

AMORTIGUAMIENTO VISCOSO EQUIVALENTE EN EL REFUERZO DE ESTRUCTURAS DISEÑADAS POR EL MÉTODO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS

EQUIVALENT VISCIOUS DAMPING IN THE RETROFITTING OF STRUCTURES DESIGNED BY THE DDBD

Cristian Bay ^a, Gustavo Palazzo ^b

^a *Grupo de Estudios de Estructuras Civiles, Universidad Tecnológica Nacional, Av. Urquiza 314,
C.P.: 5600, San Rafael, Mendoza, Argentina. cbay@frsr.utn.edu.ar,
<https://www.frsr.utn.edu.ar/investigacion/>*

^b *CeReDeTeC, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Rodríguez 273, 4200
Mendoza, Argentina, <http://www.frm.utn.edu.ar>*

Palabras clave: Amortiguamiento equivalente, Refuerzo de estructuras, DDBD.

Resumen. En zonas de alta peligrosidad sísmica existen estructuras que pueden requerir un refuerzo estructural para mejorar su desempeño. Una alternativa para realizar estos refuerzos es la incorporación de sistemas pasivos de energía. Una metodología de diseño simple para estos casos son los métodos basados en desplazamientos, en los cuales el amortiguamiento viscoso equivalente permite estimar el desplazamiento máximo de la estructura en el comportamiento no lineal de la misma. Además, para el refuerzo de estructura es habitual considerar la estructura y el sistema de refuerzo en forma paralela para obtener el comportamiento final de la estructura. En este trabajo se realiza una revisión de la literatura del amortiguamiento equivalente, además se revisan los escasos métodos propuestos para determinar este amortiguamiento en sistemas con refuerzos estructurales. Se concluye en la necesidad de profundidad de los métodos para determinar el amortiguamiento para disminuir la dispersión en los resultados.

Keywords: EVD, Retrofit, DDBD.

Abstract. In areas of high seismic hazard there are structures that may require structural retrofit to improve their performance. An alternative to carry out this retrofit is the incorporation of passive energy systems. A simple design methodology for these cases are displacement-based methods, in which the equivalent viscous damping allows estimating the maximum displacement of the structure in the nonlinear behavior of the structure. In addition, for structure reinforcement it is usual to consider the structure and the reinforcement system in parallel to obtain the final behavior of the structure. In this work, a literature review of the equivalent damping is carried out, and the few methods proposed to determine this damping in systems with structural reinforcement are reviewed. It is concluded that the methods to determine the damping need to be deepened in order to reduce the dispersion in the results.

1 INTRODUCCION

Un problema vigente en ingeniería sísmica es la vulnerabilidad de edificios existentes. Esta vulnerabilidad requiere de un refuerzo o rehabilitación estructural que permita a la estructura tener un desempeño adecuado frente a las acciones sísmicas. Las nuevas tecnologías como la disipación de energía a través de la incorporación de sistemas histeréticos resulta una alternativa atractiva para el refuerzo necesario (Bay & Palazzo, 2020).

Dentro de la práctica actual, se pueden emplear distintas metodologías para el diseño de estructuras con sistemas histeréticos de disipación de energía, aunque los métodos basados en desplazamientos (DDBD) resultan más atractivos por su transparencia y simplicidad de aplicación (Priestley, et al., 2007).

Un dato básico para el DDBD es el amortiguamiento viscoso equivalente (AVE), el cual permitirá estimar el desplazamiento máximo que tendrá la estructura. Esta estimación deberá ser contrastada, según indican las normativas referentes a nivel internacional, con análisis dinámico no lineal (ADNL).

En la formulación original del diseño basado en desplazamientos (DDBD), se propusieron expresiones para determinar el AVE (Priestley, et al., 2007). Sin embargo, la comunidad científica ha realizado estudios para mejorar la estimación del AVE de acuerdo a distintos sistemas estructurales, y en función de distintas variables que no han sido incorporados al método de diseño (Bay & Palazzo, 2019).

El objetivo de este trabajo es una recopilación de estudios (numéricos y analíticos) sobre el AVE antes y después del surgimiento del DDBD. Además, se recomiendan expresiones para determinar el AVE en estructuras de hormigón armado y sistemas histeréticos de disipación de energía, y finalmente se abordan los avances a la fecha del AVE para el refuerzo de estructuras.

En este trabajo se inicia con una revisión de la definición del amortiguamiento viscoso equivalente en la dinámica clásica para sistemas lineales, luego se realiza una revisión y crítica de los trabajos destacados encontrados en la literatura, según el ciclo de histéresis y la tipología estructural. Finalmente se abordan los trabajos sobre AVE para sistemas en paralelo de refuerzo de estructuras.

2 REVISIÓN DEL AVE

El concepto de amortiguamiento viscoso generalmente se utiliza para representar la energía disipada en una estructura en el rango elástico. Tal disipación se debe a mecanismos como la fisuración en el hormigón, la interacción con elementos no estructurales, la interacción suelo-estructura, etc. En la práctica resulta difícil estimar cada uno de estos mecanismos en forma individual, entonces el amortiguamiento viscoso equivalente representa una combinación de los mecanismos de disipación antes mencionados. Si bien no hay una relación directa entre el amortiguamiento viscoso y los fenómenos físicos descriptos, resulta una forma simple y sencilla para representar matemáticamente dichos fenómenos (Chopra, 1995).

En la dinámica clásica el AVE representa todas las fuentes de absorción de energía en el rango elástico, razón por la cual el DDBD utiliza este concepto para representar la absorción de energía en el rango lineal y no lineal de la estructura. La primera propuesta para modelar el comportamiento inelástico de un amortiguador viscoso con un parámetro proporcional a la velocidad fue realizada por Jacobsen (1930). Con el objetivo de simplificar la respuesta del sistema no lineal, representó la solución de un sistema dinámico con amortiguamiento viscoso no lineal mediante un sistema con amortiguamiento viscoso lineal equivalente. Años más tarde, varios autores (Rosenblueth & Herrera, 1964; Iwan & Gates, 1979; Gulkan & Sozen, 1974), aplicaron el concepto de Jacobsen para estructuras con comportamiento histerético, típico de estructuras civiles. En ese contexto es que otros autores (Blandon & Priestley, 2005; Dwairi, et

al., 2007) han considerado la expresión (1) para determinar el AVE del sistema, ξ_{eq} , en el DDBD.

$$\xi_{eq} = \xi_v + \xi_h \quad (1)$$

Donde ξ_v representa el amortiguamiento inicial en el rango elástico del sistema, y ξ_h representa el amortiguamiento histerético tratado como revisión del AVE en este trabajo.

Para una revisión del AVE a lo largo de la historia, es necesario marcar un hito importante, la publicación del libro sobre DDBD de Nigel Priestley (Priestley, et al., 2007). Entonces para la revisión del estado del arte del AVE se presentan 3 estadios: (i) El AVE antes de la formulación del DDBD; (2) El AVE formulado específicamente para el DDBD; y (3) Los avances que hay en AVE hasta la fecha para distintos sistemas estructurales.

2.1 AVE previo al desarrollo del DDBD

En 1930 Jacobsen propuso el concepto de amortiguamiento viscoso equivalente para un sistema viscoso no lineal. El mismo autor años más tarde (Jacobsen, 1960) resaltó los problemas que surgen en el intento de encontrar un método de linealización equivalente para resolver la respuesta de los sistemas SUGL. Para los sistemas elasto plásticos perfectos, el aumento del periodo con la amplitud en el rango posterior a la fluencia causa problemas no manifiestos cuando se utiliza un sistema lineal equivalente. Si se considera el cambio de periodo con el desplazamiento, el sistema lineal equivalente tendrá periodo, rigidez y amortiguamiento variable. Este último variará para tener en cuenta la disipación de energía del oscilador bilineal. Además, también debería cambiar el amortiguamiento crítico por el cambio en la rigidez.

Rosenblueth y Herrera (1964), presentaron una expresión general que describe los modelos lineales equivalentes para determinar la respuesta de sistemas bilineales, elastoplásticos, de un grado de libertad. Por primera vez definieron el amortiguamiento efectivo al desplazamiento máximo de la respuesta. Donde al igualar la energía disipada por un ciclo del sistema lineal equivalente, con la energía disipada por un ciclo del oscilador real, y considerando una rigidez efectiva o secante al desplazamiento máximo, es posible determinar el amortiguamiento viscoso equivalente. Este concepto desarrollado en la década del 60 (Rosenblueth & Herrera, 1964) y revisado en el 2000 (Christopoulos & Filiatrault, 2007) es el que tiene la norma americana (ASCE-7, 2022) para determinar el AVE de estructuras con sistemas de disipación pasiva de energía.

Gulkan y Sozen (1974) demostraron que la ductilidad por sí sola no es suficiente para interpretar el comportamiento de las estructuras de hormigón armado. Dos sistemas que presentan la misma ductilidad, en un sistema estático no lineal, pueden no tener la misma respuesta a una excitación cíclica, si las propiedades histeréticas de los sistemas son diferentes. Por lo tanto, el modelo histerético considerado también conduce a cambios en el amortiguamiento equivalente. Los mismos autores por primera vez trabajaron con carga sísmica, relacionaron el período efectivo con la rigidez secante en el desplazamiento máximo. Determinaron el AVE igualando la energía de la excitación del sistema y la energía disipada por un amortiguador ficticio equivalente.

Iwan y Gates (1979) aplicaron un enfoque estadístico para determinar el AVE en seis modelos de histéresis sometidos a 12 registros sísmicos. Realizaron una optimización que consistió en minimizar el medio cuadrático de la diferencia entre desplazamientos del análisis dinámico no lineal y el sistema lineal equivalente. Iwan (1980) trabajó con sistemas bilineales elasto plásticos, similares a los estudiados por Rosenblueth & Herrera (1964). En este caso sometió el sistema a carga sísmica y en base a la estadística determinó una expresión para

relacionar la ductilidad y período con el amortiguamiento equivalente.

En un estudio teórico más reciente, Kowalsky (1994) utilizó la rigidez secante al desplazamiento máximo para definir el cambio de período, tal como se había aplicado anteriormente (Rosenblueth & Herrera, 1964; Gulkan & Sozen, 1974), junto con el modelo histórico de Takeda para la rigidez degradada.

El estudio de Miranda y Ruiz-García (2002) evaluaron los cuatro métodos descritos anteriormente. Realizaron una comparación entre los resultados "exactos" del ADNL y los calculados con los métodos aproximados. En esta evaluación, se consideraron tres tipos de comportamiento histórico, 50 periodos distintos y 264 registros de terremotos ocurridos en California. Concluyeron que, a pesar de tener errores medios relativamente pequeños, la dispersión de los resultados en algunos casos fue sustancial, en particular para grandes niveles de ductilidad. Por lo tanto, cuando se aplica a registros sísmicos individuales, cualquiera de estos métodos podría conducir a errores significativos en la estimación del desplazamiento máximo.

En la Figura 1 se trazan las expresiones desarrolladas por los autores citados en párrafos anteriores. Se observa, en primer lugar, la sobre estimación del AVE en la expresión de Jacobsen respecto de las otras expresiones. A la variabilidad entre las expresiones mostrada en las figuras se debe sumar las dispersiones que presentan cada una de ellas, tal como indicó Miranda y Garcia-Ruiz (2002). Resulta necesario incorporar mayor cantidad de variables a las expresiones con el objetivo de reducir las dispersiones observadas.

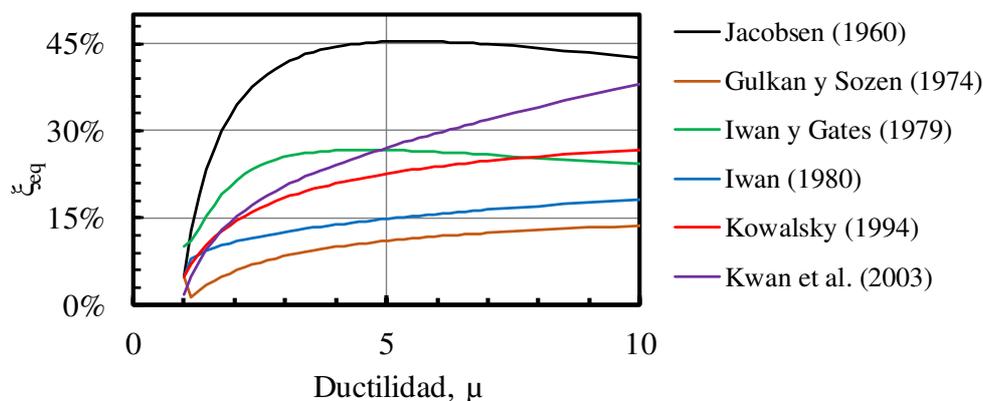


Figura 1 Relación AVE y ductilidad según distintos autores de la literatura.

2.2 AVE en el DDBD

En el libro de base del DDBD (Priestley, et al., 2007) se utilizan las investigaciones de dos trabajos destacados en el AVE (Grant, et al., 2005; Dwairi, et al., 2007) en la determinación del AVE que son incorporados al método de diseño.

Grant y colaboradores (2005), con el fin de abordar un amplio rango de modelos constitutivos de disipación utilizó seis ciclos de histéresis: (i) Takeda Largo (TL), característico de pilas de puentes y muros de hormigón armado, (ii) Takeda Corto (TC), para representar el comportamiento de pórticos de hormigón armado, (iii) Bilinear, para simular estructuras aisladas sísmicamente, (iv) Elastoplástico, para representar el comportamiento de estructuras con aisladores de goma, (v) Ramber Osgood, apropiado para simular estructuras metálicas y (vi) Ring Spring, utilizado para estructuras pretensadas de hormigón armado con juntas híbridas. Utilizaron 6 acelerogramas (uno sintético y cinco artificiales), 5 niveles de ductilidad

y 8 periodos efectivos para las simulaciones. En primera instancia compararon resultados del ADNL con la expresión de Jacobsen (1960), confirmaron la sobre estimación de esta última. En segunda instancia propusieron expresiones para determinar el AVE para cada uno de los 6 ciclos de histéresis. Para la estadística utilizaron una expresión dependiente de la ductilidad y del T_{ef} , además de constantes de ajuste. Es importante destacar que, la dependencia del T_{ef} reduce la dispersión en los resultados, pero hace al DDBD un método iterativo, perdiendo el objetivo de un método de diseño no iterativo y de fácil implementación.

Paralelamente, Dwairi et al. (2007) realizaron un trabajo que, además de comparar los ADNL con las expresiones de Jacobsen (1960), propusieron expresiones independientes del T_{ef} para estimar el AVE en función de la ductilidad al desplazamiento máximo. En este caso solo se utilizaron 4 ciclos de histéresis: (i) elastoplástico (EPP) característico de estructuras de acero, (ii) Takeda corto (TC), característico de columnas y tabiques de hormigón armado, (iii) Takeda largo (TL), referente a vigas de hormigón dúctil y (iv) Ring-Spring característico de estructuras postensadas y con sistemas de aislamiento sísmico. Para las simulaciones se utilizaron 100 registros y relaciones de ductilidad entre 1 y 6. Las expresiones obtenidas se independizan para T_{ef} superiores 1 segundo, dado que cuando es inferior a 1 segundo hay una participación importante de este, en general el T_{ef} siempre es mayor a la unidad.

En la Figura 2 se grafican las relaciones de AVE para cada ciclo de histéresis y el caso particular de $T_{ef}=1$ seg. Se observa que, a pesar de las diferentes consideraciones de Grant (2005) y Dwairi (2007), las expresiones resultan aproximadas entre sí para los ciclos de histéresis en común y para el período efectivo evaluado. Las expresiones adoptadas en el libro base del DDBD resultan conservadoras en todos los casos y se reitera la sobre estimación del amortiguamiento de Jacobsen.

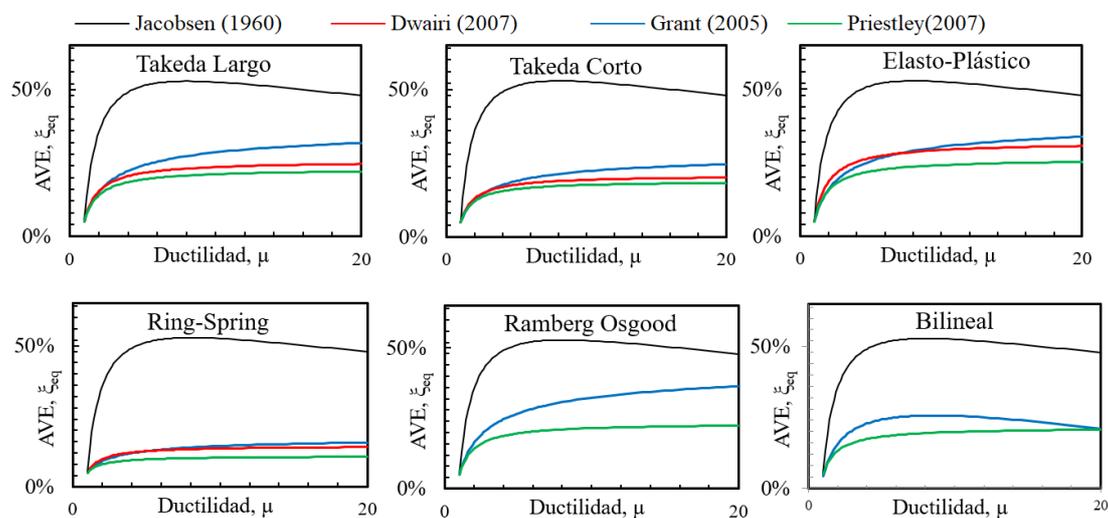


Figura 2. AVE para distintos ciclos de histéresis, $T_{ef} = 1$ seg. (Jacobsen, 1960; Dwairi, et al., 2007; Blandon & Priestley, 2005; Priestley, et al., 2007).

Entonces, las características del ciclo de histéresis constituyen una variable importante a considerar en la determinación del AVE. Además, es un dato que el diseñador tiene en el inicio del problema. También se observó que incorporar el periodo como variable reduce la dispersión, sin embargo, este dato es de difícil obtención en el diseño basado en desplazamientos.

Posterior a los trabajos descriptos se han desarrollado varias investigaciones en post de validar o no las expresiones propuestas. Hasta este momento se ha trabajado con SUGL y con distintos ciclos de histéresis. A continuación, se presentan una serie de trabajos, numéricos y

experimentales y en SVGL, clasificados según la tipología estructural.

2.3 AVE para distintas tipologías estructurales

Observando la dispersión que se encontraba cuando se utilizaban sistemas de un grado de libertad con distintos ciclos de histéresis, los autores comenzaron a utilizar estructuras de varios grados de libertad, incluso estudios experimentales para estimar el AVE. A continuación, los trabajos más relevantes de la literatura hasta el momento.

Para el caso de estructuras de hormigón el ciclo de histéresis propuesto por Takeda parece el más adecuado para representar el comportamiento no lineal de la estructura.

Yan et al. (2018) trabajaron con pórticos de hormigón armado. Utilizaron 88 modelos de geometrías diversas, entre 3 y 12 niveles. Mediante análisis estático incremental, monotónico y cíclico, obtuvieron una expresión por medio de regresión lineal. Luego contrastaron con ADNL, utilizando 250 registros para los 88 SVGL. Lograron reducir la dispersión de los resultados del 25% al 20% incorporando como variable el T_{ef} .

Ghaffarzadeh et al. (2014) trabajaron en la determinación del AVE de pórticos de hormigón armado con y sin diagonales dúctiles de acero. El estudio se basó en modelaciones numéricas de pórticos de 4, 6, 8, 12, 16 y 20 niveles, sometidos a registros escalados pertenecientes a zona de alta sismicidad. Utilizaron como base la expresión de Blandon & Priestley (2005) y obtuvieron una expresión para pórticos libres y pórticos con diagonales dúctiles de acero, con un rango de ductilidad entre 1,5 y 6.

Landi et al. (2016) trabajaron sobre pórticos de hormigón armado rellenos con mampostería. A través de un estudio numérico compararon los resultados de ADNL con los obtenidos por Priestley et al. (2007) y determinaron una subestimación del AVE. Para la mampostería aplicaron el método de la biela equivalente en compresión y en base a simulaciones numéricas en un pórtico relleno de un nivel y un vano obtuvieron una expresión que permitió determinar el AVE. Encontraron que el AVE para pórticos rellenos con mampostería es independiente de μ (para $1 < \mu < 5$) y resulta aproximadamente del 30%.

En la Figura 3 se grafican las expresiones propuestas en la literatura para pórticos de hormigón con y sin rigidización. En pórticos sin rigidización, los estudios realizados por Yan et al. (2018) sobre SVGL muestran mayores valores de AVE que los trabajos de Dwairi et al. (2007) sobre SUGL. De las investigaciones mostradas para pórticos de hormigón armado surge la necesidad de complementar con estudios experimentales para validar los estudios numéricos.

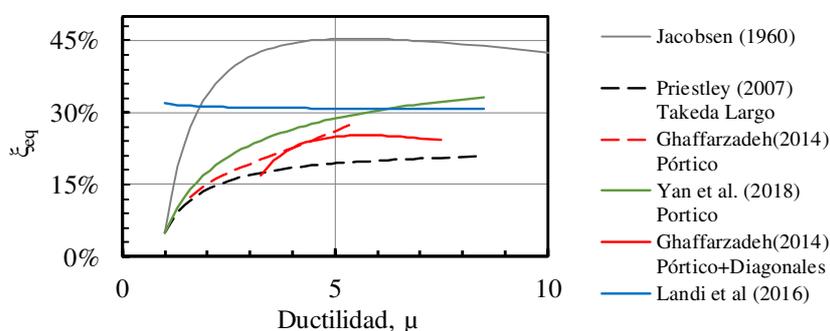


Figura 3. AVE para pórticos de hormigón armado con y sin rigidización.

Para sistemas de disipación de energía (histeréticos) y sistemas de aislamiento sísmico, los ciclos de histéresis bilineales resultan más adecuados para representar el AVE del sistema. Liu et al (2014a) realizaron un importante estudio numérico a partir de la expresión de Jacobsen (1930) y desarrollaron una expresión dependiente de r , μ y T_i . El estudio numérico incluyó

sistemas con T_i entre 0.1 segundo y 1.5 segundos, μ entre 2 y 50 y r entre 0.02 y 0.20. Se utilizaron 12 registros escalados al espectro americano. La incorporación del T_i permitió reducir las dispersiones en los resultados, aunque esto genera que en caso de aplicación en el DDBD se deba iterar para obtener el valor de T_i .

En la Figura 4 se grafican las expresiones de Liu et al (2014a) y se las compara con otras expresiones de la literatura para sistemas bilineales.

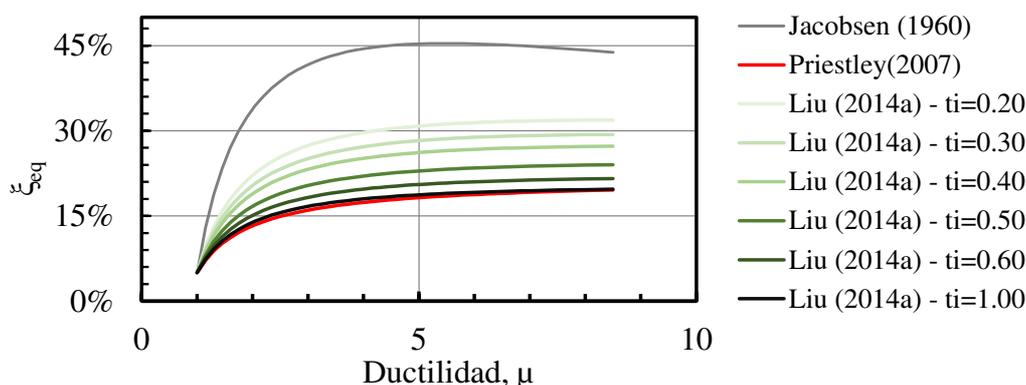


Figura 4. Relaciones de amortiguamiento para sistemas bilineales con $r = 0.05$.

Se observa, de la figura que, para $T_i = 1.00$ segundo el AVE coincide con las expresiones de Priestley (2007). Por otro lado, se muestra la sobre estimación del AVE en la formulación de Jacobsen (1960).

Entonces en el refuerzo de estructuras, una expresión adecuada para estimar el AVE de sistemas histeréticos es la expresión propuesta por Liu et al (2014a).

3 AVE DE SISTEMAS EN PARALELO EN EL DDBD

En los puntos anteriores se trató el AVE para distintos sistemas estructurales. Se encontraron expresiones dependientes de la ductilidad del sistema y de la forma del ciclo de histéresis principalmente. Sin embargo, en la práctica es frecuente que en un sistema estructural definido se incorpore otro sistema adicional, convencional o no, para mejorar el desempeño frente a acciones sísmicas, por ejemplo. En la Figura 5 se muestra el esquema generalmente adoptado por la bibliografía para considerar dos sistemas en paralelos (Lin, et al., 2003; Mazza & Vulcano, 2008; Bergami & Nutti, 2013; Mazza & Vulcano, 2015; Bay & Palazzo, 2020).

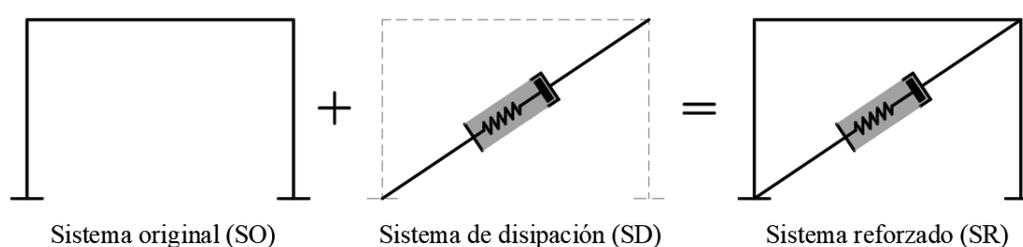


Figura 5 Sistema en paralelo simplificado utilizado en el DDBD.

En este caso la estructura original o primitiva, está constituida por un sistema de pórtico (SO), al cual se le adiciona un sistema de disipación (SD) y constituyen el sistema completo o sistema reforzado (SR). En este trabajo se utiliza el término SR para definir un sistema, el cual se ha modificado con el objetivo de mejorar su desempeño frente a acciones sísmicas.

Los métodos de diseño para estos sistemas simplifican a ambos sistemas como un único sistema con rigidez y amortiguamiento equivalente, donde la rigidez del sistema se obtiene como la suma de las rigideces de cada uno de los sistemas que intervienen y lo mismo sucede con la resistencia. En el caso del AVE en sistemas en paralelo la literatura ha considerado de distintas expresiones, sin embargo, todas se deben a deducciones analíticas, y en algunas expresiones se ha encontrado ciertas incongruencias con los conceptos de amortiguamiento para sistemas en paralelo clásicos. A continuación, se presentan las principales expresiones que aborda la literatura en AVE para sistemas en paralelo.

3.1 Revisión de la literatura

Se presenta una revisión de la forma en que la literatura aborda el AVE en sistemas en paralelo. De la crítica literaria sobre métodos de diseño basados en desplazamiento, se encontraron dos expresiones para representar el AVE de sistemas en paralelo.

La expresión (2), donde el AVE se obtiene como la suma de los AVE de cada una de los sistemas (Lin, et al., 2003; Mazza & Vulcano, 2008) y, la expresión (3), donde el AVE se obtiene proporcional a los esfuerzos de corte basal que aporta cada uno de los sistemas por separado (Bergami & Nutti, 2014; Benedetti & Landi, 2014; Mazza & Vulcano, 2015; Ferraioli & Lavino, 2018). Se destaca que la expresión (3) tiene sus orígenes en el DDBD, donde se utiliza para determinar el AVE de varios sistemas estructurales (Sullivan, et al., 2006; Maley, et al., 2010). En estas expresiones ξ_{EQ} representa el AVE del sistema paralelo, ξ_{SO} y ξ_{SD} el AVE del SO y del SD y, V_{SO} y V_{SD} el de corte basal del SO y del SD. ξ_{SD} representa el AVE del SD.

$$\xi_{EQ} = \xi_v + \xi_{SO} + \xi_{SD} \quad (2)$$

$$\xi_{EQ} = \xi_v + \frac{\xi_{SO}V_{SO} + \xi_{SD}V_{SD}}{V_{SO} + V_{SD}} \quad (3)$$

En la Figura 6 se grafica el AVE del sistema equivalente en función del AVE aportado por el SD, para un determinado AVE del SO. En color azul la expresión (2) y en color rojo la expresión (3), con línea llena para relación de corte basal 0.70, con línea de trazo largo relación de corte basal 0.50 y de trazo corto para corte basal de 0.30. Como relación de corte basal se define a la cantidad de cortante que absorbe la estructura pórtico respecto del total $V_{SO}/(V_{SO} + V_{SD})$.

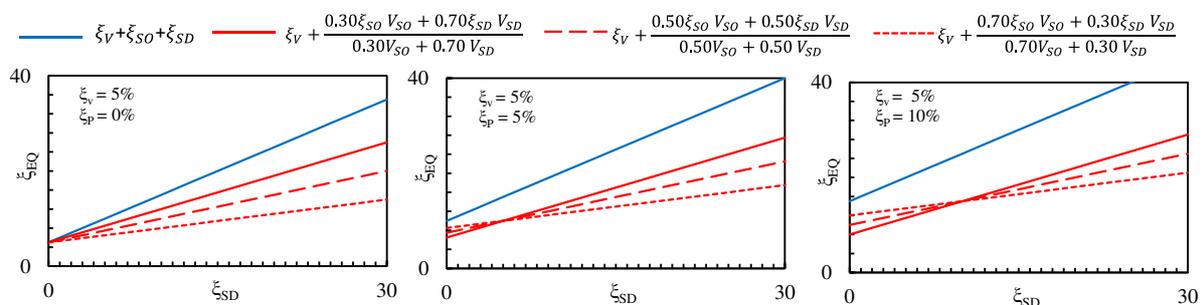


Figura 6. Amortiguamiento equivalente de sistemas en paralelo según dos criterios de la bibliografía. Expresión (2) y (3).

Se observa que la expresión (2) proporciona un valor de AVE mayor que la expresión (3), y se incrementa a medida que el sistema original presenta mayor AVE. Si en ambas expresiones

se considera $\xi_{SD} = 0$, el AVE del sistema en paralelo resulta igual.

Sin embargo, para sistemas lineales elásticos, como los estudiados, ninguna de las expresiones cumple el concepto teórico de que la constante de dos amortiguadores en paralelo es igual a la suma de constantes de cada amortiguador (Chopra, 1995).

Queda pendiente para futuros trabajos desarrollar una expresión para determinar el AVE de sistemas en paralelo que cumpla con la consideración de la dinámica clásica de que las constantes de amortiguamiento deben sumarse para obtener la constante del sistema reforzado.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una revisión del avance del conocimiento en el concepto de amortiguamiento viscoso equivalente (AVE) como factor de linealización en el diseño directo basado por desplazamientos (DDBD).

Las expresiones disponibles en la literatura permiten cubrir una importante cantidad de sistemas estructurales considerando como parámetros principales la forma del ciclo de histéresis, la ductilidad de desplazamientos del sistema y en algunos casos el periodo efectivo y el factor de endurecimiento posterior a la fluencia.

Para estructuras de hormigón armado se recomiendan las expresiones que solo dependen de la ductilidad de desplazamiento y para estructuras con sistemas de disipación de energía (histeréticos) se recomiendan expresiones que dependan del factor de endurecimiento posterior a la fluencia y el periodo inicial.

En el caso del refuerzo de estructuras, tratadas como dos sistemas en paralelo, es donde es necesario continuar la investigación. La literatura ha encontrado dos expresiones para determinar el AVE, aunque ninguna cumple las hipótesis planteadas en la dinámica clásica.

Finalmente, que resulta necesario, además de avanzar en expresiones para determinar el AVE de sistemas en paralelo, realizar estudios experimentales que permitan validar y contrastar los diversos estudios numéricos realizados a la fecha.

REFERENCIAS

- ASCE-7, 2022. Minimum design loads for buildings and other structures., Reston, Virginia, EEUU: American Society of Civil Engineers.
- Bay, C. & Palazzo, G., 2019. Amortiguamiento Viscoso Equivalente en el Diseño Basado en Desplazamientos. *Revista Tecnología Y Ciencia*, Volumen 36, pp. 115-129.
- Bay, C. & Palazzo, G., 2020. Displacement based design procedure for the retrofitting structure with hysteretic damped braced. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 25(4), pp. 285-305.
- Benedetti, A. & Landi, L., 2014. Displacement-Based Design of an Energy Dissipating System for Seismic Upgrading of Existing Masonry Structures. *Journal of Earthquake Engineering*, 18(4), pp. 477-501.
- Bergami, A. & Nutti, C., 2013. *Design of dissipative braces for an existing strategic building with a pushover based procedure*. Grecia, s.n.
- Bergami, A. & Nutti, C., 2014. Design of Dissipative Braces for an Existing Strategic Building with a Pushover Based Procedure. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, pp. (80):815-823.
- Blandon, C. & Priestley, M., 2005. Equivalente viscous damping equations for direct displacement based design. *Journal of Earthquake Engineering*, pp. (9):2: 259-278.
- Chopra, A. K., 1995. *Dinámica de las estructuras*. Cuarta ed. Mexico: Pearson.
- Christopoulos, C. & Filiatrault, A., 2007. *Principles of passive supplemental damping and seismic isolation*. Primera ed. Pavia, Italy: IUSS. Press, Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia.
- Dwairi, H., Kowalsky, J. & Nau, J., 2007. Equivalent Damping in Support of Direct Displacement-Based Design. *Journal of Earthquake Engineering*, pp. 11:4, 512-530.
- Ferraioli, M. & Lavino, A., 2018. A Displacement-Based Design Method for Seismic Retrofit of RC Buildings Using Dissipative Braces. *Mathematical Problems in Engineering*, pp. Article ID 5364564, 28 pages, 2018.
- Ghaffarzadeh, H., Jafari, A. & Zafari, N., 2014. Equivalent viscous damping in direct displacement-based design

- of steel braced reinforced concrete frames. *Struct. Design Tall Spec. Build.*, pp. 23, 604–618.
- Grant, D., Blandon, C. & Priestley, M., 2005. *Modelling Inelastic Response in Direct Displacement-Based Design*, Pavia: Report 2005/03, IUSS Press.
- Gulkan, P. & Sozen, M., 1974. Inelastic response of reinforced concrete structures to earthquake motion. *ACI Journal*, pp. 71: 604-610..
- Iwan, W. & Gates, N., 1979. Estimating earthquake response of simple hysteretic structures. *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, pp. 105: 391-405.
- Jacobsen, L. S., 1930. Steady forced vibrations as influenced by damping. *ASME Transactione*, pp. 52:(169-181).
- Kowalsky, M., 1994. *Displacement-based design-a methodology for seismic design applied to RC bridge columns*, University of California at San Diego, La Jolla, California.: Master's Thesis.
- Landi, L., Tardini, A. & Diotallevi, P., 2016. A Procedure for the Displacement-Based Seismic Assessment of Infilled. *Journal of Earthquake Engineering*, pp. (20):1077-1103.
- Lin, Y., Tsai, M., Hwang, J. & Chang, K., 2003. Direct displacement-based design for building with passive energy dissipation systems.. *Eng. Struct.*, pp. 251, 25-37.
- Liu, T., Zordan, T., Briseghella, B. & Zhang, Q., 2014a. "Evaluation of equivalent linearization analysis methods for seismically isolated buildings characterized by SDOF systems". *Engineering Structures*, pp. 59, 619-634.
- Maley, T., Sullivan, T. & Della Corte, G., 2010. Development of a Displacement-Based Design Method for Steel Dual Systems With Buckling-Restrained Braces and Moment-Resisting Frames. *Journal of Earthquake Engineering*, 14(1), pp. 106-140.
- Mazza, F. & Vulcano, A., 2002. *A simplified procedure for the aseismic design of framed building with dissipative*. Londres, Reino Unido, s.n., p. Paper 735.
- Mazza, F. & Vulcano, F., 2015. Displacement-based design procedure of damped braces for the seismic retrofitting of r.c. framed buildings. *Bulletin Earthquake Engineering*, p. (13):2121–2143.
- Mazza, F. & Vulcano, A., 2008. *Displacement-based seismic design procedure for framed buildings with dissipative braces. (a) Part I: Theoretical formulation; (b) Part II: Numerical results*. USA, American Institute of Physics conference proceedings, p. Part Two.
- Mazza, F. & Vulcano, A., 2009. *Displacement-based design of dissipative braces at a given performance level of a framed buildings*. Beijing, China, s.n., pp. 14-53.
- Miranda, E. & Ruiz-Garcia, R., 2002. Evaluation of approximate methods to estimate maximum inelastic displacement demands.. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volumen 31, pp. 539-560.
- Nuzzo, I., Losanno, D. & Caterino, N., 2019. Seismic design and retrofit of frame structures with hysteretic dampers: a simplified displacement-based procedure. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Volumen 17, p. 2787–2819.
- Priestley, M., Kowalsky, M. & Calvi, M., 2007. *Displacement Based Seismic Design Of Structure*. Pavia, Italia(Pavia): IUSS Press.
- Rosenblueth, E. & Herrera, I., 1964. On a king of hysteretic damping. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, p. 90(4): 37–48.
- Sullivan, T., Priestley, M. & Calvi, J., 2006. Direct Displacement-Based design of frame-wall structures. *Journal of Earthquake Engineering*, 10(1), pp. 91-124.
- Yan, L., Gon, J. & Zhang, Q., 2018. Investigation of Global Equivalent Damping and Statistical Relationship of Displacement Between Nonlinear Static and Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures. *Earthquake Spectra*, pp. (34):1311-1338.