

## ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL ANÁLISIS POR DESEMPEÑO DE EDIFICACIONES MULTIFAMILIARES APORTICADAS DE BAJA ALTURA DE ACERO ESTRUCTURAL CON CRECIMIENTO PROGRESIVO

**Sigfrido Loges**

Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC), FAU.UCV.  
sigfrido.loges@ucv.ve

### RESUMEN

Cuando las edificaciones multifamiliares aporticadas de baja altura de acero estructural son concebidas para permitir la construcción progresiva, la progresividad debe seguir unos lineamientos previamente establecidos al nivel de proyecto, especialmente en lo referente a la ingeniería estructural de su construcción, la cual deberá considerar en todo momento la adición o sustitución de miembros estructurales, con el impacto que esto generará en el comportamiento de la nueva edificación. Sin embargo, es muy importante destacar que la edificación en su primera etapa de construcción distará mucho, en términos de comportamiento estructural, al de la(s) definitiva(s) correspondiente(s) a cada etapa de crecimiento, por lo cual resultará imperativo evaluar dichas estructuras, haciendo un análisis por desempeño para verificar si la adición de los nuevos miembros y componentes no generará condiciones desfavorables ante acciones sísmicas. Resultará entonces muy importante el conocimiento y correcto proceder de la metodología y aspectos asociados a los análisis estructurales por desempeño, basados en análisis estáticos no lineales (*pushover*, por sus siglas en inglés), lo cual permitirá comprender, entre otras cosas, la localización de las zonas en donde debe ocurrir la disipación de energía inelástica (rótulas plásticas) y si las mismas siguen un patrón de ocurrencia adecuado, tomando en cuenta que lo aleatorio no debe formar parte del análisis, sino que depende de una secuencia lógica de eventos. En este trabajo se pretende indicar únicamente algunos de los aspectos vinculantes que se deben tomar en cuenta en viviendas multifamiliares de desarrollo progresivo, basados en los lineamientos indicados en los procedimientos de análisis estático no lineales actuales.

**Palabras clave:** análisis por desempeño, progresividad, edificaciones multifamiliares, acero estructural, *pushover*

## 1. INTRODUCCIÓN

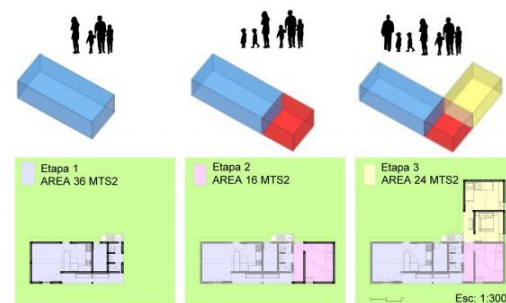
Según Cilento A. (1999):

La vivienda progresiva es una solución al problema habitacional que parte de la base de proporcionar a cada familia los requerimientos básicos esenciales y adecuados de alojamiento, concebido de tal manera que el usuario pueda, por sus propios medios y recursos (autoconstrucción, autogestión, ayuda mutua, contratación), ampliar la unidad inicial progresivamente...hasta alcanzar una vivienda estructural, salubre, confortable y estética según sus requerimientos y posibilidades. Se trata por tanto de proporcionar al beneficiario lo indispensable y asequible, según sus necesidades y recursos, para estimular la realización progresiva y la conclusión definitiva de su vivienda.

De acuerdo con Gelabert y González (2013):

La vivienda debería favorecer la adaptabilidad de sus espacios y funciones en el tiempo en correspondencia con la evolución dinámica natural de la familia, por disímiles factores: variabilidad en el número de sus miembros, composición variable del núcleo familiar, desarrollo tecnológico en ascenso, posición económica y social de la familia, entre las más comunes. Esto permitiría evitar la obsolescencia de las soluciones, garantizando su validez en el tiempo y la calidad de vida de sus moradores.

Lo anterior denota que el crecimiento progresivo de una edificación es algo flexible en gran medida, ya que de acuerdo con los requerimientos específicos de cada familia, existirán varias posibilidades: crecimiento en planta, en elevación, etc. Sin embargo, este desarrollo no debe ser una actividad improvisada, ya que depende su éxito en gran parte del acierto de las posibilidades que se hayan establecido antes de la construcción de la edificación. En la figura 1 se observa que la edificación tendrá un crecimiento progresivo principalmente en planta, lo cual se logra, en general, adicionando miembros estructurales (vigas, columnas, etc.) y componentes no estructurales (paredes, ventanas, puertas, etc.). Así, se han sumado metros cuadrados de uso a la edificación original. El crecimiento de la vivienda está condicionado, por tanto y como se comentó anteriormente, al crecimiento y a las necesidades particulares de cada familia.



**Figura 1:** Crecimiento de las familias y de las viviendas.

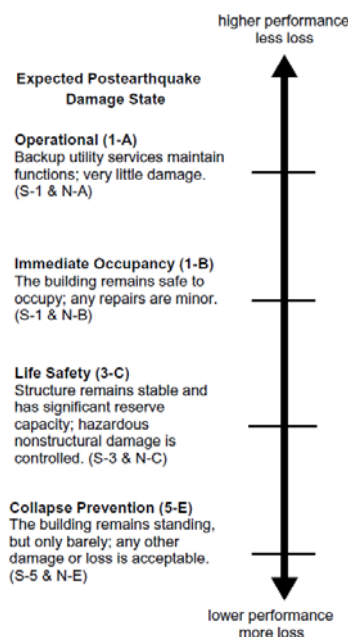
(<http://www.a57.org/articulos/entrevista/nuestra-propuesta-se-plantea-como-un-sistema-modificable-y-ajustable-entrevista>)

Esto implica en forma evidente que paulatinamente y durante el crecimiento de la vivienda será necesaria la realización de modificaciones a su estructura, lógicas y pertinentes, que impliquen que la nueva vivienda (pudiendo ser aun parcial con posibilidades de continuar creciendo o definitiva) deberá seguirse caracterizando por tener, entre otros aspectos, adecuado comportamiento ante acciones gravitacionales y eventuales, como es el caso de un sismo. Es decir, que deberá seguir teniendo un adecuado comportamiento en régimen inelástico, que garantice, por ejemplo, mediante las deformaciones de sus miembros

estructurales, la adecuada disipación de energía inelástica. Esto incluye necesariamente la consideración del *daño estructural* en el análisis. Las deformaciones serán permanentes en lugares específicos de la edificación y será necesario el reemplazo de ciertos elementos o miembros estructurales para que la edificación siga cumpliendo a futuro con su función de manera segura para los ocupantes, y con suficiente resistencia para soportar sismos próximos con adecuada capacidad, aun de disipar energía por deformaciones inelásticas. Las viviendas, en todas sus etapas de construcción, deberán ser analizadas desde este punto de vista, lo cual implica, por supuesto, el análisis de cada posibilidad de crecimiento progresivo, como proyectos de edificaciones singulares, ya que al adicionar miembros estructurales y componentes no estructurales la edificación resultante es y se comportará de manera distinta a su(s) predecesora(s), tanto desde un punto de vista arquitectónico como estructural.

## 2. EL DISEÑO POR DESEMPEÑO DE EDIFICACIONES

Según Aguiar (2003) en relación con la meta fundamental del diseño por desempeño, indica que el objetivo primordial es conocer cuál será el desempeño o comportamiento que se espera tendrá una edificación ante un determinado evento sísmico, lo cual es lógicamente función del uso que tendrá la edificación. Con base en esto, son varias las propuestas indicadas en las normas de diseño sismorresistente, pero todas ellas convergen en que se deben alcanzar ciertos niveles de desempeño de las edificaciones construidas en zonas sísmicas, sin que lo empírico sea una variable a considerar, siendo el costo y la seguridad de sus ocupantes aspectos fundamentales (Espinoza, 2011). En la figura 2 se muestran los principales objetivos para los niveles y rangos de desempeño de una edificación cualquiera, construida en zonas sísmicas. Es evidente que mientras mejor es el desempeño sísmico de una edificación, menos costosas serán las pérdidas, y viceversa. Se busca en todo momento que la edificación alcance su mayor nivel de desempeño, y se espera que en relación con el daño estructural, en lapsos de tiempo relativamente cortos luego de un sismo, los ocupantes puedan volver a la edificación, y esta siga manteniendo un elevado nivel de seguridad luego de efectuadas las reparaciones a que hubiera lugar.



**Figura 2:** Objetivos para los niveles y rangos de desempeño en un edificio. [(ASCE 41-13 (2014)).

### 3. LA TÉCNICA DEL *PUSHOVER*

El análisis por desempeño sísmico de edificaciones emplea la técnica del *pushover* (empujón, según su traducción del inglés) o análisis estático no lineal, para analizar la sucesión en la ocurrencia de daño en la edificación, mediante la formación de mecanismos dúctiles (disipación de energía inelástica por deformación) por sobre los mecanismos frágiles (fallas por corte, etc.). La técnica del *pushover* (figura 3) consiste, de manera general, en aplicar una carga lateral monotónica creciente, la cual simula la acción sísmica y que genera un corte en la base ( $V$ ), a una edificación, de acuerdo con valores previamente establecidos del desplazamiento lateral de la misma ( $\Delta_{\text{roof}}$ ) en el último nivel de la edificación (techo), valores que se espera pueda esta alcanzar durante un evento sísmico en su vida útil, e ir verificando y constatando que la disipación de energía inelástica, la cual se logra en general por la formación de rótulas plásticas, ocurre en locaciones convenientes de los miembros estructurales (extremos de las vigas, a una cierta distancia de la cara de las columnas, por ejemplo, en edificaciones aporticadas). Todo esto bajo el estudio o análisis de la jerarquización en el orden o secuencia de ocurrencia de dichas rótulas plástica, a medida que se aumentan los valores del desplazamiento lateral. Estas rótulas plásticas deberán irse generando de acuerdo con un orden previamente establecido y no de manera aleatoria, lo cual pudiera llevar a comportamientos erráticos y difíciles de predecir de la edificación, ante cargas laterales. De acuerdo con la figura 4, se observa la localización de las rótulas plásticas para un comportamiento sísmico considerado como “ideal”, en lo referente a la disipación de energía inelástica en edificaciones aporticadas. Como se aprecia, las rótulas plásticas están ubicadas en los extremos de las vigas y en la base de las columnas inferiores.

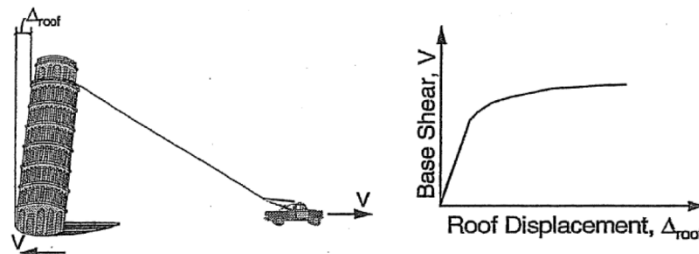


Figura 3: Basamento de la técnica del *pushover*. [ATC-40 (1996)]

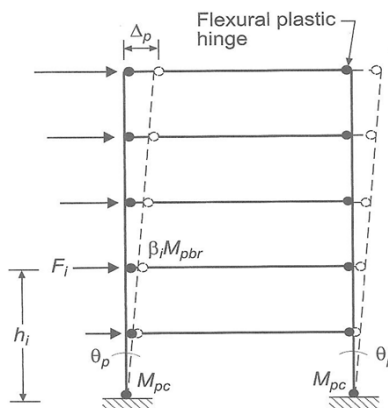
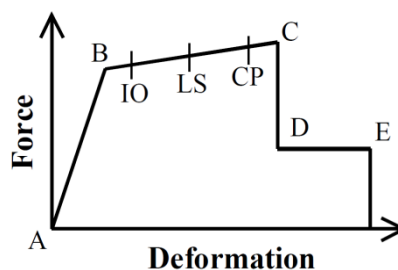


Figura 4: Localización de rótulas plásticas en comportamientos sismorresistentes ideales de edificios aporticados. (Goel y Chao, 2008).

Pese a que se considera este tipo de mecanismo de disipación de energía inelástica como ideal o *deseable*, es importante destacar que se puede presentar otro tipo de comportamientos, en los cuales la formación de rótulas plásticas pueda darse también en extremos de algunas columnas superiores, sin que ello implique necesariamente que la edificación esté en peligro de colapso. Estos comportamientos, siempre y cuando hayan sido adecuadamente analizados, implican miembros estructurales que tendrán capacidad suficiente para resistir solicitaciones adicionales provenientes de los miembros en donde se han formado articulaciones plásticas (redistribución de momentos en el comportamiento plástico).

Lo anterior resume lo que persigue el *pushover* como técnica para realizar análisis por desempeño de edificaciones: determinar la localización de las rótulas plásticas y analizar el progresivo incremento del nivel de daño; es decir, según D'Amico y Levy (2000), con cada formación de una rótula plástica se realiza un nuevo análisis incrementando la carga lateral, apareciendo por lo tanto nuevas articulaciones plásticas, y así sucesivamente, hasta que el sistema pase a ser un mecanismo (inestable). Como se miden desplazamientos *versus* fuerzas laterales aplicadas, se obtiene una curva que relaciona ambas variables. La relación que existe entre el desplazamiento lateral último ( $\Delta_u$ ) y el desplazamiento lateral en donde comienza la cedencia ( $\Delta_y$ ), indicará la ductilidad global de la estructura ( $\mu$ ). Por lo tanto,  $\mu = \Delta_u/\Delta_y$ . Resulta obvio que a mayores desplazamientos laterales últimos ( $\Delta_u$ ), mayor será la ductilidad alcanzada por el sistema, pero también a costa de un nivel de daño mayor al haber mayores deformaciones de los miembros estructurales. En análisis más rigurosos pudiera estudiarse la posibilidad de llevar a cabo un balance energético, ya que al daño de los miembros estructurales se asocia una energía disipada inelásticamente ( $E_y$ ), y a mayor daño, por lo tanto, corresponderá un mayor valor de  $E_y$ . La incorporación de amortiguamiento al sistema pudiera permitir reducir el daño en los miembros estructurales al reducirse la energía que será disipada inelásticamente, ya que se estaría aumentando la energía por amortiguamiento ( $E_a$ ), por ejemplo.

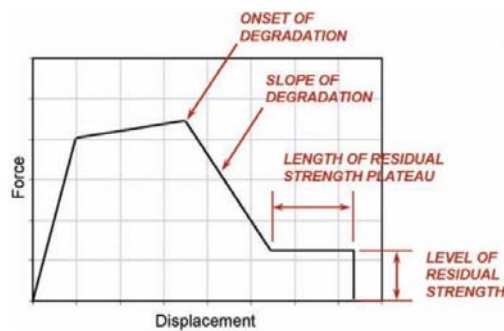
En general, es posible relacionar distintos niveles de desempeño para un componente estructural, el cual presenta rótulas plásticas, como se indicó anteriormente, mediante gráficos fuerza-desplazamiento lateral (figura 5). Cada uno de estos niveles de desempeño está relacionado con un índice de daño cada vez mayor a medida que crecen los desplazamientos laterales. Esto puede continuar hasta que el sistema se convierte en un mecanismo; la caída de los valores de fuerza en el gráfico así lo indican.



**Figura 5:** Gráfico fuerza vs. deformación de algún componente estructural. (Habibullah y Pyle, 1998).

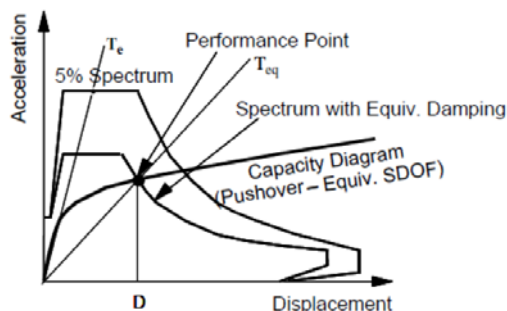
Se observa cómo desde el punto A hasta el B, rango esencialmente de comportamiento elástico del miembro estructural, las deformaciones son proporcionales a la fuerza aplicada. En B comienza la cedencia y, por lo tanto, el rango inelástico y el daño estructural. El punto IO (ocupación inmediata), LS (seguridad de vida) y CP (prevención de colapso) indican distintos niveles de deformación que pueden considerarse como aceptables en términos de desempeño. A partir de C se aprecia la importante caída de resistencia, alcanzándose el

colapso total en el punto E. El punto IO representará el nivel en el cual la edificación continúa siendo segura para ser ocupada, manteniendo una gran resistencia y rigidez en comparación con la que tenía antes del evento. El punto LS toma en cuenta un daño estructural importante, pero se tiene una reserva de resistencia y rigidez para que el colapso estructural no ocurra, sin embargo, la edificación debe ser reforzada, y su ocupación inmediata no es generalmente posible y muchas veces es económicamente imposible de afrontar. Al final, el punto CP representará un nivel en el cual la rigidez y resistencia de la estructura han sido muy afectadas, teniendo en general la edificación aún resistencia para soportar cargas verticales, pero está frente a un posible colapso, con lo cual no se considera la reparación de la edificación ni hay garantía de seguridad para su reocupación (Espinoza, 2011). La figura 6 muestra un gráfico de envolvente cíclica, que envuelve el comportamiento de un componente sometido a una carga cíclica, y se aprecia el comienzo de la degradación del componente junto con la rigidez residual.



**Figura 6:** Contorno máximo de la capacidad cíclica. (Espinoza, 2011)

Finalmente, de la aplicación del método de *pushover* se obtendrá un gráfico de demanda-capacidad, en donde se aprecia un punto que interseca, tanto el gráfico de curva de capacidad del *pushover* con el espectro sísmico empleado (figura 7). De esto resultará un punto, denominado *punto de desempeño (performance point)*, el cual a su vez estará asociado con un valor de desplazamiento. Esto servirá para evaluar en definitiva la capacidad del sistema estructural y poder concluir, de una manera bastante aproximada, si la estructura tendrá un comportamiento inelástico adecuado para el sismo de diseño considerado. Variando condiciones particulares en el sistema estructural, se obtendrán valores distintos de los puntos de desempeño.



**Figura 7:** Representación del Método del Espectro de Capacidad (ATC-40). (Espinoza, 2011)

Es determinante y evidente que, para cada etapa del desarrollo progresivo de una edificación, es muy importante considerar realizar análisis por desempeño de las edificaciones, con las adiciones correspondientes (miembros y componentes no estructurales). Así, con cada ampliación se tendrá garantía de que las edificaciones resultantes tendrán un adecuado desempeño sísmico, asegurándose de esta manera la seguridad para los ocupantes de las mismas y que los daños se concentren en las zonas destinadas de los miembros estructurales específicos, bajo costos razonables de reparación y niveles elevados de seguridad para los ocupantes, de manera inmediata y en el largo plazo.

#### **4. ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL ANÁLISIS POR DESEMPEÑO DE ESTRUCTURAS CON CRECIMIENTO PROGRESIVO**

Resulta particularmente obvio, luego de haberse visto que la adecuada disipación de energía inelástica ( $E_y$ ) se lleva a cabo por medio de deformaciones controladas de los miembros estructurales y en ubicaciones particularmente convenientes, más allá de sus límites elásticos, que existirán varios aspectos a considerar en el crecimiento progresivo de edificaciones en relación con su desempeño ante acciones sísmicas. Muy importante es mencionar en este momento, que se debe mantener siempre un absoluto control de los procesos de análisis y construcción de las edificaciones, ya que cierta imprecisión o modificación de algún detalle estructural indicado en los planos del proyecto, pudiera conducir a comportamientos sísmicos erráticos y no evidenciados en los análisis estructurales previos de cada etapa de crecimiento progresivo. Por ello, la supervisión por personal capacitado es indispensable para garantizar el fiel cumplimiento de los logros que se desean alcanzar con la evaluación del desempeño de las edificaciones.

De acuerdo con Andrade (2004):

La capacidad de una estructura de soportar daños significativos permaneciendo estable se puede atribuir por lo general a su resistencia, ductilidad y redundancia. El daño severo o colapso de muchas estructuras durante terremotos importantes es, por lo general, consecuencia directa de la falla de un solo elemento o serie de elementos con ductilidad o resistencia insuficiente.

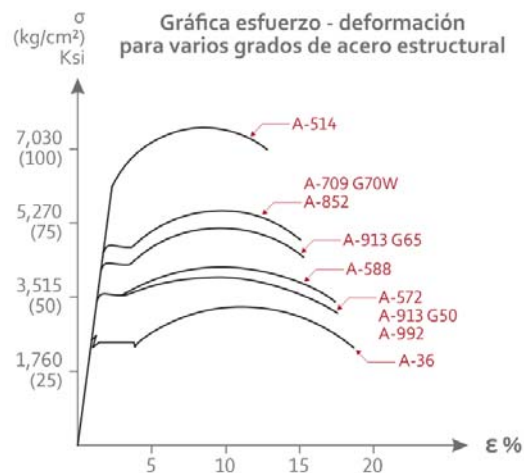
La resistencia se relaciona directamente con la capacidad para soportar cargas; contrario de la rigidez, la cual se asocia con las deformaciones de los diferentes miembros estructurales. Resulta obvio que estructuras demasiado flexibles tendrán niveles de deformaciones elevados, mientras que en las rígidas ocurre todo lo contrario. Sin embargo, un exceso de rigidez pudiera significar el dejar de favorecer al propósito de disipar energía inelástica de manera adecuada mediante el daño controlado de los miembros estructurales por deformación, por lo que no se debe caer en los límites extremos de flexibilidad ni rigidez. La flexibilidad excesiva inducirá daños importantes en componentes no estructurales.

Las edificaciones aporticadas de acero son de las configuraciones estructurales que mejor se adaptan al crecimiento progresivo. Entre algunos de los aspectos que se deben considerar cuando se lleva a cabo proyectos de edificaciones aporticadas en acero estructural, en lo referente al desempeño ante acciones sísmicas de las distintas posibilidades de crecimiento progresivo, se pueden mencionar los siguientes: ductilidad del acero estructural, adición de miembros estructurales (vigas y columnas) y la redistribución de momentos, incorporación de losas y su comportamiento como diafragma infinitamente rígido, conexiones entre los miembros estructurales, adición de irregularidades, principalmente.

#### 4.1. Ductilidad del acero estructural

En general, el acero es un material ampliamente conocido por su comportamiento dúctil. Sin embargo, y de acuerdo con Núñez (2015), representa un error importante el considerar que esta característica del material puede trasladarse al sistema estructural de forma directa, por lo cual es necesario disponer de ductilidad al nivel de secciones y de miembros y elementos estructurales (vigas, columnas, conexiones entre los miembros, etc.). Obsérvese que, por ejemplo, en edificaciones hechas en concreto estructural, el acero de refuerzo le provee al conjunto concreto-acero un comportamiento dúctil muy satisfactorio, dependiendo de la disposición y cantidad del refuerzo colocado en obra, en particular.

De acuerdo con la Norma Covenin 1756-1:2001 *Edificaciones sismorresistentes*, es posible definir la ductilidad como la *capacidad que poseen los componentes de un sistema estructural de hacer incursiones alternantes en el dominio inelástico, sin pérdida apreciable en su capacidad resistente*. Esto implica, de acuerdo con lo indicado previamente, la aparición de daño en la estructura, ya que se disipa energía mediante deformaciones de los miembros estructurales. La ductilidad ( $\mu_i$ ) se obtiene, como ya se mencionó, dividiendo los valores máximos entre los cedentes, dependiendo de si lo que se mide, por ejemplo, es desplazamiento ( $\Delta$ ) de la estructura o curvatura ( $\phi$ ) de las secciones de los miembros estructurales, aunque también se pueden determinar ductilidades partiendo de otros parámetros. Cada una arrojará, en general, un valor diferente y, por lo tanto, elevados valores de una no necesariamente implica elevados valores de las otras. El valor menor condicionará la máxima ductilidad de la edificación. Obsérvese la figura 8, en donde se muestran distintos tipos de aceros y los valores de tensiones ( $\sigma$ ) versus deformaciones ( $\epsilon$ ) en un ensayo con carga monotónica creciente, hasta que el espécimen ensayado alcanza su rotura o falla.



**Figura 8:** Gráfico tensión versus deformación de aceros estructurales. (<https://goo.gl/JWztBx>)

Aceros con mayores valores de su tensión cedente ( $F_y$ ) presentan menor ductilidad, en comparación con los aceros con menores resistencias (Núñez, 2015). Así, por ejemplo, el acero A-36 tiene mayor ductilidad que el A-588, ya que alcanza mayor nivel de deformación última. Si lo que se desea es obtener edificaciones con adecuados comportamientos sismorresistentes, el empleo de materiales con menores valores de las tensiones cedentes, en general, resulta más adecuado.

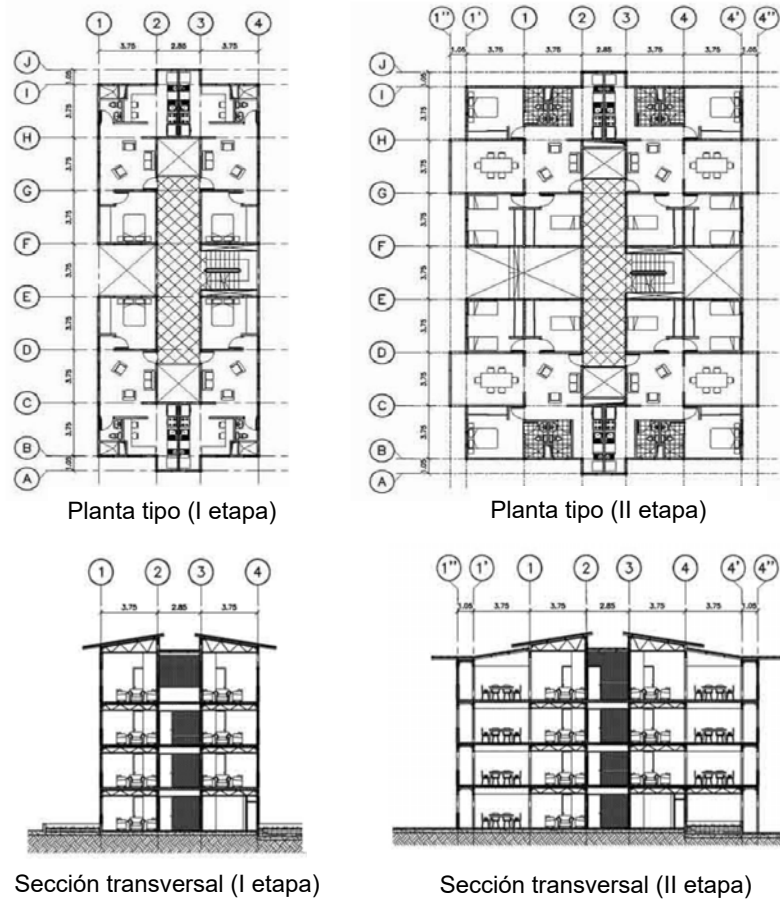


En el crecimiento progresivo de edificaciones se debe tener especial cuidado con el tipo de acero empleado en los miembros estructurales que se adicionarán a la estructura para alcanzar el desarrollo de las siguientes etapas constructivas, ya que pudiera darse el caso, nada especial en el medio venezolano, que no exista disponibilidad de perfiles particulares para las vigas y columnas de la misma calidad de los existentes en la edificación en sus predecesoras etapas de desarrollo. Esto obviamente pudiera afectar el desempeño sísmico de la edificación en las siguientes etapas de crecimiento y ameritaría la necesidad de realizar un nuevo análisis por desempeño, considerando estas variaciones en el material.

#### **4.2. Adición de miembros estructurales (vigas y columnas) y la redistribución de momentos**

El crecimiento progresivo implica, como se indicó previamente, la adición de miembros estructurales (vigas, columnas, losas, etc.) y componentes no estructurales (mampostería, cerramientos en general, acabados, etc.), los cuales modificarán el comportamiento de la edificación para ajustarse a los nuevos parámetros de ampliación. Resulta evidente que la adición de miembros estructurales generará, entre otras cosas, la redistribución de momentos flectores y de acciones verticales (cargas provenientes de los componentes no estructurales). Para el caso de vigas, aquellas que en la primera etapa de la edificación tenían uno de sus extremos coincidiendo con la fachada, es posible que ahora tengan uno o varios tramos más unidos a este, los cuales han sido adicionados para las siguientes etapas constructivas. En cambio, algunas columnas pudieran ahora tener valores de cargas verticales mayores, con la generación de solicitaciones posiblemente también mayores. Esto hace necesario que en el análisis por desempeño de la nueva edificación, exista una redistribución de solicitaciones. Por lo tanto, pudiera darse el caso de un miembro que antes tenía una sección transversal suficientemente resistente como para soportar las solicitaciones debidas a todas las acciones consideradas en su análisis (verticales, laterales, etc.), y que en la siguiente etapa de crecimiento resulte inadecuada o con una capacidad estructural insuficiente. Esta consideración pudiera traer consigo que en la primera etapa constructiva aparezcan miembros con dimensiones visiblemente elevadas y que para esa etapa en particular pudieran resultar excesivas de acuerdo con las solicitaciones existentes, pero suficientes para las siguientes etapas. Bien sabido es, que en el caso de columnas, el aumento de las cargas axiales impacta de manera negativa la ductilidad de la misma.

Supóngase el caso indicado en la figura 9, correspondiente al sistema SIEMA-VIV del Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC), en el cual se indican dos etapas de crecimiento progresivo, en las que se han adicionado vigas, columnas, losas y componentes no estructurales. Es lógico que la vivienda en la etapa II dista mucho, en cuanto a su arquitectura y comportamiento estructural, de aquella de la etapa I, ya que la adición de miembros hacia los lados de los ejes 1 y 4 han permitido ahora obtener ampliaciones de 20 m<sup>2</sup> para cada apartamento original (50 y 60 m<sup>2</sup>), con lo cual han pasado a tener un área de 70 y 80 m<sup>2</sup>, lo cual se materializa en la obtención de un cuarto y un baño adicionales a los existentes en la etapa I para cada tipo de apartamento, pasando por lo tanto a tener estos, tres habitaciones y dos baños. En este sistema la adición de miembros estructurales se logra mediante conexiones empernadas flexibles sin la inclusión de soldaduras en campo, más que aquellas necesarias para la fijación de elementos, tales como láminas de los soffits metálicos y componentes no estructurales. Aunque en este sistema en particular las conexiones son del tipo flexible, es de hacer notar que las columnas de los ejes 1 y 4 en la etapa I recibían una porción de carga inferior a la que tendrán en la etapa II.



**Figura 9:** Plantas y secciones de la vivienda propuesta (Sistema SIEMA-VIV). (Hernández R., 2008)

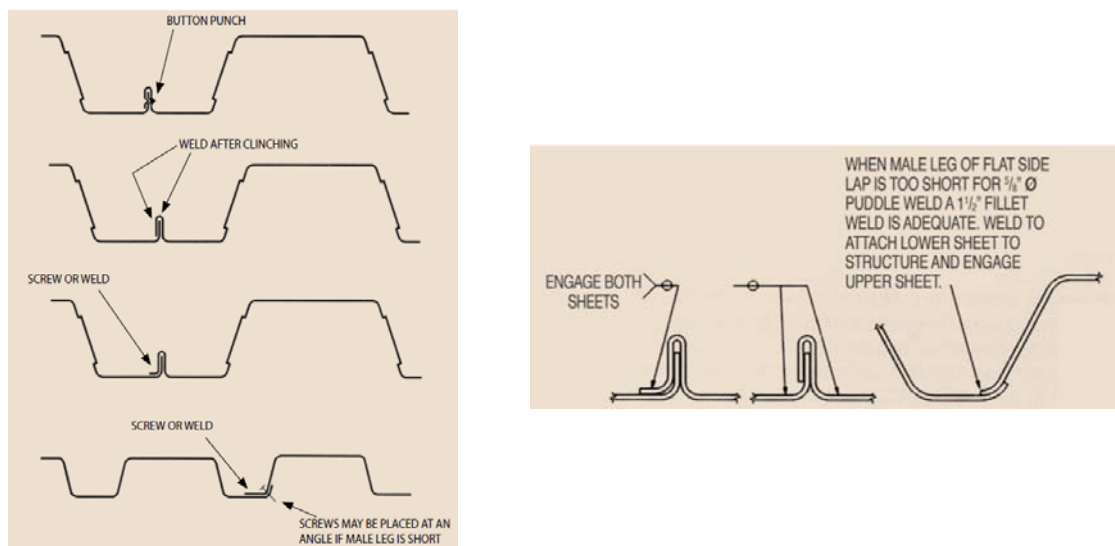
La adición de miembros estructurales (vigas, columnas y losas) traerá consigo la modificación de la distribución de solicitaciones, sobre todo en aquellos en los que las conexiones entre las vigas y las columnas sean del tipo rígido o semirrígido, las cuales tienen una alta capacidad de resistir solicitaciones de flexión y corte, principalmente. Al cambiar las condiciones de columnas laterales a interiores, las vigas de la nueva etapa constructiva o de ampliación transmitirán solicitaciones a estas columnas, generando un aumento, por ejemplo, de la carga axial y una condición distinta en el nodo viga-columna original.

#### 4.3. Incorporación de losas y su comportamiento como diafragma infinitamente rígido

Las fuerzas sísmicas se consideran en el análisis estructural como un conjunto de cargas aplicadas lateralmente en la edificación (método estático equivalente, por ejemplo), las cuales generarán cortes en las columnas y deformaciones laterales en la edificación. Con estas deformaciones laterales ocurrirán modificaciones de las tensiones en los miembros estructurales, ya que las solicitaciones debidas a la acción sísmica se adicionan a aquellas provenientes de las cargas verticales en la estructura (permanentes y variables). Por esto, son las losas las encargadas de transmitir estas fuerzas sísmicas a la estructura y distribuirla en los miembros, los cuales participarán en la resistencia global de la edificación según su resistencia particular. Con esto se evidencia que las losas deberán actuar como diafragmas infinitamente rígidos en su plano, lo cual significa, esencialmente, que deberán tener

espesores suficientes y carecer de excesivas discontinuidades (espacios vacíos) que afecten este tipo de comportamiento.

Al crecer una edificación para seguirse desarrollando, se adicionarán losas estructurales. Pero esta adición trae consigo la generación de juntas de construcción, las cuales, de no hacerse adecuadamente, pudieran interrumpir la acción de diafragma con rigidez infinita, comportándose como una sola unidad por cada nivel de la edificación, y convertirse, en cambio, en diafragmas independientes con rigidez infinita individual. Este aspecto debe ser tomado en cuenta durante la construcción de las siguientes etapas y disponer, convenientemente, de detalles que permitan el crecimiento progresivo de los diafragmas sin la afectación de su comportamiento como una sola unidad por cada nivel de la edificación. En la figura 10 se muestran algunos detalles de unión entre las láminas de acero en sofitos metálicos. Deben también proveerse detalles particulares para el vaciado de concreto y la unión del concreto nuevo con el existente.

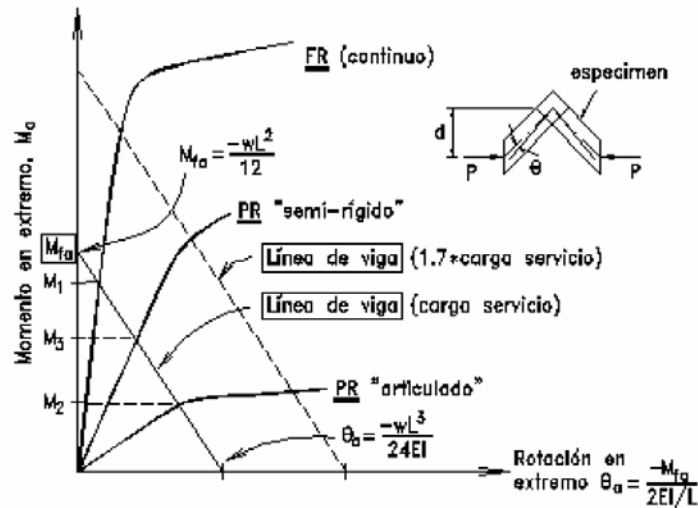


**Figura 10:** Formas correctas de unión para láminas de sofitos metálicos por medios mecánicos. (SDI Manual of Construction with Steel Deck, 2006)

#### 4.4. Conexiones entre los miembros estructurales

En edificaciones de acero estructural las conexiones entre los miembros principales se convierten en uno de los aspectos a los cuales debe prestarse mayor atención. Las conexiones, en general, pueden ser de tres tipos: rígidas, semirrígidas y flexibles. Cada una de ellas proporcionará un diferente nivel de empotramiento en los extremos de los miembros que se encuentren unidos a ellas, siendo las rígidas las que tendrán un mayor nivel y las flexibles el menor, quedando las semirrígidas como intermedias entre ellas.

En la figura 11 se observa el gráfico momento *versus* rotación de unas conexiones de acero estructural, las cuales fueron sometidas a unos ensayos con carga lateral (P), lo cual permite medir las rotaciones existentes a medida que la carga va creciendo. Es evidente cómo mediante el ensayo es posible constatar lo indicado anteriormente.



**Figura 11:** Gráfico momento *versus* rotación de distintos tipos de conexiones en acero. (Baglietto, 2007)

El tipo de conexión entre miembros estructurales es un aspecto entonces que presenta una importancia capital, ya que de allí será posible una adecuada distribución de tensiones, por ejemplo, que permitirán que la formación de rótulas plásticas se lleve a cabo en la ubicación de los miembros estructurales (vigas, en general) y de la manera deseada en el análisis inelástico de la estructura, lo cual lógicamente condicionará su adecuado desempeño sísmico. La nueva etapa de crecimiento tendrá adiciones de miembros que se conectarán con algunos de la estructura original, lo cual generará la condición explicada. Una conexión mal concebida pudiera generar un “desvío” de estas tensiones hacia otras localidades de la estructura, no destinadas a incursionar en el rango inelástico o, por ejemplo, no en un determinado momento del análisis. Por ello, esta “nueva” ubicación de deformaciones inelásticas, a medida que se avanza en el análisis por desempeño y la estructura se deforma más, pudiera incursionar en límites de desempeño elevados que pudieran inducir en casos extremos el colapso del sistema, situación peligrosa que debe evitarse.

#### 4.5. Ubicación de rótulas plásticas y redistribución de momentos flectores en el análisis plástico

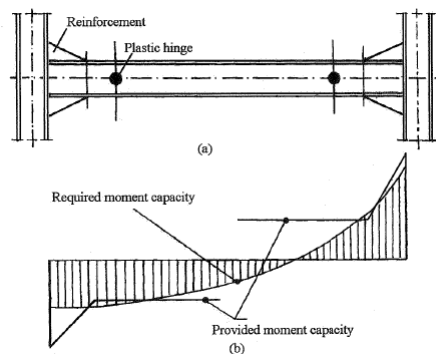
El análisis plástico de estructuras supone en todo momento que debe existir una redistribución de momentos flectores en los miembros estructurales, una vez que van ocurriendo las formaciones de rótulas plásticas en las ubicaciones establecidas para tal fin. De acuerdo con Fratelli (1967):

En las estructuras estáticamente indeterminadas o hiperestáticas, el proceso no es exactamente el mismo. Con la formación de la primera articulación plástica no se alcanza el límite de resistencia del sistema total debido a que el resto de la estructura, aun en régimen elástico, es capaz de cooperar para soportar un incremento de las cargas aplicadas. Este incremento de las cargas produce la formación de una segunda articulación plástica en otra sección de la estructura, que resulta la más solicitada elásticamente y para la cual el momento flector aplicado adopta también su valor límite... Este proceso es posible únicamente cuando la ductilidad del material es grande y permite que las deflexiones en la primera de las articulaciones formadas no sobrepasen ciertos valores

admisibles, mientras en el resto del sistema se van localizando sucesivamente las restantes rótulas de fluencia. Si esto no sucede, se producen colapsos parciales por inestabilidad local o rotura localizada del material.

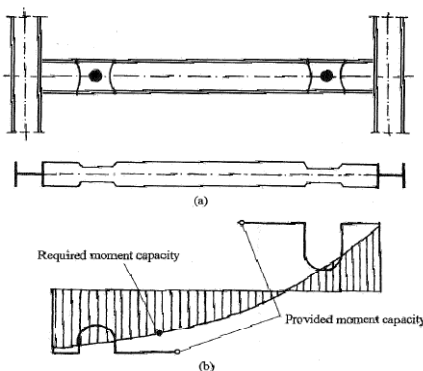
Es importante destacar que no se debe confundir *fluencia* con *cedencia*. (Nota del autor.)

De acuerdo con lo explicado previamente, es necesario establecer las zonas en donde ocurrirá la disipación de energía inelástica mediante daño y sus posteriores consecuencias (al nivel de reparaciones posteriores). En el caso de las vigas, la figura 12 muestra claramente la ubicación deseada para que se formen rótulas plásticas, a una distancia suficiente de la cara de los miembros de apoyo que, en general, son columnas o miembros solicitados a flexocompresión. Se destaca, como se explicó con anterioridad, que adicionalmente a este mecanismo plástico en las vigas es posible encontrar columnas en las cuales se han formado rótulas plásticas en alguno de sus extremos, lo cual no necesariamente inducirá un mecanismo en la edificación.



**Figura 12:** Ubicación de rótulas plásticas en vigas. (Gioncu y Mazzolani, 2002)

Se aprecia cómo los extremos de la viga presentan conexiones rigidizadas por planchas verticales (rigidizadores), tanto arriba como debajo de la conexión, lo cual genera zonas potencialmente más débiles a una cierta distancia de la cara de la columna, por lo que se espera que las rótulas plásticas se generen a una cierta distancia después de los rigidizadores. Esto puede lograrse, también, con una conexión como la indicada en la figura 13, en donde se ha debilitado la viga en sus dos extremos (alas) para lograr un efecto similar al indicado.



**Figura 13:** Ubicación de rótulas plásticas en vigas con alas destajadas. (Gioncu y Mazzolani, 2002)

#### 4.6. Adición de irregularidades

Con el crecimiento progresivo de una edificación cualquiera, es muy posible incorporar algún tipo de irregularidad, bien sea que el desarrollo progresivo sea en planta o elevación. Por ello, el desempeño de la nueva etapa de crecimiento pudiera estar siendo afectado por algún tipo de situación que genere concentración de tensiones en ubicaciones no deseadas para garantizar que la nueva estructura disipará inelásticamente energía, de acuerdo con los mecanismos provistos en su diseño por desempeño. Se debe recordar en todo momento que adicionar miembros estructurales a una edificación existente alterará su comportamiento ante acciones sísmicas y que las irregularidades generan condiciones particulares en las edificaciones, las cuales siempre deben tomarse en cuenta.

### 5. CONCLUSIONES

Se han mencionado algunos aspectos que deben tomarse en consideración cuando se planifican y proyectan edificaciones aporticadas de baja altura de acero estructural con crecimiento progresivo. El establecimiento del desempeño de una edificación estará condicionado a la secuencia en la cual se vayan formando las zonas de disipación de energía inelástica en la estructura, o secuencia de formación de rótulas plásticas o mecanismos dúctiles. Esta secuencia obedece a parámetros de comportamiento estructural deseado y cualquier variación en los aspectos constructivos o calidad de ejecución de la obra pudiera alterar de cierta forma el desempeño de la edificación. Por ello, el crecimiento progresivo involucra la adición de miembros a una estructura existente y cada etapa de crecimiento, por lo tanto, presentará de por sí un comportamiento sísmico particular. Esta adición de miembros incluye a las losas estructurales, que en acero serán ejecutadas, por ejemplo, mediante láminas de acero y concreto en su parte superior (sofitos metálicos), y su continuidad será un aspecto muy importante en la transmisión de las cargas sísmicas laterales entre los miembros estructurales. Las conexiones entre las vigas y columnas son un punto crucial en el desempeño de edificaciones en acero estructural ante acciones sísmicas, por lo que su correcto análisis y construcción son uno de los aspectos en los que debe prestarse mayor atención. En conclusión, los aspectos indicados en este documento son solo algunos de los que pudieran presentarse y que, en mayor o menor medida, pudieran causar que edificaciones aporticadas de baja altura con crecimiento progresivo tengan desempeños sísmicos variables.

### 6. REFERENCIAS

- Aguiar, R. (2003). *Análisis sísmico por desempeño. Valle de los Chillos*. Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército.
- American Society of Civil Engineers. (2014). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings ASCE 41-13*. Virginia.
- Andrade, I. (2004). Control de la deriva en las normas de diseño sismorresistente. Trabajo Final de Grado para optar al título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Applied Technology Council. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings ATC-40*. Volume I. California.
- Baglietto, L. (2007). Conexiones en estructuras de acero. Conferencia Internacional en Ingeniería Sísmica, Lima.

Cilento, A. (1999). *Cambio de paradigma del hábitat*. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC)- Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH).

Comisión Venezolana de Normas Industriales (Covenin). (2001). Edificaciones sismorresistentes 1756:2001-1. Caracas.

D'Amico, F. y Levy, D. (2000). Método del *pushover*. Optimización configuracional de estructuras aporticadas. Trabajo Final de Grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Metropolitana, Caracas.

Espinoza, V.T. (2011). *Ingeniería sísmica basada en desempeño*. Perú: Comunidad para la Ingeniería Civil.

Fratelli, G. (1967). *Cálculo plástico. Análisis y diseño límite de sistemas estructurales planos*. Buenos Aires, (s/e).

Gelabert, D. y González, D. (2013). Progresividad y flexibilidad en la vivienda. Enfoques teóricos. *Arquitectura y Urbanismo*, vol. 34, n° 1, abril. Extraído el 12 de febrero de 2017 de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376834402003>

Gioncu, V. y Mazzolani, F. (2002). *Ductility of seismic resistant steel structures*. New York: Spon Press.

Goel, S.C. y Chao, S. (2008). *Performance based plastic design. Earthquake-resistant steel structures*. Illinois: International Code Council (ICC).

Habibullah, A. y Pyle, S. (1998). Practical three dimensional nonlinear static pushover analysis. Extraído el 07 de marzo de 2008 en: [http://computersandengineering.de/downloads/technical\\_papers/CSI/PushoverPaper.pdf](http://computersandengineering.de/downloads/technical_papers/CSI/PushoverPaper.pdf)

Hernández R., B. (2008). Viviendas multifamiliares de desarrollo progresivo. *Memorias de la Semana Internacional de Investigación*. Caracas: Ediciones de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela.

Núñez, L. (2015). Estudio de conexiones a momento empleando vigas de alma abierta y columnas tubulares en sistemas estructurales de pórticos a momento en estructuras de acero ante cargas sísmicas. Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

Steel Deck Institute. (SDI). (2006). *Manual of Construction with Steel Deck*. Illinois.