

TRABAJO DE GRADO
Opción Investigación o Proyecto de Grado

**Evaluación estructural y constructiva de una conexión pernada viga-columna en
pórticos de acero**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería Civil

Valentina Rueda Caro.

Tutor: Robinson Fernando Rúa Patiño.

Corporación Universitaria Remington.

Facultad de ingenierías.

Ingeniería civil.

Proyecto de grado.

2026.

Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento a la universidad por la formación académica brindada y por proporcionar los espacios necesarios para el desarrollo de este proyecto de grado.

De manera especial, agradezco al profesor Robinson Fernando Rúa Patiño, tutor de este proyecto, por su orientación, acompañamiento y aportes técnicos durante el desarrollo de la monografía.

A mi madre, por su amor, sus consejos, apoyo incondicional y motivación constante en cada etapa de este camino académico y personal.

A mi padre, por sus esfuerzos y respaldo permanente, los cuales fueron fundamentales para continuar y culminar este proceso.

A mi hermano, por estar siempre presente, escucharme en los momentos difíciles y brindarme su amor, comprensión y apoyo constante.

A mi tía Miriam, por estar siempre para mí, brindarme su cariño, apoyo y acogerme con amor como una hija durante este proceso.

Finalmente, agradezco a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron al desarrollo y culminación de este trabajo.

Tabla de Contenidos

Resumen.....	7
Palabras clave.....	7
Abstract.....	8
Keywords.....	9
1. Introducción.....	9
2. Planteamiento del problema.....	12
2.1. Preguntas orientadoras.....	14
2.2. Justificación.....	15
3. Objetivos.....	17
3.1. Objetivo general.....	17
3.2. Objetivos específicos.....	18
4. Hipótesis.....	19
4.1. Variables de la hipótesis.....	20
5. Estado del arte.....	20
5.1. Marco normativo para conexiones pernadas.....	20
5.2. Conexiones semirrígidas y curva momento-rotación.....	21
5.3. Modelación numérica de conexiones de placa de extremo.....	22
5.4. Cargas cíclicas, respuesta sísmica y aspectos constructivos.....	24
5.5. Conceptos fundamentales de la conexión pernada.....	25
6. Metodología.....	28
6.1. Tipo y enfoque de la investigación.....	28
6.2. Fase 1: levantamiento geométrico y constructivo.....	29
6.3. Fase 2: modelo global simplificado del pórtico.....	30
6.4. Fase 3: submodelo local de la conexión.....	30
6.5. Fase 4: materiales y leyes constitutivas.....	32
6.6. Fase 5: contacto, pretensión y pasos de carga.....	32
6.7. Fase 6: Convergencia, validación y sensibilidad.....	33
7. Resultados.....	34
7.1. Modelado numérico de referencia y metodología de resultados.....	34
7.2. Variables de salida y ecuaciones usadas para interpretar resultados.....	38
7.3. Resultados de control numérico, malla, contacto y estabilidad del modelo.....	42
7.4. Mapas tipo ANSYS de refuerzo equivalente y deformación de componentes.....	45
7.5. Resultados de componentes de contacto y presión, apertura y efecto de la pretensión.....	50
7.6. Resultados en pernos: fuerzas axial, cortante y distribución no uniforme ...	53
7.7. Curva momento-rotación y clasificación semirrígida de la conexión.....	55
7.8. Evaluación de estados límites.....	57
7.9. Lectura constructiva de los resultados numéricos.....	59
8. Discusión general en función del problema, hipótesis y objetivos.....	62

8.1.	Discusión del objetivo específico 1: caracterización de parámetros	63
8.2.	Discusión del objetivo específico 2: resultado del modelo numérico.....	63
8.3.	Discusión del objetivo específico 3: estados límite y diseño normativo	65
8.4.	Discusión del objetivo específico 4: criterio constructivo	66
8.5.	Discusión de la hipótesis.....	66
9.	Desarrollo interpretativo de los resultados principales	68
9.1.	Interpretación de la rigidez rotacional	68
9.2.	Interpretación de esfuerzos en la placa de extremo	69
9.3.	Interpretación de contacto y apertura.....	69
9.4.	Interpretación de fuerzas por perno	70
9.5.	Interpretación de estado límite.....	71
10.	Conclusiones	72
14.	Referencias.....	74

Lista de figuras

Figura 1. Pórtico metálico tipo portal y delimitación de la conexión Pernada viga-columna de interés.	12
Figura 2. Idealización conceptual del submodelo numérico de la conexión Pernada viga-columna.	27
Figura 3. Flujograma metodológico de la modelación numérica de complejidad controlada.	35
Figura 4. Submodelo local idealizado de la conexión Pernada viga-columna con placa de extremo.	36
Figura 5. Esquema de refinamiento de malla en placa de extremo, taladros y bordes de contacto.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 6. Curva de sensibilidad de malla para esfuerzo equivalente máximo y rigidez inicial.	44
Figura 7. Mapa tipo ANSYS del esfuerzo equivalente normalizado en la placa de extremo.	46
Figura 8. Mapa tipo ANSYS del esfuerzo equivalente normalizado en ala de columna y zona de panel.	48
Figura 9. Mapa tipo ANSYS de deformación plástica equivalente normalizada en la placa de extremo.	49
Figura 10. Mapa tipo ANSYS de presión de contacto normalizada en la interfaz placa de extremo-ala de columna.	51
Figura 11. Perfil de apertura normalizada entre placa de extremo y ala de columna.	52
Figura 12. Distribución normalizada de fuerza axial y cortante en pernos del submodelo.	54
Figura 13. Curvas momento-rotación normalizadas para escenario base y alternativas de mejora.	56
Figura 14. Índice normalizado de utilización por estado límite de la conexión.	58
Figura 15. Flujograma para convertir un resultado numérico en una recomendación constructiva.	60
Figura 16. Mapa de discusión por objetivos específicos, metodología e hipótesis.	62

Lista de tablas

Tabla 1. Criterios de justificación del modelo de investigación.	17
Tabla 2. Clasificación de variables del estudio.	20
Tabla 3. Límites metodológicos de la investigación.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4. Componentes estructurales de la conexión y su respuesta mecánica	28
Tabla 5. Datos requeridos para el modelo numérico.	30
Tabla 6. Recomendaciones para el submodelo numérico.	31
Tabla 7. Supuestos mínimos del modelo numérico de referencia.	38
Tabla 8. Criterios mínimos de aceptación del modelo antes de discutir resultados resistentes.	45
Tabla 9. Lectura estructural de la demanda en pernos.	55
Tabla 10. Comparación normalizada de escenarios paramétricos.	57
Tabla 11. Matriz de estados límite, resultado FEM asociado y criterio de discusión.	59
Tabla 12. Checklist constructivo asociado a los resultados de la conexión pernada.	61

Resumen

Esta monografía propone la evaluación estructural y constructiva de una conexión pernada viga-columna en un pórtico de acero, tomando como caso de referencia el nudo de alero de un pórtico tipo portal. El trabajo se enfoca en la modelación numérica de la conexión, sin perder la interpretación constructiva y normativa del detalle. La conexión se concibe como un sistema compuesto por viga, columna, placa de extremo, pernos de alta resistencia, superficies de contacto, pretensión, posibles rigidizadores, zona de panel y condiciones de montaje. El propósito no es sólo verificar una capacidad resistente global, sino también analizar cómo se distribuye el esfuerzo, qué componente es el factor principal de la deformabilidad, cuál es la rigidez rotacional de la conexión y qué tipo de falla podría presentarse bajo condiciones de carga consideradas en el análisis. El documento desarrolla el problema a partir de la revisión de estudios sobre conexiones semirrígidas y placas de extremo, para después plantear una metodología de análisis numérico que considere la geometría de la conexión, forma en que el acero responde ante la aplicación de cargas, el contacto entre los diferentes elementos que la componen, el ajuste inicial de los pernos, los cambios que experimentan la estructura al deformarse, el nivel de detalle del modelo numérico y la evaluación de los resultados de acuerdo con los criterios establecidos por la normativa vigente. Para garantizar la confiabilidad del análisis, la propuesta se apoya en datos que deben obtenerse de planos, modelos CAD o mediciones de campo, evitando el uso de dimensiones o cargas que no cuenten con un sustento técnico adecuado.

Palabras clave

Pórtico de acero; unión viga-columna; conexión Pernada; pernos de alta resistencia; análisis numérico; comportamiento estructural.

Abstract

This monograph presents the structural and constructability evaluation of a bolted beam-to-column connection in a steel frame, using the eave joint of a portal frame as a reference case. The study focuses on the numerical modeling of the connection while considering both structural behavior and construction-related aspects. The connection is analyzed as an assembly composed of the beam, column, end plate, high-strength bolts, contact surfaces, bolt pretension, possible stiffeners, panel zone, and assembly conditions.

The objective is not only to verify the overall resistance of the connection, but also to evaluate the distribution of stresses, identify the components that most influence its deformability, determine its rotational stiffness, and assess the potential failure mechanisms under the loading conditions considered in the analysis. The methodology is based on a review of previous studies on semi-rigid connections and end-plate connections, followed by the development of a numerical model that incorporates the connection geometry, material behavior, interaction between components, bolt pretension, structural deformations, and appropriate modeling detail.

To ensure the reliability of the analysis, the study relies on information obtained from drawings, CAD models, or field measurements, avoiding the use of dimensions or loads that are not supported by technical evidence. The expected outcome is an academic

methodology that contributes to the understanding of the structural and constructive behavior of bolted beam-to-column connections in steel frames.

Keywords

Steel frame; beam-to-column connection; bolted connection; high-strength bolts; numerical analysis; structural behavior.

1. Introducción

Los pórticos de acero tipo portal son sistemas frecuentes en edificaciones industriales, bodegas, talleres, cubiertas livianas y estructuras de grandes luces moderadas. En estos sistemas, la estabilidad global no depende únicamente de la resistencia de vigas y columnas, sino también de la forma como se resuelve la transferencia de esfuerzos en los nudos. La conexión pernada viga-columna ubicada en el alero es especialmente relevante porque allí se combina la acción axial local de la viga inclinada, el cortante de extremo, el momento flector, la rotación del nudo y posibles efectos de montaje. La normativa colombiana y los estándares internacionales de acero estructural señalan que las conexiones no deben considerarse únicamente como un medio para unir vigas y columnas, sino como elementos fundamentales que influyen en la capacidad resistente y el desempeño de la estructura. [1]-[4].

Una conexión pernada diseñada adecuadamente facilita la fabricación de los elementos en taller, disminuye la necesidad de realizar soldaduras en obra, simplifica el transporte de

las piezas y permite un montaje más rápido y eficiente. Además, favorece el control de calidad mediante inspecciones visuales y la verificación del ajuste de pernos. No obstante, el comportamiento de este tipo de conexiones frente a las cargas que actúan sobre la estructura puede resultar complejo y requiere un análisis detallado. La carga no se reparte de forma uniforme entre todos los pernos; la placa de extremo puede flexionarse; la zona de panel de la columna puede deformarse; las superficies en contacto pueden deslizarse o separarse; y la pretensión puede modificar la rigidez inicial de la unión. Por esta razón, la especificación RCSC y las normas de pernos estructurales constituyen una referencia importante para comprender la función del ajuste inicial de los pernos, las características de la unión, los posibles desplazamientos entre las piezas conectadas y los procedimientos de montaje. [3]-[4].

En el análisis estructural de pórticos metálicos, las conexiones suelen representarse como articuladas o rígidas para simplificar el comportamiento de la estructura. Aunque esta aproximación puede ser adecuada en las etapas iniciales del diseño, resulta insuficiente cuando el estudio se enfoca específicamente en el comportamiento de las conexiones pernadas. La conexión real presenta un nivel de rigidez intermedio, por lo que su comportamiento no corresponde completamente al de una conexión articulada ni al de una conexión rígida. En este sentido, la modelación numérica lineal permite representar con mayor precisión fenómenos como el contacto entre los elementos, las posibles separaciones entre placas, los efectos que incrementan las fuerzas en algunas zonas de la conexión, las deformaciones permanentes del material y la manera en que las cargas se distribuyen entre los pernos.

Esta monografía estudia el comportamiento estructural y constructivo de una conexión pernada viga-columna en pórticos de acero mediante herramientas de modelación numérica. La palabra “constructiva” no hace referencia únicamente al proceso de montaje. También implica que la simulación representa de manera adecuada las condiciones reales de la conexión, considerando aspectos como el tipo de pernos utilizados, la dimensiones y tolerancias de las perforaciones, el procedimiento de ajuste de los pernos, el contacto entre los elementos, las soldaduras realizadas en taller, la facilidad del acceso para el montaje y las actividades de inspección y control de calidad. En este sentido, la modelación numérica no se plantea únicamente como el uso de un software de análisis, sino como una herramienta que facilita el estudio y la comprensión del comportamiento de una conexión representativa de las condiciones reales de una estructura. El análisis se centra en la conexión viga-columna mostrado en la Figura 1. Los demás elementos estructurales, como las bases, las columnas, los empalmes y el resto de la viga se incluyen únicamente para representar las condiciones de apoyo y carga que influyen en el comportamiento de la conexión. La definición del alcance del estudio permite enfocar el trabajo en la conexión, evitando ampliar el alcance hacia el diseño completo del pórtico. De esta manera, el análisis se centra en comprender el comportamiento de la unión y la forma en que se distribuyen los esfuerzos en sus diferente componentes. Como resultado, se espera desarrollar un trabajo académico sólido que contribuya al estudio de las conexiones en estructuras de acero, mediante le uso de herramientas de elementos finitos, la aplicación de la normativa vigente y la consideración de aspectos relacionados con la fabricación, el montaje y el control de calidad de la conexión.

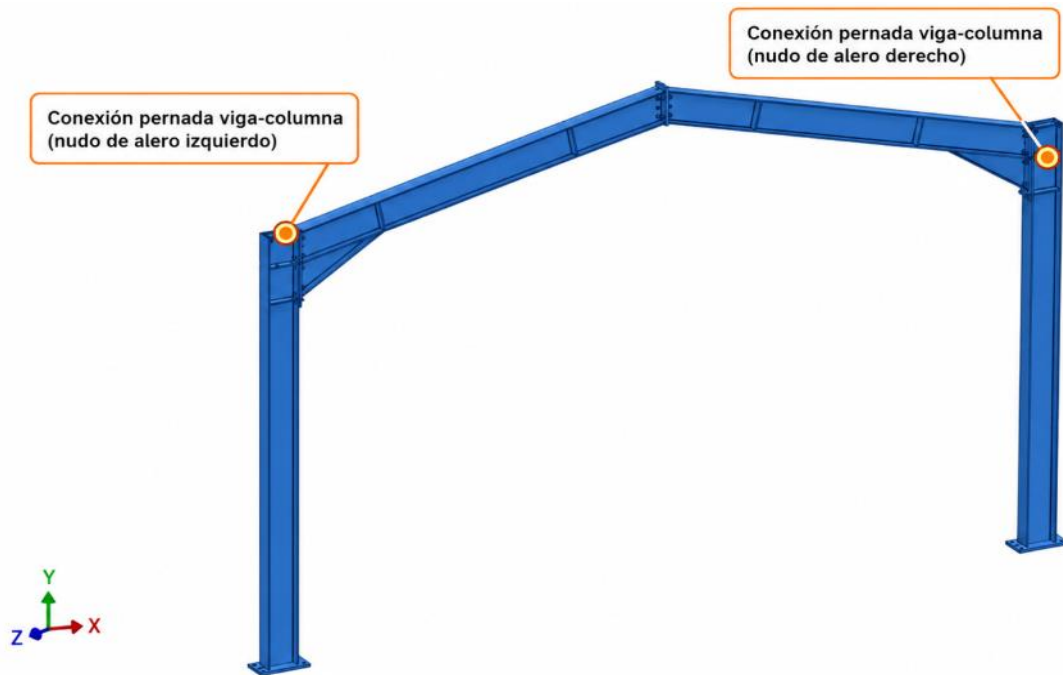


Figura 1. Pórtico metálico tipo portal y detalle de la conexión pernada viga-columna seleccionada para el análisis.

2. Planteamiento del problema

En el análisis de pórticos de acero es común considerar las conexiones como articuladas o rígidas para facilitar el estudio del comportamiento general de la estructura. Sin embargo, esta aproximación no refleja completamente el comportamiento real de una conexión pernada viga-columna, donde intervienen diversos elementos y mecanismos de transferencia de carga. [10]-[12]. En la conexión entre la viga y la columna ubicada en el alero de un pórtico tipo portal, la placa de extremo, los pernos y los demás componentes actúan conjuntamente para transferir las cargas que llegan a la unión. Como resultado de esta interacción, la conexión presenta un comportamiento intermedio entre una unión

articulada y una rígida, además de efectos locales que pueden influir significativamente en la respuesta y el desempeño de la estructura. [13]-[14]-[15].

El problema central aparece cuando una conexión Pernada se evalúa únicamente a partir del comportamiento global del pórtico o, por el contrario, cuando solo se consideran las características geométricas de la unión sin evaluar su respuesta estructural. En el primer caso, no se logra comprender con detalle cómo se comportan los pernos, la placa de extremo y las superficies en contacto dentro de la conexión. En el segundo, se deja de considerar cómo las cargas y esfuerzos que actúan sobre el pórtico influyen en el comportamiento de la unión. [16]-[18]. Para evaluar adecuadamente la conexión, es necesario utilizar un procedimiento que considere las cargas y esfuerzo que actúan sobre la estructura, permite desarrollar un modelo detallado de la unión y facilite la verificación de los resultados de acuerdo con los requisitos establecidos por la normativa y las condiciones de construcción.[7]-[9].

La imagen del pórtico muestra una conexión Pernada entre una viga inclinada y una columna. Sin embargo, sin información real de sus dimensiones y características, no es posible definir de manera adecuada aspectos como los espesores de las placas, el tamaño de los pernos, las distancias entre ellos, las propiedades del acero o las condiciones de ajuste de la conexión. Por esta razón, el propósito del estudio no es asumir datos sin fundamento para realizar una simulación, sino establecer cómo debe desarrollarse el modelo, qué información es necesaria para construirlo, qué aspectos deben supervisarse durante el análisis y qué resultados permiten determinar si la conexión presenta un comportamiento adecuado desde el punto de vista estructural y constructivo. [20]-[21].

La pregunta de investigación se formula así: ¿cómo evaluar estructural y constructivamente, el comportamiento de una conexión pernada entre viga y columna en un pórtico de acero mediante modelación numérica, teniendo en cuenta la interacción entre la placa de extremo, los pernos las superficies en contacto, el ajuste de los pernos, la zona de unión y las condiciones reales de fabricación y montaje?

2.1. Preguntas orientadoras

- ¿Cuál de los componentes de la conexión influye en mayor medida en su capacidad para resistir el giro: los pernos, la placa de extremo, el ala de la columna, la zona de unión o los rigidizadores?
- ¿De qué manera se modifican los esfuerzos en la conexión al tener en cuenta el contacto entre los elementos, las posibles separaciones que pueden presentarse y el ajuste de los pernos?
- ¿Qué criterios de verificación establecidos por la normativa deben considerarse para relacionar los resultados del modelo numérico con el diseño de la conexión?
- ¿Qué condiciones de fabricación, ensamble y montaje deben tenerse en cuenta para que la conexión estudiada sea viable de construir?

2.2.Justificación

La investigación se justifica porque las conexiones Pernadas viga-columna desempeñan un papel fundamental en la seguridad y el comportamiento de los pórticos de acero. En un pórtico tipo portal, la conexión ubicada entre la viga inclinada y la columna es una de las zonas más importantes de la estructura, ya que a través de ella se transmiten esfuerzos, fuerzas cortantes y deformaciones por giro entre ambos elementos. Si una conexión no se caracteriza correctamente, puede influir en el comportamiento de la estructura, cambiar la forma en que se distribuyen las cargas, ocasionar deformaciones inesperadas o producir problemas en algunos de sus componentes, aun cuando los elementos principales de la estructura tengan suficiente capacidad resistente. [10]-[11]-[12]-[14].

Desde el punto de vista académico, este trabajo permite que un proyecto de pregrado vaya más allá del diseño de perfiles estructurales o de una descripción general del proceso de montaje. El estudio de una conexión Pernada requiere comprender e integrar aspectos relacionados con el comportamiento de las estructuras, la respuesta de los materiales ante las cargas, los procesos de fabricación y montaje de estructuras metálicas, la aplicación de la normativa vigente, el control de calidad y el uso de herramientas de análisis numérico. Esta integración fortalece la formación profesional porque requiere fundamentar las decisiones tomadas durante el desarrollo del modelo, identificar los alcances y limitaciones del análisis y relacionar los resultados obtenidos con el comportamiento esperado de la conexión bajo condiciones reales de diseño y funcionamiento. [7]-[8]-[9].

Desde el punto de vista técnico, el análisis numérico aporta una ventaja importante porque permite estudiar aspectos del comportamiento de la conexión que son difíciles de evaluar mediante procedimientos de cálculo simplificados. Entre ellos se encuentran las zonas donde se concentran mayores esfuerzos alrededor de las perforaciones, las deformaciones de la placa de extremo, el aumento de fuerzas en algunos componentes de la conexión, la forma en que las cargas se distribuyen entre los pernos, las posibles separaciones entre elementos en contacto y las deformaciones permanentes que pueden presentarse en algunas partes de la unión. Estos resultados ayudan a comprender las razones por las cuales una conexión presenta un comportamiento adecuado o inadecuado frente a las cargas aplicadas, más allá de verificar únicamente un valor general de seguridad. [16]-[17]-[18]-[20]-[21].

Desde el punto de vista constructivo, este trabajo es relevante porque el comportamiento de una conexión pernada no depende únicamente de su diseño, sino también de aspectos que intervienen durante la fabricación y el montaje. Entre ellos se encuentran la correcta ubicación de las perforaciones, las tolerancias de fabricación, el acceso para la instalación y ajuste de los pernos, el uso de arandelas, el procedimiento de montaje, el estado de las superficies en contacto, las actividades de inspección y la calidad de la ejecución en obra. Si estos aspectos no se consideran en el análisis, los resultados obtenidos pueden parecer muy detallados, pero tener una aplicación limitada en situaciones reales. Por esta razón, el enfoque propuesto busca relacionar el análisis numérico con las condiciones reales de fabricación y montaje de la conexión. [7]-[8]-[20]-[21].

El principal aporte de esta monografía es proponer una metodología de análisis aplicable a una conexión específica de un pórtico metálico. El objetivo no es sustituir el trabajo de diseño realizado por un profesional ni emitir una certificación estructural, sino desarrollar un estudio académico sólido que permita comprender el comportamiento de la conexión a partir de un modelo numérico adecuadamente construido, la aplicación de la normativa vigente y la consideración de aspectos relacionados con su fabricación y montaje. De esta manera, se busca obtener una visión más completa del funcionamiento de la unión y de los factores que influyen en su respuesta estructural. [7]-[9]-[18]-[20]-[21].

Justificación	Contenido específico	Resultado esperado
Estructural	Identificar rigidez, fuerzas en pernos, esfuerzos y mecanismo crítico.	Comprensión del comportamiento real del nudo.
Numérica	Usar FEM con contacto, pretensión y material elastoplástico.	Curvas y mapas de resultados interpretables.
Constructiva	Revisar montaje, apriete, taladros, accesibilidad e inspección.	Criterios de control de calidad para la conexión.
Académica	Integrar normas, literatura y modelo computacional.	Monografía defendible para pregrado.

Tabla 1. Fundamentos de justificación del modelo de investigación.

3. Objetivos

3.1.Objetivo general

Evaluar el comportamiento estructural y constructivo de una conexión pernada viga-columna en un pórtico de acero mediante un modelo numérico, considerando la distribución de esfuerzos y deformaciones en sus principales componentes.

3.2.Objetivos específicos

- ✓ Identificar las características geométricas, mecánicas y constructivas que influyen en la transferencia de cargas de la conexión pernada viga - columna.
- ✓ Determinar, mediante un modelo numérico, la distribución de esfuerzos, deformaciones, fuerzas en pernos y rigidez rotacional de la conexión bajo diferentes condiciones de carga.
- ✓ Comparar los resultados obtenidos con los criterios establecidos en la normativa aplicable y en la literatura técnica, con el fin de identificar los aspectos que tienen mayor influencia en el comportamiento de la conexión
- ✓ Establecer criterios de evaluación constructiva y formular recomendaciones que contribuyen a una adecuada fabricación y montaje de la conexión.

4. Hipótesis

La conexión pernada viga-columna en el pórtico de acero presenta un comportamiento intermedio, que no es completamente rígido ni articulado. Este comportamiento depende de la interacción entre la placa de extremo, los pernos de alta resistencia, el contacto entre las superficies y la zona de la columna donde se concentra la transferencia de esfuerzos. Si el modelo numérico representa de forma más cercana la realidad, incluyendo la geometría real, el comportamiento del material, el ajuste inicial de los pernos, el contacto entre piezas y las condiciones que provienen del pórtico completo es posible entender con mayor detalle cómo se distribuyen las fuerzas dentro de la conexión, cómo responde ante el giro y qué tipo de falla podría presentarse. Esto permite una representación más precisa del comportamiento real de la conexión en comparación con modelos simplificados que la consideren totalmente rígida o completamente articulada.

4.1. Variables de la hipótesis

Tipo de variable	Variable	Interpretación dentro del estudio
Independientes	Espesor de placa, diámetro de perno, separación entre pernos, distancia al borde, grado del acero, pretensión y presencia de rigidizadores.	Parámetros que pueden modificar la respuesta mecánica de la conexión.
Dependientes	Rigidez rotacional, momento resistente, esfuerzo máximo, fuerza por perno, apertura de placa, deslizamiento y deformación plástica equivalente.	Resultados que permiten evaluar desempeño estructural.
De control	Condiciones de borde, malla, modelo de contacto, coeficiente de fricción, curva esfuerzo-deformación y criterio de convergencia.	Factores que deben mantenerse consistentes para comparar escenarios.

Tabla 2. Variables consideradas en el estudio.

5. Estado del arte

5.1. Marco normativo para conexiones pernadas

El diseño de conexiones en estructuras de acero se basa en normas que establecen criterios de resistencia, uso en condiciones normales, estabilidad, materiales, límites de diseño y requisitos de fabricación. En Colombia, la NSR-10 Título F es la norma principal para estructuras metálicas y está alineada con criterios de diseño utilizados a nivel internacional para el acero estructural [1].

El estándar ASTM F3125/F3125M integra las especificaciones de pernos estructurales de alta resistencia y permite ubicar los grados tradicionalmente asociados a A325 y A490 dentro de una especificación unificada [4]. Para estructuras con exigencias sísmicas, AISC 341-22 y AISC 358-22 amplían los requisitos de detallado y conexiones precalificadas para marcos a momento, lo que resulta útil cuando el pórtico no sólo resiste carga gravitacional, sino también acciones laterales de viento o sismo [5], [6].

El AISC Steel Construction Manual y el AISC Design Guide 39 son referencias de diseño práctico para conexiones, en particular para conexiones de placa de extremo. Design Guide 39 centraliza el tratamiento moderno de conexiones de placa de extremo, incluyendo criterios de resistencia, rigidez, acción de palanca, estados límite y ejemplos de diseño [7], [8]. Como contraste, EN 1993-1-8 desarrolla el método de los componentes y clasifica las uniones por resistencia, rigidez y capacidad de rotación, lo cual es útil para interpretar la conexión como un sistema semirrígido [9].

5.2. Conexiones semirrígidas y curva momento-rotación

La idealización clásica de una conexión como rígida o articulada fue cuestionada por investigaciones tempranas sobre pórticos con uniones flexibles. Frye y Morris propusieron procedimientos para incluir conexiones con rigidez finita en el análisis de pórticos, mostrando que la curva momento-rotación influye en la distribución de esfuerzos y desplazamientos [10]. Posteriormente, Bjorhovde, Colson y Brozzetti propusieron sistemas de clasificación de conexiones viga-columna considerando rigidez y resistencia, lo que

consolidó el concepto de conexión semirrígida como una categoría intermedia relevante para el diseño [11].

Chen y Kishi organizaron bases de datos de conexiones viga-columna y desarrollaron modelos para describir su comportamiento no lineal, especialmente a partir de curvas momento-rotación obtenidas experimentalmente [12]. Nethercot, Li y Ahmed propusieron un sistema unificado de clasificación de conexiones que incorpora rigidez y resistencia de manera conjunta [13]. Faella, Piluso y Rizzano ampliaron el estudio de las conexiones semirrígidas a través de desarrollos teóricos, criterios de diseño y el uso de herramientas de software. En sus trabajos destacan que el comportamiento local de una conexión puede influir de manera importante en el comportamiento general del pórtico [14].

En el caso de las conexiones con placa de extremo, Krishnamurthy y otros investigadores desarrollaron curvas teóricas momento-rotación que se convirtieron en un referente importante para analizar conexiones Pernadas sometidas a flexión [15]. Estos trabajos permiten comprender que la variable de interés no es únicamente la resistencia última, sino también la rigidez inicial, la rotación de fluencia, la ductilidad y la capacidad de disipar energía cuando la unión se somete a acciones laterales o ciclos de carga.

5.3. Modelación numérica de conexiones de placa de extremo

La modelación numérica de conexiones Pernadas viga-columna se desarrolló inicialmente para superar las limitaciones de los métodos puramente analíticos. Sherbourne y Bahaari realizaron simulaciones tridimensionales de conexiones Pernadas con placa de

extremo, evidenciando la necesidad de representar la interacción entre placa, pernos y columna mediante elementos sólidos y contacto [16]. Bursi y Jaspart calibraron modelos de elementos finitos para conexiones pernadas aisladas, enfatizando la importancia de validar el modelo frente a resultados experimentales y de representar adecuadamente los componentes tipo T-stub [17].

Maggi, Gonçalves, Leon y Ribeiro desarrollaron análisis paramétricos de conexiones pernadas de placa de extremo utilizando elementos finitos, considerando no linealidad material, discontinuidades geométricas y grandes desplazamientos [18]. Shi, Shi, Wang, Li y Chen llevaron el análisis al contexto de pórticos metálicos tipo portal, reportando ensayos y simulaciones de conexiones de placa de extremo para estudiar resistencia y rigidez rotacional [19]. Estos aportes son especialmente cercanos al caso de esta monografía porque conectan la unión pernada con el comportamiento de pórticos de acero.

Los estudios de Dessouki, Youssef e Ibrahim mostraron que los modelos tridimensionales en ANSYS pueden capturar el comportamiento de conexiones de placa de extremo, incluyendo la influencia del espesor de placa, los rigidizadores y el diámetro de pernos [20]. Ismail, Fahmy, Khalifa y Mohamed desarrollaron un modelo FEM en ABAQUS para estudiar el comportamiento último de conexiones pernadas de placa de extremo, destacando el efecto de la geometría, la pretensión y la configuración de rigidizadores sobre resistencia, rigidez y capacidad de rotación [21].

Investigaciones recientes han insistido en que los modelos predictivos para conexiones semirrígidas aún presentan incertidumbre cuando se busca estimar rigidez, resistencia y ductilidad en un amplio rango de geometrías. Ding y Elkady revisaron modelos disponibles

para conexiones pernadas de placa de extremo y evaluaron su desempeño frente a bases de datos experimentales extensas, concluyendo que la predicción de rigidez elástica y ductilidad continúa siendo un desafío [22]. Celik y Sakar ofrecieron un estado del arte sobre modelación, análisis y diseño de conexiones semirrígidas, clasificando modelos analíticos, empíricos, mecánicos, numéricos, híbridos e informacionales [23].

Díaz, Martí, Victoria y Querin revisaron la modelación del comportamiento de juntas en pórticos de acero, resaltando que los pórticos metálicos se han diseñado tradicionalmente con idealizaciones rígidas o articuladas, aunque las juntas reales poseen rigidez finita [24]. En trabajos posteriores, Díaz y colaboradores desarrollaron modelos FE para conexiones de placa de extremo en dos y tres dimensiones, proporcionando una base metodológica para representar geometría, contacto, no linealidad material y efectos tridimensionales [25], [26].

5.4.Cargas cíclicas, respuesta sísmica y aspectos constructivos

La respuesta de una conexión pernada puede cambiar de forma considerable cuando se somete a acciones laterales, inversión de momento, ciclos de carga o demandas que inducen apertura y cierre de la placa de extremo. Wang, Shi, Wang y Shi estudiaron numéricamente el comportamiento sísmico de conexiones de placa de extremo en marcos de acero, mostrando que la rigidez, la disipación y la secuencia de plastificación dependen del detalle local [27]. ElSabbagh, Sharaf, Nagy y ElGhandour analizaron conexiones de placa de

extremo sometidas a cargas monotónicas y cíclicas, aportando evidencia sobre la necesidad de estudiar rigidez, resistencia, ductilidad y modos de falla, no sólo capacidad última [28].

El comportamiento de los pernos de alta resistencia tiene una tradición propia dentro del diseño estructural. Kulak, Fisher y Struik sistematizaron criterios para juntas pernadas y remachadas que siguen siendo una base conceptual para comprender cortante, aplastamiento, fricción, pretensión y distribución de fuerzas [29]. En una conexión viga-columna, estos criterios deben integrarse con la flexión de la placa de extremo y la deformación de la columna, porque el perno no trabaja de manera aislada sino como parte de un mecanismo tridimensional.

5.5. Conceptos fundamentales de la conexión pernada

La conexión pernada entre viga y columna constituye uno de los elementos más importantes en los pórticos de acero, ya que permite la transferencia de cargas y esfuerzos entre los diferentes componentes de la estructura. En este tipo de unión intervienen la viga, la columna, la placa de extremo, los pernos de alta resistencia y las superficies de contacto, los cuales trabajan conjuntamente para garantizar el adecuado comportamiento estructural del sistema.

El comportamiento de una conexión pernada no suele ser completamente rígido ni completamente articulado. Por el contrario, presenta una respuesta intermedia que depende de las características de sus componentes y de la forma en que interactúan entre sí. Por esta razón, para comprender adecuadamente su comportamiento es necesario considerar el aporte de cada elemento que participa en la transferencia de cargas.

Uno de los parámetros más utilizados para evaluar este comportamiento es la rigidez rotacional de la conexión. Esta propiedad representa la relación entre el momento que actúa sobre la unión y el giro relativo que se produce entre la viga y la columna. De forma simplificada, puede expresarse mediante la ecuación, $S_j = M/\theta$, donde S_j es la rigidez rotacional, M es el momento aplicado en la conexión y θ es la rotación relativa entre la viga y la columna.

Una mayor rigidez implica una menor rotación para una misma carga aplicada, mientras que una menor rigidez permite mayores desplazamientos angulares. La relación entre el momento y la rotación se representa mediante la curva momento – rotación ($M-\theta$), la cual permite evaluar la respuesta de la conexión y clasificarla de acuerdo con su comportamiento estructural.

En una conexión con placa de extremo, las cargas se transfieren desde la viga hacia la columna a través de la placa y los pernos. Dependiendo de las condiciones de carga, los pernos pueden estar sometidos a tracción, cortante o a una combinación de ambas acciones. Asimismo, la placa de extremo, la columna y otros componentes de la unión pueden deformarse y participar en la resistencia de la conexión.

Entre los posibles modos de falla de una conexión Pernada se encuentran los daños en los pernos, las deformaciones excesivas de la placa de extremo, las fallas en la columna, los problemas en las soldaduras y los deslizamientos que pueden presentarse en la unión. La identificación de estos mecanismos permite comprender qué componente tiene mayor influencia en el comportamiento de la conexión.

La respuesta de una conexión pernada depende no solo de los esfuerzos que actúan sobre los pernos, sino también de las deformaciones que pueden presentarse en la placa de extremo, la columna y otros componentes de la unión. Estas condiciones pueden influir en la distribución de las cargas y dar lugar a diferentes modos de falla. En este contexto, la modelación numérica permite estudiar con mayor detalle el comportamiento de la conexión, identificar las zonas más exigidas y evaluar sus resultados de acuerdo con los criterios en la normativa y la literatura técnica.

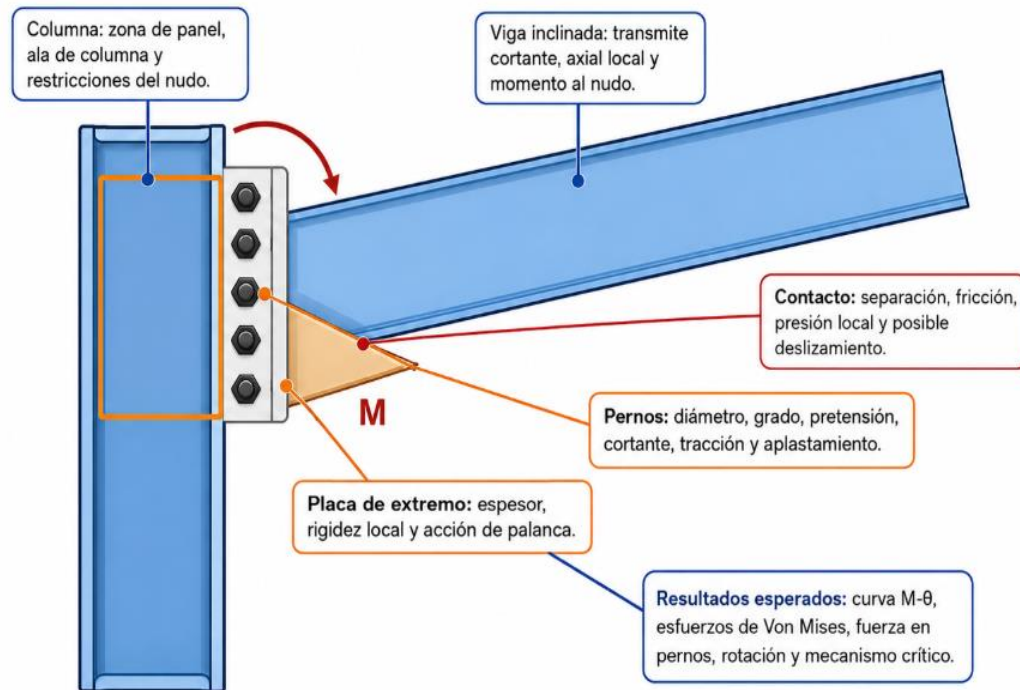


Figura 2. Representación del modelo numérico de la conexión pernada viga-columna.

Componente	Función resistente	Resultado numérico asociado
Pernos	Transmiten tracción, cortante y presión de contacto.	Fuerza axial por perno, cortante, esfuerzo y posible plastificación.
Placa de extremo	Distribuye fuerzas entre viga, pernos y columna.	Flexión local, deformación plástica, apertura y acción de palanca.
Ala de columna	Recibe presión de la placa y tracción de pernos.	Flexión local, presión de contacto y esfuerzos de Von Mises.
Zona de panel	Transfiere cortante y momento dentro del nudo.	Deformación por cortante y concentración de esfuerzos.
Rigidizadores	Reducen deformación de placa o columna.	Cambio en rigidez, reducción de plastificación y redistribución de fuerzas.
Superficies de contacto	Controlan fricción, separación y deslizamiento.	Presión normal, apertura, deslizamiento relativo y estado de contacto.

Tabla 3. Elementos principales de la conexión y su comportamiento estructural.

6. Metodología.

6.1. Tipo y enfoque de la investigación.

La metodología se desarrolla mediante un proceso de análisis numérico estructurado, en el que se definen y justifican los principales supuestos del estudio. Aunque contempla diferentes etapas de modelación, el objetivo no es únicamente construir un modelo computacional, sino analizar y comprender el comportamiento de la conexión bajo las condiciones consideradas. La herramienta sugerida puede ser ANSYS Workbench, ABAQUS u otro programa FEM con capacidad de interacción entre componentes y comportamientos del acero. La metodología también admite una etapa de modelo global

simplificado para obtener acciones internas en el nudo y una etapa de submodelado local para representar la conexión con mayor detalle.

6.2. Fase 1: levantamiento geométrico y constructivo

La primera fase consiste en documentar la geometría real de la conexión. Deben identificarse el perfil de la columna, el perfil de la viga inclinada, el espesor de placa de extremo, la existencia de cartelas o rigidizadores, el número de pernos, el diámetro nominal, el patrón de pernos, las distancias a borde, la separación vertical y horizontal, la longitud de agarre, las arandelas, las tuercas, el tipo de taladro y las soldaduras de taller que unen la placa a la viga.

El levantamiento puede provenir de planos, mediciones de campo, modelo CAD o información del fabricante. Si la imagen del pórtico es la única información inicial, se debe declarar que la geometría es incompleta. En ese caso se construye una geometría paramétrica, no una geometría definitiva. Esta distinción es importante para evitar conclusiones falsas: una cosa es analizar una conexión real y otra estudiar una familia de conexiones plausibles.

Dato requerido	Fuente sugerida	Uso en el modelo
Perfil de viga y columna	Planos, catálogo o medición.	Define geometría y rigidez de miembros.
Espesor de placa de extremo	Plano de detalle o medición.	Controla flexión de placa y acción de palanca.
Diámetro y grado de pernos	Plano o especificación técnica.	Define rigidez, resistencia y pretensión.
Patrón de pernos	Plano de taller.	Determina brazo interno y distribución de tracciones.

Tipo de contacto	Especificación de montaje.	Define fricción, deslizamiento y condición de junta.
Cargas internas del nudo	Modelo global del pórtico.	Entrada para submodelo local.

Tabla 4. Información para el modelo numérico.

6.3.Fase 2: modelo global simplificado del pórtico

Antes de desarrollar el modelo detallado de la conexión, es recomendable elaborar un modelo simplificado del pórtico para estimar las acciones que llegan a la unión, como momentos, fuerzas cortantes, fuerzas axiales y rotaciones. Inicialmente, la conexión puede representarse como rígida y posteriormente considerar una respuesta con capacidad de giro para analizar su influencia en el comportamiento del sistema.

Las cargas deben definirse de acuerdo con las condiciones de uso de la estructura e incluir, cuando corresponda, el peso propio, la cubierta, las cargas de mantenimiento, el viento y la acción sísmica, Si no se dispone de información real, pueden plantearse escenarios representativos con fines académicos, aclarando que no corresponden a condiciones definitivas de diseño.

6.4.Fase 3: submodelo local de la conexión

El modelo detallado de la conexión debe incluir el extremo de la viga, la placa de extremo, una porción representativa de la columna y los elementos de unión, como pernos, tuercas y arandelas, los cuales pueden modelarse con distintos niveles de detalle según los recursos computacionales disponibles. Se recomienda utilizar elementos sólidos los

recursos computacionales disponibles. Se recomienda utilizar elementos sólidos tridimensionales en las zonas donde existe contacto entre componentes y en la placa de extremo, ya que allí suelen presentarse deformaciones localizadas y mayores concentraciones de esfuerzos.

Los pernos pueden representarse mediante una geometría simplificada, sin incluir el detalle de la rosca, utilizando formas básicas para el cuerpo del perno, la cabeza y la tuerca. En trabajos de pregrado, generalmente no es necesario modelar la rosca, ya que incrementa el tiempo de análisis sin aportar beneficios significativos para la interpretación del comportamiento estructural. El ajuste inicial de los pernos puede incorporarse mediante las herramientas disponibles en el software empleado.

Aspecto del submodelo	Recomendación	Comentario
Tipo de elemento	Sólidos 3D en placa, pernos y zonas de contacto.	Evita perder flexión local y presión alrededor de taladros.
Contacto placa-columna	Contacto friccional con separación permitida.	Necesario para capturar apertura y deslizamiento.
Pretensión de pernos	Aplicar paso inicial de pretensión.	Permite representar junta apretada antes de aplicar cargas externas.
No linealidad material	Curva elastoplástica bilineal o multilínea.	Permite detectar plastificación local.
No linealidad geométrica	Activar grandes deformaciones si hay apertura significativa.	Útil en cargas últimas o rotaciones altas.
Malla	Refinamiento en taladros, bordes de placa y zona de contacto.	La malla controla precisión de presiones y esfuerzos máximos.

Tabla 5. Recomendaciones para el submodelo numérico.

6.5.Fase 4: materiales y leyes constitutivas

El comportamiento de acero de la viga, la columna y la placa puede representarse mediante un modelo que considere tanto su respuesta inicial como las deformaciones permanentes que pueden presentarse bajo cargas elevadas. Siempre que sea posible, se recomienda utilizar las propiedades reales del material obtenidas de certificados o información técnica. En el caso de los pernos de alta resistencia, sus propiedades deben corresponder al tipo y grados especificados por la norma aplicable.

La definición de los materiales debe diferenciar el acero de los perfiles estructurales, el acero de la placa de extremo y el acero de los pernos, ya que cada uno puede representar capacidades de resistencia diferentes. Por otra parte, la soldadura entre la viga y la placa puede modelarse de forma detallada cuando se desea analizar su comportamiento. Se este aspecto no forma parte del alcance del estudio, puede asumirse una unión continua entre ambos elementos, indicando claramente esta simplificación dentro del modelo.

6.6.Fase 5: contacto, pretensión y pasos de carga

La simulación debe desarrollarse por etapas, primero se incorpora el ajuste inicial de los pernos para garantizar el contacto entre la placa y la columna. Luego se aplican las cargas obtenidas del modelo general del pórtico y, si se considera necesario, estas pueden incrementarse gradualmente para observar el comportamiento de la conexión bajo mayores niveles de carga.

Las condiciones de contacto entre los componentes deben representar adecuadamente la interacción entre las superficies y la fricción existente. Cuando no se disponga de información precisa, puede utilizarse valores razonables, indicando claramente los supuestos adoptados. Una definición adecuada de estos contactos es importante para obtener resultados confiables en el análisis.

6.7. Fase 6: Convergencia, validación y sensibilidad

La validez del modelo no debe evaluarse únicamente a partir de las imágenes de esfuerzos. También es necesario verificar que los resultados sean consistentes mediante revisiones como el equilibrio entre cargas y reacciones, la estabilidad de los contactos y la influencia del tamaño de la malla. Además, la curva momento-rotación debe obtenerse a partir de puntos de control previamente definidos.

Cuando se disponga de ensayos experimentalmente propios, los resultados pueden compararse con tendencias reportadas en la literatura técnica. Por ejemplo, las placas más gruesas suelen aumentar la rigidez de la conexión, pernos de mayor diámetro tienden a reducir las deformaciones y los rigidizadores contribuyen a una mejor distribución de los esfuerzos. Aunque esta comparación no reemplaza un ensayo experimental, permite comprobar que la respuesta del modelo sea coherente con el comportamiento esperado de la conexión.

Incluye	No incluye
Submodelo 3D de conexión pernada viga-columna.	Diseño completo de toda la estructura metálica.
Contacto, pretensión, material elastoplástico y evaluación de rigidez.	Ensayo experimental obligatorio de laboratorio.

Comparación con estados límite normativos.	Certificación profesional de la conexión.
Criterios constructivos de montaje e inspección.	Presupuesto detallado de fabricación y montaje.
Sensibilidad de parámetros geométricos si faltan datos reales.	Inventar dimensiones como si fueran datos medidos.

Tabla 6. Límites metodológicos de la investigación.

7. Resultados

7.1. Modelado numérico de referencia y metodología de resultados.

Resultados de la fase 1: Definición geométrica y constructiva.

De acuerdo con la fase 1 de la metodología, orientada a la definición geométrica de la conexión y de los criterios básicos de modelación, los resultados obtenidos corresponden a la identificación de los componentes estructurales, la delimitación del dominio de análisis y la definición de los supuestos de modelación, presentado en las Figuras 3 y 4 y en la Tabla 7.

La metodología de resultados se basa en un modelo numérico con un nivel de detalle adecuado para un trabajo de pregrado. No se busca representar toda la estructura mediante modelos tridimensionales complejos, ya que esto aumentaría el tiempo de análisis y dificultaría la interpretación de los resultados. En su lugar, se propone un modelo simplificado del pórtico para obtener las cargas que llegan a la conexión y un modelo más detallado de la unión pernada viga-columna para estudiar su comportamiento.

El mayor nivel de detalle se concentra en los elementos que tienen una influencia directa en el comportamiento de la conexión, como el contacto entre la placa de extremo y la columna, el ajuste inicial de los pernos, las deformaciones de la placa, la distribución de

esfuerzos alrededor de las perforaciones y el comportamiento de la zona cercana a la unión. Este enfoque coincide con lo recomendado en la literatura especializada, donde se sugiere representar con mayor detalle los componentes de la conexión cuando el objetivo es estudiar su comportamiento local [16]-[24].

La Figura 3 muestra el procedimiento general propuesto para obtener resultados confiables. El proceso inicia con la recopilación de la información geométrica necesaria y finaliza con el análisis de los resultados desde el punto de vista normativo y constructivo. Por esta razón, el estudio no se limita al uso de un software, sino que incluye la interpretación y evaluación de la respuesta de la conexión.

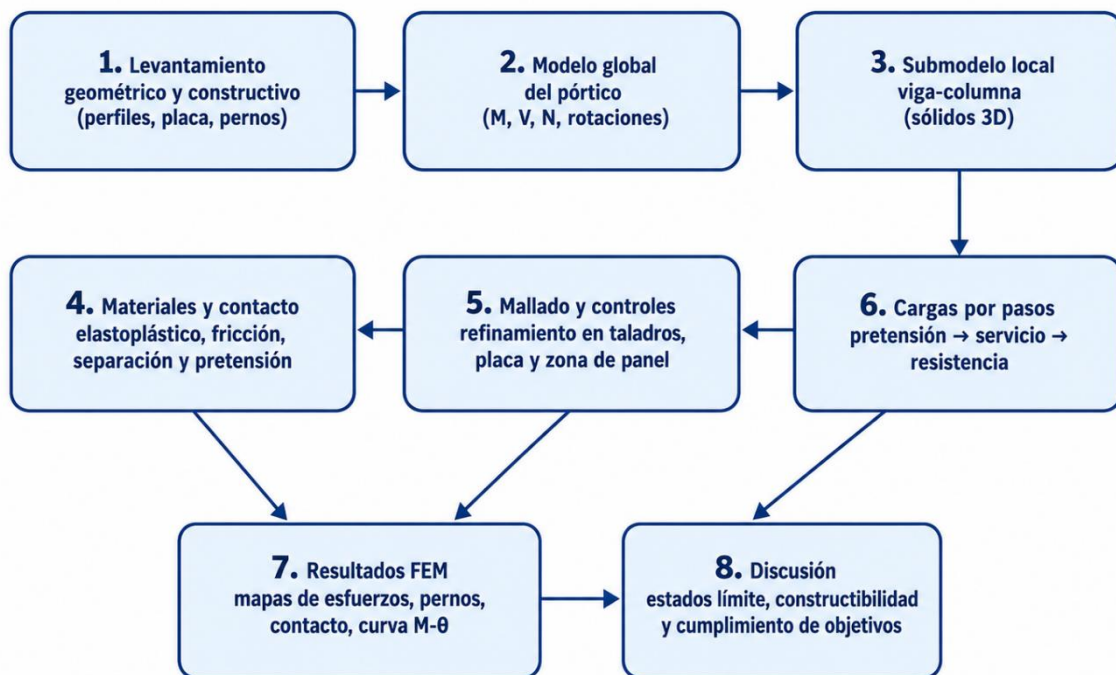


Figura 3. Flujograma metodológico de la modelación numérica

La lectura de la Figura 3 muestra que los resultados del análisis solo son confiables cuando existe coherencia entre la información utilizada, las condiciones consideradas en el modelo la definición de los contactos, el ajuste de los pernos, la malla empleada y los criterios adoptados para interpretar los resultados. En un trabajo de pregrado, lo más importante no es desarrollar un modelo excesivamente complejo, sino justificar adecuadamente las decisiones tomadas durante su construcción y análisis.

La Figura 4 representa el dominio local que debe analizarse con mayor detalle. En el esquema se distinguen viga, placa de extremo, pernos, interfaz de contacto, ala de columna y zona de panel.

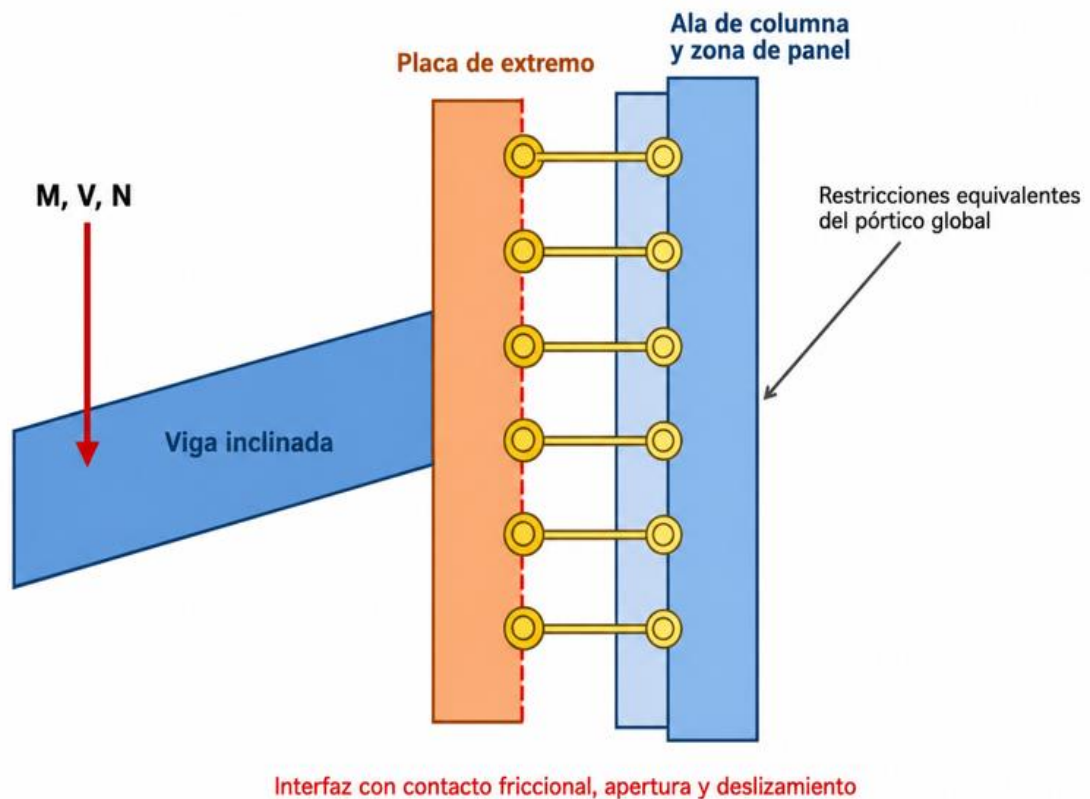


Figura 4. Modelado detallado de la conexión pernada viga-columna con placa de extremo.

La lectura de la Figura 4 muestra el modelo detallado de la conexión permite observar comportamientos que no se aprecian en el modelo general del pórtico, como las deformaciones de la placa, la distribución de fuerzas en los pernos el contacto entre los componentes y las deformaciones localizadas. Estos resultados pueden relacionarse con los criterios de diseño y desempeño de la conexión.

La Tabla 7 establece los supuestos mínimos que deben declararse antes de mostrar resultados.

Componente del modelo	Decisión de modelación	Justificación académica
Viga y columna	Sólidos 3D cerca del nudo; extensión suficiente para aplicar condiciones de borde.	Permite transferir momento, cortante y axial sin imponer rigidez artificial en la conexión.
Placa de extremo	Elemento sólido con material elastoplástico y refinamiento en bordes y taladros.	Es el componente con mayor probabilidad de controlar flexión local y acción de palanca.
Pernos	Geometría simplificada sin rosca explícita; pretensión aplicada en paso inicial.	Adecuado para pregrado porque captura la tracción global sin costo excesivo.
Contacto placa-columna	Contacto friccional con separación permitida.	Necesario para representar presión, apertura y posible deslizamiento.
Materiales	Modelo elastoplástico bilineal o multilineal según disponibilidad de datos.	Evita limitar el análisis a comportamiento puramente elástico.
Cargas	Pasos sucesivos: pretensión, servicio y resistencia.	Reproduce la secuencia constructiva básica antes de aplicar demanda estructural.
Malla	Refinamiento en taladros, bordes de placa, contacto y zona de panel.	Controla la calidad de mapas y la confiabilidad de esfuerzos máximos.

Tabla 7. *Consideraciones básicas del modelo numérico de referencia.*

Con base en la Tabla 7, la monografía mantiene un alcance adecuado para un trabajo de pregrado. Aunque no incluye el modelado detallado de las roscas de los pernos ni de toda la estructura, sí considera los aspectos más importantes para analizar el comportamiento de una conexión pernada sometida a momento.

7.2. Variables de salida y ecuaciones usadas para interpretar resultados

Resultados de la Fase 2: Variables de salida y criterios de evaluación.

En correspondencia con la fase 2 de la metodología, se establecieron las variables de respuesta y las ecuaciones necesarias para interpretar el comportamiento estructural de la conexión. Los resultados de esta fase se presentan de la conexión. Los resultados de esta fase se presentan mediante las ecuaciones de rigidez rotacional, rotación relativa, demanda/capacidad, convergencia de mala, esfuerzos normalizados, fuerzas en pernos y apertura de contacto.

Antes de presentar mapas de calor y curvas tipo ANSYS, se definen las variables que conectan el posprocesamiento con el problema estructural. Esta definición evita confundir colores altos en una figura con una conclusión de falla. La interpretación se basa en rigidez rotacional, demanda normalizada, presión de contacto, apertura, fuerza por perno, convergencia de malla y relación demanda/capacidad.

La Ecuación (1) se emplea para calcular la rigidez rotacional secante e inicial de la conexión. Antes de aplicar esta expresión se definen sus variables para evitar que la formulación quede desconectada de la lectura estructural de la conexión.

$$(1) \quad S_{j,sec} = \frac{M_j}{\theta_j} \quad ; \quad S_{j,ini} = \frac{\Delta M_j}{\Delta \theta_j} \quad | \text{ zona inicial}$$

En la Ecuación (1), $S_{j, sec}$ es la rigidez rotacional secante, $S_{j, ini}$ es la rigidez inicial, M_j es el momento transferido por la conexión y θ_j es la rotación relativa entre viga y columna. La rigidez inicial caracteriza la respuesta antes de la apertura significativa del contacto, mientras que la rigidez secante permite comparar escenarios a diferentes niveles de carga.

La Ecuación (2) se emplea para obtener la rotación relativa a partir de desplazamientos nodales de control. Antes de aplicar esta expresión se definen sus variables para evitar que la formulación quede desconectada de la lectura estructural de la conexión.

$$(2) \quad \theta_j = \theta_\beta - \theta_\epsilon \approx \left[\frac{u_{\beta,sup} - u_{\beta,inf}}{h_\beta} \right] - \left[\frac{u_{\epsilon,sup} - u_{\epsilon,inf}}{h_\epsilon} \right]$$

En la Ecuación (2), θ_β y θ_ϵ son las rotaciones locales de la viga y de la columna; $u_{\beta, sup}$, $u_{\beta, inf}$, $u_{\epsilon, sup}$ y $u_{\epsilon, inf}$ son desplazamientos de puntos superiores e inferiores; h_β y h_ϵ son distancias verticales entre puntos de control. Esta forma es útil cuando el software entrega desplazamientos nodales y no una rotación directa de la conexión.

La Ecuación (3) se emplea para comparar cada estado límite mediante una índice demanda/capacidad. Antes de aplicar esta expresión se definen sus variables para evitar que la formulación quede desconectada de la lectura estructural de la conexión.

$$(3) \quad \eta_k = \frac{E_{d,k}}{R_{d,k}}$$

En la Ecuación (3), η_k es el índice de utilización del estado límite k, $E_{d,k}$ es la demanda obtenida del modelo o de las combinaciones de carga, y $R_{d,k}$ es la resistencia de diseño asociada al componente revisado. Cuando η_k se aproxima a 1.0, el componente se considera crítico dentro del escenario analizado.

La Ecuación (4) se emplea para controlar la sensibilidad de malla de una cantidad de respuesta. Antes de aplicar esta expresión se definen sus variables para evitar que la formulación quede desconectada de la lectura estructural de la conexión.

$$(4) \quad e_Q = \left| \frac{Q_h - Q_{ref}}{Q_{ref}} \right| \times 100 \%$$

En la Ecuación (4), Q_h es el resultado obtenido con una malla de tamaño h, Q_{ref} es el resultado de referencia con malla refinada, y e_Q es el error relativo porcentual. Esta ecuación evita basar conclusiones en un esfuerzo pico que cambia de forma importante al refinar la malla.

La Ecuación (5) se emplea para normalizar mapas de esfuerzo de Von Mises y deformación plástica equivalente. Antes de aplicar esta expresión se definen sus variables para evitar que la formulación quede desconectada de la lectura estructural de la conexión.

$$(5) \quad \sigma_n = \frac{Q_{vm}}{Q_y} \quad ; \quad \varepsilon_n = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{p,max}}$$

En la Ecuación (5), σ_n es el esfuerzo equivalente normalizado, σ_{vm} es el esfuerzo de Von Mises, σ_y es el esfuerzo de fluencia del acero, ε_p es la deformación plástica equivalente normalizada y $\varepsilon_{p,max}$ es su valor máximo en el escenario evaluado. La normalización permite discutir tendencias sin inventar una resistencia de material definitiva cuando no se tienen certificados o ensayos.

La Ecuación (6) se emplea para relacionar la fuerza por perno con el equilibrio local de la conexión. Antes de aplicar esta expresión se definen sus variables para evitar que la formulación quede desconectada de la lectura estructural de la conexión.

$$(6) \quad F_{b,i} = \{N_i, V_i, M_i\} \quad ; \quad \Sigma F_{b,i} + F_{\text{contacto}} = F_{\text{externa}}$$

En la Ecuación (6), $F_{b,i}$ representa la demanda del perno i ; N_i es tracción axial, V_i es cortante, M_i es momento local si se extrae del conector, F_{contacto} es la resultante por presión y fricción, y F_{externa} es la demanda aplicada por el submodelo. La ecuación recuerda que los pernos no transfieren toda la carga cuando existe contacto efectivo; la presión y la fricción participan en el equilibrio.

La Ecuación (7) se emplea para cuantificar la apertura normal entre placa de extremo y ala de columna. Antes de aplicar esta expresión se definen sus variables para evitar que la formulación quede desconectada de la lectura estructural de la conexión.

$$(7) \quad g_n = \max (0, u_{n, \text{placa}} - u_{n, \text{columna}})$$

En la Ecuación (7), g_n es la apertura normal, $u_{n, \text{placa}}$ es el desplazamiento normal de la placa y $u_{n, \text{columna}}$ es el desplazamiento normal de la columna en pares de contacto compatibles. Una apertura alta en la zona traccionada confirma que la conexión trabaja con separación parcial y acción de palanca.

7.3. Resultados de control numérico, malla, contacto y estabilidad del modelo

Resultado de la fase 3: Control numérico del modelo.

Conforme a la fase 3, se verificó la calidad numérica del modelo mediante análisis, convergencia, estabilidad, contacto y condiciones de borde. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 5 y 6 y en la Tabla 8.

El primer resultado no debe ser el mapa de colores de mayor impacto visual, sino el control de calidad del modelo. Una conexión pernada con contacto, pretensión y material elastoplástico puede producir resultados aparentemente detallados, pero numéricamente inestables si la malla es insuficiente, si el contacto penetra de forma no física o si las reacciones no equilibran la carga aplicada. Por eso, la lectura inicia con la malla y la convergencia.

La Figura 5 presenta la lógica de discretización recomendada. Los taladros, bordes de placa y zonas de contacto se refinan porque allí se concentran gradientes de esfuerzo y presión.

Esquema de control de malla para resultados tipo FEM/ANSYS

Placa de extremo con refinamiento local

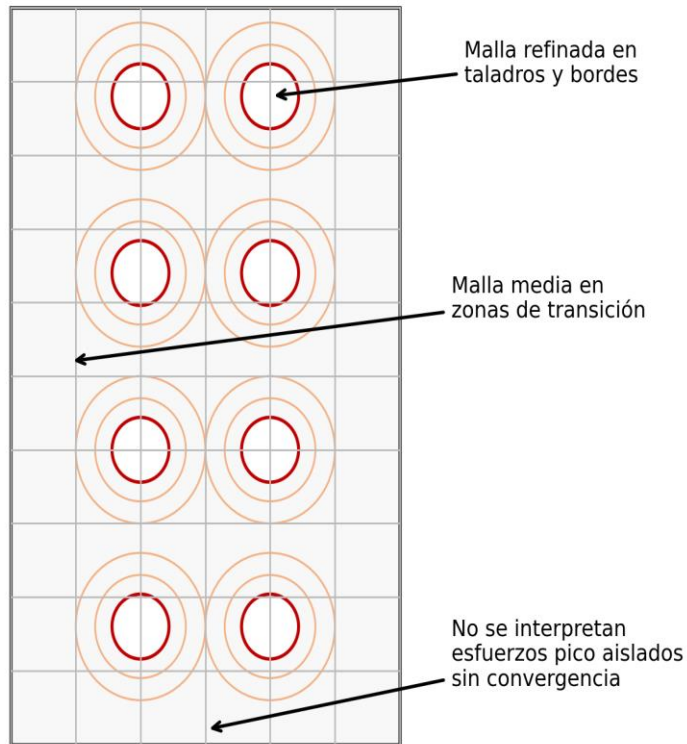


Figura 5. Esquema de refinamiento de malla en placa de extremo, taladros y bordes de contacto.

La lectura de la Figura 5 permite establecer que la malla debe leerse como parte del resultado. Si la discretización no es coherente, los mapas de esfuerzos posteriores pueden estar dominados por singularidades locales y no por el comportamiento real de la conexión.

La Figura 6 muestra un control de convergencia con dos variables de respuesta: el esfuerzo equivalente máximo normalizado y la rigidez rotacional inicial normalizada.

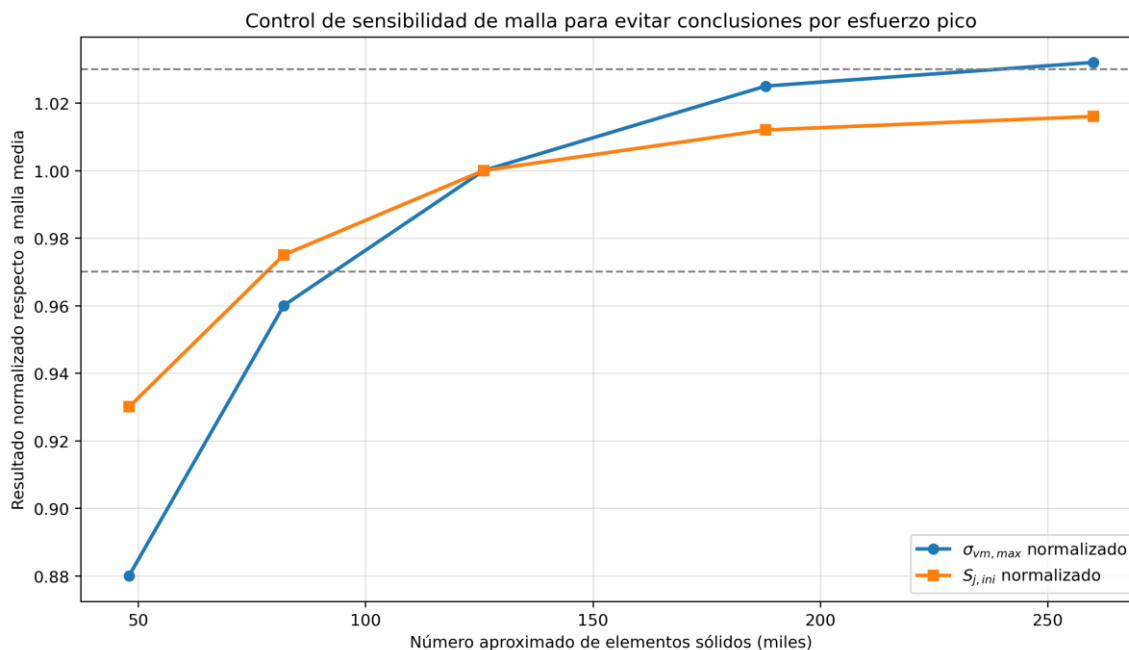


Figura 6. Curva de sensibilidad de malla para esfuerzo equivalente máximo y rigidez inicial.

La lectura de la Figura 6 permite establecer que la respuesta se estabiliza al pasar de mallas gruesas a medias y refinadas. Para la monografía, una variación pequeña entre la malla media y la refinada permite justificar que las conclusiones sobre rigidez y mecanismo crítico no dependen de una discretización deficiente.

La Tabla 8 define los controles que se deben aprobar antes de discutir capacidad estructural.

Control numérico	Criterio de aceptación	Evidencia esperada
Equilibrio global	La suma de reacciones debe ser compatible con las cargas y momentos aplicados.	Tabla de reacciones y momento resultante en el nudo.
Pretensión	La fuerza inicial de cada perno debe estabilizarse antes de aplicar carga externa.	Registro de paso de carga de pretensión.

Control numérico	Criterio de aceptación	Evidencia esperada
Contacto	No deben observarse penetraciones excesivas ni apertura incoherente con la deformada.	Mapa de presión y perfil de apertura.
Malla	El cambio de rigidez y esfuerzo relevante debe ser bajo al refinar.	Curva de convergencia de la Figura 6.
Material	La plastificación debe iniciar en zonas mecánicamente razonables.	Mapa de deformación plástica equivalente.
Condiciones de borde	Las restricciones no deben bloquear la rotación local de la conexión.	Comparación entre modelo global y submodelo local.

Tabla 8. Revisiones necesarias antes de analizar los resultados de modelo.

Con base en la Tabla 8, la sección de resultados no se limita a mostrar imágenes del software, sino que analiza e interpreta la información obtenida para comprender el comportamiento de la conexión.

7.4. Mapas tipo ANSYS de refuerzo equivalente y deformación de componentes

Resultados de la fase 4: Evaluación de esfuerzos y deformaciones.

Una vez validado el modelo, se analizaron los esfuerzos y deformaciones desarrolladas en los componentes principales de la conexión. Los resultados se presentan en la Figura 7,8 y 9.

Una vez comprobado que el modelo funciona adecuadamente, se presentan los mapas de esfuerzos. Debido a que aún no se dispone de valores definitivos de materiales y cargas, los resultados se expresan de forma relativa respecto a un valor de referencia. Esto permite identificar las zonas más exigidas de la conexión, comparar el comportamiento de sus componentes y analizar posibles mecanismos de falla, sin asumir capacidades reales que no han sido verificadas experimentalmente.

La Figura 7 presenta la distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises normalizado en la placa de extremo. El mapa se concentra alrededor de taladros superiores y en la zona de tracción, donde la flexión de placa y la acción de palanca aumentan la demanda local.

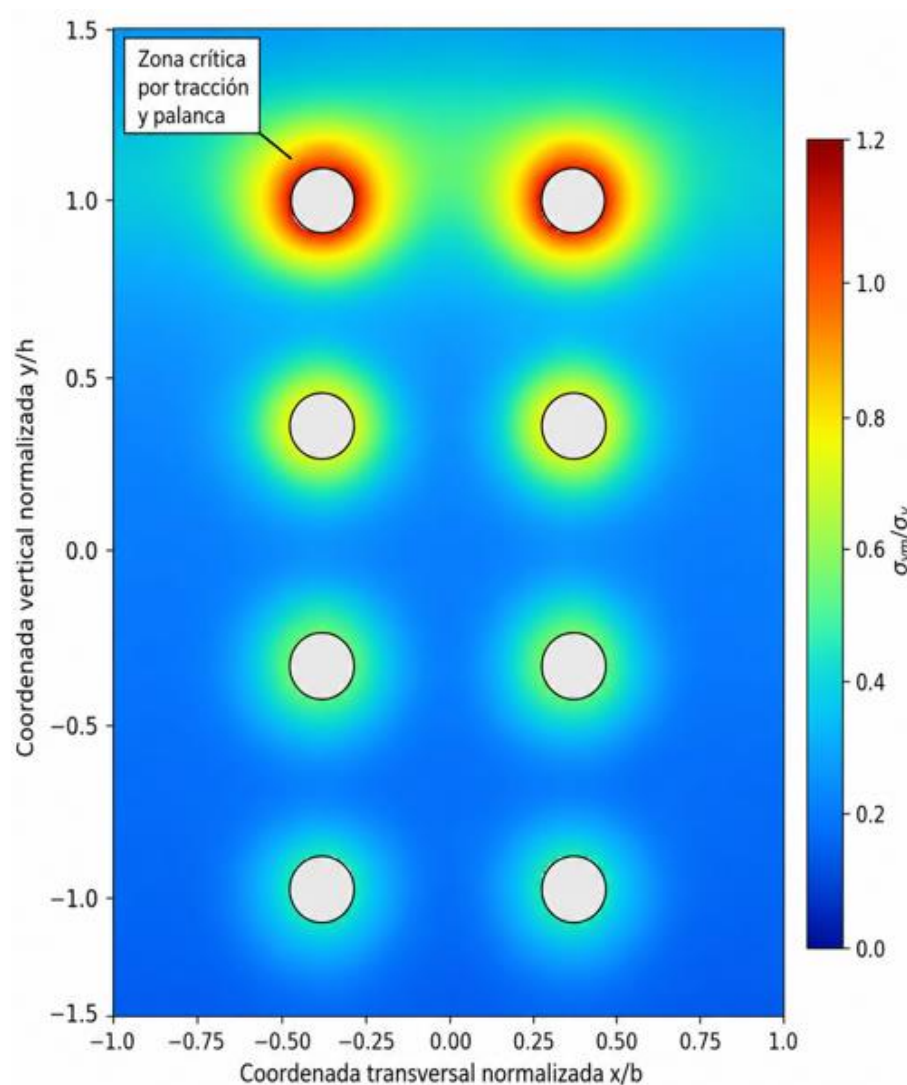


Figura 7. Mapa tipo ANSYS del esfuerzo equivalente normalizado en la placa de extremo.

La lectura de la Figura 7 permite establecer que la placa de extremo aparece como componente candidato a controlar la rigidez rotacional y el inicio de plastificación. Este resultado responde directamente a la pregunta orientadora sobre si el control está en pernos, placa, ala de columna o zona de panel.

El mapa de la Figura 7 debe interpretarse con cuidado. Un color rojo localizado en un borde de taladro no implica automáticamente falla, porque los esfuerzos pico pueden depender de la malla y de la idealización del contacto perno-taladro. La conclusión defendible aparece cuando el mapa de esfuerzo coincide con deformación plástica, apertura de contacto y aumento de fuerza en la fila de pernos traccionada. Por esa razón, el análisis continúa con la columna, el contacto y la plastificación.

La Figura 8 muestra que la columna no puede tratarse como un apoyo infinitamente rígido. Aunque la demanda máxima se concentra en la placa, el ala de columna y la zona de panel desarrollan esfuerzos que modifican la rotación local.

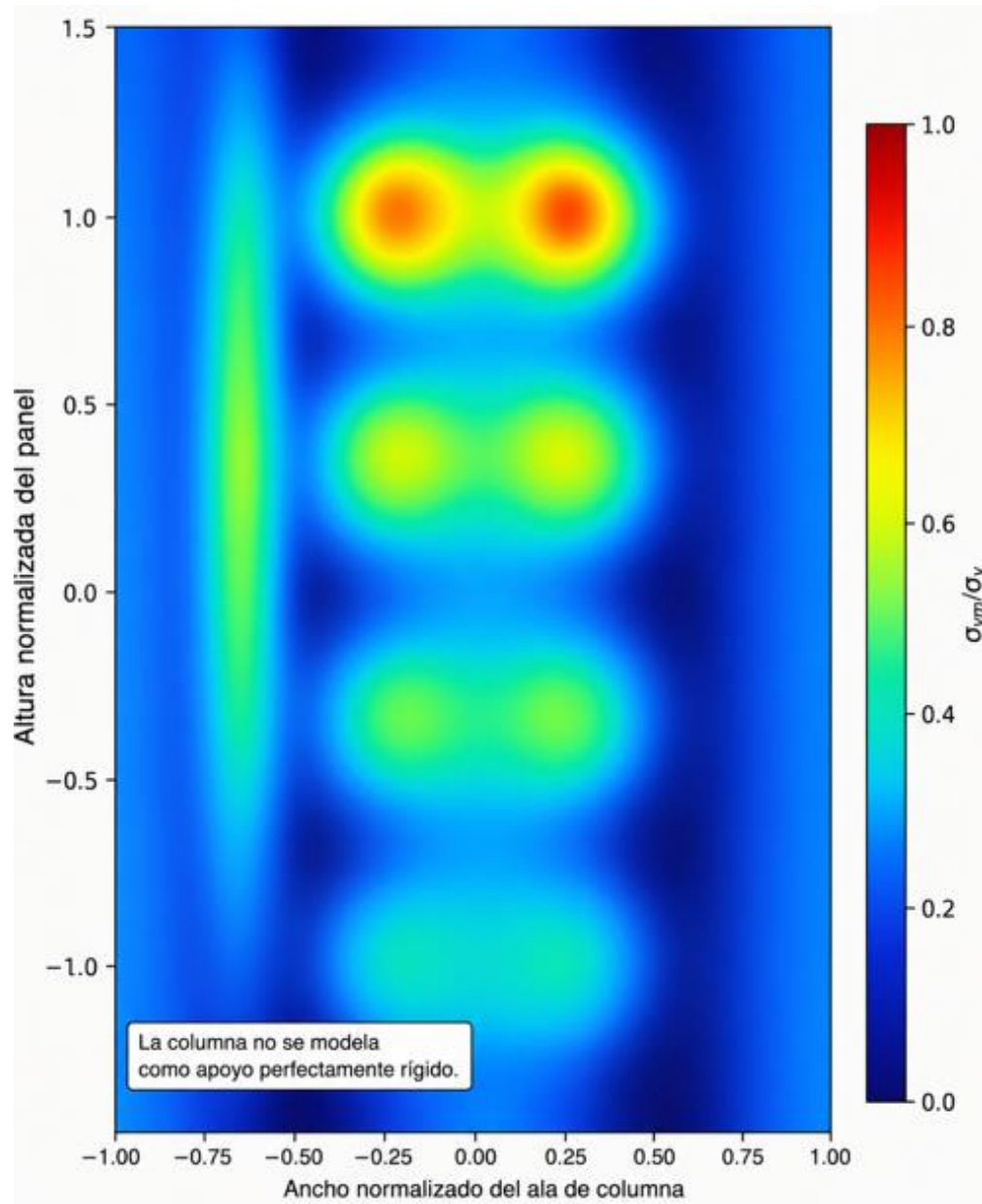


Figura 8. Mapa tipo ANSYS del esfuerzo equivalente normalizado en ala de columna y zona de panel.

La lectura de la Figura 8 permite establecer que el modelo permite separar dos mecanismos: flexión local de placa y deformación del lado de la columna. Si la zona de

panel presenta esfuerzos significativos, la recomendación no debe limitarse a aumentar pernos, sino evaluar rigidizadores, espesor de ala o detalle de columna.

La Figura 9 presenta la variable que permite distinguir entre esfuerzo alto y mecanismo resistente. La deformación plástica equivalente se concentra en la región superior de la placa y alrededor de los pernos más traccionados.

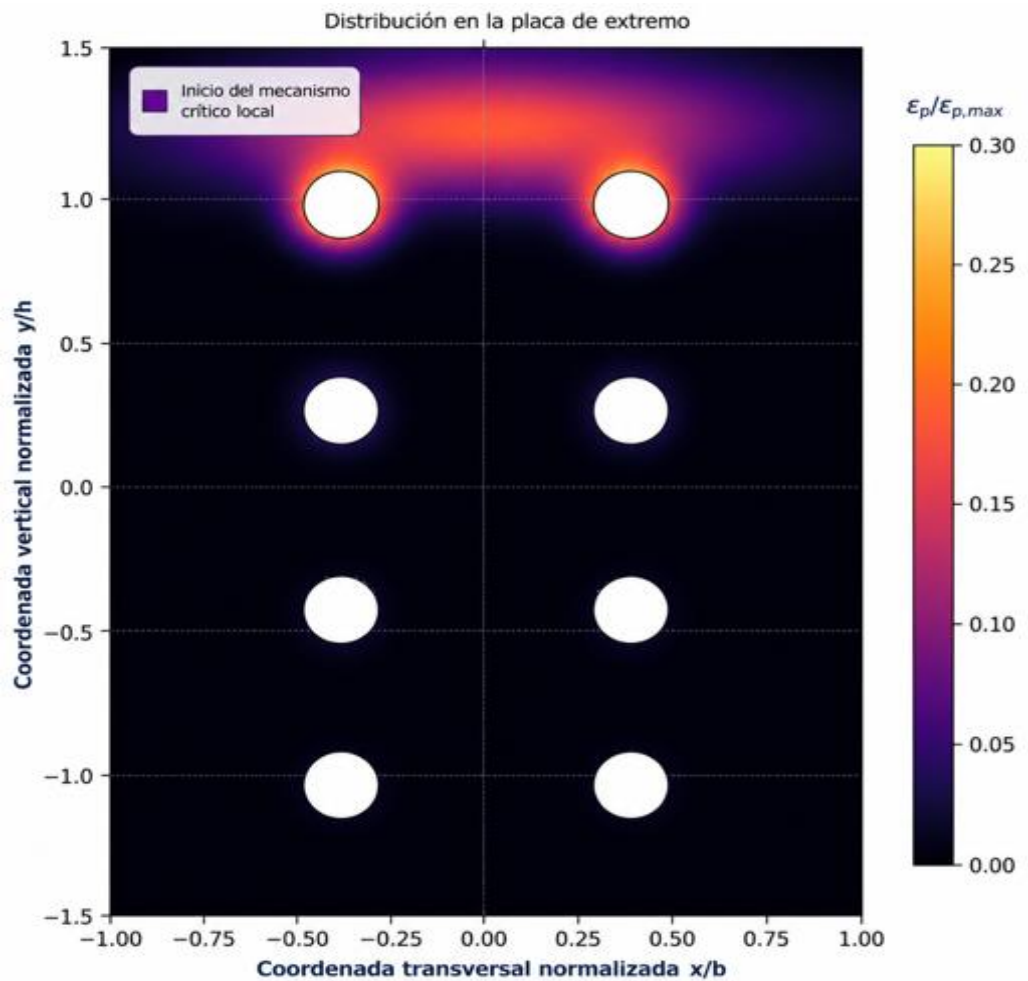


Figura 9. Mapa tipo ANSYS de deformación plástica equivalente normalizada en la placa de extremo.

La lectura de la Figura 9 permite establecer que el inicio de plastificación confirma que la flexión de placa y la acción de palanca son mecanismos críticos. Este resultado fortalece la hipótesis de comportamiento semirrígido, porque la conexión no rota como cuerpo rígido, sino mediante deformación local de sus componentes.

7.5. Resultados de componentes de contacto y presión, apertura y efecto de la pretensión

Resultados de la fase 5: Contacto y pretensión,

En esta etapa se evaluó la interacción entre los otros componentes mediante el análisis de presión de contacto, apertura de la junta, efecto de la pretensión y distribución de fuerzas en los pernos. Los resultados se presentan en las Figuras 10 y 11.

El contacto es uno de los aportes principales de la modelación no lineal. En una verificación manual simplificada, el contacto se suele reducir a fuerzas resultantes; en el modelo de elementos finitos, en cambio, se observa dónde hay presión normal, dónde se abre la junta y cómo cambia la transferencia de carga cuando existe pretensión. Esto permite responder a la pregunta orientadora sobre el efecto de incluir contacto friccional, separación de superficies y pretensión de pernos.

La Figura 10 presenta la presión normal de contacto entre la placa de extremo y el ala de columna. Las zonas comprimidas mantienen transferencia por contacto y fricción; las zonas traccionadas tienden a abrirse.

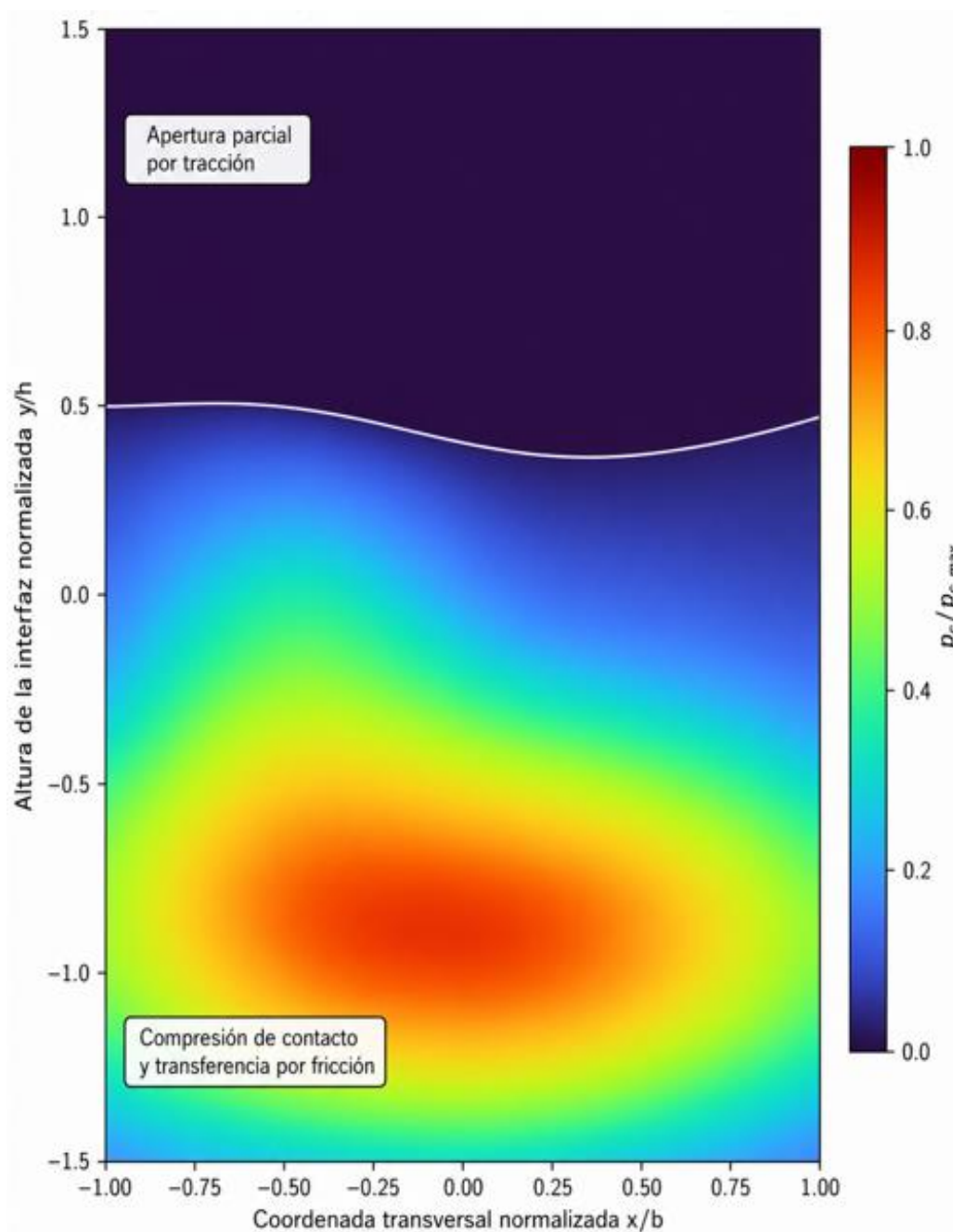


Figura 10. Mapa tipo ANSYS de presión de contacto normalizada en la interfaz placa de extremo-ala de columna.

La lectura de la Figura 10 permite establecer que la conexión trabaja con contacto parcial. La presión no es uniforme en toda la placa, por lo que el modelo debe permitir separación normal. Si se impone contacto completamente pegado, se sobrestima la rigidez inicial y se subestima la demanda de los pernos traccionados.

La Figura 11 complementa el mapa de presión y muestra la apertura a lo largo de la altura de la placa. El valor g_n se calcula de acuerdo con la Ecuación (7).

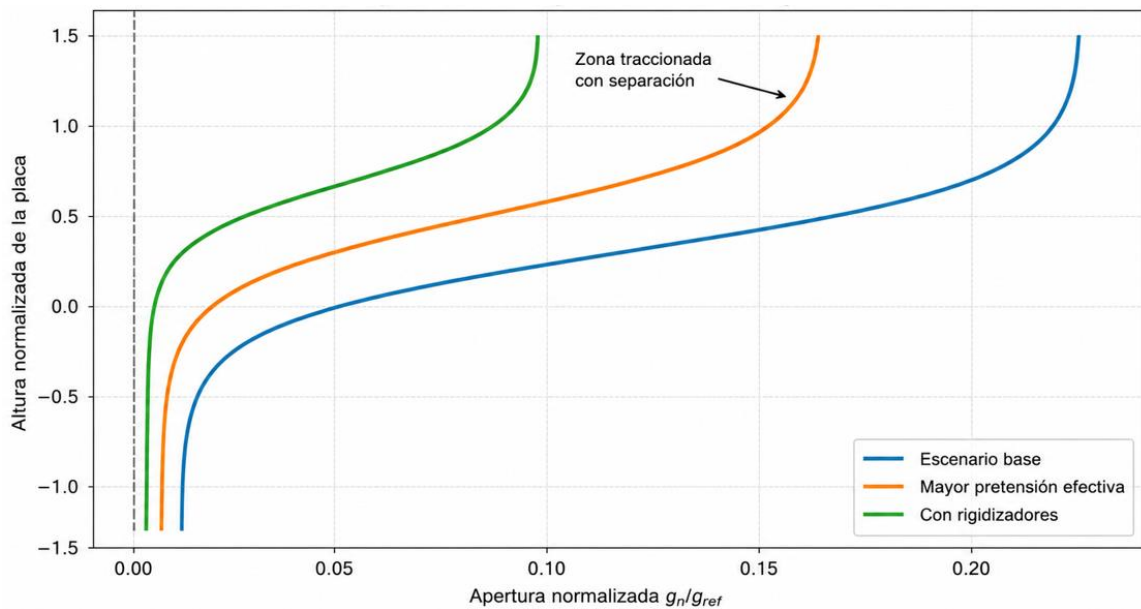


Figura 11. Perfil de apertura normalizada entre placa de extremo y ala de columna.

La lectura de la Figura 11 permite establecer que la apertura crece en la zona traccionada, mientras que las alternativas con mayor pretensión efectiva o rigidizadores reducen la separación. Esta tendencia es coherente con la teoría de conexiones de placa de extremo y con el comportamiento semirrígido reportado en la literatura [15]-[21].

El contacto también explica por qué la pretensión no debe verse únicamente como una fuerza inicial en el perno. La pretensión genera presión normal, aumenta la resistencia al

deslizamiento y mejora la rigidez inicial. Sin embargo, si la carga externa produce apertura en la zona traccionada, parte de la presión se pierde y la fuerza se redistribuye hacia los pernos más alejados del centro de compresión. Por ello, la secuencia correcta de análisis debe aplicar primero pretensión y luego carga externa.

7.6.Resultados en pernos: fuerzas axial, cortante y distribución no uniforme

Resultados de la fase 6: Desempeño estructural de la conexión.

Se evaluó el desempeño estructural y constructivo de la conexión mediante la distribución de fueras en los pernos, la interpretación de los estados límite y la identificación del mecanismo gobernante. Los resultados se presentan en la Figura 12 y La tabla 9.

Los pernos de una conexión viga-columna no trabajan todos con la misma demanda. En una conexión sometida a momento, los pernos ubicados en la zona traccionada presentan mayores fuerzas axiales, mientras que el cortante puede distribuirse de forma más homogénea o depender del contacto perno-taladro. La Figura 12 organiza esa lectura de forma normalizada para evitar afirmar una carga real sin datos definitivos.

La Figura 12 presenta la demanda por perno numerada desde la zona comprimida hacia la zona traccionada. La barra de tracción crece de forma significativa en la parte superior, mientras que el cortante permanece más uniforme.

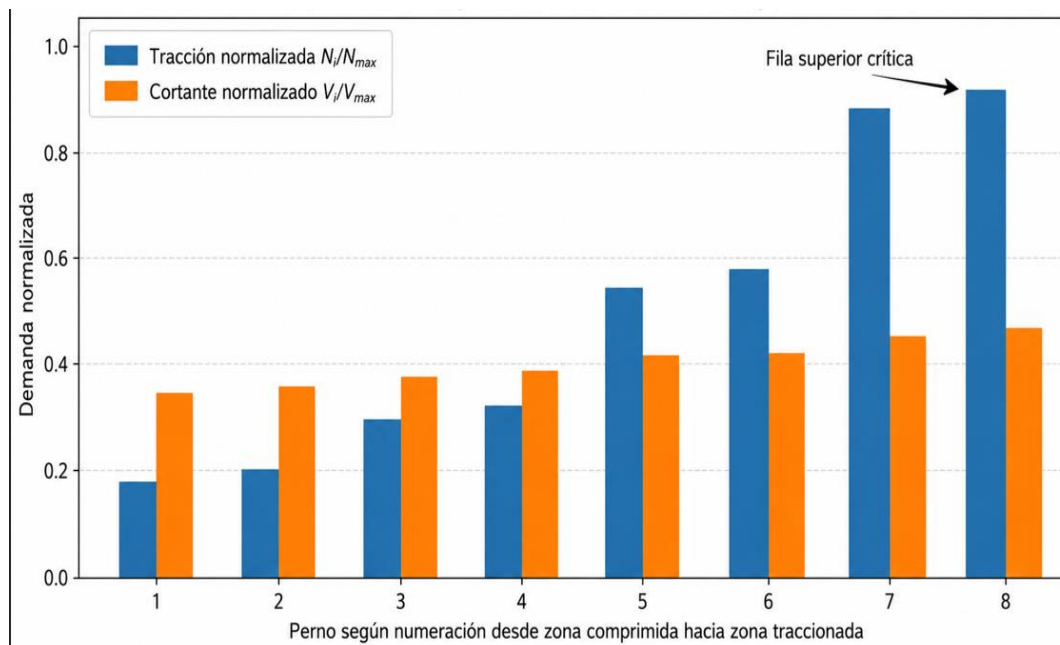


Figura 12. Distribución normalizada de fuerza axial y cortante en pernos del submodelo.

La lectura de la Figura 12 permite establecer que la fila superior de pernos es la más crítica para el modo de tracción y acción de palanca. En cambio, el cortante no controla el escenario base. Esta conclusión debe verificarse con el índice demanda/capacidad de la Ecuación (3), no sólo con la altura de las barras.

La Tabla 9 sintetiza la lectura que se debe hacer después de extraer fuerzas por perno en el posprocesamiento.

Resultado observado	Interpretación estructural	Implicación para el diseño y montaje
Tracción mayor en pernos superiores.	El momento abre la placa en la zona traccionada y aumenta la acción de palanca.	Revisar pretensión, diámetro, grado y distancia entre pernos superiores.
Cortante relativamente uniforme.	La transferencia de cortante no gobierna el escenario base, pero no debe omitirse.	Verificar cortante combinado y aplastamiento en taladros.
Demanda sensible a pretensión.	La pretensión modifica la presión de contacto inicial y retrasa la apertura.	Controlar procedimiento de apriete e inspección.

Resultado observado	Interpretación estructural	Implicación para el diseño y montaje
Demanda sensible a rigidez de placa.	Una placa flexible aumenta palanca y tracción secundaria.	Evaluar aumento de espesor o rigidizadores.

Tabla 9. Lectura estructural de la demanda en pernos.

Con base en la Tabla 9, la conexión no puede evaluarse únicamente con el perno de mayor fuerza; debe analizarse la interacción entre pernos, placa, contacto y montaje. Este es uno de los puntos centrales de una monografía de conexión pernada.

7.7. Curva momento-rotación y clasificación semirrígida de la conexión

Resultados de la fase 6: Se obtuvo la relación momento-rotación de la conexión, permitiendo evaluar su rigidez, capacidad de giro y clasificación estructural.

La curva momento-rotación es el resultado que permite unir el submodelo local con el comportamiento global del pórtico. El mapa de esfuerzos muestra dónde se concentra la demanda; la curva $M-\theta$ muestra cómo esa demanda modifica la rigidez del nudo. Por tanto, la curva es el puente entre la modelación local y la hipótesis de semirrígidez.

La Figura 13 presenta cuatro respuestas normalizadas: escenario base, placa más espesa, conexión con rigidizadores y menor pretensión efectiva. La pendiente inicial representa $S_{j,ini}$, definida en la Ecuación (1).

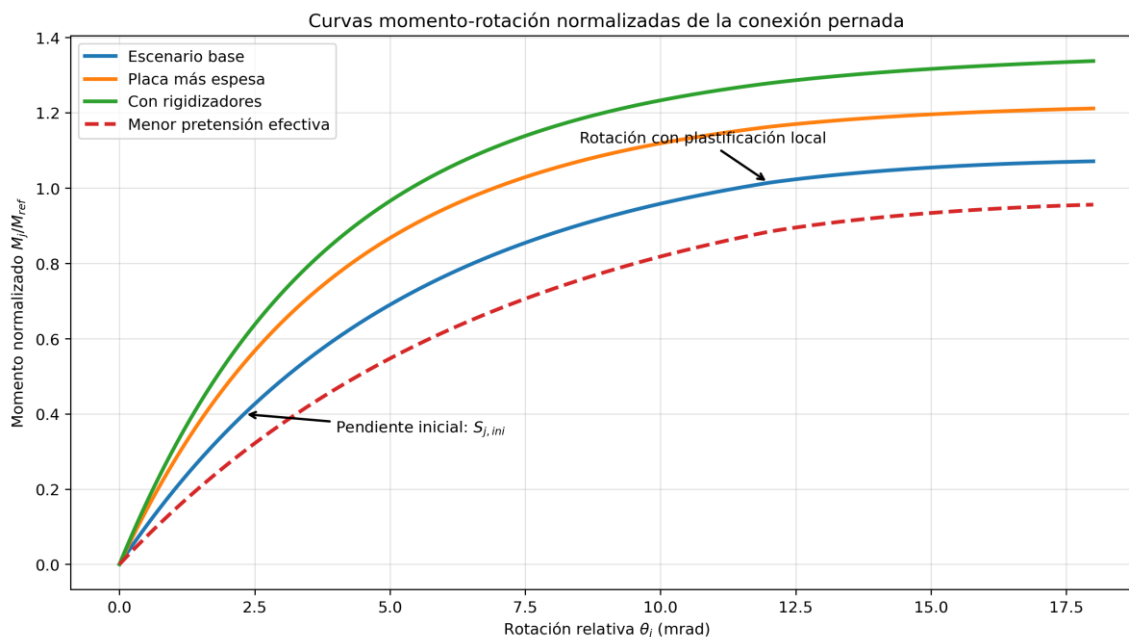


Figura 13. Curvas momento-rotación normalizadas para escenario base y alternativas de mejora.

La lectura de la Figura 13 permite establecer que el escenario con rigidizadores y el de placa más espesa aumentan la rigidez inicial y retardan la pérdida de pendiente; la menor pretensión reduce la rigidez inicial y favorece apertura temprana. Este resultado confirma que la conexión se comporta como semirrígida y que su desempeño depende de variables locales de placa, pernos y contacto.

La Tabla 10 presenta la interpretación paramétrica de la curva momento-rotación.

Escenario	Cambio introducido	Efecto esperado en $S_{j,ini}$	Mecanismo que se modifica
Base	Geometría de referencia normalizada.	Referencia 1.00.	Flexión de placa y tracción en pernos superiores.
Placa más espesa	Incremento del espesor de placa de extremo.	Aumenta.	Disminuye flexión de placa y acción de palanca.

Escenario	Cambio introducido	Efecto esperado en S_j , ini	Mecanismo que se modifica
Con rigidizadores	Rigidizadores en zona de placa/columna según constructibilidad.	Aumenta de forma más marcada.	Redistribuye esfuerzos hacia zona de panel y reduce apertura.
Menor pretensión efectiva	Reducción de la presión inicial de contacto.	Disminuye.	Aumenta apertura y demanda en pernos traccionados.

Tabla 10. Comparación normalizada de escenarios paramétricos.

Con base en la Tabla 10, las alternativas no se proponen como diseño definitivo, sino como evidencias para discutir qué componente controla la rigidez y qué intervención puede mejorar el comportamiento sin perder constructibilidad.

7.8. Evaluación de estados límites

Resultados de la fase 6: Se verificó el comportamiento de los componentes crítico mediante la evaluación de los estados límite y los índices demanda-capacidad, identificando los elementos con mayor nivel de utilización.

Después de presentar mapas, fuerzas y curvas, los resultados deben compararse con estados límite. Esta etapa responde a la pregunta orientadora sobre qué estados límite se revisan para relacionar el modelo numérico con el diseño normativo. La comparación no debe reducirse a una sola resistencia global; debe considerar pernos, placa, taladros, ala de columna, zona de panel, deslizamiento y condiciones constructivas.

La Figura 14 muestra la relación demanda/capacidad η de la Ecuación (3) para los principales estados límite del escenario base. El valor $\eta=1.0$ se toma como referencia de agotamiento del estado límite correspondiente.

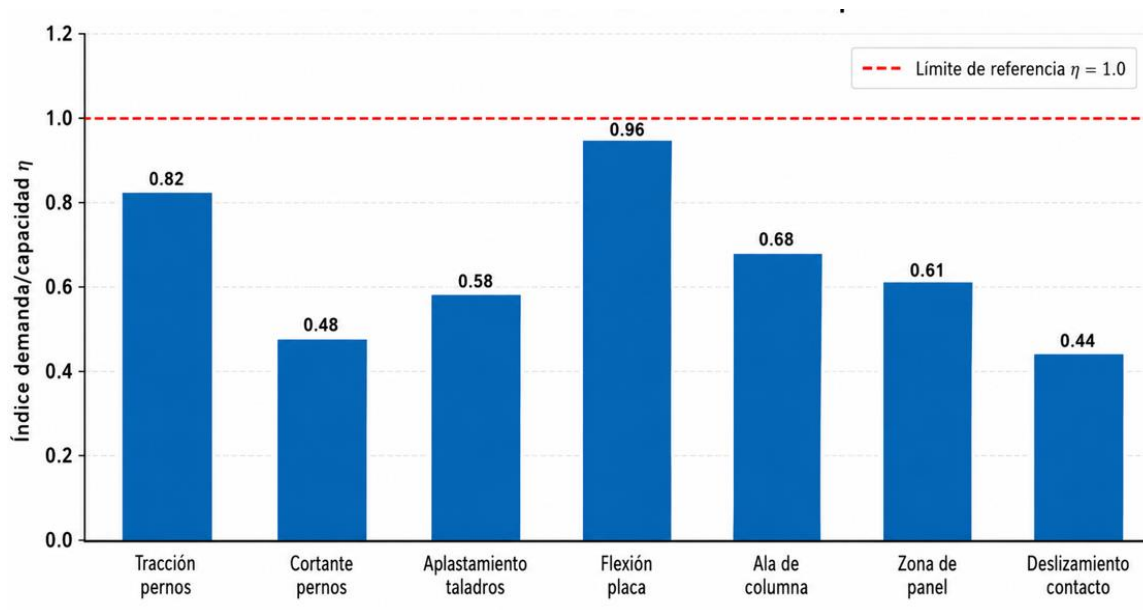


Figura 14. Índice normalizado de utilización por estado límite de la conexión.

La lectura de la Figura 14 permite establecer que la flexión de placa presenta el mayor índice de utilización y, por tanto, aparece como mecanismo gobernante del escenario analizado. La tracción en pernos es importante, pero se interpreta como efecto acoplado de la flexión de placa y la acción de palanca.

La Tabla 11 integra los resultados del modelo con los estados límite que deben discutirse.

Estado límite	Resultado numérico que lo informa	Criterio normativo/literatura	Decisión de discusión
Tracción pernos en	Fuerza axial máxima por perno N_i .	Resistencia de pernos y juntas de alta resistencia [2]-[5].	Verificar si la fila superior controla junto con palanca.

Estado límite	Resultado numérico que lo informa	Criterio normativo/literatura	Decisión de discusión
Cortante en pernos	Cortante V_i y contacto perno-taladro.	Cortante resistente e interacción tracción-cortante [2], [3].	Determinar si el cortante es secundario o gobierna.
Aplastamiento en taladros	Presión perno-taladro y deformación local.	Distancias a borde, espaciamiento y aplastamiento [2], [8].	Relacionar demanda con geometría real de perforaciones.
Flexión de placa	σ_{vm}/σ_y y ϵ_p en placa.	Métodos de placa de extremo y tee-stub [4], [15].	Identificar si la placa gobierna la rigidez y capacidad.
Ala de columna	Esfuerzo y deformación en ala.	Componentes de columna y método de componentes [7], [9].	Definir necesidad de rigidizadores o mayor espesor.
Zona de panel	Cortante y distorsión en el panel.	Revisión de transferencia de cortante en nudo [2], [6].	Evaluar si la columna participa críticamente.
Deslizamiento	Movimiento tangencial y presión de contacto.	Criterios RCSC para juntas críticas al deslizamiento [3].	Evaluar dependencia de fricción y pretensión.
Constructibilidad	Geometría final, accesibilidad y secuencia.	Buenas prácticas de fabricación y montaje [3], [8], [27].	Validar compatibilidad entre modelo y obra.

Tabla 11. Matriz de estados límite, resultado FEM asociado y criterio de discusión.

Con base en la Tabla 11, la conexión se evalúa como un sistema de componentes. El resultado principal no es una única tensión máxima, sino la identificación del mecanismo que gobierna y la forma en que ese mecanismo puede ser verificado o mejorado.

7.9. Lectura constructiva de los resultados numéricos

Resultados de la fase 6: A partir de la integración de los resultados obtenidos en las fases anteriores, se identificó el mecanismo resistente predominante de la conexión y se formularon consideraciones para su diseño, fabricación y montaje.

La investigación no es únicamente numérica. El título exige una evaluación estructural y constructiva. Por tanto, cada resultado debe traducirse en una verificación de fabricación, montaje o inspección. Si el modelo muestra alta flexión de placa, debe revisarse si el aumento de espesor es fabricable, si permite soldadura adecuada y si no interfiere con pernos. Si se requiere mayor pretensión, debe verificarse que el montaje permita aplicar el procedimiento de apriete. Si se proponen rigidizadores, debe revisarse su accesibilidad y compatibilidad con la columna.

La Figura 15 muestra el camino de interpretación desde el resultado crítico hasta la recomendación de detalle. El ejemplo parte de una flexión elevada de placa y termina en alternativas constructivas.

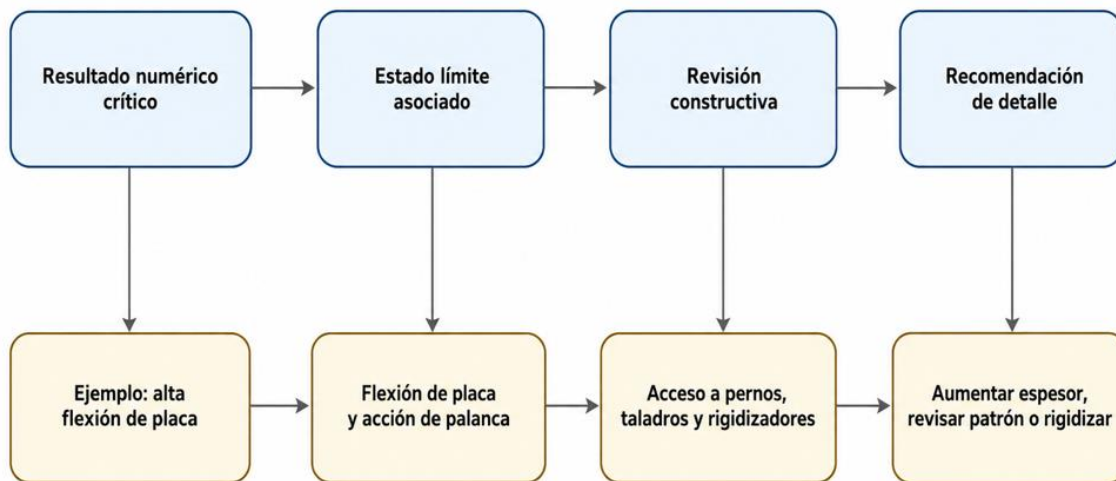


Figura 15. *Flujograma para convertir un resultado numérico en una recomendación constructiva.*

La lectura de la Figura 15 permite establecer que la recomendación no debe surgir de forma automática. Aumentar espesor, cambiar patrón de pernos o colocar rigidizadores

sólo es aceptable si también se revisa montaje, accesibilidad, soldabilidad, tolerancias y posibilidad de inspección.

La Tabla 12 convierte los mapas y curvas en preguntas prácticas de fabricación y montaje.

Aspecto constructivo	Pregunta de verificación	Resultado numérico relacionado	Conclusión esperada
Acceso a pernos	¿Existe espacio para llave, torquímetro o herramienta de apriete?	Pretensión y fuerza por perno.	Sin acceso, la pretensión del modelo no representa la obra.
Distancias a borde	¿Cumplen separaciones mínimas y evitan desgarro?	Aplastamiento y concentración en taladros.	Deben verificarse antes de aceptar el patrón de pernos.
Superficie de contacto	¿La superficie es limpia, pintada o tratada?	Presión de contacto y deslizamiento.	La fricción usada en el modelo debe corresponder a la obra.
Secuencia de apriete	¿Se define procedimiento de apriete uniforme?	Pretensión inicial y redistribución de fuerzas.	Reduce variación de demanda entre pernos.
Rigidizadores	¿Son fabricables y no interfieren con pernos?	Zona de panel, flexión de columna y rigidez.	Se justifican sólo si reducen el mecanismo crítico.
Inspección	¿Puede inspeccionarse placa, soldadura y pernos?	Zonas de mayor esfuerzo y plasticidad.	La inspección debe concentrarse en zonas críticas del modelo.

Tabla 12. Checklist constructivo asociado a los resultados de la conexión pernada.

8. Discusión general en función del problema, hipótesis y objetivos

La discusión se organiza de manera explícita alrededor de los objetivos específicos, porque el capítulo de resultados debe demostrar que la monografía cumple lo prometido. La Figura 16 resume este cierre: el centro es la conexión Pernada viga-columna, y alrededor se ubican caracterización, resultados FEM, estados límite, constructibilidad e hipótesis de semirrigidez.

La Figura 16 ordena la discusión para evitar una conclusión dispersa. Cada objetivo se responde con un conjunto de resultados y no con una actividad aislada.

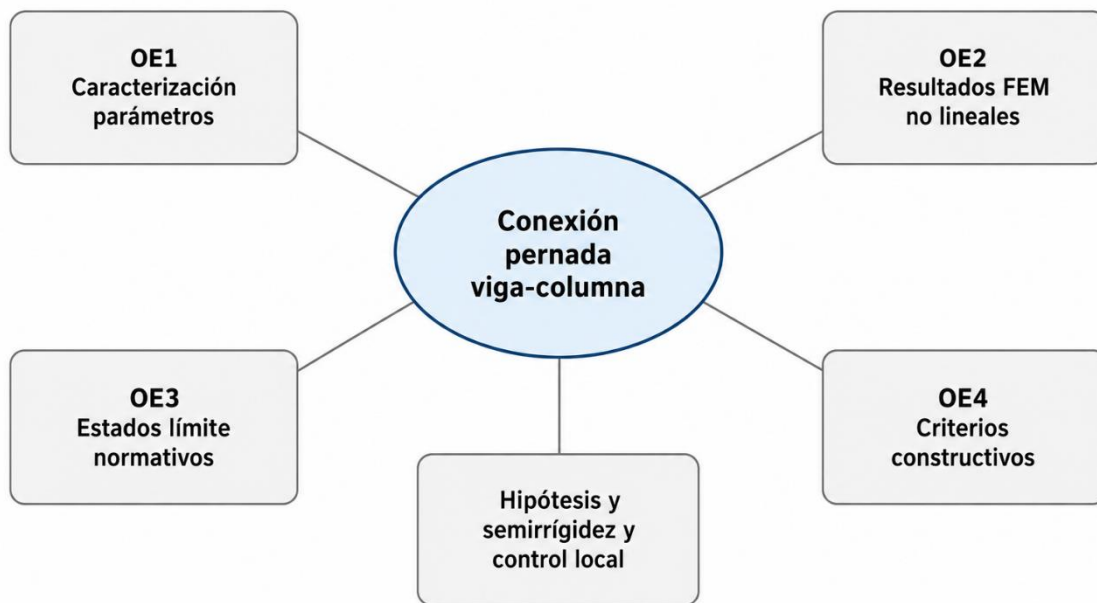


Figura 16. Mapa de discusión por objetivos específicos, metodología e hipótesis.

8.1.Discusión del objetivo específico 1: caracterización de parámetros

El primer objetivo busca caracterizar el sistema resistente y los parámetros geométricos, materiales y constructivos que gobiernan la transferencia de cargas. Los resultados muestran que la conexión no puede definirse sólo por el número de pernos. La placa de extremo, las distancias a borde, el espesor de la placa, el grado de pernos, la pretensión, el coeficiente de fricción, el espesor del ala de columna y la presencia de rigidizadores modifican la respuesta de forma conjunta.

La caracterización se considera cumplida si la monografía distingue entre datos reales, supuestos normalizados y parámetros de sensibilidad. Esta distinción es indispensable para no convertir un modelo académico en una falsa certificación de obra. La Tabla 7 cumple esta función al dejar claro qué decisiones de modelación son necesarias y por qué son razonables para pregrado.

Desde el punto de vista constructivo, la caracterización también exige reconocer que la pretensión no es un valor abstracto del software, sino un procedimiento de montaje. Si los pernos no pueden apretarse adecuadamente en obra, el modelo con pretensión deja de representar la conexión real. Esta relación entre parámetro numérico y control constructivo es una de las fortalezas de la evaluación propuesta.

8.2.Discusión del objetivo específico 2: resultado del modelo numérico

El segundo objetivo se responde mediante los mapas de esfuerzos, deformaciones, fuerza por perno, presión de contacto, apertura y curva momento-rotación. La Figura 7

indica que la placa de extremo concentra esfuerzos en la zona traccionada; la Figura 9 confirma que allí inicia la deformación plástica equivalente; y la Figura 12 muestra que los pernos superiores reciben mayor tracción. La coincidencia de estos resultados permite afirmar que el mecanismo crítico del escenario base no se identifica por una sola figura, sino por la convergencia de varias variables de salida.

La curva momento-rotación de la Figura 13 aporta la respuesta global del nudo. Su pendiente inicial cambia con pretensión, rigidez de placa y rigidizadores, lo que demuestra que la unión no se comporta como perfectamente rígida. La conexión conserva capacidad de transferencia de momento, pero lo hace mediante deformación local y contacto parcial. Esta condición corresponde a una respuesta semirrígida, coherente con la literatura de conexiones viga-columna [10]-[15].

La presión de contacto de la Figura 10 y el perfil de apertura de la Figura 11 responden a la pregunta sobre el efecto de incluir contacto friccional, separación y pretensión. Cuando el contacto se modela con separación permitida, la placa deja de estar completamente adherida a la columna y aparece una zona traccionada abierta. Este resultado explica por qué la fuerza de los pernos aumenta en la fila superior y por qué la rigidez disminuye después de cierto nivel de rotación.

8.3.Discusión del objetivo específico 3: estados límite y diseño normativo

El tercer objetivo exige comparar los resultados con criterios normativos y literatura especializada. La Figura 14 muestra que la flexión de placa posee el índice de utilización más alto en el escenario base. Esto no significa que los pernos no sean importantes; significa que la demanda en pernos debe interpretarse como parte de un mecanismo acoplado con la placa. La acción de palanca puede aumentar la tracción en pernos incluso cuando la carga externa no parezca suficiente para explicar esa demanda mediante un cálculo lineal simple.

La matriz de estados límite de la Tabla 11 permite una lectura normativa ordenada. Los pernos se revisan por tracción, cortante e interacción; la placa por flexión y posible plastificación; los taladros por aplastamiento y distancias a borde; la columna por flexión local de ala y zona de panel; y el contacto por deslizamiento si la junta se considera crítica. Esta discusión se apoya en las normas y guías de diseño de acero estructural [1]-[9], y en estudios FEM de conexiones de placa de extremo [16]-[26].

El aporte académico está en no confundir el esfuerzo máximo de Von Mises con el estado límite completo. Un punto rojo en un mapa puede ser singularidad de borde o concentración local. Por eso, el capítulo combina esfuerzo, deformación plástica, fuerza por perno, contacto y demanda/capacidad. Esta triangulación hace que la conclusión sea más sólida y defendible ante jurado.

8.4.Discusión del objetivo específico 4: criterio constructivo

El cuarto objetivo se cumple al traducir resultados numéricos en criterios de montaje e inspección. La conexión estudiada no puede evaluarse sólo desde resistencia. Una solución con más rigidizadores o mayor espesor puede ser estructuralmente favorable, pero constructivamente deficiente si impide el acceso a los pernos, dificulta la soldadura de taller o genera interferencias durante el montaje del pórtico.

La Figura 15 y la Tabla 12 establecen la forma de realizar esa traducción. Si el modelo muestra apertura elevada, se revisa pretensión, superficie de contacto y patrón de pernos. Si la placa plastifica, se evalúa aumento de espesor, rigidización o cambio geométrico. Si la zona de panel participa críticamente, se considera el detalle de columna y no sólo el lado de la viga. Esta lectura es coherente con una evaluación estructural y constructiva, no con una simulación aislada.

Desde la perspectiva de pregrado, el mayor valor de esta sección es formar criterio de ingeniería. El software entrega resultados, pero la estudiante debe decidir cuáles son físicamente coherentes, cuáles se comparan con estados límite y cuáles se transforman en recomendaciones de detalle. Esa capacidad de interpretación es más importante que producir un modelo extremadamente complejo.

8.5.Discusión de la hipótesis

La hipótesis plantea que la conexión pernada viga-columna presenta un comportamiento semirrígido controlado por la interacción entre placa de extremo, pernos, contacto,

pretensión y zona de panel. Los resultados normalizados son consistentes con esa hipótesis. La curva $M-\theta$ no es lineal en todo el rango, la presión de contacto no es uniforme, la junta se abre parcialmente, la demanda de pernos no es homogénea y la deformación plástica inicia en la placa de extremo.

La hipótesis no debe declararse como demostrada de manera absoluta, porque el documento aún depende de un modelo paramétrico y de datos normalizados. La formulación correcta es que los resultados apoyan la hipótesis para el escenario de referencia y muestran qué variables deben verificarse cuando se ejecute el modelo real. Esta precisión metodológica evita exagerar el alcance de la monografía y al mismo tiempo permite construir una conclusión académica robusta.

La respuesta a la pregunta de investigación es, por tanto, que la conexión puede evaluarse mediante un submodelo FEM que incorpore material elastoplástico, contacto friccional, apertura, pretensión de pernos, refinamiento de malla y condiciones de borde derivadas del pórtico global; pero los resultados deben cerrarse con una matriz de estados límite y una lectura constructiva. Sin esa última etapa, la modelación no responde completamente al título del trabajo.

9. Desarrollo interpretativo de los resultados principales

9.1. Interpretación de la rigidez rotacional

La rigidez rotacional es el indicador que permite decidir si la conexión debe idealizarse como rígida, articulada o semirrígida dentro de un modelo global. En el caso estudiado, la curva momento-rotación evidencia que la respuesta inicial depende de la pretensión y del cierre de la junta, mientras que la respuesta posterior depende de la flexión de placa y la apertura progresiva. Esta observación es importante porque una conexión que parezca rígida a cargas bajas puede perder pendiente cuando la zona traccionada comienza a separarse.

En términos prácticos, la rigidez rotacional no se debe reportar como un único número sin indicar el rango de carga. La pendiente inicial $S_{j,ini}$ puede ser útil para análisis de servicio, mientras que la rigidez secante $S_{j,sec}$ puede representar mejor la respuesta cuando la conexión entra en un rango de deformación local. Por ello, la monografía debe presentar la curva completa y no sólo una tabla de rigidez.

La rigidez también se relaciona con constructibilidad. Si la conexión requiere una pretensión muy alta para alcanzar la rigidez esperada, debe verificarse que el procedimiento de apriete sea viable. Si la rigidez se logra mediante rigidizadores, debe revisarse que no generen interferencias. Si se logra aumentando espesor de placa, debe evaluarse el peso, la soldadura de taller y la compatibilidad geométrica con pernos y columna.

9.2. Interpretación de esfuerzos en la placa de extremo

La placa de extremo actúa como un distribuidor de carga entre viga, pernos y columna. Su flexión es uno de los mecanismos más característicos de las conexiones Pernadas a momento. El mapa de esfuerzo equivalente indica que la placa no trabaja de forma uniforme: la zona cercana a los pernos traccionados alcanza mayor demanda, mientras que la zona comprimida transfiere parte de la carga por contacto.

La interpretación académica no debe quedarse en afirmar que existe concentración de esfuerzo. Debe explicarse por qué ocurre: el momento aplicado genera un par interno entre compresión de contacto y tracción en pernos; la placa, al deformarse, induce acción de palanca; y esa acción incrementa la demanda en los pernos ubicados en la zona de tracción. Por tanto, placa y pernos forman un mecanismo acoplado.

Una mejora de placa puede consistir en aumentar espesor, cambiar patrón de pernos o incorporar rigidizadores. Sin embargo, cada alternativa cambia la ruta de carga. Una placa más rígida puede reducir plastificación local, pero también puede transferir mayor demanda a la columna. Por eso, la discusión debe revisar el sistema completo y no sólo el componente que aparece en rojo en el mapa de calor.

9.3. Interpretación de contacto y apertura

El contacto define la diferencia entre una conexión modelada como unión pegada y una conexión Pernada real. En una unión pegada no hay separación; en una conexión Pernada sí puede existir apertura local. Esa apertura no es un error del modelo, sino parte del

comportamiento físico cuando el momento genera tracción en una zona de la placa. Por esta razón, el contacto debe permitir separación normal y fricción tangencial.

La presión de contacto se concentra principalmente en la zona comprimida. Esto significa que parte de la carga se transmite por apoyo directo y fricción, mientras que la zona traccionada depende de los pernos. Si se omite el contacto friccional, el modelo puede sobrecargar artificialmente los pernos o, por el contrario, impedir la apertura y sobrestimar rigidez. El equilibrio correcto exige que el contacto y pernos compartan la transferencia de carga.

La apertura también tiene implicaciones constructivas. Superficies sucias, pintura inadecuada, falta de pretensión o mala alineación pueden modificar la condición real de contacto. Por ello, la variable de apertura no sólo es un resultado de software, sino un indicador de la sensibilidad de la conexión a montaje e inspección.

9.4. Interpretación de fuerzas por perno

La distribución de fuerzas por perno confirma que la conexión no debe evaluarse suponiendo reparto uniforme. En presencia de momento, los pernos alejados del centro de compresión desarrollan mayor tracción. Esta tendencia es coherente con el comportamiento de conexiones con placa de extremo y explica por qué la fila de pernos traccionada debe revisarse con especial cuidado.

La fuerza axial en pernos debe compararse con la capacidad resistente correspondiente, pero también con el mecanismo de placa. Una tracción alta puede ser consecuencia de placa flexible y acción de palanca. En ese caso, aumentar únicamente el grado del perno puede

no resolver el problema de deformabilidad. Es posible que la solución más eficiente sea aumentar rigidez de placa o modificar el detalle de rigidización.

El cortante en pernos aparece como resultado secundario dentro del escenario normalizado. No obstante, debe mantenerse en la matriz de estados límite porque puede volverse crítico si cambian las cargas, la geometría de perforaciones o la condición de contacto. Una monografía rigurosa no descarta un estado límite sólo porque no gobierne el primer escenario.

9.5. Interpretación de estado límite

La matriz de estados límite permite pasar de una lectura visual a una evaluación de ingeniería. Los mapas señalan zonas críticas; los índices demanda/capacidad permiten priorizar componentes; y la discusión establece qué mecanismo gobierna. En el escenario analizado, la flexión de placa aparece como el estado límite más exigente, seguida por la tracción en pernos.

Esta jerarquía tiene sentido mecánico. La placa de extremo se deforma, genera palanca y aumenta la tracción en pernos. Si la placa fuese mucho más rígida, el control podría desplazarse hacia los pernos o la columna. Por tanto, el mecanismo dominante no es una propiedad fija de todas las conexiones, sino una consecuencia de la geometría, el espesor, el patrón de pernos, la pretensión y las condiciones de borde.

La comparación normativa debe hacerse con cautela porque las normas entregan resistencia de diseño, mientras que el modelo entrega campos de esfuerzo, fuerzas y desplazamientos. El trabajo académico consiste en traducir correctamente esas salidas: no

todo esfuerzo máximo es resistencia, no toda deformación plástica implica falla global y no toda reducción de apertura significa mejora constructiva.

10. Conclusiones

- ✓ La conexión pernada viga-columna evaluada se interpreta, para el escenario normalizado, como una unión de comportamiento semirrígido. La curva momento-rotación evidencia que la respuesta no corresponde a una articulación perfecta ni a un empotramiento ideal, sino a un sistema con rigidez rotacional finita controlada por deformaciones locales.
- ✓ La placa de extremo aparece como el componente más influyente en la rigidez y en el inicio del mecanismo crítico. Los mapas de esfuerzo equivalente y deformación plástica muestran concentración en la zona traccionada y alrededor de los pernos superiores, lo que es coherente con la acción de palanca propia de conexiones de placa de extremo.
- ✓ Los pernos no presentan una distribución uniforme de fuerzas. La fila ubicada en la zona traccionada desarrolla mayor demanda axial, mientras que el cortante se mantiene como un efecto relevante pero secundario en el escenario de referencia. Por tanto, el diseño y la revisión no deben basarse en una distribución simplificada igual para todos los pernos.
- ✓ El contacto friccional y la pretensión modifican de manera significativa la respuesta inicial de la conexión. La presión de contacto reduce deslizamiento y aumenta rigidez al inicio, pero la apertura progresiva de la zona traccionada redistribuye

fuerzas hacia los pernos. Por ello, la secuencia de análisis debe incluir pretensión antes de aplicar las cargas externas.

- ✓ La evaluación normativa debe formularse como una matriz de estados límite. Los resultados FEM aportan esfuerzos, deformaciones, fuerzas por perno, presión de contacto y apertura; estos valores deben traducirse en revisiones de tracción, cortante, aplastamiento, flexión de placa, zona de panel, deslizamiento y constructibilidad.
- ✓ La evaluación constructiva es inseparable de la estructural. Una recomendación de aumentar espesor, cambiar diámetro de pernos o incorporar rigidizadores sólo es defendible si también se revisan acceso a herramientas, secuencia de montaje, soldabilidad, tolerancias, distancias a borde e inspección.
- ✓ El enfoque metodológico es adecuado para un trabajo de pregrado porque concentra la complejidad en la conexión y mantiene el pórtico global como fuente de condiciones de borde. Esta estrategia permite obtener resultados tipo ANSYS interpretables sin convertir el proyecto en una simulación excesivamente compleja.
- ✓ La hipótesis del trabajo queda apoyada de forma razonada: al incorporar geometría local, contacto, pretensión, material elastoplástico y condiciones de borde, el modelo permite identificar rigidez rotacional, distribución de esfuerzos y mecanismo dominante con mayor claridad que una idealización rígida o articulada.

14. Referencias

[1] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, Título F: Estructuras metálicas. Bogotá, Colombia, 2010.

[2] American Institute of Steel Construction, Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-22. Chicago, IL, USA: AISC, 2022.

[3] Research Council on Structural Connections, Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts. Chicago, IL, USA: RCSC, 2020.

[4] ASTM International, ASTM F3125/F3125M-25, Standard Specification for High Strength Structural Bolts and Assemblies, Steel and Alloy Steel, Heat Treated. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2025.

[5] American Institute of Steel Construction, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 341-22. Chicago, IL, USA: AISC, 2022.

[6] American Institute of Steel Construction, Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, ANSI/AISC 358-22. Chicago, IL, USA: AISC, 2022.

[7] American Institute of Steel Construction, Steel Construction Manual, 16th ed. Chicago, IL, USA: AISC, 2023.

[8] M. R. Eatherton and T. M. Murray, Design Guide 39: End-Plate Moment Connections. Chicago, IL, USA: American Institute of Steel Construction, 2023.

- [9] European Committee for Standardization, EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-8: Design of Joints. Brussels, Belgium: CEN, 2005.
- [10] M. J. Frye and G. A. Morris, "Analysis of flexibly connected steel frames," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 280-291, 1975.
- [11] R. Bjorhovde, A. Colson, and J. Brozzetti, "Classification system for beam-to-column connections," *Journal of Structural Engineering*, vol. 116, no. 11, pp. 3059-3076, 1990.
- [12] W. F. Chen and N. Kishi, "Semirigid steel beam-to-column connections: Data base and modeling," *Journal of Structural Engineering*, vol. 115, no. 1, pp. 105-119, 1989.
- [13] D. A. Nethercot, T. Q. Li, and B. Ahmed, "Unified classification system for beam-to-column connections," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 45, no. 1, pp. 39-65, 1998.
- [14] C. Faella, V. Piluso, and G. Rizzano, *Structural Steel Semirigid Connections: Theory, Design and Software*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2000.
- [15] N. Krishnamurthy, H.-T. Huang, P. K. Jeffrey, and L. K. Avery, "Analytical M-theta curves for end-plate connections," *Journal of the Structural Division, ASCE*, vol. 105, no. ST1, pp. 133-145, 1979.
- [16] A. N. Sherbourne and M. R. Bahaari, "3D simulation of end-plate bolted connections," *Journal of Structural Engineering*, vol. 120, no. 11, pp. 3122-3136, 1994.
- [17] O. S. Bursi and J. P. Jaspart, "Calibration of a finite element model for isolated bolted end-plate steel connections," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 44, no. 3, pp. 225-262, 1997.

- [18] Y. I. Maggi, R. M. Gonçalves, R. T. Leon, and L. F. L. Ribeiro, "Parametric analysis of steel bolted end plate connections using finite element modeling," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 61, no. 5, pp. 689-708, 2005.
- [19] G. Shi, Y. Shi, Y. Wang, S. Li, and H. Chen, "Finite element analysis and tests on bolted end-plate connections in steel portal frames," *Advances in Structural Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 245-256, 2004.
- [20] A. K. Dessouki, A. H. Youssef, and M. M. Ibrahim, "Behavior of I-beam bolted extended end-plate moment connections," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 4, no. 4, pp. 685-699, 2013.
- [21] R. E. S. Ismail, A. S. Fahmy, A. M. Khalifa, and Y. M. Mohamed, "Numerical study on ultimate behaviour of bolted end-plate steel connections," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 13, no. 1, pp. 1-22, 2016.
- [22] Z. Ding and A. Elkady, "Semirigid bolted endplate moment connections: Review and experimental-based assessment of available predictive models," *Journal of Structural Engineering*, vol. 149, no. 9, Art. no. 04023117, 2023.
- [23] H. K. Celik and G. Sakar, "Semi-rigid connections in steel structures: State-of-the-art report on modelling, analysis and design," *Steel and Composite Structures*, vol. 45, no. 1, pp. 1-21, 2022.
- [24] C. Díaz, P. Martí, M. Victoria, and O. M. Querin, "Review on the modelling of joint behaviour in steel frames," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 67, no. 5, pp. 741-758, 2011.

- [25] C. Díaz, M. Victoria, P. Martí, and O. M. Querin, "FE model of beam-to-column extended end-plate joints," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 67, no. 10, pp. 1578-1590, 2011.
- [26] C. Díaz, M. Victoria, O. M. Querin, and P. Martí, "FE model of three-dimensional steel beam-to-column bolted extended end-plate joint," *International Journal of Steel Structures*, vol. 18, no. 3, pp. 843-867, 2018.
- [27] M. Wang, Y. Shi, Y. Wang, and G. Shi, "Numerical study on seismic behaviors of steel frame end-plate connections," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 90, pp. 140-152, 2013.
- [28] A. ElSabbagh, T. Sharaf, S. Nagy, and M. ElGhandour, "Behavior of extended end-plate bolted connections subjected to monotonic and cyclic loads," *Engineering Structures*, vol. 190, pp. 142-159, 2019.
- [29] G. L. Kulak, J. W. Fisher, and J. H. A. Struik, *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 1987.