

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



*Una Institución Adventista*

Revisión del diseño sísmico por desempeño en tuberías de agua suspendidas mediante la metodología de desplazamiento directo

Por:

Geoffrey Collantes Julca

Asesor:

Ing. Roberto Roland Yoctun Rios

Lima, setiembre 2020

## DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Roberto Roland Yoctún Rios, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente trabajo de investigación titulado: "REVISIÓN DEL DISEÑO SÍSMICO POR DESEMPEÑO EN TUBERÍAS DE AGUA SUSPENDIDAS MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE DESPLAZAMIENTO DIRECTO" constituye la memoria que presenta el estudiante Geoffrey Collantes Julca para aspirar al grado de bachiller en Ingeniería Civil, cuyo trabajo de investigación ha sido realizado en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este trabajo de investigación son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Lima, a los 21, setiembre del 2020.



---

Roberto Roland Yoctún Rio

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a.....los.....18.....día(s) del mes de.....setiembre.....del año 2020...siendo las.....13:15.....horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión campus Lima, bajo la dirección del (de la) presidente(a): .....Ing. Ferrer Canaza Rojas....., el (la) secretario(a): ..... Mg. Leonel Chahuares Paucar..... y los demás miembros: ..... Ing. Fiorella Zapata Antezana.....y el (la) asesor(a)...Ing. Roberto Roland Yoctún Rios.....con el propósito de administrar el acto académico de sustentación del trabajo de investigación titulado: "Revisión del diseño sísmico por desempeño en tuberías de agua suspendidas mediante la metodología de desplazamiento directo". de los (las) egresados (as):

.....a).....**GEOFFREY COLLANTES JULCA**.....  
.....conducente a la obtención del grado académico de Bachiller en:

.....**INGENIERÍA CIVIL**.....  
(Denominación del Grado Académico de Bachiller)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato/a (a): ..... **GEOFFREY COLLANTES JULCA**.....

| CALIFICACIÓN | ESCALAS   |         |             | Mérito    |
|--------------|-----------|---------|-------------|-----------|
|              | Vigesimal | Líteral | Cualitativa |           |
| APROBADO     | 16        | B       | BUENO       | MUY BUENO |

Candidato/a (b): .....

| CALIFICACIÓN | ESCALAS   |         |             | Mérito |
|--------------|-----------|---------|-------------|--------|
|              | Vigesimal | Líteral | Cualitativa |        |
|              |           |         |             |        |

(\*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó ... al.... candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

\_\_\_\_\_  
Presidente  
Ing. Ferrer Canaza  
Rojas

  
\_\_\_\_\_  
Secretario  
Mg. Leonel Chahuares  
Paucar

\_\_\_\_\_  
Asesor  
Ing. Roberto Roland  
Yoctún Rios

\_\_\_\_\_  
Miembro

\_\_\_\_\_  
Miembro  
Ing. Fiorella Zapata  
Antezana

\_\_\_\_\_  
Candidato (a)  
Geoffrey Collantes  
Julca

\_\_\_\_\_  
Candidato/a (b)

# **Revisión del diseño sísmico por desempeño en tuberías de agua suspendidas mediante la metodología de desplazamiento directo**

Review of seismic design for performance in water pipes  
suspended using the direct displacement methodology

GEOFFREY COLLANTES JULCA\*

*EP. Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión,  
Perú.*

## **Resumen**

Muchas investigaciones han demostrado que el diseño sísmico tradicional (diseño sísmico basado en las fuerzas) no brinda seguridad a las edificaciones de importancia, por tal motivo, en los últimos años se han desarrollado enfoques más refinados basados en el diseño por desempeño. Una de las ramas poco investigadas de estos enfoques es el diseño de elementos no estructurales. Los elementos no estructurales son todos los que no participan de manera directa en la resistencia estructural de una edificación, sin embargo, presentan daños frente a la ocurrencia de un sismo dejando a la edificación inoperativa. Debido a la importancia de los elementos no estructurales se están realizando investigaciones de diseño sísmico por desempeño. Uno de los métodos desarrollados en los últimos años es mediante el desplazamiento directo, que consta de restringir al elemento no estructural dándole un máximo desplazamiento permisible y en base a ese desplazamiento calcular la fuerza permisible. Uno de los elementos no estructurales más vitales en edificaciones de importancia son las tuberías de agua de las instalaciones sanitarias, por eso se ha realizado una revisión del diseño sísmico por desempeño de tuberías ancladas de agua en edificios mediante la metodología de desplazamiento directo. Al comparar un diseño sísmico por desempeño de las tuberías de agua con el diseño sísmico tradicional, el refuerzo de anclaje y las fuerzas requeridos son significativamente mayores.

**Palabras clave:** Desplazamiento directo, tuberías de agua ancladas, diseño sísmico por desempeño, elementos no estructurales

## Abstract

Much research has shown that traditional seismic design (force-based seismic design) does not provide safety for major buildings, for this reason, more refined approaches based on performance design have been developed in recent years. One of the little-researched branches of these approaches is the design of non-structural elements. Non-structural elements are all those that do not participate directly in the structural resistance of a building; however, they present damage in the event of an earthquake, leaving the building inoperative. Due to the importance of non-structural elements, performance seismic design investigations are being carried out. One of the methods developed in recent years is through direct displacement, which consists of restraining the non-structural element by giving it a maximum allowable displacement and based on that displacement, calculating the allowable force. One of the most vital non-structural elements in important buildings is the water pipes of the sanitary facilities, which is why a review of the seismic design has been carried out for the performance of anchored water pipes in buildings using the direct displacement methodology. When comparing a seismic design for performance of the water pipes with the traditional seismic design, the anchor reinforcement and the forces required are significantly higher.

**Key words:** Direct displacement, anchored water pipes, seismic design for performance, non-structural elements.

*\*Correspondencia de autor: Km. 19 Carretera Central, Ñaña, Lima. E-mail: [geoffreycollantes@upeu.edu.pe](mailto:geoffreycollantes@upeu.edu.pe)*

## INTRODUCCIÓN

Un avance fundamental en la ingeniería sísmica en las últimas dos décadas ha sido la elaboración de conceptos basados en el desempeño para el diseño de estructuras. Por tal motivo, se ha desarrollado sustancialmente enfoques basados en el desempeño para sistemas de elementos estructurales hasta ser incorporados en los códigos y normas de construcción internacionales (ASCE, 2017). Pero su aplicación a sistemas de elementos no estructurales sigue siendo en gran parte inexplorables.

Según Filiatrault y Sullivan (2014) el diseño sísmico de elementos no estructurales tiene su fundamento en conceptos empíricos que se basa en el juicio y la intuición más que en datos experimentales y resultados analíticos, dado que los sistemas de elementos no estructurales no son parte del soporte de cargas estructurales. Sin embargo, están sometidos al mismo entorno dinámico frente a la ocurrencia de un sismo y deberían ser diseñados mediante una metodología más acertada. Uno de los métodos para el diseño por desempeño es el basado en el desplazamiento directo que propone partir de un desplazamiento máximo de demanda, el cual dependerá de las propiedades de amortiguamiento, hasta el cálculo de la máxima fuerza en la base de la estructura o elemento.

La mayoría de los sismos en el Perú dejan los elementos estructurales en condiciones funcionales u operativas, pero son los elementos no estructurales los que presentan mayores daños después de un movimiento sísmico. Uno de los elementos no estructurales que presentaron daños en los últimos años fueron los sistemas anclados de tuberías de agua. El mal funcionamiento de los sistemas de tuberías afecta a las edificaciones de un nivel importante, siendo un mayor número de afectados los que no cuenten con el recurso hídrico después de un suceso sísmico. Por lo tanto, se hizo una revisión del diseño sísmico por desempeño de tuberías de agua ancladas en edificios mediante la metodología de desplazamiento directo.

## DESARROLLO

### 1. Elementos no estructurales:

Son componentes y sistemas que no forman parte del sistema de soporte de carga estructural de una edificación, sin embargo, están sujetos al mismo entorno dinámico durante un sismo. Taghavi y Miranda (2004) mencionan que los elementos no estructurales están presentes en un 90% de las edificaciones e incluyen las instalaciones eléctricas, saneamiento y gas, por lo que en la posible ocurrencia de un sismo los daños serán mayores y los sistemas quedarán inoperativos. Por otro lado, los elementos no estructurales representan la mayor parte de las inversiones totales en edificios de significativa importancia. En los edificios de hospitales, por ejemplo, los componentes no estructurales representan aproximadamente el 92% de las inversiones totales monetarias.

El daño inducido en elementos no estructurales durante los terremotos recientes demostró que su vulnerabilidad también depende de las aceleraciones y desplazamientos que surgen de respuestas sísmicas de la estructura (Perrone y Filiatrault, 2017). En la actualidad el Perú cuenta con una normativa que es la E.030 – Diseño Sismorresistente, la cual cuenta con un capítulo para el diseño sísmico de elementos no estructurales, pero de manera genérica (RNE, 2006).

Filiatrault y Sullivan (2014), clasifican los componentes de construcción no estructurales en tres categorías genéricas:

#### 1.1. *Los componentes arquitectónicos:*

Son componentes no estructurales integrados que forman parte del edificio. Incluyen tabiques interiores, parapetos, chimeneas, áticos, techos suspendidos, apéndices y ornamentación, letreros y vallas publicitarias, escaleras de salida que son independientes del edificio, sistemas de revestimiento, sistemas de ventanas y sistemas de iluminación.

#### 1.2. *Los componentes mecánicos y eléctricos:*

Son componentes no estructurales integrados que forman parte del edificio. Incluyen equipos de HVAC, motores, turbinas, bombas, compresores, recipientes a presión, generadores, baterías, motores, transformadores, tableros de paneles, engranajes de conmutación, gabinetes de instrumentación, equipos de comunicación, computadoras, torres de enfriamiento, sistemas de tuberías, conductos y conductos eléctricos.

### 1.3. *Los contenidos del edificio:*

Son componentes no estructurales que pertenecen a los inquilinos u ocupantes del edificio. Incluyen gabinetes de archivo, estanterías y todos los muebles que se encuentran dentro de los edificios.

Un estudio reciente de Porter (2005), desarrolló un sistema de categorización (taxonomía) para componentes de edificios no estructurales basado principalmente en el diseño común o alternativas de modificación que marcan la diferencia en su desempeño sísmico. Bachman y Dowty (2008), han brindado orientación a los ingenieros sobre cómo determinar si un elemento debe tratarse o no como un componente no estructural o como una estructura no edificable para el diseño sísmico.

## 2. **Diseño por desempeño:**

Según Priestley (2000), el diseño para la resistencia sísmica ha sido objeto de una revisión crítica en los últimos años y con el pasar del tiempo se ha dado más énfasis al “rendimiento” que a la “fuerza”. En los últimos 70 años fue el período durante el cual los cálculos de diseño para la resistencia sísmica requeridos por las normas tomaban a los términos de fuerza y rendimiento como sinónimos. Sin embargo, durante los últimos 25 años ha habido un cambio gradual de esta posición con la comprensión principal que el aumento de la fuerza puede no aumentar la seguridad, ni necesariamente reducir el daño.

El desarrollo de los principios de diseño de la capacidad en Nueva Zelanda en la década de 1970 de Park & Pauley (1975), fue una expresión de la comprensión de que la distribución de la fuerza a través de un edificio era más importante que el valor absoluto de la cortante en la base de diseño. Se concluyó que un sistema estructural aporricado tendría mejor desempeño frente a un movimiento sísmico si las bisagras de plástico se producirían en las vigas en lugar de las columnas y si la resistencia al cizallamiento de los miembros superó la cizalla correspondiente a fuerza flexible. Esto puede ser identificado como el verdadero inicio de diseño sísmico basado en el rendimiento, en el que el rendimiento general del edificio se controla en función del proceso de diseño.

Como un entendimiento desarrollado en los años 1960 y 1970 de la importancia de la respuesta estructural inelástico a grandes terremotos, la comunidad científica se hizo cada vez más involucrados en intentos de cuantificar la capacidad de deformación inelástica de los componentes estructurales. Generalmente esto se expresó en términos de la capacidad de desplazamiento de ductilidad,  $\mu\Delta$ , que fue elegido como un indicador útil debido a su aparente relación con el factor de reducción de la fuerza, R, que se utiliza comúnmente para reducir los niveles elásticos esperados de la fuerza cortante en la base a los niveles de diseño aceptables. Como se ve en la fórm. 1, la aproximación desplazamiento igual de respuesta sísmica implica que:

$$\mu\Delta = R$$

*Fórmula 1.* Relación entre Ductilidad y Factor de Reducción.

Fuente: (Priestley, 2000)

Ha habido problemas con este enfoque, ya que la aproximación igual del desplazamiento es inapropiada para estructuras de períodos muy cortos y muy largos, también es de dudosa validez para estructuras de periodos medios cuando las respuestas históricas del sistema inelástico se desvían significativamente del sistema elasto-plástico. Además, ha habido dificultades para llegar a un consenso dentro de la comunidad de investigación en cuanto a la definición apropiada de rendimiento y los desplazamientos finales. Con referencia a la fig. 1(b), el desplazamiento de fluencia se ha definido de diversas maneras, como: la intersección de la rigidez inicial tangente con la fuerza nominal, la intersección de la rigidez secante que pasa por el rendimiento con resistencia nominal (fuerza nominal), y el desplazamiento del rendimiento con resistencia nominal (fuerza nominal). Entre otras posibilidades la capacidad de desplazamiento, o desplazamiento último, también se ha definido como el desplazamiento en la fuerza de pico, el desplazamiento correspondiente al 20% o degradación del 50% desde el pico (o nominal) fuerza, y el desplazamiento a la rotura inicial de refuerzo transversal. Claramente con una amplia variedad de desplazamientos límite tal, ha habido una considerable variación en la capacidad de desplazamiento ductilidad de estructuras (Priestley, 2000).

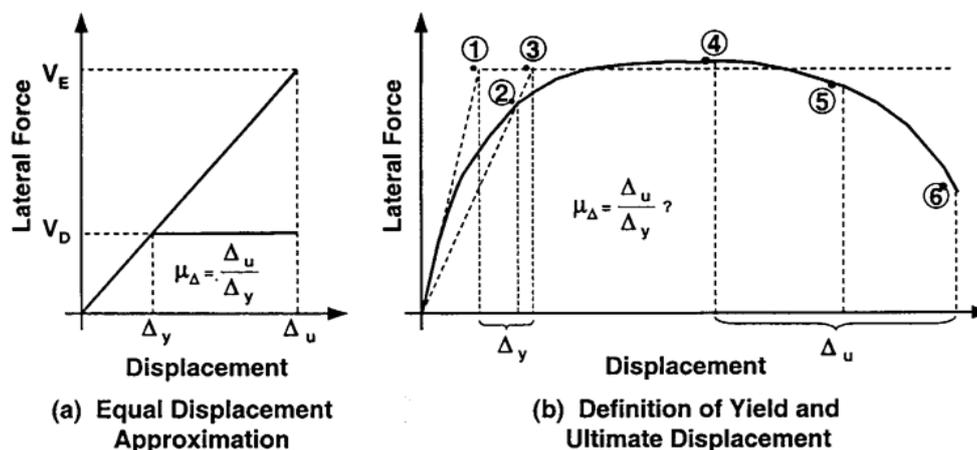


Figura 1. Rango elástico vs Rango inelástico.  
Fuente: (Priestley, 2000)

El nuevo enfoque de los conceptos fundamentales de diseño sísmico se ha intensificado en los últimos años, con un gran número de enfoques contradictorios a los enfoques clásicos. En algunos casos las diferencias entre los enfoques son fundamentales, mientras que en otros las diferencias son conceptuales. Un catalizador crucial para este interés ha sido el documento Visión 2000, elaborado por la Asociación de Ingenieros Estructurales de California (OES, 1995). El núcleo de este documento es la selección de “objetivos de rendimiento sísmicos”, definidos como el “acoplamiento del nivel de rendimiento esperado con los niveles esperados de movimientos de tierra sísmicos”. Se definen cuatro niveles de desempeño como se muestra en la fig. 1(b):

- *Totalmente operacional*: la instalación continúa en funcionamiento con un daño insignificante.
- *Operacional*: instalación continúa en funcionamiento con daños menores y la interrupción de menor importancia en los servicios no esenciales.
- *Vida segura*: la seguridad de la vida está protegida sustancialmente, el daño es moderado a extensa.
- *Al borde del colapso*: la seguridad de la vida está en riesgo, el daño es grave, se evita el colapso estructural.

### 3. Diseño sísmico por desplazamiento directo:

Debe quedar claro de lo anterior que, para que el diseño sísmico basado en la fuerza sea incorporado adecuadamente en criterios basados en el rendimiento, debe aumentar significativamente el esfuerzo de diseño, en forma de iteración sucesiva de las características elásticas iniciales. Al mismo tiempo, es evidente que el aumento del esfuerzo de cálculo de diseño, al requerir análisis elástico 3D, no es probable que resulte en una mejor caracterización de la respuesta estructural que representaciones SDOF (Sistema equivalentes elásticos con un solo grado de libertad) más simplificados, a menos que las respuestas estructurales sean esencialmente elásticas. Como consecuencia de estas consideraciones, un procedimiento de diseño alternativo conocido como “diseño directo en base al desplazamiento” ha sido desarrollado por Chen, Lu, Xue, Tang y Li (2018) que intenta reconocer deficiencias en los enfoques basados en la fuerza, y para caracterizar la estructura por una representación SDOF en respuesta de desplazamiento máximo. Este enfoque de diseño intenta diseñar una estructura que permita alcanzar un desempeño, en lugar de ser limitada por un estado límite de rendimiento dado bajo una intensidad sísmica. Esto esencialmente da lugar a estructuras de riesgo uniforme, que son filosóficamente compatibles con el riesgo de intensidad sísmica uniforme incorporado en la mayoría de las normas.

Se tiene en cuenta que el diseño basado en la fuerza no intenta producir estructuras de riesgos uniformes, sino mantiene el riesgo de una estructura dada por debajo de un umbral aceptable, aunque no definido. Se puede demostrar fácilmente que el riesgo, en términos de probabilidad anual de un nivel dado de daños, por estructuras diseñadas basados en criterios de fuerza puede variar en más de un orden de magnitud de la estructura. Mientras que el diseño basado en la fuerza caracteriza a una estructura en términos de propiedades elásticas (rigidez y amortiguación) apropiadas en primer rendimiento, el diseño directo en base a desplazamiento caracteriza la estructura de rigidez secante ( $K_c$ ) en un desplazamiento máximo ( $\Delta_d$ ) y un nivel de amortiguación visco-equivalente apropiada a la energía de histéresis absorbida durante la respuesta inelástica como se muestra en la fig. 2 (b). Por lo tanto, como se muestra en la fig. 2 (c), para un nivel dado de demanda de ductilidad, un edificio de acero estructural con los miembros compactos se le asignará un mayor nivel de equivalente de amortiguación visco-equivalente que un edificio de pared estructural de hormigón armado diseñado para el mismo nivel de ductilidad la demanda, como consecuencia de ciclos de histéresis “gordos”. El enfoque utilizado para caracterizar la estructura se basa en la “estructura sustituto” procedimiento de análisis desarrollado por Calvi, Priestley y Kowalsky (2008).

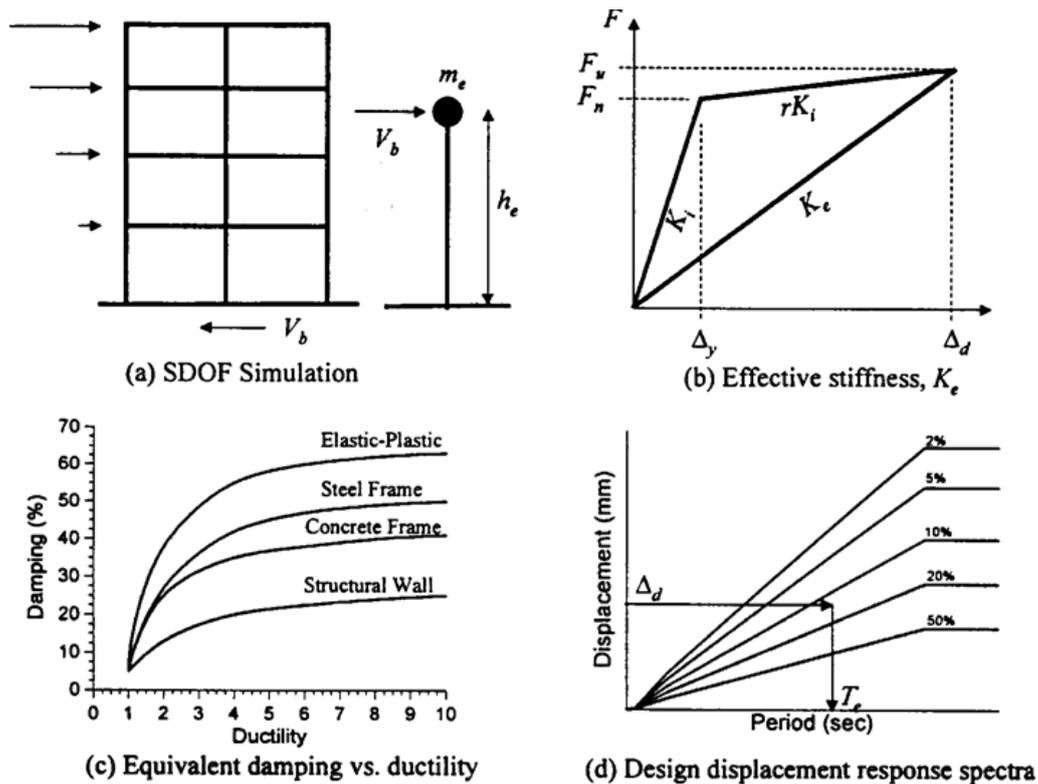


Figura 2. Fundamentos Basados en el Diseño Sísmico por Desplazamiento Directo. Fuente: (Calvi, Priestley y Kowalsky; 2008)

### 3.1. Generación de espectro de desplazamiento vs periodo:

Parte central de las investigaciones es generar los espectros de desplazamiento para un elemento estructural situado en un determinado piso, ya que las mayores aceleraciones se dan en el último piso y con el mayor modo se analiza solo para el último piso y el primero modo. Filiatrault, Perrone, Merino y Calvi (2018), hace una recopilación de fórmulas propuestas en investigaciones anteriores y plantea la formulación para el método del desplazamiento directo en elementos no estructurales. Dicha formulación depende de la aceleración máxima modal, el amortiguamiento del propio elemento no estructural y el periodo de todo el sistema estructural como se muestra en la fórm. 2:

$$S_{DF}(T_a) = \frac{T_a^3}{4\pi^2 T_n} \left[ a_{max} \left( \frac{1}{\sqrt{\xi_a}} \right) \right] + \frac{T_a^2 a_{max}}{4\pi^2} ; T_a < T_n$$

$$S_{DF}(T_a) = \frac{T_a^2 a_{max}}{4\pi^2 \sqrt{\xi_a}} ; T_n \leq T_a < T_{eq}$$

$$S_{DF}(T_a) = \frac{T_a^2 a_{max}}{4\pi^2 \sqrt{\left(1 - \frac{T_a}{T_{eq}}\right)^2 + \xi_a}} ; T_a \geq T_{eq}$$

*Fórmula 2.* Ecuación para generar espectro de desplazamiento vs periodo.  
Fuente: (Filiatrault, 2018)

Donde:

- $T_a$  = Periodo del elemento no estructural
- $T_{eq}$  = Periodo equivalente del elemento no estructural (en función del  $T_a$  y de la ductilidad “ $\mu$ ” del elemento no estructural)
- $T_n$  = Periodo del sistema estructural
- $a_{max}$  = aclaración máxima modal
- $\xi_a$  = Amortiguamiento propio del elemento no estructural

Con el desplazamiento de diseño ( $\Delta_d$ ) determinado y la amortiguación ( $\xi_a$ ) que se estimó a partir de la demanda de ductilidad que se esperaba, el período efectivo ( $T_e$ ) en respuesta máxima de desplazamiento se puede leer a partir de un conjunto de espectros de diseño de desplazamiento, como se muestra en el ejemplo de la figura 2 (d). En representación de la estructura (Fig. 2 (a)) como un oscilador SDOF equivalente, la rigidez efectiva ( $K_e$ ) en respuesta máxima de desplazamiento se puede encontrar mediante la inversión de la ecuación para el período natural de un oscilador SDOF, a saber:

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{m_e}{K_e}}$$

*Fórmula 3.* Ecuación para el Periodo Efectivo.  
Fuente: (Priestley, 2000)

Después,

$$K_e = \frac{4\pi^2 m_e}{T_e^2}$$

*Fórmula 4.* Ecuación para la Rigidez Efectiva.

Fuente: (Priestley, 2000)

Donde “me” es la masa efectiva.

Por último, se calcula la máxima fuerza en la base del elemento no estructural (Cortante basal máxima para elementos estructurales):

$$V_B = K_e \Delta_d$$

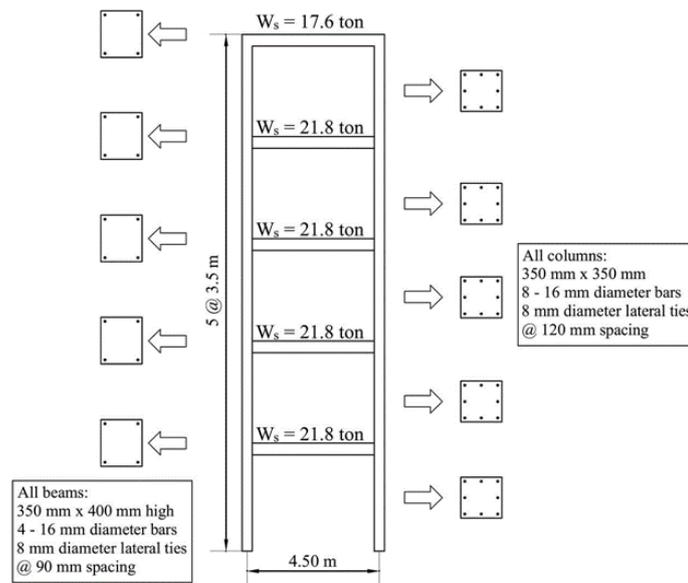
*Fórmula 5.* Ecuación para la Cortante Basal máxima.

Fuente: (Priestley, 2000)

El concepto de diseño es por lo tanto muy simple, y tal complejidad como existe refiere a la determinación de las características de la “estructura sustituto” y la determinación del desplazamiento de diseño y desarrollo de los espectros de diseño de desplazamiento (Shibata y Sozen, 1976).

#### 4. Diseño sísmico de un sistema de tuberías anclados de agua:

Filiatrault et al. (2018), modeló una estructura simple de concreto armado de cinco pisos, 21.8 Tn por piso y 17.6 Tn para la azotea, la edificación tiene 4.5 m de separación entre las columnas principales y 3.5 m de altura entre pisos. La configuración de las vigas y las columnas, así como de toda la estructura se muestran en la fig. 3:



*Figura 3.* Configuración de la estructura para el diseño.

Fuente: (Filiatrault et al, 2018)

Christopoulos y Filiatrault (2006) recomiendan en su libro el uso de amortiguadores suplementarios y sistemas de aislamiento sísmico para la respuesta sísmica de estructuras. También hacen énfasis en diversos sistemas innovadores que han demostrado un potencial considerable a través de estudios analíticos, pruebas experimentales e implementación estructural real. Por lo tanto, se seleccionó un sistema de tuberías de suministro de agua suspendida en el último nivel de la estructura que contenía: (1) una línea de agua fría de distribución, (2) una línea de distribución de agua caliente, y (3) un conducto de retorno de agua caliente como se muestra en la fig. 4. El sistema incluyó una línea de alimentación principal de 18 m de largo conectado a una perpendicular de 36 m de longitud transversal a la línea principal. Las tuberías en el sistema fueron de acero estándar negro con un diámetro de 127 mm (5 pulgadas) a lo largo con un espesor de pared de 6,5 mm. Todos los codos de tubo y empalmes longitudinales se tomaron como rígidamente soldadas. El peso unitario del agua ( $w_a$ ) para cada tubo fue igual a 0,31 kN / m.

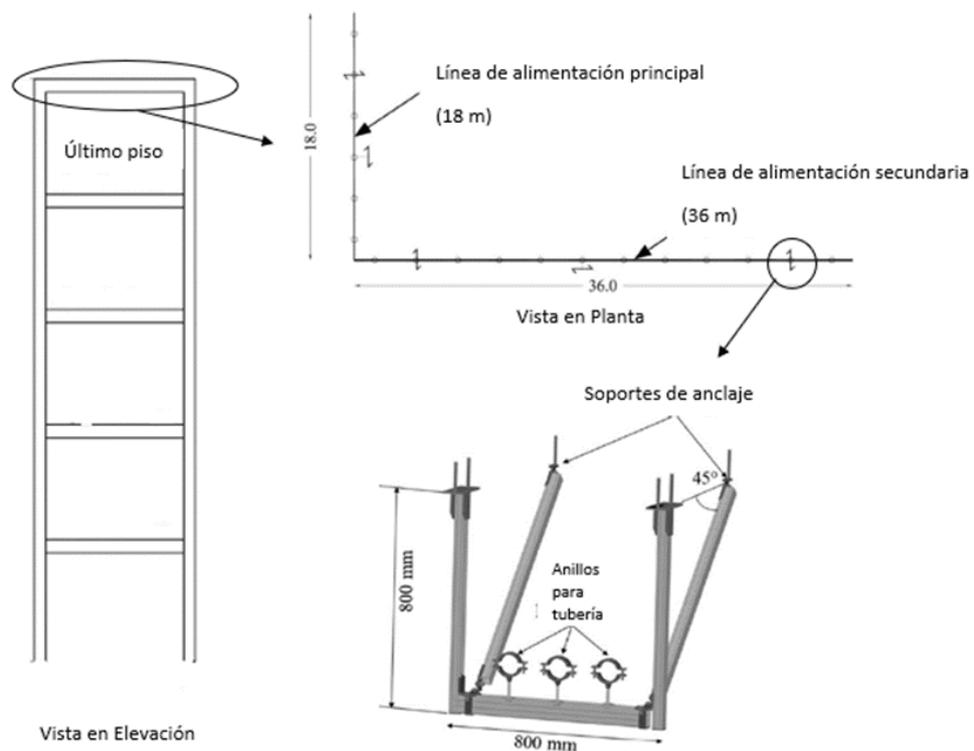


Figura 4. Configuración del elemento de estudio.  
Fuente: (Filiatrault et al, 2018)

Para la configuración del edificio y para el sistema de tuberías suspendida ya mostrado se ha diseñado el número de anclajes por los dos métodos: el método tradicional, para este caso siguiendo el Eurocódigo 8 y el diseño por desempeño basado en el método de desplazamiento directo.

#### 4.1. Método tradicional (Eurocódigo 8)

Wood, Hutchinson, Hoehler y Kreidl (2014) realizaron ensayos para ensambles de trapecios de puntal metálico anclados y evaluaron el comportamiento fuerza-desplazamiento en dirección transversal y longitudinal.

Tabla 1. Propiedades de los anclajes para el método tradicional

| Dirección    | Propiedades              |                            |                            |
|--------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
|              | Fuerza máxima admisible  | Desplazamiento de fluencia | Coefficiente de ductilidad |
|              | F <sub>max, a</sub> (kN) | Δy,a (mm)                  | μ <sub>a</sub>             |
| Transversal  | 8.6                      | 13.8                       | 1.5                        |
| Longitudinal | 11.9                     | 18.2                       | 2.5                        |

Fuente: (Wood et al, 2014)

De acuerdo a la fórm. 6 para la separación requerida se diseña el número de anclajes por el método tradicional, el resumen de los cálculos se muestra en la tabla. 2.

$$S_a \leq \frac{q_a}{\gamma_m \gamma_a S_a} \frac{F_{Rk}}{1.15 N_p w_a}$$

Fórmula 6. Fórmula de la separación requerida para el método del Eurocódigo 8.

Fuente: (CEN, 2018)

Tabla 2. Resumen del diseño tradicional por el Eurocódigo 8

| Parámetros de diseño                                 | Dirección transversal | Dirección longitudinal |      |
|--|-----------------------|------------------------|------|
| Número de tuberías, N <sub>p</sub>                   |                       | 3                      |      |
| Peso específico lineal del agua, w <sub>a</sub>      |                       | 0.31                   | KN/m |
| Relación de periodos, T <sub>a</sub> /T <sub>n</sub> |                       | 0                      |      |
| Aceleración máxima de diseño, a <sub>g</sub>         |                       | 0.21                   | g    |
| Factor del suelo, S                                  |                       | 1.0                    |      |
| Relación de alturas, z/H                             |                       | 1.0                    |      |
| Coefficiente sísmico, S <sub>a</sub>                 |                       | 0.53                   |      |
| Factor de importancia, γ <sub>a</sub>                |                       | 1.0                    |      |
| Factor de desempeño, q <sub>a</sub>                  |                       | 2.0                    |      |
| Factor de resistencia, γ <sub>m</sub>                |                       | 1.25                   |      |
| Fuerza máxima admisible, (Tabla 01)                  | 8.6                   | 11.9                   | kN   |
| Separación requerida, fórm. 6                        | 24.3                  | 33.6                   | m    |
| <b>Anclajes requeridos (L=18m)</b>                   |                       |                        |      |
| <b>Fig. 7</b>  | <b>1</b>              | <b>1</b>               |      |
| <b>Anclajes requeridos (L=36m)</b>                   |                       |                        |      |
| <b>Fig. 7</b>  | <b>2</b>              | <b>1</b>               |      |

Fuente: (Filiatrault et al, 2018)

Los planos de diseño son mostrados en la fig. 7(a).

#### 4.2. Método de desplazamiento directo:

Para el método por desplazamiento directo también se utilizan los mismos resultados de los ensayos realizados por Wood et al. (2014).

Tabla 03. Propiedades de los anclajes para el método por desplazamiento directo

| Rendimiento objetivo | Periodo de retorno, $T_r$ (años) | Desplazamiento objetivo, $\Delta t_a$ (mm) |                        | Coeficiente de ductilidad, $\mu_a$ |                        |
|----------------------|----------------------------------|--|------------------------|------------------------------------|------------------------|
|                      |                                  | Dirección transversal                      | Dirección longitudinal | Dirección transversal              | Dirección longitudinal |
| Prevención de daños  | 100                              | 13.8                                       | 18.2                   | 1.0                                | 1.0                    |
| Vida segura          | 475                              | 20.7                                       | 45.5                   | 1.5                                | 2.5                    |

Fuente: (Wood et al, 2014)

A continuación, se muestran los espectros de aceleración para la normativa Eurocódigo 8. En tiempos de retorno ( $T_r$ ) de 100 y 475 años (CEN, 2018).

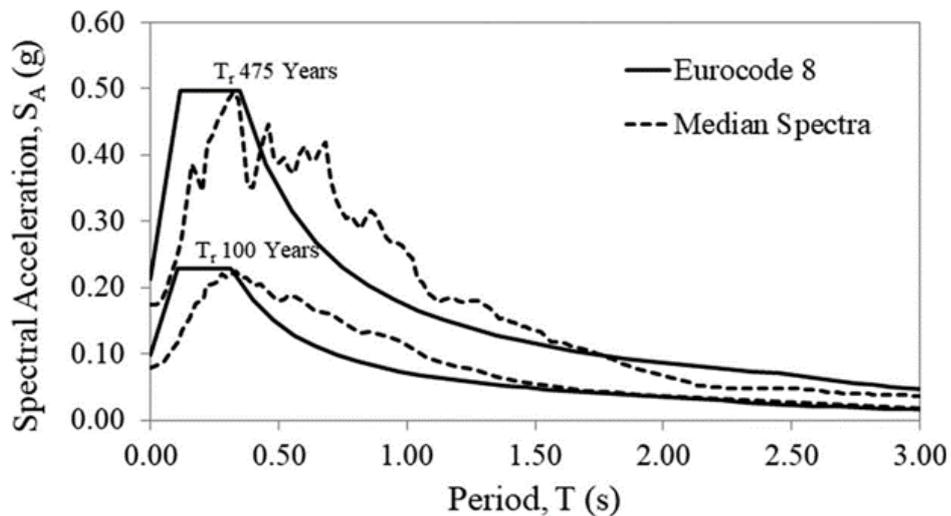


Figura 5. Espectro de aceleración.

Fuente: (CEN, 2018)

4.2.1. Análisis modal:

Ya que la mayor respuesta se encuentra en el último nivel de una edificación, el análisis modal solo se realiza para el último nivel (nivel 5). Para esto se utiliza la fórm. 7 como se indica y los resultados se muestran en la tabla 4.

$$a_{max,j,i} = \frac{\phi_{j,i}}{\sum \phi_{j,i} m_j} m_{e,i} S_{A,i}$$

Fórmula 7. Fórmula para la aceleración máxima en un piso "i".  
Fuente: (Filiatrault et al, 2018)

Tabla 4. Resumen del análisis modal para el nivel 5

|   | Período no estructural (s) | Aceleración espectral (g) | Masa efectiva modal (t) | Porcentaje acumulado | Valor modal, $\phi_{5,i}$ | $\sum \phi_{j,i} m_j$ | Aceleración máxima en el nivel 5 |
|---|----------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------------------|
|   | Tn                         | Sa, Fig. 5                | me,i                    | Acumulado            | Modo 5 piso               | (t)                   | amax,5,i (g)                     |
| 1 | 0.92                       | 0.27                      | 86                      | 82.06%               | 0.14                      | 9.23                  | 0.35                             |
| 2 | 0.33                       | 0.44                      | 11.32                   | 10.80%               | 0.12                      | 3.79                  | 0.16                             |
| 3 | 0.21                       | 0.35                      | 4.57                    | 4.36%                | 0.11                      | 1.79                  | 0.10                             |

Fuente: (Filiatrault et al, 2018)

Los espectros de desplazamiento para el nivel 5 son graficados con la fórm. 2, para 0.15 y 0.18 de amortiguamiento y para los dos periodos de retorno ( $T_R = 100$  años y  $T_R = 475$  años).

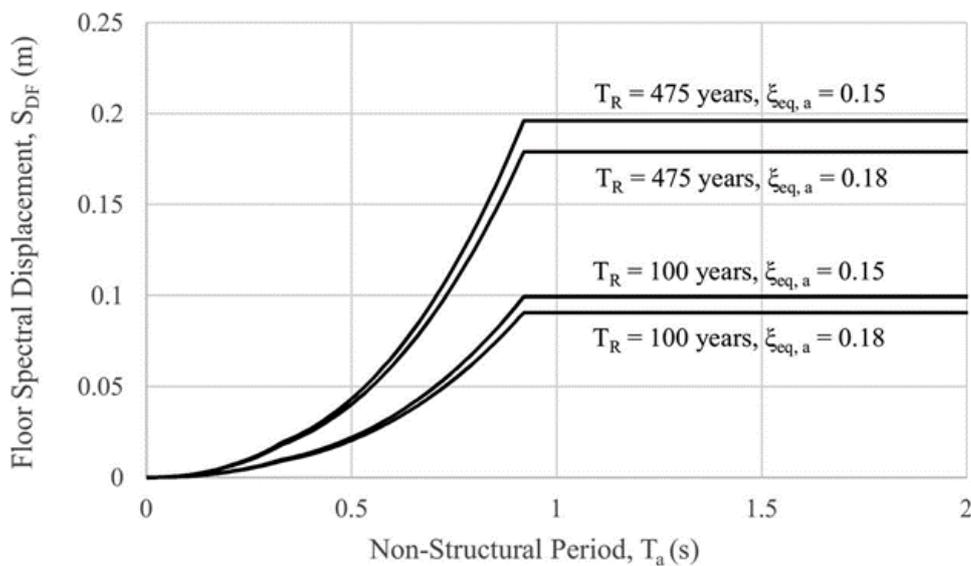


Figura 6. Espectros de desplazamiento.  
Fuente: (Filiatrault et al, 2018)

$$S_a \leq \frac{gT_{eq,a}^2}{4\pi^2\Delta_{t,a}} \frac{F_{Rk}}{1.15\gamma_m N_p w_a}$$

Fórmula 8. Fórmula de la separación requerida para el método de desplazamiento directo.  
Fuente: (Filiatrault et al, 2018)

Tabla 5. Resumen del diseño por desplazamiento directo. Fuente: (Filiatrault et al, 2018)

| Parámetros de diseño                                       | Valores finales de diseño          |              |                            |              |    |
|--|------------------------------------|--------------|----------------------------|--------------|----|
|  | Prevención de daños<br>Tr=100 años |              | Vida segura<br>Tr=475 años |              |    |
|  | Transversal                        | Longitudinal | Transversal                | Longitudinal |    |
| Relación de ductilidad objetiva, $\mu_{t,a}$               | 1.0                                | 1.0          | 1.5                        | 2.5          |    |
| Desplazamiento objetivo, $\Delta_{t,a}$ (mm)<br>(Tabla 03) | 13.8                               | 18.2         | 20.7                       | 45.5         |    |
| Coefficiente de amortiguamiento, $\xi_{eq,a}$              |                                    | 0.15         |                            | 0.18         |    |
| Periodo equivalente, $T_{eq,a}$ , (Fig. 6)                 | 0.40                               | 0.46         | 0.36                       | 0.53         | s  |
| Número de tuberías, $N_p$                                  |                                    |              | 3                          |              |    |
| Peso específico lineal del agua, $w_a$<br>(KN/m)           |                                    |              | 0.31                       |              |    |
| Factor de resistencia, $\gamma_m$                          |                                    |              | 1.25                       |              |    |
| Fuerza máxima admisible, (Tabla 01)                        | 8.6                                | 11.9         | 8.6                        | 11.9         | KN |
| Separación requerida, fórm. 8                              | 18.5                               | 25.7         | 10.0                       | 13.7         | m  |
| <b>Anclajes requeridos (L=18m) Fig. 7</b>                  | <b>1</b>                           | <b>1</b>     | <b>2</b>                   | <b>2</b>     |    |
| <b>Anclajes requeridos (L=36m) Fig. 7</b>                  | <b>2</b>                           | <b>2</b>     | <b>4</b>                   | <b>3</b>     |    |

Fuente: (Filiatrault et al, 2018)

Para el diseño por desplazamiento directo de la fig. 7(b), se eligió los resultados pertenecientes al periodo de retorno de  $Tr = 475$  años por ser más conservador.

4.3. Planos del diseño:

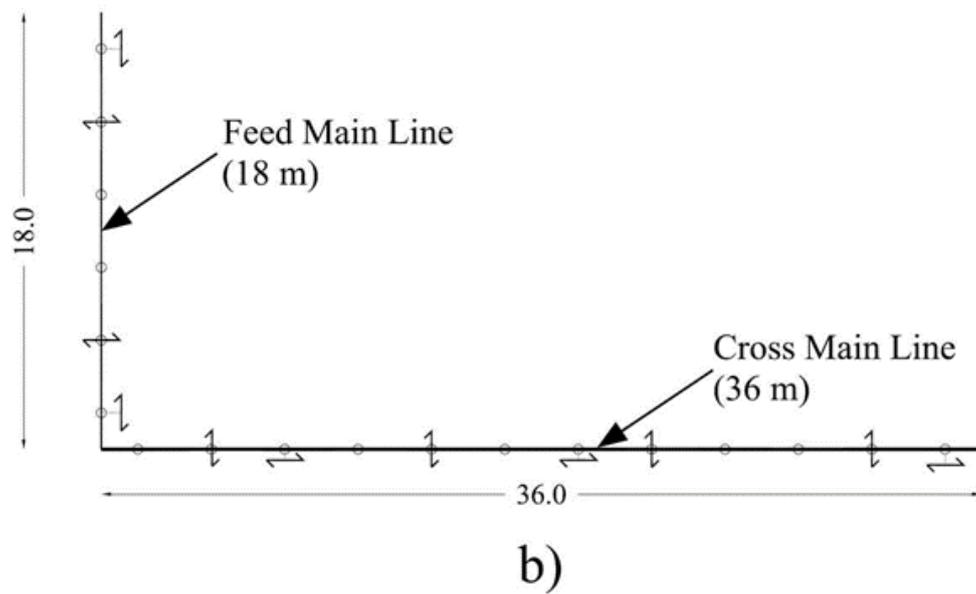
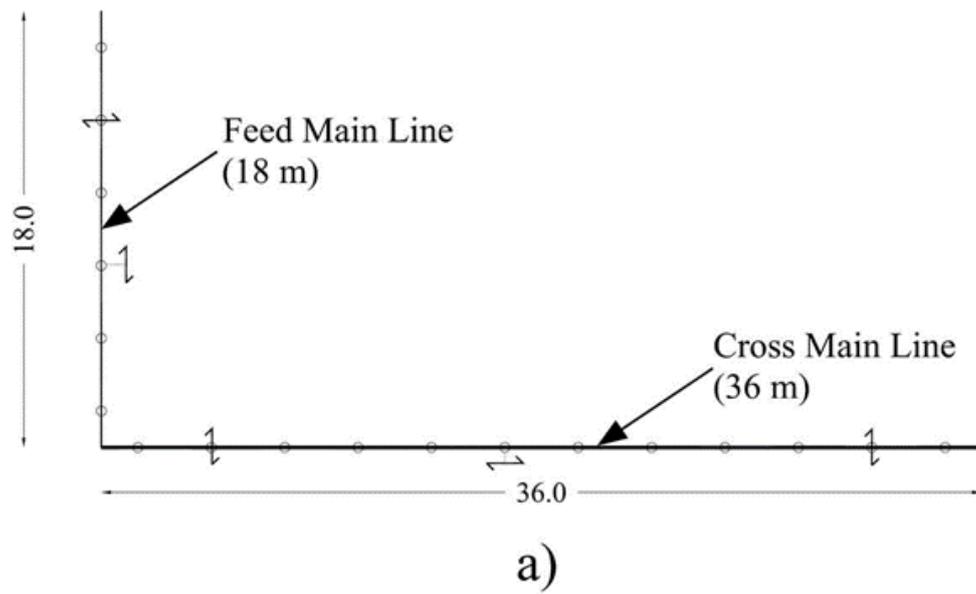


Figura 7. a) Diseño sísmico tradicional y b) diseño sísmico por desplazamiento directo.  
Fuente: (Filiatrault et al, 2018)

## **CONCLUSIONES**

El diseño sísmico por desempeño es significativamente más conservador que el diseño sísmico tradicional y debe aplicarse a las edificaciones esenciales e importantes como se menciona en la norma E.030 Diseño sismorresistente (RNE, 2006): Edificaciones del sector salud, edificaciones para la respuesta ante desastres, edificaciones de sistemas masivos de transporte, edificaciones del sector educación, entre otros. Por su complejidad dichas estructuras contienen gran porcentaje de elementos no estructurales y sería pertinente realizar un diseño sísmico más conservador.

Las fuerzas horizontales obtenidas del cálculo por medio del método de desplazamiento directo siempre resultan mayores que las realizadas por métodos tradicionales como menciona la norma nacional E.030 Diseño sismorresistente (RNE, 2006). Además, este nuevo enfoque cuenta con niveles de desempeño que sitúan cada edificación según su importancia, o dejan que el diseñador seleccione el nivel de desempeño pertinente según su criterio y experiencia.

Para el diseño de los anclajes de las tuberías de agua mediante el método de desplazamiento directo, los refuerzos que restringen los desplazamientos horizontales en las dos direcciones son significativamente mayores a los diseñados por métodos tradicionales. Mostrando la importancia de un diseño por desempeño y lo poco seguro que es realizarlos por el método tradicional de la norma nacional E.030 Diseño sismorresistente (RNE, 2006). Además, la norma nacional solo cuenta con el capítulo VI para el diseño sísmico de elementos no estructurales, el cual sigue siendo muy general y está basado en diseño sísmico tradicional (diseño sísmico basado en las fuerzas).

## **RECOMENDACIONES**

Realizar más investigaciones en los otros elementos no estructurales de las edificaciones esenciales e importantes: sistemas eléctricos, fachadas, enchapes, falsos techos, vidrios u otros elementos no estructurales. Luego, calcular la fuerza mediante el método de desplazamiento directo y trabajar con los requerimientos sísmicos propios de cada elemento no estructural para garantizar su total operatividad después de la ocurrencia de un sismo.

Ya que el cálculo de los espectros de desplazamiento no es complicado se puede generar una base de datos de espectros para diferentes tipos de materiales de acuerdo a sus propiedades (amortiguamiento propio interno de cada material).

Para el diseño de elementos no estructurales anclados, como son las tuberías ancladas de agua, que se requiera muchos refuerzos para la restricción del desplazamiento, se podría utilizar sistemas que permitan aumentar el amortiguamiento propio del elemento no estructural para disipar la energía sísmica y reducir el número de refuerzos.

Modelar estructuras tipo, variando su configuración en planta y en altura, para las diferentes zonas sísmicas en el país, obteniendo información de las redes acelerográficas actualmente operativas en el Perú.

## REFERENCIAS

- ASCE. (2017). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings : ASCE/SEI, 41-17*. Reston : American Society of Civil Engineers.
- Bachman, Robert; Dowty, Susan. (2008). *Is It a Nonstructural Component or a Nonbuilding Structure?* (July), 18–21.
- Calvi, G. M., Priestley, M. J. N., & Kowalsky, M. J. (2008). Displacement Based Seismic Design of Structures - MJN Priestley high resolution.pdf. *5th New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference*.
- CEN. (2018). UNE-EN 1998-5:2018 Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismo... Retrieved September 6, 2020, from UNE website: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0060366>
- Chen, K., Lu, W., Xue, F., Tang, P., & Li, L. H. (2018). Automatic building information model reconstruction in high-density urban areas: Augmenting multi-source data with architectural knowledge. *Automation in Construction, 93*(May), 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.009>
- Christopoulos, C., & Filiatrault, A. (2006). Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation. *IUSS Press, Vol. 1*Christopo, p. 1192. Retrieved from <https://www.worldcat.org/title/principles-of-passive-supplemental-damping-and-seismic-isolation/oclc/123131116>
- Filiatrault, A., Perrone, D., Merino, R. J., & Calvi, G. M. (2018). Performance-Based Seismic Design of Nonstructural Building Elements. *Journal of Earthquake Engineering, 00*(00), 1–33. <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1512910>
- Filiatrault, A., & Sullivan, T. (2014). Performance-based seismic design of nonstructural building components: The next frontier of earthquake engineering. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 13*(1), 17–46. <https://doi.org/10.1007/s11803-014-0238-9>
- Park & Pauley. (1975). *Reinforced Concrete Structures*.
- Perrone, D., & Filiatrault, A. (2017). Automated seismic design of non-structural elements with building information modelling. *Automation in Construction, 84*(September), 166–175. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.09.002>
- Porter, K. A. (2005). A Taxonomy of Building Components for Performance-Based Earthquake Engineering. *Pacific Earthquake Engineering Research*, (September).
- Priestley, M. J. N. (2000). Performance based seismic design. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 33*(3), 325–346.
- RNE. (2006). *Norma E.030 Diseño Sismorresistente*. Retrieved from <https://www.sencico.gob.pe/investigacion/publicaciones.php?id=444>
- Shibata, & Sozen. (1976). Substitute-structure method to determine design forces in earthquake-resistant reinforced concrete frames. *Journal of Structural Division, Vol. 102*, pp. 1905–1910. Retrieved from [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/6\\_vol2\\_1905.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/6_vol2_1905.pdf)
- Taghavi, S., & Miranda, E. (2004). Estimation of Seismic Acceleration Demands in Building Components. *Journal of Earthquake Engineering, (3199)*, 3199.
- Wood, R. L., Hutchinson, T. C., Hoehler, M. S., & Kreidl, B. (2014). Experimental characterization of trapeze assemblies supporting suspended nonstructural systems. *NCEE 2014 - 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.4231/D3D21RJ9J>