

## Desarrollo de prótesis para la inclusión

Sr. Alvaro, Benitez Franco; Ing. Juan Ignacio, Villar; Ing. Lucas, Sznajderman.

Dto. de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, UNLP. Calle 115 esq. 47. CP: 1900.

[alvaro.benitezfranco@ing.unlp.edu.ar](mailto:alvaro.benitezfranco@ing.unlp.edu.ar)

### Introducción

Las prótesis de uso competitivo resultan ser hoy de difícil adquisición, compleja importación y costo prohibitivo siendo una tecnología capaz de desarrollarse aquí, constituyendo una posibilidad de sustitución a la importación, y medio para que nuestros atletas paralímpicos alcancen el escenario competitivo en igualdad. Surge así la necesidad de un plan destinado a cubrir un área de vacancia, donde nuestra intervención genere nuevos conocimientos y medios para construir prótesis de uso deportivo, capaces de resistir las sollicitaciones de la competencia permitiendo entonces alcanzar el máximo potencial de los futuros usuarios.



Figura 1 - Utilización de la prótesis deportiva

El proyecto está destinado a los atletas lesionados con amputaciones o bien aquellos que presentan una malformación congénita similar a una amputación de miembros inferiores. En particular, a quienes se inician en la práctica deportiva (como niños y adolescentes), al atletismo y también a los atletas en la alta competencia quienes requieren ciertos equipamientos para poder desempeñarse en el primer nivel.

Dada la experiencia del equipo en el en el deporte, el movimiento paralímpico y en el deporte adaptado en particular, se ha podido constatar el uso en competencia de prótesis comunes o de "uso diario" no aptas para el deporte, que pueden incurrir en riesgo de lesiones tanto en los muñones como falla de la pieza, imposibilitándoles correr cómodamente, ni aprovechar todo su potencial por presentar asimetría entre zancadas, e incluso pudiendo ocasionar graves lesiones futuras en sus piernas, rodillas, caderas y espalda víctima del impacto y favoreciendo la aparición de lesiones por stress.

Es esperable una mejora significativa en las velocidades finales y la marcha propia de la carrera, que deberían mostrar los registros del atleta una vez adaptado al uso de la misma y, que de ser una transición óptima es esperable que se halle en el orden de más de 1 [s] en los 100 [m], resultando además en un confort de carrera más saludable.

Finalmente el gran objetivo de este proyecto es que los destinatarios alcancen una vida más plena, dado que se entiende al deporte como una herramienta de rehabilitación y motivación ayudando a quien lo practica en su inclusión y a alcanzar una vida más saludable.

### Parte experimental

Inicialmente las prótesis fabricadas serán de uso deportivo destinadas a atletas que se desempeñan en pruebas de pista, amputados transtibiales por debajo de la rodilla doble y simple (respectivamente T43/T44) de acuerdo con las "Reglas y reglamentaciones del IPC 2014/2015" vigentes (International paralympic Committee) que participen en pruebas de 100 [m], 200 [m] y hasta 400 [m], ya que en el caso el resto de las pruebas de atletismo responden a distintas características funcionales y requieren a priori de una modificación en la forma de la pieza. No existe reglamentación que limite las prótesis en conceptos dinámicos, cinemáticos y/o energéticos, pero sí en geométricos, no pudiendo dotar al atleta de una talla sobrenatural que modifique anormalmente su paso ni contener partes motoras.

Las prótesis en sí, son muy personales dado que cada atleta posee una talla, frecuencia de paso, zancada, tiempo de vuelo y fuerzas transmitidas al piso muy distintas, todas muy importante en el desarrollo de la pieza. Con lo cual representa un verdadero desafío a resolver el cómo adaptar el modelo desarrollado a las diversas necesidades de cualquier atleta con las mínimas modificaciones posibles.

Se busca entonces el diseño, la validación y fabricación de la prótesis transtibial de tipo Flex-Foot para la competencia con su correspondiente anclaje a la bota, manufacturada en materiales compuestos.



Figura 2 - Prototipo de prótesis

El diseño de esta prótesis se realiza basado en el proyecto previo “Desarrollo de prótesis ortopédica en materiales compuestos para uso competitivo” en donde se generó una función, con método de elementos finitos, que permite relacionar la constante elástica de la prótesis (en la dirección de utilización) vs. la cantidad de láminas de material compuesto, siendo esta última, la principal variable independiente del sistema para modificar el parámetro más importante de la misma (rigidez). Todo esto manteniendo la geometría de la pieza pero escalandola en función de la talla del usuario.

La construcción de los prototipos se realiza en materiales compuestos con fibras tanto de carbono como de vidrio y resina epoxy a través del método “Vacuum bag wet lay-up”. Las piezas se realizan con una cantidad de láminas variables sobre un molde unilateral con la geometría buscada. Para el anclaje se busca que sea capaz de resistir las sollicitaciones cíclicas a las que será sometido, por lo que la fabricación tiene dos posibilidades, o se realiza en polímeros de impresión 3D o en metal. La bota, por otro lado, sobre la que descansa el miembro amputado del atleta son fabricadas por un ortopedista con años de experiencia en la temática.

A su vez, la validación consiste en comparar la prótesis fabricada con el modelo desarrollado, estudiando tanto la variación de dimensiones como de propiedades mecánicas y buscando las razones de tales diferencias. Dichas discrepancias se obtienen experimentalmente, fabricando prototipos con distintas configuraciones y utilizando ensayos estáticos y dinámicos, así como el feedback provisto por un potencial usuario. En particular se obtienen parámetros para la validación de las siguientes maneras:

- Realización de ensayos de caracterización de las propiedades mecánicas de los distintos materiales compuestos a ser utilizados para la fabricación de la prótesis (fibra y resina).
- Construcción de una plataforma de carga multidireccional para el estudio de Ground Reaction Force (GRF), estas son las fuerzas estáticas y dinámicas que la prótesis transmite al impactar con el suelo y que sirven como variable de entrada para el resto de los ensayos.
- Implementación de ensayos estáticos a compresión para obtener la variación de la constante elástica, los mismos se realizan con una máquina de ensayos universales INSTRON.
- Fabricación de una máquina de ensayo de impacto para el estudio de la respuesta dinámica de la prótesis cuya importancia radica en que modifica la vibración en la fase aérea de la prótesis lo que define la condición de apoyo.

Se busca también, sistematizar los estudios a realizar a los futuros usuarios para alimentar los modelos y determinar las características que debe presentar la pieza específica a fabricar. Entre ellos, los estudios de parámetros biomecánicos del usuario, sus medidas antropométricas, estudio de la marcha, de la carrera, tests de potencia unipodal, test multihop y medidas de cargas en plataforma de fuerzas. Entre los parámetros más destacados a obtener de estos estudios y que definirán el modelo se encuentran la masa, la antropometría, la biomecánica del atleta, la velocidad que puede desarrollar, la fuerza que logra transferir al suelo durante la carrera, entre otros.

El tipo de marcha que es capaz de desplegar el atleta tiene impacto en la frecuencia con que la prótesis toma contacto con el suelo deformándose y acumulando energía elástica al tiempo que la devuelve en impulsos. De esta forma se establecen criterios que permiten asegurar que dicha frecuencia de toma de contacto con el suelo está lejos de la natural propia de la prótesis, garantizando además que la misma recuperará entre paso y paso su configuración de no deformación.

Un indicador de progreso lo obtendremos a partir de la comparación de los datos relevados del atleta con las publicaciones experimentales disponibles (mencionadas en la bibliografía) sobre las GRF (ground reaction force), frecuencia de pasos, duración del vuelo con y sin prótesis, rigidez de la pieza, comportamiento viscoelástico, confort de marcha, entre otros parámetros indicadores relevantes.

A su vez se pretende que el atleta modelo de testeo de las prótesis sea capaz de realizar una realimentación del proceso de cálculo, diseño y construcción así como también es el espíritu del proyecto consolidarlo como entrenador de futuros usuarios de prótesis en el marco del proyecto dada su amplia experiencia como usuario. De forma paralela se estudia la viabilidad económica del desarrollo del proyecto que permita su sostenibilidad y sustentabilidad en el tiempo.

Secuencial y cronológicamente la metodología a emplear abarca la medición de parámetros del atleta y su experiencia con el prototipo, comparación con atletas de similar condición antropométrica y biomecánica; consecuente alimentación del modelo numérico con los datos y parámetros relevados al diseño (propuesto según el usuario) y esperables para la prótesis; elección de materiales que mejor reproduzcan las condiciones deseadas según la solicitud; construcción de las probetas de constituyentes y la prótesis; ensayos de las mismas y consecuente validación con las publicaciones, estudios existentes y propios; adaptación del atleta al uso de la prótesis y evaluación comparativa contra la condición previa; análisis de posibilidades de mejora y optimización.

## Resultados y discusión

El Proyecto es beneficioso en todo sentido pues nos permitirá desarrollar y poner al alcance de los deportistas tecnologías de difícil acceso para los mismos ofreciendo igualdad de condiciones en el plano de competición nacional e internacional.

Por otra parte, se busca lograr la inclusión educativa y el desarrollo social de la comunidad de personas con discapacidad y mejorar las condiciones en que se desenvuelven los mismos; algunos de los cuales se encuentran en condiciones de vulnerabilidad social, con el objetivo de mejorar su calidad de vida sin onerosos gastos a los que, muchas veces, esta comunidad no puede acceder por razones económicas.

Se ha demostrado que el proceso de fabricación utilizado actualmente (Vacuum bag wet lay-up) genera la falla de la pieza por delaminación por lo que es necesario un estudio extenso sobre posibles nuevos procesos de fabricación en el caso de prótesis que utilicen alta cantidad de láminas de material compuesto (mayor a 30).

Se ha demostrado que para los distintos modelos que se han realizado en elementos finitos que no se logra aún la rigidez necesaria, tampoco se ha alcanzado tal rigidez en las prótesis prototipo. Debido a esto se siguen realizando estudios para mejorar los resultados. El promedio de la constante elástica obtenido de los distintos resultados se muestra en la tabla siguiente:

	Pretendido	Modelo	Ensayo
K [kN/m]	40	8	19

Tabla 1 - Comparación de módulo elástico

Buscando la permanencia es imprescindible que los atletas evaluados se mantengan vinculados al proyecto de modo de obtener su colaboración en todo momento como destinatarios finales del desarrollo del mismo permitiendo medir los parámetros necesarios para el modelo, así como dando una devolución acerca de los factores a mejorar para obtener la pieza óptima.

Se han realizado cálculos preliminares que acotan el costo de la materia prima e insumos a unos Dólares doscientos (USD 200) a lo que debiera sumarse la ingeniería, mano de obra, servicios e instalaciones pero que se resume en una disminución sustancial del valor en comparación a sus pares importados que rondan los Dólares dieciocho mil (USD 18.000).

### **Conclusiones**

Existen muchos atletas con amputaciones o malformaciones congénitas, traumáticas o debidas a enfermedades que necesitan imperiosamente prótesis de uso competitivo para llegar a la competencia de élite mundial, como también deportistas amateurs que desean realizar la práctica deportiva en el ámbito local y que actualmente se enfrentan al hecho de que solamente estos productos son fabricados en Europa o Estados Unidos e importados, con costos elevadísimos para el alcance de cualquier ciudadano del país. Para atacar esta problemática hemos desarrollado el siguiente proceso:

Es de esperar que el impacto en los usuarios no solo sea en la performance de competencia sino también la mejora en la salud a través del acceso a una mejor calidad de vida que siempre acompaña el realizar una práctica deportiva. Todo esto compartiendo las pautas sobre Responsabilidad Social Universitaria que definen el compromiso de la Universidad ante las exigencias éticas de orientar sus actividades hacia el desarrollo sostenible, considerando el impacto ambiental y social que puedan tener las mismas. Este proyecto articula extensión, docencia e investigación aportando la colaboración de distintas disciplinas a través de docentes, graduados, estudiantes y otros sectores sociales.

### **Bibliografía**

- 1972 - García - Análisis de los 100m lisos.
- 1998 - Novacheck - The biomechanics of running.
- 2000 - Weyan - Study of the ground reaction forces.
- 2000 - ASTM D3039 - Tensile properties of polymer matrix composite materials.
- 2003 - Ming Chai - Biomechanics of running.
- 2005 - Lara - Medición de la potencia con tests de salto.
- 2008 - Bruggemann - Biomechanics of dedicated sprinting prostheses.
- 2009 - Grabowski - Running-specific prostheses limit ground-force during sprinting.
- 2009 - Weyand - The fastest runner on artificial legs.
- 2009 - Valencia - Diseño y desarrollo de una prótesis flex-foot.
- 2010 - Vicente - Modelo rítmico 100m.
- 2011 - Morales - Biomecanica de la fase de salida en 100m.
- 2011 - European patent specification flex-foot.
- 2011 - Sánchez - Parámetros cinemáticos de la carrera.
- 2012 - McGowan - Leg stiffness using running-specific prostheses.
- 2013 - Hobara - Amputee locomotion.
- 2014 - Pearce - Mechanical properties of 3D printed materials.
- 2015 - Jweeg - Impact testing of new athletic prosthetic.
- 2015 - Normativa y reglamento de atletismo del IPC.
- 2015 - Tominaga - The effects of sagittal plane alignment.