



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA.**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA.**

**PROTOTIPO DE PLATAFORMA PARA CALZADO ORTOPÉDICO  
PERSONALIZADO PARA POLIOMIELITIS.**

**TESIS**

Para obtener el título de:

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

Presenta:

**LUZ ELISA GAHONA CASTILLEJOS.**

Asesor de tesis:

**DR. MANUEL APARICIO RAZO.**

Co-asesor de tesis:

**MTRO. JUAN CARLOS ROJAS BRAVO.**

Puebla, Pue.

Enero 2023



## Tabla de contenido

Índice gráficas.....	4
Índice de Ilustraciones.....	4
Introducción.....	7
Planteamiento del problema .....	9
Objetivos.....	11
Objetivo general .....	11
Objetivos particulares.....	11
Justificación.....	12
Descripción.....	13
Diagrama del proceso para la realización de la plataforma.....	14
Capítulo 1. Marco Teórico.....	15
1.1 Poliomielitis .....	15
1.2 La polio en la actualidad.....	16
1.3 Dismetría.....	17
1.4 Ingeniería inversa.....	18
1.5 Deformaciones y esfuerzos.....	19



1.6	Método de elemento finito.....	19
1.7	Factor de seguridad.....	20
1.8	Fresadora CNC .....	21
Capítulo 2. Ingeniería inversa en el proceso de diseño.....		22
2.1	Parametrización .....	22
2.2	Selección del material.....	24
	Nylamid .....	26
2.3	Diseño de la plataforma de calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.	27
Capítulo 3. Simulaciones por elemento finito y maquinado .....		31
3.1	Simulación de deformaciones y esfuerzos por medio de análisis de elemento finito de la plataforma.....	31
3.2	Simulación del maquinado de la plataforma del calzado ortopédico.....	34
Capítulo 4. Maquinados y Resultado.....		39
4.1	Maquinado de la plataforma.....	39
4.2	Resultados.....	42
4.3	Anexo.....	47
Anexos.....		48
	Anexo 1 Publicación del artículo.....	48
Referencias .....		55



## Índice de Tablas

Tabla 1 Tabla comparativa de las propiedades del aluminio, nylamid SL y hule.....	25
Tabla 2 Propiedades del material en SolidWorks.....	30

## Índice gráficas.

Gráfica 1 Propiedades mecánicas de diferentes tipos de Nylamid;	<b>Error!</b>	<b>Marcador no definido.</b>
---	---------------	------------------------------

## Índice de Ilustraciones.

Ilustración 1 Escaneado de zapato.....	23
Ilustración 2 Imagen que se genera con el escáner.....	23
Ilustración 3 resultado final arrojado por el software.....	24
Ilustración 4 Plataforma con el vaciado. ....	28
Ilustración 5 Tacón de la plataforma .....	28
Ilustración 6 Propiedades físicas de la plataforma .....	29
Ilustración 7 Ensamble de la plataforma, tacón y solera. ....	30
Ilustración 8 Resultado de Von Mises .....	32
Ilustración 9 Factor de seguridad de la plataforma.....	33
Ilustración 10 Simulación de la plataforma.....	34



Ilustración 11 Tiempo aproximado de maquinado del tacón .....	35
Ilustración 12 Proceso del Contorno .....	36
Ilustración 13 Proceso del tacón.....	36
Ilustración 14 Proceso de la cuchara .....	37
Ilustración 15 Proceso de la parte inferior de la plataforma.....	38
Ilustración 16 Devaste de altura y contorno de la plataforma. ....	39
Ilustración 17 Maquinado del tacón y la parte superior .....	40
Ilustración 18 Vaciado de la plataforma y barrenos del tacón. ....	41
Ilustración 19 Maquinado de la suela. ....	41
Ilustración 20 Plataforma impresa en 3D / Plataforma realizada con Nylamid .....	42
Ilustración 21 Zapato 1 con plataforma de hule rígido.....	42
Ilustración 22 Zapato 2 con plataforma de Hule suave .....	43
Ilustración 23 Zapato 3 Plataforma con Nylamid SL.....	43
Ilustración 24 Comparación de los calzados en el siguiente orden Zapato 1 / zapato2 / Zapato 3 .....	44
Ilustración 25 Zapato 3 en uso con suela Nylamid SL.....	45



Prototipo de plataforma para calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.

### **Agradecimientos.**

*A mis padres que, gracias a su esfuerzo y dedicación, puede llegar hasta donde estoy.*

*Muchas Gracias por todo lo que han hecho por mí, los amo.*

*A mis profesores por su paciencia y apoyo para cumplir una meta más.*



## Introducción

La poliomielitis es una enfermedad altamente contagiosa provocada por un virus que invade el sistema nervioso y puede causar parálisis en cuestión de horas. Esta se transmite de persona a persona por vía fecal-oral, con menos frecuencia a través del agua y los alimentos contaminados, multiplicándose en el intestino. [1]

La poliomielitis tuvo su auge a finales del siglo XIX, entre los años 1880 a 1920, la expansión se dio entre los años 20's y 50's y su retirada fue a finales de los años 50's a 1988 con la aparición de las vacunas. Una de cada 200 infecciones produce una parálisis irreversible generalmente en las piernas, esta enfermedad afecta sobre todo a los niños menores de 5 años [1]

La poliomielitis ataca generalmente los miembros inferiores y los músculos, es decir, la tibial anterior, peroneos, tibial posterior, extensor común de los dedos del pie, cuádriceps, tríceps sural, glúteos, musculo del tronco, deltoides, músculos del brazo, ante brazo y mano. [2]

Las secuelas permanentes son las que aparecen después de un año del episodio agudo, y son imposibles que presenten una recuperación debido a la parálisis. La fibra muscular de nervadas se atrofian y son sustituidas por tejido fibrocolageno y adiposo, Las fibras musculares indemnes al contrario pueden aumentar de volumen por hipertrofia compensatoria. [2]

Debido a que la enfermedad ataca en la etapa infantil puede producir el acortamiento del miembro paralizado, gracias a la hipoplasia del esqueleto, esta debido a la inactividad del miembro que quedó paralizado. [3]



Los casos provocados por poliovirus salvaje han disminuido en más de un 99%, de los 350,000 estimados en 1988 a los 33 notificados en 2018. [4] .Se han evitado más de 16 millones de casos de parálisis como resultado de los esfuerzos mundiales por erradicar la enfermedad [5]

En México, el primer brote de poliomielitis se presentó en Veracruz en 1946, y, el último fue registrado en el año 1990, en Jalisco. Según datos oficiales, en México se presentaron entre 1200 a 1300 casos de poliomielitis tipo poliovirus silvestre serotipos I y II solo entre los años 1986-1987. A partir del año posterior se generó una iniciativa para la erradicación a nivel mundial incluyendo México. [6]

Con los datos anteriores se puede analizar que los brotes de esta enfermedad en México se dieron entre los años 40's y 80's, lo que da como resultado que actualmente existan en la población personas con estas secuelas. El rango de edad de los afectados oscila entre 76-29 años, donde la mayoría se encuentra con una edad mayor de 41 años.

Se considera hoy en día que, la población económicamente activa en México se encuentra entre los 15 a los 75 años [7] indica que estas personas son ciudadanos con un alto potencial económico para la sociedad, lo que sugiere que deben contar con dispositivos ortopédicos de alta calidad que faciliten sus actividades diarias.

Una de las principales secuelas, como ya se abordó, es la atrofia muscular en las extremidades provocando el acortamiento de dicho miembro obligando al afectado a utilizar un aparato ortopédico que le permita caminar con mayor facilidad, las ortesis antiguas son pesadas y rígidas. Para las personas de mayor edad este tipo de aparatos les dificulta el movimiento ya que al tener peso extra provoca un cansancio y otros problemas de salud [8].



## **Planteamiento del problema**

Aproximadamente el 90%, de las personas que presentan secuelas de poliomielitis en México tienen en la actualidad edades que oscilan entre 32-86 años [9], lo que indica que son ciudadanos económicamente activos y con potencial para la economía local. Lamentablemente los aparatos, principalmente el zapato, que usan estas personas son dispositivos que no han sufrido cambios desde los años 50's y, sus características, son aparatos ortopédicos pesados que afectan la movilidad y con materiales deficientes que no garantizan los ciclos de vida a largo plazo.

Desde un enfoque económico, se dice que la elaboración de los zapatos ortopédicos se realiza totalmente de manera artesanal por zapateros convencionales. En la ciudad de Puebla se identificaron dos negocios que los elaboran, y es bajo pedido.

Debido a las limitantes técnicas en materiales y tecnología, la elaboración de un zapato de manera tradicional se efectúa por medio del uso de diferentes hules de alta densidad que son pesados y que no son capaces de soportar a largo plazo las condiciones estáticas y dinámicas del uso cotidiano. Además de que el tiempo aproximado de hechura es aproximadamente de dos a tres meses y su precio puede rondar entre 5,000 a 8,000 pesos mexicanos, lo que lo vuelve un producto no viable desde la óptica calidad-precio-tecnología-tiempo.

Por último, se puede afirmar que actualmente en el país, incluyendo al estado de Puebla, no cuenta con ninguna industria que ofrezca soluciones para la manufactura de productos relacionados a dispositivos ortopédicos para este tipo de secuelas. Esto es lamentable ya que es un sector abandonado y con nulas alternativas tecnológicas para mejorar la calidad de vida



Prototipo de plataforma para calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.

de las personas con estas características. Se considera que esta industria tiene un alto potencial para mejorar la vida laboral y social para este sector de la población.



## Objetivos.

### Objetivo general

Diseñar, simular y maquinar el prototipo de una plataforma de calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.

### Objetivos particulares

- Parametrizar, seleccionar material y diseñar plataforma de calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.
- Simular las deformaciones y esfuerzos por medio de análisis de elemento finito de la plataforma de calzado ortopédicos.
- Simular el maquinado de la plataforma de calzado ortopédicos por medio de HSMWorks
- Maquinar la plataforma de calzado ortopédicos en fresadora CNC Haas VF-2ss.



## **Justificación.**

En la actualidad los aparatos ortopédicos para las secuelas de la poliomielitis como puede ser un zapato con plataforma, pueden llegar a ser pesados e incómodos gracias al material del que están hechos (como el acero) por dicho inconveniente se buscan zapatos más livianos, estos suelen ser de un material poco resistente que no aguanta (como el caucho) el peso de la persona y los aditamentos que se le colocan al zapato haciendo la vida útil de este muy corta.

En este caso específico para la persona que fue realizada la plataforma, contaba con 2 pares uno hecho de acero con un peso de aproximadamente 2.5 kg., éste es el que cuenta con mayor tiempo de vida útil, pero gracias a su peso y a la edad de la persona afectada, el aditamento provocó más problemas e incómodidades. La segunda plataforma intentó corregir ese inconveniente siendo hecha de un material más liviano como lo es el caucho, este cuenta con muy poca dureza y resistencia a la presión sufriendo mucha deformación en los primeros años de vida no durando ni 4 años.

Por todo lo anterior es necesario buscar un material que aguante la presión, el peso y el uso que necesita la persona, pero que este no sea tan pesado, también el hecho de acortar el tiempo en que un zapato esté listo para usar ya con la plataforma integrada.



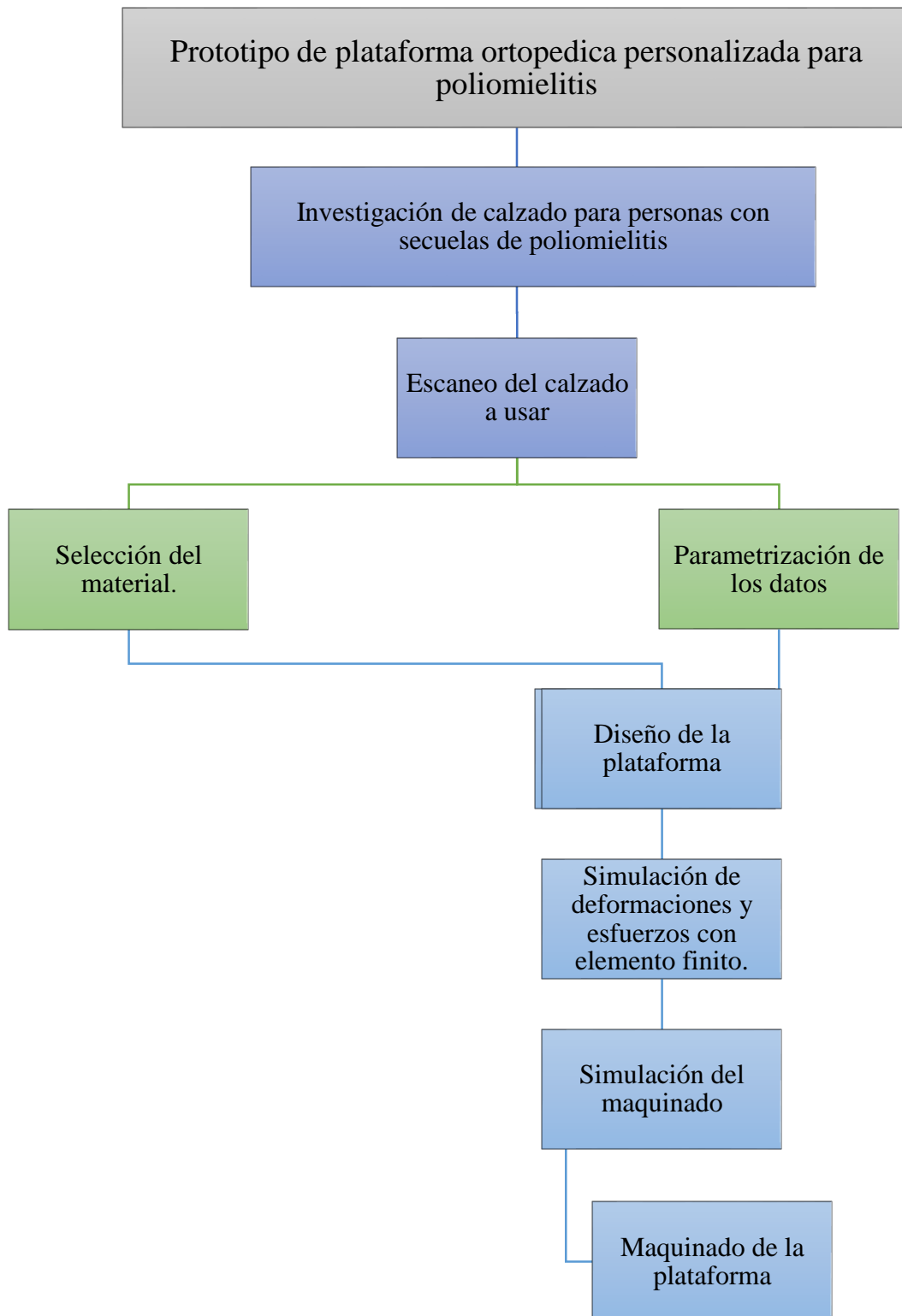
## **Descripción.**

El proceso del proyecto se llevará a cabo con ingeniería inversa, el objetivo es diseñar, simular y maquinar una plataforma para un zapato ortopédico personalizado a una persona que tuvo poliomielitis y sufre las secuelas, con eso se busca optimizar el calzado, para que sea capaz de resistir más tiempo, pero sin tener que ser tan pesado y así reducir el esfuerzo al usarlo.

Con ello primero se escaneará el zapato a utilizar para que la plataforma sea totalmente personalizable al calzado que la persona desea usar, partiendo de eso se terminara de diseñar la plataforma con Solid Works, posteriormente se ejecutaran las simulaciones de esfuerzo y deformaciones por medio de análisis de elemento finito para asegurar que el material elegido con el diseño sea optimo y resista las condiciones estáticas de carga, de ahí se realizara al post procesado de Solid Woks, donde se simulara el tiempo que llevara realizar la plataforma y para finalizar se maquinara la pieza en una VF-2SS HAAS.



**Diagrama del proceso para la realización de la plataforma.**





## Capítulo 1. Marco Teórico.

### 1.1 Poliomielitis

Enfermedad altamente contagiosa provocada por el virus de la poliomielitis, la mayoría de las infecciones ocasionadas por poliovirus no producen síntomas, aunque de 100 personas infectadas la excepción pueden ser entre 5 a 10 personas que pueden presentar síntomas similares a la gripe y en 1 de cada 200 casos el virus destruye partes del sistema nervioso provocando parálisis en las extremidades y en raras ocasiones la enfermedad ataca partes del cerebro que ayudan a respirar provocando la muerte del infectado. [10]

La polio se propaga cuando las heces de alguna persona infectada terminan siendo ingerida por alguien más, gracias al agua o comida contaminada y en algunos casos se puede presentar oral- oral a través de la saliva de una persona infectada. El periodo de incubación de esta enfermedad es de seis a cinco días, las complicaciones que se puede tener gracias a la enfermedad incluyen parálisis en las extremidades principalmente en las piernas.

Uno de los riesgos de contraer esta enfermedad en el síndrome post polio, la cual puede afectar a los infectados, diez o cuarenta años después de haberse recuperado de la enfermedad y este síndrome de caracteriza por debilitar los músculos que había resultados afectados por la infección, algunos de los síntomas son fatiga, deterioro de los músculos que progresa lentamente.

El poliovirus consta de un genoma de ARN encerrado en una cubierta de proteína llamada cápside, hay tres serotipos de poliovirus salvaje tipo 1, 2 y 3, el polio virus de tipo 2 fue



erradicado en septiembre de 2015, el tipo 3 se declaró erradicado en octubre 2019, ya que se detectó por última vez en noviembre de 2012, solo queda el tipo 1.

Los síntomas que se pueden presentar al inicio de esta enfermedad son fiebre, fatiga, dolor de cabeza, vómitos, rigidez de cuello y dolor en las extremidades. Esta enfermedad tuvo su auge entre los años 1880 a 1920, la expansión se dio entre los años 20's y 50's y su retirada fue a finales de los años 50's a 1988, con la aparición de las vacunas.

Debido a que la polio afectaba principalmente las extremidades y la etapa en que más se veía la infección era la infancia, esto provocaba en algunos casos que las extremidades afectadas presentaran un acortamiento, disimetría.

El día mundial de la poliomielitis es el 24 de octubre.

## 1.2 La polio en la actualidad.

La enfermedad provocada por el poliovirus salvaje tipo 1 (WPV1) aún es endémica de Afganistán y Pakistán. Los brotes que han surgido es debido a la Poliovirus circulantes derivados de la vacuna (cVDPV), esto se debe a que en ocasiones poco recurrentes cuando la población no se encuentra lo vacunada y a su alrededor hay otros factores de riesgo como la falta de higiene, existe la posibilidad que el virus Sabin pueda mutar o recombinarse y cambiar a poliovirus derivados de la vacuna, existen aparte de este 2 tipos de polio virus derivados de la vacuna, el Poliovirus derivados de vacuna relacionados a inmunodeficiencia (iVDPV) de este solo se han documentado 42 casos y sucedió en un escaso grupo de personas con desordenes inmunológicos raros, ya que al no ser capaces de crear una respuesta inmune, no pueden eliminar la infección intestinal por el virus vacunal y excretan poliovirus derivados



de la vacuna durante periodos prolongados y el Poliovirus derivados de vacuna ambiguos (aVDPV). [11]

Entre enero de 2020 y abril de 2022, 33 países notificaron un total de casi 1900 casos de parálisis por polio derivada de la vacuna. [12]

Las muestras encontradas en las aguas residuales de Londres, en Israel y en Nueva York son todas del virus derivado de la vacuna. Llevan la misma huella genética, lo que sugiere que el virus puede haber estado circulando sin ser detectado durante aproximadamente un año en algún lugar del mundo. Actualmente la vacuna vía Oral protege de la poliomielitis tipo 1 y 3, ya que en el 2015, se dio por erradicada el tipo 2 la OMS lo retiro de la vacuna oral en el 2016. [13]

### 1.3 Dismetría.

La disimetría de los miembros se define como la diferencia en la longitud de uno o varios segmentos de una extremidad con respecto a la otra extremidad.

Algunas de las consecuencias de una disimetría es dolor de espalda, escoliosis, artrosis. Una de las formas para tratar de una disimetría es el uso de una ortesis. [14]

La ortesis es un aparato que se coloca externamente, con el propósito de modificar las características estructurales y funcionales del sistema neuromusculoesquelético.

Existen varios tipos de ortesis uno de esos son los bitutores de marcha estos pueden ser cortos que lleguen por debajo de la rodilla o largos que van por encima de la rodilla, suelen fabricarse de aluminio, termoplástico, titanio y fibra de carbono o en combinación de estos materiales, la estructura de esta consta de dos barras laterales unidas por una articulación de



tobillo, estribo y botas, igual se juntan por semi aro posterior con una correa en forma de T para corregir el varo. [15]

#### 1.4 Ingeniería inversa.

La ingeniería inversa es el proceso mediante el cual se observa cómo está construido y cómo funciona un objeto, proceso, programa o sistema con la intención de mejorarlo.

La ingeniería inversa también consiste en el procesamiento del objeto en 3d, este proceso de captura geométrica en tres dimensiones se le conoce como digitalización 3D.

Con ayuda de herramientas CAD (Diseño Asistido por Computadora) se reconstruyen las superficies y con ellos construir un modelo 3D.

En esta digitalización se pueden utilizar herramientas como calibradores y galgas, en el caso de los objetos más complicados será necesario recurrir a técnicas más avanzadas que pueden ser el uso de un escáner laser, ultrasonido o reconocimiento de imágenes.

La ingeniería directa tiene un proceso, el cual consiste en especificaciones generales de las cuales parte el diseño y todo el proceso de ingeniería, para terminar con el producto o solución del problema.

En el caso de la ingeniería inversa esta parte del producto y con ayuda de herramientas, equipos tecnológicos se obtiene el diseño de este, el cual será modificado según las características específicas del nuevo concepto.

El proceso de la ingeniería inversa tiene dos etapas: la digitalización 3D del objeto físico y la reconstrucción de superficies mediante la aplicación de sistema CAD (Diseño Asistido por



Computadora) /CAM (Fabricación Asistida por Computadora) /CAE (Ingeniería Asistida por Computadora).

### 1.5 Deformaciones y esfuerzos.

El esfuerzo es una fuerza que actúa sobre el área unitaria en la que se aplica, existen esfuerzos de tensión, flexión, compresión y cortantes. La deformación unitaria se define como el cambio de dimensión por unidad de longitud. El esfuerzo se suele expresar en pascales (Pa) o en *psi* (libras por pulgadas cuadradas, por sus siglas en inglés). La deformación unitaria no tiene dimensiones y con frecuencia se expresa en pulgada o en cm.

La pendiente de la gráfica de deformación contra esfuerzo elásticos es lo que se conoce como módulo de Young o de elasticidad, existe también una deformación elástica.

### 1.6 Método de elemento finito.

Este método utiliza la geometría de la pieza, sometidas a cargas y restricciones, esta se divide en partes pequeñas, llamadas “elementos”, al subdividirlo en problemas más simple como elementos más pequeños permite que la computadora realice las tareas con eficiencia, los “elementos” pueden tener diversas formas como triangulares, cuadrangulares y esto va a depender del tipo y el tamaño del problema, los elementos finitos están conectados entre sí por nodos o puntos nodales, y estos con los elementos forman una malla, en este tipo de análisis entre menor sea el tamaño y mayor sea el número de elementos en una malla, los resultados serán más precisos.

Este método se suele utilizar en la resolución y diagnóstico de problemas estructurales para obtener las tensiones, deformaciones o desplazamientos, de igual forma algunas de las



variaciones del elemento finito permite hacer análisis termiónico, acústico, dinámico, electromagnético. [16]

### 1.7 Factor de seguridad.

El coeficiente de seguridad es la relación entre el esfuerzo para el que se diseña el equipo, frente a un valor de referencia al límite y da la capacidad máxima del sistema y el valor del requerimiento esperado al que se verá sometido.

Podemos obtener el factor de seguridad teniendo el esfuerzo admisible el cual es aquel esfuerzo que no debería ser excedido en el diseño de un miembro y está determinada por el esfuerzo máximo sobre el factor de seguridad:

$$\sigma_{admissible} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\text{factor de seguridad}}$$

De lo anterior podemos decir que el factor de seguridad está dado por el esfuerzo máximo sobre el admisible: [17]

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_{admissible}}$$

La elección del factor de seguridad es complicada, pero hay disposiciones reglamentarias sobre alguno de los materiales en la construcción y el coeficiente de seguridad recomendado por ejemplo para construcciones de acero su FS (Factor de Seguridad) varía entre 1.25 y 1.6 o para el hormigón armado puede variar entre 1.75 y 2.1. [18]



## 1.8 Fresadora CNC

Una fresadora CNC (Control Numérico por Computadora) funciona por control número computarizado, las partes móviles de una fresa son: mesa, cabeza de corte, husillo, carro de desplazamiento lateral, carro de desplazamiento transversal, mesa de fresado que se desplaza en los ejes X y Y, cabezal con husillo, ordenador CNC o panel de control. La velocidad de corte en una fresa CNC es importante ya que de ella depende la productividad, esta velocidad está dada por revoluciones por minuto. [19]

El control numérico es un sistema que mantiene controlada la posición de un elemento físico, esto se logra con un programa y conjunto de órdenes añadidas, el sistema CNC también controla las coordenadas de igual forma la manera en que se desplaza entre ellas.



## Capítulo 2. Ingeniería inversa en el proceso de diseño.

En este capítulo se abordará el proceso de ingeniería inversa para llevar a cabo el diseño de la plataforma, comenzando con la parametrización de la plataforma y la selección del material más óptimo para maquinarla.

### 2.1 Parametrización

Para el diseño de la plataforma se realizó un proceso de ingeniería inversa, ya que contaba con una plataforma previa que se desea mejorar y el zapato al que se debía adaptar, entonces se procedió a escanear la suela del calzado para tener la curvatura adecuada esto fue con ayuda de un Kinect, el cual cuenta con dos cámaras, una cámara RGB y otra de rango (sensor de profundidad), proyección laser, sensor CMOS de infrarrojos y cable USB para transmitir datos.

La cámara RGB tiene una capacidad de 15 fps a máxima resolución y 30 fps para una resolución aproximada a la VGA (640x480), el sensor de profundidad permite un campo de visión de 58° en horizontal, 45° en vertical y 70° diagonal, cuenta con un tamaño de imagen también de (640x480).

Posterior mente los datos son transmitidos y recopilados por el software Skanect, el cual puede adquirir información densa en 3D sobre una escena a una velocidad de hasta 30 fotogramas por segundo, captura un conjunto completo de puntos de vista y obtiene una malla 3D en tiempo real.

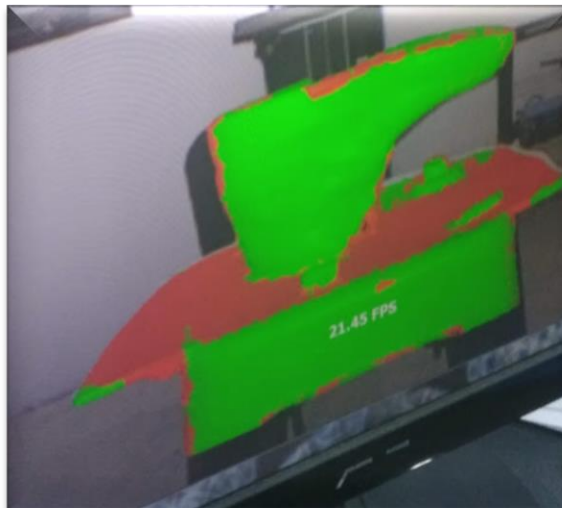


## Prototipo de plataforma para calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.



*Ilustración 1 Escaneado de zapato*

Se puede observar en la *ilustración. 1* cómo se escaneó el zapato con ayuda del Kinect, en la *ilustración. 2* se muestra la imagen 3D formada en tiempo real y por último en la *ilustración. 3* el resultado del escaneo.



*Ilustración 2 Imagen que se genera con el escáner*



*Ilustración 3 resultado final arrojado por el software*

## 2.2 Selección del material.

Para el material de la plataforma se requiere uno con baja densidad que su peso sea ligero, resistencia térmica y al desgaste, también con buenas propiedades mecánicas.

Se realizó una tabla comparativa con los posibles materiales, los cuales fueron aluminio, nylamid y caucho. En la siguiente tabla (la tabla 1) se pueden observar algunas de las propiedades a comprar de cada material como la densidad, el limite elástico a tensión y la rigidez cortante, en donde la densidad es la relación entre la masa y el volumen, el limite elástico es la tensión máxima que el material puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes, la rigidez cortante describe la deformación elástica lineal de un elemento estructural debido a la tensión tangencial o al esfuerzo cortante.



Tabla 1 Tabla comparativa de las propiedades del aluminio, nylamid SL y hule.

Material	Densidad	Modulo elástico
<b>Aleaciones de aluminio</b>	$2.7 \text{ kg/m}^3$	$70000 \text{ MPa}$
<b>Nylamid SL</b>	$1140 \text{ kg/m}^3$	$3447.379 \text{ MPa}$
<b>Caucho</b>	$1100 \text{ kg/m}^3$	$5000 \text{ MPa}$

Las aleaciones de aluminio tienen un módulo elástico de  $70000 \text{ MPa}$  [20] y una densidad de  $2.7 \text{ kg/m}^3$  [21], el nylamid SL cuenta con una densidad de  $1140 \text{ kg/m}^3$  [22] y un módulo elástico de  $3447.379 \text{ MPa}$ , el caucho tiene una densidad de  $1100 \text{ kg/m}^3$  y un modulo elástico de  $5000 \text{ MPa}$ . [23]

Se observa que el Nylamid SL tiene mayor densidad que el caucho y menor modulo elastico.

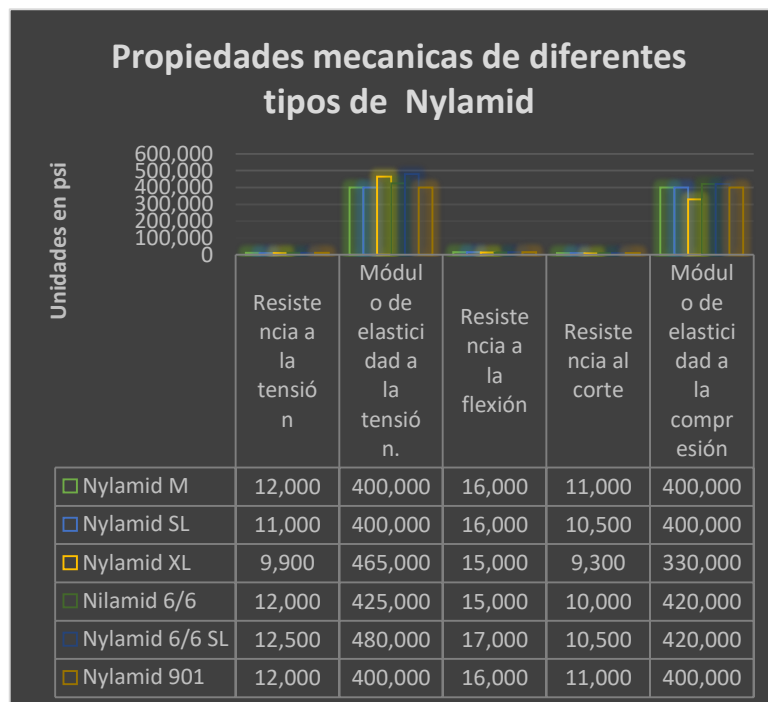


## Nylamid

Familia de las Poliamidas (PA) Nylon, algunas de sus características son:

- Gran resistencia térmica y al desgaste.
- Maquinabilidad.
- Baja densidad.
- Buenas propiedades mecánicas y eléctricas.

Gráfica 1 Propiedades mecánicas de diferentes tipos de Nylamid



Existen diferentes tipos de nylamid como el que es de color natural, gris marmoleado, color verde, color azul y el color negro (SL), este último fue el que se utilizó para el prototipo de la plataforma, está cargado con disulfuro de molibdeno.

En la *gráfica 1*, se pueden observar en comparación, algunas de las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de nylamid a 74°F [24], las unidades se encuentran en psi.



Se eligió este material por todas las propiedades que aporta, también por la presentación ya que al ser de color negro se ve elegante a diferencia de hule rígido que es con el material que se está comparado la mejora, ya que de estos materiales están realizadas las anteriores plataformas, con las que contaba la persona que fue afectada por la polio y a la cual se le hizo el prototipo de la plataforma.

También se escogió el nylamid SL ya que la viruta producida durante el maquinado se puede reciclar reduciendo los residuos, al ser un tipo de poliamida es posible utilizarla para la fabricación de ropa deportiva, calcetería, ropa interior, hilos para cocer, alfombras y tapicería, de igual forma se podría utilizar para realizar globos, la seda utilizada en paracaídas, la tela que utilizan los veleros y algunas telas para uso automotriz, prácticamente se puede reciclar equis número de veces, a diferencia del caucho o hule del que están hechas las suelas de los zapatos es un material altamente contaminante, que tarda años en degradarse y difícil de reutilizar. [25].

### 2.3 Diseño de la plataforma de calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.

Para el diseño de la plataforma se utilizó un software de CAD llamado SolidWorks. El reto presentado en este modelo fue obtener la plataforma a partir de la imagen compleja de la suela, para posteriormente, optimizar su diseño de la forma que fuera resistente, ligero y fácil de maquinar. Para conseguir eso se realizó una serie de vaciados como se muestra en la *ilustración 4*, también se dividió el modelo en dos piezas para asegurar que este se pudiera acoplar al soporte metálico sin descuidar el proceso de maquinado, en la *ilustración 5*, se puede observar el tacón de la plataforma.



## Prototipo de plataforma para calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.

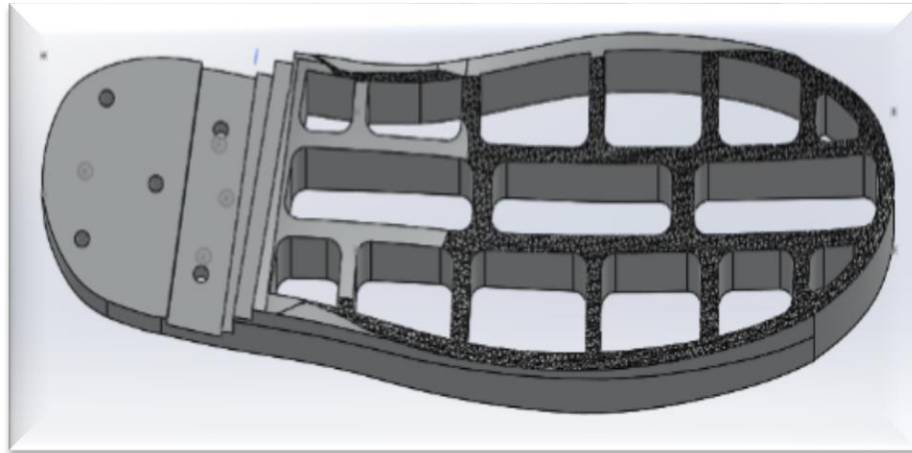


Ilustración 4 Plataforma con el vaciado.

Para lograr el ensamble óptimo de los elementos se decidió realizar una serie de tres barrenos en el tacón, de manera que permita acoplarlo con tornillos a la otra mitad de la plataforma como se pueden observar en las *ilustraciones 4 y 5*, este tipo de unión brinda la posibilidad

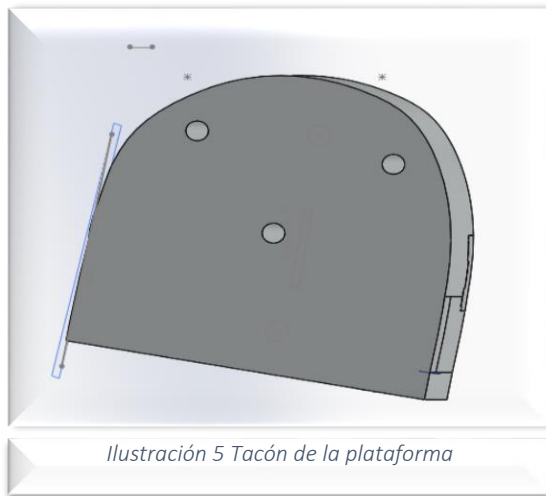


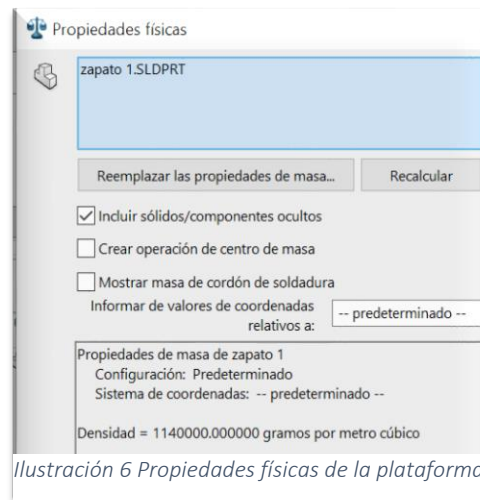
Ilustración 5 Tacón de la plataforma

de desarmar los elementos de la plataforma si en algún momento se decide cambiar el soporte metálico, ya sea por el uso o el confort.



Uno de los principales motivos por el cual se realizó este prototipo de esta forma es que la persona a la cual se le adaptara la plataforma a su calzado cuenta con una edad avanzada y su propósito era contar con un zapato ligero, resistente y que no presentara tantas deformaciones por su uso. Por ello se optó en usar el Nylamid que tiene propiedades similares al acero y al aluminio, pero a baja densidad.

El siguiente paso fue asignar las propiedades del diseño en el software CAD Solidworks, en la *ilustración 6*, se puede observar la densidad de la pieza principal.



*Ilustración 6 Propiedades físicas de la plataforma*

Para obtener este resultado fue necesario editar el material en el software de Solid Works, en la *tabla 2*, de a continuación se podrá observar los parámetros con los que se configuró el material para llevar acabo el análisis del diseño.

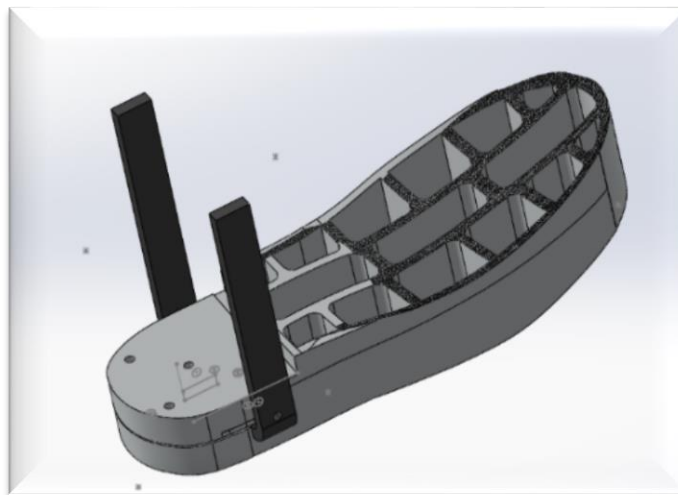


## Prototipo de plataforma para calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.

Tabla 2 Propiedades del material en SolidWorks

Propiedad	Valor	Unidades
<b>Módulo elástico</b>	2353.596	$N/m^2$
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0.39	$N/D$
<b>Densidad de masa</b>	1140	$kg/m^3$
<b>Límite elástico</b>	75.842193	$N/mm^2$
<b>Conductividad térmica</b>	2.94	$W/(m \cdot K)$
<b>Calor específico</b>	1386	$J/(kg \cdot K)$

En la *ilustración 7*, se observa en ensamble de la plataforma ya con el tacón y la solera sobrepuesta.



*Ilustración 7* Ensamble de la plataforma, tacón y solera.



### Capítulo 3. Simulaciones por elemento finito y maquinado

3.1 Simulación de deformaciones y esfuerzos por medio de análisis de elemento finito de la plataforma.

Solidworks utiliza el método de elemento finito (FEM), el cual es una técnica numérica para analizar diseños de ingeniería, el FEM divide el modelo en varias piezas pequeñas de formas simples las cuales son llamadas elementos.

Esos pequeños elementos comparten puntos comunes los cuales son denominados nodos y el proceso de división del modelo en esas pequeñas piezas es llamado mallado. [26]

La respuesta de un elemento, en cualquier momento se interpola desde la respuesta de los nodos del elemento, cada uno de los nodos se describe en detalle por un número de parámetros y estos dependen del tipo de análisis o elemento utilizado. SolidWorks realiza las ecuaciones que rigen el comportamiento de cada uno de los elementos, teniendo en cuenta la interconexión de los elementos, estas son la referencia a la respuesta de las cargas, restricciones y propiedades del material que tiene el software, posteriormente estas ecuaciones son organizadas por SolidWorks en un conjunto mayor de ecuaciones algebraicas, simultaneas y resuelve las desconocidas. [26]

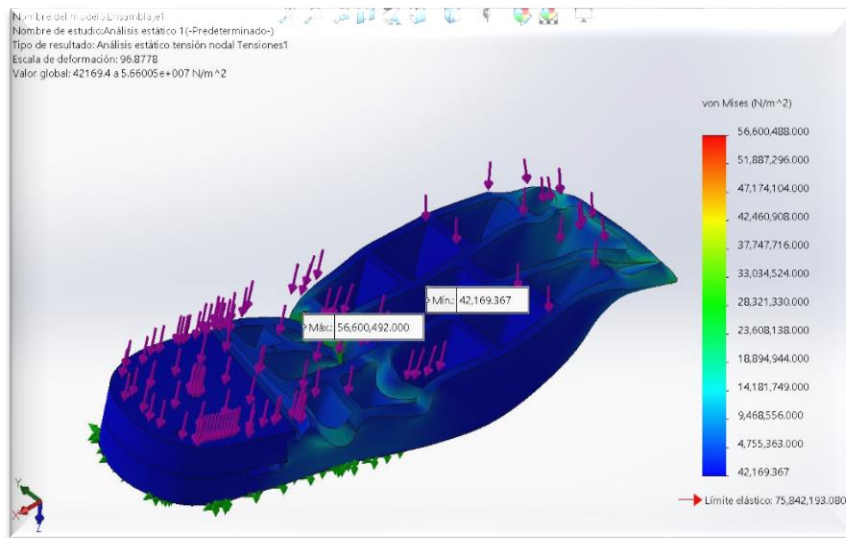
Con todo lo anterior se llevó acabo la validación del diseño utilizando el análisis de elemento finito por medio de SolidWorks para saber si la plataforma soportaría la carga de trabajo.

Como antecedentes es importante mencionar que la plataforma fue realizada para una persona en específico y su peso está en el rango de los 100 y 120 kg, debido a eso, se decidió utilizar una carga de 150 kg para asegurar que soporte el peso, tomando en cuenta que la



distribución del peso en una persona normal es diferente a una persona con alguna disimetría de extremidades inferiores, se decidió evaluar el peso total sobre la plataforma y así garantizar que soportar la carga a la cual será sometido. [27]

Como se observa en la *ilustración 8*, el resultado de elemento finito de las tensiones de von-mises, donde su límite elástico de la plataforma es de 75.8421 MPa.



*Ilustración 8* Resultado de Von Mises

En la *ilustración 9*, se observa que la mayoría de la plataforma tiene un factor de seguridad mayor a uno y esto asegura la capacidad en exceso que tiene el sistema por sobre sus requerimientos.

SolidWorks calcula el factor de seguridad dividiendo el límite elástico del material por la tensión de von mises, e indica que con un factor de seguridad menor a uno, el material en esa ubicación ha cedido y que el diseño no es seguro, como se muestra en la formula 1. [28]

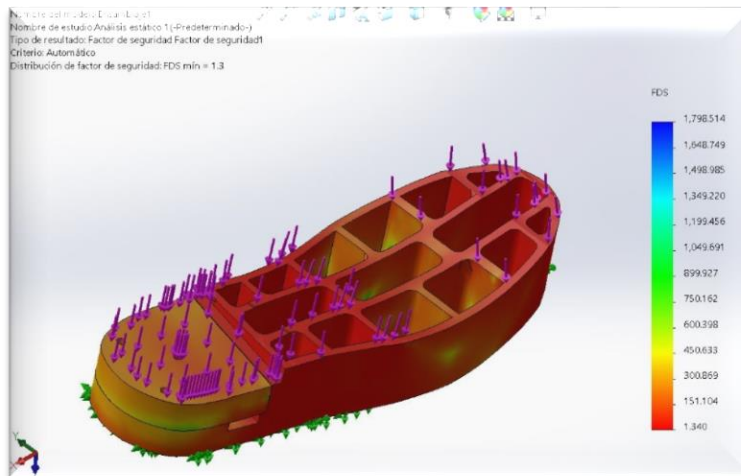
$$FS = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_y} \quad (1)$$



## Prototipo de plataforma para calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.

La tensión máxima del prototipo arrojada por solidworks es de  $56.600 \text{ MPa}$ , con lo anterior y la formula 1 tenemos que el Factor de seguridad de la pieza simulada en SolidWorks es de 1.340 como se puede observar en la *ilustración 9*.

$$FS = \frac{75.8421 \text{ MPa.}}{56.600 \text{ MPa}} = 1.340$$



*Ilustración 9 Factor de seguridad de la plataforma.*



### 3.2 Simulación del maquinado de la plataforma del calzado ortopédico.

La velocidad de corte es la velocidad a la que gira la herramienta, suele suministrarla el fabricante de la herramienta mediante tablas, la  $V_c$  varía según el material a cortar y también el trabajo mecanizado a realizar. [29]

Cuando no se tiene la información del fabricante algunas velocidades de corte orientativas para fresas helicoidales de MD (Metal Duro) son por ejemplo para aluminio:  $350\text{ RPM}$  y para plásticos  $250\text{ RPM} - 600\text{ RPM}$ . [30]

Por ejemplo, para un fresado frontal con herramienta de carburo se recomienda una profundidad de corte de  $0.060''$  y una velocidad de  $2,500\text{ RPM}$  a  $4,500\text{ RPM}$  en el fresado y de acabado/ ranurado con acero de alta velocidad con  $\frac{1}{4}''$ ,  $\frac{1}{2}''$  o  $\frac{3}{4}''$  se recomienda una profundidad de corte de  $0.250''$  y a la velocidad de  $6,500\text{ RPM}$  a  $8,000\text{ RPM}$ . [29]



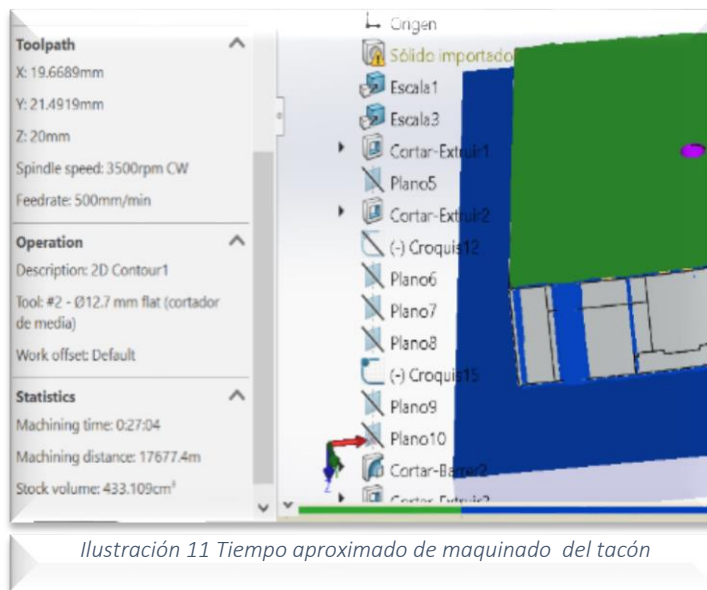
Ilustración 10 Simulación de la plataforma

Teniendo la certeza de que la pieza aguantaría las condiciones estáticas de carga, se procedió a realizar el post procesado en solidworks, para el maquinado del tacón, la velocidad del usillo fue de  $3,500\text{ RPM}$  partiendo de eso se realizó la simulación, la cual indica todos los



pasos que realizará la fresa en este caso una VF-2ss Haas, también muestra el tiempo estimado que se llevará realizando todo el proceso y la trayectoria que seguirá la pieza y la herramienta.

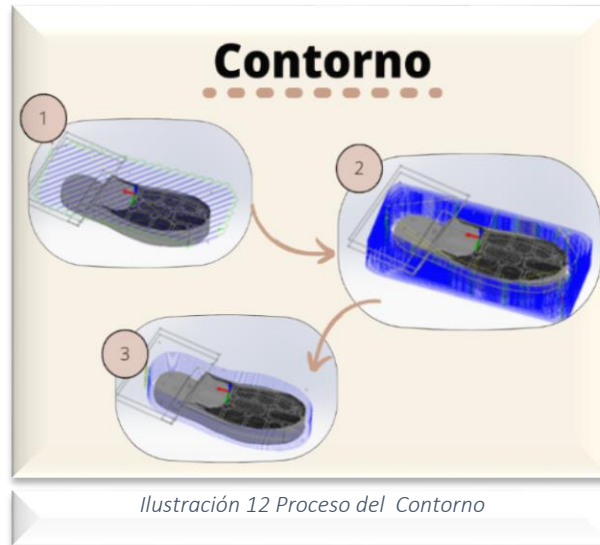
El tiempo estimado que arrojo el software que se llevaría en maquinarse el tacón que es la parte más pequeña fue de 27 minutos, como se puede observar en la *ilustración 11*, y, para la pieza principal se tuvo un estimado de 14 horas de trabajo, en la *ilustración 10*, se observa parte de su simulación del maquinado de la plataforma.



Al momento de realizar la simulación de la pieza principal se llevó a cabo la división del proceso en 4 pasos, el primero, el contorno que consistía en que tenía 3 movimientos, el primero devastar la cara superior del material, el segundo en un 2D adaptativo, para quitar el material del contorno de la plataforma y el último un 2D contur para delinear más preciso

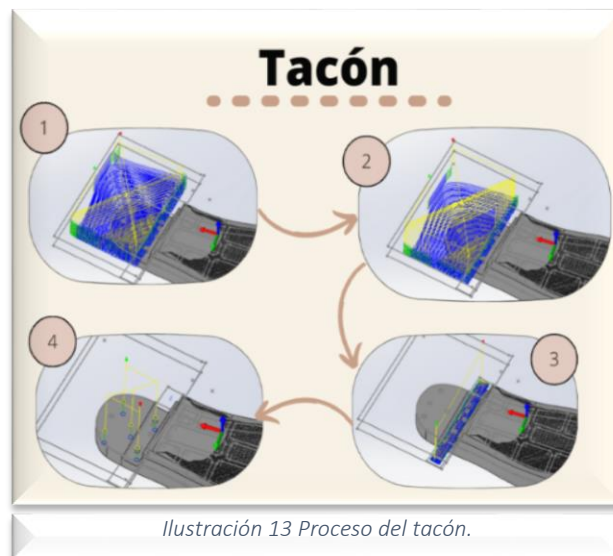


lo que se volverá el contorno final de la plataforma, lo anterior se llevó a cabo con un cortador de media con un diámetro de 0.9799” en la *ilustración 12*, se observan estos tres pasos.



*Ilustración 12 Proceso del Contorno*

La siguiente operación fue para llevar a cabo el talón este se dividió en 4 pasos un primer 2D. adaptive para el desbaste del material y tener un primer nivel, posteriormente un segundo Adaptive y hacer la parte más profunda del tacón y por último un tercer Adaptive para realizar la ranura donde se colocara la solera, el cuarto y último paso de esta sección sería un drill para los barrenos del tacón, los dos primeros Adaptive se llevaron a cabo con un



*Ilustración 13 Proceso del tacón.*



cortador de media de 0.978819 pulgadas, el tercer adaptative con un flat de 6.35 mm de diámetro, para los barrenos se utilizó un drill de 5 mm, en la *ilustración 13* se pueden observar los 4 pasos del proceso del maquinado del tacón.

El tercer proceso se le llamo cuchara que es la parte superior donde se acoplaría al zapato, el primer paso de ese proceso fue un parallel el cual se realizaría con una broca de punta de bola de media pulgada de diámetro, este primer movimiento le daría la forma de “cuchara” para que más adelante sea sencillo el acople con el zapato, posteriormente se llevó acabo otro 2D adaptive con un flat extra largo de 6.35 mm de diámetro para que este estuviera a cargo de realizar el vaciado de la parte de enfrente de la plataforma, los pasos 3 y 4 se realizaron con la misma herramienta, ya que tenían como finalidad realizar el vaciado de la parte central y trasera de la plataforma respectivamente, este proceso se puede observar en la *ilustración 14*.

El cuarto y último paso fue la simulación del el maquinado correspondiente a la parte inferior del zapato, esta debe de tener cierta curvatura, este proceso solo consta de dos partes, la

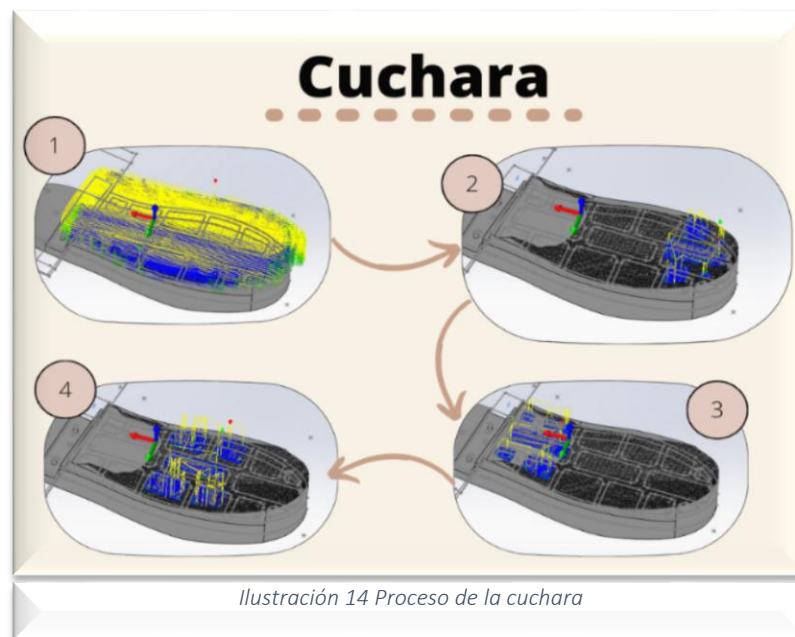
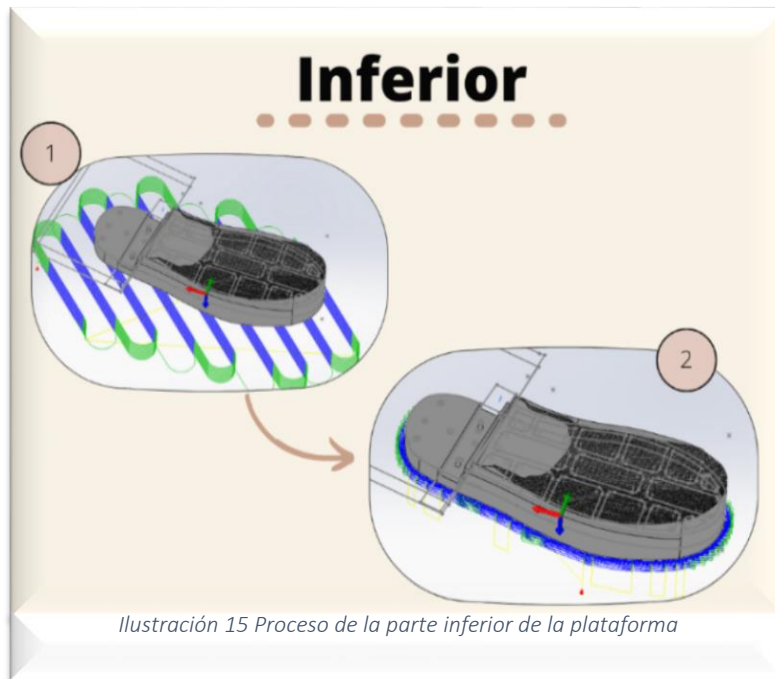


Ilustración 14 Proceso de la cuchara



primera un face para realizar un desbaste de material y terminar de ajustar la altura deseada, esto se llevó acabo con una fresa de 3 pulgadas, por último, con un parallel y la broca de punta de bola de media pulgada de diámetro, este proceso lo se observa en la *ilustración 15*





## Capítulo 4. Maquinados y Resultado

### 4.1 Maquinado de la plataforma.

Cuando se maquina plásticos como el nylamid se tiene que tomar en cuenta algunos factores como que su expansión térmica es de hasta 10 veces mayor a la de los metales, disipa el calor lentamente, se recomienda el uso de herramientas de carburo. Como una regla general, para la pieza fresada se puede aplicar una tolerancia de maquinado de 0.1% a 0.2% en la relación a su medida nominal. [29]

Para el proceso del maquinado se utilizó un bloque de Nylamid de  $10.6\text{ cm} \times 13.6\text{ cm} \times 33.8\text{ cm}$  y se llevó a cabo en 3 partes principales la primera fue el devaste de la altura y el contorno como se muestra en la *ilustración 16*, en este paso fue revisando el comportamiento del maquinado, y así asegurar que los parámetros colocados eran los adecuados para el Nylamid, el segundo paso fue el desbaste de la parte trasera de la plataforma donde posteriormente se acoplaría la otra parte del tacón y sujetar el zapato con los barrenos, también en esta etapa se procedió a realizar la parte superior, que en el proceso



*Ilustración 16 Devaste de altura y contorno de la plataforma.*



de simulación se le denominó “cuchara” ya que ésta es donde se acoplará a la suela del zapato, y se puede ver en la *ilustración 17*, dejando como tercer paso la realización de barrenos



*Ilustración 17 Maquinado del tacón y la parte superior*

del tacón, para barrenos pequeños menores a una pulgada se sugiere el uso de brocas de acero de alta velocidad [29], lo siguiente fue llevar a cabo el vaciado de la plataforma, recordando que esta parte del proceso es importante para quitarle peso y hacer el producto final más ligero, el resultado de este proceso se puede observar en la *ilustración 18*.

Una vez teniendo la forma de la plataforma y el vaciado se retiró la pieza, como paso final se tuvo que volver a montar de tal forma que se pudiera llevar a cabo el maquinado de la suela de la plataforma, esto se hizo con la finalidad que la parte inferior se asemejara lo más posible a la suela de cualquier zapato, con cierta curvatura y brindar un mayor confort al momento de llevarlo puesto, para esto se tuvo que asegurar la pieza con cable como se muestra en la *ilustración 19*, fue necesario perforar la plataforma para poderla sujetar y evitar que durante el maquinado se moviera.



## Prototipo de plataforma para calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.



*Ilustración 18 Vaciado de la plataforma y barrenos del tacón.*



*Ilustración 19 Maquinado de la suela.*

La última parte del maquinado fue la segunda pieza de la plataforma, la cual consistía en el tacón, que se acoplaría a con ayuda de los barrenos, para juntar la solera, esa parte del maquinado se realizó con un bloque de Nylamid SL de  $10\text{ cm} \times 12.62\text{ cm} \times 31.8$  y el tiempo estimado de maquinado arrojado por SolidWorks fue de 27.04 minutos.



#### 4.2 Resultados.

En la *ilustración 20* se observa la comparación entre el zapato que se imprimió en filamento 3D previo al maquinado para corroborar que la curva fuera la correcta.



*Ilustración 20 Plataforma impresa en 3D / Plataforma realizada con Nylamid*

Con la finalidad de comparar la plataforma del zapato diseñado y maquinado, con respecto al zapato previamente usado por el mismo usuario. Se tuvo acceso a dos zapatos realizados por zapateros, uno fue el zapato 1, cuya antigüedad es de 13 años y que fue usado por 9 años y el zapato 2 con antigüedad de 3 años y que fue usado en todo ese periodo.



*Ilustración 21 Zapato 1 con plataforma de hule rígido*



## Prototipo de plataforma para calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.

El zapato 1, que es aproximadamente de 2.5 Kg, el zapato 2, que es el que usaba recientemente y sustituido por el prototipo tiene un peso de aproximado de 1.9 Kg y finalmente el zapato 3, el prototipo diseñado, presenta un peso aproximado de 1.7 Kg, como se puede observar en las *ilustraciones 21, 22 y 23* respectivamente.



*Ilustración 22 Zapato 2 con plataforma de Hule suave*

Es importante destacar según los relatos del usuario, que el zapato 1, lo dejó por el peso, ya que le resultaba muy cansado cargarlo cada pisada y también porque presentó deformaciones sobre la suela dura de goma donde se localiza el soporte metálico que soporta el aparato



*Ilustración 23 Zapato 3 Plataforma con Nylamid SL*



## Prototipo de plataforma para calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.

ortopédico. En el caso del zapato 2, el usuario solicitó al zapatero que le elaborara otro zapato, pero más ligero, y, de hecho lo fue, pero al medio año empezó a presentar deformaciones, ya que el material de la suela es más suave provocando deformaciones enormes que llegó a modificar en su totalidad la plataforma, y para que pudiera ser utilizado, el usuario tuvo que colocarle calzas a lo largo de los años, en la *ilustración 22*, se pueden observar dichas calzas que son aproximadamente 4 y como estas fueron puestas para evitar que la solera se vaya hacia abajo y se sostenga a la altura adecuada.



En el caso de zapato 1 y 2, se presentó repetidamente que la barra metálica deformará y rompiera el hule provocando holgura mecánica entre el soporte y la suela, provocando una lesión en la rodilla con deformación ósea de la pierna y esto termino ocasionando problemas al usuario, la necesidad de una plataforma que fuera menos pesada y más resistente era algo primordial para asegurar la comodidad y la salud del usuario. En el caso de zapato 3, el cual



## Prototipo de plataforma para calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.

se muestra en la *ilustración 25*, el actualmente en uso, se supone que la durabilidad superará fácilmente los zapatos anteriores, debido al uso de materiales resistentes, con alta durabilidad al desgaste y principalmente ligero. Comparando los tres zapatos se puede notar que el diseño propuesto logra un mejor peso sin descuidar la rigidez y evitando las deformaciones que hacen que la rodilla se lesione. La retroalimentación del usuario después de utilizar el zapato diseñado es que la plataforma lo hace sentir más seguro a la hora de caminar, además de ser cómoda, fácil de limpiar, con excelente estética y resistente a condiciones ambientales. Se pueden apreciar algunas imágenes del zapato usado por el usuario y la comparación de los tres zapatos en la *ilustración 24*.



*Ilustración 25 Zapato 3 en uso con suela Nylamid SL*

El usuario de la plataforma ya tiene desde el 2020 utilizándola, este tiempo es 4 veces mayor a los meses que tardo la segunda plataforma en mostrar deformaciones, lo cual no da un buen estimado del comportamiento que el material está teniendo, con respecto al uso de los zapatos anteriores.



## Prototipo de plataforma para calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.

A parte de mejorar el peso del calzado, otro es al momento de realizar el proceso era asegurar que el usuario pudiera elegir el calzado que más le gustara y acomodara, ya con el zapato elegido a gusto, también se brinda seguridad y mayor conformidad al momento de usarlo, los dos zapatos previos eran exclusivamente de uso ortopédico, darle la libertad al usuario de seleccionar su propio calzado y de ahí partir con el proceso de ingeniería inversa, brinda una mejor experiencia de uso.



#### 4.3 Anexo

Este proyecto se presentó en el primer encuentro estatal de jóvenes investigadores 2019, realizado a principios noviembre del mismo año, consiguiendo una publicación del artículo en la revista HUMANIDADES, CIENCIA, TECNOLOGÍA

E INNOVACIÓN EN PUEBLA, la publicación del artículo se puede observar en la parte de anexos en el anexo 1.



## Anexos

Anexo 1 Publicación del artículo.

### HUMANIDADES, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN EN PUEBLA

ACADEMIA JOURNALS



OPUS PRO SCIENTIA ET STUDIUM

ISSN 2644-0903 online  
VOL. 2, NO. 1, 2020

[WWW.ACADEMIAJOURNALS.COM](http://WWW.ACADEMIAJOURNALS.COM)

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN AUSPICIADO POR EL CONVENIO CONCYTEP-ACADEMIA JOURNALS



GAHONA CASTILLEJOS LUZ ELISA

PROTOTÍPO DE PLATAFORMA PARA CALZADO ORTOPÉDICO PERSONALIZADO PARA  
POLIOMIELITIS

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

COORDINADOR: M.C APARICIO RAZO MANUEL

NÚMERO DE SECUENCIA 2-2



Prototipo de plataforma para calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.



**Benemérita Universidad Autónoma  
de Puebla.**

*Facultad de Ciencias de la Electrónica.*

Prototipo de plataforma para calzado  
ortopédico personalizado para poliomielitis.

**Autor: Gahona Castillejos Luz Elisa.**  
**Coordinador: M.C Aparicio Razo Manuel**

Fecha de aprobación: 30/10/2019



## Prototipo de plataforma para calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.

Luz Elisa Gahona Castillejos<sup>1†</sup>, Emilio Francisco Alonso Hernández<sup>1†</sup>, Pablo Romano Carranza<sup>1†</sup>, Juan Carlos Rojas Bravo<sup>1</sup>, Miguel Angel Morales Carmona<sup>1</sup>, Manuel Aparicio Razo.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla-Ciudad Universitaria, Blvd. Valsequillo y Esquina, Av. San Claudio s/n, Col. San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue, México.

### Resumen.

*Este trabajo presenta el diseño, la validación con elemento finito, la simulación del maquinado realizado con el software CAD SolidWorks® y el maquinado de una plataforma ortopédica de nylamid SL acoplable a un calzado de una persona con secuelas de poliomielitis.*

### PALABRAS CLAVE

*Poliomielitis, ortesis, análisis de elemento finito, maquinado, Nylamid SL.*

### ABSTRACT

*This work presents the design, the validation with finite element, the simulation of the machining carried out with the CAD SolidWorks® software and the machining of an orthopedic platform of nylamid SL that can be attached to a person's footwear with polio sequelae.*

### KEY WORDS

*Poliomyelitis, orthosis, finite element analysis, machining, Nylamid SL.*

### INTRODUCCIÓN

La poliomielitis es una enfermedad altamente contagiosa provocada por un virus que invade el sistema nervioso y puede causar parálisis en cuestión de horas. Esta se transmite de persona a persona por vía fecal-oral y a veces con menos frecuencia a través de un vehículo como el agua y los alimentos contaminados y se multiplica en el intestino (OMS, 2019). La poliomielitis tuvo su auge a finales del siglo XIX, entre los años 1880 a 1920, la expansión se dio entre los años 20's y 50's y su retirada fue a finales de los años 50's a 1988 con la aparición de las vacunas. Una de cada 200 infecciones produce una parálisis irreversible generalmente en las piernas, esta enfermedad afecta sobre todo a los niños menores de 5 años (OMS, 2019).

La poliomielitis ataca generalmente los miembros inferiores y los músculos, es decir, la tibial anterior, peroneos, tibial posterior, extensor común de los dedos del pie, cuádriceps, tríceps sural, glúteos, musculo del tronco, deltoides, músculos del brazo, ante brazo y mano (Rosa-Perez, 2000). Las secuelas permanentes son las que aparecen después de un año del episodio agudo, y son imposibles que presenten una recuperación debido a la parálisis. La fibra muscular de nervadas se atrofian y son sustituidas por tejido fibrocolageno y adiposo, Las fibras musculares indemnes al contrario pueden aumentar de volumen por hipertrofia compensatoria (Rosa-Perez, 2000). Debido a que la enfermedad ataca en la etapa infantil puede producir el acortamiento del miembro paralizado, gracias a la hipoplasia del esqueleto, esta debido a la inactividad del miembro que quedó paralizado (Berg, 1949).

Los casos provocados por poliovirus salvaje han disminuido en más de un 99%, de los 350,000 estimados en 1988 a los 33 notificados en 2018. (Aylward, 2000). Se han evitado más de 16 millones de casos de parálisis como resultado de los esfuerzos mundiales por erradicar la enfermedad (Bart, 1996). En México, el primer brote de poliomielitis se presentó en Veracruz en 1946 y el último fue registrado en el año 1990 en Jalisco. Según datos oficiales, en México se presentaron entre 1200 a 1300 casos de poliomielitis tipo poliovirus silvestre serotipos I y II solo entre los años 1986-1987. A partir del año posterior se generó una iniciativa para la erradicación a nivel mundial incluyendo nuestro país (Gonzales-Rubio, 2019 Abril).

Con los datos anteriores podemos analizar que los brotes de esta enfermedad en México se dieron entre los años 40's y 80's, lo que da como resultado que actualmente existan en la población personas con estas secuelas. Dicho de otra manera, el rango de edad de los afectados oscila entre 76-29 años, donde la mayoría se encuentra con una edad mayor de 39 años. Si consideramos que hoy en día la población económicamente activa en México se encuentra entre los 15 a los 75 años (Peralta, 2010) nos indica que estas personas son ciudadanos con un alto



## Prototipo de plataforma para calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.

potencial económico para la sociedad, lo que sugiere que deben contar con dispositivos ortopédicos de la más alta calidad que faciliten sus actividades diarias.

Una de las principales secuelas, como ya se abordó, es la atrofia muscular en las extremidades provocando el acortamiento de dicho miembro obligando al afectado a utilizar un aparato ortopédico que le permita caminar con mayor facilidad, las ortesis antiguas son muy pesadas y rígidas. Para las personas de mayor edad este tipo de aparatos les dificulta mucho el movimiento ya que al tener peso extra provoca un cansancio y otros problemas de salud (Gordedo Silva, 2015)

### METODOLOGÍA

Para llevar a cabo la plataforma primero se eligió el material a utilizar, este necesitaba cumplir con unas buenas propiedades mecánicas y que sobretodo tuviera baja densidad y soportara el maquinado por lo cual se decidió trabajar con el Nylamid SL. El Nylamid es de la familia de las Poliamidas (PA) Nylon, algunas de sus características son:

- Gran resistencia térmica y al desgaste
- Maquinabilidad
- Baja densidad
- Buenas propiedades mecánicas y eléctricas

Existen diferentes tipos de Nylamid como el que es de color natural, gris marmoleado, color verde, color azul y el color negro (SL), este último fue el que se utilizó para el prototipo de la plataforma, está cargado con disulfuro de molibdeno. Podemos observar en la Tabla 1 que el Nylamid SL usado cuenta con una densidad más baja que el hule para la suela que se había estado usando sin contar que su esfuerzo a compresión es alto, asegurando que va aguantar el peso de la persona que lo utilizara. Se escogió este material por todas las propiedades que aporta, también por la presentación ya que al ser de color negro se ve elegante a diferencia de hule rígido que es con el material que se está comparado la mejora, ya que de este material están realizadas las anteriores plataformas que tenía la persona que fue afectada por la polio y a la cual se le hizo el prototipo de la plataforma.

#### *Diseño de plataforma ortopédica*

Para el diseño de la plataforma se realizó un proceso de ingeniería inversa, ya que contaba con una plataforma previa que se quería mejorar y el zapato al que se debía adaptar, entonces se procedió a escanear la suela del calzado para tener la curvatura adecuada, esto fue con ayuda de un programa llamado Skanect, este software es capaz de convertir una cámara especial en un escáner 3D.

Podemos observar en la Fig. 1 como se escaneo el zapato, en la Fig. 2 la imagen en 3d que se estaba formado y por último en la Fig. 3 el resultado final del escaneo.



Fig.1 Escaneado del zapato

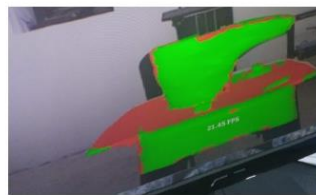


Fig.2 Imagen que se genera con el escáner



Fig.3 resultado final arrojado por el software

Después de realizar el escaneo de la suela del zapato, se efectuó el diseño de la plataforma por medio de programa CAD SolidWorks. Un reto importante en el diseño, fue obtener la plataforma a partir de la superficie compleja de la suela y optimizar el diseño de tal forma que fuera resistente, ligero y fácil de maquinar. Para lograr eso se realizó una serie de vaciado en la pieza como se muestra en la fig.4 y además se llevó a cabo una partición el modelo en dos piezas para que se pudiera acoplar el soporte metálico sin descuidar el proceso de maquinado rápido. En la fig. 5 y fig. 6 se pueden apreciar los detalles del diseño. Para lograr el acople de los elementos se decidió hacer uso de tornillo para garantizar un buen ajuste, para ellos se realizaron una serie de



## Prototipo de plataforma para calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.

barrenos. Otro fin de usar este tipo de unión es que brinda la posibilidad de desarmar los elementos de la plataforma si en algún momento dado el usuario decide cambiar el zapato o el soporte metálico.

Uno de los motivos por el cual se realizó este prototipo fue principalmente a que la persona que usará el zapato cuenta con edad avanzada y su fin era contar con un zapato ligero, resistente y que no presentará deformaciones por el uso. Por ello se optó en usar el material Nylamid que tiene propiedades similares al acero y aluminio, pero a una baja densidad. Después de asignar las propiedades de este material al diseño CAD, se logró que la plataforma tuviera un peso de 1055.18 gramos lo que es un logro, ya que se tiene ligereza y resistencia en un solo material.

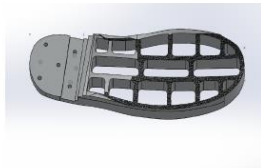


Fig. 4  
Plataforma

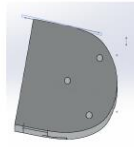


Fig. 5 tacón

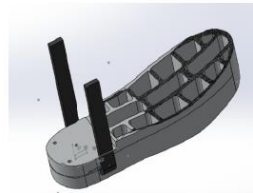


Fig. 6 Ensamble de la plataforma,  
tacón y solera.

### Validación por elemento finito

El siguiente paso que se llevó a cabo fue la validación del diseño utilizando un análisis del elemento finito por medio del mismo software para saber si la plataforma soportaría la carga de trabajo. Como antecedente es importante mencionar que la plataforma fue realizada para una persona en específico y su peso está en el rango de los 100 y 120 kg, debido a eso, se utilizó una carga de 150 kg para asegurar que soporte el peso.

Cabe señalar que la distribución de peso en una persona normal es diferente a una con discapacidad, por ello se evaluó el peso total sobre la plataforma, para así garantizar que soporta la carga a la cual va a ser sometido (Boza, 2007).

Podemos observar en la Fig.7 el resultado del elemento finito de las tensiones de von-mises y en la Fig.8 se aprecia que todo el zapato tiene un factor de seguridad mayor a uno y esto asegura la capacidad en exceso que tiene el sistema por sobre sus requerimientos.

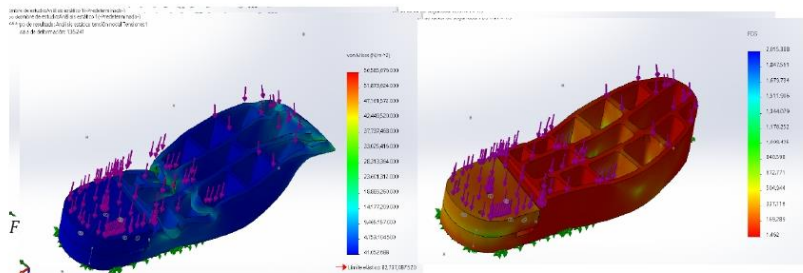


Fig. 7 Resultado de Von mises

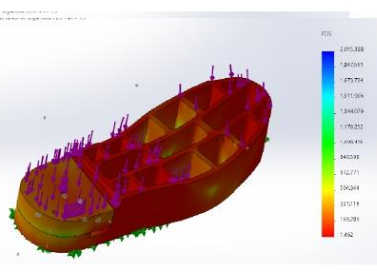


Fig. 8 Resultado del Factor de seguridad

### Post procesado y maquinado de plataforma

Teniendo la certeza de que la pieza aguantaría las condiciones estáticas de carga, se procedió a realizar el post procesado en solidworks, para el maquinado, las velocidades se tomaron como si se estuviera maquinando aluminio partiendo de eso se realizó la simulación, la cual nos indica todos los pasos que realizara la fresa en este caso una VF-2ss Haas, también muestra el tiempo estimado que se llevara realizando todo el proceso y la trayectoria que seguirá la pieza y la herramienta.



## Prototipo de plataforma para calzado ortopédico personalizado para poliomielitis.

El tiempo estimado que arroja el software que se llevaría en maquinado el tacón que es la parte más pequeña fue de 27 minutos como observamos en la fig. 9 a), mientras que el tiempo estimado de la pieza principal que es la plataforma es de unas 14 horas, en la fig.9 b) podemos observar la simulación del maquinado de la plataforma. Después de llevar a cabo todas las simulaciones y el post procesado se procedió a realizar el maquinado, esto se desarrolló en diferentes partes, primero fue colocar el rectángulo de nylamid y asegurarlo para que durante el maquinado no se moviera, de ahí lo segundo fue sacar todos los ceros pieza, posteriormente a eso se cargó el programa que genero Solid Works y se prosiguió a correr el programa y con ello a maquinado la pieza.

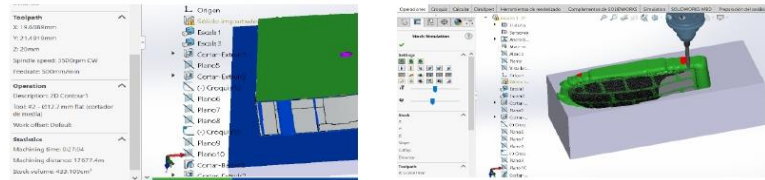


Fig. 9 a) tiempo estimado del maquinado tacón / b) simulación del maquinado de la parte

Podemos observar en las Fig. 10, 11 y 12 el proceso que realizo la máquina para realizar la plataforma comenzando primero con la altura y el contorno, prosiguiendo con la parte trasera, y la superior que va al calzado dejando como ultimo los barrenos del tacón y el vaciado de la plataforma. En las Fig. 13 se puede observar la comparación entre el zapato que se mandó a imprimir en filamento en 3D para corroborar que la curva fuera la correcta para el calzado y el realizado con el Nylamid.



Fig. 10 Maquinado del contorno de la plataforma



Fig. 11 Maquinado de la parte cóncava de la plataforma

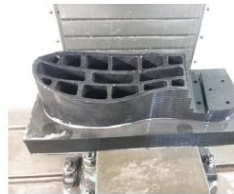


Fig. 12 Maquinado finalizado ya con el vaciado.



Fig. 13 Plataforma impresa en 3D / Plataforma maquinada

## RESULTADOS

Con la finalidad de comparar la plataforma del zapato diseñado y maquinado se comparó este con respecto a zapatos previamente usados por el mismo usuario. Se tuvo acceso a 2 zapatos realizados por zapateros, uno fue el zapato 1 cuya antigüedad es de 13 años y que fue usado por 9 años y el zapato 2 con antigüedad de 3 años y que fue usado por 3 años. En las Fig. 14-16, se aprecia que el peso del zapato 1 que es aproximadamente de 2.5 Kg, el zapato 2 "que es el que usaba más recientemente y sustituido por nuestro prototipo" tiene un peso de aproximado de 1.9 Kg y finalmente el zapato 3, nuestro prototipo, presenta un peso aproximado de 1.7 Kg.



Fig. 14 Zapato1/huele más rígido / con un peso aproximado a 2.5 kg

Es importante destacar según los relatos del usuario, que el zapato 1 lo dejó por el peso, ya que le resultaba muy cansado cargarlo cada pisada y también porque presentó deformaciones sobre la suela dura de goma donde se localiza el soporte metálico que soporta el aparato ortopédico. En el caso del zapato 2, el usuario solicitó al zapatero que le elaborara otro zapato, pero más ligero, y de hecho lo fue, pero al medio año empezó a presentar deformaciones, ya que el material de la suela es más suave provocando deformaciones enormes que llegó a modificar en su totalidad la plataforma.



Fig. 16 Zapato 3 / Nylamid SL/ con un peso de 1.697 Kg.

En el caso de zapato 1 y 2 se presentó repetidamente que la barra metálica deformará y rompió el hule provocando holgura mecánica entre el soporte y la suela, provocando una lesión en la rodilla con deformación ósea de la pierna.



Fig. 15 Zapato 2 / material menos denso / con un peso aproximado 1.9 Kg

En el caso de zapato 3 el cual se muestra en la Fig. 18, que actualmente está en uso, suponemos que la durabilidad superará fácilmente los zapatos anteriores, debido al uso de materiales resistentes, con alta durabilidad al desgaste y principalmente ligero. Comparando los 3 zapatos se puede notar que nuestro diseño logra un mejor peso sin descuidar la rigidez y evitando las deformaciones que hacen que la rodilla se lesione. La retroalimentación del usuario después de utilizar el zapato diseñado es que la plataforma lo hace sentir más seguro a la hora de caminar, además de ser cómoda, fácil de limpiar, con excelente estética y resistente a condiciones ambientales. Se puede apreciar algunas imágenes del zapato fabricado usado por el usuario y la comparación de los tres zapatos en la Fig. 17.



Fig. 17 Comparación de los calzados en el siguiente orden Zapato 1 / zapato2 / Zapato 3



Fig. 18 Zapato 3 en uso.

## DISCUSIÓN

La plataforma es una forma de poder darle una opción para las personas que necesiten calzados con alturas diferentes, dándoles la oportunidad de poder escoger el calzado que más sea de su agrado, ya que al ser realizada con ingeniería inversa esta se puede adaptar prácticamente a cualquier zapato, de igual manera gracias a los resultados obtenidos con SolidWorks y el análisis de elemento finito, se puede comprobar que el material es capaz de soportar un peso considerado, asegurando con ello mayor tiempo de vida del calzado, también haciendo que la plataforma pese menos que los modelos expuestos previamente, hace que el calzado sea más ligero y con ello más cómodo de llevar.

## CONCLUSIÓN

El diseño y fabricación de la plataforma se podría catalogar en este momento como un proyecto altruista, ya que de este prototipo no se obtuvo beneficio económico, pero al analizar los costos, beneficios y satisfacción social, podemos ver la necesidad y oportunidad de la apertura a una nueva industria de un sector totalmente olvidado en el país. Gracias al uso del diseño y maquinado computacional y los conocimientos de ingeniería es posible dar esperanza a estas personas y ofrecerles productos con mayor calidad a un costo accesible y a corto tiempo.



## Referencias

- [1] OMS, 22 Julio 2019. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/poliomielitis>.
- [2] J. H. Rosa-Perez, «Cirugía : II cirugía ortopédica y traumatología,» Lima, UNMSM, 2000, pp. 389-395.
- [3] R. H. Berg, La lucha contra la poliomeilitis, Nova, 1949.
- [4] R. B. H. H. F. C. S. L. S. R. W. O. J. M. & M. B. Aylward, «Disease eradication as a public health strategy: a case study of poliomyelitis eradication. Bulletin of the World Health Organization,,» 2000.
- [5] K. J. F. J. & P. P. Bart, «Global eradication of poliomyelitis: benefit-cost analysis. Bulletin of the World Health Organization,,» 1996, pp. 74, 35.
- [6] R. Gonzales-Rubio, «La Poliomielitis y su erradicación en México y las Américas Reto histórico de salud hecho realidad.,» *Revista Médico-Científica de la Secretaría de Salud Jalisco*, 2019 Abril.
- [7] E. Peralta, «Perspectiva laboral en México, 2008-2030. Comercio Exterior ,60(3),,» pp. 195-208., 2010.



- [8] M. Gordedo Silva, « Las consecuencias de la poliomielitis.,» 2015.
- [9] S. A. Vitrain, «La poliomielitis y sus efectos tardios; el caso de México,» Puerto Vallarta, 2014.
- [10] O. P. d. S. (OPS), «Paho,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.paho.org/es/temas/poliomielitis>.
- [11] Fernando Revilla, «OPS/OMS | Ayuda Memoria - Tipos de poliovirus derivados de vacunas,» 2012. [En línea]. Available: [https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com\\_content&view=article&id=7038:2012-aide-memoire-types-vaccine-derived-poliovirus-vdpv&Itemid=0&lang=es#gsc.tab=0](https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=7038:2012-aide-memoire-types-vaccine-derived-poliovirus-vdpv&Itemid=0&lang=es#gsc.tab=0).
- [12] J. C. P. C. C. B. J. J. G. T. A. O. S. G. W. J. F. V. Audrey Rachlin, «Progress Toward Polio Eradication — Worldwide, January 2020–April 2022,» 13 Mayo 2022. [En línea]. Available: [https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/71/wr/mm7119a2.htm?s\\_cid=mm7119a2\\_w](https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/71/wr/mm7119a2.htm?s_cid=mm7119a2_w).
- [13] T. N. Y. Times, «La polio estaba erradicada en casi todo el mundo. Pero este año reapareció,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.nytimes.com/es/2022/08/19/espanol/polio-casos-vacuna.html>.
- [14] J. d. Pablos, «Dismetrías de los miembros inferiores,» *MBA institute*, pp. 2,9, 2015.



- [15] Ortosur, «Bitutores de Marcha,» 19 12 2017. [En línea]. Available: <https://www.ortosur.es/catalogo-de-productos/ortesis/bitutores-marcha/bitutores-de-marcha/>.
- [16] G. Mirlisenna, «¿Qué es el método de elementos finitos y cómo es utilizado en la simulación?,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/#:~:text=El%20m%C3%A9todo%20propone%20que%20un,tipo%20y%20tama%C3%B1o%20del%20problema..>
- [17] R. W. Fitzgerald, Mecanica de materiales, México: Alfaomega, Octubre 2007.
- [18] A. M. M. M., Resistencia de materiales Aplicada, La Paz Bolivia: Yucatán Hermosa..
- [19] «HELLER - Maquinaria,» Fresadora CNC funcionamiento y características - HELLER - Maquinaria, 13 1 2022. [En línea]. Available: <https://www.hellermaquinaria.com/fresadora-cnc-funcionamiento-y-caracteristicas/>.
- [20] J. Gordon, Estructuras o Porque Las Cosas No Se Caen, Madrid: Calamar ediciones, 2004.
- [21] A.-S. S.A, «Aluminio, Información técnica, historia y propiedades · Alu-Stock S.A.,» Alustock, 2023. [En línea].



- [22] P. |. A. Levinson, «Aceros Levinson | Aceros | Plásticos | Metales,» 22 05 2010. [En línea]. Available: <https://www.aceroslevinson.com/plasticos/nylamid/propiedadesprincipales/>.
- [23] Material-properties.org, 2023. [En línea]. Available: <https://material-properties.org/es/caucho-densidad-resistencia-punto-de-fusion-conductividad-termica/>.
- [24] LEVINSON, «Aceros levinson,» [En línea]. Available: <https://www.aceroslevinson.com/plasticos/nylamid/propiedadesprincipales/>.
- [25] T. Panamericanos, Marzo 2005. [En línea]. Available: <https://textilespanamericanos.com/textiles-panamericanos/articulos/2005/03/la-poliamida-una-fibra-versatil-para-textiles-de-alta-calidad/>.
- [26] «SolidWorks,» 10 2022. [En línea]. Available: [https://help.solidworks.com/2016/spanish/solidworks/cworks/c\\_Basic\\_Concepts\\_of\\_Analysis.htm#:~:text=El%20software%20utiliza%20el%20M%C3%A9todo,para%20ser%20implementado%20en%20computadoras..](https://help.solidworks.com/2016/spanish/solidworks/cworks/c_Basic_Concepts_of_Analysis.htm#:~:text=El%20software%20utiliza%20el%20M%C3%A9todo,para%20ser%20implementado%20en%20computadoras..)
- [27] R. D. E. B. R. M. E. M. J. M. T. M. .. & E. F. Boza, «Estudio baropodométrico en el hemipléjico vascular: relación con la discapacidad, equilibrio y capacidad de marcha. Rehabilitación,» *41(1)*, pp. 3-9., 2007.



- [28] «Guía del estudiante para el aprendizaje del software SolidWorks ®,» [En línea]. Available: [https://www.solidworks.com/sw/docs/student\\_wb\\_2011\\_esp.pdf](https://www.solidworks.com/sw/docs/student_wb_2011_esp.pdf). [Último acceso: 2023].
- [29] M. a. materials, «Plásticos de la ingeniería, Guía técnica,» [En línea]. Available: [https://media.mcam.com/fileadmin/quadrant/documents/QEPP/MX/MCAM-ENGG-Guia-Tecnica-Nylamid-ES-LIT-201117\\_01.pdf](https://media.mcam.com/fileadmin/quadrant/documents/QEPP/MX/MCAM-ENGG-Guia-Tecnica-Nylamid-ES-LIT-201117_01.pdf).
- [30] «Velocidad de corte y de avance en fresadora CNC: como calcularlas fácilmente,» 12 4 2021. [En línea]. Available: <https://tecnocorte.com/blog/fresadora-cnc-calcul-velocidad-de-corte-y-de-avance/>.
- [31] «Industrial (Bandas, Mangueras, Poleas),» Gates.com.mx, 2023. [En línea]. Available: <http://gates.com.mx/seccion044680.html?subseccion=44&segundonivel=103>.