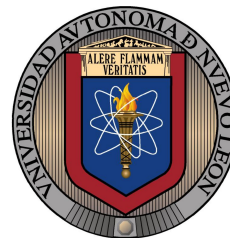




Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

UANL

MECATRÓNICA



Laboratorio de Biomecánica

Grupo:309

Optimización Topológica Practica 2

FECHA DE ENTREGA: 21 SEPTIEMBRE 2022

Profesor:

Nombre del Maestro

Nombre	Matricula	Carrera
Saul Moises Mendoza Cida	1942534	IMTC
Erick Daniel Esquivel Arguelles	1826021	IMTC
Omar Isaí Moreno Cruz	1849630	IMTC
Miguel Rodrigo Aguilar Moreno	1801380	IMTC
Betsaida Alejandra Ruedas Vázquez	1730437	IMTC

Índice

1. Objetivo	3
2. Estado del arte	3
3. Marco teórico	4
4. Desarrollo	9
5. Conclusiones	17

1. Objetivo

El estudiante deberá presentar una propuesta de análisis de formas y la programación para la ejecución de la optimización (descripción funcional) de características de trabajo específicas que presenten las ventajas mencionadas.

2. Estado del arte

Se conoce como bicicleta al medio de transporte que tiene dos ruedas, con pedales que permiten transmitir el movimiento a la rueda trasera a través de una cadena, un piñón y un plato. Se trata de un vehículo que se desplace por la propulsión del propio usuario, quien debe pedalear.

Las bicicletas se utilizan como medio de transporte en entornos urbanos y rurales. Son ecológicas (no emiten contaminación), sostenibles (su energía procede del propio usuario) y saludables (al usarla, la persona realiza actividad física). Además resultan muy económicas ya que no llevan ningún tipo de combustible y casi no tienen gastos de mantenimiento. Desde su creación (1817-actualidad) han tenido un gran cambio en su diseño que se ha ido perfeccionando y adaptando a diferentes entornos.

Cómo se clasifican las bicicletas

Las bicicletas fueron adquiriendo características específicas para usos específicos. El motivo era satisfacer las necesidades de distintos tipos de público que le daban una utilidad diferente al vehículo dos ruedas.

Bicicleta de montaña: Diseñadas para recorrer senderos montañosos, así que han sido provistas de ruedas anchas y de mejor agarre. Con manubrios rectos y mucho más altos que las bicis convencionales.

Bicicletas de ruta: Diseñadas para recorridos largos y a toda velocidad por carreteras pavimentadas. Tienen ruedas más finas y más grandes. Tienen manubrios de tipo drop-bar que ayudan al ciclista a adoptar una postura aerodinámica.

Bicicletas urbanas: Se trata de bicicletas concebidas para andar en la ciudad y soportar sus condiciones. Por eso son sumamente resistentes y sólidas.

Bicicletas híbridas: Combina elementos de las bicicletas de ruta con las bicicletas de montaña.

Bicicletas eléctricas: Utilizan un motor para ayudar al ciclista a subir pendientes empinadas o andar por lugares donde el viento sopla muy fuerte en contra.

3. Marco teórico

Partes del cuadro de bicicleta

Tiene forma triangular y los hay de diferentes materiales. Fibra de carbono y aluminio son los más habituales, pero también hay cuadros de bicicleta fabricados en titanio o acero.

El triángulo frontal está compuesto por:

- El tubo del asiento va desde el eje de centro hasta el asiento.
- El tubo superior puede correr horizontalmente, inclinado o inclusive con algunas curvas, dependiendo del tipo de bici, y va desde el tubo de la dirección hasta el tubo del asiento.
- El tubo inferior corre diagonalmente desde el eje de centro hasta la parte baja del poste de la dirección.
- El tubo de la dirección que conecta el tubo superior con el inferior. Es por donde entra el poste de dirección de la tijera.

Por su parte, el triángulo trasero está compuesto por:

- Las vainas, que se conforman por dos juegos de tubos, más delgados que el resto de la tubería: vainas superiores e inferiores. Las vainas superiores corren desde el tubo del asiento hasta los terminales de donde se sujeta la rueda trasera (dropout). Las vainas inferiores conectan el dropout o forkend al eje de centro.



Figura 1: Aquí se muestran las partes del cuadro anteriormente mencionadas

Para completar toda la función de la bicicleta tenemos las siguientes partes y sus definiciones.

Tijera/horquilla. La tijera no es parte del cuadro, sino que se une a este por medio del tubo de dirección. El poste de dirección de la horquilla entra por la parte inferior del tubo de dirección y se sujeta por la parte superior ya sea por unas tuercas si es roscada o por la potencia si es no roscada.

Piñones. Son las coronas traseras de la bicicleta que configuran el sistema de transmisión junto a los platos y a la cadena. Los piñones se suben o se bajan con la maneta derecha gracias al uso del cambio mecánico.

Platos. Los platos van en la parte delantera de la transmisión y al igual que los piñones se contabilizan por número de dientes. El plato pequeño es el que tiene menos dientes, mientras que el grande es el que tiene un número de dientes más amplio.

Cadena. La cadena de la bicicleta permite unir la transmisión y darle sentido al sistema de plato / piñón. La cadena tiene una vida útil y al igual que los platos y los piñones tendrá que cambiarse cada cierto tiempo.

Pedalier. El pedalier es la parte de la bicicleta en la que van integradas las bielas y se encuentra en la parte central del cuadro.

Bielas. Las bielas son una parte indispensable en una bicicleta y son las que nos permiten “empujar” el desarrollo. Son como los brazos de la bicicleta y sin ellas no tendríamos tracción. Las bielas unen la caja de pedalier con los pedales de la bici.

Pedales. Los pedales son indispensables para poder hacer fuerza con los pies y es la superficie o plataforma en la que apoyamos la base de los mismos.

Ruedas. Las ruedas de la bicicleta son indispensables y no hace falta decir que las ruedas nos permiten avanzar y mantener el equilibrio.

Manillar. El manillar de la bicicleta es la parte que nos ayuda a mantener la dirección deseada y sobre el que nos apoyamos con las manos para aguantar el equilibrio. Sobre el manillar también van colocadas las manetas de freno y de cambio.

Cubiertas. Las cubiertas de la bicicleta son los neumáticos y las responsables de hacernos traccionar. Hay diferentes sistemas de neumático. Puede aparecer el convencional de cámara y cubierta aunque también se pueden apreciar el sistema de tubular y el de tubeless.

Radios. Los radios son como los “palos” de la bicicleta. Son los responsables de mantener la rueda centrada y de dar estabilidad y rigidez a las mismas.

Frenos. Los frenos son los encargados de detener la bicicleta y los puedes encontrar de

diferentes sistemas. De zapata o de disco. En la actualidad todo parece encaminado hacia el último de los dos sistemas.



Figura 2: Partes de la bicicleta

Geometría de un cuadro de bicicleta

La geometría es mucho más importante que los componentes que se puedan montar. Unas buenas medidas marcan un buen comportamiento y un buen equilibrio. Los componentes se pueden mejorar, las geometrías no siempre. A continuación te detallamos punto por punto todos los parámetros que marcan la geometría de una bici.

1. Ángulo de dirección. Es el ángulo que forma el tubo de dirección del cuadro con respecto a la horizontal del suelo. Un ángulo de 70° hará que la bici sea más nerviosa y muy rápida de reacciones, sobre todo a la hora de subir. Por el contrario será más inestable a la hora de bajar. Un ángulo más cerrado (alrededor de $67-68$ grados) hace que la horquilla esté más lanzada (más distancia entre ejes), con lo cual será más estable en el descenso atacando más en diagonal los impactos. Su valor oscila normalmente entre los 63 y 71 grados.

2. Ángulo de tubo de sillín. Es el ángulo formado entre el tubo de sillín y la horizontal del suelo. Para entenderlo hay que visualizar un tubo de sillín perpendicular al suelo. Ese tubo tendría 90 grados. Partiendo de esa medida, comprobarás cómo la mayoría de los ángulos de sillín están entre los 73 y 78 grados.



Figura 3: Para saber este ángulo se toma como referencia el eje de pedalier y su vertical (90 grados).

3. Tubo superior. El tubo superior es el responsable de la longitud desde el tubo de sillín hasta el manillar (tubo de dirección). Los tubos superiores más largos otorgan una mayor distancia entre ejes, haciendo la bici más estable.

4. Tubo de sillín. El tubo que alberga la tija de sillín es el determinante para saber cuál es la talla de tu bici. La distancia se mide desde el centro del eje de pedalier hasta la parte superior del tubo.



Figura 4: Las medidas se suelen dar en pulgadas, centímetros o tallaje convencional S, M, L, XL y XXL.

5. Distancia entre ejes. La distancia entre ejes se mide de centro a centro de cada uno de los ejes de las ruedas. A mayor distancia, mayor estabilidad a altas velocidades.

6. Longitud de vainas. Es la longitud que existe entre el centro del eje de la rueda trasera y el

centro del eje de pedalier. Cuanto más cortas sean, mejor capacidad a la hora de subir, pero menor estabilidad.



Figura 5: Una medida fundamental para la distancia entre ejes y la transmisión de pedalada a la rueda trasera.

7. Altura del eje del pedalier. La altura de pedalier es determinante para la estabilidad y la capacidad de maniobra de la bici. Se mide desde el centro del eje de pedalier al suelo. Cuanto más bajo esté el eje de pedalier más estable será la bici, ya que el centro de gravedad queda más bajo.

8. Longitud del tubo de dirección. Es la medida del tubo que alberga el tubo de dirección de la horquilla. Cuanto más corto, más bajo podemos situar la potencia y el manillar.



Figura 6: Longitud del tubo de dirección

9. Offset de la horquilla. Es la distancia que hay entre el eje de la rueda delantera y la



Figura 7: Esta es una medida que viene muy determinada por la altura de pedalier

prolongación de la línea imaginaria del ángulo que forma el tubo de dirección del cuadro. Un mayor offset confiere una mayor estabilidad y unas reacciones más nobles de la dirección.

10. Alcance (REACH). Es la distancia horizontal entre la proyección vertical del centro del eje de pedalier y el centro del tubo de dirección en su parte más elevada. El alcance ayuda a que el reparto de pesos sea más equilibrado y como consecuencia puedas llegar mejor al manillar y cargar el peso en la rueda delantera.

11. Altura del cuadro (STACK). Es la distancia en vertical entre el centro del eje de pedalier y la parte superior del tubo de dirección. Esta distancia es importante sobre todo para la altura de la parte frontal de nuestro cuadro en relación con la distancia al eje de pedalier.

12. Standover. Es la distancia del suelo a la parte superior del tubo superior del cuadro, en el centro exacto de la bici entre los dos ejes.

13. Longitud de potencia. La potencia influye directamente en la maniobrabilidad de la bici, la posición del cuerpo y el reparto de pesos.

4. Desarrollo

Desarrollo de código

Primera optimización

Para la optimización del marco de bicicleta se utilizará el mismo programa (top.m) utilizado en la práctica anterior, sin embargo, requiere algunos cambios en ciertas partes del código.

Primero, es necesario reajustar las cargas aplicadas a solo una y el apoyo, para esto es necesario

realizar un ajuste en las líneas 80 y 81, quedando de la siguiente manera

```
80 F(2,1) = 1;
81 fixeddofs =2*nelx*(nely+1)+1:2*(nelx+1)*(nely+1);
```

De esta forma podemos ejecutar el código colocando la siguiente instrucción en la ventana de comando.

```
top(20,20,0.33,3.0,1.5)
```

Un cambio mas que se debe de realizar es un ajuste a la fuerza ya que esta no es realista, por esto es necesario corregir el módulo de Young en la línea 89 de la siguiente manera

```
89 E=2*10^11
```

Finalmente, para la primera optimización es necesario cambiar el valor del tamaño de los elementos finitos, los cuales están definidos como una1 vez por 1 unidad. El cambio en la línea de código debe quedar de la siguiente forma:

```
41 while ((l2-l1)/l2 > 1e-4)
```

Este cambio no es necesario en todos los casos ya que solo se utiliza para corregir las escalas, sin embargo, en esta ocasión nos ayuda a mantener la precisión mientras se resuelven las ecuaciones del programa.

Segunda optimización

Dado a que la primera optimización no deja libre un espacio para la rueda delantera, es necesario realizar una segunda optimización, en la cual se llama a los elementos finitos en este pasivo vacío, y se define una matriz con ceros en elementos libre y seres en pasiva. Para esto se agrega la siguiente sección de código entre las líneas 5 y 6:

```
for ely=1:nely
    for elx=1:nelx
        if((elx)^2+(ely-nely)^2)<(0.65*nelx)^2
            passive(ely,elx)=1;
        else
            passive(ely,elx)=0;
        end
    end
end
x(find(passive))=0.001
```

Gracias a esto ahora se inicializan todos los elementos de la zona hueca en el bajo valor 0.001. Además es necesario actualizar la línea 29, 40 e insertar una línea entre la 43 y 44.

```
29 [x]      = OC(nelx,nely,x,volfrac,dc,passive);
40 function [xnew]=OC(nelx,nely,x,volfrac,dc,passive)
43 xnew(find(passive))=0.001
```

Nota: Las numeración de las 29, 40 y 43 es en base al código original, es necesario tomar en cuenta las líneas extra que añade la sección de código implementada en el paso anterior. Par poder comprobar los resultados se ejecuta la siguiente instrucción en la ventana de comando.

```
top(20,20,0.33,3.0,1.5)
```

Resultados de la optimización

Tras finalizar los cambios correspondientes al código de la practica anterior, y evaluarlo con el código mencionado anteriormente obtuvimos los siguientes resultados

```
top(20,20,0.33,3.0,1.5)
```

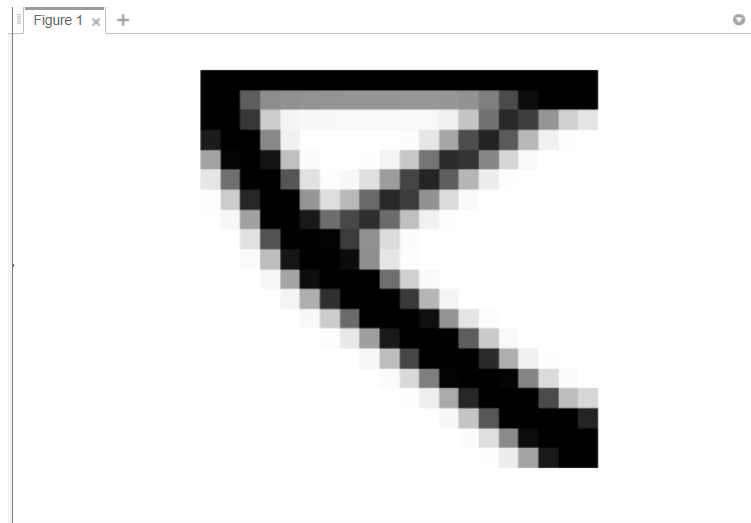


Figura 8: Segunda optimización de la topología de la bicicleta

Posteriormente después de realizar los cambios correspondientes como agregar el agujero para la llanta delantera hubo un cambio significativo en la estructura optimizada, el cual podemos ver a continuación.

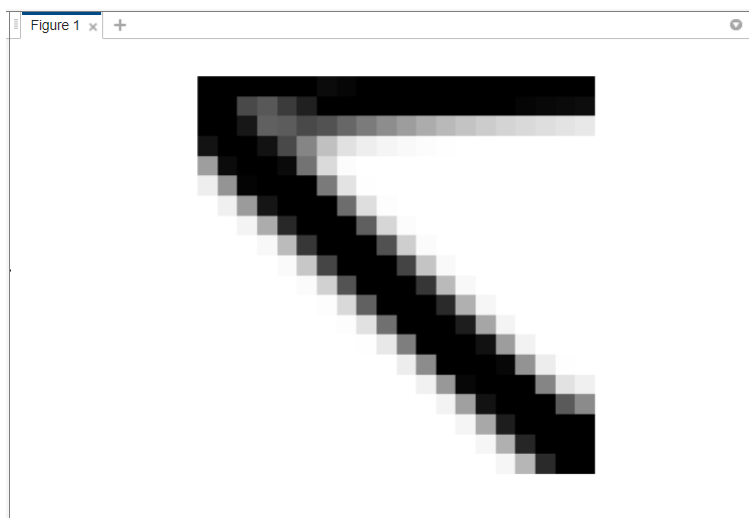


Figura 9: Segunda optimización de la topología de la bicilceta

Además, si realizamos cambios en el código utilizado para realizar la simulación, se interpreta directamente como hacer cambios en el tamaño del mallado lo cual produce los siguientes resultados.

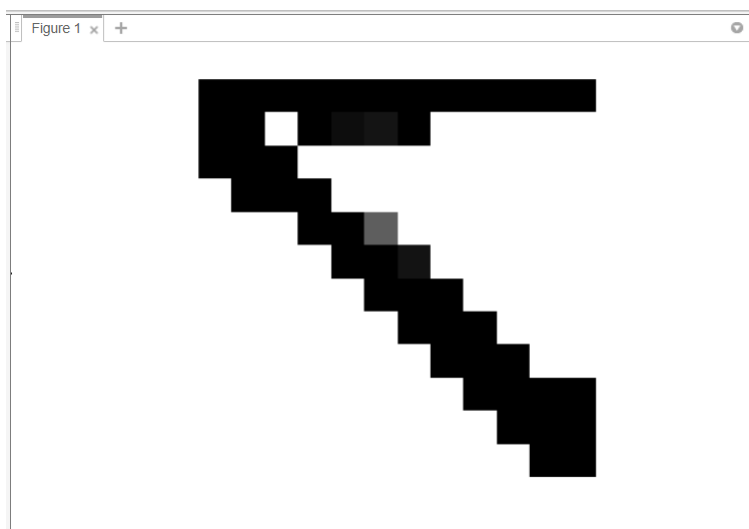


Figura 10: $\text{top}(12,12,0.33,3.0,0.9)$



Figura 11: $\text{top}(16,16,0.33,3.0,1.2)$

Otro cambio que se le puede realizar al mallado es el estado del filtro, es decir este puede ser desactivado (ya que por defecto se encuentra activado), para esto es necesario comentar la línea 27 del código para que quede de la siguiente forma.

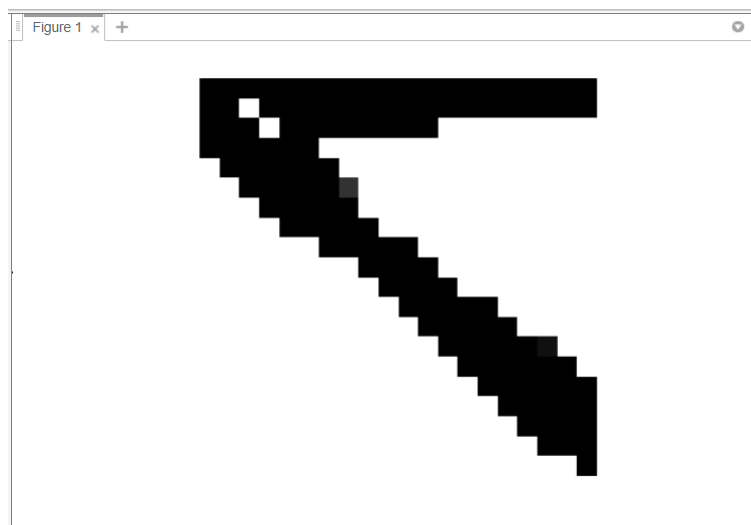


Figura 12: Segunda optimización de la topología de la bicicleta sin filtro

Código final

```
%%% A 99 LINE TOPOLOGY OPTIMIZATION CODE BY OLE SIGMUND, JANUARY 2000 %%%
```

```

%%% CODE MODIFIED FOR INCREASED SPEED, September 2002, BY OLE SIGMUND %%%
function top(nelx,nely,volfrac,penal,rmin);
% INITIALIZE
x(1:nely,1:nelx) = volfrac;
for ely=1:nely
    for elx=1:nelx
        if((elx)^2+(ely-nely)^2)<(0.65*nelx)^2
            passive(ely,elx)=1;
        else
            passive(ely,elx)=0;
        end
    end
end
x(find(passive))=0.001
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] = lk;
    c = 0.;
    for ely = 1:nely
        for elx = 1:nelx
            n1 = (nely+1)*(elx-1)+ely;
            n2 = (nely+1)* elx +ely;
            Ue = U([2*n1-1;2*n1; 2*n2-1;2*n2; 2*n2+1;2*n2+2; 2*n1+1;2*n1+2],1);
            c = c + x(ely,elx)^penal*Ue'*KE*Ue;
            dc(ely,elx) = -penal*x(ely,elx)^(penal-1)*Ue'*KE*Ue;
        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,passive);
% PRINT RESULTS
    change = max(max(abs(x-xold)));
    disp([' It.: ' sprintf('%4i',loop) ' Obj.: ' sprintf('%10.4f',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; axis off; pause(1e-6);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [xnew]=OC(nelx,nely,x,volfrac,dc,passive)
l1 = 0; l2 = 100000; move = 0.2;
while ((l2-l1)/l2 > 1e-4)
    lmid = 0.5*(l2+l1);
    xnew(find(passive))=0.001
    xnew = max(0.001,max(x-move,min(1.,min(x+move,x.*sqrt(-dc./lmid)))));
    if sum(sum(xnew)) - volfrac*nelx*nely > 0;
        l1 = lmid;
    else
        l2 = lmid;
    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-floor(rmin),1):min(i+floor(rmin),nelx)
            for l = max(j-floor(rmin),1):min(j+floor(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)/(x(j,i)*sum);
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [U]=FE(nelx,nely,x,penal)
[KE] = lk;
K = sparse(2*(nelx+1)*(nely+1), 2*(nelx+1)*(nely+1));
F = sparse(2*(nely+1)*(nelx+1),1); U = zeros(2*(nely+1)*(nelx+1),1);
for elx = 1:nelx
    for ely = 1:nely

```

```

    n1 = (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 LOADS AND SUPPORTS (HALF MBB-BEAM)
F(2,1) = 1;
fixeddofs =2*nelx*(nely+1)+1:2*(nelx+1)*(nely+1);
alldofs    = [1:2*(nely+1)*(nelx+1)];
freedofs   = setdiff(alldofs,fixeddofs);
% SOLVING
U(freedofs,:) = K(freedofs,freedofs) \ F(freedofs,:);
U(fixeddofs,:)= 0;
%%%%%%%%%% ELEMENT STIFFNESS MATRIX %%%%%%%%%%%
function [KE]=lk
E = 2*10^11;
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(2) 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)];
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% This Matlab code was written by Ole Sigmund, Department of Solid      %
% Mechanics, Technical University of Denmark, DK-2800 Lyngby, Denmark. %
% Please sent your comments to the author: sigmund@fam.dtu.dk          %
%                                                                       %
% The code is intended for educational purposes and theoretical details  %
% are discussed in the paper                                           %
% "A 99 line topology optimization code written in Matlab"            %
% by Ole Sigmund (2001), Structural and Multidisciplinary Optimization, %
% Vol 21, pp. 120--127.                                              %
%                                                                       %
% The code as well as a postscript version of the paper can be        %

```



```
% downloaded from the web-site: http://www.topopt.dtu.dk      %
%                                                              %
% Disclaimer:                                                  %
% The author reserves all rights but does not guaranty that the code is %
% free from errors. Furthermore, he shall not be liable in any event %
% caused by the use of the program.                            %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

5. Conclusiones

Saul Moises Mendoza Cida Esta práctica fue muy interesante ya que planteaba un rediseño del código dado en la práctica anterior para lograr el objetivo de esta práctica, al principio fue un poco complicado saber que modificar, sin embargo, poco a poco se fue facilitando este aspecto gracias al entendimiento del código, sin duda alguna, estos conocimientos seran de utilidad en un futuro ya sea para optimizar futuraa piezas que se pidan en el laboratorio o por otra parte utilizar este programa en aplicaciones externas a la facultad

Erick Daniel Esquivel Arguelles Se destaca la importancia del modelo matemático que existe detrás de una optimización topológica de alguna geometría, es interesante ver como la ingeniería busca innovar en los rediseños de las estructuras de tal forma que las características mecánicas de la estructura no se pierdan, se entiende que la optimización puede ser en tamaño o forma, y eso depende de los parámetros que se le den al software que se encarga de aplicar dicho modelo.

Miguel Rodrigo Aguilar Moreno

Durante la realización el diseño del marco de una bicicleta en esta practica dio la oportunidad al desarrollo de habilidades de optimización con el empleo del modelo matemático a nivel estructural. Dando desarrollo a las habilidades de análisis de estructuras y optimización de diseños conservando su función principal

Omar Isaí Moreno Cruz Se modificó el programa (top.m) para optimizar el marco de la bicicleta donde se cambió y optimizó la geometría. Esto con el objetivo de dar un rediseño que permitiera rectificar el modelo ya existente del cuadro. En la optimización hace un análisis estructural para aligerar la estructura de la bici, alterando su geometría.

Betsaida Alejandra Ruedas Vázquez Al haber concluido esta practica de diseño del marco de una bicicleta pude adquirir mas conocimiento mediante el análisis de formas y de la programación para la optimización de las características específicamente que se encuentran en este. Así mismo al realizar la investigación comprendí mas acerca de la definición de geometría siendo el estudio de las

propiedades y de las magnitudes de las figuras en el plano o en el espacio, así mismo como del estado del arte y que opciones se consideraron para el diseño de la geometría, alcances y limitaciones.

Referencias

- [1] Elliott, C., Hintermüller, M., Leugering, G., and Sokolowski, J. (2011). Special issue on advances in shape and topology optimization: theory, numerics and new applications areas. *Optim. Methods Softw.*, 26(4-5):511–512.
- [2] Fujii, D., Ejima, S., and Kikuchi, N. (2000). Topology optimization of compliant mechanisms using the homogenization design method. *J. Struct. Constr. Eng.*, 65(528):99–105.
- [3] Katsuno, E. T., Dantas, J. L. D., and Silva, E. C. N. (2022). Topology optimization of low-friction painting distribution on a marine propeller. *Struct. Multidiscipl. Optim.*, 65(9).
- [4] Kikuchi, N., N. S. F. L. S. O. . S. E. C. N. (1998). Design optimization method for compliant mechanisms microstructure. *Methods Appl. Mech. Engrg.*, 151(4-5):401 –417.
- [5] Kota, S., J. J. L. Z. R. S. M. . S. J. (2001). Design of compliant mechanisms: Applications to mems. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 29:7 –15.
- [6] Larsen, U. D., Signund, O., and Bouwsta, S. (1997). Design and fabrication of compliant micro-mechanisms and structures with negative poisson’s ratio. *J. Microelectromech. Syst.*, 6(2):99–106.
- [7] Lin, J., Luo, Z., and Tong, L. (2010). A new multi-objective programming scheme for topology optimization of compliant mechanisms. *Struct. Multidiscipl. Optim.*, 40(1-6):241–255.
- [8] Maute, K. Allen, M. (2004). . conceptual design of aeroelastic structures by topology optimization. *Struct Multidisc Optim*, 27(27 - 42).
- [9] Pingen, G., Evgrafov, A., and Maute, K. (2007). Topology optimization of flow domains using the lattice boltzmann method. *Struct. Multidiscipl. Optim.*, 34(6):507–524.
- [10] Sigmund, O. and Clausen, P. M. (2007). Topology optimization using a mixed formulation: An alternative way to solve pressure load problems. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 196(13-16):1874–1889.

Los créditos de las fotografías pertenecen a sus respectivos autores.