

## Ampliación del método de resistencia directa para dimensionar paredes de marco de acero

P. W. Kubde<sup>1\*</sup>, K. K. Sangle<sup>1</sup>

\*Contact Author: [pwkubde@vjti.org.in](mailto:pwkubde@vjti.org.in)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i1.196>

Received: 11/12/2016 | Accepted: 27/04/2017 | Published: 31/05/2017

### RESUMEN

El uso de paredes de marco de acero (CFS) está creciendo debido a la evolución de la tecnología de manufactura, al desarrollo de la construcción civil y debido a la existencia de normas técnicas, confiriendo ventajas en su uso. Entretanto el proyecto de estructuras de CFS es complejo debido al poco espesor de las paredes y la existencia de aberturas (marcos y puertas) dejan esas estructuras sujetas a fallas por pandeo localizados, ocasionados por flexión combinada con torsión. El llamado Método de la Resistencia Directa, DSM, es el método disponible, con ciertas limitaciones, para dimensionar vigas y columnas. Para superar esas limitaciones este artículo se dedica a proponer una fórmula como ampliación y mejora del método tradicional de dimensionar por DSM. Una estructura de marco de acero fue analizada experimentalmente para validar el modelo usado en el programa de cálculo (software) y la misma estructura, con diferentes alturas, fue analizada por el método DSM y análisis por elementos finitos, con vistas a obtener una fórmula que amplió y mejoró el espectro de uso del DSM.

**Palabras clave:** marco de acero; análisis de elementos finitos; método de la resistencia directa DSM; pandeo por torsión; pandeo generalizada.

**Citado como:** P. W. Kubde, K. K. Sangle (2017). “Ampliación del método de resistencia directa para dimensionar paredes de marco de acero”, Revista ALCONPAT, 7 (2), pp. 172-185, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i1.196>

<sup>1</sup>Structural Engineering Department, Veermata Jijabai Technological Institute (VJTI), Mumbai, 400019, India.

### Legal Information

Revista ALCONPAT is a quarterly publication of the Latinamerican Association of quality control, pathology and recovery of construction- International, A.C.; Km. 6, Antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97310, Tel.5219997385893.

E-mail: [revistaalconpat@gmail.com](mailto:revistaalconpat@gmail.com), Website: [www.revistaalconpat.org](http://www.revistaalconpat.org).

Editor: Dr. Pedro Castro Borges. Reservation of rights to exclusive use No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, both awarded by the National Institute of Copyright. Responsible for the latest update on this number, ALCONPAT Informatics Unit, Eng. Elizabeth Maldonado Sabido, Km. 6, Antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, México, C.P. 97310.

The views expressed by the authors do not necessarily reflect the views of the publisher.

The total or partial reproduction of the contents and images of the publication without prior permission from ALCONPAT International A. C. is not allowed.

Any discussion, including authors reply, will be published on the first number of 2018 if received before closing the third number of 2017.

## Extension of direct strength method to two dimensional cold formed steel frame

### ABSTRACT

The use of cold-formed marco de acero (CFS) structures is increasing due to the advances in manufacturing, construction technologies and relevant standards. CFS has many advantages. However, the design of CFS structures is complex because of their thin walled open sections making them vulnerable to torsional-flexural buckling and local buckling. Direct strength method (DSM) is the method available for individual beam and column, with certain limitations. To overcome one such limitation this paper attempts to find a formula as an extension to DSM. Already experimented frame was used to validate software model and same frame with different heights was analysed by Finite Element Method and DSM and a formula is obtained as an extension to DSM.

**Keywords:** cold formed marco de acero; distortional buckling; global buckling; direct strength method; finite element analysis.

## Ampliação do método da resistência direta para dimensionar paredes de steel frame

### RESUMO

O emprego de paredes de steel frame (CFS) está crescendo devido à evolução da tecnologia de manufatura, ao desenvolvimento da construção civil e devido à existência de normas técnicas, conferindo vantagens ao seu emprego. Entretanto o projeto de estruturas de CFS é complexo devido a pouca espessura das paredes e a existência de aberturas (caixilhos e portas) deixarem essas estruturas sujeitas a falhas por flambagem localizada, ocasionadas por flexão combinada com torção. O chamado Método da Resistência Direta, DSM, é o método disponível, com certas limitações, para dimensionar vigas e pilares. Para superar essas limitações este artigo se dedica a propor uma fórmula como ampliação e melhoria do método tradicional de dimensionar por DSM. Uma estrutura de steel frame foi analisada experimentalmente para validar o modelo empregado no programa de cálculo (software) e a mesma estrutura, com diferentes alturas, foi analisada pelo método DSM e análise por elementos finitos, com vistas a obter uma fórmula que ampliou e melhorou o espectro de uso do DSM.

**Palavras-chave:** steel frame; análise de elementos finitos; método da resistência direta DSM; flambagem por torção; flambagem generalizada.

## 1. INTRODUCCIÓN

En India, debido a la creciente industrialización y gran número de población, las estructuras de acero conformadas al frío, conocidas por marco de acero, destinadas a estructuras para industrias y para vivienda de interés social, son las necesidades del momento, revelando como una alternativa muy económica y eficiente. Este marco de acero tiene ventajas de apariencia atractiva, construcción rápida, bajo mantenimiento, fácil ampliación, menor costo a largo plazo, no retrae y no se deforma por fluencia a temperatura ambiente, no necesita de formas, no es atacado por comejenes o termitas y ni por la descomposición orgánica; presenta calidad uniforme y no es combustible.

### 1.1 Método de la resistencia directa DSM

Existen dos métodos básicos de proyecto para dimensionar las piezas de marco de acero denominados en este artículo por CFS, como el Método del Ancho Efectivo Tradicional (Yu W. W., 2000) y el método de la resistencia directa DSM, adoptado en las especificaciones de proyecto norteamericano en 2004, como una alternativa al Método del Ancho Efectivo. El Apéndice 1 de la Especificación norteamericana para el proyecto de piezas estructurales de CFS, de 2004, complementó la edición de 2001, cita fórmulas y aplicaciones del DSM para columnas y vigas. Las piezas estructurales de CFS, debido a sus paredes finas, se colocan ante los ingenieros como desafíos, pues hay el riesgo de pandeo local y distorsión de sección transversal. Pero al mismo tiempo las paredes de CFS ofrecen la ventaja de presentar reserva de resistencia en el post pandeo, lo que lo hace aún más eficiente. El DSM es un método que responde a los desafíos por encima, al mismo tiempo en que usa la oportunidad creada por los desafíos. (Schafer B. W., 2006).

El desarrollo del DSM comenzó en la Universidad de Sydney, a través de la investigación de pandeo en columnas y posteriormente aplicado a vigas (Schafer B. W., 2006). Adicionalmente, Hancock (Hancock et al., 1994) mostraron que la resistencia a la compresión en una falla de distorsión se correlacionó bien con la esbeltez en el modo de distorsión elástica.

Un análisis riguroso de la estabilidad elástica de la pieza es fundamental para el uso correcto del DSM. El método se basa en la idea de que, si todas las tres inestabilidades elásticas son conocidas, es decir, local, distorsional y pandeo global, conjuntamente con la determinación de la carga o el momento que causa la fluencia del acero de la sección, entonces la resistencia puede ser determinada directamente. El método usa curvas de pandeo global de columnas con aplicación en inestabilidades de pandeo local y distorsional.

La mayor precisión del método ocurre debido a mejoras en la previsión del pandeo local. El método también lleva en consideración el cálculo de deflexión (estado límite de servicio). Es un método confiable; su confiabilidad es establecida usando el formato de proyecto de estado límite usado en Estados Unidos. (Schafer B. W., 2006)

El apéndice 1 de la Especificación norteamericana para el proyecto de miembros estructurales de CFS de 2004, complemento al de 2001, también incluye una serie de tablas que ofrecen los límites geométricos y los materiales de los miembros que pasaron en la verificación del abordaje de resistencia directa, en el proceso de codificación del mismo.

Pre calificado es el nombre apropiado que fue dado para esas secciones. Aunque el método DSM sea principalmente acreditado la Schafer B.W. (Schafer BW, 2000), Moen C., conjuntamente con Schafer B.W., aplicó ese método a miembros estructurales de CFS con perforaciones (baños, puertas, ventanas) (Moen CD y Schafer BW, 2006; 2008; 2010; 2011). En 2006, Schafer BW creó una guía denominada "Guía para proyectar utilizando el DSM". (Schafer B. W., 2006).

### 1.2 Revisión de la Literatura

Un estudio sobre la resistencia a flexión y deformaciones de CFS con secciones C y Z fue realizado en la Universidad de Florida (Ellifrit D., 1991; Ellifrit D., 1992; Ellifrit D., 1997). En la investigación, las secciones típicas de C y Z fueron ensayadas a flexión con varios tipos de refuerzos. Los investigadores desarrollaron un modelo de elementos finitos para las grandes deflexiones no lineales y el análisis de la rotación de las vigas-columnas. (Pi YL, 1994; Pi YL, 1994). Investigadores realizaron ensayos de pandeo lateral en vigas tipo canal de marco de acero (CFS). Una carga vertical fue aplicada en el centro de cizallamiento de la sección, o en un punto abajo del centro de cizallamiento. Las vigas fueron apoyadas en las extremidades, conectadas a un bloque de acero con dos tornillos en el borde de la sección (Bogdan M. Put, 1999; 1999).

En otro estudio, investigadores (Yu C., 2003; Schafer B. W., 2006) estudiaron el comportamiento de pandeo de vigas CFS. El ensayo de pandeo fue realizado en CFSs sin refuerzo, simplemente apoyadas, con dos secciones transversales diferentes. Los resultados del ensayo de pandeo lateral

mostraron que las secciones CFS fallaron catastróficamente por pandeo local y de torsión de la mayoría de los elementos comprimidos de la sección transversal luego de las deformaciones bastante grandes. Los resultados de 10 ensayos de pandeo lateral en CFSs simplemente apoyadas, con dos secciones transversales diferentes fueron presentados y también comparados con el método de proyecto analítico conforme la AS 4100 (AS 4100 Australian Standard Steel Structures, 1981). Se verificó que los momentos de ruptura fueron menores cuando las deflexiones laterales de la viga aumentaron a compresión en los bordes laterales y mayores cuando aumentaron la compresión en el borde del apoyo. Investigadores (Put B. M. et al., 1998) realizaron un ensayo de pandeo local en CFS con secciones C y Z. Durante el ensayo, el refuerzo fue cuidadosamente considerado en estos ensayos para garantizar que el pandeo torsional y el pandeo lateral torsional no influyeran en la interpretación de los resultados. Ellos concluyeron que los resultados del ensayo pueden ser usados para la evaluación de métodos existentes y propuestos para la previsión de la resistencia de almas y bordes en pandeo local. Además de eso, esos ensayos pueden constituir la base para evaluaciones posteriores en las cuales las restricciones de torsión sean aliviadas. Los resultados globales de los ensayos indican que el método de proyecto AISI (American Iron and Steel Institute, 1996) ofrece previsiones de resistencias adecuadas. El DSM tiene la mejor relación ensayo-previsión para probetas esbeltas y no esbeltas. Los resultados del ensayo demostraron que aún son posibles muchas mejoras en el pandeo elástico y en el cálculo del ancho efectivo de secciones C's e Z's.

Los investigadores estudiaron la flexibilidad de los conectores de viga-pilar utilizados en sistemas de estante de paletas de acero de paredes finas y fundidas al frío (American Iron and Steel Institute, 1996). La atención es enfocada en vigas sujetas a torque, debido al efecto de cargas transversales no aplicadas en el centro de cizallamiento (Bajoria, KM et al., 2006). Un método de análisis no-lineal geométrica simple, basado en el equilibrio satisfactorio de las configuraciones deformadas, es examinado y usado para prevenir el comportamiento de las vigas. Análisis geométricos simples, análisis de elementos finitos son realizados y comparados con los resultados experimentales. La influencia de las condiciones típicas de apoyo es estudiada y se verificó que ellas producen una restricción de deformación parcial en las extremidades.

Este efecto es explicado por la introducción de un resorte hipotético. La magnitud de la rigidez del resorte es evaluada para conexiones comúnmente usadas. Otros factores que afectan el comportamiento de CFS, como el pandeo local, también son estudiados. El objetivo era resolver la rotación desconocida.

Los resultados de los ensayos fueron comparados con el software comercial patrón de elementos finitos. Los resultados se mostraron próximos, para los problemas de interés, hasta que la fluencia ocurre en el miembro estructural. Eso puede ser visto en los resultados ofrecidos en las secciones posteriores. Por tanto, se puede concluir que, para los problemas de interés, la mayor contribución para la no-linealidad, en el rango elástico, y la no-linealidad debido a la dependencia del torque en la rotación de la viga.

Ellos concluyeron que, sobre la carga, la viga desliza horizontalmente y gira gradualmente, mas no ocurre un pandeo lateral súbito de la viga. La falla es iniciada por la fluencia del material. El procedimiento AISI para la estimación de la resistencia, en base a la curva lateral-torsional, puede sub estimar o sobreestimar la resistencia. La viga sufre gran rotación antes de la ruptura. Por tanto, el estado límite de servicio puede ser más crítico que el estado limite último. En caso de vigas sin elementos delgados, el modelaje como elementos de viga o elementos de casca previene un comportamiento semejante. Una nueva sección CFS fue fabricada y ensayada usando el nuevo método de balance doble. Bajoria y Talicotti (Bajoria, K. M., 2006) propusieron un ensayo alternativo de viga-columna en vez del ensayo de equilibrio. Estudios completos incluyendo investigaciones experimentales y numéricas fueron realizados para descubrir la flexibilidad del conector viga-columna, siguiendo un ensayo de cuadro completo para comparar los resultados obtenidos. El ensayo de equilibrio doble lleva en consideración el comportamiento

realista de los conectores, que son sometidos al momento, cizallamiento y esfuerzo axial por las vigas. Eso fue confirmado por los resultados del ensayo de cuadro completo. Investigadores estudiaron el modelo tridimensional (3D) de los sistemas convencionales de estante de paletas utilizando el programa de elementos finitos ANSYS.

Ellos brindan un análisis modal de vibración libre en estantes de paleta convencionales con los 18 tipos de secciones de columnas desarrolladas juntamente con la conexión semi-rígida. La rigidez del conector fue ensayada usando el método de equilibrio convencional y también usando un método de equilibrio doble. Ellos realizaron FEA no-lineal de ambos ensayos.

El modelo se destina a desarrollar una ecuación simplificada para el período fundamental de repisas de almacenamiento en su dirección de pasillo. Finalmente, fue realizado un estudio paramétrico para descubrir la forma y el período de tiempo de modo fundamental. El método de los elementos finitos fue utilizado para la precisión y adecuación de la armadura de acero formada en frío.

En 2011, KK Sangle desarrolló el elemento finito deformado y los análisis dinámicos de cuadros monocromáticos bidimensionales (2D) y cuadros tridimensionales (3D) de secciones formadas en frío con conexiones semi-rígidas usadas en el sistema convencional de estante de paletas. (Bajoria, KM et al., 2011) Los resultados del análisis de curvatura para los cuadros 2D individuales son comparados con los del estudio experimental y el abordaje de largo efectivo dada por el RMI (especificación RMI para el proyecto, ensayo y uso de repisas de almacenamiento industrial, Rack Manufacturers Institute, 2008.)

El modelo de elementos finitos usado para el modelaje de plano 2D simple y ampliado para cuadros 3D con conexiones semi-rígidas, para los cuales los resultados del análisis de pandeo son obtenidos. Investigadores. (Thombare C. N. et.al., 2016) estudiaron el análisis no-lineal de pandeo de la estructura 2D de estantes de almacenamiento de acero formado en frío usando plataformas comerciales FE apropiadas. En este artículo, los resultados del FEA son validados con datos experimentales disponibles para un molde CFS bidimensional particular (Bajoria, K.M., 2011) con diferentes espesores y patrones de refuerzo.

Los resultados de FEA muestran buena convergencia con los resultados experimentales. Por tanto, el estudio es extendido para más alturas de cuadros. Los resultados son entonces utilizados para sugerir una fórmula de extensión para modificación en la expresión DSM actual para cuadros bidimensionales.

Investigaciones significativas están en desarrollo para simplificar el dibujo de secciones y cuadros de CFS para hacerlos más confiables y prácticamente aceptables. La adición de perforaciones tiene muchas ventajas para el propósito práctico, más al mismo tiempo genera complicaciones en el proyecto. Son necesarios esfuerzos considerables para estudiar el impacto de las aberturas sobre la resistencia del elemento.

El objetivo de esta investigación actual es proponer una fórmula que ayude a descubrir la capacidad de carga de CFS bidimensional con diferentes alturas como una extensión para las ecuaciones DSM.

En este artículo, los resultados de la FEA son validados con datos experimentales disponibles para cuadros CFS bidimensionales (Bajoria, K.M., 2011), con diferentes espesores y patrones de refuerzo. Los resultados de la FEA muestran buena convergencia con los resultados experimentales.

Así, el estudio es extendido para frames (cuadros) más altos. Los resultados son entonces utilizados para sugerir una fórmula de extensión para modificación en la expresión DSM actual para cuadros bidimensionales.

## 2. PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es exploratorio y analítico. Los cuadros CFS fueron seleccionados por disponibilidad e, por lo tanto, el método de muestreo conveniente es adoptado. Un tamaño de muestra de 12 cuadros cada uno con propiedades diferentes fue utilizado para la validación del modelo FEA, pues datos experimentales estaban disponibles para esos cuadros. (Tabla 1). El mismo se aplica a todas las demás tablas; Eso es, que, en cada tabla, cada cuadro tiene propiedades diferentes.

### 3. ESTUDIO ANALÍTICO

En este estudio, los resultados de FEA finitos son validados con datos experimentales disponibles para una determinada estructura CFS bidimensional. (Bajoria, K. M. et.al., 2011) con espesores diferentes (mostrado en la Fig. 3). Los mismos cuadros fueron los utilizados para el estudio analítico por dos métodos, a saber:

DSM y FEM utilizando software; Para el DSM, el software -CUFSM versión 4.05 que está libremente disponible fue usado y para FEM, software comercial apropiado.

#### 3.1 Modelaje de elementos finitos

Tipo de elemento: Tres elementos comúnmente usados por el software FEM en el análisis de pandeo elástico de estructuras de paredes finas son los elementos S9R5, S4 y S4R como se muestra en la fig.1. Los S4 y el S4R son elementos de cascarón de propósito general de cuatro nodos, válidos para problemas de cascarón grueso y fino. Ambos elementos usan funciones de forma lineal para interpolar la deformación entre nodos. El elemento S4R fue usado para mezclar el modelo. Ventaja del elemento S4R sobre el S4 es que el S4R usa integración reducida con control de hourglassing, membrana finita de tensiones.

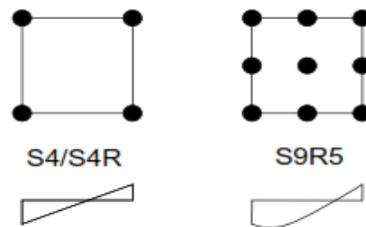


Figura 1. Elementos de cascarón FE S4/S4R y FE S9R5

Condiciones de contorno y carga: la condición de límite para la columna modelada es fijada, libre. Los nodos de extremidad de sección transversal son restringidos en las direcciones X y Z y los nodos centrales son impedidos en la dirección Y para evitar el movimiento del cuerpo rígido. Una carga de referencia de 1 kN es aplicada como una carga en el borde de la envoltura sobre el perímetro de la columna. La columna tiene perforaciones a 140 cm c/c. El Módulo de Elasticidad es de 212000 MPa y el coeficiente de Poisson es de 0.325

Análisis: el análisis lineal de pandeo Ebert fue realizada con el software FEA apropiado. El valor de Eigen obtenido a partir del análisis es usado para calcular la capacidad de pandeo del cuadro. Los modelos que estaban fueron refinados con malla de 30mm y 10mm para el estudio de convergencia. Se observó que la convergencia no era monótona, por tanto, para encontrar un autovalor más preciso, los modelos con malla de 10 mm son usados.



Las siguientes propiedades del material fueron atribuidas a la sección.

Tensión última fluencia =  $365 \text{ N/mm}^2$

Módulo de Elasticidad =  $E = 212000 \text{ N/mm}^2$

Módulo de cizallamiento =  $G = 80000 \text{ N/mm}^2$

Coefficiente de Poisson =  $\nu = 0,325$

Espesor = 1,6 mm a lo largo de la sección.

Dos secciones de columna fueron conectadas por elementos como lo mostrado en la Fig. 4. Las propiedades de sección transversal son encontradas por la opción de "propiedades de sección" del software como se aprecia. A carga aplicada é 1000 N en la sección transversal e para generar un efecto de cuadro, la conexión de elementos fue excluida como se muestra (Fig. 4).

De la misma forma, para las propiedades de la sección transversal de las alas, el espesor del elemento cero fue atribuida a la región de la perforación. Una vez cargado 1000 N y los cero elementos fueron excluidos como se aprecia. Antes de analizar la sección transversal líquida del cuadro, los nodos de las esquinas del miembro fueron impedidos en la dirección Z (Schafer B.W., Moen C.D., 2010).

La sección de la columna del molde está teniendo 2 orificios en la red y 4 orificios en la mesa. Así, los cálculos de las perforaciones del cuadro totalizaban 4 minutos de perforaciones en la evaluación de la resistencia.

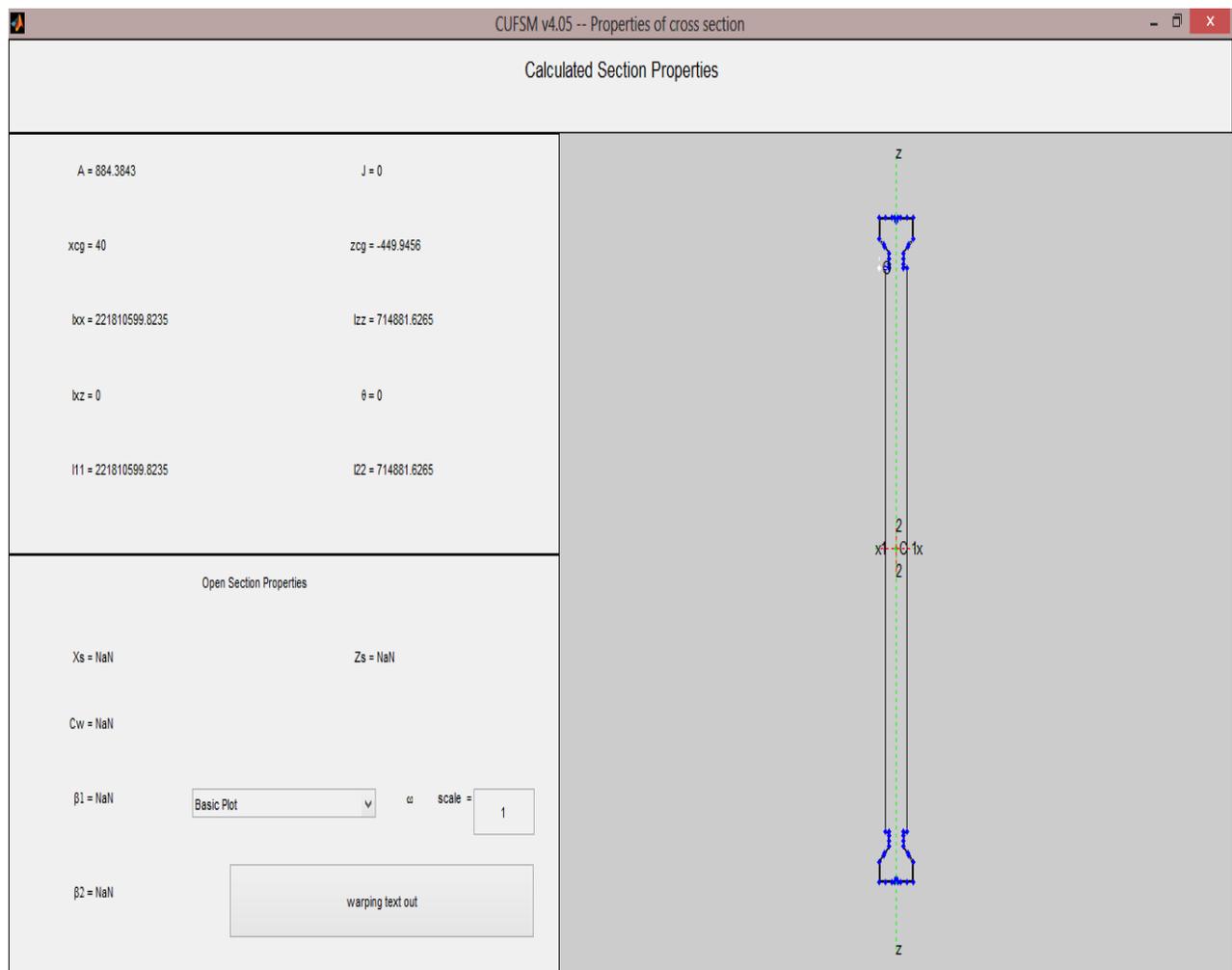


Figura 4. Modelo de tira finita del cuadro MW1.6 no CUFSM versión 4.05

#### 4. RESULTADOS

En la tabla 1, los resultados experimentales ya obtenidos por investigadores anteriores para varios cuadros y resultados FEM obtenidos para los mismos cuadros son tabulados. {Significado de la Nomenclatura en la columna 1 de la tabla 1: Por ejemplo: MW-1.6-B1 es cuadro de la columna. Nombre: donde MW significa peso promedio (HW significa peso pesado), 1,6 mm es el espesor, B1 y el tipo de apoyo como lo mostrado en la figura 2a (B2 es otro tipo de refuerzo como se ve en la figura 2b.)}

Tabla 1. Validación del modelo: Resultados experimentales y FEA.

<b>Estudio Experimental 1: sin barras espaciadas (altura da sección 3.1 m)</b>				
<b>Sección da columna</b>	<b>Pe (experimental) kN</b>	<b>Pe (FEM) kN</b>	<b>% error</b>	<b>Pe (FEM) / Pe (experimental)</b>
MW-1.6-B1	103.51	112.04	-8.24	1.08
MW-1.6-B2	115.45	125.00	-8.27	1.08
MW-1.8-B1	166.78	151.15	9.37	0.91
MW-1.8-B2	176.88	160.74	9.12	0.91
MW-2.0-B1	200.41	182.29	9.04	0.91
MW-2.0-B2	215.46	196.81	8.66	0.91
HW-2.0-B1	223.45	236.20	-5.71	1.06
HW-2.0-B2	235.26	269.00	-14.34	1.14
HW-2.25-B1	264.24	268.65	-1.67	1.02
HW-2.25-B2	275.56	304.40	-10.47	1.10
HW-2.5-B1	295.46	301.63	-2.09	1.02
HW-2.5-B2	305.56	340.12	-11.31	1.11
Promedio				1.11
Coeficiente de Variación.				11.08

En las tablas siguientes 2, 3 y 4, resultados FEM y DSM para el mismo modelo validado en la tabla 1, pero con tres alturas diferentes. (Tabla 2: altura 3,1 m, Tabla 3: Altura 4,6 m y Tabla 4: altura 6,1 m) son presentados. Como el modelo FEM ya está validado, los valores FEM para cuadros de otras alturas con perforaciones son considerados correctos y son comparados con los valores DSM correspondientes con orificios para descubrir la fórmula / factor apropiado necesario que, cuando es usado juntamente con el valor DSM, dará el valor correcto, es decir, el mismo valor dado por el FEM.

Tabla 2. Carga crítica de pandeo para secciones con altura de 3,1 m.

<b>secciones con altura de 3.1 m</b>						
<b>Sección de la columna</b>	<b>Pe (FEM) kN</b>	<b>Pe (DSM) kN</b>		<b>% erro</b>		<b>DSM com alma FEM</b>
		<b>Sin alma</b>	<b>Con alma</b>	<b>Sin alma</b>	<b>Sin alma</b>	
MW-1.6-B1	112.04	169.92	94.71	-64.16	15.46	0.85
MW-1.8-B1	151.15	191.16	106.55	-14.62	29.51	0.70

MW-2.0-B1	182.29	212.40	118.39	-5.98	35.06	0.65
HW-2.0-B1	236.20	253.99	228.32	-13.67	3.34	0.97
HW-2.25-B1	268.65	291.89	262.89	-10.46	2.14	0.98
Promedio						0.83
Coeficiente de Variación						-16.33

Tabla 3. Carga crítica de pandeo para secciones con altura de 4.6m

secciones con altura de 4.6 m						
Sección de la columna	Pe (FEM) kN	Pe (DSM) kN		% error		Pe(DSM)com alma Pe(FEM)
		Sin alma	con alma	sin alma	sin alma	
MW-1.6-B1	73.20	169.92	42.98	-132.13	41.29	0.59
MW-1.8-B1	82.39	191.16	48.35	-132.01	41.32	0.59
MW-2.0-B1	91.71	212.40	53.72	-131.60	41.42	0.59
HW-2.0-B1	154.08	253.99	122.42	-64.85	20.54	0.79
HW-2.25-B1	172.16	291.89	141.21	-69.54	17.98	0.82
HW-2.5-B1	190.65	317.49	153.03	-66.53	19.74	0.80
Média						0.70
Coeficiente de Variación						15.36

Tabla 4. Carga crítica de pandeo para secciones con altura de 6.2m

secciones con altura de 6.2 m						
Sección da columna	Pe (FEM) kN	Pe (DSM) kN		% error		DSM com alma FEM
		Sin alma	Con alma	Sin alma	Sin alma	
MW-1.6-B1	53.89	169.92	23.71	-215.30	56.01	0.44
MW-1.8-B1	60.31	191.16	26.67	-216.95	55.78	0.44
MW-2.0-B1	66.73	212.40	29.63	-218.31	55.59	0.44
HW-2.0-B1	123.31	253.99	67.56	-105.97	45.21	0.55
HW-2.25-B1	136.93	291.89	77.93	-113.16	43.09	0.57
HW-2.5-B1	150.70	317.49	84.45	-110.67	43.96	0.56
Promedio						0.50
Coeficiente de Variación						12.06

A partir de las tablas 2, 3 y 4, se observa que la proporción de DSM con orificio para FEM muestra menor variación para la misma altura del cuadro. El promedio de esas proporciones, por ejemplo, R fué trazada en relación a la altura del cuadro correspondiente (digamos R) (Consulte la Figura 5). A partir del gráfico antes presentado en figura 5, obtenemos la siguiente ecuación para cuadro con refuerzo tipo B1,

$$R = -0.1241 \times \text{Altura del cuadro} + 1.2694 \quad (1)$$

Donde R es el factor de relación promedio, eso es, la relación de resistencia por FEM con la resistencia por DSM con abertura. Usando esta relación y la resistencia del cuadro calculada por

el DSM con la abertura, podemos descubrir la carga crítica de pandeo para cualquier altura de cuadro con tipo de refuerzo B1.

La Tabla 5 representa valores de FEM y valores de DSM con factor de modificación para cuadros con tipo de refuerzo B1, lo que deja claro que el factor R obtenido de la ecuación (1) cuando es aplicado al valor de DSM, modifica ese valor aproximándose del valor de FEM.

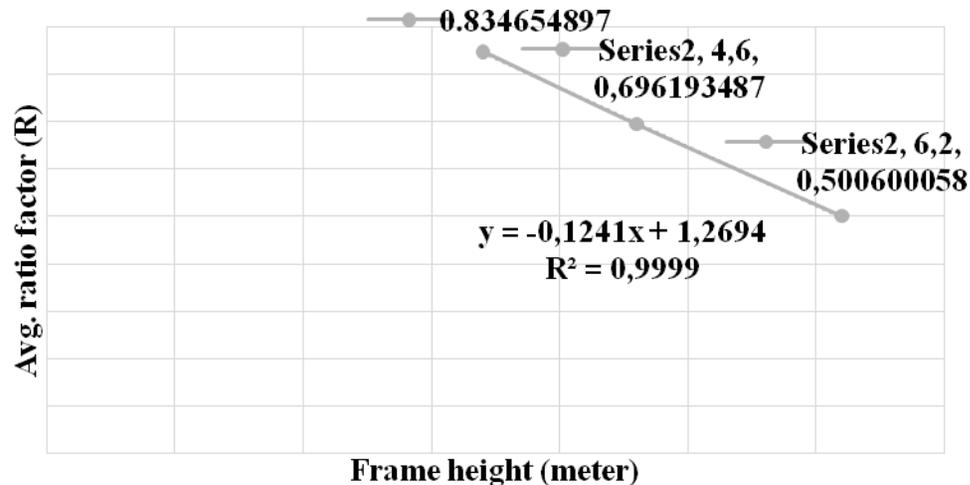


Figura 5. Altura de la sección vs. Factor promedio

Tabla 5. Comparación de los resultados DSM con FEM para secciones con apoyo B1

Altura de la sección (m)	Tipo de sección	Resistencia utilizando FEM para la sección tipo B1 (kN)	Resistencia utilizando ecuaciones de DSM (kN)	Resistencia obtenida por la ecuación desarrollada (kN)	FEM		
					resistência pela equação DSM	resistência pela equação desenvolvida	
3.1	MW-1.6	112.04	94.711	107.06	0.85	1.05	
3.1	MW-1.8	151.15	106.55	120.44	0.70	1.26	
3.1	MW-2.0	182.29	118.389	133.82	0.65	1.36	
3.1	HW-2.0	236.20	228.318	258.08	0.97	0.92	
3.1	HW-2.25	268.65	262.892	297.16	0.98	0.90	
3.1	HW-2.5	301.63	285.397	322.60	0.95	0.94	
4.6	MW-1.6	73.20	42.978	61.53	0.59	1.19	
4.6	MW-1.8	82.39	48.351	69.22	0.59	1.19	
4.6	MW-2.0	91.71	53.723	76.91	0.59	1.19	
4.6	HW-2.0	154.08	122.421	175.25	0.79	0.88	
4.6	HW-2.25	172.16	141.207	202.15	0.82	0.85	
4.6	HW-2.5	190.65	153.027	219.07	0.80	0.87	
6.2	MW-1.6	53.89	23.707	47.42	0.44	1.14	
6.2	MW-1.8	60.31	26.67	53.34	0.44	1.13	
6.2	MW-2.0	66.73	29.634	59.27	0.44	1.13	
6.2	HW-2.0	123.31	67.563	135.13	0.55	0.91	
6.2	HW-2.25	136.93	77.93	155.87	0.57	0.88	
6.2	HW-2.5	150.70	84.453	168.91	0.56	0.89	
Média							1.04
Coeficiente de Variación.							15.15

La Tabla 6 representa valores de FEM y valores de DSM con factor de multiplicación para cuadros con tipo de refuerzo B2 (para los cuales los resultados y análisis no son presentados en este artículo), lo que deja claro que el factor de multiplicación obtenido de la ecuación para el tipo de refuerzo B2 cuando es aplicado al valor de DSM modifica ese valor aproximándolo del valor FEM.

Tabla 6. Comparación de los resultados del DSM con el FEM para el cuadro con refuerzo B2

Altura de la sección (m)	Tipo de sección	Resistencia utilizando FEM para la sección tipo B2	Resistencia utilizando ecuaciones de DSM (kN)	Resistencia obtenida para la ecuación desarrollada (kN)	FEM	FEM
					resistência pela equação DSM	resistência pela equação desenvolvida
3.1	MW-1.6	125.00	94.711	126.33	0.76	0.99
3.1	MW-1.8	160.74	106.55	142.12	0.66	1.13
3.1	MW-2.0	196.81	118.389	157.91	0.60	1.25
3.1	HW-2.0	269.00	228.318	304.53	0.85	0.88
3.1	HW-2.25	304.40	262.892	350.65	0.86	0.87
3.1	HW-2.5	340.12	285.397	380.66	0.84	0.89
4.6	MW-1.6	88.66	42.978	72.60	0.48	1.22
4.6	MW-1.8	99.56	48.351	81.68	0.49	1.22
4.6	MW-2.0	110.38	53.723	90.75	0.49	1.22
4.6	HW-2.0	194.04	122.421	206.80	0.63	0.94
4.6	HW-2.25	236.21	141.207	238.53	0.60	0.99
4.6	HW-2.5	215.21	153.027	258.50	0.71	0.83
6.2	MW-1.6	61.94	23.707	55.95	0.38	1.11
6.2	MW-1.8	69.45	26.67	62.94	0.38	1.10
6.2	MW-2.0	76.92	29.634	69.94	0.39	1.10
6.2	HW-2.0	154.61	67.563	159.46	0.44	0.97
6.2	HW-2.25	171.96	77.93	183.92	0.45	0.93
6.2	HW-2.5	189.13	84.453	199.32	0.45	0.95
Promedio						0.13
Coeficiente de Variación						12.94

Al usar los respectivos factores de multiplicación R, la carga de pandeo para algunas alturas fue calculada y mostrada en la tabla 7, para ambos tipos de refuerzos B1 y B2 {Al contrario del tipo de cuadro B1 (Tablas 2 a 5), resultados detallados y análisis para el tipo de refuerzo B2 no son presentados en este documento}.

Tabla 7. Fuerza de pandeo de los cuadros para otras alturas.

Tipo de sección	Altura de la sección (m)	Resistencia utilizando ecuaciones de DSM (kN)	Resistencia obtenida por la ecuación desarrollada por sección (kN)	
			Con refuerzo tipo B1	Con refuerzo tipo B2
MW-1.6	3.8	63	78.97	93.18
MW-1.8	3.8	70.87	88.83	104.82
MW-2.0	3.8	78.75	98.71	116.47
HW-2.0	3.8	175.27	219.69	259.23
HW-2.25	3.8	202.01	253.20	298.78

HW-2.5	3.8	219.09	274.61	324.04
MW-1.6	5.3	32.36	52.90	62.43
MW-1.8	5.3	36.41	59.53	70.24
MW-2.0	5.3	40.46	66.15	78.05
HW-2.0	5.3	92.19	150.72	177.85
HW-2.25	5.3	106.34	173.85	205.15
HW-2.5	5.3	115.24	188.40	222.31
MW-1.6	6.8	19.65	46.18	54.49
MW-1.8	6.8	22.11	51.96	61.31
MW-2.0	6.8	24.57	57.74	68.13
HW-2.0	6.8	55.98	131.56	155.24
HW-2.25	6.8	64.57	151.74	179.06
HW-2.5	6.8	69.87	164.20	193.75

## 5. CONCLUSIONES

1. El objetivo principal de la investigación fue verificar si el DSM desarrollado por Moen es aplicable a cuadros CFS bidimensionales o no, y en caso contrario, sugerir modificaciones apropiadas del DSM existente. En consecuencia, los dos cuadros dimensionales CFS estudiados por K. M. Bajoria, K. K. Sangle y R. S.
2. Talicotti, 2011, en el IITB Mumbai, fue utilizado para validación del modelo FEA. Las capacidades de carga del mismo modelo con la misma altura, así como con algunas alturas diferentes, fueron entonces calculadas usando el software FEM, bien como las fórmulas DSM (software Cufsum). Todos esos valores FEM y DSM tabulados en tablas 2, 3, 4 fueron analizados gráficamente (Figura 5) para obtener una ecuación R del factor de multiplicación (1).
3. Este factor de multiplicación, investigación de este artículo, que cuando se aplica al valor DSM obtenido para el cuadro de cualquier altura, ofrece capacidad de carga (valor FEM) correcta de aquel cuadro con una precisión de +/- 20%. (Tabla 5 y 6).
4. Aplicando el factor de corrección encontrado en este documento las fórmulas DSM, la capacidad de carga para el cuadro de cualquier altura puede ser calculada en vez de realizar FEA riguroso y tedioso.

## 5. REFERENCIAS

### Research Papers from Journals

- Bajoria, K. M., Talikoti, R. S. (2006), “*Determination of flexibility of beam-to-column connectors used in thin walled cold-formed marco de acero pallet racking systems*”, Journal of Thin-Walled Structures, Vol. 44, Pages 372-380.
- Bajoria, K. M. Sangle K. K., Talikoti, R. S. (2011), “*Stability and Dynamic Analysis of Cold-Formed Storage Rack Structures with Semirigid Connections*”, Journal of Thin-Walled Structures, Vol. 44, Pages 372-380.
- Bogdan, M. Put, Yong-Lin Pi, N. S. Trahair, Member, ASCE (1999). “*Lateral Buckling Tests on Cold-Formed Channel Beams*” J. Struct. Eng. 1999.125:532-539.
- Bogdan M. Put, Yong-Lin Pi, N. S. Trahair, Member, ASCE (1999). “*Bending and Torsion of Cold-Formed Channel Beams*”, J. Struct. Eng.125:504-546; 1999.
- Ellifrit D., Sputo T., Haynes J. (1991), *Flexural strength and deflections of discretely braced cold formed marco de acero channel and zee sections*. Project report, American Iron and Marco de acero Institute.

- Ellifrit D. et al. (1992), *Flexural capacity of discretely braced C's and Z's*. In: Yu W-W, LaBoube RA, editors. Proceedings of the Eleventh International Specialty Conference on Cold-Formed Marco de acero Structures. St Louis, MO: Department of Civil Engineering, University of Missouri — Rolla, 108–29.
- Ellifrit D., Glover B., Hren J. (1997), *Distortional buckling of channels and zees not attached to sheathing*. Report for the American Iron and Marco de acero Institute.
- Moen, C. D. (2008), "*Direct Strength Design for Cold-Formed Marco de acero Members with Perforations*". Ph.D. Thesis, Johns Hopkins University, Baltimore.
- Moen, C. D., Schafer B. W. (2011), "*Direct strength design method for design of cold formed column with holes*", Journal of Structural Engineering, Vol. 137, No. 5, May 1, 2011 ©ASCE.
- Pi, Y. L., Trahair N. S. (1994), *Nonlinear inelastic analysis of marco de acero beam-columns. I: Theory*. Journal of Structural Engineering, 120(7):2041–61; ASCE.
- Pi, Y. L., Trahair N. S. (1994) *Nonlinear inelastic analysis of marco de acero beam-columns. II: Applications*. Journal of Structural Engineering, ASC; 120(7):2062–85; ASCE.
- Put B. M., Pi Y-L, Trahair N. S. (1998) *Lateral buckling tests on cold-formed channel beams*. Research report no. R767, Center for Advanced Structural Engineering, Department of Civil Engineering, the University of Sydney, Australia.
- Schafer, B. W. (2006) "*Direct Strength Method Design Guide*", American Iron and Marco de acero Institute, Washington, D.C. 171 pages.
- Schafer B. W., Moen C. D. (2010), "*Extending Direct Design to Cold Formed Marco de acero Beams with Holes*". Twentieth International Specialty Conference on Cold-Formed Marco de acero Structures St. Louis, Missouri, USA.
- Schafer B. W., (2006) "*Review: The Direct Strength Method of Cold Formed Marco de acero Member*" Stability and Ductility of Marco de acero Structures. Lisbon, Portugal.
- Thombare C. N., Sangle K. K. And Mohitkar V. M. (2016) *Nonlinear buckling analysis of 2D cold formed storage simple cross aisle frames*. Journal of building Engineering, Vol 7(2016), 12-22.
- Yu C., Schafer B. W. (2003), *Local buckling tests on cold-formed marco de acero beams*. Journal of Structural Engineering; 129(12):1596–606.

### **Books**

Yu, W.W. Cold-Formed Marco de acero Design. John Wiley & Sons, Inc; 2000.

### **Standards**

American Iron and Marco de acero Institute (1996, AISI Specification for the Design of Cold-Formed Marco de acero Structural Members. American Iron and Marco de acero Institute. Washington, D.C.;

AS 4100 Australian Standard Marco de acero Structures, (Standards Association of Australia).

RMI, Specification for the design, testing and utilization of industrial storage racks, Rack Manufacturers Institute, 2008.

North American Specification (2004), "*Appendix 1: Design of Cold-Formed Marco de acero Structural Members Using the Direct Strength Method*." Supplement to the North American Specification for the Design of Cold-Formed Marco de acero Structures. American Iron and Marco de acero Institute, Washington, DC; 2004.

### **Softwares.**

Appropriate commercial software for FEM.

CUFSM version 4.05 – A general purpose cold formed marco de acero component design software based on North American Standards