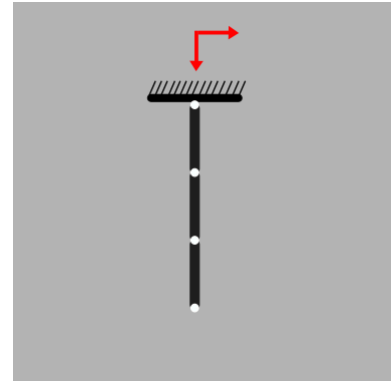
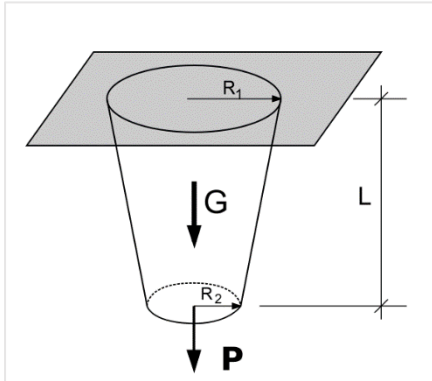


## Problema sistemas discretos

### 1. Resolución del problema de forma manual utilizando tres barras de sistemas discretos



- Matrices de rigidez y vector de cargas elementales

Barra 1:

$$\begin{Bmatrix} R_1^{(1)} \\ R_2^{(1)} \end{Bmatrix} = k^{(1)} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1^{(1)} \\ u_2^{(1)} \end{Bmatrix}$$

$$k^{(1)} = \left( \frac{EA}{l} \right)^{(1)}$$

$$f_g^{(1)} = \frac{G^{(1)}l^{(1)}}{2}$$

$$G^{(1)} = \frac{\gamma V^{(1)}}{l^{(1)}} = \frac{\gamma \pi}{3} (r_1^2 + r_2^2 + r_1 r_2)$$

Barra 2:

$$\begin{Bmatrix} R_1^{(2)} \\ R_2^{(2)} \end{Bmatrix} = k^{(2)} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1^{(2)} \\ u_2^{(2)} \end{Bmatrix}$$

$$k^{(2)} = \left( \frac{EA}{l} \right)^{(2)}$$

$$f_g^{(2)} = \frac{G^{(2)}l^{(2)}}{2}$$

$$G^{(2)} = \frac{\gamma V^{(2)}}{l^{(2)}} = \frac{\gamma \pi}{3} (r_2^2 + r_3^2 + r_2 r_3)$$

Barra 3:

$$\begin{Bmatrix} R_1^{(3)} \\ R_2^{(3)} \end{Bmatrix} = k^{(3)} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1^{(3)} \\ u_2^{(3)} \end{Bmatrix}$$

$$k^{(3)} = \left( \frac{EA}{l} \right)^{(3)}$$

$$f_g^{(3)} = \frac{G^{(3)} l^{(3)}}{2}$$

$$G^{(3)} = \frac{\gamma V^{(3)}}{l^{(3)}} = \frac{\gamma \pi}{3} (r_3^2 + r_4^2 + r_3 r_4)$$

El radio situado en los nodos es calculado a partir de la ecuación de una recta donde y corresponde a la coordenada y.

$$r(y) = \left( \frac{r_2 - r_1}{L} \right) y + r_1$$

- Desplazamientos locales y globales

$$\begin{aligned} u_1^{(1)} &= u_1 & u_1^{(2)} &= u_2 & u_1^{(3)} &= u_3 \\ u_2^{(1)} &= u_2 & u_2^{(2)} &= u_3 & u_2^{(3)} &= u_4 \end{aligned}$$

- Ecuación de ensamblaje a cada uno de los nodos

Nodo 1:

$$\sum_{i=1}^n R_i^{(e)} = -R1 + f_g^{(1)}$$

Nodo 2:

$$\sum_{i=1}^n R_i^{(e)} = f_g^{(1)} + f_g^{(2)}$$

Nodo 3:

$$\sum_{i=1}^n R_i^{(e)} = f_g^{(2)} + f_g^{(3)}$$

Nodo 4:

$$\sum_{i=1}^n R_i^{(e)} = f_g^{(3)} + P$$

- Matriz de rigidez, desplazamientos y fuerzas globales

$$\begin{bmatrix} k^{(1)} & k^{(1)} & 0 & 0 \\ -k^{(1)} & k^{(1)} + k^{(2)} & -k^{(2)} & 0 \\ 0 & -k^{(2)} & k^{(2)} + k^{(3)} & -k^{(3)} \\ 0 & 0 & -k^{(3)} & k^{(3)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_1 + f_g^{(1)} \\ f_g^{(1)} + f_g^{(2)} \\ f_g^{(2)} + f_g^{(3)} \\ f_g^{(3)} + P \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1.1615e + 11 & -1.1615e + 11 & 0 & 0 \\ -1.1615e + 11 & 1.9391e + 11 & -7.7754e + 10 & 0 \\ 0 & -7.7754e + 10 & 1.2497e + 11 & -4.7037e + 10 \\ 0 & 0 & -4.7037e + 10 & 4.7037e + 10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_1 + 1.2711e + 5 \\ 2.1232e + 5 \\ 1.3689e + 5 \\ 7.1683 + 3 \end{bmatrix}$$

- Cálculo de desplazamientos

$$\begin{bmatrix} 1.9391e + 11 & -7.7754e + 10 & 0 \\ -7.7754e + 10 & 1.2497e + 11 & -4.7037e + 10 \\ 0 & -4.7037e + 10 & 4.7037e + 10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.1232e + 5 \\ 1.3689e + 5 \\ 7.1683 + 3 \end{bmatrix}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 3.6237e - 6 \\ 6.3061e - 6 \\ 7.8301e - 6 \end{bmatrix} (m)$$

- Deformaciones en cada barra

Barra 1:

$$\varepsilon^{(1)} = \frac{u_2 - u_1}{l} = 3.6237e - 6$$

Barra 2:

$$\varepsilon^{(2)} = \frac{u_3 - u_2}{l} = 2.6825e - 6$$

Barra 3:

$$\varepsilon^{(3)} = \frac{u_4 - u_3}{l} = 1.5240e - 6$$

- Tensiones en cada barra

Barra 1:

$$\sigma^{(1)} = E\varepsilon^{(1)} = 3.9860e + 4 \left( \frac{N}{m^2} \right)$$

Barra 2:

$$\sigma^{(2)} = E\varepsilon^{(2)} = 2.9507e + 4 \left( \frac{N}{m^2} \right)$$

Barra 3:



$$\sigma^{(3)} = E \varepsilon^{(3)} = 1.6764e + 4 \left( \frac{N}{m^2} \right)$$

- Esfuerzos en cada barra

Barra 1:

$$N^{(1)} = \sigma^{(1)} A^{(1)} = 4.2089e + 5 \text{ (N)}$$

Barra 2:

$$N^{(2)} = \sigma^{(2)} A^{(2)} = 2.0857e + 5 \text{ (N)}$$

Barra 3:

$$N^{(3)} = \sigma^{(3)} A^{(3)} = 7.1683e + 4 \text{ (N)}$$

- Reacción en el nodo 1

$$k^{(1)} u_1 - k^{(1)} u_2 = -R_1 + f_g^1$$

$$R_1 = f_g^1 + k^{(1)} (u_2 - u_1), \quad u_1 = 0$$

$$R_1 = f_g^1 + k^{(1)} u_2 = 5.4801e + 5 \text{ (N)}$$

Verificamos sumando todas las fuerzas

$$\sum_{i=1}^n f_i \approx 0$$

## 2. Resolución del problema para n barras de sistemas discretos

Para encontrar la solución a este problema de forma numérica para un numero de barras n se ha utilizado un software de programación matemática que permite operaciones matriciales, gráficos, etc.

Dentro de nuestro script de Matlab introducimos las propiedades mecánicas del material como el modulo de Young, peso específico y además las condiciones geométricas del caso de nuestro problema (R1, R2, L, P).

```
young = 1.1e10; % N/m^2
gamma = 24010; % N/m^3
rmax = 2;      % m
rmin = 1;      % m
l = 3;         % m
p = 20e3;      % N
```

Después se definen unas variable que permitirán iterar de un numero de barras inicial a un final a través de una función for(). Dentro de esta función se define el número de barras que se utilizara en la iteración, el numero de nodos, las coordenadas de los nodos y sus puntos intermedios.

```
n_inicial = 3;
n_final = 25;
max_u = 1:n_final-n_inicial+1;

for i=n_inicial:n_final
%Discretization
n = i;      % n of beams
nnodes = n+1; % n of nodes
y_nodes = linspace(0,l,nnodes); % y coordinates at the nodes
y_mid = (l/n)/2:l/n:1-(l/n)/2; % y coordinates at the mid sections
```

De aquí se necesita para el cálculo de las matrices de rigidez elementales y las fuerzas distribuidas los radios tanto en los nodos como en los puntos intermedios calculados anteriormente.

```
%weight of section G's
%radius at the nodes
r_nodes = (rmin-rmax)/l*y_nodes+rmax; % radius at the nodes
r_mid = (rmin-rmax)/l*y_mid+rmax;     % radius at the mid section

%Distributed load

fg = zeros(n,1);
G = zeros(n,1);

% G in N/m
for i=1:n
    G(i) = gamma*pi/3*(r_nodes(i)^2+r_nodes(i+1)^2+r_nodes(i)*r_nodes(i+1));
end

%fg in N
fg = G*(l/n)/2;
```

Una vez se dispone de todos los parámetros necesarios para el cálculo del problema, se construye la matriz de rigidez global del sistema.

```
%Stiffnes matrix

k_element = young*pi*r_mid.^2/(1/n); % k of each beam
k = zeros(nnodes); % global stiffnes matrix

for i=1:n % building global stiffnes matrix
    k(i:i+1,i:i+1) = [1,-1;-1,1].*k_element(i)+k(i:i+1,i:i+1);
end
```

Debido a que el desplazamiento en el nodo 1 está empotrado el desplazamiento  $u_1=0$  y por lo tanto se puede eliminar la primera fila y columna de la matriz de rigidez global. Y construimos el vector de fuerzas globales eliminando su primera fila.

```
%Get mini stiffnes matrix and mini force vector

mini_k = k(2:nnodes,2:nnodes);

%Creating mini_f

mini_f = zeros(n,1);

for i=1:n
    if i<n
        mini_f(i)=fg(i)+fg(i+1);
    else
        mini_f(i)= fg(i)+p;
    end
end
```

Resolviendo el sistema de ecuaciones se obtienen los desplazamientos nodales:

```
%Find displacement matrix

m_u = mini_k\mini_f;

%Get global displacement vector

u = zeros(nnodes,1);

u(2:end)=m_u;
```



Una vez calculados los desplazamientos nodales se obtienen las deformes en las barras, la tensión y la fuerza axial a la que está sometida.

```
%Deformation of each beam

e = zeros(n,1);

for i=1:n
    e(i)= (u(i+1)-u(i))/(1/n);
end

%Strain stress

sigma = young*e;

%Strain

N = zeros(n,1);

for i=1:n
    N(i)= sigma(i)*pi*r_mid(i)^2;
end
```

### 3. Diagrama de convergencia

Una vez se ha iterado para todos los casos de  $n$  barras y graficamos el desplazamiento nodal máximo de sistema en función del número de barras se observa que converge hasta un valor aproximado de:

$$u_{max} = 7.4223e - 6 \text{ (m)}$$

