

DESARROLLO DE ALGORITMO Y SOFTWARE DE CÁLCULO PARA CONEXIONES A MOMENTO EN ESTRUCTURAS DE ACERO USANDO PLACA DE EXTREMO

Jorge O. Sanero (1); Luciano Filipuzzi (2); Arturo M. Cassano (3)

(1) Ing. en Construcciones, Cátedra de Estructuras Especiales

(2) Ing. Civil, Becario de Investigación, programa BINID

(3) Ing. en Construcciones, Cátedra de Construcciones Metálicas

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional Paraná - Entre Ríos, Argentina

E-mail: ing.sanero@gmail.com

RESUMEN

Actualmente, las conexiones rígidas (FR) con placa de extremo resistente a momento, del tipo “totalmente restringidas”, se presentan como una buena alternativa constructiva por su relativo bajo costo y facilidad de fabricación y montaje. Para el diseño de este tipo de uniones, es posible encontrar diversos métodos que van desde la metodología clásica de cálculo (método rígido usado generalmente en nuestro medio, fuertemente conservador) a otras más modernas, como la publicada por el *American Institute of Steel Construction*, basada en el equilibrio por líneas de fluencia. En este trabajo, se muestra el software de cálculo EPDS1, desarrollado para las conexiones tipo FR, en el marco de un proyecto de I + D, basado en la metodología de cálculo de líneas de fluencia.

Se hace, primeramente, una reseña sobre el algoritmo utilizado, luego se muestra un esquema simplificado del funcionamiento del programa de cálculo y por último es presentado un ejemplo numérico calculado usando el software EPDS1 y la corroboración usando el Método de los Elementos Finitos. Las conclusiones focalizan en las bondades y precisión del método utilizado en el software y se proyectan las actividades de ampliación del rango de uso del mismo con otras configuraciones usuales.

ABSTRACT

At present, fully restricted (FR) end-plate moment connections in steel structures, are presented as a good constructive alternative due to its low cost and ease of implementation. In these connections type design process, is possible to find various calculation methods, ranging from the classic analysis methodology (rigid method generally used in our environment, strongly conservative) to some more modern ones, as the published by the American Institute of Steel Construction, based on yield lines equilibrium methodology. In this paper, we show the calculation software EPDS1, developed for FR connections, under an R & D project, based on the yield lines calculation method. Is made, at first, a simple review of the applied algorithm, then is shown a simplified working diagram of the software, and finally a numerical example is presented using the EPDS1 software and a Finite Element Method correlation. Conclusions focus on the benefits and accuracy of the used method and future activities to extend the range of use with other common configurations.

INTRODUCCIÓN

Las conexiones a momento totalmente restringidas (FR) son empleadas para materializar las uniones entre los elementos de estructuras metálicas aporricadas o continuas que deben realizar una transmisión o distribución del momento flector.

Dentro de este tipo de uniones se encuentran las denominadas conexiones a momento con placa de extremo (end-plate moment connections). Las mismas consisten en una chapa que soldada perpendicularmente al eje axial de la viga, permite ser abulonada a otra viga (con idéntica chapa de extremo) o a una columna. Este tipo de conexiones, según la configuración explícita de la placa, clasificarse en conexiones de placa al ras (flush end-plate) y en conexiones de placa extendida con y sin rigidizador (extended end-plate).

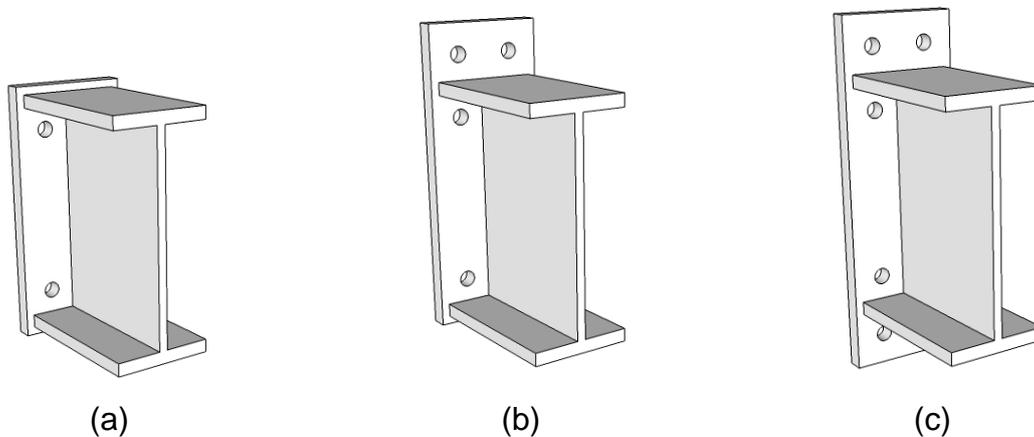


Figura 1. (a) placa enrasada, (b) extendida a un lado, (c) extendida a ambos lados.

La unión tipo placa enrasada es apropiada para situaciones en las cuales el momento flector es reducido, como es el caso de estructuras sometidas a la acción de fuerzas horizontales de poca importancia o en zonas cercanas a puntos de inflexión. Las conexiones de placa extendida, debido a su mayor rigidez, son empleadas usualmente en las uniones viga-columna. Su utilización data de la década del 60 y muchas han sido las investigaciones en busca de un método de diseño confiable, que sea capaz de predecir el complejo comportamiento estructural de este tipo de conexión, para diseños equilibrados que no sean excesivamente conservadores.

Un aspecto muy importante a tener en cuenta en este tipo de enlace es su rigidez, puesto que, giros relativos entre elementos conectados darían origen a deformaciones y esfuerzos distintos a los obtenidos idealizando la construcción como una estructura continua con nudos rígidos, pudiéndose alcanzar valores de deformaciones o esfuerzos inadmisibles.

Dentro de los modernos procedimientos de diseño encontramos el publicado por el AISC (Murray y Shoemaker, 2002, 2003) ^[1]. Esta metodología se basa en la aplicación de la teoría de líneas de fluencia en la placa y la predicción de las fuerzas desarrolladas en los bulones teniendo en cuenta los efectos de palanca mediante una modificación al método propuesto por Kennedy (1981) ^[2].

Tanto la norma original AISC-LRFD ^{[3],[4]}, como el CIRSOC 301-EL, aceptan que una conexión es de tipo totalmente restringida (FR) si para el 90% del momento de empotramiento perfecto MF, el extremo conectado no gira más del 10% del propio de la misma viga simplemente apoyada. Salmon y Johnson (1980) ^[5], tanto como Bjorhovde (1987, 1990) ^{[6],[7]} realizaron correlaciones a fin de evaluar la rigidez de este tipo de conexiones, encontrando que estas uniones a momento pueden utilizarse hasta el 80% de su capacidad última en el caso de las conexiones tipo rasante (flush) y hasta un 100% de su capacidad en el caso de las la conexiones de placa extendida, es por esto que el método de diseño multiplica los momentos Mu por un coeficiente $\gamma_r=1.25$ en el caso de las conexiones rasantes (flush) y por $\gamma_r=1$ en el caso de las de placa extendida.

En función a pruebas realizadas, Borgsmiller y Murray (1995) ^[8] determinaron que el fenómeno de palanqueo cobra importancia cuando el momento en la placa supera el 90% del momento de plastificación (0.90 Mpl). Si el esfuerzo resultante es menor que este valor, la placa se comporta como una placa gruesa y la acción de palanca se puede despreciar en los pernos.

Una vez que el momento aplicado cruza el umbral de 0.90 Mpl, la placa se puede aproximar a una placa delgada y la acción máxima palanca se incorpora en el análisis de los bulones. Así, utilizando la metodología de análisis propuesta por el AISC se tienen dos procedimientos de diseño:

- Procedimiento 1 (*placa gruesa, sin efecto de palanqueo en los bulones*).
- Procedimiento 2 (*placa delgada, mayor tamaño de bulones, se considera efecto de palanqueo en el cálculo de los mismos*).

Este método de diseño como muchos otros implica un proceso de tanteos que puede ser fácilmente programado posibilitando al proyectista realizar todos los cálculos y verificaciones con una importante economía de tiempo.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN

El software está desarrollado en Visual Basic, lo cual permitió desarrollar una interfaz gráfica sencilla e intuitiva. En un principio se han incluido 4 conexiones tipo rasante (flush) y cinco conexiones del tipo placa extendida, los cuales son mostrados en las figuras 5 y 6.

Para el ingreso de datos se parte de una pantalla INICIAL (figura 2) en la cual se selecciona el tipo de unión a utilizar y el procedimientos de cálculo, chapa “gruesa” sin palanqueo o chapa “fina” con cálculo de palanqueo y bulones de mayor tamaño.

Posteriormente en una nueva ventana se ingresan los datos de cada uno de los elementos que componen la unión:

1. pantalla PERFIL: permite se indicar el tipo y material del perfil.
2. pantalla PLACA: permite ingresar el tipo de acero a emplear en la placa como así también la configuración geométrica (distancias entre bulones, distancia de los bulones referidas al borde del ala del perfil, etc).
3. pantalla BULON: en esta pantalla se indica el tipo de bulón a utilizar, el “tipo de ajuste”. Se calcula automáticamente Tb: pretensado (tabla J.3-1, CIRSOC 301-

EL) o “ajuste sin juego” (porcentajes de los valores de la misma tabla)

4. pantalla SOLICITACIONES: se ingresan las solicitaciones. Se han previsto un máximo de tres estado.

5. pantalla RESULTADOS: esta pantalla muestra en forma sintética el resultado *del cálculo. Desde esta ventana es posible generar un archivo de texto con todos los detalles del cálculo.*

El algoritmo de cálculo es el indicado en las figuras 3 y 4, el cual es mostrado en forma sintética por una cuestión de espacio.

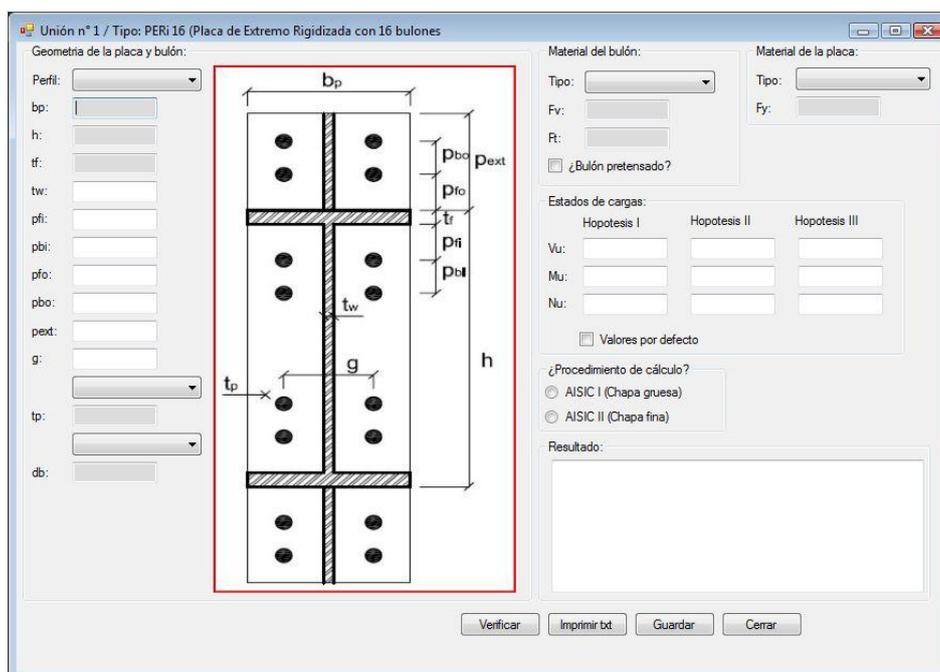
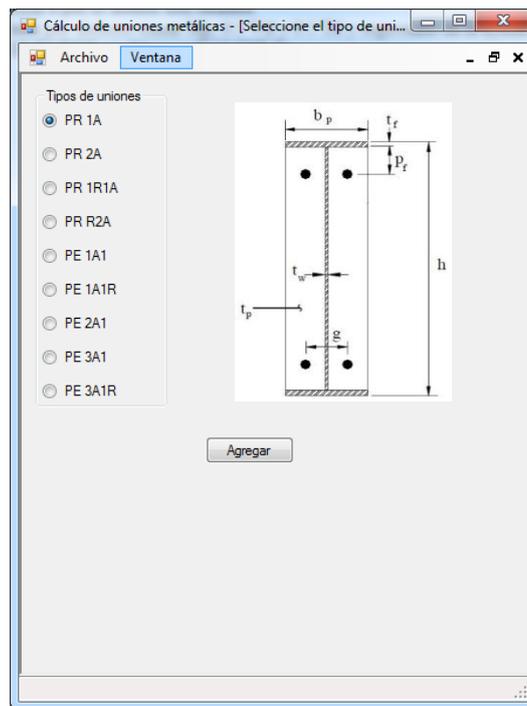


Figura 2. Ventana principal y fichas de ingreso de datos

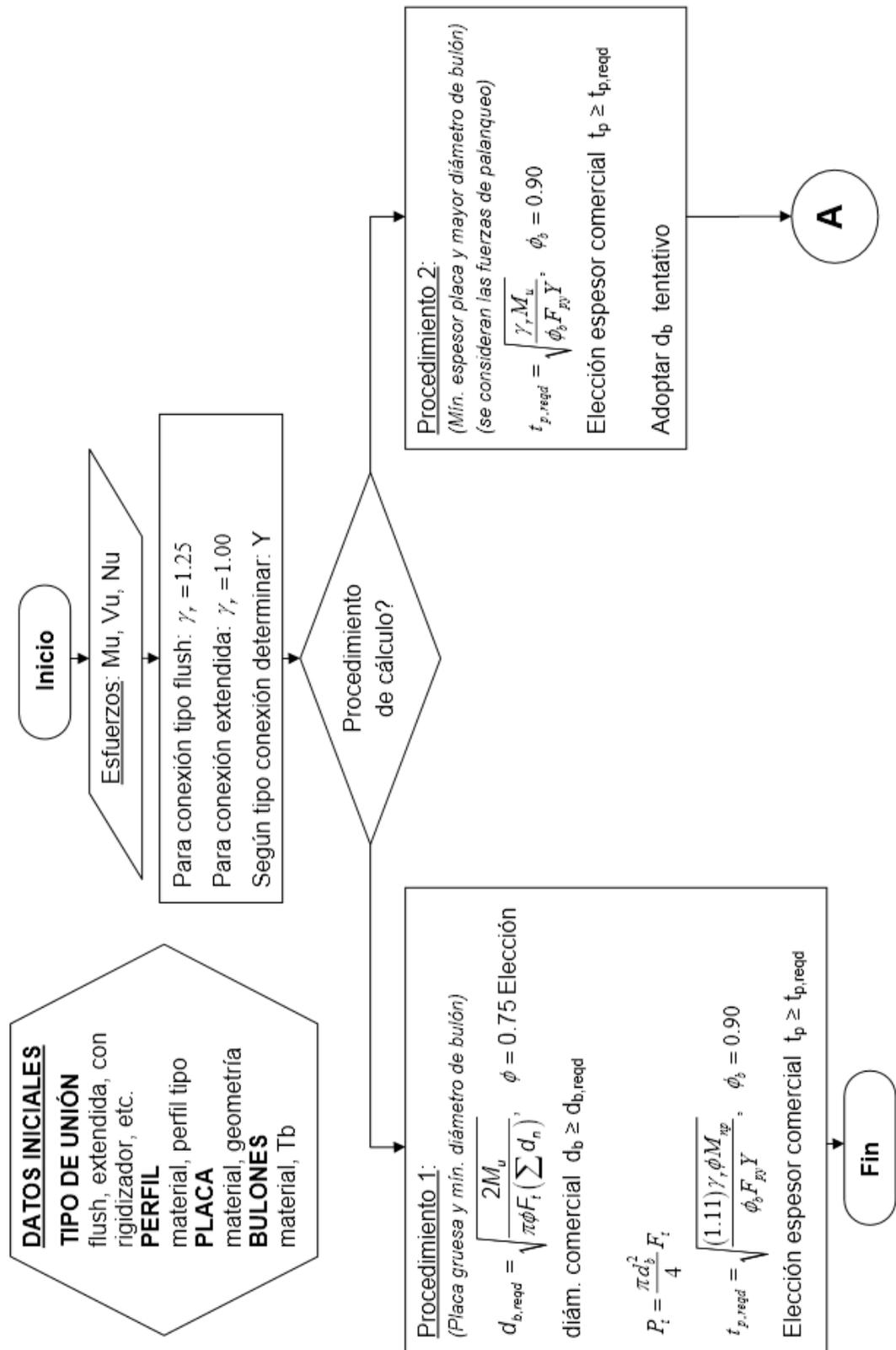


Figura 3. Diagrama de flujo procedimiento de diseño para conexiones FR

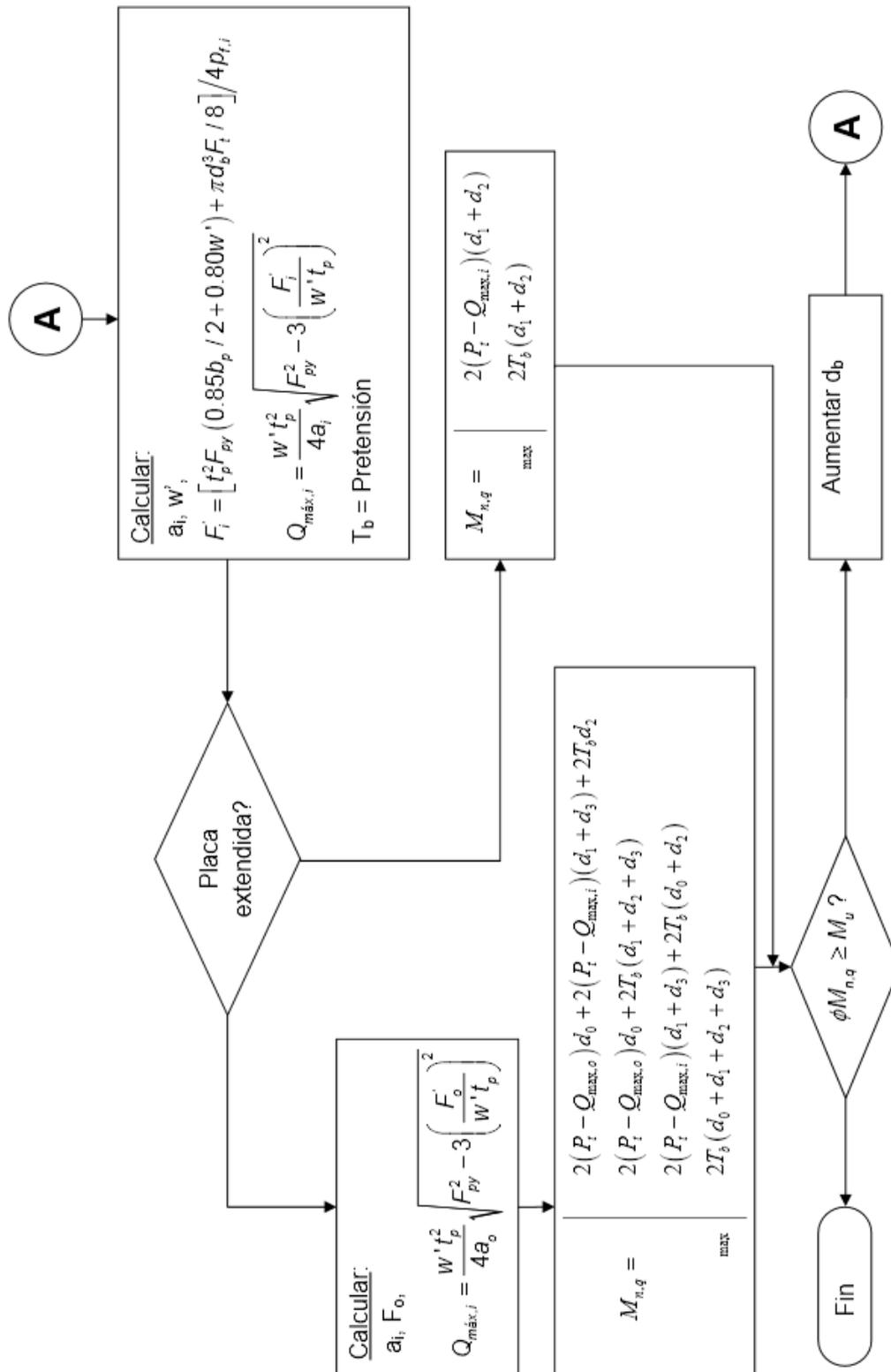


Figura 4. Diagrama de flujo procedimiento de diseño para conexiones FR

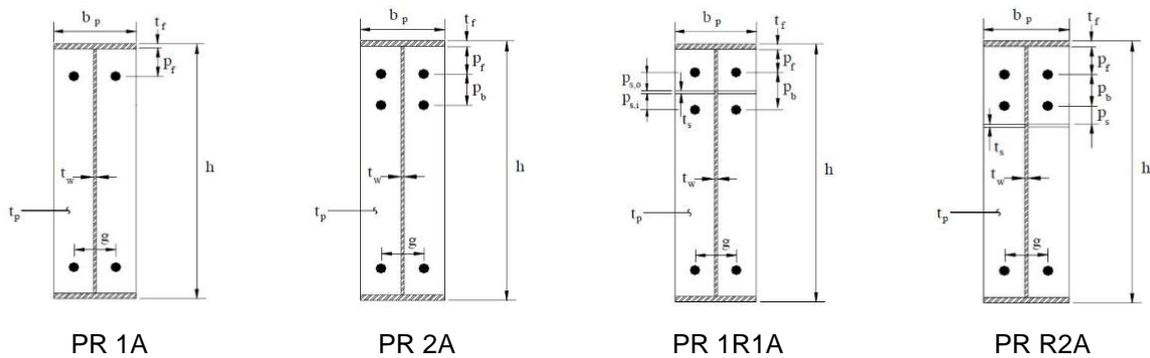


Figura 5. Configuraciones grupo de conexiones tipo rasante (flush)

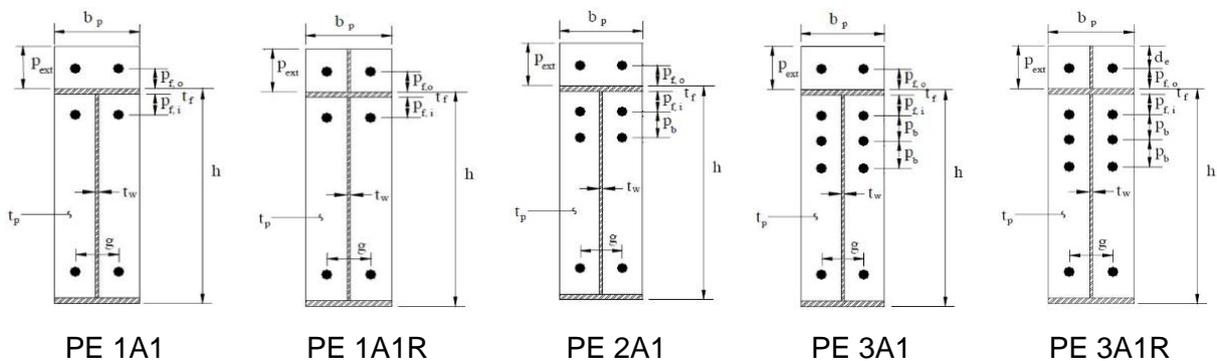


Figura 6. Configuraciones grupo de conexiones tipo placa extendida

EJEMPLO NUMÉRICO Y CORROBORACIÓN CON MEF

Seguidamente se comparan los resultados obtenidos mediante el software desarrollado con los correspondientes a un análisis no lineal mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF). La unión estudiada es la mostrada en la figura 7, consistente en un perfil IPN 300, diseñada para resistir un momento $M_u=146$ kNm.

El material adoptado tanto para el perfil como para la placa es de acero F24. Los bulones son de alta resistencia tipo A325 con ajuste sin juego.

Para el diseño de la unión se optó por el **procedimiento 2** (placa delgada, se considera efecto de palanqueo en el cálculo de los bulones).

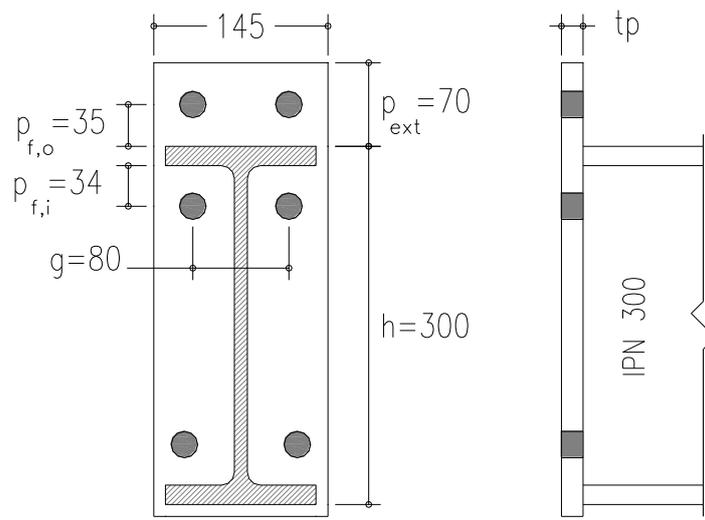


Figura 7. Geometría placa de extremo analizada

A continuación se transcribe el archivo de texto generado por del software en donde pueden apreciarse tanto los datos de entrada como la salida de resultados.

UNION N° 1 TIPO PE 1A1

Cálculo placas de extremos en conexiones a momento según el:

Steel Design Guide Series 16 -AISC-

Fecha: 20/05/2012 04:04:53 p.m.

ENTRADA

Material del perfil.

Fy[MPa]: 240.00 Tensión de fluencia.

Geometría del perfil.

d[mm]: 300.00 Altura.

df[mm]: 125.00 Ancho del ala.

tf[mm]: 16.20 Espesor del ala.

tw[mm]: 10.80 Espesor del alma.

Material de la placa.

Fy[MPa]: 240.00 Tensión de fluencia.

Geometría de la placa.

bp[mm]: 125.00 Ancho.

tf[mm]: 16.20 Espesor del ala.

h [mm]: 300.00 Altura perfil.

g [mm]: 80.00 Dist. horiz. entre bulones

pfi[mm]:	34.00	Dist. borde ala perfil a fila inf. de bulones.
pfo[mm]:	35.00	Dist. borde ala perfil a fila sup. de bulones.
pext[mm]:	70.00	Dist. borde ala perfil a borde de la placa.

Bulón.

Fv [MPa]:	330.00	Resistencia al corte.
Ft [MPa]:	620.00	Resistencia a tracción.
Tb [kN]:	172.00	Fuerza de pretensado (ajuste sin juego).

Solicitaciones.

Vu [kNm]:	262.44	Corte último.
Mu [kNm]:	146.00	Momento último.
Nu [kN]:	0.00	Esfuerzo normal último.

SALIDA

Procedimiento II: Se considera el efecto de palanqueo.

tp [mm]:	19.05	Espesor de placa s/cálculo.
Se adopta:	19.05 mm	
db [mm]:	22.23	Adoptado
Verificación:	OK	1.32

CÁLCULOS AUXILIARES

Cálculo del espesor de placa según el procedimiento II

s [mm]:	50.00
Y [mm]:	1862.99
Tp [mm]:	19.05 Espesor de placa según cálculo

Verificación del diámetro de bulón adoptado

Cálculo de la fuerza de palanqueo de los bulones inferiores

ai [mm]:	56.25
wpr [mm]:	38.38
Fipr [kN]:	73.50
Qmaxi [kN]:	10.31

Cálculo de la fuerza de palanqueo de los bulones superiores

ao [mm]:	34.72
wpr [mm]:	38.38
Fopr [kN]:	71.40

Q_{\max} [kN]: 17.20

Cálculo del momento de rotura de los bulones

P_t [kN]: 240.62

$f_i \text{Mom} P$ [kNm]: $\max(193.08 ; 171.94; 167.87; 146.73)$

$f_i \text{Mom} P > M_u$ ($193.08 > 146.00$)

El diametro d_b [mm]: 22.23 adoptado esta en BC

Para el estudio mediante el método de los elementos finitos (MEF) se utilizó el software ALGOR^[9], programa comercial disponible en la Facultad Regional Paraná. El análisis fue realizado utilizando elementos tipo placa (shell) de cuatro nodos, isoparmétricos, con formulación no lineal en el material de tipo “von Mises con endurecimiento isotrópico” y en la geometría “lagrangiano total”. Como se aprecia en la figura 8, fue modelada una parte de la viga y la placa correspondiente, colocando las fuerzas que generan el par flector en las alas, sobre una porción de sección de viga de mayor rigidez para lograr una correcta distribución de tensiones.

La interacción con el apoyo se realizó mediante elementos de contacto no lineal que presentan rigidez a compresión (simulando el ala de la columna) pero libera el nodo ante la presencia de tracción, permitiendo la separación de la placa del plano de apoyo. De esta forma es posible tener en cuenta el efecto del palanqueo (prying) para la determinación de las fuerzas en tornillos. El ancho de placa considerado fue el ancho real (ancho del perfil + 20mm=145mm).

Las resoluciones se llevaron hasta la plastificación total del perfil ($M_p=179\text{kNm}$).

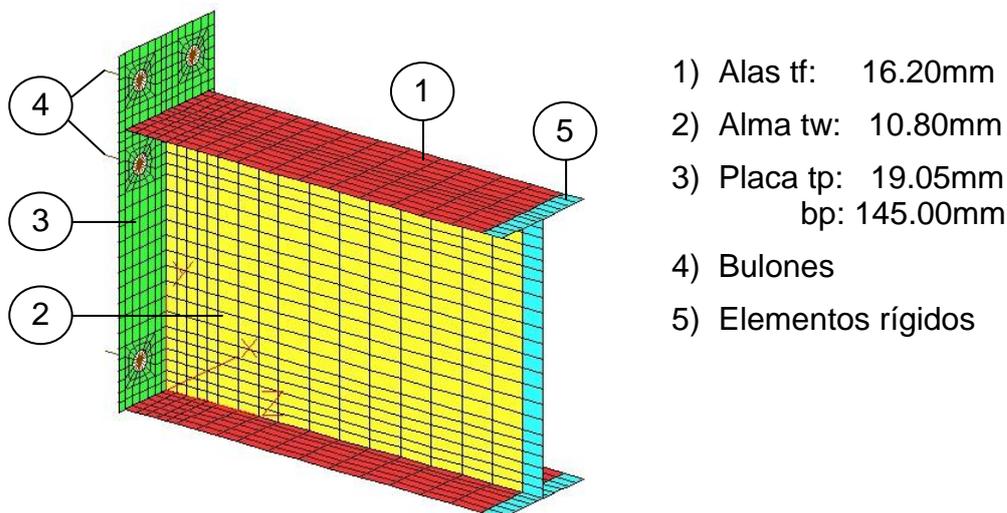


Figura 8. Modelo de elementos finitos

En figura 9, se ha representado el gráfico de la rigidez relativa. El giro θ se determinó dividiendo el desplazamiento del nodo ubicado en la intersección entre el ala superior del perfil, el alma y la placa de extremo por la altura del perfil.

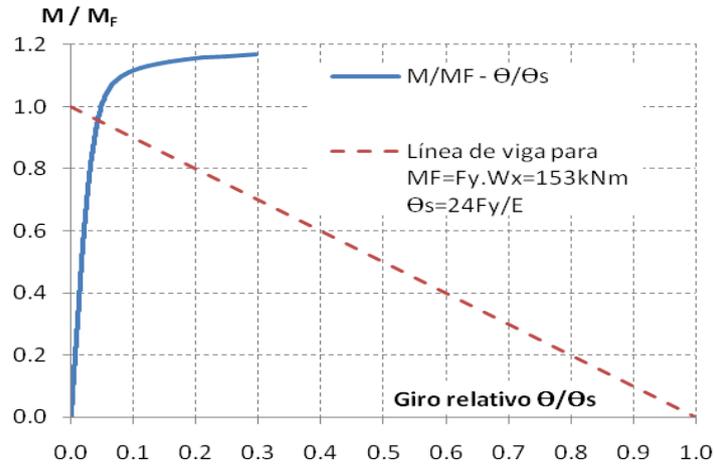


Figura 9. Evaluación de la rigidez de la conexión

Como puede verse el comportamiento corresponde a una conexión FR pues el giro relativo es menor al 10% en todo el rango de análisis, considerando MF como el momento de primera fluencia. En el gráfico M- θ , figura 10, se indican los momentos correspondientes a la formación de las distintas líneas de fluencia hasta llegar a la configuración de falla total en la placa. El punto (1) corresponde al momento que da origen a la primer línea de fluencia en la unión ala superior-placa de extremo, es en este punto donde comienza manifestarse el fenómeno de palanqueo. En la figura 11 puede observarse el estado tensional correspondiente. En el punto (2) se forman las líneas fluencia de la parte de placa que está por debajo del ala traccionada, en la figura 12 se muestra estado tensional. En el punto (3), forma la última línea de fluencia en la placa y las fuerzas de palanqueo alcanzan su máximo valor.

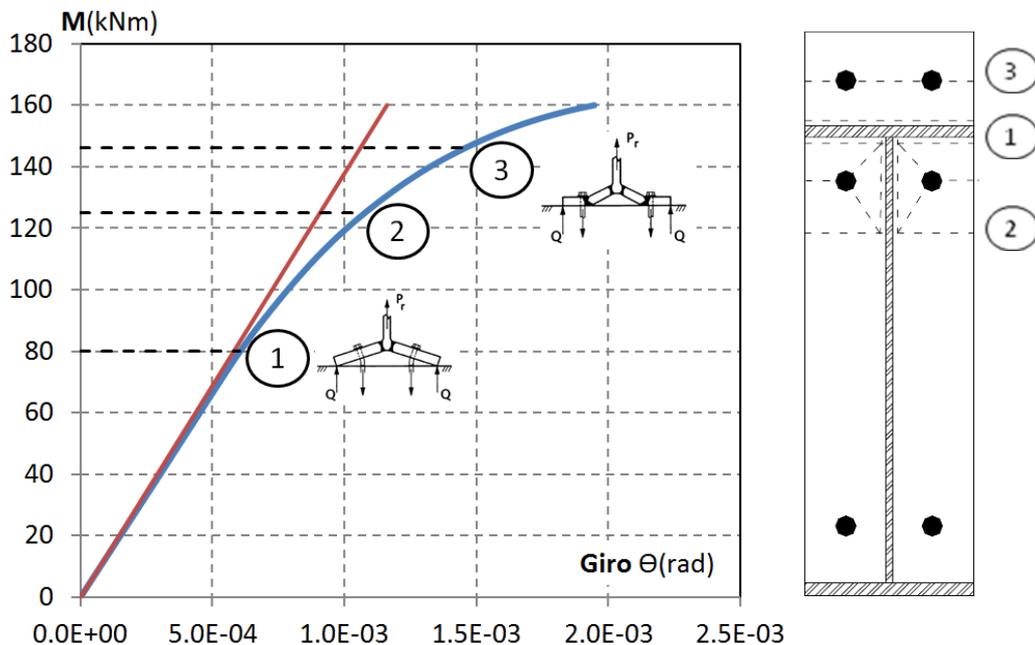


Figura 10. Relación M- θ

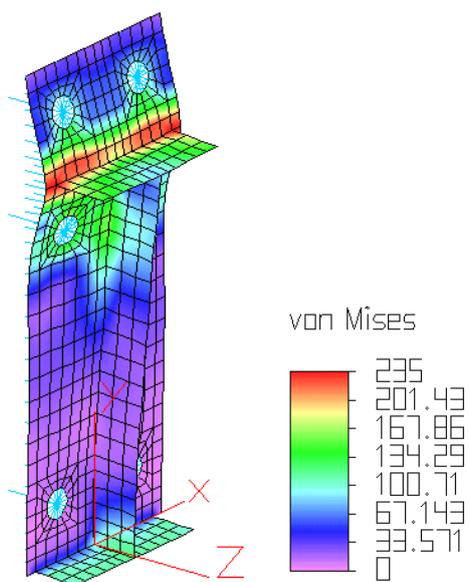


Figura 11. Estado tensional para $M=80\text{kNm}$ (punto 1)

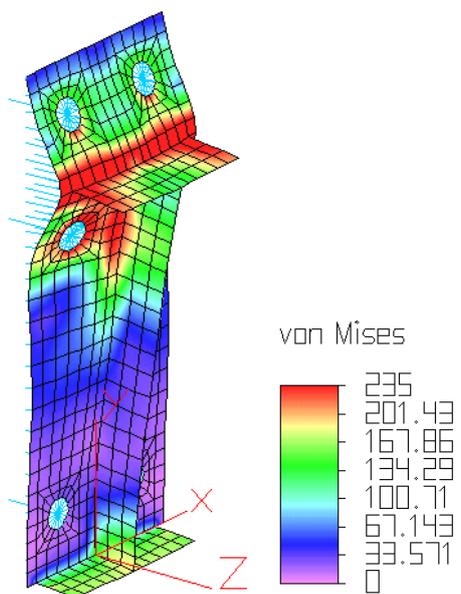


Figura 12. Estado tensional para $M=125\text{kNm}$ (punto 2)

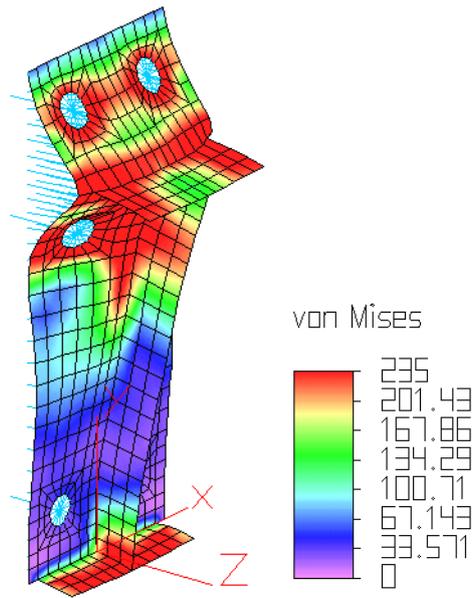


Figura 13. Estado tensional para $M=155\text{kNm}$ (punto 3)

En la tabla 1 se indican los valores de los esfuerzos en los bulones obtenidos del MEF y los calculados según el método de diseño 2. En la figura 14 se observa el gráfico con las fuerzas en bulones.

Posición	Método de diseño 2			MEF
	Fopr Fipr [kN]	Qmaxo Qmaxo [kN]	B [kN]	B [kN]
bulón sup.	71,40	17,20	88,60	66,8
bulón inf.	73,50	10,31	83,81	90,1

Tabla 1 – Fuerzas en bulones “B”

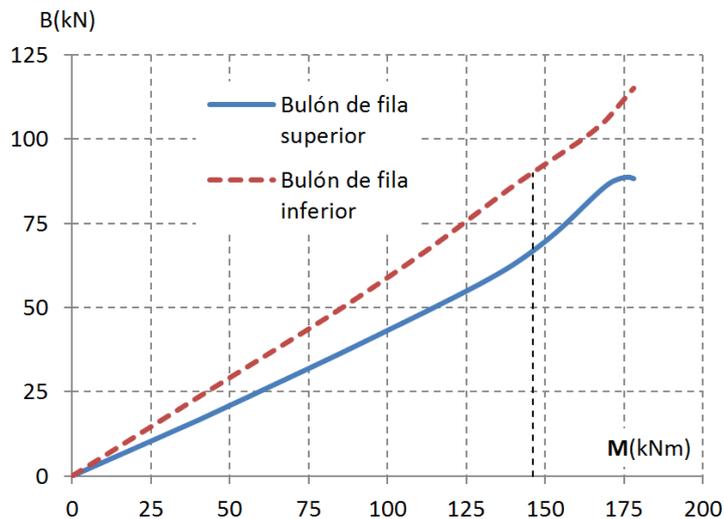


Figura 14. Evolución de las fuerzas en bulones, según el análisis MEF

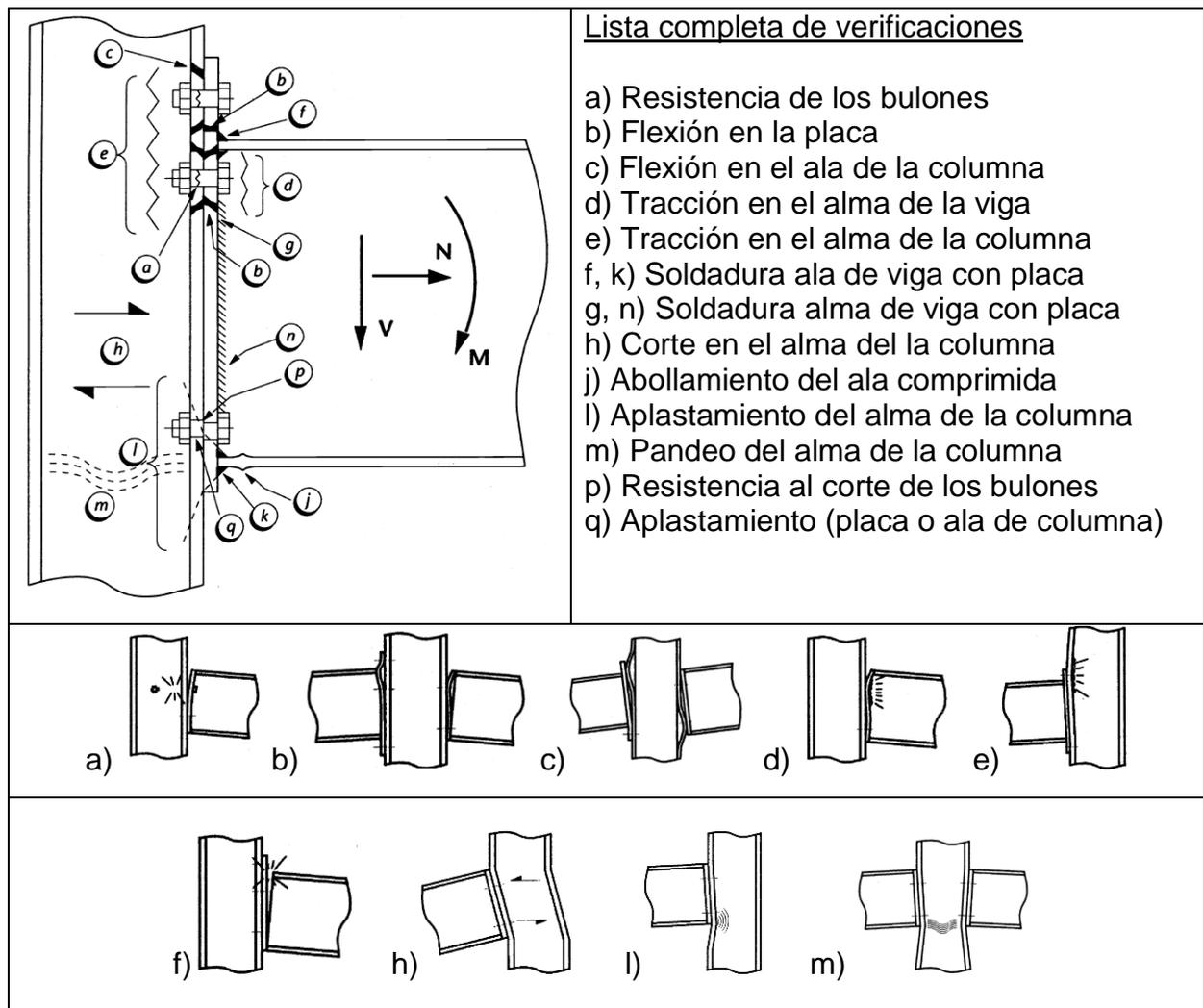


Figura 15. Verificaciones necesarias en conexiones de placa de extremo para configuraciones tipo *viga-columna*

CONCLUSIONES

Se ha presentado un programa de cálculo y dimensionado de conexiones tipo FR, basado en un moderno procedimiento de análisis que entrega resultados precisos y permite obtener diseños confiables pero sin excederse en conservadores incrementos de espesores de placas o diámetros de bulones. Su facilidad de empleo y programación lo hacen atractivo para ámbitos que escapan lo académico, proyectándose como una herramienta potente para el profesional dedicado al proyecto de estructuras metálicas. No obstante, al momento de la presentación de este trabajo, el software solo resuelve una parte del problema real. Efectivamente, únicamente se han analizado las cuestiones referentes a la flexión de la placa de extremo, las fuerzas en los bulones y la rigidez relativa al giro, debiéndose complementar al momento de considerarlo “apto” para su utilización libre, con otro tipo de verificaciones como las enumeradas en la figura 15. Estas verificaciones adicionales solo significan la aplicación de fórmulas y procedimientos bien conocidos y existentes en todas las normas vigentes y no representan más que el trabajo de programar cada paso. A esta tarea de completar las verificaciones necesarias se encuentra abocado el equipo de trabajo al momento de la presentación de esta contribución.

Colaboradores: Además de los autores explícitos del trabajo, colaboraron en diversas etapas de la investigación y desarrollo de esta metodología las siguientes personas: Ing. Hernán Barrera, Ing. Diego Siboldi, Ing. Patricia López, Ing. Daniel Friedrich, Ing. Susana Facendini, Sr. Fernando Menghi.

Agradecimientos: El presente trabajo se realizó con la ayuda económica de la UTN, proyecto 25 K016 y la participación, en la provisión de bulones y otros elementos para ensayos de Ferrenet CMS de la ciudad de Paraná. A ellos nuestro agradecimiento.

REFERENCIAS:

- [1]. Murray, T. M. , Lee Shoemaker, W, (2003) "Flush and Extended Multiple-Row Moment End-Plate Connections" AISC, Steel Design Guide No. 16.
- [2]. Kennedy, N.A., Vinnakota, S. and Sherbourne, A.N. (1981) "The Split-Tee Analogy in Bolted Splices and Beam-Column Connections", Proceedings of the International Conference on Joints in Structural Steelwork, 2.138-2.157.
- [3]. AISC, (1999-2005) Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [4]. AISC, (1989-2005) Allowable Stress Design Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL
- [5]. Salmon, C. and Johnson, J. (1980) Steel Structures, Design and Behavior, 2nd Ed., Harper & Row, New York, New York.
- [6]. Bjorhovde, R., Brozzetti, J. and Colson, A. (1987) "Classification of Connections," Connections in Steel Structures - Behaviour, Strength and Design, Elsevier Applied Science, 388-391.
- [7]. Bjorhovde, R., Colson, A. and Brozzetti, J. (1990) "Classification System for Beam-to-Column Connections," Journal of Structural Engineering, ASCE, 116(11), pp. 3059-3076.
- [8]. Borgsmiller, J. T. and Murray, T. M., (1995) "Simplified Method for the Design of Moment End-Plate Connections," Research Report CE/VPI-ST-95/19, Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, November, 1995.
- [9]. Algor Design Software. ALGOR Inc., Pistburg, USA, 2000.