

ANÁLISIS ESTÁTICO PARA OPTIMIZAR UN CHASÍS DE PATÍN DE CARRERAS SOBRE RUEDAS

Junes Abdul Villarraga Ossa¹, Liliana Marcela Bustamante Goez², Juan Gustavo Diossa Peña³

¹Magister en Ingeniería Mecánica, Candidato a Doctorado en Ingeniería y Ciencia de los Materiales, Profesor Departamento de Ingeniería Mecánica; jun.es.villarraga@udea.edu.co

²Magister en Ingeniería, Profesor Departamento de Ingeniería Mecánica; Liliana.bustamante@udea.edu.co.

³Ingeniero Mecánico, Estudiante de Maestría en Ingeniería Mecánica, Profesor Departamento de Ingeniería Mecánica, juan.diosa@udea.edu.co.

Grupo Diseño Mecánico GDM, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Calle 70 No. 52-21, of. 20-404, Medellín, Colombia.

RESUMEN

La forma de patinar de los deportistas ha ido evolucionando a través del tiempo debido a diversos factores tales como: el cambio de patines convencionales a patines en línea, el tamaño de las ruedas y la intención de reducir el esfuerzo físico del patinador para realizar la misma distancia con menos energía. En el patinaje de velocidad se desarrolló la técnica de doble empuje para mejorar el rendimiento, esta técnica ha provocado fallas en el chasis del patín debido a los esfuerzos a los que es sometido. A partir de una caracterización del material, de un análisis de la cinemática del movimiento y el cálculo de las cargas estáticas generadas en el punto más crítico del ciclo de la técnica, se elaboran modelos computacionales para dos tipos de chasis y mediante simulación numérica se obtienen los esfuerzos y se realiza un análisis de falla, para posteriormente elaborar una optimización geométrica

Palabras clave: Patinaje de velocidad; técnica doble empuje; elementos finitos; optimización geométrica; análisis de esfuerzo.

Recibido: 11 de septiembre de 2014.
Received: September 11th, 2014.

Aceptado: 11 de diciembre de 2014.
Accepted: December 11th, 2014.

STATIC ANALYSIS TO OPTIMIZE A SKATES' FRAME OF INLINE SPEED SKATING

ABSTRACT

The way how skate has evolved over time due to various factors such as the change of conventional skates to inline skates, the size of the wheels and the intention to reduce the physical effort of the skater to perform the same distance with less energy. In speed skating double push technique was developed to improve the performance, this technique has led to failures in the skate chassis due to the stresses to which it is subjected. Computational models for two types of chassis were made through a characterization of the material, the analysis of the kinematics of motion and the calculation of static forces generated at the most critical point in the cycle and the failure analysis was obtained by numerical simulation with the aim of developing a geometrical optimization that guarantees a durable and reliable product, giving to athletes a better device for this sport.

Keywords: Speed skating; double push technique; finite elements; geometrical optimization; stresses analysis

1. INTRODUCCIÓN

Los patines en línea son unos aparatos utilizados para deslizarse sobre alguna superficie debido al giro de sus ruedas acopladas a la estructura del patín, su principal característica es que las ruedas están ensambladas una tras otra formando una línea recta; está compuesto por una bota o zapatilla, la cual le permite acoplar y sujetar los patines al deportista; un chasis elaborado en aluminio o fibra de carbono que une las ruedas con la zapatilla, las ruedas encargadas del desplazamiento en los patines, fabricadas en materiales poliméricos y sus tamaños comprenden desde los 80 a 110 mm de diámetro y por último, los rodamientos para reducir la fricción que provoca el ensamble de las ruedas desnudas con los tornillos – ejes.

Debido a la evolución del patinaje a través del tiempo y principalmente al cambio de patines convencionales a patines en línea y el interés de reducir el esfuerzo físico [1], surge la técnica de doble empuje, la cual consiste en que el patinador realiza su desplazamiento hacia delante describiendo una trayectoria curvilínea [2] (similar a lo que sucede con el Sprint en el ciclismo), mediante la flexión de las rodillas y el tronco [3], con el fin de ganar estabilidad al bajar el centro de gravedad del cuerpo, de ésta forma, el impulso se genera por las extremidades inferiores y por el peso del cuerpo del deportista al desplazar el centro de gravedad en función de tener una propulsión continua en todo el desplazamiento. En la figura 1 se muestran las principales etapas de esta técnica.

Se han realizado estudios biomecánicos del rendimiento de un patinador de acuerdo a la técnica utilizada y su eficiencia, Koning y otros [4] en sus modelos evalúan de manera más efectiva el rendimiento del patinador que los métodos empíricos. Acero [5 – 7], analiza la técnica de la salida, el ciclo de empuje en recta y el rendimiento de los patinadores, obteniendo datos importantes de las distancias, velocidades y aceleraciones que los deportistas pueden alcanzar durante la realización del movimiento de empuje mediante videografía, cinegramas y ciclogramas que describen el movimiento de los miembros. En los estudios nombrados anteriormente como en los de Boer [8] y otros, Boyd [9] y colaboradores; no se hace una diferencia entre la técnica clásica y la de doble empuje; todos ellos están orientados al rendimiento físico del patinador y como detectar los

movimientos realizados por el patinador y no al análisis de fuerzas generadas durante el movimiento.

Por otra parte Lugea [10], analiza la técnica del patinaje de velocidad en los tramos rectos y curvos, elabora los diagramas de cuerpo libre para cada posición y plantea ecuaciones para el análisis de fuerza simplificando el modelo evaluando sólo la posición de inclinación que se presenta en la técnica de doble empuje. Un análisis más detallado de las técnicas utilizadas en el patinaje fue realizado por García y Bolívar [11] donde realizan una comparación cinemática de los ciclos de empuje en el patinaje de carreras, utilizando una tabla deslizante y la recta de una pista, pero como las investigaciones anteriores están enfocadas a el mejoramiento del rendimiento deportivo y no a un análisis de fuerzas sobre el chasis. Petrone [12], Stidwild y colaboradores [13] realizaron el análisis fuerzas en patines sobre ruedas y en patines de hockey sobre hielo respectivamente, utilizando sensores en los chasis para obtener las fuerzas a las que es sometido en un recorrido, adquiriendo datos importantes como la fuerza mínima y la fuerza máxima, pero no se identifica en que instante de la ejecución se presenta.

Recientemente Olmi [14] estudió las fallas presentadas en los chasis para patines de patinaje artístico sobre ruedas, proponiendo un nuevo modelo optimizado después de analizar los impactos generados por los saltos y los movimientos generados por los deportistas. Utilizando el Método de los Elementos Finitos y validando el modelo al recurrir a sensores y metodologías similares a las utilizadas por Petrone y Sidwild en sus investigaciones.

En este estudio se presenta un análisis estático de la técnica de doble empuje, un análisis estructural de dos chasis utilizados en patinaje de velocidad, se caracterizan los materiales empleados en su fabricación y se propone un modelo geométrico optimizado basado en los esfuerzos generados durante la ejecución de la técnica de doble empuje, con el fin de aumentar la vida útil del patín.

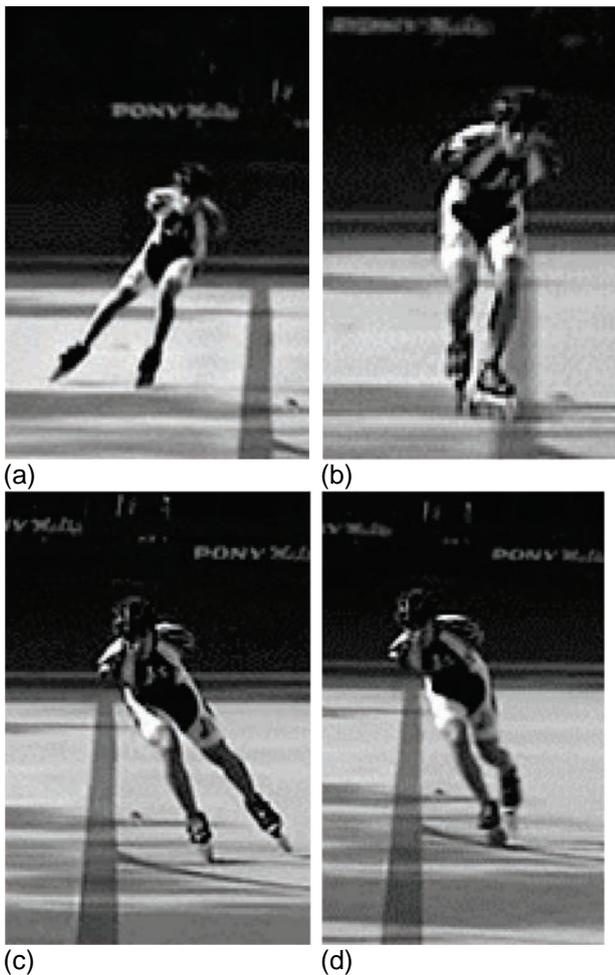


Fig. 1. Etapas principales de la técnica de doble empuje (a) Empuje hacia la derecha (b) Recuperación ambos patines en el centro. (c) Empuje hacia la izquierda. (d) Recuperación ambos patines en el centro empuje [15].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización del análisis estático y la optimización del diseño del chasis para un patín en línea utilizado en competencias de patinaje de velocidad, la metodología empleada se describe a continuación.

2.1 Análisis cinemático de la técnica.

Para la obtención de las cargas se analiza la técnica de doble empuje en las principales etapas de su ejecución. Mediante el software Kinovea® 0.8.15 [16] se determinan los ángulos y posiciones de cada una de las etapas de videos de un patinador Elite (Figura 2). Tomando como posiciones críticas aquellas en las que el deportista

se encuentra parado en un sólo patín Figura 1 (b), (c) y (d) y utilizando una persona cuyo peso y altura sea de 80 kg y 1.80 m respectivamente, se calculan las fuerzas aplicadas por el patinador al patín teniendo en cuenta la posición del centro de gravedad con respecto al apoyo del patinador en ese instante como se puede ver en el ejemplo de la Figura 3. Para hallar las longitudes de todos los segmentos del cuerpo, se emplearon las relaciones antropométricas proporcionadas por Winter [17]. Los resultados obtenidos para cada una de estas posiciones se muestran en la tabla 1.

De la tabla 1 se observa que los mayores momentos se presentan en la posición dos, en ésta el patinador se encuentra parado en un sólo pie e inclinado (Ver figura 1.c).



Fig. 2. Secuencia de movimiento del patinador analizada

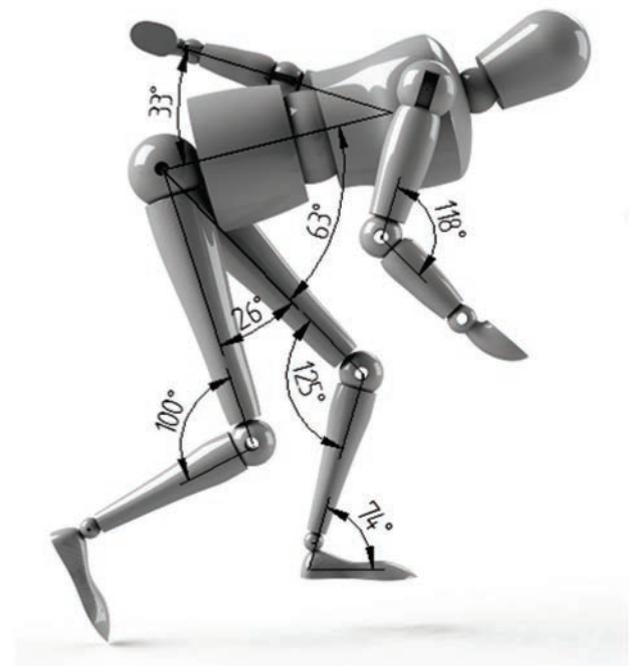


Fig. 3. Posición de análisis

Tabla 1. Fuerzas y momentos aplicados al patín para diferentes posiciones críticas

Posición	Fuerzas (N)	Momentos (N m)
1 → (b)	784.8 i	83.2673 i - 114.4238 k
2 → (c)	784.8 i	101.3962 i - 399.8556 k
3 → (d)	784.8 i	88.2900 i + 240.3058 k

2.2 Caracterización del material

Se determinó la composición química de los chasis usando un Espectrómetro Shimadzu® OES 5500, se analizaron cinco modelos de chasis de diferentes marcas, los datos promedios de la composición de tres pruebas diferentes se muestran en la tabla 2, para determinar si los chasis tenían algún tratamiento térmico se realizó una prueba de dureza en el durómetro universal Gnehm Hartepuffer Swiss Max 300, en la Tabla 3 se presenta el promedio de cinco pruebas para cada chasis analizado. Las pruebas del ensayo de dureza se realizaron a una temperatura de 23 °C y 53% de Humedad relativa y de acuerdo a la norma ASTM E10 [18]. A partir de los resultados obtenidos en los ensayos se pudo determinar que el material de fabricación de los chasis es el aluminio serie 7000 (E= 71 GPa, ν=0.33)[19]; En el ensayo de dureza se observa que a los chasis no se les realiza tratamiento térmico, puesto que se encuentran en los rangos de dureza comunes del aluminio de esta serie (20.0 - 210).

2.3 Modelos CAD de los chasis

Para el análisis numérico y geométrico de los chasis, se seleccionaron los modelos uno y cuatro por sus diferencias en la geometría.

Tabla 2. Principales aleantes de cinco modelos de chasis de diferentes marcas en % de componente.

	1	2	3	4	5
Al	98.554	98.667	98.324	98.661	93.316
Si	0.0708	0.652	0.461	0.605	0
Fe	0.091	0.089	0.155	0.117	0.134
Cu	0.086	0.086	0.165	0.086	0.142
Mn	0.026	0.013	0.039	0.024	0.25
Mo	0.482	0.452	0.774	0.463	0.698
Cr	0.014	0.004	0.039	0.007	0.124
Zn	0	0	0	0	5.167

Tabla 3 Resultado de ensayo de dureza para cinco modelos de chasis de diferentes marcas

Modelo	Dureza promedio [HB]
1	102
2	110
3	109
4	91.4
5	84.5

El modelado geométrico de los chasis se realizó en el software *Solid Edge® ST4* [20], los chasis se muestran en la figura 4.

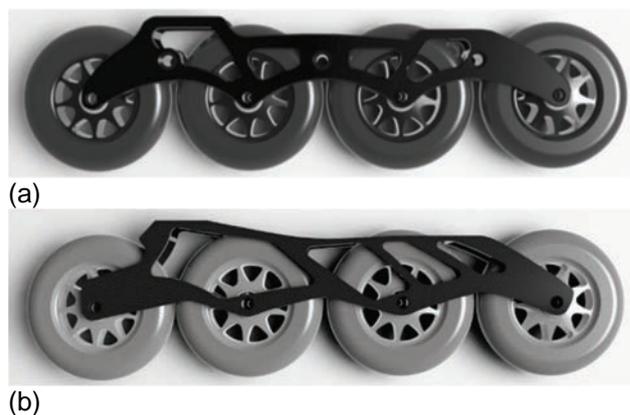


Fig. 4. a) Modelo CAD de chasis 1. b) Modelo CAD de chasis 4.

2.4 Simulación por elementos finitos

Se elaboró un modelo de elementos finitos utilizando el software *ANSYS® 14* [21], al cual se le aplicaron las cargas (Tabla 1) correspondientes a la posición más crítica, éstas se aplicaron sobre las superficies en donde el chasis hace contacto con la bota del patinador y se restringieron todos los grados de libertad de los agujeros donde se apoyan los ejes de las ruedas, se le aplicó una precarga del tornillo que ensambla la bota con el chasis de 3333 N, el tornillo es tipo Allen 5 y soporta un torque de 4 N m [22], usando la Ec.(1) [23] para un *k* recomendado de 0.20, los elementos utilizados fueron tetraedros con un tamaño mínimo de 0.07 mm y el modelo total constaba de 30191 nodos y 15534 elementos en promedio.

$$T = K F_i d \quad (1)$$

Dónde:

T → Torque (N m)

K → Coeficiente par de torsión (Adimensional)

F_i → Precarga (N)

d → Diámetro del tornillo (m)

2.5 Proceso de optimización

Con base en los resultados obtenidos de las simulaciones previas, se proponen cambios geométricos que ayuden a aumentar la resistencia de la estructura y distribuyan mejor los esfuerzos, aumentando así el tiempo de vida útil esperado para el chasis.

3. RESULTADOS

Los resultados de las simulaciones para los chasis de prueba 1 y 2 correspondientes al factor de seguridad son mostrados en la figura 5 indican que el chasis 1 y el chasis 2 tienen un factor de seguridad 0.96 y de 1.26 respectivamente, lo cual implica que presentan un bajo rendimiento para las condiciones del estudio.

El modelo propuesto (figura 6a), se obtuvo incrementando el espesor del chasis en las zonas donde se ensambla este a la bota (zona dentro de la línea punteada) y modificando los vaciados (zona dentro de la línea continua). Con esta nueva geometría el factor de seguridad alcanza un valor de 2.1. Los resultados de la simulación para este chasis se muestran en la figura 6 (b).

4. DISCUSIÓN

El método de elementos finitos ya ha sido validado por varios autores para la cuantificación de esfuerzos y para la optimización geométrica de chasis de patines en diferentes aplicaciones deportivas, lo cual nos permite utilizar este método garantizando la validez de las cargas calculadas. Los resultados obtenidos para los factores de seguridad de los chasis comerciales utilizados como referencia presentan valores que pueden ser considerados como bajos, teniendo en cuenta que, el estudio realizado es de carácter estático, lo cual implica que presentan un bajo rendimiento desde el punto de vista de la vida del elemento y sabiendo que la fatiga juega un papel importante [14]. Con los cambios geométricos propuestos se logra obtener un aumento del factor de seguridad en casi el 40% con respecto al mejor de los chasis de prueba, logrando un chasis más resistente que brinda mayor seguridad al patinador. Se debe recordar que un análisis de fatiga puede brindar mayor información sobre el aumento real de la vida útil del chasis, también es recomendable el uso de

galgas extensiométricas para validar los datos obtenidos, debido a la presencia de cargas dinámicas durante la utilización de la técnica de doble empuje.

5. CONCLUSIONES

Al analizar la cinética de la técnica de doble empuje se puede realizar el cálculo estático y obtener las fuerzas ejercidas sobre el chasis del patín, estas cargas se aplicaron en un estudio numérico y se obtuvieron los factores de seguridad para dos modelos comerciales, evidenciando que están diseñados con dimensiones no adecuadas para la función que desempeñan, por lo cual se hace pertinente un estudio de optimización.

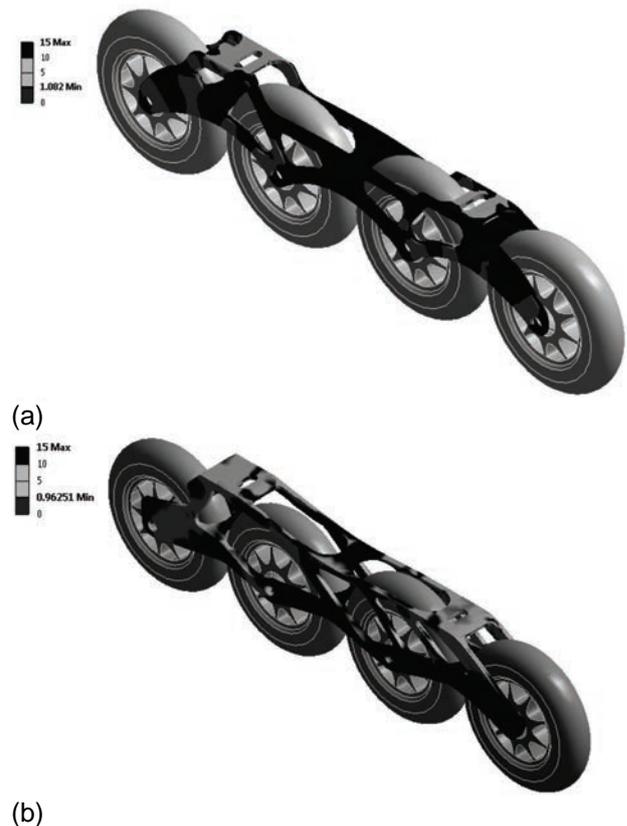
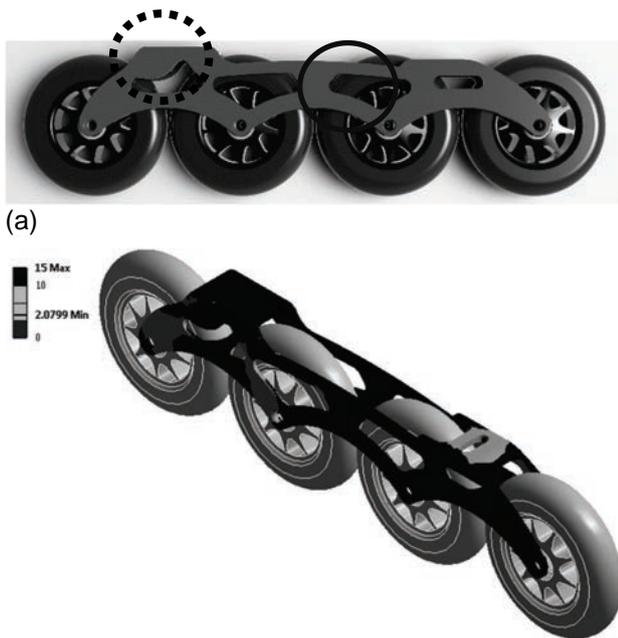


Fig. 5. Resultados simulación a) chasis 1 y b). chasis 2.



(a)
(b)
Fig. 6. Chasis propuesto a) Modelo CAD y b) Resultado simulación chasis propuesto

Otro de los factores que motiva la optimización, es el hecho de que este estudio se realizó sólo contemplando un modelo estático, con lo cual los valores obtenidos para los esfuerzos durante la utilización en la técnica deben cambiar, lo que podría traducirse en una disminución de los factores de seguridad hallados.

La optimización geométrica propuesta mejora los factores de seguridad obtenidos en un 39 % y por ende se espera incrementar la durabilidad del chasis.

Es recomendable realizar un análisis que tenga en cuenta la dinámica del movimiento para la generación y el cálculo de las cargas, así como el cálculo más detallado de las contribuciones de cada uno de los elementos del cuerpo del patinador sobre las reacciones del piso con el patín, para poder obtener resultados más acertados, también se recomienda realizar un proceso de optimización más riguroso que pueda vincular el diseño de experimentos para el análisis de medidas continuas o discretas dentro del modelo del chasis.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Comité para el Desarrollo de la Investigación CODI y Centro de Investigaciones Ambientales y de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, quienes financiaron la investigación, también a la Liga de Patinaje de Antioquia, Al instructor Carlos Enrique Plata y al Patinador Guillermo Cerén por su colaboración con el proyecto.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lugea, C. Fundamentos de la técnica en el patinaje de velocidad. Spagatta. Disponible en: http://www.spagatta.com/pdf/articulos/tecnica/tecnic_a_patinaje_velocidad.pdf [consultado el 10 de Octubre de 2012]
- [2] Tai, B.-H., Su, C.-K. & Shiang, T.-Y. The comparison of Gait Analysis of Roller-Skating and Walking. XXI ISB Congress, Julio de 2007.
- [3] Lugea, C. Posiciones y saltos de potenciación, para el patinaje de velocidad. EMDER/AMP, Curso de Patín, EMDER y Asociación Marplatense de Patín AMP, Mar del Plata, Argentina, Diciembre de 2010.
- [4] Koning, J. J. de, Foster, C., Lampen, J., Hettinga, F. & Bobbert, M. F. Experimental evaluation of the power balance model of speed skating. J. Appl. Physiol. 98, 227–233, 2005.
- [5] Acero, J. & Palomino, A. Descripción motriz y cinemática de la salida de 200 metros en patinadores elite de Colombia. Instituto de Investigaciones y Soluciones Biomecánicas, 2010.
- [6] Ramón, G. Biomecánica Deportiva Aplicada. Universidad de Antioquia Funámbulos Editores, 2011.
- [7] Acero, J., Palomino, A., Iburgüen, H. & Carmona, C. Valoración cinemática (2d) sagital de la salida frontal de un patinador de carreras: un estudio piloto. Instituto de Investigaciones y Soluciones Biomecánicas, 2003.
- [8] Boer, R. W., Vos, E., Hutter, W., de Groot, G. & van Ingen Schenau, G. J. Physiological and biomechanical comparison of roller skating and

speed skating on ice. *Eur. J. Appl. Physiol.* 56, 562–569, 1987.

[9] Boyd, J. E., Godbout, A. & Thornton, C. In Situ Motion Capture of Speed Skating: Escaping the Treadmill. in 2012 Ninth Conference on Computer and Robot Vision (CRV) 460–467, Junio de 2012.

[10] Lugea, C. Consideraciones sobre biomecánica en el patinaje. Universidad Autónoma de Madrid, 2009.

[11] García, K. & Bolívar, M. Comparación cinemática de los ciclos de empuje en patinadores competitivos, de 11 a 17 años, utilizando una tabla deslizante y la recta en pista. [Trabajo de grado pregrado], Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira, Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/2610/1/796077G216.pdf>. 2011.

[12] Petrone, N. Acquisition and analysis of ground reaction forces and foot orientation on in-line skates during track speed skating. *J. Biomech.* 40, Supplement 2, S398, 2007.

[13] Stidwill, T. J., Turcotte, R. A., Dixon, P. & Pearsall, D. J. Force transducer system for measurement of ice hockey skating force. *Sports Eng.* 12, 63–68, 2009.

[14] Olmi, G. Failure of the chassis of roller skates for agonistic figure skating. *Case Stud. Eng. Fail. Anal.* doi:10.1016/j.csefa.2014.08.002

[15] Plata C. y Ordoñez A., Video instruccional - técnica patinaje de velocidad. Medellín: 2006.

[16]. Charmant J, Kinovea. 2011.

[17] Winter, D. A. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. Jhon Wiley & sons, 2009.

[18] American Society for Testing and Materials ASTM, “Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.” ASTM, 01-Apr-2007.

[19] “Overview of materials for 7000 Series Aluminum Alloy,” MatWeb. Disponible en: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab9706916818406b80c22b7f39db0c78&ckck=1>. [Consultado el 4 de Septiembre de 2012].

[20] Siemens PLM Software, Solid Edge. 2011.

[21] NASDAQ : ANSS, ANSYS. 2011.

[22] “Como escoger la llave de torque correcta.” . Disponible en : <https://dl-web.dropbox.com/get/009711.BUR%20Como%20escoger%20la%20llave%20de%20torque%20correcta.pdf?w=99497787> [Consultado el 4 de Septiembre de 2012]

[23] Budynas R. y. Nisbett K, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 8th ed. México: McGraw-Hill, 2008.