

## TWO NUMERICAL MODELS OF SISMIC STRUCTURE ANALYSIS WITH TADA DISSIPERS

Roberto Aguiar<sup>(1,2)</sup>, Brian Cagua<sup>(3)</sup>, Jorge Romero<sup>(3)</sup>, Julia Pilatasig<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE. Av. Gral. Rumiñahui s/n, Valle de los Chillos.

<sup>(2)</sup>Carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí  
[rraguiar@espe.edu.ec](mailto:rraguiar@espe.edu.ec)

<sup>(3)</sup>Maestría en Estructuras. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. [bjcagua@espe.edu.ec](mailto:bjcagua@espe.edu.ec)  
[jiromerolol@gmail.com](mailto:jiromerolol@gmail.com) [jepilatasig3@espe.edu.ec](mailto:jepilatasig3@espe.edu.ec)

Received: September 2019. Accepted: November 2019.

### ABSTRACT

The equivalent diagonal model and the dissipating element model for the seismic analysis of structures with energy dissipators are presented. For this purpose, the calculation of the lateral stiffness matrix of a gantry is shown in detail and a gantry is resolved against static loads. Some new functions of CEINCI-LAB are indicated in the case of the heatsink model.

**Keywords:** CEINCI-LAB computer system, heatsink element, equivalent diagonal

## DOS MODELOS NUMÉRICOS DE ANÁLISIS SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON DISIPADORES TADAS

### RESUMEN

Se presenta el modelo de la **diagonal equivalente** y el modelo de **elemento disipador** para el análisis sísmico de estructuras con disipadores de energía. Para el efecto se muestra con detalle el cálculo de la matriz de rigidez lateral de un pórtico y se resuelve un pórtico ante cargas estáticas. Se indican algunas nuevas funciones de **CEINCI-LAB** para el caso del modelo de *elemento disipador*.

**Palabras Claves:** Sistema de computación **CEINCI-LAB**, elemento disipador, diagonal equivalente.

## 1. INTRODUCCIÓN

La fotografía de la figura 1, corresponde a un dissipador TADAS de 6 placas que fue utilizado en el reforzamiento sísmico de tres bloques estructurales de la Empresa Molinos Superior, que fue afectada por el terremoto de Pedernales de 2016 de magnitud 7.8 (Aguiar y Del Castillo, 2016). Lo importante de la fotografía es mostrar que el TADAS, está compuesto por dos placas, la de flexión que se halla a la izquierda y la de corte que observa a la derecha.

En los proyectos, estas dos placas se colocan separadas. En efecto, se deja una separación comprendida entre 1 y 2 mm, se recomienda dejar 1.5 mm, que aproximadamente es el diámetro de un alambre. De tal manera que un alambre se coloca entre las dos placas, mientras se sueldan las placas secundarias (de color plomo en la fotografía de la figura 1 a), a las placas horizontales de continuidad, luego se quita el alambre y las dos placas quedan separadas 1.5 mm.



(a)



(b)



(c)

**Figura 1** a) Placa de flexión a la izquierda y placa de corte a la derecha de un dissipador TADAS de 6 placas; b) Ensayo de un dissipador TADAS de 4 placas; c) Comportamiento a flexión durante el ensayo.

La separación entre las dos placas, tiene por objetivo, que el dissipador no transmita carga vertical, esta consideración se toma en cuenta en el siguiente apartado cuando se muestra el cálculo de la matriz de rigidez de un elemento TADAS.

En la figura 1 b, se ven todos los componentes que intervienen en la realización de un ensayo y son: i) A la izquierda se ve el gato hidráulico; ii) A la

derecha el marco de carga; iii) En la parte inferior del marco de carga se tiene a la izquierda la celda de carga; iv) A la derecha se ve un disipador de 4 placas a ser ensayado, el cual se halla sobre un banco de carga (estructura diseñada para soportar las cargas laterales altas que se le darán al disipador); v) Sobre el escritorio se muestra la computadora desde la cual se emite la información sobre las cargas cíclicas que se dan y a la que llega los datos que se obtienen del ensayo.

En este ensayo la placa de flexión, se colocó en la parte inferior y en la parte superior, se encuentra la placa de corte y es así como el primero de los autores de este artículo ha colocado en el reforzamiento sísmico de varias estructuras en el Ecuador. Aguiar y Del Castillo (2018); Aguiar *et al.*, (2019,1)

Finalmente, en la figura 1 c, se muestra un instante del ensayo del TADAS de 4 placas y se observa cómo se deforma a flexión la placa triangular, que prácticamente trabaja empotrada. La placa de corte durante el ensayo se desplaza horizontalmente (debido a la cargas laterales) se desplaza verticalmente por eso se tienen los cilindros que se observan en la figura 1 a (sobre la placa triangular) y hay una rotación.

Para identificar el comportamiento, se puede decir que la placa de flexión trabaja empotrada en la parte inferior y articulada en la parte superior (modelo de rodillo) con este modelo se está despreciando el desplazamiento vertical, que es mínimo pero se da. Esto es para el caso de que la placa de flexión se encuentre en la parte inferior y la placa de corte en la parte superior.

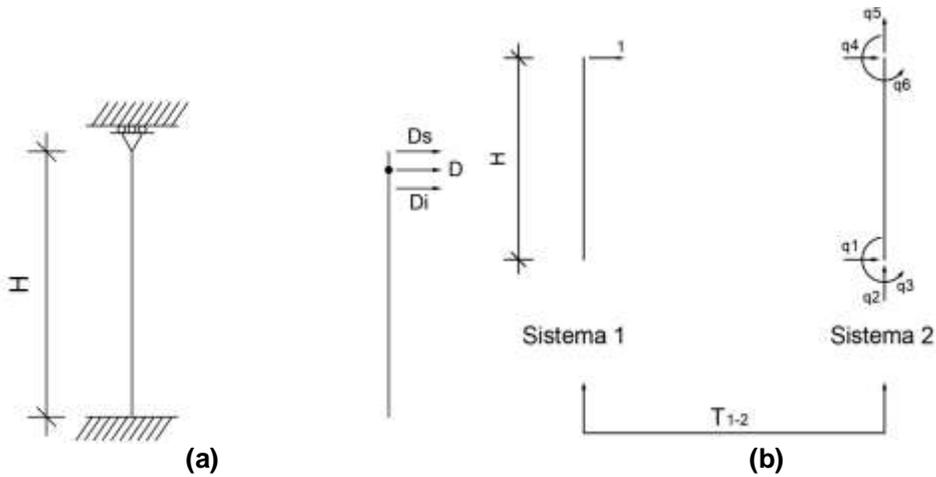
Ahora en un Proyecto, se puede colocar la placa de corte en la parte inferior y la de flexión en la parte superior, es otra posibilidad, en este caso se tendrá un rodillo en la parte inferior y un empotramiento en la parte superior. Es importante tener en cuenta esto en la deducción de la matriz de rigidez del elemento TADAS que se indica a continuación.

## 2. MATRIZ DE RIGIDEZ DE ELEMENTO TADAS

Se va a desarrollar los dos casos como puede colocarse el TADAS en un Proyecto. En el primer caso, que se indica en la figura 2, la placa de flexión se encuentra en la parte inferior y la de corte en la parte superior. Por esta razón se tiene empotrado abajo y rodillo arriba (gráfica izquierda de figura 2 a. En este caso el desplazamiento horizontal  $D$ , se encuentra en la parte superior, a este modelo se identifica como Sistema 1, a la izquierda de la figura 2 b, mientras que a la derecha se muestra el elemento disipador en coordenadas globales.

El objetivo es encontrar la matriz de rigidez del elemento disipador en coordenadas globales  $k_2$  con el cual se hallará la matriz de rigidez de la estructura por ensamblaje directo considerando al disipador como un elemento más de la estructura.

En el sistema 1, se conoce la matriz de rigidez  $k_1$  y no es más que la rigidez tangente del modelo constitutivo del disipador TADAS, que se habla en el siguiente apartado. Para encontrar la matriz  $k_2$ , se debe encontrar primero, la matriz de paso entre el sistema 1 y el sistema 2 (ver figura 2 b), por medio de la cinemática.



**Figura 2** Placa de flexión abajo y placa de corte encima; a) Modelo Empotrado-Rodillo e identificación del desplazamiento  $D$ , un  $\epsilon$  más arriba se tiene  $D_s$  y un  $\epsilon$  más abajo se tiene  $D_i$ ; b) En el sistema 1, se muestra al elemento disipador con un solo grado de libertad ubicado en la parte superior y en el sistema 2 se presentan al elemento disipador y sus coordenadas globales, para el ensamblaje de la matriz de rigidez.

- **Matriz de paso  $T_{1-2}$**

Al observar las figuras de la derecha de 2 a y 2 b, se tiene:

$$\begin{aligned}
 D_s &= q_4 \\
 D_i &= q_1 - q_3 * H \\
 D &= D_s - D_i \\
 D &= q_4 - q_1 + q_3 * H \\
 D &= [-1 \quad 0 \quad H \quad 1 \quad 0 \quad 0] * \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$T_{1-2} = [-1 \quad 0 \quad H \quad 1 \quad 0 \quad 0] \tag{1}$$

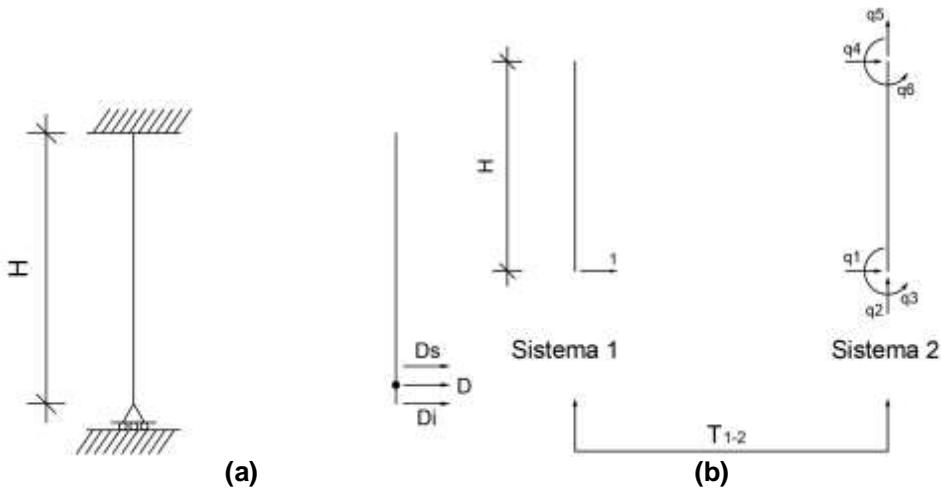
La matriz de rigidez, en el sistema de coordenadas dos, se encuentra con la siguiente ecuación.

$$k_2 = T_{1-2}^t k_1 T_{1-2} \tag{2}$$

Donde  $k_1$  es la rigidez tangente del modelo constitutivo del disipador TADAS que se indica en el siguiente apartado.

- **Placa de Corte abajo y Placa de Flexión arriba**

Existe otra posibilidad de colocar los disipadores en un Proyecto y consiste en poner abajo la placa de corte y arriba la placa de flexión, contrario a lo indicado en la figura 2; en este caso se tiene que el desplazamiento  $D$ , o sistema 1, se mide en la parte inferior como se indica en la figura 3 a.



**Figura 3** Placa de Corte en la parte Inferior y Placa de Flexión arriba; a) Modelo de Rodillo-Empotramiento; b) Sistema de coordenadas 1 y 2.

En este caso la matriz de paso es la siguiente:

$$T_{1-2} = [-1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ H] \tag{3}$$

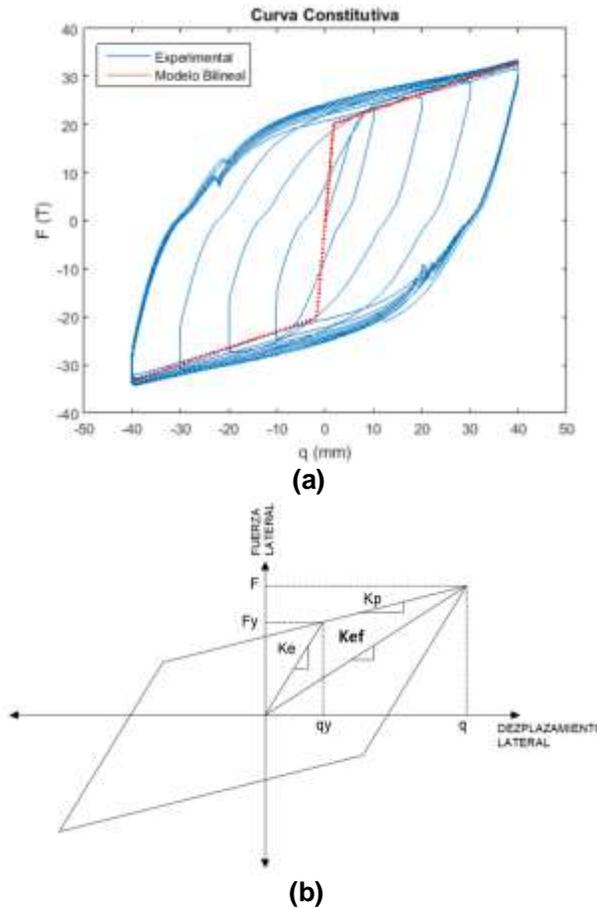
Donde  $H$  es la altura del disipador, la matriz de rigidez en el sistema de coordenadas 2, se halla con la ecuación (2).

### 3. MODELO CONSTITUTIVO BILINEAL

En la figura 4 a, se muestra la curva constitutiva del ensayo de un disipador TADAS de 6 placas, con el que se reforzó el Ex Parquadero de la ULEAM, hoy convertido en un Edificio Administrativo, que cuenta con 8 auditorios ya que en cada rampa hicieron uno. Con línea azul está la curva constitutiva que se obtuvo en el ensayo (Dictuc, 2019) y con rojo el modelo bilineal que se utiliza para el análisis sísmico.

En la figura 4 b, se muestra el modelo bilineal completo (para un ciclo de carga) en ella se aprecia el modelo bilineal y las rigideces: elástica  $k_e$ ; plástica  $k_p$ ; y la rigidez efectiva  $k_{ef}$ . También se indica el punto de fluencia que está asociado al desplazamiento de fluencia  $q_y$  y fuerza de fluencia  $F_y$ . De igual manera se indica

que para un punto cualquiera que tiene un desplazamiento  $q$ , la fuerza asociada es  $F$ .



**Figura 4** a) Curva constitutiva obtenida en laboratorio de un disipador TADAS; b) Modelo Bilineal.

Para el modelo de **Elemento Disipador** se trabaja con la rigidez plástica  $k_p$ ; y para el modelo de la **Diagonal Equivalente** que se presenta en el siguiente apartado se trabaja con la rigidez efectiva  $k_{ef}$ . Las ecuaciones de cálculo se indican a continuación y están deducidas en Aguiar *et al.* (2016), Nanguillasmú H., y Tena A., (2017)

$$F_y = n \frac{f_y b t^2}{6 h} \quad (4)$$

$$q_y = \frac{f_y h^2}{E_s t} \quad (5)$$

$$k_e = n \frac{E_s b t^3}{6 h^3} \quad (6)$$

Donde  $b, h, t$ , son la base, altura y espesor de la placa triangular;  $n$  es el número de placas del disipador;  $f_y, E_s$ , son el límite de fluencia del material y el módulo de elasticidad del material, que por regular es acero. Ahora, la fuerza  $F$ , asociado a un desplazamiento relativo  $q$ , viene dada por la siguiente expresión.

$$F = F_y + k_p (q - q_y) \quad (7)$$

Por otra parte, se tiene que:

$$k_p = \alpha k_e \quad (8)$$

Donde  $\alpha = 0.02$ ; Se recuerda que  $F$  tiene que ser menor que la fuerza total de plastificación  $F_u$ , que viene dada por la siguiente ecuación.

$$F_u = \frac{f_y b t^2}{4 h} \quad (9)$$

#### 4. MODELO DE LA DIAGONAL EQUIVALENTE

En el modelo de la Diagonal Equivalente, que se presenta en este apartado se trabaja con la rigidez efectiva  $k_{ef}$  que se muestra en la figura 4 b, la misma que se calcula con la siguiente ecuación.

$$K_{ef} = \frac{F}{q} \quad (10)$$

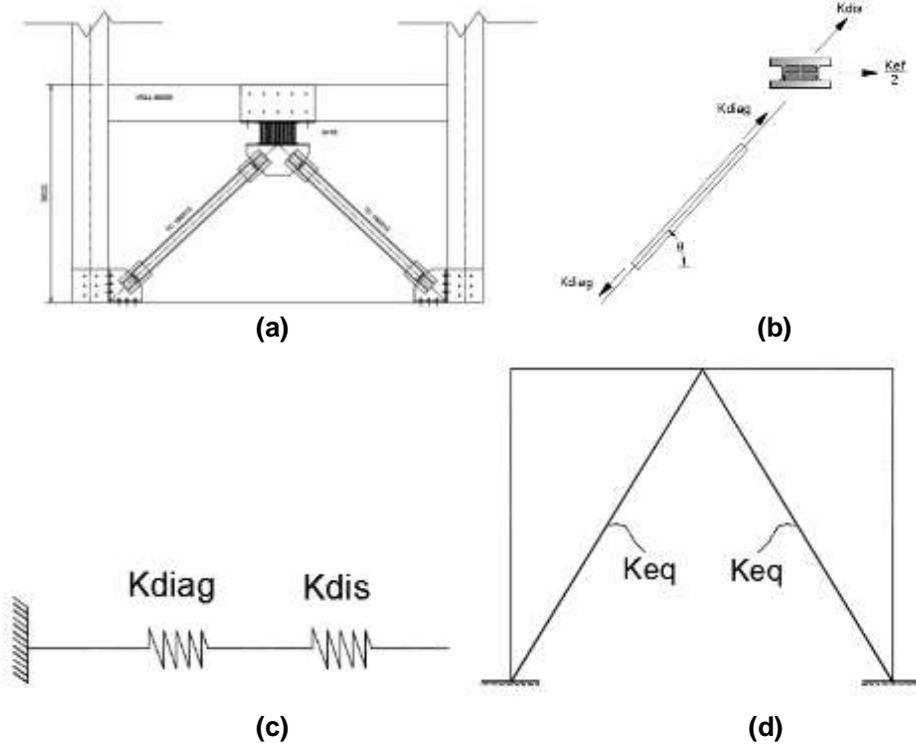
La fuerza  $F$  se halla con la ecuación (7) y el desplazamiento relativo  $q$ , es dato para el cual se obtiene la rigidez efectiva.

En la figura 5 a, se presenta un vano de un pórtico con un disipador de energía TADAS, colocado sobre dos diagonales de acero en forma de "V" invertida, cada diagonal tiene una rigidez axial  $k_{diag}$

$$k_{diag} = \frac{E_s A}{L} \quad (11)$$

Donde  $L$  es la longitud de la diagonal;  $E_s$  es el módulo de elasticidad del material;  $A$  es el área de la sección transversal; en la figura 5 b, se observa la dirección en que actúa esta rigidez  $k_{diag}$  y la rigidez efectiva que por cierto aparece dividida para 2, ya que se tienen dos diagonales y se va a encontrar una rigidez equivalente del conjunto: diagonal-disipador.

Se realiza una rotación de coordenadas para hallar la rigidez  $k_{dis}$  que se encuentra en la misma dirección de la rigidez axial de la diagonal. La matriz de paso  $T$ , aunque solo tiene un elemento vale.



**Figura 5** Modelo de la diagonal equivalente; a) Vano con disipador colocado sobre diagonales de acero; b) Rigidez efectiva  $k_{ef}$ , rigidez del disipador  $k_{dis}$  y rigidez de la diagonal  $k_{diag}$ ; c) Modelo de resortes en serie; d) Rigidez equivalente del conjunto diagonal de acero-disipador.

$$T = \frac{1}{\cos \theta}$$

Siendo  $\theta$  el ángulo de forma la diagonal con respecto a la horizontal. Con esto  $k_{dis}$  se encuentra con la siguiente expresión.

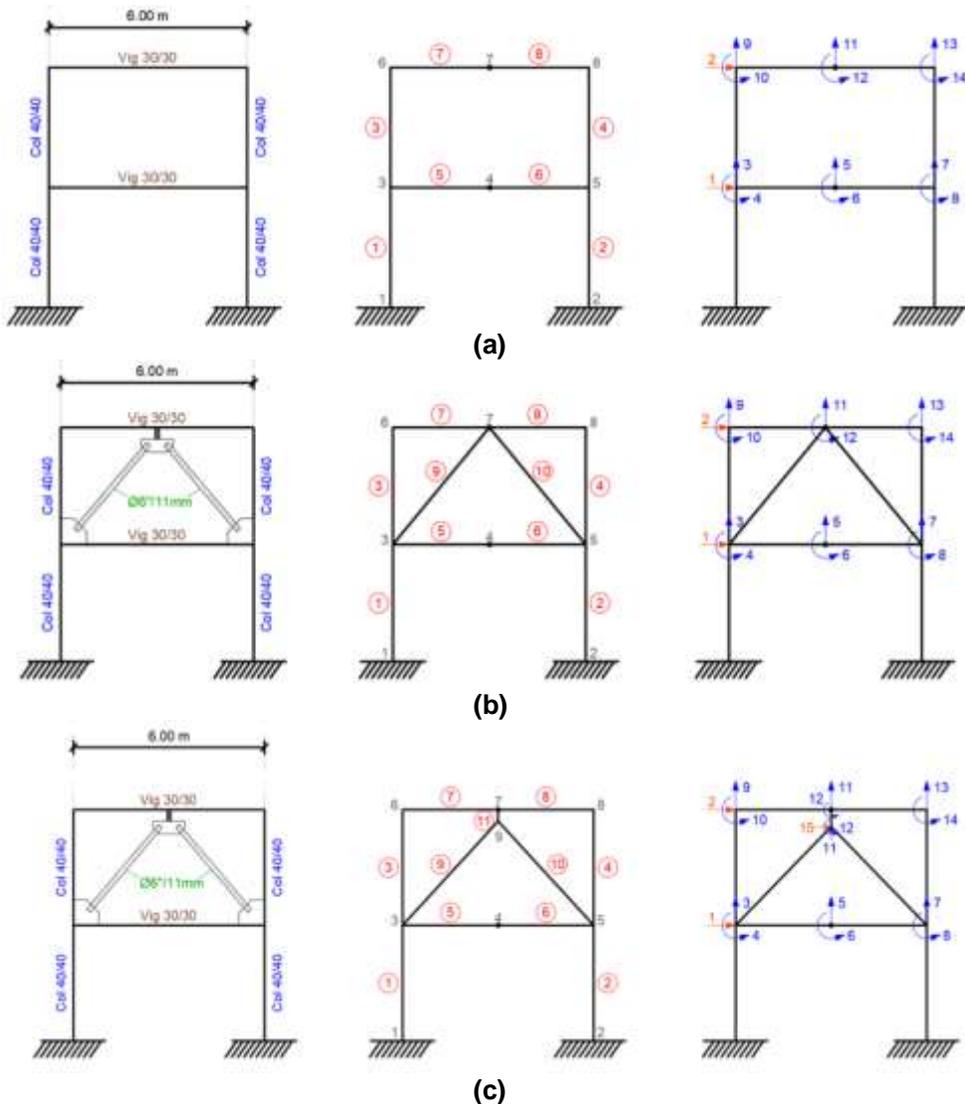
$$k_{dis} = T^t \frac{k_{ef}}{2} T$$

Por tener desplazamientos diferentes, la rigidez axial de la diagonal  $k_{diag}$  con la rigidez del disipador  $k_{dis}$  trabajan en serie como se observa en la figura 5 c, con esto se halla la rigidez equivalente  $k_{eq}$  del conjunto: diagonal-disipador, con la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_{diag}} + \frac{1}{k_{dis}}$$

Reemplazando valores se llega a obtener.

$$K_{eq} = \frac{K_{diag} K_{ef}}{K_{ef} + 2 \cos^2 \theta K_{diag}} \quad (12)$$



**Figura 6** Estructura de análisis; numeración de nudos y elementos; numeración de grados de libertad; a) Estructura de hormigón armado sin diagonales ni disipador; b) Estructura de hormigón armado con disipador TADAS sobre diagonales, calculado con **rigidez equivalente**; c) Estructura de hormigón armado con disipador TADAS sobre diagonales, calculado con **elemento disipador**.

## 5. EJEMPLO NUMÉRICO

Se determinará la matriz de rigidez lateral, del pórtico de hormigón armado indicado en la figura 6 a; que tiene columnas de 40/40 cm, y vigas de 30/30 cm, la luz es de 6.0 m, y la altura de entrepiso es de 3.0 m. El hormigón tiene una

resistencia a la compresión  $f'_c = 240 \frac{kg}{cm^2}$ ; el módulo de elasticidad del hormigón se halla con la siguiente expresión  $E = 15000 \sqrt{f'_c} \left( \frac{kg}{cm^2} \right)$

$$K_L = \begin{bmatrix} 3377.8 & -1245.5 \\ -1245.5 & 704.95 \end{bmatrix}$$

Ahora, en la estructura de hormigón armado se incorpora en el segundo piso dos diagonales circulares de 6" de diámetro y 11 mm, de espesor y sobre estas se halla un disipador TADAS de acero, de 6 placas, cada placa tiene una base de 20 cm, una altura de 20 cm, un espesor de 3 cm. El módulo de elasticidad del acero es  $f_y = 3200 \frac{kg}{cm^2}$ , se obtiene la matriz de rigidez lateral trabajando con el modelo de la **diagonal equivalente** para el efecto se impone un desplazamiento relativo del disipador de 2cm. Se trabaja con un valor  $\alpha = 0.02$  (relación entre la rigidez post fluencia con respecto a la rigidez elástica del disipador)

Se consideró el disipador en el segundo piso, para tener dos columnas, dos vigas, dos diagonales, en el contorno del disipador.

La rigidez lateral que se obtiene, para esta estructura, que se indica en la figura 6 b, con modelo de diagonal equivalente es:

$$K_L = \begin{bmatrix} 4812.8 & -2679.5 \\ -2679.5 & 2137.8 \end{bmatrix}$$

Como era de esperarse, la matriz de rigidez lateral se incrementa con respecto a la de la estructura de hormigón armado, mostrada en la figura 6 a.

Ahora, se obtiene la matriz de rigidez lateral del pórtico con disipador TADAS en segundo piso, sobre diagonales de acero (es la misma estructura que se cálculo la matriz de rigidez lateral con el modelo de la diagonal equivalente). Pero ahora el cálculo se realiza considerando al disipador como un elemento más de la estructura, ver gráfica central de figura 6 c.

Nótese que primero se han numerado los elementos de hormigón armado, luego las diagonales de acero y finalmente el elemento disipador. Al numerar de esta manera se puede hallar la matriz de rigidez de la estructura sumando la contribución de los elementos de hormigón armado, luego los de acero y finalmente del elemento disipador.

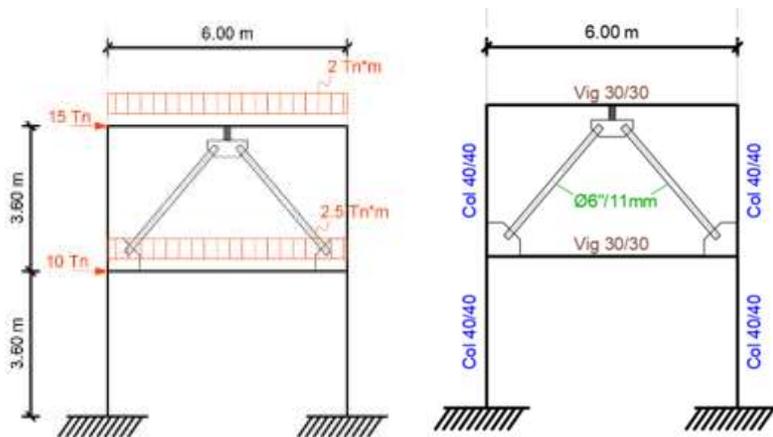
A la izquierda de la figura 6 c, se han numerado los grados de libertad de la siguiente manera: i) Primero los desplazamientos laterales de piso (coordenadas 1 y 2) esto implica considerar que las vigas son axialmente rígidas; ii) luego los grados de libertad horizontal y vertical de los nudos de la estructura de hormigón armado (considerando grados de libertad en la mitad de la viga); iii) Finalmente los grados de libertad en el nudo inicial del elemento disipador, donde se tiene un corrimiento horizontal (15) y se supone que el desplazamiento vertical y giro son iguales a los de la viga, en el centro de luz del segundo piso. La matriz de rigidez lateral que se obtiene es:

$$K_L = \begin{bmatrix} 3687.0 & -1550.9 \\ -1550.9 & 1006.5 \end{bmatrix}$$

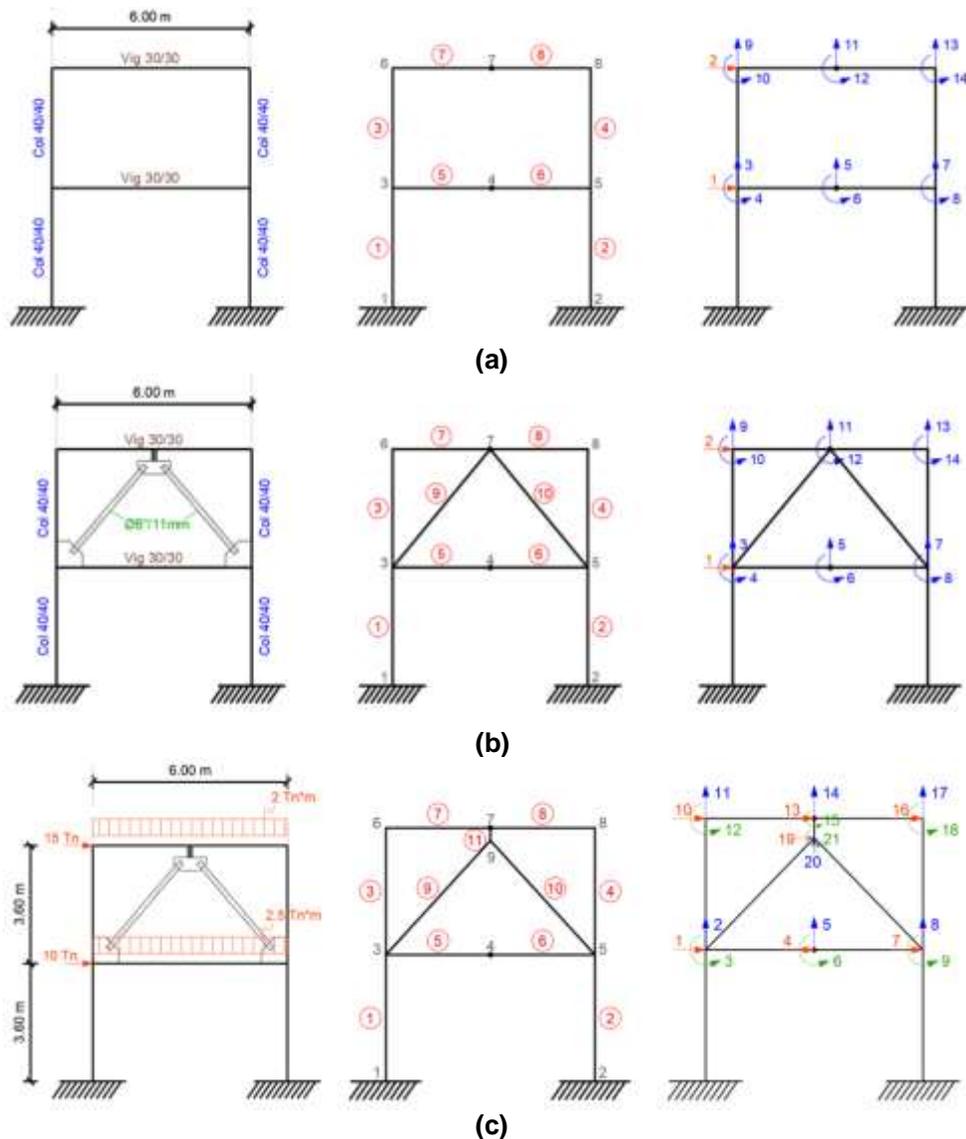
Si se comparan las tres matrices de rigidez lateral, se concluye que la menor de todas es la correspondiente a la estructura de hormigón armado sin disipador ni diagonales; luego se tiene la matriz de rigidez lateral que se halla con el modelo de **elemento disipador** trabajando con la rigidez plástica del modelo constitutivo del TADAS, que es muy baja. Finalmente la que presenta los valores más altos es la que se halla con el modelo de la **diagonal equivalente**. Pero en los tres casos, las matrices de rigidez lateral son comparables.

## 6. SOLUCIÓN ESTÁTICA DE PÓRTICO CON ELEMENTO DISIPADOR

En este apartado se resuelve, ante cargas estáticas el pórtico de hormigón armado, reforzado con un disipador de energía de 6 placas colocado en segundo piso, que se ha venido analizando y que se muestra en la figura 7, se lo hace de tres formas a saber: i) sin considerar la diagonal y disipador del segundo piso; ii) con el modelo numérico de la **diagonal equivalente**; iii) con el modelo de **elemento disipador**; lo que interesa en una primera etapa es comparar los desplazamientos laterales que se obtienen y en una segunda etapa comparar las fuerzas en las diagonales y disipador que se hallan con los dos modelos: diagonal equivalente y elemento disipador. Para el efecto, en la figura 8, se presentan los tres casos de análisis considerados; nótese que en todos ellos se ha considerado un nudo en la mitad de la viga.



**Figura 7** Pórtico de Hormigón Armado, reforzado con un disipador sobre diagonales de acero, ubicado en segundo piso, sometido a fuerzas estáticas horizontales y verticales.



**Figura 8** a) Pórtico de hormigón armado sin diagonales; numeración de nudos y elementos; grados de libertad considerados para análisis estático; b) Pórtico con dissipador y diagonales calculado con modelo de **diagonal equivalente**; c) Cargas estáticas actuantes y numeración de nudos y elementos, y grados de libertad de modelo con **elemento dissipador**.

Para la solución estática se obtuvo en primer lugar la matriz de rigidez de la estructura, por ensamblaje directo, utilizando los programas del sistema de computación **CEINCI-LAB**, (Aguiar 2012, 2014) después se halló el vector de cargas generalizadas y luego se resolvió el sistema de ecuaciones lineales, para encontrar los desplazamientos laterales y giros, cuyos resultados se indican en la tabla 1.

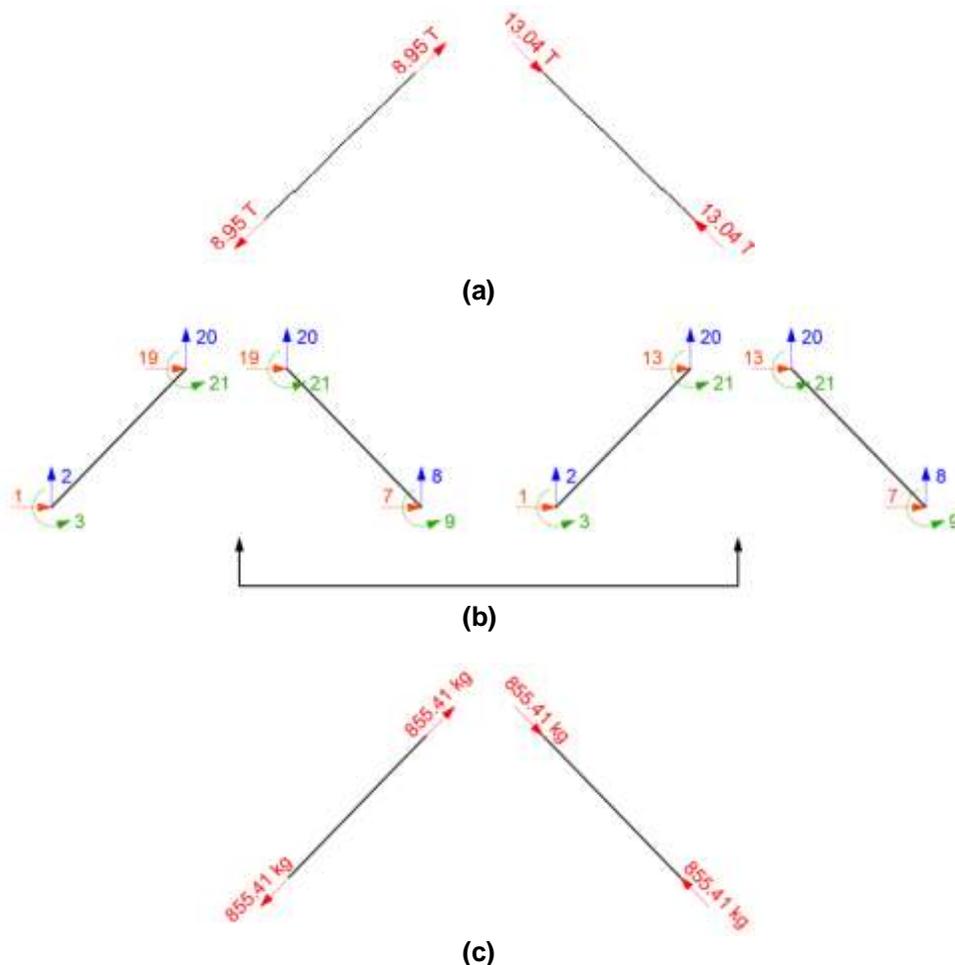
**Tabla 1** Desplazamientos y giros que se encuentran en los tres modelos analizados.

Hormigón Armado		Kequivalente		Elemento corto	
GDLi	qi	GDLi	qi	GDLi	qi
1	0.031	1	0.022	1	0.031
2	0.000	2	0.000	2	0.000
3	-0.012	3	-0.007	3	-0.012
4	0.031	4	0.022	4	0.031
5	-0.006	5	-0.007	5	-0.006
6	0.006	6	0.003	6	0.006
7	0.031	7	0.022	7	0.031
8	0.000	8	0.000	8	0.000
9	-0.011	9	-0.006	9	-0.011
10	0.076	10	0.040	10	0.076
11	0.000	11	0.000	11	0.000
12	-0.011	12	-0.004	12	-0.011
13	0.076	13	0.040	13	0.076
14	-0.006	14	-0.003	14	-0.006
15	0.005	15	0.002	15	0.005
16	0.076	16	0.040	16	0.076
17	0.000	17	0.000	17	0.000
18	-0.009	18	-0.003	18	-0.009
				19	0.031
				20	0.000
				21	-0.125

Es interesante ver que los desplazamientos y giros que se hallan en el pórtico sin disipador y diagonales (dos primeras columnas de tabla 1) son iguales a los encontrados con el modelo de **elemento disipador**, son iguales en los grados de libertad iguales del 1 al 18 (dos últimas columnas de tabla 1). Finalmente en las columnas centrales tres y cuatro se tienen los desplazamientos para el caso del modelo numérico de la diagonal equivalente.

Los desplazamientos y giros obtenidos, están en concordancia con el hecho de que los disipadores de energía no proporcionan rigidez a la estructura (el incremento de la rigidez es mínimo) lo que proporcionan es amortiguamiento a la estructura, que para el caso estático no interviene pero si para el caso sísmico.

Por otra parte, al encontrar las fuerzas en las diagonales, con el modelo de la diagonal equivalente, se hallan los valores indicados en la figura 8 a. Al trabajar con el modelo de **elemento disipador** se tiene que el desplazamiento horizontal del grado de libertad 19 (figura 8 c) es igual al desplazamiento horizontal del grado 1 (figura 8 c) en estas condiciones la fuerza axial que se obtiene en la diagonal es muy baja y esto no es correcto debido a que las diagonales si absorben una cantidad apreciable de energía elástica pero numéricamente con el modelo presentado en la figura 8 c, da valores muy bajos, por lo que en lugar de trabajar con el grado de libertad 19 se recomienda trabajar con el grado de libertad 2 (artificio mostrado en la figura 8 b).



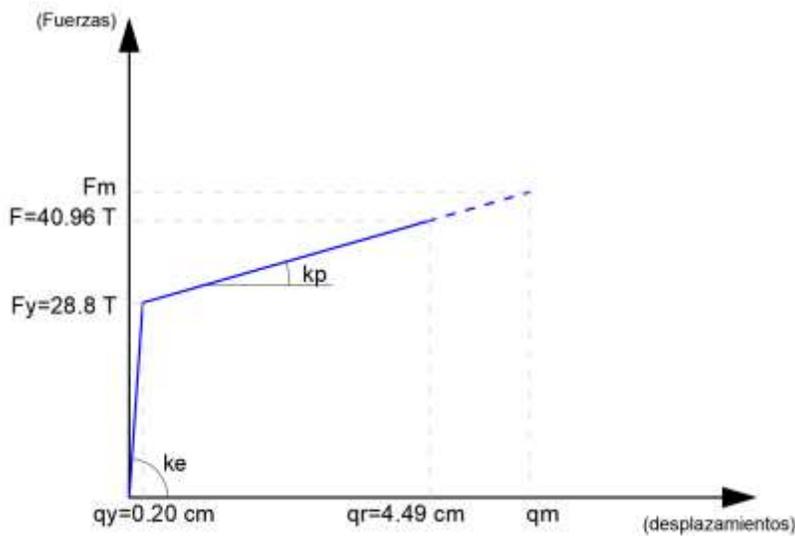
**Figura 8** a) Fuerzas en **diagonal equivalente**; b) Artificio que se realiza para encontrar las fuerzas laterales en diagonal de acero cuando se trabaja con **elemento disipador**; c) Fuerzas laterales en elemento disipador.

Al utilizar el artificio (cambio de grado de libertad horizontal en el nudo final de la diagonal) se encuentran las fuerzas en las diagonales indicadas en la figura 8 c. Nótese que todavía son bajas.

Para encontrar la fuerza lateral en el disipador, se debe encontrar el desplazamiento relativo  $q_r$  como la diferencia entre el desplazamiento horizontal de la coordenada 13 con el desplazamiento de la coordenada 19.

$$q_r = q_{13} - q_{19} = 4.49 \text{ cm}$$

Con el valor de  $q_r$  se ingresa al modelo bilineal del modelo constitutivo del TADAS y se halla que la fuerza horizontal en el elemento disipador es 40.96 T, cantidad muy alta si se considera que la fuerza en elemento de diagonal equivalente es 8.95 T. en una diagonal a tracción y 13.04 T., en diagonal a compresión.



**Figura 9** Cálculo de la fuerza lateral en elemento disipador, se ingresa con el valor de  $q_r$  y se halla que la fuerza en el disipador es 40.96 T.

## 7. PROGRAMAS DE CEINCI-LAB

### 7.1 Matriz de rigidez lateral

A continuación se presenta el programa con el cual se obtiene la matriz de rigidez lateral del pórtico indicado en la figura 6, y después se detallan las nuevas funciones que se han creado para el análisis con elemento disipador, que viene a ser un complemento a las presentadas en Aguiar *et al.* (2019, 2, 3).

```
clear;clc
% Matriz de rigidez lateral de un pórtico
% con V invertidas, empleando elemento TADAS
%.....
% Ej_Portico_Elem_Corto
%.....
%Geometría del pórtico
sv =[6]; %Ingresar un vector con la longitud de vanos en (metros)
sp =[3.6;3.6]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en (metros)
mar_V=[2];
%Número del marco en el que se desea colocar diagonales con elemento
%vertical
h=0.34; % Altura del elemento vertical en metros(TADAS)
num_mar_V=length(mar_V);
%Propiedades del material
fc =240; % La resistencia a la compresión del hormigón f'c (kg/cm2)
E=150000*sqrt(fc); % Calcula el módulo de elasticidad del material (T/m2)
SECCION=[1 0.40 0.40 3 1;5 0.3 0.30 3 1]; % Unicamente Columnas y Vigas
%.....
[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
```

```

[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr);
[Ni,NJ]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg);
% Rutinas para ingresar diagonales V invertida
[GEN2]=geometria_nudo_diagonales(nv, np, nudt, mar_V);
[Ni,NJ,X,Y]=gn_portico_V2(GEN2,num_mar_V,Ni,NJ,X,Y,nod,h);
%.....
num_mar=0;
dibujo2D_V(X,Y,Ni,NJ,nudt,num_mar,num_mar_V)
[CG,ngl]=cg_sismo_V(nod,nr,Y,mar_V);
%% Análisis de los elementos de Hormigón
[ELEM]=gelem_portico(SECCION);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,Ni,NJ);
[VC]=vc(Ni,NJ,CG);
%Contribucion de elementos de hormigón armado (Columnas y Vigas)
ELEMH=ELEM(1:8,:);
LH=L(1:8); senoH=seno(1:8); cosenoH=coseno(1:8); VCH=VC(1:8,:);
[KH]=krigidez(ngl,ELEMH,LH,senoH,cosenoH,VCH,E);

%% Análisis de los elementos Diagonales de acero
% *****ATENCIÓN UNIDADES *** Kg y cm para está sección
Est=2100000;% Modulo de elasticidad del acero en kg/cm2
%....Diagonales de Acero de 6" por 11 mm desde el 2do piso
diam=6*2.54;diame=diam+2*1.1; % Diámetro Interior y Exterior en cm
adiagA=pi*diame^2/4-pi*diam^2/4; % Área de la diagonal de acero para TADAS
% Piso 1
H=sp*100;hci=30;hcd=30;hdis=34;Lon=600;hv=30;
Kef=zeros(1,1);
for ie=1:1
[Kdiag(ie),Keq(ie)]=rigidez_equivalente_TADAS(hci,hcd,hdis,Lon,hv,H(ie),Kef(ie),a
diagA,Est);
end
Kdiag=Kdiag/10; Keq=Keq/10; % Para tener en T/m
ELEM_T_Diag=[Kdiag(1);Kdiag(1)];
mbr=(num_mar_V+num_mar)*2; % Número de diagonales de acero
L_Diag=L(9:10); senoDiag=seno(9:10); cosenoDiag=coseno(9:10);
VCDiag=VC(9:10,:);
%Contribucion de elementos Diagonales de Acero
[K_Diag]=krigidez_tadas(mbr,ngl,ELEM_T_Diag,senoDiag,cosenoDiag,VCDiag);
%Rigidez de TADAS

%% Elemento TADAS considerado Elemento Corto
Est=2100000;% Modulo de elasticidad del acero en kg/cm2
mbr=(num_mar_V); % Número de TADAS
VCTADAS=VC(11:end,:);
b=20;h=20;t=3; % Medidas en cm
nplac=6; fy=3200;% Kg/cm2
alfa=0.02;
%Contribucion de elementos TADAS
[K_TADAS]=krigidez_tadas_elemento(mbr,ngl,Est,fy,b,h,t,alfa,nplac,VCTADAS);
% Rigidez Lateral
%.....

```

```

% Matriz de rigidez lateral Estructura original
nglHA=(nod-nr)*2+np;
K=KH;
% Condensacion de K
na=np; %#gdl por planta, considerar na=np
kaa=K(1:na,1:na);kab=K(1:na,na+1:nglHA);kba=kab';
kbb=K(na+1:nglHA,na+1:nglHA);
T=-kbb\kba;KL=kaa+kab*T; % Matriz de rigidez lateral
KL_HA=KL % Matriz de rigidez lateral
%.....
% Matriz de rigidez Total: Con elementos de Reforzamiento
K=KH+KDiag+KTADAS; % Matriz de rigidez lateral total
% Condensacion de K
na=np; %#gdl por planta, considerar na=np
kaa=K(1:na,1:na);kab=K(1:na,na+1:ngl);kba=kab';
kbb=K(na+1:ngl,na+1:ngl);
T=-kbb\kba;KL=kaa+kab*T; % Matriz de rigidez lateral
KL_Ref=KL % Matriz de rigidez lateral

```

- **[CG,ngl]=cg\_sismo\_V(nod,nr,Y,mar\_V)**

Programa que determina los grados de libertad para el análisis sísmico de pórticos planos en que se considera **elemento disipador**. El programa determina en primer lugar los grados de libertad considerando que no existe disipador y diagonales. Luego en nudo inferior de elemento disipador se continúa con la numeración de los grados de libertad horizontales y para el vertical y giro se considera que son los mismos del nudo final de elemento disipador (Ver gráfico derecho de figura 6 c).

Los datos de entrada son: **nod** que es el número de nudos; **nr** es el número de nudos restringidos; **Y** coordenadas en Y de los nudos del pórtico; **mar\_V** es la identificación del vano que contiene al elemento disipador, para el ejemplo es el 2.

Programa reporte una matriz con los grados de libertad, denominada **CG** y el número total de grados de libertad **ngl**

- **[GEN2]=geometria\_nudo\_diagonales(nv, np, nudt, mar\_V);**

Este programa genera la matriz **GEN2** que contiene el número de la diagonal, el nudo inicial y final, número de elementos a generar, incremento en la numeración de elementos, incremento en la numeración de nudo inicial y final, son 7 valores. Pero considerando que no hay elemento corto disipador. Los datos de entrada son: **nv** es el vector con la longitud de los vanos; **np**, vector con la altura de los entrepisos; **nudt** es el número total de columnas y vigas de estructura; **mar\_V** identifica el vano que contiene al disipador.

- **[NI,NJ,X,Y]=gn\_portico\_V2(GEN2,num\_mar\_V,NI,NJ,X,Y,nod,h)**

El programa **gn\_portico\_V2** determina los vectores **NI** con el Nudo Inicial de los elementos, considerando el elemento disipador; **NJ** vector con los nudos finales considerando al elemento disipador; **X, Y**, vectores con las coordenadas en X,Y de los nudos pero considerando al elemento disipador. Los datos de entrada son: **GEN2**, indicada en la función anterior en que se tiene a las diagonales sin la presencia del elemento disipador, ahora se incorpora elemento disipador; **num\_mar\_V** es el número de vanos con elemento disipador; **NI,NJ** vectores que contienen el nudo inicial del pórtico pero sin la presencia del elemento disipador, se considera a las diagonales; **X,Y**, coordenadas de los nudos, sin tener en cuenta el nudo inicial de elemento disipador; **nod** es el número total de nudos; **h** es la altura del elemento disipador en metros.

- **dibujo2D\_V(X,Y,NI,NJ,nudt,num\_mar,num\_mar\_V)**

Dibuja el pórtico plano con elemento disipador; los datos de entrada son las coordenadas **X,Y** de todos los nudos considerando elemento disipador; **NI,NJ** vector con los nudos iniciales y finales de todos los elementos; **nudt** es el número total de nudos y vigas; **num\_mar** es el número de vanos solo con diagonales a secas; si el pórtico no tiene diagonales a secas, se coloca cero en esta variable; **num\_mar\_V** es el número de vanos con elementos disipador.

- **[SS,K\_miem\_tadas]=krigidez\_tadas\_elemento(mbr,ngl,E,fy,b,h,t,alfa,n,VC)**

Programa que determina la contribución a la matriz de rigidez de la estructura del elemento TADAS; los datos de entrada son **mbr** número de elementos TADAS; **ngl** número de grados de libertad del pórtico; **E,fy,b,h,t**, es el módulo de elasticidad, de fluencia, la base, la altura y el espesor de la placa de flexión del TADAS en kg y cm, **alfa**, es la relación entre la rigidez post fluencia con respecto a la rigidez elástica; **n** es el número de placas. El programa determina la rigidez post fluencia del disipador TADAS en kg/cm y luego lo pasa a T/m; **VC** matriz que contiene los vectores de colocación de elementos TADAS.

## 7.2 Solución estática de pórtico plano

A continuación se presenta el programa con el cual se resolvió el pórtico plano con elemento disipador, sometido a cargas verticales y cargas laterales, indicado en la figura 7

```
clear;clc
% Matriz de rigidez lateral de un pórtico
% con V invertidas, empleando nuevas TADAS como elemento corto
%.....
% Ej_Portico_Elem_Corto
```

```

%.....
%Geometría del pórtico
sv =[6]; %Ingresar un vector con la longitud de vanos en (metros)
sp =[3.6;3.6]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en (metros)
mar_V=[2];
%Número del marco en el que se desea colocar diagonales con elemento
%vertical
h=0.34; % Altura del elemento vertical en metros(TADAS)
num_mar_V=length(mar_V);
%Propiedades del material
fc =240; % La resistencia a la compresión del hormigón f'c (kg/cm2)
E=150000*sqrt(fc); % Calcula el módulo de elasticidad del material (T/m2)
SECCION=[1 0.40 0.40 3 1;5 0.3 0.30 3 1]; % Unicamente Columnas y Vigas
%.....
[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr);
[NI,NJ]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg);
% Rutinas para ingresar diagonales V invertida
[GEN2]=geometria_nudo_diagonales(nv, np, nudt, mar_V);
[NI,NJ,X,Y]=gn_portico_V2(GEN2,num_mar_V,NI,NJ,X,Y,nod,h);
%.....
num_mar=0;
dibujo2D_V(X,Y,NI,NJ,nudt,num_mar,num_mar_V)
RES=[1 1 1 1;2 1 1 1];
nod=nod+num_mar_V; % Considerando el nudo adicional del elemento corto
[CG,ngl]=cg (nod,nr,RES);

%% Análisis de los elementos de Hormigón
[ELEM]=gelem_portico(SECCION);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ);
[VC]=vc(NI,NJ,CG);
%Contribucion de elementos de hormigón armado (Columnas y Vigas)
ELEMH=ELEM(1:8,:);
LH=L(1:8); senoH=seno(1:8);cosenoH=coseno(1:8); VCH=VC(1:8,:);
[KH]=krigidez(ngl,ELEMH,LH,senoH,cosenoH,VCH,E);

%% Análisis de los elementos Diagonales de acero
% *****ATENCIÓN UNIDADES *** Kg y cm para está sección
Est=2100000;% Modulo de elasticidad del acero en kg/cm2
%...Diagonales de Acero de 6" por 11 mm desde el 2do piso
diam=6*2.54;diame=diam+2*1.1; % Diámetro Interior y Exterior en cm
adiagA=pi*diam^2/4-pi*diame^2/4; % Área de la diagonal de acero para TADAS
% Piso 1
H=sp*100;
hci=30;hcd=30;hdis=34;Lon=600;hv=30;
Kef=zeros(1,1);
for ie=1:1
[Kdiag(ie),Kef(ie)]=rigidez_equivalente_TADAS(hci,hcd,hdis,Lon,hv,H(ie),Kef(ie),a
diagA,Est);
end

```

```

Kdiag=Kdiag/10; % Para tener en T/m
Keq=Keq/10; % Para tener en T/m

ELEMT_Diag=[Kdiag(1);Kdiag(1)];
mbr=(num_mar_V+num_mar)*2; % Número de diagonales de acero
LDiag=L(9:10); senoDiag=seno(9:10);cosenoDiag=coseno(9:10);
VCDiag=VC(9:10,:);
%Contribucion de elementos Diagonales de Acero
[KDiag]=krigidez_tadas(mbr,ngl,ELEMT_Diag,senoDiag,cosenoDiag,VCDiag);
%Rigidez de TADAS

%% Elemento TADAS considerado Elemento Corto
Est=2100000;% Modulo de elasticidad del acero en kg/cm2
mbr=(num_mar_V); % Número de TADAS
VCTADAS=VC(11:end,:);
b=20;h=20;t=3; % Medidas en cm
nplac=6; fy=3200;% Kg/cm2
alfa=0.02;
%Contribucion de elementos TADAS
[KTADAS,K_miem_tadas]=krigidez_tadas_elemento(mbr,ngl,Est,fy,b,h,t,alfa,nplac,
VCTADAS);

% Matriz de rigidez Total: Con elementos de Reforzamiento
K=KH+KDiag+KTADAS; % Matriz de rigidez lateral total

% 5. Vector de Cargas Generalizadas
njc=2;nmc=4;% Por ahora no hay cargas en miembros
F=[3 10.0 0 0;6 15.0 0 0];
Fm=[5 2.5 1 1 1;7 2.0 1 1 1];
datos=0;
[Q,Q2]=cargas(njc,nmc,ngl,L,seno,coseno,CG,VC,F,Fm,datos);
q=K\Q;
[qr_TADAS,q_Diag]=Fuerzas_Diag_Tadas(VC,CG,nod,nr,Y,mar_V,q);

%6.- FUERZAS INTERNAS ELEMENTOS HORMIGÓN ARMADO
%.....
%Coordenadas secundarias
Q2H=Q2(1:8,:); % Acciones de empotramiento perfecto
[FHORMIG]=fuerzas(ngl,ELEMH,LH,senoH,cosenoH,VCH,E,q,Q2H); %<-----
Fuerzas Elem. H.A.
%7.- FUERZAS INTERNAS EN ACERO
Q2A=Q2(9:10,:);Es=21000000; % En T/m2
[FDIAG]=fuerzas_acero_tadas(ngl,ELEMT_Diag,LDiag,senoDiag,cosenoDiag,VCD
iag,Es,q_Diag,Q2A);
%.....
%7.- FUERZAS INTERNAS EN TADAS
for i=1:num_mar_V
[F,Kef,Zeda]=rigidez_efectiva_TADAS(nplac,b,t,h,fy,qr_TADAS(i)*100,alfa,Est);
FTADAS(i,1)=F/1000; % Toneladas
end

```

A continuación se indican los programas con los cuales se hallan las fuerzas en las diagonales y en elemento TADAS.

- **[qr\_TADAS,q\_Diag]=Fuerzas\_Diag\_Tadas(VC,CG,nod,nr,Y,mar\_V,q)**

Este programa determina los desplazamientos relativos en elemento TADAS que se ha llamado **qr\_TADAS** restando los desplazamientos del nudo final menos los del nudo inicial del elemento TADAS; también encuentra todos los desplazamientos y giros en todos los nudos, pero teniendo en cuenta de que en el nudo final de la diagonal se tenga el desplazamiento lateral de piso **q\_Diag** (artificio indicado en figura 8 b). Los datos de entrada son **VC**, vector de colocación de la estructura; **CG**, coordenadas generalizadas; **nod, nr**, que son el número de nudos y número de nudos restringidos; **Y** vector que contiene las coordenadas Y de los nudos; **mar\_V** que identifica el número del vano que tiene elemento TADAS; **q** vector con los desplazamientos y giros pero con el artificio indicado en la figura 8 b.

- **[FF]=fuerzas\_acero\_tadas(ngl,ELEM,L,seno,coseno,VC,E,q\_diag,Q2)**

Este programa encuentra, las fuerzas en las diagonales de acero **FF**, los datos que se dan son **ngl**, es el número de grados de libertad; **ELEM**, vector que contiene la rigidez axial  $E A/L$  de cada diagonal; **L**, vector con la longitud de las diagonales; **seno, coseno**, vectores con los valores de los senos y cosenos de las diagonales; **VC**, matriz de colocación de cada elemento de las diagonales, tiene 6 cantidades, tres para el nudo inicial y tres para el nudo final de los grados de libertad: horizontal, vertical y rotación; **E** es el módulo de elasticidad del acero; **q\_diag**, desplazamientos y giros del nudo inicial y final de la diagonal, teniendo en cuenta el artificio indicado en la figura 8 b; **Q2**, vector de empotramiento perfecto, normalmente es cero, pero se debe dar al programa para que se ejecute.

- **[F,Kef,Zeda]=rigidez\_efectiva\_TADAS(n,b,t,h,fy,qr,alfa,E)**

Este programa determina la fuerza en el elemento diagonal **F**, la rigidez efectiva  $K_{ef}$  (rigidez secante) **Zeda**, factor de amortiguamiento asociado al desplazamiento relativo **qr**. Los datos de entrada son: **n**, el número de placas del disipador TADAS; **b, t, h**, la base, espesor y altura de la placa triangular del TADAS; **fy** es el límite de fluencia del acero del TADAS; **qr**, es el desplazamiento relativo; **alfa** es la relación entre la rigidez plástica con respecto a la rigidez elástica; **E**, es el módulo de elasticidad del TADAS.

## 8. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Se ha presentado dos modelos para el análisis de estructuras con disipadores de energía TADAS, el uno se ha denominado: "Elemento TADAS" y el otro "Diagonal Equivalente", los dos son conocidos y es más el primero de los autores los ha publicado. Lo interesante de este artículo son las nuevas contribuciones al sistema de computación **CEINCI-LAB**.

## AGRADECIMIENTO

A José Luis Almazán, de la Pontificia Universidad Católica de Santiago de Chile, por sus aportes valiosos en la definición de la matriz de rigidez de elemento TADAS, para el caso plano.

## REFERENCIAS

1. Aguiar R., Mora D., Sarzosa C., Bejarano J., (2019,1), *Ampliación y reforzamiento estructural de Agencia Iñaquito de Produbanco*.
2. Aguiar R., Cagua B., Pilatasig J., Zambrano E., (2019,2), "Interface for **ICEINCI-LAB** and new functions", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **24**, (2), 167-199
3. Aguiar R., Cagua B., Pilatasig J., (2019,3), "New functions of the **CEINCI-LAB** system for 3-D seismic analysis", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **24**, (3), 259-276.
4. Aguiar R., Del Castillo F., (2018), *Reforzamiento Estructural de Ex Parquadero de Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí*.
5. Aguiar R., Rodríguez M., Mora D., (2016), *Análisis Sísmico de Estructuras con disipadores de energía ADAS o TADAS*, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE IS-75, 165 p.
6. Aguiar R., Del Castillo F., (2016), *Reforzamiento Estructural de Bloques Estructurales de Empresa Molinos Superior*, 6 Capítulos de Memorias entregadas a Ing. Andrés Guerrón.
7. Aguiar R., (2014), *Análisis Matricial de Estructuras*, Instituto Panamericano de Geografía e Historia IPGH, cuarta edición, 676 p., Quito.
8. Aguiar R., (2012), *Dinámica de Estructuras con CEINCI-LAB*, Centro de Investigaciones Científicas. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, segunda edición, 416 p.
9. Dictuc (2019) *Ensayo cíclico disipador de energía metálico tipo TADAS en acero al carbono*, Dictuc Ingeniería Estructural. Informe 1516348, 17 p.
10. Nanguillasmú H., y Tena A., (2017), "Modelado de disipadores histeréticos de energía en estructuras de concreto reforzado. Diferencias entre análisis en el plano y en tres dimensiones", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **22** (2), 135-162.