

## La construcción de viviendas con el sistema Steel Framing en zonas de subsidencia: Pertinencia y Sustentabilidad

### Luis Alfredo Hernández Castillo



Maestro en Ingeniería por la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Profesor-Investigador en la Universidad Autónoma de Aguascalientes, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción Departamento de Construcción y Estructuras. Aguascalientes [Aguascalientes], México.<lahernan@correo.uaa.mx>.

### José Ángel Ortiz Lozano



Doctor en Ingeniería por la Universidad Politécnica de Cataluña. Profesor-Investigador en la Universidad Autónoma de Aguascalientes, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción. Departamento de Construcción y Estructuras. Aguascalientes [Aguascalientes], México.<jose.ortiz.lozano@gmail.com>.

### Resumen

El fenómeno de subsidencia causado por la extracción de agua subterránea es un problema que se presenta en diferentes lugares alrededor del mundo. Particularmente, en la República Mexicana es una situación que afecta varias ciudades en por lo menos ocho estados localizados en la zona central del país. Por las características del subsuelo que se presenta en estas regiones afectadas, la subsidencia puede llegar a generar grietas y fracturas que se hacen evidentes en la superficie del suelo provocando asentamientos diferenciales que afectan todo tipo de construcción causando daños considerables en los elementos estructurales de las viviendas. Los materiales tradicionalmente empleados para la construcción de viviendas tales como la mampostería y el concreto entre otros, presentan características de rigidez que los hacen especialmente vulnerables ante estos efectos. En contraste, el acero representa una excelente opción de uso debido a sus características estructurales, como es su alta resistencia a la tensión, ductilidad, buen comportamiento a la compresión y su alta eficiencia en su relación peso-resistencia, entre otras cualidades. Los elementos de acero formado en frío de pared delgada, son otro tipo de perfiles muy ligeros, que aunque su uso se conoce desde hace algunas décadas, es en tiempos recientes que han extendido su aplicación, principalmente en la construcción de viviendas, y en menor escala en la construcción comercial e industrial. La principal ventaja de este material es que conserva las características mecánicas del acero pero con una reducción importante en cuanto al peso de los elementos. El uso más frecuente de este tipo de perfiles es en la fabricación de marcos estructurales en forma de módulos estándar, cuyo ensamblaje más común es formarlo con perfiles de sección; canal con borde rígido y perfiles de sección, canal simple, con diferentes dimensiones y calibres. En pruebas experimentales a escala real y en modelos de simulación numérica el sistema presenta un excelente comportamiento ante los desplazamientos diferenciales como los provocados por la subsidencia, aceptando deformaciones considerables sin sufrir daños apreciables y con una capacidad portante muy adecuada. En este comportamiento se observa la bondad del acero formado en frío de pared delgada, primero por su capacidad de deformación sin colapso y segundo por ser un sistema sustentable que causa un menor impacto al ambiente, en comparación con las construcciones tradicionales. Por lo anterior expuesto, se considera que este sistema constructivo-estructural puede ser muy adecuado para reducir daños y garantizar la seguridad estructural en viviendas construidas en zonas afectadas por hundimientos diferenciales debidos a agrietamientos del suelo asociados al fenómeno de subsidencia.

### Palabras clave

Subsidencia, acero formado en frío, sustentabilidad, viviendas, comportamiento estructural.

### Housing building with steel framing system in subsidence zones: Pertinence and Sustainability

### Abstract

The phenomenon of subsidence caused by the extraction of groundwater is a problem that occurs in different places around the world. Particularly in the Mexican Republic is a situation that affects several cities in at least eight states located in the central region. Given the particular nature of the subsoil that occurs in these regions affected, subsidence can generate cracks and fractures that are evident on the surface of the soil causing differential settlement affecting all types of construction causing considerable damage to the structural elements

of the dwellings. The materials traditionally used for housing construction such as masonry and concrete among others, have stiffness characteristics that make them especially vulnerable to these effects. In contrast, steel is an excellent choice for use due to their structural characteristics, such as its high tensile strength, ductility, compressive good performance, high efficiency in weight — strength ratio, among other qualities. The cold formed thin-walled steel elements, are another type of very light profiles, although its use has been known for several decades, is in recent times that have extended their application, mainly in housing construction, and to a lesser scale commercial and industrial construction. The main advantage of this material is that it retains the mechanical properties of steel, but with a significant reduction in the weight of the items. The most common use of this type of profile is in the manufacture of structural frames as standard modules, the most common form it is assembly profile channel with rigid edge section and section profiles of single channel, with different dimensions and sizes. In full-scale testing and numerical simulation models, the system exhibits an excellent performance under differential displacements as those caused by subsidence, accepting considerable deformations without reaching the failure of structural elements. In the goodness of this behavior is observed thin-walled cold formed steel, first by its deformation without collapse and second for being a sustainable system that causes less harm to the environment compared to traditional buildings. Therefore exposure is considered that this system is an excellent choice for use in housing construction in areas with subsidence.

### **Keywords**

Subsidence, cold-formed steel, sustainability, dwellings, structural behavior.

## **1. Introducción: subsidencia**

La subsidencia es un fenómeno que ocurre entre otras causas, por la extracción subterránea de fluidos o sólidos que se manifiesta en hundimientos súbitos o paulatinos de la masa del suelo que se ven reflejados en la superficie. Frecuentemente estos hundimientos provocan fisuras o grietas que dañan todo tipo de infraestructura urbana. A decir de los expertos este fenómeno es un problema que ha existido desde hace mucho tiempo, pero no se tomó en cuenta sino hasta que debido al considerable aumento de la población y por consiguiente el incremento en los niveles de vida este fenómeno empezó a afectar las condiciones de vida de los seres humanos. La subsidencia puede presentarse por diferentes condiciones y causas, como zonas expuestas a minas subterráneas, extracción de fluidos del subsuelo, inundaciones, obras de construcción, etc. La subsidencia causada por la extracción de agua subterránea es un grave problema que en las últimas décadas se ha generalizado en la República Mexicana, principalmente en el centro del país en donde se ubican valles cuyos acuíferos están formados por materiales no consolidados tales como depósitos aluviales, lacustres o vulcano-sedimentarios geológicamente recientes (FIGUEROA, 1984), (AGUIRRE et al., 2000), (GARDUÑO et al., 2001), (CENAPRED, 2001), (ROJAS et al., 2002), (ARROYO et al., 2003), (ARROYO et al., 2004), (ZERMEÑO et al., 2004) y (PACHECO et al., 2006). De acuerdo con estos investigadores, cuando el lecho rocoso del acuífero es irregular, la subsidencia puede generar fallas y fracturas de los rellenos granulares en la superficie dañando la infraestructura urbana existente, (ROJAS et al., 2002) y (PACHECO et al., 2006). Las fracturas asociadas con la subsidencia han sido ampliamente estudiadas en diversos lugares del mundo (UNESCO, 1984), (BORCHERS, 1998), (PRINCE et al., 1995). En México este fenómeno se presenta, en valles aluviales principalmente en zonas del altiplano mexicano tales como Celaya, Silao, Irapuato, Querétaro, San Luis Potosí, Morelia, y Ciudad de México, en donde se han reportado problemas por hundimientos y fracturas asociadas a la sobreexplotación del acuífero granular (AGUIRRE et al., 2000), (GARDUÑO et al., 2001), (CENAPRED, 2001), (ARROYO et al., 2003), (ARROYO et al., 2004), y (PACHECO et al., 2006). Para el caso de la Ciudad de Aguascalientes las fracturas y fallas superficiales se reportaron por primera vez hace más de tres décadas (ARANDA & ARANDA, 1985) y (ARANDA-GÓMEZ, 1989). Estos autores reportaron que las grietas comenzaron a ser notadas en 1981 por los daños que causaron en las construcciones, además documentaron la existencia de grietas que tenían movimiento vertical, las cuales formaban un escarpe de varias decenas de centímetros, encontrándose también grietas “jóvenes” apenas perceptibles. En sus conclusiones apuntaron como la causa inmediata de la generación de grietas al abatimiento del nivel piezométrico, aunque hacen notar que la geología estructural juega un papel pasivo, al sugerir que la orientación de las



**Figura 1.** Perspectiva de la Ciudad de Aguascalientes y zonas de agrietamiento. Imagen proporcionada por Jesús Pacheco Martínez, 2014.

fracturas estudiadas podría coincidir con las irregularidades del basamento rocoso del relleno aluvial. De acuerdo con un levantamiento realizado en el mes de diciembre de 1984, se tenían detectados solamente un total de 10 grietas con diferentes longitudes distribuidas en toda la zona urbana de la ciudad de Aguascalientes (ARANDA & ARANDA, 1985). Actualmente de acuerdo con información del gobierno del estado (SIFAGG, 2014) se tienen detectadas 66 grietas que en total alcanzan una longitud lineal de 83,545 metros afectando un total de 1438 inmuebles, solamente en el área correspondiente al municipio de Aguascalientes. En todo el estado los inmuebles dañados ascienden a 1865 unidades.

Por su parte (CASTAÑEDA et al., 1995) formulan un mecanismo de la generación de agrietamientos en términos de un acuífero libre sobreexplotado, la sobreposición de conos de abatimiento y un lecho rocoso

con heterogeneidades. Estiman que por cada metro de abatimiento del nivel freático se origina un incremento en los esfuerzos efectivos en el relleno por debajo del nivel freático de  $0.8 \text{ Ton/m}^2$ , lo cual favorece una deformación vertical del acuífero, que en conjunción con el lecho rocoso irregular, se puede traducir en hundimientos diferenciales. Reconocen que el parámetro más importante en la magnitud de los hundimientos esperados es el espesor de los rellenos granulares. (ARROYO et al., 2003) y (UAQ-UNAM, 2006) retoman el modelo del mecanismo de generación de grietas, basado en hundimientos diferenciales causados por la conjunción de un lecho rocoso de topografía irregular y un descenso en el nivel del agua subterránea (JACHENS & HOLZER, 1979), (JACHENS & HOLZER, 1982) y (Pampeyan et al., 1988) para zonas de fracturamiento en los Estados Unidos, y propuesto por (Aranda y Aranda, 1985), y (CASTAÑEDA et al., 1995) para explicar el agrietamiento en el valle de Aguascalientes. En este trabajo, Arroyo y colegas realizan simulaciones del proceso de subsidencia utilizando la teoría de la pérdida volumétrica utilizada por (ROJAS et al., 2002) para modelar el proceso de subsidencia en valles aluviales. De la modelización realizada concluyeron que si el nivel de agua subterránea sigue descendiendo y se tiene un espesor de sedimentos suficiente, se pueden formar fracturas paralelas a una ya formada hacia el lado más profundo del graben siempre y cuando la profundidad del lecho rocoso se haga más grande. Por su parte (ZERMEÑO et al., 2004) estimaron un hundimiento regional total de 1.31 m en un lapso de 18 metros medido en la ciudad de Aguascalientes, y reporta una velocidad de hundimiento de 11.18 cm por año para un punto ubicado en las instalaciones del INEGI en la ciudad de Aguascalientes, el cual es monitoreado con GPS. Finalmente (ZERMEÑO et al., 2005) presenta dos mapas uno de hundimientos medidos en la ciudad de Aguascalientes y otro de abatimiento del nivel piezométrico, los mapas muestran una clara correspondencia entre las zonas de hundimiento y los conos de abatimiento regionales con lo que comprueban que para el valle de Aguascalientes los hundimientos y agrietamientos se asocian al abatimiento.

## 2. Marcos de acero formado en frío

### 2.1. Materiales y métodos

El sistema de marcos de acero conformado en frío es un sistema constructivo que se basa en el uso y aplicación de perfiles de acero galvanizado de pared delgada trabajando en colaboración con paneles estructurales aligerados los cuales pueden fabricarse con diferentes materiales. Aunque se

considera una técnica de construcción relativamente nueva, el sistema de estructuración por medio de marcos utilizando perfiles esbeltos tiene su origen en los inicios del siglo XIX, ya que este sistema, conocido como “BallonFraming”, aparece como una adaptación de las viviendas de madera, que se iniciaron a construir en los Estados Unidos a raíz de la llegada de los colonizadores europeos a esas tierras, principalmente porque se requería de un sistema más sencillo y económico para la construcción de casas (SARAMANHO, 2007). El objetivo principal de utilizar este novedoso sistema de construcción basado en la estructuración por medio de marcos, era el de aligerar el peso, disminuir las dimensiones de las piezas y utilizar elementos con medidas estándar. De esta manera el tipo de conexión para la unión de los diferentes elementos también resultó ser mucho más sencillo en lugar de trabajar con elementos más robustos y pesados.

El uso del acero formado en frío no es reciente, sus inicios se remontan al año 1850 cuando se empezó a utilizar como material de construcción en los Estados Unidos y Gran Bretaña. Para finales de los años 20's y principios de los años 30's, este material comenzó a emplearse en la construcción de edificios utilizando productos manufacturados por los primeros fabricantes, pero no fueron muy aceptados principalmente porque no se tenían especificaciones de diseño bien sustentadas. Muchas de las aplicaciones del acero formado en frío no se utilizaron ya que se tenían metodologías de diseño limitadas. Debido al poco conocimiento del comportamiento del material y a que no se tenían normas estandarizadas, la aplicación de este material fue limitada hasta el año 1946 cuando se publicó la primera edición de las especificaciones para el diseño de elementos de acero de pared delgada del Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI, 1946) basadas en trabajos de investigación realizados en la universidad de Cornell liderados por el profesor George Winter. (BEHROOZ H.S, 2010).

El crecimiento de la economía en los Estados Unidos y una alta producción del acero en el periodo posterior a la segunda guerra mundial, de alguna forma contribuyeron a la fabricación y uso de elementos de acero rolado en frío en la construcción de edificios comerciales y posteriormente en la construcción de viviendas. Durante la misma época posterior a la segunda guerra mundial en Japón se comenzó a construir con el sistema de marcos de acero rolado en frío, principalmente para poder hacer frente a la reconstrucción masiva de viviendas que fueron dañadas por los bombardeos (SARAMANHO, 2007). Ya para el año de 1949 se publicó el primer manual de diseño para el uso de los ingenieros. Posteriormente en el año de 1956 estas especificaciones fueron formalmente adoptadas por primera vez por los organismos encargados de formular los códigos y normas de construcción. (BEHROOZ H.S, 2010).

## 2.2. Principios estructurales

El sistema de marcos de acero formado en frío es un sistema constructivo que se basa en el uso y aplicación de perfiles de acero galvanizado de pared delgada trabajando en colaboración con paneles estructurales aligerados los cuales pueden fabricarse con diferentes materiales, tales como madera, poliestireno, yeso, madera OSB, lamina lisa y lamina corrugada. La característica principal



**Figura 2.** Estructuración típica de una construcción utilizando marcos de acero formado en frío de pared delgada (agroads.com)

de los perfiles utilizados en este tipo de sistema estructural es que son formados en frío, para lo cual, hojas de acero previamente cortadas a las dimensiones necesarias se hacen pasar por una serie de rodillos para determinar la forma final de los perfiles, los cuales son muy ligeros, debido a que tienen de uno a varios milímetros en su espesor. El sistema se forma por medio de módulos de dimensiones estándar que generalmente se fabrican en planta y son trasladados al sitio de construcción de la obra. El principio estructural del sistema está basado en marcos cuya función es la de trabajar como muros de carga interactuando tanto con los muros adyacentes, como con el sistema de techo y piso así como con los anclajes a la cimentación con el fin de formar un entramado que sea capaz de soportar tanto las cargas gravitacionales como las cargas horizontales (Figura 2).



**Figura 3.** Marco de acero rolado en frío con recubrimiento de poliestireno expandido. (Archivo personal).

La capacidad de carga de un muro de acero formado en frío puede decirse que se sustenta en dos componentes principales: una es el esqueleto o estructura base formada por los elementos verticales y horizontales denominados Studs y Tracks respectivamente, y por otra parte el material de recubrimiento del muro el cual aparte de tener una función de aislante termoacústico, también tiene una función estructural proporcionando resistencia y rigidez al sistema. De acuerdo con lo anterior, la resistencia del muro ante las cargas aplicadas, depende en cierta medida del comportamiento mecánico del material utilizado como recubrimiento, de las conexiones entre los muros y sistema de losa, de la cantidad y separación de los tornillos de fijación a la estructura, de los anclajes al piso y de los elementos de soporte lateral.

El sistema de muros se conforma por medio de los marcos estructurales los cuales se forman por medio de una serie de elementos verticales de sección canal con borde rígido (studs) y se complementan con 2 elementos horizontales colocados en el extremo superior e inferior del marco con sección canal simple (tracks). La conexión entre estos elementos se realiza por medio de tornillos autopercutores de diferentes tipos y dimensiones. La distancia de separación entre los elementos verticales (studs) puede variar, dependiendo del cálculo estructural, pero generalmente se establecen entre los 40 a 60 cm para una vivienda de uno o dos niveles.

Como recubrimiento de los marcos se pueden utilizar diferentes materiales como yeso, silicato de calcio, poliestireno, madera OSB, lamina lisa o lamina corrugada, los cuales proporcionan cierto grado de rigidez a la estructura incrementando la capacidad de carga del muro e integrando todos los elementos a trabajar en conjunto. Estos materiales se fijan a los tracks y studs por medio de tornillos autopercutores de diferentes dimensiones colocados tanto en el perímetro del marco como en las áreas centrales del mismo.



**Figura 4.** Sistema de paneles de losa de azotea con lámina corrugada (Archivo personal).

El sistema de losa puede ser también construido por medio de módulos prefabricados en dimensiones estándar o por medio de vigas apoyadas en los muros. A fin de que el sistema trabaje correctamente, las vigas de la losa deben coincidir con los studs de los muros de soporte con el objetivo de que las cargas sean correctamente transmitidas a la cimentación o a los muros inferiores. Al igual que los muros de carga el material de recubrimiento en las losas puede ser de diferentes tipos pero principalmente se utiliza poliestireno, madera o algún tipo de lámina corrugada que aparte de trabajar como elemento estructural, tenga la función de utilizarse como cimbra ahogada para el soporte del concreto fresco durante la construcción de la losa.(Figura 4).

### 2.3. Comportamiento del sistema ante subsidencia

El efecto de la subsidencia en las estructuras produce desplazamientos diferenciales en varios puntos de acuerdo con la zona afectada. De esta forma se tiene una gama muy amplia de posibilidades en que una estructura puede ser afectada al encontrarse en zonas vulnerables de subsidencia y agrietamientos. Los desplazamientos diferenciales por mínimos que sean afectan todo tipo de construcción. En el caso de las viviendas unifamiliares las principales afectaciones que se encuentran por esta causa son fisuras y fracturas en muros, vigas, columnas y techos. La rigidez de los sistemas constructivos tradicionales provoca que ante mínimos desplazamientos diferenciales los elementos estructurales sufran daños. Por sus características mecánicas el sistema de acero formado en frío resulta ser una excelente opción para aplicarse en zonas de subsidencia. De acuerdo con pruebas experimentales ante desplazamientos

verticales que se realizaron en una estructura a escala real construida de acero formado en frío (Figura 5) se obtuvieron resultados muy satisfactorios en cuanto al adecuado comportamiento estructural desde el punto de vista de ductilidad de este sistema, ya que en base a la simulación numérica y a la



**Figura 5.** Prueba experimental ante asentamientos diferenciales en estructura a escala real. (Archivo personal).

experimentación se observó básicamente que dichos sistemas son capaces de soportar adecuadamente grandes distorsiones angulares (debidas a hundimientos diferenciales) sin sufrir daños apreciables, y con una capacidad portante muy adecuada. Como conclusión, se determinó que la utilización de este sistema constructivo-estructural sería muy adecuada para reducir daños y garantizar la seguridad estructural en viviendas construidas en zonas afectadas por hundimientos diferenciales debidos a agrietamientos del suelo asociados el fenómeno de subsidencia.

### 3. Sustentabilidad del sistema steelframing

#### 3.1. Desarrollo sustentable

De acuerdo con The World Commission on Environment and Development de las Naciones Unidas, establece como concepto de Desarrollo Sustentable el siguiente: “El desarrollo sustentable hace referencia a la capacidad que haya desarrollado el sistema humano para satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer los recursos y oportunidades para el crecimiento y desarrollo de las generaciones futuras”. Indudablemente si se habla de desarrollo sustentable éste considera todo lo relacionado con la actividad del hombre sobre la tierra. Una de las actividades inmersa en este tipo de desarrollo definitivamente es la industria de la construcción, que involucra tanto el proceso de concepción (la planeación, el proyecto, el diseño), como la construcción y el mantenimiento de obras que se ponen al servicio del hombre. Una manera de mitigar los efectos negativos que se producen por los procesos constructivos o de producción de materiales utilizados en la industria de la construcción, es aplicar nuevos materiales, procedimientos y sistemas que se consideren amigables con el ambiente y que cumplan con el concepto de desarrollo sostenible.

#### 3.2. Factores del Cambio Climático

Las variaciones de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles en la atmósfera y las variaciones de la cubierta terrestre y de la radiación solar, alteran el equilibrio energético del sistema climático. Las emisiones mundiales de GEI por efecto de actividades humanas han aumentado desde la era preindustrial en un 70% entre 1970 y 2004. El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el GEI antropógeno más importante. Sus emisiones anuales aumentaron en torno a un 80% entre 1970 y 2004. Los aumentos de la concentración mundial de CO<sub>2</sub> se deben principalmente a la utilización de combustible de origen fósil y en una parte, apreciable pero menor, a los cambios de uso de la tierra, (IPCC, 2007).

#### 3.3. Reciclaje del acero

La producción de acero requiere el uso de gran cantidad de energía. Sin embargo un manejo adecuado de los procesos de producción puede disminuir considerablemente la cantidad de energía utilizada para este fin. Por otro lado el reciclaje del acero ayuda en buena medida a mejorar el uso de la energía ya que por medio de este proceso, se utilizaría menos energía si se realizara todo el proceso completo para la producción del acero. Por otra parte es necesario acotar que el acero es uno de los materiales más reciclables en Norteamérica y en el mundo, generando con esto

una considerable disminución en las emisiones de CO<sub>2</sub>. Cuando las estructuras metálicas han completado su vida útil, es posible dismantelarlas y utilizarlas para su reconstrucción en otros lugares. Este material puede ser reciclado innumerables veces sin perder sus propiedades, contribuyendo de esta manera a la disminución del consumo de recursos naturales y a la optimización en la reutilización de esos mismos recursos. Entre 1970 y 1980 las plantas de acero modernas necesitaron un promedio de 144 kg de materia prima para producir 100 kg de acero. Con inversión en investigación, mejoras tecnológicas y buena planeación, la industria del acero hoy en día utiliza solamente 115 kg para producir 100 kg de acero, con una reducción del 21%. (World Steel Association, 2010).

Desde 1975 al año 2005 el promedio de consumo de energía por tonelada de acero crudo producido decreció alrededor del 50%. La asociación mundial del acero ha estimado las tasas de reciclaje para productos que contengan una significativa porción de acero, e identificado las tasas objetivo para el año 2050 (Tabla 1).

**Tabla 1.** Tasas de reciclaje para la industria de acero (World Steel Association, 2010).

Mercado	2007 (Estimado)	2050 (Meta)
Construcción	85 %	90 %
Automotriz	85 %	95 %
Maquinaria	90 %	95 %
Aplicaciones	50 %	75 %
Contenedores	69 %	75 %
<b>Total</b>	<b>83 %</b>	<b>90 %</b>

Estas metas al ser completadas resultarán en una cantidad adicional de 38 millones de toneladas de acero reciclado alrededor del mundo para el año 2050. Esto es igual a 54 millones de toneladas menos de CO<sub>2</sub>. Desde un punto de vista del medio ambiente el reciclaje del acero tiene un enorme impacto sobre la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. Por otro lado si 450 millones de toneladas de acero rolado en caliente fueran producidas del 100% de chatarra en nuevos materiales, el total de ahorro en emisiones de CO<sub>2</sub> sería aproximadamente de 634 millones de toneladas en un año. (World Steel Association, 2010).

Una de las características relevantes del acero como material de construcción es que todos los productos utilizados en edificios de acero son 100% reciclables. Una de las claves importantes en los atributos de sustentabilidad es la capacidad o habilidad del material para ser reciclado sin ninguna pérdida de degradación de sus propiedades inherentes permitiendo un infinito número de ciclos de vida del producto (CSSBI, 2008).

### 3.4. La Sustentabilidad del Acero en la Construcción

El desarrollo sustentable es actualmente un asunto esencial que tiene implicaciones en todos los sectores de nuestra sociedad. La industria de la construcción desempeña un papel fundamental en sus objetivos no sólo por su contribución a la economía global sino también por sus significativos impactos, tanto en términos ambientales como sociales. La construcción sustentable procura minimizar el consumo de recursos naturales y maximizar su reutilización, emplear recursos renovables y reciclables, proteger el ambiente natural y entregar un ambiente construido de óptima calidad. Las estructuras metálicas, por lo general, son estructuras de elementos prefabricados, lo que implica un proceso de construcción más eficiente, una mayor rapidez de construcción y un mínimo de riesgos y deterioros de la obra y de las instalaciones. Asimismo, como

se trata de estructuras relativamente livianas, las cimentaciones son más reducidas, lo que permite preservar el suelo y efectuar menos movimientos de tierra (GERVASIO, 2008).

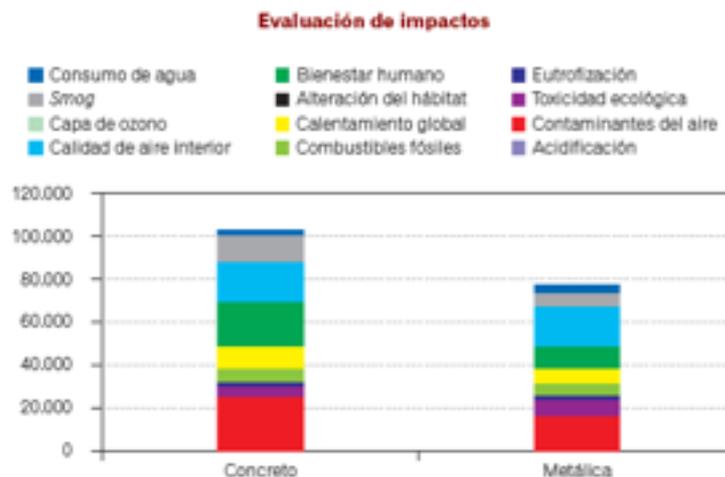


Figura 6. Comparativo de sustentabilidad entre los dos tipos de construcciones (Gervasio, 2008).

#### 4. Conclusiones

De acuerdo con estudios preliminares basados en pruebas experimentales tanto en elementos aislados, como en marcos a carga lateral así como en una estructura a escala real sometida a desplazamientos verticales simulando subsidencia, se ha observado que el sistema de marcos de acero formado en frío de pared delgada presenta un comportamiento mecánico muy adecuado ante desplazamientos verticales. Una de las ventajas del sistema es su gran ductilidad y su capacidad de sufrir grandes deformaciones sin llegar a la falla. Como conclusión, se determinó que la utilización de este sistema constructivo-estructural sería muy adecuada para reducir daños y garantizar la seguridad estructural en viviendas construidas en zonas afectadas por hundimientos diferenciales debidos a agrietamientos del suelo asociados el fenómeno de subsidencia. Por las características de fabricación del sistema y de los materiales con que se construye resulta una excelente alternativa desde el punto de vista de la sustentabilidad ya que al ser materiales mucho más ligeros de los comúnmente utilizados se reduce considerablemente la cantidad de acero a utilizarse en una construcción, además son materiales que se pueden transportar con facilidad. Por otra parte al ser un sistema industrializado se reducen los desperdicios del material.

El sistema de marcos de acero rolado en frío se considera un sistema que pretende ser amigable con el medio ambiente ya que reduce en gran medida la cantidad de acero que se utiliza para la construcción de estructuras. Al ser un material de espesor delgado disminuye el peso que soporta la cimentación con lo que se reduce el tamaño de la misma y se afecta el suelo a menos profundidad. Al ser un material que se puede reciclar permite que los desperdicios que se tengan se reutilicen. Por otro lado al ser un sistema un tanto cuanto industrializado en el cual los módulos estándar pueden realizarse en planta, el desperdicio al construir resulta ser mínimo. En cuanto a los materiales de recubrimiento tanto para los muros como para el sistema de losa, existen una gran cantidad de materiales aislantes que ayudan a que el sistema tenga un buen desempeño en cuanto a las condiciones de temperatura adecuadas en la construcción.

#### 5. Referencias

AGUIRRE, G.J.; ZÚÑIGA, R.; PACHECO F.J.; GUZMÁN M.; NIETO J. "El graben de Querétaro, Querétaro, México. Observaciones de fallamiento activo", **Geos, boletín de la Unión Geofísica Mexicana**. México, v. 20, p.2-7, 2000. Disponible en <[http://www.geociencias.unam.mx/~ger/2000\\_Geos.pdf](http://www.geociencias.unam.mx/~ger/2000_Geos.pdf)>, acceso 5 de Marzo de 2014.

ARANDA, J.J. & ARANDA M. **Análisis del Agrietamiento en la ciudad de Aguascalientes**, Aguascalientes, Reporte técnico preparado para el Centro Tecnológico de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, México, 1985.

ARANDA, J.J., "Geología Preliminar del Graben de Aguascalientes", **Revista del Instituto de Geología**, Universidad Nacional Autónoma de México, México, v.8, p.22-32, 1989.

ARROYO, M.G.; ARZATE, J.; ROJAS, E.; MARTÍNEZ, J.R.; YUTSIS, V.; PACHECO, J.; FRÍAS, A.O.; OCHOA, H.G., **Causas y efectos de las grietas y fallas en el valle de Aguascalientes, México**. Cuaderno de trabajo editado por el CONACYT, SIHGO. 2003.

ARROYO, M.G.; ZERMEÑO, E.; CASTAÑEDA J.A., **El agrietamiento en Aguascalientes, causas y efectos**. Primera edición; Aguascalientes, Universidad Autónoma de Aguascalientes, 2004, 227 p.

BEHROOZ, H.; SOROORI, R., **Experiments on Cold-Formed Steel Beams with Holes**, 2010, 153p. Thesis of Master of Science in Civil Engineering, submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, May 3, 2010. Disponible en <[http://www.moen.cee.vt.edu/postedfiles/SorooriRad\\_BH\\_T\\_2010R.pdf](http://www.moen.cee.vt.edu/postedfiles/SorooriRad_BH_T_2010R.pdf)>, acceso 6 de Marzo de 2014.

BORCHERS, J.W. Land subsidence case studies and current research, **Proceedings of the Dr. Joseph F. Poland Symposium on Land Subsidence**, Association of Engineering Geologists, Sacramento California, USA, 1988, Special Publication no. 8.

CANADIAN SHEET STEEL BUILDING INSTITUTE, (CSSB), **Environmental Fact Sheets**, EFS-3, Lightweight Steel Framing-Looking forward to benefits, November, 2008. Disponible en <<http://www.cssbi.ca/sites/default/files/publications/CSSBI-EFS-3.pdf>>, acceso 31 marzo 2014.

CASTAÑEDA, H.; MURILLO, A.; FUENTES, J.A.; MONSIVÁIS, J.P., "Comentarios al estudio de Fallas y Fracturas Geológicas de la ciudad de Aguascalientes", **Investigación y Ciencia**, UAA, Aguascalientes, v.14, Año 5, p. 40-43, 1995.

CENAPRED, **Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México**. Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana. 2001, 231p. Disponible en <<http://www.atlasmacionalderiesgos.gob.mx/>>, acceso 10 Marzo 2014.

FIGUEROA, G. Case history 9.8, México, D.F., Mexico, **Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal**, prepared for the International Hydrological Program, Working Group 8.4. 217-232, 1984.

GARDUÑO, V.H.; ARREYGUE, E.; ISRADE, I.; RODRÍGUEZ, G.M., Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México, **Revista Mexicana de Ciencias Geológicas**, México, v.18, p. 37-54, 2001.

GERVASIO, H., La sustentabilidad del acero y las estructuras metálicas, CONSTRUMETAL, Congreso Latinoamericano de Construcción Metálica (septiembre 2008), Sao Pablo, Brasil. **Anais...** Disponible en <[http://www.construmetal.com.br/2008/downloads/PDFs/27\\_Helena\\_Gervasio.pdf](http://www.construmetal.com.br/2008/downloads/PDFs/27_Helena_Gervasio.pdf)> acceso 18 Marzo 2014.

INTERNATIONAL PANEL CLIMATE CHANGE, (IPCC), **INFORME DE SÍNTESIS**. Contribución de los grupos de trabajo I, II, III y al cuarto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, 2007. Ginebra Suiza, 104p. Disponible en <[https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_sp.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf)>, acceso 28 de Febrero de 2014.

JACHENS, C.R. & HOLZER, L.T.; Geophysical investigations of ground failure related to ground water withdrawal Picacho basin Arizona, **Ground Water**, vol. 17, no. 6. p. 574-585, 1979.

HERNÁNDEZ CASTILLO, L.A.; ORTIZ LOZANO, J.A. La construcción de viviendas con el sistema Steel Framing en zonas de subsidencia: Pertinencia y Sustentabilidad. **Labor & Engenho**, Campinas [Brasil], v.8, n.2, p.52-61, 2014. Disponible en: <[www.conpadre.org](http://www.conpadre.org)>.

JACHENS, C.R. & HOLZER, L.T.; Differential compaction mechanism for earth fissures near Casa Grande, Arizona, **Geological Society of American Bulletin**, v. 93, p. 998-1012.1982.

PACHECO, J.; ARZATE, J.A.; ROJAS, E.; YUTSIS, V.; ARROYO, M.; OCHOA, G. Delimitation of soil fissures zones due to ground subsidence using gravity data and finite element modeling in the Valley of Querétaro, Mexico, **Engineering Geology**, USA, v.84 p.143-160. Disponible en <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795205003406>>, acceso 15 Marzo 2014.

PAMPEYAN, E.H.; HOLZER, T.L.; CLARK, M.M., Modern failure in the Garlock fault zone, Fremont Valley, California, **Geological Society of America Bulletin**, vol. 100, no. 5, p. 677-691, May 1988. Disponible en: <<http://gsabulletin.gsapubs.org/citmgr?gca=abull;100/5/677>>, acceso 2 de Marzo de 2014.

PRINCE, K.R.; GALLOWAY, D.L.; LEAKE, S.A., **U.S. Geological survey subsidence interest group conference**, Edwards Air Force Base, Antelope Valley, California. Usgs, Open-File Report 94-532, Sacramento California, 1995. Disponible en <<http://pubs.usgs.gov/of/1994/ofr94-532/pdf/OFR94-532.pdf>>, acceso 11 Marzo 2014.

ROJAS, E.; ARZATE, J.; ARROYO, M. "A method to predict the group fissuring and faulting causes by regional groundwater decline", **Engineering Geology**, v.65, 245-260,2006. Disponible en <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795201001351>>, acceso 10 Marzo 2014.

SARMANHO, A.M. y MORAES, R. C., "**Steel Framing: Arquitectura**", Instituto Latinoamericano del Fierro y del Acero (ILAFSA), 2007, ISBN: 978-956-8181-02-4, 119 pp.

SIFAGG (2014), "**Sistema de Información de Fallas Geológicas y Grietas 2014**", Secretaría de Obras Públicas del Estado, Gobierno de Aguascalientes. World Steel Association, Fact Sheet, The three Rs of sustainable steel, Disponible en <[https://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/fact-sheets/Fact-sheet\\_3Rs/document/Fact%20sheet\\_3Rs.pdf](https://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/fact-sheets/Fact-sheet_3Rs/document/Fact%20sheet_3Rs.pdf)> acceso 12 de Marzo de 2014.

UAQ-UNAM, **Reporte final del estudio integral sobre la problemática del agua, subsidencia y sismicidad en el valle de Aguascalientes**, Proyecto financiado por INAGUA del Gob. del Estado de Aguascalientes y el CONACYT, Aguascalientes, Ags.2006, 433p.-

UNESCO, **Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal**, prepared for the international hydrological program, working group 8.4, Joseph F. Poland Chairman and Editor, 1984, 340p.

ZERMEÑO, M.E.; MENDOZA, E.; CALVILLO, G., Medición del hundimiento y modelado para estudiar el agrietamiento de la ciudad de Aguascalientes. **Revista Investigación y Ciencia**. Aguascalientes, v.31, p. 35-40, 2004.

ZERMEÑO, M.E.; ESQUIVEL, R.; HERNÁNDEZ, A.; MENDOZA, E. y ARELLANO, J. "Influencia de la extracción de agua en la subsidencia y Agrietamiento de la Ciudad de Aguascalientes", **Investigación y Ciencia**, Aguascalientes, v. 32, p. 15-22, 2005.