

Metodología para la cuantificación de la sustentabilidad sísmica de estructuras de marcos de acero^[1]

J. CHANCHI GOLONDRINO

Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda / Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia

G.A. MACRAE, J.G. CHASE Y G.W. RODGERS

Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda

C.G. CLIFTON

Universidad de Auckland, Nueva Zelanda

PALABRAS CLAVES

Sustentabilidad sísmica · Sistemas libres de daño · Daño sísmico bajo · Estructuras de marcos de acero

RESUMEN

La sustentabilidad sísmica está directamente relacionada con la capacidad del sistema de sobrevivir a cualquier evento sísmico severo sin requerir reparaciones mayores o remplazos. Este trabajo presenta una metodología cualitativa para evaluar la sustentabilidad sísmica de las estructuras de acero en términos de cuatro parámetros: Daño por deriva^[2], Factibilidad del reemplazo de elementos, Daño en las losas de los pisos y Desplazamiento permanente. Los resultados muestran que los sistemas de marcos convencionales en acero, tales como los Resistentes a momento, y los Arriostrados concéntrica y excéntrica, son menos sustentables que aquellas estructuras equipadas con dispositivos para disipación de energía y que experimentarían escaso daño en la estructura. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones acerca de futuros estudios sobre la sustentabilidad de sistemas de estructuras de acero. El objeto es promover la adopción de este concepto en la práctica del proyecto.

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de sustentabilidad de los sistemas estructurales está asociado directamente con los impactos ambientales, sociales y económicos resultantes de cualquier actividad asociada con los procesos de construcción, ocupación y mantenimiento desarrollado durante la vida del sistema (ASCE 2005). En tal sentido el rol que el ingeniero estructural debe desempeñar en el proyecto sustentable no se limita a la especificación de materiales reutilizables o de un sistema estructural eficaz sino también en la elección de un nivel aceptable de daño que el sistema estructural pueda soportar como resultado de la probabilidad de cualquier evento extremo (Hays y Cocke 2009).

De acuerdo con esta definición se puede argumentar que la sustentabilidad sísmica de cualquier sistema estructural puede ser evaluada mediante la predicción del nivel esperado de daño del sistema estructural después de un gran terremoto.

La aplicación de esta metodología a diferentes sistemas estructurales requiere la definición de un grupo de parámetros que influyen en el nivel de daño. Estos parámetros son denominados como

^[1] Trabajo presentado por los autores en STESSA 2012. Editado en español con permiso de los autores y de los organizadores de STESSA 2012. Traducción al español revisado por Arnaldo Gutierrez.

^[2] Deriva. Diferencia de los desplazamientos horizontales totales entre dos niveles o pisos consecutivos

Indicadores de daño y podrían ser organizados en una escala numérica utilizando el entendimiento racional del mecanismo de disipación de energía del sistema estructural evaluado. El desarrollo de una metodología simple que incorpore las ideas generales arriba descritas permitirá a los profesionales de la ingeniería evaluar la sustentabilidad sísmica de cualquier sistema estructural y algo todavía más importante: elegir la opción más sustentable.

Es importante desarrollar una metodología que cuantifique la sustentabilidad sísmica de los sistemas de estructuras de acero resistente a los sismos. Este trabajo se encara respondiendo a las siguientes preguntas:

1. ¿Cuáles son los sistemas estructurales más comunes y cómo se comportan inelásticamente en un terremoto?
2. ¿Cuáles son los parámetros principales que tienen influencia en la sustentabilidad de los sistemas estructurales en acero?
3. ¿Cuál podría ser un sistema simple de puntuación que establezca la sustentabilidad sísmica de los sistemas estructurales de acero?
4. ¿Cómo se clasificarían los sistemas estructurales de acero en términos de la sustentabilidad sísmica?
5. ¿Cuáles son algunas de las posibles orientaciones para futuras investigaciones respecto a la sustentabilidad sísmica?

2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS

Para determinar la sustentabilidad sísmica de los sistemas estructurales en acero más comunes, se los ha clasificado en tres categorías de acuerdo con el mecanismo de disipación de energía y el nivel de daño después de un terremoto severo.

2.1. Sistemas tradicionales

2.1.1. Marcos Resistentes a Momento (Moment Resisting Frames - MRF). Estos sistemas consisten en vigas conectadas rígidamente con las columnas como muestra la [Figura 1a](#).

Su resistencia lateral se desarrolla mediante fuerzas de corte y momentos flectores en los miembros y las conexiones (Bruneau et al 1998) El mecanismo inelástico más deseable está asociado con rótulas plásticas en los extremos de las vigas y en las bases de las columnas. Como consecuencia del desempeño altamente dúctil se espera que aparezca daño estructural como no estructural.

2.1.2. Marcos Arriostrados Excéntricamente (Eccentrically Braced Frames - EBF). Estos sistemas consisten en marcos y arriostramientos no ubicados concéntricamente colocados de forma de generar en la viga un segmento denominado vínculo tal como se muestra en la [Figura 1b](#). Su resistencia lateral se desarrolla por la acción inelástica en el vínculo y la acción elástica en el marco que lo contiene (Chen Scawthorn 2003) El mecanismo inelástico está basado en la fluencia^[3] (*yielding*) del vínculo. Como resultado se espera que aparezca un importante daño en la zona del vínculo,

2.1.3. Marcos Arriostrados Concéntricamente (Concentrically Braced frames - CBF). Estos sistemas consisten en marcos y arriostramientos colocados concéntricamente en cada nivel del marco como se muestra en la [Figura 1c](#). Su resistencia lateral está desarrollada principalmente por fuerzas axiales en los miembros que soportan pequeños momentos flectores (Feenay & Clifton 1995). El mecanismo inelástico está basado en el comportamiento de fluencia por tracción y postpandeo de los arriostramientos. Se esperan significativos desplazamientos permanentes en los arriostramientos y grandes rotaciones inelásticas en las conexiones.

2.1.4. Marcos Restringidos al Pandeo (Buckling Restrained Frames - BRB). Estos sistemas consisten en marcos y arriostramientos provistos de un núcleo de acero colocado dentro de un miembro tubular que soporta lateralmente el núcleo como se muestra en la [Figura 1d](#). La resistencia lateral se desarrolla por la acción inelástica en los arriostramientos y la acción elástica en las vigas y las columnas (Iwata et al 2000). El mecanismo inelástico está basado en la fluencia por tracción y compresión de los arriostramientos. Se esperan

^[3] El revisor tiene muy poderosos argumentos para indicar que la palabra que traduce “yielding” es “cedencia”. El editor ha preferido colocar la palabra “fluencia” por ser el término más conocido en América Latina, a pesar de que no sea el término correcto.

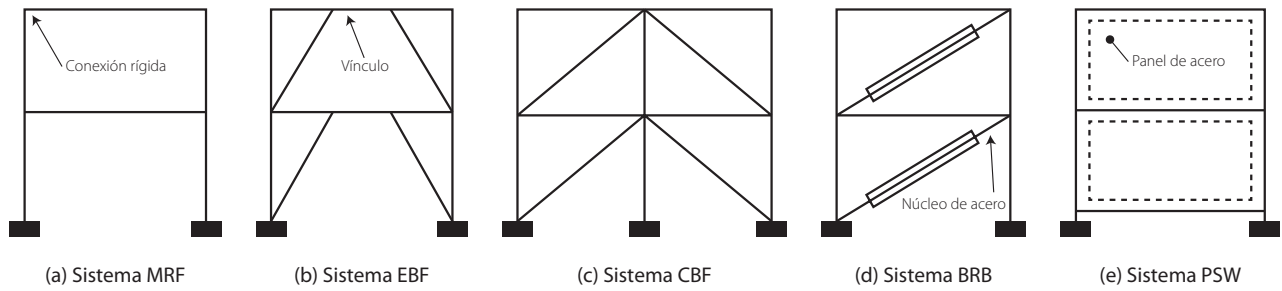


Figura 1. Sistemas tradicionales con acero

grandes y permanentes derivas debido a la baja rigidez postfluencia de los arriostramientos.

2.1.5 Paredes de Plancha de Corte (Plate Shear Walls - PSW). Estos sistemas consisten en paneles de acero rodeados de vigas y columnas como se muestra en la Figura 1e. La resistencia lateral se desarrolla mediante la generación de un campo de tracciones en el panel de acero después de una etapa inicial de pandeo por corte (Dastfan & Driver 2009). El mecanismo inelástico deseable está asociado a la fluencia en los paneles y al desarrollo de rótulas en las vigas de riostras de la base de las columnas (Berman & Bruneau 2003).

2.2. Sistemas con miembros y conexiones mejoradas

Esta categoría comprende sistemas tradicionales donde los miembros o las conexiones han sido modificados para mejorar su desempeño. El mecanismo de

disipación de la energía está basado principalmente en que los componentes que entran en fluencia (*yielding*) pueden ser fácilmente reemplazados si ocurre algún daño.

2.2.1. Vigas con Secciones Reducidas (Reduced Beam Sections - RBS). Los sistemas RBS consisten en marcos en los cuales las vigas tienen alas recortadas en tramos cortos y alejados de las columnas como se muestra en la Figura 2a. La resistencia lateral se desarrolla en forma similar a la de los marcos resistentes a momento. Sin embargo, se espera un comportamiento superior inelástico (Chen et al 1996). El mecanismo inelástico está basado en forzar la formación de rótulas plásticas en las secciones debilitadas de las vigas. Como resultado, se esperan importantes rotaciones inelásticas.

2.2.2. Marcos Arriostrados Excéntricamente con Vínculos Reemplazables (EBF with Replaceable Links - EBFRL). Este sistema consiste en marcos

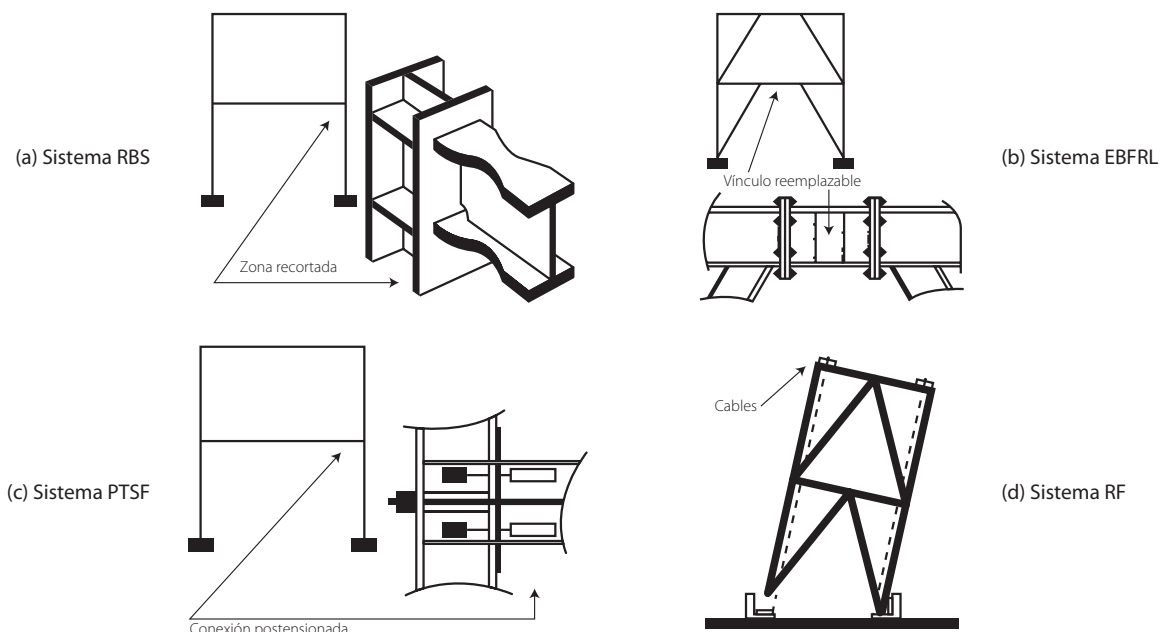


Figura 2. Sistemas en acero con uniones o elementos mejorados

arriostrados excéntricamente (EBF) equipados en la viga vínculo con conexiones dúctiles y reemplazables colocados como se muestra en la **Figura 2b**. Sin embargo, su resistencia lateral se desarrolla en forma similar a los marcos arriostrados excéntricamente (Mansour et al 2006). El mecanismo inelástico está basado en vínculos que entran en fluencia debido a fuerzas importantes de corte. Como consecuencia se esperan importantes deformaciones inelásticas al corte y derivas inelásticas.

2.2.3. Marcos de Acero Postensionados (Post-Tensioned Steel Frames - PTSF). Estos sistemas consisten en marcos resistentes a momentos (MRF) con columnas y vigas colocadas en contacto mediante cables postensionados de alta resistencia. Se incorporan barras adicionales en las conexiones vigas-columnas con propósito de disipación de energía como muestra la **Figura 2c**. Sus resistencias laterales se desarrollan mediante fuerzas de corte y de momento en los miembros y las conexiones. El mecanismo inelástico se basa en la fluencia axial de las barras pasantes a través de las aberturas en la interfaz columnas-vigas (Christopoulos et al 2002). Se esperan grandes deformaciones axiales sin derivas residuales.

2.2.4. Marcos Basculantes (Rocking Frames - RF). Estos sistemas consisten en marcos arriostrados concéntricamente (CBF) con cables postensionados alineados con las columnas y discontinuos en las bases de las mismas que permiten que las columnas se levanten de las fundaciones como se muestra en la **Figura 2d**. Su resistencia lateral está basado en la activación de un modo basculante que contrabalancea a las fuerzas sísmicas debido a la

inercia rotacional del sistema (Sause et al 2006). El mecanismo inelástico está basado en mantener elásticos los miembros y hacer ceder los cables postensionados. No se espera daño estructural o deriva residual.

2.3. Sistemas de Bajo Daño

Esta categoría comprende sistemas tradicionales equipados con equipos especiales que proveen al sistema de amortiguamiento suplementario. Los mecanismos de disipación de energía se basan en la activación de estos equipos a una dada intensidad de fuerza definida de tal forma que los miembros estructurales principales permanezcan elásticos y sólo se produzca un daño mínimo tanto en el sistema estructural como en estos equipos.

2.3.1. Disipadores de Extrusión con Plomo (Lead Extrusion Dissipaters HF2V). Estos sistemas están basados en marcos resistentes a momentos (MRF) equipados con un disipador de extrusión con plomo (HF2V) debajo de las alas inferiores de la viga. Se debe proveer una brecha en la interfaz viga-columna y ángulos para unir las vigas a las columnas como se muestra en la **Figura 3a**. La resistencia lateral se desarrolla a través de las fuerzas de momentos y cortantes en las conexiones y en los miembros del marco. El mecanismo inelástico está basado en la activación del proceso de extrusión del plomo en el equipo HF2V a medida que la junta se abre y cierra (Mander 2009), proveyendo de esa manera disipación de energía y evitando la fluencia de cualquier miembro del marco. De esa forma se pueden alcanzar grandes derivas sin daño estructural.

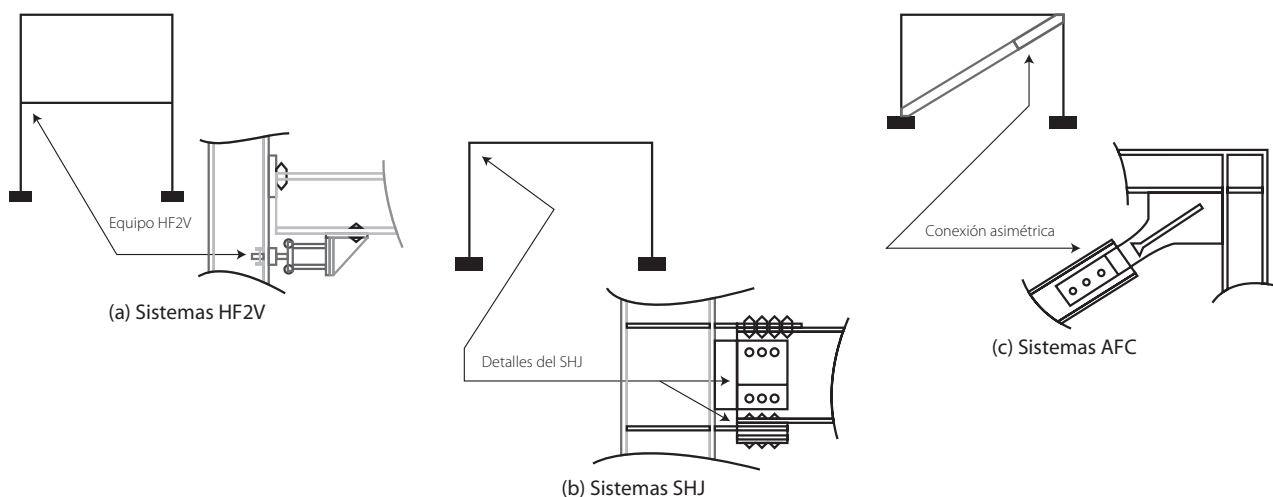


Figura 3. Sistemas de acero libres de daño

2.3.2. Sistema de Rótula Deslizante (Sliding Hinge Joint Systems - SHJ). Este sistema se basa en marcos resistentes a momentos (MRF) con conexiones de fricción asimétricas colocadas en el alma y debajo de las alas inferiores de las vigas. Éstas son separadas de las columnas mediante una brecha y unidas a las alas de la viga como se muestra en la [Figura 3b](#). La resistencia lateral se desarrolla a través de las fuerzas de momentos y cortantes en las conexiones y en los miembros del marco. El mecanismo inelástico está basado en la activación de un mecanismo de fricción a medida que se produce la rotación de la viga-columna (MacRae 2008). Esto disipa energía y mantiene los miembros del marco dentro del rango elástico. Sólo se esperan daños menores en los pernos de la conexión asimétrica.

2.3.3. Conexiones de Fricción Asimétricas (Asymmetrical Friction Connections - AFC). Estos sistemas son basadas en los marcos convencionales arriostrados con conexiones de fricción asimétricas colocados entre los arriostramientos o debajo del ala inferior de la viga como se indica en la [Figura 3c](#). La resistencia lateral se desarrolla por la configuración de los arriostramientos del sistema. El mecanismo inelástico se basa en la activación de un mecanismo de fricción a medida que el marco se deforma lateralmente (MacRae & Clifton 2010). Mediante el deslizamiento a fricción los miembros de los marcos se mantienen en el rango elástico y protegidos de los estados límites de fluencia o pandeo. Pueden alcanzarse grandes derivas pero sólo con daños menores en los pernos de la conexión asimétrica.

3. INDICADORES DE DAÑO

La sustentabilidad sísmica de los sistemas de marcos estructurales de acero fue desarrollado por Chanchi y otros (2010). Cuatro parámetros influyen el nivel esperado de daño. Estos parámetros son denominados Indicadores de daño y pueden ser usados para evaluar subjetivamente la probabilidad de daño en el sistema estructural como se describe a continuación.

3.1. Factibilidad de Reemplazo de Elementos (Element Replaceability - ER)

Los sistemas convencionales de marcos estructurales de acero disipan energía en ubicaciones específicas o en varios miembros de la estructura. Aunque el sistema estructural disipe la energía en forma satisfactoria, el daño estructural resultante puede ser difícil de reparar e insumir mucho tiempo y altos costos. (Mander y otros 2009). Ciertos elementos disipadores de energía por fluencia, fricción u otros mecanismos, permiten el reemplazo del componente. Se definió un *Indicador de la Factibilidad de Reemplazo de los Elementos* (ER). Se definió una escala de 1 a 3 para esta indicador, donde 0 corresponden a sistemas con alta factibilidad de poder reemplazar los elementos dañados sin mayores efectos de trastornos desde el punto de vista de los costos o el tiempo y 3 corresponden a la baja factibilidad o imposibilidad de reemplazo sin incurrir en altos costos o interrupción prolongada del uso.

3.2. Daño en las Losas de los Pisos (Floor Damage - FR)

Durante las excitaciones sísmicas, los sistemas de losas de los pisos de un sistema convencional de marcos de acero pueden exhibir daño importante en las zonas de articulación de las vigas dado las incompatibilidades de las deformaciones entre las losas y las vigas de los marcos. (Sasikumar & Mitra 2009). Adicionalmente las acciones inelásticas generan mayores deformaciones en las zonas de las rótulas de las vigas, causando su propagación en las vigas. Como resultado se presentan importantes tensiones de tracción en las losas causando daño local severo (Umarami & MacRae 2007). Este fenómeno de propagación en las vigas no sólo aparece en las estructuras convencionales de marcos sino también en sistemas con miembros o conexiones mejoradas, que también son susceptibles de producir daño severo a la losa (Umarami & MacRae 2007). Por esa razón son muy beneficiosos aquellos sistemas libres de daño en los que se minimizan las incompatibilidades sísmicas entre las losas de los pisos y la estructura principal. Para evaluar subjetivamente la probabilidad de algún daño en las losas se define un *Indicador de Daño de las Losas* (FD). Este indicador toma el valor de 0 a 2, en donde 0 corresponde a un sistema estructural con ninguna posibilidad de daño en la losa, especialmente aquellas soluciones libres de daño, y 2 a los sistemas estructurales con alta probabilidad de daño en las losas, especialmente aquellos en que aparecen los

efectos propagación de deformaciones en las zonas de rótulas de las vigas.

3.3. Daño por Deriva (Drift Damage - DD)

Los mecanismos de disipación de energía de los sistemas convencionales de marcos de acero están basados en la capacidad de desplazamiento horizontal debido a acciones dúctiles inelásticas localizadas (Christopolous et al 2008). Como resultado, estos sistemas estructurales presentan altos niveles de deriva de entrepisos durante los terremotos importantes. Esto genera un alto daño estructural y no estructural. En contraste, los sistemas estructurales modernos que involucran componentes suplementarios de amortiguación (que usan fricción, fluencia metálica o visco-elasticidad) se caracterizan por la disipación de energía por parte de esos equipos, manteniendo al sistema estructural en el intervalo elástico de comportamiento (Pekcan et al 1995). Consecuentemente se reduce la deriva de entrepisos y el nivel de daño. Para evaluar subjetivamente el nivel de daño generado en los sistemas estructurales debido a la deriva de entrepisos, se define un Indicador de deriva de entrepiso (DD). Se fija una escala de 0 a 3, en donde 0 corresponde a sistemas caracterizados por baja demanda de deriva tales como los equipados con cualquier amortiguador y a 3 para sistemas en que las respuesta dúctil inelástica implica altas demandas por derivas como los exhibidos por los sistemas convencionales.

3.4. Desplazamiento Permanente (Permanent Displacement - PD)

Después de un terremoto mayor los sistemas estructurales pueden quedar con desplazamientos

permanentes, que pueden tornar al sistema inutilizable, inseguro o difícil de reparar (MacRae & Kawashina 1997). La magnitud de estos desplazamientos permanentes depende de factores tales como la intensidad del movimiento del suelo, las características estructurales y de la forma del ciclo de histéresis del sistema (MacRae & Kawashina 1997). Para evaluar subjetivamente el nivel de daño asociado con los desplazamientos estructurales permanentes, se define un *Indicador de Desplazamiento Permanente* (PD) en función de los tres lazos de histéresis presentados en la [Figura 4](#).

Los ciclos elasto-plásticos representan sistemas en donde la energía es disipada a través de la fluencia de los miembros de la estructura y para los cuales se esperan grandes desplazamientos permanentes. Los ciclos bilineales representan sistemas convencionales o mejorados con ciclos de histéresis con rigidez postelástica y sin mayores desplazamientos permanentes.

Los ciclos en forma de bandera representan sistemas con conexiones mejoradas o equipadas con amortiguadores caracterizados por propiedades autocentrantes y desplazamientos mínimos permanentes. Para este indicador se fija una escala de 0 a 2, en donde 0 corresponde a sistemas con ciclos de histéresis en forma de bandera y 2 a sistemas con ciclos elasto-plástico o sea con grandes desplazamientos permanentes.

4. CUANTIFICACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD

La *Sustentabilidad Sísmica* de un sistema estructural está asociada a un nivel esperado de daños que el sistema sufrirá en un terremoto mayor. Se puede tener un valor de esa Sustentabilidad evaluando

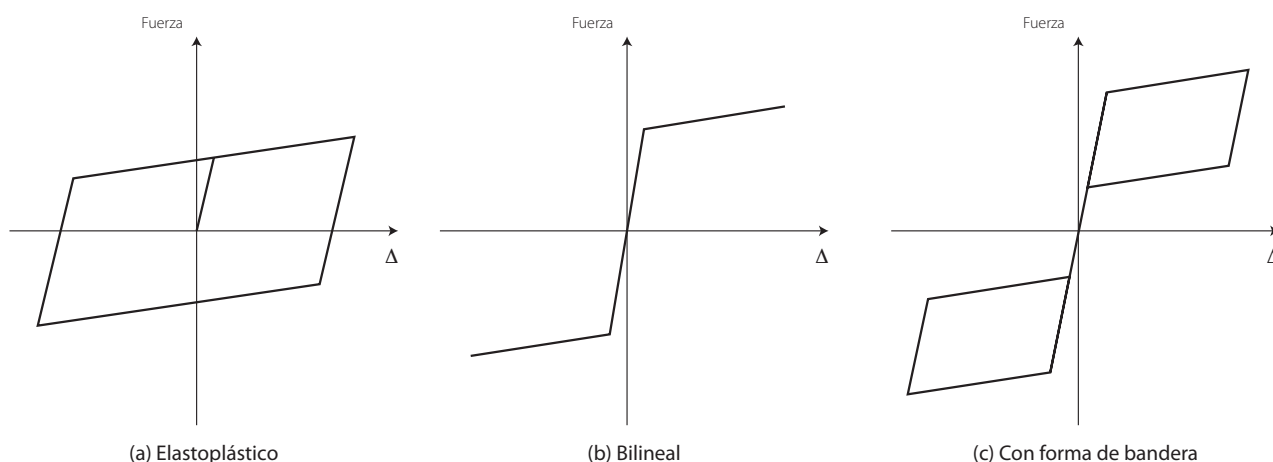


Figura 4. Ciclos idealizados de histéresis

subjetivamente la probabilidad de daño en cada uno de los cuatro indicadores de daño descriptos de acuerdo a su respectivo rango. La suma de los cuatro indicadores es una representación numérica del daño total esperado en el sistema estructural. Considerando que cada uno de los indicadores tiene influencia similar en el daño total y suponiendo una relación lineal entre el daño y ese índice de sustentabilidad tendremos la fórmula que determinará la *Sustentabilidad Sísmica*:

$$\text{Sustentabilidad} = 9 - \sum (\text{indicadores daño}) \quad (1)$$

Para ilustrar la aplicación de la *Fórmula (1)*, se evalúa la sustentabilidad de una estructura de *Marcos Resistentes a Momento (MRF)* en la *Tabla 1*. Puede verse que con excepción del daño en las losas todos los indicadores tienen valor máximo, resultando

en un nivel esperado de gran daño y bajo valor en la sustentabilidad. Esta evaluación puede ser explicada teniendo en cuenta que el sistema tiene un comportamiento dúctil basado en la fluencia de las vigas en sus extremos, grandes desplazamientos laterales, grandes derivas inelásticas y daño severo en la estructura y en los componentes no estructurales. Por esa razón ese sistema no debe ser considerado como una alternativa económica para zonas sísmicamente activas.

5. TABLA RESUMEN DE LA SUSTENTABILIDAD

Se calculó la sustentabilidad sísmica de los diferentes sistemas estructurales de acero siguiendo la metodología explicada. Toda la evaluación se volcó en la *Tabla 2*.

Tabla 1. Evaluación de sustentabilidad sísmica de los MRF

Indicador de daño		Escala	Daño
Factibilidad de reemplazo de elementos	[ER]	(0 a 2)	2
Daño en las losas de pisos	[FD]	(0 a 2)	1
Daño por deriva	[DD]	(0 a 3)	3
Desplazamiento permanente	[PD]	(0 a 3)	2
		Daño total	8
		Sustentabilidad	1

Tabla 2. Evaluación de la sustentabilidad sísmica

Categoría	Subcategoría	ER	FD	DD	PD	Daño	Sustentabilidad
		(0 a 2)	(0 a 2)	(0 a 3)	(0 a 2)	(0 a 9)	(0 a 9)
Sistemas tradicionales	Marcos Resistentes a Momento - MRF	2	1	3	2	8	1
	Marcos arriostrados excentricamente - EBF	2	1	2	2	7	1
	Marcos arriostrados concéntricamente - CBF	2	0	2	2	6	3
	Marcos Restringidos al Pandeo - BRB	0	0	3	2	5	4
	Paredes de planchas de corte - PSW	1	1	2	1	5	4
Sistemas con miembros o conexiones mejoradas	Vigas con secciones reducidas - RBS	2	1	3	2	8	1
	Marcos arriostrados excéntricamente con vínculos reemplazables - EBFRL	0	1	2	1	4	5
	Marcos de Acero Postensionados - PTSF	1	1	2	0	4	5
	Marcos Basculantes - RF	1	1	2	0	4	5
Sistemas libres de daño	Disipadores de Extrusión con Plomo - HF2V	0	0	0	1	1	8
	Sistema de Rótula Deslizante - SHJ	0	0	1	1	2	7
	Conexiones a fricción asimétricas - AFC	0	0	1	1	2	7

Tabla 3. Clasificación por sustentabilidad sísmica de los sistemas estructurales de acero

Sistema estructural	Disipadores de extrusión con plomo Sistema de rótula deslizante Conexiones de fricción asimétricas	Marcos restringidos al pandeo Paredes de planchas de corte Marcos arriostrados excéntricamente con vínculo reemplazable Marcos de acero postensionados Marcos basculantes	Marcos resistentes a momento Marcos arriostrados excéntricamente Marcos arriostrados concéntricamente Vigas con secciones reducidas
Indicador principal de daño	DD, FD	FD, DD	ER, FD, DD, PD
Sustentabilidad	Alto (6 a 9)	Medio (4 a 5)	Bajo (0 a 3)

En ella recordemos que ER, FD, DD y PD representan los indicadores de daño: Factibilidad de reemplazo de los elementos, Daño en las losas de los pisos, Daño por deriva y Desplazamiento permanente. Usando esos resultados de la [Tabla 2](#) se clasificaron los distintos sistemas estructurales en la [Tabla 3](#).

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Considerando los resultados presentados en la [Tabla 2](#), es posible reagrupar los sistemas estructurales evaluados en tres categorías principales. La primera categoría corresponde a sistemas con alta sustentabilidad con valores entre 6 y 9. Estos sistemas estructurales se caracterizan por propiedades de autocentrado, alta posibilidad de reemplazo de elementos, daño menor en las losas de los pisos y cuyo nivel de daño está influido principalmente por los indicadores de deriva y de desplazamiento permanente.

La segunda categoría comprende sistemas estructurales con sustentabilidad sísmica con valores entre 4 y 5, siendo considerado como semisustentables. El nivel esperado de daño es influenciado principalmente por indicadores tales como la deriva y el daño en las losas de los pisos. Su mecanismo de disipación de energía está basado en la generación de daño en elementos localizados que pueden ser reemplazados sin incurrir en altos costos.

La categoría final comprende los sistemas estructurales menos estables con valores entre 0 y 3. Los sistemas estructurales en esta categoría son caracterizados por la disipación de energía dúctil en elementos difícil de reemplazar. Esto genera procesos de reparación o reemplazo muy costosos y que interrumpen el servicio del edificio. El nivel esperado de daño está influenciado por los altos puntajes de los indicadores de daño.

La [Tabla 3](#) incluye un resumen de las tres categorías mencionadas.

7. DIRECCIÓN DE LAS FUTURAS INVESTIGACIONES

Las futuras investigaciones y desarrollos pueden ser realizadas en dos direcciones principales. Primeramente, en el desarrollo de una metodología más objetiva y refinada de evaluación de la sustentabilidad sísmica. La Universidad de Canterbury (NZ) ha desarrollado métodos de este tipo, considerando el costo inicial. En segundo término, se requieren mejores técnicas para incrementar la sustentabilidad sísmica.

8. CONCLUSIONES

Este artículo presenta una metodología simple para determinar la sustentabilidad sísmica de los sistemas estructurales de acero. Se concluye que:

- i. Los sistemas estructurales de acero pueden ser clasificados en tres categorías:
 - a. Sistemas tradicionales
 - b. Sistemas con miembros o conexiones mejoradas
 - c. Sistemas de bajo daño.

La clasificación se basa en los mecanismos de disipación de energía y en el nivel de daño que los sistemas estructurales pueden presentar después de un terremoto mayor.

- ii. Los indicadores utilizados de daño son: Factibilidad de Reemplazo de Elementos, Daño de Losas de Pisos, Daño por Deriva y Desplazamiento Permanente
- iii. Se propone una metodología cualitativa para determinar la sustentabilidad sísmica de cualquier sistema estructural de marcos de acero. La metodología se basa en una evaluación subjetiva

del daño esperado en cada uno de los indicadores usando una escala numérica de 0 a 3. Para mayor simplicidad, se considera una relación lineal entre Sustentabilidad y el Nivel esperado de daño.

- iv. Los sistemas estructurales de marcos de acero pueden ser clasificados de acuerdo con sus valores de sustentabilidad sísmica en tres categorías: altamente sustentables, semisustentables, y menos sustentables
- v. Debe desarrollarse más investigación para determinar la sustentabilidad sísmica. Asimismo deben desarrollarse sistemas estructurales con alta sustentabilidad sísmica.

9. REFERENCIAS

- American Society of Civil Engineers (2004). Sustainable Engineering Practices: An Introduction. *ASCE - Committee on Sustainability*. Reston, Virginia, United States of America.
- Berman, J. and Bruneau, M. (2003). Plástic Analysis and Design of the Steel Plate Shear Walls. *Journal of Structural Engineering*, 129(11), 1448-1456.
- Bruneau, M., Uang, C.M., and Whittaker, A. (1998). Ductile Design of Steel Structures. *McGraw-Hill*, New York, United States of America.
- Chanchi, J., MacRae, G.A., Chase, J.G., and Clifton, C.G. (2010). Quantifying Seismic Sustainability of Steel Framed Structures. *Steel Structures Workshop - Research Directions and Priorities for Steel Structures*. Christchurch, New Zealand, April 13-14.
- Chen, S.J., Chu, J.M., and Chou, Z.X. (1997). Dynamic Behaviour of Steel Frames with Beam Flanges Shaven around Connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 42(1), 49-70.
- Chen, W.F., and Scawthorn, C. (2003). Earthquake Engineering Handbook. *CRC Press*. Boca Raton, Florida, United States of America.
- Christopoulos, C., Filiatraut, A., Uang, C.M., and Folz, B. (2002). Posttensioned Energy Dissipating Connections for Moment - Resisting Steel Frames. *Journal of Structural Engineering*, 128(9), 1111-1920.
- Christopoulos, C., Trembiay, R., Kim, H.J., and Lacerte. (2008). Self-Centering Energy Dissipative Bracing System for the Seismic Resistance of Structures: Development and Validation. *Journal of Structural Engineering*, 134(1), 96-107.
- Dastfan, M., and Driver, R.G. (2009). Investigation on the Effect of Frame Member Connection Rigidity on the behaviour of Steel Plate Shear Walls Systems. *Behaviour of steel structures in Seismic Areas, STESSA 2009*, Philadelphia, Pennsylvania, United States of America.
- Feeney, M.J., and Clifton, G.C. (1995). Seismic Design Procedures for Steel Structures. *HERA Report R4-76*. First edition. New Zealand.
- Hays, B., and Cocke, D. (2009). Missed Opportunities in Structural Sustainability. *Structure Magazine*, April 2009.
- Iwata, M., Kato, T., and Wada, A. (2000). Buckling-restrained braces as Hysteretic Dampers. *Behaviour of steel structures in Seismic Areas, STESSA 2000*, Balkelma, Rotterdam.
- MacRae, G.A., and Kawashima, K. (1997). Post-Earthquake Residual Displacement of Bilinear Oscillators. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26(7), 701-716.
- MacRae, G.A. (2008). A New Look at Some Earthquake Engineering Concepts. M. J. Nigel Priestley Symposium *Proceedings*, IUSS Press, 2008.
- MacRae, G.A., and Clifton, G.C. (2010). New Technology Applications, Recent Developments and Research Directions for Seismic Steel Structures in New Zealand. *Submitted to ACEE Journal*.
- Mander, T.J., Rodgers, G.W., Chase, J.G., Mander, J.B., MacRae, G.A., and Dhakal, R. (2009). A Damage Avoidance Design Steel Beam-Column Moment Connection Using High-Force-To-Volume Dissipators. *Journal of Structural Engineering*, 135(11), 1390-1397.
- Mansour, N., Christopoulos, C., and Trembiay, R. (2006). Seismic Design of EBF Steel Frames using Replaceable Nonlinear Links. *Behaviour of steel structures in Seismic Areas, STESSA 2006*, Yokohama, Japan.
- Pekcan, G., Mander, J.B., Eeti, M., and Chen, S.S. (1995). The Seismic Response of a 1:3 Scale Model R.C. Structure with Elastomeric Spring Dampers. *Earthquake Spectra*, 11(2), 249-267.
- Sasikumar, R., and Mitra, D.C. (2009). Linear and Nonlinear Dynamic Response of Chevron Type EBF. *10th National Conference on Technological Trends (NCTT09)*, 6-7 November 2009.
- Sauce, R., Rieles, J.M., Roke, D., Seo, C.Y., and Lee, K.S. (2006). Design of Self Centering Steel Concentrically Braced Frames. *4th International Conference on Earthquake Engineering*, Taipei, Taiwan, October 12-13.
- Umarani, C., and MacRae, G.A. (2007). A New Concept for Consideration of Slab Effects on Building Seismic Performance. *Journal of Structural Engineering*, (34), 1, 25-32.