

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Escuela de Posgrado



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**DESARROLLO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA PREDECIR EL
COMPORTAMIENTO DE CONEXIONES VIGA-COLUMNA
TIPO CHAPA FRONTAL EXTENDIDA BASADOS
EN DATOS OBTENIDOS MEDIANTE FEA**

Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Mecánica

Presentado por:

Ysmael David Llatas Ontaneda

Asesor:

Dr. Ing. Rosendo Franco Rodríguez

Noviembre 2018

Lima - Perú



© 2018, Ysmael Llatas Ontaneda

Se autoriza la reproducción total o parcial,
con fines académicos a través de cualquier
medio o procedimiento, incluyendo la cita
bibliográfica del documento.

RESUMEN

La presente tesis se enfoca en el comportamiento estructural de la conexión viga-columna tipo chapa frontal extendida, con el objetivo de construir modelos matemáticos capaces de predecir su comportamiento en base a datos obtenidos mediante simulaciones numéricas. Para este fin se construyó un modelo numérico de elementos finitos de la conexión, donde sus propiedades geométricas y mecánicas fueron parametrizadas empleando el lenguaje APDL del software ANSYS Mechanical. Este modelo se validó con ensayos experimentales reportados por otros autores y se utilizó para elaborar una base de datos con 140 casos de estudio. Como resultados de las simulaciones se obtuvo el comportamiento de la curva momento-rotación, así como la resistencia y la rigidez de la conexión para distintos valores de los parámetros geométricos y del momento. Finalmente, se aplicó análisis de regresión no lineal múltiple a esta base de datos con el fin de obtener los modelos matemáticos requeridos. Para validar los modelos matemáticos se realizaron 10 nuevas simulaciones con parámetros geométricos diferentes a los contemplados en la base de datos de los 140 casos. El coeficiente de determinación mínimo encontrado fue de 0.59 y el máximo de 0.99, lo que indica un ajuste aceptable entre los modelos matemáticos y las variables geométricas de la base de datos, si se considera el complejo comportamiento no lineal de esta conexión. Los modelos matemáticos obtenidos permiten calcular de forma práctica el comportamiento estructural de la conexión tipo chapa frontal extendida, que puede controlarse variando los parámetros geométricos y de esta forma adecuarse a los requerimientos del diseño solicitado.





Dedicado a mis padres por su apoyo y aliento constante en todas las etapas de mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
INTRODUCCIÓN	1
I. CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES.....	3
1.1 Comportamiento de Conexiones Estructurales.....	3
1.2 Modelos Experimentales.....	5
1.3 Modelos Empíricos	6
1.3.1 Modelo de Frye - Morris.....	6
1.3.2 Modelo de Krishnamurthy	9
1.3.3 Modelo de Kukreti	10
1.3.4 Modelo de Richard - Abbott	10
1.3.5 Modelo de Ang y Morris.....	11
1.4 Modelos Analíticos	13
1.4.1 Modelo de Kishi y Chen	13
1.4.2 Modelo de Yee y Melchers.....	14
1.4.3 Modelo de Lee y Moon.....	14
1.5 Modelos Mecánicos	16
1.6 Modelos Numéricos	17
1.7 Modelos basados en Inteligencia Artificial.....	19
1.8 Representación Matemática de la curva Momento-rotación	21
II. CAPÍTULO 2: CONEXIONES SEMIRRÍGIDAS.....	26
2.1 Curva Momento - Rotación	28
2.2 Análisis, diseño y clasificación de conexiones según el Eurocódigo 3	28
2.2.1 Clasificación según su rigidez al giro.....	29
2.2.2 Clasificación según su resistencia a flexión	30

2.3	Análisis, diseño y clasificación de conexiones según la norma AISC	33
2.3.1	Conexiones Simples	33
2.3.2	Conexiones a Momento	33
2.3.3	Clasificación de Conexiones	34
2.3.4	Rigidez de la Conexión	34
2.3.5	Resistencia de la Conexión.....	35
2.3.6	Ductilidad de la Conexión.....	36
2.4	Conexiones Tipo Chapa Frontal	36
III.	CAPÍTULO 3: MODELO NUMÉRICO PARAMÉTRICO DE LA CONEXIÓN .41	
3.1	Ensayo Experimental	41
3.2	Construcción del Modelo Numérico Paramétrico.....	45
3.2.1	Modelamiento	45
3.2.2	Propiedades Mecánicas y Geométricas del Modelo	48
3.3	Construcción de la Base de Datos.....	52
3.3.1	Análisis de Sensibilidad de Malla.....	53
3.3.2	Validación de Resultados.....	55
IV.	CAPÍTULO 4: CONSTRUCCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS	59
4.1	Procedimiento para la construcción de Modelos Matemáticos.....	59
4.1.1	Definición de Parámetros en la Base de Datos	61
4.1.2	Análisis de Regresión	62
4.1.3	Coefficiente de Determinación R^2	64
4.2	Construcción del Modelo Matemático.....	65
4.2.1	Modelos Matemáticos obtenidos	66
4.2.2	Análisis de los Modelos Matemáticos obtenidos.....	67
V.	CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN DE RESULTADOS	70
5.1	Evaluación de los Modelos Matemáticos	70
5.4	Comparación de resultados con modelos Similares.....	80
	CONCLUSIONES	84
	BIBLIOGRAFÍA	86
	A N E X O A.....	94
	A N E X O B.....	102

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1: Constantes de ajuste de la curva $M-\theta_r$ y constantes de estandarización del modelo Polinomial de Frye-Morris	7
Tabla 3.1: Detalles geométricos de ensayos realizados	43
Tabla 3.2: Propiedades Mecánicas de los materiales	44
Tabla 3.3: Resultados obtenidos del ensayo	45
Tabla 3.4: Rangos Geométricos viga-columna considerados	49
Tabla 3.5: Propiedades geométricas y mecánicas consideradas	49
Tabla 3.6: Pretensión en Tornillos.	50
Tabla 3.7: Parámetros geométricos	51
Tabla 3.8: Características de cada malla evaluada	53
Tabla 4.1: Coeficientes de Determinación	69
Tabla 5.1: Parámetros Geométricos - Nuevas simulaciones FEA	71
Tabla 5.2: Resultados de nuevas simulaciones FEA	72
Tabla 5.3: Resultados aplicando Modelos Matemáticos	72
Tabla 5.4: Comparación de resultados μ_u, M_0	73
Tabla 5.5: Comparación de resultados θ_u, θ_0	73
Tabla 5.6: Comparación de resultados R_{ki}, R_{kp}	74
Tabla 5.7: Comparación de resultados n	74
Tabla 5.8: Comparación de resultados R_{ki} : Mod. Matemático vs EC-3	82

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Representación de la curva Momento-rotación.....	4
Figura 1.2: Ensayo experimental, conexión con ángulos.....	5
Figura 1.3: Tipos de conexiones y parámetros del Modelo de Frye-Morris.....	8
Figura 1.4: Conexión tipo chapa frontal extendida, Modelo de Krishnamurthy	9
Figura 1.5: Conexión tipo chapa frontal no extendida, Modelo de Kukreti	10
Figura 1.6: Curva M- θ_r , Modelo de Richard - Abbott.....	11
Figura 1.7: Curva M- θ_r , Modelo de Ramberg - Osgood.....	12
Figura 1.8: Curva M- θ_r , Modelo de Kishi y Chen.....	13
Figura 1.9: Comparación de curvas M- θ_r según datos experimentales y de predicción del modelo de Lee y Moon	15
Figura 1.10: Modelo Mecánico de Del Sabio et al.	17
Figura 1.11: Curva Momento-Rotación y deformación plástica de von Mises	19
Figura 1.12: Representación del Perceptron Multicapa	20
Figura 1.13: Representaciones matemáticas de la curva Momento-rotación.....	22
Figura 2.1: Clasificación según el tipo de apoyo de la conexión.....	27
Figura 2.2: Efecto del tipo de soporte en la distribución de momentos flectores y deflexiones de vigas	27
Figura 2.3: Curvas Momento-rotación.....	28
Figura 2.4: Límites de clasificación de las uniones según su rigidez	29
Figura 2.5: Clasificación según tipo de continuidad de la columna	31
Figura 2.6: Clasificación de las uniones según sus límites de resistencia	32
Figura 2.7: Curva característica Momento-rotación de una unión.....	32

Figura 2.8: Curva Momento-rotación típica de una conexión PR	34
Figura 2.9: Curva Momento-rotación de Conexiones Completamente Restringidas (FR), Parcialmente Restringidas (PR) y Conexiones Simples	35
Figura 2.10: Configuraciones de conexión tipo chapa frontal extendida.....	37
Figura 2.11: Configuraciones de conexión tipo chapa frontal no extendida.....	38
Figura 2.12: Curvas Momento-rotación de diferentes conexiones viga-columna	39
Figura 2.13: Tipos de Conexiones Estructurales	40
Figura 3.1: Conexión Chapa Frontal Extendida.....	42
Figura 3.2: Detalles geométricos de la conexión	43
Figura 3.3: Ángulo de rotación definido para el ensayo experimental	44
Figura 3.4: Curvas Momento-rotación obtenidas.....	45
Figura 3.5: Curva tensión-deformación bilineal empleada en el análisis	46
Figura 3.6: Ubicación de puntos máxicos.	47
Figura 3.7: Esquema de aplicación de la carga.....	48
Figura 3.8: Configuración geométrica	50
Figura 3.9: Esfuerzo de von Mises en la conexión, Caso 97	53
Figura 3.10: Comparación de curvas M- θ_r según el tamaño de elementos	53
Figura 3.11: Comparación entre valores de rigidez inicial en función del número de elementos.....	54
Figura 3.12: Comparación de Curvas M- θ_r : EPC-1 - FEA.....	55
Figura 3.13: Comparación de Curvas M- θ_r : EPC-2 - FEA.....	55
Figura 3.14: Comparación de Curvas M- θ_r : EPC-3 - FEA.....	56
Figura 3.15: Comparación de Curvas M- θ_r : EPC-4 - FEA.....	56
Figura 3.16: Comparación de Curvas M- θ_r : EPC-5 - FEA.....	57

Figura 3.17: Comparación cualitativa de deformaciones, Experimental y FEA.....	58
Figura 4.1: Curva Momento-rotación	60
Figura 4.2: Parámetros adicionales	66
Figura 5.1: Comparación de curvas M- θ r, Caso 01	75
Figura 5.2: Comparación de curvas M- θ r, Caso 02	75
Figura 5.3: Comparación de curvas M- θ r, Caso 03	76
Figura 5.4: Comparación de curvas M- θ r, Caso 04	76
Figura 5.5: Comparación de curvas M- θ r, Caso 05	77
Figura 5.6: Comparación de curvas M- θ r, Caso 06	77
Figura 5.7: Comparación de curvas M- θ r, Caso 07	78
Figura 5.8: Comparación de curvas M- θ r, Caso 08	78
Figura 5.9: Comparación de curvas M- θ r, Caso 09	79
Figura 5.10: Comparación de curvas M- θ r, Caso 10	79
Figura 5.11: Conexión tipo Chapa Frontal del Modelo de Frye – Morris	81
Figura 5.12: Comparación de curvas M- θ r, Caso 01	81
Figura 5.13: Comparación de curvas M- θ r, Caso 06	82

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_b : Área de la sección transversal del perno [pulg², mm²].
 A_B : Área de la sección transversal de la viga [pulg², mm²].
 b_c : Ancho del ala de la columna [mm].
 b_b : Ancho del ala de la viga [mm].
 b_{ep} : Ancho de la placa End-plate [pulg, mm].
 C_j : Parámetro de ajuste de la curva, Modelo de Kishi y Chen.
 C_{kr} : Parámetro del modelo de Krishnamurthy [adimensional].
 C_{ku} : Parámetro del modelo de Kukreti [adimensional].
 C_y : Constante empírica, Modelo de Yee y Melchers.
 C_1, C_2, C_3 : Constantes de ajustes de la curva, Modelo de Frye - Morris.
 D_k : Parámetro de ajuste de la curva, Modelo de Kishi y Chen.
 d_b : Diámetro del perno [mm].
 d_o : Diámetro del agujero del tornillo [mm].
 e, e_c : Mínima distancia desde el centro del perno al borde de un perfil.
 E : Módulo de elasticidad.
 E_t : Módulo tangente.
 F_y : Esfuerzo de Fluencia del material [kN/m²].
 F_{by} : Esfuerzo de Fluencia de la viga [kN/m²].
 F_{yb} : Esfuerzo de Fluencia de perno [kN/m²].
 g : Gramil [mm].
 g_b : Parámetro, Modelo de Kukreti [adimensional].
 h_b : Peralte de la viga [mm].
 h_c : Peralte de la columna [mm].
 I_b : Momento de inercia de la viga.
 I_c : Momento de inercia de la columna.
 i_b : Radio de giro de la viga [mm].
 i_c : Radio de giro de la columna [mm].
 K : Constante de estandarización.
 K_i : Rigidez inicial de la conexión, AISC.
 K_s : Rigidez secante bajo cargas de servicio, AISC.
 L_b : Longitud de la viga [m].
 L_c : Longitud de la columna [m].
 M : Momento de la unión.
 M_i : Momento inicial, Modelo de Kishy y Chen.
 $M_{j,Ed}$: Momento resistente, correspondiente a S_j , Eurocódigo.
 $M_{j,Rd}$: Momento resistente de diseño de la unión, Eurocódigo.
 M_{Rd} : Momento resistente plástico, Eurocódigo.
 $M_{b,pl,Rd}$: Momento resistente plástico de la viga, Eurocódigo.
 $M_{c,pl,Rd}$: Momento resistente plástico de la columna, Eurocódigo.
 M_s : Momento de servicio, AISC.
 M_n : Momento último, AISC.
 M_o : Momento de referencia [kNm].
 M_p : Capacidad de Momento plástico [kNm].
 M_u : Momento último [kNm].
 n_t : Número de filas de pernos entre alas de viga.
 n : Parámetro de ajuste de la curva Momento-rotación.
 p : Separación entre pernos [mm].

- P_i : Parámetros geométricos de la unión, propuestos por Azizinamini.
 p_f : Parámetro geométrico, modelo de Kukreti [adimensional].
 p_k : Parámetro geométrico, modelo de Krishnamurthy [adimensional].
 Q : Carga distribuida.
 t_{rh} : Espesor del rigidizador en columna [mm].
 t_{rv} : Espesor del rigidizador en viga [mm].
 R_{ki} : Rigidez Inicial de la unión [kNm/rad].
 R_{kp} : Rigidez Plástica de la unión [kNm/rad].
 S_j : Rigidez secante de la unión, Eurocódigo.
 $S_{j,ini}$: Rigidez inicial de la unión, Eurocódigo.
 t_{bf} : Espesor del ala de la viga [mm].
 t_{bw} : Espesor del alma de la viga [mm].
 t_{cf} : Espesor del ala de la columna [mm].
 t_{cw} : Espesor del alma de la columna [mm].
 t_{ep} : Espesor de la placa frontal [mm].
 t_{bf} : Espesor del ala de la viga [mm].
 W_b : Módulo de sección de la viga [mm³].
 $W_{pl,y}$: Módulo de flexión plástico [mm³].
 α : Factor de escala para estabilidad numérica, Modelo Kishi y Chen.
 α_i : Coeficientes de ajuste de la curva, propuestos por Azizinamini.
 β : Parámetro del modelo de Krishnamurthy [adimensional].
 ε : Parámetro de control de la curva, modelo de Kong y Kim. [adim.]
 τ : Parámetro del modelo de Krishnamurthy [adimensional].
 μ : Coeficiente de fricción entre superficies en contacto.
 γ : Parámetro de control de la curva, modelo de Lee y Moon.
 V : Parámetro conocido obtenido de análisis en FE.
 π_i : Parámetro dependiente para cada conexión.
 π_j : Parámetro independiente para cada conexión.
 θ_k : Capacidad rotacional inicial, Modelo de Kishy y Chen [rad].
 θ_n : Capacidad de rotación máxima, correspondiente a M_n , AISC [rad]
 θ_r : Rotación, Capacidad rotacional [rad].
 θ_s : Capacidad de rotación bajo cargas de servicio, AISC [rad].
 θ_u : Capacidad de rotación última, AISC [rad].
 θ_0 : Capacidad rotacional de referencia [rad].
 ϕ : Rotación de la unión, Eurocódigo.
 ϕ_{Ed} : Rotación de la unión, correspondiente a $M_{j,Ed}$, Eurocódigo.

INTRODUCCIÓN

En el Perú en las últimas décadas el empleo de estructuras de acero ha tenido un importante auge en la construcción de edificaciones habitacionales, comerciales e industriales, debido a que su empleo presenta significativos beneficios en comparación con una estructura de concreto. Entre estos beneficios tenemos el de reducir costos al presentar mayor rapidez en su fabricación y montaje, brindan flexibilidad en los diseños al existir una amplia gama de perfiles a emplear, los que presentan alta resistencia y menor peso. Además, su ductilidad le permite fluir localmente en caso de cargas excesivas evitando colapsos, importante mencionar que es 100% reciclable.

El principal elemento en las estructuras de acero son las conexiones, existiendo diversos tipos, cada una con distinto comportamiento de acuerdo al diseño requerido. El análisis estructural, a fin de simplificar el cálculo, considera a una conexión como perfectamente articulada o completamente rígida según su nivel de acercamiento a estos dos comportamientos, sin embargo, existen conexiones que presentan un comportamiento intermedio, considerarlas como articuladas o rígidas sería incorrecto, a este tipo de conexiones se les denomina semirrígidas. Una conexión semirrígida en comparación con una conexión rígida presenta menores momentos en las uniones viga-columna por lo que se pueden emplear perfiles de menor espesor, reduciendo material y costos en su fabricación, por consiguiente, el empleo de conexiones semirrígidas conlleva a diseños más eficientes, ahorro de espacio y mejor estética. Un hecho importante que destacó la importancia de las conexiones semirrígidas fueron los terremotos sucedidos en Northridge (1994) y Kobe (1995). Anterior a estos eventos el diseño se inclinaba a conexiones completamente soldadas con grandes capacidades de momento, sin embargo, tales diseños al alcanzar su máxima capacidad fallaron por fractura frágil causando graves daños a la totalidad de la estructura, desde entonces el estudio de las conexiones semirrígidas ha tomado mayor importancia debido a su capacidad de disipación de energía y a su ductilidad.

Si bien las conexiones semirrígidas han sido ampliamente estudiadas en los últimos años lográndose importantes investigaciones y estas se están considerando cada vez más en las principales normativas internacionales como el Eurocódigo y AISC, su

metodología de cálculo aún es compleja y se requiere por lo tanto formulaciones más simples para determinar parámetros como resistencia, rigidez y capacidad de rotación según el tipo de conexión.

La presente tesis aborda el estudio de la conexión tipo chapa frontal extendida con el objetivo de obtener modelos matemáticos que predigan el comportamiento estructural de esta conexión en función de sus principales propiedades geométricas. Para tal fin se elaborará un modelo paramétrico de esta conexión en el software ANSYS, el cual será validado con ensayos experimentales realizados por otros autores. Se evaluará su comportamiento frente a diferentes valores de parámetros geométricos y de carga. Los resultados obtenidos servirán para elaborar una base de datos con 140 casos, a la cual se aplicará análisis de regresión no lineal múltiple con el fin de obtener los modelos matemáticos requeridos.

Por lo antes expuesto la presente tesis tiene como objetivo general:

- Obtener modelos matemáticos que predigan el comportamiento estructural de la conexión tipo chapa frontal extendida frente a diferentes cargas de trabajo a partir de una base de datos obtenida mediante análisis por elementos finitos (FEA).

Los objetivos específicos de la tesis son:

- Construir un modelo numérico paramétrico de la conexión tipo chapa frontal extendida considerando sus principales parámetros geométricos a fin de evaluar su comportamiento estructural frente a diferentes niveles de carga.
- Elaborar una base de datos con los resultados obtenidos mediante FEA de un gran número de combinaciones viga-columna.
- Obtener modelos matemáticos que permitan calcular la resistencia, rigidez y el ángulo de rotación de la conexión a partir de los resultados FEA.
- Obtener modelos matemáticos que representen la curva Momento-Rotación de la conexión a partir de los resultados FEA.
- Comprobar los modelos matemáticos obtenidos a partir del análisis de combinaciones viga-columna no contempladas en la base de datos inicial.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

En el presente capítulo se describen los principales modelos desarrollados a fin de predecir el comportamiento estructural de distintos tipos de conexiones viga-columna, además se describe las principales formulaciones matemáticas a fin de representar la curva Momento-rotación.

1.1. Comportamiento de Conexiones Estructurales

Desde inicios del siglo XX se han realizado diversos estudios a fin de comprender el comportamiento estructural de las conexiones viga-columna, enfocándose en la representación de la curva Momento-Rotación ($M-\theta_r$), fig. 1.1, la cual relaciona el momento aplicado a la conexión versus la rotación relativa entre los elementos conectados, siendo esta la principal fuente de información para comprender el comportamiento de la conexión, entre sus principales parámetros tenemos:

Momento último M_u : es el valor del máximo momento resistente de la conexión, sus unidades están dadas en kN.m o kip.in.

Rotación última θ_u : es la máxima capacidad rotacional de la conexión correspondiente al momento último aplicado. Su valor indica la máxima rotación relativa entre los elementos conectados, sus unidades usualmente se indican en radianes.

La rigidez inicial R_{ki} : expresa la relación entre el momento y la rotación respectiva en el tramo elástico de la curva, sus unidades se dan en kN.m/rad o kip.m/rad.

La rigidez plástica R_{kp} : expresa la relación entre el momento y la rotación respectiva en el tramo no lineal de la curva, sus unidades se dan en kN.m/rad o kip.m/rad.

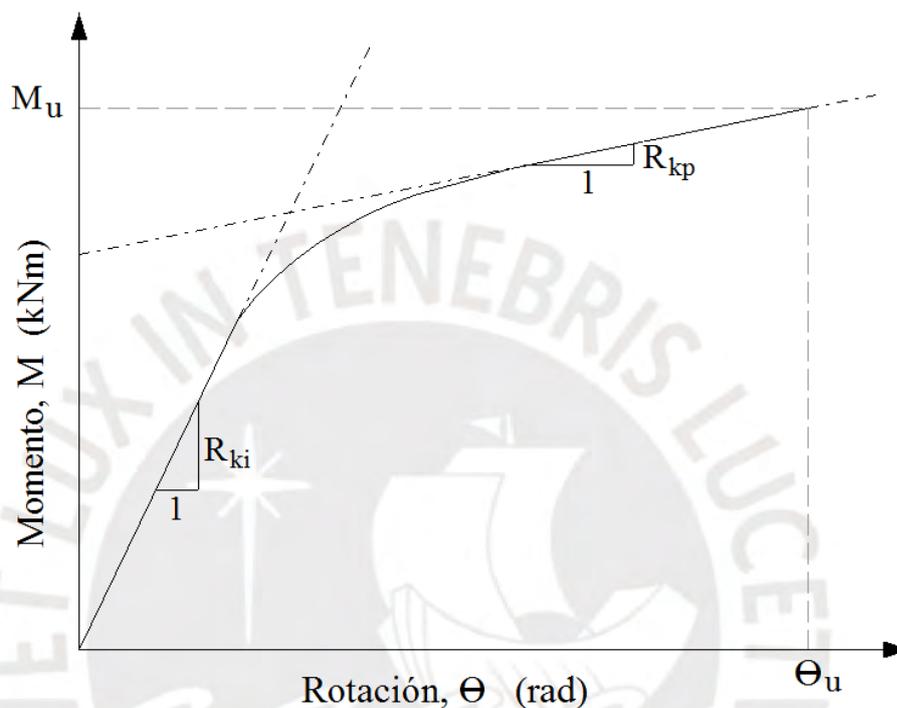


Fig. 1.1: Representación de la curva Momento-rotación.

Según Swanson (1999) las conexiones son típicamente clasificadas por tres principales características: por su la resistencia, rigidez y por su ductilidad. La resistencia de una conexión se refiere a la capacidad de la zona de unión, esta zona comprende las partes de la viga y columna adyacentes a la conexión, los componentes que conectan las alas y/o almas de la viga y columna, además de los conectores (pernos, remaches o soldaduras). La rigidez se refiere a la cantidad de rotación relativa entre columna y viga como resultado del momento aplicado. La ductilidad de la conexión es definida como la cantidad de rotación plástica que esta puede sostener mientras se mantiene un cierto porcentaje de su resistencia final, también puede definirse como la capacidad de deformación máxima en condiciones de plastificación, desde el inicio de la fluencia hasta la rotura del componente (Jiménez et al. 2017). Una reducida ductilidad puede originar fractura frágil en la conexión, debido a lo anterior es necesario que su diseño presente una adecuada

ductilidad que permita liberar energía ante un evento sísmico evitando el colapso de la estructura.

Convencionalmente en el diseño de estructuras de acero se ha considerado el comportamiento de las conexiones viga-columna como rígidas o articuladas, pero en realidad la mayoría de las conexiones no son ni completamente rígidas ni perfectamente articuladas, estas exhiben un comportamiento semirrígido que puede afectar significativamente la respuesta de la estructura (Ataei et al. 2015). A lo largo de los años diferentes autores han propuesto modelos con el fin de lograr un mejor entendimiento del comportamiento de las conexiones viga-columna. Si bien los primeros modelos eran prácticos y sencillos, no eran lo suficientemente precisos debido a excesivas simplificaciones asumidas en su análisis y al comportamiento no-lineal de la curva Momento-rotación. A continuación, se describen los principales modelos desarrollados a fin de caracterizar su comportamiento:

1.2. Modelos Experimentales

Es la forma más precisa de predecir el comportamiento de una conexión, constituyéndose en la principal fuente de información para validar modelos hechos con otras metodologías, su desventaja radica en que son costosos de realizar, además el diseñador raramente encontrará una conexión que se ajuste a sus requerimientos, la fig. 1.2 muestra uno de estos tipos de ensayos.

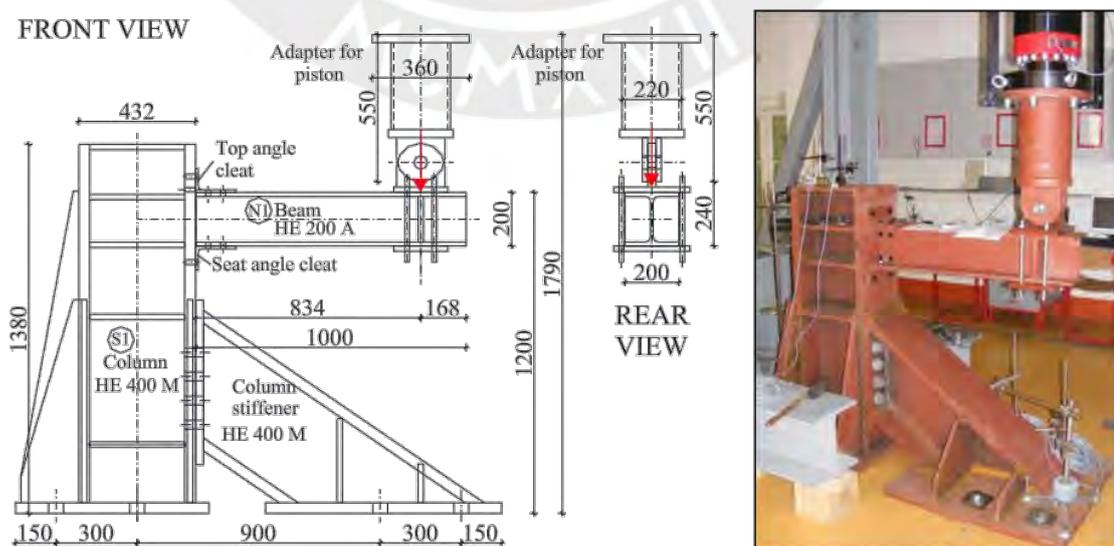


Fig. 1.2: Ensayo experimental, conexión con ángulos (Tomado de Skejic et al. 2014).

El primer experimento fue realizado en la Universidad de Illinois por Wilson y Moore (1917). Desde entonces numerosos estudios han sido realizados por diversos autores para distintos tipos de conexión, ensayos que han sido reunidos en grandes bases de datos como los registradas por Goverdhan A. (1983), el cual reúne ensayos realizados en EE.UU. entre los años 1950 y 1983. Posteriormente Nethercot (1985a, 1985b) publicó el primer banco de Datos de Europa con ensayos realizados entre los años 1915 y 1985. Kishi y Chen (1986a, 1986b), desarrollaron el programa SCDB (Steel Connection Data Bank) registrando más de 300 ensayos realizados desde 1936. Las bases de datos SERICON y SERICON II reúne ensayos europeos de conexiones en acero y compuestas.

1.3 Modelos Empíricos

Se basan en formulaciones matemáticas, pudiendo obtenerse mediante métodos de regresión estadística tomando como fuente de datos los resultados de ensayos experimentales, parametrizaciones en elementos finitos, modelos analíticos o mecánicos, su precisión depende de la calidad y cantidad de estas fuentes. La principal desventaja de este tipo de modelo es que sólo es aplicable a conexiones cuyas características son similares con las utilizadas en los estudios, entre los más conocidos tenemos:

1.3.1 Modelo de Frye - Morris

Frye y Morris (1975), representaron la curva Momento-Rotación mediante una expresión polinómica obtenida mediante el método de los mínimos cuadrados para distintos tipos de conexiones, ver ecuación 1.1.

$$\theta_r = C_1(KM) + C_2(KM)^3 + C_3(KM)^5 \quad (1.1)$$

Donde:

θ_r : es el ángulo de rotación de la conexión (rad).

M : el momento aplicado en la conexión (kN.m)

K : constante que depende de las propiedades geométricas y mecánicas de la unión.

C_1, C_2 y C_3 : constantes de ajuste de la curva obtenidos por regresión.

El principal inconveniente de esta formulación es que, para algunos valores de momento, la rigidez presenta valor negativo, algo físicamente inaceptable, para resolver este problema Azizinamini et al. (1985), propusieron una modificación para la constante K, dada por la ecuación 1.2, donde P_i son parámetros geométricos de la unión y α_i son coeficientes que mejoran el ajuste de la curva.

$$K = P_1^{\alpha_1} P_2^{\alpha_2} \dots \dots P_n^{\alpha_n} \quad (1.2)$$

Diversos estudios de distintos investigadores han permitido ampliar su campo de aplicación. Tanto los tipos de conexión estudiados como los parámetros K, C_1 , C_2 y C_3 se muestran en la Tabla 1.1 y la figura 1.3:

Tabla 1.1: Constantes de ajuste de la curva M- θ_r y constantes de estandarización del modelo Polinomial de Frye-Morris (valores en cm).

Tipo de conexión	Constantes de ajuste de la curva M- θ_r	Constantes de Estandarización
Ángulo simple en alma	$C_1 = 1.67 \times 10^{-0}$ $C_2 = 8.56 \times 10^{-2}$ $C_3 = 1.35 \times 10^{-3}$	$K = d_a^{-2.4} t_a^{-1.81} g^{0.15}$
Doble ángulo en alma	$C_1 = 1.43 \times 10^{-1}$ $C_2 = 6.79 \times 10^1$ $C_3 = 4.09 \times 10^5$	$K = d_a^{-2.4} t_a^{-1.81} g^{0.15}$
Ángulo superior y de asiento con doble ángulo en alma	$C_1 = 1.50 \times 10^{-3}$ $C_2 = 5.60 \times 10^{-3}$ $C_3 = 4.35 \times 10^{-3}$	$K = d^{-1.287} t^{-1.128} t_c^{-0.415} l_a^{-0.694} (g - d_b/2)^{1.35}$
Ángulo superior y de asiento	$C_1 = 2.59 \times 10^{-1}$ $C_2 = 2.88 \times 10^3$ $C_3 = 3.31 \times 10^4$	$K = d^{-1.5} t^{-0.5} l_a^{-0.7} d_b^{-1.1}$
Chapa frontal extendida sin rigidizadores en la columna	$C_1 = 8.91 \times 10^{-1}$ $C_2 = -1.20 \times 10^4$ $C_3 = 1.75 \times 10^8$	$K = d_g^{-2.4} t_p^{-0.4} d_b^{-1.5}$
Chapa frontal extendida con rigidizadores en la columna	$C_1 = 2.60 \times 10^{-1}$ $C_2 = 5.36 \times 10^2$ $C_3 = 1.31 \times 10^7$	$K = d_g^{-2.4} t_p^{-0.6}$
Chapa frontal parcial	$C_1 = 6.14 \times 10^{-3}$ $C_2 = 1.08 \times 10^{-3}$ $C_3 = 6.05 \times 10^{-3}$	$K = t_p^{-1.6} g^{1.6} d_p^{-2.3} t_w^{-0.5}$
Doble perfil T	$C_1 = 6.42 \times 10^{-2}$ $C_2 = 1.77 \times 10^2$ $C_3 = -2.03 \times 10^4$	$K = d^{-1.5} t^{-0.5} l_t^{-0.7} d_b^{-1.1}$

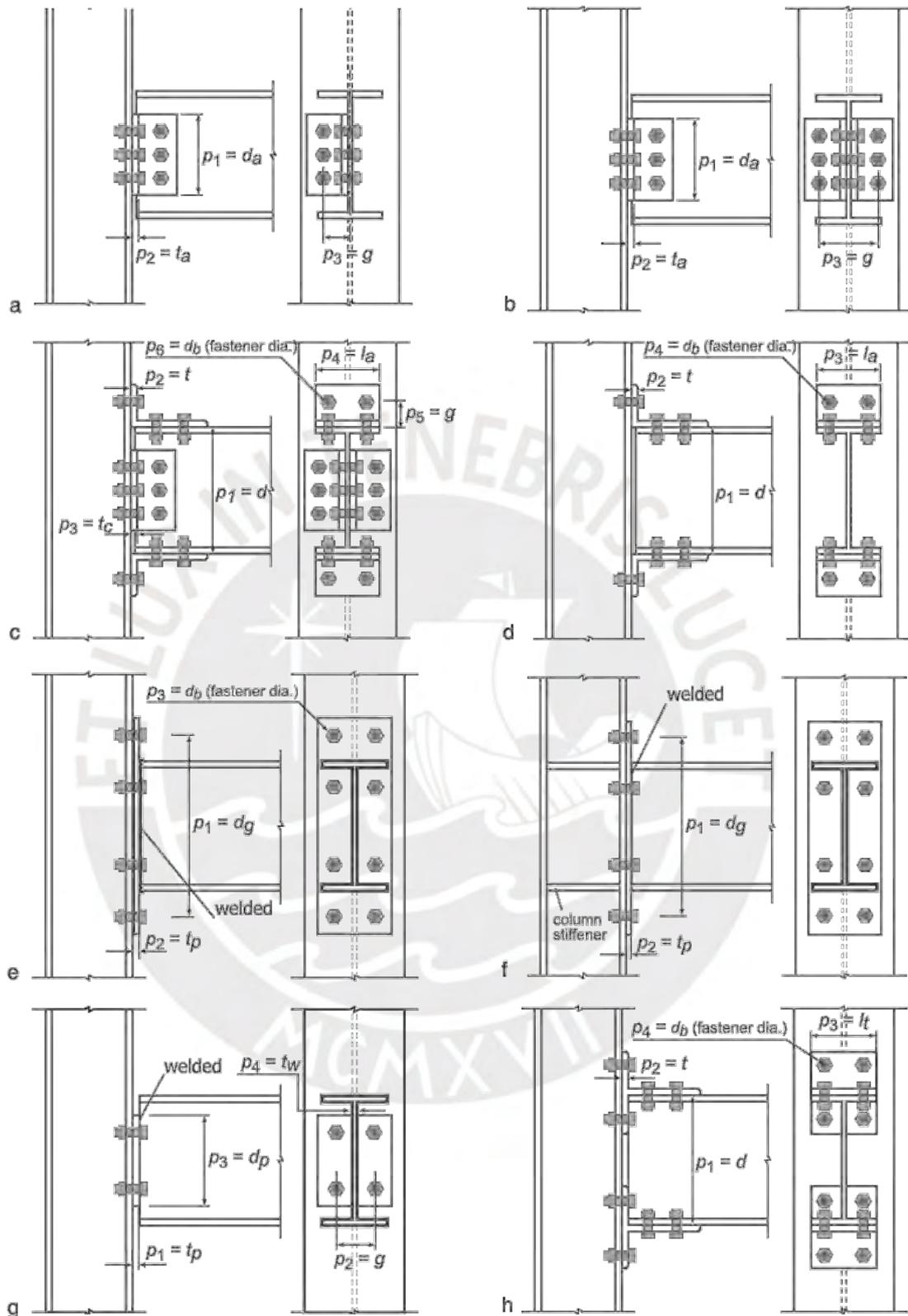


Fig. 1.3: Tipos de conexiones y parámetros del Modelo de Frye-Morris, (a) ángulo simple en alma; (b) doble ángulo en alma; (c) ángulo superior y de asiento con doble ángulo en alma; (d) ángulo superior y de asiento; (e) Chapa frontal extendida sin rigidizadores en la columna; (f) Chapa frontal extendida con rigidizadores en la columna; (g) Chapa frontal parcial; (h) doble perfil T. (tomado de Chen et al. 2011).

1.3.2 Modelo de Krishnamurthy

Krishnamurthy et al. (1976, 1978, 1979), desarrollaron un amplio estudio paramétrico en elementos finitos de la conexión tipo chapa frontal extendida con cuatro pernos en la zona de tracción, ver fig. 1.4, empleando un modelo bi-dimensional. Se realizaron ensayos experimentales para ajustar los valores obtenidos numéricamente, finalmente las expresiones que definen el modelo fueron encontradas por un análisis de regresión, ecuaciones 1.3a a 1.3d.

$$\theta_r = C_{kr} M^{1.58} \quad (1.3a)$$

$$C_{kr} = \frac{1.4\beta \tau p_k^{2.03}}{A_b^{0.36} t_{ep}^{1.38}} \quad (1.3b)$$

$$\beta = \frac{0.0056 b_{ep}^{0.61} t_{fb}^{1.03}}{h_b^{1.3} t_{wb}^{0.26} W_b^{1.58}} \quad (1.3c)$$

$$\tau = \frac{1}{F_{by}^{0.38} F_{yb}^{1.2}} \quad (1.3d)$$

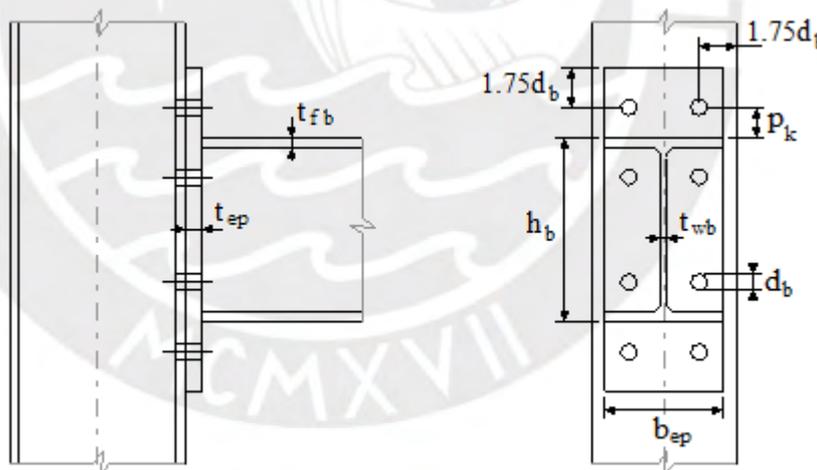


Fig. 1.4: Conexión tipo chapa frontal extendida, Modelo de Krishnamurthy.

Donde: W_b es el módulo de sección de la viga; F_{by} el esfuerzo de fluencia del material; F_{yb} el esfuerzo de fluencia del perno; t_{ep} espesor de la chapa frontal; b_{ep} el ancho de la chapa, igual al ancho de la viga; h_b el peralte de la viga; t_{fb} y t_{wb} el espesor del ala y alma de la viga; d_b el diámetro del perno y A_b el área bruta de la sección transversal del perno. El estudio no consideró deformación en la columna, por lo que estos parámetros son independientes de la geometría de la columna.

1.3.3 Modelo de Kukreti

Kukreti et al. (1987) realizaron un amplio estudio paramétrico en EF de la conexión con chapa frontal, fig. 1.5. El modelo fue calibrado con ensayos experimentales, los resultados del análisis sirvieron para predecir mediante análisis de regresión ecuaciones que caractericen el comportamiento de la conexión, ecuación 1.4a a 1.4c.

$$\theta_r = C_{ku} M^{1.353} \quad (1.4a)$$

$$C_{ku} = \frac{359 \times 10^{-6} p_f^{2.227}}{h_b^{2.616} t_{wb}^{0.501} t_{fb}^{0.038} d_b^{0.849} g_b^{0.519} b_{ep}^{0.218} t_{ep}^{1.539}} \quad (1.4b)$$

$$g_b = \frac{F_{by} A_B}{3 F_{yb} d_b} \quad (1.4c)$$

Donde: A_B es el área de la sección transversal de la viga (in^2), F_{by} y F_{yb} el esfuerzo de fluencia de la viga y del perno (ksi), M el momento (kip-ft), las longitudes están dadas en pulgadas. El modelo solo consideró carga de momento y se despreció deformaciones en la columna. Similares estudios fueron presentados por Kukreti et al. (1990) para la conexión tipo chapa frontal de gran capacidad.

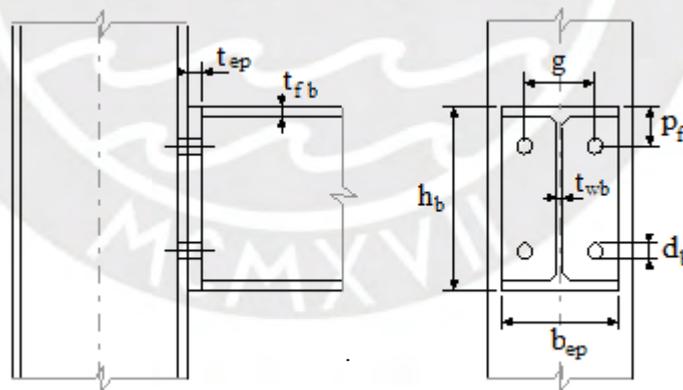


Fig. 1.5: Conexión tipo Chapa frontal no extendida, Modelo de Kukreti.

1.3.4 Modelo de Richard - Abbott (Four-parameter power model)

Richard y Abbott (1975), caracterizaron la curva Momento-rotación mediante una expresión que depende de 4 parámetros los que permiten un mejor control de la curva $M-\theta_r$. Es empleada por muchos investigadores por su alta precisión y además por incluir la rigidez plástica en su expresión, ecuación 1.5.

$$M = \frac{(R_{ki} - R_{kp})\theta_r}{\left[1 + \left(\frac{(R_{ki} - R_{kp})\theta_r}{M_0}\right)^n\right]^{1/n}} + R_{kp}\theta_r \quad (1.5)$$

Donde: R_{ki} es la rigidez inicial de la conexión, R_{kp} es la rigidez de endurecimiento por deformación, M_0 el momento de referencia, θ_0 la rotación relativa de referencia y n es un parámetro de forma de la curva obtenido por regresión, ver figura 1.6.

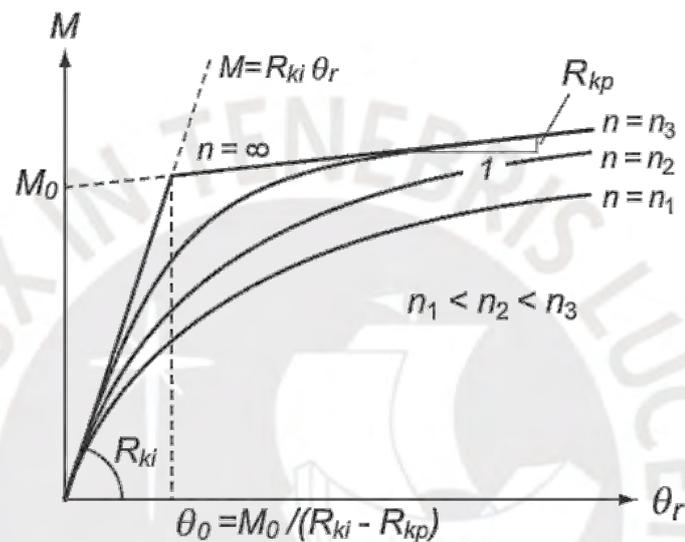


Fig. 1.6: Curva $M-\theta_r$, Modelo de Richard - Abbott (Tomado de Chen et al. 2011)

1.3.5 Modelo de Ang y Morris

Ang y Morris (1984) caracterizaron la curva $M-\theta_r$ de cinco conexiones viga-columna empleando la función propuesta por Ramberg - Osgood (1943), ver ecuación 1.6.

$$\frac{\theta_r}{\theta_0} = \frac{KM}{[KM]_0} \left[1 + \left(\frac{KM}{[KM]_0} \right)^{n-1} \right] \quad (1.6a)$$

$$\theta_0 = \frac{[KM]_0}{R_{ki}} \quad (1.6b)$$

Donde: $[KM]_0$ y θ_0 son constantes que definen la ubicación del punto A, ver fig. 1.7; K constante de estandarización que depende del tipo de conexión y de su geometría; n factor de forma de la curva; θ_r la capacidad rotacional y M el momento resistente,

1.4 Modelos Analíticos

Se fundamentan en el análisis estructural, empleando el equilibrio de fuerzas, relaciones deformación-desplazamiento y esfuerzo-deformación, así como también de mecanismos de falla. Su exactitud depende de la cantidad de simplificaciones hechas en su análisis. Entre los modelos más conocidos tenemos:

1.4.1 Modelo de Kishi y Chen (Three-parameter power model)

Kishi y Chen (1990), obtuvieron expresiones semi-analíticas para conexiones con ángulos. Representaron la curva $M-\theta_r$ empleando la expresión de Richard y Abbott considerando la rigidez plástica R_{kp} como cero, la rigidez inicial R_{ki} (kNm/rad. o kip-in/rad.) y el momento último M_u (kNm o kip-in) se determinó analíticamente empleando un simple mecanismo de falla, la rotación de referencia θ_0 (rad.) es igual a M_u/R_{ki} , el parámetro de forma n fue determinado aplicando el método de mínimos cuadrados comparando los resultados obtenidos con datos disponibles en la literatura. El modelo se validó contra datos de ensayos experimentales, además no considera deformación en la columna. La ec. 1.7 y la fig. 1.8 representan a este modelo.

$$M = \frac{R_{ki} \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\theta_r}{\theta_0}\right)^n\right]^{1/n}} \quad (1.7)$$

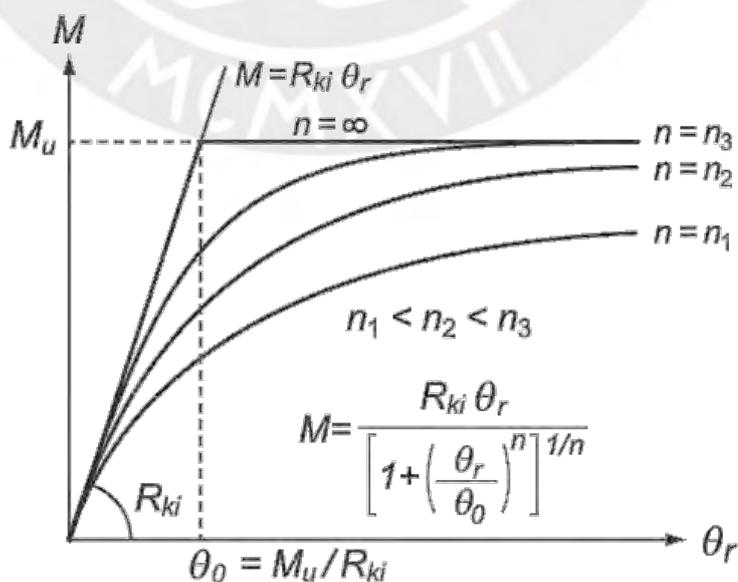


Fig. 1.8: Curva $M-\theta_r$, Modelo de Kishi y Chen (Tomado de Chen et al. 2011)

1.4.2 Modelo de Yee y Melchers

Yee y Melchers (1986), propusieron una formulación matemática para predecir el comportamiento de la curva Momento-Rotación de la conexión con chapa frontal extendida. El modelo analítico se basó en seis modelos de falla y cinco deformaciones relacionadas con las propiedades de la unión. La rigidez rotacional se obtuvo de la combinación de las deformaciones elásticas de cada elemento de la junta, el valor del momento último depende de la resistencia del elemento más débil, el modelo se expresa según la ecuación exponencial 1.8:

$$M = M_p \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{(R_{ki} - R_{kp} + C_y \theta_r) \theta_r}{M_p} \right] \right\} + R_{kp} \theta_r \quad (1.8)$$

Donde: R_{ki} es la rigidez inicial, R_{kp} es la rigidez plástica, M_p es el máximo momento que puede transmitir la conexión sin que aparezca endurecimiento por deformación y C_y es una constante empírica que depende de la configuración de la conexión.

1.4.3 Modelo de Lee y Moon

Lee y Moon (2002), desarrollaron un modelo semi-analítico para describir el comportamiento no-lineal de la curva Momento-rotación la cual depende de dos parámetros γ y n , ecuación 1.9a, los cuales son derivados en términos de la rigidez inicial (R_{ki}) y la rigidez plástica (R_{kp}) aplicando análisis de regresión. Se desarrollaron expresiones para las conexiones con doble ángulo en el alma (ec. 1.9b y 1.9c) y tipo ángulo superior y de asiento (ec.1.9d y 1.9e), sin embargo, este modelo brinda aceptables ajustes de la curva $M-\theta_r$ aun para diferentes tipos de conexiones como puede observarse en la fig. 1.9.

$$M = \gamma [\ln(10^3 n \theta_r + 1)]^n \quad (1.9a)$$

$$\gamma = 1.499E - 0.3R_{ki} + 1.449E - 0.3R_{kp} + 0.704 \quad (1.9b)$$

$$n = -3.594E - 0.5R_{ki} - 3.496E - 0.5R_{kp} + 1.170 \quad (1.9c)$$

$$\gamma = 9.689E - 0.4R_{ki} + 9.562E - 0.4R_{kp} + 3.850 \quad (1.9d)$$

$$n = 4.500E - 0.6R_{ki} + 4.400E - 0.6R_{kp} + 0.601 \quad (1.9e)$$

El parámetro γ tiene efectos sobre la rigidez inicial y momento último, mientras n gobierna la forma de la curva. Las unidades de R_{ki} y R_{kp} están en kNm/rad, E en N/mm². El modelo también puede ser aplicado para un análisis de segundo orden debido a que la rigidez tangente puede ser directamente obtenida de la ec. 1.9f.

$$k_t = \frac{dM}{d\theta_r} = n\gamma[\ln(10^3 n\theta_r + 1)]^{n-1} \cdot \left(\frac{10^3 n}{10^3 n + 1}\right) \quad (1.9f)$$

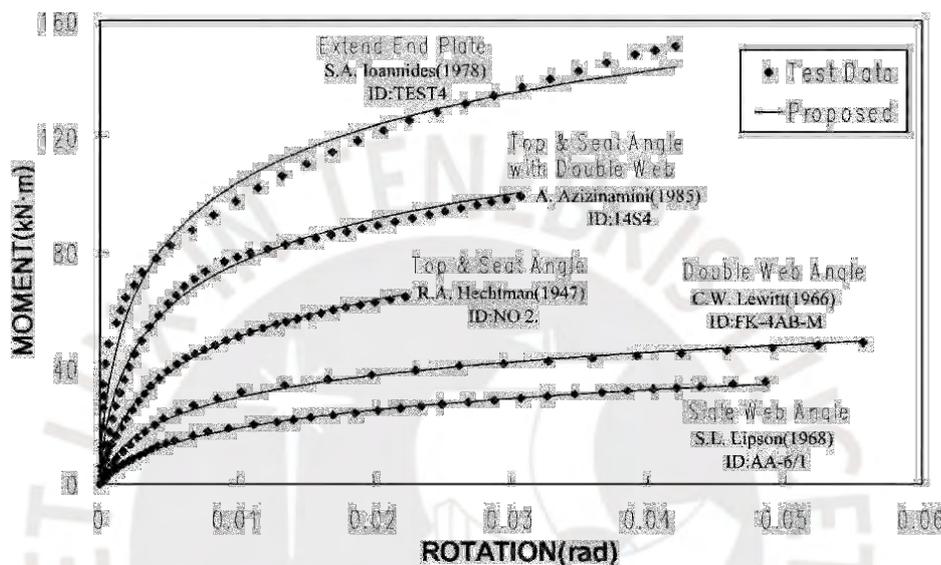


Fig. 1.9: Comparación de curvas M- θ_r según datos experimentales y de predicción del modelo de Lee y Moon (tomado de Lee y Moon, 2002)

Entre otras investigaciones tenemos: Kennedy y Hafez (1984), aplicaron los principios de T-equivalente (T-stub) a fin de caracterizar los elementos en compresión y tracción de la conexión con chapa frontal parcial, considerando cargas de corte y momento. Pirmoz et al. (2009), propusieron ecuaciones semi-analíticas para la conexión con ángulo superior y de asiento apoyándose en parametrizaciones en EF y en bancos de datos realizados por Azizinamini (1982) y Komuro et al. (2004), su estudio demuestra que la tensión axial reduce la rigidez elástica y la capacidad de momento de la conexión, el modelo tiene la capacidad de predecir el comportamiento de la conexión considerando tanto carga axial como momento. Ribeiro et al. (2015), en base a estudios de modelos analíticos y a la metodología presente en el Eurocódigo, propusieron un modelo analítico para evaluar la respuesta de juntas empleando T-equivalente bajo carga de impacto. Ahmed y Kishi (2017) mejoraron las expresiones propuestas por Kishi y Chen (1990) considerando en su modelo rigidez en los pernos y la acción de palanca entre pernos (prying action).

1.5 Modelos Mecánicos

Idealizan el comportamiento de la conexión empleando una combinación de elementos flexibles (resortes) y elementos rígidos (barras), el comportamiento no lineal de la unión se obtiene empleando las leyes constitutivas inelásticas de los resortes, la respuesta global de la unión se obtiene de la contribución de cada elemento (Faella et al. 2000). La exactitud del modelo depende en gran medida del número de elementos considerados y de la caracterización e interacción entre estos. Debido a su flexibilidad se aplica a diferentes configuraciones de uniones y donde se requiera evaluar el efecto de algún elemento en particular como el pretensionamiento en tornillos, endurecimiento plástico, comportamiento a elevadas temperaturas, entre otros. Estos modelos han servido de base para el desarrollo del método de los componentes propuesto por el Eurocódigo 3 (EN 1993-1.8:2010).

Los primeros en utilizar este tipo de modelo fueron Wales y Rossow (1983), su modelo simuló el comportamiento de la conexión con doble ángulo en el alma sometido a cargas axiales y momentos flectores, encontrándose que la fuerza axial tiene gran influencia en el comportamiento de la conexión. Faella et al. (2000), en base al método de los componentes desarrolló el software JMRC (Joint Moment-Rotation Curve) a fin de evaluar el comportamiento de las conexiones viga-columna soldadas, conexiones empernadas con chapa frontal y con ángulos. Simões da Silva et al. (2000), en base a modelos elásticos post-pandeo desarrollaron expresiones analíticas a fin de evaluar el comportamiento de la conexión viga-columna soldada. Posteriormente Simões da Silva y Girão Coelho (2001), evaluaron la respuesta de la conexión viga-columna soldada sometida a carga axial y momento flector, encontrando que la carga axial disminuye la capacidad de momento de la conexión.

Cabrero y Bayo (2007a, 2007b), apoyados en parametrizaciones en elementos finitos, ensayos experimentales y principalmente en el método de los componentes del Eurocódigo 3, desarrollaron nuevas formulaciones analíticas para predecir el comportamiento de la conexión tipo chapa frontal extendida, considerando carga en ambos ejes de la columna (eje mayor y menor), concluyendo que con el aumento de espesor de la chapa se logra mejorar su rigidez y resistencia a flexión, además se pudo comprobar que las formulaciones propuestas en el Eurocódigo 3 sobreestiman

la capacidad rotacional si se comparan con los resultados experimentales realizados, mientras que para la resistencia de la junta se dan resultados más cercanos.

Lemonis y Gantes (2009), presentaron una metodología para estimar la totalidad de la curva $M-\theta_r$ de las conexiones tipo chapa frontal y tipo ángulo superior y de asiento con doble ángulo en el alma, caracterizando su comportamiento mediante el modelo de T-equivalente, emplearon el método de los componentes a fin de obtener el correspondiente modelo mecánico, validaron su modelo mediante pruebas experimentales y modelos numéricos. Del Sabio et al. (2009), basados en el método de los componentes propusieron un modelo mecánico para estimar el comportamiento de la conexión tipo chapa frontal sometida a cargas axiales y de momento simultáneamente, ver fig. 1.10. Hu et al. (2011) y Hu et al. (2012), lograron predecir con una elevada precisión el comportamiento de la conexión viga-columna con T-equivalente bajo cargas cíclicas. Shi y Chen (2017) evaluaron el comportamiento de la curva Momento-rotación de la conexión con chapa frontal de gran capacidad basados en el método de los componentes del Eurocódigo 3.

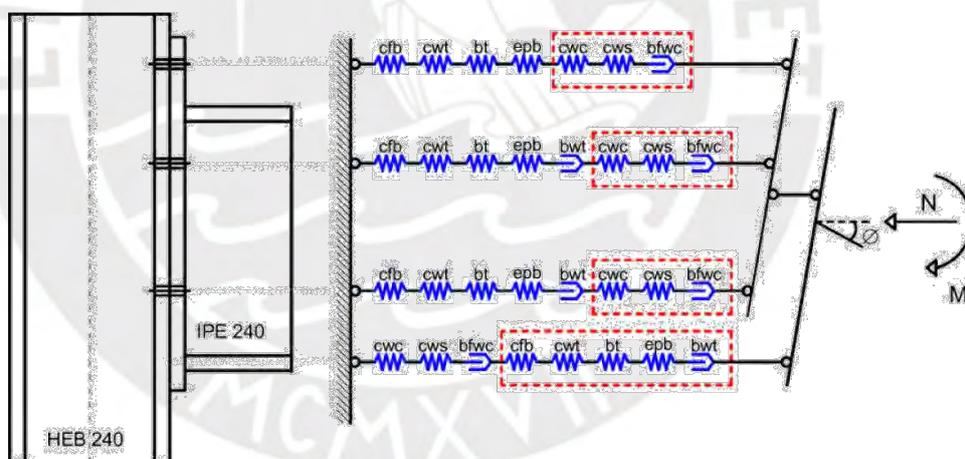


Fig. 1.10: Modelo Mecánico de Del Sabio et al. (tomado de Del Sabio et al. 2009)

1.6 Modelos Numéricos

La simulación numérica comenzó a ser utilizada por varias razones (Díaz et al. 2011a): (1) como un medio para superar la falta de resultados experimentales; (2) para comprender los efectos locales importantes que son difíciles de medir con suficiente precisión; (3) la posibilidad de generar extensos estudios paramétricos. Si bien los modelos en elementos finitos son una herramienta económica y confiable de

cálculo, requieren de una adecuada modelización para predecir el comportamiento de la conexión de manera confiable, esto debido a que interactúan diferentes factores tales como la no linealidad del material, pretensión en los tornillos, interacción entre pernos y placas, fuerzas de fricción, deslizamientos entre otras imperfecciones.

Entre las principales investigaciones tenemos: Bose et al. (1972), aplicaron los EF a fin de estudiar la unión viga-columna soldada, el modelo consideró deformación elástica y plástica, además de pandeo en el alma de la columna, dando nuevas formulaciones y recomendaciones para el diseño estructural aplicado en ese entonces, la precisión del modelo fue evaluada con resultados experimentales. Krishnamurthy y Graddy (1976), trabajaron en la conexión con chapa frontal desarrollando el primer estudio 3D en EF, consideraron pretensión en tornillos y contactos entre planchas y pernos, apoyaron sus resultados en modelos simplificados en 2D. Chasten et al. (1992), estudiaron el efecto de la fuerza de corte y la acción de palanca en la conexión con chapa frontal extendida con 8 pernos en la zona de tensión. Sherbourne y Bahaari (1994), evaluaron el comportamiento de la conexión tipo chapa frontal extendida, también consideraron el efecto de la acción de palanca.

Swanson et al. (2002), usaron modelos en 2D y 3D en EF a fin de simular el comportamiento de conexiones empleando T-equivalente, los modelos incorporaron características no lineales del material, comportamiento geométrico no lineal, pretensión en tornillos, contacto y fricción entre elementos. Moreno (2005), desarrollo un modelo 3D para las uniones tipo chapa frontal extendida y no extendida, proponiendo una mejora en los métodos de análisis de la unión con el objetivo de predecir su comportamiento rotacional, la característica principal del modelo es la alta no linealidad de sus componentes y la compleja interacción entre ellos. Abolmaali et al. (2005) también desarrollaron ecuaciones de predicción para la conexión con chapa frontal no extendida empleando modelos numéricos y análisis de regresión, evaluaron la curva $M-\theta_r$ empleando los modelos de Ramberg - Osgoog y de Kishi y Chen. Cabrero (2006), presento un extenso estudio sobre la conexión con chapa frontal extendida cargada tanto en el eje mayor como en el eje menor (cargas tridimensionales).

Díaz et al. (2011b), desarrollaron un modelo numérico a fin de predecir el comportamiento de la conexión tipo chapa extendida, fig. 1.11, los resultados fueron

calibrados y validados con bases de datos de ensayos experimentales y con el modelo propuesto por el Eurocódigo 3, encontrando que el endurecimiento por deformación del material y parámetros de contacto tienen gran influencia en el comportamiento de la unión. Girão Coelho (2013), realizó un estudio paramétrico para evaluar la resistencia y capacidad rotacional de la conexión con chapa frontal, la falla de la junta es predicha mediante modelos micromecánicos basados en mecanismos de crecimiento y coalescencia los cuales fueron considerados en el análisis de EF.

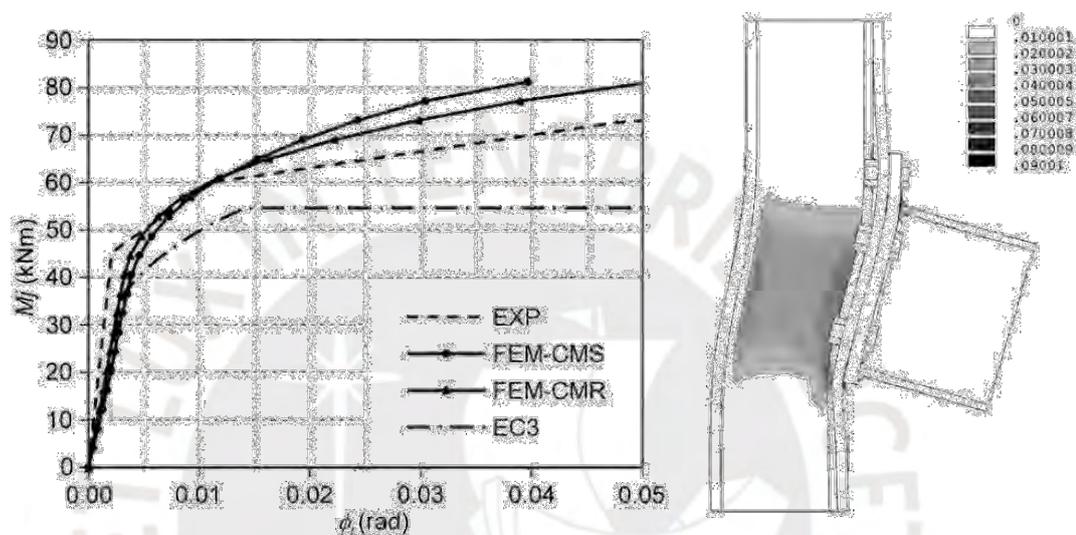


Fig. 1.11: Curva Momento-Rotación y deformación plástica de von Mises (amplificada X5), Ensayo experimental T101.007 (tomado de Díaz et al. 2011b)

1.7 Modelos basados en Inteligencia Artificial

“La Inteligencia Artificial (IA) es un campo del estudio que busca explicar y emular el comportamiento inteligente de los seres vivos en términos computacionales” [Schalkoff, 1990]. Entre las técnicas de IA más conocidas tenemos a las Redes Neuronales Artificiales (RNA).

“Las Redes Neuronales son modelos computacionales inspirados en el sistema nervioso de los seres vivos. Tienen la capacidad de adquirir y mantener conocimiento (basado en información) y pueden definirse como un conjunto de unidades de procesamiento, representadas por neuronas artificiales, enlazadas por muchas interconexiones (sinapsis artificiales), implementadas por vectores y matrices de pesos sinápticos” [Nunes da Silva, 2017].

Las RNA tienen sus inicios a partir de los estudios de McCulloch y Pitts (1943). El modelo de RNA más conocido es el perceptrón multicapa (Multi-Layer Perceptron, MLP), compuesta por nodos (neuronas) organizados en capas los cuales interactúan entre sí a fin de reconocer patrones y dar una respuesta, ver fig. 1.12. Los nodos de la capa de entrada son los encargados de recibir datos (X_1, X_2, X_3, X_4), estos son multiplicados por un factor de ponderación (ω) y enviados al siguiente grupo de nodos (capa oculta), donde estos valores son sumados y procesados por una función de activación no lineal (f), generalmente de tipo sigmooidal, el proceso se repite en los nodos de la capa de salida, los cuales brindaran los datos de salida requeridos (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4). Estas redes deben ser entrenadas mediante la alimentación de datos de entrada y salida conocidos, los cuales ajustarán los pesos, hasta calibrar el modelo. El algoritmo backpropagation (BP) es el método de entrenamiento más utilizado en redes MLP, el cual se fundamenta en reducir el gradiente de la función error.

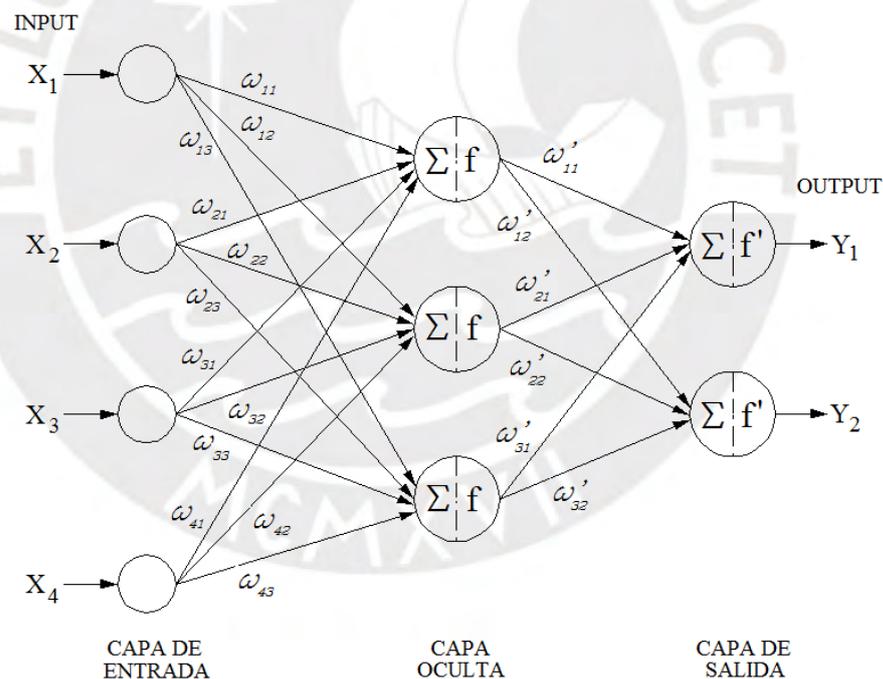


Fig. 1.12: Representación del Perceptrón Multicapa, de 4 entradas y 2 salidas.

Las RNA pueden aprender comportamientos complejos como pandeo local, fricción, mecanismos de fractura, comportamiento plástico del material, características que son difíciles de manejar en modelos numéricos y mecánicos. Si bien esta herramienta es muy flexible y precisa, no brinda información sobre la relación entre las variables de entrada y los efectos de éstas sobre las variables de salida.

Entre las principales investigaciones tenemos: Anderson et al. (1997), obtuvieron una aproximación bilineal de la curva Momento-Rotación del eje menor de la conexión tipo chapa frontal no extendida, la arquitectura de su red consistió de 7 variables de entrada, correspondientes a las propiedades geométricas de la conexión y 2 variables de salida: el momento resistente y la rigidez inicial. De Lima et al. (2005), estudiaron tres tipos de uniones viga-columna: Soldada, con chapa frontal y tipo ángulo superior y de asiento con doble ángulo en el alma, empleando dos tipos de RNA, la primera para predecir la resistencia a flexión y la segunda para predecir la rigidez inicial, entrenaron su red empleando el algoritmo BP. Consideraron como parámetros de entrada las características geométricas y mecánicas tomadas de ensayos experimentales realizados por otros autores, el promedio de error obtenido para la resistencia a flexión fue de 8.4%, 8.9% y 11.6%. Pirmoz y Golizadeh (2007), estudiaron el comportamiento de conexiones con ángulos, construyeron modelos numéricos acorde con ensayos experimentales de Azizinamini (1982), posteriormente elaboraron la red neuronal empleando Matlab, la que fue entrenada y validada con estos modelos. Kim et al. (2012), presentan un modelo híbrido (mecánico-informacional) para representar el comportamiento no lineal de conexiones viga-columna empernadas (bolted flange-plate) afectadas por sismos.

1.8 Representación Matemática de la curva Momento - Rotación ($M - \theta_r$)

“La deformación rotacional es la característica más importante de la conexión debido a que bajo condiciones normales de trabajo en la mayoría de conexiones la deformación por carga axial y cortante son generalmente pequeñas comparadas con su deformación rotacional” [Shi et al, 2008]. Esta deformación rotacional puede graficarse mediante la curva $M-\theta_r$ la cual relaciona el momento aplicado a la conexión versus el giro relativo entre los elementos conectados, siendo la principal herramienta para conocer el comportamiento de las conexiones estructurales.

Según Wu y Chen (1990) una expresión que represente correctamente la curva $M-\theta_r$ debería satisfacer los siguientes requerimientos:

- ❖ La curva debería pasar por el origen de coordenadas.
- ❖ La pendiente de la curva en el origen debería ser igual a la rigidez inicial R_{ki} .

- ❖ Cuando la rotación sea elevada, la pendiente de la curva en este tramo debería aproximarse a la rigidez de endurecimiento por deformación R_{kp} .
- ❖ Para cualquier valor de θ_r , la pendiente de la curva representará la rigidez tangente de la conexión.
- ❖ Los parámetros de esta expresión deberían tener un significado físico.
- ❖ Los parámetros deberían ser determinados por un simple procedimiento analítico.
- ❖ La expresión debería tener una forma sencilla.

La figura 1.13 muestra diferentes representaciones de la curva Momento-rotación: lineal, bilineal, multilineal y no lineal.

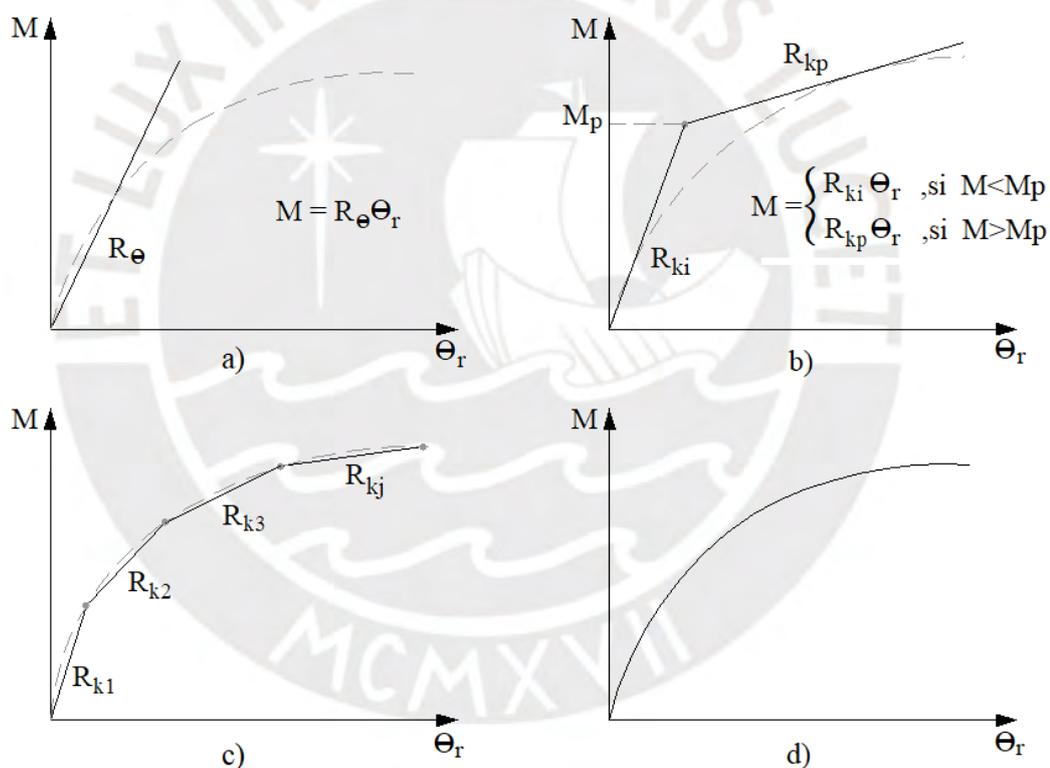


Fig. 1.13: Representaciones matemáticas de la curva Momento-rotación:
(a) Lineal, (b) Bilineal, (c) Multilineal, (d) No lineal.

(a) Modelo Lineal: Es la más simple y la menos exacta, ya que no considera el comportamiento total de la conexión, solo depende de la rigidez rotacional (R_θ).

(b) Modelo Bilineal: Depende de tres parámetros: rigidez inicial (R_{ki}), rigidez rotacional plástica (R_{kp}) y el momento plástico (M_p).

(c) Modelo Multilineal: Razzaq (1983), aproximó la curva Momento-rotación mediante cierto número de líneas rectas con su respectiva pendiente. Según Chen et al. (2011) aunque estos modelos son fáciles de usar, las inexactitudes y los saltos en la rigidez en los puntos de transición los hacen indeseables.

(d) Modelo No-lineal: Es el modelo que más se aproxima al comportamiento no-lineal de la curva. De acuerdo a Attiogbe y Morris (1991): La función polinómica es capaz de brindar mejores aproximaciones que las funciones lineales, sin embargo, debido a su inherente naturaleza oscilatoria puede producir valores de rigidez tangencial erráticos. Mientras que los splines cúbicos proporcionan un ajuste excelente, implican un gran número de parámetros. La función exponencial puede proporcionar un buen ajuste, pero requiere al menos seis parámetros. Las funciones potenciales brindan un ajuste comparable a la de los splines cúbicos. Entre las principales representaciones tenemos:

Frye y Morris (1975), obtuvieron la ec. polinómica 1.10 para diferentes conexiones:

$$\theta_r = C_1(KM) + C_2(KM)^3 + C_3(KM)^5 \quad (1.10)$$

Donde: K depende de las propiedades geométricas y mecánicas de la conexión; C_1 , C_2 y C_3 son constantes de ajuste de la curva (ver Tabla 1.1 y Fig. 1.3).

Richard y Abbott (1975), en base a investigaciones de otros autores, propusieron una de las expresiones más conocidas y empleadas (The four-parameter power model):

$$M = \frac{(R_{ki} - R_{kp}) \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\theta_r}{\theta_0}\right)^n\right]^{1/n}} + R_{kp} \theta_r \quad (1.11a)$$

$$\theta_0 = \frac{M_0}{(R_{ki} - R_{kp})} \quad (1.11b)$$

Donde: R_{ki} es la rigidez inicial, R_{kp} es la rigidez de endurecimiento por deformación, M_0 el momento de referencia, θ_0 rotación relativa de referencia y n el factor de forma. Notar que si $R_{ki} = R_{kp}$ se obtiene en un modelo lineal, si $R_{kp} = 0$ la curva adquiere un comportamiento elástico-perfectamente plástico y cuando $n \Rightarrow \infty$ se convierte en un modelo bilineal.

Kishi y Chen (1987a, 1987b), modificaron la expresión de Richard y Abbott, considerando R_{kp} igual a cero, ecuación 1.12a:

$$M = \frac{R_{ki} \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\theta_r}{\theta_0}\right)^n\right]^{1/n}} \quad (1.12a)$$

$$\theta_0 = \frac{M_u}{R_{ki}} \quad (1.12b)$$

Donde: M_u es la capacidad de momento último, θ_0 una rotación plástica de referencia. Ang y Morris (1984), estandarizaron la función propuesta por Ramberg y Osgood (1943), proponiendo la ecuación 1.13a:

$$\frac{\theta_r}{\theta_0} = \frac{KM}{[KM]_0} \left[1 + \left(\frac{KM}{[KM]_0}\right)^{n-1}\right] \quad (1.13a)$$

$$\theta_0 = \frac{[KM]_0}{R_{ki}} \quad (1.13b)$$

Donde: $[KM]_0$ y θ_0 son constantes; K constante de estandarización que depende del tipo de conexión y de su geometría; n factor de forma de la curva; θ_r la deformación rotacional y M el momento resistente de la conexión.

Kishi y Chen (1986b), refinaron la expresión exponencial propuesta por Lui y Chen (1986), obteniendo la ecuación 1.14:

$$M = M_i + \sum_{j=1}^m C_j \left[1 - \exp\left(-\frac{|\theta_r|}{2j\alpha}\right)\right] + \sum_{k=1}^n D_k (|\theta_r| - |\theta_k|) H[|\theta_r| - |\theta_k|] \dots \quad (1.14)$$

Donde: M_i momento inicial de la conexión; C_j , D_k son parámetros de ajuste de la curva determinados por regresión lineal; α factor de escala para estabilidad numérica; θ_k es la rotacional inicial del k -ésimo componente de la curva experimental $M-\theta_r$; $H[\theta]$ es la función escalón de Heaviside (1 para $\theta \geq 0$ y 0 para $\theta < 0$). La rigidez instantánea de la conexión R_k para una determinada relación relativa $|\theta_k|$ puede ser calculada diferenciando la ecuación 1.14 con respecto a $|\theta_k|$.

Yee y Melchers (1986), propusieron el siguiente modelo exponencial, ecuación 1.15:

$$M = M_p \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{(R_{ki} - R_{kp} + C\theta_r)\theta_r}{M_p} \right] \right\} + R_{kp}\theta_r \quad (1.15)$$

Donde: R_{ki} es la rigidez inicial, R_{kp} es la rigidez de endurecimiento por deformación, M_p la capacidad de momento plástico y C es una constante de ajuste de la curva.

Wu y Chen (1990), propusieron un modelo exponencial de tres parámetros para conexiones con ángulos, ecuación 1.16:

$$\frac{M}{M_u} = n \ln \left(1 + \frac{\theta_r}{n\theta_0} \right) \quad (1.16)$$

Donde: $M_u = R_{ki} \theta_0$, R_{ki} es la rigidez inicial, θ_0 rotación de referencia, n es un parámetro de forma determinado empíricamente.

Lee y Moon (2002), propusieron un modelo logarítmico en función de dos parámetros de forma (γ , n) obtenidos empleando el método de mínimos cuadrados:

$$M = \gamma [\ln(10^3 n \theta_r + 1)]^n \quad (1.17)$$

Kong y Kim (2017), desarrollaron dos tipos de expresiones para la curva $M-\theta_r$ de la conexión con ángulo simple en el alma, ecs. 1.18a y 1.18b, cuya selección depende del tipo de falla de la conexión, ε y n son parámetros de forma en función de las propiedades mecánicas y geométricas de la conexión determinados por regresión.

$$M = \varepsilon \cdot \operatorname{arcsinh}(n \cdot \theta) \quad (1.18a)$$

$$M = \varepsilon \cdot \tanh(n \cdot \theta) \quad (1.18b)$$

En el presente estudio la expresión matemática propuesta por Richard y Abbott ha sido seleccionada, debido a que este modelo es el que mejor caracteriza el comportamiento de la curva Momento-rotación, siendo la más empleada por investigadores, además presenta una formulación simple y directa donde sus parámetros tienen un claro significado físico.

CAPÍTULO 2

CONEXIONES SEMIRRÍGIDAS

En el presente capítulo se hace una descripción general de las conexiones semirrígidas, además se presenta el análisis y clasificación de las conexiones estructurales según la norma europea Eurocódigo 3 y la americana AISC, también se da una descripción general de la conexión tipo chapa frontal.

Las conexiones viga-columna constituyen los elementos más importantes en una estructura, convencionalmente han sido consideradas como rígidas o articuladas. Teóricamente se considera como unión completamente rígida aquella que permite transferir cargas axiales, de corte y momento de la viga a la columna sin presentar ningún giro relativo entre sus elementos (rigidez infinita), en cambio las uniones perfectamente articuladas solo son capaces de transmitir carga axial y de cortante, mas no de momento y permiten el giro relativo de la unión. Estas dos consideraciones son ideales, sin embargo, en la práctica hay uniones que debido a su acercamiento a estos dos comportamientos pueden ser modeladas como tales, existe otro tipo de uniones que presentan un comportamiento intermedio entre ambas, considerarlas en su análisis como articuladas o rígidas sería incorrecto, a este tipo de conexiones se les denomina semirrígidas. En la fig. 2.1 se muestran estas tres formas de comportamiento en conexiones viga-columna.

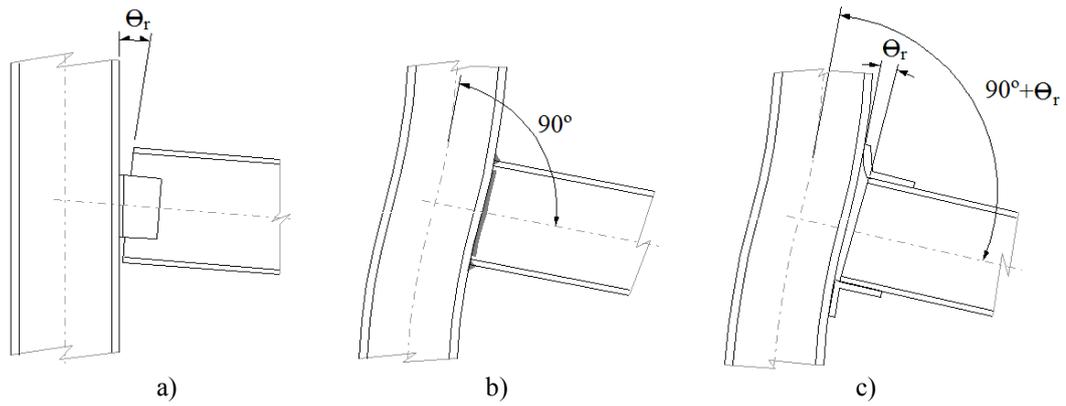


Figura 2.1: Clasificación según el tipo de apoyo de la conexión:
 (a) Articulada, (b) Rígida, (c) Semirrígida.

El uso de conexiones semirrígidas en estructuras de acero puede llevar a diseños más eficientes, ahorro de espacio y mejor estética de la estructura, menor uso de soldadura y debido a que originan menores momentos en las uniones si se comparan con las uniones rígidas, se puede emplear perfiles de menor espesor, reduciendo así el peso de las estructuras y haciéndolas más económicas, además estas conexiones no presentan un comportamiento frágil como sucede con las conexiones soldadas, presentan mejor capacidad de disipación de energía, por consiguiente un mejor comportamiento sísmico. En la fig. 2.2 se aprecia que la distribución de momentos y deflexiones varía notablemente según la elección del tipo de apoyo, puede notarse que para un apoyo semirrígido el momento en su extremo es inferior si se compara con un apoyo empotrado, asimismo la deflexión en el centro de la viga es menor comparada con el caso de apoyo simple.

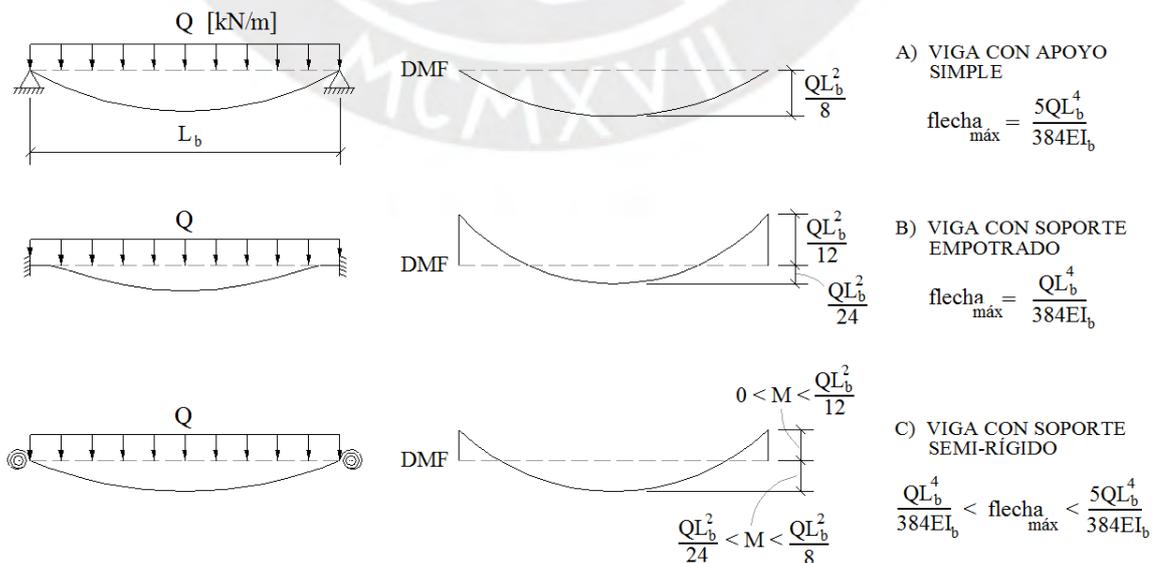


Fig. 2.2: Efecto del tipo de soporte en la distribución de momentos flectores y deflexiones de vigas.

2.1 Curva Momento - Rotación

Es la característica principal de una conexión, permite un mejor entendimiento de su comportamiento, pues las deformaciones originadas por cargas axiales y de corte son generalmente despreciables para la mayoría de las conexiones (Fengfeng Zhou, 2005). Esta describe la relación no lineal entre la capacidad de momento y de rotación de la conexión, fig. 2.3, la pendiente de esta curva brinda la rigidez, definida como la resistencia a la rotación de la conexión al aplicarle un momento. Se podría asumir un comportamiento rígido de la conexión cuando más cerca este la curva del eje M, mientras que si se ubica próxima al eje θ_r se podría asumir como articulada.

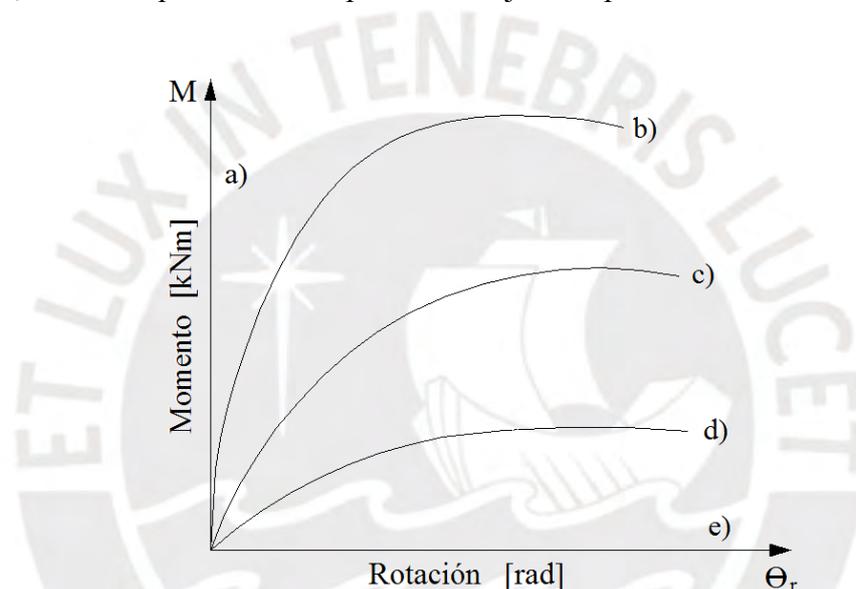


Fig. 2.3: Curvas Momento-rotación: (a) Completamente rígida, (b) Rígida, (c) Semirrígida, (d) Articulada, (e) Perfectamente Articulada.

2.2 Análisis, diseño y clasificación de conexiones según el Eurocódigo 3

Con respecto a su análisis, el Eurocódigo 3: Diseño de Estructuras de Acero, Parte 1-8: Diseño de Juntas (EN 1993-1-8, 2010), brinda los siguientes alcances:

Los efectos del comportamiento de la unión en la distribución de fuerzas y momentos internos deben ser generalmente considerados en el análisis, pueden ser despreciados si estos efectos son muy pequeños. Se han considerado tres modelos simplificados para identificar donde los efectos del comportamiento de la unión deben ser tomados:

Simple: Se podría considerar que la unión no transmite momentos flectores, no existe continuidad entre sus miembros, comportándose como una unión articulada.

Continuo: Existe continuidad entre los elementos conectados, se podría asumir que el comportamiento de la unión no tiene influencia en el tipo de análisis.

Semi-continuo: El comportamiento de la unión debe ser considerado en el análisis. El tipo de modelo de unión apropiado depende de la clasificación de la unión y del modelo de análisis seleccionado.

Con respecto a su clasificación el Eurocódigo 3, en el apartado 5.2 clasifica a las uniones según su rigidez y resistencia:

2.2.1 Clasificación según su rigidez al giro.

Se establecen tres calificaciones, definidas al comparar la rigidez inicial de la unión $S_{j,ini}$ con los límites de clasificación dados en la fig.2.4.

Nominalmente Articuladas: Deben ser capaces de transmitir las fuerzas internas, sin desarrollar momentos significativos que puedan afectar a sus miembros o a la estructura en su totalidad. La unión debe permitir rotaciones bajo cargas de diseño.

Rígidas: Presentan suficiente rigidez rotacional para justificar un análisis continuo. La rotación relativa entre los miembros conectados es mínima.

Semirrígidas: Son aquellas uniones que no presentan un comportamiento nominalmente articulado ni rígido, deben ser capaces de transmitir fuerzas internas y momentos.

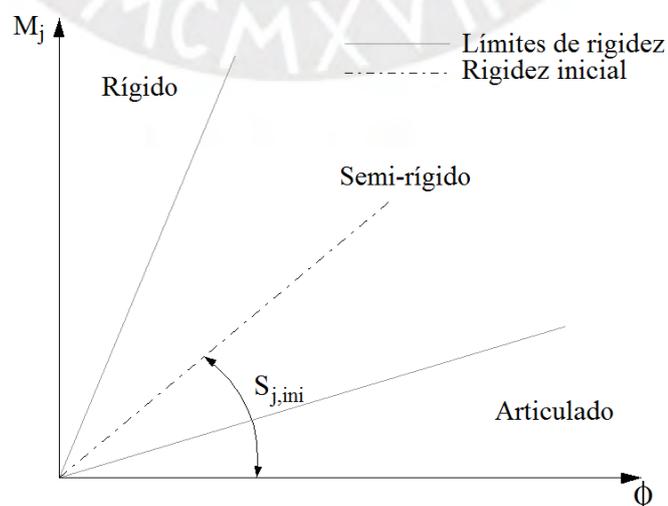


Fig. 2.4: Límites de Clasificación de las uniones según su rigidez.

Límites para su Clasificación:

Zona 1: Se considera rígidas si:

$$S_{j,ini} \geq \frac{k_b E I_b}{L_b}$$

Donde:

$k_b = 8$: para estructuras arriostradas donde el sistema de arriostramiento reduce el desplazamiento horizontal al menos un 80%.

$k_b = 25$: para el resto de estructuras, siempre que en cada planta cumpla $K_b / K_c \geq 0.1$

Zona 2: Todas las uniones pertenecientes a esta zona deben considerarse como semirrígidas. Se considera Semirrígida si:

Estructuras arriostradas: $0.5EI_b / L_b < S_{j,ini} < 8EI_b / L_b$

Estructuras sin arriostrar: $0.5EI_b / L_b < S_{j,ini} < 25EI_b / L_b$

Zona 3: Independientemente de si es arriostrada o no, se considera nominalmente articulada si:

$$S_{j,ini} \leq \frac{0.5 E I_b}{L_b}$$

Donde:

$S_{j,ini}$: Rigidez inicial de la unión.

K_b : valor promedio de I_b / L_b para todas las vigas de esa planta.

K_c : valor promedio de I_c / L_c para todas las columnas de esa planta.

I_b : momento de inercia de la viga.

I_c : momento de inercia de la columna.

L_b : luz de la viga (distancia entre centros de las columnas).

L_c : altura de la columna.

E : módulo elástico.

2.2.2 Clasificación según su resistencia a flexión

Existen tres clasificaciones, definidas al comparar los momentos resistentes de diseño $M_{j,Rd}$ de la unión con los momentos resistentes de diseño de los miembros conectados.

Nominalmente Articulada: Capaz de transmitir fuerzas internas sin desarrollar momentos apreciables que puedan afectar a los miembros o la estructura en su totalidad, bajo la acción de cargas deben permitir giros en la unión.

Se considera articulada si: $M_{j,Rd} \leq 0.25M_{Rd}$, siempre que presente suficiente capacidad de rotación.

Donde:

$M_{j,Rd}$: Momento resistente de diseño de la unión.

M_{Rd} : Momento resistente requerido para resistencia completa (Momento resistente plástico)

De Resistencia Completa: La unión presenta igual o mayor resistencia de diseño que los miembros conectados.

Se considera de resistencia completa si cumple:

Para columnas no continuas: $M_{j,Rd} \geq M_{b,pl,Rd}$ o $M_{j,Rd} \geq M_{c,pl,Rd}$

Para columnas continuas: $M_{j,Rd} \geq M_{b,pl,Rd}$ o $M_{j,Rd} \geq 2M_{c,pl,Rd}$

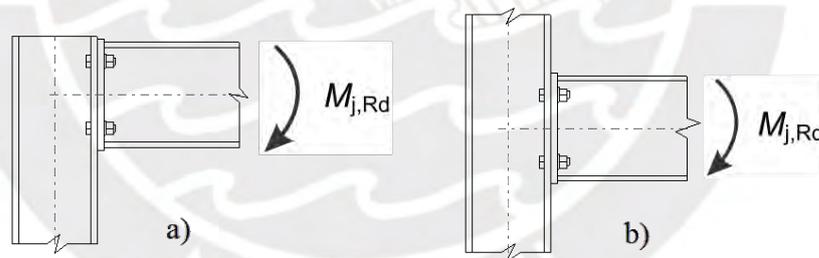


Figura 2.5: Clasificación según tipo de continuidad de la columna:
(a) No continua, (b) Continua.

Donde:

$M_{b,pl,Rd}$: momento resistente plástico de la viga.

$M_{c,pl,Rd}$: momento resistente plástico de la columna.

Resistencia Parcial: Si la unión no cumple con los criterios anteriores, debe ser considerada de resistencia parcial. Su momento resistente de diseño es inferior al momento resistente del miembro conectado más débil.

Se considera de resistencia parcial si: $0.25M_{Rd} < M_{j,Rd} < M_{Rd}$

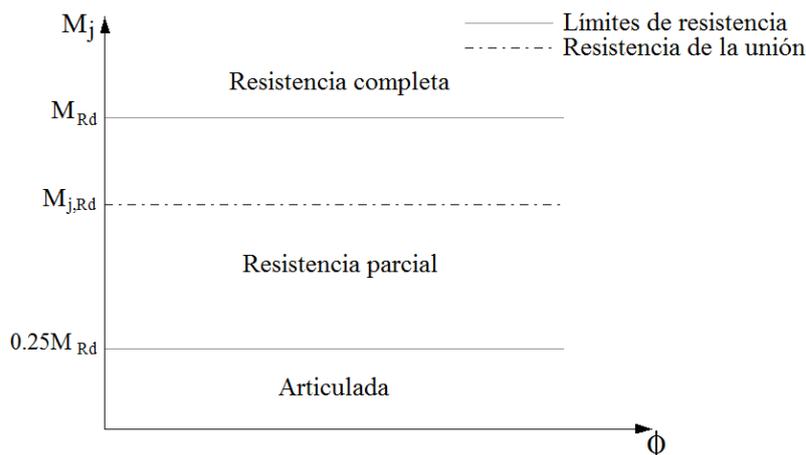


Fig. 2.6: Clasificación de las uniones según sus límites de resistencia.

De acuerdo a esta norma la unión puede ser representada mediante un muelle rotacional que conecte los ejes de los miembros conectados en su punto de intersección, como se indica en la fig. 2.7 (a, b). Las propiedades del muelle pueden ser expresadas en forma de la curva característica Momento-Rotación, la que describe la relación entre el momento resistente de diseño $M_{j,Ed}$ aplicado a la unión y la correspondiente rotación ϕ_{Ed} entre los miembros conectados. La curva característica Momento-Rotación de diseño, fig. 2.7(c), debe definir las siguientes propiedades: Momento resistente, Rigidez rotacional y Capacidad de rotación. El momento resistente de diseño $M_{j,Rd}$, es igual al máximo momento de la curva característica $M-\phi$. El tramo elástico de la curva $M-\phi$ representa a la rigidez rotacional inicial $S_{j,ini}$. La rigidez rotacional S_j , la cual es la rigidez secante, aplica hasta la rotación ϕ_{Xd} , en la cual $M_{j,Ed}$ se iguala con $M_{j,Rd}$, pero no para mayores rotaciones. La capacidad de rotación de diseño de la unión ϕ_{Cd} es la máxima rotación indicada en la curva característica $M-\phi$.

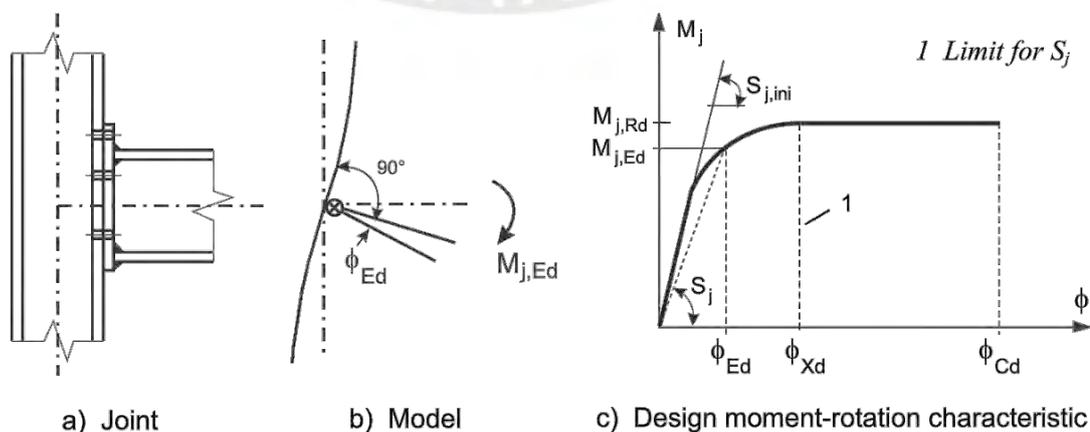


Fig. 2.7: Curva característica Momento-rotación de una unión.
(tomado de Eurocódigo 3, 1993-1-8, 2010)

En el caso de conexiones semirrígidas bajo un análisis global elástico de la unión, si el momento actuante $M_{j,Ed}$ no supera los $2/3$ del momento resistente de la unión $M_{j,Rd}$, puede considerarse el valor de la rigidez rotacional $S_{j,ini}$ igual al valor de la rigidez inicial $S_{j,ini}$ de la unión.

2.3 Análisis, diseño y clasificación de uniones según la norma AISC

La Especificación AISC 360-16 (Specification for Structural Steel Buildings, 2016) considera que las conexiones pueden ser diseñadas como Simples o a Momento:

2.3.1 Conexiones Simples

Su transmisión de momento es despreciable. En el análisis de la estructura se puede asumir que permiten una rotación relativa entre sus miembros. Estas conexiones deberán presentar suficiente capacidad de rotación para acomodar la rotación requerida determinada en el análisis de la estructura.

2.3.2 Conexiones a Momento

Existen dos tipos, completamente restringidas y parcialmente restringidas:

(a) Completamente Restringidas (Fully Restrained, FR)

Transfieren momentos con despreciable rotación entre los miembros conectados. En el análisis se puede considerar que la conexión no permite rotación relativa. Una conexión FR deberá tener suficiente resistencia y rigidez para mantener los ángulos iniciales entre los miembros en los estados límites de resistencia.

(b) Parcialmente Restringidas (Partially Restrained, PR)

Capaces de Transferir momentos, pero la rotación relativa entre sus miembros no es despreciable. En el análisis de la estructura se deberá incluir las características de respuesta fuerza-deformación de la conexión, las que deberán estar documentadas en literatura técnica o establecida por medios analíticos o experimentales.

2.3.3 Clasificación de Conexiones

El AISC 360-16 considera que el comportamiento de una conexión puede ser modelada por la curva Momento-rotación, fig. 2.8, la conexión se define como la región entre la columna y viga y los elementos de la conexión, la respuesta de la conexión no solo considera las contribuciones de los elementos de la conexión sino también los extremos de los elementos conectados y el área a cortante de la columna.

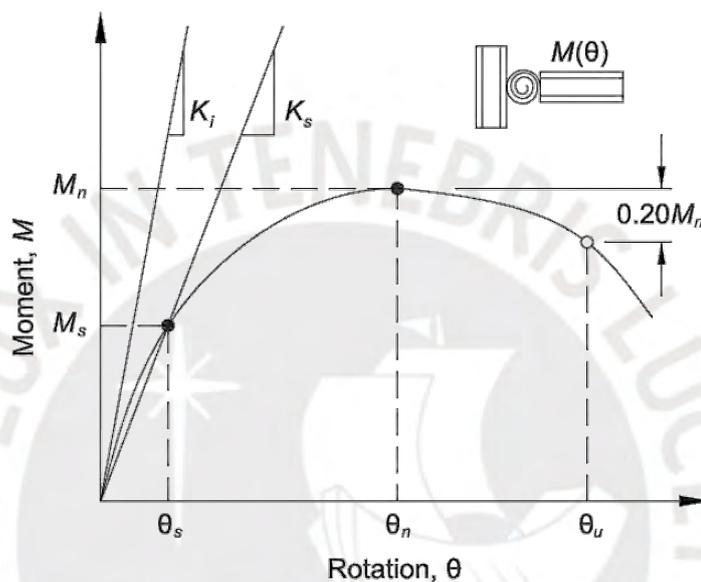


Fig. 2.8: Curva Momento-Rotación típica de una conexión PR
(Fig. C-B3.2 de AISC 360-16)

2.3.4 Rigidez de la Conexión

Debido al comportamiento no lineal de la conexión aun para bajos niveles de carga, la rigidez inicial de la conexión K_i mostrada en la fig. 2.8, no caracteriza adecuadamente la respuesta de la conexión bajo cargas de servicio. Además, varios tipos de conexiones no exhiben una rigidez confiable, o esta existe para pequeños rangos de carga, por tal motivo la rigidez secante K_s bajo cargas de servicio es considerada una propiedad de la rigidez de la conexión, ver figura 2.9.

$$K_s = M_s / \theta_s$$

Donde:

M_s : momento bajo cargas de servicio, kip-in (N.mm).

θ_s : capacidad de rotación bajo cargas de servicio, rad.

De acuerdo a esta propiedad las conexiones se clasifican como:

Conexiones Completamente Restringidas (FR): Si $K_s.L / E.I \geq 20$

Conexiones Simples: Si $K_s.L / E.I \leq 2$

Conexiones Parcialmente Restringidas (PR): $2 < K_s.L / E.I < 20$, en este tipo de conexiones la rigidez, resistencia y ductilidad deben ser considerados en el diseño.

Siendo L y EI la longitud y rigidez a flexión de la viga.

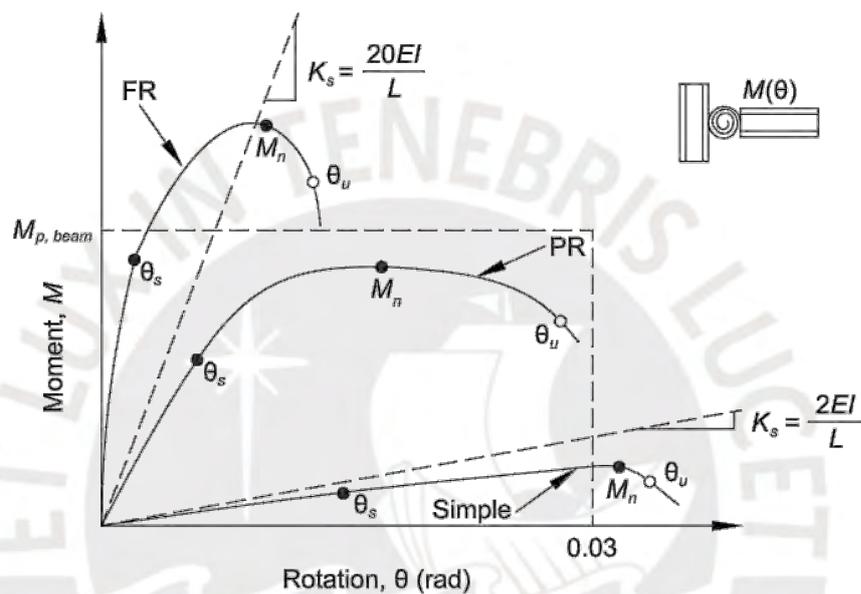


Fig. 2.9: Curva Momento-rotación de conexiones Completamente Restringidas (FR), Parcialmente Restringidas (PR) y Conexiones Simples (Fig. C-B3.3, AISC 360-16)

2.3.5 Resistencia de la Conexión

La resistencia de la conexión M_n es el máximo momento que esta es capaz de transmitir, como se muestra en la fig. 2.9, donde θ_u indica el estado de máxima rotación de la conexión. La resistencia M_n puede obtenerse mediante un modelo de estados límites últimos o mediante ensayos experimentales. Si M_n no puede ser determinada claramente de la curva $M-\theta_r$, entonces esta puede considerarse como el momento a una rotación de 0.02 rad. Aquellas conexiones que transmiten menos del 20% del momento plástico de la viga correspondiente a una rotación de 0.02 rad no poseen resistencia a flexión y en su diseño deben ser consideradas como simples.

2.3.6 Ductilidad de la Conexión

Si la resistencia de la conexión excede ampliamente la resistencia a momento plástico de la viga, entonces la ductilidad del sistema estructural es controlada por la viga y la conexión puede ser considerada como elástica. Si la resistencia a momento plástico de la viga solo es excedida ligeramente, entonces la conexión puede experimentar deformaciones inelásticas antes de que la viga alcance su máxima resistencia. Si la resistencia de viga excede la resistencia de la conexión las deformaciones pueden presentarse en la conexión. Acorde la fig. 2.9 la capacidad de rotación θ_u se define como el valor de la rotación de la conexión en el punto donde el momento resistente ha caído a $0.8M_n$ o para cuando la conexión se ha deformado más de 0.03 rad, ese segundo criterio se aplica en conexiones donde no existe pérdida de resistencia hasta que grandes rotaciones ocurran.

2.4 Conexiones Tipo Chapa Frontal

La conexión tipo chapa frontal consiste de una placa soldada en el extremo de la viga y conectada por medio de pernos generalmente al ala de la columna. Empleadas ampliamente por su gran capacidad de momento. Su comportamiento varía ampliamente con el uso o no de rigidizadores, aumentando su rigidez y reduciendo su ductilidad con su uso, además la adición de rigidizadores permite aumentar la capacidad de momento de la conexión para un mismo espesor de placa. Entre las ventajas y desventajas de este tipo de conexión podemos mencionar (según Steel Design Guide 4, 2003):

Ventajas:

- El montaje es más simple ya que solo requiere instalar pernos.
- Las soldaduras son realizadas en taller eliminando problemas asociados con soldadura en obra.
- Sin la necesidad de soldadura en campo, el proceso de montaje es relativamente más rápido y menos costoso.
- Costos de montaje competitivos para la mayoría de los casos.

Desventajas:

- Las técnicas de fabricación deben ser más rigurosas, debido a la necesidad de longitudes exactas de la viga y cuadratura en el extremo de esta y la columna.
- Estos problemas pueden causar dificultades en montaje, pudiendo ser controlados fabricando la viga 1/4 in. a 3/8 in. más corta y adicionando laines (shims).
- La placa frontal frecuentemente se deforma por la adición de calor en el proceso de soldadura, además podría ocurrir desgarramiento laminar en la zona de tracción del ala de la viga.
- Posibilidad de generar fuerzas de palanca (prying action) en la zona de pernos en tracción, principalmente en planchas delgadas y flexibles, estas fuerzas originan esfuerzos adicionales en los pernos.

Entre las configuraciones que podemos encontrar podemos mencionar:

Chapa Frontal Extendida: La extensión de la placa es tal que permite la instalación de pernos más allá del peralte de la viga, adecuadas para zonas sísmicas, además puede presentar rigidizadores tanto en la columna como entre la placa y la viga. La fig. 2.10 muestra tres configuraciones comunes de esta conexión.

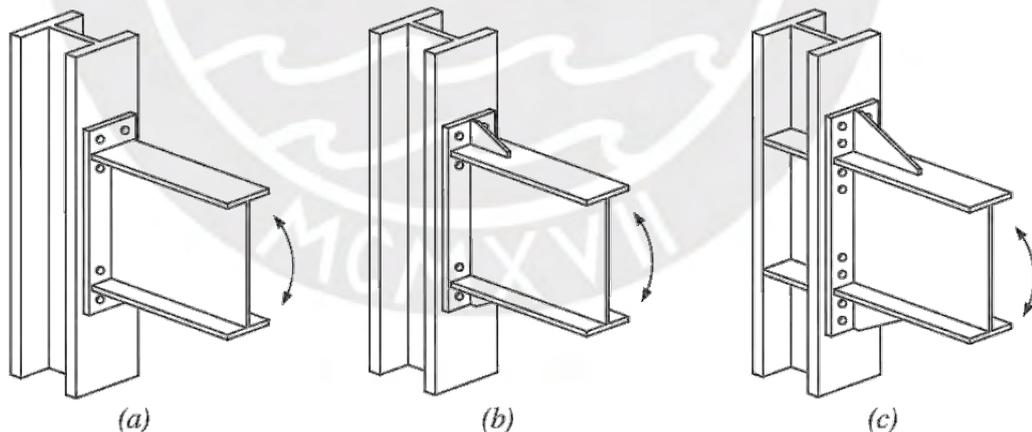


Fig. 2.10: Configuraciones de conexión tipo chapa frontal extendida: (a) Sin rigidizar de 4 pernos, 4E (b) Rigidizada de 4 pernos, 4ES (c) Rigidizada de 8 pernos, 8ES (Fig. 6.1, AISC 358-16)

Chapa Frontal no Extendida: Solo presenta pernos entre las alas de la viga, la chapa no se extiende apreciablemente más allá de las alas de la viga, ver fig. 2.11. Presentan menor capacidad para soportar momento que la conexión con chapa extendida.

El Manual AISC (Steel Construction Manual, 2011) considera a ambas como conexiones a momento tipo FR. Estudios realizados por Kishi y Chen (1997) encontraron para la conexión con chapa frontal extendida un valor de momento máximo entre $0.40M_p$ y $0.80M_p$ y para la conexión con chapa frontal no extendida valores de $0.20M_p$ y $0.80M_p$, siendo M_p el momento máximo plástico de la viga, por lo que ambas podrían clasificarse como semirrígidas según el Eurocódigo 3.

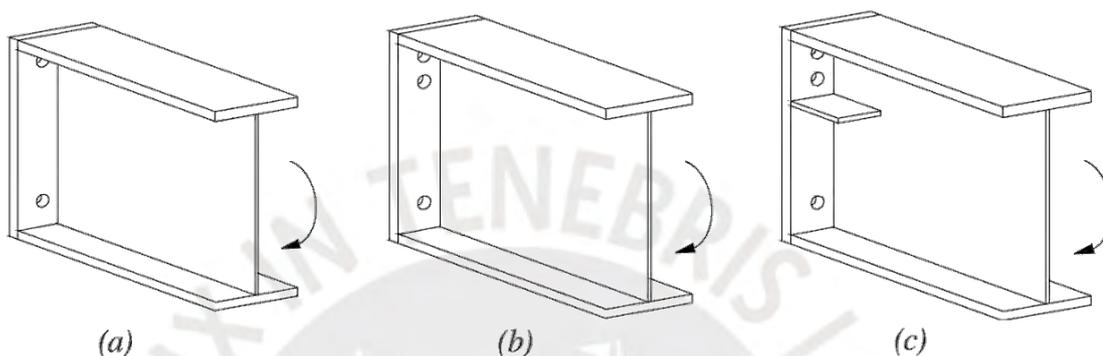


Fig. 2.11: Configuraciones de conexión tipo chapa frontal no extendida: (a) y (b) Sin rigidizar con 2 y 4 pernos en zona de tracción, (c) Rigidizada con 4 pernos en zona de tracción (tomado de AISC SDG-16, 2002)

Los primeros procedimientos de cálculo propuestos de estas conexiones resultaban en placas de gran espesor y pernos de gran diámetro, debido a excesivas simplificaciones en su análisis. A lo largo de los años el AISC ha publicado distintos procedimientos para calcular estas conexiones, basadas en la teoría de líneas de fluencia (yield-line theory) y en la generación de fuerzas de palanca en los pernos (variación del método propuesto por Kennedy et al. 1981), las que pueden encontrarse en las siguientes publicaciones publicadas por el AISC:

AISC 358-16 (2016): Incluye distintas conexiones precalificadas para uso en pórticos especiales a momento y pórticos intermedios a momento. Su criterio de diseño brinda suficiente resistencia en los elementos de la conexión para asegurar que las deformaciones inelásticas de la conexión se alcancen en la viga. Aplica para uso con pernos pretensionados.

Steel Design Guide 4 (Murray y Summer, 2003): Aplicable para conexiones tipo chapa frontal extendida en estructuras sometidas a cargas cíclicas y sísmicas, no considera el efecto de la acción de palanca en los pernos, debido a que los espesores

de la placa frontal brindados presentan suficiente espesor para minimizar este efecto. Aplicable para uso con pernos pretensionados.

Steel Design Guide 16 (Murray y Shoemaker, 2002): Considera el efecto de la acción de palanca, permite el uso de pernos apretados sin holgura y pernos pretensionados, sin embargo, este procedimiento no ha sido verificado para aplicaciones sísmicas. Aplicable tanto para conexiones con chapa frontal extendida y no extendida.

Existen diferentes tipos de conexión, su selección depende de cada proyecto en particular, una adecuada selección garantiza la seguridad y funcionalidad de la estructura. La fig. 2.12 muestra curvas $M-\theta_r$ de diferentes tipos de conexión, cabe señalar que estas son representaciones aproximadas y no la representación exacta del comportamiento de la conexión, la fig. 2.13 muestra varias tipologías de conexión.

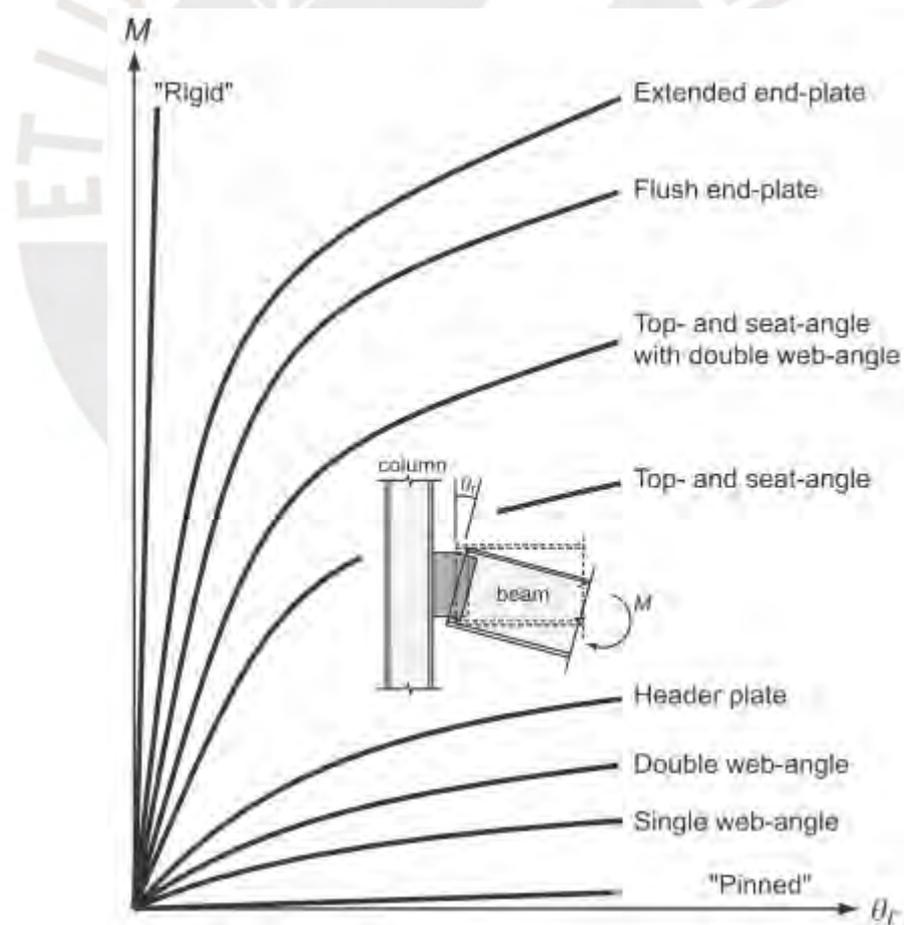


Fig. 2.12: Curvas Momento - rotación de diferentes conexiones viga-columna. (tomado de Chen et al., 2011)

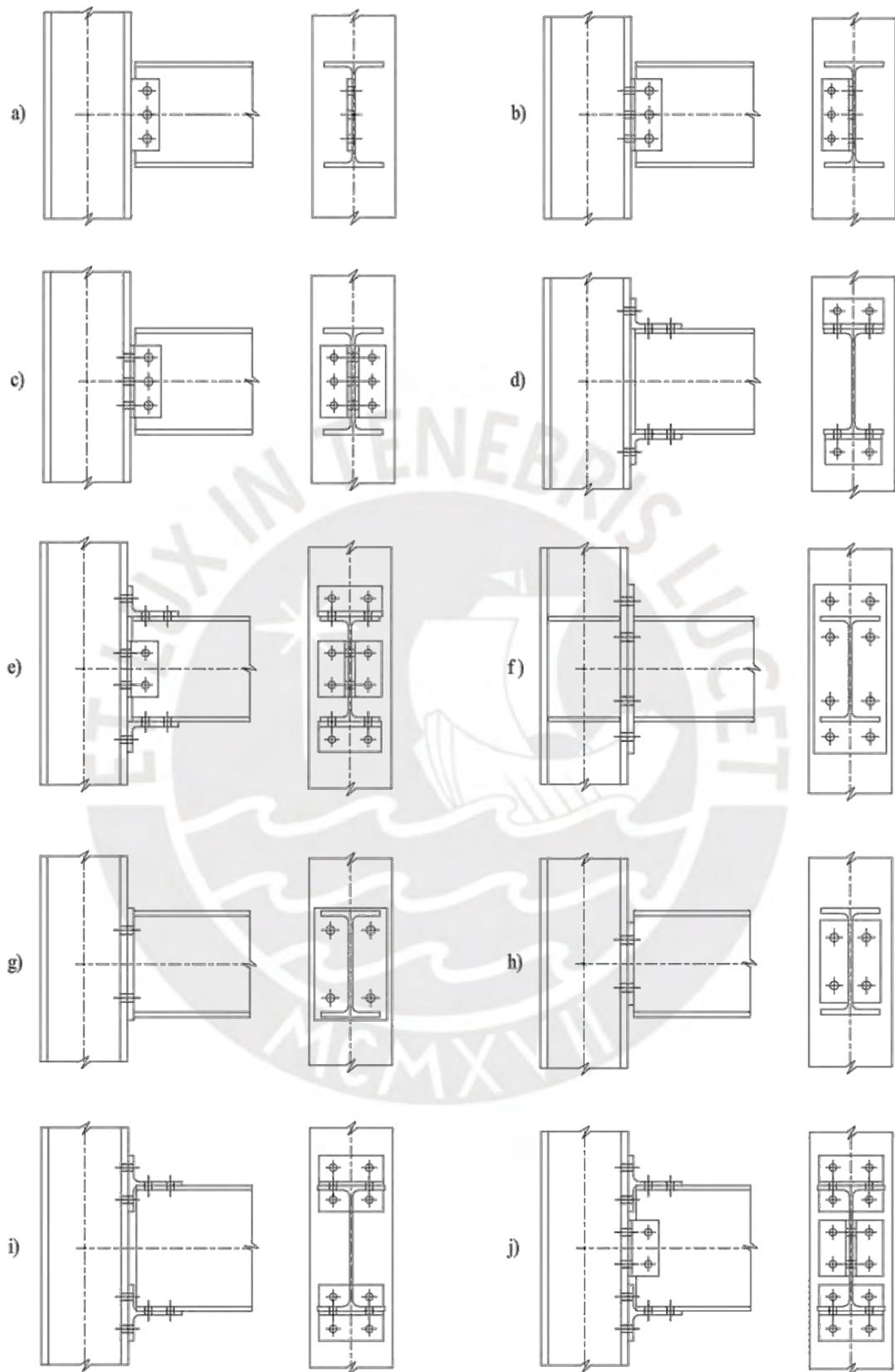


Fig. 2.13: Tipos de Conexiones Estructurales: a) Placa a cortante, b) Ángulo simple en alma, c) Ángulo doble en alma, d) Ángulo superior y de asiento, e) Ángulo superior y de asiento con ángulo doble en alma, f) Chapa frontal extendida rigidizada, g) Chapa frontal no extendida, h) Chapa frontal parcial, i) Doble T, j) Doble T con ángulo doble en el alma.

CAPÍTULO 3

MODELO NUMÉRICO PARAMÉTRICO DE LA CONEXIÓN

En el presente capítulo se describe el procedimiento realizado para construir el modelo paramétrico en elementos finitos de la conexión tipo chapa frontal extendida. En primer lugar, se detalla el ensayo experimental de la conexión tipo chapa frontal que sirvió para validar el modelo desarrollado en elementos finitos, luego se expone el proceso de modelamiento numérico de la conexión, parámetros geométricos, propiedades mecánicas de los materiales, entre otras consideraciones. Finalmente se describe el proceso de validación de los resultados obtenidos.

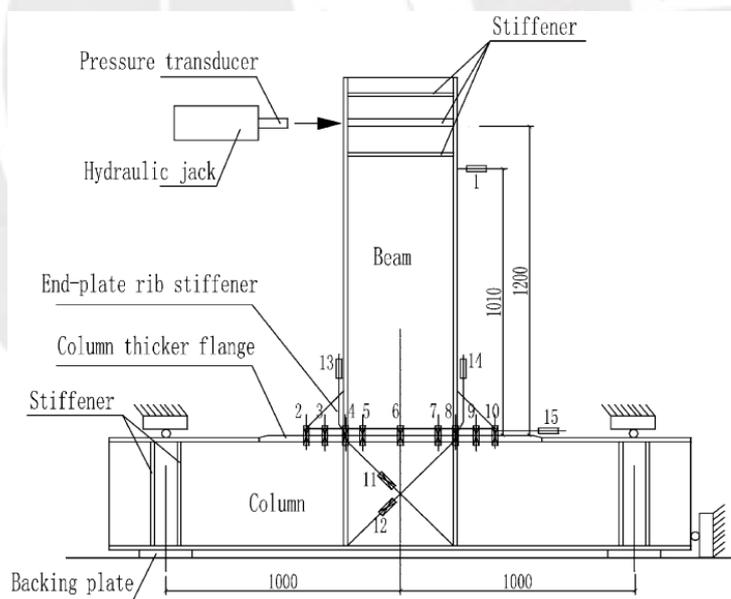
3.1 Ensayo Experimental

Shi et al. (2007) propusieron un modelo analítico para evaluar el comportamiento rotacional de la conexión tipo chapa frontal extendida con rigidizadores al variar tanto el diámetro de pernos como el espesor de la chapa. El modelo fue dividido en varios componentes, incluyendo el alma a cortante de la columna, el ala de la columna, pernos y la chapa frontal, la curva Momento-rotación de la conexión fue obtenida de las contribuciones de cada componente. El modelo fue validado con cinco ensayos experimentales realizados bajo carga estática, pudiéndose comprobar que este brinda buenos resultados en la evaluación de la rigidez inicial y la curva

Momento-rotación. La fig. 3.1 muestra el ensayo experimental realizado por estos autores. Posteriormente Shi et al. (2008) apoyándose en estos ensayos experimentales desarrollaron modelos numéricos en EF con la habilidad de simular y analizar el comportamiento estructural de diferentes conexiones tipo chapa frontal.



a)



b)

Fig. 3.1: Conexión Chapa Frontal Extendida, a) Ensayo experimental, b) Disposición geométrica y de cargas, dimensiones en mm (tomado de Shi et al., 2007).

En los ensayos experimentales realizados se emplearon perfiles-I fabricados de planchas soldadas. En el área conectada se reemplazó el ala de la columna soldando

una chapa de refuerzo de espesor igual al de la chapa frontal, extendiéndose 100 mm del extremo inferior y superior de la chapa frontal. El espesor de los rigidizadores en la columna y entre la chapa frontal y viga fue de 12mm y 10mm respectivamente. El material del acero fue Grado Q345 (Fluencia nominal $F_y=345$ MPa) y los pernos empleados fueron de Grado 10.9. La soldadura fue de penetración completa entre la chapa frontal y las alas de la viga y entre la columna y la chapa de refuerzo, en el resto de uniones se empleó soldadura de filete de tamaño 8mm.

Los detalles geométricos de cada ensayo realizado se muestran en la fig. 3.2 y la Tabla 3.1. Las propiedades de los materiales empleados fueron obtenidas a través de ensayos y certificados de calidad, estos se indican en la Tabla 3.2.

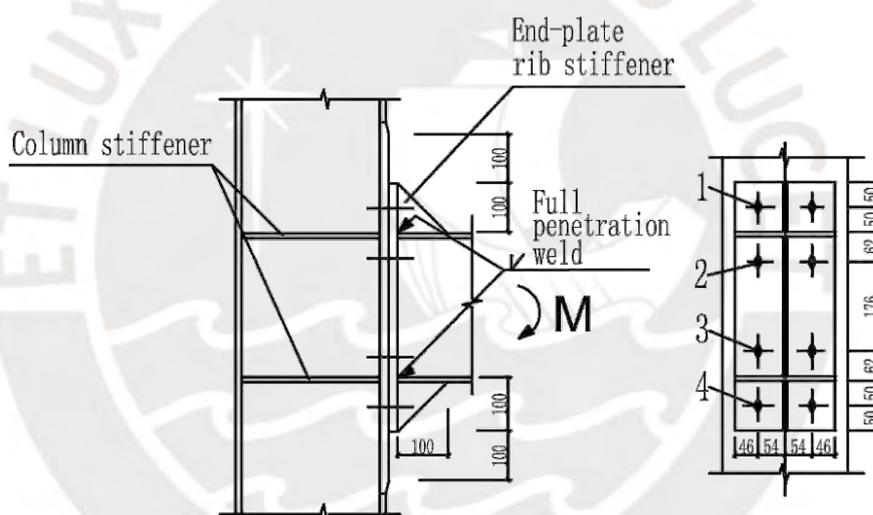


Fig. 3.2: Detalles geométricos de la conexión, dimensiones en mm (tomado de Shi et al., 2007).

Tabla 3.1: Detalles geométricos de ensayos realizados, unidades en mm.

Ensayo N°	Columna $h_c \times b_{cf} \times t_{cf} \times t_{cw}$	Viga $h_b \times b_{bf} \times t_{bf} \times t_{bw}$	Placa t_p	Diám. Perno d
EPC-1	300x250x12x8	300x200x12x8	20	20
EPC-2	300x250x12x8	300x200x12x8	25	20
EPC-3	300x250x12x8	300x200x12x8	20	24
EPC-4	300x250x12x8	300x200x12x8	25	24
EPC-5	300x250x12x8	300x200x12x8	16	20

Tabla 3.2: Propiedades de los materiales

Material	Fluencia (MPa)	Resistencia a la rotura (MPa)	Módulo Elástico (MPa)	Fuerza de pre-tensión Promedio (kN)
Acero:				
espesor $\leq 16\text{mm}$	391	559	190707	-
espesor $>16\text{mm}$	363	537	204228	-
Pernos (M20)	995	1160	-	185
Pernos (M24)	975	1188	-	251

Como se observa de la fig. 3.3, el ángulo de rotación total de la conexión se obtiene sumando el efecto de la rotación a cortante (ϕ_s) y la rotación en la placa frontal (ϕ_{ep}), la primera es debida de la deformación producida en el alma a cortante de la columna y la segunda es debida a la deformación relativa entre la chapa frontal y el ala de la columna, además de la deformación de los tornillos. En el ensayo el ángulo de rotación de la conexión (ϕ) se obtuvo midiendo la rotación relativa (antes y después de aplicada la carga) que sufre una línea definida por dos puntos ubicados en la parte inferior y superior del peralte de la viga, estos puntos fueron situados en el extremo de la viga que va unida a la placa frontal.

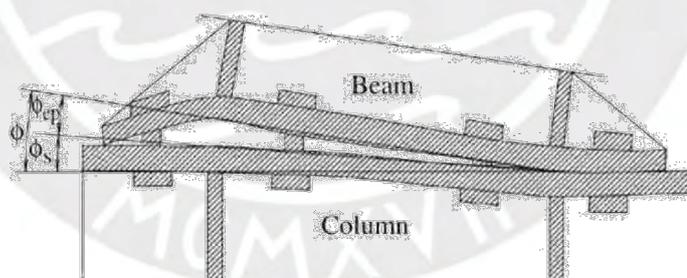


Fig. 3.3: Ángulo de rotación definido para el ensayo experimental (tomado de Shi et al., 2007).

El momento resistente máximo de la conexión es el resultado de multiplicar la capacidad de carga por el brazo de carga (1.2m). Los resultados de los ensayos realizados, así como el modo de falla se muestran en la Tabla 3.3, la fig. 3.4 muestra las curvas Momento-rotación obtenidas para cada ensayo.

Tabla 3.3: Resultados obtenidos del ensayo.

Ensayo N°	Capacidad de Carga (kN)	Momento Resistente (kN.m)	Rigidez Inicial (kN.m/rad.)	Modo de Falla
EPC-1	286.4	343.7	52 276	Fractura en pernos
EPC-2	268.4	322.1	46 094	Fractura en pernos
EPC-3	325.3	390.3	46 066	Pandeo en ala de viga y del alma en compresión
EPC-4	342.3	410.8	47 469	Pandeo en ala de viga y del alma en compresión
EPC-5	296.1	355.4	41 634	Fractura en pernos y pandeo a compresión en rigidizador entre viga y chapa frontal

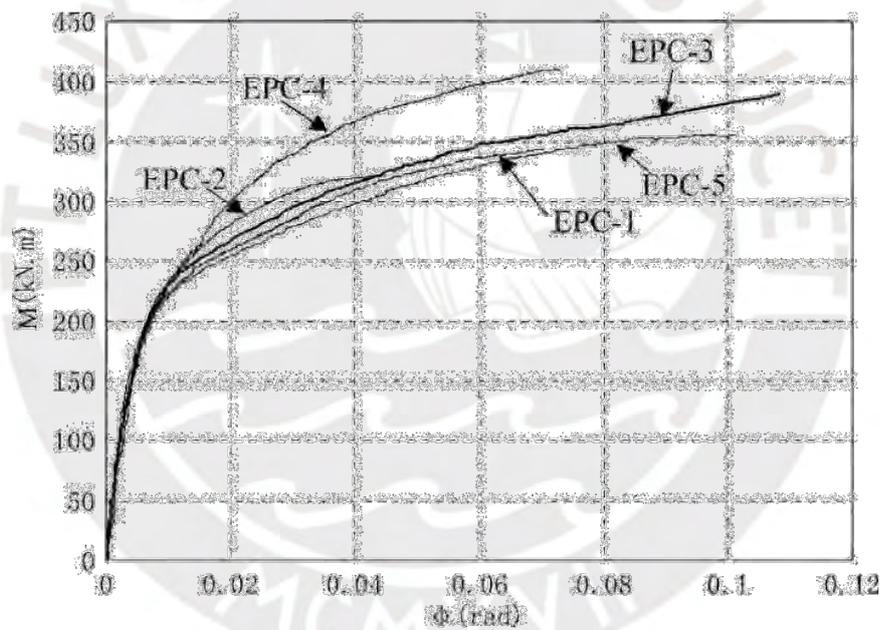


Fig. 3.4: Curvas Momento-rotación obtenidas (tomado de Shi et al., 2007).

3.2 Construcción del Modelo Numérico Paramétrico

3.2.1 Modelamiento

El modelo elaborado consideró deformaciones en la columna, viga y en los componentes de la conexión, incluyendo no linealidad del material, pretensión en tornillos, fricción y contacto entre componentes, entre otras consideraciones. El

material se caracterizó con comportamiento elastoplástico mediante un modelo de endurecimiento isotrópico bilineal tal como se aprecia en la curva tensión-deformación del material de la fig. 3.5, donde la pendiente inicial de esta curva corresponde al módulo elástico E , el comportamiento no lineal del material se caracterizó por el módulo tangente E_t con valor igual al 2% del módulo elástico, se consideró este comportamiento a fin de simplificar el análisis, además el comportamiento de la conexión presentó buenos resultados al compararlo con los resultados de los ensayos experimentales. Se empleó el criterio de fluencia de von Mises, el material asignado a la soldadura fue el mismo que el empleado en vigas y columnas.

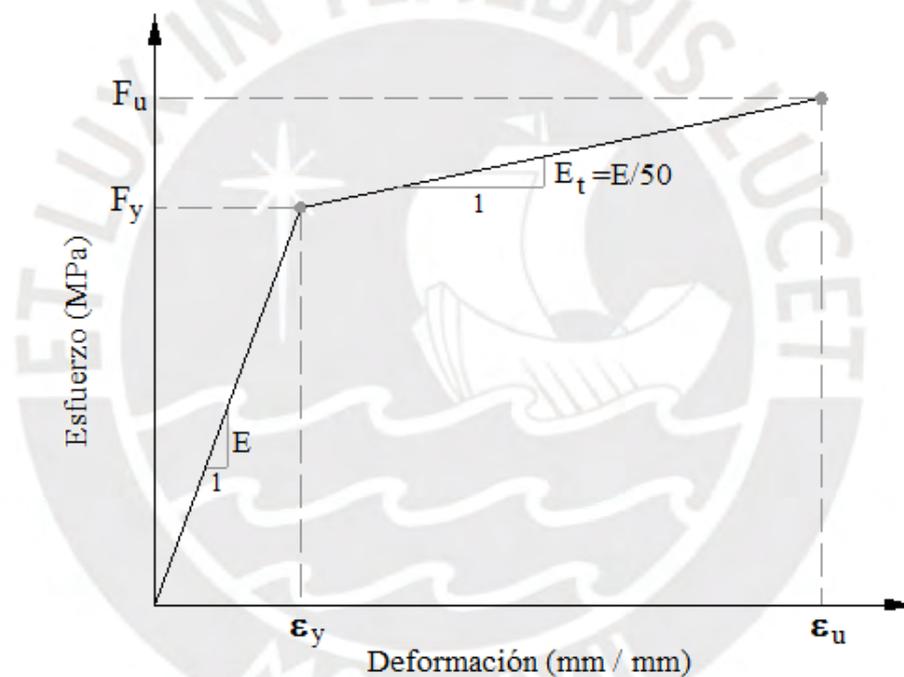


Fig. 3.5: Curva tensión-deformación bilineal empleada en el análisis.

El modelamiento de los componentes de la conexión se realizó con elemento SOLID 187, un elemento 3D tetraédrico de 10 nodos que es ideal para el análisis estructural no lineal, el contacto entre componentes se realizó con elementos CONTA 174 y TARGE 170, la pretensión en los tornillos se logró con el elemento PRETS 179. El modelamiento y análisis de la conexión fue completa, a diferencia de otros autores quienes aprovechando la simetría de la conexión solo modelaron la mitad de esta a fin de reducir recursos computacionales.

La carga y las condiciones de frontera fueron aplicadas en puntos másicos utilizando el elemento MASS 21 ubicado a 10cm de los extremos libres de columna y viga. En el caso de la columna los nodos pertenecientes a las caras exteriores fueron acoplados a este punto másico y se restringió su desplazamiento en los tres ejes. En el caso de la viga los nodos de la cara libre se acoplaron a este elemento permitiéndose solo desplazamiento en la dirección vertical, es en este punto másico donde la carga fue aplicada, de esta forma se evitó causar deformaciones locales que se originarían si la fuerza fuese aplicada directamente sobre la viga. La fig. 3.6 muestra el modelo construido en elementos finitos y la ubicación de estos puntos másicos.

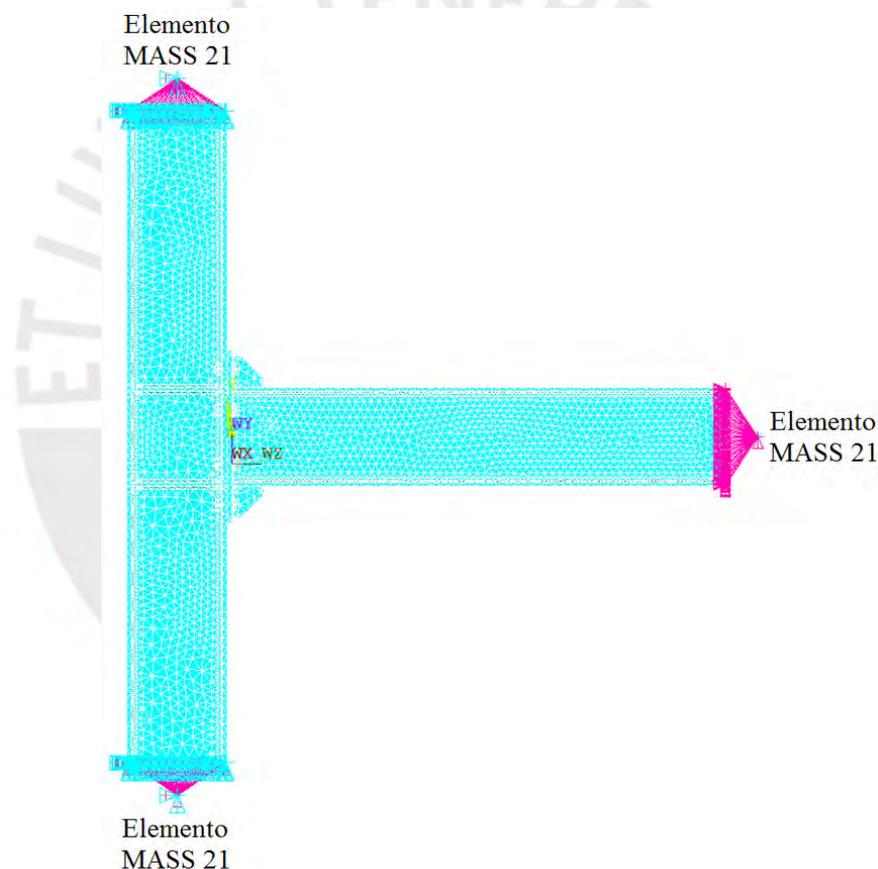


Fig. 3.6: Ubicación de puntos másicos.

La fuerza se aplicó progresivamente en cada iteración. El término de cada simulación fue programado para detenerse hasta que los materiales de la conexión o del perno alcanzaran su deformación límite, se consideró 21% como deformación máxima para los materiales de la conexión y de 14% para el material de los pernos, es en estos

límites de donde se obtuvo el valor de momento último de la conexión, este se calculó multiplicando la máxima fuerza admisible (F) por el brazo de carga (L_{carga}), ver fig. 3.7.

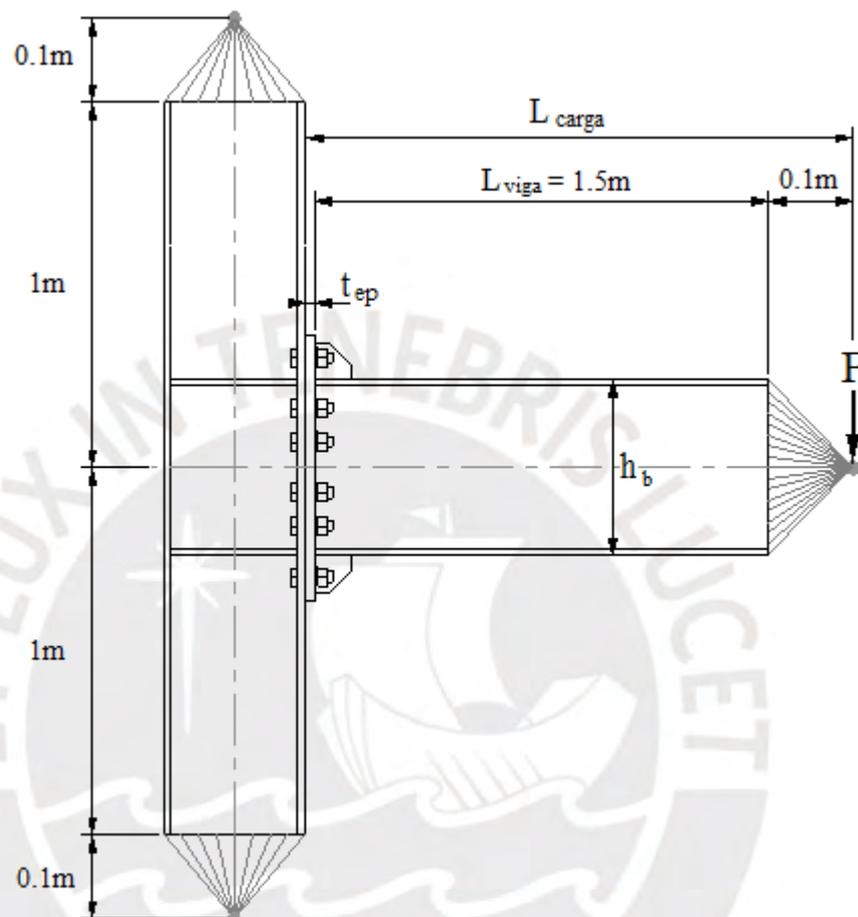


Fig. 3.7: Esquema de aplicación de la carga

3.2.2 Propiedades Mecánicas y Geométricas del Modelo

El modelo numérico desarrollado presentó las siguientes características: el módulo de elasticidad considerado fue de E : 210 GPa. El valor del coeficiente de Poisson fue de ν : 0.3. El valor del coeficiente de rozamiento μ el cual depende del estado de las superficies en contacto fue de 0.3, correspondiente a una superficie de fricción Clase C (norma EN 1993-1-8, 2010), la cual presenta limpieza de superficie mediante cepillado con cepillo de alambre o mediante flameado, el cual es aceptable para este tipo de conexiones. Las dimensiones geométricas de los perfiles fueron limitadas a rangos basados en prácticos detalles constructivos mostrados en tabla 3.4.

El material de perfiles y planchas empleado fue acero ASTM A572-Gr.50, por presentar este un creciente uso en la industria de la construcción. El material seleccionado para los pernos fue ASTM A325 por ser uno de los más empleados en el diseño. Con respecto a las características de perfiles y material de la conexión a emplear estos se indican en la tabla 3.5. La fuerza de pretensión en los tornillos se indica en la Tabla 3.6, valores obtenidos de la norma AISC 360-16. La elongación límite para el acero A572-Gr.50 fue de 21% y para el acero A325 de 14%, valores indicados en sus respectivas normas ASTM A572 / A572M-15 y ASTM A325-14.

La conexión se modeló con rigidizadores tanto en la columna como entre viga y chapa frontal, la chapa fue conectada al ala de la columna (eje fuerte). La conexión consta de una fila de pernos en la parte externa del ala superior e inferior de la viga, la cantidad de filas de pernos entre alas de la viga es variable.

Tabla 3.4: Rangos Geométricos viga-columna considerados.

$t_{cw} / t_{cw} \geq 1.56$	$t_{cw} / t_{cw} \leq 1.79$
$t_{bf} / t_{bf} \geq 1.42$	$t_{bf} / t_{bf} \leq 1.79$
$t_{cw} / t_{bw} \geq 1.0$	$t_{cw} / t_{bw} \leq 1.7$
$t_{cf} / t_{bf} \geq 1.0$	$t_{cf} / t_{bf} \leq 1.7$
$b_b / b_c \geq 0.75$	$b_b / b_c \leq 1.0$
$W_{pl, y, b} / W_{pl, y, c} \geq 0.85$	$W_{pl, y, b} / W_{pl, y, c} \leq 2$
$i_{y, b} / i_{y, c} \geq 0.7$	$i_{y, b} / i_{y, c} \leq 1.11$

Tabla 3.5: Propiedades geométricas y mecánicas consideradas.

Descripción	Perfil / Diámetro	Material	Esf. Fluencia (N/mm ²)	Esf. Último (N/mm ²)
Columna	W310x250 a W460x280	A572-Gr50	345	450
Viga	W310x200 a W460x280	A572-Gr50	345	450
Placa	Espesor > 13.5mm	A572-Gr50	345	450
Pernos	M16, M20, M24 *	A325	635	825
	M27 **	A325	560	725

*Diámetro de agujeros: 18, 22, 24mm. **Diámetro de agujero: 30mm

Tabla 3.6: Pretensión en Tornillos.

Diámetro d (mm)	Pretensión (KN)
16	91
20	142
24	205
27	267

La efectividad de las ecuaciones de predicción obtenidas del modelo matemático dependerá de la consideración o no de estas propiedades geométricas y mecánicas. La configuración geométrica empleada para esta conexión se muestra en la fig. 3.8, la Tabla 3.7 indica la simbología correspondiente a cada parámetro geométrico considerado.

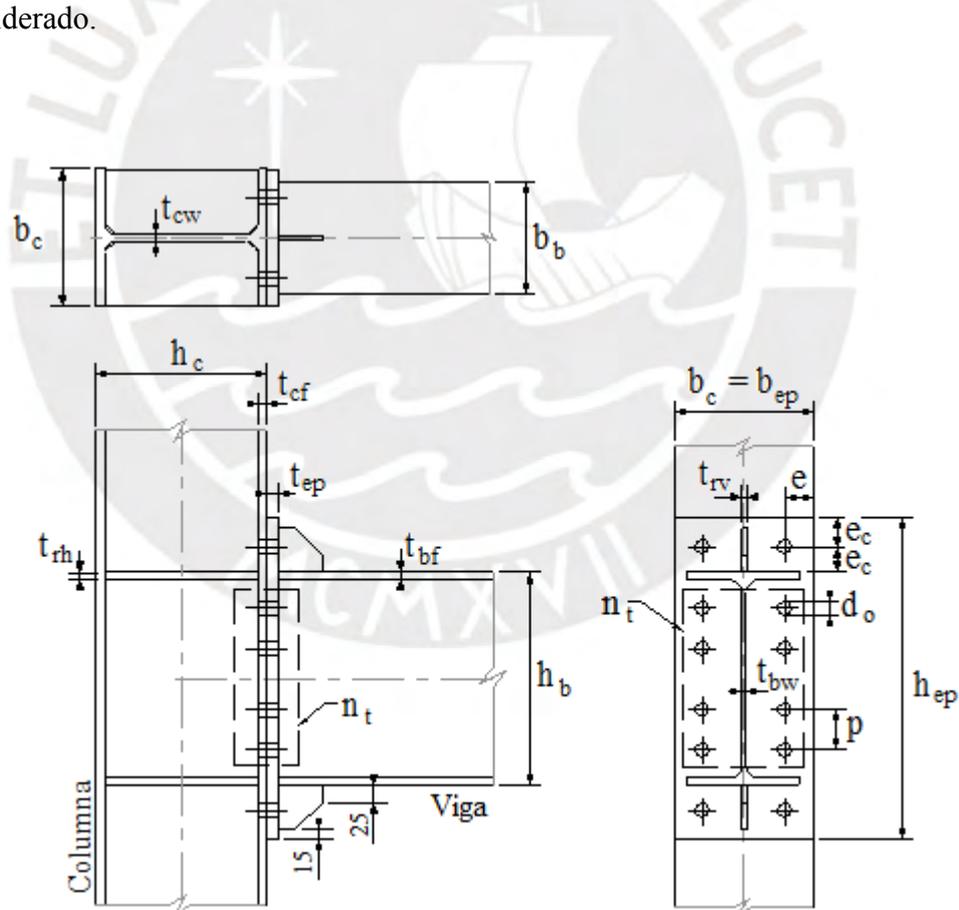


Fig. 3.8: Configuración geométrica

Tabla 3.7: Parámetros geométricos

Símbolo	Descripción	Observaciones
h_c	Peralte de columna	
b_c	Ancho de columna	
t_{cf}	Espesor del ala de la columna	
t_{cw}	Espesor del alma de la columna	
h_b	Peralte de viga	
b_b	Ancho de viga	
t_{bf}	Espesor del ala de la viga	
t_{bw}	Espesor del alma de la viga	
h_{ep}	Largo de placa frontal	$h_{ep} = h_c + 8d$
b_{ep}	Ancho de placa frontal	$b_{ep} = b_c$
t_{ep}	Espesor de placa	$t_{ep} = t_{cf}$
t_{rh}	Espesor del rigidizador en la columna	$t_{rh} = t_{bf}$
t_{rv}	Espesor del rigidizador en la viga	$t_{rv} = t_{bw}$
d	Diámetro del tornillo	
d_0	Diámetro del agujero	$d_0 = d + 2$ ó 3 *
n_t	Número de filas internas de pernos	2, 4, 6
e	Distancia horizontal desde el centro del perno al borde lateral de la placa	$e = 2d_0$
e_c	Distancia vertical desde el centro del perno al borde superior de la placa	$e_c = 2d_0$
p	Distancia vertical entre tornillos interiores	$p = 3d_0$
g	Gramil, separación horizontal entre pernos	$g = b_c - 4d_0$

* $d_0 = d + 2$, para pernos M16, M20 y M24; $d_0 = d + 3$, para pernos M27

3.3 Construcción de la Base de Datos

El objetivo principal del presente estudio es mediante una base de datos construir modelos matemáticos a fin de predecir el comportamiento estructural de la conexión tipo chapa frontal extendida frente a diferentes cargas de momento y parámetros geométricos, esta base de datos constará de 140 casos de estudio. Por consiguiente, se ha considerado emplear el lenguaje APDL del software ANSYS Mechanical, debido a que este lenguaje permite parametrizar las características mecánicas y propiedades geométricas de la conexión facilitando significativamente la evaluación de los 140 casos de estudio propuestos.

El proceso de parametrización numérica fue realizado a través de macros, donde en un archivo independiente se almacenan 140 casos con las propiedades geométricas de la conexión, diferenciándose cada caso según el perfil de la columna o viga, en el diámetro de tornillos y el número de filas internas de tornillos, las propiedades mecánicas de los materiales también se incluyen en archivos independientes. El proceso de simulación inicia con la construcción de la geometría de la conexión y el mallado de esta, posteriormente se añaden los contactos y las condiciones de borde, finalmente el análisis es ejecutado y este se reinicia con cada incremento de carga, el análisis se detiene cuando se alcanza la deformación máxima de algún componente de la conexión.

Las propiedades geométricas de estos 140 casos considerados se indican en el Anexo A, el Anexo B indica los resultados obtenidos para cada caso de estudio. En la fig. 3.9 puede observarse para el Caso 97 los esfuerzos desarrollados cuando esta conexión alcanza su máxima capacidad resistente, como era de esperarse se aprecia claramente que los máximos desplazamientos y esfuerzos se presentan en la zona próxima a los pernos cercanos al ala superior de la viga, ya que esta zona es la más sobrecargada, además la zona del alma a cortante de la columna también es una de las más afectadas por la aplicación de la carga.

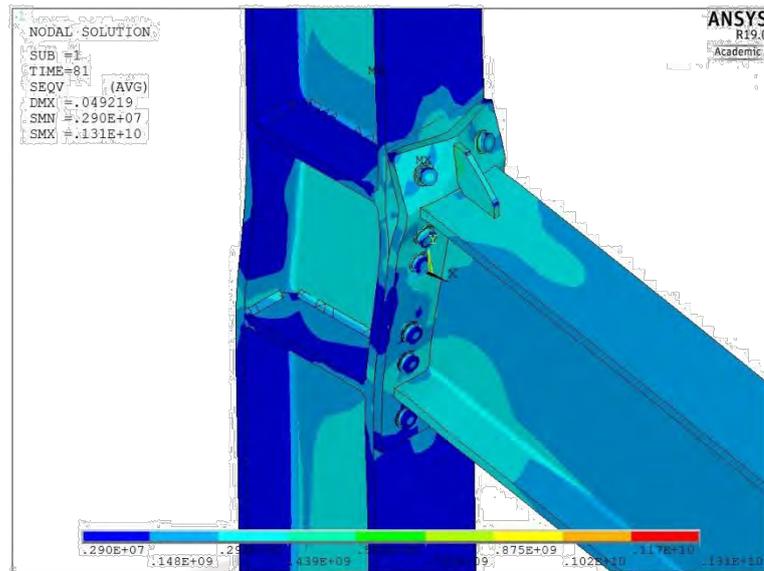


Fig. 3.9: Esfuerzo de von Mises en la conexión, Caso 97.

3.3.1 Análisis de Sensibilidad de Malla

Se realizó un análisis de sensibilidad de malla a fin de evaluar su independencia con respecto a los resultados obtenidos. El Caso 30 fue elegido para realizar esta evaluación, las características de cada malla se indican en la Tabla 3.8. La primera evaluación consistió en comparar la curva Momento-rotación de acuerdo al tamaño de malla, ver fig. 3.10. En la segunda evaluación se comparó la convergencia de la rigidez inicial en función del número de elementos de la malla, ver fig. 3.11, observándose que a medida que se incrementa el número de elementos la rigidez inicial converge a un valor casi constante. De ambas evaluaciones se decidió utilizar la malla 04 debido a que presenta buena convergencia empleando un número aceptable de elementos.

Tabla 3.8: Características de cada malla evaluada.

Tamaño de Malla	Elementos	Nodos	Grados de Libertad
01	74615	122825	368013
02	86923	140226	420186
03	120269	198130	593838
04	151246	249870	748740
05	175586	288867	865755
06	210062	339791	1018299
07	281881	447901	1341813

En el Anexo A se muestran los valores para cada variable geométrica de este caso.

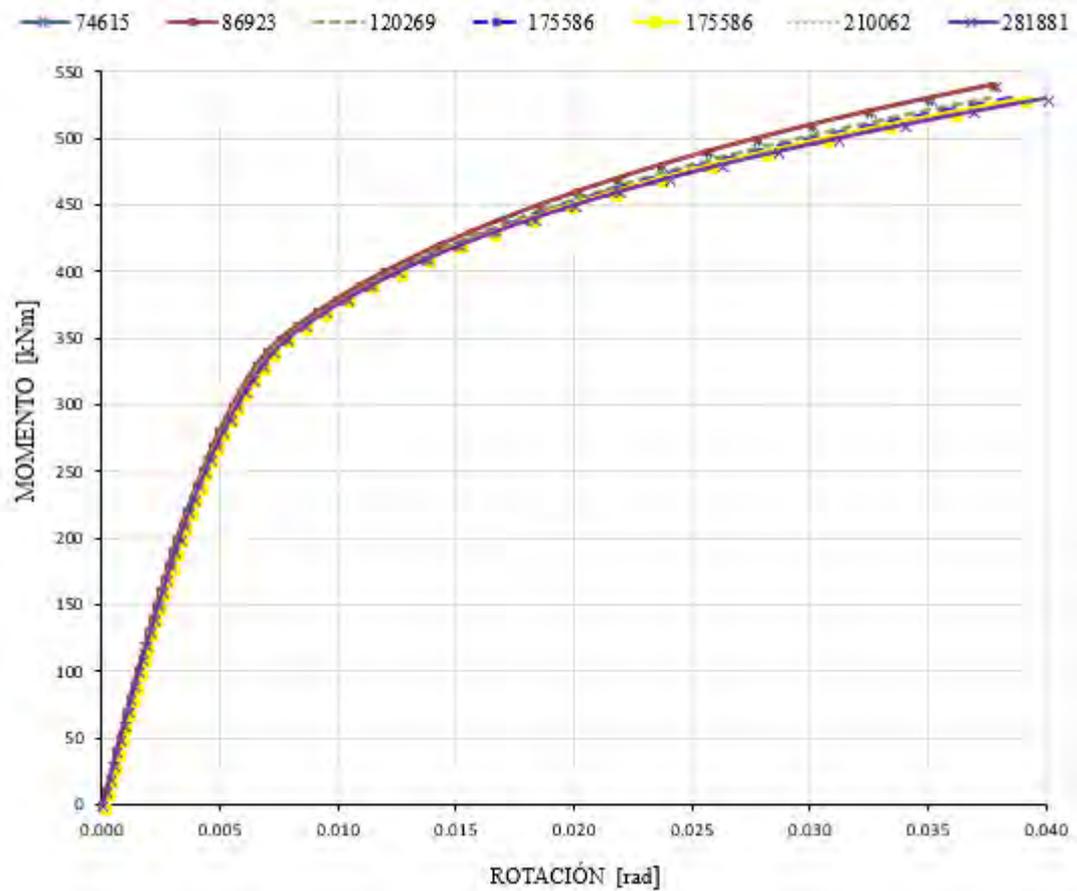


Fig. 3.10: Comparación de curvas Momento-rotación según el tamaño de malla.

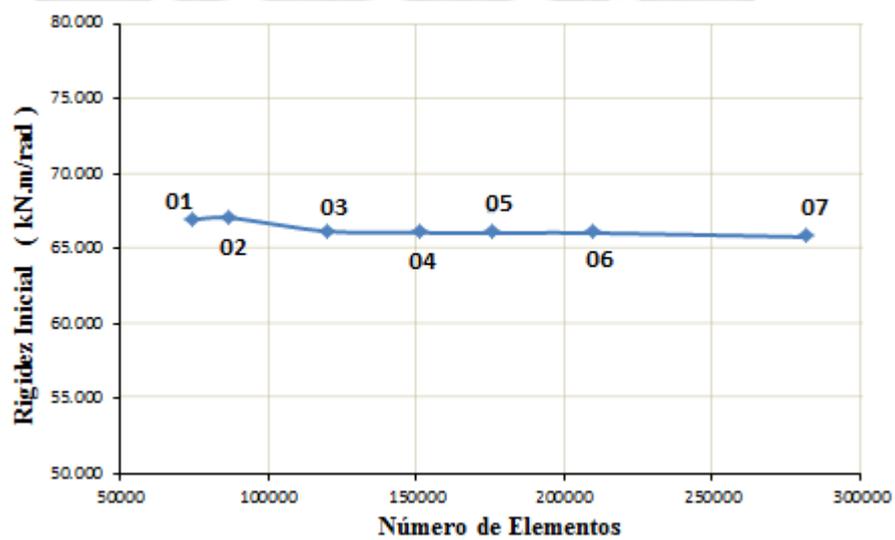


Fig. 3.11: Comparación entre valores de rigidez inicial en función del número de elementos.

3.3.2 Validación de Resultados

Los ensayos realizados por Shi et al. (2007) fueron empleados a fin de validar el modelo numérico desarrollado, en tal sentido las cinco conexiones ensayadas por estos autores fueron parametrizadas numéricamente y luego se compararon las curvas Momento-rotación experimentales y las curvas obtenidas según el modelo numérico. Estas curvas se muestran en las figuras 3.12 a 3.16.

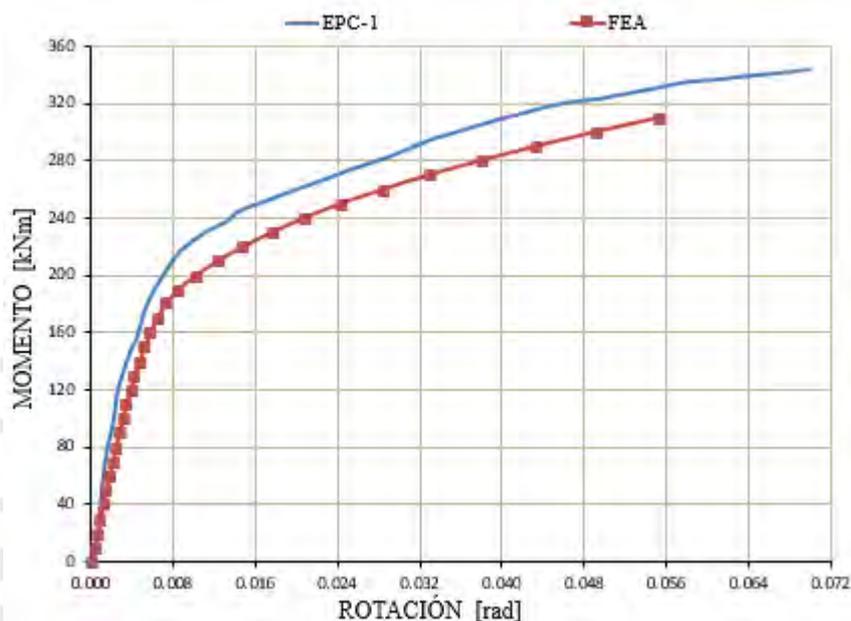


Fig. 3.12: Comparación de Curvas M- θ : EPC-1 – FEA.

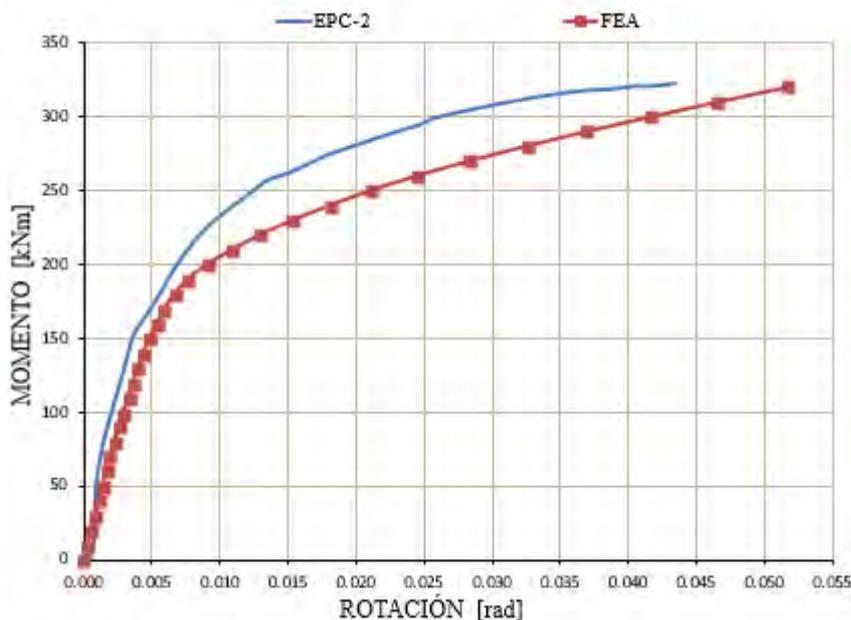


Fig. 3.13: Comparación de Curvas M- θ : EPC-2 – FEA.

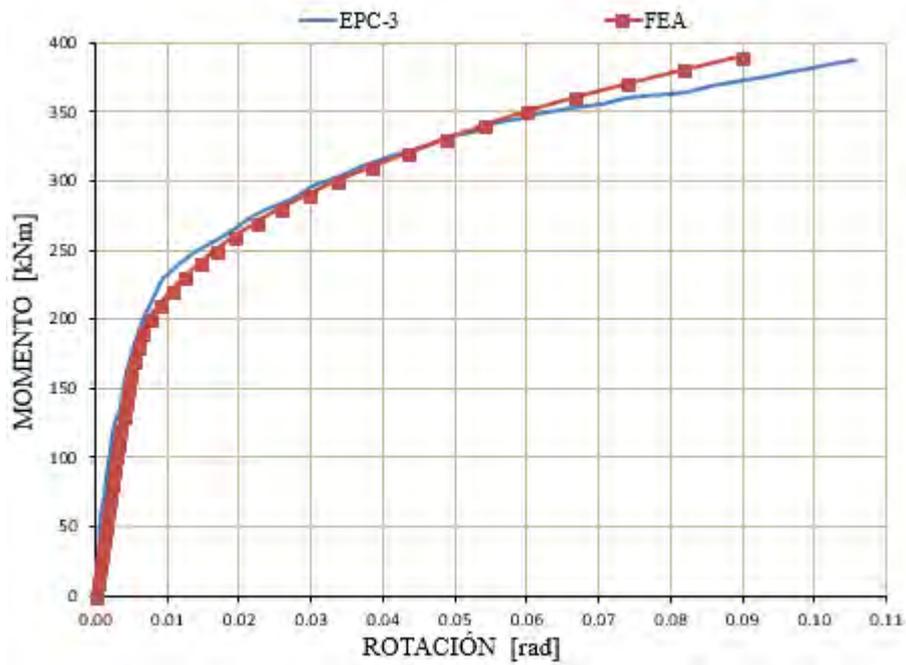


Fig. 3.14: Comparación de Curvas M- θ ; EPC-3 – FEA.

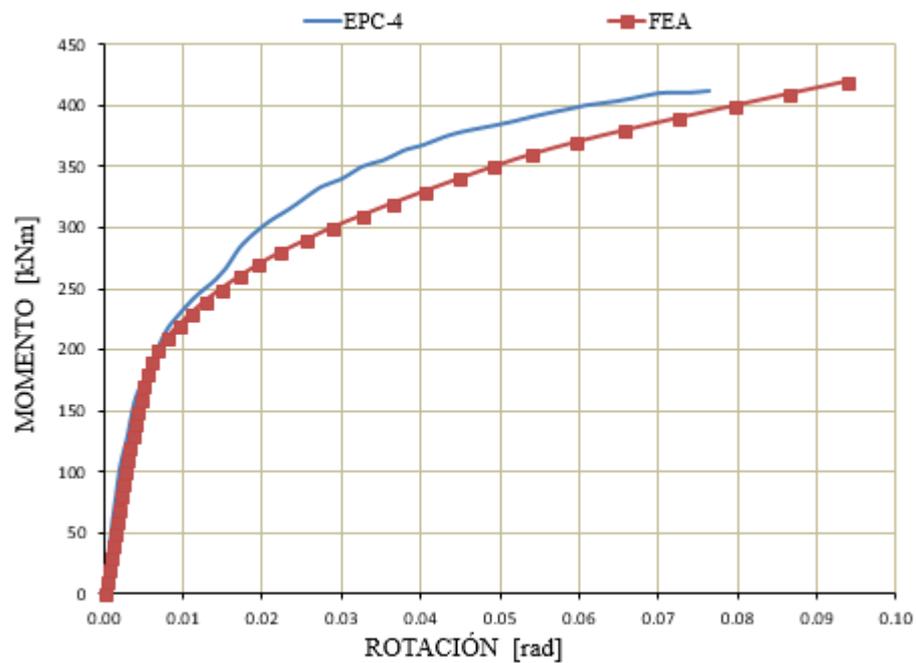


Fig. 3.15: Comparación de Curvas M- θ ; EPC-4 – FEA.

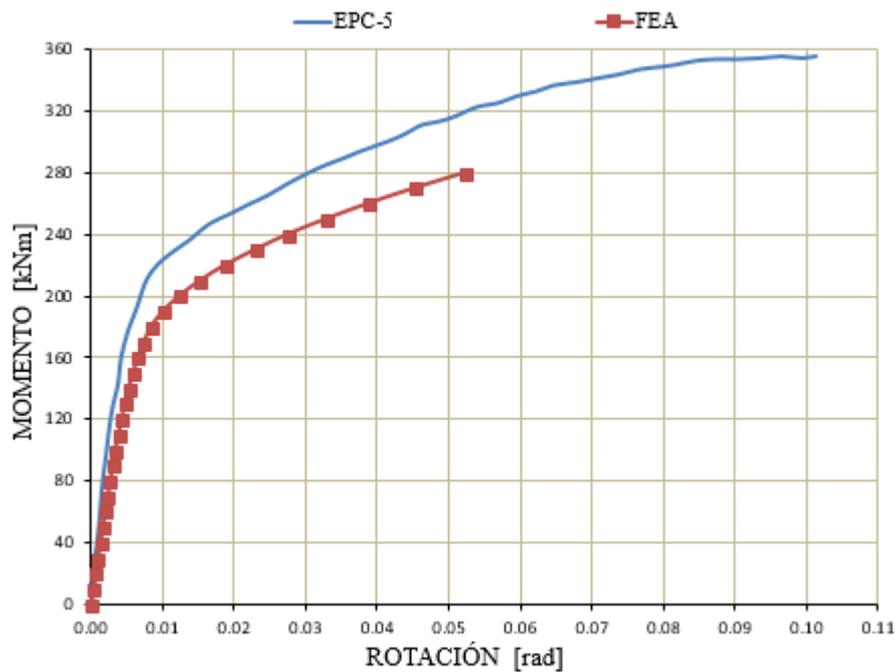
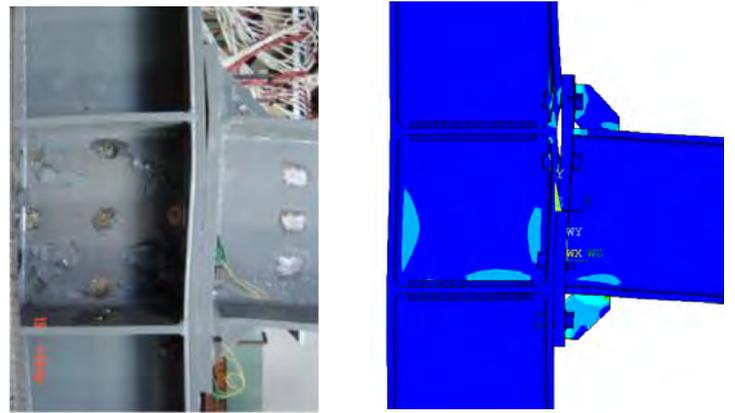


Fig. 3.16: Comparación de Curvas M- θ ; EPC-5 – FEA.

Puede observarse que el modelo numérico desarrollado presenta un comportamiento similar al ensayo experimental de validación, a excepción del ensayo EPC-5. Esto puede deberse a la diferencia de propiedades mecánicas de los materiales entre ambas o a la omisión de ciertos parámetros geométricos en el modelo numérico, también puede deberse a imprecisiones en el ensayo experimental, ya que si comparamos los resultados de este ensayo con el caso EPC-2, se observa que presentando este un diámetro mayor de perno, el valor de su rotación es mucho menor, ver fig. 3.4.

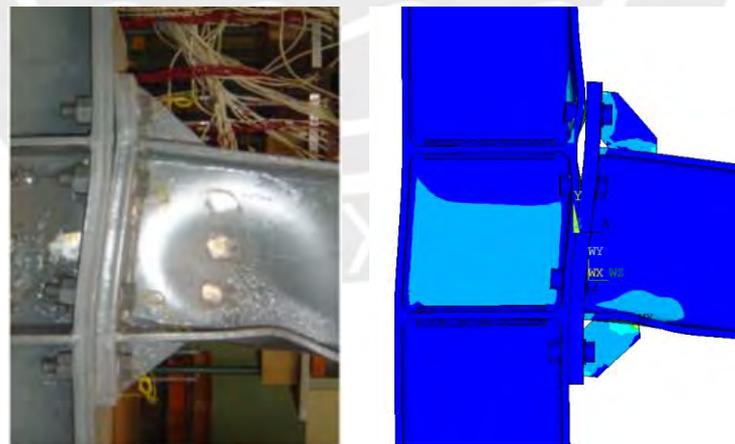
En la fig.3.17 se compara cualitativamente las deformaciones que presentan los casos EPC-1, EPC-3 y EPC-4 según el ensayo experimental y el modelo numérico, también puede observarse comportamientos similares. De esta forma el modelo numérico construido queda validado.



a)



b)



c)

Fig. 3.17: Comparación cualitativa de deformaciones, Experimental y FEA
a) EPC-1 b) EPC-3 c) EPC-4

CAPÍTULO 4

CONSTRUCCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS

En el presente capítulo se desarrolla la metodología a emplear a fin de construir los modelos matemáticos capaces de predecir el comportamiento estructural de la conexión tipo chapa frontal extendida, asimismo se muestran y analizan los modelos encontrados aplicando esta metodología.

4.1 Procedimiento para la construcción de Modelos Matemáticos

Los modelos matemáticos que predigan el comportamiento de la conexión tipo chapa frontal extendida se determinarán empleando el análisis de regresión no lineal múltiple. Para este fin se dispone de una amplia base de datos elaborada realizando parametrizaciones de los principales parámetros geométricos de esta conexión bajo diferentes valores de carga. Los modelos matemáticos obtenidos permitirán predecir los siguientes comportamientos:

- M_u : Momento resistente último (kN.m).
- M_0 : Momento de referencia (kN.m).
- θ_0 : Capacidad rotacional de referencia (rad).
- θ_u : Capacidad rotacional última (rad).
- R_{ki} : Rigidez inicial (kN.m/rad).

- R_{kp} : Rigidez plástica (kN.m/rad).
- Curva característica Momento-rotación ($M-\theta_r$).

La evaluación de la curva Momento-rotación se realizará mediante el Modelo de Richard y Abbott (1975), ecuación 1.5 mostrada en el Capítulo 1, puesto que es la que mejor representa el comportamiento de la curva Momento-rotación, debido a que además de considerar la rigidez inicial R_{ki} incluye también la rigidez de endurecimiento por deformación o plástica R_{kp} , favorable si queremos caracterizar la curva Momento-rotación de conexiones tipo chapa frontal, las cuales presentan un comportamiento altamente semirrígido, por lo cual el modelo de Kishi y Chen no sería el más práctico. Adicionalmente según Attiogbe y Morris (1991) este modelo presenta mejor ajuste que el modelo desarrollado por Ramberg y Osgood. En la fig. 4.1 se muestra la curva característica Momento-rotación ($M-\theta_r$) y los parámetros que conforman este modelo.

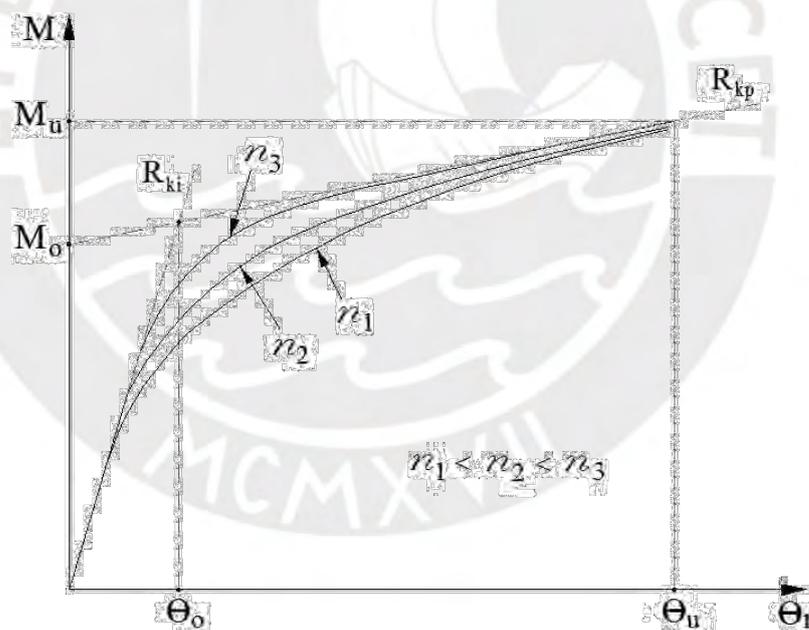


Fig. 4.1: Curva Momento-rotación

Entre los méritos de este modelo podemos citar (Kishi et al. 2004):

- (1) Solo se compone de cuatro parámetros y su formulación es simple y directa, además estos parámetros tienen un claro significado físico.

(2) Requiere menor tiempo computacional en un análisis estructural no lineal, debido a que tanto el momento, la rotación y la rigidez pueden ser obtenidos de la ec. 1.5.

(3) Si los parámetros R_{ki} , R_{kp} y M_0 fueran determinados por un análisis estructural simple, se podría determinar una ecuación empírica para el parámetro de forma n ajustando la ecuación 1.5 con datos disponibles de la curva Momento-rotación.

4.1.1 Definición de Parámetros en la Base de Datos

Los valores de M_u , M_0 , θ_u , θ_0 , R_{ki} , R_{kp} y n para cada curva Momento-rotación en la base de datos será obtenida como se indica:

Momento último M_u : Es el valor del máximo momento resistente obtenido cuando los materiales de la conexión alcanzaron su deformación límite, 21% de deformación máxima para los materiales de la conexión y 14% para el material de los pernos.

Momento de referencia M_0 : Es el valor donde la línea que representa a la rigidez plástica interseca al eje de momento en la curva $M-\theta_r$, ver fig. 4.1.

Rotación última θ_u : Es el valor de la máxima rotación originada debido a la acción del momento último M_u .

Rotación de referencia θ_0 : Es el valor de rotación debido a la acción del momento de referencia M_0 . Tanto este valor como el momento de referencia serán útiles para representar la curva $M-\theta_r$ eficientemente. Su valor se obtuvo mediante la ec. 4.1.

$$\theta_0 = M_0 / (R_{ki} - R_{kp}) \quad (4.1)$$

Rigidez Inicial R_{ki} : El valor de la rigidez inicial se define como la relación entre el momento y la rotación respectiva en el tramo elástico de la curva $M-\theta_r$. En vista que los datos del estudio no presentan un tramo perfectamente lineal aun para bajos niveles de carga, el valor de R_{ki} a considerar para cada curva $M-\theta_r$ será el valor de la pendiente que tendría una recta de regresión comprendida entre los puntos iniciales de carga hasta 1/3 del momento resistente último de la conexión.

Rigidez Plástica R_{kp} : La rigidez de endurecimiento plástico a considerar para cada curva $M-\theta_r$ será el valor de la pendiente que tendría una recta de regresión trazada considerando los últimos puntos de la curva $M-\theta_r$.

Parámetro de Forma n : El valor del parámetro de ajuste de la curva n será encontrado para cada grafica $M-\theta_r$, se determinara por el método de los mínimos cuadrados ajustando los valores obtenidos de la ecuación 1.5 con los valores dados en la Base de Datos.

4.1.2 Análisis de Regresión

La técnica de regresión múltiple no lineal será empleada debido al comportamiento altamente no lineal que presentan las conexiones semirrígidas. Las ecuaciones que representen a las variables dependientes a predecir (variables a explicar) serán expresadas en función de las variables independientes (variables explicativas) que corresponden a los parámetros geométricos de la conexión, ambas almacenadas en la Base de datos. La formulación general a emplear es la siguiente:

$$V_i = C_0 (\pi_1)^{C_1} (\pi_2)^{C_2} (\pi_3)^{C_3} \dots \dots \dots (\pi_m)^{C_m} \quad (4.2a)$$

$$V_i = \prod_{j=1}^m C_0 \pi_j^{C_j} \quad (4.2b)$$

Donde V_i corresponde a cada variable dependiente a predecir (M_u , M_0 , θ_u , θ_0 , R_{ki} , R_{kp} , y n); π_j las variables independientes que variarán según las propiedades geométricas de la conexión; C_j exponente que indica el efecto del j -ésimo parámetro geométrico en la respuesta estructural de la conexión; C_0 es una constante y m es el número de parámetros independientes considerados. Entonces para una determinada cantidad de valores V_i y π_j conocidos, se formaría un sistema de ecuaciones no lineal, del cual se desconoce el valor de las variables C_0 y C_j . Si aplicamos logaritmos a ambos lados de la ecuación 4.2a, esta puede ser expresada de la siguiente forma:

$$\ln V_i = \ln C_0 + \sum_{j=1}^m C_j \ln \pi_j \quad (4.2c)$$

Observando la ecuación 4.2c se aprecia que se ha pasado de un sistema de ecuaciones no lineal a un sistema lineal, pudiendo resolverse aplicando análisis de regresión lineal. Expresando este sistema en forma matricial, donde se ha considerado $\ln C_0 = C'_0 \ln e$, obtenemos la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} \ln V_1 \\ \ln V_2 \\ \ln V_3 \\ \ln V_4 \\ \vdots \\ \ln V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln e & \ln \pi_1^{(1)} & \ln \pi_2^{(1)} & \ln \pi_3^{(1)} & \dots & \ln \pi_m^{(1)} \\ \ln e & \ln \pi_1^{(2)} & \ln \pi_2^{(2)} & \ln \pi_3^{(2)} & \dots & \ln \pi_m^{(2)} \\ \ln e & \ln \pi_1^{(3)} & \ln \pi_2^{(3)} & \ln \pi_3^{(3)} & \dots & \ln \pi_m^{(3)} \\ \ln e & \ln \pi_1^{(4)} & \ln \pi_2^{(4)} & \ln \pi_3^{(4)} & \dots & \ln \pi_m^{(4)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \ln e & \ln \pi_1^{(n)} & \ln \pi_2^{(n)} & \ln \pi_3^{(n)} & \dots & \ln \pi_m^{(n)} \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} C'_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ \vdots \\ C_m \end{pmatrix} \quad (4.3a)$$

Representando este sistema matricial en forma simbólica, ecuación 4.3b:

$$\mathbb{V} = \mathbb{III} * \mathbb{C} \quad (4.3b)$$

Para nuestro caso se desea determinar los valores del vector \mathbb{C} , cuya solución está dada por la siguiente expresión:

$$\mathbb{C} = (\mathbb{III}^T \mathbb{III})^{-1} (\mathbb{III}^T \mathbb{V}) \quad (4.3c)$$

Finalmente estos términos serán los exponentes que permitan expresar las variables dependientes V_i en función de las variables independientes π_i , ecuación 4.3d.

$$V_i = e^{C'_0} (\pi_1)^{C_1} (\pi_2)^{C_2} (\pi_3)^{C_3} \dots \dots \dots (\pi_m)^{C_m} \quad (4.3d)$$

Entonces para cada variable dependiente considerada se tendrá:

$$M_0 = \prod_{j=1}^m A \pi_j^{t_j} \quad (4.4a)$$

$$M_u = \prod_{j=1}^m B\pi_j^{u_j} \quad (4.4b)$$

$$\theta_0 = \prod_{j=1}^m C\pi_j^{v_j} \quad (4.4c)$$

$$\theta_u = \prod_{j=1}^m D\pi_j^{w_j} \quad (4.4d)$$

$$R_{ki} = \prod_{j=1}^m E\pi_j^{x_j} \quad (4.4e)$$

$$R_{kp} = \prod_{j=1}^m F\pi_j^{y_j} \quad (4.4f)$$

$$n = \prod_{j=1}^m G\pi_j^{z_j} \quad (4.4g)$$

Donde: A, B, C, D, E, F y G son constantes por determinar; t_j , u_j , v_j , w_j , x_j , y_j y z_j , son exponentes a determinar. El programa IBM SPSS Statistics 22 fue empleado para obtener los modelos matemáticos debido a su alta confiabilidad y su amplio uso en diferentes investigaciones.

4.1.3 Coeficiente de Determinación R^2

La evaluación de cada modelo matemático se realizará empleando el coeficiente de determinación R^2 . Este estadístico indica que proporción de la variación total en los datos puede ser explicada por el modelo de regresión, ecuación 4.5. El valor en el denominador en esta ecuación indica la suma de cuadrados de la diferencia entre la variable observada Y y su media \bar{Y} (valores de la base de datos), el valor en el numerador expresa la suma de cuadrados de la diferencia entre el valor obtenido del modelo de regresión \hat{Y} y la media de los valores observados \bar{Y} .

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{Y} - \bar{Y})^2}{\sum(Y - \bar{Y})^2} \quad , \quad 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (4.5)$$

Este estadístico es útil para conocer la confiabilidad del modelo, toma valores desde 0 a 1, un valor cercano a 1 significa que nuestro modelo se ajusta muy bien a los datos suministrados, mientras que un valor cercano a cero indica que las ecuaciones obtenidas no pueden explicar la relación entre las variables independientes. Según Cohen et al. (2000) coeficientes de 0.12 hasta 0.42 son de poca utilidad para predicciones, valores de 0.42 a 0.72 brindan predicciones suficientemente precisas para la mayoría de propósitos y coeficientes superiores a 0.72 indican una estrecha relación entre las variables estudiadas y son muy útiles para predicciones individuales o grupales. En este estudio considerando el complejo comportamiento de las conexiones semirrígidas se considerará un valor mínimo de $R^2=0.90$ como aceptable, los modelos planteados que presenten R^2 inferiores a este valor se volverán a formular hasta poder cumplir con el valor especificado.

4.2 Construcción del Modelo Matemático

Se formularon distintos modelos matemáticos para cada variable dependiente (M_u , M_0 , θ_u , θ_0 , R_{ki} , R_{kp}), seleccionando el modelo que mejor se ajustó al comportamiento de la conexión, buscando siempre un coeficiente de determinación igual o superior a 0.9. Finalmente, en cada modelo seleccionado se evaluó cada variable independiente (parámetros geométricos) a fin de encontrar su efecto e importancia. Las variables independientes que no afecten significativamente a los resultados de los modelos de predicción no fueron consideradas y el análisis de regresión fue repetido a fin de encontrar ecuaciones más simplificadas sin dejar de perder precisión.

Las propiedades mecánicas y geométricas de la conexión se muestran en las Tablas 3.4, 3.5, 3.6 y en la fig. 3.8 del Capítulo 3. Los modelos matemáticos obtenidos en el presente estudio solo se encuentran en función de los parámetros geométricos de la conexión, debido a que las propiedades mecánicas de los materiales se consideraron constantes, cabe resaltar que la exactitud de los modelos matemáticos de predicción dependerá de la consideración o no de estas propiedades.

Además de los parámetros geométricos indicados en la Tabla 3.7, se han adicionado los parámetros P1, P2 y P3 con el fin de mejorar los resultados de la regresión, ver fig. 4.2. El parámetro P1 es la distancia vertical entre los tornillos adyacentes al ala

de la viga, el parámetro P2 define el brazo de palanca desde el punto C hacia la fila de tornillos interiores más próxima al ala superior de la viga, esto debido a que en las simulaciones numéricas realizadas se observó que estos tornillos están entre los que más carga soportan. Un tercer parámetro P3 representando la rigidez a flexión de la placa frontal en la dirección horizontal fue añadido, con el fin de mejorar los resultados (Kukreti et al. 1990).

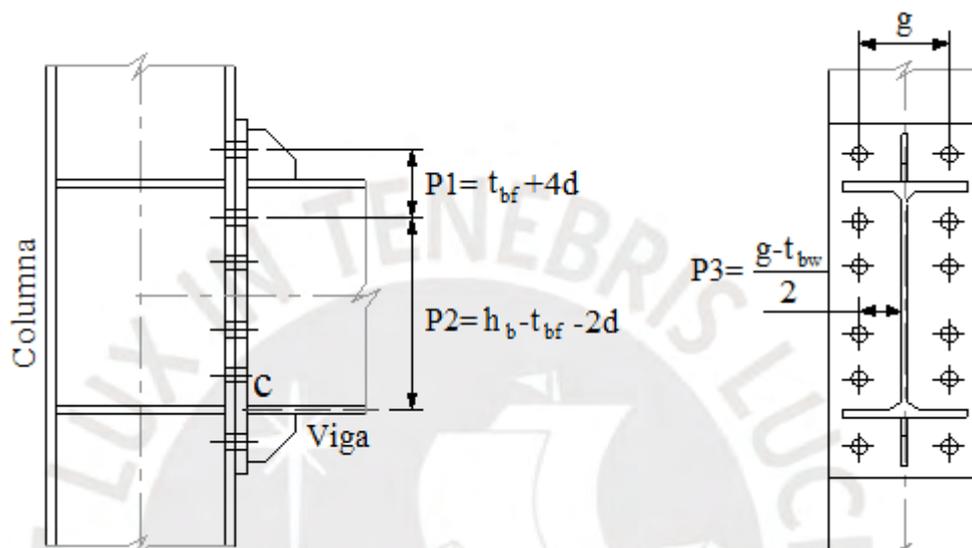


Fig. 4.2: Parámetros adicionales

4.2.1 Modelos Matemáticos Obtenidos

Los modelos obtenidos como consecuencia de análisis de regresión se muestran en las ecs. 4.6 a 4.12, las unidades de cada parámetro geométrico están en mm.

Momento último M_u [kN.m]:

$$M_u = 0.018 \times h_c^{0.082} \times b_c^{-1.201} \times t_{cf}^{0.461} \times t_{cw}^{0.092} \times h_b^{1.111} \times b_b^{0.016} \times t_{bw}^{0.156} \dots \\ \dots \times d^{1.687} \times n_t^{0.113} \times (g - t_{bw})^{0.596} \times (h_b - t_{bf} - 2d)^{-0.097} \quad (4.6)$$

Momento de referencia M_0 [kN.m]:

$$M_0 = 0.315 \times h_c^{0.277} \times b_c^{-2.398} \times t_{cf}^{0.461} \times t_{cw}^{0.026} \times h_b^{-2.098} \times b_b^{-0.149} \times t_{bf}^{-0.182} \times t_{bw}^{0.506} \dots \\ \dots \times d^{2.729} \times n_t^{0.106} \times (g - t_{bw})^{1.409} \times (h_b - t_{bf} - 2d)^{2.475} \quad (4.7)$$

Capacidad de rotación última θ_u [10^3 rad.]:

$$\theta_u = 1.106 x h_c^{-0.589} x b_c^{0.773} x t_{cf}^{-1.032} x t_{cw}^{-0.40} x h_b^{-0.502} x b_b^{-0.13} x t_{bf}^{-0.75} x t_{bw}^{-0.227} \dots \\ \dots x d^{-1.901} x n_t^{0.103} x (g - t_{bw})^{-0.337} x (h_b - t_{bf} - 2d)^{-0.274} x (t_{bf} + 4d)^{4.651} \quad (4.8)$$

Capacidad de rotación de referencia θ_0 [10^3 rad.]:

$$\theta_0 = 290\,000 x h_c^{-0.324} x b_c^{-2.312} x t_{cf}^{-0.392} x t_{cw}^{-0.392} x h_b^{0.546} x b_b^{-0.162} x t_{bf}^{0.586} \dots \\ \dots x t_{bw}^{0.149} x d^{5.469} x n_t^{0.110} x (g - t_{bw})^{1.723} x (h_b - t_{bf} - 2d)^{-0.799} x (t_{bf} + 4d)^{-4.216} \quad (4.9)$$

Rigidez inicial R_{ki} [kN.m/rad.]:

$$R_{ki} = 0.036 x h_c^{0.634} x b_c^{-0.518} x t_{cf}^{1.352} x h_b^{1.365} x b_b^{0.119} x t_{bw}^{0.101} x d^{0.261} \quad (4.10)$$

Rigidez plástica R_{kp} [kN.m/rad.]:

$$R_{kp} = 0.027 x h_c^{0.207} x b_c^{-3.440} x t_{cf}^{0.413} x t_{cw}^{1.297} x h_b^{1.864} x b_b^{1.090} x t_{bf}^{0.947} x t_{bw}^{-0.611} \dots \\ \dots x d^{-0.087} x n_t^{0.20} x (g - t_{bw})^{1.530} \quad (4.11)$$

Factor de forma n [Adimensional]:

$$n = 27\,100 x h_c^{-0.592} x b_c^{-0.263} x t_{cf}^{-0.147} x t_{cw}^{0.127} x h_b^{-0.898} x b_b^{0.138} x t_{bf}^{-0.342} x t_{bw}^{0.367} \dots \\ \dots x d^{1.442} x n_t^{-0.198} x (g - t_{bw})^{-0.156} x (h_b - t_{bf} - 2d)^{-5.569} x (t_{bf} + 4d)^{-0.344} \quad (4.12)$$

4.2.2 Análisis de los Modelos Matemáticos Obtenidos

Se puede observar de la expresión del Momento último, ec. 4.6, como era de esperarse el aumento en las propiedades geométricas de la conexión tiene relación directa con el aumento en la resistencia a momento, siendo el diámetro de pernos el que más influencia brinda, sin embargo, el ancho de la columna presenta una relación

inversa, esto debido a que su incremento ocasiona una disminución en el factor que caracteriza a la resistencia a flexión. La no inclusión del espesor del ala de la viga en la expresión no necesariamente implica su nula influencia, sino que en comparación con el espesor del alma de la viga esta última presenta mucha mayor influencia, recordar también que la relación entre espesores del ala y alma de la viga esta entre 1.42 y 1.79. La expresión para el Momento de Referencia ec. 4.7, presenta entre sus parámetros más influyentes el diámetro del perno y el ancho de la columna, presentando menor influencia el espesor del ala de la columna.

En el valor de la Rotación última representada por la ec. 4.8 se observa que su valor está fuertemente relacionado con los peraltes de viga y columna, además del espesor del ala de la viga y el diámetro de tornillos. En la expresión de la Rotación de referencia, ec. 4.9, se observan comportamientos similares. En estos dos modelos se incluyó el parámetro P3 correspondiente a la separación vertical entre los tornillos adyacentes al ala de la viga, esto para mejorar los resultados de predicción, ya que el coeficiente de determinación presentaba valores menores a 0.9.

Con respecto al valor de la Rigidez inicial, ec. 4.10, se observa que está fuertemente relacionada con los peraltes de la viga y columna además del espesor del ala de esta, durante el proceso de regresión se observó que la relación con el espesor del alma de la columna y ala de la viga era despreciable por lo que la regresión se volvió a realizar sin estos parámetros, el número de hileras de pernos también fue desestimado debido a su poca influencia, esto se debe a que en el rango elástico de la curva Momento-rotación gran parte de la carga es soportada por los pernos más cercanos al ala de la viga, caso contrario sucede en el rango plástico de la curva, donde debido a las grandes deformaciones el resto de hileras de pernos empezarán a tomar mayores cargas. El valor de la Rigidez Plástica también indica poca influencia del diámetro de pernos, pero si presenta fuerte relación con el factor que caracteriza la rigidez a flexión. El valor del Factor de forma, ec. 4.12, está fuertemente relacionado al valor del peralte de la viga y al espesor de alma de la viga.

Los parámetros correspondientes al espesor y ancho de la placa frontal (t_{ep} y b_{ep}) no fueron incluidos en los modelos matemáticos debido a que su valor se consideró igual al espesor del ala de la columna y al ancho de esta, variables ya consideradas.

De la misma manera los espesores tanto del rigidizador en la columna como el ubicado entre la viga y la placa frontal (t_{rh} y t_{rv}) no fueron considerados dentro de las variables independientes, ya que su valor es igual al espesor del ala y alma de la viga. Los parámetros e , e_c y p tampoco fueron considerados debido a que su valor se incluye dentro de la variable d . Las holguras de los agujeros no fueron tomadas en cuenta, esto con el fin de reducir la cantidad de términos en cada modelo matemático.

Según lo observado podemos variar el comportamiento de la conexión (rígido a semirrígido) variando determinados parámetros geométricos, esto nos permite adecuarnos al requerimiento de diseño que necesitamos.

Los Coeficientes de determinación R^2 encontrados en cada modelo se muestran en la Tabla 4.1, como se mencionó anteriormente este estadístico varía de 0 a 1, mientras más cercano su valor a 1 nos indica que los modelos matemáticos encontrados pueden explicar la relación entre las variables, siendo más confiable. El valor mínimo encontrado fue de $R^2=0.59$, correspondiente a la variable n , sin embargo, considerando el comportamiento altamente no lineal de la conexión este mínimo valor encontrado sigue siendo aceptable para validar el modelo. El valor más alto encontrado fue de $R^2=0.99$, correspondiente a la rigidez inicial y al momento último.

Tabla 4.1: Coeficientes de Determinación

Variable a predecir	Coef. Determinación R^2
M_u	0.99
M_0	0.97
θ_u	0.97
θ_0	0.96
R_{ki}	0.99
R_{kp}	0.94
n	0.59

CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta la evaluación de los modelos matemáticos construidos comparando los resultados obtenidos de 10 nuevas simulaciones con los resultados que se obtienen aplicando los modelos matemáticos de predicción, asimismo estos son comparados con el modelo propuesto por Frye y Morris y el desarrollado por el Eurocódigo 3.

5.1 Evaluación de los Modelos Matemáticos

Se realizaron 10 nuevas simulaciones considerando el modelo numérico construido con el fin de evaluar los modelos matemáticos obtenidos. Las nuevas simulaciones presentan valores de parámetros geométricos diferentes a las empleadas para realizar el análisis de regresión, sin embargo, estos están dentro de los rangos geométricos considerados para realizar el modelo numérico (Tabla 3.4 y 3.7). Estos parámetros se muestran en la Tabla 5.1.

La Tabla 5.2 muestra los resultados obtenidos de estas nuevas simulaciones. En la Tabla 5.3 se indican los resultados que se obtienen aplicando los modelos matemáticos propuestos considerando la geometría de estas nuevas simulaciones.

Tabla 5.1: Parámetros Geométricos - Nuevas simulaciones FEA

Caso	Columna				Viga					
	Sección	h_c mm	b_c mm	t_{ef} mm	t_{ew} mm	Sección	h_b mm	b_b mm	t_{bf} mm	t_{bw} mm
01	W 310 x 250 x 86	310	254	16.3	9.1	W 310 x 200 x 67	306	204	14.6	8.5
02	W 310 x 310 x 117	314	307	18.7	11.9	W 310 x 250 x 79	306	254	14.6	8.8
03	W 310 x 310 x 129	318	308	20.6	13.1	W 360 x 250 x 110	360	256	19.9	11.4
04	W 310 x 310 x 158	327	310	25.1	15.5	W 360 x 250 x 122	363	257	21.7	13
05	W 360 x 200 x 64	347	203	13.5	7.7	W 360 x 170 x 44.6	352	171	9.8	6.9
06	W 360 x 250 x 110	360	256	19.9	11.4	W 360 x 200 x 72	350	204	15.1	8.6
07	W 360 x 370 x 162	364	371	21.8	13.3	W 360 x 370 x 147	360	370	19.8	12.3
08	W 360 x 370 x 179	368	373	23.9	15	W 460 x 280 x 144	472	283	22.1	13.6
09	W 360 x 370 x 196	372	374	26.2	16.4	W 360 x 370 x 196	372	374	26.2	16.4
10	W 460 x 280 x 177	482	286	26.9	16.6	W 460 x 280 x 158	476	284	23.9	15

Tabla 5.1 (continuación): Parámetros Geométricos - Nuevas simulaciones FEA

Caso	Placa Frontal					Pernos			
	t_{ep} mm	h_{ep} mm	b_{ep} mm	e mm	p mm	g mm	d mm	d_o mm	n_t
01	16.3	514	254	52	78	150	24	26	2
02	18.7	514	307	52	78	203	24	26	2
03	20.6	536	308	44	66	220	20	22	4
04	25.1	603	310	60	90	190	27	30	2
05	13.5	528	203	44	66	115	20	22	4
06	19.9	590	256	60	90	136	27	30	2
07	21.8	536	371	44	66	283	20	22	4
08	23.9	648	373	44	66	285	20	22	6
09	26.2	548	374	44	66	286	20	22	4
10	26.9	684	286	52	78	182	24	26	4

Tabla 5.2: Resultados de nuevas simulaciones FEA.

Caso	M_u kNm	M₀ kNm	θ_u 10³ rad	θ₀ 10³ rad	R_{ki} kNm/rad	R_{kp} kNm/rad
01	380	258	52.66	6.36	42 986	2 388
02	410	290	39.32	6.21	49 895	3 121
03	440	308	20.58	4.70	72 200	6 749
04	670	472	25.73	4.89	104 362	7 960
05	320	226	35.79	5.27	45 533	2 696
06	550	386	37.50	5.08	80 393	4 429
07	440	276	16.37	3.98	79 922	10 460
08	600	358	12.66	3.27	129 767	20 088
09	500	297	15.47	2.98	112 935	13 436
10	910	602	13.37	3.13	216 527	24 022

Tabla 5.3: Resultados aplicando Modelos Matemáticos

Caso	M_u kNm	M₀ kNm	θ_u 10³ rad	θ₀ 10³ rad	R_{ki} kNm/rad	R_{kp} kNm/rad
01	376	275	50.40	6.49	44270	2133
02	399	289	39.13	5.95	50177	3370
03	425	281	20.35	4.34	70391	8016
04	677	476	26.33	4.91	103432	7172
05	335	251	41.31	5.22	45814	2267
06	554	397	41.13	5.10	78740	3457
07	420	273	17.45	3.93	79152	9595
08	613	389	13.05	3.47	127466	16110
09	500	314	13.08	3.09	110459	15514
10	917	655	11.98	3.31	218287	22717

Las Tablas 5.4 a 5.7 muestran las comparaciones de los resultados obtenidos de estas nuevas simulaciones y los modelos matemáticos propuestos.

Tabla 5.4: Comparación de resultados M_u , M_0 : Datos FEA vs Modelo Matemático

Caso	Momento Último M_u (kN.m)			Momento Referencia M_0 (kN.m)		
	Mod. Mat.	FEA	Error %	Mod. Mat.	FEA	Error %
01	376	380	1.14%	275	258	6.66%
02	399	410	2.80%	289	290	0.37%
03	425	440	3.37%	281	308	8.72%
04	677	670	1.04%	476	472	0.86%
05	335	320	4.71%	251	226	11.28%
06	554	550	0.77%	397	386	2.87%
07	420	440	4.52%	273	276	1.33%
08	613	600	2.12%	389	358	8.56%
09	500	500	0.07%	314	297	5.73%
10	917	910	0.79%	655	602	8.90%

Tabla 5.5: Comparación de resultados θ_u , θ_0 : Datos FEA vs Modelo Matemático

Caso	Rotación Última θ_u (10^3 rad)			Rotación Referencia θ_0 (10^3 rad)		
	Mod. Mat.	FEA	Error %	Mod. Mat.	FEA	Error %
01	50.40	52.66	4.30%	6.49	6.36	2.07%
02	39.13	39.32	0.50%	5.95	6.21	4.18%
03	20.35	20.58	1.12%	4.34	4.70	7.70%
04	26.33	25.73	2.32%	4.91	4.89	0.34%
05	41.31	35.79	15.42%	5.22	5.27	1.04%
06	41.13	37.50	9.70%	5.10	5.08	0.33%
07	17.45	16.37	6.54%	3.93	3.98	1.34%
08	13.05	12.66	3.10%	3.47	3.27	6.07%
09	13.08	15.47	15.42%	3.09	2.98	3.40%
10	11.98	13.37	10.41%	3.31	3.13	6.00%

Tabla 5.6: Comparación de resultados R_{ki} , R_{kp} : Datos FEA vs Modelo Matemático

Caso	Rigidez Inicial R_{ki} (kN.m/rad)			Rigidez Plástica R_{kp} (kN.m/rad)		
	Mod. Mat.	FEA	Error %	Mod. Mat.	FEA	Error %
01	44270	42986	2.99%	2133	2388	10.68%
02	50177	49895	0.57%	3370	3121	7.98%
03	70391	72200	2.51%	8016	6749	18.77%
04	103432	104362	0.89%	7172	7960	9.90%
05	45814	45533	0.62%	2267	2696	15.93%
06	78740	80393	2.06%	3457	4429	21.95%
07	79152	79922	0.96%	9595	10460	8.27%
08	127466	129767	1.77%	16110	20088	19.80%
09	110459	112935	2.19%	15514	13436	15.46%
10	218287	216527	0.81%	22717	24022	5.43%

Tabla 5.7: Comparación de resultados n : Datos FEA vs Modelo Matemático

Caso	Parámetro de Ajuste de la Curva (n)		
	Modelo Matemático	FEA	Error %
01	2.66	2.73	2.43%
02	2.53	2.73	7.18%
03	2.48	2.24	10.36%
04	2.64	2.62	0.86%
05	2.98	3.25	8.27%
06	2.56	2.60	1.59%
07	2.25	2.25	0.15%
08	2.08	2.15	3.37%
09	2.22	2.20	1.06%
10	2.28	2.18	4.38%

De las Tablas anteriores se observa que los resultados obtenidos de las 10 nuevas simulaciones presentan un buen acercamiento a los resultados que se obtienen aplicando los modelos matemáticos. Las gráficas 5.1 a 5.10 muestran la comparación de las curvas $M-\theta_r$ construidas según estos 10 casos y la evaluada con los modelos matemáticos para estos mismos casos.

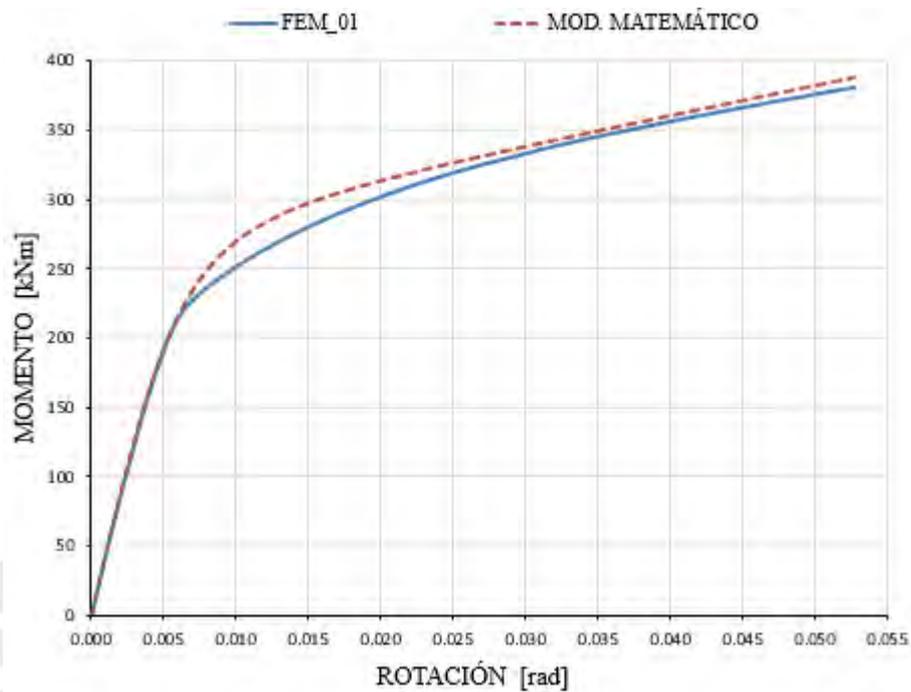


Fig. 5.1: Comparación de curvas $M-\theta_r$, Caso 01

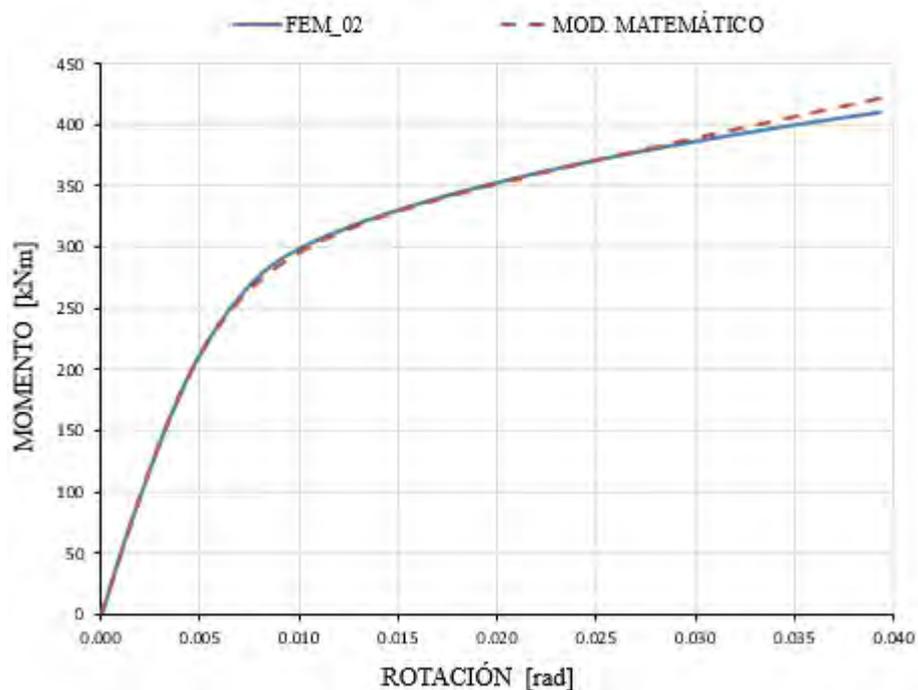
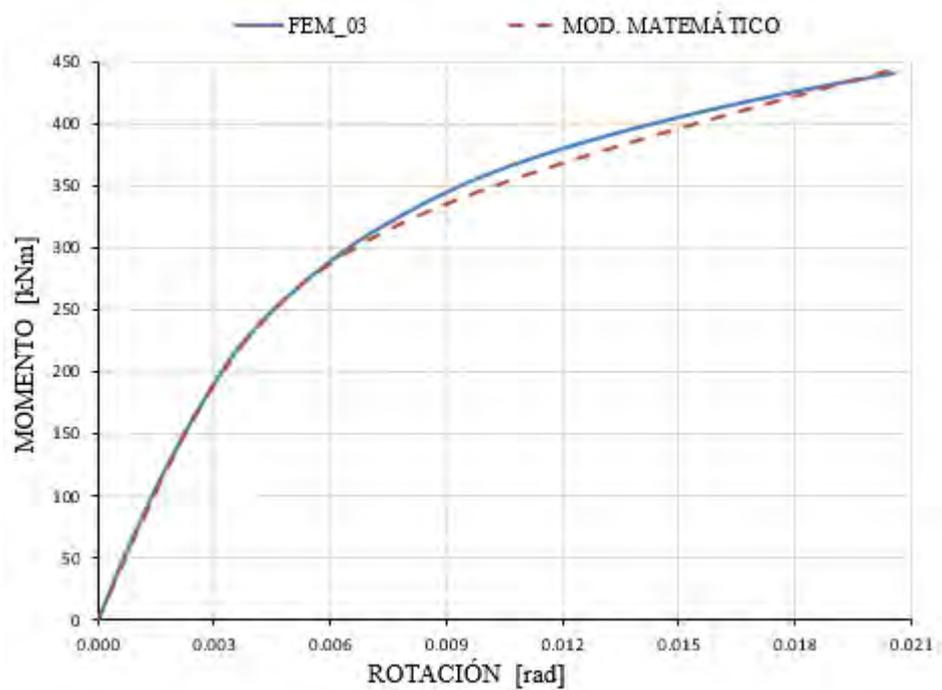
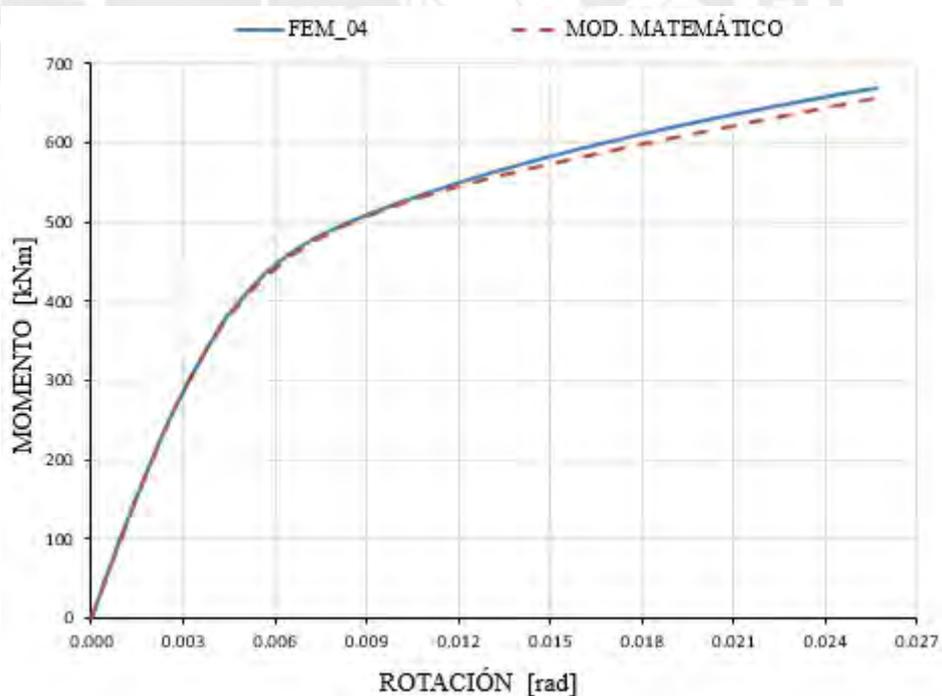


Fig. 5.2: Comparación de curvas $M-\theta_r$, Caso 02

Fig. 5.3: Comparación de curvas M- θ r, Caso 03Fig. 5.4: Comparación de curvas M- θ r, Caso 04

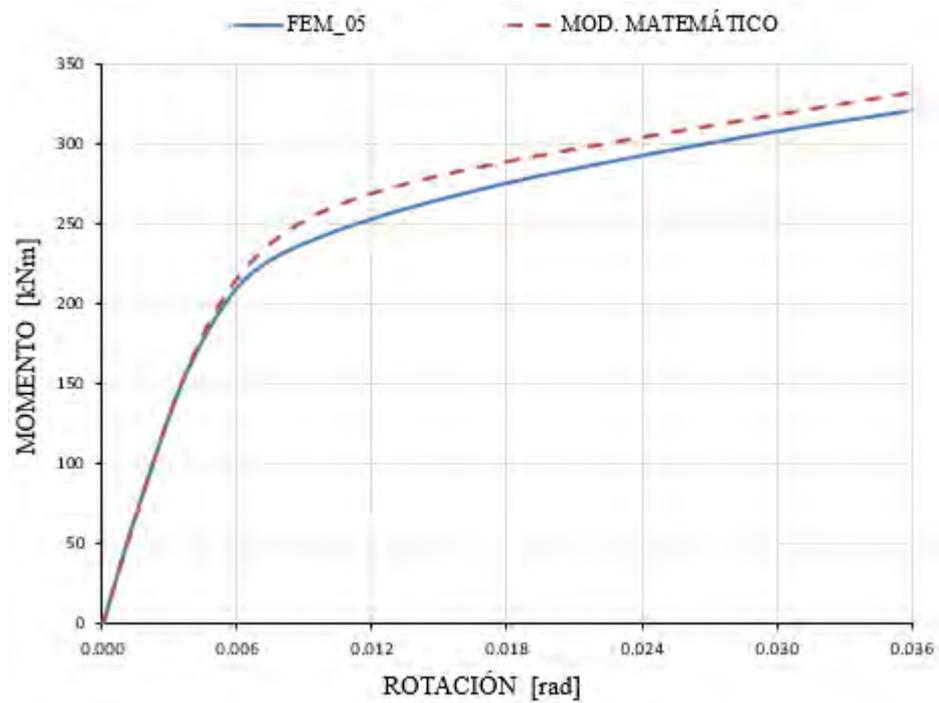


Fig. 5.5: Comparación de curvas M- θ_r , Caso 05

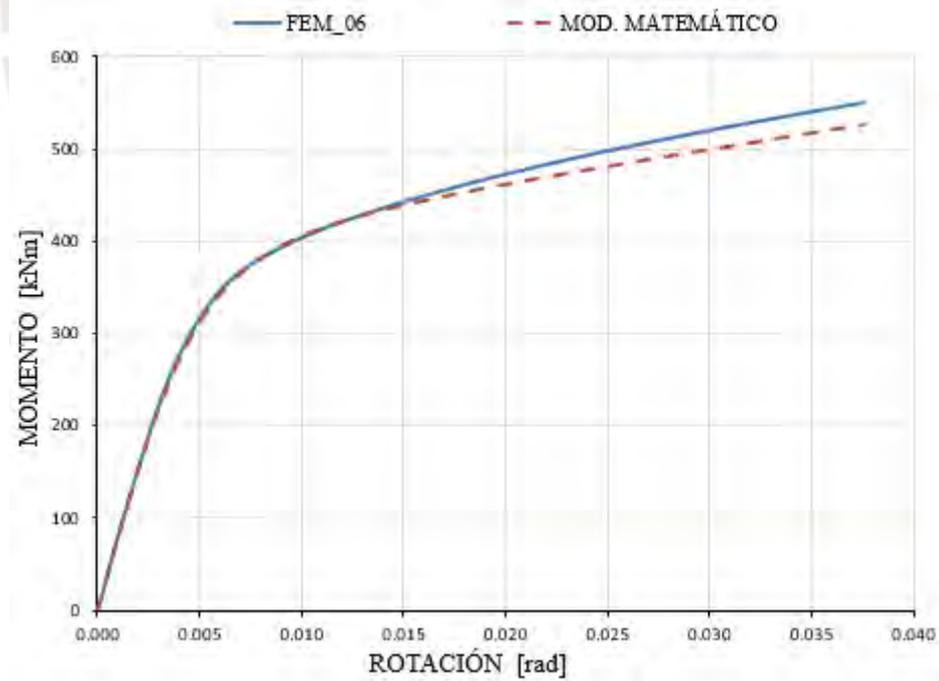
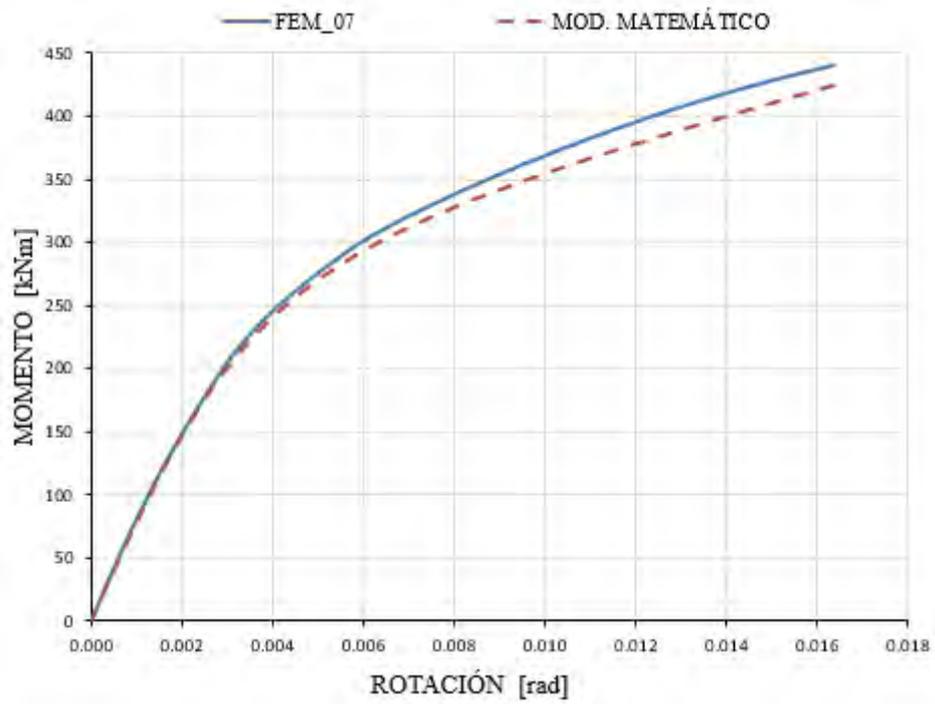
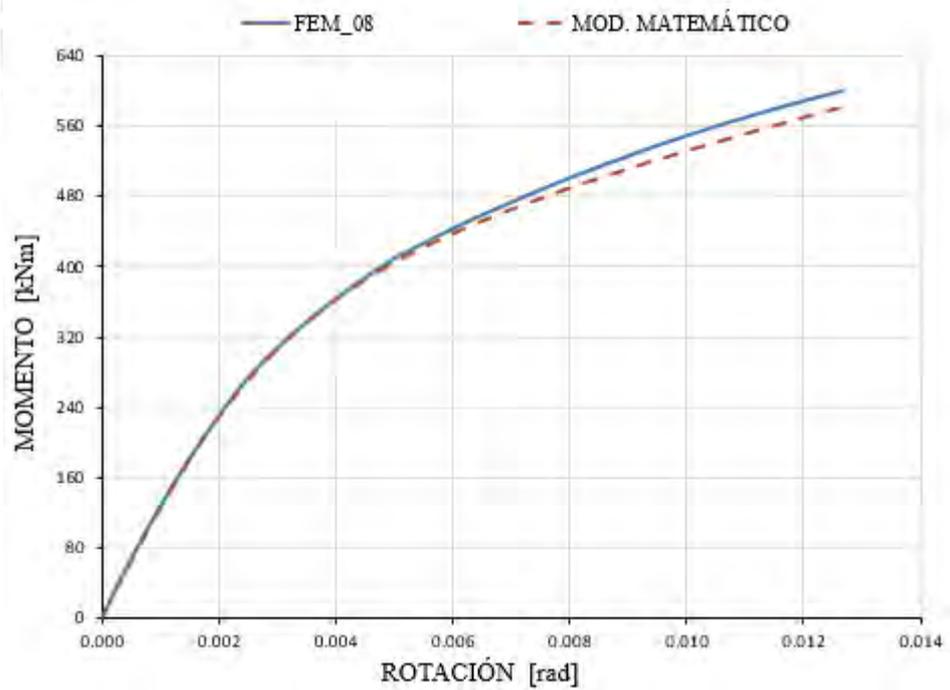


Fig. 5.6: Comparación de curvas M- θ_r , Caso 06

Fig. 5.7: Comparación de curvas M- θ r, Caso 07Fig. 5.8: Comparación de curvas M- θ r, Caso 08

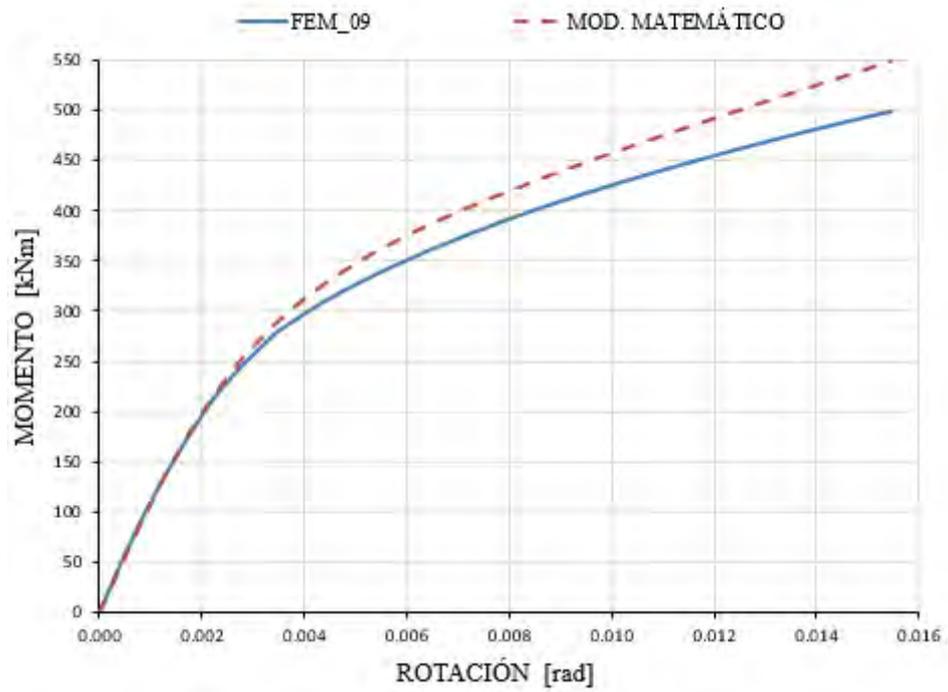


Fig. 5.9: Comparación de curvas M- θ r, Caso 09

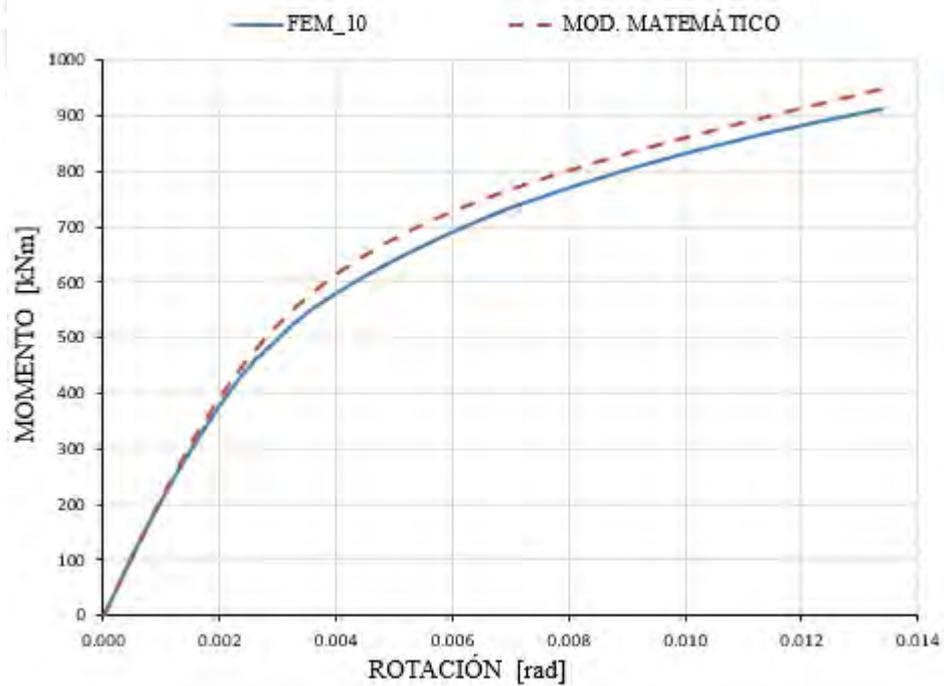


Fig. 5.10: Comparación de curvas M- θ r, Caso 10

5.2 Comparación de resultados con modelos Similares

La curva Momento-rotación obtenida fue contrastada con la curva obtenida aplicando la metodología del Eurocódigo 3 y el modelo propuesto por Frye y Morris (1975), los Casos 01 y 06 serán empleados para realizar esta comparación. Las siguientes expresiones se emplearán para construir la curva Momento-rotación aplicando el Eurocódigo 3 considerando un análisis global elastoplástico:

Cuando: $M_{j,Ed} \leq 2/3M_{j,Rd}$

$$\theta_r = \frac{M_{j,Ed}}{S_{j,ini}} \quad (5.1)$$

Cuando: $2/3M_{j,Rd} \leq M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd}$

$$\theta_r = \frac{(1.5 \cdot M_{j,Ed} / M_{j,Rd})^\psi}{S_{j,ini}} \cdot M_{j,Ed} \quad (5.2)$$

Donde: $M_{j,Rd}$ es el momento resistente de la unión, $M_{j,Ed}$ el momento aplicado, $S_{j,ini}$ la rigidez inicial y ψ un coeficiente que depende de la tipología de la unión, para el caso de conexión tipo chapa frontal su valor es 2.7 según Eurocódigo. Los valores de $M_{j,Rd}$, $M_{j,Ed}$ y $S_{j,ini}$ fueron obtenidos mediante el programa Robot Structural 2018, el cual desarrolla sus cálculos en base al método de los componentes propuesto por esta norma.

La curva Momento-rotación del modelo propuesto por Frye y Morris está dado por la ecuación 5.3, donde $C_1=0.26$, $C_2=536$ y $C_3=1.31 \times 10^{-7}$, $K=d_g^{-2.4} \times t_p^{-0.6}$, su geometría se aprecia en la fig. 5.11.

$$\theta_r = C_1 (KM) + C_2 (KM)^3 + C_3 (KM)^5 \quad (5.3)$$

En las figuras 5.12 y 5.13 se muestran las curvas Momento-rotación para cada modelo de evaluación considerado.

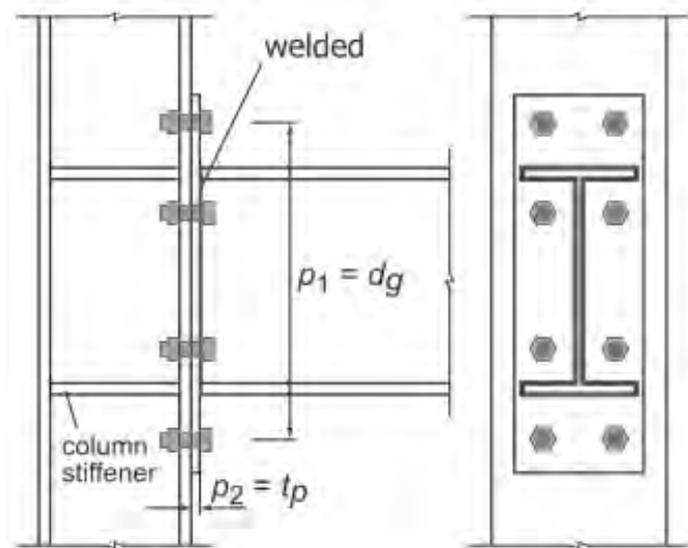


Fig. 5.11: Conexión tipo Chapa Frontal del Modelo de Frye – Morris (tomado de Chen et al. 2011).

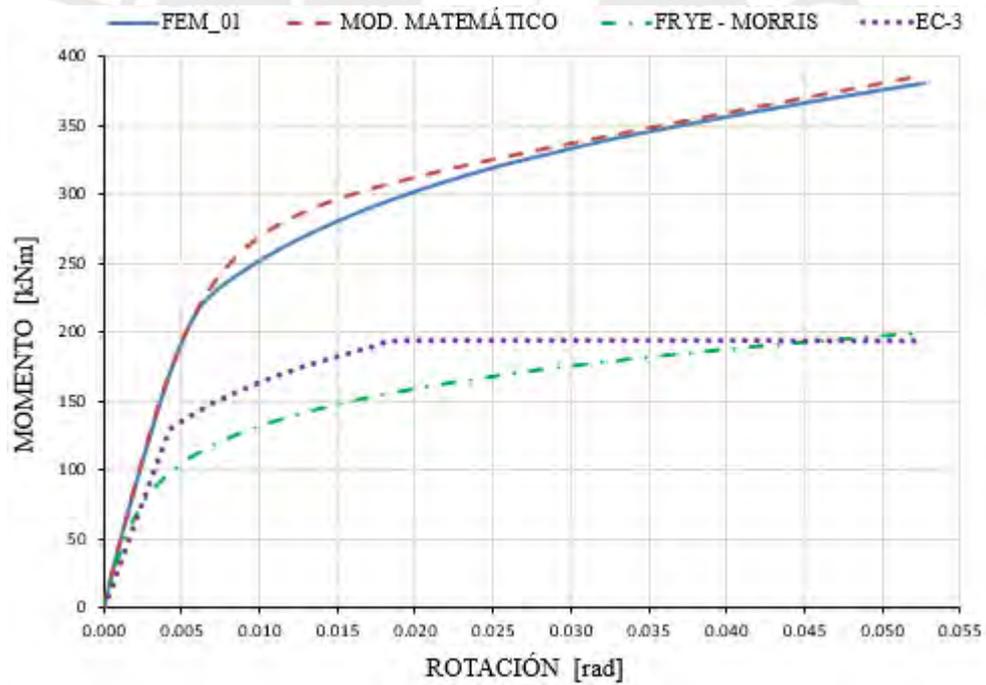


Fig. 5.12: Comparación de curvas M- θ_r , Caso 01

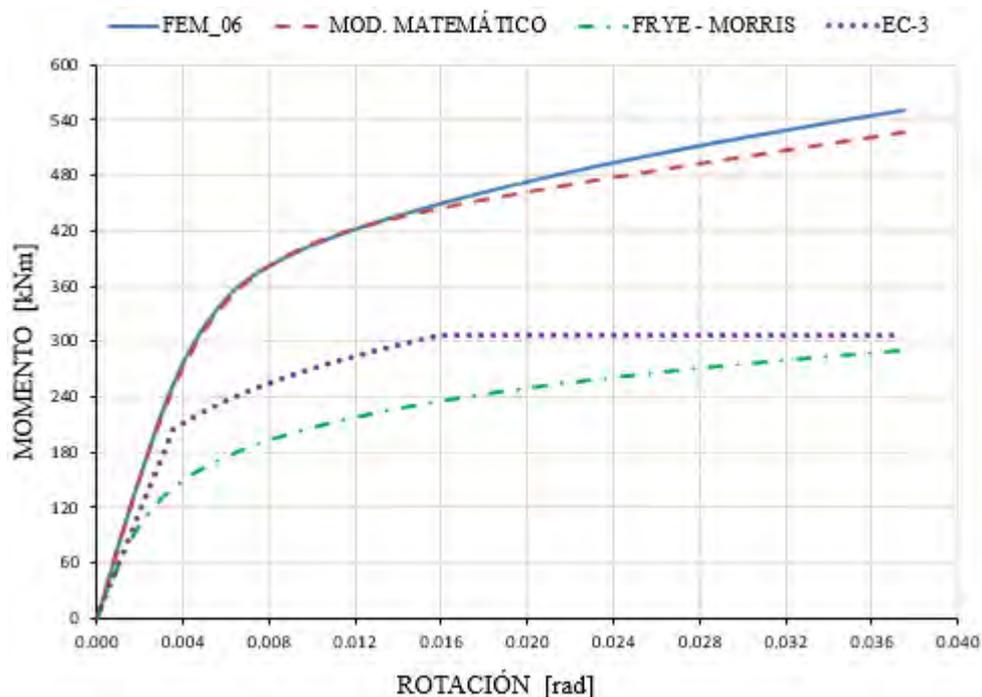


Fig. 5.13: Comparación de curvas M- θ_r , Caso 06

En la Tabla 5.8 se muestra la comparación de la Rigidez inicial obtenida a través del modelo matemático construido y la obtenida mediante el Eurocódigo 3.

Tabla 5.8: Comparación de resultados R_{ki} : Mod. Matemático vs EC-3

Caso	Rigidez Inicial R_{ki} (kN.m/rad)		Error %
	Mod. Mat.	EC-3	
01	44 270	30 946	28
02	50 177	31 391	37
03	70 391	43 929	39
04	103 432	69 000	34
05	45 814	37 727	17
06	78 740	57 579	28
07	79 152	35767	55
08	12 7466	68 041	48
09	110 459	51 336	54
10	218 287	124 689	42

Como puede observarse la curva Momento-rotación del modelo matemático y numérico difiere de la obtenida a través de la metodología del Eurocódigo y del modelo de Frye-Morris, en este último caso puede deberse a que este modelo es para materiales de menor resistencia, en este caso acero A36, mientras que en nuestro caso es un acero A572-Gr.50, falta de consideración de rigidizadores entre viga y placa frontal o por la simpleza de la expresión de Frye - Morris, ya que no considera parámetros importantes, entre ellos el diámetro de pernos, sin embargo presenta valores de rigidez inicial y plástica similares. También debemos tomar en cuenta que la curva del Eurocódigo no considera endurecimiento por deformación del material. La comparación de la rigidez inicial también presenta desviaciones importantes.



CONCLUSIONES

1. El empleo de conexiones semirrígidas presenta entre sus principales benéficos el de reducir el momento en las uniones viga-columnas y la flecha entre sus apoyos si se compara con conexiones empotradas o articuladas, esto se traduce en la utilización de perfiles menos robustos, reduciendo así el peso y los costos, además de presentar un mejor comportamiento ante eventos sísmicos.
2. Existen diferentes modelos matemáticos para representar la curva Momento-rotación de una conexión tipo chapa frontal extendida, siendo el modelo desarrollado por Richard-Abbott el de mayor aplicación por investigadores, debido a su sencillez y buen ajuste de las curvas, además por incluir entre sus parámetros tanto la rigidez elástica como la rigidez plástica, adicionalmente este puede ser fácilmente implementado en un análisis estructural de segundo orden.
3. Se desarrolló un modelo paramétrico en elementos finitos de la conexión tipo chapa frontal extendida rigidizada con el fin de elaborar una amplia Base de Datos, la cual contiene 140 casos de estudio, donde se registran el comportamiento estructural de la conexión para diferentes valores de parámetros geométricos.
4. Se realizó un análisis de regresión no lineal múltiple a los resultados obtenidos en la Base de Datos con el objetivo de desarrollar modelos matemáticos que describan su comportamiento estructural empleando ecuaciones prácticas y sencillas, las que están en función de los principales parámetros geométricos de esta conexión. Estos modelos matemáticos permiten calcular los valores de momento último resistente de la conexión (M_u), momento plástico (M_0), capacidad rotacional (θ_r), rigidez inicial (R_{ki}) y plástica (R_{kp}), además de brindar la característica principal de una conexión, que es curva Momento-rotación ($M-\theta_r$). El análisis de regresión resulto ser una herramienta eficiente en la construcción de estos modelos de predicción.
5. Los modelos matemáticos obtenidos son capaces de predecir con aceptable precisión el comportamiento estructural de la conexión evaluada numéricamente, permitiendo ahorrar tiempo al eliminar la necesidad de realizar nuevas simulaciones

de conexiones con similares características. El coeficiente de determinación mínimo R^2 encontrado fue 0.59, el factor de forma n , sin embargo, debido al comportamiento altamente no lineal de la conexión este valor está dentro de un rango razonable, el mayor valor de R^2 fue de 0.99 correspondiente al Momento último y a la Rigidez inicial.

6. Los modelos matemáticos obtenidos fueron evaluados contra 10 nuevas simulaciones en elementos finitos no presentes en la base de datos, encontrándose una aceptable correlación entre estos resultados. Resultados similares fueron encontrados al comparar las curvas Momento-rotación del nuevo análisis y las encontradas con el modelo de Richard y Abbott.

7. Se pudo observar que un aumento en el espesor de la placa frontal, diámetro de tornillos y la cantidad de filas de tornillos se logra un aumento en la capacidad de momento último de la conexión, reduciendo su capacidad rotacional, es decir la conexión es más rígida, de esta forma podemos adecuar el comportamiento de la conexión al requerimiento de diseño solicitado.

BIBLIOGRAFÍA

AISC (2011), Steel Construction Manual, 14th Ed. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.

AISC Steel Design Guide 4 (2003), T. Murray y E. Summer, Extended End-Plate Moment Connections: Seismic and Wind Applications Second Edition. American Institute of Steel Construction.

AISC Steel Design Guide 16 (2002), T. Murray y W. Shoemaker, Flush and Extended Multiple-Row Moment End-Plate Connections. American Institute of Steel Construction.

AISC 341-16 (2016), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago.

AISC 358-16 (2016), Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.

AISC 360-16 (2016), Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.

ASTM A325-14 (2014), Standard Specification for Structural Bolts, Steel, Heat Treated, 120/105 ksi Minimum Tensile Strength. ASTM International, United States.

ASTM A572 /A572M -15 (2015), Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel. ASTM International, United States.

Anderson D., Hines E.L., Arthur S.J., Eiap E.L. (1997), Application of artificial neural networks to the prediction of minor axis steel connections. *Computers & Structures*; 63(4): 685-692.

Abolmaali A., Matthys J., Farooqi M. y Choi Y., Development of moment-rotation model equations for flush end-plate connections. *Journal of Constructional Steel Research*; 61: 1595-1612.

Ang K.M., Morris G.A. (1984), Analysis of three-dimensional frames with flexible beam-column connections. *Canadian Journal of Civil Engineers*; 11(2): 245-254.

Ataei A., Bradford M. A. Dist.M.ASCE, Valipour H. R. (2015), Moment-Rotation Model for Blind-Bolted Flush End-Plate Connections in Composite Frame Structures, *Journal of Structural Engineering*; 141 (9).

Attiogbe E., Morris G. (1991), Moment-rotation functions for steel connections. *Journal of Structural Engineering*; 117: 1703-1718.

Azizinamini A. (1982), Monotonic response of semi-rigid steel beam to column connections. M.S. thesis. Columbia: University of South Carolina, Columbia.

Azizinamini A, Bradburn JH, Radziminski JB. (1985), Static and cyclic behavior of steel beam-column connections. *Structural Research Studies*. Civil Engineering Department, University of South Carolina.

Bose S.K., McNeice G.M., Sherbourne A.N. (1972), Column webs in steel beam to column connexions. Part I: formulation and verification. *Computers & Structures*; 2: 253-272.

Cabrero Ballarín J.M. (2006) Nuevas propuestas para el diseño de pórticos y uniones semirrígidas de acero. Ph.D. thesis. Universidad de Navarra.

Cabrero J.M., Bayo E. (2007a), The semi-rigid behaviour of three-dimensional steel beam-to-column joints subjected to proportional loading. Part I: Experimental evaluation. *Journal of Constructional Steel Research*; 63: 1241-1253.

Cabrero J.M., Bayo E. (2007b), The semi-rigid behaviour of three-dimensional steel beam-to-column joints subjected to proportional loading. Part II: Theoretical model and validation. *Journal of Constructional Steel Research*; 63: 1254-1267.

Chasten C.P., Lu L.W., Driscoll G.C. (1992), Prying and shear in end-plate connection design. *Journal of Structural Engineering*; 118(5): 1295-1311.

Chen Wai-Fah, Kishi Norimitsu, Komuro Masato (2011), *Semi-rigid Connections Handbook*, J. Ross Publishing civil & environmental engineering series. USA.

Cohen Louis, Manion Lawrence, Morrison Keith (2000), *Research Methods in Education*, Fifth edition. RoutledgeFalmer. London.

De Lima L.R.O., da S. Vellasco P.C.G., de Andrade S.A.L., da Silva J.G.S. (2005), Neural networks assessment of beam-to-column joints. *Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*; 28(3): 314-324.

Del Savio A.A., Nethercot D.A., Vellasco P.C.G.S., Andrade S.A.L., Martha L.F. (2009), Generalised component-based model for beam-to-column connections including axial versus moment interaction. *Journal of Constructional Steel Research*; 65: 1876-1895.

Díaz C., Martí P., Victoria M., Querin O.M. (2011a), Review on the modelling of joint behaviour in steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*; 67: 741-758.

Díaz C., Victoria M., Martí P., Querin O.M. (2011b), FE model of beam-to-column extended end-plate joints. *Journal of Constructional Steel Research*; 67(10): 1578-1590.

European Committee for Standardization (CEN) (2010), PrEN 1993-1-8:2010, Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1.8: Design of joints. Bruselas.

Faella C., Piluso V., Rizzano G. (2000), Structural steel semirigid connections: theory, design and software. In: *New directions in civil engineering*. Boca Raton, London. CRC Press.

Fengfeng Zhou (2005), Model-based simulation of steel frames with endplate connections. Ph.D. thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Cincinnati, Ohio.

Fernández Ceniceros J. (2015), Numerical-Informational methodology for characterizing steel bolted components coupling finite element simulations and soft computing techniques. Ph.D. thesis. Universidad de la Rioja.

Frye M.J., Morris G.A. (1975), Analysis of flexibly connected steel frames. *Canadian Journal of Civil Engineering*; 2(3): 280-291.

Girão Coelho, A.M. (2013), Rotation capacity of partial strength steel joints with three-dimensional finite element approach. *Computers & Structures*; 116: 88-97.

Goldberg D.E., Richard R.M. (1963), Analysis of non-linear structures. *Journal of the Structural Division*; 89(4): 333-351.

Goverdhan A. (1983), A collection of experimental moment-rotation curves and evaluation of prediction equations for semi-rigid connections. Master's thesis, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee (USA).

Haupt Randy L., Haupt Sue E. (2004), *Practical Genetic Algorithms*, 2da Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Hu J.W., Leon R.T., Park T. (2011), Mechanical modeling of bolted T-stub connections under cyclic loads Part I: Stiffness Modeling. *Journal of Constructional Steel Research*; 67(11): 1710-1718.

Hu J.W., Leon R.T., Park T. (2012), Mechanical models for the analysis of bolted T-stub connections under cyclic loads. *Journal of Constructional Steel Research*; 78: 45-57.

Jiménez de Cisneros J. J., Carazo A. D., Carazo A. J. D., Jordao S, Simoes da Silva L. (2017), Análisis de componentes T-equivalente asimétricas: enfoque experimental y numérico. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*; 33(1-2):129–137.

Kennedy N.A., Vinnakota S., Sherbourne A.N. (1981), The Split-Tee Analogy in Bolted Splices and Beam-Column Connections. *Proceedings of the International Conference on Joints in Structural Steelwork*; 2.138 - 2.157.

Kennedy D.J.R., Hafez M. (1984), A study of end-plate connections for steel beams. *Canadian Journal of Civil Engineering*; 11(2): 139-149.

Kim J., Ghaboussi J., Elnashai A.S. (2012), Hysteretic mechanical-informational modeling of bolted steel frame connections. *Engineering Structures*; 45: 1-11.

Kishi N., Chen W.F. (1986a), Steel connection data bank program. In: *Structural engineering*. 2nd ed. School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Report no. CE-STR-86-18.

Kishi N., Chen W.F. (1986b), Data base of steel beam-to-column connections. In: *Structural engineering*. School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, 1/2, Report no. CE-STR-86-26.

Kishi N., Chen W.F., Matsuoka K.G. and Nomachi S. G. (1987a), Moment-rotation relation of top- and seat-angle with double web-angle connections. *Proc. Workshop on Connections and the Behavior, Strength and Design of Steel Structures*, Elsevier Applied Science Publishers, London, England, 121-134.

Kishi N., Chen W.F., Matsuoka K.G. and Nomachi S. G. (1987b), Moment-rotation relation of single/double web-angle connections. *Proc. Workshop on Connections*

and the Behavior, Strength and Design of Steel Structures, Elsevier Applied Science Publishers, London, England, 135-149.

Kishi N., Chen W.F. (1990), Moment-Rotation relations of semi-rigid connections with angles. *Journal of Structural Engineering*; 116(7): 1813-1834.

Kishi N., Hasan R., Chen W.F., Goto Y. (1997), Study of Eurocode 3 steel connection classification. *Engineering Structures*: 19(9): 772-79.

Kishi N., Komuro M., Chen W.F. (2004), Four-parameter power model for $m-\theta$ curves of end-plate connections. *Connections in Steel Structures V - Amsterdam*.

Komuro M., Kishi N., Chen W.F. (2004), Elasto-plastic FE analysis on moment-rotation relations of top-and seat-angle connections. In: 5th International workshop on connections in steel structures: Behaviour, strength and design. Faculty of Civil Engineering and Geosciences of the Delft University of Technology.

Kong Z., Kim S-E. (2017), Moment-rotation model of single-web angle connections. *International Journal of Mechanical Sciences*; 126: 24-34.

Krishnamurthy N., Graddy D.E. (1976), Correlation between 2- and 3-dimensional finite element analysis of steel bolted end-plate connections. *Computers & Structures*; 6(4-5): 381-9.

Krishnamurthy N. (1978), Fresh look at bolted end-plate behaviour and design. *Engineering Journal*; 15(2):39-49.

Krishnamurthy N., Huang H., Jeffrey P.K., Avery L.K. (1979), Analytical $M-\phi$ curves for end-plate connections. *Journal of the Structural Division*; 105: 133-145.

Kukreti A.R., Murray T.M., Abolmaali A. (1987), End-plate connection moment-rotation relationship. *Journal of Constructional Steel Research*: 8: 137-157.

Kukreti A.R., Glassemieh M., Murray T.M. (1990), Behavior and design of large-capacity moment end plates. *Journal of Structural Engineering*: 116(3): 809-828.

Lee S.S., Moon T.S. (2002), Moment-rotation model of semi-rigid connections with angles. *Engineering Structures*; 24(2): 227-37.

Lemonis M.E., Gantes C.J. (2009), Mechanical modeling of the nonlinear response of beam-to-column joints. *Journal of Constructional Steel Research*; 65: 879-890.

Lui E.M., Chen W.F. (1986), Analysis and behaviour of flexibly jointed frames. *Engineering Structures*; 8(2): 107-118.

McCulloch W.S, Pitts W. (1943), A logical calculus of Ideas Imminent in Nervous Activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*; Vol. 5: 115-133.

Moncarz P.D., Gerstle K.H. (1981), Steel frame with nonlinear connections. *Journal of Structural Division*; 107 (ST8): 1427-1241.

Moreno A. (2005), Un modelo de elementos finitos para el análisis de uniones atornilladas viga-pilar con comportamiento semirrígido. Ph.D. thesis. Universidad de La Coruña.

Nethercot D.A. (1985a), Steel beam-to-column connections: a review of test data and its applicability to the evaluation of joint behaviour in the performance of steel frames. CIRIA report, RP338.

Nethercot D.A. (1985b), Utilization of experimentally obtained connection data in assessing the performance of steel frames. In: Chen WF, editor. *Connection flexibility and steel frames*. Detroit: Proc. of a Session Sponsored by the ASCE Structural Division.

Nunes da Silva I., Hernane Spatti D., Andrade Flauzino R., Bartocci Liboni L.E., Franco dos Reis Alves S. (2017), *Artificial Neural Networks: A Practical Course*. Springer International Publishing Switzerland.

Pirmoz A., Gholizadeh S. (2007), Predicting of moment-rotation behavior of bolted connections using neural networks. In: 3rd national congress on civil engineering.

Pirmoz A., Seyed Khoei A., Mohammadrezapour E., Saedi Daryan A. (2009), Moment-rotation behavior of bolted top-seat angle connections. *Journal of Constructional Steel Research*; 65(4): 973-984.

Ramberg W., Osgood WR. (1943), Description of stress-strain curves by three-parameters. National Advisory Committee for Aeronautics, Technical report 902.

Razzaq Z., (1983), End restraint effect on steel column strength, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 109(2), 314-334.

- Ribeiro J., Santiago A., Rigueiro C., Simões da Silva L. (2015), Analytical model for the response of T-stub joint component under impact loading. *Journal of Constructional Steel Research*; 106: 23-34.
- Richard R.M. and Abbott B.J. (1975), Versatile elastic-plastic stress-strain formula. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*; 101(4): 511-515.
- Skejic Davor, Dujimovic Darco, Beg Darco (2014), Behaviour of stiffened flange cleat joints. *Journal of Constructional Steel Research*; 103: 61-76.
- Schalkoff Robert (1990), *Artificial Intelligence: An Engineering Approach*. McGraw-Hill, New York.
- Sherbourne A.N., Bahaari M.R. (1994), 3D simulation of end-plate bolted connections. *Journal of Structural Engineering ASCE*; 120(11): 3122-3136.
- Sherbourne A.N., Bahaari M.R. (1997), Finite Element Prediction of End Plate Bolted Connection Behavior: I Parametric Study. *Journal of Structural Engineering ASCE*; 123(2): 157-164.
- Sherbourne A.N., Bahaari M.R. (1997), Finite Element Prediction of End Plate Bolted Connection Behavior: II Analytic Formulation. *Journal of Structural Engineering ASCE*; 123(2): 165-175.
- Shi Gang, Chen Xuesen (2017), Moment-rotation curves of ultra-large capacity end-plate joints based on component method. *Journal of Constructional Steel Research*; 128: 451-461.
- Shi Y., Shi G., Wang Y. (2007), Experimental and theoretical analysis of the moment-rotation behaviour of stiffened extended end-plate connections. *Journal of Constructional Steel Research*; 63: 1279-1293.
- Shi Y., Shi G., Wang Y., Bradford M. (2008), Numerical simulation of steel pretensioned bolted end-plate connections of different types and details. *Engineering Structures*; 30: 2677-2686.
- Simões da Silva L., Girão Coelho A.M., Neto E.L. (2000), Equivalent post-buckling models for the flexural behaviour of steel connections. *Computers & Structures*; 77(6): 615-624.

Simões da Silva L., Girão Coelho A.M. (2001), An analytical evaluation of the response of steel joints under bending and axial force. *Computers & Structures*; 79(8): 873-881

Swanson James A. (1999), Characterization of the strength, stiffness and ductility behavior of T-Stub connections. . Ph.D. thesis. Georgia Institute of Technology.

Swanson J.A., Kokan D.S., Leon R.T. (2002), Advanced finite element modeling of bolted T-stub connection components. *Journal of Constructional Steel Research*; 58(5-8): 1015-1031.

Syahril Taufik (2013), Numerical Modelling of Semi-rigid Connection with High Strength Steel. *Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA)*; 2 (2): 38-47.

Wales M.W., Rossow E.C. (1983), Coupled moment-axial force behavior in bolted joint. *Journal of Structural Engineering*; 109(5): 1250-1266.

Wilson W.M., Moore H.F. (1917), Tests to determine the rigidity of riveted joints in steel structures. Engineering Experiment Station. Bulletin no. 104, Urbana (USA): University of Illinois.

Wu F.S., Chen W.F. (1990), A Design model for semi-rigid connections. *Engineering Structures*; 12(2): 88-97.

Yee K.L., Melchers R.E. (1986), Moment-Rotation curves for bolted connections. *Journal of Structural Engineering*; 112: 615-635.

ANEXO A

Tabla A.1 Propiedades geométricas de la conexión

Caso	Columna				Viga				Pernos			Placa Frontal							
	Sección	h _c	b _c	t _{cf}	t _{cw}	Sección	h _b	b _b	t _{bf}	t _{bw}	d	do	nt	t _{ep}	h _{ep}	b _{ep}	e	p	g
01	W 310 x 250 x 79	306	254	14.6	8.8	W 310 x 200 x 60	303	203	13.1	7.5	24	26	2	14.6	511	254	52	78	150
02	W 310 x 250 x 79	306	254	14.6	8.8	W 310 x 200 x 67	306	204	14.6	8.5	16	18	4	14.6	450	254	36	54	182
03	W 310 x 250 x 79	306	254	14.6	8.8	W 310 x 250 x 79	306	254	14.6	8.8	24	26	2	14.6	514	254	52	78	150
04	W 310 x 250 x 79	306	254	14.6	8.8	W 360 x 200 x 64	347	203	13.5	7.7	20	22	4	14.6	523	254	44	66	166
05	W 310 x 250 x 86	310	254	16.3	9.1	W 310 x 200 x 60	303	203	13.1	7.5	27	30	2	16.3	543	254	60	90	134
06	W 310 x 250 x 86	310	254	16.3	9.1	W 310 x 250 x 79	306	254	14.6	8.8	16	18	4	16.3	450	254	36	54	182
07	W 310 x 250 x 86	310	254	16.3	9.1	W 310 x 250 x 86	310	254	16.3	9.1	24	26	2	16.3	518	254	52	78	150
08	W 310 x 250 x 86	310	254	16.3	9.1	W 360 x 200 x 64	347	203	13.5	7.7	20	22	4	16.3	523	254	44	66	166
09	W 310 x 250 x 86	310	254	16.3	9.1	W 360 x 200 x 72	350	204	15.1	8.6	27	30	2	16.3	590	254	60	90	134
10	W 310 x 310 x 97	308	305	15.4	9.9	W 310 x 250 x 79	306	254	14.6	8.8	24	26	2	15.4	514	305	52	78	201
11	W 310 x 310 x 97	308	305	15.4	9.9	W 310 x 310 x 97	308	305	15.4	9.9	27	30	2	15.4	548	305	60	90	185
12	W 310 x 310 x 107	311	306	17	10.9	W 310 x 250 x 79	306	254	14.6	8.8	16	18	4	17	450	306	36	54	234
13	W 310 x 310 x 107	311	306	17	10.9	W 310 x 250 x 86	310	254	16.3	9.1	24	26	2	17	518	306	52	78	202
14	W 310 x 310 x 107	311	306	17	10.9	W 310 x 310 x 97	308	305	15.4	9.9	27	30	2	17	548	306	60	90	186
15	W 310 x 310 x 107	311	306	17	10.9	W 310 x 310 x 107	311	306	17	10.9	24	26	2	17	519	306	52	78	202
16	W 310 x 310 x 107	311	306	17	10.9	W 360 x 250 x 91	353	254	16.4	9.5	20	22	4	17	529	306	44	66	218
17	W 310 x 310 x 117	314	307	18.7	11.9	W 310 x 250 x 86	310	254	16.3	9.1	16	18	4	18.7	454	307	36	54	235

Tabla A.1 (continuación) Propiedades geométricas de la conexión

Caso	Columna				Viga				Pernos			Placa Frontal							
	Sección	h _c	b _c	t _{cf}	t _{cw}	Sección	h _b	b _b	t _{bf}	t _{bw}	d	do	nt	t _{ep}	h _{ep}	b _{ep}	e	p	g
18	W 310 x 310 x 117	314	307	18.7	11.9	W 310 x 310 x 97	308	305	15.4	9.9	27	30	2	18.7	548	307	60	90	187
19	W 310 x 310 x 117	314	307	18.7	11.9	W 310 x 310 x 107	311	306	17	10.9	24	26	2	18.7	519	307	52	78	203
20	W 310 x 310 x 117	314	307	18.7	11.9	W 310 x 310 x 117	314	307	18.7	11.9	16	18	4	18.7	458	307	36	54	235
21	W 310 x 310 x 117	314	307	18.7	11.9	W 360 x 250 x 91	353	254	16.4	9.5	27	30	2	18.7	593	307	60	90	187
22	W 310 x 310 x 117	314	307	18.7	11.9	W 360 x 250 x 101	357	255	18.3	10.5	20	22	4	18.7	533	307	44	66	219
23	W 310 x 310 x 117	314	307	18.7	11.9	W 410 x 260 x 100	415	260	16.9	10	24	26	4	18.7	623	307	52	78	203
24	W 310 x 310 x 129	318	308	20.6	13.1	W 310 x 250 x 79	306	254	14.6	8.8	16	18	4	20.6	450	308	36	54	236
25	W 310 x 310 x 129	318	308	20.6	13.1	W 310 x 250 x 86	310	254	16.3	9.1	16	18	4	20.6	454	308	36	54	236
26	W 310 x 310 x 129	318	308	20.6	13.1	W 310 x 310 x 97	308	305	15.4	9.9	27	30	2	20.6	548	308	60	90	188
27	W 310 x 310 x 129	318	308	20.6	13.1	W 310 x 310 x 107	311	306	17	10.9	24	26	2	20.6	519	308	52	78	204
28	W 310 x 310 x 129	318	308	20.6	13.1	W 310 x 310 x 117	314	307	18.7	11.9	27	30	2	20.6	554	308	60	90	188
29	W 310 x 310 x 129	318	308	20.6	13.1	W 310 x 310 x 129	318	308	20.6	13.1	16	18	4	20.6	462	308	36	54	236
30	W 310 x 310 x 129	318	308	20.6	13.1	W 360 x 250 x 91	353	254	16.4	9.5	20	22	4	20.6	529	308	44	66	220
31	W 310 x 310 x 129	318	308	20.6	13.1	W 360 x 250 x 101	357	255	18.3	10.5	27	30	2	20.6	597	308	60	90	188
32	W 310 x 310 x 129	318	308	20.6	13.1	W 410 x 260 x 100	415	260	16.9	10	24	26	4	20.6	623	308	52	78	204
33	W 310 x 310 x 129	318	308	20.6	13.1	W 410 x 260 x 114	420	261	19.3	11.6	27	30	4	20.6	660	308	60	90	188
34	W 310 x 310 x 143	323	309	22.9	14	W 310 x 250 x 79	306	254	14.6	8.8	16	18	4	22.9	450	309	36	54	237
35	W 310 x 310 x 143	323	309	22.9	14	W 310 x 250 x 86	310	254	16.3	9.1	24	26	2	22.9	518	309	52	78	205
36	W 310 x 310 x 143	323	309	22.9	14	W 310 x 310 x 97	308	305	15.4	9.9	27	30	2	22.9	548	309	60	90	189

Tabla A.1 (continuación) Propiedades geométricas de la conexión

Caso	Columna				Viga				Pernos			Placa Frontal							
	Sección	h _c	b _c	t _{cf}	t _{cw}	Sección	h _b	b _b	t _{bf}	t _{bw}	d	do	nt	t _{ep}	h _{ep}	b _{ep}	e	p	g
37	W 310 x 310 x 143	323	309	22.9	14	W 310 x 310 x 107	311	306	17	10.9	24	26	2	22.9	519	309	52	78	205
38	W 310 x 310 x 143	323	309	22.9	14	W 310 x 310 x 117	314	307	18.7	11.9	27	30	2	22.9	554	309	60	90	189
39	W 310 x 310 x 143	323	309	22.9	14	W 310 x 310 x 129	318	308	20.6	13.1	16	18	4	22.9	462	309	36	54	237
40	W 310 x 310 x 143	323	309	22.9	14	W 310 x 310 x 143	323	309	22.9	14	27	30	2	22.9	563	309	60	90	189
41	W 310 x 310 x 143	323	309	22.9	14	W 360 x 250 x 91	353	254	16.4	9.5	20	22	4	22.9	529	309	44	66	221
42	W 310 x 310 x 143	323	309	22.9	14	W 360 x 250 x 101	357	255	18.3	10.5	24	26	4	22.9	565	309	52	78	205
43	W 310 x 310 x 143	323	309	22.9	14	W 360 x 250 x 110	360	256	19.9	11.4	20	22	4	22.9	536	309	44	66	221
44	W 310 x 310 x 143	323	309	22.9	14	W 360 x 250 x 122	363	257	21.7	13	27	30	2	22.9	603	309	60	90	189
45	W 310 x 310 x 143	323	309	22.9	14	W 410 x 260 x 100	415	260	16.9	10	16	18	6	22.9	559	309	36	54	237
46	W 310 x 310 x 143	323	309	22.9	14	W 410 x 260 x 114	420	261	19.3	11.6	24	26	4	22.9	628	309	52	78	205
47	W 310 x 310 x 143	323	309	22.9	14	W 410 x 260 x 132	425	263	22.2	13.3	27	30	4	22.9	665	309	60	90	189
48	W 310 x 310 x 143	323	309	22.9	14	W 460 x 280 x 113	463	280	17.3	10.8	20	22	6	22.9	639	309	44	66	221
49	W 310 x 310 x 158	327	310	25.1	15.5	W 310 x 250 x 86	310	254	16.3	9.1	16	18	4	25.1	454	310	36	54	238
50	W 310 x 310 x 158	327	310	25.1	15.5	W 310 x 310 x 97	308	305	15.4	9.9	24	26	2	25.1	516	310	52	78	206
51	W 310 x 310 x 158	327	310	25.1	15.5	W 310 x 310 x 107	311	306	17	10.9	16	18	4	25.1	455	310	36	54	238
52	W 310 x 310 x 158	327	310	25.1	15.5	W 310 x 310 x 117	314	307	18.7	11.9	20	22	4	25.1	490	310	44	66	222
53	W 310 x 310 x 158	327	310	25.1	15.5	W 310 x 310 x 129	318	308	20.6	13.1	27	30	2	25.1	558	310	60	90	190
54	W 310 x 310 x 158	327	310	25.1	15.5	W 310 x 310 x 143	323	309	22.9	14	24	26	2	25.1	531	310	52	78	206
55	W 310 x 310 x 158	327	310	25.1	15.5	W 310 x 310 x 158	327	310	25.1	15.5	27	30	2	25.1	567	310	60	90	190

Tabla A.1 (continuación) Propiedades geométricas de la conexión

Caso	Columna				Viga				Pernos			Placa Frontal							
	Sección	h _c	b _c	t _{cf}	t _{cw}	Sección	h _b	b _b	t _{bf}	t _{bw}	d	do	nt	t _{ep}	h _{ep}	b _{ep}	e	p	g
56	W 310 x 310 x 158	327	310	25.1	15.5	W 360 x 250 x 91	353	254	16.4	9.5	20	22	4	25.1	529	310	44	66	222
57	W 310 x 310 x 158	327	310	25.1	15.5	W 360 x 250 x 101	357	255	18.3	10.5	27	30	2	25.1	597	310	60	90	190
58	W 310 x 310 x 158	327	310	25.1	15.5	W 360 x 250 x 110	360	256	19.9	11.4	20	22	4	25.1	536	310	44	66	222
59	W 310 x 310 x 158	327	310	25.1	15.5	W 410 x 260 x 100	415	260	16.9	10	20	22	4	25.1	591	310	44	66	222
60	W 310 x 310 x 158	327	310	25.1	15.5	W 410 x 260 x 114	420	261	19.3	11.6	16	18	6	25.1	564	310	36	54	238
61	W 310 x 310 x 158	327	310	25.1	15.5	W 410 x 260 x 132	425	263	22.2	13.3	27	30	4	25.1	665	310	60	90	190
62	W 310 x 310 x 158	327	310	25.1	15.5	W 460 x 280 x 113	463	280	17.3	10.8	24	26	4	25.1	671	310	52	78	206
63	W 310 x 310 x 158	327	310	25.1	15.5	W 460 x 280 x 128	467	282	19.6	12.2	20	22	6	25.1	643	310	44	66	222
64	W 360 x 200 x 64	347	203	13.5	7.7	W 360 x 170 x 51	355	171	11.6	7.2	20	22	4	13.5	531	203	44	66	115
65	W 360 x 200 x 64	347	203	13.5	7.7	W 360 x 200 x 64	347	203	13.5	7.7	20	22	4	13.5	523	203	44	66	115
66	W 360 x 200 x 64	347	203	13.5	7.7	W 410 x 180 x 53	403	177	10.9	7.5	16	18	6	13.5	547	203	36	54	131
67	W 360 x 200 x 64	347	203	13.5	7.7	W 410 x 180 x 60	407	178	12.8	7.7	20	22	4	13.5	583	203	44	66	115
68	W 360 x 250 x 91	353	254	16.4	9.5	W 360 x 200 x 64	347	203	13.5	7.7	27	30	2	16.4	587	254	60	90	134
69	W 360 x 250 x 91	353	254	16.4	9.5	W 360 x 200 x 72	350	204	15.1	8.6	24	26	2	16.4	558	254	52	78	150
70	W 360 x 250 x 91	353	254	16.4	9.5	W 360 x 250 x 91	353	254	16.4	9.5	27	30	2	16.4	593	254	60	90	134
71	W 360 x 250 x 101	357	255	18.3	10.5	W 360 x 200 x 64	347	203	13.5	7.7	20	22	4	18.3	523	255	44	66	167
72	W 360 x 250 x 101	357	255	18.3	10.5	W 360 x 200 x 72	350	204	15.1	8.6	27	30	2	18.3	590	255	60	90	135
73	W 360 x 250 x 101	357	255	18.3	10.5	W 360 x 200 x 79	354	205	16.8	9.4	20	22	4	18.3	530	255	44	66	167
74	W 360 x 250 x 101	357	255	18.3	10.5	W 360 x 250 x 91	353	254	16.4	9.5	20	22	4	18.3	529	255	44	66	167

Tabla A.1 (continuación) Propiedades geométricas de la conexión

Caso	Columna					Viga					Pernos			Placa Frontal					
	Sección	h _c	b _c	t _{cf}	t _{cw}	Sección	h _b	b _b	t _{bf}	t _{bw}	d	do	nt	t _{ep}	h _{ep}	b _{ep}	e	p	g
75	W 360 x 250 x 101	357	255	18.3	10.5	W 360 x 250 x 101	357	255	18.3	10.5	27	30	2	18.3	597	255	60	90	135
76	W 360 x 250 x 101	357	255	18.3	10.5	W 460 x 190 x 89	463	192	17.7	10.5	24	26	4	18.3	671	255	52	78	151
77	W 360 x 250 x 110	360	256	19.9	11.4	W 360 x 200 x 64	347	203	13.5	7.7	20	22	4	19.9	523	256	44	66	168
78	W 360 x 250 x 110	360	256	19.9	11.4	W 360 x 200 x 79	354	205	16.8	9.4	20	22	4	19.9	530	256	44	66	168
79	W 360 x 250 x 110	360	256	19.9	11.4	W 360 x 250 x 91	353	254	16.4	9.5	20	22	4	19.9	529	256	44	66	168
80	W 360 x 250 x 110	360	256	19.9	11.4	W 360 x 250 x 101	357	255	18.3	10.5	27	30	2	19.9	597	256	60	90	136
81	W 360 x 250 x 110	360	256	19.9	11.4	W 360 x 250 x 110	360	256	19.9	11.4	27	30	2	19.9	600	256	60	90	136
82	W 360 x 250 x 110	360	256	19.9	11.4	W 460 x 190 x 97	466	193	19	11.4	24	26	4	19.9	674	256	52	78	152
83	W 360 x 250 x 122	363	257	21.7	13	W 360 x 200 x 64	347	203	13.5	7.7	20	22	4	21.7	523	257	44	66	169
84	W 360 x 250 x 122	363	257	21.7	13	W 360 x 200 x 72	350	204	15.1	8.6	27	30	2	21.7	590	257	60	90	137
85	W 360 x 250 x 122	363	257	21.7	13	W 360 x 200 x 79	354	205	16.8	9.4	20	22	4	21.7	530	257	44	66	169
86	W 360 x 250 x 122	363	257	21.7	13	W 360 x 250 x 91	353	254	16.4	9.5	27	30	2	21.7	593	257	60	90	137
87	W 360 x 250 x 122	363	257	21.7	13	W 360 x 250 x 101	357	255	18.3	10.5	20	22	4	21.7	533	257	44	66	169
88	W 360 x 250 x 122	363	257	21.7	13	W 360 x 250 x 110	360	256	19.9	11.4	20	22	4	21.7	536	257	44	66	169
89	W 360 x 250 x 122	363	257	21.7	13	W 360 x 250 x 122	363	257	21.7	13	27	30	2	21.7	603	257	60	90	137
90	W 360 x 250 x 122	363	257	21.7	13	W 460 x 190 x 97	466	193	19	11.4	20	22	6	21.7	642	257	44	66	169
91	W 360 x 250 x 122	363	257	21.7	13	W 460 x 190 x 106	469	194	20.6	12.6	24	26	4	21.7	677	257	52	78	153
92	W 360 x 370 x 134	356	369	18	11.2	W 360 x 370 x 134	356	369	18	11.2	20	22	4	18	532	369	44	66	281
93	W 360 x 370 x 134	356	369	18	11.2	W 460 x 280 x 113	463	280	17.3	10.8	24	26	4	18	671	369	52	78	265

Tabla A.1 (continuación) Propiedades geométricas de la conexión

Caso	Columna				Viga				Pernos			Placa Frontal							
	Sección	h _c	b _c	t _{cf}	t _{cw}	Sección	h _b	b _b	t _{bf}	t _{bw}	d	do	nt	t _{ep}	h _{ep}	b _{ep}	e	p	g
94	W 360 x 370 x 147	360	370	19.8	12.3	W 360 x 370 x 134	356	369	18	11.2	20	22	4	19.8	532	370	44	66	282
95	W 360 x 370 x 147	360	370	19.8	12.3	W 360 x 370 x 147	360	370	19.8	12.3	27	30	2	19.8	600	370	60	90	250
96	W 360 x 370 x 147	360	370	19.8	12.3	W 460 x 280 x 113	463	280	17.3	10.8	20	22	6	19.8	639	370	44	66	282
97	W 360 x 370 x 147	360	370	19.8	12.3	W 460 x 280 x 128	467	282	19.6	12.2	24	26	4	19.8	675	370	52	78	266
98	W 360 x 370 x 162	364	371	21.8	13.3	W 360 x 370 x 134	356	369	18	11.2	27	30	2	21.8	596	371	60	90	251
99	W 360 x 370 x 162	364	371	21.8	13.3	W 360 x 370 x 162	364	371	21.8	13.3	27	30	2	21.8	604	371	60	90	251
100	W 360 x 370 x 162	364	371	21.8	13.3	W 460 x 280 x 113	463	280	17.3	10.8	20	22	6	21.8	639	371	44	66	283
101	W 360 x 370 x 162	364	371	21.8	13.3	W 460 x 280 x 128	467	282	19.6	12.2	27	30	4	21.8	707	371	60	90	251
102	W 360 x 370 x 179	368	373	23.9	15	W 360 x 370 x 134	356	369	18	11.2	27	30	2	23.9	596	373	60	90	253
103	W 360 x 370 x 179	368	373	23.9	15	W 360 x 370 x 147	360	370	19.8	12.3	20	22	4	23.9	536	373	44	66	285
104	W 360 x 370 x 179	368	373	23.9	15	W 360 x 370 x 162	364	371	21.8	13.3	20	22	4	23.9	540	373	44	66	285
105	W 360 x 370 x 179	368	373	23.9	15	W 360 x 370 x 179	368	373	23.9	15	27	30	2	23.9	608	373	60	90	253
106	W 360 x 370 x 179	368	373	23.9	15	W 460 x 280 x 113	463	280	17.3	10.8	20	22	6	23.9	639	373	44	66	285
107	W 360 x 370 x 179	368	373	23.9	15	W 460 x 280 x 128	467	282	19.6	12.2	24	26	4	23.9	675	373	52	78	269
108	W 360 x 370 x 179	368	373	23.9	15	W 460 x 280 x 158	476	284	23.9	15	27	30	4	23.9	716	373	60	90	253
109	W 360 x 370 x 196	372	374	26.2	16.4	W 360 x 370 x 134	356	369	18	11.2	20	22	4	26.2	532	374	44	66	286
110	W 360 x 370 x 196	372	374	26.2	16.4	W 360 x 370 x 147	360	370	19.8	12.3	24	26	2	26.2	568	374	52	78	270
111	W 360 x 370 x 196	372	374	26.2	16.4	W 360 x 370 x 162	364	371	21.8	13.3	27	30	2	26.2	604	374	60	90	254
112	W 360 x 370 x 196	372	374	26.2	16.4	W 360 x 370 x 179	368	373	23.9	15	24	26	4	26.2	576	374	52	78	270

Tabla A.1 (continuación) Propiedades geométricas de la conexión

Caso	Columna					Viga					Pernos			Placa Frontal					
	Sección	h _c	b _c	t _{cf}	t _{cw}	Sección	h _b	b _b	t _{bf}	t _{bw}	d	do	nt	t _{ep}	h _{ep}	b _{ep}	e	p	g
113	W 360 x 370 x 196	372	374	26.2	16.4	W 460 x 280 x 128	467	282	19.6	12.2	27	30	4	26.2	707	374	60	90	254
114	W 360 x 370 x 196	372	374	26.2	16.4	W 460 x 280 x 144	472	283	22.1	13.6	24	26	4	26.2	680	374	52	78	270
115	W 360 x 370 x 196	372	374	26.2	16.4	W 460 x 280 x 158	476	284	23.9	15	27	30	4	26.2	716	374	60	90	254
116	W 410 x 260 x 100	415	260	16.9	10	W 410 x 260 x 100	415	260	16.9	10	20	22	4	16.9	591	260	44	66	172
117	W 410 x 260 x 114	420	261	19.3	11.6	W 410 x 260 x 100	415	260	16.9	10	16	18	6	19.3	559	261	36	54	189
118	W 410 x 260 x 114	420	261	19.3	11.6	W 410 x 260 x 114	420	261	19.3	11.6	20	22	4	19.3	596	261	44	66	173
119	W 410 x 260 x 132	425	263	22.2	13.3	W 410 x 260 x 100	415	260	16.9	10	20	22	4	22.2	591	263	44	66	175
120	W 410 x 260 x 132	425	263	22.2	13.3	W 410 x 260 x 114	420	261	19.3	11.6	27	30	4	22.2	660	263	60	90	143
121	W 410 x 260 x 132	425	263	22.2	13.3	W 410 x 260 x 132	425	263	22.2	13.3	24	26	4	22.2	633	263	52	78	159
122	W 410 x 260 x 149	431	265	25	14.9	W 410 x 260 x 100	415	260	16.9	10	27	30	2	25	655	265	60	90	145
123	W 410 x 260 x 149	431	265	25	14.9	W 410 x 260 x 114	420	261	19.3	11.6	16	18	6	25	564	265	36	54	193
124	W 410 x 260 x 149	431	265	25	14.9	W 410 x 260 x 132	425	263	22.2	13.3	27	30	4	25	665	265	60	90	145
125	W 410 x 260 x 149	431	265	25	14.9	W 410 x 260 x 149	431	265	25	14.9	24	26	4	25	639	265	52	78	161
126	W 460 x 280 x 113	463	280	17.3	10.8	W 410 x 260 x 100	415	260	16.9	10	20	22	4	17.3	591	280	44	66	192
127	W 460 x 280 x 113	463	280	17.3	10.8	W 460 x 280 x 113	463	280	17.3	10.8	24	26	4	17.3	671	280	52	78	176
128	W 460 x 280 x 128	467	282	19.6	12.2	W 410 x 260 x 114	420	261	19.3	11.6	20	22	4	19.6	596	282	44	66	194
129	W 460 x 280 x 128	467	282	19.6	12.2	W 460 x 280 x 113	463	280	17.3	10.8	20	22	6	19.6	639	282	44	66	194
130	W 460 x 280 x 128	467	282	19.6	12.2	W 460 x 280 x 128	467	282	19.6	12.2	27	30	4	19.6	707	282	60	90	162
131	W 460 x 280 x 144	472	283	22.1	13.6	W 460 x 280 x 113	463	280	17.3	10.8	20	22	6	22.1	639	283	44	66	195

Tabla A.1 (continuación) Propiedades geométricas de la conexión

Caso	Columna					Viga					Pernos			Placa Frontal					
	Sección	h _c	b _c	t _{cf}	t _{cw}	Sección	h _b	b _b	t _{bf}	t _{bw}	d	do	nt	t _{ep}	h _{ep}	b _{ep}	e	p	g
132	W 460 x 280 x 144	472	283	22.1	13.6	W 460 x 280 x 128	467	282	19.6	12.2	27	30	4	22.1	707	283	60	90	163
133	W 460 x 280 x 144	472	283	22.1	13.6	W 460 x 280 x 144	472	283	22.1	13.6	24	26	4	22.1	680	283	52	78	179
134	W 460 x 280 x 158	476	284	23.9	15	W 460 x 280 x 113	463	280	17.3	10.8	20	22	6	23.9	639	284	44	66	196
135	W 460 x 280 x 158	476	284	23.9	15	W 460 x 280 x 128	467	282	19.6	12.2	24	26	4	23.9	675	284	52	78	180
136	W 460 x 280 x 158	476	284	23.9	15	W 460 x 280 x 144	472	283	22.1	13.6	24	26	4	23.9	680	284	52	78	180
137	W 460 x 280 x 158	476	284	23.9	15	W 460 x 280 x 158	476	284	23.9	15	27	30	4	23.9	716	284	60	90	164
138	W 460 x 280 x 177	482	286	26.9	16.6	W 460 x 280 x 113	463	280	17.3	10.8	27	30	4	26.9	703	286	60	90	166
139	W 460 x 280 x 177	482	286	26.9	16.6	W 460 x 280 x 128	467	282	19.6	12.2	20	22	6	26.9	643	286	44	66	198
140	W 460 x 280 x 177	482	286	26.9	16.6	W 460 x 280 x 144	472	283	22.1	13.6	27	30	4	26.9	712	286	60	90	166

ANEXO B

Tabla B.1 Resultados Obtenidos

Caso	Mu kNm	M₀ kNm	θ_u 10 ³ rad	θ₀ 10 ³ rad	R_{ki} kNm/rad	R_{kp} kNm/rad	Factor n
01	340	229	60.42	6.57	36771	1899	2.82
02	220	154	22.79	4.98	33875	2938	2.52
03	360	252	55.49	6.16	42861	1979	2.43
04	330	232	37.24	5.79	42715	2672	2.70
05	420	282	73.44	6.44	45703	1942	2.24
06	240	163	19.00	4.55	39855	4101	2.55
07	390	254	49.41	6.04	44994	2880	2.89
08	350	234	29.86	5.34	47736	4018	3.14
09	490	338	65.65	6.29	56291	2454	2.27
10	350	248	53.40	6.88	37966	1933	2.50
11	410	274	67.28	7.29	39661	2069	2.64
12	240	150	19.31	4.24	40169	4744	2.49
13	390	274	45.75	6.53	44579	2592	2.66
14	450	305	61.50	6.81	47245	2429	2.54
15	410	281	48.16	6.52	45842	2744	2.66
16	370	265	26.51	5.56	51844	4191	2.49
17	250	144	16.08	3.57	46919	6728	2.69
18	470	331	46.11	6.44	54452	3090	2.55
19	420	302	33.65	6.11	53002	3544	2.68
20	250	143	13.74	3.29	51297	7883	2.70
21	540	375	44.89	6.22	64117	3777	2.66
22	410	292	24.89	5.16	61632	4973	2.28
23	590	415	30.28	5.78	77663	5847	2.81
24	250	148	15.39	3.29	51717	6650	2.59
25	260	154	16.00	3.27	53858	6655	2.48
26	510	362	40.30	6.03	63808	3732	2.47
27	460	333	32.21	5.72	62239	3962	2.50
28	530	375	38.44	6.05	66079	4087	2.53
29	270	158	14.51	2.97	60877	7796	2.45

Tabla B.1 (continuación) Resultados Obtenidos

Caso	Mu kNm	M ₀ kNm	θ _u 10 ³ rad	θ ₀ 10 ³ rad	R _{ki} kNm/rad	R _{kp} kNm/rad	Factor n
30	430	304	22.10	4.86	68584	5995	2.25
31	590	416	36.33	5.85	75938	4862	2.67
32	640	433	27.17	5.36	88512	7774	2.98
33	720	494	29.51	5.58	96310	7772	2.79
34	260	155	15.39	3.03	58117	6847	2.52
35	470	338	30.32	5.34	67733	4389	2.61
36	550	383	37.69	5.70	71754	4502	2.62
37	490	350	29.74	5.34	70377	4733	2.57
38	570	400	35.67	5.63	75905	4812	2.51
39	280	162	14.47	2.67	68847	8237	2.45
40	590	417	32.12	5.56	80497	5424	2.49
41	440	295	18.17	4.24	77960	8360	2.31
42	580	406	27.20	5.27	83793	6646	2.50
43	450	297	17.04	4.08	82143	9360	2.31
44	650	456	30.42	5.36	91561	6595	2.59
45	390	222	12.21	2.80	93523	14192	2.29
46	710	488	24.88	5.10	104834	9173	2.62
47	810	546	28.36	5.20	114660	9647	2.56
48	620	400	15.05	4.00	115428	15252	2.50
49	270	160	14.58	2.65	67983	7618	2.50
50	470	328	20.48	4.62	77998	7007	2.86
51	270	163	13.30	2.51	72954	8128	2.49
52	400	251	16.44	3.60	79259	9498	2.30
53	600	422	28.79	5.09	89246	6446	2.50
54	490	331	17.54	4.31	86280	9338	2.92
55	610	425	24.29	4.93	94023	7933	2.56
56	450	294	16.30	3.75	88412	10023	2.29
57	660	465	30.33	4.95	100339	6510	2.59
58	460	298	15.36	3.63	93141	11019	2.28
59	540	355	14.55	3.63	111152	13216	2.35
60	410	235	11.66	2.47	110411	15425	2.18

Tabla B.1 (continuación) Resultados Obtenidos

Caso	Mu kNm	M ₀ kNm	θ _u 10 ³ rad	θ ₀ 10 ³ rad	R _{ki} kNm/rad	R _{kp} kNm/rad	Factor n
61	870	579	26.64	4.93	128752	11308	2.61
62	790	541	17.04	4.48	135541	14997	2.82
63	640	410	12.81	3.52	135677	18956	2.31
64	340	237	39.97	5.28	47491	2617	2.84
65	340	230	39.28	5.31	46143	2884	3.00
66	310	229	20.27	4.68	53137	4273	2.65
67	400	273	34.40	5.07	57673	3768	3.10
68	490	332	58.37	5.84	59590	2786	2.59
69	440	311	42.25	5.71	57586	3144	2.75
70	520	348	54.00	5.75	63892	3316	2.61
71	390	286	25.59	5.00	61411	4311	2.46
72	520	364	40.95	5.38	71519	3884	2.61
73	410	289	24.63	4.86	64737	5146	2.49
74	420	297	25.58	4.88	65880	5066	2.44
75	570	379	42.77	5.38	75131	4634	2.77
76	660	462	24.94	5.05	99831	8259	3.07
77	410	309	23.78	4.81	68730	4469	2.34
78	430	315	21.97	4.69	72694	5494	2.31
79	430	308	20.02	4.54	74155	6387	2.36
80	590	398	35.30	5.12	83282	5597	2.88
81	610	413	36.83	5.13	85989	5482	2.73
82	730	505	24.81	4.90	112264	9212	3.12
83	430	329	21.68	4.46	78688	4906	2.24
84	570	402	31.95	4.66	91607	5267	2.71
85	450	326	19.17	4.23	83995	6826	2.22
86	600	416	31.85	4.65	95427	5863	2.66
87	460	319	17.59	4.00	88071	8348	2.27
88	460	312	16.62	3.87	89746	9313	2.33
89	650	444	30.11	4.72	101132	6946	2.83
90	640	450	16.04	4.12	121752	12702	2.47

Tabla B.1 (continuación) Resultados Obtenidos

Caso	Mu kNm	M ₀ kNm	θ _u 10 ³ rad	θ ₀ 10 ³ rad	R _{ki} kNm/rad	R _{kp} kNm/rad	Factor n
91	800	559	22.86	4.62	131897	10874	2.89
92	380	261	20.52	4.88	59631	6220	2.27
93	590	431	26.11	5.48	84984	6289	2.42
94	410	277	18.78	4.56	68279	7534	2.19
95	580	419	37.21	6.28	71247	4467	2.39
96	530	363	18.20	4.30	94185	9679	2.13
97	660	475	23.21	5.30	97874	8235	2.50
98	590	424	28.34	5.73	80122	6068	2.50
99	620	441	29.02	5.60	85149	6407	2.42
100	600	424	20.55	4.37	106301	9258	1.93
101	800	575	24.85	5.34	116931	9298	2.43
102	650	463	29.36	5.37	92926	6564	2.34
103	430	257	13.45	3.29	91323	13224	2.44
104	430	252	12.82	3.16	94046	14308	2.51
105	680	478	26.64	5.11	101356	7812	2.32
106	590	383	14.60	3.61	121363	15221	1.97
107	790	569	22.24	4.76	130192	10727	2.13
108	910	651	23.19	5.00	141932	11886	2.24
109	460	280	15.36	3.20	99518	12023	2.32
110	570	373	17.80	4.01	104504	11350	2.76
111	680	466	21.98	4.54	112701	10106	2.36
112	640	409	17.71	4.19	110948	13524	2.43
113	930	660	22.28	4.70	153169	12736	2.21
114	850	591	19.46	4.37	149397	14099	2.24
115	980	666	22.10	4.58	160471	14915	2.29
116	460	339	19.12	4.54	81376	6700	2.38
117	380	222	11.48	2.70	96565	14283	2.17
118	510	362	14.76	3.98	101777	10657	2.29
119	540	345	13.52	3.25	121146	15004	2.31
120	820	583	27.24	4.55	137306	9066	2.45

Tabla B.1 (continuación) Resultados Obtenidos

Caso	Mu kNm	M ₀ kNm	θ _u 10 ³ rad	θ ₀ 10 ³ rad	R _{ki} kNm/rad	R _{kp} kNm/rad	Factor n
121	730	523	18.77	4.34	131976	11597	2.55
122	730	510	19.73	3.58	153751	11305	2.70
123	430	247	11.13	2.02	139635	16958	2.07
124	900	635	23.54	4.18	163376	11654	2.39
125	760	522	14.00	3.65	160972	17837	2.44
126	460	328	17.83	4.07	88338	7832	2.24
127	650	477	22.88	4.79	107566	7928	2.56
128	510	355	14.94	3.66	108144	10905	2.15
129	590	400	13.54	3.64	124569	14748	2.23
130	850	626	26.00	4.90	136717	8885	2.55
131	640	393	12.47	3.10	147374	20528	2.22
132	930	675	22.67	4.45	163394	11913	2.38
133	830	607	17.38	4.10	161704	13706	2.26
134	620	352	10.12	2.55	165054	27209	2.40
135	860	617	16.68	3.81	177724	15558	2.16
136	860	617	14.93	3.76	181683	17336	2.18
137	1030	743	21.09	4.14	193909	14526	2.18
138	990	752	19.92	3.82	209247	12685	2.09
139	710	443	11.90	2.52	199120	23431	1.95
140	1030	737	16.72	3.64	221035	18698	2.11