UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Desarrollo de Hojas de Cálculo para el Diseño de Conexiones a Momento con Plancha Extrema por el Método de los Estados Límites (LRFD)

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR **Samuel J. OGLY SCHACHTER**
Eugenio E. QUIROGA BERRIZBEITIA

PROFESOR GUÍA **José G. Castillo**

FECHA **Octubre 2010**

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Desarrollo de Hojas de Cálculo para el Diseño de Conexiones a Momento con Plancha Extrema por el Método de los Estados Límites (LRFD)

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: ,,

JURADO EXAMINADOR

Firma:	Firma:	Firma:
Nombre: ……………………………	Nombre: ……………………………	Nombre: ……………………………

REALIZADO POR **Samuel J. OGLY SCHACHTER**
Eugenio E. QUIROGA BERRIZBEITIA

PROFESOR GUÍA **José G. Castillo**

FECHA **Octubre 2010**

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Católica Andrés Bello por ofrecernos durante cinco años las técnicas y habilidades necesarias para formarnos no sólo en el ámbito profesional, sino también en lo personal.

A nuestro tutor, José Gerardo Castillo, por su generosa entrega al brindarnos la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia en un marco de confianza, afecto y amistad, fundamentales para el logro de este trabajo.

A nuestros familiares a quienes les debemos nuestra carrera y este trabajo, por su apoyo incondicional durante todos estos años.

A todos nuestros amigos por su ayuda a lo largo de todo este tiempo.

A todos, ¡muchas gracias!

Samuel J. Ogly S.

Eugenio E. Quiroga B.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS VI

ÍNDICE DE TABLAS VIII

RESUMEN IX

NOTACIÓN Y UNIDADES X

INTRODUCCION 1

CAPÍTULO I (EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN) 3

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3
2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 4
   2.1 Objetivo General 4
   2.2 Objetivos Específicos 4
3. JUSTIFICACIÓN 4
4. ALCANCE Y LIMITACIONES 5
5. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN 7

CAPITULO II (MARCO METODOLÓGICO) 9

1. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN 9
2. FASES DE LA INVESTIGACIÓN 9
3. OPERACIONALIZACIÓN DE LOS OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 11

CAPITULO III (MARCO DE REFERENCIA CONCEPTUAL) 13

1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS CONEXIONES A MOMENTO CON PLANCHA EXTREMA 13
   1.1. Ventajas 13
   1.2. Desventajas 13
2. CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DISEÑO DE CONEXIONES A MOMENTO CON PLANCHA EXTREMA 14
   2.1 Momento de diseño de la conexión 17
   2.2 Análisis de la Línea de Cedencia 18
   2.3 Resistencia de los pernos 19
   2.4 Estados Límites a Verificar en el Diseño 23
   2.5 Detallado y Prácticas de Fabricación 24

3. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DETALLADO DE UNA CONEXIÓN A MOMENTO CON PLANCHA EXTREMA 26
3.1 Cálculo del momento de diseño en el ala de la columna M_{uc} 27
3.2 Selección de una de las tres configuraciones de conexiones a momento con plancha extrema (4E, 4ES, 8ES), y establecer valores preliminares para la geometría de la conexión $g, P_{fi}, P_{fo}, P_b, etc.$ 28
3.3 Cálculo del diámetro requerido de los pernos $d_{b\,req.}$ 28
3.4 Selección de un diámetro de perno de prueba d_b, mayor al obtenido en el paso anterior $d_{b\,req.}$, y cálculo del momento en el perno para que no existan fuerzas de apalancamiento M_{np} 29
3.5 Determinar el espesor de la plancha extrema requerido $t_{p\,req.}$ 29
3.6 Seleccionar un espesor de Plancha Extrema t_p mayor al espesor requerido .. 31
3.7 Calcular la fuerza mayorada en el ala de la viga 31
3.8 Verificación de la capacidad por cedencia al corte de la porción extendida de la plancha extrema (Sólo en conexiones de 4E) 31
3.9 Verificación de la capacidad por rotura en la sección neta de corte de la porción extendida de la plancha extrema (Sólo en conexiones 4E) 31
3.10 Si se está usando la conexión Extendida de 4 pernos Rigidizada (4ES) o la Extendida de 8 pernos Rigidizada (8ES), seleccionar el espesor del rigidizador de la plancha extrema t_s y diseñar las soldaduras entre el rigidizador y el ala de la viga, y entre el rigidizador y la plancha extrema 32
3.11 Verificación de la resistencia a la rotura por corte de la conexión 33
3.12 Verificación del aplastamiento en la plancha extrema y en el ala de la columna 33
3.13 Diseñar las soldaduras entre la plancha extrema y el ala y entre la plancha extrema y el alma 34
3.14 Verificación por cedencia a la flexión del ala de la columna 35
3.15 Si se requieren rigidizadores por cedencia a la flexión del ala de la columna, se debe determinar la fuerza en el rigidizador 39
3.16 Verificación de la resistencia a la cedencia del alma de la columna considerando una columna sin el alma rigidizada en las alas de la viga conectada 39
3.17 Verificación de la resistencia al pandeo del alma no rigidizada de la columna en el ala a compresión de la viga 40
3.18 Verificación de la resistencia al desgarramiento del alma no rigidizada de la columna en el ala a compresión de la viga 40
3.19 Resistencia requerida por corte en la zona de panel de la columna 41

3.20 Capacidad al corte de la zona de panel de la columna 42
3.21 Si se trabaja en zonas de alta sismicidad también debe verificarse el espesor mínimo del alma de la columna 44
3.22 Si en alguno de los estados límites previamente estudiados los rigidizadores transversales son necesarios, se calcula la resistencia requerida de los mismos 44
3.23 Si en los estado límites previamente estudiados (Paso 3.20 y 3.21) las planchas de refuerzo son necesarias, la resistencia requerida de las mismas será: 44
3.24 Diseño de los rigidizadores transversales.....44
3.24.1 Cálculo del área transversal mínima para el rigidizador transversal en cada ala.....45
3.24.2 Cálculo del ancho mínimo de cada rigidizador transversal 45
3.24.3 Cálculo del espesor mínimo de cada rigidizador transversal.....46
3.24.4 Profundidad del rigidizador 46
3.24.5 Cálculo del área transversal real del rigidizador.....47
3.24.6 Cálculo del tamaño de la soldadura 47
3.25 Diseño de las planchas de refuerzo 50
3.25.1 Altura y profundidad de las planchas de refuerzo 50
3.25.2 Espesor de la plancha de refuerzo.....51
3.25.3 Conexión de las plancha de refuerzo a lo largo de los bordes del ala de la columna.....51
3.25.4 Conexión de las planchas de refuerzo a lo largo de los bordes superior e inferior.....52

CAPÍTULO IV (DESARROLLO DE LAS HOJAS DE CÁLCULO) 55

1. GENERALIDADES Y REQUISITOS MÍNIMOS DEL SISTEMA 55
2. MANUAL DE USO DE LAS HOJAS DE CÁLCULO 55
2.1 Consideraciones Generales.....55
2.2 Datos Iniciales 61

CAPITULO V (VALIDACIÓN DE LAS HOJAS DE CÁLCULO).....63

1. GENERALIDADES.....63
2. DESARROLLO DE EJEMPLOS MANUALES 63
2.1. Ejemplo Conexión 4Ea.....63
2.2. Ejemplo Conexión 4Eb 78
2.3. Ejemplo Conexión 4ES 92

2.4 Ejemplo Conexión 8ES 96
CAPITULO VI (CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES) 111
1. CONCLUSIONES 111
2. RECOMENDACIONES 111

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 113

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. Conexión a momento con plancha extrema extendida de cuatro (4) pernos no rigidizada (4E).....6

Fig. 1.2. Conexión a momento con plancha extrema extendida de cuatro (4) pernos rigidizada (4ES) 6

Fig. 1.3. Conexión a momento con plancha extrema extendida de ocho (8) pernos rigidizada (8ES) 7

Fig. 2.1. Fases de la investigación.....11

Fig. 3.1. Conexión a momento con plancha extrema extendida de cuatro (4) pernos no rigidizada (4E).....14

Fig. 3.2. Conexión a momento con plancha extrema extendida de cuatro (4) pernos rigidizada (4ES) 15

Fig. 3.3. Conexión a momento con plancha extrema extendida de ocho (8) pernos rigidizada (8ES) 15

Fig. 3.4. Ubicación de la rótula plástica.....18

Fig. 3.5. Ubicación de la línea de cedencia en la pancha extrema.....19

Fig. 3.6. Estados del comportamiento de la plancha del modelo desarrollado por kennedy y otros en el año 1981. 20

Fig. 3.7. Momento estático en plancha gruesa. 22

Fig. 3.8. Geometría del rigidizador de plancha extrema. 25

Fig. 3.9. Parámetros geométricos generales de una conexión con plancha extrema. 27

Fig. 3.10. Parámetros geométricos generales y ubicación de la línea de cedencia en el ala de la columna en una conexión a momento con plancha extrema. 38

Fig. 3.11. Parámetros geométricos generales de un rigidizador transversal. 47

Fig.3.12. Conexión del rigidizador transversal con la zona de panel de la columna. 49

Fig.3.13. Detalle de juntas conformadas por una plancha de refuerzo y un par de rigidizadores transversales, soldadas lo largo de los bordes superior e inferior 53

Fig.3.14. Detalle de juntas conformadas por dos planchas de refuerzo y un par de rigidizadores transversales, soldadas lo largo de los bordes superior e inferior 54

Fig.4.1. Ejemplo selección del tipo de conexión e imagen respectiva 56
Fig. 4.2. Ejemplo introducir datos en la primera página 56
Fig. 4.3. Ejemplo introducir datos 57
Fig. 4.4. Ejemplo resultado de verificaciones 57
Fig. 4.5. Ejemplo verificaciones de diseño 58
Fig. 4.6. Ejemplo mensajes de recomendaciones 58
Fig. 4.7. Ejemplo comparación mensajes ocultos y activados 59
Fig. 4.8. Ejemplo comentarios 60
Fig. 4.9. Ejemplo comentarios 60
Fig. 5.1. Conexión a momento con plancha extrema extendida de cuatro (4) pernos no rigidizada (4E) 64
Fig.5.2. Conexión a momento con plancha extrema extendida de cuatro (4) pernos rigidizada (4ES) 92
Fig. 5.3. Conexión a momento con plancha extrema extendida de ocho (8) pernos rigidizada (8ES) 96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Operacionalización de los Objetivos 12
Tabla 3.1. Resistencia a la tracción de los pernos. 28
Tabla 3.2. Patrones de línea de cedencia en la plancha extrem. 30
Tabla 3.3. Resistencia al corte de los pernos. 33
Tabla 3.4. Patrones de la línea de cedencia en el ala de la columna. 36
Tabla 5.1. Datos básicos para el diseño de una conexión (4e).....64
Tabla 5.2. Comparación de resultados- diseño de una conexión (4e).....77
Tabla 5.3. Datos básicos para el diseño de una conexión (4e).....78
Tabla 5.4. Comparación de resultados- diseño de una conexión (4e).....91
Tabla 5.3. Datos básicos para el diseño de una conexión (4es) 93
Tabla 5.6. Comparación de resultados- diseño de una conexión (4es) 95
Tabla 5.7. Datos básicos para el diseño de una conexión (8es) 97
Tabla 5.8. Comparación de resultados- diseño de una conexión (8es) 110

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Desarrollo de Hojas de Cálculo para el Diseño de Conexiones a Momento con Plancha Extrema por el Método de los Estados Límites (LRFD)

Autores: Br. Samuel Ogly / Br. Eugenio Quiroga
Tutor: Ing. José Gerardo Castillo
Fecha: Octubre 2010

RESUMEN

Las conexiones son unos de los elementos más importantes dentro de una estructura, ya que son el punto de unión de los distintos miembros (vigas y columnas) que conforman el sistema estructural. La resistencia de las conexiones y, por lo tanto, el debido diseño de las mismas, son factores fundamentales que determinan la capacidad resistente de las estructuras metálicas. Si dichas conexiones no son correctamente diseñadas, no tendrán la capacidad de soportar las acciones a las cuales se ven sometidas, pudiendo afectar la estabilidad de la estructura y causar su colapso parcial o total. Una de las conexiones más importantes son las conexiones a momento o rígidas, ya que éstas son las únicas capaces de resistir teóricamente el 100% de los momentos flectores, fuerzas axiales y cortantes, presentes en las estructuras. Dentro de la gran variedad de soluciones para este tipo de uniones, una de las que ha resultado más eficiente tanto por su comportamiento en zonas de alta sismicidad, como por su versatilidad en el montaje, es la conexión a momento con plancha extrema. Sin embargo, el diseño de estas conexiones requiere múltiples verificaciones, convirtiéndose en un trabajo laborioso, y consumiendo grandes cantidades de tiempo, por lo que se considera conveniente disponer de herramientas que faciliten y agilicen este proceso.

Por todo esto, el objetivo principal de este Trabajo Especial de Grado es el desarrollo de un conjunto de hojas de cálculo en MS Excel® para realizar el diseño de conexiones a Momento con Plancha Extrema, basadas en el Método de los Estados Límites (LRFD), método vigente en la *Norma Venezolana COVENIN 1618:1998: "Estructuras de Acero para Edificaciones. Método de los Estados Límites"*, tomando en cuenta las actualizaciones que ha realizado el *American Institute of Steel Construction (AISC)* a sus normas, específicamente aquellas indicadas en el *AISC 360-05 "Specifications for Structural Steel Buildings"*, así como las recomendaciones indicadas en las Guías de Diseño del AISC relativas al tema y bibliografía especializada. Una vez realizadas, las hojas de cálculo se validaron mediante la comparación de resultados con ejemplos realizados manualmente, para que así el Ingeniero Estructural tenga la confianza plena en el funcionamiento de esta valiosa herramienta.

Palabras Clave: Conexión, Plancha Extrema, Estructuras de Acero, LRFD

NOTACIÓN Y UNIDADES

Para efectos de este Trabajo Especial de Grado la notación utilizada corresponde con la especificada en la *Guía de Diseño N° 4 "Extended End Plate Moment Connections",* y en la *Guía de Diseño N° 13 "Wide Flange Column Stiffening at Moment Connections-Wind and Seismic Applications"*, ambas publicadas por el *American Institute of Steel Construction (AISC).*

A	Área de la sección transversal de la columna.
A_b	Área gruesa nominal del perno.
A_n	Área neta de la plancha extrema.
A_{stt}[1]	Área transversal de los rigidizadores horizontales o transversales de la columna.
b_{fb}	Ancho del ala de la viga.
b_{fc}	Ancho del ala de la columna.
b_p	Ancho de la plancha extrema.
b_{pf}	Ancho de la plancha del ala.
b_{stt}	Ancho de cada rigidizador transversal.
C	Distancia centro a centro entre los pernos separados por el ala de la viga.
D	Dimensión mínima de la soldadura de filete.
d	Altura del perfil de la viga.
d_b	Diámetro nominal del perno.
d_c	Altura del perfil de la columna.
d_e	Distancia desde el extremo de la plancha extrema al centro del primer perno.
d_m	Brazo de momento entre las fuerzas concentradas en las alas.
E	Módulo de elasticidad.
F_{cu}	Resistencia requerida de los rigidizadores transversales.[2]
F_{exx}	Resistencia mínima especificada para el metal de aporte de la soldadura (electrodo).
F_{fu}	Fuerza mayorada en el ala de la viga.[3]
F_t	Resistencia especificada del perno a la tensión.
F_{ub}	Límite de rotura especificado del material de la viga.
F_{uc}	Límite de rotura especificado del material de la columna.
F_{up}	Límite de rotura especificado del material de la plancha extrema.
F_v	Resistencia especificada del perno al corte.
F_{yb}	Límite de cedencia especificado del material de la viga.

[1] Durante el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado fue seleccionado el subíndice "stt" para designar aquellos parámetros referentes a los rigidizadores transversales, para así, evitar confusiones entre la notación de la *Guía N° 4* y la *Guía N° 13 del AISC*, las cuales presentan semejanzas entre los parámetros de los rigidizadores transversales y de los rigidizadores de la plancha extrema.

[2] En la *Guía N° 13 del AISC*, se utiliza la notación R_{ust} para indicar la resistencia requerida de los rigidizadores transversales, mientras que en la *Guía N° 4* es utilizada la notación aquí especificada.

[3] En la *Guía N° 13 del AISC* se utiliza la notación P_{uf} para indicar la fuerza mayorada en el ala de la viga, mientras que en la *Guía N° 4* es utilizada la notación aquí especificada.

F_{yc} Límite de cedencia especificado del material de la columna.
F_{ydp} Límite de cedencia especificado del material de la plancha de refuerzo del alma de la columna.
F_{yp} Límite de cedencia especificado del material de la plancha extrema.
F_{yst} Límite de cedencia especificado del material del rigidizador de la plancha extrema.
F_{ystt} Límite de cedencia especificado del material del rigidizador transversal de la columna.
g Distancia centro a centro entre las columnas de pernos (gramil).
h_i Distancia desde el *centerline* del ala a compresión de la viga al *centerline* de la fila "i" de los pernos a tensión.
h_i Distancia entre la línea central de ala a compresión al centro de la fila de pernos.
h_{st} Altura del rigidizador de la plancha extrema.
k_b Distancia desde la cara externa del ala de la viga al borde de la soldadura de filete del alma.
k_c Distancia desde la cara externa del ala de la columna al borde de la soldadura de filete del alma.
l Longitud del rigidizador transversal.
l_{dp}[4] Profundidad de la plancha de refuerzo.
L_c Distancia, en la dirección de la fuerza, entre el borde del agujero y el borde del otro agujero o el extremo del material.
Lp Distancia desde la cara del ala de la columna hasta la ubicación de la rótula plástica.
L_{st} Longitud del rigidizador de la plancha extrema.
M_{cf} Resistencia de diseño a la flexión del ala de la columna.
M_{np} Momento para que no existan fuerzas de apalancamiento.
M_{pe} Momento esperado en la rótula plástica.
M_{uc} Momento de diseño.
N Espesor del ala de la viga más dos veces la garganta efectiva de la soldadura.
n Numero de pernos en cada fila.
n_b Número de pernos en el ala a compresión.
n_i Numero de pernos internos (2 para 4E y 4ES, y 4 para 8ES).
n_o Número de pernos externos (2 para 4E y 4ES, y 4 para 8ES).
P_b Distancia centro a centro entre los pernos de una misma columna.
P_{fi} Distancia desde el ala de la viga al centro del perno interno más cercano (*Pitch*).
P_{fo} Distancia desde el ala de la viga al centro del perno externo más cercano (*Pitch*).
P_t Resistencia a la tensión del perno.
P_u Carga axial en la columna.
P_y Resistencia a la compresión axial de la columna.
R_n Resistencia teórica.
R_v Resistencia al corte de diseño de la zona de panel de la columna.

[4] A falta de una notación especifica en las *Guías de Diseño del AISC* para designar la profundidad de la plancha de refuerzo, se seleccionó esta nomenclatura.

R_y Relación entre la resistencia a la cedencia esperada y el límite de cedencia especificado.
t_{dp} Espesor de la plancha de refuerzo del alma de la columna.
t_{eff} Espesor mínimo requerido por resistencia de la plancha de refuerzo del alma de la columna.
t_{fb} Espesor del ala de la viga.
t_{fc} Espesor del ala de la columna.
t_p Espesor de la plancha extrema.
t_{sc} Espesor del rigidizador horizontal o transversal de la columna.
t_{st} Espesor del rigidizador de la plancha extrema.
t_{stt} Espesor del rigidizador transversal de la columna.
t_{wb} Espesor del alma de la viga.
t_{wc} Espesor del alma de la columna.
V_u Fuerza de corte en la rótula plástica.
V_{udp} Resistencia requerida de la(s) plancha(s) de refuerzo.
V_{us} Esfuerzo cortante en la planta.
V_{uzp}[5] Resistencia requerida por corte en la zona de panel de la columna.
W Tamaño de soldadura.
Y_c Parámetro del mecanismo de la línea de cedencia del ala de la columna.
Y_p Parámetro del mecanismo de la línea de cedencia de la plancha extrema.
Ø Factor de minoración de la resistencia teórica.

Las unidades utilizadas en este Trabajo Especial de Grado corresponden al Sistema Técnico MKS, utilizándose con frecuencia el centímetro (cm) y la Tonelada (T).

Se usarán las siguientes unidades:

Dimensiones:

- En las fórmulas (L, d, t_w, etc.): cm
- En el detallado de las secciones y piezas de acero: mm

Áreas: cm^2
Fuerzas: T
Momentos: T-m
Tensiones: kgf/cm^2

[5] Durante el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado fue seleccionado el subíndice "zp" para diferenciar la notación de la fuerza de corte en la rótula plástica, con la resistencia requerida por corte en la zona de panel de la columna, ambas variables indicadas tanto en la *Guía N° 4* como en la *Guía N° 13 del AISC*.

INTRODUCCIÓN

En una estructura de acero, las conexiones son uno de los puntos más importantes y que ameritan mayor atención durante el diseño, ya que un error en la etapa de cálculo, o un comportamiento no deseado de las mismas, puede afectar la estabilidad de la estructura metálica, hasta el punto de originar el colapso del sistema.

Una de las conexiones más importantes son las conexiones a momento, ya que éstas le aportan al sistema estructural la capacidad de resistir la totalidad de las acciones sísmicas y gravitacionales. Entre los distintos tipos de conexiones a momento, la conexión con plancha extrema ha resultado ser una de las más eficientes y versátiles, ya que las soldaduras se realizan por completo en el taller de fabricación, y en obra sólo se presenta y atornilla mediante pernos, economizando y disminuyendo los tiempos de construcción.

Este tipo de conexión requiere numerosas verificaciones a fin de analizar los posibles estados límites que pudieran controlar su diseño y, por ende, su capacidad, por lo que el diseño de las mismas se transforma en un proceso laborioso y le consume gran cantidad de tiempo al Ingeniero Estructural.

Es por esto, que el objetivo principal de este Trabajo Especial de Grado (TEG) es el desarrollo de un conjunto de hojas de cálculo en MS Excel®, para el Diseño de Conexiones a Momento con Plancha Extrema, basadas en el Método de los Estados Límites (LRFD).

Este TEG se encuentra dividido en capítulos, a fin de facilitar su entendimiento y lectura. El *Capítulo I* presenta el planteamiento del problema, los objetivos generales y específicos y la justificación, así como también el alcance y las limitaciones de este TEG. Además, se revisan los antecedentes enmarcados dentro de esta misma línea de investigación.

El *Capítulo II* presenta el marco metodológico utilizado en esta investigación, donde se explican las fases en las que se dividió todo el procedimiento llevado a cabo para la ejecución de este trabajo, y define las variables, instrumentos y técnicas para lograr los objetivos planteados.

En el *Capítulo III* contiene el marco de referencia conceptual, el cual presenta, en forma breve, la historia y evolución del procedimiento de diseño de las conexiones a momento con plancha extrema, las ventajas y desventajas de este tipo de conexión, y se establecen los parámetros principales y el procedimiento detallado de diseño.

El *Capítulo IV* presenta una guía para el usuario de las hojas de cálculo desarrolladas, en donde se le explica los requisitos mínimos del sistema para poder utilizar de manera adecuada dichas hojas. Además, familiariza al usuario con el formato

que presenta la hoja de cálculo, explicándole los datos que debe introducir y las distintas alertas, informaciones y mensajes que pueden aparecer, todo esto para que la interfaz entre el usuario y la herramienta sea lo más entendible y amigable posible.

En el *Capítulo V* se presentan ejemplos manuales de diseño, cuyos resultados se comparan con aquellos obtenidos utilizando las hojas de cálculo, para así validar la herramienta desarrollada.

El *Capítulo VI* presenta las conclusiones alcanzadas con el desarrollo de este trabajo de investigación, verificando el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio de esta investigación. Además, se plantean las recomendaciones y posibles mejoras para los trabajos futuros dentro de la misma línea de investigación.

Por último, se incluyen las referencias bibliográficas utilizadas para el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, y que le pudieran servir al lector interesado para profundizar aún más en este tema.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Este capítulo presenta el planteamiento del problema de investigación, los objetivos generales y específicos y la justificación del desarrollo de este Trabajo Especial de Grado. Además, se establece el alcance y las limitaciones del mismo, y se revisan los antecedentes enmarcados dentro de esta misma línea de investigación.

1. Planteamiento del Problema

Los puntos donde se unen las vigas y las columnas que conforman una estructura, son llamados conexiones estructurales. Estas conexiones pueden estar formadas por distintos elementos tales como perfiles, pernos y/o soldaduras, planchas, rigidizadores, etc., y deben ser capaces de resistir las acciones a las cuales están sometidas, a fin de garantizar la integridad del sistema estructural.

La resistencia de las conexiones y, por lo tanto, el debido diseño de las mismas, son factores fundamentales que determinarán la capacidad resistente de las distintas estructuras metálicas. Una conexión que no presente el comportamiento supuesto en los cálculos y que no sea capaz de resistir las solicitaciones impuestas, pudiera afectar la estabilidad de la estructura e, incluso, provocar el colapso parcial o total del sistema.

Dentro de la gran variedad de conexiones presentes en una estructura, las conexiones a momento son unas de las más importantes, ya que de ellas depende la transmisión de esfuerzos entre los miembros que conforman los sistemas aporticados rígidos, de manera que éstos sean capaces de resistir la totalidad de las acciones sísmicas, de viento y/o gravitacionales a las que sea expuesta la estructura.

Para resolver este tipo de uniones, la solución con plancha extrema ha demostrado ser una de las de más amplia difusión, por su comprobada eficiencia en zonas sísmicas y por su rapidez, sencillez y bajo costo de instalación, ya que las piezas vienen soldadas de taller y sólo se presentan y se fijan con pernos en obra.

Sin embargo, el comportamiento de este tipo de conexiones puede llegar a ser bastante complejo y, por lo tanto, el esfuerzo de diseño de las mismas por parte del Ingeniero Estructural se vuelve también un proceso largo y complicado, ya que es necesario realizar una gran cantidad de cálculos y verificaciones, a fin de analizar los distintos estados límites que, a la larga, determinarán la capacidad de estas uniones.

Por lo tanto, sería de gran ayuda para el Ingeniero Estructural disponer de una herramienta que le permita realizar el diseño de estas conexiones de forma rápida y sencilla, por lo que el objetivo principal de este Trabajo Especial de Grado (TEG) es el

desarrollo de un conjunto de hojas de cálculo en MS Excel®, para el diseño de conexiones a Momento con Plancha Extrema, basadas en el Método de los Estados Límites (LRFD), método vigente en la *Norma Venezolana COVENIN 1618:1998: "Estructuras de Acero para Edificaciones. Método de los Estados Límites".*

Adicionalmente, se tomarán en cuenta las actualizaciones que ha realizado el *American Institute of Steel Construction (AISC)*, a sus normas, específicamente aquellas indicadas en el *AISC 360-05 "Specifications for Structural Steel Buildings".*

También, se tomarán en cuenta las recomendaciones indicadas en las Guías de Diseño del AISC relativas al tema, así como también aquellas propuestas en la bibliografía especializada.

2. Objetivos de la Investigación

2.1 Objetivo General

Desarrollar un conjunto de hojas de cálculo en MS Excel® para realizar el diseño de conexiones a Momento con Plancha Extrema, por el Método de los Estados Límites (LRFD).

2.2 Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Revisión de la bibliografía existente acerca del diseño de conexiones a momento con plancha extrema por el método de los estados limites (LRFD).
- Desarrollo de la formulación, de acuerdo con la normativa vigente y las actualizaciones del AISC, para el diseño de conexiones a momento con plancha extrema.
- Desarrollo de las hojas de cálculo con MS Excel® para el diseño de conexiones a momento con plancha extrema.
- Calibrar, con ejemplos manuales, los resultados obtenidos con las hojas de cálculo desarrolladas.
- Comparar los resultados obtenidos con las hojas de cálculo con aquellos obtenidos con los ejemplos manuales

3. Justificación

Dentro de las estructuras de acero, las uniones o conexiones son uno de los factores críticos a ser considerados durante la etapa de diseño, ya que deben tener la resistencia suficiente para soportar las acciones o solicitaciones que se le impongan,

deben evitar deformaciones excesivas y, a su vez, permitir que el proceso de fabricación y montaje sea lo más económico y eficiente posible.

Es por esto que el Ingeniero Estructural deberá verificar que cada unión presente en la estructura cumpla con los requisitos establecidos en las Normas vigentes, lo cual puede convertir el proceso de diseño en un trabajo repetitivo y laborioso, requiriendo una gran inversión de tiempo que podría ahorrarse si se tuvieran herramientas automatizadas de cálculo, diseño y verificación.

El programa MS Excel® es una herramienta que permite, mediante la programación de hojas de cálculo, automatizar procedimientos de diseño en cualquier ámbito de la ingeniería, por lo que su aplicación para el desarrollo de herramientas que permitan diseñar de forma automática las conexiones necesarias en un proyecto de estructuras de acero luce como una alternativa ventajosa desde todo punto de vista.

Si bien ya existen en el mercado programas comerciales que son capaces de realizar estos diseños, su alto costo representa una inversión que no muchas oficinas de proyectos están en la capacidad de asumir, por lo que el desarrollo de herramientas alternativas con hojas de cálculo representa una de las opciones más económicas y accesibles.

Asimismo, desde el punto de vista teórico, la elaboración de este TEG se enmarca dentro de la línea de investigación que plantea el desarrollo de herramientas en MS Excel® para su aplicación no sólo en el diseño de estructuras de acero, sino para cualquier otro campo de la ingeniería civil.

Por todo lo expuesto anteriormente, se consideró de gran importancia la elaboración del presente Trabajo Especial de Grado, el cual consiste básicamente en el desarrollo de un conjunto de hojas de cálculo que faciliten y agilicen el trabajo del Ingeniero Estructural para el diseño y revisión de conexiones a momento con plancha extrema.

4. Alcance y Limitaciones

A efectos del desarrollo de este TEG, y con el fin de limitar el alcance del mismo, sólo se desarrollaron las hojas de cálculo para el diseño de las siguientes conexiones a momento con plancha extrema:

- Conexión a Momento Con Plancha Extrema Extendida de Cuatro (4) Pernos No Rigidizada (4E[6]):

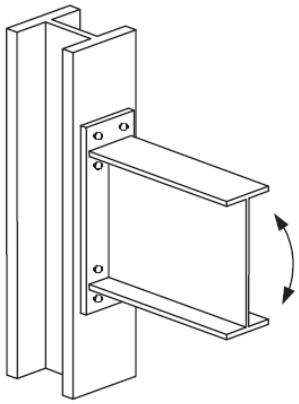


Fig. 1.1. Conexión a Momento con Plancha Extrema Extendida de Cuatro (4) Pernos No Rigidizada (4E).
Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

- Conexión a Momento Con Plancha Extrema Extendida de Cuatro (4) Pernos Rigidizada (4ES):

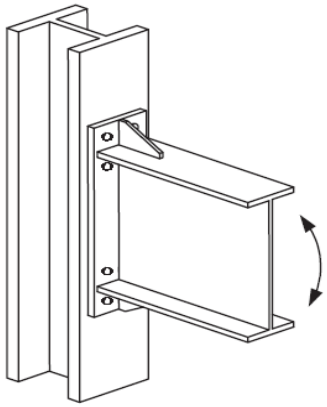


Fig. 1.2. Conexión a Momento con Plancha Extrema Extendida de Cuatro (4) Pernos Rigidizada (4ES).
Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

[6] Nomenclatura, en inglés, establecida en la *Guía de Diseño N°4 del AISC* para identificar las conexiones a Momento con Plancha Extrema de acuerdo con su clasificación: Extendida (E: Extended), Rigidizada (S: Stiffened) y número de pernos en el ala a tracción.

- Conexión a Momento Con Plancha Extrema Extendida de Ocho (8) Pernos Rigidizada (8ES):

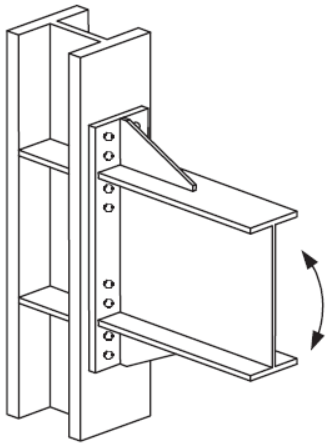


Fig. 1.3. Conexión a Momento con Plancha Extrema Extendida de Ocho (8) Pernos Rigidizada (8ES).
Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

5. Antecedentes de la Investigación

El principal antecedente de esta investigación es el Trabajo Especial de Grado desarrollado por Matamoros y Losada (2010), el cual tiene por título ***"Desarrollo de hojas de cálculo para automatizar el diseño de conexiones en estructuras de acero por el Método de los Estados Límites (LRFD)"***, en donde se trabajaron cinco (5) tipos de conexiones distintas, entre las cuales se encuentran las de arriostramientos con angulares y perfiles "T", conexiones a corte simple con plancha, placas base empotradas y articuladas, etc., pero, sin abarcar las conexiones a momento con plancha extrema.

En su trabajo, Matamoros y Losada plantearon los procedimientos de diseño de acuerdo con la normativa vigente en Venezuela, la *Norma Venezolana COVENIN 1618:1998: "Estructuras de Acero para Edificaciones. Método de los Estados Límites"* y tomaron en cuenta las últimas actualizaciones que el AISC ha realizado a sus normas, específicamente las establecidas en el *AISC 360-05 "Specifications for Structural Steel Buildings",* para luego desarrollar las hojas de cálculo correspondientes. Finalmente, calibraron sus resultados con ejemplos desarrollados a mano, a fin de comprobar que las herramientas desarrolladas produjeran resultados confiables.

Entre las recomendaciones planteadas en su trabajo, Matamoros y Losada plantean, siguiendo la misma línea de investigación, desarrollar hojas de cálculo adicionales para otros tipos de conexiones, por lo que la ejecución de este Trabajo

Especial de Grado representa la continuación natural del trabajo iniciado en su investigación.

CAPITULO II

MARCO METODOLÓGICO

En el siguiente capítulo se presenta el enfoque y la metodología que se utilizó para el desarrollo de esta investigación y cumplir con los objetivos previamente planteados.

Además, se presentan las distintas fases que se llevaron a cabo para el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado.

1. Diseño de la Investigación

El objetivo principal de esta investigación es el desarrollo de un conjunto de hojas de cálculo en MS Excel®, para el diseño de conexiones a Momento con Plancha Extrema, que faciliten y agilicen el trabajo del Ingeniero Estructural.

Para afrontar el problema de investigación planteado, el diseño que se adoptó para el proceso de investigación fue el definido como *Investigación Documental*, para lo cual se llevó a cabo una revisión bibliográfica de todos los aspectos relevantes que se deben tomar en cuenta para el diseño de este tipo de conexiones.

Las hojas de cálculo están basadas en el Método de los Estados Límites (LRFD), método vigente en la *Norma Venezolana COVENIN 1618:1998 "Estructuras de Acero para Edificaciones. Método de los Estados Límites"*, por lo que fue necesario en primer lugar revisar los requisitos que se establecen en la misma para el diseño de este tipo de uniones. Además, fueron revisadas e incorporadas las actualizaciones que ha realizado el AISC a sus normas, específicamente aquellas indicadas en el *ANSI/AISC 360-05"Specifications for Structural Steel Buildings"*.

Igualmente, se revisaron las recomendaciones y procedimientos de diseño sugeridos en las Guías de Diseño del AISC[7] relativas al tema. Por último, se revisó bibliografía especializada, a fin de recopilar toda la información requerida para el planteamiento de los procedimientos de diseño y posterior desarrollo de las hojas de cálculo, lo cual, en definitiva, es el objetivo principal de esta investigación.

2. Fases de la Investigación

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo en 4 fases: Bases del Trabajo Especial de Grado, Fase de Elaboración, Fase de Validación y Fase de Redacción del Informe Final.

[7] AISC: American Institute of Steel Construction.

En la primera fase se realizó la revisión, tanto de la bibliografía, como de los requisitos normativos para el diseño de las conexiones a momento con plancha extrema por el Método de los Estados Límites (LRFD). Esta revisión bibliográfica permitió comprender los fundamentos teóricos necesarios para poder avanzar a la siguiente fase de la investigación.

La segunda fase consistió en el desarrollo del marco teórico, en donde, basado en toda la información recopilada y analizada de las distintas fuentes bibliográficas, se desarrolló el procedimiento que se usó para el diseño de las hojas de cálculo. Luego de establecido el procedimiento de diseño, se dio inicio al desarrollo de las hojas de cálculo.

En la siguiente fase se procedió a realizar la calibración de las hojas de cálculo con ejemplos manuales de cada uno de los tipos de conexión con plancha extrema seleccionados, para luego finalmente comparar ambos resultados y así validar el instrumento desarrollado.

Por último, en la cuarta etapa, se redactó el informe final correspondiente a este Trabajo Especial de Grado.

En la figura 2.1 se resume en un esquema las fases para el desarrollo de la investigación.

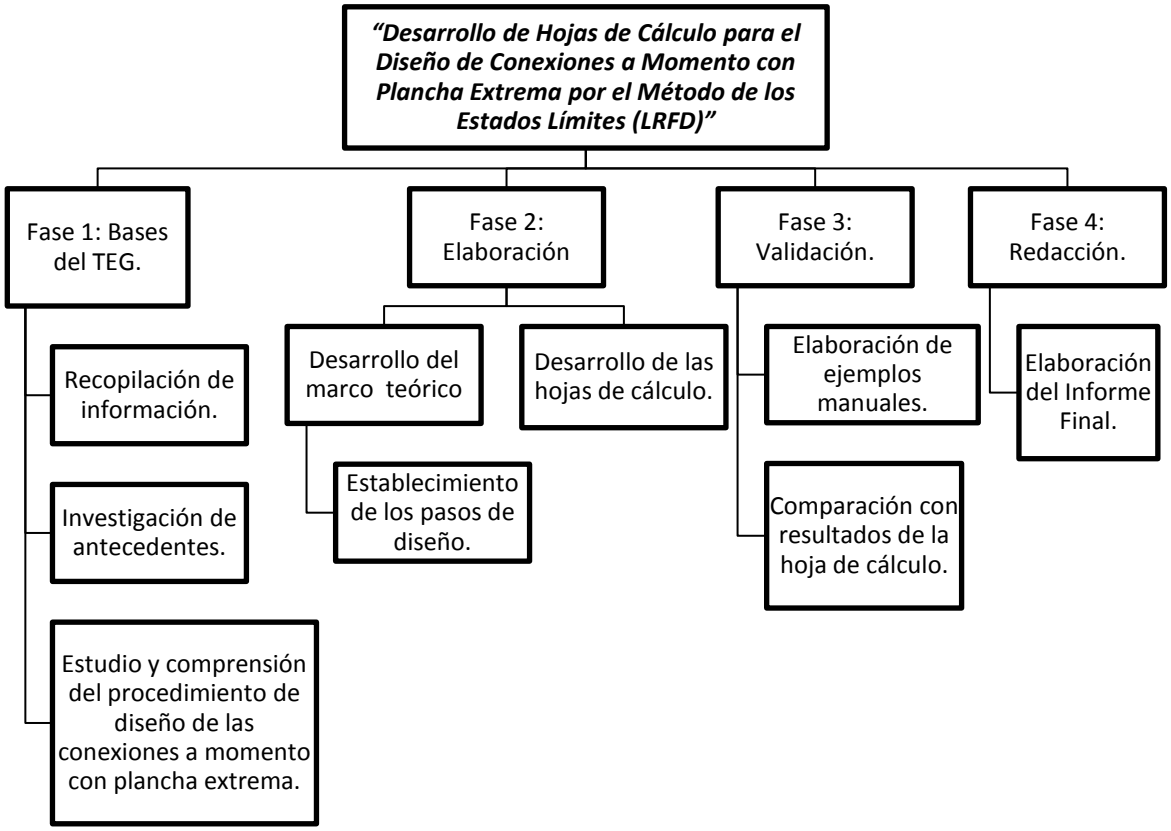


Fig. 2.1. Fases de la Investigación.
Fuente: Elaboración Propia.

3. Operacionalización de los Objetivos de la Investigación

Con el objeto de poder alcanzar los objetivos planteados en esta investigación, fue necesario definir las variables que fueron analizadas para poder determinar los distintos componentes que conformarían las hojas de cálculo para el diseño de conexiones a momento con plancha extrema.

La Tabla 2.1 muestra la operacionalización de los objetivos de la investigación.

Tabla 2.1. Operacionalización de los Objetivos.

Objetivo General	Objetivos Específicos	Variables	Técnicas	Instrumentos	Fuentes de Información
Desarrollar un conjunto de hojas de cálculo en MS Excel® para realizar el diseño de conexiones a Momento con Plancha Extrema, por el Método de los Estados Límites (LRFD).	Revisión de la bibliografía existente acerca del diseño de conexiones a momento con plancha extrema por el método de los estados limites (LRFD).	Normas, Guías de diseño AISC, Libros de texto para el diseño de estructuras metálicas (LRFD).	Análisis documental de fuentes bibliográficas.	Citas y notas de referencias bibliográficas, tablas, ecuaciones.	Normativa vigente, bibliografía especializada, artículos técnicos, guías de diseño, Internet.
	Desarrollo de la formulación, de acuerdo con la normativa vigente y las actualizaciones del AISC, para el diseño de conexiones a momento con plancha extrema.	Requisitos normativos para el diseño de conexiones a momento con plancha extrema.	Análisis documental de fuentes bibliográficas.	Citas y notas de referencias bibliográficas, tablas, ecuaciones.	Normativa vigente, bibliografía especializada, artículos técnicos, guías de diseño, Internet.
	Desarrollo de las hojas de cálculo con MS Excel® para el diseño de conexiones a momento con plancha extrema.	Tipo de conexión, procedimientos de diseño.	Análisis documental de fuentes bibliográficas.	Computador, MS Excel®.	Normativa vigente, bibliografía especializada, artículos técnicos, guías de diseño, Internet, Criterio Propio.
	Calibrar, con ejemplos manuales, los resultados obtenidos con las hojas de cálculo desarrolladas.	Tipo de conexión, Procedimientos de Diseño.	Aplicación de las hojas de cálculo desarrolladas.	Hojas de cálculo desarrolladas.	Resultados obtenidos con las hojas de cálculo y ejemplos manuales.

Fuente: Elaboración Propia.

CAPITULO III

MARCO DE REFERENCIA CONCEPTUAL

Este capítulo contiene el marco de referencia conceptual que sirvió como base para el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado.

Se presentan las bases de diseño para las conexiones a momento con plancha extrema, con una breve discusión de las investigaciones realizadas que permitieron establecer y desarrollar los parámetros más importantes en el diseño de este tipo de conexiones. Además, se presenta el procedimiento detallado de diseño de las mismas.

1. Ventajas y Desventajas de las Conexiones a Momento con Plancha Extrema

A continuación se presentan las principales ventajas y desventajas de las conexiones a momento con plancha extrema:

1.1. Ventajas

- Todas las soldaduras son en el taller.
- Por no tener que soldar en campo, el proceso es más rápido y económico.
- Si la fabricación es precisa, es fácil mantener el aplome del pórtico durante el montaje de la estructura.
- El costo total de la instalación es competitivo, comparado con otras opciones para resolver este tipo de uniones.

1.2. Desventajas

- Las técnicas de fabricación son restrictivas, ya que se necesita precisión tanto en el largo de la viga, como en el extremo de ella para lograr que cuadre o calce perfectamente.
- Las columnas descuadradas, y la tolerancia existente en la profundidad de las mismas, pueden causar dificultades durante el montaje, aunque éstas pueden ser controladas fabricando las vigas de 6 a 10 mm (1/4 pulg. a 3/8 pulg.) más cortas y adaptándolas con el uso de planchas delgadas de acero (usualmente de unos 2 mm o 1/16 pulg.), llamadas planchas de relleno.
- A menudo las planchas pueden deformarse debido a las altas temperaturas del proceso de soldadura.
- Las planchas extremas están sujetas al desgarro laminar en la región de la soldadura del ala superior a tensión.
- Los pernos están sometidos a tensión, por lo que pueden generarse fuerzas de apalancamiento.

- Una porción de la plancha extrema rigidizada se puede extender más allá del piso terminado, lo que requerirá un cierre de columna más grande y resultará en una reducción de la superficie útil del piso.

2. Consideraciones Generales para el Diseño de Conexiones a Momento con Plancha Extrema

Una conexión a momento con plancha extrema está compuesta por una plancha de acero soldada, en taller, al extremo de una viga, la cual se conecta a un miembro adyacente, ya sea viga o columna, usando filas de pernos de alta resistencia.

Este tipo de conexiones se pueden clasificar como:

- Al ras o extendidas, dependiendo si la plancha extrema se extiende o no, más allá de las alas de la viga, de forma que sea posible colocar pernos adicionales en esa zona.
- Con o sin rigidizadores[8].
- Dependiendo del número de pernos (4 u 8) en el ala que se encuentra a tracción, tal y como se muestran en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3.

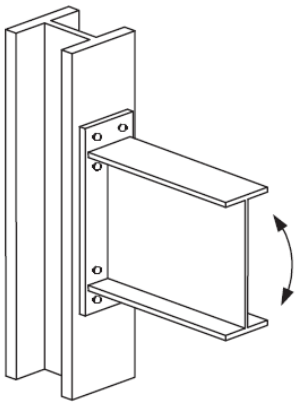


Fig. 3.1. Conexión a Momento con Plancha Extrema Extendida de Cuatro (4) Pernos No Rigidizada (4E).
Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

[8] De acuerdo con la *Guía de Diseño N° 13 del AISC "Stiffening of Wide-Flange Columns at Moment Connections" (Carter, 2003),* los rigidizadores son planchas de acero que se sueldan a los miembros de las conexiones con el fin de incrementar la resistencia y/o la rigidez de los mismos.

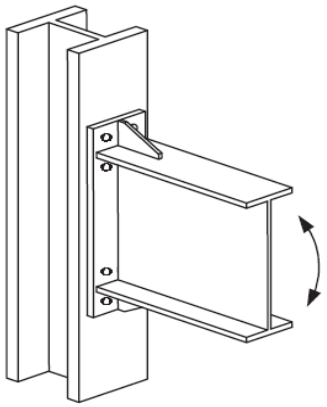


Fig. 3.2. Conexión a Momento con Plancha Extrema Extendida de Cuatro (4) Pernos Rigidizada (4ES).
Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

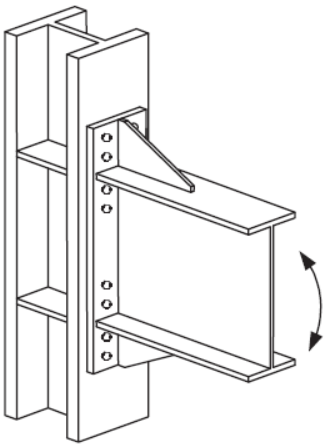


Fig. 3.3. Conexión a Momento con Plancha Extrema Extendida de Ocho (8) Pernos Rigidizada (8ES).
Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

Las tres conexiones de plancha extrema extendidas mostradas en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3, han sido probadas para su aplicación bajo acciones sísmicas (Murray y Sumner, 2003), demostrando ser adecuadas para la construcción de estructuras clasificadas como Tipo I (Tipo Pórtico) en la *Norma Venezolana COVENIN 1618-98*, siendo capaces de resistir la totalidad de las acciones sísmicas. La conexión de cuatro (4) pernos no rigidizada (Fig. 3.1), es comúnmente utilizada en las construcciones tipo pórtico de varios pisos y, con el uso de los rigidizadores (Fig. 3.2) se puede disminuir el espesor de la plancha extrema. Asumiendo que la totalidad del momento será resistido, y que el diámetro máximo de pernos será de 1 ½ pulg., estas conexiones, por la resistencia a la tensión de los pernos, serán suficientes para menos de la mitad de los perfiles laminados en caliente existentes para vigas. La conexión con ocho (8) pernos rigidizada

(Fig. 3.3) es capaz de desarrollar su capacidad total a momento para la mayoría de los perfiles existentes, incluso si el diámetro de pernos es limitado a 1 ½ pulg. (Murray y Sumner, 2003).

Las siguientes recomendaciones para el proceso de diseño están basadas principalmente en las investigaciones que se realizaron la Universidad de Oklahoma (*University of Oklahoma*) y el Instituto Politécnico de Virginia (*Virginia Polytechnic Institute*). La teoría de la línea de cedencia[9] es utilizada para el análisis de la flexión de la plancha extrema y del ala de la columna. Las fuerzas de apalancamiento[10] son despreciadas, ya que el espesor de la plancha extrema y del ala de la columna previene que éstas se desarrollen.

Según lo descrito en la *Guía de Diseño N°4 del AISC*, que se basa en la recopilación de las investigaciones realizadas por las instituciones antes mencionadas, las siguientes condiciones aplican para el proceso de diseño:

1) Todos los pernos son ajustados a una pretensión no menor a la especificada en las especificaciones del AISC vigente[11], sin embargo, no es necesario analizar la conexión como del tipo deslizamiento crítico (slip-critical connection).
2) Los procesos de diseño son válidos para cualquiera de los pernos ASTM A325 o ASTM A490.
3) La conexión más económica es aquella que posee la menor distancia entre la cara del ala de la viga y el *centerline*[12] del perno más cercano; esta distancia es conocida como "Pitch"[13]. La dimensión mínima del pitch para pernos de hasta 1 pulg. de diámetro es igual al diámetro del perno más 1,27 cm (½ pulg.), y para pernos de mayor diámetro el pitch será el diámetro del perno más 1,91 cm (¾ pulg.). Sin embargo, los fabricantes prefieren usar un pitch estándar de 5,1 cm o 6,35 cm (2 pulg. o 2 ½ pulg.) para cualquier perno.
4) Se asume que todas las fuerzas cortantes de la conexión son resistidas por los pernos del lado del ala de la viga sometida a compresión. Las conexiones de

[9] El pionero del análisis de la línea de cedencia fue el Profesor K. W. Johansen, quien, en 1843, publicó en su tesis de doctorado esta teoría, la cual se basa en el análisis de los mecanismos de falla en los estados límites y consiste en el equilibrio entre el trabajo virtual externo y el trabajo virtual interno.

[10] La acción de palanca se origina porque las fuerzas no se aplican directamente sobre los pernos, sino a través de ángulos de conexión o alas de perfiles T y doble T, los cuales pueden sufrir deformaciones por flexión que modifican la distribución de los esfuerzos de aplastamiento entre las cabezas del conector y las planchas (Fratelli, 2005).

[11] Especificaciones equivalentes a la *Norma Venezolana COVENIN 1618:1998: "Estructuras de Acero para Edificaciones. Método de los Estados Límites"*.

[12] *Centerline*, eje longitudinal del perno.

[13] En la figura 3.2 se muestra la distancia denominada Pitch $(P_{fo},\ P_{fi})$.

plancha extrema no tienen que ser diseñadas como conexiones de deslizamiento crítico, y se ha notado que los esfuerzos cortantes son raramente causantes de mayores preocupaciones en las conexiones a momento con plancha extrema.

5) Se asume que el ancho de la plancha extrema efectivo para resistir el momento que aplica la viga, no es mayor al ancho del ala de la viga más 2,54 cm (1 pulg.). Esto se basa en el juicio del ingeniero, y no forma parte de ninguno de los procedimientos de diseño.
6) El gramil[14] de los pernos a tensión no excederá el ancho del ala sometida a tensión de la viga.
7) Debe soldarse el alma de la viga con la plancha extrema en las cercanías a los pernos a tracción. Esto se hace para desarrollar el límite de fluencia de la viga. La resistencia que aporta esta soldadura es recomendada aún si el pórtico no necesita que la viga soporte su capacidad máxima a momento.
8) Se asume que sólo la soldadura que une el alma de la viga y la plancha extrema, desde la mitad del alma hasta la cara interna del ala a compresión, soporta el corte de la viga. Esto se basa en el juicio del ingeniero, no existe literatura que lo certifique o contradiga.

2.1 Momento de diseño de la conexión

En la actualidad, se trabaja acomodando en los entrepisos de los pórticos rígidos de acero, una combinación de deformaciones elásticas e inelásticas. Estas deformaciones inelásticas se presentan cuando se producen rótulas plásticas, las cuales ocurren en lugares predeterminados del pórtico y son causadas por deformaciones inelásticas por flexión en las vigas de la conexión.

La ubicación de las rótulas plásticas en las conexiones a momento con plancha extrema depende del tipo de conexión a usar. Si la conexión es una conexión no rigidizada, la rótula plástica estará a una distancia (L_p) igual al valor mínimo entre la mitad de la altura de la viga $\left({}^{d}/_{2}\right)$ y tres (3) veces el ancho del ala de la viga $(3b_f)$, mientras que en las conexiones rigidizadas, la rótula plástica estará localizada al final del rigidizador. La figura 3.4 ilustra las ubicaciones de las rótulas plásticas en los distintos casos.

[14] Distancia horizontal entre las filas verticales de pernos.

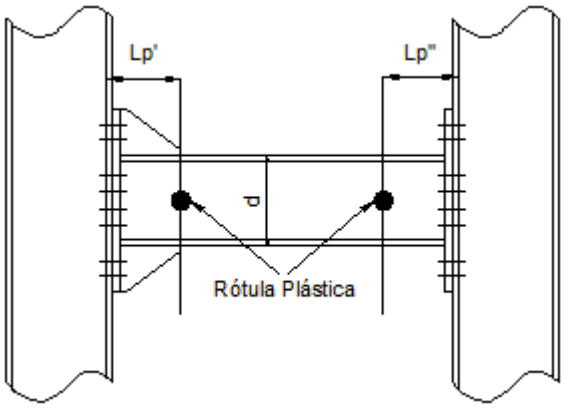


Fig. 3.4. Ubicación de la Rótula Plástica.
Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

- Para conexiones rigidizadas:

$$L_p = L_{p'} = L_{st} + t_p \qquad \text{(Ec. 3-1)}$$

- Para conexiones no rigidizadas:

$$L_p = L_{p''} = min\left(\frac{d}{2}; 3b_f\right) \qquad \text{(Ec. 3-2)}$$

El momento utilizado para el diseño es el que se produce en la cara conectada del ala de la columna, ya que éste es el punto crítico de este tipo de conexión. Este momento (M_{uc}) es igual a la suma del momento esperado en la rótula plástica (M_{pe}) más el momento producido por el corte ubicado en la misma (V_u), y viene dado por la siguiente expresión:

$$M_{uc} = M_{pe} + V_u * L_p \qquad \text{(Ec. 3-3)}$$

$$\text{Donde: } M_{pe} = 1{,}1 * R_y * F_y * Z_x \qquad \text{(Ec. 3-4)}$$

$Ry = 1.1$ para aceros de alta resistencia y $Ry = 1.5$ para aceros de baja resistencia.

2.2 Análisis de la Línea de Cedencia

El análisis de la línea de cedencia es el procedimiento utilizado en la actualidad para determinar la resistencia a la flexión de la plancha extrema y del ala de la columna. Este análisis es comúnmente realizado por el método del trabajo virtual, el cual fue utilizado para establecer las ecuaciones de predicción

para la determinación de la resistencia a la flexión de los elementos antes mencionados.

Para realizar el análisis se deben tomar varias líneas de cedencia de prueba, y la que resulte en la carga de falla más baja, es la que controlará el diseño de la unión.

En la actualidad, se ha simplificado el procedimiento de diseño, y ya están determinados los parámetros[15] del mecanismo de la línea de cedencia que controla en las conexiones a momento con plancha extrema.

En la figura 3.5 se muestra el parámetro geométrico (S) como indicador de la distancia desde el centro del perno interno más lejano del ala de la viga, hasta la línea de cedencia.

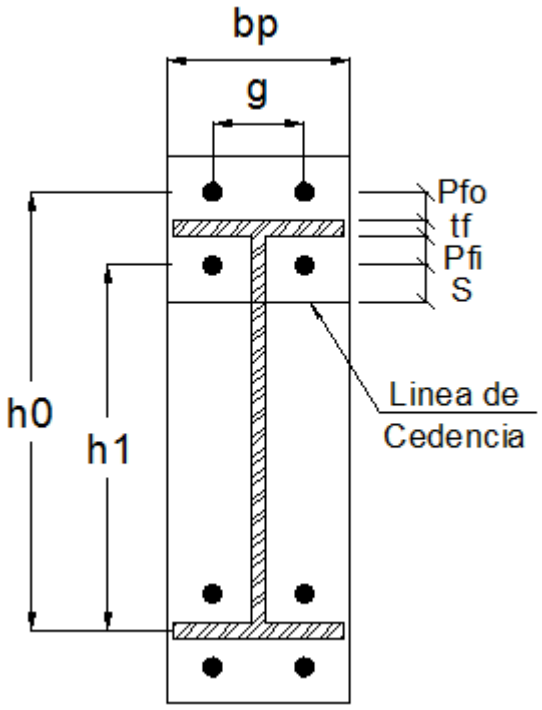


Fig. 3.5. Ubicación de la Línea de Cedencia en la Pancha Extrema.
Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

2.3 Resistencia de los pernos

Los pernos en las conexiones a momento con plancha extrema se ven sometidos a distintas solicitaciones, incluyendo las fuerzas de palanca que se

[15] Estos parámetros de diseño se muestran en la tabla 3.2.

generan en la plancha extrema. El estudio y predicción de estas fuerzas es llevado a cabo utilizando una analogía con el comportamiento de una sección T, la cual, bajo la acción de esas solicitaciones, es similar al que tiene la conexión con plancha extrema.

Se han realizado distintos estudios, entre los cuales se encuentra el modelo desarrollado por Kennedy y otros en el año 1981, el cual resume el comportamiento del ala de la sección T en 3 etapas, a medida que se incrementa la carga aplicada (Murray y Sumner, 2003). Estas etapas se pueden resumir de la siguiente manera:

a) Etapa 1: Se considera que la plancha es gruesa y se asume que no hay fuerza de apalancamiento. Ocurre a bajos niveles de carga y comportamiento elástico.

b) Etapa 2: Se considera que la plancha es de un espesor intermedio, aparecen las fuerzas de apalancamiento y se forma la rótula plástica en el ala.

c) Etapa 3: Se considera que la plancha es delgada, las fueras de apalancamiento son máximas y una segunda rótula plástica aparece en la línea de pernos.

En la figura 3.6 se muestran las 3 etapas, en donde se ilustran las fuerzas de apalancamiento (Q), y la aparición de las rótulas plásticas.

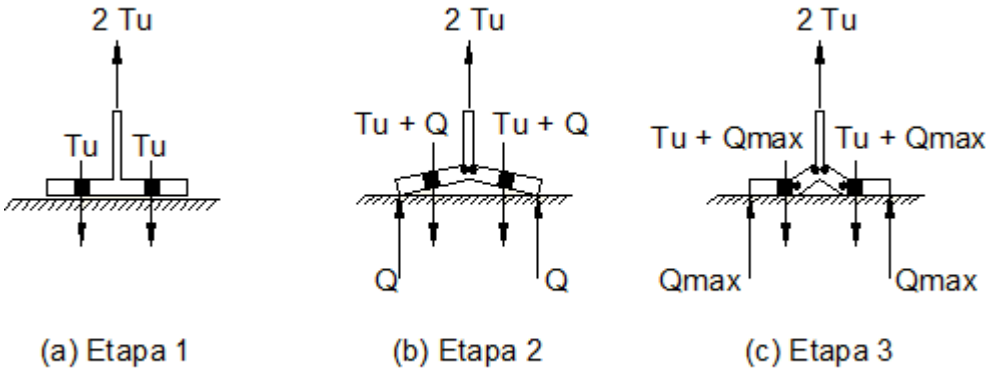


Fig. 3.6. Estados del Comportamiento de la Plancha del Modelo desarrollado por Kennedy y otros en el año 1981.
Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

Sin embargo, Borgsmiller en el año 1995 simplificó el método de Kennedy, tomando en cuenta sólo el comportamiento de plancha gruesa y plancha delgada y, basado en investigaciones anteriores, determinó los parámetros para diferenciar si una plancha se puede considerar de

comportamiento de plancha gruesa o delgada. Estos parámetros son los siguientes:

- Si la fuerza aplicada a la plancha es mayor al noventa por ciento (90%) de la resistencia de la misma, se considera que la plancha se comporta como plancha delgada, y se asumen máximas las fuerzas de apalancamiento.
- Si por el contrario, la fuerza aplicada a la plancha es menor al noventa por ciento (90%) de la resistencia de la misma, se considera que la plancha tiene un comportamiento de plancha gruesa, y no se consideran las fuerzas de apalancamiento.

Algunos autores como Fratelli (1999) trabajan con las fuerzas de apalancamiento, calculando sus valores y el momento que éstas generan, para así determinar con ese momento el espesor requerido de la plancha, de tal manera que resista la acción de estas fuerzas. Sin embargo, en el procedimiento de diseño sugerido la *Guía de Diseño N° 4 del AISC*, se calcula un momento que evita la aparición de estas fuerzas de apalancamiento, y con este momento se calcula el espesor requerido de la plancha extrema. Este espesor calculado con ese momento garantiza que la plancha extrema trabaje como plancha gruesa y evita que aparezcan las fuerzas de apalancamiento, obligando al comportamiento inelástico entre las vigas conectadas y zona del panel de la columna[16], y que el ala de la columna y la plancha extrema permanezcan elásticas[17].

Cuando el comportamiento de la plancha es de plancha gruesa, la resistencia de los pernos se calcula con el momento estático que generan las fuerzas de los pernos en la mitad del ala a compresión de la viga, tal y como se ilustra en la figura 3.7.

[16] La zona de panel de la columna es el área comprendida entre las alas de la columna y la proyección de las alas de la viga conectada, o los rigidizadores de la columna si estos existen.

[17] A efectos de comparación con algunos ejemplos prácticos, se determinó que los espesores de plancha obtenidos con el método propuesto por Fratelli son superiores a aquellos obtenidos con el procedimiento de la *Guía de Diseño N° 4*.

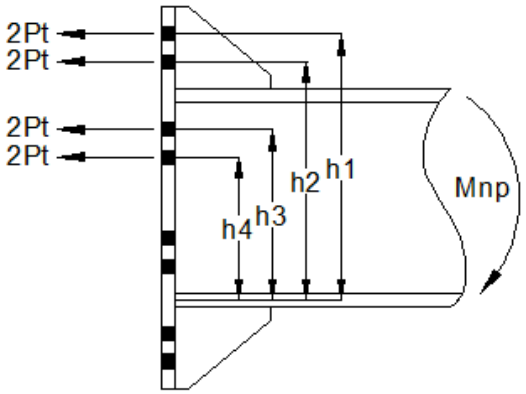


Fig. 3.7. Momento Estático en Plancha Gruesa.
Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

Como la resistencia de la conexión se basa en la resistencia a la ruptura por la tensión de los pernos, este momento estático (M_{np}), se convierte en el parámetro de resistencia de la conexión y viene dado por la siguiente expresión:

$$M_{np} = n * P_t \sum_{i=1}^{N} h_i \qquad \text{(Ec. 3-5)}$$

$$\text{Donde: } P_t = F_t + A_b \qquad \text{(Ec. 3-6)}$$

El momento sin apalancamiento de los pernos desarrollará la totalidad de la resistencia a la tensión de cada perno de la conexión. Sin embargo, se asume que las secciones permanecen planas después de la deformación, y esto causaría que los pernos más alejados desarrollen su máxima resistencia a la tensión antes que los demás, pero Borgsmiller (1995) también asume que los pernos mas externos ceden y se deforman lo suficiente como para que los pernos internos desarrollen también toda su resistencia a la tensión. Lo expuesto anteriormente fue investigado en conexiones extendidas con múltiples filas, y se comprobó su veracidad (Murray y Sumner, 2003).

El momento en el perno para que no existan fuerzas de apalancamiento es calculado para un comportamiento de plancha gruesa. Para asegurar la existencia de este comportamiento, la resistencia sin apalancamiento del perno debe ser menor o igual al noventa por ciento (90%) de la resistencia a la flexión de la plancha extrema y del ala de la columna, es decir:

$$M_{np} \leq 0{,}9 * M_{pl} \quad \vee \quad M_{np} \leq 0{,}9 * M_{cf} \qquad \text{(Ec. 3-7)}$$

2.4 Estados Límites a Verificar en el Diseño

De acuerdo con lo indicado en la *Guía de Diseño N° 4 del AISC*, los estados límites que se deben verificar para el diseño de una conexión a momento con plancha extrema son:

- Cedencia por flexión de la plancha extrema en las cercanías de los pernos del ala a tensión. Este estado límite no es usualmente crítico, pero la cedencia produce rápidos incrementos en las fuerzas de tensión de los pernos.
- Cedencia por corte de la plancha extrema. Este estado límite no se observa normalmente, pero en combinación con la flexión, puede causar reducción de la capacidad a flexión y de la rigidez.
- Ruptura por corte de la plancha extrema sin rigidizar a través de la línea de agujeros de pernos externos.
- Ruptura por tensión del perno. Este es el estado límite mas critico en una conexión a momento con plancha extrema y, por lo tanto, es el que controla finalmente su capacidad.
- Ruptura del perno por corte, debido al corte existente en la interface entre la plancha extrema y el ala de la columna.
- Falla por aplastamiento de la plancha extrema o del ala de la columna.
- Ruptura de la soldadura entre la plancha extrema y el ala a tensión de la viga, o de la soldadura entre la región a tensión del alma de la viga y la plancha extrema.
- Cedencia por corte de la soldadura entre el alma de la viga y la plancha extrema, o de la soldadura del metal base del alma de la viga.
- Cedencia del alma de la columna opuesta a las alas a compresión o tensión de la viga conectada.
- Cizallamiento del alma de la columna opuesta al ala a compresión de la viga conectada.
- Pandeo del alma de la columna opuesta al ala en compresión de la viga conectada.
- Cedencia por flexión del ala de la columna en la cercanía de los pernos a tensión.
- Falla del rigidizador de plancha continua de la columna debido a la cedencia, el pandeo local o falla de la soldadura.
- Falla de la zona de panel de la columna debido a la cedencia por corte o pandeo de la plancha del alma.

2.5 Detallado y Prácticas de Fabricación

Adicionalmente a la verificación de los estados límites que determinan la capacidad de las conexiones a momento con plancha extrema, existen otros factores muy importantes que deben ser considerados por el Ingeniero Estructural. Entre estos factores podemos mencionar el detallado de la conexión, los procedimientos de soldadura entre la plancha extrema y la viga o el diseño de los rigidizadores, en el caso de que la conexión sea rigidizada.

Al momento de diseñar y establecer las dimensiones y la disposición de los pernos, deben ser seleccionadas, entre otras, la distancia horizontal entre las columnas de pernos o gramil (g), la distancia desde la cara del ala de la viga al *centerline* del perno más cercano (P_{fo}, P_{fi}) y la distancia de la línea media de un perno a la línea media del perno en la fila adyacente (P_b). En el caso de la distancia desde la cara del ala de la viga a la línea media del perno más cercano, se acostumbra a que sea igual a 5 cm para cualquier diámetro de perno (Murray y Summer, 2003), y la distancia entre líneas medias de pernos se selecciona de acuerdo con las recomendaciones del AISC, usando un valor no menor a 3 veces el diámetro del perno (AISC, 1999). Estas dimensiones se deben seleccionar para que se pueda trabajar, de forma cómoda y adecuada, en la instalación y apriete de los pernos.

El ancho de la plancha extrema también debe ser establecido y es de práctica común, ya sea para facilitar la instalación de la plancha o como margen para posibles errores en el proceso de soldadura, que sea seleccionado aquel valor estándar que sea igual o cercano al obtenido de sumar el ancho del ala de la viga de conexión más 2,54 cm (1 pulg.)[18].

La presencia de rigidizadores en una conexión con plancha extrema extendida permite que parte de las tensiones desarrolladas en el ala de la viga sean absorbidas por la plancha extrema y los pernos, aumentando la resistencia de la plancha extrema y disminuyendo el espesor requerido de la misma. Los rigidizadores que se utilizan son planchas en forma de cartelas que se unen, mediante soldaduras, al ala de la viga y a la plancha extrema.

El detallado del rigidizador de la plancha extrema es de gran importancia para garantizar el comportamiento deseado del mismo, la relación entre la altura del rigidizador (L_{st}) y el ancho (h_{st}) del mismo será igual a:

$$L_{st} = \frac{h_{st}}{\tan(30°)} \qquad \text{(Ec. 3-8)}$$

[18] Estas dimensiones se muestran en la figura 3.4 "Parámetros Geométricos Generales de una Conexión a Momento con Plancha Extrema".

La terminación del rigidizador contra la plancha extrema y contra el ala de la viga, deberá tener un corte perpendicular a ellas de aproximadamente 2,54 cm, para facilitar el proceso de soldadura.

El espesor del rigidizador (t_s) será igual o mayor que el espesor del alma de la viga, si la resistencia de los materiales son iguales. En el caso de que la resistencia del material del rigidizador sea diferente a la resistencia del material de la viga, el espesor del rigidizador será mayor que la relación entre la resistencia a la cedencia de la viga y el rigidizador, y el espesor del alma de la viga.

En el caso de las soldaduras, se pueden especificar que las mismas sean de filete o de penetración completa entre el rigidizador y el ala de la viga. Si el espesor del rigidizador es mayor a 10 mm (3/8 pulg.), la soldadura entre el rigidizador y la plancha extrema debería ser una soladura de penetración completa, mientras que para espesores menores es aceptable usar la soldadura de filete.

En la figura 3.8 se muestra la geometría detallada de un rigidizador de plancha extrema.

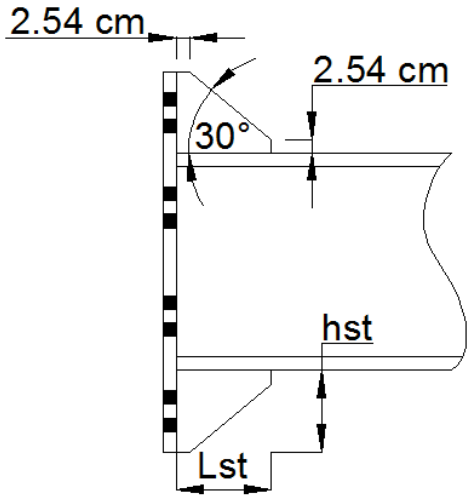


Fig. 3.8. Geometría del Rigidizador de Plancha Extrema.
Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

De acuerdo con la *Norma Venezolana COVENIN 1618:1998 "Estructuras de Acero para Edificaciones. Método de los Estados Límites"*, las soldaduras deberán ser realizadas de acuerdo a las especificaciones del *Structural Welding Code, AWS D1.1* de la American Welding Society (AWS) y de forma que resistan las cargas aplicadas.

La soldadura entre la plancha extrema y el alma de la viga puede ser una soldadura de filete, o en el caso de que esta sea muy larga, se puede usar una soldadura de ranura de penetración completa o CJP[19]. La soldadura entre el ala de la viga y la plancha extrema dependerá de los espesores del ala. En el caso de que el espesor de la misma sea mayor a 10 mm (3/8 pulg.), la soldadura debería ser una soladura de ranura de penetración completa. Para espesores menores, es aceptable usar la soldadura de filete. Es importante que la soldadura entre la plancha extrema y el alma de la viga sea ejecutada antes que la soldadura entre la plancha extrema y el ala de la viga para evitar esfuerzos adicionales en esta última debido a la contracción de la soldadura en el alma.

En el caso de los rigidizadores de la plancha extrema, la soldadura entre ellos y el ala de la viga puede ser una soldadura de filete, si el espesor de la plancha del rigidizador es igual o menor a 10 mm (3/8 pulg.), o una soldadura de ranura de penetración completa, ya sea con bisel sencillo o doble.

3. Procedimiento de Diseño Detallado de una Conexión a Momento con Plancha Extrema

De acuerdo con lo indicado en la *Guía de Diseño N° 4 del AISC*, existen cuatro parámetros principales para el diseño de una conexión a momento con plancha extrema sometidas a cargas cíclicas y sísmicas, los cuales son:

a) El momento de diseño requerido.
b) Resistencia de los pernos de conexión.
c) Resistencia de la plancha extrema.
d) Resistencia a la flexión del ala de la columna.

En la figura 3.9 se muestran los parámetros geométricos de una conexión a momento con plancha extrema, a fin de tener un entendimiento más claro de todo el procedimiento de diseño.

[19] Siglas en inglés de *Complete Joint Penetration*.

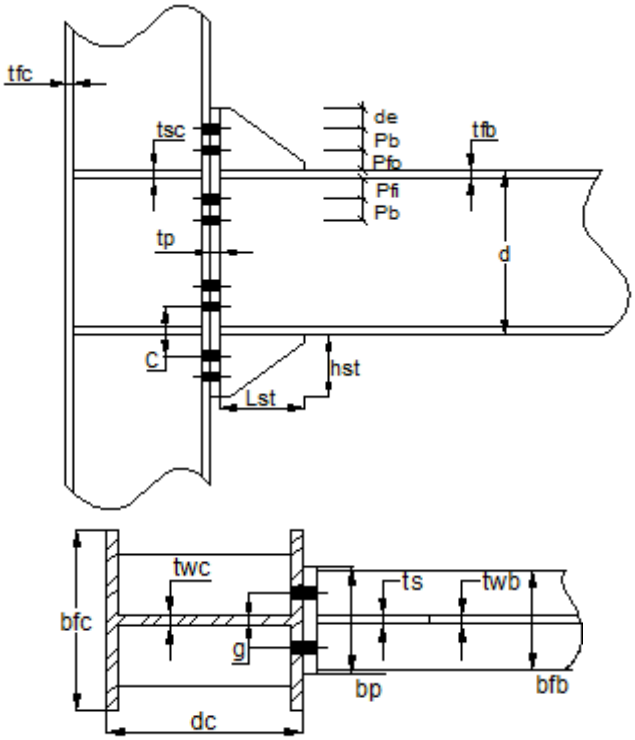


Fig. 3.9. Parámetros Geométricos Generales de una Conexión con Plancha Extrema. Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

En las siguientes secciones se presenta el procedimiento de diseño detallado de una conexión a momento con plancha extrema, de acuerdo con las recomendaciones de la *Guía de Diseño N°4 del AISC*.

3.1 Cálculo del momento de diseño en el ala de la columna (M_{uc})

- Para zonas de alta sismicidad:

$$M_{uc} = M_{pe} + V_u * L_p \qquad \text{(Ec. 3-9)}$$

$$M_{pe} = 1{,}1 * R_y * F_y * Z_x \qquad \text{(Ec. 3-10)}$$

$R_y = 1{,}1$ para aceros de alta resistencia y $R_y = 1{,}5$ para aceros de baja resistencia.

Para conexiones no rigidizadas (4E):

$$L_p = min\left(\frac{d}{2}; 3 * b_f\right) \qquad \text{(Ec. 3-11)}$$

Para conexiones rigidizadas (4ES, 8ES):

$$L_p = L_{st} + t_p \qquad \text{(Ec. 3-12)}$$

- Para solicitaciones de viento y zonas de baja sismicidad:

$$M_{uc} = 0{,}90 * F_{yb} * Z_{xb} \qquad \text{(Ec. 3-13)}$$

3.2 Selección de una de las tres configuraciones de conexiones a momento con plancha extrema (4E, 4ES, 8ES), y establecer valores preliminares para la geometría de la conexión $(g, P_{fi}, P_{fo}, P_b, etc.)$

3.3 Cálculo del diámetro requerido de los pernos $(d_{b\,req.})$

Para conexiones de cuatro (4) pernos (4E, 4ES):

$$d_{b\,req.} = \sqrt{\frac{2 * M_{uc}}{\pi * \emptyset * F_t * (h_0 + h_1)}} \qquad con\ \emptyset = 0{,}75 \qquad \text{(Ec. 3-14)}$$

Para conexiones de ocho (8) pernos (ES):

$$d_{b\,req.} = \sqrt{\frac{2 * M_{uc}}{\pi * \emptyset * F_t * (h_1 + h_2 + h_3 + h_4)}} \quad con\ \emptyset = 0{,}75 \qquad \text{(Ec. 3-15)}$$

En la Tabla 3.1 se muestra la resistencia teórica a la tracción (F_t) de los distintos tipos de pernos.

Tabla 3.1 Resistencia a la Tracción de los Pernos.[20]

Tipo de Perno	Resistencia Teórica a la Tracción (F_t) (kg/cm^2)
A307	3.160
A325	6.330
A490	7.940

Fuente: Adaptado de la Tabla 22.6 de la Norma COVENIN-MINDUR 1618-1998.

[20] Para las conexiones a momento con plancha extrema sólo se utilizan pernos de alta resistencia. Los pernos A307 no son utilizados en este tipo de conexión.

3.4 Selección de un diámetro de perno de prueba (d_b), mayor al obtenido en el paso anterior $(d_{b\,req.})$, y cálculo del momento en el perno para que no existan fuerzas de apalancamiento (M_{np})

Para conexiones de cuatro (4) pernos (4E, 4ES):

$$M_{np} = 2 * P_t * (h_0 + h_1) \quad \text{(Ec. 3-16)}$$

Donde:

$$h_0 = d + P_{fo} - \frac{t_{fb}}{2} \quad \text{(Ec. 3-17)}$$

$$h_1 = d - P_{fi} - \frac{3 * t_{fb}}{2} \quad \text{(Ec. 3-18)}$$

Para conexiones de ocho (8) pernos (8ES):

$$M_{np} = 2 * P_t * (h_1 + h_2 + h_3 + h_4) \quad \text{(Ec. 3-19)}$$

Donde:

$$P_t = F_t * A_b = F_t * \left(\frac{\pi * d_b^2}{4}\right) \quad \text{(Ec. 3-20)}$$

$$h_1 = d + P_{fo} + P_b - \frac{t_{fb}}{2} \quad \text{(Ec. 3-21)}$$

$$h_2 = d + P_{fo} - \frac{t_{fb}}{2} \quad \text{(Ec. 3-22)}$$

$$h_3 = d - t_{fb} - P_{fo} - \frac{t_{fb}}{2} \quad \text{(Ec. 3-23)}$$

$$h_4 = d - t_{fb} - P_{fo} - P_b - \frac{t_{fb}}{2} \quad \text{(Ec. 3-24)}$$

3.5 Determinar el espesor de la plancha extrema requerido $(t_{p\,req.})$

$$t_{p\,req.} = \sqrt{\frac{1{,}11 * \emptyset * M_{np}}{\emptyset_b * F_{yp} * Y_p}} \qquad con\ \emptyset = 0{,}75\ y\ \emptyset_b = 0{,}90 \quad \text{(Ec. 3-25)}$$

La tabla 3.2 muestra los patrones de línea de cedencia (Y_p) de la plancha extrema a utilizar en cada tipo de conexión.

Tabla 3.2. Patrones de Línea de Cedencia en la Plancha Extrema

Conexión con Plancha Extrema Extendida de Cuatro Pernos No Rigidizada (4E)

$$Y_p = \frac{b_p}{2} * \left[h_1 * \left(\frac{1}{P_{fi}} + \frac{1}{S}\right) + h_0 * \left(\frac{1}{P_{fo}}\right) - \frac{1}{2}\right] + \frac{2}{g}\left[h_1 * \left(P_{fi} + S\right)\right] \quad \text{(Ec. 3-26)}$$

Conexión con Plancha Extrema Extendida de Cuatro Pernos Rigidizada (4ES)

$Caso\ 1\ (d_e < S)$

$$Y_p = \frac{b_p}{2} * \left[h_1 * \left(\frac{1}{P_{fi}} + \frac{1}{S}\right) + h_0 * \left(\frac{1}{P_{fo}} + \frac{1}{2 * S}\right)\right] + \frac{2}{g} * \left[h_1 * \left(P_{fi} + S\right) + h_0 * \left(d_e + P_{fo}\right)\right] \quad \text{(Ec. 3-27)}$$

$Caso\ 2\ (d_e > S)$

$$Y_p = \frac{b_p}{2} * \left[h_1 * \left(\frac{1}{P_{fi}} + \frac{1}{S}\right) + h_0 * \left(\frac{1}{S} + \frac{1}{P_{fo}}\right)\right] + \frac{2}{g} * \left[h_1 * \left(P_{fi} + S\right) + h_0 * \left(S + P_{fo}\right)\right] \quad \text{(Ec. 3-28)}$$

Conexión con Plancha Extrema Extendida de Ocho Pernos Rigidizada (8ES)

$Caso\ 1\ (d_e < S)$

$$Y_p = \frac{b_p}{2}\left[h_1 \frac{1}{2 * d_e} + h_2 * \frac{1}{P_{fo}} + h_3 * \frac{1}{P_{fi}} + h_4 * \frac{1}{S}\right] + \quad \text{(Ec. 3-29)}$$

$$+\frac{2}{g} * \left[h_1 * \left(d_e + \frac{P_b}{4}\right) + h_2 * \left(P_{fo} + \frac{3 * P_b}{4}\right) + h_3 * \left(P_{fi} + \frac{P_b}{4}\right) + h_4 * \left(S + \frac{3 * P_b}{4}\right) + P_b^2\right] + g$$

$Caso\ 2\ (d_e > S)$

$$Y_p = \frac{b_p}{2}\left[h_1 \frac{1}{S} + h_2 * \frac{1}{P_{fo}} + h_3 * \frac{1}{P_{fi}} + h_4 * \frac{1}{S}\right] + \quad \text{(Ec. 3-30)}$$

$$+\frac{2}{g} * \left[h_1 * \left(S + \frac{P_b}{4}\right) + h_2 * \left(P_{fo} + \frac{3 * P_b}{4}\right) + h_3 * \left(P_{fi} + \frac{P_b}{4}\right) + h_4 * \left(S + \frac{3 * P_b}{4}\right) + P_b^2\right] + g$$

Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

<u>*NOTA:*</u>

$$S = \frac{1}{2} * \sqrt{b_p * g} \quad \text{(Ec. 3-31)}$$

$$Si\ P_{fi} > S, usar\ P_{fi} = S$$

3.6 Seleccionar un espesor de Plancha Extrema (t_p) mayor al espesor requerido

El espesor de la plancha debe cumplir las siguientes condiciones:

$$t_p \geq \max(t_{p\,req.}, d_b) \qquad \text{(Ec. 3-32)}$$

3.7 Calcular la fuerza mayorada en el ala de la viga

$$F_{fu} = \frac{M_{uc}}{d - t_{fb}} \qquad \text{(Ec. 3-33)}$$

3.8 Verificación de la capacidad por cedencia al corte de la porción extendida de la plancha extrema (Sólo en conexiones de 4E)

$$\emptyset R_n = \emptyset * 0{,}6 * F_{yp} * b_p * t_p \quad con\ \emptyset = 1{,}00\ ^{21,22} \qquad \text{(Ec. 3-34)}$$

$$\frac{F_{fu}}{2} \leq \emptyset R_n \qquad \text{(Ec. 3-35)}$$

Si la desigualdad no se satisface, incrementar el espesor de la plancha extrema hasta que se satisfaga.

3.9 Verificación de la capacidad por rotura en la sección neta de corte de la porción extendida de la plancha extrema (Sólo en conexiones 4E)

$$\emptyset R_n = \emptyset * 0{,}6 * F_{up} * A_n \qquad con\ \emptyset = 0{,}75 \qquad \text{(Ec. 3-36)}$$

[21] De acuerdo con lo indicado en el procedimiento de la *Guía de Diseño N° 4 del AISC* y en la *Norma Covenin 1618:1998 "Estructuras de Acero para Edificaciones. Método de los Estados Límites"*, el factor $\emptyset$ es igual a 0.90. Sin embargo, se actualizó con la sección J4.2 del *AISC 360-05 "Specifications for Structural Steel Buildings"*.

[22] De acuerdo con Winters-Downey y Fadden (2008), las ediciones anteriores del LRFD utilizaban un factor de minoración de la resistencia $\emptyset = 0.90$, pero a fin de mantener la correspondencia entre el LRFD y ediciones anteriores del ASD, esta fue una de las áreas donde el LRFD fue modificado. Una de las relaciones fundamentales entre el ASD y el LRFD en la especificación del 2005 del AISC es aquella que establece que $\emptyset = {}^{1.50}/_{\Omega}$ (donde Ω es el factor de seguridad para el diseño por ASD). Las ediciones anteriores del ASD fueron desarrolladas de manera que el factor de seguridad para este estado límite en particular fuera 1.50. Cuando el LRFD fue desarrollado, el factor de minoración $\emptyset = 0.90$ originaba que el factor de seguridad equivalente para este estado límite se incrementara hasta 1.67 (aproximadamente 10% adicional). Los comentarios a la especificación del AISC indican que este incremento de 10% aproximadamente era muy conservador, lo cual es soportado por la evidencia histórica del adecuado desempeño de las conexiones tradicionales diseñadas con el ASD, por lo que se justifica su modificación para llevarlo a $\emptyset = 1.00$.

$$\frac{F_{fu}}{2} \leq \emptyset R_n \qquad \text{(Ec. 3-37)}$$

Donde:

$$A_n = t_p * \left[b_p - 2 * (d_a)^{23}\right]^{24} \qquad \text{(Ec. 3-38)}$$

Si la desigualdad no se satisface, incrementar el espesor de la plancha extrema hasta que se satisfaga. En el caso que se supere el valor comercial de 50 mm, se deberá tomar una sola de las siguientes consideraciones:

- Aumentar la altura de la viga (d), para disminuir las fuerzas en las alas.
- Si la conexión seleccionada es de cuatro (4) pernos, cambiar a una configuración de ocho (8) pernos.
- En caso de que la conexión no sea rigidizada, colocar rigidizadores.

3.10 Si se está usando la conexión Extendida de 4 pernos Rigidizada (4ES) o la Extendida de 8 pernos Rigidizada (8ES), seleccionar el espesor del rigidizador de la plancha extrema (t_s) y diseñar las soldaduras entre el rigidizador y el ala de la viga, y entre el rigidizador y la plancha extrema

$$t_{s\,req.} = t_{wb}\left(\frac{F_{yb}}{F_{ys}}\right) \qquad \text{(Ec. 3-39)}$$

Luego de seleccionar un espesor (t_s) mayor que el espesor requerido, se deberá satisfacer el siguiente criterio para prevenir el pandeo local del rigidizador de la plancha:

$$\frac{h_{st}}{t_s} \leq 0{,}56 * \sqrt{\frac{E}{F_{ys}}} \qquad o \qquad t_s \geq 1{,}79 * h_{st} * \sqrt{\frac{F_{ys}}{E}} \qquad \text{(Ec. 3-40)}$$

Se puede especificar soldadura de filete o de ranura penetración completa entre el rigidizador y el ala de la viga. Si el espesor del rigidizador es mayor a 10 mm (3/8 pulg.), la soldadura entre el rigidizador y la plancha extrema debería ser una soldadura de ranura de penetración completa. Para espesores menores, es aceptable usar soldadura de filete.

[23] Para este cálculo se toma el diámetro del agujero: $d_a = d_b + 3mm$.

[24] Área neta cuando se usan agujeros estándar.

3.11 Verificación de la resistencia a la rotura por corte de la conexión[25]

Resistencia requerida:

$$V_u \leq \emptyset R_n \qquad \text{(Ec. 3-41)}$$

$$\emptyset R_n = \emptyset * n_b * F_v * A_b \qquad con\ \emptyset = 0{,}75 \qquad \text{(Ec. 3-42)}$$

En la Tabla 3.3 se muestra la resistencia teórica al corte (F_v) de los distintos tipos de pernos.

Tabla 3.3. Resistencia al Corte de los Pernos.

Tipo de Perno	Resistencia Teórica al Corte (F_v) (kg/cm2)
A307[a]	1690
A325-N	3370
A325-X	4220
A490-N	4220
A490-X	5720

Notas:
N: Rosca iNcluida en el plano de corte.
X: Rosca eXcluida en el plano de corte.
[a]: Rosca incluida o no en el plano de corte.

Fuente: Adaptado de la Tabla 22.6 de la Norma COVENIN-MINDUR 1618-1998.

Si la desigualdad no se satisface, incrementar el diámetro del perno o el número de pernos.

3.12 Verificación del aplastamiento en la plancha extrema y en el ala de la columna

- En la plancha extrema:

Resistencia Requerida

$$V_u \leq \emptyset R_n \qquad \text{(Ec. 3-43)}$$

$$R_n = \min\left(1{,}2 * L_c * t_p * F_{up}\ ;\ 2{,}4 * d_b * t_p * F_{up}\right) \qquad \text{(Ec. 3-44)}$$

$$L_c = \left(P_{fi} + t_{fb} + P_{fo}\right) - (d_a) \qquad \text{(Ec. 3-45)}$$

[25] Se asume que la capacidad viene dada por los pernos ubicados en el ala a compresión.

$$\emptyset R_n = n_i * \emptyset * R_n + n_o * \emptyset * R_n \qquad con\ \emptyset = 0{,}75 \qquad \text{(Ec. 3-46)}$$

Donde:

n_i es el número de pernos internos. Dos (2) para 4E y 4ES, y cuatro (4) para 8ES.

n_o es el número de pernos externos. Dos (2) para 4E y 4ES, y cuatro (4) para 8ES

$d_a$es el diametro del agujero y es igual a $d_b + 2\ mm$

Si la desigualdad no se satisface, incrementar el espesor de la plancha extrema.

- En el ala de la columna:

Resistencia requerida:

$$V_u \leq \emptyset R_n \qquad \text{(Ec. 3-47)}$$

$$\emptyset R_n = \emptyset R_n * \frac{t_{fc}}{t_p} * \frac{F_{yp}}{F_{yc}} \qquad \text{(Ec. 3-48)}$$

3.13 Diseñar las soldaduras entre la plancha extrema y el ala y entre la plancha extrema y el alma

- Soldadura entre la plancha extrema y las alas de la viga:

a) Para zonas de alta sismicidad:

Usar soldadura de ranura de penetración completa

b) Para solicitaciones de viento y zonas de baja sismicidad:

La fuerza de diseño de la soldadura será igual a la fuerza mayorada en el ala de la viga (Ec. 3-33) y no debe ser menor a $0{,}6 * F_{yb} * A_{fb}$

$$D = \left(\frac{F_{fu}}{1{,}5 * 1{,}392 * Longitud\ efectiva\ soldadura * 16}\right) * 25{,}4 \qquad \text{(Ec. 3-49)}$$

Donde:

$$Longitud\ efectiva = b_{fb} + \left(b_{fb} - t_{wb}\right) \qquad \text{(Ec. 3-50)}$$

- Soldadura entre la plancha extrema y el alma de la viga:

  Para zonas de alta sismicidad y solicitaciones de viento y gravitacionales:

  El tamaño de la soldadura para resistir el esfuerzo a flexión utilizando electrodos E-70 es:

$$D = \left(\frac{0{,}6 * F_{yb} * t_{wb} * 5{,}6 * 10^{-4}}{2 * 1{,}392 * 16}\right) * 25{,}4 \qquad \text{(Ec. 3-51)}$$

  El tamaño de la soldadura necesaria para resistir el corte entre el ala a compresión y la distancia mínima entre la mitad de la profundidad de la viga y el ala a compresión, o la fila interna de pernos a tensión más dos veces el diámetro de los pernos, es:

$$D = \left(\frac{V_u * 2{,}2046 * 25{,}4}{2 * 1{,}392 * Longitud\ efectiva\ soldadura * 16}\right) * 25{,}4 \qquad \text{(Ec. 3-52)}$$

Donde:

$$\text{Longitud efectiva de la soldadura} = d/2 - t_{fb} \qquad \text{(Ec. 3-53)}$$

3.14 Verificación por cedencia a la flexión del ala de la columna

$$t_{fc\,Req} = \sqrt{\frac{1{,}11 * \emptyset * M_{np}}{\emptyset_b * F_{yc} * Y_c}} \quad con\ \emptyset = 0{,}9 \qquad \text{(Ec. 3-54)}$$

$$t_{fc\,Req} \leq t_{fc} \qquad \text{(Ec. 3-55)}$$

Si la desigualdad no se satisface, incrementar el tamaño de la columna o añadir rigidizadores del alma (rigidizadores transversales u horizontales). Si se añaden rigidizadores, se debe verificar la desigualdad utilizando el (Y_c) correspondiente a cada caso.

Donde:

$$P_{so} = P_{si} = \frac{c - t_{stt}}{2} \qquad \text{(Ec. 3-56)}$$

En la tabla 3.4 se muestran los patrones de la línea de cedencia (Y_c) en el ala de la columna para los distintos casos.

Tabla 3.4. Patrones de la Línea de Cedencia en el Ala de la Columna.

Conexión extendida de cuatro pernos (4E, 4ES) sin el alma de la columna rigidizada. $$Y_c = \frac{b_{fc}}{2}\left[h_1 * \frac{1}{S} + h_0 * \frac{1}{s}\right] + \frac{2}{g}\left[h_1 * \left(S + \frac{3*c}{4}\right) + h_0 * \left(S + \frac{c}{4}\right) + \frac{c^2}{2}\right] + \frac{g}{2}$$	(Ec. 3-57)
Conexión extendida de cuatro pernos (4E, 4ES) con el alma de la columna rigidizada. $$Y_c = \frac{b_{fc}}{2}\left[h_1 * \left(\frac{1}{S} + \frac{1}{P_{si}}\right) + h_0 * \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{P_{so}}\right)\right] + + \frac{2}{g}\left[h_1 * (S + P_{si}) + h_0 * (S + P_{so})\right]$$	(Ec. 3-58)
Conexión extendida de ocho pernos (8ES) sin el alma de la columna rigidizada. $$Y_c = \frac{b_{fc}}{2}\left[h_1 * \frac{1}{S} + h_4 * \frac{1}{s}\right] + \frac{2}{g}\left[h_1 * \left(P_b + \frac{c}{2} + S\right) + h_2 * \left(\frac{P_b}{2} + \frac{c}{4}\right) + h_3 * \left(\frac{P_b}{2} + \frac{c}{2}\right) + h_4 * S\right] + \frac{g}{2}$$	(Ec. 3-59)
Conexión extendida de ocho pernos (8ES) con el alma de la columna rigidizada. $$Y_c = \frac{b_{fc}}{2}\left[h_1 * \frac{1}{S} + h_2 * \frac{1}{P_{so}} + h_3 * \frac{1}{P_{si}} + h_4 * \frac{1}{s}\right] + + \frac{2}{g}\left[h_1\left(S + \frac{P_b}{4}\right) + h_2\left(P_{so} + \frac{3*P_b}{4}\right) + h_3\left(P_{si} + \frac{P_b}{4}\right) + h_4\left(S + \frac{3*P_b}{4}\right) + P_b^2\right] + g$$	(Ec. 3-60)

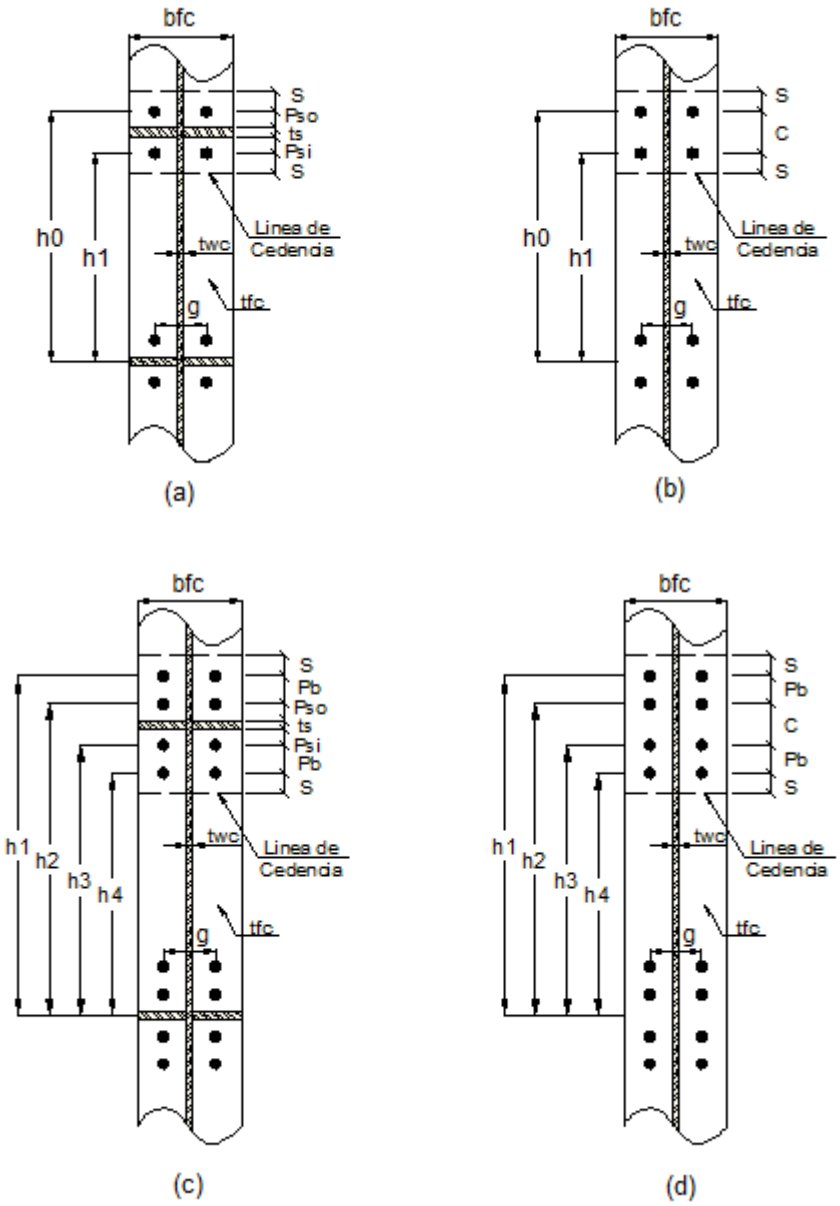
Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

Donde:

$$S = \frac{1}{2}\sqrt{b_{fc} + g} \qquad \text{(Ec. 3-61)}$$

$$Si\ P_{si} > S, usar\ P_{si} = S$$

En la figura 3.10 se muestran los parámetros geométricos y la ubicación de la línea de cedencia del ala de la columna en una conexión a momento con plancha extrema.



En la figura 3.10.a y 3.10.b conexión (4E, 4ES) con rigidizadores y sin rigidizador del alma de la columna respectivamente.
En la figura 3.10.c y 3.10.d conexión (8ES) con rigidizador y sin rigidizadores del alma de la columna respectivamente.

Fig. 3.10. Parámetros Geométricos Generales y Ubicación de la Línea de Cedencia en el Ala de la Columna en una Conexión a Momento con Plancha Extrema.
Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

3.15 Si se requieren rigidizadores por cedencia a la flexión del ala de la columna, se debe determinar la fuerza en el rigidizador

La resistencia de diseño a la flexión del ala de la columna es:

$$\emptyset M_{cf} = \emptyset_b * F_{yc} * Y_c * t_{fc}^2 \quad \text{(Ec. 3-62)}$$

y la fuerza de diseño equivalente de la columna es:

$$\emptyset R_n = \frac{\emptyset M_{cf}}{(d - t_{fb})} \quad \text{(Ec. 3-63)}$$

Donde:

$\emptyset_b = 0{,}90$

3.16 Verificación de la resistencia a la cedencia del alma de la columna considerando una columna sin el alma rigidizada en las alas de la viga conectada

Resistencia Requerida:

$$\emptyset R_n \geq F_{fu} \quad \text{(Ec. 3-64)}$$

$$\emptyset R_n = \emptyset * C_t * \left(6 * k_c + N + 2 * t_p\right) * F_{yc} * t_{wc} \quad con\ \emptyset = 1{,}0 \quad \text{(Ec. 3-65)}$$

Donde:

$C_t = 0{,}5$ si la distancia del tope de la columna al tope de la cara de la viga es menor a la profundidad de la columna (d_c), en el caso contrario será igual a 1,0.[26]

N es el espesor del ala de la viga más el doble del espesor de la soldadura de ranura de refuerzo. En el caso de usar soldadura de filete, será igual al espesor del ala de la viga mas 0,707 veces el espesor de la soldadura de filete de refuerzo.[27]

Si la desigualdad no se satisface, es necesario colocar rigidizadores del alma de la columna.

[26] Para efectos de este Trabajo Especial de Grado, se trabajará siempre con C_t=1,0.

[27] Para efectos de este Trabajo Especial de Grado se asumirá conservadoramente que N = t_{fb}.

3.17 Verificación de la resistencia al pandeo del alma no rigidizada de la columna en el ala a compresión de la viga

Resistencia Requerida:

$$\emptyset R_n \geq F_{fu} \qquad \text{(Ec. 3-66)}$$

a) Cuando F_{fu} es aplicada a una distancia mayor o igual a $^{d_c}/_2$ desde el borde de la columna:

$$\emptyset R_n = \frac{\emptyset * 24 * t_{wc}^3 * \sqrt{E * F_{yc}}}{h} \quad con\ \emptyset = 0{,}9 \qquad \text{(Ec. 3-67)}$$

b) Cuando F_{fu} es aplicada a una distancia menor a $^{d_c}/_2$ desde el borde de la columna:[28]

$$\emptyset R_n = \frac{\emptyset * 12 * t_{wc}^3 * \sqrt{E * F_{yc}}}{h} \quad con\ \emptyset = 0{,}9 \qquad \text{(Ec. 3-68)}$$

Donde:

$$h = \left(\frac{h}{t_w}\right)_c * t_{wc} \qquad \text{(Ec. 3-69)}$$

Si la desigualdad no se satisface, es necesario colocar rigidizadores del alma de la columna.

3.18 Verificación de la resistencia al desgarramiento del alma no rigidizada de la columna en el ala a compresión de la viga

Resistencia Requerida:

$$\emptyset R_n \geq F_{fu} \qquad \text{(Ec. 3-70)}$$

a) Cuando F_{fu} es aplicada a una distancia mayor o igual a $^{d_c}/_2$ desde el borde de la columna:

[28] Para efectos de este Trabajo Especial de Grado, se asumirá conservadoramente que F_{fu} siempre esta aplicada a una distancia menor a $^{d_c}/_2$ desde el borde de la columna.

$$\emptyset R_n = \emptyset * 0{,}80 * t_{wc}^2 * \left[1 + 3 * \left(\frac{N}{d_c}\right) * \left(\frac{t_{wc}}{t_{fc}}\right)^{1.5}\right] * \sqrt{\frac{E * F_{yc} * t_{fc}}{t_{wc}}} \quad \text{(Ec. 3-71)}$$

b) Cuando F_{fu} es aplicada a una distancia menor a $^{d_c}/_2$ desde el borde de la columna:[29]

- Para $\frac{N}{d_c} < 0{,}2$

$$\emptyset R_n = \emptyset * 0{,}40 * t_{wc}^2 * \left[1 + 3 * \left(\frac{N}{d_c}\right) * \left(\frac{t_{wc}}{t_{fc}}\right)^{1{,}5}\right] * \sqrt{\frac{E * F_{yc} * t_{fc}}{t_{wc}}} \quad \text{(Ec. 3-72)}$$

- Para $\frac{N}{d_c} > 0{,}2$

$$\emptyset R_n = \emptyset * 0{,}40 * t_{wc}^2 * \left[1 + \left(\frac{4N}{d_c} - 0{,}2\right) * \left(\frac{t_{wc}}{t_{fc}}\right)^{1{,}5}\right] * \sqrt{\frac{E * F_{yc} * t_{fc}}{t_{wc}}} \quad \text{(Ec. 3-73)}$$

Donde:

En los 3 casos, $\emptyset = 0{,}75$

N es el espesor del ala de la viga más el doble del espesor de la soldadura de ranura de refuerzo. En el caso de usar soldadura de filete, sera igual al espesor del ala de la viga mas 0,707 veces el espesor de la soldadura de filete de refuerzo.

Si la resistencia requerida no se satisface, es necesario colocar rigidizadores del alma de la columna.

3.19 Resistencia requerida por corte en la zona de panel de la columna

- Para solicitaciones de viento y zonas de baja sismicidad con dos vigas conectadas a momento:

[29] Para efectos de este Trabajo Especial de Grado, se asumirá conservadoramente que F_{fu} siempre esta aplicada a una distancia menor a $^{d_c}/_2$ desde el borde de la columna.

a) Columna con dos vigas conectadas a momento:

$$V_{uzp} = F_{fu1} + F_{fu2} - V_{us} \quad \text{(Ec. 3-74)}$$

b) Columna con una viga conectada a momento:

$$V_{uzp} = F_{fu} - V_{us} \quad \text{(Ec. 3-75)}$$

- Para zonas de alta sismicidad las ecuaciones anteriores quedarían alteradas por un factor de reducción $\emptyset$:

a) Columna con dos vigas conectadas a momento:

$$V_{uzp} = \emptyset * \left(F_{fu1} + F_{fu2}\right) - V_{us} \quad \text{(Ec. 3-76)}$$

b) Columna con una viga conectada a momento:

$$V_{uzp} = \emptyset * \left(F_{fu}\right) - V_{us} \quad \text{(Ec. 3-77)}$$

Donde:

V_{us} es el esfuerzo cortante en la planta.[30]

$\emptyset = 0{,}80$

3.20 Capacidad al corte de la zona de panel de la columna

Resistencia Requerida:

$$\emptyset R_v \geq V_{uzp} \quad \text{(Ec. 3-78)}$$

- Si se supone que el comportamiento en la zona de panel se mantiene en el rango elástico:

a) $P_u \leq 0{,}40 * P_y$

$$\emptyset R_v = 0{,}9 * 0{,}6 * F_{yc} * d_c * t_{wc} \quad \text{(Ec. 3-79)}$$

b) $P_u > 0{,}40 * P_y$

[30] Conservadoramente no se tomarán en cuenta los efectos del esfuerzo cortante en la planta.

$$\emptyset R_v = 0{,}9 * 0{,}6 * F_{yc} * d_c * t_{wc} * \left(1{,}4 - \frac{P_u}{P_y}\right) \qquad \text{(Ec. 3-80)}$$

- Si se considera en el análisis de la estabilidad del pórtico la deformación inelástica en la zona de panel de la columna[31]:

  a) $P_u \leq 0{,}75 * P_y$

     i. Para solicitaciones de viento y zonas de baja sismicidad:

$$\emptyset R_v = 0{,}9 * 0{,}6 * F_{yc} * d_c * t_{wc} * \left(1 + \frac{3 * b_{fc} * t_{fc}^2}{d * d_c * t_{wc}}\right) \qquad \text{(Ec. 3-81)}$$

     ii. Para zonas de alta sismicidad:

$$\emptyset R_v = 0{,}75 * 0{,}6 * F_{yc} * d_c * t_{wc} * \left(1 + \frac{3 * b_{fc} * t_{fc}^2}{d * d_c * t_{wc}}\right) \qquad \text{(Ec. 3-82)}$$

  b) $P_u > 0{,}75 * P_y$

     i) Para solicitaciones de viento y zonas de baja sismicidad:

$$\emptyset R_v = 0{,}9 * 0{,}6 * F_{yc} * d_c * t_{wc} * \left(1 + \frac{3 * b_{fc} * t_{fc}^2}{d * d_c * t_{wc}}\right)\left(1{,}9 - \frac{1{,}2 * P_u}{P_y}\right) \qquad \text{(Ec. 3-83)}$$

     ii) Para zonas de alta sismicidad:

$$\emptyset R_v = 0{,}75 * 0{,}6 * F_{yc} * d_c * t_{wc} * \left(1 + \frac{3 * b_{fc} * t_{fc}^2}{d * d_c * t_{wc}}\right)\left(1{,}9 - \frac{1{,}2 * P_u}{P_y}\right) \qquad \text{(Ec. 3-84)}$$

Donde:

$$P_y = A_c * F_{yc} \qquad \text{(Ec. 3-85)}$$

[31] Para efectos de este Trabajo Especial de Grado, se asumirá que el comportamiento en la zona de panel se mantiene en el rango elástico para solicitaciones de viento y zonas de baja sismicidad, mientras que para zonas de alta sismicidad se debe considerar en el análisis de la estabilidad del pórtico la deformación inelástica en la zona de panel de la columna.

3.21 Si se trabaja en zonas de alta sismicidad también debe verificarse el espesor mínimo del alma de la columna

$$t_{wc\,min} = \frac{d_m + d_c - 2 * t_{fc}}{90} \qquad \text{(Ec. 3-86)}$$

$$d_m = d - t_{fb} \qquad \text{(Ec. 3-87)}$$

Si $t_{wc\,min}$ es mayor a t_{wc} se deberá colocar planchas de refuerzo para el alma de la columna.

3.22 Si en alguno de los estados límites previamente estudiados los rigidizadores transversales son necesarios, se calcula la resistencia requerida de los mismos

$$F_{cu} = F_{fu} - \min \emptyset R_n \qquad \text{(Ec. 3-88)}$$

La resistencia mínima de diseño será el menor valor $\emptyset R_n$ obtenido en los pasos previos (3.15, 3.16, 3.17 y 3.18, respectivamente)

Si F_{cu} es negativo los rigidizadores transversales no serán necesarios, y su valor será igual a cero en los siguientes cálculos.

3.23 Si en los estado límites previamente estudiados (Paso 3.20 y 3.21) las planchas de refuerzo son necesarias, la resistencia requerida de las mismas será:

$$V_{udp} = V_{uzp} - \emptyset R_v \qquad \text{(Ec. 3-89)}$$

Donde:

Si V_{udp} es negativo, las planchas de refuerzo no serán necesarias.

$\emptyset R_v$ es la capacidad al corte de diseño del alma de la columna elegida en el paso 3.20.

3.24 Diseño de los rigidizadores transversales

Para el diseño de los rigidizadores transversales de la columna, se seguirán las recomendaciones de la *Guía de Diseño N° 13 del AISC "Wide Flange Column Stiffening at Moment Connections-Wind and Seismic Applications" (Carter, 2003),* las cuales se detallan a continuación.

3.24.1 Cálculo del área transversal mínima para el rigidizador transversal en cada ala

$$A_{stt\ min} = \frac{F_{cu}}{\emptyset * F_{ystt}} \ \ con\ \emptyset = 0{,}9 \qquad \text{(Ec. 3-90)}$$

En el caso de que dos vigas estén conectadas a momento a las alas de la columna, el área transversal mínima del rigidizador se calculará con la máxima fuerza mayorada (F_{fu}) entre las dos vigas, y no con la combinación de estas.

3.24.2 Cálculo del ancho mínimo de cada rigidizador transversal

a) Para solicitaciones de viento y zonas de baja sismicidad:

$$b_{stt\ min} = \frac{b_{fb}}{3} - \frac{t_{ps}}{2} \qquad \text{(Ec. 3-91)}$$

Donde:

t_{ps}:

- En el caso de que no se usen planchas de refuerzo en el alma de la columna o si estas se extienden, sin pasar al rigidizador transversal, será igual al espesor del alma de la columna (t_{wc}).
- En el caso de que las planchas de refuerzo en el alma de la columna se extiendan más allá de los rigidizadores transversales, entonces será igual al espesor total de la zona de panel de la columna.[32]

b) Para zonas de alta sismicidad el rigidizador será tal que su ancho total $(2 * b_{stt} + t_{wc})$, será igual o mayor que el ancho del ala de la viga (b_{fb}) o el ancho de la plancha del ala, o se extenderá la totalidad del ancho del ala de la columna.[33]

En la figura 3.11 se muestra la geometría de un rigidizador transversal.

[32] Para los efectos de este Trabajo Especial de Grado las planchas de refuerzo, en solicitaciones de viento y baja sismicidad, no se extenderán más allá de los rigidizadores transversales.

[33] No se considerará la presencia de planchas del ala en este Trabajo Especial de Grado.

3.24.3 Cálculo del espesor mínimo de cada rigidizador transversal

a) Para solicitaciones de viento y zonas de baja sismicidad:

- El mínimo espesor del rigidizador será:

$$t_{sttmin} = \frac{t_{fb}}{2} \geq \frac{b_{stt} * \sqrt{F_{ystt}}}{797} \qquad \text{(Ec. 3-92)}$$

- El espesor requerido para un par de rigidizadores de profundidad total será: [34]

$$t_s \geq \frac{F_{cu1} + F_{cu2}}{0{,}9 * 0{,}6 * F_{yst} * (l - 2 * clip) * 2} \qquad \text{(Ec. 3-93)}$$

Donde:

t_s es el espesor del rigidizador transversal.

$clip$ es el corte diagonal en el borde del rigidizador necesario para colocar las soldaduras.[35]

b) Para zonas de alta sismicidad el espesor del rigidizador transversal será igual al espesor del ala de la viga conectada o al espesor de la plancha del ala para satisfacer las recomendaciones del FEMA (1995)[36].

3.24.4 Profundidad del rigidizador

Como se indico previamente la profundidad o longitud del rigidizador (l) será igual a la distancia comprendida entre las alas de la columna y considerando el espacio requerido para colocar las soldaduras.

$$l = d_c - 2 * t_{fc} \qquad \text{(Ec. 3-94)}$$

[34] Para los efectos de este Trabajo Especial de Grado, se trabajará sólo con rigidizadores de profundidad total. No se tomaran en cuenta rigidizadores transversales de profundidad parcial. Para el diseño de estos últimos, referirse a la *Guía de Diseño N° 13 del AISC*.

[35] Según el Manual AISC-LRFD (1999), generalmente un clip de 1,9 cm (3/4 pulg.) de diagonal es adecuado para la mayoría de las soldaduras entre el ala y el alma de la columna.

[36] Otras investigaciones demuestran que si el espesor del rigidizador transversal es igual o mayor al 60% del espesor de la plancha del ala o del ala de la viga, puede proveer la rigidez necesaria de la sección transversal del rigidizador, si y solo si, una sola viga es conectada a momento a la columna (El Tawil et al., 1998).

En la figura 3.11 se muestra el parámetro geométrico (l) de un rigidizador transversal.

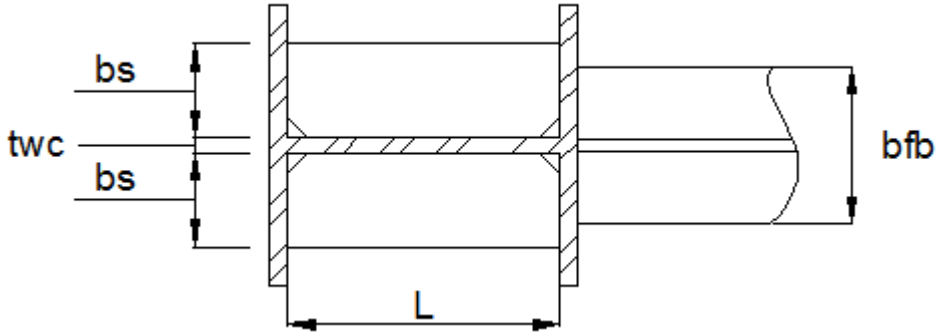


Fig. 3.11. Parámetros Geométricos Generales de un Rigidizador Transversal.
Fuente: Adaptado de Carter (2003).

3.24.5 Cálculo del área transversal real del rigidizador

$$A_{stt} = 2 * t_{stt} * (b_s - clip) \quad \text{(Ec. 3-95)}$$

$$A_{stt} \geq A_{stt\,min} \quad \text{(Ec. 3-96)}$$

3.24.6 Cálculo del tamaño de la soldadura

a) Soldadura para conectar el rigidizador con las alas de la columna:

i) En solicitaciones de viento y zona de baja sismicidad:

- Si se necesitan rigidizadores transversales por la tensión ejercida por el ala (cedencia por flexión del ala o cedencia del alma), la soldadura doble de filete tendrá un tamaño mínimo igual a:

$$D = \frac{0{,}943 * F_{ystt} * t_{stt}}{F_{EXX}} \quad \text{(Ec. 3-97)}$$

- Si se necesitan rigidizadores transversales por la compresión ejercida por el ala (cedencia por flexión del ala, pandeo o desgarramiento del alma), se debe cumplir lo siguiente:

$$(b_s - clip) * t_{stt} \geq \frac{0{,}370 * F_{cu}}{F_{ystt}} \quad \text{(Ec. 3-98)}$$

Y si se usa soldadura doble de filete, el tamaño mínimo de este será:

$$D = \frac{0{,}524 * F_{cu}}{F_{EXX} * (b_s - clip)} \qquad \text{(Ec. 3-99)}$$

En cualquiera de los casos anteriores también se pueden utilizar soldadura doble de canal de penetración parcial, con soldadura de filete de refuerzo, o una soldadura de canal de penetración total.

ii) Para zonas de alta sismicidad:

La soldadura puede ser soldadura doble de filete, soldadura doble de canal de penetración parcial con soldadura de filete de refuerzo, o una soldadura de canal de penetración total.

Si se utiliza soldadura doble de filete, el tamaño mínimo de esta será igual al calculado en la ecuación (Ec. 3-97).

b) Soldadura para conectar el rigidizador con la zona de panel de la columna:

Tanto para solicitaciones de viento y zona de baja sismicidad como para zonas de alta sismicidad, los rigidizadores serán conectados a la zona de panel solo en los siguientes casos:

- Hay una sola viga conectada al ala de la columna. (ver Fig. 3.12.a)
- La columna tiene dos vigas conectadas a momento y las fuerzas mayoradas del ala de las vigas (F_{fu}) van en sentido contrario, en este caso sólo se colocarán rigidizadores si controla el desgarramiento del alma, o para estabilizar el rigidizador. (ver Fig. 3.12.b)
- La columna tiene dos vigas conectadas a momento y las fuerzas mayoradas del ala de las vigas (F_{fu}) van en el mismo sentido.

En la figura 3.12 se muestran los casos donde es necesario conectar mediante soldadura el rigidizador transversal a la zona de panel de la columna.

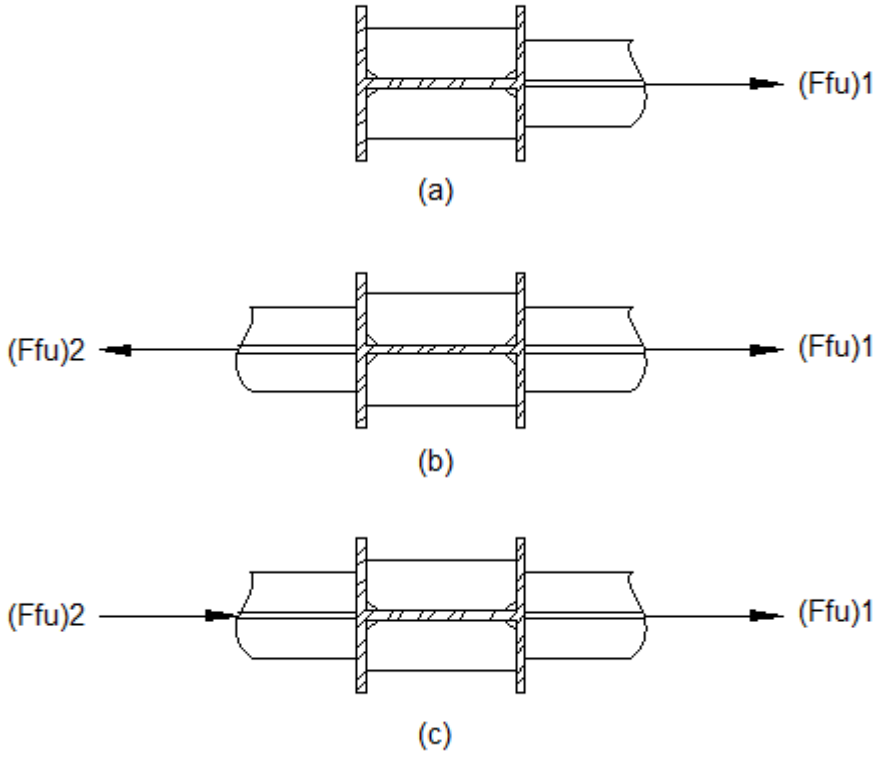


Fig. 3.12. Conexión del Rigidizador Transversal con la Zona de Panel de la Columna. Fuente: Adaptado de Carter (2003).

En caso de ser necesario conectar el rigidizador con la zona de panel de la columna, se utilizará soldadura doble de filete en cada rigidizador, y su tamaño requerido para resistir el corte será:

$$D = \frac{F_{cu1} + F_{cu2}}{0{,}75 * 0{,}6 * F_{EXX}(l - 2 * clip) * 2 * \sqrt{2}} \quad \text{(Ec. 3-100)}$$

La resistencia desarrollada por la soldadura no deberá ser mayor a:

$$\emptyset R_{n\,max} = 0{,}9 * F_{ystt} * 4 * (b_{stt} - clip) * t_{stt} \quad \text{(Ec. 3-101)}$$

$$\emptyset R_{n\,max} = 0{,}9 * 0{,}6 * F_{ystt} * (l - 2 * clip) * 2 * t_{stt} \quad \text{(Ec. 3-102)}$$

$$\emptyset R_{n\,max} = 0{,}9 * 0{,}6 * F_{ypz} * d_c * t_{pz} \quad \text{(Ec. 3-103)}$$

Donde:

F_{ypz} es la resistencia mínima a la cedencia de la zona de panel.

t_{pz} es el espesor de la zona de panel, o de la zona de panel más las planchas de refuerzo si estas existen.

Si la columna tiene una sola viga conectada a momento la ecuación (Ec. 3-101) será:

$$\emptyset R_{n\,max} = 0{,}9 * F_{ystt} * 2 * (b_{stt} - clip) * t_{stt} \qquad \text{(Ec. 3-104)}$$

Cuando el tamaño requerido del filete supera los 12 mm, se recomienda utilizar la soldadura de penetración completa.

3.25 Diseño de las planchas de refuerzo

Al igual que en el caso del diseño de los rigidizadores transversales de la columna, para el caso del diseño de las planchas de refuerzo del alma, se seguirán las recomendaciones de la *Guía de Diseño N° 13 del AISC "Wide Flange Column Stiffening at Moment Connections Wind and Seismic Applications"*. El procedimiento detallado de diseño, se indica en las siguientes secciones.

3.25.1 Altura y profundidad de las planchas de refuerzo

En solicitaciones de viento y zonas de baja sismicidad o en zonas de alta sismicidad, la altura y la profundidad (l_{dp}) de las planchas de refuerzo son seleccionadas basadas en las dimensiones de la zona de panel de la columna, con los respectivos detalles para lograr la conexión de la plancha de refuerzo con el alma de la columna mediante soldaduras.

Las planchas de refuerzo pueden ser extendidas hasta los rigidizadores transversales. Alternativamente, pueden extenderse más allá de los rigidizadores transversales para cubrir la zona del alma de la columna sujeta al desgarramiento y pandeo por corte. Para conexiones a momento con plancha extrema, la distancia mínima de extensión de las planchas mas allá de los rigidizadores transversales es tres (3) veces la distancia (k_C) de la columna, más el espesor de la plancha extrema, es decir:

$$\left(3 * k_C + t_p\right) \qquad \text{(Ec. 3-105)}$$

Si no existen rigidizadores transversales, las planchas de refuerzo deben extenderse más allá del borde de la plancha extrema, para cubrir la zona del alma de la columna sujeta al desgarramiento y pandeo por corte. Esta distancia debe cumplir con una longitud mínima igual a la calculada con la ecuación (Ec. 3-105).

3.25.2 Espesor de la plancha de refuerzo

- Espesor requerido por resistencia:

$$t_{dp} \geq \frac{V_{udp}}{0{,}9 * 0{,}6 * F_{ydp} * d_c} \qquad \text{(Ec. 3-106)}$$

- Cuando se usa soldadura de filete, el espesor mínimo para poder tener un biselado apropiado es:

$$t_{dp\,min} = k_c - t_f - r_e \qquad \text{(Ec. 3-107)}$$

- Espesor mínimo para prevenir el pandeo por corte:

a) En solicitaciones de viento y zonas de baja sismicidad:

$$t_{dp\,min} = \frac{h * \sqrt{F_{ydp}}}{3500} \qquad \text{(Ec. 3-108)}$$

b) En zonas de alta sismicidad:

$$t_{dp\,min} = \frac{d_m - t_{stt} + d_c - 2 * t_{fc}}{90} \geq \frac{h * \sqrt{F_{ydp}}}{3500} \qquad \text{(Ec. 3-109)}$$

Donde:

$$h = d_c - 2 * k_c \qquad \text{(Ec. 3-110)}$$

3.25.3 Conexión de las plancha de refuerzo a lo largo de los bordes del ala de la columna

En solicitaciones de viento y zonas baja sismicidad y en zonas de alta sismicidad, las planchas de refuerzo son soldadas, mediante soldaduras filete o de ranura, a lo largo de los bordes del ala de la columna para, dependiendo del tipo de pórtico, desarrollar su resistencia requerida al corte o para desarrollar la resistencia al corte de todo el espesor de la plancha de refuerzo.

Preferiblemente, y mientras sea factible, se trabaja con soldadura filete por su sencillez y bajo costo.

El uso de la soldadura filete requiere un borde biselado para despejar el radio de la soldadura entre el ala y el alma de la columna, y un espesor de la plancha de refuerzo que sea igual o mayor el bisel requerido.

Si la dimensión del bisel y el espesor de la plancha son iguales, el tamaño mínimo de la soldadura filete para desarrollar la garganta efectiva es:

$$D = \frac{1{,}70 * F_{ydp} * t_{eff}}{F_{EXX}} \geq t_{eff}\sqrt{2} \qquad \text{(Ec. 3-111)}$$

Si la dimensión del bisel es menor al espesor de la plancha, el tamaño mínimo de la soldadura filete para desarrollar la garganta efectiva es:

$$D = \frac{1{,}70 * F_{ydp} * t_{eff}}{F_{EXX}} \geq t_{eff}\sqrt{2} - (t_p - bisel) \qquad \text{(Ec. 3-112)}$$

Cuando el tamaño requerido del filete supera los 12 mm, se recomienda utilizar la soldadura de penetración completa[37].

3.25.4 Conexión de las planchas de refuerzo a lo largo de los bordes superior e inferior

En el caso de que no se usen rigidizadores transversales y la plancha de refuerzo se extienda más allá del ala de la viga o de la plancha extrema, o en el caso de que se usen los rigidizadores transversales y la plancha de refuerzo se extienda más allá de ellos, se utiliza la soldadura filete más pequeña de acuerdo con lo establecido en la Tabla 23.5 de la *Norma Venezolana COVENIN 1618:1998 "Estructuras de Acero para Edificaciones. Método de los Estados Límites"*, y que no exceda el espesor de la plancha de refuerzo menos 2 mm (1/16 in.)

En el caso de que se usen rigidizadores transversales y la plancha de refuerzo se extienda hasta ellos pero no los pase, se debe detallar la junta entre el rigidizador, el alma de la columna y la plancha de refuerzo, verificando la resistencia de acuerdo a las ecuaciones (Ec. 3-101, Ec. 3-102, Ec. 3-103) en la sección 3.24.6.

[37] Criterio de los autores.

La figuras 3.13 y 3.14 ilustran los detalles más comunes de soldadura en las juntas.

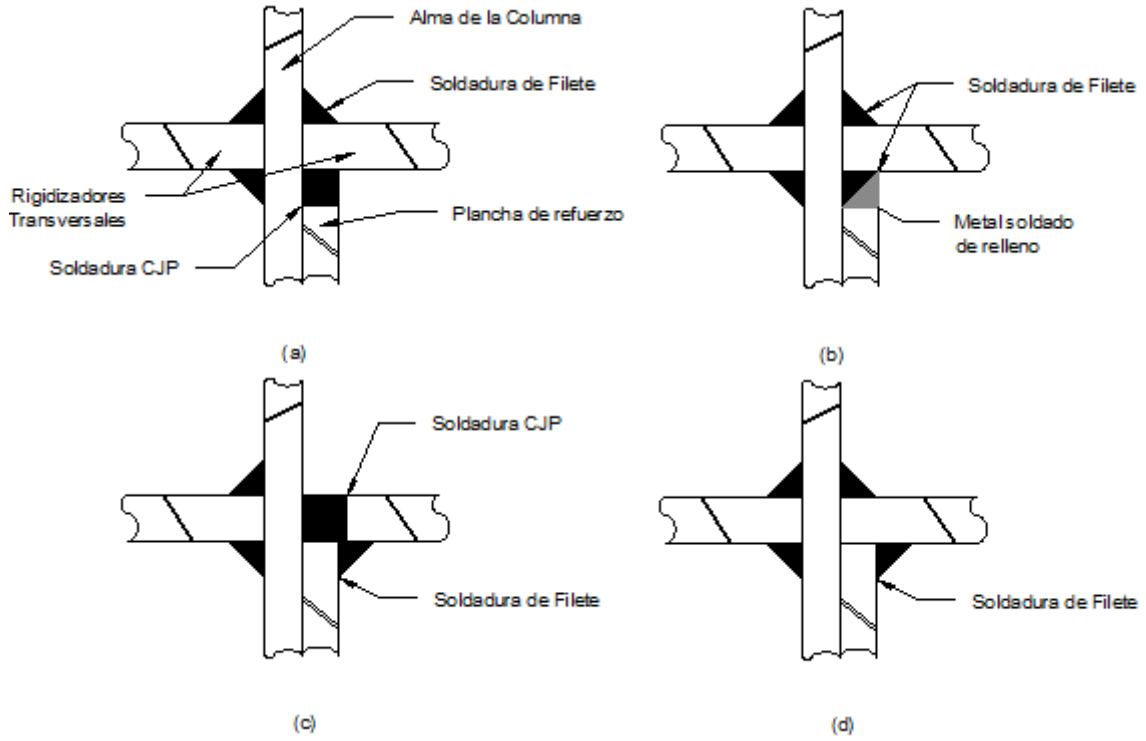


Fig. 3.13. Detalle de juntas conformadas por una plancha de refuerzo y un par de rigidizadores transversales, soldadas lo largo de los bordes superior e inferior.
Fuente: Adaptado de Carter (2003).

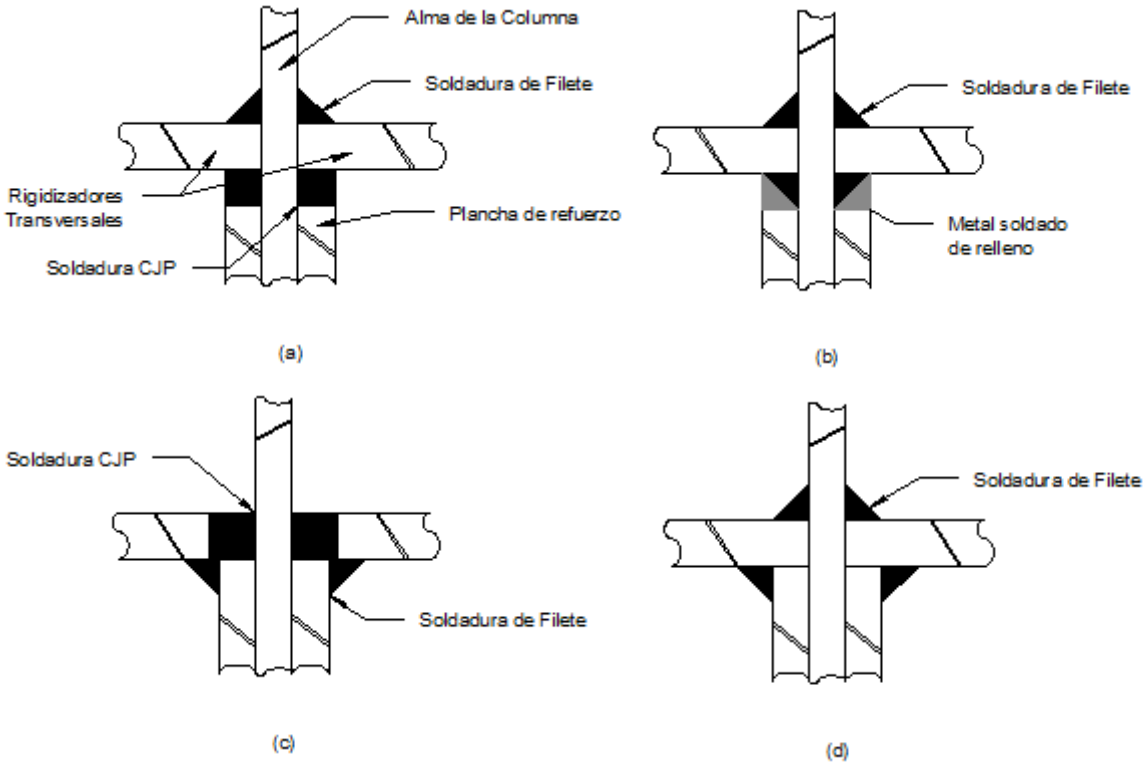


Fig. 3.14. Detalle de juntas conformadas por dos planchas de refuerzo y un par de rigidizadores transversales, soldadas lo largo de los bordes superior e inferior.
Fuente: Adaptado de Carter (2003).

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DE LAS HOJAS DE CÁLCULO

En el siguiente capítulo se presentan las generalidades y requisitos mínimos para el buen funcionamiento de las hojas de cálculo. Se muestra el formato de la hoja de cálculo y se explican los datos que deben ser introducidos por el usuario, así como los distintos mensajes que se muestran a lo largo de la hoja de cálculo desarrollada.

1. Generalidades y Requisitos Mínimos del Sistema

Las hojas de cálculo fueron desarrolladas en MS Excel® 2007, sin embargo no es necesario disponer de esta versión del programa, ya que han sido guardadas de forma que se puedan utilizar en versiones anteriores del mismo.

Al momento de abrir la hoja de cálculo, deberá habilitar los macros, a fin de que todas las funcionalidades de la hoja estén activadas correctamente. Para habilitar los macros, el usuario debe hacer ***click*** en "*Opciones"* en la pestaña "*Advertencia de Seguridad"* que aparece sobre la barra de formulas. Luego, se abrirá una ventana donde deberá seleccionar la opción "*Habilitar este contenido"*, y luego hacer ***click*** en "*Aceptar"*.

Adicionalmente, se recomienda disponer, como mínimo, de un computador con procesador de 1 GHz de 32 bits o de 64 bits, 512 Mb de memoria RAM, 20 Gb de disco duro con al menos 15 Gb de espacio disponible.

2. Manual de Uso de las Hojas de Cálculo

2.1 Consideraciones Generales

Se buscó que la interfaz entre el usuario y la herramienta fuera lo más amigable posible, por lo que se usaron distintos colores para resaltar los datos, parámetros y mensajes de comprobación y/o alerta. A continuación se especifican y explican las características del funcionamiento de la hoja y el significado de los colores, con sus respectivas figuras ilustrativas para que el usuario se familiarice con la herramienta.

- El usuario tiene la posibilidad de elegir entre los 3 tipos de conexiones desarrolladas. La imagen de la conexión seleccionada aparecerá en un recuadro en el lado izquierdo de la hoja de cálculo.

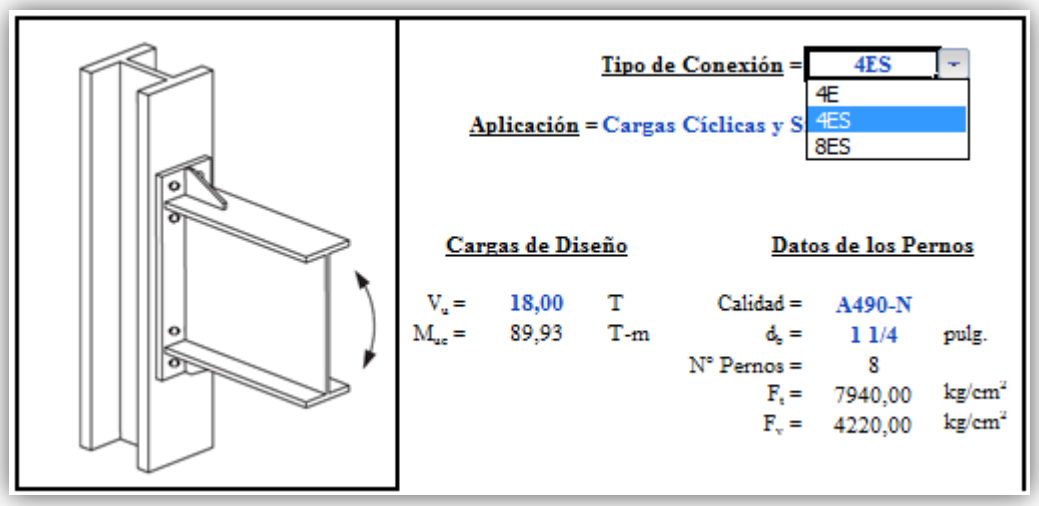


Fig. 4.1. Ejemplo Selección del tipo de Conexión e imagen respectiva.
Fuente: Elaboración Propia.

- En color *azul* se encuentran los datos que el usuario debe introducir, ya sea mediante listas desplegables o de forma manual. En la primera página se encuentran los datos básicos, pero a lo largo de la hoja de cálculo, también, de ser necesario, deberá introducir datos de entrada identificados con el mismo color *azul* y, en algunos casos, la celda tendrá un comentario donde se ofrecen recomendaciones o indicaciones adicionales.

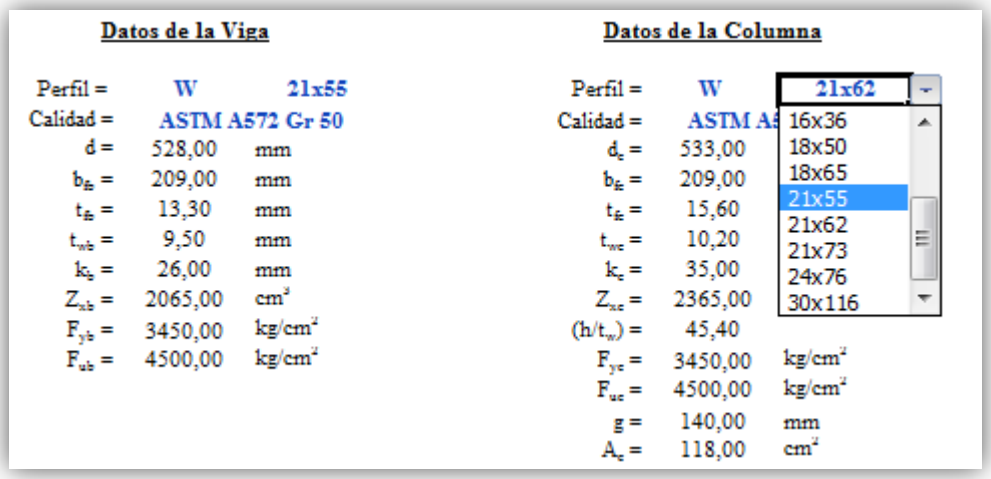


Fig. 4.2. Ejemplo Introducir Datos en la Primera Página.
Fuente: Elaboración Propia.

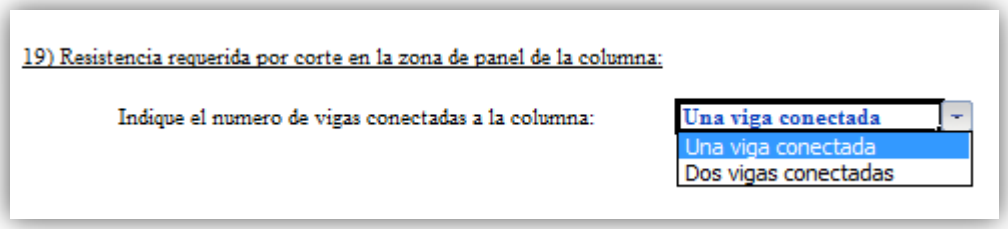


Fig. 4.3. Ejemplo Introducir Datos.
Fuente: Elaboración Propia.

Al seleccionar los tipos de perfiles y diámetros de pernos a utilizar, así como la calidad de cada uno de ellos, automáticamente aparecen sus dimensiones y propiedades.

- En color *negro* y en *negrita* aparecen los resultados de los distintos cálculos y verificaciones realizadas automáticamente por la hoja.

Fig. 4.4. Ejemplo Resultado de Verificaciones.
Fuente: Elaboración Propia.

- En color *rojo* aparecen los distintos mensajes dependiendo del resultado obtenido en cada una de las verificaciones. Cuando se cumple la verificación aparece la palabra "OK!", en el caso contrario aparecerá la palabra "NO!". Además, en algunos casos, se incluyen mensajes con recomendaciones como por ejemplo *"Aumentar el espesor de la plancha extrema"*, *"Aumentar el número de pernos"*, entre otros.

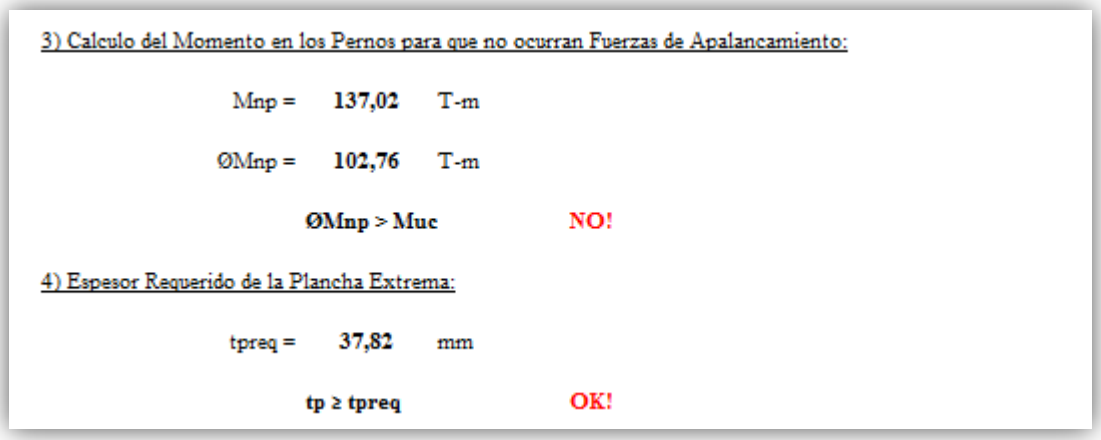


Fig. 4.5. Ejemplo Verificaciones de Diseño.
Fuente: Elaboración Propia.

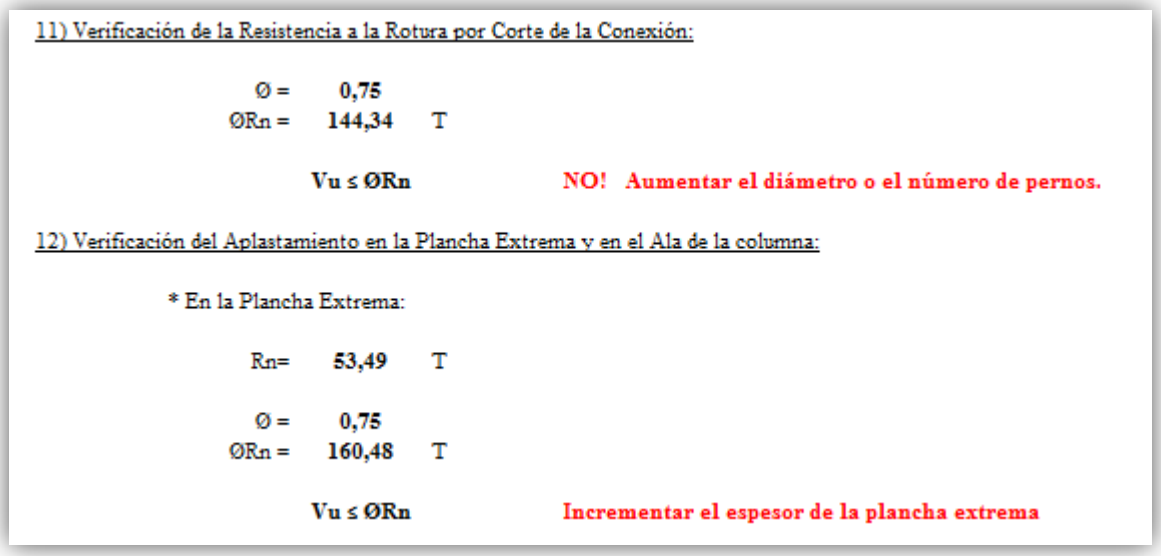


Fig. 4.6. Ejemplo Mensajes de recomendaciones.
Fuente: Elaboración Propia.

- A lo largo de la hoja de cálculo existen verificaciones, mensajes de alerta o indicaciones ocultas, las cuales se activan automáticamente si son necesarias. Si no lo son, las mismas se ocultan y se verá un espacio en blanco.

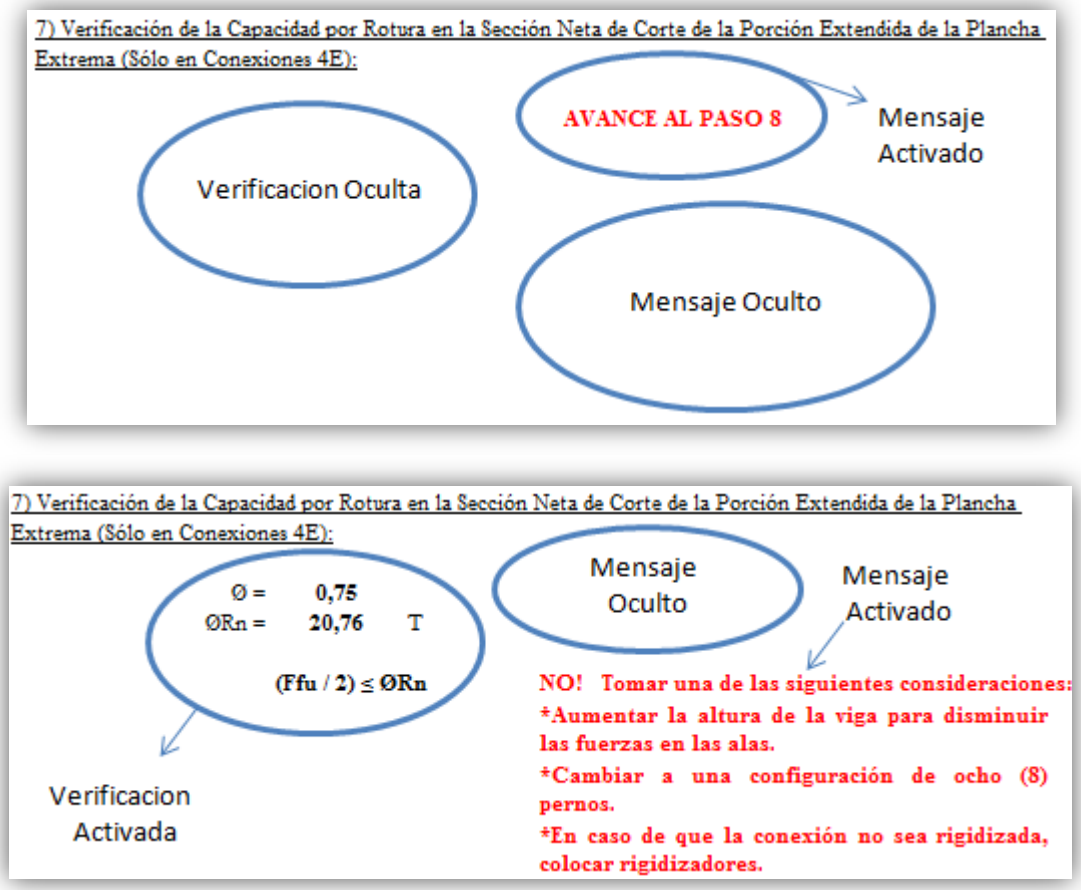


Fig. 4.7. Ejemplo Comparación Mensajes Ocultos y Activados.
Fuente Elaboración Propia.

- Existen celdas con comentarios de recomendaciones, o indicaciones que deberá leer el usuario antes de introducir el dato. Para leer estos comentarios, solo debe colocar el cursor sobre la pestaña *roja* ubicada en la esquina superior derecha de la celda y aparecerá automáticamente el comentario.

Fig. 4.8. Ejemplo Comentarios.
Fuente Elaboración Propia.

- Al momento de seleccionar el perfil de la viga, es posible que se observe la lista de perfiles seguida de ceros "0". Esto ocurre porque la hoja de cálculo está programada para sólo mostrar los tipos de perfiles de viga con la altura (d) suficiente para cumplir con las distancias y separaciones mínimas establecidas en las Normas. Aquellos perfiles que no cumplen con la altura mínima, son cambiados por ceros "0", es decir, esta lista desplegable depende del tipo de conexión y del diámetro de perno seleccionado, por lo que, antes de seleccionar el perfil de la viga, deberá seleccionar el tipo de conexión y el diámetro del perno.

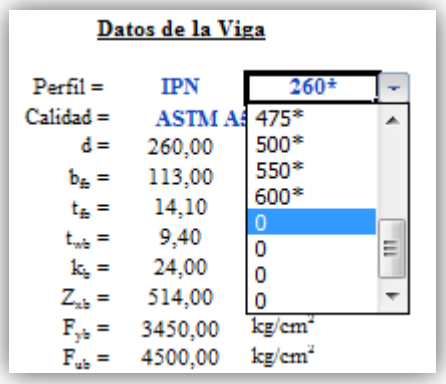


Fig. 4.9. Ejemplo Comentarios.
Fuente Elaboración Propia.

Al terminar todo el procedimiento de diseño, se encuentra un resumen con los detalles más importantes.

Las hojas de cálculo están protegidas de forma tal que el usuario sólo pueda modificar las celdas destinadas a datos de entrada y, además, están configuradas y listas para ser impresas al finalizar el trabajo de diseño, de forma que las mismas puedan ser anexadas a la memoria de cálculo correspondiente.

2.2 Datos Iniciales

Para el uso de la hoja de cálculo, se deben introducir inicialmente, y en este mismo orden, los siguientes datos:

- **Tipo de conexión**, se selecciona en una lista desplegable que contiene los 3 posibles tipos de conexión. Es importante introducir el tipo de conexión antes de elegir el tipo de perfil de la viga, ya que los perfiles disponibles varían dependiendo del caso analizado.

- **Aplicación**, mediante una lista desplegable que permite variar entre cargas cíclicas y sísmicas o gravitacionales y de viento.

- **Resistencia al corte requerida**, se introduce manualmente el valor deseado.

- **Calidad de los pernos**, mediante una lista desplegable que contiene los tipos de pernos más comunes.

- **Diámetro de los pernos**, mediante una lista desplegable. Es importante introducir este valor antes de elegir el tipo de perfil de la viga, ya que los perfiles disponibles varían dependiendo del diámetro.

- **Tipo de perfil**, se elige en una lista desplegable que contiene distintos tipos de perfiles disponibles en el mercado.

- **Calidad del acero del perfil**, en una lista desplegable que contiene los tipos de acero disponibles.

- **Calidad del acero de la plancha extrema**, en una lista desplegable con los tipos de acero disponibles.

- **Espesor de la plancha extrema,** se selecciona de una lista desplegable que contiene los espesores comerciales de planchas en Venezuela.

- **Calidad del rigidizador de la plancha extrema**, en el caso de que la conexión seleccionada sea rigidizada, se podrá elegir de una lista desplegable el tipo de acero deseado.

- **Espesor del rigidizador de la plancha extrema**, se selecciona de una lista desplegable que contiene los espesores comerciales de planchas en Venezuela.

A lo largo del procedimiento podrá ser necesario introducir otra serie de datos, tales como:

- **Espesor del rigidizador transversal**, se selecciona de una lista desplegable que contiene los espesores comerciales de planchas en Venezuela.

- **Numero de vigas conectadas a la columna,** se selecciona de una lista desplegable que tiene las opciones de *"Una viga conectada"* o *"Dos vigas conectadas"*.

- **Fuerza cortante mayorada en la rótula plástica de la segunda viga,** se introduce manualmente el valor deseado.

- **Carga axial mayorada en la columna,** se introduce el valor deseado manualmente.

- **Calidad del rigidizador transversal,** este valor se selecciona de una lista desplegable, que contiene los tipos de acero disponibles.

- **Calidad de la plancha de refuerzo,** se selecciona a partir de una lista desplegable, que contiene los tipos de acero disponibles.

- **Espesor de la plancha de refuerzo,** este valor se elije a partir de una lista desplegable que contiene los valores comerciales en Venezuela.

CAPÍTULO V

VALIDACIÓN DE HOJAS DE CÁLCULO

En este capítulo se desarrollaron ejemplos de diseño realizados manualmente de los tres tipos de conexión a momento con plancha extrema que se analizaron en este Trabajo Especial de Grado, y se compararán los resultados de cada uno de ellos con los obtenidos por las hojas de cálculo, para así calibrar y validar la herramienta desarrollada.

1. Generalidades.

Se presenta en primer lugar el enunciado de cada ejemplo, donde se observan los datos básicos utilizados para el diseño, en un formato similar a como se muestran en la hoja de cálculo, luego se procede con las verificaciones pertinentes explicadas en el *Capítulo III*. Por último, se muestra, al final de cada ejercicio, una tabla con la comparación de los resultados obtenidos manualmente y los obtenidos con la hoja de cálculo.

Los ejemplos seleccionados son adaptados de la Guía de Diseño N° 4 del AISC, por tratarse de ejemplos bastante representativos de todo el procedimiento de diseño.

2. Desarrollo de ejemplos manuales

2.1. Ejemplo Conexión 4Ea

Usando cargas cíclicas y sísmicas, se debe diseñar una conexión a momento con plancha extrema extendida de cuatro (4) pernos no rigidizada (4E), para conectar una viga W21X55 a una columna W14X109, ambas de acero de calidad ASTM A572 Gr. 50 y la plancha extrema de acero de calidad ASTM A572 Gr. 50. Los pernos a usar son pernos de calidad ASTM A490. La resistencia al corte (V_u), es de 18 T.

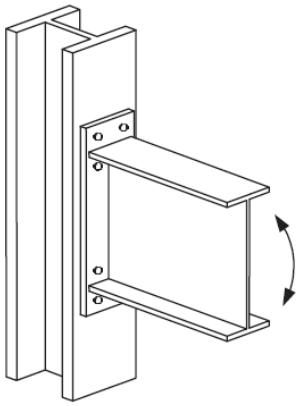


Fig. 5.1. Conexión a Momento con Plancha Extrema Extendida de Cuatro (4) Pernos No Rigidizada (4E).
Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

Tabla 5.1. Datos Básicos para el Diseño de una Conexión (4E)

Aplicación =	Cargas Cíclicas y Sísmicas

Cargas de Diseño			**Datos de los Pernos**			**Datos de la Plancha Extrema**		
V_u =	18	T	Calidad =	A490-N		Calidad =	ASTM A572 Gr 50	
M_{uc} =	90,96	T-m	d_b =	1 1/4	pulg.	t_p =	38	mm
			N° Pernos =	8		b_p =	212	mm
			F_t =	7940	kg/cm²	F_{yp} =	3450	kg/cm²
			F_v =	4220	kg/cm²	F_{up} =	4500	kg/cm²

Datos de la Columna			**Datos de la Viga**			**Datos Geométricos**		
Perfil =	W	14x109	Perfil =	W	21x55			
Calidad =	ASTM A572 Gr 50		Calidad =	ASTM A572 Gr 50		d_c =	47,63	mm
d_c =	363	mm	d =	528	mm	P_f =	50,00	mm
b_{fc} =	371	mm	b_{fb} =	209	mm	P_{fi} =	50,00	mm
t_{fc} =	21,8	mm	t_{fb} =	13,3	mm	P_b =	0,00	mm
t_{wc} =	13,3	mm	t_{wb} =	9,5	mm			
k_c =	37		k_b =	26				
Z_{xc} =	7325	cm³	Z_{xb} =	2065	cm³			
(h/t_w) =	21,7		F_{yb} =	3450	kg/cm²			
F_{yc} =	3450	kg/cm²	F_{ub} =	4500	kg/cm²			
F_{uc} =	4500	kg/cm²						
g =	140	mm						
A_c =	206	cm²						

Fuente: Elaboración Propia.

2.1.1. Cálculo del momento de diseño en el ala de la columna (M_{uc}):

$$M_{pe} = 1{,}1 * R_y * F_{yb} * Z_{xb} = 1{,}1 * 1{,}1 * 34500 * 2065 * 10^{-6} = 86{,}20\ T * m$$

$$L_p = min\left(\frac{d}{2}; 3 * b_{fb}\right) = min\left(\frac{0{,}528}{2}; 3 * 0{,}209\right) = 0{,}264\ m$$

$$M_{uc} = M_{pe} + V_u * L_p = 86{,}20 + 18 * 0{,}264 = 90{,}95\ T * m$$

2.1.2. Cálculo del diámetro requerido de los pernos $(d_{b\,req.})$:

$$h_0 = d + P_{fo} - \frac{t_{fb}}{2} = 528 + 50 - \frac{13{,}3}{2} = 571{,}4\ mm$$

$$h_1 = d - P_{fi} - \frac{3 * t_{fb}}{2} = 528 - 50 - \frac{3 * 13{,}3}{2} = 458{,}1\ mm$$

$$d_{b\,req.} = \sqrt{\frac{2 * M_{uc}}{\pi * \emptyset * F_t * (h_0 + h_1)}} = \sqrt{\frac{2 * 9095000}{\pi * 0{,}75 * 7940 * (57{,}14 + 45{,}81)}} = 3{,}07\ cm$$

2.1.3. Selección de un diámetro de perno de prueba (d_b), mayor al obtenido en el paso anterior $(d_{b\,req.})$, y cálculo del momento en el perno para que no existan fuerzas de apalancamiento (M_{np})

El diámetro seleccionado de 1 ¼ pulg. es mayor al requerido.

$$P_t = F_t * A_b = F_t * \left(\frac{\pi * d_b^2}{4}\right) = 79400 * \left(\frac{\pi * (0{,}03175)^2}{4}\right) = 62{,}86\ T$$

$$M_{np} = 2 * P_t * (h_0 + h_1) = 2 * 62{,}86 * (0{,}5714 + 0{,}4581) = 129{,}43\ T * m$$

$$\emptyset M_{np} = 0{,}75 * 129{,}43 = 97{,}07\ T * m$$

2.1.4. Determinar el espesor de la plancha extrema requerido $(t_{p\,req.})$

$$S = \frac{1}{2} * \sqrt{b_p * g} = \frac{1}{2} * \sqrt{212 * 140} = 86{,}13\ mm > P_{fi} = 50\ mm$$

$$Y_p = \frac{b_p}{2} * \left[h_1 * \left(\frac{1}{P_{fi}} + \frac{1}{S}\right) + h_0 * \left(\frac{1}{P_{fo}}\right) - \frac{1}{2}\right] + \frac{2}{g}\left[h_1 * (P_{fi} + S)\right]$$

$$Y_p = \frac{212}{2} * \left[458{,}1 * \left(\frac{1}{50} + \frac{1}{86{,}13}\right) + 571{,}4 * \left(\frac{1}{50}\right) - \frac{1}{2}\right] + \frac{2}{140}[458{,}1 * (50 + 86{,}13)]$$

$$Y_p = 3585\ mm$$

$$t_{p\,req.} = \sqrt{\frac{1{,}11 * \emptyset * M_{np}}{\emptyset_b * F_{yp} * Y_p}} = \sqrt{\frac{1{,}11 * 0{,}75 * 129430000}{0{,}9 * 34{,}50 * 3585}} = 31{,}11\ mm$$

2.1.5. Selección de un espesor de Plancha Extrema (t_p) mayor al espesor requerido

El espesor de la plancha debe cumplir las siguientes condiciones:

$$\boldsymbol{t_p \geq max(t_{p\,req.};\ d_b)}$$

$$\boldsymbol{38\ mm \geq max(31{,}11\ mm;\ 31{,}75\ mm)\ OK!}$$

2.1.6. Cálculo de la fuerza mayorada en el ala de la viga

$$F_{fu} = \frac{M_{uc}}{d - t_{fb}} = \frac{90{,}95}{0{,}528 - 0{,}0133} = 176{,}72\ T$$

2.1.7. Verificación de la capacidad por cedencia al corte de la porción extendida de la plancha extrema

$$\emptyset R_n = \emptyset * 0{,}6 * F_{yp} * b_p * t_p = 1{,}00 * 0.6 * 3{,}450 * 21{,}2 * 3{,}8 = 166{,}76\ T$$

$$\boldsymbol{\frac{F_{fu}}{2} < \emptyset R_n \rightarrow \frac{176{,}72\ T}{2} < 166{,}76\ T \rightarrow OK!}$$

2.1.8. Verificación de la capacidad por rotura en la sección neta de corte de la porción extendida de la plancha extrema

$$A_n = t_p * \left[b_p - 2 * (d_a)\right] = 3{,}8 * [21{,}2 - 2 * (3{,}175 + 0{,}3)] = 54{,}15\ cm^2$$

$$\emptyset R_n = \emptyset * 0{,}6 * F_{up} * A_n = 0{,}75 * 0{,}6 * 4{,}5 * 54{,}15 = 109{,}65\ T$$

$$\boldsymbol{\frac{F_{fu}}{2} < \emptyset R_n \rightarrow \frac{176{,}72\ T}{2} < 109{,}65 \rightarrow OK!}$$

2.1.9. Verificación de la resistencia a la rotura por corte de la conexión

$$\emptyset R_n = \emptyset * n_b * F_v * A_b = 0{,}75 * 4 * 4{,}22 * 7{,}92 = 100{,}27\ T$$

$$\boldsymbol{V_u < \emptyset R_n \rightarrow 18\ T < 100{,}27\ T \rightarrow OK!}$$

2.1.10. Verificación del aplastamiento en la plancha extrema y en el ala de la columna

- En la plancha extrema:

$$L_c = (P_{fi} + t_{fb} + P_{fo}) - (d_b + 2) = (50 + 13{,}3 + 50) - (31{,}75 + 2) = 79{,}55\ mm$$

$$R_n = min(1.2 * L_c * t_p * F_{up}\ ;\ 2.4 * d_b * t_p * F_{up})$$

$$R_n = min(1.2 * 7{,}955 * 3{,}8 * 4{,}5\ ;\ 2.4 * 3{,}175 * 3{,}8 * 4{,}5) = min(163{,}24\ ;\ 130{,}30)$$

$$R_n = 130{,}30$$

$$\emptyset R_n = n_i * \emptyset * R_n + n_o * \emptyset * R_n = 4 * (0{,}75 * 130{,}30) = 390{,}90\ T$$

$$\boldsymbol{V_u < \emptyset R_n \rightarrow 18\ T < 390{,}90\ T \rightarrow OK!}$$

- En el ala de la columna:

$$\emptyset R_n = \emptyset R_n * \frac{t_{fc}}{t_p} * \frac{F_{yp}}{F_{yc}} = 390{,}90 * \frac{21{,}8}{38} * \frac{3450}{3450} = 224{,}25\ T$$

$$\boldsymbol{V_u < \emptyset R_n \rightarrow 18\ T < 224{,}25\ T \rightarrow OK!}$$

2.1.11. Diseñar las soldaduras entre la plancha extrema y el ala y entre la plancha extrema y el alma

- Entre la plancha extrema y las alas de la viga:

  Especificar soldadura de penetración completa.

- Entre la plancha extrema y el alma de la viga:

  El tamaño mínimo de soldadura de filete para una plancha de 38 mm de espesor es de 8 mm.

  Tamaño requerido de la soldadura para resistir el esfuerzo a flexión utilizando electrodos E-70:

$$D = \left(\frac{0.6 * F_{yb} * t_{wb}}{2 * 1{,}392 * 16}\right) * 25{,}4 = \left(\frac{0.6 * 3450 * 9{,}5 * 5{,}6 * 10^{-4}}{2 * 1{,}392 * 16}\right) * 25{,}4$$

$$D = 6{,}28\ mm$$

Usar soldadura de filete de 8 mm

Tamaño requerido de la soldadura para resistir el corte:

$$Longitud\ efectiva\ soldadura = \frac{d}{2} - t_{fb} = \frac{528}{2} - 13{,}3 = 250{,}7\ mm$$

$$D = \left(\frac{V_u * 2{,}2046 * 25{,}4}{2 * 1{,}392 * Longitud\ efectiva\ soldadura * 16}\right) * 25{,}4$$

$$D = \left(\frac{18 * 2{,}2046 * 25{,}4}{2 * 1{,}392 * 250{,}7 * 16}\right) * 25{,}4 = 2{,}29\ mm$$

Usar soldadura de filete de 8 mm

2.1.12. Verificación por cedencia a la flexión del ala de la columna

$$c = P_{fi} + P_{fo} + t_{fb} = 50 + 50 + 13{,}3 = 113{,}3\ mm$$

$$S = \frac{1}{2} * \sqrt{b_{fc} * g} = \frac{1}{2} * \sqrt{371 * 140} = 113{,}95\ mm$$

$$Y_c = \frac{b_{fc}}{2}\left[h_1 * \frac{1}{S} + h_0 * \frac{1}{s}\right] + \frac{2}{g}\left[h_1 * \left(S + \frac{3 * c}{4}\right) + h_0 * \left(S + \frac{c}{4}\right) + \frac{c^2}{2}\right] + \frac{g}{2}$$

$$Y_c = \frac{371}{2}\left[458{,}1 * \frac{1}{113{,}95} + 571{,}4 * \frac{1}{113{,}95}\right] +$$

$$+ \frac{2}{140}\left[458{,}1 * \left(113{,}95 + \frac{3 * 113{,}3}{4}\right) + 571{,}4 * \left(113{,}95 + \frac{113{,}3}{4}\right) + \frac{113{,}3^2}{2}\right] + \frac{140}{2}$$

$$Y_c = 4300{,}81\ mm$$

El espesor requerido del ala de la columna sin rigidizar es:

$$t_{fc\,Req} = \sqrt{\frac{1{,}11 * \emptyset * M_{np}}{\emptyset_b * F_{yc} * Y_c}} = \sqrt{\frac{1{,}11 * 0{,}75 * 129{,}43 * 10^8}{0{,}9 * 3450 * 4300{,}81}} = 28{,}41\ mm$$

$$\boldsymbol{t_{fc\,Req} \leq\ t_{fc} \rightarrow 28{,}41\ mm \leq\ 21{,}8\ mm \rightarrow NO!}$$

Se deben colocar rigidizadores transversales

Asumir un rigidizador de espesor igual a 13 mm.

$$P_{so} = P_{si} = \frac{c - t_{stt}}{2} = \frac{113{,}3 - 13}{2} = 50{,}15\ mm$$

$$Y_c = \frac{b_{fc}}{2}\left[h_1 * \left(\frac{1}{S} + \frac{1}{P_{si}}\right) + h_0 * \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{P_{so}}\right)\right] + \frac{2}{g}\left[h_1 * (S + P_{si}) + h_0 * (S + P_{so})\right]$$

$$Y_c = \frac{371}{2}\left[458{,}1 * \left(\frac{1}{113{,}95} + \frac{1}{50{,}15}\right) + 571{,}4 * \left(\frac{1}{113{,}95} + \frac{1}{50{,}15}\right)\right] +$$

$$+ \frac{2}{140}\left[458{,}1 * (113{,}95 + 50{,}15) + 571{,}4 * (113{,}95 + 50{,}15)\right]$$

$$Y_c = 7897{,}39\ mm$$

El espesor requerido del ala de la columna rigidizada es:

$$t_{fc\,Req} = \sqrt{\frac{1{,}11 * \emptyset * M_{np}}{\emptyset_b * F_{yc} * Y_c}} = \sqrt{\frac{1{,}11 * 0{,}75 * 129{,}43 * 10^8}{0{,}9 * 3450 * 7897{,}39}} = 20{,}96\ mm$$

$$\boldsymbol{t_{fc\,Req} \leq\ t_{fc} \rightarrow 20{,}96 \leq\ 21{,}8\ mm \rightarrow OK!}$$

2.1.13. Si se requieren rigidizadores por cedencia a la flexión del ala de la columna, se debe determinar la fuerza en el rigidizador

$$\emptyset M_{cf} =\ \emptyset_b * F_{yc} * Y_c *\ t_{fc}^2 =\ 0{,}9 * 34500 * 4{,}300 *\ (0{,}0218)^2 = 63{,}45\ T * m$$

$$\emptyset R_n = \frac{\emptyset M_{cf}}{\left(d - t_{fb}\right)} = \frac{63{,}45}{(0{,}528 - 0{,}0133)} = 123{,}28\ T$$

2.1.14. Verificación de la resistencia a la cedencia del alma de la columna considerando una columna sin el alma rigidizada en las alas de la viga conectada

$C_t = 1{,}00$ (Se asume que no se está en el tope de la columna)
$N = t_{\text{fb}} = 13{,}30\ mm$

$$\emptyset R_n = \emptyset * C_t * \left(6 * k_c + N + 2 * t_p\right) * F_{yc} * t_{wc}$$

$$= 1{,}00 * 1{,}00 * (6 * 0{,}037 + 0{,}0133 + 2 * 0{,}038) * 34500 * 0{,}0133$$

$$\emptyset R_n = 142{,}85\ T$$

$$\boldsymbol{\emptyset R_n > F_{fu} \rightarrow 142{,}84\ T > 176{,}72\ T \rightarrow NO!}$$

Es necesario colocar rigidizadores transversales

2.1.15. Verificación de la resistencia al pandeo del alma no rigidizada de la columna en el ala a compresión de la viga

$$h = \left(\frac{h}{t_w}\right)_c * t_{wc} = 21{,}7 * 13{,}3 = 288{,}61\ mm$$

$$\emptyset R_n = \frac{\emptyset * 12 * t_{wc}^3 * \sqrt{E * F_{yc}}}{h}$$

$$= \frac{0{,}9 * 12 * (0{,}0133)^3 * \sqrt{21000000 * 34500}}{0{,}28861}$$

$$\emptyset R_n = 74{,}94\ T$$

$$\boldsymbol{\emptyset R_n > F_{fu} \rightarrow 74{,}94\ T > 176{,}72\ T \rightarrow NO!}$$

Es necesario colocar rigidizadores transversales

2.1.16. Verificación de la resistencia al desgarramiento del alma no rigidizada de la columna en el ala a compresión de la viga

$\frac{N}{d_c} < 0{,}2 \rightarrow \frac{13{,}3}{363} = 0{,}04 < 0{,}2 \rightarrow$ Entonces:

$$\emptyset R_n = \emptyset * 0{,}40 * t_{wc}^2 * \left[1 + 3 * \left(\frac{N}{d_c}\right) * \left(\frac{t_{wc}}{t_{fc}}\right)^{1.5}\right] * \sqrt{\frac{E * F_{yc} * t_{fc}}{t_{wc}}}$$

$$= 0{,}75 * 0{,}40 * (0{,}0133)^2 * \left[1 + 3 * \left(\frac{13{,}3}{363}\right) * \left(\frac{13{,}3}{21{,}8}\right)^{1.5}\right]$$

$$* \sqrt{\frac{21000000 * 34500 * 21{,}8}{13{,}3}}$$

$$\emptyset R_n = 60{,}85\ T$$

$$\boldsymbol{\emptyset R_n > F_{fu} \rightarrow 60{,}85\ T > 176{,}72\ T \rightarrow NO!}$$

Es necesario colocar rigidizadores transversales.

2.1.17. Resistencia requerida por corte en la zona de panel de la columna

Para una viga conectada a las alas de la columna

Se asume nulo el esfuerzo cortante en la planta estudiada (V_{us})

$$V_{uzp} = \emptyset * (F_{fu}) - V_{us} = 0{,}80 * 176{,}72 - (0) = 141{,}38\ T$$

2.1.18. Capacidad al corte de la zona de panel de la columna

Para una carga axial mayorada en la columna $P_u = 140\ T$

$$P_y = A_c * F_{yc} = 206 * 3{,}450 = 710{,}7\ T$$

Como se trabaja con cargas cíclicas y sísmicas se debe considerar en el análisis de la estabilidad del pórtico la deformación inelástica en la zona de panel de la columna. Entonces:

$P_u \leq 0{,}75 * P_y \rightarrow 140\ T \leq 533{,}03\ T \rightarrow$ Entonces:

$$\emptyset R_v = 0{,}75 * 0{,}6 * F_{yc} * d_c * t_{wc} * \left(1 + \frac{3 * b_{fc} * t_{fc}^2}{d * d_c * t_{wc}}\right)$$

$$= 0{,}75 * 0{,}6 * 34500 * 0{,}363 * 0{,}0133 * \left(1 + \frac{3 * 371 * (21{,}8)^2}{528 * 363 * 13{,}3}\right)$$

$$\emptyset R_v = 90{,}50\ T$$

$$\boldsymbol{\emptyset R_v \geq V_{uzp} \rightarrow 90{,}50\ T \geq 141{,}38\ T \rightarrow NO!}$$

Es necesario colocar planchas de refuerzo para el alma de la columna

2.1.19. Si se trabaja en zonas de alta sismicidad también debe verificarse el espesor mínimo del alma de la columna

$$t_{wc\ min} = \frac{d_m + d_c - 2 * t_{fc}}{90} = \frac{(528 - 13{,}3) + 363 - 2 * 21{,}8}{90} = 9{,}27\ mm$$

$$\boldsymbol{t_{wc\ min} \leq t_{wc} \rightarrow 9{,}27\ mm \leq 13{,}3\ mm \rightarrow OK!}$$

2.1.20. Si en alguno de los estados límites previamente estudiados (Pasos 2.1.13, 2.1.14, 2.1.15, 2.1.16) los rigidizadores transversales son necesarios, la resistencia requerida de los mismos será:

$$F_{cu} = F_{fu} - \min \emptyset R_n$$

$$F_{cu} = 176{,}72 - \min(123{,}28\ ;\ 142{,}85\ ;\ 74{,}94\ ;\ 60{,}85) = 176{,}72 - 60{,}85$$

$$F_{cu} = 115{,}87\ T$$

2.1.21. Si en los estados límites previamente estudiados (Pasos 2.1.18 y 2.1.19) las planchas de refuerzo son necesarias, la resistencia requerida de las mismas será:

$$V_{udp} = V_{uzp} - \emptyset R_v = 141{,}38 - 90{,}50 = 50{,}88\ T$$

2.1.22. Diseño de los rigidizadores transversales

2.1.22.1. Cálculo del área transversal mínima para el rigidizador transversal en cada ala

Se asume un rigidizador transversal de acero de calidad ASTM A572 Gr. 50.

$$A_{stt\ min} = \frac{F_{cu}}{\emptyset * F_{ystt}} = \frac{115{,}87}{0{,}9 * 3{,}45} = 37{,}32\ cm^2$$

2.1.22.2. Cálculo del ancho mínimo de cada rigidizador transversal

$$b_{stt\ min} = \frac{b_{fb} - t_{wc}}{2} = \frac{209 - 13{,}3}{2} = 97{,}85\ mm$$

Usar $b_{stt} = 98\ mm$

2.1.22.3. Cálculo del espesor mínimo de cada rigidizador transversal

Para cargas cíclicas y zonas sísmicas:

$$t_{stt\ min} = t_{fb} = 13{,}3\ mm$$

Se debe seleccionar un espesor comercial mayor o igual a $(t_{stt\ min})$ y al seleccionado en el paso 2.1.12.

Se usará el espesor comercial de 16 mm

2.1.22.4. Profundidad del rigidizador

$$l = d_c - 2 * t_{fc} = 363 - 2 * (21{,}8) = 319{,}4\ mm$$

Se debe considerar el espacio requerido para colocar la soldadura

2.1.22.5. Cálculo del área transversal real del rigidizador

$$A_{stt} = 2 * t_{stt} * (b_s - clip) = 2 * 1{,}6 * (9{,}8 - 1{,}9) = 25{,}28\ cm^2$$

$$\boldsymbol{A_{stt} \geq A_{stt\,min} \rightarrow 25{,}28 \geq 37{,}32 \rightarrow NO!}$$

Se debe aumentar el espesor del rigidizador transversal

Se tomará un rigidizador transversal de 25 mm de espesor

$$A_{stt} = 2 * 2{,}5 * (9{,}8 - 1{,}9) = 39{,}5\ cm^2$$

$$\boldsymbol{A_{stt} \geq A_{stt\,min} \rightarrow 39{,}5 \geq 37{,}32 \rightarrow OK!}$$

2.1.22.6. Cálculo del tamaño de la soldadura

a) Soldadura para conectar el rigidizador con las alas de la columna

Se utilizara soldadura doble de filete con un electrodo E-70, y su tamaño mínimo será:

$$D = \frac{0{,}943 * F_{ystt} * \ t_{stt}}{F_{EXX}} = \frac{0{,}943 * 3450 * \ 25}{4920} = 16{,}53\ mm$$

El tamaño máximo de soldadura de filete es de 12 mm por lo que se usara soldadura de canal de penetración completa.

b) Soldadura para conectar el rigidizador con la zona de panel de la columna

Se utilizara soldadura doble de filete con un electrodo E-70, y su tamaño mínimo será:

$$D = \frac{F_{cu}}{0.75 * 0.6 * F_{EXX}(l - 2 * clip) * 2 * \sqrt{2}}$$

$$= \frac{115{,}87}{0.75 * 0.6 * 0{,}0492(319{,}4 - 2 * 19) * 2 * \sqrt{2}}$$

$$D = 6{,}58\ mm$$

Usar soldadura de filete de 8 mm

2.1.23. Diseño de las planchas de refuerzo

Se asume una plancha de refuerzo de acero de calidad ASTM A572 Gr. 50.

2.1.23.1. Altura y profundidad de las planchas de refuerzo

La plancha de refuerzo puede o no extenderse más allá de los rigidizadores transversales.

Si se extiende, la distancia mínima de extensión será:

$$3 * k_c + t_p = 3 * 37 + 38 = 149\ mm$$

La profundidad de las planchas extremas será:

$$l_{dp} = d_c - \ 2 * t_{fc} = 319{,}4\ mm$$

Se debe tomar en cuenta el espacio requerido para colocar la soldadura.

2.1.23.2. Espesor de la plancha de refuerzo

Espesor requerido por resistencia:

$$t_{dp\,req.} = t_{eff} = \frac{V_{udp}}{0{,}9 * 0{,}6 * F_{ydp} * d_c} = \frac{50880}{0{,}9 * 0{,}6 * 34{,}5 * 363} = 7{,}52\ mm$$

Cuando se usa soldadura de filete, el espesor requerido es:

$$t_{dp\,min} = k_c - t_{fc} - r_e = 37 - 21{,}8 - 7{,}94 = 7{,}26\ mm$$

Espesor mínimo para prevenir el pandeo por corte:

$$t_{dp\,min} = \frac{h * \sqrt{F_{ydp}}}{3500} = \frac{(d_c - 2 * k_c) * \sqrt{F_{ydp}}}{3500} = \left(\frac{(36{,}3 - 2 * 3{,}7) * \sqrt{3450}}{3500}\right) * 10$$

$$t_{dp\,min} = 4{,}85\ mm$$

$$t_{dp\,min} = \frac{d_m - t_{stt} + d_c - 2 * t_{fc}}{90} = \frac{(528 - 13{,}3) - 25 + 363 - 2 * 21{,}8}{90}$$

$$t_{dp\,min} = 8{,}99\ mm$$

El espesor mínimo de la plancha de refuerzo será:

$$t_{dp\,min} = \max(7{,}52\ ;\ 7{,}25\ ;\ 8{,}99) = 8{,}99\ mm$$

Se selecciona un espesor comercial mayor o igual al espesor mínimo:

Usar $t_{dp} = 10\ mm$

2.1.23.3. Calculo del tamaño de la soldadura

a) Soldadura para conectar las planchas de refuerzo con las alas de la columna

Se usara soldadura de filete y su tamaño mínimo será:

$$D = \frac{1{,}70 * F_{ydp} * t_{eff}}{F_{EXX}} = \frac{1{,}70 * 3450 * 7{,}52}{4920} = 8{,}96\ mm$$

Usar $D = 9\ mm$

b) Soldadura para conectar las planchas de refuerzo a lo largo de los bordes superior e inferior.

Detalles en las figuras 3.13 y 3.14

2.1.24. Comparación de Resultados

La siguiente tabla muestra una comparación entre los resultados obtenidos en el ejemplo desarrollado manualmente con aquellos obtenidos utilizando la hoja de cálculo. Sólo se muestran, a manera ilustrativa, los resultados principales de todo el procedimiento de diseño.

Tabla 5.2. Comparación de Resultados- Diseño de una Conexión (4E)

Revisión	Hoja de cálculo	Cálculo manual	% de Error
Momento de Diseño de la Conexión	90,96 T*m	90,95 T*m	0,01%
Diámetro de Perno Requerido	3,07 cm	3,07 cm	0,00%
Espesor Requerido de la Plancha Extrema	31,12 mm	31,11 mm	0,03%
Espesor Requerido del Ala de la Columna por Cedencia a la Flexión	28,41 mm	28,41 mm	0,00%
Resistencia Requerida por Corte en la Zona de Panel de la Columna	141,37 T	141,38 T	0,01%
Resistencia Requerida de los Rigidizadores Transversales	115,86 T	115,87 T	0,01%
Espesor Requerido de los Rigidizadores Transversales	13,30 mm	13,30 mm	0,00%
Ancho Mínimo de cada Rigidizador Transversal	97,85 mm	97,85 mm	0,00%
Resistencia Requerida de las Planchas de Refuerzo	50,87 T	50,88 T	0,02%
Espesor de la Plancha de Refuerzo	8,99 mm	8,99 mm	0,00%

Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que los resultados obtenidos mediante el cálculo manual y con el uso de las hojas de cálculo son muy cercanos. Las pequeñas diferencias, prácticamente despreciables, se atribuyen a los redondeos en los cálculos manuales, por lo tanto se puede decir que las hojas de cálculo funcionan y producen resultados confiables.

2.2. Ejemplo Conexión 4Eb

Usando cargas de viento y gravitacionales, se debe diseñar una conexión a momento con plancha extrema extendida de cuatro (4) pernos no rigidizada (4E), para conectar una viga W21X55 a una columna W14X109, ambas de acero de calidad ASTM A572 Gr. 50 y la plancha extrema de acero de calidad ASTM A572 Gr. 50. Los pernos a usar son pernos de calidad ASTM A490. La resistencia al corte (V_u), es de 18 T.

Tabla 5.3. Datos Básicos para el Diseño de una Conexión (4E)

Aplicación =	Cargas de Viento y Gravitacionales

Cargas de Diseño			Datos de los Pernos			Datos de la Plancha Extrema		
V_u =	18	T	Calidad =	A490-N		Calidad =	ASTM A572 Gr 50	
M_{uc} =	64,12	T-m	d_b =	1 1/4	pulg.	t_p =	38	mm
			N° Pernos =	8		b_p =	212	mm
			F_t =	7940	kg/cm²	F_{yp} =	3450	kg/cm²
			F_v =	4220	kg/cm²	F_{up} =	4500	kg/cm²

Datos de la Columna			Datos de la Viga			Datos Geométricos		
Perfil =	W	14x109	Perfil =	W	21x55			
Calidad =	ASTM A572 Gr 50		Calidad =	ASTM A572 Gr 50		d_c =	47,63	mm
d_c =	363	mm	d =	528	mm	P_{fi} =	50,00	mm
b_{fc} =	371	mm	b_{fb} =	209	mm	P_{fo} =	50,00	mm
t_{fc} =	21,8	mm	t_{fb} =	13,3	mm	P_b =	0,00	mm
t_{wc} =	13,3	mm	t_{wb} =	9,5	mm			
k_c =	37		k_b =	26				
Z_{xc} =	7325	cm³	Z_{xb} =	2065	cm³			
(h/t_w) =	21,7		F_{yb} =	3450	kg/cm²			
F_{yc} =	3450	kg/cm²	F_{ub} =	4500	kg/cm²			
F_{uc} =	4500	kg/cm²						
g =	140	mm						
A_c =	206	cm²						

Fuente: Elaboración Propia

2.2.1. Cálculo del momento de diseño en el ala de la columna (M_{uc}):

$$M_{uc} = 0{,}9 * F_{yb} * Z_{xb} = 0{,}9 * 34500 * 2065 * 10^{-6} = 64{,}12\ T * m$$

2.2.2. Cálculo del diámetro requerido de los pernos $(d_{b\ req.})$:

$$h_0 = d + P_{fo} - \frac{t_{fb}}{2} = 528 + 50 - \frac{13{,}3}{2} = 571{,}4\ mm$$

$$h_1 = d - P_{fi} - \frac{3 * t_{fb}}{2} = 528 - 50 - \frac{3 * 13{,}3}{2} = 458{,}1\ mm$$

$$d_{b\ req.} = \sqrt{\frac{2 * M_{uc}}{\pi * \emptyset * F_t * (h_0 + h_1)}} = \sqrt{\frac{2 * 6412000}{\pi * 0{,}75 * 7940 * (57{,}14 + 45{,}81)}} = 2{,}58\ cm$$

2.2.3. Selección de un diámetro de perno de prueba (d_b), mayor al obtenido en el paso anterior $(d_{b\ req.})$, y cálculo del momento en el perno para que no existan fuerzas de apalancamiento (M_{np})

El diámetro seleccionado de 1 ¼ pulg. es mayor al requerido.

$$P_t = F_t * A_b = F_t * \left(\frac{\pi * d_b^2}{4}\right) = 79400 * \left(\frac{\pi * (0{,}03175)^2}{4}\right) = 62{,}86\ T$$

$$M_{np} = 2 * P_t * (h_0 + h_1) = 2 * 62{,}86 * (0{,}5714 + 0{,}4581) = 129{,}43\ T * m$$

$$\emptyset M_{np} = 0{,}75 * 129{,}43 = 97{,}07\ T * m$$

2.2.4. Determinar el espesor de la plancha extrema requerido $(t_{p\ req.})$

$$S = \frac{1}{2} * \sqrt{b_p * g} = \frac{1}{2} * \sqrt{212 * 140} = 86{,}13\ mm > P_{fi} = 50\ mm$$

$$Y_p = \frac{b_p}{2} * \left[h_1 * \left(\frac{1}{P_{fi}} + \frac{1}{S}\right) + h_0 * \left(\frac{1}{P_{fo}}\right) - \frac{1}{2}\right] + \frac{2}{g}\left[h_1 * (P_{fi} + S)\right]$$

$$Y_p = \frac{212}{2} * \left[458{,}1 * \left(\frac{1}{50} + \frac{1}{86{,}13}\right) + 571{,}4 * \left(\frac{1}{50}\right) - \frac{1}{2}\right] + \frac{2}{140}[458{,}1 * (50 + 86{,}13)]$$

$$Y_p = 3585\ mm$$

$$t_{p\ req.} = \sqrt{\frac{1{,}11 * \emptyset * M_{np}}{\emptyset_b * F_{yp} * Y_p}} = \sqrt{\frac{1{,}11 * 0{,}75 * 129430000}{0{,}9 * 34{,}50 * 3585}} = 31{,}11\ mm$$

2.2.5. Selección de un espesor de Plancha Extrema (t_p) mayor al espesor requerido

El espesor de la plancha debe cumplir las siguientes condiciones:

$$\boldsymbol{t_p \geq max(t_{p\,req.};\ d_b)}$$

$$\boldsymbol{38\ mm \geq max(31,11\ mm;\ 31,75\ mm)\ OK!}$$

2.2.6. Cálculo de la fuerza mayorada en el ala de la viga

$$F_{fu} = \frac{M_{uc}}{d - t_{fb}} = \frac{64{,}12}{0{,}528 - 0{,}0133} = 124{,}58\ T$$

2.2.7. Verificación de la capacidad por cedencia al corte de la porción extendida de la plancha extrema

$$\emptyset R_n = \emptyset * 0{,}6 * F_{yp} * b_p * t_p = 1{,}00 * 0.6 * 3{,}450 * 21{,}2 * 3{,}8 = 166{,}76\ T$$

$$\boldsymbol{\frac{F_{fu}}{2} < \emptyset R_n \rightarrow \frac{124,58\ T}{2} < 166,76\ T \rightarrow OK!}$$

2.2.8. Verificación de la capacidad por rotura en la sección neta de corte de la porción extendida de la plancha extrema

$$A_n = t_p * \left[b_p - 2 * (d_a)\right] = 3{,}8 * [21{,}2 - 2 * (3{,}175 + 0{,}3)] = 54{,}15\ cm^2$$

$$\emptyset R_n = \emptyset * 0{,}6 * F_{up} * A_n = 0{,}75 * 0{,}6 * 4{,}5 * 54{,}15 = 109{,}65\ T$$

$$\boldsymbol{\frac{F_{fu}}{2} < \emptyset R_n \rightarrow \frac{124,58\ T}{2} < 109,65 \rightarrow OK!}$$

2.2.9. Verificación de la resistencia a la rotura por corte de la conexión

$$\emptyset R_n = \emptyset * n_b * F_v * A_b = 0{,}75 * 4 * 4{,}22 * 7{,}92 = 100{,}27\ T$$

$$\boldsymbol{V_u < \emptyset R_n \rightarrow 18\ T < 100,27\ T \rightarrow OK!}$$

2.2.10. Verificación del aplastamiento en la plancha extrema y en el ala de la columna

- En la plancha extrema:

$$L_c = \left(P_{fi} + t_{fb} + P_{fo}\right) - (d_b + 2) = (50 + 13{,}3 + 50) - (31{,}75 + 2) = \ 79{,}55\ mm$$

$$R_n\ = min\left(1.2 *\ L_c * t_p * F_{up}\ ;\ 2.4 * d_b * t_p * F_{up}\right)$$

$$R_n\ = min(1.2 *\ 7{,}955 * 3{,}8 * 4{,}5\ ;\ 2.4 * 3{,}175 * 3{,}8 * 4{,}5) = min(163{,}24\ ;\ 130{,}30)$$

$$R_n\ = 130{,}30\ T$$

$$\emptyset R_n\ =\ n_i * \emptyset * R_n\ +\ n_o * \emptyset * R_n\ =\ 4 * (0{,}75 * 130{,}30) = 390{,}90\ T$$

$$\boldsymbol{V_u < \ \emptyset R_n\ \rightarrow 18\ T < \ 390{,}90\ T \rightarrow OK}!$$

- En el ala de la columna:

$$\emptyset R_n\ = \emptyset R_n\ * \frac{t_{fc}}{t_p} * \frac{F_{yp}}{F_{yc}} =\ 390{,}90 * \frac{21{,}8}{38} * \frac{3450}{3450} = 224{,}25\ T$$

$$\boldsymbol{V_u < \ \emptyset R_n\ \rightarrow 18\ T < \ 224{,}25\ T \rightarrow OK}!$$

2.2.11. Diseñar las soldaduras entre la plancha extrema y el ala y entre la plancha extrema y el alma

- Entre la plancha extrema y las alas de la viga:

$$F_{fu} > 0{,}6 * F_{yb} * A_{fb} \rightarrow F_{fu}\ > 0{,}6 * 3{,}45 * (20{,}9 * 1{,}33)$$

$$124{,}58\ T\ > 57{,}53\ T\ \rightarrow OK!$$

$$Longitud\ efectiva = b_{fb} + \left(b_{fb} - t_{wb}\right) = 209 + (209 - 9{,}5) = 408{,}5\ mm$$

$$D = \left(\frac{F_{fu} * 2{,}2046 * 25{,}4}{1{,}5 * 1{,}392 * Longitud\ efectiva\ soldadura * 16}\right) * 25{,}4 =$$

$$\left(\frac{124{,}58 * 2{,}2046 * 25{,}4}{1{,}5 * 1{,}392 * 408{,}5 * 16}\right) * 25{,}4 = 13\ mm$$

El tamaño máximo de soldadura de filete es de 12 mm por lo que se usara soldadura de canal de penetración completa.

- Entre la plancha extrema y el alma de la viga:

El tamaño mínimo de soldadura de filete para una plancha de 38 mm de espesor es de 8 mm.

Tamaño requerido de la soldadura para resistir el esfuerzo a flexión utilizando electrodos E-70:

$$D = \left(\frac{0.6 * F_{yb} * t_{wb}}{2 * 1{,}392 * 16}\right) * 25{,}4 = \left(\frac{0.6 * 3450 * 9{,}5 * 5{,}6 * 10^{-4}}{2 * 1{,}392 * 16}\right) * 25{,}4$$

$$D = 6{,}28\ mm$$

Usar soldadura de filete de 8 mm

Tamaño requerido de la soldadura para resistir el corte:

$$Longitud\ efectiva\ soldadura = \frac{d}{2} - t_{fb} = \frac{528}{2} - 13{,}3 = 250{,}7\ mm$$

$$D = \left(\frac{V_u * 2{,}2046 * 25{,}4}{2 * 1{,}392 * Longitud\ efectiva\ soldadura * 16}\right) * 25{,}4$$

$$D = \left(\frac{18 * 2{,}2046 * 25{,}4}{2 * 1{,}392 * 250{,}7 * 16}\right) * 25{,}4 = 2{,}29\ mm$$

Usar soldadura de filete de 8 mm

2.2.12. Verificación por cedencia a la flexión del ala de la columna

$$c = P_{fi} + P_{fo} + t_{fb} = 50 + 50 + 13{,}3 = 113{,}3\ mm$$

$$S = \frac{1}{2} * \sqrt{b_{fc} * g} = \frac{1}{2} * \sqrt{371 * 140} = 113{,}95\ mm > P_{fi} = 50\ mm$$

$$Y_c = \frac{b_{fc}}{2}\left[h_1 * \frac{1}{S} + h_0 * \frac{1}{s}\right] + \frac{2}{g}\left[h_1 * \left(S + \frac{3 * c}{4}\right) + h_0 * \left(S + \frac{c}{4}\right) + \frac{c^2}{2}\right] + \frac{g}{2}$$

$$Y_c = \frac{371}{2}\left[458{,}1 * \frac{1}{113{,}95} + 571{,}4 * \frac{1}{113{,}95}\right] +$$

$$+ \frac{2}{140}\left[458{,}1 * \left(113{,}95 + \frac{3 * 113{,}3}{4}\right) + 571{,}4 * \left(113{,}95 + \frac{113{,}3}{4}\right) + \frac{113{,}3^2}{2}\right] + \frac{140}{2}$$

$$Y_c = 4300{,}81\ mm$$

El espesor requerido del ala de la columna sin rigidizar es:

$$t_{fc\ Req} = \sqrt{\frac{1{,}11 * \emptyset * M_{np}}{\emptyset_b * F_{yc} * Y_c}} = \sqrt{\frac{1{,}11 * 0{,}75 * 129{,}43 * 10^8}{0{,}9 * 3450 * 4300{,}81}} = 28{,}41\ mm$$

$$\boldsymbol{t_{fc\ Req} \leq\ t_{fc} \rightarrow 28{,}41\ mm \leq\ 21{,}8\ mm \rightarrow NO!}$$

Se deben colocar rigidizadores transversales

Asumir un rigidizador de espesor igual a 13 mm.

$$P_{so} = P_{si} = \frac{c - t_{stt}}{2} = \frac{113{,}3 - 13}{2} = 50{,}15\ mm$$

$$Y_c = \frac{b_{fc}}{2}\left[h_1 * \left(\frac{1}{S} + \frac{1}{P_{si}}\right) + h_0 * \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{P_{so}}\right)\right] + \frac{2}{g}\left[h_1 * (S + P_{si}) + h_0 * (S + P_{so})\right]$$

$$Y_c = \frac{371}{2}\left[458{,}1 * \left(\frac{1}{113{,}95} + \frac{1}{50{,}15}\right) + 571{,}4 * \left(\frac{1}{113{,}95} + \frac{1}{50{,}15}\right)\right] +$$

$$+ \frac{2}{140}\left[458{,}1 * (113{,}95 + 50{,}15) + 571{,}4 * (113{,}95 + 50{,}15)\right]$$

$$Y_c = 7897{,}39\ mm$$

El espesor requerido del ala de la columna rigidizada es:

$$t_{fc\ Req} = \sqrt{\frac{1{,}11 * \emptyset * M_{np}}{\emptyset_b * F_{yc} * Y_c}} = \sqrt{\frac{1{,}11 * 0{,}75 * 129{,}43 * 10^8}{0{,}9 * 3450 * 7897{,}39}} = 20{,}96\ mm$$

$$\boldsymbol{t_{fc\,Req} \leq\ t_{fc} \rightarrow 20,96 \leq\ 21,8\ mm \rightarrow OK!}$$

2.2.13. Si se requieren rigidizadores por cedencia a la flexión del ala de la columna, se debe determinar la fuerza en el rigidizador

$$\emptyset M_{cf} =\ \emptyset_b * F_{yc} * Y_c *\ t_{fc}^2 =\ 0,9 * 34500 * 4,300 *\ (0,0218)^2 = 63,45\ T * m$$

$$\emptyset R_n = \frac{\emptyset M_{cf}}{\left(d - t_{fb}\right)} = \frac{63,45}{(0,528 - 0,0133)} = 123,28\ T$$

2.2.14. Verificación de la resistencia a la cedencia del alma de la columna considerando una columna sin el alma rigidizada en las alas de la viga conectada

$C_t = 1,00$ (Se asume que no se está en el tope de la columna)
$N = t_{\text{fb}} = 13,30\ mm$

$$\emptyset R_n =\ \emptyset * C_t * \left(6 * k_c + N + 2 * t_p\right) * F_{yc} * t_{wc}$$

$$=\ 1,00 * 1,00 * (6 * 0,037 + 0,0133 + 2 * 0,038) * 34500 * 0,0133$$

$$\emptyset R_n = 142,85\ T$$

$$\boldsymbol{\emptyset R_n >\ F_{fu} \rightarrow 142,85\ T >\ 124,58\ T\ \rightarrow OK!}$$

No es necesario colocar rigidizadores transversales

2.2.15. Verificación de la resistencia al pandeo del alma no rigidizada de la columna en el ala a compresión de la viga

$$h = \left(\frac{h}{t_w}\right)_c * t_{wc} =\ 21,7 * 13,3 = 288,61\ mm$$

$$\emptyset R_n = \frac{\emptyset * 12 * t_{wc}^3 * \sqrt{E * F_{yc}}}{h}$$

$$= \frac{0,9 * 12 * (0,0133)^3 * \sqrt{21000000 * 34500}}{0,28861}$$

$$\emptyset R_n = 74,94\ T$$

$$\emptyset \boldsymbol{R_n} > \boldsymbol{F_{fu}} \rightarrow \boldsymbol{74,94\ T} > \boldsymbol{124,58\ T} \rightarrow \boldsymbol{NO}!$$

Es necesario colocar rigidizadores transversales

2.2.16. Verificación de la resistencia al desgarramiento del alma no rigidizada de la columna en el ala a compresión de la viga

$\frac{N}{d_c} < 0{,}2 \rightarrow \frac{13{,}3}{363} = 0{,}04 < 0{,}2 \rightarrow$ Entonces:

$$\emptyset R_n = \emptyset * 0{,}40 * t_{wc}^2 * \left[1 + 3 * \left(\frac{N}{d_c}\right) * \left(\frac{t_{wc}}{t_{fc}}\right)^{1.5}\right] * \sqrt{\frac{E * F_{yc} * t_{fc}}{t_{wc}}}$$

$$= 0{,}75 * 0{,}40 * (0{,}0133)^2 * \left[1 + 3 * \left(\frac{13{,}3}{363}\right) * \left(\frac{13{,}3}{21{,}8}\right)^{1.5}\right] *$$

$$* \sqrt{\frac{21000000 * 34500 * 21{,}8}{13{,}3}}$$

$$\emptyset R_n = 60{,}85\ T$$

$$\emptyset \boldsymbol{R_n} > \boldsymbol{F_{fu}} \rightarrow \boldsymbol{60,85\ T} > \boldsymbol{124,58\ T} \rightarrow \boldsymbol{NO}!$$

Es necesario colocar rigidizadores transversales

2.2.17. Resistencia requerida por corte en la zona de panel de la columna

Para dos vigas conectadas a las alas de la columna

Se asume nulo el esfuerzo cortante en la planta estudiada

$$(V_{us} = 0) \text{ y } F_{fu1} = F_{fu2}$$

$$V_{uzp} = F_{fu1} + F_{fu2} - V_{us} = 124{,}58 + 124{,}58 + (0) = 249{,}16\ T$$

2.2.18. Capacidad al corte de la zona de panel de la columna

Para una carga axial mayorada en la columna $P_u = 140\ T$

$$P_y = A_c * F_{yc} = 206 * 3{,}450 = 710{,}7\ T$$

Como se trabaja con cargas de viento y gravitacionales se debe considerar que el comportamiento en la zona de panel se mantiene en el rango elástico. Entonces:

$$P_u \leq 0{,}40 * P_y \rightarrow 140\ T \leq 284{,}28\ T \rightarrow \text{Entonces:}$$

$$\emptyset R_v = 0.9 * 0.6 * F_{yc} * d_c * t_{wc}$$

$$= 0.9 * 0.6 * 3{,}45 * 36{,}3 * 1{,}33$$

$$\emptyset R_v = 89{,}94\ T$$

$$\boldsymbol{\emptyset R_v \geq V_{uzp} \rightarrow 89{,}94\ T \geq 249{,}16\ T \rightarrow NO!}$$

Es necesario colocar planchas de refuerzo para el alma de la columna

2.2.19. Si en alguno de los estados límites previamente estudiados (Pasos 2.2.13, 2.2.14, 2.2.15, 2.2.16) los rigidizadores transversales son necesarios, y la resistencia requerida de los mismos será:

$$F_{cu} = F_{fu} - \min \emptyset R_n$$

$$F_{cu} = 124{,}58 - \min(123{,}28\ ;\ 142{,}85\ ;\ 74{,}94\ ;\ 60{,}85) = 124{,}58 - 60{,}85$$

$$F_{cu} = 63{,}73\ T$$

2.2.20. Si en los estados límites previamente estudiados (Pasos 2.2.18 y 2.2.19) las planchas de refuerzo son necesarias, y la resistencia requerida de las mismas será:

$$V_{udp} = V_{uzp} - \emptyset R_v = 249{,}16 - 89{,}94 = 159{,}22\ T$$

2.2.21. Diseño de los rigidizadores transversales

2.2.21.1. Cálculo del área transversal mínima para el rigidizador transversal en cada ala

Se asume un rigidizador transversal de acero de calidad ASTM A572 Gr. 50.

$$A_{stt\ min} = \frac{F_{cu}}{\emptyset * F_{ystt}} = \frac{63{,}73}{0{,}9 * 3{,}45} = 20{,}52\ cm^2$$

2.2.21.2. Cálculo del ancho mínimo de cada rigidizador transversal

$$b_{stt\ min} = \frac{b_{fb}}{3} - \frac{t_{ps}}{2} = \frac{209}{3} - \frac{13{,}3}{2} = 63{,}02\ mm$$

Usar $\boldsymbol{b_{stt} = 64\ mm}$

2.2.21.3. Cálculo del espesor mínimo de cada rigidizador transversal

Para cargas de viento y gravitacionales:

$$t_{sttmin} = \frac{t_{fb}}{2} \geq \frac{b_{stt} * \sqrt{F_{ystt}}}{797} = \frac{13{,}3}{2} \geq \left(\frac{6{,}4 * \sqrt{3450}}{797}\right) * 10 = 6{,}65 \geq 4{,}72$$

Se debe seleccionar un espesor comercial mayor o igual a $(t_{stt\ min})$ y al seleccionado en el paso 2.2.12.

Se usará el espesor comercial de 16 mm

2.2.21.4. Profundidad del rigidizador

$$l = d_c - 2 * t_{fc} = 363 - 2 * (21{,}8) = 319{,}4\ mm$$

Se debe considerar el espacio requerido para colocar la soldadura

2.2.21.5. Cálculo del área transversal real del rigidizador

$$A_{stt} = 2 * t_{stt} * (b_s - clip) = 2 * 1{,}6 * (6{,}4 - 1{,}9) = 14{,}40\ cm^2$$

$$\boldsymbol{A_{stt} \geq A_{stt\ min} \rightarrow 14{,}40 \geq 20{,}52 \rightarrow NO!}$$

Se debe aumentar el espesor del rigidizador transversal

Se tomará un rigidizador transversal de 25 mm de espesor

$$A_{stt} = 2 * 2{,}5 * (6{,}4 - 1{,}9) = 22{,}5\ cm^2$$

$$\boldsymbol{A_{stt} \geq A_{stt\ min} \rightarrow 22{,}5 \geq 20{,}52 \rightarrow OK!}$$

2.2.21.6. Cálculo del tamaño de la soldadura

a) Soldadura para conectar el rigidizador con las alas de la columna

Se utilizara soldadura doble de filete con un electrodo E-70, y su tamaño mínimo será:

$$D = \frac{0{,}524 * F_{cu}}{F_{EXX} * (b_s - clip)} = \frac{0{,}524 * 63{,}73}{0{,}0492 * (64 - 19)} = 15{,}08\, mm$$

El tamaño máximo de soldadura de filete es de 12 mm por lo que se usara soldadura de canal de penetración completa.

b) Soldadura para conectar el rigidizador con la zona de panel de la columna

Se utilizará soldadura doble de filete con un electrodo E-70, y su tamaño mínimo será:

$$D = \frac{F_{cu1} + F_{cu2}}{0.75 * 0.6 * F_{EXX}(l - 2 * clip) * 2 * \sqrt{2}}$$

$$= \frac{63{,}73 + 63{,}73}{0.75 * 0.6 * 0{,}0492(319{,}4 - 2 * 19) * 2 * \sqrt{2}}$$

$$D = 7{,}23\, mm$$

Usar soldadura de filete de 8 mm

2.2.22. Diseño de las planchas de refuerzo

Se asume una plancha de refuerzo de acero de calidad ASTM A572 Gr. 50.

2.2.22.1. Altura y profundidad de las planchas de refuerzo

La plancha de refuerzo puede o no extenderse más allá de los rigidizadores transversales.

Si se extiende, la distancia mínima de extensión será:

$$3 * k_c + t_p = 3 * 37 + 38 = 149\, mm$$

La profundidad de las planchas extremas será:

$$l_{dp} = d_c - 2 * t_{fc} = 363 - 21{,}8 = 319{,}40\ mm$$

Se debe tomar en cuenta el espacio requerido para colocar la soldadura

2.2.22.2. Espesor de la plancha de refuerzo

Espesor requerido por resistencia:

$$t_{dp\,req.} = t_{eff} = \frac{V_{udp}}{0{,}9 * 0{,}6 * F_{ydp} * d_c} = \frac{159220}{0{,}9 * 0{,}6 * 34{,}5 * 363} = 23{,}54\ mm$$

Cuando se usa soldadura de filete, el espesor requerido es:

$$t_{dp\,min} = k_c - t_{fc} - r_e = 37 - 21{,}8 - 7{,}94 = 7{,}26\ mm$$

Espesor mínimo para prevenir el pandeo por corte:

$$t_{dp\,min} = \frac{h * \sqrt{F_{ydp}}}{3500} = \frac{(d_c - 2 * k_c) * \sqrt{F_{ydp}}}{3500} = \left(\frac{(36{,}3 - 2 * 3{,}7) * \sqrt{3450}}{3500}\right) * 10$$

$$t_{dp\,min} = 4{,}85\ mm$$

El espesor mínimo de la plancha de refuerzo será:

$$t_{dp\,min} = \max(23{,}54\ ;\ 7{,}25\ ;\ 4{,}85) = 23{,}54\ mm$$

Se selecciona un espesor comercial mayor o igual al espesor mínimo:

Usar $t_{dp} = 8\ mm$

2.2.22.3. Calculo del tamaño de la soldadura

a) Soldadura para conectar las planchas de refuerzo con las alas de la columna

Se usara soldadura de filete y su tamaño mínimo será:

$$D = \frac{1{,}70 * F_{ydp} * t_{eff}}{F_{EXX}} = \frac{1{,}70 * 3450 * 23{,}54}{4920} = 28{,}06\ mm$$

El tamaño máximo de soldadura de filete es de 12 mm por lo que se usara soldadura de canal de penetración completa.

b) Soldadura para conectar las planchas de refuerzo a lo largo de los bordes superior e inferior.

Detalles en las figuras 3.13 y 3.14

2.2.23. Comparación de Resultados

La siguiente tabla muestra una comparación entre los resultados obtenidos en el ejemplo desarrollado manualmente, con aquellos obtenidos utilizando la hoja de cálculo. Sólo se muestran, a manera ilustrativa, los resultados principales de todo el procedimiento de diseño.

Tabla 5.4. Comparación de Resultados- Diseño de una Conexión (4E)

Revisión	Hoja de cálculo	Cálculo manual	% de Error
Momento de Diseño de la Conexión	64,12 T*m	64,12 T*m	0,00%
Diámetro de Perno Requerido	2,58 cm	2,58 cm	0,00%
Espesor Requerido de la Plancha Extrema	31,12 mm	31,11 mm	0,03%
Espesor Requerido del Ala de la Columna por Cedencia a la Flexión	28,41 mm	28,41 mm	0,00%
Resistencia Requerida por Corte en la Zona de Panel de la Columna	249,15 T	249,16 T	0,00%
Resistencia Requerida de los Rigidizadores Transversales	63,72 T	63,73 T	0,02%
Espesor Requerido de los Rigidizadores Transversales	6,65 mm	6,65 mm	0,00%
Ancho Mínimo de cada Rigidizador Transversal	63,02 mm	63,02 mm	0,00%
Resistencia Requerida de las Planchas de Refuerzo	159,20 T	159,22 T	0,01%
Espesor de la Plancha de Refuerzo	23,54 mm	23,54 mm	0,00%

Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que los resultados obtenidos mediante el cálculo manual y con el uso de las hojas de cálculo son muy cercanos. Las pequeñas diferencias, prácticamente despreciables, se atribuyen a los redondeos en los cálculos manuales, por lo tanto se puede decir que las hojas de cálculo funcionan y producen resultados confiables.

2.3. Ejemplo Conexión 4ES

Usando cargas cíclicas y sísmicas, rediseñar la conexión 4E del ejemplo 2.1 usando ahora una conexión a momento con plancha extrema extendida de cuatro (4) pernos rigidizada (4ES), para conectar una viga W21X55 a una columna W14X109, ambas de acero de calidad ASTM A572 Gr. 50 y la plancha extrema de acero de calidad ASTM A572 Gr. 50. Los pernos a usar son pernos de calidad ASTM A490. La resistencia al corte (V_u), es de 18 T. Se asume conservadoramente que el momento de diseño será el mismo. Este ejemplo es una continuación del ejemplo 2.1, la única diferencia es que en este caso la plancha extrema se encuentra rigidizada, todas las verificaciones de los estados limites son las mismas.

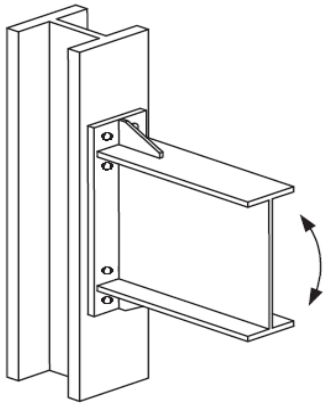


Fig. 5. 2. Conexión a Momento Con Plancha Extrema Extendida de Cuatro (4) Pernos Rigidizada (4ES)
Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

Tabla 5.3. Datos Básicos para el Diseño de una Conexión (4ES)

Aplicación =	Cargas Cíclicas y Sísmicas

Cargas de Diseño			**Datos de los Pernos**			**Datos de la Plancha Extrema**		
V_u =	18	T	Calidad =	A490-N		Calidad =	ASTM A572 Gr 50	
M_{uc} =	89,93	T-m	d_b =	1 1/4	pulg.	t_p =	38	mm
			N° Pernos =	8		b_p =	148	mm
			F_t =	7940	kg/cm²	F_{yp} =	3450	kg/cm²
			F_v =	4220	kg/cm²	F_{up} =	4500	kg/cm²

Datos de la Columna			**Datos de la Viga**			**Datos Geométricos**		
Perfil =	W	10x30	Perfil =	W	21x55	d_c =	47,63	mm
Calidad =	ASTM A572 Gr 50		Calidad =	ASTM A572 Gr 50		P_{fi} =	50,00	mm
d_c =	266	mm	d =	528	mm	P_{fo} =	50,00	mm
b_{fc} =	148	mm	b_{fb} =	209	mm	P_b =	0,00	mm
t_{fc} =	13	mm	t_{fb} =	13,3	mm			
t_{wc} =	7,6	mm	t_{wb} =	9,5	mm			
k_c =	24		k_b =	26				
Z_{xc} =	603	cm³	Z_{xb} =	2065	cm³			
(h/t_w) =	28,7		F_{yb} =	3450	kg/cm²			
F_{yc} =	3450	kg/cm²	F_{ub} =	4500	kg/cm²			
F_{uc} =	4500	kg/cm²						
g =	80	mm						
A_c =	57,3	cm²						

Datos del Rigidizador de la Plancha Extrema		
Calidad =	ASTM A572 Gr 50	
t_{st} =	16	mm
F_{yst} =	3450	kg/cm²
h_{st} =	98	mm
L_{st} =	169	mm

Fuente: Elaboración Propia

2.3.5 Determinar el espesor de la plancha extrema requerido $(t_{p\,req.})$

$$S = \frac{1}{2} * \sqrt{b_p * g} = \frac{1}{2} * \sqrt{212 * 140} = 86{,}13\ mm > P_{fi} = 50\ mm$$

$$d_e = 47{,}63\ mm \rightarrow d_e < S$$

$$h_0 = 571{,}4\ mm$$
$$h_1 = 458{,}1\ mm$$

$$Y_p = \frac{b_p}{2} * \left[h_1 * \left(\frac{1}{P_{fi}} + \frac{1}{S} \right) + h_0 * \left(\frac{1}{P_{fo}} + \frac{1}{2 * S} \right) \right]$$

$$+ \frac{2}{g} * \left[h_1 * \left(P_{fi} + S \right) + h_0 * \left(d_e + P_{fo} \right) \right]$$

$$Y_p = \frac{212}{2} * \left[458{,}1 * \left(\frac{1}{50} + \frac{1}{86{,}13}\right) + 571{,}4 * \left(\frac{1}{50} + \frac{1}{2 * 86{,}13}\right)\right] +$$

$$\frac{2}{140} * [458{,}1 * (50 + 86{,}13) + 571{,}4 * (47{,}63 + 50)]$$

$$Y_p = 4786\ mm$$

$$t_{p\,req.} = \sqrt{\frac{1{,}11 * \emptyset * M_{np}}{\emptyset_b * F_{yp} * Y_p}} = \sqrt{\frac{1{,}11 * 0{,}75 * 129430000}{0{,}9 * 34{,}50 * 4786}} = 26{,}93\ mm$$

2.3.6 Selección de un espesor de Plancha Extrema (t_p) mayor al espesor requerido.

El espesor de la plancha debe cumplir las siguientes condiciones:

$$\boldsymbol{t_p \geq max(t_{p\,req.};\ d_b)}$$

$$\boldsymbol{38\ mm \geq max(26{,}93\ mm;\ 31{,}75\ mm)\ OK!}$$

2.3.7 Seleccionar el espesor del rigidizador de la plancha extrema (t_s) y diseñar las soldaduras entre el rigidizador y el ala de la viga, y entre el rigidizador y la plancha extrema

$$t_{s\,req.} = t_{wb}\left(\frac{F_{yb}}{F_{ys}}\right) = 9{,}5\left(\frac{3450}{3450}\right) = 9{,}5\ mm$$

Usar $t_s = 10\ mm$

Verificación para prevenir el pandeo local del rigidizador de la plancha:

$$\frac{h_{st}}{t_s} \leq 0.56 * \sqrt{\frac{E}{F_{ys}}} \rightarrow \frac{98}{10} \leq 0.56 * \sqrt{\frac{2100000}{3450}} \rightarrow 9{,}8 \leq 13{,}81\ OK!$$

Soldadura entre el Rigidizador de Plancha Extrema y la Plancha Extrema:

Especificar soldadura de ranura de penetración completa

Soldadura entre el Rigidizador de Plancha Extrema y el Ala de la Viga:

Usar soldadura de filete de 6 mm

2.3.8 Comparación de Resultados

La siguiente tabla muestra una comparación entre los resultados obtenidos en el ejemplo desarrollado manualmente, con aquellos obtenidos utilizando la hoja de cálculo. Sólo se muestran, a manera ilustrativa, los resultados principales de todo el procedimiento de diseño.

Tabla 5.6. Comparación de Resultados- Diseño de una Conexión (4ES)

Revisión	Hoja de cálculo	Cálculo manual	% de Error
Espesor Requerido de la Plancha Extrema	26,93 mm	26,93 mm	0,00%
Espesor Requerido del Rigidizador de Plancha Extrema	9,50 mm	9,5 mm	0,00%

Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que los resultados obtenidos mediante el cálculo manual y con el uso de las hojas de cálculo son muy cercanos. Las pequeñas diferencias, prácticamente despreciables, se atribuyen a los redondeos en los cálculos manuales, por lo tanto se puede decir que las hojas de cálculo funcionan y producen resultados confiables.

2.4 Ejemplo Conexión 8ES

Usando cargas cíclicas y sísmicas, rediseñar la conexión 4E del ejemplo 2.1 usando ahora una conexión a momento con plancha extrema extendida de ocho (8) pernos rigidizada (8ES), para conectar una viga W21X55 a una columna W14X109, ambas de acero de calidad ASTM A572 Gr. 50 y la plancha extrema de acero de calidad ASTM A572 Gr. 50. Los pernos a usar son pernos de calidad ASTM A490. La resistencia al corte (V_u), es de 18 T.

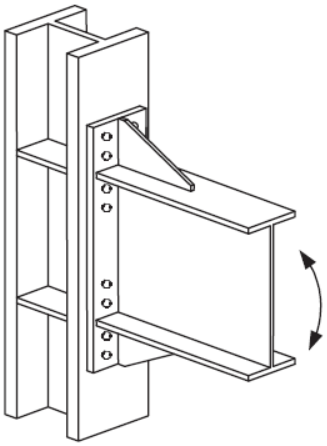


Fig. 5.3. Conexión a Momento con Plancha Extrema Extendida de Ocho (8) Pernos Rigidizada (8ES)
Fuente: Adaptado de Murray y Sumner (2003).

Tabla 5.7. Datos Básicos para el Diseño de una Conexión (8ES)

Aplicación =	Cargas Cíclicas y Sísmicas

Cargas de Diseño			**Datos de los Pernos**			**Datos de la Plancha Extrema**		
V_u =	18	T	Calidad =	A490-N		Calidad =	ASTM A572 Gr 50	
M_{uc} =	92,01	T-m	d_b =	1	pulg.	t_p =	38	mm
			N° Pernos =	16		b_p =	148	mm
			F_t =	7940	kg/cm²	F_{yp} =	3450	kg/cm²
			F_v =	4220	kg/cm²	F_{up} =	4500	kg/cm²

Datos de la Columna			**Datos de la Viga**			**Datos Geométricos**		
Perfil =	W	10x30	Perfil =	W	21x55	d_c =	38,10	mm
Calidad =	ASTM A572 Gr 50		Calidad =	ASTM A572 Gr 50		P_{fi} =	50,00	mm
d_c =	266	mm	d =	528	mm	P_{fo} =	50,00	mm
b_{fc} =	148	mm	b_{fb} =	209	mm	P_b =	76,20	mm
t_{fc} =	13	mm	t_{fb} =	13,3	mm			
t_{wc} =	7,6	mm	t_{wb} =	9,5	mm	**Datos del Rigidizador de la Plancha Extrema**		
k_c =	24		k_b =	26				
Z_{xc} =	603	cm³	Z_{xb} =	2065	cm³	Calidad =	ASTM A572 Gr 50	
(h/t_w) =	28,7		F_{yb} =	3450	kg/cm²	t_{st} =	16	mm
F_{yc} =	3450	kg/cm²	F_{ub} =	4500	kg/cm²	F_{yst} =	3450	kg/cm²
F_{uc} =	4500	kg/cm²				h_{st} =	164	mm
g =	80	mm				L_{st} =	285	mm
A_c =	57,3	cm²						

Fuente: Elaboración Propia

2.4.5 Cálculo del momento de diseño en el ala de la columna (M_{uc}):

$$M_{pe} = 1{,}1 * R_y * F_{yb} * Z_{xb} = 1{,}1 * 1{,}1 * 34500 * 2065 * 10^{-6} = 86{,}20\ T * m$$

$$L_p = L_{st} + t_p = 284{,}58 + 38 = 322{,}58\ mm$$

$$M_{uc} = M_{pe} + V_u * L_p = 86{,}20 + 18 * 0{,}323 = 92{,}01\ T * m$$

2.4.6 Cálculo del diámetro requerido de los pernos $(d_{b\,req.})$:

$$h_1 = d + P_{fo} + P_b - \frac{t_{fb}}{2} = 528 + 50 + 76{,}20 - \frac{13{,}3}{2} = 647{,}55\ mm$$

$$h_2 = d + P_{fo} - \frac{t_{fb}}{2} = 528 + 50 - \frac{13{,}3}{2} = 571{,}35\ mm$$

$$h_3 = d - t_{fb} - P_{fo} - \frac{t_{fb}}{2} = 528 - 13{,}3 - 50 - \frac{13{,}3}{2} = 458{,}05\ mm$$

$$h_4 = d - t_{fb} - P_{fo} - P_b - \frac{t_{fb}}{2} = 528 - 13{,}3 - 50 - 76{,}20 - \frac{13{,}3}{2} = 381{,}85\ mm$$

$$d_{b\,req.} = \sqrt{\frac{2 * M_{uc}}{\pi * \emptyset * F_t * (h_1 + h_2 + h_3 + h_4)}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 * 9201000}{\pi * 0{,}75 * 7940 * (64{,}76 + 57{,}14 + 45{,}81 + 38{,}19)}} = 2{,}19\ cm$$

2.4.7 Selección de un diámetro de perno de prueba (d_b), mayor al obtenido en el paso anterior $(d_{b\,req.})$, y cálculo del momento en el perno para que no existan fuerzas de apalancamiento (M_{np})

El diámetro seleccionado de 1 pulg. es mayor al requerido.

$$P_t = F_t * A_b = F_t * \left(\frac{\pi * d_b^2}{4}\right) = 79400 * \left(\frac{\pi * (0{,}0254)^2}{4}\right) = 40{,}23\ T$$

$$M_{np} = 2 * P_t * (h_1 + h_2 + h_3 + h_4)$$

$$= 2 * 40{,}23\ * (0{,}6476 + 0{,}5714 + 0{,}4581 + 0{,}3819) = 165{,}67\ T * m$$

$$\emptyset M_{np} = 0{,}75 * 258{,}84 = 124{,}25\ T * m$$

2.4.8 Determinar el espesor de la plancha extrema requerido $(t_{p\,req.})$

$$S = \frac{1}{2} * \sqrt{b_p * g} = \frac{1}{2} * \sqrt{212 * 140} = 86{,}13\ mm > P_{fi} = 50\ mm$$

$$d_e = 38{,}10\ mm \rightarrow d_e < S$$

$$Y_p = \frac{b_p}{2}\left[h_1 \frac{1}{2 * d_e} + h_2 * \frac{1}{P_{fo}} + h_3 * \frac{1}{P_{fi}} + h_4 * \frac{1}{S}\right] +$$

$$\frac{2}{g} * \left[h_1 * \left(d_e + \frac{P_b}{4}\right) + h_2 * \left(P_{fo} + \frac{3 * P_b}{4}\right) + h_3 * \left(P_{fi} + \frac{P_b}{4}\right) + h_4 * \left(S + \frac{3 * P_b}{4}\right) + P_b^2\right] + g$$

$$Y_p = \frac{212}{2}\left[647{,}55 * \frac{1}{2 * 38{,}10} + 571{,}35 * \frac{1}{50} + 458{,}05 * \frac{1}{50} + 381{,}85 * \frac{1}{86{,}13}\right] +$$

$$\frac{2}{140} * \left[647{,}55 * \left(38{,}10 + \frac{76{,}20}{4}\right) + 571{,}35 * \left(50 + \frac{3 * 76{,}20}{4}\right)\right] +$$

$$\frac{2}{140} * \left[458{,}05 * \left(50 + \frac{76{,}20}{4}\right) + 381{,}85 * \left(86{,}13 + \frac{3 * 76{,}20}{4}\right) + (76{,}20)^2\right] + 140$$

$$Y_p = 6412{,}69\ mm$$

$$t_{p\,req.} = \sqrt{\frac{1{,}11 * \emptyset * M_{np}}{\emptyset_b * F_{yp} * Y_p}} = \sqrt{\frac{1{,}11 * 0{,}75 * 165670000}{0{,}9 * 34{,}50 * 6413}} = 26{,}31\ mm$$

2.4.9 Selección de un espesor de Plancha Extrema (t_p) mayor al espesor requerido

El espesor de la plancha debe cumplir las siguientes condiciones:

$$\boldsymbol{t_p \geq max(t_{p\,req.};\ d_b)}$$

$$\boldsymbol{38\ mm \geq max(26{,}31\ mm;\ 25{,}4\ mm)\ OK!}$$

2.4.10 Cálculo de la fuerza mayorada en el ala de la viga

$$F_{fu} = \frac{M_{uc}}{d - t_{fb}} = \frac{92{,}01}{0{,}528 - 0{,}0133} = 178{,}76\ T$$

2.4.11 Seleccionar el espesor del rigidizador de la plancha extrema (t_s) y diseñar las soldaduras entre el rigidizador y el ala de la viga, y entre el rigidizador y la plancha extrema

$$t_{s\,req.} = t_{wb}\left(\frac{F_{yb}}{F_{ys}}\right) = 9{,}5\left(\frac{3450}{3450}\right) = 9{,}5\ mm$$

$$t_s = 10\ mm$$

Verificación para prevenir el pandeo local del rigidizador de la plancha:

$$\frac{h_{st}}{t_s} \leq 0.56 * \sqrt{\frac{E}{F_{ys}}} \rightarrow \frac{192,88}{10} \leq 0.56 * \sqrt{\frac{2100000}{3450}} \rightarrow 19,28 \leq 13,81\ NO!$$

Aumentar el espesor del rigidizador de la plancha extrema

$$\frac{h_{st}}{t_s} \leq 0.56 * \sqrt{\frac{E}{F_{ys}}} \rightarrow \frac{164,30}{13} \leq 0.56 * \sqrt{\frac{2100000}{3450}} \rightarrow 12,63 \leq 13,81\ OK!$$

Usar $t_s = 13\ mm$

Soldadura entre el Rigidizador de Plancha Extrema y la Plancha Extrema:

Especificar soldadura de ranura de penetración completa

Soldadura entre el Rigidizador de Plancha Extrema y el Ala de la Viga:

Usar soldadura de filete de 6 mm

2.4.12 Verificación de la resistencia a la rotura por corte de la conexión

$$\emptyset R_n = \emptyset * n_b * F_v * A_b = 0,75 * 8 * 4,22 * 5,07 = 128,30\ T$$

$$\boldsymbol{V_u < \emptyset R_n \rightarrow 18\ T < 128,30\ T \rightarrow OK!}$$

2.4.13 Verificación del aplastamiento en la plancha extrema y en el ala de la columna

- En la plancha extrema:

$$L_c = \left(P_{fi} + t_{fb} + P_{fo}\right) - (d_b + 2) = (50 + 13,3 + 50) - (25,4 + 2) = 85,90\ mm$$

$$R_n = min\left(1.2 * L_c * t_p * F_{up}\ ;\ 2.4 * d_b * t_p * F_{up}\right)$$

$$R_n = min(1.2 * 8,59 * 3,8 * 4,5\ ;\ 2.4 * 2,54 * 3,8 * 4,5) = min(176,27\ ;\ 104,24)$$

$$R_n = 104,24\ T$$

$$\emptyset R_n = n_i * \emptyset * R_n + n_o * \emptyset * R_n = 8 * (0,75 * 104,24) = 625,45\ T$$

$$\boldsymbol{V_u < \emptyset R_n \rightarrow 18\ T < 625,45\ T \rightarrow OK!}$$

- En el ala de la columna:

$$\emptyset R_n = \emptyset R_n * \frac{t_{fc}}{t_p} * \frac{F_{yp}}{F_{yc}} = 625{,}45 * \frac{21{,}8}{38} * \frac{3450}{3450} = 358{,}82\ T$$

$$\boldsymbol{V_u < \emptyset R_n \rightarrow 18\ T < 358{,}82\ T \rightarrow OK!}$$

2.4.14 Diseñar las soldaduras entre la plancha extrema y el ala y entre la plancha extrema y el alma

- Entre la plancha extrema y las alas de la viga:

  Especificar soldadura de penetración completa.

- Entre la plancha extrema y el alma de la viga:

El tamaño mínimo de soldadura de filete para una plancha de 38 mm de espesor es de 8 mm.

Tamaño requerido de la soldadura para resistir el esfuerzo a flexión utilizando electrodos E-70:

$$D = \left(\frac{0.6 * F_{yb} * t_{wb}}{2 * 1{,}392 * 16}\right) * 25{,}4 = \left(\frac{0.6 * 3450 * 9{,}5 * 5{,}6 * 10^{-4}}{2 * 1{,}392 * 16}\right) * 25{,}4$$

$$D = 6{,}28\ mm$$

Usar soldadura de filete de 8 mm

Tamaño requerido de la soldadura para resistir el corte:

$$Longitud\ efectiva\ soldadura = \frac{d}{2} - t_{fb} = \frac{528}{2} - 13{,}3 = 250{,}7\ mm$$

$$D = \left(\frac{V_u * 2{,}2046 * 25{,}4}{2 * 1{,}392 * Longitud\ efectiva\ soldadura * 16}\right) * 25{,}4$$

$$D = \left(\frac{18 * 2{,}2046 * 25{,}4}{2 * 1{,}392 * 250{,}7 * 16}\right) * 25{,}4 = 2{,}29\ mm$$

Usar soldadura de filete de 8 mm

2.4.15 Verificación por cedencia a la flexión del ala de la columna

$$c = P_{fi} + P_{fo} + t_{fb} = 50 + 50 + 13{,}3 = 113{,}3\ mm$$

$$S = \frac{1}{2} * \sqrt{b_{fc} * g} = \frac{1}{2} * \sqrt{371 * 140} = 113{,}95\ mm$$

$$Y_c = \frac{b_{fc}}{2}\left[h_1 * \frac{1}{S} + h_4 * \frac{1}{s}\right] +$$

$$\frac{2}{g}\left[h_1 * \left(P_b + \frac{c}{2} + S\right) + h_2 * \left(\frac{P_b}{2} + \frac{c}{4}\right) + h_3 * \left(\frac{P_b}{2} + \frac{c}{2}\right) + h_4 * S\right] + \frac{g}{2}$$

$$Y_c = \frac{371}{2}\left[647{,}55 * \frac{1}{113{,}95} + 381{,}85 * \frac{1}{113{,}95}\right] +$$

$$\frac{2}{140}\left[647{,}55 * \left(76{,}20 + \frac{113{,}3}{2} + 113{,}95\right) + 571{,}35 * \left(\frac{76{,}20}{2} + \frac{113{,}3}{4}\right)\right] +$$

$$\frac{2}{140}\left[458{,}05 * \left(\frac{76{,}20}{2} + \frac{113{,}3}{2}\right) + 381{,}85 * 113{,}95\right] + \frac{140}{2}$$

$$Y_c = 5812{,}61\ mm$$

El espesor requerido del ala de la columna sin rigidizar es:

$$t_{fc\ Req} = \sqrt{\frac{1{,}11 * \emptyset * M_{np}}{\emptyset_b * F_{yc} * Y_c}} = \sqrt{\frac{1{,}11 * 0{,}75 * 165{,}67 * 10^8}{0{,}9 * 3450 * 5812{,}61}} = 27{,}64\ mm$$

$$\boldsymbol{t_{fc\ Req} \leq\ t_{fc} \rightarrow 27{,}64\ mm \leq\ 21{,}8\ mm \rightarrow NO!}$$

Se deben colocar rigidizadores transversales

Asumir un rigidizador de espesor igual a 19 mm.

$$P_{so} = P_{si} = \frac{c - t_{stt}}{2} = \frac{113{,}3 - 19}{2} = 47{,}15\ mm$$

$$Y_c = \frac{b_{fc}}{2}\left[h_1 * \frac{1}{S} + h_2 * \frac{1}{P_{so}} + h_3 * \frac{1}{P_{si}} + h_4 * \frac{1}{s}\right] +$$

$$\frac{2}{g}\left[h_1\left(S+\frac{P_b}{4}\right)+h_2\left(P_{so}+\frac{3*P_b}{4}\right)+h_3\left(P_{si}+\frac{P_b}{4}\right)+h_4\left(S+\frac{3*P_b}{4}\right)+P_b^2\right]+g$$

$$Y_c=\frac{371}{2}\left[647{,}55*\frac{1}{113{,}95}+571{,}35*\frac{1}{47{,}15}+458{,}05*\frac{1}{47{,}15}+381{,}85*\frac{1}{113{,}95}\right]$$

$$+\frac{2}{140}\left[647{,}55*\left(113{,}95+\frac{76{,}20}{4}\right)+571{,}35*\left(47{,}15+\frac{3*76{,}20}{4}\right)\right]+$$

$$\frac{2}{140}\left[458{,}05*\left(47{,}15+\frac{76{,}20}{4}\right)+381{,}85*\left(113{,}95+\frac{3*76{,}20}{4}\right)+(76{,}20)^2\right]+140$$

$$Y_c=9396{,}82\ mm$$

El espesor requerido del ala de la columna rigidizada es:

$$t_{fc\ Req}=\sqrt{\frac{1{,}11*\emptyset*M_{np}}{\emptyset_b*F_{yc}*Y_c}}=\sqrt{\frac{1{,}11*0{,}75*165{,}67*10^8}{0{,}9*3450*9396{,}82}}=21{,}74\ mm$$

$$\boldsymbol{t_{fc\ Req}\leq\ t_{fc}\rightarrow 21{,}74\leq\ 21{,}8\ mm\rightarrow OK!}$$

2.4.16 Si se requieren rigidizadores por cedencia a la flexión del ala de la columna, se debe determinar la fuerza en el rigidizador.

$$\emptyset M_{cf}=\ \emptyset_b*F_{yc}*Y_c*\ t_{fc}^2=\ 0{,}9*34500*5{,}812*\ (0{,}0218)^2=85{,}76\ T*m$$

$$\emptyset R_n=\ \frac{\emptyset M_{cf}}{\left(d-t_{fb}\right)}=\ \frac{85{,}76}{(0{,}528-0{,}0133)}=166{,}62\ T$$

2.4.17 Verificación de la resistencia a la cedencia del alma de la columna considerando una columna sin el alma rigidizada en las alas de la viga conectada

$C_t=1{,}00$ (Se asume que no se está en el tope de la columna)
$N=t_{\text{fb}}=13{,}30\ mm$

$$\emptyset R_n=\ \emptyset*C_t*\left(6*k_c+N+2*t_p\right)*F_{yc}*t_{wc}$$

$$=\ 1{,}00*1{,}00*(6*0{,}037+0{,}0133+2*0{,}038)*34500*0{,}0133$$

$$\emptyset R_n=142{,}85\ T$$

$$\emptyset \boldsymbol{R_n} > \boldsymbol{F_{fu}} \rightarrow \boldsymbol{142,84\ T} > \boldsymbol{178,76\ T} \rightarrow \boldsymbol{NO}!$$

Es necesario colocar rigidizadores transversales

2.4.18 Verificación de la resistencia al pandeo del alma no rigidizada de la columna en el ala a compresión de la viga

$$h = \left(\frac{h}{t_w}\right)_c * t_{wc} = 21{,}7 * 13{,}3 = 288{,}61\ mm$$

$$\emptyset R_n = \frac{\emptyset * 12 * t_{wc}^3 * \sqrt{E * F_{yc}}}{h}$$

$$= \frac{0{,}9 * 12 * (0{,}0133)^3 * \sqrt{21000000 * 34500}}{0{,}28861}$$

$$\emptyset R_n = 74{,}94\ T$$

$$\emptyset \boldsymbol{R_n} > \boldsymbol{F_{fu}} \rightarrow \boldsymbol{74,94\ T} > \boldsymbol{178,76\ T} \rightarrow \boldsymbol{NO}!$$

Es necesario colocar rigidizadores transversales

2.4.19 Verificación de la resistencia al desgarramiento del alma no rigidizada de la columna en el ala a compresión de la viga

$\frac{N}{d_c} < 0{,}2 \rightarrow \frac{13{,}3}{363} = 0{,}04 < 0{,}2 \rightarrow$ Entonces:

$$\emptyset R_n = \emptyset * 0{,}40 * t_{wc}^2 * \left[1 + 3 * \left(\frac{N}{d_c}\right) * \left(\frac{t_{wc}}{t_{fc}}\right)^{1.5}\right] * \sqrt{\frac{E * F_{yc} * t_{fc}}{t_{wc}}}$$

$$= 0{,}75 * 0{,}40 * (0{,}0133)^2 * \left[1 + 3 * \left(\frac{13{,}3}{363}\right) * \left(\frac{13{,}3}{21{,}8}\right)^{1.5}\right] *$$

$$* \sqrt{\frac{21000000 * 34500 * 21{,}8}{13{,}3}}$$

$$\emptyset R_n = 60{,}85\ T$$

$$\emptyset \boldsymbol{R_n} > \boldsymbol{F_{fu}} \rightarrow \boldsymbol{60,85\ T} > \boldsymbol{178,76\ T} \rightarrow \boldsymbol{NO}!$$

Es necesario colocar rigidizadores transversales

2.4.20 Resistencia requerida por corte en la zona de panel de la columna

Para una viga conectada a las alas de la columna

Se asume nulo el esfuerzo cortante en la planta estudiada (V_{us})

$$V_{uzp} = \emptyset * (F_{fu}) - V_{us} = 0{,}80 * 178{,}76 - (0) = 143{,}01\ T$$

2.4.21 Capacidad al corte de la zona de panel de la columna

Para una carga axial mayorada en la columna $P_u = 140\ T$

$$P_y = A_c * F_{yc} = 206 * 3{,}450 = 710{,}7\ T$$

Como se trabaja con cargas cíclicas y sísmicas se debe considerar en el análisis de la estabilidad del pórtico la deformación inelástica en la zona de panel de la columna. Entonces:

$P_u \leq 0{,}75 * P_y \rightarrow 140\ T \leq 533{,}03\ T \rightarrow$ Entonces:

$$\emptyset R_v = 0{,}75 * 0{,}6 * F_{yc} * d_c * t_{wc} * \left(1 + \frac{3 * b_{fc} * t_{fc}^2}{d * d_c * t_{wc}}\right)$$

$$= 0{,}75 * 0{,}6 * 34500 * 0{,}363 * 0{,}0133 * \left(1 + \frac{3 * 371 * (21{,}8)^2}{528 * 363 * 13{,}3}\right)$$

$$\emptyset R_v = 90{,}50\ T$$

$$\boldsymbol{\emptyset R_v \geq V_{uzp} \rightarrow 90{,}50\ T \geq 143{,}01\ T \rightarrow NO!}$$

Es necesario colocar planchas de refuerzo para el alma de la columna

2.4.22 Si se trabaja en zonas de alta sismicidad también debe verificarse el espesor mínimo del alma de la columna

$$t_{wc\ min} = \frac{d_m + d_c - 2 * t_{fc}}{90} = \frac{(528 - 13{,}3) + 363 - 2 * 21{,}8}{90} = 9{,}27\ mm$$

$$\boldsymbol{t_{wc\ min} \leq t_{wc} \rightarrow 9{,}27\ mm \leq 13{,}3\ mm \rightarrow OK!}$$

2.4.23 Si en alguno de los estados límites previamente estudiados (Pasos 2.1.12, 2.1.13, 2.1.14, 2.1.15) los rigidizadores transversales son necesarios, y la resistencia requerida de los mismos será

$$F_{cu} = F_{fu} - \min \emptyset R_n$$

$$F_{cu} = 178{,}76 - \min(166{,}62\ ;\ 142{,}85\ ;\ 74{,}94\ ;\ 60{,}85) = 178{,}76 - 60{,}85$$

$$F_{cu} = 117{,}91\ T$$

2.4.24 Si en los estados límites previamente estudiados (Pasos 2.1.17 y 2.1.18) las planchas de refuerzo son necesarias, la resistencia requerida de las mismas será

$$V_{udp} = V_{uzp} - \emptyset R_v = 143{,}01 - 90{,}51 = 52{,}50\ T$$

2.4.25 Diseño de los rigidizadores transversales

2.4.25.1 Cálculo del área transversal mínima para el rigidizador transversal en cada ala

Se asume un rigidizador transversal de acero de calidad ASTM A572 Gr. 50.

$$A_{stt\ min} = \frac{F_{cu}}{\emptyset * F_{ystt}} = \frac{117{,}91}{0{,}9 * 3{,}45} = 37{,}97\ cm^2$$

2.4.25.2 Cálculo del ancho mínimo de cada rigidizador transversal

$$b_{stt\ min} = \frac{b_{fb} - t_{wc}}{2} = \frac{209 - 13{,}3}{2} = 97{,}85\ mm$$

Usar $b_{stt} = 98\ mm$

2.4.25.3 Cálculo del espesor mínimo de cada rigidizador transversal

Para cargas cíclicas y zonas sísmicas:

$$t_{stt\ min} = t_{fb} = 13{,}3\ mm$$

Se debe seleccionar un espesor comercial mayor o igual a $(t_{stt\ min})$ y al seleccionado en el paso 2.1.12.

Se usará el espesor comercial de 25 mm

2.4.25.4 Profundidad del rigidizador

$$l = d_c - 2 * t_{fc} = 363 - 2 * (21{,}8) = 319{,}4\ mm$$

Se debe considerar el espacio requerido para colocar la soldadura

2.4.25.5 Cálculo del área transversal real del rigidizador

$$A_{stt} = 2 * t_{stt} * (b_s - clip) = 2 * 2{,}5 * (9{,}8 - 1{,}9) = 39{,}50\ cm^2$$

$$\boldsymbol{A_{stt} \geq A_{stt\,min} \rightarrow 39{,}50 \geq 37{,}32 \rightarrow OK!}$$

2.4.25.6 Cálculo del tamaño de la soldadura

a) Soldadura para conectar el rigidizador con las alas de la columna

Se utilizara soldadura doble de filete con un electrodo E-70, y su tamaño mínimo será:

$$D = \frac{0{,}943 * F_{ystt} * t_{stt}}{F_{EXX}} = \frac{0{,}943 * 3450 * 25}{4920} = 16{,}53\ mm$$

El tamaño máximo de soldadura de filete es de 12 mm por lo que se usara soldadura de canal de penetración completa.

b) Soldadura para conectar el rigidizador con la zona de panel de la columna

Se utilizara soldadura doble de filete con un electrodo E-70, y su tamaño mínimo será:

$$D = \frac{F_{cu}}{0.75 * 0.6 * F_{EXX}(l - 2 * clip) * 2 * \sqrt{2}}$$

$$= \frac{117{,}91}{0.75 * 0.6 * 0{,}0492(319{,}4 - 2 * 19) * 2 * \sqrt{2}}$$

$$D = 6{,}69\ mm$$

Usar soldadura de filete de 8 mm

2.4.26 Diseño de las planchas de refuerzo

Se asume una plancha de refuerzo de acero de calidad ASTM A572 Gr. 50.

2.4.26.1 Altura y profundidad de las planchas de refuerzo

La plancha de refuerzo puede o no extenderse más allá de los rigidizadores transversales.

Si se extiende, la distancia mínima de extensión será:

$$3 * k_c + t_p = 3 * 37 + 38 = 149\ mm$$

La profundidad de las planchas extremas será:

$$l_{dp} = d_c - 2 * t_{fc} = 319{,}40\ mm$$

Se debe tomar en cuenta el espacio requerido para colocar la soldadura

2.4.26.2 Espesor de la plancha de refuerzo

Espesor requerido por resistencia:

$$t_{dp\ req.} = t_{eff} = \frac{V_{udp}}{0{,}9 * 0{,}6 * F_{ydp} * d_c} = \frac{52510}{0{,}9 * 0{,}6 * 34{,}5 * 363} = 7{,}76\ mm$$

Cuando se usa soldadura de filete, el espesor requerido es:

$$t_{dp\ min} = k_c - t_{fc} - r_e = 37 - 21{,}8 - 7{,}94 = 7{,}26\ mm$$

Espesor mínimo para prevenir el pandeo por corte:

$$t_{dp\ min} = \frac{h * \sqrt{F_{ydp}}}{3500} = \frac{(d_c - 2 * k_c) * \sqrt{F_{ydp}}}{3500} = \left(\frac{(36{,}3 - 2 * 3{,}7) * \sqrt{3450}}{3500}\right) * 10$$

$$t_{dp\ min} = 4{,}85\ mm$$

$$t_{dp\ min} = \frac{d_m - t_{stt} + d_c - 2 * t_{fc}}{90} = \frac{(528 - 13{,}3) - 25 + 363 - 2 * 21{,}8}{90}$$

$$t_{dp\ min} = 8{,}99\ mm$$

El espesor mínimo de la plancha de refuerzo será:

$$t_{dp\,min} = \max(7{,}76\,;\,7{,}25\,;\,8{,}99) = 8{,}99\,mm$$

Se selecciona un espesor comercial mayor o igual al espesor mínimo:

Usar $\boldsymbol{t_{dp} = 10\,mm}$

2.4.26.3 Calculo del tamaño de la soldadura

a) Soldadura para conectar las planchas de refuerzo con las alas de la columna

Se usara soldadura de filete y su tamaño mínimo será:

$$D = \frac{1{,}70 * F_{ydp} * t_{eff}}{F_{EXX}} = \frac{1{,}70 * 3450 * 7{,}76}{4920} = 9{,}25\,mm$$

Usar $\boldsymbol{D = 10\,mm}$

b) Soldadura para conectar las planchas de refuerzo a lo largo de los bordes superior e inferior.

Detalles en las figuras 3.13 y 3.14

2.4.27 Comparación de Resultados

La siguiente tabla muestra una comparación entre los resultados obtenidos en el ejemplo desarrollado manualmente, con aquellos obtenidos utilizando la hoja de cálculo. Sólo se muestran, a manera ilustrativa, los resultados principales de todo el procedimiento de diseño.

Tabla 5.8. Comparación de Resultados- Diseño de una Conexión (8ES)

Revisión	Hoja de cálculo	Cálculo manual	% de Error
Momento de Diseño de la Conexión	92,01 T*m	92,01 T*m	0,00%
Diámetro de Perno Requerido	2,19 cm	2,19 cm	0,00%
Espesor Requerido de la Plancha Extrema	26,32 mm	26,31 mm	0,04%
Espesor Requerido del Rigidizador de Plancha Extrema	9,50 mm	9,50 mm	0,00%
Espesor Requerido del Ala de la Columna por Cedencia a la Flexión	27,64 mm	27,64 mm	0,00%
Resistencia Requerida por Corte en la Zona de Panel de la Columna	143,01 T	143,01 T	0,00%
Resistencia Requerida de los Rigidizadores Transversales	117,91 T	117,91 T	0,00%
Espesor Requerido de los Rigidizadores Transversales	13,30 mm	13,30 mm	0,00%
Ancho Mínimo de cada Rigidizador Transversal	97,85 mm	97,85 mm	0,00%
Resistencia Requerida de las Planchas de Refuerzo	52,51 T	52,50 T	0,02%
Espesor de la Plancha de Refuerzo	8,99 mm	8,99 mm	0,00%

Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que los resultados obtenidos mediante el cálculo manual y con el uso de las hojas de cálculo son muy cercanos. Las pequeñas diferencias, prácticamente despreciables, se atribuyen a los redondeos en los cálculos manuales, por lo tanto se puede decir que las hojas de cálculo funcionan y producen resultados confiables.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este último capítulo se presentan las conclusiones obtenidas luego del desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, en base a los objetivos planteados al inicio del mismo. También, se incluyen recomendaciones y posibles mejoras para futuros trabajos enmarcados dentro de esta misma línea de investigación.

1. Conclusiones

- Se revisó la bibliografía existente acerca del diseño de conexiones a momento con plancha extrema, incluyendo la normativa vigente en Venezuela, actualizaciones posteriores hechas por el AISC, guías de diseño y bibliografía especializada en general. En base a las revisiones anteriores, se logró desarrollar la formulación para el diseño de conexiones a momento con plancha extrema.

- Se logró desarrollar un conjunto de hojas de cálculo para el diseño de conexiones a Momento con Plancha Extrema, que facilitan y agilizan el trabajo del Ingeniero Estructural.

- Se validaron, comparando con ejemplos manuales, los resultados obtenidos con las hojas de cálculo. Se observó que los porcentajes de error entre ambos resultados son muy bajos, y atribuibles a los redondeos que se realizan en los cálculos manuales, por lo que se puede concluir que las hojas de cálculo desarrolladas funcionan y producen resultados confiables.

- Se logró desarrollar una herramienta económica y accesible, que automatiza el diseño y revisión de este tipo de conexiones, y por lo tanto disminuye en forma notable el tiempo que debe invertir el Ingeniero Estructural para el diseño de este tipo de conexiones.

2. Recomendaciones

- Desarrollar versiones similares a estas hojas de cálculo donde se incorporen otras conexiones típicas en el proyecto de estructuras de acero, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes: Conexión a Corte Simple con Angulares, Conexión a Corte Doble con Angulares, Conexión Extendida a Corte Simple con Plancha, Arriostramientos con perfiles doble "T", etc.

- Considerar en futuras versiones de las hojas de cálculo desarrolladas, que los rigidizadores transversales de la columna sean de profundidad parcial, que el número de vigas que llegan a la columna sea mayor a dos (2) y que, si se desea, sea posible variar los perfiles de las mismas.

- Ampliar la base de datos de perfiles en futuras versiones de las hojas de cálculo, a fin de darle más libertad al usuario en sus diseños. Asimismo, se recomienda ampliar la variedad de calidades de acero, tanto para los perfiles como para las distintas planchas presentes en este tipo de conexiones.

- Continuar desarrollando herramientas en MS Excel® para su aplicación no sólo en el diseño de estructuras de acero, si no para cualquier otro campo de la ingeniería.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Institute of Steel Construction (2005). *Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-05*. Chicago, Illinois: Autor.

American Institute of Steel Construction (2005). *Steel Construction Manual, 13th Edition*. Chicago, Illinois: Autor.

American Institute of Steel Construction (1999). *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, Illinois: Autor.

Borgsmiller, J.T (1995). *Simplified Method for Design of Moment End-Plate Connections.* M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

Borgsmiller, J.T., Sumner, E. y Murray, T. (1995). *Tests of Multi-Row Moment End Plate Connections Having Large Inner Pitch Distances.*

Carter, C. (2003). *Steel Design Guide 13: Stiffening of Wide-Flange Columns at Moment Connections, Wind and Seismic Applications* (2da ed.). Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction.

El Tawil, S., Mikesell, T., Vidarsson, E. y Kunnath S.K. (1998), *Strength and Ductility of FR Welded-Bolted Connections*.

Federal Emergency Management Agency. (1995). *FEMA 267 Interim Guidelines: Evaluation, Repair, Modification and Design of Steel Moment Frames.* Washington, D.C: FEMA.

Fratelli, M. (1999). *Proyectos Estructurales de Acero* (1era ed.). Caracas: Autor.

Fratelli, M. (2005). *Temas Especiales de Estructuras Metálicas, Estados Límites LRFD* (1era ed.). Caracas: Autor.

Kochalski, G. y Ericksen, J. (2007). *Prequalified Seismic Moment Connections*. Modern Steel Construction Magazine, Enero. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction.

Losada, M. y Matamoros, T. (2010). *Desarrollo de Hojas de Cálculo para automatizar el diseño de conexiones en estructuras de acero por el Método de los Estados Límites (LRFD).* Trabajo Especial de Grado, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela.

Miller, D. (2002). *Practical cost-saving ideas for the design professional: welding*. *Carefully evaluate "Code requirements".* Modern Steel Construction Magazine, Agosto. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction.

Murray, T. y Sumner, E. (2003). *Steel Design Guide 4: Extended End-Plate Moment Connections, Seismic and Wind Applications* (2da ed.). Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction.

Norma Venezolana COVENIN 1618, (1998). *Estructuras de Acero para Edificaciones: Método de los Estados Límites* (1era revisión). Caracas: FONDONORMA.

Norma Venezolana COVENIN 2004, (1998). *Terminología de las Normas COVENIN-MINDUR de Edificaciones*. Caracas: FONDONORMA.

Research Council on Structural Connections (2004). *Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts*. Chicago, Illinois: Autor.

Ruby, D. (2003). *All About Bolts.* Modern Steel Construction Magazine, Mayo. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction.

Ryan, J. (1999). *Evaluation of Extended End Plate Moment Connections Under Seismic Loading*. Trabajo Especial de Grado, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

Santalla-Peñaloza, Z.R. (2006). *Guía para la Elaboración formal de reportes de investigación* (1era ed.). Caracas: Publicaciones UCAB.

Schlafly, T. y Ericksen, J. (2007). *Saying What You Mean*. Modern Steel Construction, Julio. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction.

Winters-Downey, E. y Fadden, M. (2008). Simple Shear Connection Limit States. Modern Steel Construction Magazine, Febrero. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction.