



FIME

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN®

Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Laboratorio de Biomecánica

Práctica 3. Diseño de la estructura de un panorámico

1992212	Jose Eduardo Mendoza Ziga	IMTC
1992298	Manuel Antonio Ulloa Méndez	IMTC
1733433	Raúl Alejandro Tamez González	IMTC
1992043	Eduardo Villarreal Gámez	IMTC
1818785	Oiram Colunga Bernal	IMTC
1822072	Brandon Arturo Solano Arias	IMTC
1916426	Daniel Alberto Acosta Banda	IMTC
Maestro:	Dra. Yadira Moreno Vera	
Hora:	V1	
Grupo:	204	

*Fecha de entrega 20 de septiembre, 2022
Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza*

1.- Objetivo

Desarrollar la capacidad de análisis, implementación y solución del problema de optimización de la estructura de un panorámico.

2.- Estado del arte

2.1.-Estructura de un panorámico

El presente trabajo se basa en un artículo orientado al estudio y análisis paramétrico de estructuras tipo mamparas elevadas (anuncios espectaculares) las cuales generalmente son susceptibles a los efectos de las acciones de empuje de viento debido a su configuración geométrica, tomando como punto principal de estudio el pedestal de soporte del mismo.

Este tipo de estructura aparentemente es muy sencilla porque cuenta solamente con tres partes principales que son: la mampara, el pedestal y la cimentación; en la Figura 1 se muestran esquemáticamente estas tres partes.

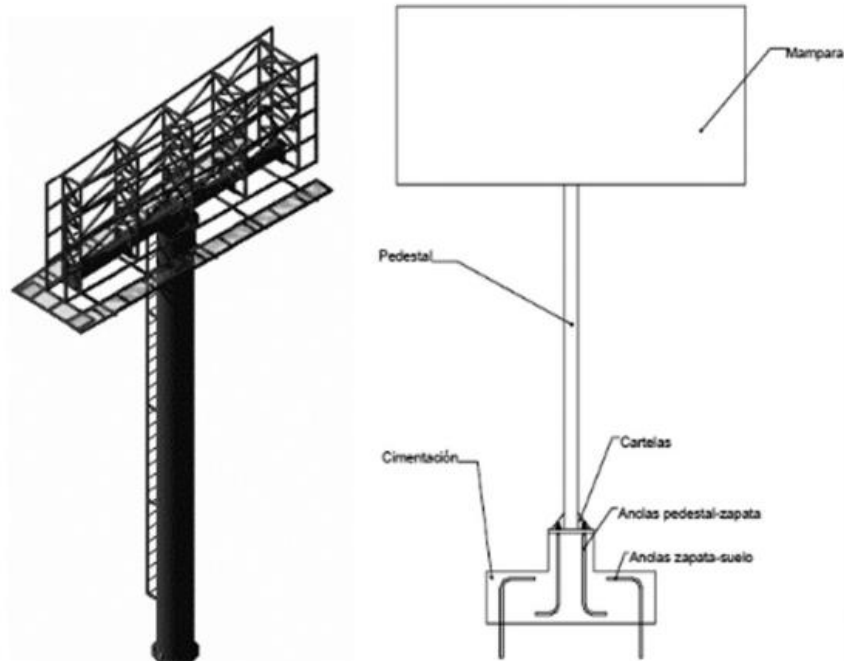


Figura 1: Estructura de panorámico

Sin embargo, vista en forma minuciosa, una mampara consta de varios componentes accesorios que hacen que esta estructura sea realmente muy compleja tanto en su diseño estructural, como en su construcción y también en su comportamiento sobre todo ante viento como el producido por un huracán o tromba. Tanto la cimentación como el pedestal y la mampara elevada pueden constar de diversos elementos tales como: anclas suelo–zapata, vigas estabilizadoras, anclas pedestal–zapata, lastres, placas-base, acuartelamientos, el tubo del pedestal, escaleras externas e internas, andamios, placas de conexión pedestal-mampara, travesaño principal de la mampara, placas verticales del travesaño, armaduras, pernos de sujeción, láminas de la mampara, accesorios de iluminación, ganchos o argollas de sujeción, travesaños secundarios; además, se tienen diversos elementos de sujeción o conexión tales como pernos, tornillos, remaches, soldaduras, etc.

2.2.- Partes de un panorámico

- **Columna:** Este es el enorme tubo de metal que sostiene el cartel en el aire. Es uno de los componentes más pesados de la estructura y se lleva la peor parte de la carga del viento en los fenómenos meteorológicos. El monopolio de acero comenzó con el oleoducto de Alaska: se producían tantos tubos de acero que algunos terminaron en la industria de las vallas publicitarias como un nuevo componente para reemplazar las vigas en l y los postes de madera.
- **Placa:** Este es el cuadrado de acero que se suelda a la parte superior de la columna, en el que se adjunta la cabeza de la señal. La placa contiene una gran cantidad de orificios, normalmente alrededor de 12, en los que la cabeza del letrero se atornilla a la columna con pernos enormes que miden aproximadamente 10 "de largo.
- **Barra de torsión:** Este es el gran tubo horizontal que se monta perpendicular a la columna, creando una apariencia de "T". Tiene una placa a juego con un patrón de pernos de imagen de espejo para atornillar de forma segura a la columna. La pieza que sujeta la placa a la barra de torsión es llamada "montura". La barra de torsión es normalmente la segunda parte más pesada de un panorámico.

- **Estabilizadores:** Estas son las vigas en L de acero que corren perpendiculares a la barra de torsión y crean el ángulo de los dos lados del letrero, también conocido como "V". En un letrero espalda con espalda, los estabilizadores son todos idénticos en longitud. En un signo de "V", los estabilizadores están en longitud descendente, con el estabilizador más largo en la parte de la barra de torsión más alejada de la carretera.
- **Montantes:** estas son las vigas en L de acero que se unen a los estabilizadores y tienen una orientación vertical. Estos son los que sostienen los anuncios en el letrero. Todos son de idéntica longitud.
- **Largueros:** Estas son piezas de ángulo de hierro de acero que se unen a los montantes. Son paralelos a la barra de torsión y normalmente hay alrededor de cuatro a cada lado del letrero.
- **Paneles:** Estos pueden estar hechos de acero o madera y, en conjunto, tienen las dimensiones exactas del letrero. Se cuelgan de los largueros del cartel. Los paneles son alrededor de los cuales se envuelve el anuncio de vinilo y se estira firmemente. Los paneles normalmente miden 4' de ancho y su longitud es la longitud total de la cara del cartel (en un cartel de 14' x 48', los paneles miden 14' x 4' y hay 12 de ellos uno al lado del otro).
- **Zócalo:** Este es el material de metal corrugado que oculta la barra de torsión de la vista cuando se ve la valla publicitaria desde la carretera, y es la ubicación de la placa de identificación del propietario del letrero, también conocida como "escudo".
- **Empotramiento directo o cimiento de jaula de pernos:** Así es como la columna de la valla publicitaria se adhiere a la tierra y se levanta. En una cimentación de empotramiento directo, se perfora un agujero en la tierra, se inserta la columna y luego se vierte concreto en la parte superior del agujero. En una cimentación de jaula de pernos, se vierte una enorme cimentación de concreto que se llena de barras de refuerzo y un patrón de enormes pernos. La columna del panorámico tiene una segunda placa en la

parte inferior de la columna, y los orificios de esta placa se alinean con el patrón de pernos en el cimiento, y la columna se atornilla al suelo.

2.3 Limitaciones y regulaciones del panoramico

- El Eurocodigo requiere que las señales hechas de estructuras de acero cumplan con regulaciones. Una de las principales preocupaciones en el diseño de vallas publicitarias y carteles es el riesgo de fallo por carga de viento, lo que tiene graves consecuencias económicas y de seguridad. Una estructura de señalización vial defectuosa puede causar lesiones a los peatones, dañar los vehículos y obstruir el tráfico. Como resultado, dichas estructuras que están expuestas al público deben satisfacer todas las consideraciones de seguridad necesarias. También se deben verificar los riesgos adicionales de colisión de vehículos con estructuras de letreros, y se debe proporcionar protección pasiva para dichas estructuras.
- La acción del viento en carteles y vallas publicitarias se puede evaluar de acuerdo con EN 1991-1-4:2005. El código de práctica ASCE 7-10 también se puede utilizar para la evaluación de la carga de viento en estructuras de letreros. El Anexo Nacional de BS EN 12899-1:2007 recomienda cargas de viento adecuadas para la mayoría de las señales en el Reino Unido. Si bien es más conservador que realizar un análisis completo, es más simple y rápido.
- Otras fuerzas que deben tenerse en cuenta al diseñar estructuras de letreros son las cargas puntuales y la carga dinámica de la nieve (no aplicable en Nigeria). El Anexo Nacional del Reino Unido recomienda que los letreros sean capaces de soportar una fuerza de 0,5 kN aplicada en cualquier punto. Representa la carga que podría ejercer, por ejemplo, un golpe de refilón en el retrovisor de un vehículo, la caída de una rama o una interferencia malintencionada con la señal. Esta carga puntual es el factor crítico solo para señales muy pequeñas, pero para señales montadas en un solo soporte, provoca fuerzas de torsión que deben tenerse en cuenta.
- Para vallas publicitarias grandes, las cargas vivas y el peso de los servicios deben tenerse en cuenta en el diseño

3.-Desarrollo

3.1.- Propuesta de diseño de la geometría, alcances y limitaciones

Los panorámicos se exponen a altas ráfagas de viento, por lo que su estructura ocupa ser muy rígida para soportar estas fuerzas. El espacio de diseño a evaluar será de dos dimensiones, las cargas y los apoyos de observan en la figura 2.

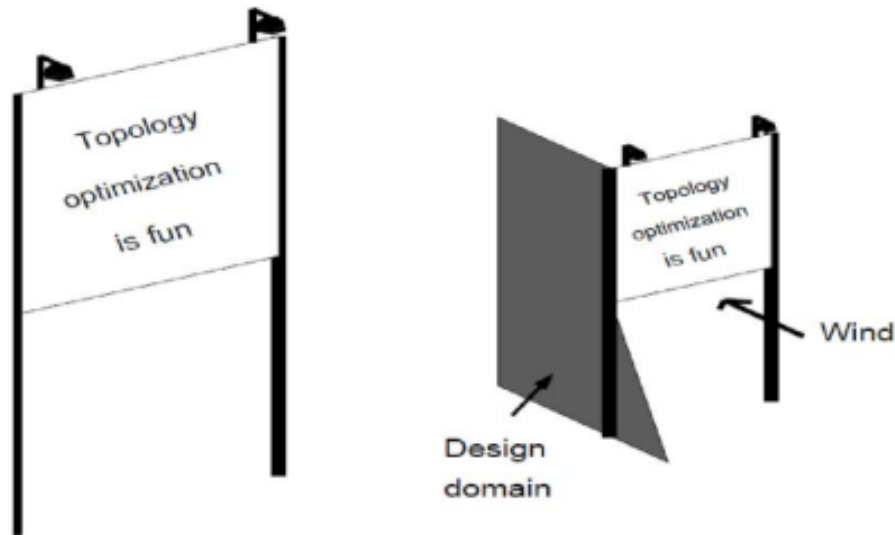


Figura 2: Estructura de panorámico y su interacción con el viento

En la figura 3 se puede ver el espacio de diseño propuesto para esta práctica. Se espera una fracción volumétrica aproximada de 0.20% del espacio de diseño. Se supone que el panorámico es muy rígido, y sus patas son del mismo material que el marco.

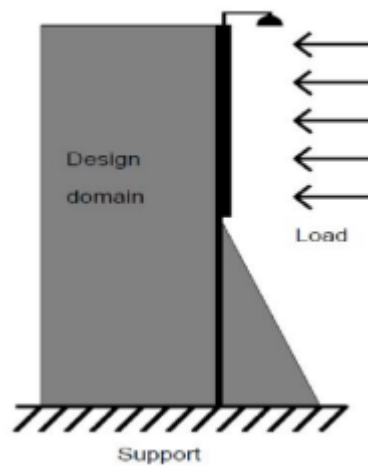


Figura 3: Espacio de diseño propuesto

De igual modo se toman ciertas consideraciones para la solución de esta práctica:

5 cargas, los apoyos tendrán restricciones en “X”, “Y” y el espacio de diseño para esta práctica el espacio de diseño resulta ser el visualizado en la figura 4.

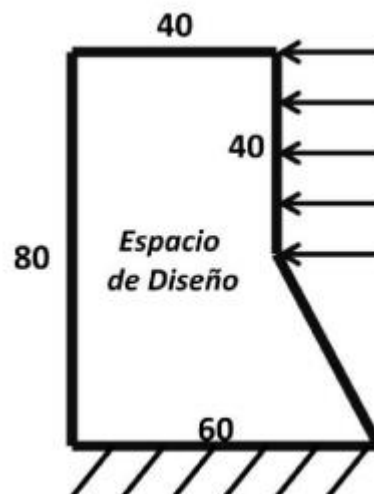


Figura 4: Espacio de diseño final

3.2.- Pasos del desarrollo de la programación

Para este caso vimos la oportunidad de utilizar como base el mismo script de la práctica 1 “código de optimización topológica de 99 líneas escrito en Matlab” por parte del autor Ole Sigmund (2001). Que como bien se mencionó, se dispone de 36 líneas para el programa principal, 12 líneas para el optimizador basado en criterios, 16 líneas para un filtro de independencia de malla y 35 líneas para el código de elemento finito. Estas se definen nuevamente y a detalle a continuación.

➤ 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 l_1 inferior y l_2 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.

Como se mencionó anteriormente, tanto los nodos como los elementos son columnas numeradas sabiamente de izquierda a derecha. Es más, cada nodo tiene dos grados de libertad (horizontal y vertical), así el comando $F(2,1) = -1$. (línea 79) aplica una fuerza vertical unitaria en la esquina superior izquierda. Los apoyos se implementan eliminando grados fijos de libertad de las ecuaciones lineales. Matlab lo puede hacer con la línea:

$$84U(\text{freedofs},:) = K(\text{freedofs},\text{freedofs}) \setminus$$
$$F(\text{freedofs},:);$$

Donde “freedofs” indican, los grados de libertad que no están restringidos. En general, es más fácil definir los grados de libertad que son fijos (fixeddofs) a partir de que los freedofs se encuentran automáticamente usando el operador de Matlab “setdiff” que encuentra los grados de libertad libres como la diferencia entre todos los grados de libertad y los grados de libertad fijos (línea 82). La matriz de rigidez se calcula en las líneas 86-99. El módulo de Young (E) y la ratio de Poisson (nu) pueden modificarse en las líneas 88 y 89.

Aunque para esta práctica en específico, se tuvieron que realizar algunas modificaciones al código base para poder insertar las fuerzas que se pide considerar en la propuesta de diseño anteriormente planteada, y para cambiar el anclaje del espacio de diseño a otra posición. Para ello se modificaron las líneas de código correspondientes con la instrucción “fixeddofs”. De igual forma se realizaron las modificaciones respectivas al código para recrear el empotramiento diagonal de la parte inferior derecha de la figura 5.

Código para la simulación

```
%%% A 99 LINE TOPOLOGY OPTIMIZATION CODE BY OLESIGMUND, OCTOBER 1999 %%%

function practica3(nelx,nely,volfrac,penal,rmin);
% INITIALIZE
x(1:nely,1:nelx) = volfrac;
loop = 0;
%Declarando vacio
for ely = 1:nely
    for elx = 1:nelx
        if ((ely-(nely*0.5)<(2*elx)-(1.36*nelx)) || (ely < (1+nely*0.5))) &&(elx > (1+nelx)*0.6666)
            passive(ely,elx) = 1;
        else
            passive(ely,elx) = 0;
        end
    end
end
x(find(passive))=0.001;
change = 1.0;
% START ITERATION
while change > 0.01
    loop = loop + 1;
    xold = x;
    % FE-ANALYSIS
    [U]=FE(nelx,nely,x,penal);

    xold = x;
    % FE-ANALYSIS
    [U]=FE(nelx,nely,x,penal);
    %13 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;
            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],1);
                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
    %25 FILTERING OF SENSITIVITIES
    [dc] = check(nelx,nely,rmin,x,dc);
    %27 DESIGN UPDATE BY THE OPTIMALITY CRITERIA METHOD
    [x] = OC(nelx,nely,x,volfrac,dc,passive);
    %29 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
%40 %%%%%%%%% OPTIMALITY CRITERIA UPDATE %%%%%%%%%

```

```

function [xnew]=OC(nelx,nely,x,volfrac,dc,passive)
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(1.,min(x+move,x.*sqrt(-dc./lmid))))); xnew(find(passive)) = 0.001;
    if sum(sum(xnew)) - volfrac*nelx*nely > 0; l1 = lmid;
    else l2 = lmid;
    end
end

```

```

%%%%%%%% MESH-INDEPENDENCY FILTER %%%%%%%%%

```

```

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)/(x(j,i)*sum);
    end
end

```

```

%65 %%%%%%%%% FE-ANALYSIS %%%%%%%%%

```

```

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),5); U=zeros(2*(nely+1)*(nelx+1),5);
for ely = 1:nely
    for elx = 1:nelx
        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 LOADSAND SUPPORTS(HALF MBB-BEAM)

```

```

F(2*nelx*(nely+1)+2,1) = 1;

```

```

fixeddofs = 2*(nely+1):2*(nely+1):2*(nelx+1)*(nely+1);
alldofs = [1:2*(nely+1)*(nelx+1)];
freedofs = setdiff(alldofs,fixeddofs);

```

```

% SOLVING 127

```

```

U(freedofs,:) = K(freedofs,freedofs) \F(freedofs,:);
U(fixeddofs,:)= 0;

```

```

%%%%%%%% ELEMENT STIFFNESS MATRIX %%%%%%%%%

```

```

function[KE]=lk

```

```

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(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)];

```

Resultados de la optimización

Tras correr la simulación con las líneas de código modificadas en el código anterior, se consigue la siguiente forma optimizada de la figura 5 correspondiente al panorámico.

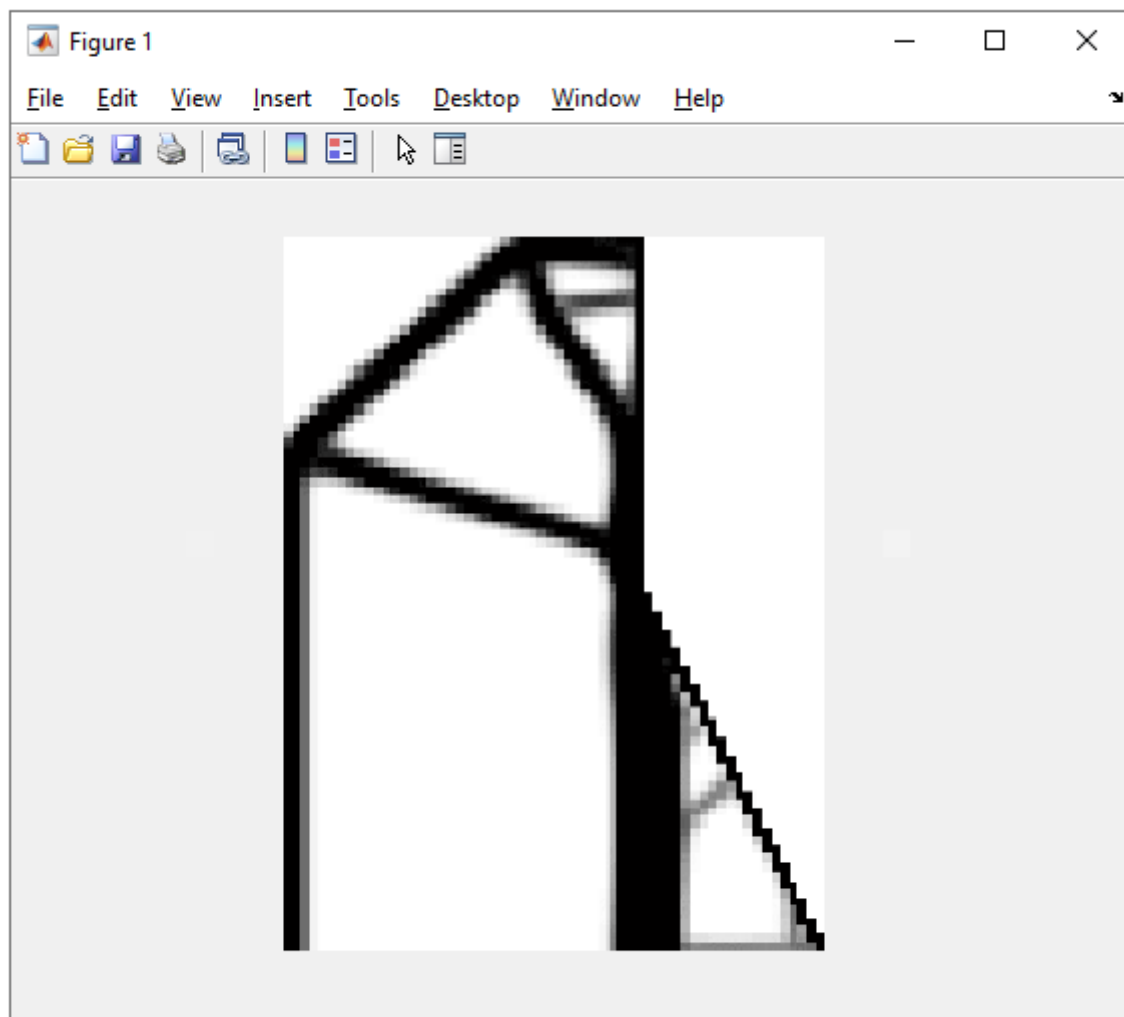


Figura 5: Estructura de panorámico optimizada

Diagrama de flujo del procedimiento básico de optimización

La optimización de topología es un método que combina los resultados de un análisis de elementos finitos. En este método, el objetivo es encontrar una solución con una distribución óptima del material en un volumen determinado. Este volumen se llama espacio de diseño. El espacio de diseño está entrelazado con elementos finitos. Cada iteración determina qué elementos estarán vacíos y cuáles representarán el material [Kubec 2010]. El procedimiento de optimización se muestra en la figura 6.

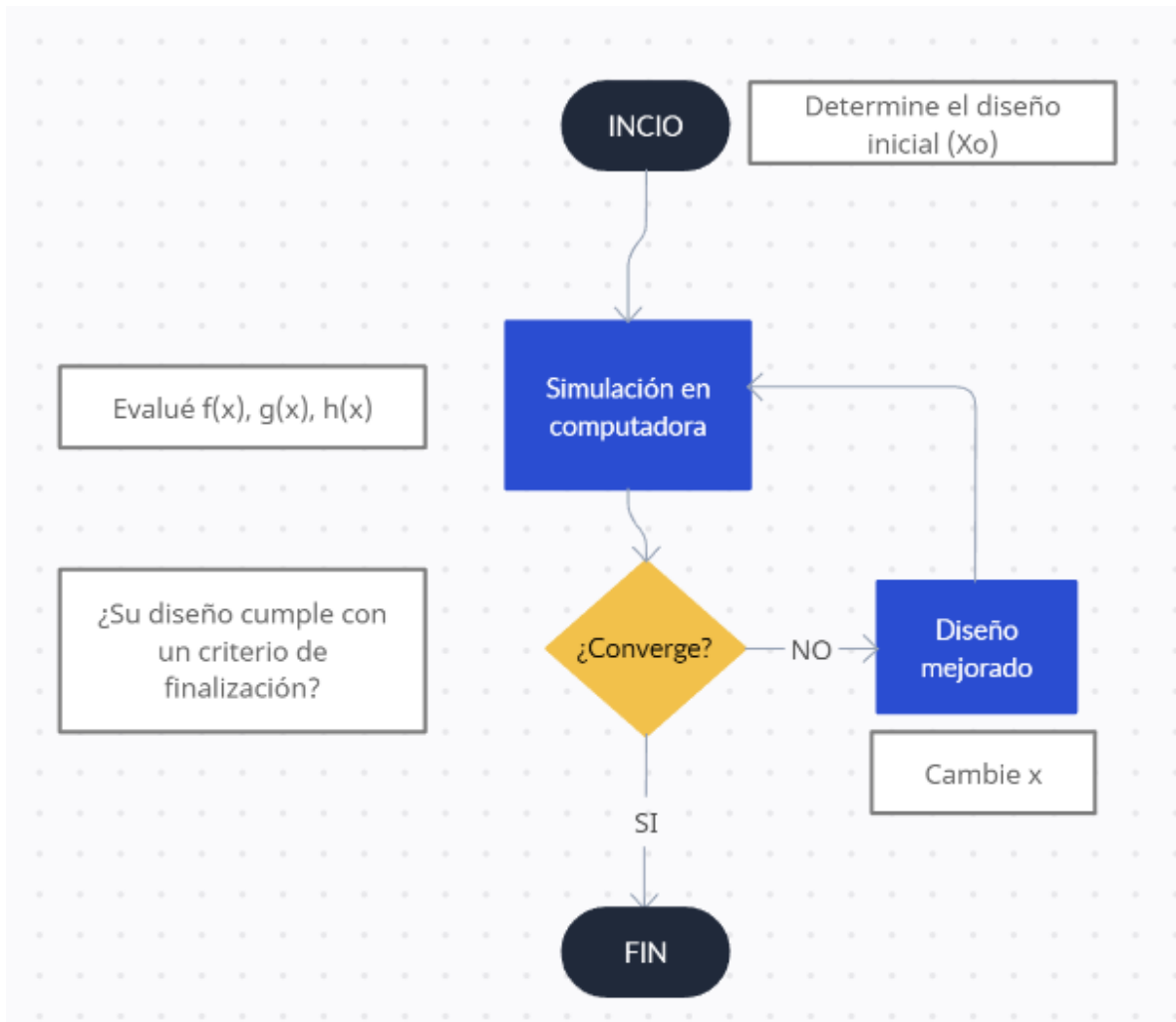


Figura 6: Diagrama de flujo básico de proceso de optimización. [Weck 2004]

Conclusiones

Eduardo Villarreal Gámez – 1992043:

En definitiva, me resultó nuevamente bastante interesante el hecho de que el código de 99 líneas del autor Ole Sigmund resulte ser tan flexible y adaptable, como se mostró para esta práctica, pues se pudo adaptar únicamente mediante ciertas modificaciones en el código base para la aplicación deseada. Referente a la investigación puedo decir que realmente fue algo complicada, ya que no había mucha información al respecto de análisis estructurales y de optimización de panorámicos, no obstante, se pudo sobrellevar de buena forma la práctica con el material disponible, como se muestra en el presente documento. Para concluir puedo mencionar que me resultó bastante interesante y útil la información obtenida durante la investigación, sobre todo por su alta aplicabilidad en criterios de diseño. Por lo anterior, me encuentro bastante satisfecho con los resultados obtenidos.

José Eduardo Mendoza Ziga – 1992212:

Esta práctica como las anteriores nos permiten conocer un poco más sobre algunas estructuras, desde sus partes y funciones hasta la manera de implementarlas y mejorarlas con el diseño optimizado. En esta ocasión analizamos un panorámico, como es su estructura y las partes que lo conforman, para realizar la práctica se utilizó un código de optimización utilizado en una practica pasada el cual al modificarlo un por no arrojo un resultado que buscamos, además se logro cumplir el objetivo el cual era desarrollar la capacidad de análisis, implementación y solución del problema de optimización de la estructura de un panorámico.

Brandon Arturo Solano Arias -1822072:

Al igual que en la practica anterior se empleó el código de 99 líneas para optimizar la estructura de un panorámico, pero fue un tanto complicado ya que no hay suficiente información o más bien información que se pueda

acceder para poder observar y aprender a hacer el diseño de un panorámico, y el análisis estructural de este mismo, la estructura debe soportar distintas fuerzas además de su propio peso, las fuerzas que provoca el “anuncio” que se coloca en la mampara por las corrientes de aire. Puedo concluir que esta práctica demostró la amplia variedad de posibilidades y utilidad que tiene el código de 99 líneas de Ole Sigmurd .

Daniel Alberto Acosta Banda - 1916426:

Los panorámicos son un buen punto de oportunidad para crear diseños generativos que sean eficientes pero que contengan la misma cantidad de cargas, y es muy interesante las diferentes maneras en las que se puede llegar a esa optimización, dependiendo de cuales serán las especificaciones deseadas del panorámico, y que tipo de anuncios serán los que maneja, pues existen anuncios simples de tela o plástico, o algunos mas complejos con algún mecanismo o material holográfico.

Por lo cual fue bueno conocer que el código de Ole Sigmurd fuera tan modulable, pues ayuda a que alguien pueda realizar diferentes tipos de modelos dependiendo de nuestras necesidades y el tipo de operación deseada.

Oiram Colunga Bernal – 1818785

En esta práctica también se analizo una estructura la cual intentamos optimizar pero en este caso fue la de un panorámico lo único complicado de esta práctica fue que no haba mucha información de como poder optimizar o mejorar esta estructura fuer de eso todo lo de las fue muy simple también algo que ayudo mucho fue el código 99 líneas del autor Ole Sigmund el cual me sigue sorprendiendo lo flexible, práctico y útil que puede llegar a ser.

Manuel Antonio Ulloa Méndez – 1992298

El código de 99 líneas del autor Ole Sigmund es muy flexible y adaptable, hemos analizado ya 3 estructuras diferentes y solo es de mover ciertas líneas para poder adaptar el código a la estructura a analizar.

Referencias Bibliográficas

- 1- https://ingenieria.unach.mx/images/Articulos_revista/revistapakbal_43_p_ag69-77.pdf
- 2- <https://www.obuniversity.com/articles/the-anatomy-of-a-billboard-structure>
- 3- L.A. Schmidt, Structural design by systematic synthesis, Proceedings of the Second ASCE Conference on Electronic Computation, 105–122, Pittsburgh, USA (1960).
- 4- S. Hernández, Métodos de Diseño Óptimo de Estructuras, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid (1990).
- 5- F. Navarrina y M. Casteleiro, A general methodological analysis for optimum design, Int. J. Num. Meth. Engrg., 31, 85–111 (1991).
- 6- F. Navarrina, S. López, I. Colominas, E. Bendito y M. Casteleiro, High order shape design sensitivity: A unified approach. Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg., 188, 681–696 (2000).
- 7- M. P. Bendsøe y N. Kikuchi, generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg., 71, 197–224 (1988).
- 8- E. Ramm, S. Schwarz y R. Kemmler, Advances in structural optimization including nonlinear mechanics, Proceedings of the European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2000) (CD-ROM, ISBN: 84-89925-70-4), European Community on Computational Methods in Applied Sciences, Barcelona (2000).

- 9- M. P. Bendsøe, Optimization of structural topology, shape, and material, Springer-Verlag, Heidelberg (1995).
- 10- I. Muiños, Optimización Topológica de Estructuras: Una Formulación de Elementos Finitos para la Minimización del Peso con Restricciones en Tensión, Proyecto Técnico, ETSICCP, Universidad de A Coruña (2001).
- 11- M. P. Bendsøe, Variable-topology optimization: status and challenges, Proceedings of the European Conference on Computational Mechanics ECCM'99, W. Wunderlich (Ed.), TUM, Munich (1999).
- 12- I. Muiños, I. Colominas, F. Navarrina y M. Casteleiro, Una formulación de mínimo peso con restricciones en tensión para la optimización topológica de estructuras, Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (ISBN: 84-89925-91-7), E. Oñate, F. Zárata, G. Ayala, S. Botello y M.A. Moreles (Eds.), CIMNE, Barcelona, 399–408 (2001).