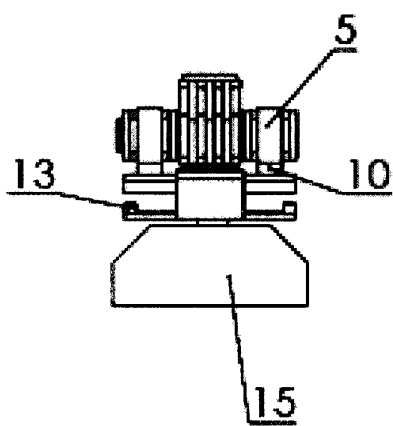


FIGURA 12

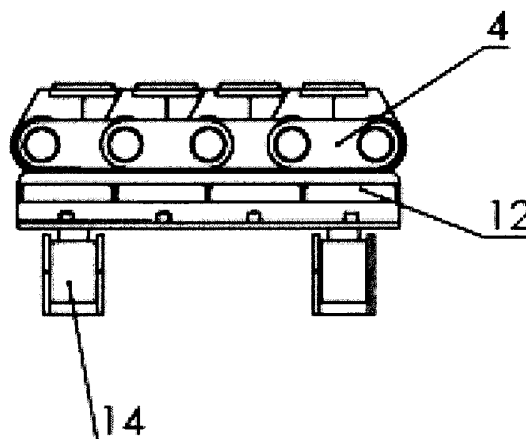


FIGURA 13

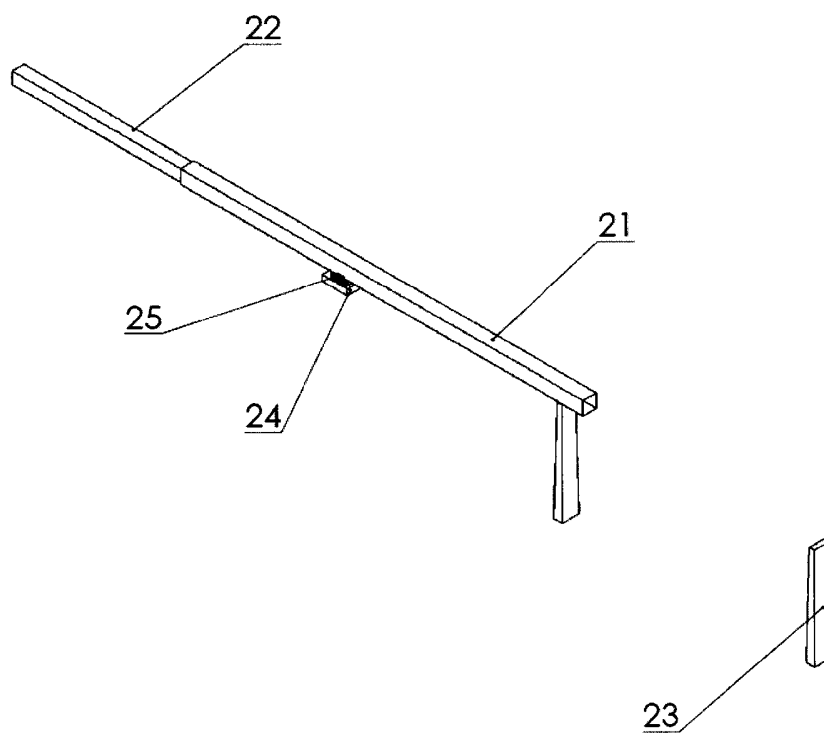


FIGURA 14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/ES2012/000182

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

E01D21/00 (2006.01)

E01D21/06 (2006.01)

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

E01D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPODOC, INVENES

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2009114853 A (OKKUSU JACK KK) 28/05/2009, figures & Abstract from DataBase WPI. Retrieved from EPOQUE; AN 2009-J68045.	1-13
A	DE 3515498 C1 (DYCKERHOFF & WIDMANN AG) 05/06/1986, figures & Abstract from DataBase WPI. Retrieved from EPOQUE; AN 1986-145112.	1-13
A	FR 2437466 A1 (MUELLER J G BAUGES) 25/04/1980, figures & Abstract from DataBase WPI. Retrieved from EPOQUE; AN 1980-D4357C.	1-13
A	US 4259759 A (TADA HIROSHI) 07/04/1981, figures & Abstract from DataBase WPI. Retrieved of EPOQUE; AN 1979-H3914B.	1-13

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance.</p> <p>"E" earlier document but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure use, exhibition, or other means.</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>"&" document member of the same patent family</p>
--	--

Date of the actual completion of the international search
16/10/2012

Date of mailing of the international search report
(22/10/2012)

Name and mailing address of the ISA/
OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS
Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)
Facsimile No.: 91 349 53 04

Authorized officer
M. Castañón Chicharro

Telephone No. 91 3493261

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/ES2012/000182

Information on patent family members

Patent document cited in the search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
JP2009114853 A	28.05.2009	JP4805366B2 B	02.11.2011
-----	-----	-----	-----
DE3515498 C	05.06.1986	NONE	
-----	-----	-----	-----
FR2437466 AB	25.04.1980	DE2825174 AC AT371178 B ATA414179 A	10.04.1980 10.06.1983 15.10.1982
-----	-----	-----	-----
US4259759 A	07.04.1981	DE2905795 AC JP54109217 A JP60007085 B JP1281449 C FR2417590 AB JP55013310 A JP60000483 B JP1275105 C JP55050119 U JP57012018Y2	23.08.1979 27.08.1979 22.02.1985 13.09.1985 14.09.1979 30.01.1980 08.01.1985 31.07.1985 02.04.1980 10.03.1982
-----	-----	-----	-----

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº

PCT/ES2012/000182

A. CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD

E01D21/00 (2006.01)

E01D21/06 (2006.01)

De acuerdo con la Clasificación Internacional de Patentes (CIP) o según la clasificación nacional y CIP.

B. SECTORES COMPRENDIDOS POR LA BÚSQUEDA

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

E01D

Otra documentación consultada, además de la documentación mínima, en la medida en que tales documentos formen parte de los sectores comprendidos por la búsqueda

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda internacional (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

EPODOC, INVENES

C. DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES

Categoría*	Documentos citados, con indicación, si procede, de las partes relevantes	Relevante para las reivindicaciones nº
A	JP 2009114853 A (OKKUSU JACK KK) 28/05/2009, figuras & Resumen de la base de datos WPI. Recuperado de EPOQUE; AN 2009-J68045.	1-13
A	DE 3515498 C1 (DYCKERHOFF & WIDMANN AG) 05/06/1986, figuras & Resumen de la base de datos WPI. Recuperado de EPOQUE; AN 1986-145112.	1-13
A	FR 2437466 A1 (MUELLER J G BAUGES) 25/04/1980, figuras & Resumen de la base de datos WPI. Recuperado de EPOQUE; AN 1980-D4357C.	1-13
A	US 4259759 A (TADA HIROSHI) 07/04/1981, figuras & Resumen de la base de datos WPI. Recuperado de EPOQUE; AN 1979-H3914B.	1-13

En la continuación del recuadro C se relacionan otros documentos

Los documentos de familias de patentes se indican en el anexo

* Categorías especiales de documentos citados:

"A" documento que define el estado general de la técnica no considerado como particularmente relevante.

"E" solicitud de patente o patente anterior pero publicada en la fecha de presentación internacional o en fecha posterior.

"L" documento que puede plantear dudas sobre una reivindicación de prioridad o que se cita para determinar la fecha de publicación de otra cita o por una razón especial (como la indicada).

"O" documento que se refiere a una divulgación oral, a una utilización, a una exposición o a cualquier otro medio.

"P" documento publicado antes de la fecha de presentación internacional pero con posterioridad a la fecha de prioridad reivindicada.

"T" documento ulterior publicado con posterioridad a la fecha de presentación internacional o de prioridad que no pertenece al estado de la técnica pertinente pero que se cita por permitir la comprensión del principio o teoría que constituye la base de la invención.

"X" documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse nueva o que implique una actividad inventiva por referencia al documento aisladamente considerado.

"Y" documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse que implique una actividad inventiva cuando el documento se asocia a otro u otros documentos de la misma naturaleza, cuya combinación resulta evidente para un experto en la materia.

"&" documento que forma parte de la misma familia de patentes.

Fecha en que se ha concluido efectivamente la búsqueda internacional.
16/10/2012

Fecha de expedición del informe de búsqueda internacional.
22 de octubre de 2012 (22/10/2012)

Nombre y dirección postal de la Administración encargada de la búsqueda internacional

OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)

Nº de fax: 91 349 53 04

Funcionario autorizado

M. Castañón Chicharro

Nº de teléfono 91 3493261

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº

Informaciones relativas a los miembros de familias de patentes

PCT/ES2012/000182

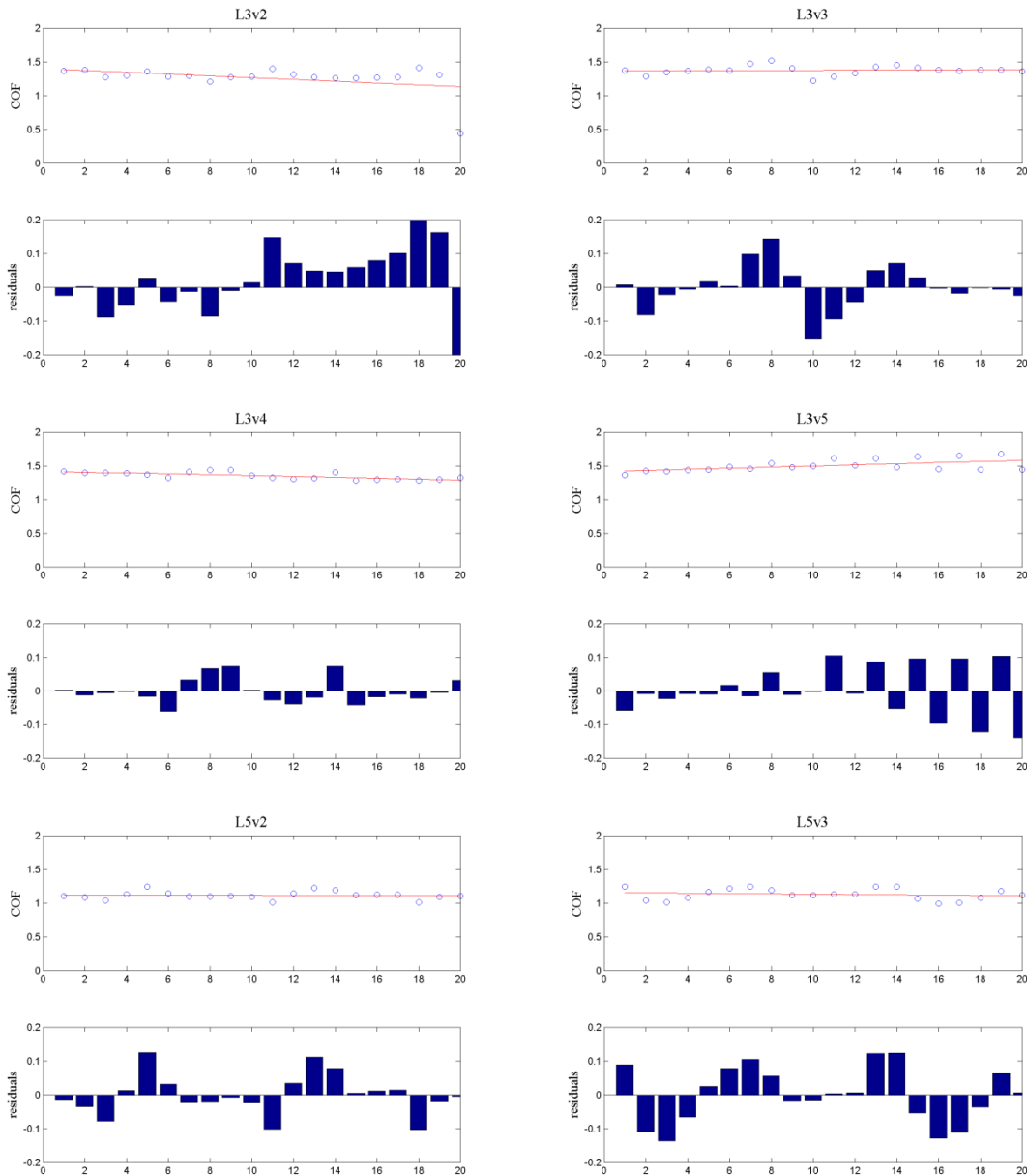
Documento de patente citado en el informe de búsqueda	Fecha de Publicación	Miembro(s) de la familia de patentes	Fecha de Publicación
JP2009114853 A	28.05.2009	JP4805366B2 B	02.11.2011
-----	-----	-----	-----
DE3515498 C	05.06.1986	NINGUNO	
-----	-----	-----	-----
FR2437466 AB	25.04.1980	DE2825174 AC AT371178 B ATA414179 A	10.04.1980 10.06.1983 15.10.1982
-----	-----	-----	-----
US4259759 A	07.04.1981	DE2905795 AC JP54109217 A JP60007085 B JP1281449 C FR2417590 AB JP55013310 A JP60000483 B JP1275105 C JP55050119 U JP57012018Y2	23.08.1979 27.08.1979 22.02.1985 13.09.1985 14.09.1979 30.01.1980 08.01.1985 31.07.1985 02.04.1980 10.03.1982
-----	-----	-----	-----

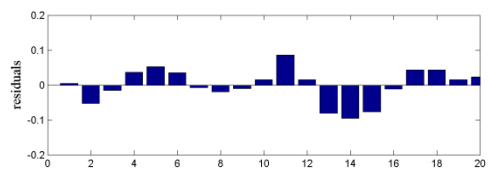
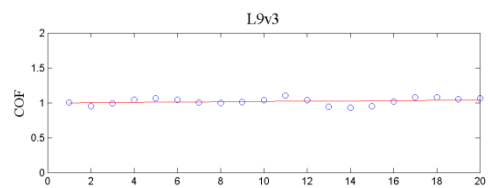
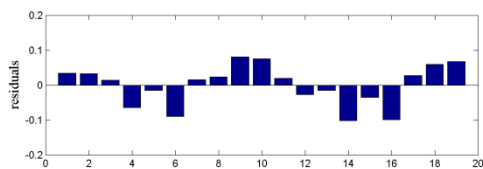
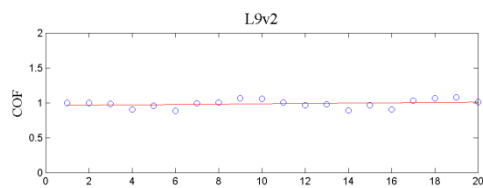
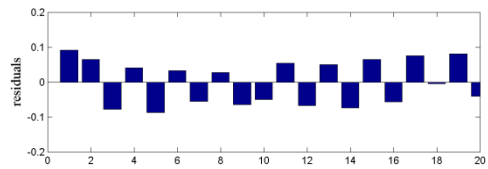
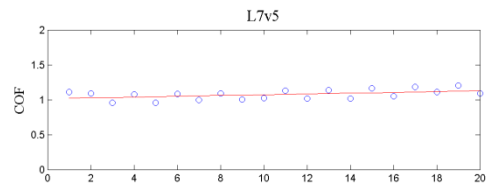
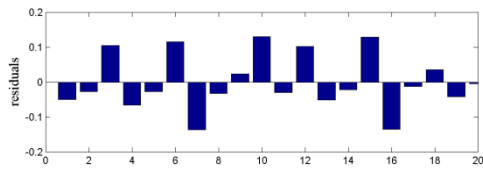
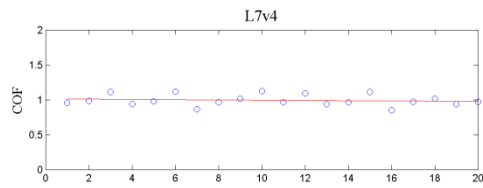
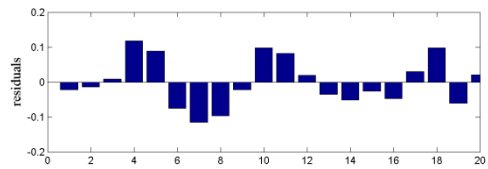
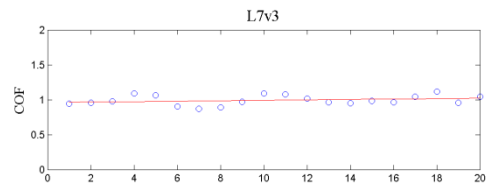
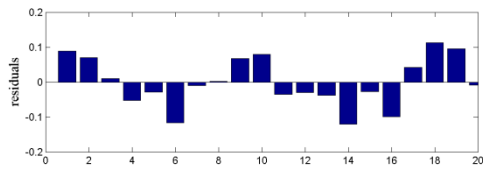
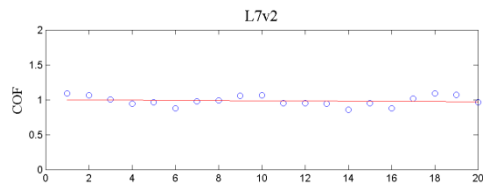
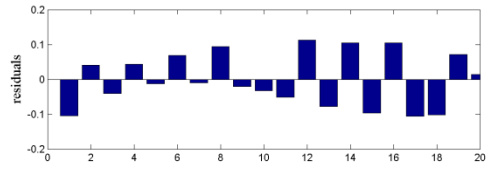
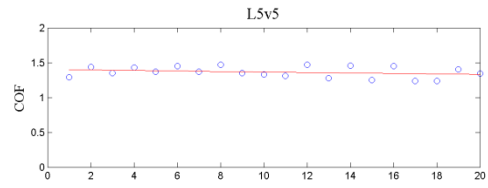
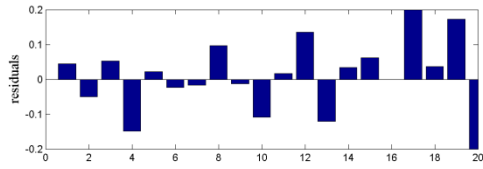
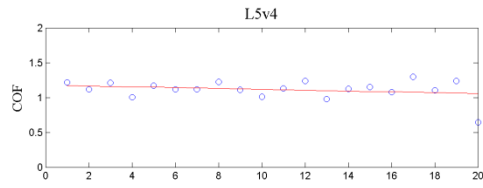
ANEXO III

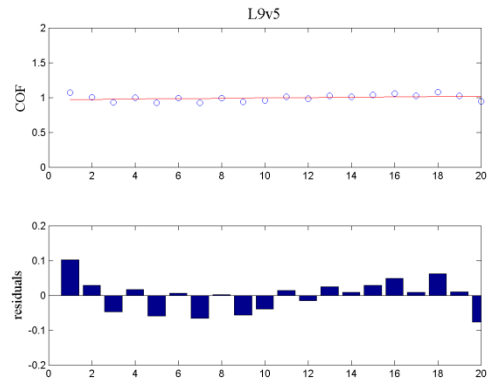
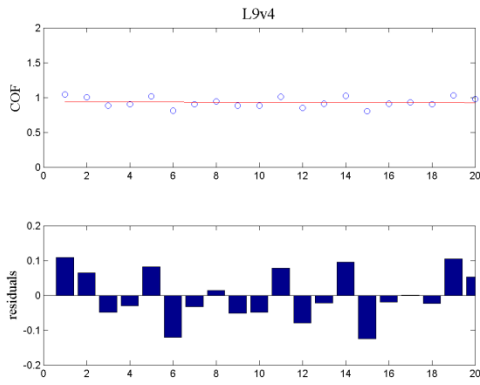
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FRICCIÓN
MEDIANTE LA TÉCNICA PIN-ON-DISC

1. Elastómero CR60

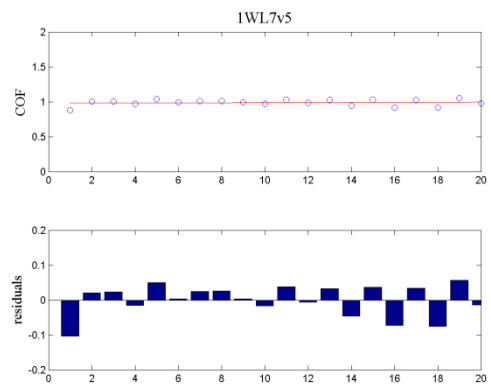
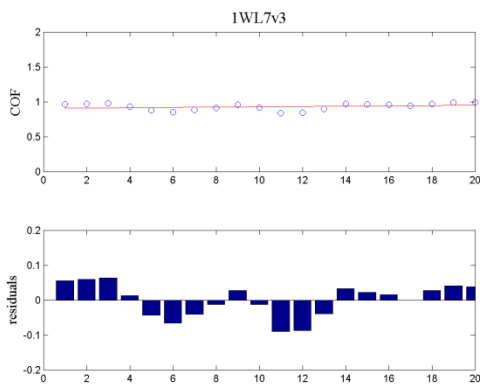
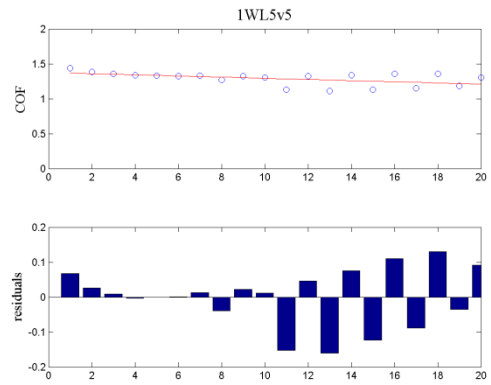
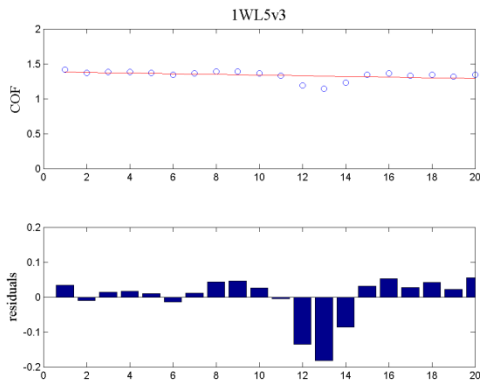
SOBRE DISCO 1



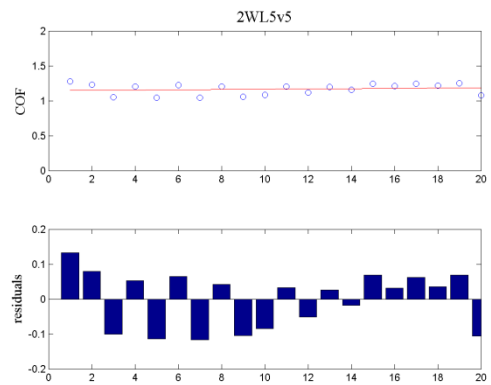
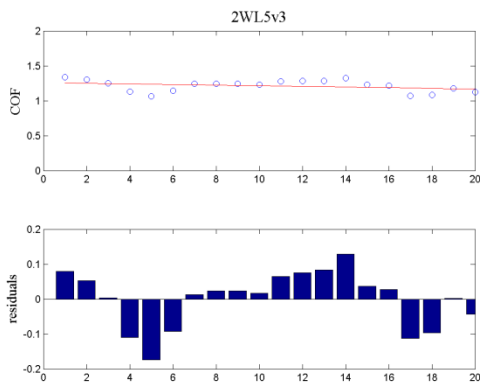


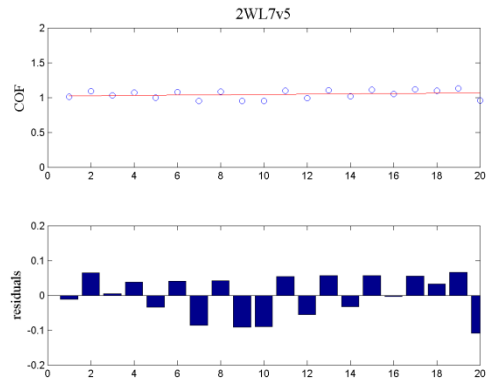
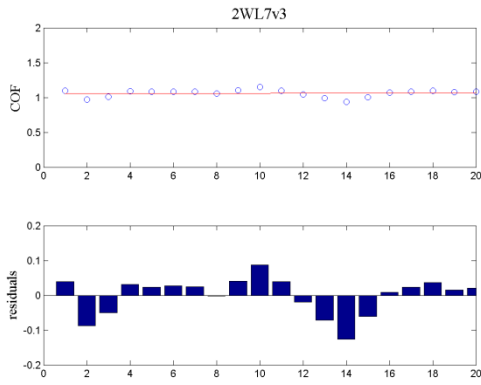


ENVEJECIDAS 1 SEMANA (1W)

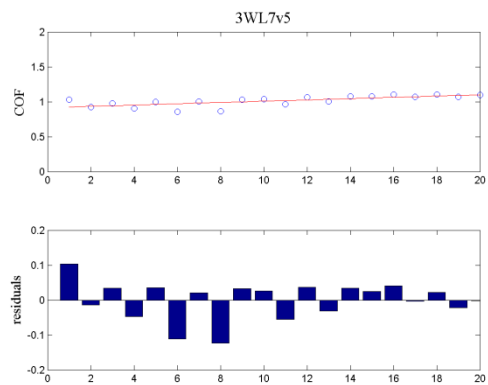
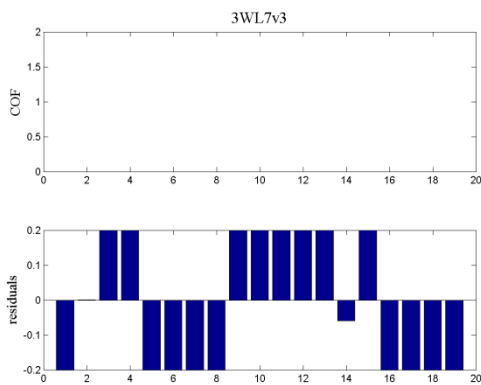
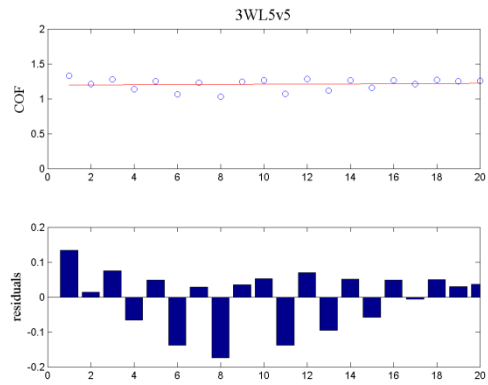
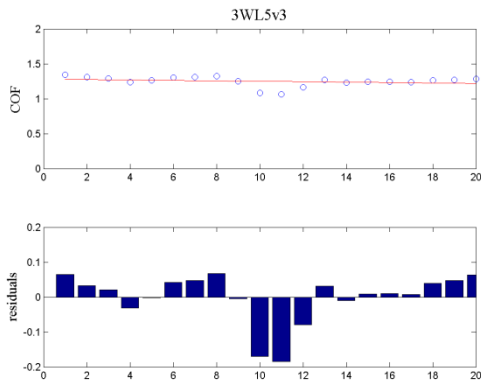


ENVEJECIDAS 2 SEMANAS (2W)

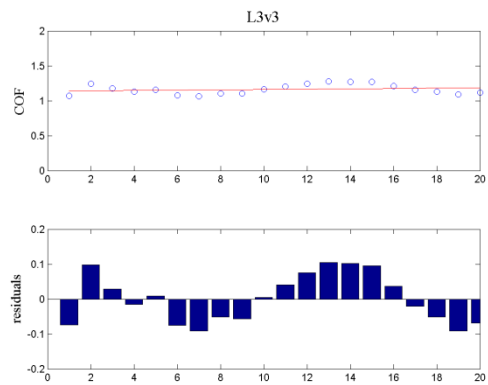
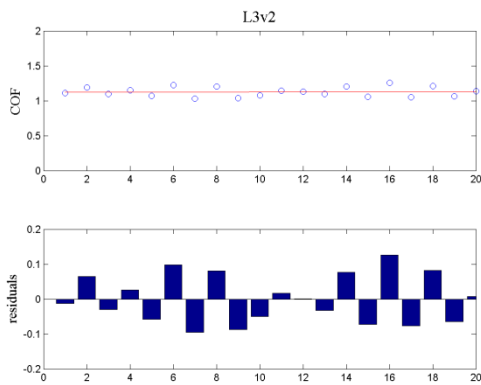


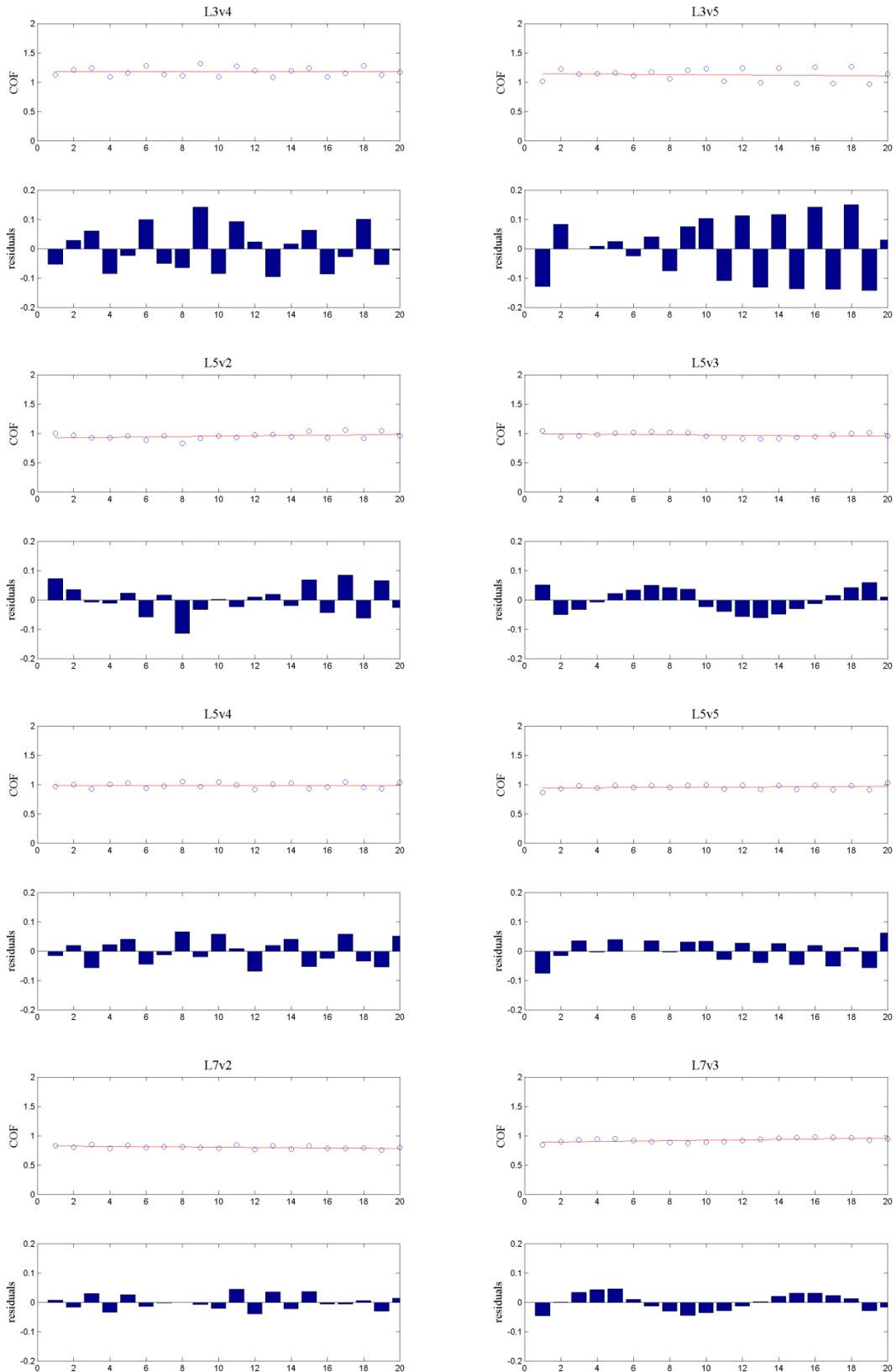


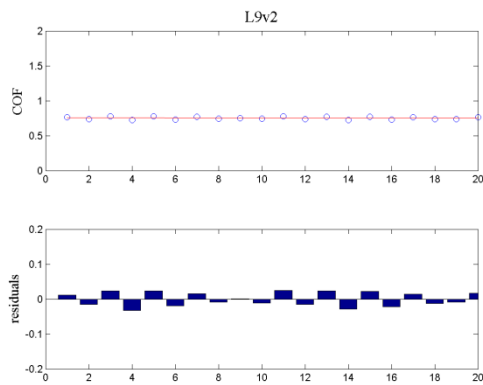
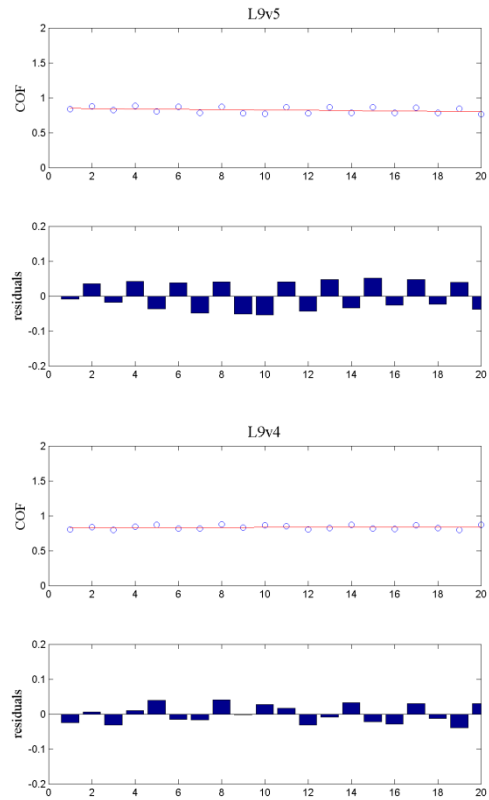
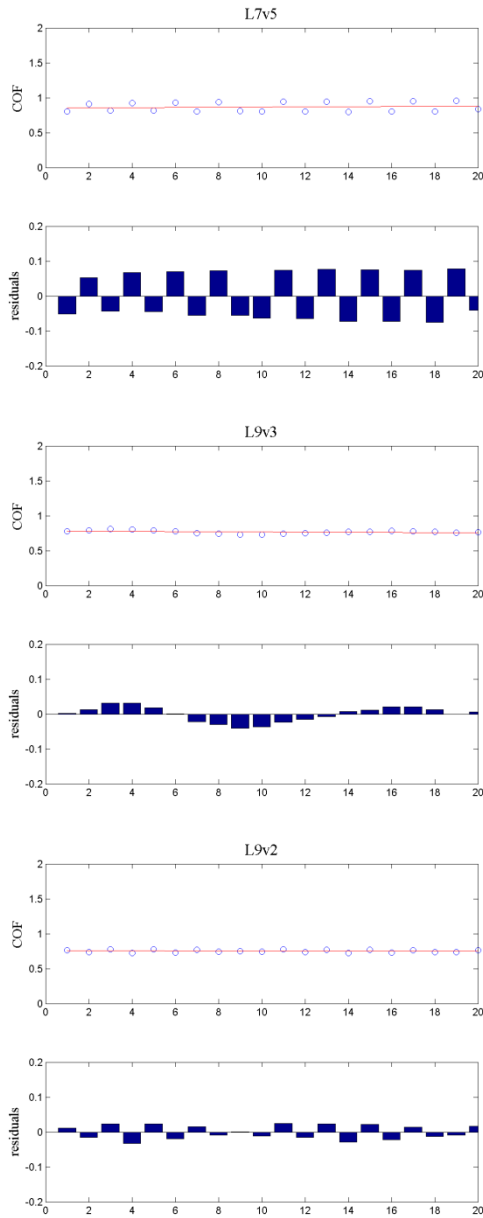
ENVEJECIDAS 3 SEMANAS (3W)



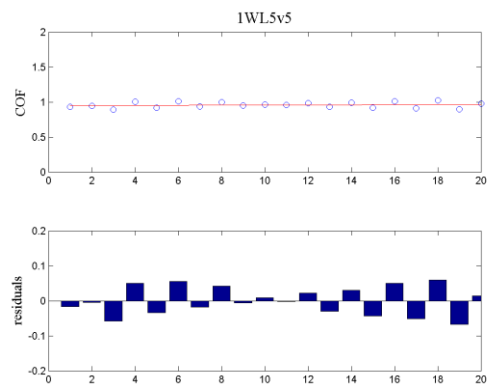
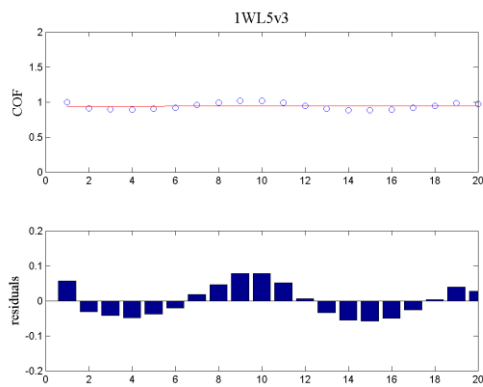
SOBRE DISCO 2

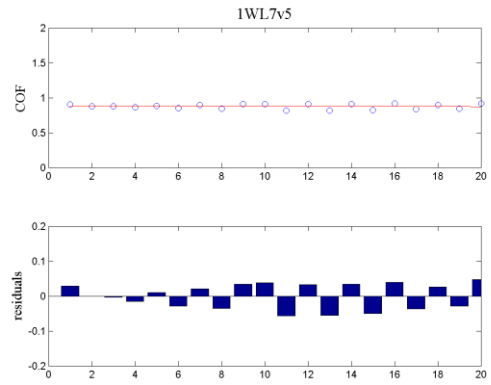
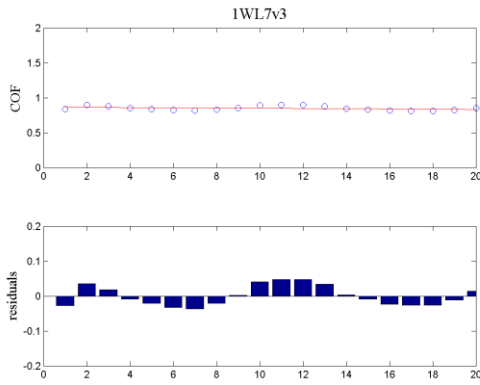




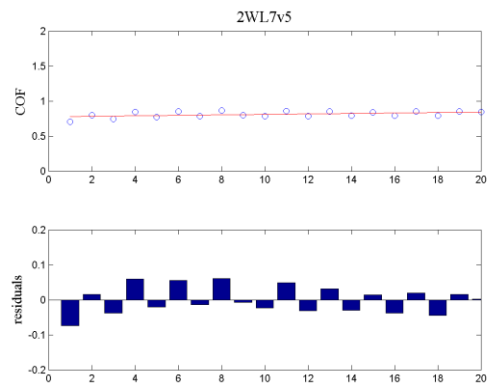
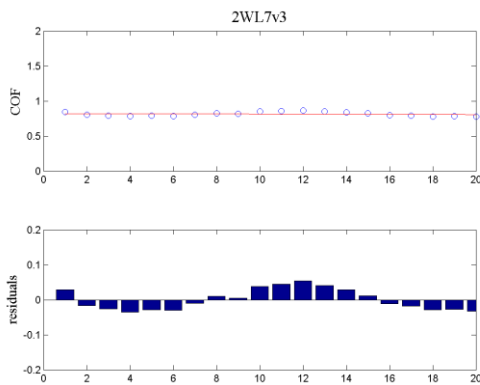
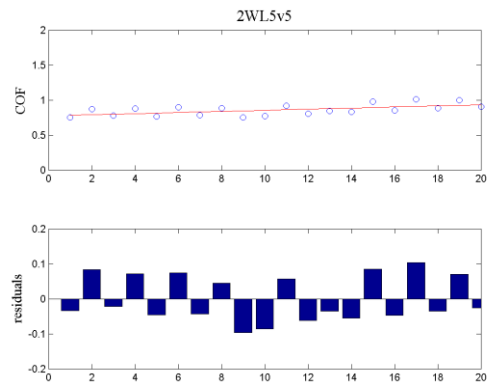
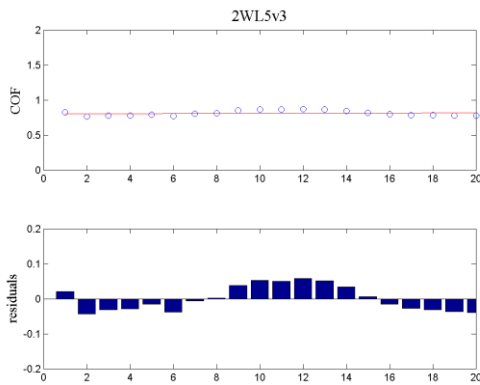


ENVEJECIDAS 1 SEMANA (1W)

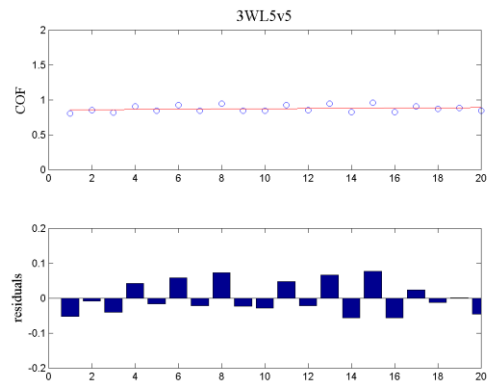
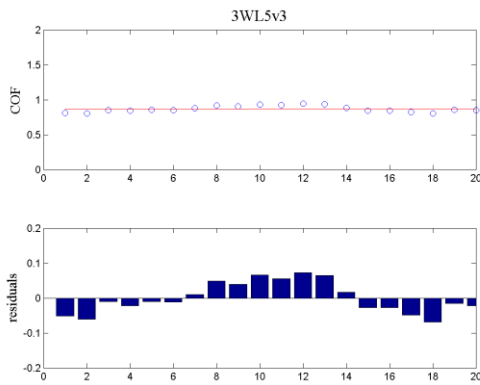


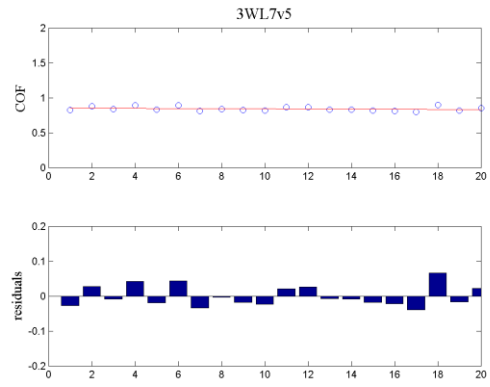
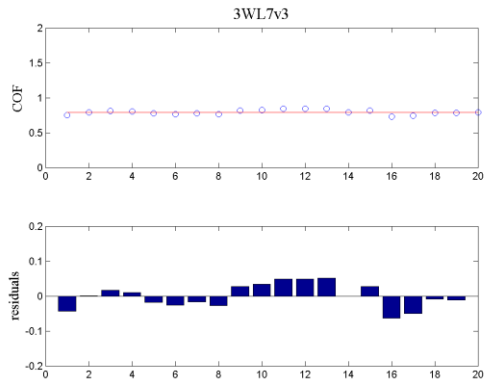


ENVEJECIDAS 2 SEMANAS (2W)



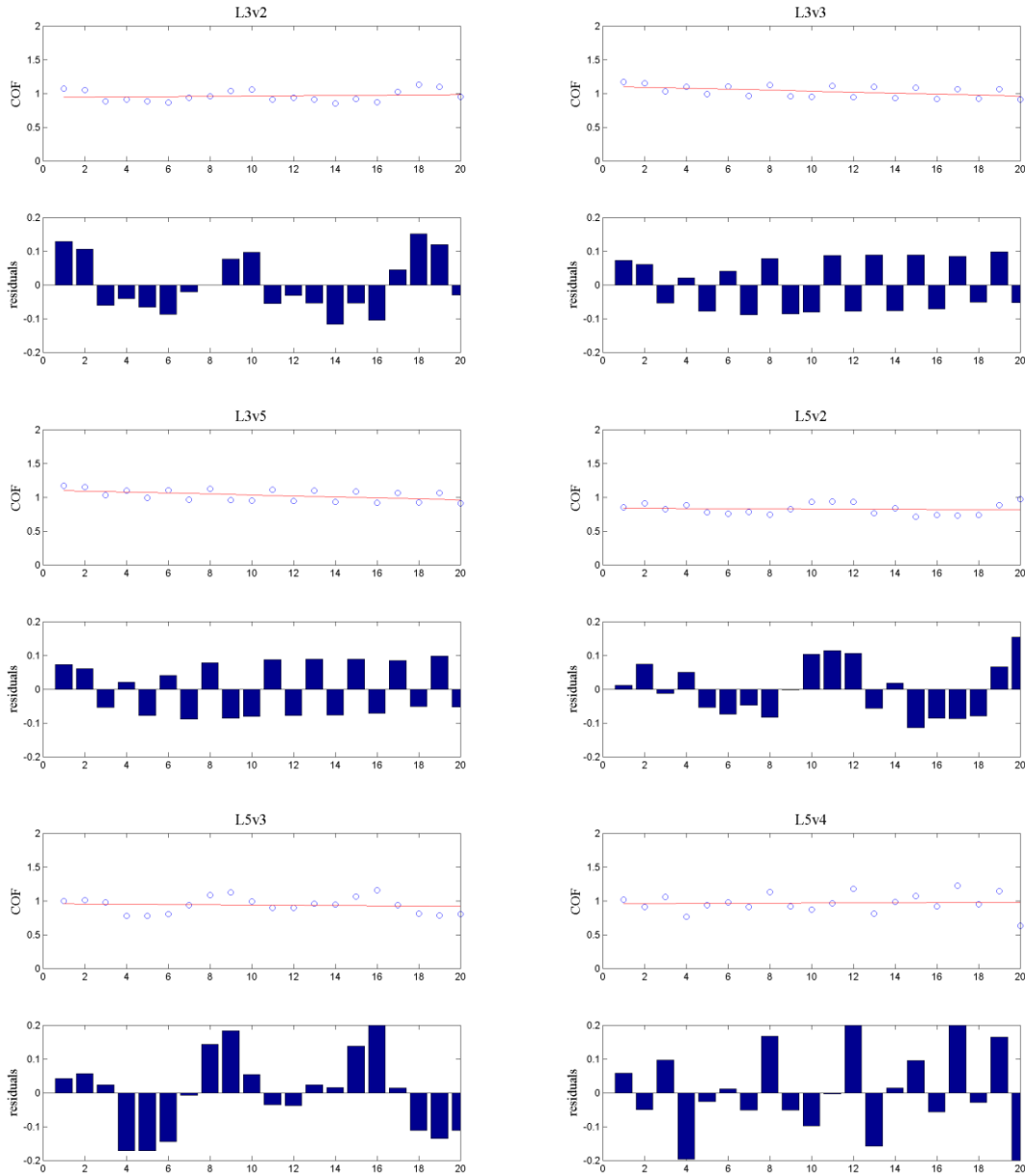
ENVEJECIDAS 3 SEMANAS (3W)

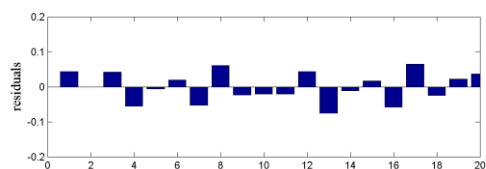
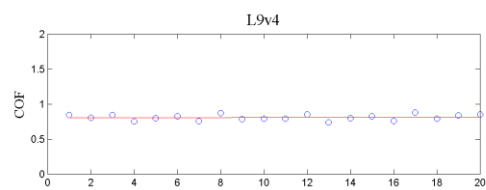
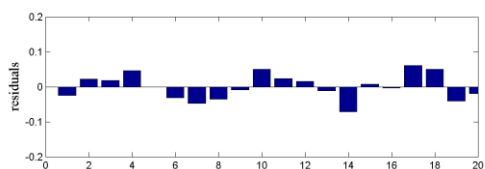
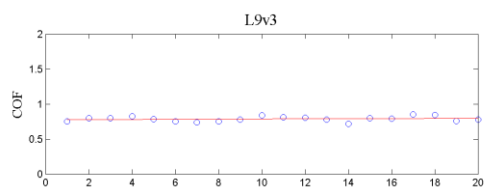
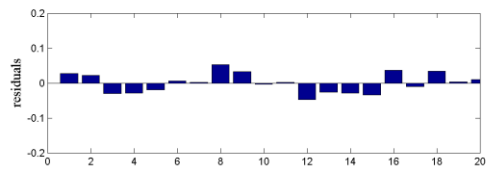
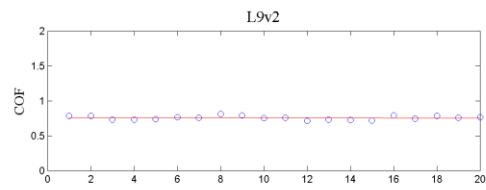
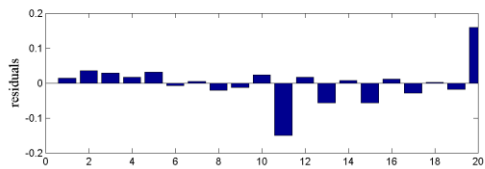
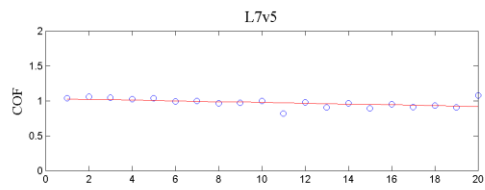
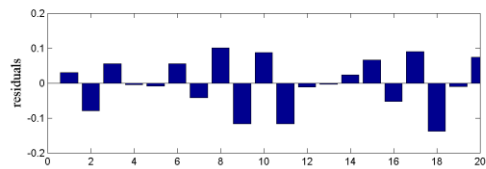
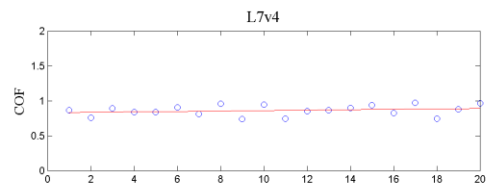
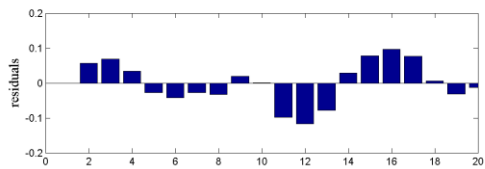
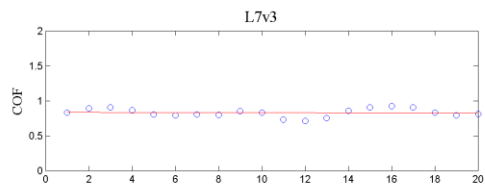
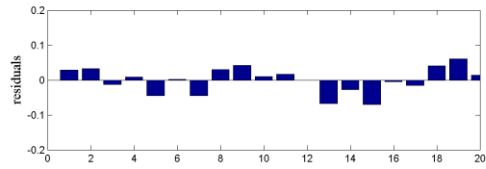
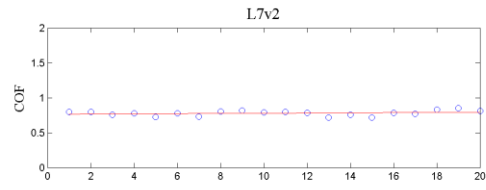
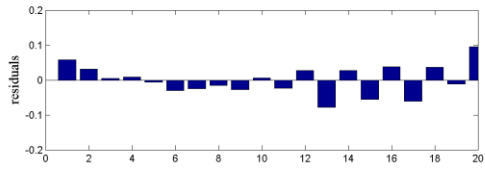
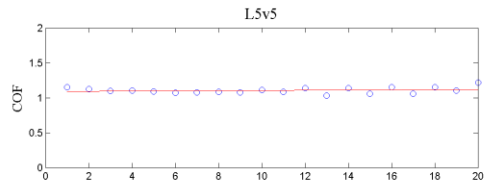


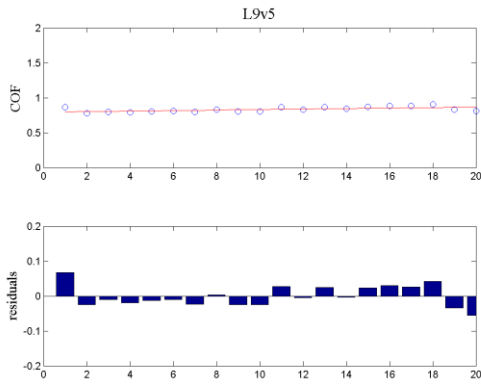


2. Elastómero CR45

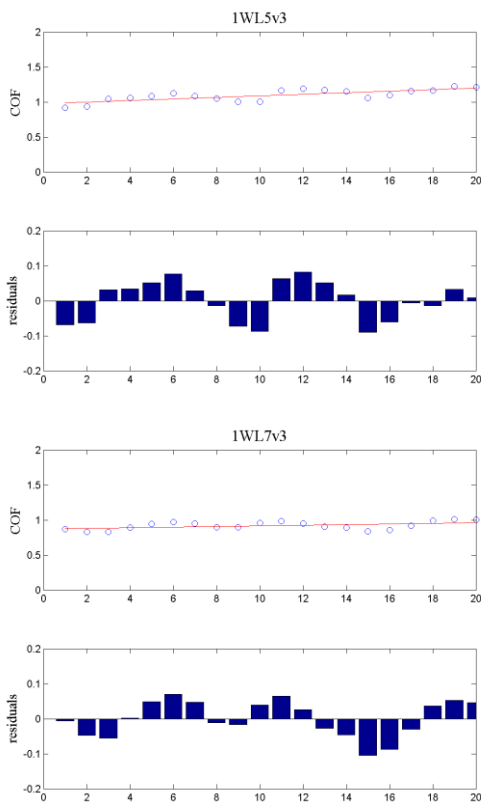
SOBRE DISCO 1



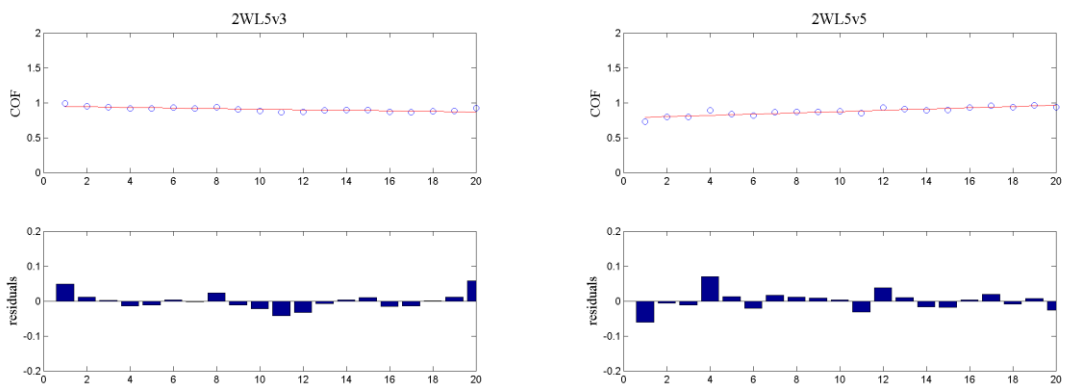


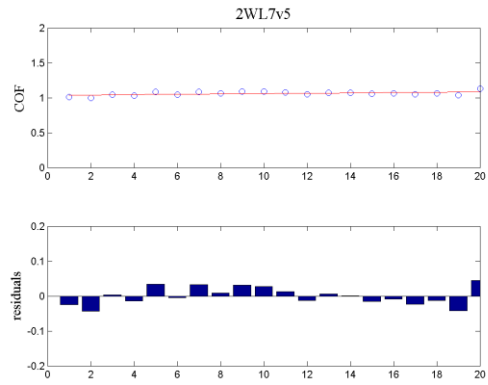
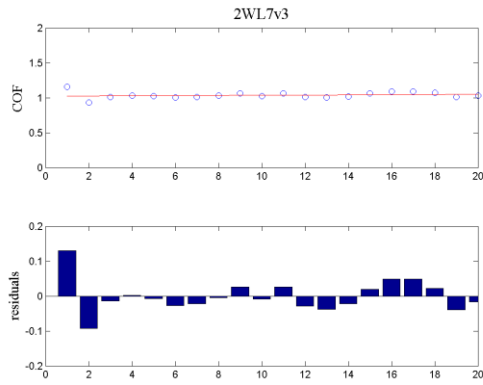


ENVEJECIDAS 1 SEMANA (1W)

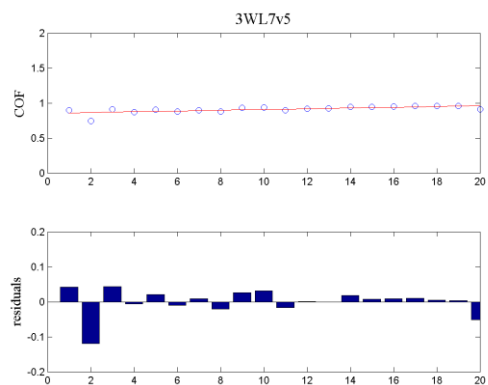
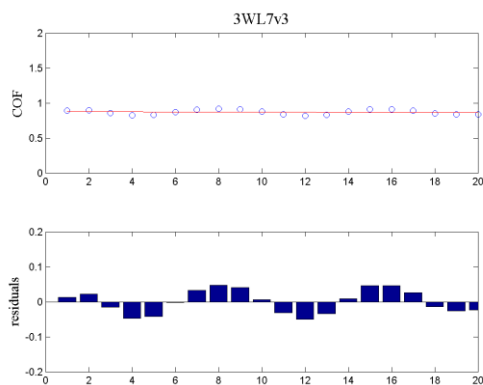
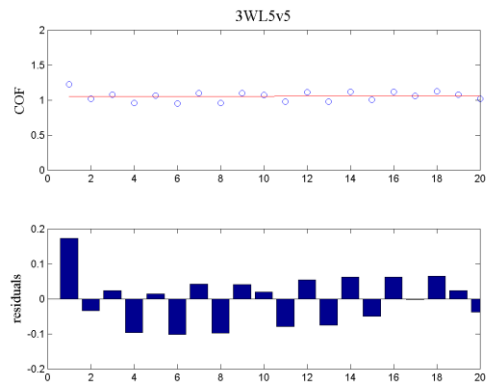
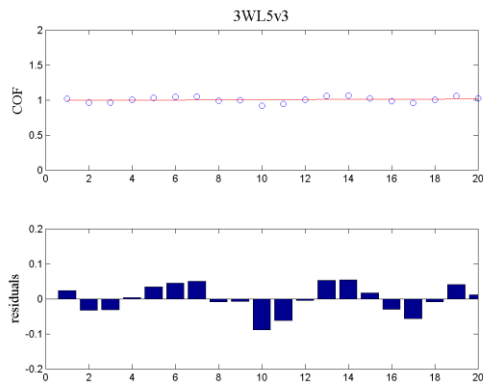


ENVEJECIDAS 2 SEMANAS (2W)

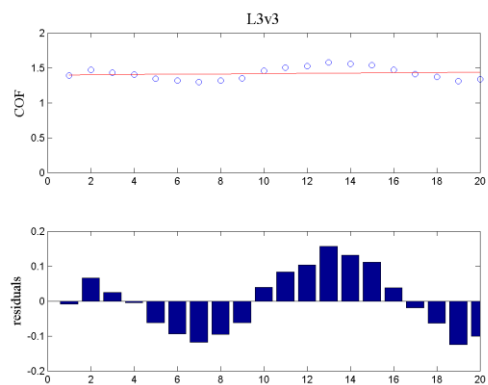
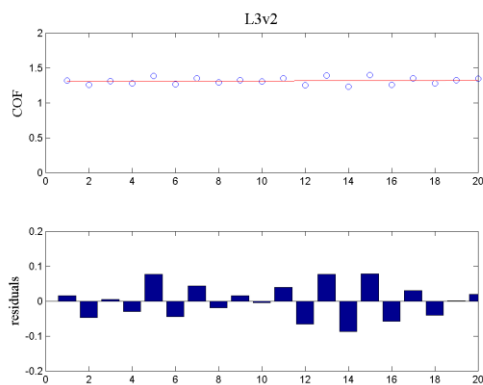


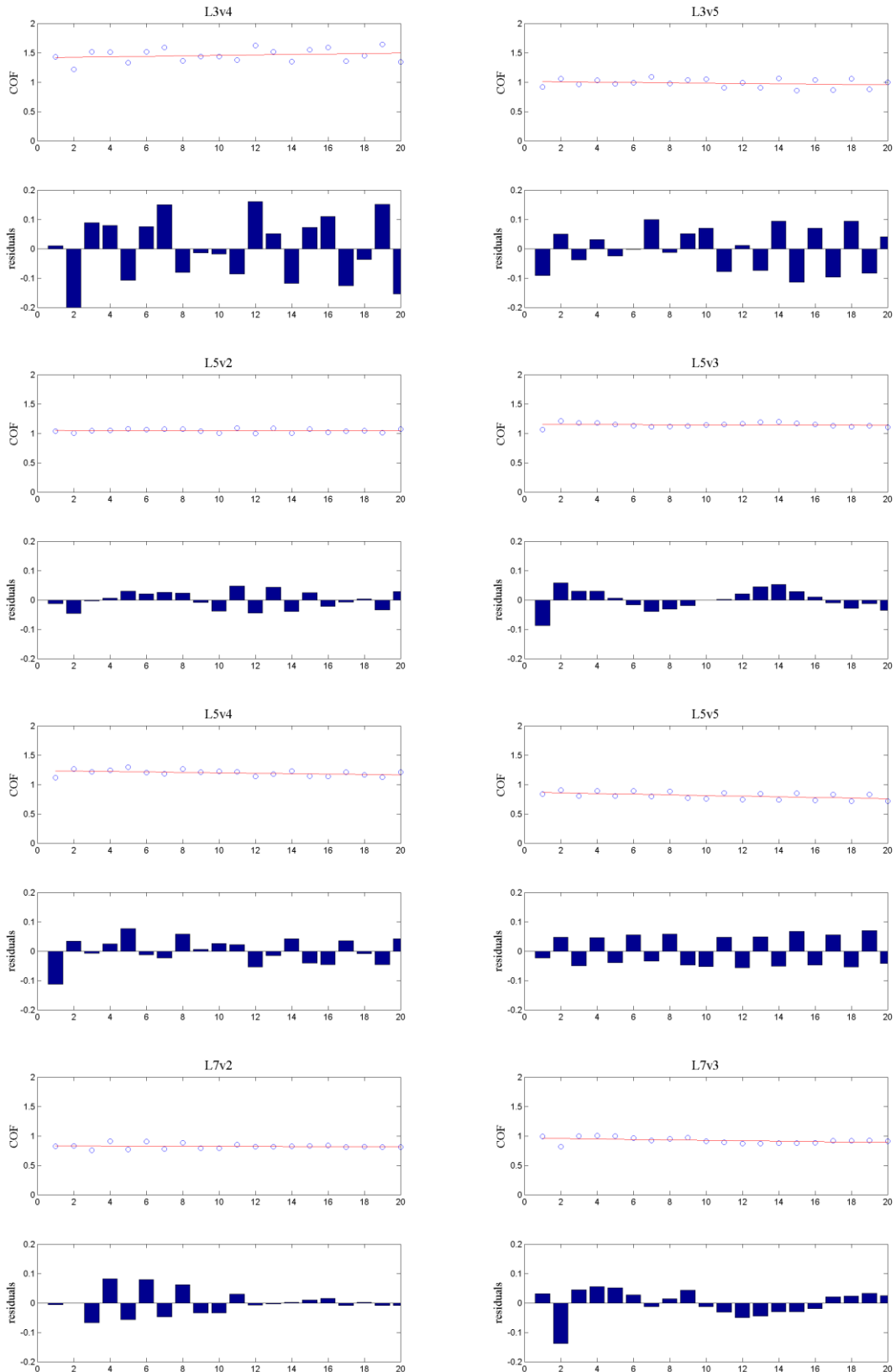


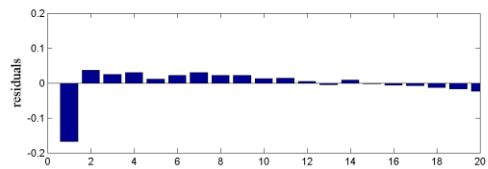
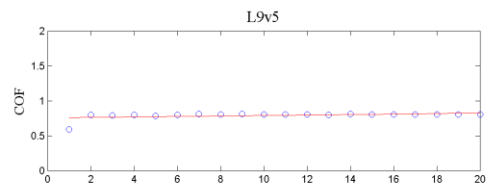
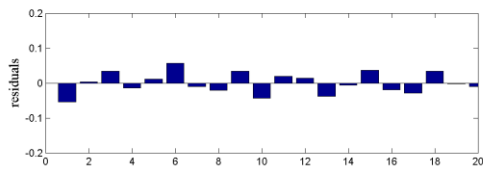
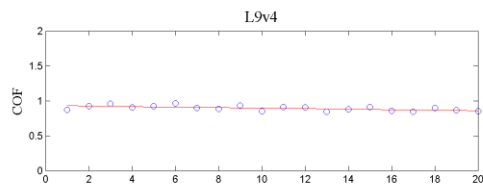
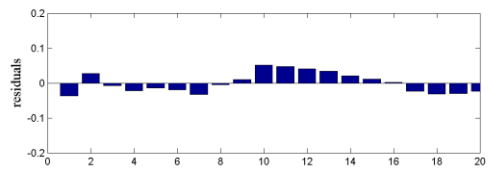
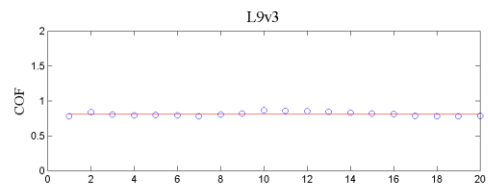
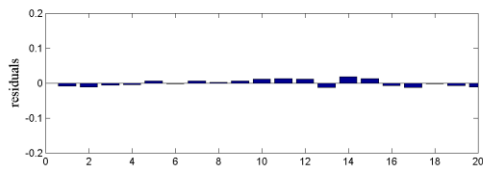
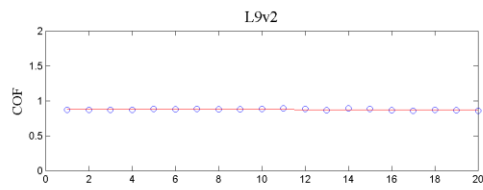
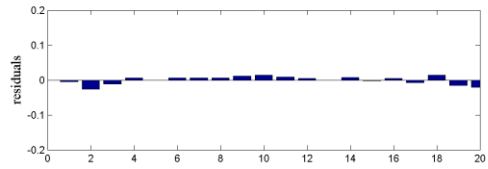
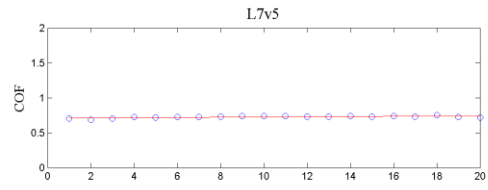
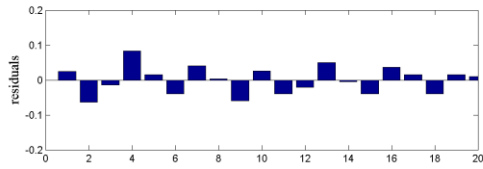
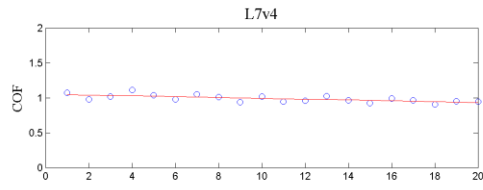
ENVEJECIDAS 3 SEMANAS (3W)



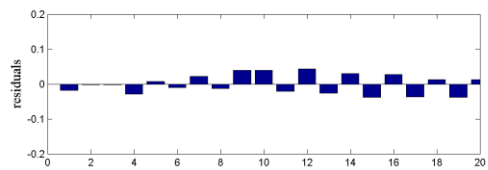
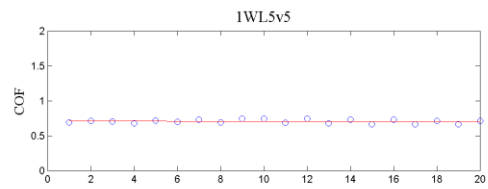
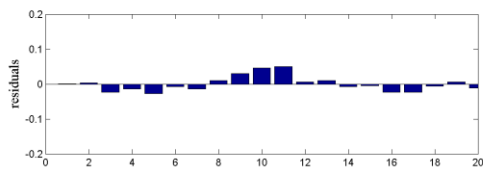
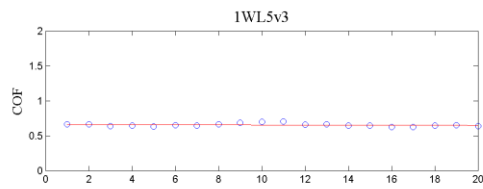
SOBRE DISCO 2

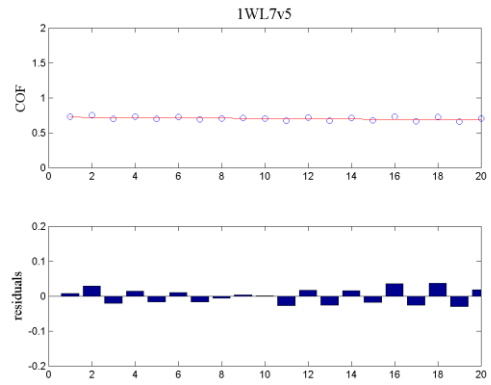
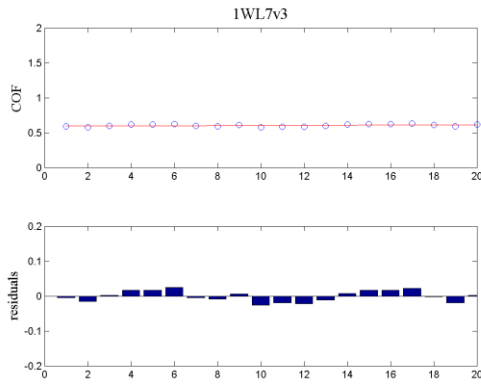




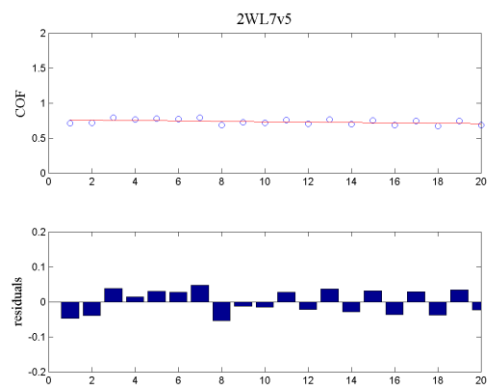
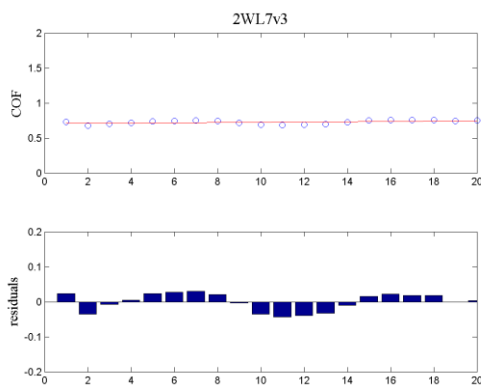
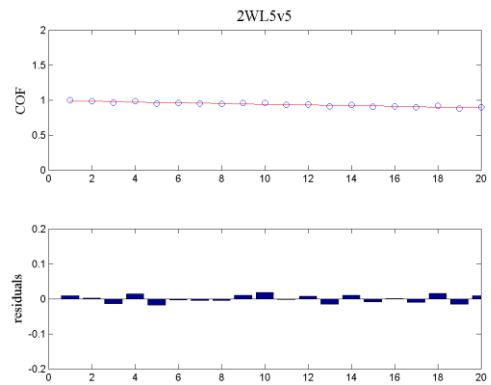
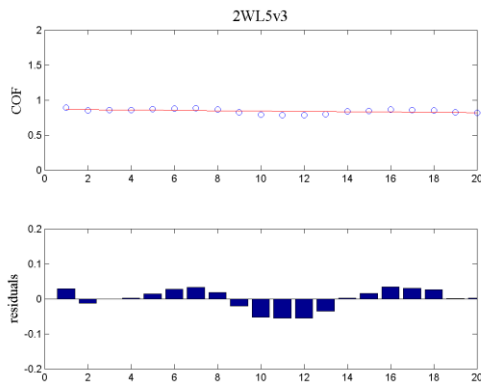


ENVEJECIDAS 1 SEMANA (1W)

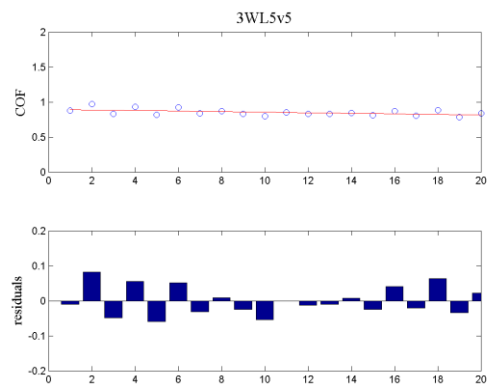
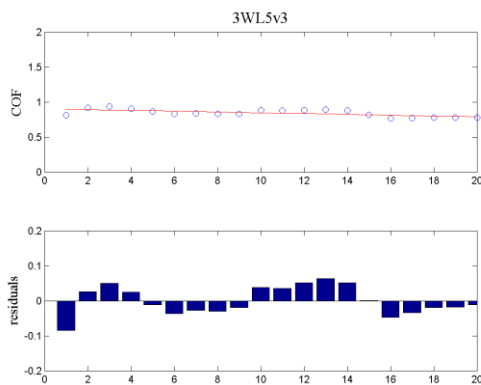


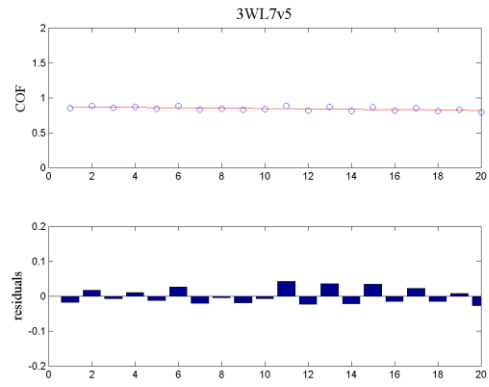
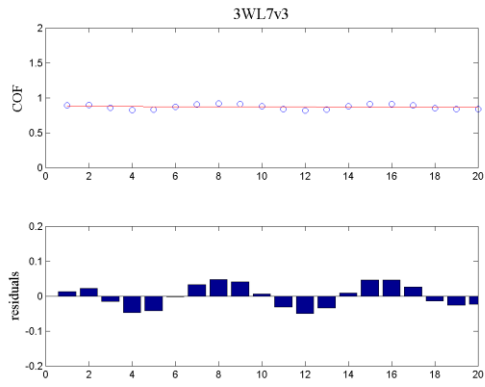


ENVEJECIDAS 2 SEMANAS (2W)



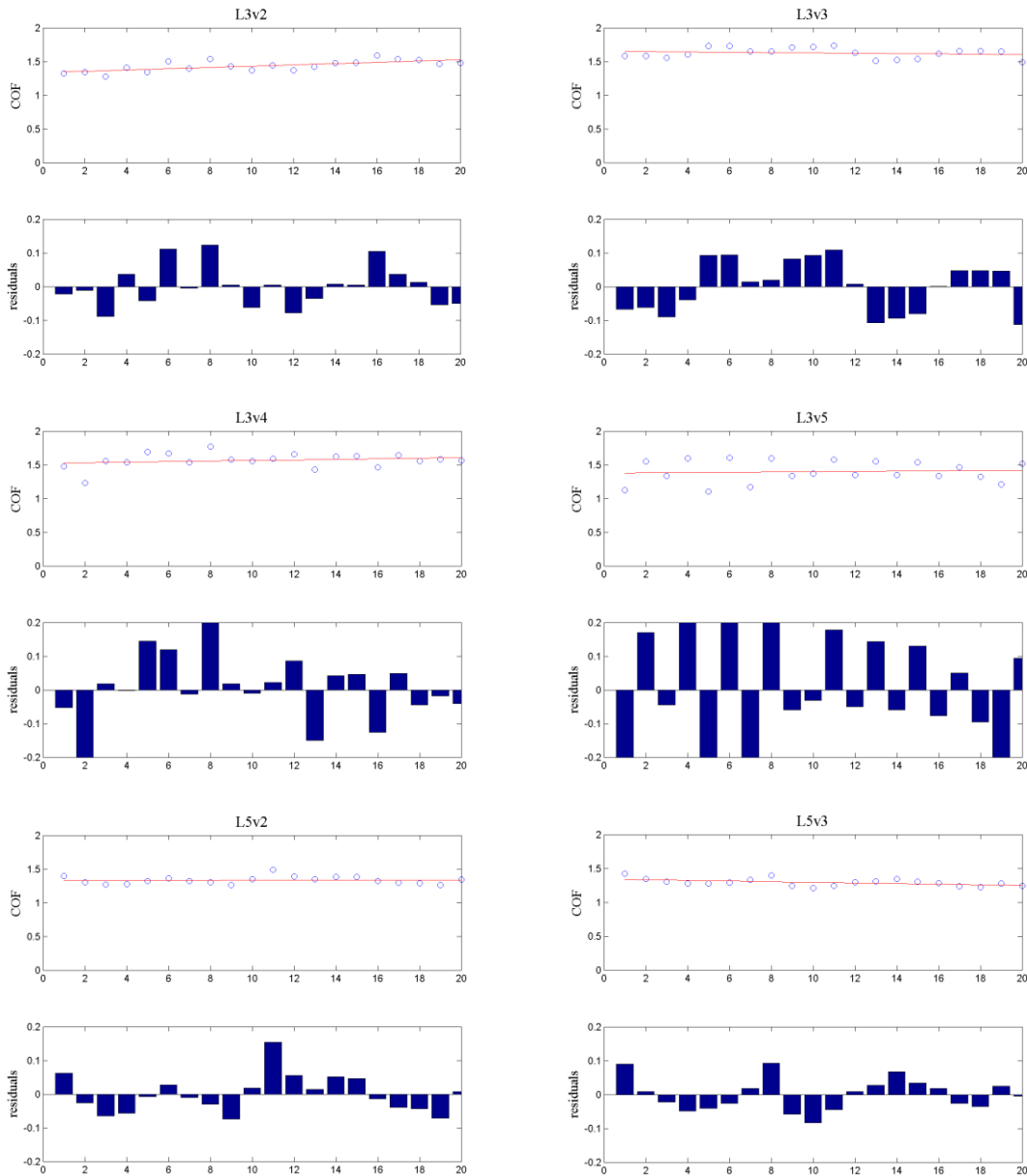
ENVEJECIDAS 3 SEMANAS (3W)

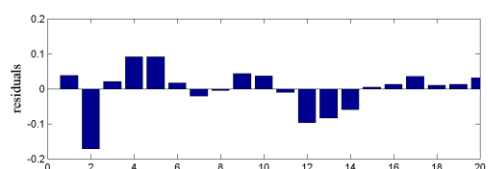
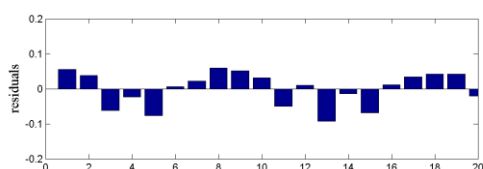
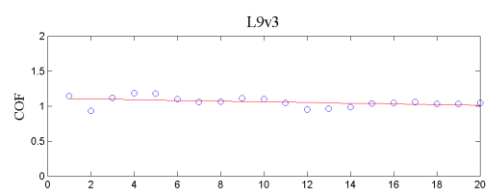
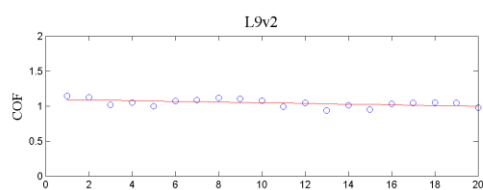
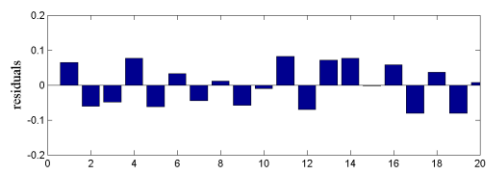
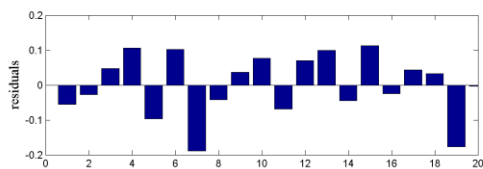
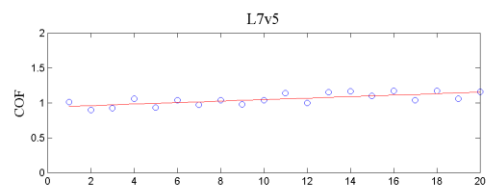
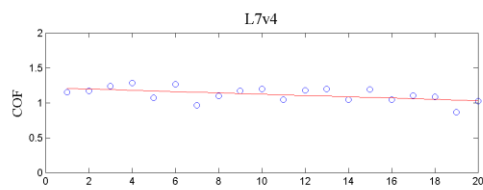
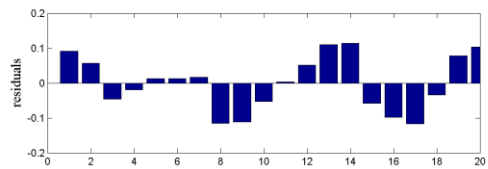
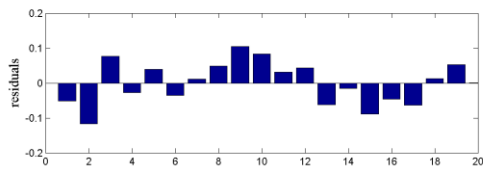
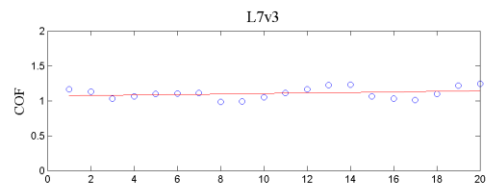
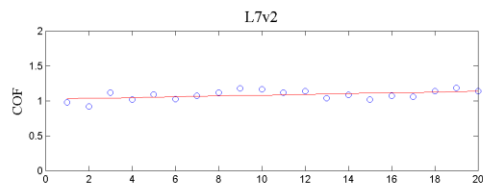
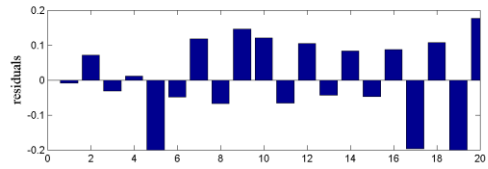
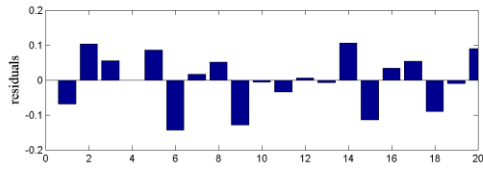
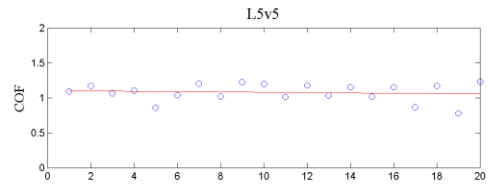
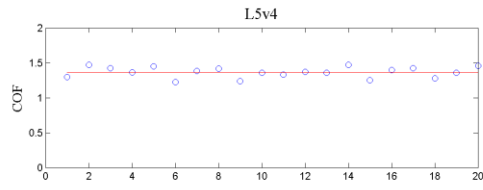


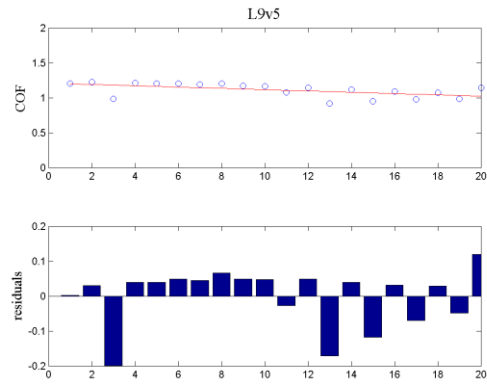
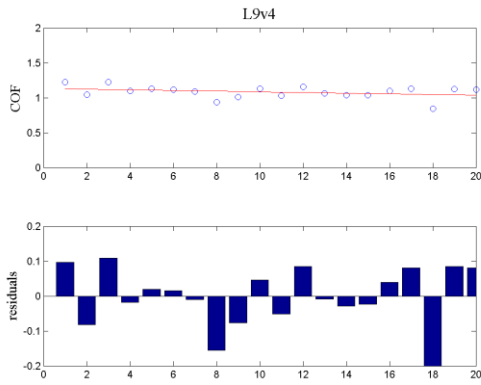


3. Elastómero NR60

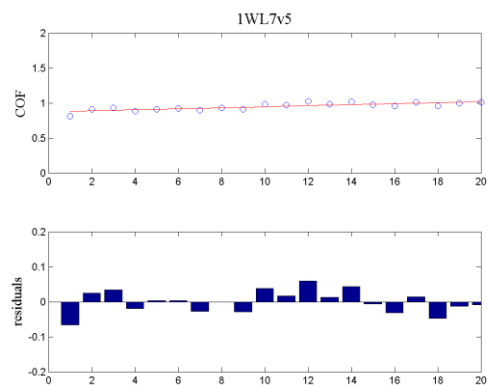
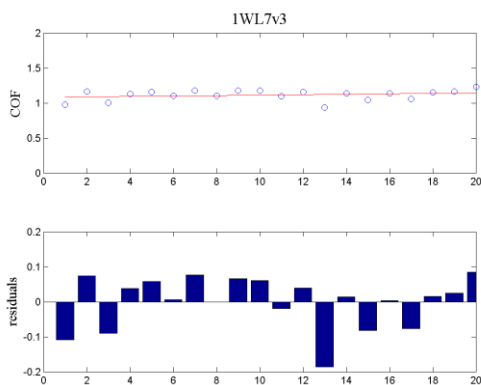
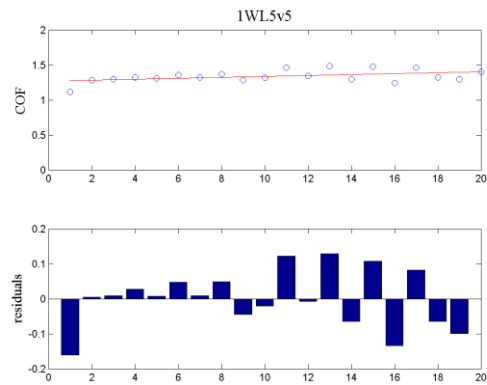
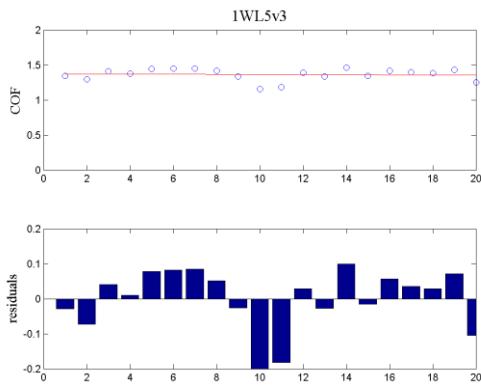
SOBRE DISCO 1



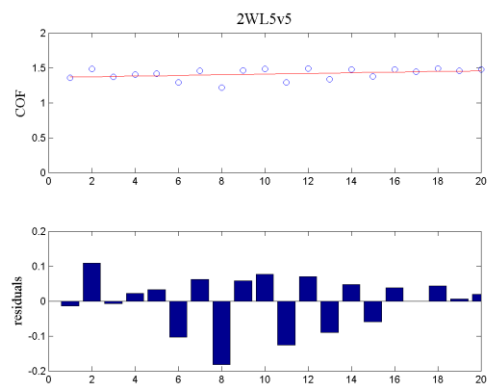
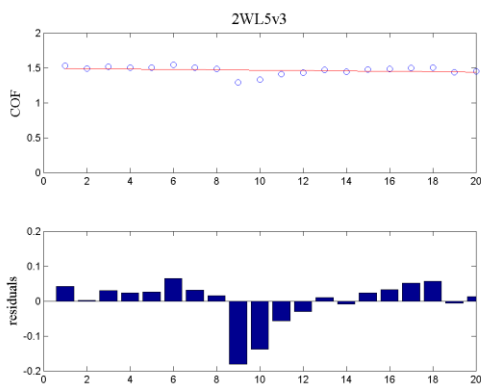


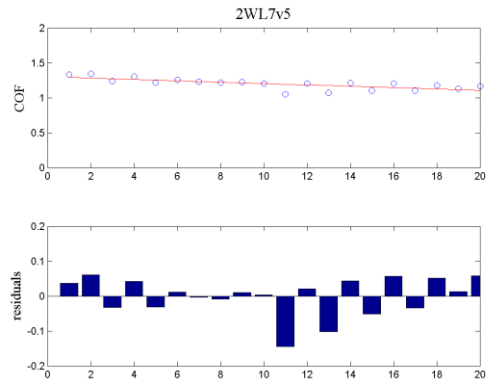
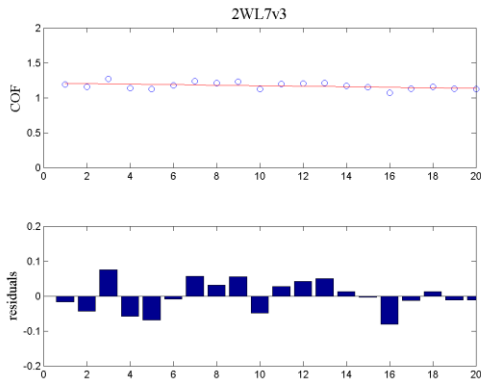


ENVEJECIDAS 1 SEMANA (1W)

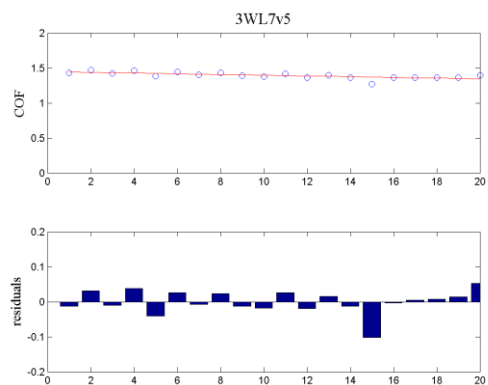
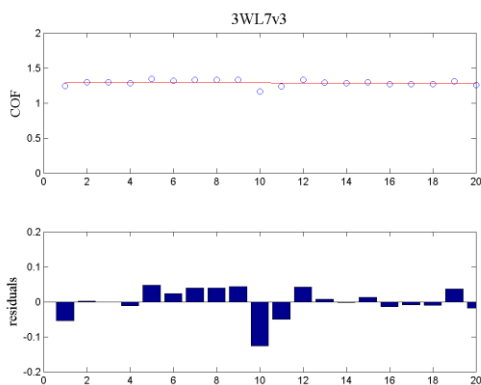
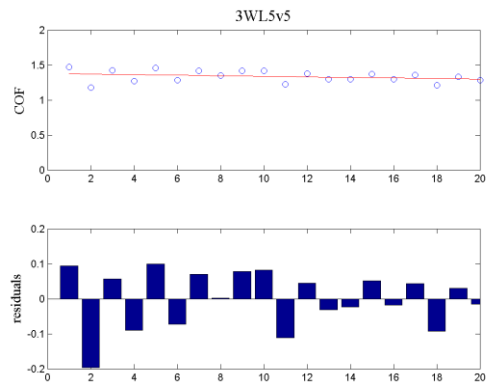
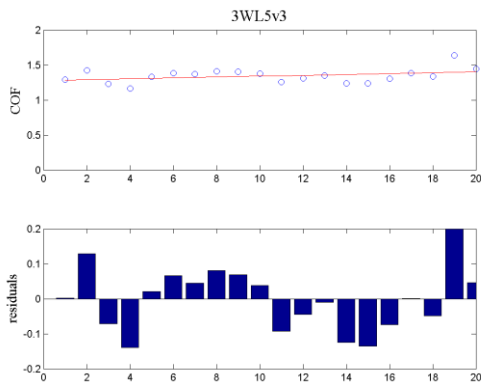


ENVEJECIDAS 2 SEMANAS (2W)

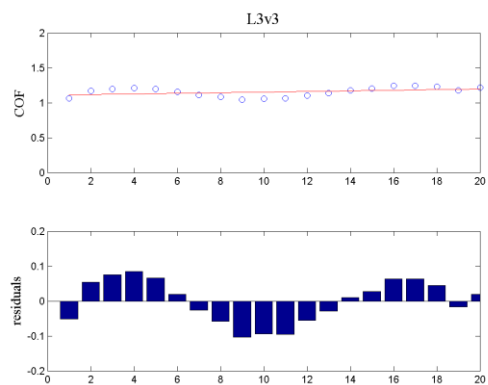
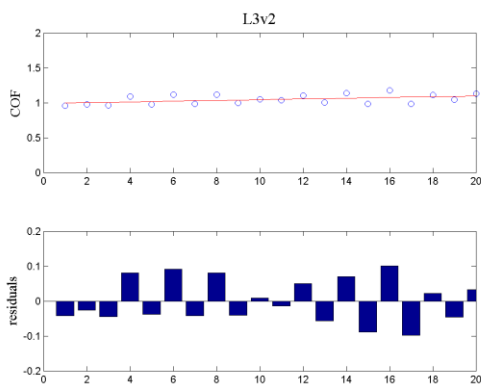


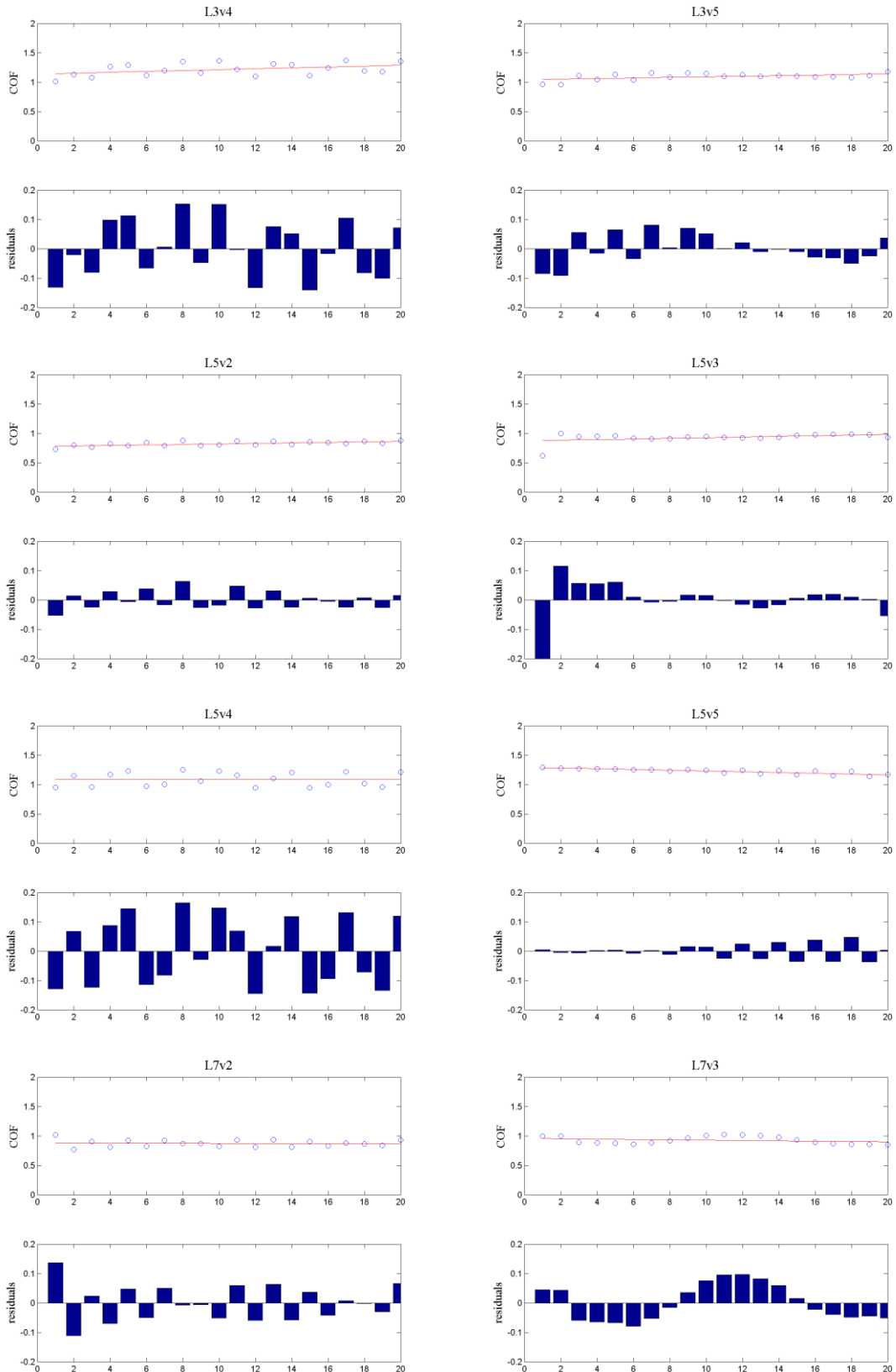


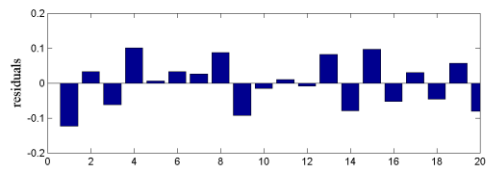
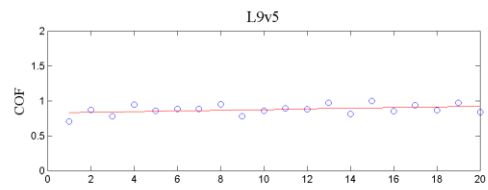
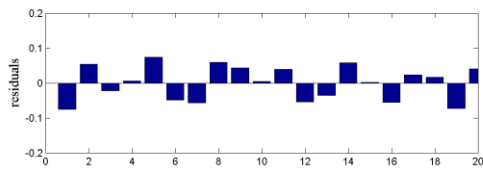
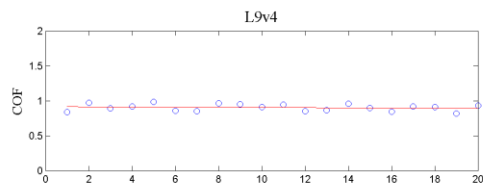
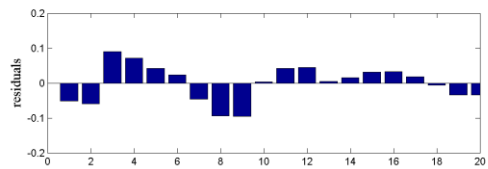
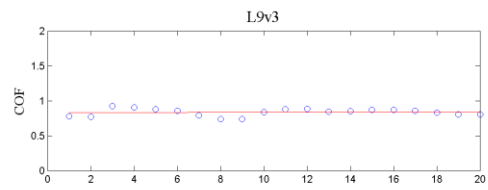
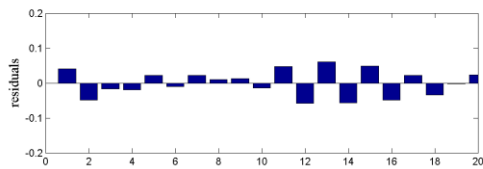
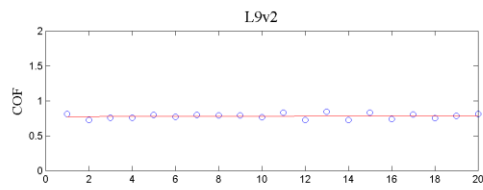
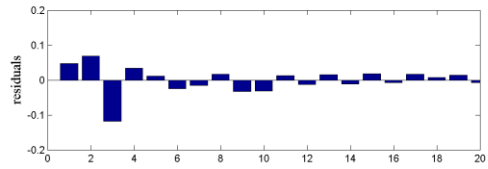
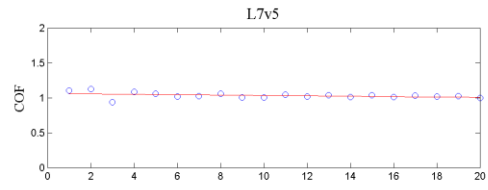
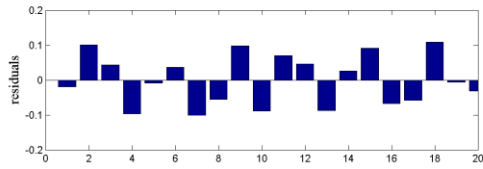
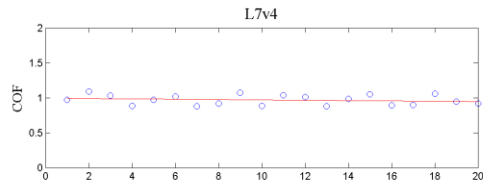
ENVEJECIDAS 3 SEMANAS (3W)



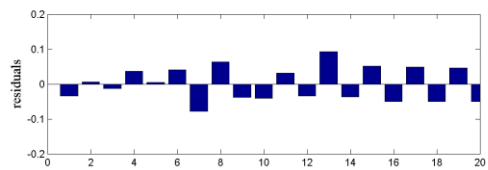
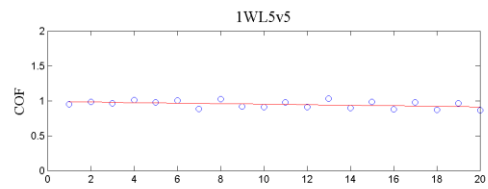
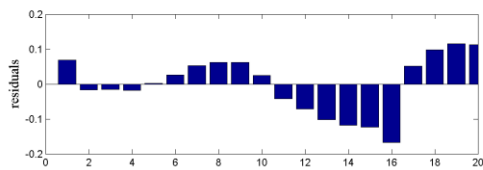
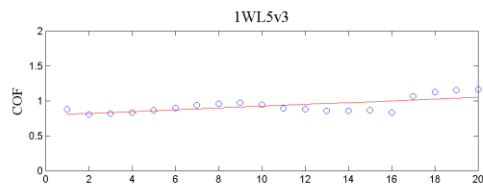
SOBRE DISCO 2

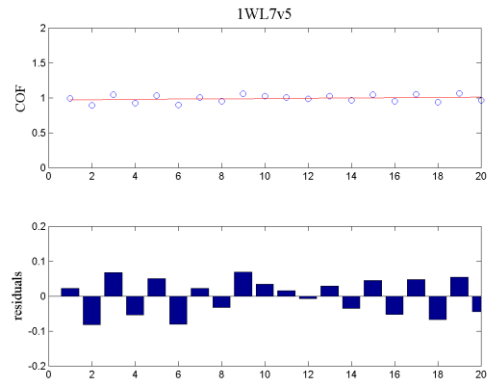
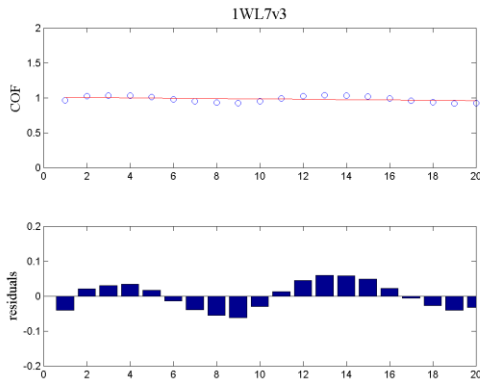




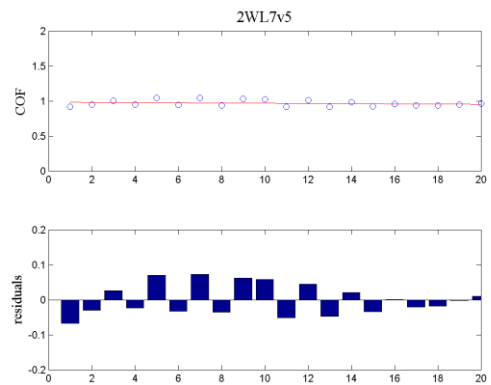
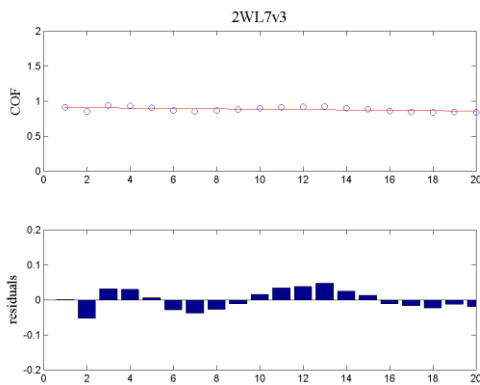
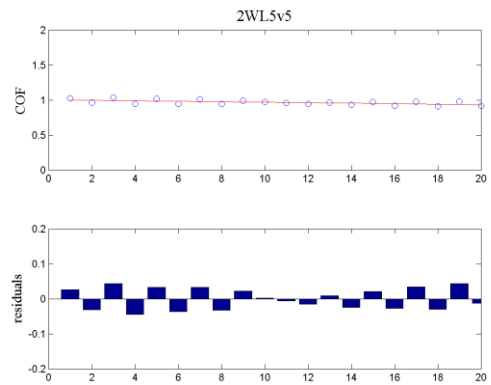
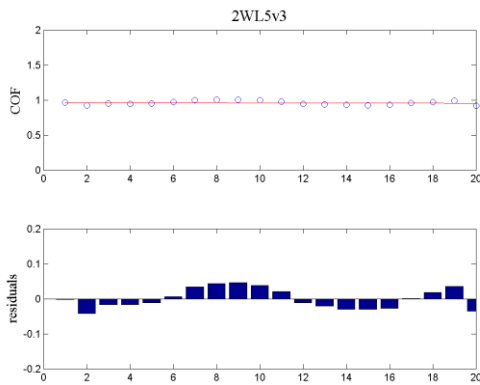


ENVEJECIDAS 1 SEMANA (1W)

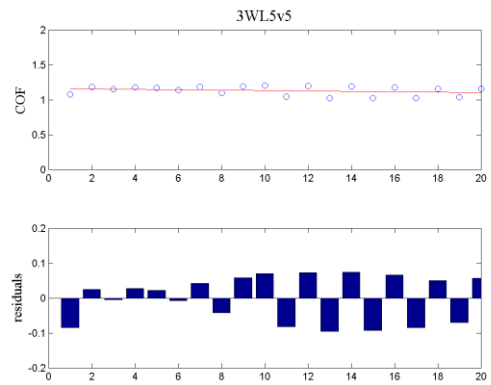
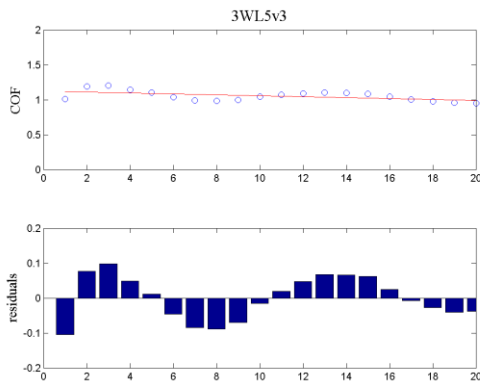


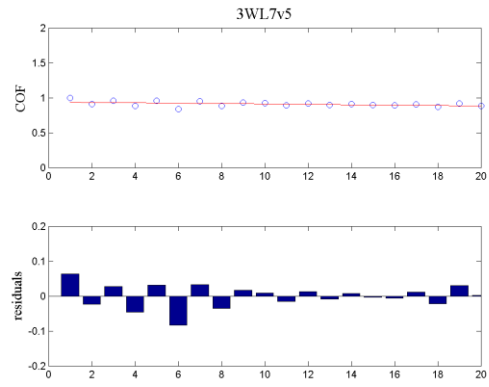
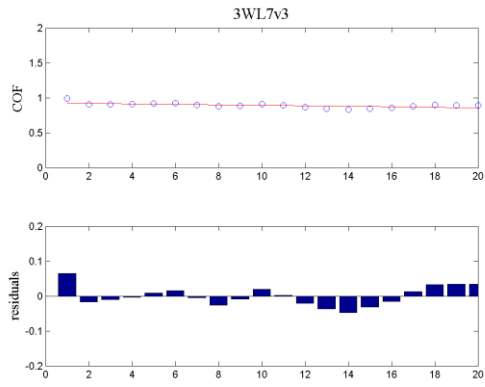


ENVEJECIDAS 2 SEMANAS (2W)



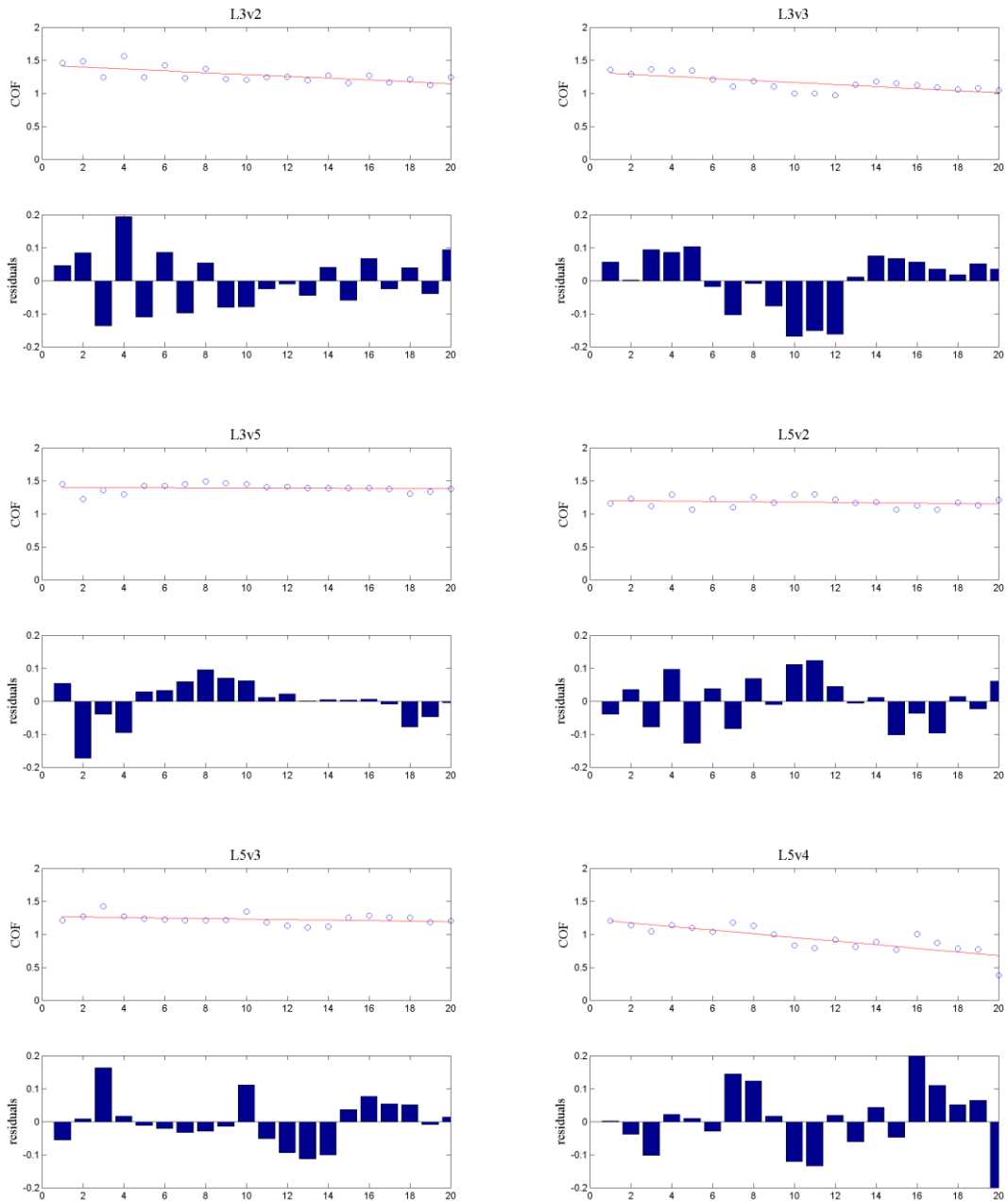
ENVEJECIDAS 3 SEMANAS (3W)

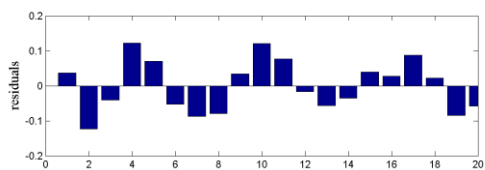
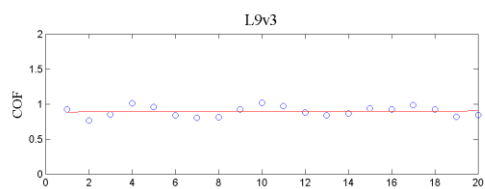
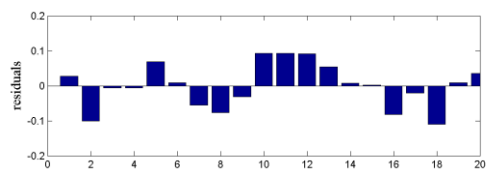
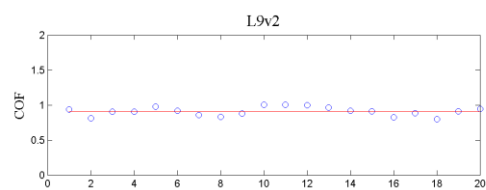
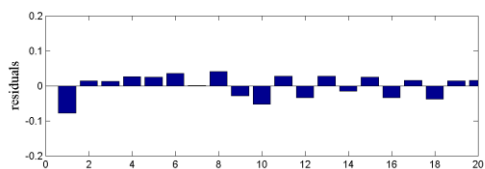
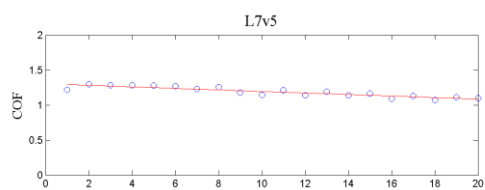
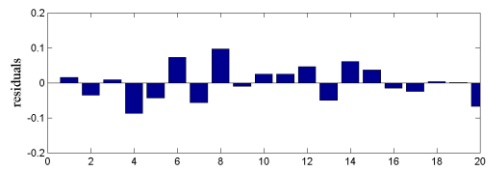
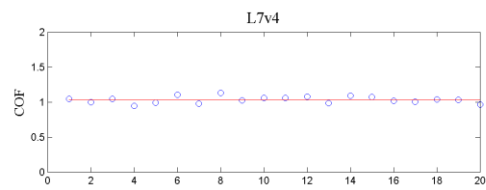
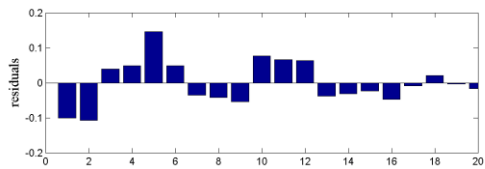
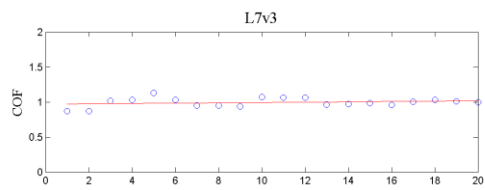
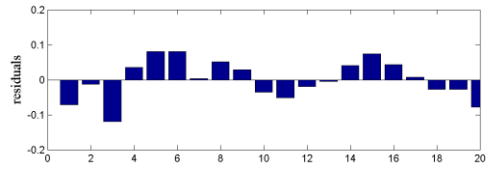
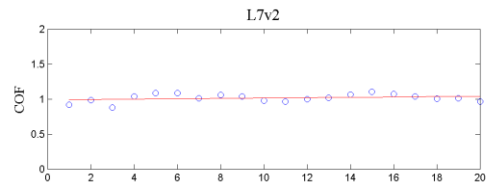
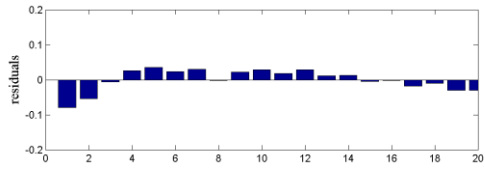
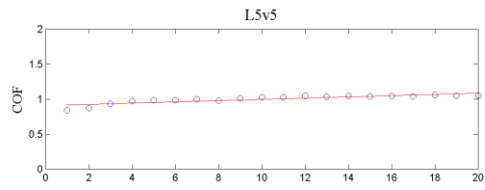




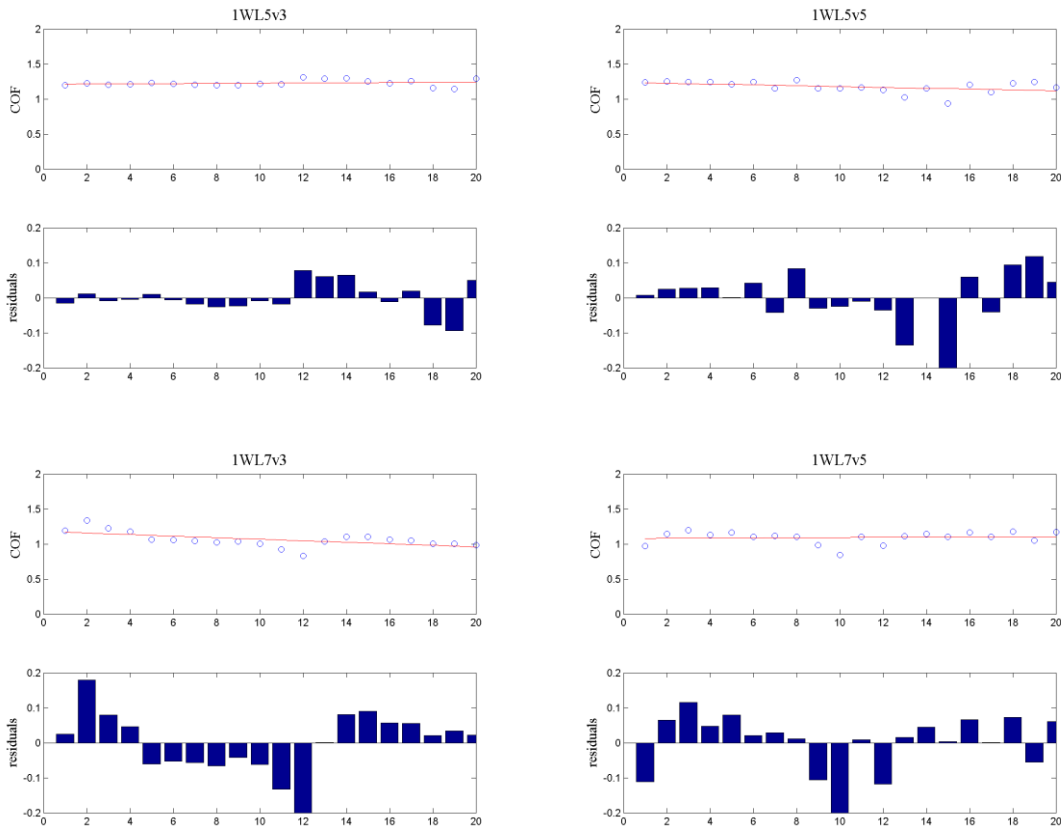
4. Elastómero NR50

SOBRE DISCO 1

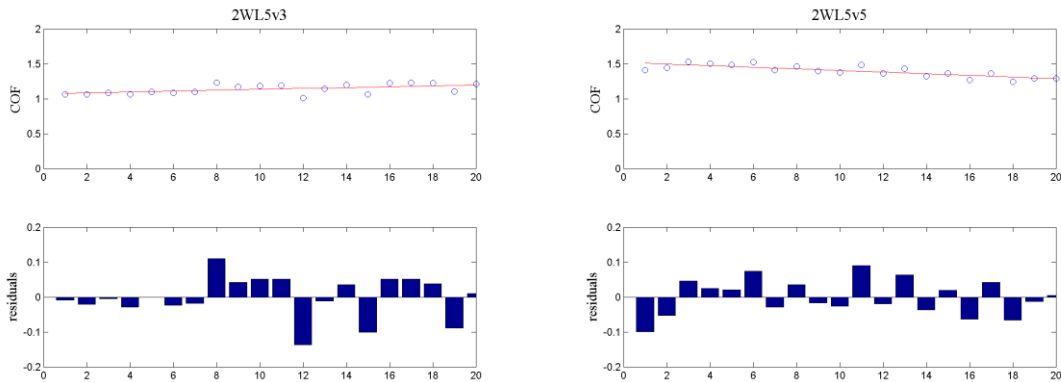


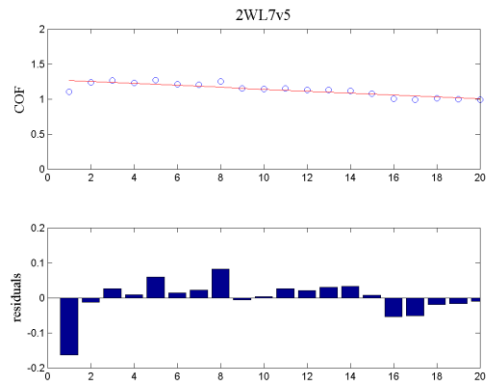
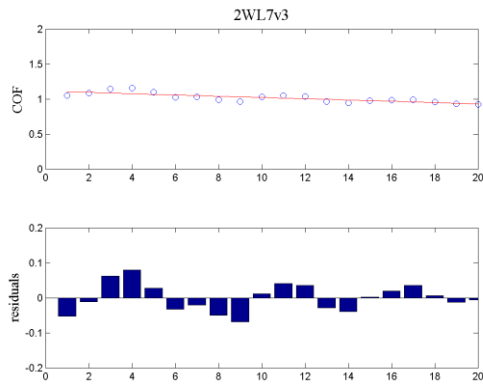


ENVEJECIDAS 1 SEMANA (1W)

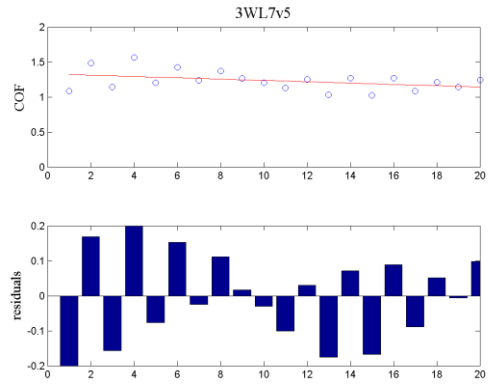
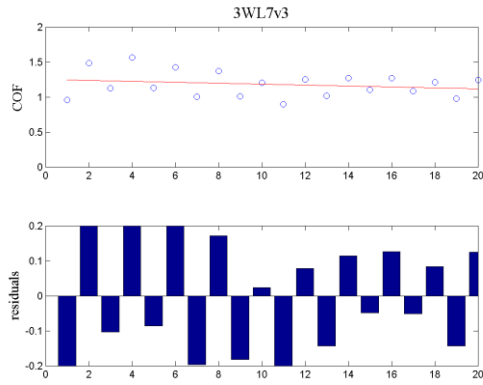
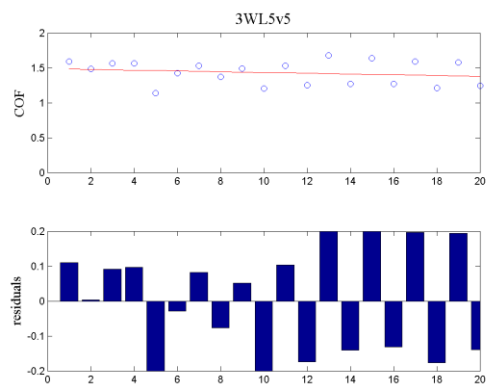
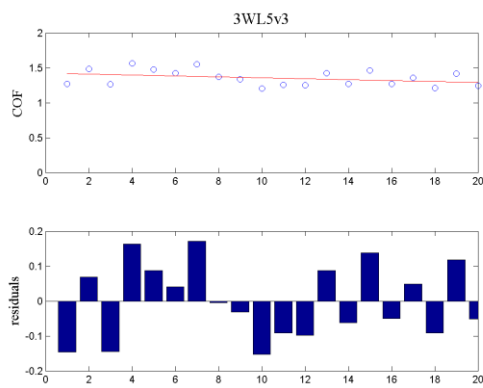


ENVEJECIDAS 2 SEMANAS (2W)

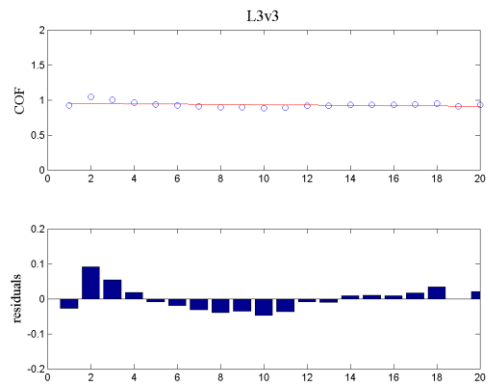
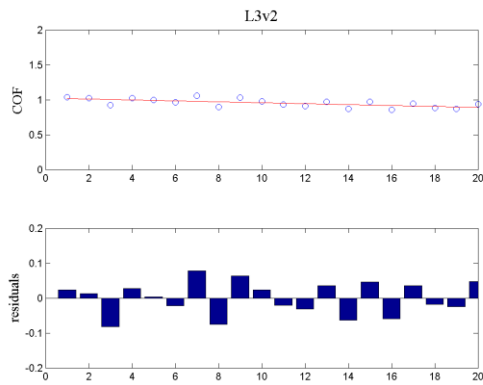


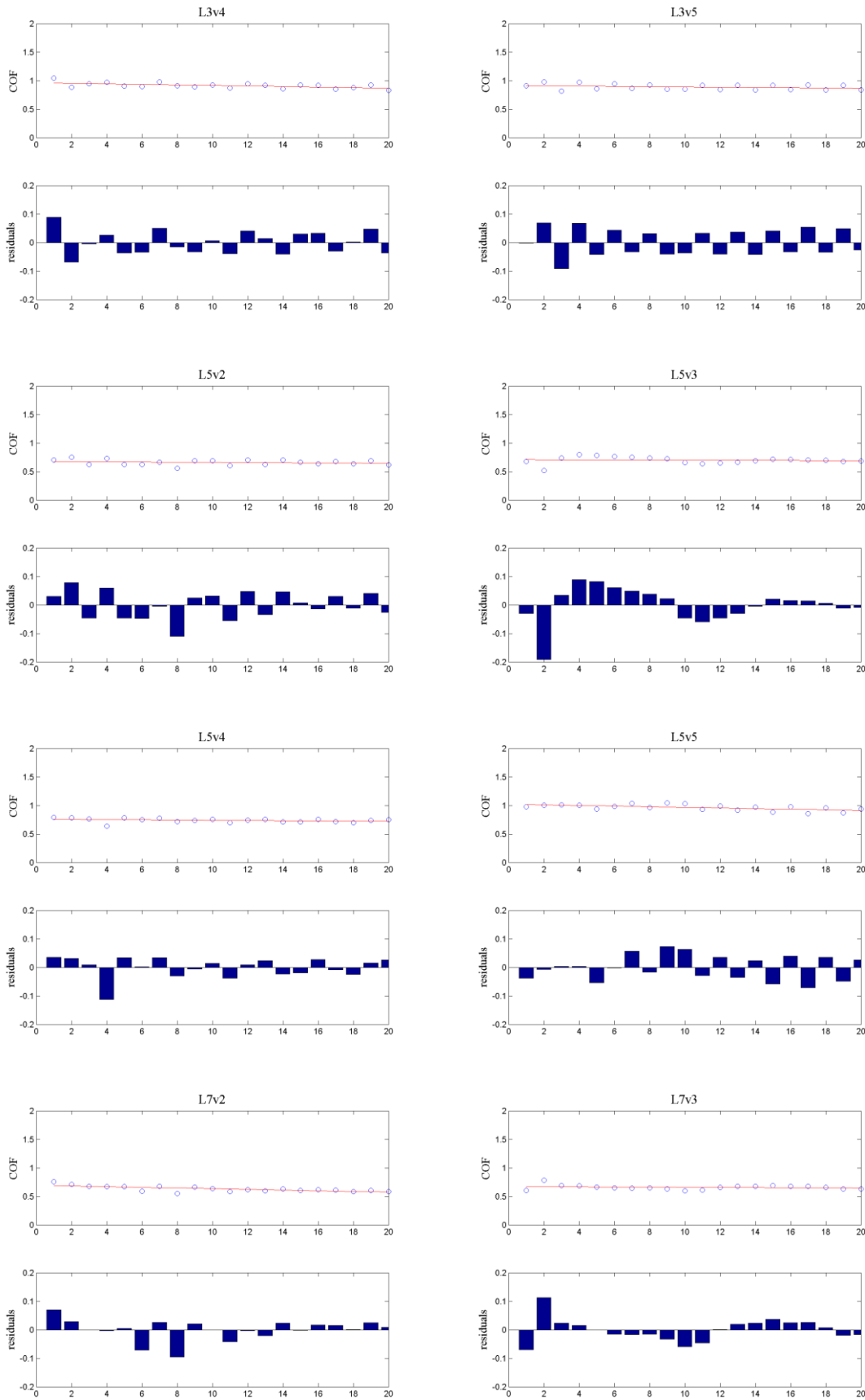


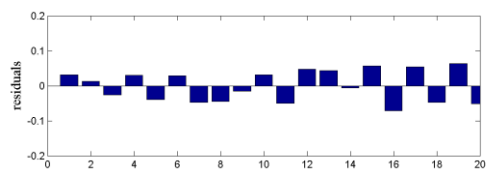
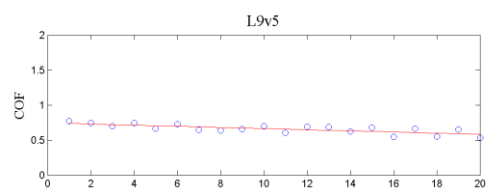
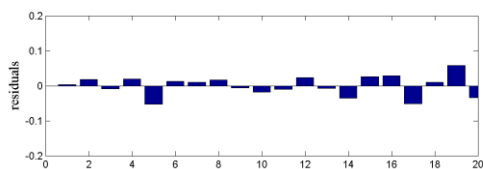
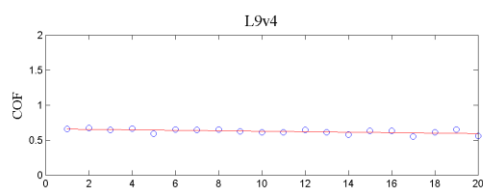
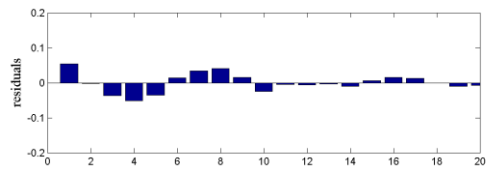
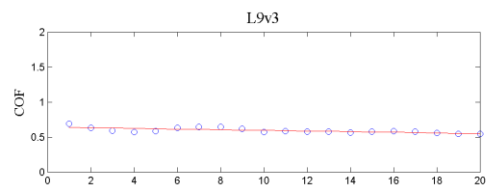
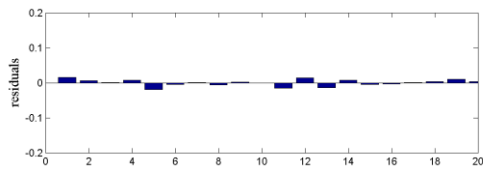
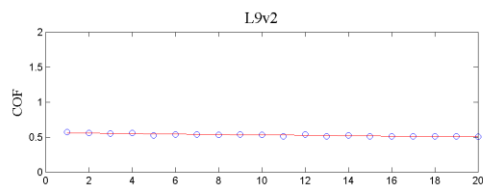
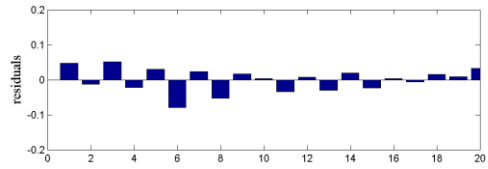
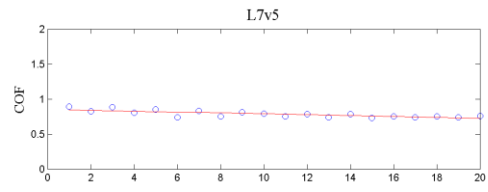
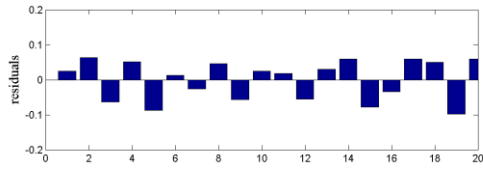
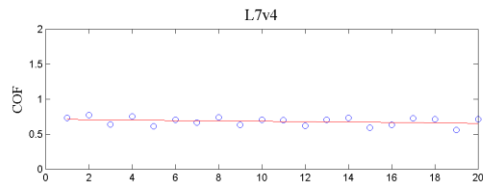
ENVEJECIDAS 3 SEMANAS (3W)



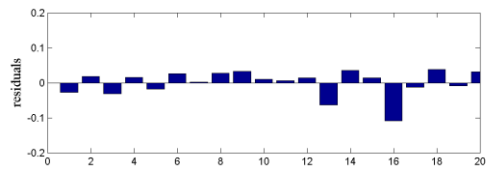
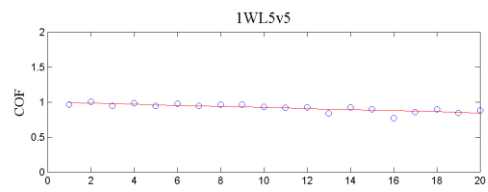
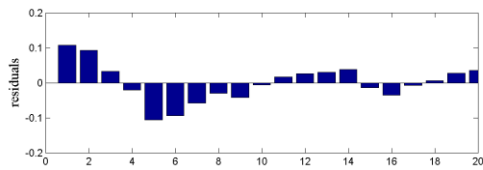
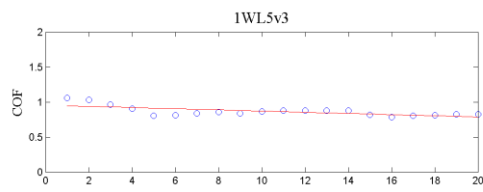
SOBRE DISCO 2

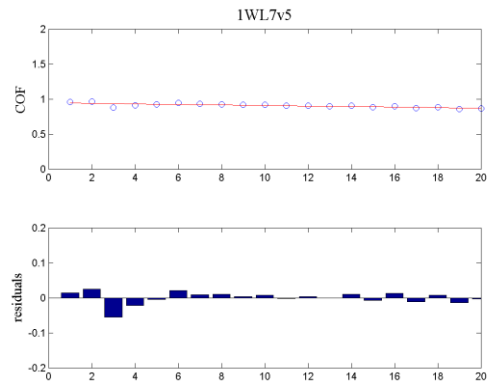
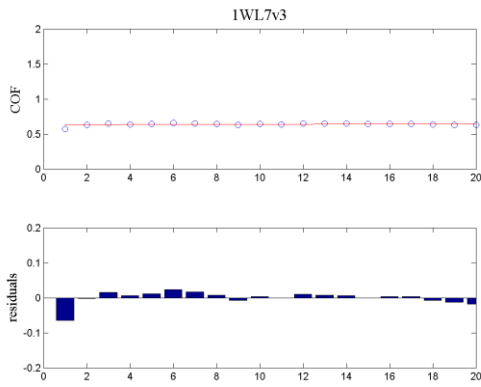




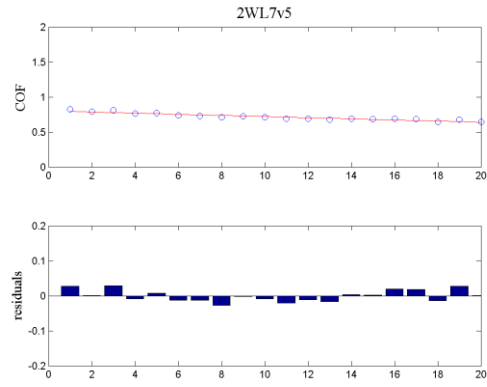
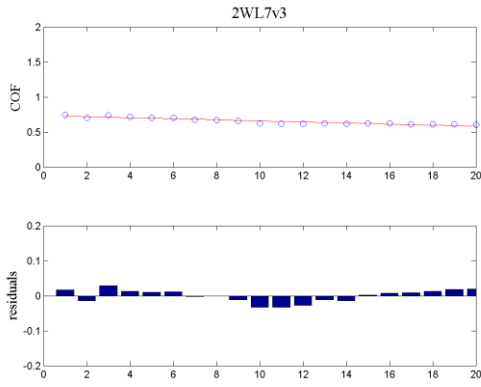
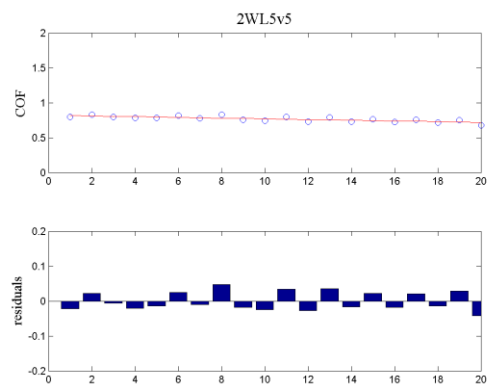
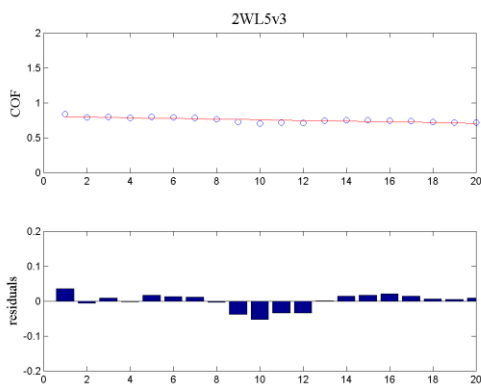


ENVEJECIDAS 1 SEMANA (1W)





ENVEJECIDAS 2 SEMANAS (2W)



ENVEJECIDAS 3 SEMANAS (3W)

