

Práctica 5: Optimización de una prótesis de un pie

Brigada: 109

Emanuel Salas de León 1854873
Jason Méndez Muñoz 1889560
Jesús Mario Duarte Salinas 1907630
Lorena Alejandra Campos Carrazco 1909279
Yair Obed Morales Ortiz 1992266

14 de noviembre de 2022

1. Marco Teórico

En el diseño de optimización de la topología de la prótesis de un pie, el objetivo principal es minimizar el peso de la prótesis, al tiempo que se garantiza su funcionalidad. El proceso de optimización implica variar la topología, o la forma general, de la estructura para encontrar la configuración que mejor cumpla con los objetivos de diseño.

La optimización de topología es un tipo de optimización utilizada en ingeniería que se enfoca en encontrar la topología óptima o la estructura general de un producto o estructura. La tarea de la optimización topológica es reducir el peso del producto o de la estructura, al mismo tiempo que se garantiza que se determinen todos los demás parámetros, como la resistencia, la rigidez, la carga, los materiales y el diseño.

La optimización topológica se realiza por el diseño generativo, este se realiza por el método de elementos finitos para poder hacer la optimización de manera fácil y controlable. El método de elementos finitos se basa en la idea de construir un objeto complicado con formas simples o dividir un objeto complicado en piezas más pequeñas y manejables. Porque la geometría de la pieza, sometida a cargas y restricciones, se subdivide en partes más pequeñas, al subdividirse en problemas más simples.

2. Desarrollo

2.1. Nombre y definición de la forma GEOMETRIA

Existen las prótesis de pie y las prótesis parciales de pie, las segundas son aparatos que tienen la función de reemplazar la pérdida de una sección del pie, ya sea el antepié, dedos, talón, etc. que han sido amputados por causas como accidentes, enfermedades o cualquier condición de agnesia en la cual sea necesario reemplazarlos. Estas prótesis tienen funciones indispensables para el cuerpo humano, desde cuestiones meramente estéticas hasta brindar un apoyo para lograr un equilibrio adecuado en el paciente y que tenga la capacidad de caminar de manera normal. Para ello tiene que seguir las fases de la marcha humana

Fases de la marcha humana

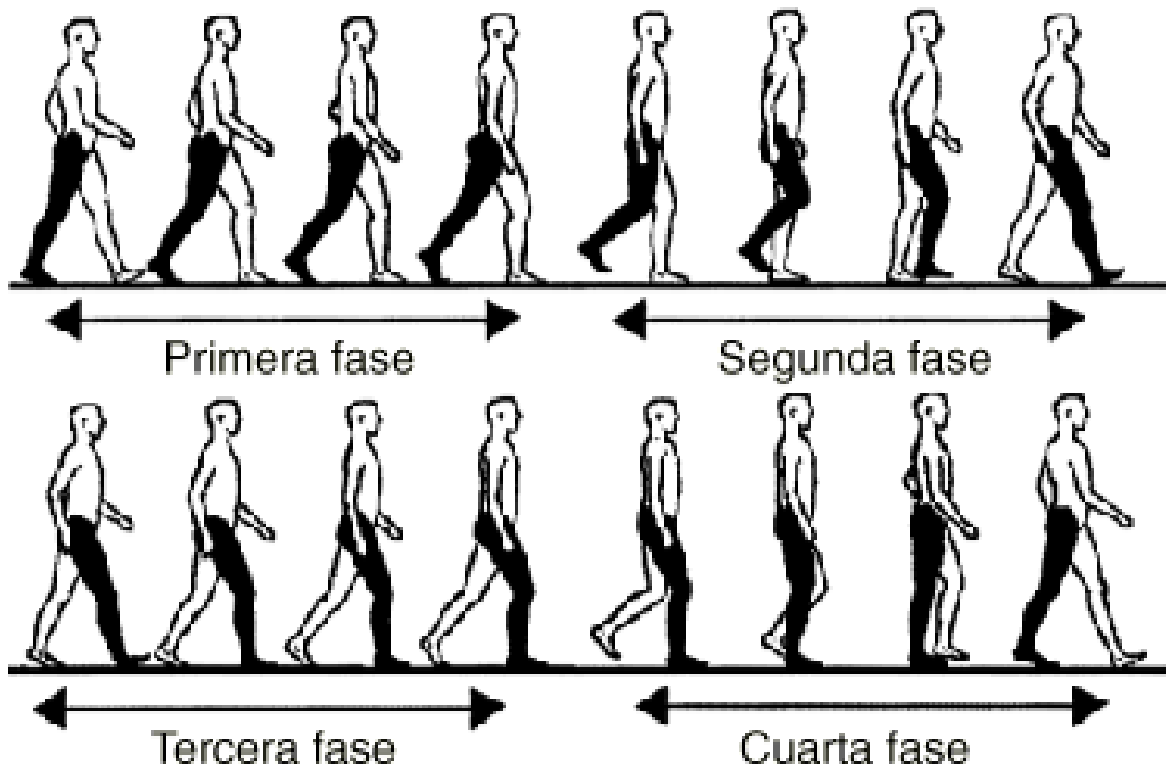


Figura 1: *Fases de la marcha humana*

- *Fase de despegue.* Es la primera fase y es de que a nivel de pie produce una flexión plantar lenta de unos 30° , como consecuencia hay una reducción progresiva del apoyo de la planta del pie en el suelo hasta que solo apoya el dedo gordo.
- *Fase de oscilación.* Es la segunda fase, en ella el pie que en la fase anterior sólo apoyaba con el dedo gordo se despegaba del suelo, la rodilla y la cadera se flexionan y todo el miembro se desplaza adelantándose al resto del cuerpo.
- *Fase de recepción de la carga.* Es la tercera fase y se caracteriza porque el pie que en la segunda fase cruzaba al contrario, toca el suelo por medio del talón, recibiendo parte del peso del cuerpo.
- *Fase media de apoyo.* Es la última fase, el pie apoyado soporta todo el peso del cuerpo a la vez que mantiene el equilibrio en los tres planos y permite la traslación corporal hacia delante.

2.2. Estado del arte

Prótesis de pie se trata de aparatos médicos diseñados para sustituir de forma artificial un pie, tobillo o parte del pie faltante en el cuerpo de un paciente a causa de una amputación total o parcial del miembro. Estos aparatos protéticos pueden tener tanto finalidades funcionales para la rehabilitación del paciente como funciones estéticas para imitar de forma bastante realista la parte del cuerpo faltante.

¿Cómo funciona una prótesis de pie? Un pie protésico se trata de un aparato médico diseñado justo a la medida de cada paciente para suplantar estéticamente y funcionalmente la parte faltante de la extremidad a causa de una amputación. Esta tiene la función tanto de aparentar que existe la sección faltante como de ser un punto de apoyo para que el paciente pueda caminar, utilizar calzado y desempeñar sus labores de forma normal o lo más normal posible.

Materiales de las prótesis de pie El pie prostético puede ser fabricado de uno o más materiales, los cuales son seleccionados para brindar el soporte, agarre y diseño necesario para suplantar la parte faltante del cuerpo humano. Por lo general se utiliza: Silicona médica. Plantillas de carbono. Rellenos de materiales elásticos. Aluminio. Titanio. Acero inoxidable. Plásticos.

Revisión sobre el estado del arte

Ávila, Marcial Aguilar, Douglas Ordóñez Ávila, José Luis. (2021). Propuesta metodológica para el diseño de prótesis utilizando CAD generativo y análisis CAE. 10.13140/RG.2.2.35705.19042.

Resumen: El cuerpo humano no está diseñado para ser indestructible se sabe ya que hay muchos casos pues por el tipo de guerras y por accidentes esto nos llevan a una pérdida de alguna de nuestras extremidades, se deben de tomar decisiones para que la vida humana prevalezca en el cual terminan en amputaciones de alguna de nuestras extremidades. Ahora en día el área de la biomecánica ha evolucionado tanto con el uso de las prótesis para ayudar a este tipo de personas para ayudarles a mejorar y darles una mejor calidad de vida, mostrándoles que pueden llevar una vida como cualquier otra persona que tenga todas sus extremidades completas. El objetivo de este proyecto es desarrollar una prótesis de pie mediante el uso de la manufactura aditiva. Para esto se propone la utilización de una metodología de seis pasos comenzando con la parametrización, diseño generativo, análisis de elementos finitos, fabricación, experimentación y reciclaje de la prótesis. La utilización de la tecnología 3D sobre Prototipado Rápido hace que el ciclo de diseño del producto se acorta enormemente. Hace que la tecnología sea más eficaz y eficiente en el desarrollo de productos.

Ordóñez Ávila, José Luis Ávila, Marcial Aguilar, Douglas. (2021). Diseño y demostración de prótesis utilizando CAD generativo y análisis CAE con manufactura aditiva.

Resumen: Una prótesis es sometida al peso corporal de las personas en especial cuando la persona se apoya sobre la prótesis. En ese momento todo el peso de la persona cae sobre la extremidad que se une a la prótesis. Por lo que es necesario realizar los análisis estáticos de cada pieza para confirmar que ninguna de estas tendrá puntos de ruptura y que los desplazamientos mecánicos no influyan negativamente a la prótesis. El objetivo de este proyecto es desarrollar una prótesis de pie mediante el uso de la manufactura aditiva utilizando CAD generativo y validando el funcionamiento mediante análisis CAE. Se analizaron posibles efectos mediante el diagrama de Ishikawa. Para esto se utilizó una metodología de seis pasos comenzando con la parametrización, diseño generativo, análisis de elementos finitos, fabricación, experimentación y reciclaje de la prótesis. Con el diseño generativo se optimizó las medidas de la prótesis las cuales se basaron en el escaneo de un muñón y es capaz de soportar el peso de 225 lb. Palabras claves prótesis de pie, diseño generativo CAD, análisis de tensiones.

2.3. Propuesta de diseño de la geometría, alcances y limitaciones

Analizando los elementos concretos del pie y de la fase de marcha, un elemento de fundamental importancia en el diseño debe ser el cumplimiento de las posiciones del pie para poder seguir siendo funcional. Por lo anterior, aquí la propuesta de diseño es dividida en 3 partes:

Normal El talón y área metatarsal son los apoyos, la fuerza se aplica sobre el tobillo con una fuerza de 500N.



Figura 2: *Normal*

Despegue El área metatarsial es el apoyo, la fuerza de 500N se aplica sobre el tobillo con un ángulo de 30°

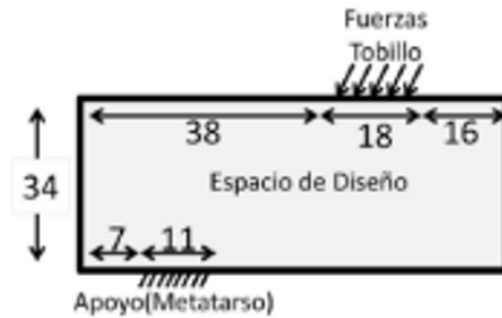


Figura 3: *Despegue*

Apoyo El área del talón es el apoyo, la fuerza de 500N se aplica sobre el tobillo con un ángulo de 60°

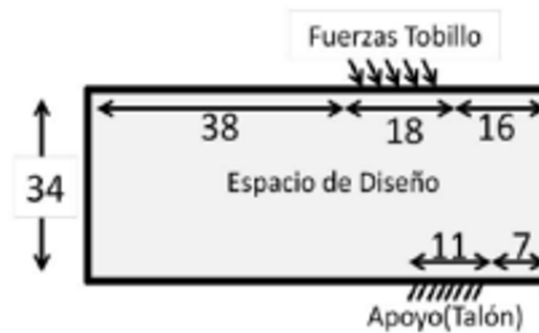


Figura 4: *Apoyo*

Dentro de los alcances se tienen en esta práctica se encuentra el poder definir un diseño que soporte correctamente el peso y las fuerzas que se ejercen en la superficie, todo esto por medio de la optimización topológica. Sin embargo se tiene como limitación que no se conoce concretamente la carga que se puede generar en en esta superficie ya que varia dependiendo del tamaño, peso, etc.

2.4. Pasos del desarrollo de la programación

1. Ejecutar Matlab, puede ser el software en línea o directamente instalado en su computadora.
2. Crear un nuevo script y guardarlo el archivo.

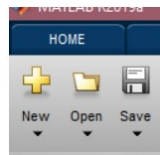


Figura 5: *Nuevo script*

3. Una vez creado el script teclear el código de la programación, en esta práctica se utilizó el código de optimización topológica de 99 líneas escrito en Matlab, elaborado por el autor Ole sigmud (2001).

4. Se establecen las condiciones iniciales en el código del programa.

Programa principal (líneas 1-36):

En esta parte se comienza distribuyendo el material uniformemente en el dominio del diseño (línea 4). Después de ciertas inicializaciones, el ciclo principal inicia con la llamada a la subrutina de elemento finito (línea 12) la cual regresa el vector de desplazamiento U . La subrutina de matriz de rigidez del elemento es solo llamada una vez (línea 14) al tratarse de un material sólido. Después de ello, un ciclo sobre todos los elementos determina la función objetivo y las sensibilidades (líneas 16-24). El análisis de sensibilidad es seguido por una llamada al filtro de independencia de malla (línea 26) y el optimizador de criterios óptimos (línea 28). El cumplimiento actual, así como otros parámetros son impresos (líneas 30-33) y la distribución de densidad resultante de grafica (línea 35). El ciclo principal se termina si el cambio en las variables de diseño (línea 30) es menos del 1 %, de lo contrario los pasos de arriba se vuelven a repetir.

Optimizador basado en criterios de optimización (líneas 37-48)

El optimizador encuentra las variables de diseño actualizadas (líneas 37-48). Ya que el volumen material ($\text{sum}(\text{sum}(x_{\text{new}}))$) es una función monótonamente decreciente del multiplicador de Lagrange (retraso), el valor del multiplicador lagrangiano que satisface la restricción de volumen puede encontrarse por un algoritmo de bisección (líneas 40- 48). El algoritmo de bisección se inicializa adivinando unos límites $l1$ inferior y $l2$ superior para el multiplicador lagrangiano (línea 39). El intervalo que limita el multiplicador lagrangiano se reduce repetidamente a la mitad hasta que su tamaño es menos que los criterios de convergencia (línea 40)

Filtrado de independencia de malla (líneas 49-64)

El filtro de independencia de malla funciona al modificar los elementos sensitivos (líneas 49-64).

Código de elemento finito (líneas 65-99)

El código de elemento finito se escribe en las líneas 65-99. La matriz de rigidez global está formada por un bucle sobre todos los elementos (líneas 70-77). Como sucedía en los principales programas, las variables $n1$ y $n2$ indican el número de nodos de elementos de la parte superior izquierda y derecha en números de nodos globales y son usados para insertar la matriz de rigidez del elemento en los lugares correctos en la matriz de rigidez global.

```

Código fase 1 de la optimización:
%%% % 3D LINE TECHNOLOGY OPTIMIZATION CODE BY OLESTIONMD, OCTOBER 1999 %%%
function topbfa(nelx,nely,volfrac,penal,rmin);
nelx=72;
nely=34;
volfrac=0.33;
penal=1.0;
rmin=1.5;
% INITIALIZE
x(l:nely,1:nelx) = volfrac;
loop = 0;
change = 1.;
% START ITERATION
while change > 0.01
    loop = loop + 1;
    xold = x;
    % FE-ANALYSIS
    [U]=FE(nelx,nely,x,penal);
    % OBJECTIVE FUNCTION AND SENSITIVITY ANALYSIS
    [KE] = lkr;
    c = 0.;
    for ely = 1:nely
        for elx = 1:nelx
            nl = (nely+1)*(elx-1)+ely;
            n2 = (nely+1)*elx +ely;
            dc(ely,elx)=0.;
            for i=1:5
                Ue = U([2*n1-1;2*n1; 2*n2-1;2*n2; 2*n2+1; 2*n2+2;
                    2*n1+1;2*n1+2],i);
                c = c + x(ely,elx)*penal*Ue'*KE*Ue;
                dc(ely,elx) = dc(ely,elx)-penal*x(ely,elx)*(penal-
1)*Ue'*KE*Ue;
            end
        end
    end
    % FILTERING OF SENSITIVITIES
    [dc] = check(nelx,nely,rmin,x,dc);
    % DESIGN UPDATE BY THE OPTIMALITY CRITERIA METHOD
    [x] = OC(nelx,nely,x,volfrac,dc);
    % PRINT RESULTS
    change = max(max(abs(x-xold)));
    disp(['it.: ' sprintf('%d',loop) 'obj.: ' sprintf('%d.0f',c) ...
        'vol.: ' sprintf('%6.3f',sum(sum(x)))/(nelx*nely)) ...
        'ch.: ' sprintf('%6.3f',change)]);
    % PLOT DENSITIES
    colormap(gray); imagesc(x); axis equal; axis tight;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [xnew]=OC(nelx,nely,x,volfrac,dc)
l1 = 0; l2 = 100000; move = 0.2;
while (l2-l1 > 1e-4)
    lmid = 0.5*(l2+l1);
    xnew = max(0.001,max(x-move,min(l1,min(k*move,x.*sqrt(-dc./lmid))));
    if sum(sum(xnew)) - volfrac*nelx*nely > 0;
        l1 = lmid;
    else
        l2 = lmid;
    end
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [dcn]=check(nelx,nely,rmin,x,dc)
dcn=zeros(nely,nelx);
for i = 1:nelx
    for j = 1:nely
        sum=0.0;
        for k = max(i-round(rmin),1):min(i+round(rmin),nelx)
            for l = max(j-round(rmin),1):min(j+round(rmin), nely)
                fac = rmin-sqrt((i-k)^2+(j-l)^2);
                sum = sum+max(0,fac);
                dcn(j,i) = dcn(j,i) + max(0,fac)*x(l,k)*dc(l,k);
            end
        end
        dcn(j,i) = dcn(j,i)/(k(i,j)*sum);
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [U]=FE(nelx,nely,x,penal)
[KE] = lkr;
K = sparse(2*(nelx+1)*(nely+1), 2*(nelx+1)*(nely+1));
F = sparse(2*(nely+1)*(nelx+1),5); U =sparse(2*(nely+1)*(nelx+1),5);
for ely = 1:nely
    for elx = 1:nelx
        nl = (nely+1)*(elx-1)+ely;
        n2 = (nely+1)*elx +ely;
        edof = [2*n1-1; 2*n1; 2*n2-1; 2*n2; 2*n2+1;2*n2+2;2*n1+1;
2*n1+2];
        K(edof,edof) = K(edof,edof) + x(ely,elx)*penal*KE;
    end
end
% DEFINE LOADAND SUPPORTS (HALF HSB-BEAM)
F(322,1) = -1;
F(3782,2) = -1;
F(1842,3) = -1;
F(3982,4) = -1;
F(3902,5) = -1;
freedofs = union([560;2*(nely+1);1260],[3920;2*(nely+1);4620]);
allldofs = [1;2*(nely+1)*(nelx+1)];
freedofs = setdiff(allldofs,fixeddofs);
% SOLVING IET
U(freedofs,:)= K(freedofs,freedofs) \F(freedofs,:);
U(fixeddofs,:)= 0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [KE]=lkr
E = 1.;
nu = 0.3;
k=1/2*nu/6/1/8*nu/8 -1/4*nu/12 -1/8*3*nu/8 ...
-1/4*nu/12 -1/8*nu/8 nu/6/1/8-3*nu/8;
KE = E/(1-nu^2)*[ k(1) k(2) k(3) k(4) k(5) k(6) k(7) k(8)
k(2) k(1) k(8) k(7) k(6) k(5) k(4) k(3)
k(3) k(8) k(1) k(6) k(7) k(4) k(5) k(2)
k(4) k(7) k(6) k(1) k(8) k(3) k(2) k(5)
k(5) k(6) k(7) k(8) k(1) k(5) k(3) k(4)
k(6) k(5) k(4) k(3) k(2) k(1) k(8) k(7)
k(7) k(4) k(5) k(2) k(3) k(8) k(1) k(6)
k(8) k(3) k(2) k(5) k(4) k(7) k(6) k(1)];

```

Figura 6: Código en Matlab Fase 1

2.5. Resultados de la optimización

Para obtener la pieza optimizada se realizaron varias simulaciones corriendo el código en Matlab, ya que se hicieron de cada una de las fases y se obtuvieron los siguientes resultados.

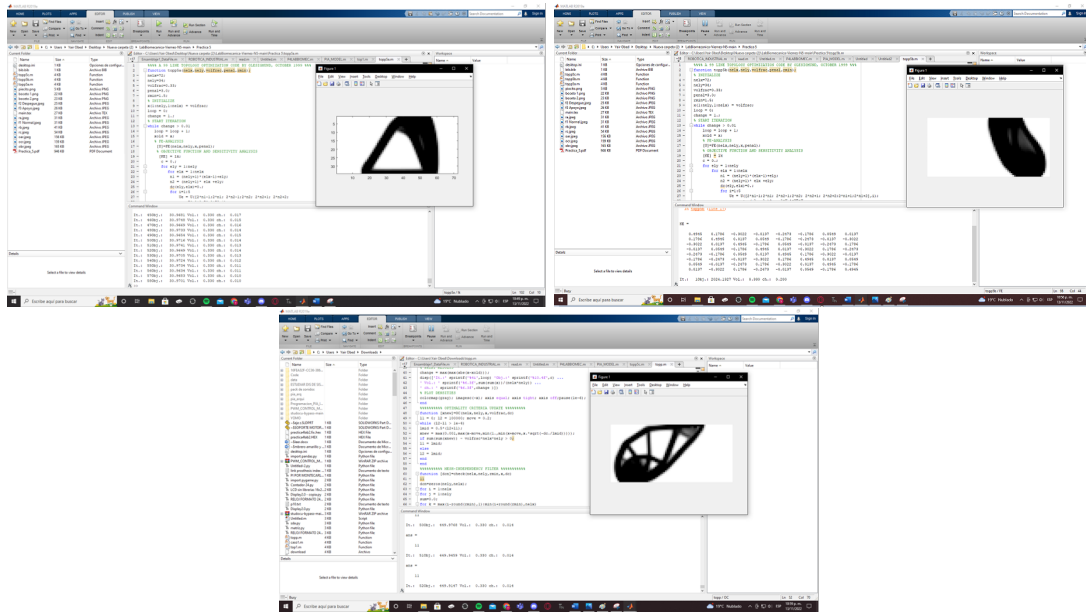


Figura 9: *Simulaciones de las fases para la optimización*

Después de haber corrido el código en Matlab se obtuvo la siguiente imagen que nos muestra la optimización deseada.

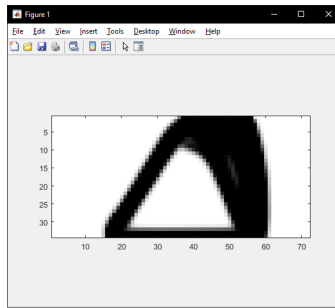


Figura 10: *Resultado de la optimización fase 1*

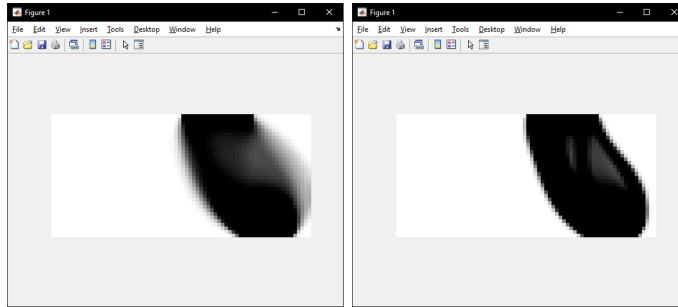


Figura 11: *Resultado de la optimización fase 2*

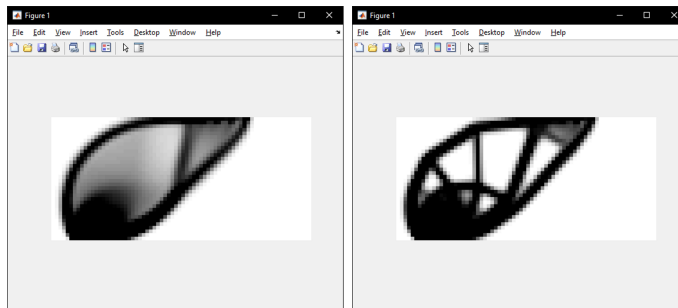


Figura 12: *Resultado de la optimización fase 3*

3. Conclusiones de cada autor

■ Emanuel Salas de Leon 1854873

Esta práctica fue la aplicación directa de todo lo aprendido de todas y cada una de las prácticas anteriores, pues en esta práctica el objetivo fue diseñar una prótesis de pie, este tipo de prótesis está comúnmente expuesto a muchas fuerzas externas, además del peso corporal de las personas. Es por esta razón que para el diseño de este se consideraron todos estos factores a la hora de generar el diseño final, de tal forma que al final se obtuvo una geometría particular para soportar dichas fuerzas. Se realizó la optimización conforme a las cargas consideradas y se obtuvo el diseño final optimizado, que cumpliera con las normas de seguridad al transportar tales cargas.

■ Jason Méndez Muñoz 1889560

Con esta practica ponemos en aplicación todo lo aprendido durante este laboratorio, desde la teoría de la optimización topológica y el uso del software de Matlab, y lo utilizamos para un caso más relacionado con la materia de Biomecánica. Pue ahora en vez de analizar estructuras de uso en ingeniería civil, nos concentramos en la manufactura de una prótesis de pie. Para la cual no solo se necesita de un análisis del movimiento natural al caminar o correr y las fuerzas a las que están sometidas las prótesis, sino que se necesitan que estén sean lo mas ligeras posibles para la comodidad del usuario, por lo que ahora es completamente necesario el uso de su versión más optimizada.

■ Jesús Mario Duarte Salinas 1907630

Esta práctica me sirvió para aplicar conocimientos que hemos venido viendo desde el inicio del semestre. Todas las practicas anteriores tuvieron relación con hacer una optimización topológica y esta no fue la excepción. En este caso se trató de diseñar una prótesis de pie y seguimos los mismos pasos que hemos hecho anteriormente, volvimos a utilizar el código de 99 líneas con el cual solo es necesario realizar algunas modificaciones para poder desarrollar el resultado que buscábamos. Al momento de realizar la simulación y esperar a que cargara, obtuvimos la optimización deseada y concluimos con la realización de esta práctica.

■ **Lorena Alejandra Campos Carrazco 1909279**

Al realizar esta actividad se volvió a ver la optimización topológica, que bien sabemos es un método para poder optimizar el diseño de un elemento o estructura dada. En esta actividad se vio la optimización topológica de un elemento, prótesis de un pie, esto fue posible gracias al software de Matlab donde se escribió un código de 99 líneas, el cual nos permitió hacer la optimización. Como ya se sabe el método de optimización topológica se centra en encontrar la topología óptima de un producto o estructura. El objetivo es minimizar el peso del producto pero que siga cumpliendo los mismos criterios y especificaciones. Lo cual fue posible, como se observó en las imágenes en la cual se puede observar las fases de la marcha humana en una prótesis completamente optimizado en el resultado.

■ **Yair Obed Morales Ortiz 1992266**

Al concluir esta práctica puedo concluir que, fue una práctica un poco similar a las anteriores, utilizando Matlab, para la elaboración de esta práctica se presentó y se aplicó una propuesta de análisis de formas, con el fin de optimizar el diseño, para ello se tomó en cuenta lo que se vio en las prácticas anteriores donde se definió la forma geométrica de la pieza, el cual vendría siendo una prótesis de pie dividido en 3 fases, y posteriormente se declararon las variables a tomar en cuenta, como lo es el espacio del diseño y las variables en el código. Ejecutando el código de programa en el software se pueden observar los resultados obtenidos en la figura.

Referencias

- [1] Avila, M., Aguilar, D., and Ordóñez Ávila, J. L. (2021). Propuesta metodológica para el diseño de prótesis utilizando cad generativo y análisis cae.
- [2] Hofer, P., S. F. W. E. (2021). *Topology Optimization of a Cableway Pylon with Assessment of Uncertain Loading*. PhD thesis, Technical University of Munich.
- [3] Ordóñez Ávila, J. L., Avila, M., and Aguilar, D. (2021). Diseño y demostración de protesis utilizando cad generativo y análisis cae con manufactura aditiva.