

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE MECÁNICA

TEMA:

"Diseño de conexiones entre perfiles conformados en frío de sección transversal uv en acero ASTM A572 grado 50 utilizado en la construcción de torres de telecomunicaciones"

AUTORES: Marlon Sebastián Chico Segura

Angel Gabriel Salazar Aguilar

TUTOR: Ing. Alex Santiago Mayorga Pardo Mg.

Ambato – Ecuador

Junio – 2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **"DISEÑO DE CONEXIONES ENTRE PERFILES CONFORMADOS EN FRÍO DE SECCIÓN TRANSVERSAL UV EN ACERO ASTM A572 GRADO 50 UTILIZADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES",** elaborado por los estudiantes MARLON SEBASTIÁN CHICO SEGURA, portador de la Cédula de Ciudadanía No. 1805277009 y ANGEL GABRIEL SALAZAR AGUILAR, portador de la Cédula de Ciudadanía No. 1850428119, estudiantes de la carrera de Mecánica, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo de titulación, bajo la modalidad proyecto experimental es original de sus autores.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, junio 2026

.....

Ing. Alex Santiago Mayorga Pardo Mg.

C.C. 1802165785

TUTOR

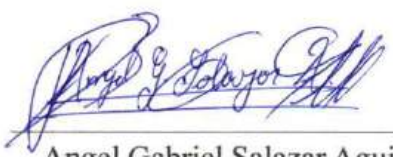
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Marlon Sebastián Chico Segura con C.C. 1805277009 y Angel Gabriel Salazar Aguilar con CC. 1850428119, declaramos que todos los contenidos y actividades expuestos en el desarrollo del presente Trabajo de titulación, Modalidad proyecto experimental con el tema: **"DISEÑO DE CONEXIONES ENTRE PERFILES CONFORMADOS EN FRÍO DE SECCIÓN TRANSVERSAL UV EN ACERO ASTM A572 GRADO 50 UTILIZADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES"**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del trabajo experimental, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, junio 2026



Marlon Sebastián Chico Segura
C.C.: 1805277009
AUTOR



Angel Gabriel Salazar Aguilar
C.C.: 1850428119
AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedemos los Derechos en línea patrimoniales de nuestro Proyecto Experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, junio 2026

Marlon Sebastián Chico Segura
C.C.: 1805277009
AUTOR

Angel Gabriel Salazar Aguilar
C.C.: 1850428119
AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del trabajo experimental, realizado por los estudiantes **Marlon Sebastián Chico Segura** y **Angel Gabriel Salazar Aguilar**, de la Carrera de Mecánica bajo el tema: "**DISEÑO DE CONEXIONES ENTRE PERFILES CONFORMADOS EN FRÍO DE SECCIÓN TRANSVERSAL UV EN ACERO ASTM A572 GRADO 50 UTILIZADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES", Modalidad trabajo experimental.**

Ambato, junio 2026

Para constancia firma:

.....	.....
Ing. Christian Byron Castro Miniguano Mg.	Ing. Pablo Raul Valle Velasco Mg. Ph.D.
C.C. 1803441128	C.C. 1802498285
MIEMBRO CALIFICADOR	**MIEMBRO CALIFICADOR**

DEDICATORIA

El presente trabajo quiero dedicarlo a mi familia y en especial a mi madre Ligia Magaly, a mi padre Emérito Chico ya que son el cimiento sobre el cual he construido cada paso de este logro. A ustedes les debo más de lo que las palabras pueden expresar. Han sabido inculcarme que el esfuerzo y compromiso siempre darán buenos resultados, sin olvidar la generosidad y la bondad hacia los demás. Este logro no es solo mío es también suyo, ya que, sin su guía, su paciencia y sobre todo su fe en mí nunca habría sido posible.

A mis abuelitos maternos María Clorinda y Gonzalo Segura por ser como una segunda madre, por su ternura y por enseñarme con su ejemplo lo que significa amor. A mi abuelito que con su cariño y apoyo incondicional fue mi fuente de motivación para seguir adelante y nunca rendirme. A mis abuelitos paternos Ernestina Villacrés y Ricardo Chico, cuyos consejos y enseñanzas me han permitido fortalecerme como persona, A mi abuelito Ricardo Chico que desde el cielo cuida nuestra familia y nos enseñó el valor de ser una buena persona en la vida.

A mi tío Edison Segura que con su apoyo incondicional en los arduos momentos vividos durante el transcurso de mi carrera y de mi vida cotidiana. A Tannia Castro que, con sus palabras de aliento, cariño y su presencia en mi vida, han cambiado mi crecimiento personal. A mis padrinos Isabel y Guillermo cuya inspiración y adoración me ha permitido solventar obstáculos presentes en mi camino para seguir adelante. A Alejandra Lascano y Sandra Tiván por brindarme su apoyo incondicional y recordarme que nunca estoy solo. Su compañía y comprensión ha sido un refugio y motivación constante.

Extiendo esta dedicatoria a mi familia en general, quienes, con sus palabras de aliento y cariño y su presencia en mi vida han contribuido en mi crecimiento personal y académico.

Por último, pero no menos importante a mis amigos dentro y fuera de la Carrera, muchas gracias por toda su ayuda en cada paso de este recorrido.

"Cree en ti mismo y en todo lo que eres"

Chico Segura Marlon Sebastián

DEDICATORIA

El trabajo presente está dedicado a mi padre; Angel Salazar, mi madre; Martha Aguilar, mi hermano; Jairo Salazar; mi hermana, Cristina Acosta, personas responsables de que, en parte, la culminación de este trabajo y del todo el proceso que hay detrás sea una realidad. Asimismo, este compendio de esfuerzos académicos está dedicado a dos criaturas, la primera: Valentín (*Borrego*, *Roco*, *Tusilla*), la segunda: cuyo nombre siempre ignoré, aquel perro que con cariño nombré *Pipón* (*Gosdo*, *Gordo*).

Angel Gabriel Salazar Aguilar

AGRADECIMIENTO

En primera instancia, agradezco a Dios por haberme concedido la fortaleza, sabiduría y paciencia hasta la etapa final de mi Carrera.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres Ligia Magaly y Emérito Chico que con su amor incondicional y paciencia fueron partícipes en los buenos y arduos momentos vividos durante el transcurso de mi Carrera. Su presencia ha sido una guía constante y fuente de Consuelo en los momentos de dificultad.

Agradezco a mi tutor, Ing. Alex Mayorga que con su apoyo y paciencia durante este periodo han sido cruciales para el Desarrollo de la investigación.

Al Ing. Francisco Peña por su valiosa ayuda, sus conocimientos y orientaciones que lograron que nuestro trabajo se realice de la mejor manera.

Extiendo mis agradecimientos a los docentes de la Carrera de Mecánica y al área de Vinculación con la sociedad de la Universidad Técnica de Ambato, quienes a lo largo de mi formación académica contribuyeron de manera significativa en mi desarrollo profesional e intelectual.

Al laboratorio de Civil de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica por brindarme un entorno propicio para el aprendizaje y la investigación. Del mismo modo, a aquellas autoridades que conforman el laboratorio de civil, muchas gracias por brindarnos su apoyo y espacio brindado para la realización de este proyecto.

Chico Segura Marlon Sebastián

AGRADECIMIENTO

Agradezco el apoyo que recibí de mi núcleo familiar, ya que, sin el mismo, la culminación del trabajo presente sería una entelequia.

Angel Gabriel Salazar Aguilar

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I 1
1. Marco teórico 1
1.1. Antecedentes investigativos 1
1.2. Objetivos 18
CAPÍTULO II 19
2. Metodología 19
2.1. Materiales 19
2.2. Métodos 24
CAPÍTULO III 30
3. Resultados y discusión 30
3.1. Análisis y discusión de los resultados 30
3.2. Verificación de hipótesis 84
CAPÍTULO IV 89
4. Conclusiones y recomendaciones 89
4.1. Conclusiones 89
4.2. Recomendaciones 90
MATERIALES DE REFERENCIA 91
Referencias Bibliográficas 91
Anexos 97

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Factor de reducción del límite elástico: (a) diferentes aceros a temperaturas elevadas de estudios previos; (b) según el grado de acero, destacando las zonas MS, HSS y VHSS **[2]**.....3
Fig. 2. Factor de reducción de la resistencia a la tracción (resistencia máxima): (a) diferentes aceros a temperaturas elevadas de estudios anteriores; (b) según el grado de acero, destacando las zonas MS, HSS y VHSS **[2]**.....3
Fig. 3. Factor de reducción del módulo elástico: (a) diferentes aceros a temperaturas elevadas de estudios previos; (b) según el grado de acero, destacando las zonas MS, HSS y VHSS **[2]**.....4
Fig. 4. Doblado en V **[4]** 5
Fig. 5. Ensayo a tracción de una probeta **[7]**.....6
Fig. 6. Esquema de ensayo a compresión **[11]** 7
Fig. 7. Representación de un miembro estructural usando MEF **[14]** 9
Fig. 8. Ejemplares de empalmes de columnas **[25]**.....15
Fig. 9. Distribución de la fuerza interna de la muestra **[25]**.....16
Fig. 10. Ensayo mecánico **[25]**.....17
Fig. 11. Modelo MEF **[25]** 17
Fig. 12. Plancha de acero ASTM A572 Gr. 50 de 6mm de espesor **[30]** 19
Fig. 13. Plancha de acero ASTM A572 Gr. 50 de 8mm de espesor **[30]** 20
Fig. 14. Perno (con rodela y tuerca) galvanizado A325 20
Fig. 15. Plancha de acero A36 **[31]** 20
Fig. 16. Electrodos E-6011 **[32]** 20
Fig. 17. Electrodos E-7018 **[33]** 21
Fig. 18. Disco de corte 21
Fig. 19. Cortadora láser CNC.....21
Fig. 20. Dobladora industrial **[34]**.....22
Fig. 21. Máquina de ensayos a compresión 22
Fig. 22. Máquina universal 22
Fig. 23. Máquina de soldar SMAW **[35]**.....23
Fig. 24. Flexómetro.....23
Fig. 25. Calibrador 23
Fig. 26. Torquímetro **[36]**.....24
Fig. 27. Amoladora.....24
Fig. 28. Diagrama de flujo de la metodología a utilizar.....29
Fig. 29. Distribución de tensiones a compresión en la placa de conexión y perfil UV ...32
Fig. 30. Análisis de resistencia y selección del tipo de pernos 33
Fig. 31. Distribución de tensiones a tracción en la placa de conexión y perfil UV 35

Fig. 32. Detalle de la junta soldada con soldadura en ranura con CJP precalificada con proceso SMAW **[39]**.....36
Fig. 33.Selección y diseño de la junta soldada 37
Fig. 34. Valores de calibración de pretensión para los pernos 39
Fig. 35.Preparación de los especímenes de prueba.....40
Fig. 36. Soldadura de placas y soportes necesarios para realizar el respectivo ensayo ...40
Fig. 37. Representación de muestras tanto a tracción y a compresión.....42
Fig. 38. Ilustración de los efectos térmicos ocurridos en la fractura de la conexión 43
Fig. 39. Esquema de doble placa por ala.....43
Fig. 40. Rotura de la placa de conexión del ensayo de tracción 47
Fig. 41. Fallo de corte en bloque.....50
Fig. 42. Plasticidad de la conexión empernada.....51
Fig. 43. Fallos en la probeta 2 a Tracción 53
Fig. 44. Relación fuerza – Deformación de las muestras.....57
Fig. 45. Fallas a compresión de la conexión empernada.....62
Fig. 46. Relación fuerza Deformación de las muestras ensayadas 65
Fig. 47. Modelado de geometría para su posterior análisis.....67
Fig. 48 Verificación de materiales Ansys Workbench.....68
Fig. 49.Propiedades mecánicas de placa y perfil UV.....69
Fig. 50. Parámetros de contacto entre placa y perfil UV.....70
Fig. 52. Consignación de sujeciones empernadas entre el perfil y la placa 71
Fig. 53. Consignación de áreas de contacto y finales de borde de los agujeros mediante named selections. 72
Fig. 54. Información del estado de los contactos entre la placa y perfil del apartado de connections.....72
Fig. 55. Aplicación de métodos de mallado y determinación de parámetros de refinamiento. 73
Fig. 56. Condiciones de sujeción y parámetros de carga para el modelo FEM 74
Fig. 57. Predicciones de fallo del espécimen: (a) Distribución de esfuerzos y pandeo de la conexión; (b) Muestra ensayada a compresión; (c) Deformación plástica y posible rotura en la placa de conexión; (d) Muestra ensayada a tracción 75
Fig. 58. Diagrama fuerza vs desplazamiento del ensayo - Simulación a tracción 76
Fig. 59. Correlación entre los resultados experimentales y numéricos de la conexión empernada sometida a tracción 79
Fig. 60. Diagrama fuerza vs desplazamiento del ensayo- Simulación a compresión 81
Fig. 61. Correlación entre los resultados experimentales y numéricos de la conexión empernada sometida a compresión 83

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I LISTA DE MATERIALES.....19
TABLA II LISTA DE EQUIPOS Y MÁQUINAS.....21
TABLA III LISTA DE HERRAMIENTAS.....23
TABLA IV RESUMEN DE CÁLCULOS A COMPRESIÓN.....31
TABLA V RESUMEN DE CÁLCULOS DE RESISTENCIA PARA LOS PERNOS....33
TABLA VI RESUMEN DE RESULTADOS DE LA PROBETA DE PRUEBA A TRACCIÓN.....34
TABLA VII RESUMEN DE RESULTADOS PARA LAS PROBETAS A TRACCIÓN 38
TABLA VIII RESUMEN DE CÁLCULOS A COMPRESIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA.....38
TABLA IX RESULTADO A COMPRESIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA DE PRUEBA.....44
TABLA X ENSAYO A TRACCIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA DE PRUEBA 46
TABLA XI FICHA TÉCNICA DE ENSAYO A TRACCIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA DE LA PROBETA 1.....48
TABLA XII FICHA TÉCNICA DE ENSAYO A TRACCIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA DE LA PROBETA 2.....51
TABLA XIII FICHA TÉCNICA DE ENSAYO A TRACCIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA DE LA PROBETA 3.....54
TABLA XIV FICHA TÉCNICA DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA DE LA PROBETA 1.....58
TABLA XV FICHA TÉCNICA DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA DE LA PROBETA 2.....60
TABLA XVI FICHA TÉCNICA DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA DE LA PROBETA 3.....63
TABLA XVII COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FUERZA A TRACCIÓN 78
TABLA XVIII COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FUERZA A COMPRESIÓN 82
TABLA XIX LISTADO DE COMPONENTES Y COSTOS PARA LA FABRACIÓN 86
TABLA XX LISTADO DE INSUMOS Y COSTOS PARA MUESTRAS DE TRACCIÓN.....87
TABLA XXI LISTADO DE ENSAYOS Y COSTOS DE MANO DE OBRA.....88
TABLA XXII LISTADO TOTAL DE COSTOS.....88

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Certificados de calidad del Acero ASTM A572 Gr.50 97
Anexo 2. Cálculos de la resistencia de la conexión empernada de prueba 99
Anexo 3. Cálculos de la conexión empernada a ensayar 117
Anexo 4. Planos 137

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación aborda el análisis de conexiones empernadas compuestas por perfiles UV y placas, tales estructuras son utilizadas en la construcción de torres de telecomunicaciones. El comportamiento de la unión empernada se examina mediante experimentación (ensayos de compresión y tracción) y simulación numérica. Es importante resaltar el uso de la norma AISC 360-22 como guía de diseño estructural; asimismo, el empleo del código AWS D1.1 para el diseño de juntas soldadas necesarias para la creación de los elementos de sujeción de las probetas de los ensayos a tracción. El trabajo experimental se fundamentó en realizar 3 ensayos a tracción y 3 ensayos a compresión para identificar los elementos críticos en cada conexión y posteriormente obtener una representación gráfica fuerza-desplazamiento de los resultados obtenidos; adicionalmente, previo a realizar los ensayos finales, se ejecutaron ensayos de prueba, tanto de compresión como tracción, con el propósito de determinar la rigidez de la estructura empernada. Con respecto a la simulación numérica, se empleó un modelo 3D, usando superficies, también, se estableció las condiciones necesarias para representar el comportamiento físico de la unión estructural y así poder demostrar la concordancia entre las gráficas experimentales y de simulación. En síntesis, el estudio destaca la comparación de fuerzas y desplazamientos de las conexiones empernadas sometidas a cargas axiales.

Palabras clave: CONEXIÓN, ENSAYO, SIMULACIÓN, FUERZA, DESPLAZAMIENTO

ABSTRACT

This research addresses the analysis of bolted connections composed of UV profiles and plates, which are commonly used in the construction of telecommunication towers. The behavior of the bolted joint is examined through experimental testing (compression and tension tests) and numerical simulation. It is important to highlight the use of the AISC 360-22 standard as the structural design guide, as well as the AWS D1.1 code for the design of welded joints required for the fabrication of the gripping elements used in the tensile test specimens. The experimental work consisted of conducting three tensile tests and three compression tests to identify the critical elements in each connection and subsequently obtain force–displacement curves from the results. Additionally, before performing the final tests, preliminary compression and tensile tests were carried out to determine the stiffness of the bolted structure. Regarding the numerical simulation, a three-dimensional model based on surface elements was developed. The necessary conditions were established to accurately represent the physical behavior of the structural joint and to demonstrate the agreement between the experimental and simulated force–displacement responses. In summary, the study emphasizes the comparison of forces and displacements in bolted connections subjected to axial loading.

Keywords: CONNECTION, TESTING, SIMULATION, FORCE, DISPLACEMENT

CAPÍTULO I

1. Marco teórico

1.1. Antecedentes investigativos

El crecimiento sostenido de las comunicaciones ha impulsado el uso de estructuras ligeras de acero para torres y soportes, donde pesan la eficiencia resistente y la rapidez de montaje. En ese marco, los perfiles conformados en frío de acero ASTM A572 Grado 50 con geometría delgada tipo UV aportan ventajas claras de peso y costo. A cambio, exigen un control cuidadoso del desempeño de sus uniones empernadas: pequeñas excentricidades, la acción de palanca y las inestabilidades local o distorsional pueden mermar capacidad y ductilidad si no se consideran en el diseño y en la fabricación, con impacto directo en la seguridad y en la vida útil.

La pertinencia del proyecto radica en articular ensayos de tracción y compresión con modelación numérica para caracterizar, bajo una métrica común, rigidez, resistencia y modos de falla gobernantes (sección neta, corte en pernos y corte en bloque). Esta doble lectura permite contrastar predicción y evidencia, ajustar parámetros de diseño y explorar variantes geométricas con menor demanda experimental. El resultado es un mapa más claro de cómo responde la conexión y qué variables conviene priorizar.

La justificación se refuerza por su utilidad inmediata para proyectistas y fabricantes. Se aportan criterios verificables para dimensionar la unión, definir controles de calidad y documentar márgenes de seguridad conforme a norma. Además, el estudio aborda un detalle poco documentado a escala local y ofrece posibilidades de transferencia a otras aplicaciones con elementos delgados.

Finalmente, el fin último del trabajo presente es diseñar y verificar, mediante ensayos de tracción y compresión complementados con modelación numérica, la capacidad y el modo de falla de una conexión empernada en perfiles UV de acero ASTM A572 Grado 50, orientada a su uso en estructuras de telecomunicaciones.

¿Para qué sirven las torres de telecomunicaciones?

Hoy en día, la tecnología relacionada con la comunicación está en su punto más álgido. Debido al crecimiento casi exponencial en el uso de dispositivos de comunicación, tal es el caso de los teléfonos móviles, los cuales han incrementado la demanda en el diseño e implementación de torres de comunicación. Estas estructuras son usadas para la transmisión mediante el recibimiento y envío de información a través de ondas de radio en dispositivos, tales como, radio, televisión y teléfonos celulares. Estos envían y reciben la información a través de antenas las cuales están sujetadas a estas torres. Generalmente están hechas de secciones de acero **[1]**.

Uso de aceros en la fabricación de torres de telecomunicaciones

Uno de los materiales empleados en la fabricación de torres de telecomunicaciones es el acero ASTM A572 Grado 50, se toma como referencia con Fy=345MPa, Fu=450 MPa y módulo de elasticidad E=200000 MPa. También presenta un alargamiento entre 18–21 %. Estos valores sirven como punto de partida para la evaluación del material a temperatura elevada. Para la obtención de dichos valores de realizaron ensayos de tracción, los cuales se ejecutan en régimen estacionario conforme a ASTM E8 y ASTM E21. Se emplea un horno con capacidad hasta 1200 °C. La velocidad de calentamiento es cercana a ≈ 10 °C/min. Tras la estabilización térmica, la carga se aplica manteniendo la temperatura constante dentro del intervalo 25–900 °C **[2]**. A partir de las curvas experimentales se obtienen factores de reducción para el límite elástico (Fig. 1), la resistencia a tracción (Fig. 2) y el módulo elástico (Fig. 3).

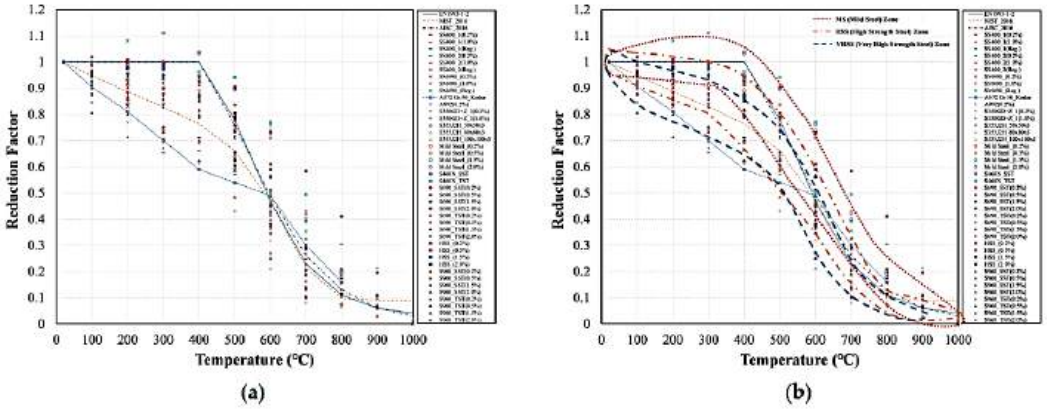


Fig. 1. Factor de reducción del límite elástico: (a) diferentes aceros a temperaturas elevadas de estudios previos; (b) según el grado de acero, destacando las zonas MS, HSS y VHSS **[2]**.

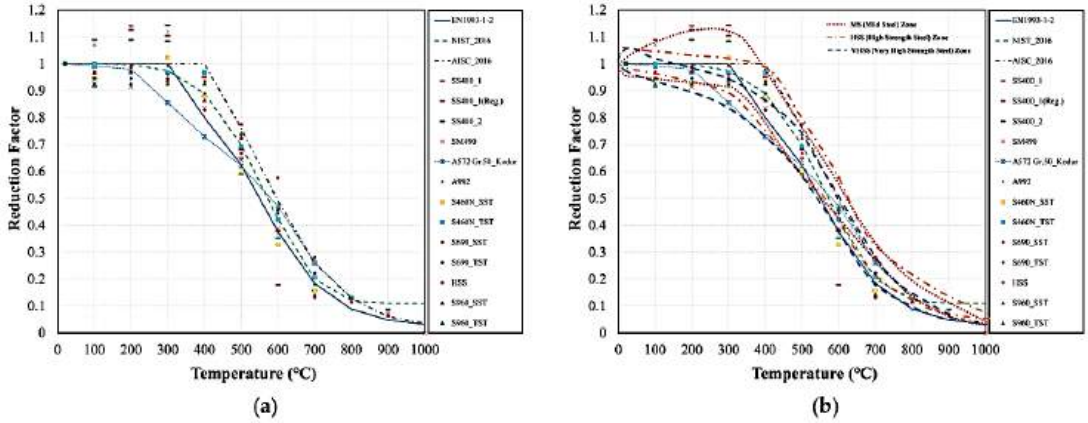


Fig. 2. Factor de reducción de la resistencia a la tracción (resistencia máxima): (a) diferentes aceros a temperaturas elevadas de estudios anteriores; (b) según el grado de acero, destacando las zonas MS, HSS y VHSS **[2]**.

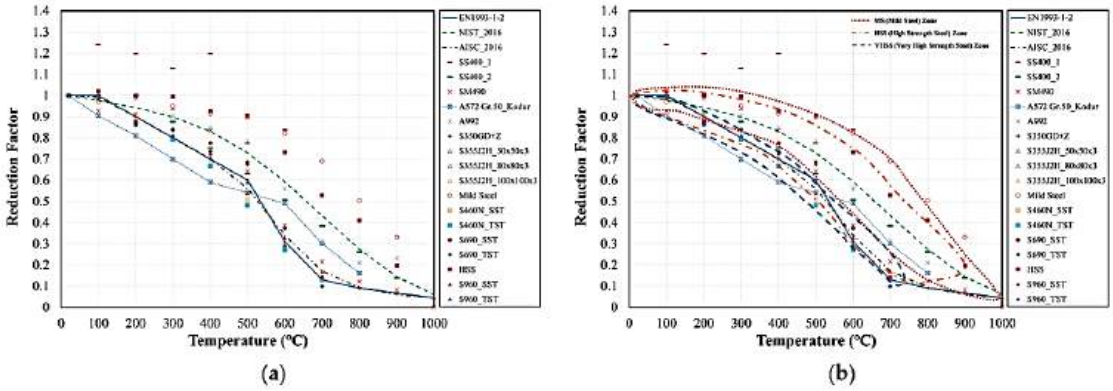


Fig. 3. Factor de reducción del módulo elástico: (a) diferentes aceros a temperaturas elevadas de estudios previos; (b) según el grado de acero, destacando las zonas MS, HSS y VHSS **[2]**.

Se observa que los aceros de alta y muy alta resistencia pierden capacidad con mayor rapidez que los aceros convencionales. Por esta razón se sugiere especial cautela en el rango de 500–600 °C. En ese intervalo la degradación resulta crítica. Su consideración evita sobreestimar la respuesta del material.

Para conexiones empernadas en perfiles UV conformados en frío utilizados en torres de telecomunicaciones, esta información resulta directamente aplicable. Las propiedades verificadas del material base y sus reducciones térmicas permiten sustentar los cálculos de capacidad. También facilitan justificar los criterios de seguridad y el desempeño de la conexión. La misma base respalda la evaluación bajo condiciones ambientales o accidentales de temperatura elevada.

Conformado en frío para aceros

El acero conformado en frío se ha consolidado como alternativa relevante para elementos estructurales. Su fabricación por prensado y rolado sin aporte térmico favorece soluciones eficientes y económicas. El ahorro de material es una consecuencia directa de esa manera de producir perfiles delgados. Su uso abarca desde tabiques y sistemas panelizados hasta aplicaciones en edificaciones de mediana altura, puentes y torres **[3]**.

La delgadez de estos perfiles introduce riesgos de inestabilidad. Se presentan modos de pandeo local, distorsional y global que incluso pueden activarse antes de alcanzar la

fluencia. Por ello el diseño debe considerar con detalle la transferencia de cargas en cada unión. También requiere control de calidad en fabricación y en montaje para limitar imperfecciones. En ciertos casos se adoptan alas huecas para reducir la longitud de bordes libres y mejorar el comportamiento **[3]**.

Uso del conformado en frío para obtener un doblado en V

Las operaciones compuestas por doblado se hacen mediante el uso de varias herramientas, tales como punzones y troqueles. Los dos métodos de doblado más comunes y sus herramientas respectivas son el doblado en V, ejecutado mediante un troquel en V; y el doblado enfocado en bordes, llevado a cabo a través de un troquel de tipo deslizante. Para el trabajo de titulación presente se hará uso del primer tipo. Para lo cual se especificará su procedimiento **[4]**.

En el doblado en V, la lámina a ser tratada es deformada entre un punzón y un troquel tipo V. Los ángulos incluidos, que varían desde ángulos obtusos hasta los muy agudos, se pueden hacer con troqueles en forma de V. Frecuentemente, el doblado en V se usa para operaciones de baja producción y se realiza frecuentemente en una prensa de cortina. Los correspondientes troqueles en forma de V son anodinos y económicamente convenientes **[4]**.

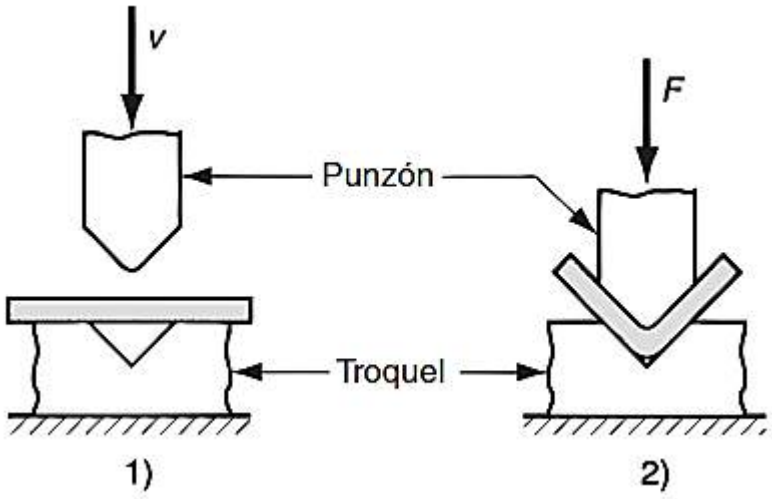


Fig. 4. Doblado en V **[4]**

¿Cómo verificar experimentalmente la resistencia de una conexión empernada?

Existen diversas formas de verificar la resistencia de una estructura metálica de forma experimental, verbigracia, ensayos a tracción y compresión, ensayos de momento flector, etc. Para el trabajo experimental presente se hará uso de las primeras formas.

Ensayo por tracción

Un ensayo de tracción aplica a una probeta metálica (conexión empernada) una carga axial creciente en direcciones opuestas hasta la rotura. Durante el proceso se registra la curva esfuerzo-deformación o la curva esfuerzo-desplazamiento a la temperatura de interés. Con ese registro se identifican el módulo, la fluencia y la resistencia de la probeta. Es un procedimiento directo que permite observar cómo cambian la rigidez y la capacidad con la temperatura **[5]**. Para la investigación actual se hará uso de la norma ANSI/AISC 360-22 **[6]** en donde se estipulan los parámetros y criterios para desarrollar los preceptos relacionados a este ensayo, pero desde un enfoque teórico.

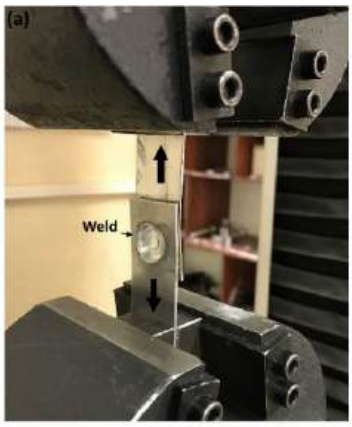


Fig. 5. Ensayo a tracción de una probeta **[7]**

Con este ensayo se identifican con claridad los modos de falla más habituales. Entre ellos se incluyen la fractura a sección neta del alma, la rotura de pernos a tracción, el corte de pernos y el corte en bloque. La identificación de estos mecanismos permite obtener, dentro de un mismo marco, la capacidad resistente, el modo que gobierna y la ductilidad del detalle. De este modo se logra una caracterización directa y comparable entre

especímenes. Además, los criterios de clasificación se mantienen consistentes a lo largo de la evaluación **[8]**.

Ensayo por compresión

Un ensayo de compresión aplica a un elemento metálico una carga axial que aumenta de forma controlada. Con ello se caracterizan su resistencia, su rigidez y, en especial, su estabilidad fuera del plano. El registro carga-desplazamiento sirve como base para el análisis. La observación directa de los modos de inestabilidad completa la lectura del comportamiento **[9]**.

Durante la prueba se revisa la distribución de esfuerzos normales y el inicio de la fluencia en la zona solicitada. Esta respuesta puede describirse mediante el concepto de ancho efectivo, que aproxima la parte efectivamente solicitada donde se evalúan las tensiones. Dado que en compresión la inestabilidad es decisiva, el protocolo incorpora la identificación y la cuantificación del pandeo **[10]**. Para ello se usan esquemas equivalentes de tiras-columna a compresión que permiten estimar la carga crítica de inestabilidad. La integración de registros y observaciones lleva a reconocer la secuencia fluencia-redistribución–pandeo que precede al colapso en elementos comprimidos **[9], [10]**.

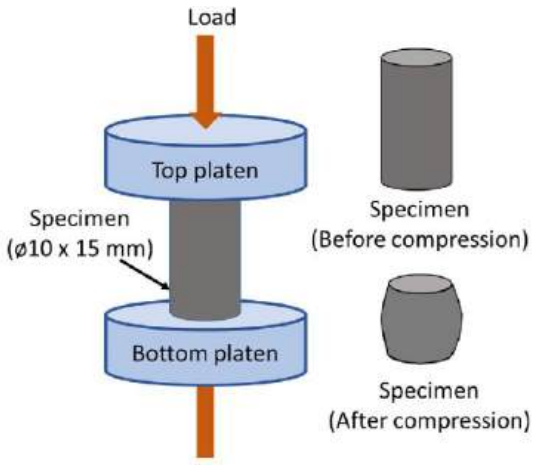


Fig. 6. Esquema de ensayo a compresión **[11]**

Al igual que en el ensayo por tracción se hará uso de la norma **[6]** para realizar el diseño de miembros estructurales bajo el paradigma de este tipo de ensayo.

Uso de herramientas de elementos finitos para modelar estructuras metálicas

Hoy en día existen maneras de predecir el comportamiento de estructuras metálicas, ya sea mediante el uso de ensayos en laboratorio, métodos numéricos especializados, etc. No obstante, últimamente se ha popularizado una técnica muy útil, práctica y relativamente económica de realizar este tipo de predicciones, se trata del Método de Elementos Finitos (MEF), esta novedosa técnica ha facilitado exponencialmente el diseño de estructuras metálicas, proporcionando una predicción bastante realista sobre el comportamiento de una configuración metálica **[12]**.

La literatura reciente sobre monopolos de telecomunicaciones los enmarca en la expansión de la red móvil y en las restricciones de suelo propias de las ciudades. Frente a las torres reticuladas, destacan por su huella reducida y por la rapidez de montaje. Bajo ese contexto, el análisis y el diseño frente al viento se abordan para alturas habituales y para configuraciones con o sin camuflaje, incorporando la interacción con antenas y accesorios **[13]**. El enfoque combina modelado estructural, comparación de desplazamientos laterales y verificación de capacidad resistente. Con ello se proponen criterios para elegir tipología según la demanda ambiental y las condicionantes del emplazamiento, y se aporta un trasfondo técnico que explica cómo se evalúa el comportamiento global del soporte y cómo este condiciona decisiones de detalle en la transmisión de esfuerzos **[13]**.

En torres reticuladas con ángulos atornillados, los estudios coinciden en que el deslizamiento de los nudos es inevitable. Omitirlo conduce a sobrestimar la rigidez axial del sistema. La respuesta bajo tracción incremental se describe como no lineal y sigue una secuencia reconocible: primero domina la fricción, luego aparecen deslizamientos asincrónicos a lo largo de la hilera de fijaciones y, finalmente, se produce un deslizamiento pleno cuando se supera la fricción en toda la interfase. Para representarlo se proponen modelos carga-deformación de tipo multilineal y elementos nodales que incorporan el deslizamiento en el análisis global **[12]**. Esta representación mejora la predicción de deformaciones y aumenta la confiabilidad del diseño, a la vez que impulsa la calibración entre resultados experimentales y numéricos y el tratamiento del nudo como un componente de rigidez axial variable en servicio.

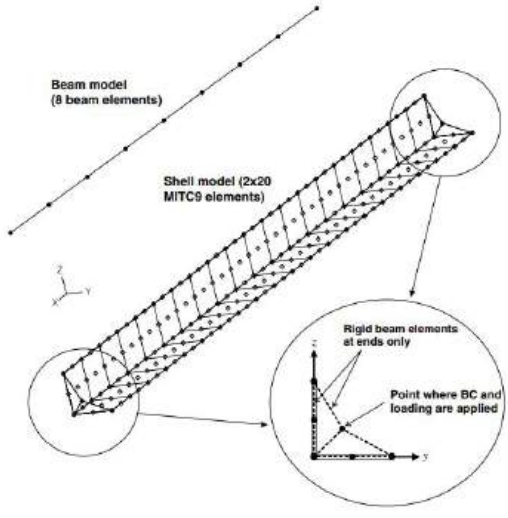


Fig. 7. Representación de un miembro estructural usando MEF **[14]**

Con la expansión de 5G se ha profundizado el uso de modelos de elementos finitos para capturar con mayor fidelidad el solape con pernos en conexiones de ángulos de torres de transmisión. El modelado atiende de forma explícita los contactos, la fricción, las condiciones de borde y la calidad de malla como variables críticas. Este planteamiento relaciona el diseño del solape con la estabilidad y con el modo de falla del nudo bajo combinaciones de carga relevantes, e incorpora además la respuesta frente a torsión y a acciones ambientales. La metodología ordena los pasos de discretización, formulación de matrices de rigidez y equilibrio, junto con criterios prácticos de mallado y de relaciones de interfaz para equilibrar precisión y eficiencia computacional **[15]**. En conjunto, la modelación física detallada habilita la optimización de detalles y la transferencia de resultados al diseño y a la verificación de estructuras destinadas a operación continua.

Análisis y diseño estructural

Denominamos análisis estructural a la resolución o cálculo de las cargas o fuerzas actuantes sobre un elemento estructural, el diseño estructural conlleva el arreglo y dimensionamiento de cada una de las partes que confirma la estructura con el propósito de que estos elementos resistan las solicitaciones planteadas. Hay que tomar en cuenta que los esfuerzos de los elementos deben ser menores o iguales que los esfuerzos admisibles, es decir que el elemento resista, a su vez las deformaciones deben ser menores o iguales a las deformaciones admisibles esto quiere decir que el elemento sea rígido. La

especificación del AISC proporciona ecuaciones que permiten el cálculo de la resistencia de cada uno de elementos sujetos a las diferentes cargas actuantes.

Resistencia de los elementos a compresión:

Si una columna está sujeta a compresión en su eje longitudinal se acotará a lo largo de la dirección de su carga flexionándose y se deformará súbitamente pudiendo al mismo tiempo torcerse en la dirección perpendicular a su eje longitudinal, Por otro lado, si la longitud efectiva de la columna crece se disminuye el esfuerzo de pandeo, en cambio si la longitud efectiva excede su valoración el esfuerzo de pandeo tendrá un valor menor que el límite proporcional del acero.

Para obtener la resistencia nominal a compresión se utilizará la siguiente ecuación:

$$P_n = F_y A_g \qquad (1)$$

$$\emptyset = 0.90\ (LRFD);\ \Omega = 1.67\ (ASD)$$

Donde:

F_y : Esfuerzo de fluencia por tracción

A_g : Área de la sección transversal

Tomando en cuenta que esta ecuación se utiliza únicamente cuando la longitud crítica sobre su radio de giro de la columna es menos o igual que 25. Para el cálculo de la resistencia nominal del elemento conectado en un perno se utilizará la siguiente ecuación:

Conexiones atornilladas de alta resistencia ajustadas o pretensadas:

$$R_n = 2.4 * d * t * F_u \qquad (2)$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD);\ \Omega = 2.00\ (ASD)$$

Donde:

d : Diámetro del perno

t : Espesor de la placa conectada

F_u: Resistencia última del material

La delimitación de resistencia de los elementos sometidos a tracción o corte define la siguiente ecuación el cual se lo determinará dependiendo los estados de límite de rotura o corte la ecuación se presenta en el siguiente apartado:

Resistencia a la tracción y al corte de pernos y piezas roscadas:

$$R_n = F_n A_b \quad (3)$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD);\ \Omega = 2.00\ (ASD)$$

Donde:

F_n : Esfuerzo nominal a tracción del perno según la tabla J3.2 de AISC

A_b : Área nominal del perno

En este caso la ecuación que se presentará es adecuada cuando las conexiones deben ser diseñadas para evitar un deslizamiento crítico y para estados de limite de las conexiones de tipo apoyo.

Resistencia al deslizamiento crítico:

$$R_n = \mu D_u h_f T_b n_s \quad (4)$$

$$\emptyset = 1.00\ (LRFD);\ \Omega = 1.50\ (ASD)$$

Donde:

μ : Coeficiente de deslizamiento medio para superficies de Clase A o B.

D_u : 1.13, multiplicador que refleja la relación entre la pretensión media instalada del perno

h_f : factor para rellenos entre piezas conectadas

T_b : Pretensión mínima de perno indicada en la tabla J3.1 o tabla J3.1M.

n_s: Número de planos de deslizamiento necesarios para permitir el deslizamiento de la conexión.

Para los elementos sometidos a tracción específicamente para placas soportes cartelas y ángulos, se debe tomar a consideración que entre la resistencia de diseño y la resistencia de diseño admisible se deberá tomar el menor valor de los estados de limite a fluencia y rotura por tracción. Se presenta las ecuaciones de fluencia y fractura:

Fluencia de los elementos de conexión:

$$R_n = F_y A_g \qquad (5)$$

$$\emptyset = 0.9\ (LRFD);\ \Omega = 1.67\ (ASD)$$

Donde:

F_y: Esfuerzo de fluencia por tracción

A_g: Área total de la sección transversal del elemento.

Fractura de los elementos de conexión:

$$R_n = F_u A_e \qquad (6)$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD);\ \Omega = 2.00\ (ASD)$$

Donde:

F_u: Resistencia última a tracción del material

A_e: Área neta efectiva de la sección transversal del elemento

En este caso se trata de obtener las posibles fallas de un elemento cargado. Es necesario tomar en cuenta que un elemento a tracción no siempre va a estar controlado por fluencia a la tracción, la fractura a tracción o resistencia de los tornillos y soldaduras con las que se haya conectado. En lugar a eso pueden estar controladas por la resistencia de corte en bloque, sucediendo la falla a lo largo de una trayectoria el cual implica tracción en un plano y cortante en el otro plano perpendicular desgarrándose el acero. Para ello se dispone de la siguiente ecuación:

Resistencia al corte en bloque:

$$R_n = 0.60F_uA_{nv} + U_{bs}F_uA_{nt} \leq 0.60F_yA_{gv} + U_{bs}F_uA_{nt} \quad (7)$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD);\ \Omega = 2.00\ (ASD)$$

F_u : Resistencia última a tracción del material

A_{nv} : Área neta sujeta a cortante

A_{nt} : Área neta sujeta a tracción

F_y : Esfuerzo de fluencia por tracción

A_{gv} : Área total sujeta a cortante

U_{bs} : Distribución de esfuerzos (Uniforme :1; No uniforme :0.5)

Para determinar la resistencia nominal total de las soldaduras es necesario tomar en cuenta las soldaduras transversales menos dúctiles logran alcanzar su capacidad de deformación última antes de que las soldaduras que son laterales o longitudinales, por ende, el AISC recomienda tomar el valor igual o mayor de la resistencia nominal total de la conexión ya sea longitudinal o transversal. Se presenta la ecuación para la resistencia nominal de manera transversal y longitudinal.

Resistencia nominal de la soldadura trasversal

$$R_n = 0.30F_{EXX}(1 + 0.5 * \sin^{1.5}\alpha) * A_\omega \quad (8)$$

Donde:

F_{EXX} : Resistencia a tracción del electrodo

α : Angulo de la carga respecto al eje del cordón de soldadura

A_ω : Área efectiva de la garganta de la soldadura

Relación conceptual entre ensayos mecánicos y modelación por MEF

Los ensayos mecánicos ofrecen la observación directa del comportamiento de un material o de un detalle estructural bajo cargas controladas. Permiten registrar curvas carga-desplazamiento y esfuerzo-deformación, identificar modos de inestabilidad y seguir la

secuencia de plastificación paso a paso. Esos registros incluyen la variabilidad propia de la fabricación, el montaje y las condiciones de borde, por lo que reflejan la realidad de servicio. Son, en síntesis, la referencia empírica con la que se contrasta cualquier predicción.

La modelación mediante el método de los elementos finitos es una representación idealizada construida sobre hipótesis explícitas. Define material, geometría, contactos, apoyos y discretización, y a partir de ello aproxima la respuesta estructural. Su fortaleza radica en aislar variables, probar escenarios y medir sensibilidad con economía de recursos. También facilita estudiar situaciones difíciles o costosas de reproducir en laboratorio.

Ambos enfoques se complementan. El ensayo valida y acota, el MEF explica y generaliza. La calibración entre datos medidos y modelos reduce la incertidumbre, mejora la capacidad predictiva y delimita los rangos en los que es razonable extrapolar. Con esa dupla se obtiene un marco claro para interpretar respuestas y tomar decisiones de diseño con mayor confianza.

Ejemplo ilustrativo del uso de ensayos mecánicos y simulación por MEF bajo un mismo paradigma

En sistemas estructurales esbeltos, combinar los ensayos de tracción con la modelación por elementos finitos (MEF) permite describir la respuesta de un empalme delgado con una métrica única y evitar comparaciones inconsistentes **[16]**, **[17]**, **[18]**, **[19]**. El caso de estudio del artículo se centra en empalmes asimétricos de secciones tubulares cuadradas cuyas caras deben quedar a ras; incorpora una placa de recubrimiento y analiza su comportamiento a tracción mediante experimento y simulación **[20]**, **[21]**, **[22]**. Esta doble mirada aclara por qué la interacción entre componentes y pequeñas palancas efectivas termina gobernando la respuesta global; el ensayo lo muestra en la curva carga–deformación y el MEF lo despliega en los campos internos. El enfoque ofrece un trasfondo aplicable a soportes ligeros, donde la transmisión eficiente de esfuerzos y la estabilidad local resultan decisivas **[23]**, **[24]**.

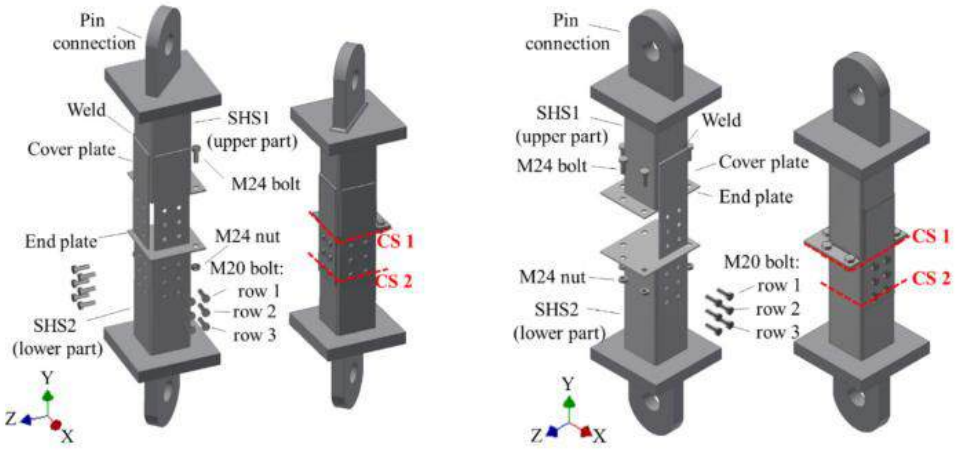


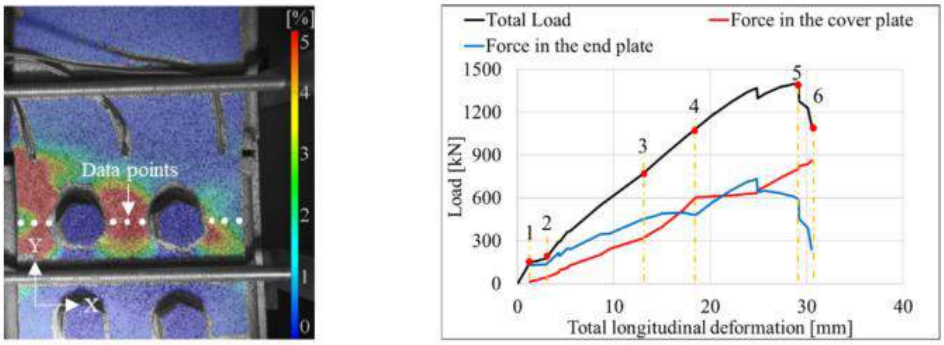
Fig. 8. Ejemplares de empalmes de columnas **[25]**

El hilo conductor de la comparación es una idealización bilineal que define una resistencia de referencia (R_y) por el método de áreas iguales; así, ensayo y MEF comparten la misma regla de lectura para rigidez inicial y capacidad **[26]**, **[27]**. En esta clave, un MEF con material elastoplástico perfecto reproduce un (R_y) alineado con el caracterizado en el ensayo, sin contaminar la comparación con endurecimiento por deformación [27]**,** [26]. El resultado es una base objetiva para distinguir qué parte de la respuesta es geométrica y cuál es material, antes de entrar a decisiones de calibración **[16]**, **[17]**.

La validación cruzada no se limita a comparar máximos; también contrasta la forma de la curva, los tramos de rigidez y los modos de iniciación. La asimetría del empalme induce flexiones secundarias y una secuencia de activación de componentes que el MEF captura con resolución espacial, mientras el ensayo aporta la trayectoria real carga-deformación. Esta lectura complementaria permite separar efectos de montaje de los puramente resistentes y trasladar tendencias a contextos de elementos delgados con exigencias de estabilidad **[23]**, **[24]**, **[19]**.

Un hallazgo central es la longitud efectiva de las líneas de fluencia en la placa: las expresiones simplificadas proponen una longitud, pero el MEF validado permite medir la efectiva y resulta aproximadamente el doble de la calculada; al incorporar esa longitud

"medida", el método analítico por componentes mejora la predicción de la resistencia de referencia y reduce el sesgo **[28]**. La moraleja metodológica es clara: usar el MEF no para "imitar" el ensayo, sino para capturar magnitudes internas no observables que alimenten un modelo analítico coherente con la evidencia experimental **[28]**, **[22]**.



a) Strain contour plot. b) Load-deformation curves.

Fig. 9. Distribución de la fuerza interna de la muestra **[25]**

Como variable de montaje, la pretensión puede retrasar la iniciación de deformaciones sin alterar la resistencia última, de modo que la comparación ensayo-MEF basada en (R_y) permanece consistente **[18]**, **[29]**. Además, el trabajo enfatiza que sensibilidades locales asociadas a la zona afectada por el calor exigen control y verificación, reforzando la necesidad de validar con evidencias complementarias. Este registro de observables comunes y efectos de montaje consolida la trazabilidad de la comparación y sustenta decisiones de diseño **[16]**, **[17]**, **[27]**.

Con todo lo anterior, el paradigma unificado queda delineado: ensayo para anclar la realidad, MEF para medir lo que no se ve y modelo analítico calibrado para transferir ese conocimiento al diseño y verificación de detalles delgados **[26]**. En conjunto, la estrategia ofrece un camino replicable para decisiones sobre espesores, palancas efectivas y distribución de esfuerzos, con una cadena de evidencias clara entre laboratorio, simulación y cálculo **[21]**, **[22]**.

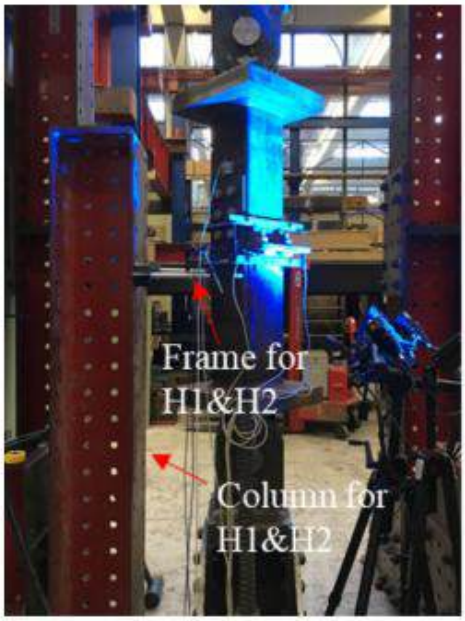


Fig. 10. Ensayo mecánico **[25]**

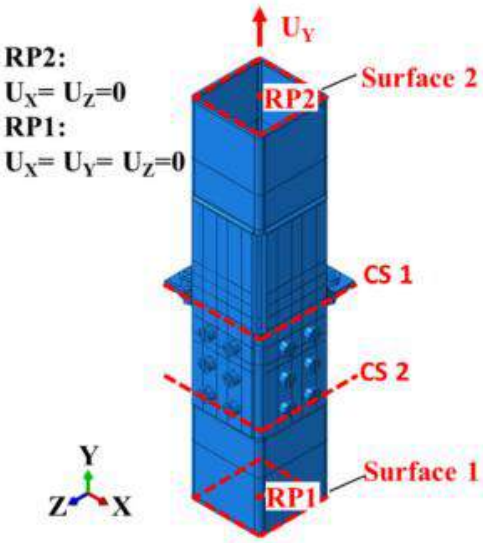


Fig. 11. Modelo MEF **[25]**

1.2. Objetivos

Objetivo General

Diseñar conexiones entre perfiles conformados en frío de sección UV en acero ASTM A572 Grado 50, utilizados para construcción de torres de telecomunicaciones.

Objetivos Específicos

- Proponer un modelo mediante la metodología de elementos finitos que simule la conexión empernada entre los perfiles UV conformados en frío para conocer su comportamiento. Implementar una simulación mediante el método de elementos finitos para analizar el comportamiento de la conexión empernada entre perfiles UV.
- Ejecutar ensayos de tracción y compresión para verificar la viabilidad del modelo de conexión propuesto para espesores de 6mm.
- Comparar los resultados obtenidos de manera experimental con el modelo de elementos finitos para garanticen la validez y confiabilidad de los resultados del material de origen en el modelo de conexiones propuesto.

CAPÍTULO II

2. Metodología

2.1. Materiales

A continuación, se presentan los materiales, equipos, máquinas y herramientas empleados en la fabricación de probetas destinadas a ensayos mecánicos de compresión y de tracción. Para cada elemento se indica una característica o descripción técnica esencial y se reserva un espacio para su imagen y pie de figura, a fin de garantizar trazabilidad, reproducibilidad y verificación visual del proceso. La selección y uso de estos recursos se alinean con las prácticas de laboratorio y con los procedimientos de preparación de especímenes aplicables.

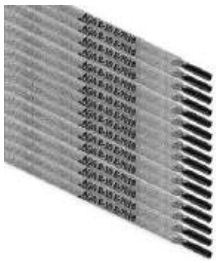
Caracterización de materiales

TABLA I

LISTA DE MATERIALES

N.°	Material	Características	Imagen
1	Acero ASTM A572 Gr. 50	• Dimensiones de 1.22 x 2.44 m • Espesor de 6 mm	 Fig. 12. Plancha de acero ASTM A572 Gr. 50 de 6mm de espesor **[30]**
2	Acero ASTM A572 Gr. 50	• Dimensiones de 1.22 x 2.44 m • Espesor de 8 mm	

			 Fig. 13. Plancha de acero ASTM A572 Gr. 50 de 8mm de espesor **[30]**
3	Perno galvanizado A325 (con tuerca y rodela incluidos)	• Diámetro de 5/8″ • 2″ de largo	 Fig. 14. Perno (con rodela y tuerca) galvanizado A325
4	Acero A36	• Dimensiones de 7.5 x 27 cm • Espesor de 15 mm	 Fig. 15. Plancha de acero A36 **[31]**
5	Electrodos 6011	• 3.2 mm de diámetro, 1/8″ y 35 cm de largo	 Fig. 16. Electrodos E-6011 **[32]**

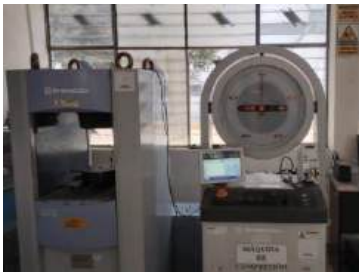
6	Electrodos 7018	• 3.2 mm de diámetro, 1/8″ y 35 cm de largo • Electrodo con revestimiento de bajo hidrógeno	 Fig. 17. Electrodos E-7018 **[33]**
7	Disco de corte	• 115 x 1.6 x 22.2 mm	 Fig. 18. Disco de corte

Descripción de equipos y máquinas

TABLA II

LISTA DE EQUIPOS Y MÁQUINAS

N.°	**Equipo**	**Descripción**	**Imagen**
1	Cortadora láser CNC	• Equipo que corta y graba materiales mediante un haz láser controlado por computadora con alta precisión.	 Fig. 19. Cortadora láser CNC

2	Dobladora industrial	• Máquina que aplica fuerza para curvar o plegar láminas y perfiles metálicos según un ángulo definido.	 Fig. 20. Dobladora industrial **[34]**
3	Máquina de ensayos a compresión	• Máquina que somete probetas a carga axial de compresión para medir resistencia, rigidez y deformación.	 Fig. 21. Máquina de ensayos a compresión
4	Máquina universal	• Prensa de ensayos mecánicos que realiza pruebas de tracción, compresión y flexión con control de carga o desplazamiento.	 Fig. 22. Máquina universal
5	Máquina de soldar SMAW	• Fuente de poder para soldadura por arco con electrodo revestido, adecuada	

		para uniones en acero al carbono y aleados.	 Fig. 23. Máquina de soldar SMAW **[35]**

Descripción de herramientas

TABLA III

LISTA DE HERRAMIENTAS

N.°	**Herramienta**	**Descripción**	**Imagen**
1	Flexómetro	• Cinta métrica retráctil para medir longitudes con precisión milimétrica.	 Fig. 24. Flexómetro
2	Calibrador	• Herramienta que mide diámetros exteriores/interiores y profundidades con alta precisión.	 Fig. 25. Calibrador
3	Torquímetro	• Llave que aplica un par controlado para ajustar pernos y tuercas sin exceder el torque.	

			 Fig. 26. Torquímetro **[36]**
4	Amoladora	• Herramienta rotativa que usa discos para desbaste, corte y pulido de metales y otros materiales.	 Fig. 27. Amoladora

2.2. Métodos

Esta sección describe los procedimientos empleados para estudiar la conexión empernada en perfiles conformados en frío tipo "UV" de acero ASTM A572 Grado 50. Se adoptan tres enfoques complementarios: (i) un método analítico–normativo para estimar la capacidad de diseño; (ii) un método experimental para medir la respuesta real de la unión en tracción y compresión; y (iii) la preparación metodológica para un eventual análisis numérico. La integración de estos enfoques permite contrastar capacidades, identificar el modo de falla gobernante y verificar la coherencia del diseño con los objetivos del estudio.

Método analítico–normativo

El cálculo teórico se basa en la norma AISC 360-22, trabajando en formato LRFD (ϕRn). La unión se clasifica como deslizante (slip-critical), con pernos pretensados y rosca excluida en el plano de corte. El análisis se centra en el modo de corte en bloque como verificación principal de la placa de conexión, complementándose con las comprobaciones necesarias de sección neta y de aplastamiento/cortante en pernos cuando corresponda. Para cada modo de falla se determinan las resistencias nominales y las resistencias de diseño ϕRn, considerando dimensiones efectivas (espesor, anchos,

diámetros de perforación, distancias a borde y entre pernos) y propiedades mecánicas del acero ASTM A572 Grado 50.

En los ensayos de tracción se emplearon placas soldadas en los extremos a fin de permitir la sujeción de las probetas en la máquina de ensayos a tracción; dichas uniones soldadas se ejecutaron bajo los criterios de la norma AWS D1.1, limitando su función a la sujeción del espécimen y no a la transferencia principal de carga de la conexión estudiada.

Método experimental

Se realizan ensayos cuasi estáticos de tracción y compresión sobre especímenes que reproducen la configuración de la conexión: dos perfiles UV y dos placas de conexión que unen sus extremos. Las dimensiones declaradas son: perfil UV 60×60×60×6 mm; placa de conexión de 7,5×27 cm con espesor de 15 mm. Se dispone de ocho pernos A325 en total (dos por extremo de cada perfil), con patrón en columna, diámetro de agujero de 18 mm, distancia a borde de 27,5 mm y separación entre pernos de 45 mm. El material del perfil y de la placa es ASTM A572 Grado 50, con certificados de material disponibles.

Para cada tipo de solicitación (tracción y compresión) se ensayan tres especímenes, sumando seis ensayos totales. La velocidad del actuador se fija en 1 mm/min bajo control por desplazamiento. El criterio de terminación es: en compresión, hasta observar pandeo visible del conjunto placa-perfil; en tracción, hasta la fractura de las placas. Se documentan mediante registro fotográfico la evolución del daño.

La alineación y el apoyo se mantienen de forma que el eje de carga sea coincidente con el eje del perfil, minimizando excentricidades no deseadas. Se adquieren continuamente fuerza y desplazamiento para construir curvas carga–desplazamiento, a partir de las cuales se extraen la carga última y la rigidez inicial. En compresión se observó pandeo del conjunto placa con los perfiles; en tracción se registró dominancia de la falla en la placa.

Alcance respecto del método numérico (MEF)

Este apartado establece una guía flexible para el análisis numérico de la conexión UV. El objetivo es obtener, cuando corresponda, la curva carga–desplazamiento y un criterio

objetivo de pérdida de rigidez, manteniendo abierta la posibilidad de ajustar el enfoque según indicaciones del tutor o requerimientos de validación.

Alcance y software

Se utilizará un software de elementos finitos. La modelación considerará no linealidades de material y contacto cuando sea pertinente y se realizará en un régimen estático.

Representación del modelo

La geometría replicará las dimensiones ensayadas. La discretización podrá realizarse con elementos de cascarón o elementos sólidos, en función del equilibrio entre detalle requerido y costo computacional. La elección final se acordará con el tutor y se justificará por sensibilidad y consistencia con los ensayos.

Material

Se utilizará un modelo para acero estructural adecuado al nivel de fidelidad deseado (p. ej., elastoplástico bilineal con endurecimiento isotrópico o multilineal calibrado). Los parámetros (E, ν, Fy, Fu) se tomarán del certificado de material o de normas aplicables, y se ajustarán si la comparación con ensayos lo requiere.

Contacto y pretensión

Se definirán contactos entre placa–perfil y agujero–perno con formulación apropiada (penalización o Lagrangiano aumentado). El coeficiente de fricción y la inclusión de pretensión en pernos se fijarán explícitamente y, en caso de incertidumbre, se evaluarán mediante análisis de sensibilidad.

Mallado y convergencia

Se realizará un estudio de convergencia con al menos tres niveles de malla (gruesa, media y fina), con refinamiento en bordes y contornos de agujeros. El tamaño final se adoptará cuando variaciones en la respuesta global y en la curva carga–desplazamiento sean pequeñas entre niveles consecutivos.

Condiciones de frontera y carga

Se reproducirán los apoyos y la alineación de los ensayos. La carga podrá imponerse como desplazamiento (extrayendo la reacción para obtener la curva) o como fuerza, según conveniencia numérica. Se considerará activar grandes desplazamientos cuando se prevean rotaciones significativas. Sin embargo, considerando la naturaleza del fenómeno físico a simular conviene adaptar el desplazamiento como variable de control debido a que, en análisis no lineales de conexiones estructurales, este procedimiento permite un mejor seguimiento de la respuesta del sistema, especialmente en la zona de grandes deformaciones y cercanía a la pérdida de rigidez. De esta manera, la fuerza se obtendrá como respuesta reactiva del modelo, lo que permitirá construir la curva fuerza–desplazamiento y compararla directamente con los resultados experimentales.

Estrategia de solución

Se utilizará un análisis estático incremental con un algoritmo de equilibrio adecuado (por ejemplo, Newton–Raphson), con control de tamaño de paso y criterios de convergencia por fuerzas/residuos y desplazamientos.

Resultados y criterio de falla numérica

Resultado principal: curva carga–desplazamiento. Se considerará que la respuesta numérica alcanza su límite útil cuando se identifique el pico de carga o una pérdida clara de rigidez global; el valor reportado será coherente con el último punto estable previo a inestabilidades numéricas.

Hipótesis y variables

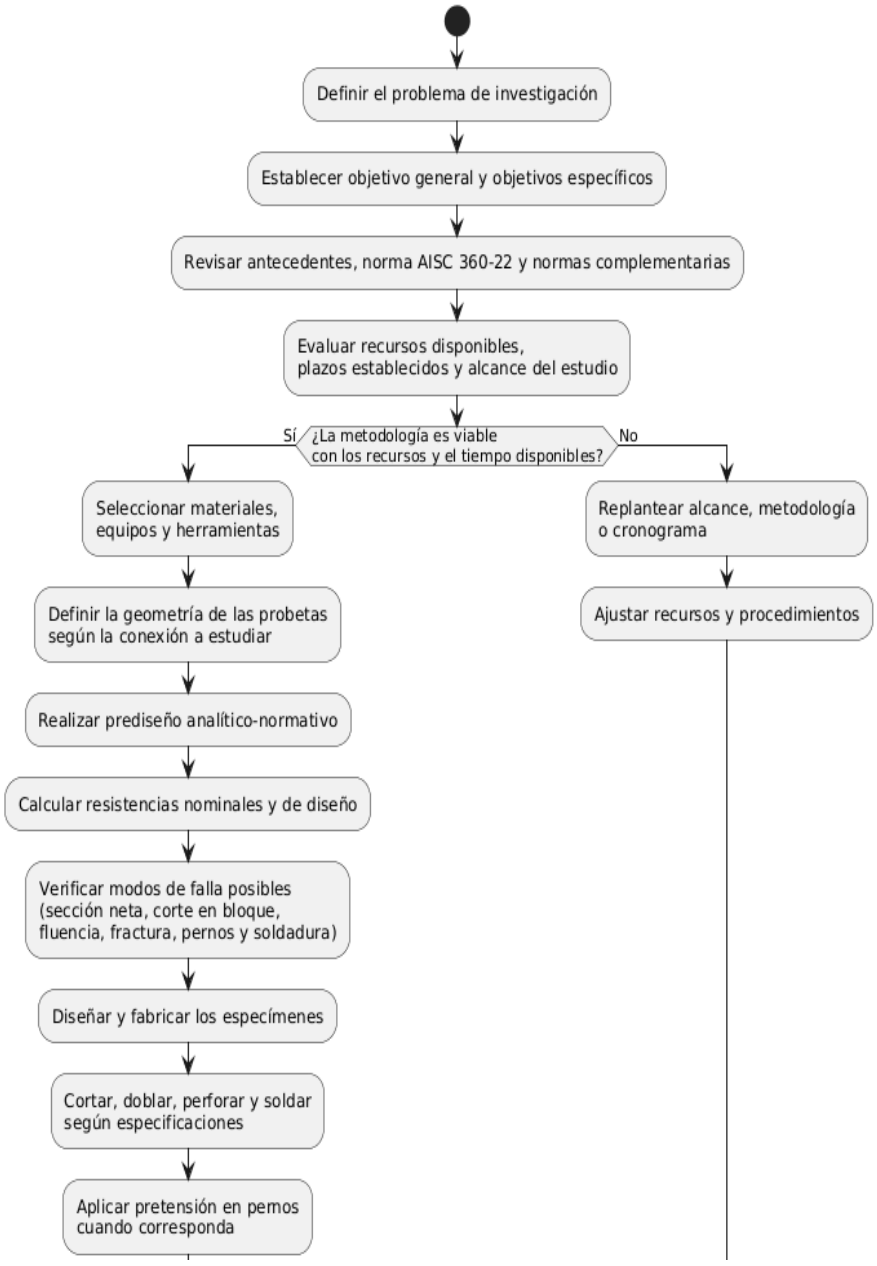
Formulación de hipótesis

- Hipótesis alternativa (H_1): La simulación numérica de la conexión empernada con perfil UV mediante el método de elementos finitos reproduce adecuadamente el desplazamiento observado en el ensayo, en cada nivel de fuerza aplicado.
- Hipótesis nula (H_0): La simulación numérica de la conexión empernada con perfil UV mediante el método de elementos finitos no reproduce adecuadamente el comportamiento mecánico observado experimentalmente, en términos de la relación fuerza-desplazamiento.

Variables

- Variable independiente (x): Desplazamiento, en milímetros (mm).
- Variable dependiente (y): Fuerza, en kilonewtons (kN).

Diagrama de flujo de la metodología empleado



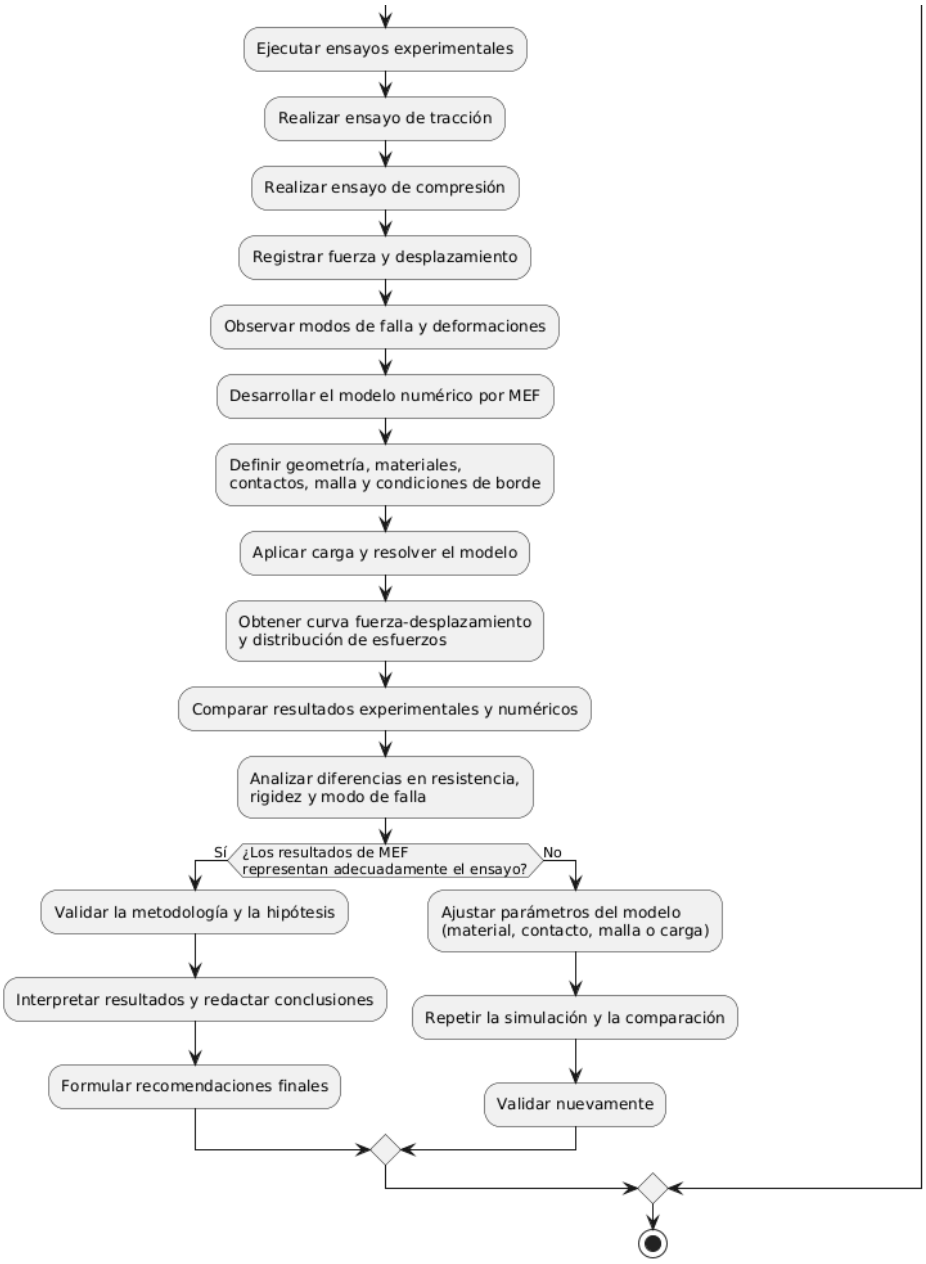


Fig. 28. Diagrama de flujo de la metodología a utilizar

CAPÍTULO III

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis y discusión de los resultados

En este apartado se propone presentar los resultados de los ensayos realizados de tracción y compresión, tomando en cuenta un prediseño con el propósito de determinar la resistencia mínima del material, así como también la selección del tipo de perno y la cantidad necesaria que ayude a satisfacer la demanda de resistencia. Todo esto se realizó en base a la especificación para la construcción de acero estructural (AISC 360-22) calculando resistencias nominales a tracción del perfil UV y de la placa de conexión, cálculo de posibles fallas de bloque a cortante de la placa y del perfil UV, pandeo elástico e inelástico de la placa, aplastamiento de los orificios y resistencia a la tracción y corte de los pernos. Se ha descubierto que, aun cuando los factores geométricos y composición química de los materiales conformados en frío sean análogos, las propiedades mecánicas son diferentes en comparación en su distribución de tensiones en función de la carga aplicada.

Además, Cabe recalcar que los materiales ensayados poseen su correspondiente certificado de autenticidad y originalidad, las mismas que se encuentran detallados en el Anexo 1 para el espesor de 8 mm y de 6 mm.

Diseño del espécimen

Es importante mencionar que el estudio experimental tiene como propósito determinar modos de fallo como desgarro en pernos, rotura de placas y en perfiles UV. Podemos incluir factores clave como la deformación plástica equivalente y la relación entre la tracción media o hidrostática y la tracción efectiva o de Von Mises (triaxialidad del esfuerzo) **[37]**.

Evaluación experimental a compresión de la conexión empernada de prueba

Siguiendo la especificación para la construcción de acero estructural (AISC 360-22) se calculó las resistencias nominales a tracción del perfil UV y de la placa de conexión tomando en cuenta dimensiones de la máquina a ensayar las cuales se detallan en la TABLA IV y Anexo 2.

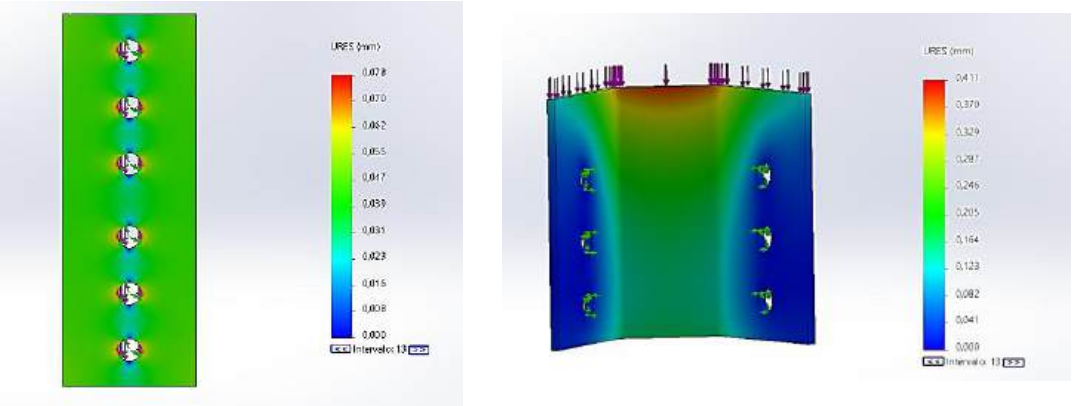
TABLA IV

RESUMEN DE CÁLCULOS A COMPRESIÓN

PREDISEÑO COMPRESIÓN		
COMPONENTE	**Resistencia a la compresión [LRFD $\emptyset_c P_n$]**	**Aplastamiento en orificios de perno 1 y 2 [LRFD $\emptyset_c P_n$]**
Placa 300 X 106 X 8 mm	270.674 kN	197.962 kN
Perfil 110 X 80 X 6 mm	573.137 kN	151.092 kN

En la conexión empernada se puede observar que varios tipos de elementos están trabajando a compresión, para el cálculo de la resistencia nominal a compresión mediante LRFD para la placa se tomó en cuenta la longitud crítica del elemento, así como también el factor de longitud efectiva y su longitud efectiva, permitiéndonos el cálculo de la resistencia a compresión teniendo en cuenta que la relación de esbeltez fue menor o igual que 25 como se estipula en el Capítulo J sección 4 de la AISC 360 **[6].**

Mediante el uso de elementos finitos se logró determinar los desplazamientos de la placa (Fig. 29(a)). De igual modo para la resistencia a compresión del perfil UV se tomó datos como sus radios de giro y longitud efectiva el cual denotó una resistencia muy superior a la de las placas, la (Fig. 29(b)) nos muestra el modelado MEF de la reacción del perfil UV sometido a cargas de compresión



a) Resultados de desplazamientos a compresión de la placa 300 X 106 X 8 mm.

b) Resultados de desplazamientos a compresión del perfil 110 X 80 X 6 mm.

Fig. 29. Distribución de tensiones a compresión en la placa de conexión y perfil UV

Análisis de pernos estructurales

La especificación AISC en el capítulo J sección 7 menciona sobre la resistencia a la tracción y corte en pernos y piezas roscadas.

Una unión atornillada combina enfoques de pretensión o ajuste y fricción, es decir al ser una unión sujetada con una carga debe tener una alta fricción entre placa perfil y tuerca para poder evitar que estos se aflojen de manera accidental. Lo cual es necesario que esta fricción sea superada con la carga de ajuste o pretensando de los pernos.

Desde la perspectiva más general la influencia de un coeficiente de fricción en un perno debe tomarse muy en cuenta en aplicaciones mecánicas, en las uniones M10 de perno y tuerca con un coeficiente de fricción de 0.1 se puede perder el aproximado de un 85% de torque de apriete debido a la fricción generada entre la cabeza, la rosca y la tuerca, lo cual esta energía de fricción es un factor clave para mantener sujeta esta unión en contra de un aflojamiento **[38]**.

Para ello se procede a seleccionar el perno A325 del grupo 120 tomando en cuenta que el perno tiene una pretensión de 91 kN y su esfuerzo nominal es de 370 MPa (Fig. 30(a)) ya que las roscas son excluidas del plano de corte, datos obtenidos de la tabla J3.1 y J3.2M

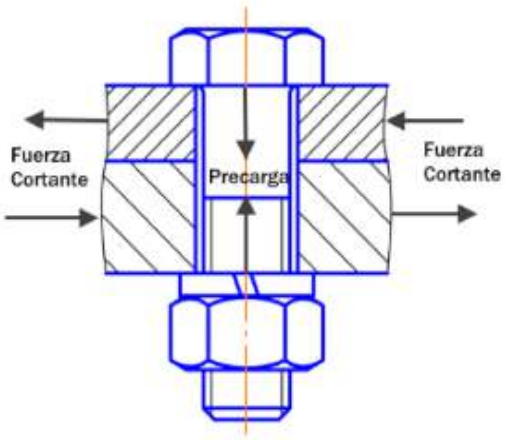
(Anexo 2). Los resultados tanto para la resistencia a la tracción y para el deslizamiento crítico se presentan en la TABLA V.

TABLE J3.2
Nominal Stress of Fasteners and Threaded Parts, ksi (MPa)

Description of Fasteners	Nominal Tensile Stress, F_{nt}, ksi (MPa)[a][b]	Nominal Shear Stress in Bearing-Type Connections, F_{nv}, ksi (MPa)[c]	
		Threads Not Excluded from Shear Planes—(N)[e]	Threads Excluded from Shear Planes—(X)
A307 bolts	45 (310)	27 (190)[d]	27 (190)[d]
Group 120 (e.g., A325)	90 (620)	54 (370)	68 (470)
Group 144 (e.g., F3148)	108 (750)	65 (450)	81 (560)
Group 150 (e.g., A490)	113 (780)	68 (470)	84 (580)
Group 200 (e.g., F3043)	150 (1 000)	90 (620)[f]	113 (780)[f]
Threaded parts meeting the requirements of Section A3.4	$0.75F_u$	$0.450F_u$	$0.563F_u$

[a] For high-strength bolts subjected to tensile fatigue loading, see Appendix 3.
[b] For nominal tensile strength it is permitted to use the tensile stress area of the threaded rod or bolt multiplied by the specified minimum tensile stress of the rod or bolt material, in lieu of the tabulated values based on a nominal tensile stress area of 0.75 times the gross area. The tensile stress area shall be calculated in accordance with the applicable ASTM standard.
[c] For end-loaded connections with a fastener pattern length greater than 38 in. (950 mm), F_{nv} shall be reduced to 83.3% of the tabulated values. Fastener pattern length is the maximum distance parallel to the line of force between the centerline of the bolts connecting two parts with one faying surface.
[d] For ASTM A307 bolts, the tabulated values shall be reduced by 1% for each 1/16 in. (2 mm) over five diameters of length in the grip.
[e] Threads assumed and permitted in shear planes in all cases.
[f] The transition area of Group 200 bolts is considered part of the threaded section.

a) Tabla de tracción nominal cortante [6]



b) Fuerzas y cargas actuantes sobre el perno A325

Fig. 30. Análisis de resistencia y selección del tipo de pernos

Mediante la (Fig. 30(b)), se puede denotar las cargas a la cual estará sometido el perno, denotando los efectos de la pretensión y la fuerza a cortante actuando sobre el área transversal del perno tomando en cuenta la holgura de los agujeros donde irá el perno.

TABLA V
RESUMEN DE CÁLCULOS DE RESISTENCIA PARA LOS PERNOS

COMPONENTE	**Resistencia a la tracción y corte [LRFD $\emptyset R_n$]**	**Resistencia al deslizamiento crítico [LRFD $\emptyset R_n$]**
Perno 5/8 in A325	41.295 kN	18.153 kN

Evaluación experimental a tracción de la conexión empernada de prueba

Tomando en cuenta la sección 4 del capítulo J de la especificación AISC 360 se identifica cada uno de los miembros afectados a tracción y se procede a realizar el cálculo de la resistencia a tracción y fractura (Anexo 2).

Se debe escoger el valor menor por ser una conexión a tracción, los resultados se plantean en la TABLA VI denotando que la resistencia del perfil UV es superior al de la placa **[6]**.

TABLA VI

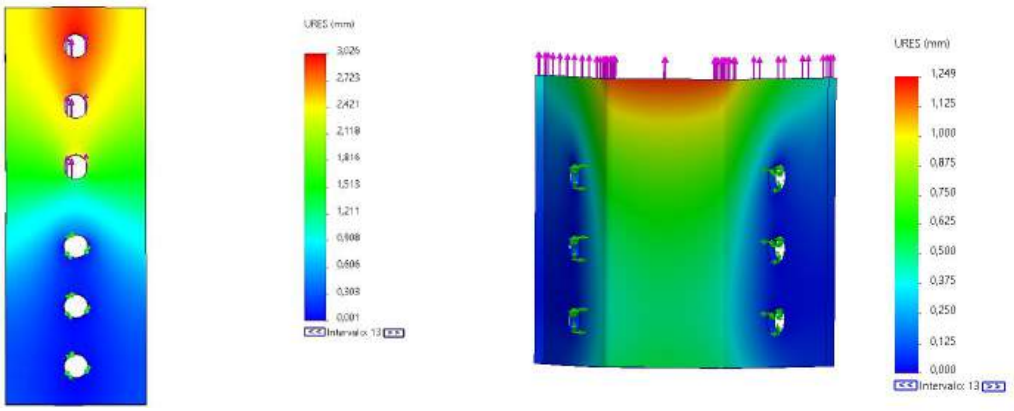
RESUMEN DE RESULTADOS DE LA PROBETA DE PRUEBA A TRACCIÓN

PREDISEÑO A TRACCIÓN				
COMPONENTE	**Resistencia a tracción [LRFD $\emptyset R_n$]**	**Fluencia al corte [LRFD $\emptyset R_n$]**	**Rotura por cizallamiento [LRFD $\emptyset R_n$]**	**Resistencia al corte en bloque [LRFD $\emptyset R_n$]**
Placa 300 X 106 X 8 mm	250.207 kN	197.783 kN	116.002 kN	237.005 kN
Perfil 110 X 80 X 6 mm	308.644 kN	146.368 kN	85.232 kN	353.985 kN

Cabe recalcar que para el diseño de las placas y perfiles se tomó en cuenta que la fuerza se va a transmitir de manera directa por medio de los tornillos siendo el área neta especifica igual al área neta del elemento a analizar.

Seguido de esta definición se debe considerar que el área neta no debe superar el 85 % del área del elemento, esto se debe a que las longitudes de los elementos de conexión son bastante pequeñas en relación a la longitud de los elementos conectados, es decir las deformaciones inelásticas de las secciones totales son ilimitadas **[40]**.

Con el fin de analizar los desplazamientos del perfil y la placa a tracción se realizó un modelado con elementos finitos que se puede observar en la (Fig. 31(a)) tomando en cuenta la carga máxima que resiste los elementos según los cálculos del prediseño (Fig. 31(b)).



a) Resultados de desplazamientos a tracción de la placa 300 X 106 X 8 mm

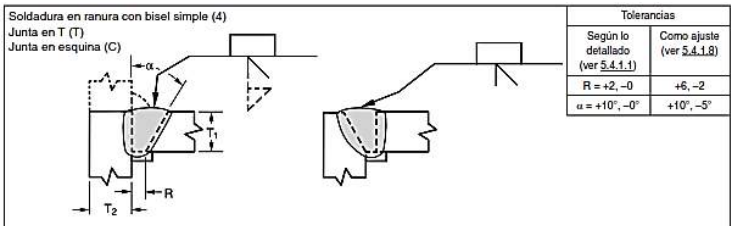
b) Resultados de desplazamientos a tracción del perfil 110 X 80 X 6 mm

Fig. 31. Distribución de tensiones a tracción en la placa de conexión y perfil UV

Evaluación de resistencia de soldadura de conexión en T

Mediante la sección 2 del capítulo J y el código AWS D1.1 se logró obtener los valores de la resistencia a fluencia de la sección total del perfil y con ello diseñar la soldadura obteniendo un valor de resistencia nominal de soldadura transversal de 418.727 kN con un tamaño de soldadura de 6 mm que irá entre la placa base a lo largo del perfil de 110X80X6 mm, en la selección de consumibles se tomó en cuenta las resistencia de los materiales, en este caso se seleccionó un electro E7018 el cual cumple con la resistencia de las placas (Anexo 2).

Según el AWS D1.1 se seleccionó una junta precalificada de penetración completa (CJP), el cual según la tabla 4.3 de esfuerzos admisibles una soldadura en ranura con CJP tiene un esfuerzo admisible igual que el metal base, en comparación con las soldaduras de ranura PJP que solamente trabajan a un 30 % de la resistencia del material de aporte. En consideración a ese enunciado se seleccionó una junta precalificada con placa de respaldo y proceso de soldadura SMAW (Fig. 32).



Soldadura en ranura con bisel simple (4) Junta en T (T) Junta en esquina (C)				Tolerancias				
				Según lo detallado (ver 5.4.1.1)	Como ajuste (ver 5.4.1.8)			
				R = +2, −0	+6, −2			
				α = +10°, −0°	+10°, −5°			

Proceso de soldadura	Designación de junta	Espesor del metal base (U - ilimitado)		Preparación de la ranura		Posiciones de soldadura permitidas	Gas de protección para FCAW	Notas
		T_1	T_2	Abertura de la raíz	Ángulo de la ranura			
SMAW	TC-U4a	U	U	R = 6	α = 45°	Todo	—	e, g, k, o
				R = 10	α = 30°	F, V, OH	—	e, g, k, o
GMAW FCAW	TC-U4a-GF	U	U	R = 5	α = 30°	Todo	Se requiere	a, g, k, o
				R = 10	α = 30°	F	No se req.	a, g, k, o
				R = 6	α = 45°	Todo	No se req.	a, g, k, o
SAW	TC-U4a-S	U	U	R = 10	α = 30°	F	—	g, k, o
				R = 6	α = 45°			

Fig. 32. Detalle de la junta soldada con soldadura en ranura con CJP precalificada con proceso SMAW **[39]**

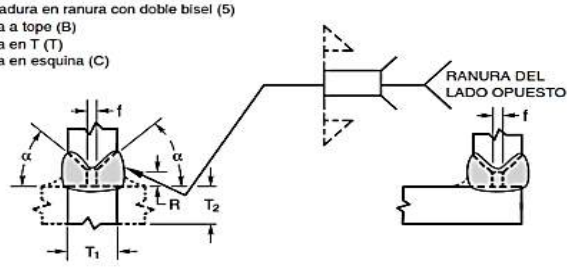
Evaluación experimental a tracción de la conexión empernada

Con el propósito de determinar la resistencia mínima a tracción se procede a realizar los cálculos correspondientes tanto para el perfil y la placa como se muestra en la TABLA VII. Tomando en cuenta que el diseño de la placa no debe tener excentricidad para que el esfuerzo pueda transmitirse uniformemente sobre la sección neta del miembro. Si fuese el caso de que las conexiones tengan excentricidad se producirá momentos ocasionando esfuerzos adicionales en el grupo de conexiones. En el diseño se considera que los ejes centroidales de los miembros conectados coinciden con la línea de acción de la fuerza. Según el capítulo J sección 4 de la especificación AISC 360 nos menciona que la distancia ente centros deberá ser igual a 3 veces el diámetro del elemento a conectar, teniendo en cuenta que la distancia libre entre los agujeros de los pernos no debe ser menor que el diámetro **[6]**.

En la (Fig. 33(b)) en el apartado de los resultados de deformación se puede observar que para realizar el ensayo de tracción fue necesario la implementación de dos placas de 15 mm para poder sujetar los perfiles en UV. El diseño de estas placas fue mediante elementos finitos y cálculos de resistencia a tracción longitudinal de la soldadura, el diseño de la placa se basa en traccionar al perfil tomando en cuenta su centro de gravedad, el cual impide que el perfil ni se traslade para adelante o atrás al momento de realizar el ensayo. Mediante el código de soldadura para aceros AWS D1.1 se seleccionó un tipo de junta

precalificada CJP (Fig. 33(a)), teniendo en cuenta que esta vez tendrá un pase de raíz con electrodo E6011 y los demás pases se los realizará con electrodo E7018 denotando que la resistencia de la soldadura deberá ser superior a la resistencia tanto de los pernos, placas y el perfil.

Soldadura en ranura con doble bisel (5)
Junta a tope (B)
Junta en T (T)
Junta en esquina (C)

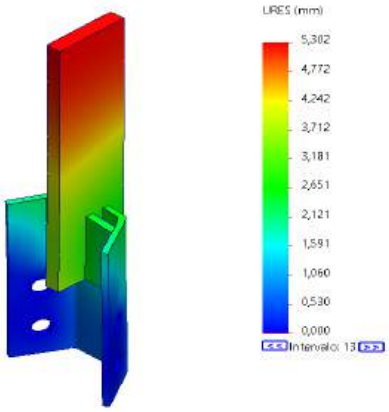


	Tolerancias	
	Según lo detallado (ver 5.4.1.1)	Como ajuste (ver 5.4.1.8)
	R = ±0	+1/4, −0
	f = +1/16, −0	±1/16
	α = +10°, −0°	+10°, −5°
Separador	+1/16, −0	+1/8, −0

Proceso de soldadura	Designación de junta	Espesor del metal base (U = ilimitado) T_1	T_2	Preparación de la ranura: Abertura de la raíz	Cara de la raíz	Ángulo de la ranura	Posiciones de soldadura permitidas	Gas de protección para FCAW	Notas
SMAW	B-U5b	U Separador = 1/8 × R	—	R = 1/4	f = 0 a 1/8	α = 45°	Todo	—	c, d, e, h, j
	TC-U5a	U Separador = 1/4 × R	U	R = 1/4	f = 0 a 1/8	α = 45°	Todo	—	d, e, g, h, j, k
				R = 3/8	f = 0 a 1/8	α = 30°	F, OH	—	d, e, g, h, j, k

Figura 5.1 (continuación)—Detalles de la junta soldada con soldadura en ranura con CJP precalificada (ver 5.4.1) (Dimensiones en pulgadas)

a) Detalle de la junta soldada con soldadura en ranura precalificada con proceso de soldadura SMAW **[39]**.



b) Modelo de elementos finitos con los desplazamientos del perfil.

Fig. 33.Selección y diseño de la junta soldada

TABLA VII

RESUMEN DE RESULTADOS PARA LAS PROBETAS A TRACCIÓN

DISEÑO A TRACCIÓN				
COMPONENTE	**Resistencia a tracción [LRFD $\emptyset R_n$]**	**Fluencia al corte [LRFD $\emptyset R_n$]**	**Rotura por cizallamiento [LRFD $\emptyset R_n$]**	**Resistencia al corte en bloque [LRFD $\emptyset R_n$]**
Placa 216 X 55 X 8 mm	96.802 kN	123.32 kN	74.134 kN	149.425 kN
Perfil 60 X 60 X 6 mm	161.099 kN	92.49 kN	55.692 kN	183.985 kN

Evaluación experimental a compresión de la conexión empernada

Teniendo en cuenta la relación de esbeltez, radios de giro y momentos de inercia de cada uno de los miembros a compresión, se evaluó los elementos como se muestra en la TABLA VIII. Los cálculos se realizaron en base a que la carga se la va a aplicar de manera axial o concéntrica obviando excentricidades, para el cálculo de la placa de conexión se tomó en cuenta su longitud efectiva es decir la distancia entre centros de los agujeros céntricos tratando en lo máximo posible de que el material no tenga defectos ni imperfecciones al momento de su fabricación (Anexo 3).

TABLA VIII

RESUMEN DE CÁLCULOS A COMPRESIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA

DISEÑO A COMPRESIÓN		
COMPONENTE	**Resistencia a la compresión [LRFD $\emptyset_c P_n$]**	**Aplastamiento en orificios de perno 1 y 2 [LRFD $\emptyset_c P_n$]**
Placa 216 X 55 X 8 mm	136.64 kN	197.962 kN
Perfil 60 X 60 X 6 mm	318.585 kN	151.092 kN

Aplicación de pretensión de los pernos

Como se especifica en la tabla J3.2M en la sección de diseño de conexiones de la AISC 360-22 (Fig. 34(b)), la aplicación de pretensado o un ajuste controlado en los pernos A325

se lo realiza con el propósito de que al instante de tensionar el perfil y la placa exista un rozamiento entre los elementos, impidiendo un cortante puro del perno. Con la ayuda de un torquímetro se pudo dar la carga necesaria de ajuste del perno (Fig. 34(a)).



a) Ajuste de Pernos con Torquímetro

TABLE J3.1
Minimum Bolt Pretension, kips

Bolt Size, in.	Group 120[a]	Group 144[b] and Group 150[b]	Group 200, Grade 2[c]
½	12	15	–
⅝	19	24	–
¾	28	35	–
⅞	39	49	–
1	51	64	90
1⅛	64	80	113
1¼	81	102	143
1⅜	97	121	–
1½	116	148	–

[a]Equal to 0.70 times the minimum tensile strength of bolts as specified in ASTM F3125/F3125M for Grade A325 rounded off to nearest kip.
[b]Equal to 0.70 times the minimum tensile strength of bolts as specified in ASTM F3125/F3125M for Grade A490 rounded off to nearest kip. Group 144 (F3148) assemblies have the same specified minimum pretension as Group 150.
[c]Equal to 0.70 times the minimum tensile strength of bolts as specified in ASTM F3043 and F3111 for Grade 2, rounded off to the nearest kip.

b) Tabla de pretensión para pernos de 5/8 in

Fig. 34. Valores de calibración de pretensión para los pernos

Geometría del espécimen

Se utilizaron muestras de perfiles en UV conformados en frío, unidos con placas empernadas, cada muestra consta de dos perfiles en UV y dos placas ubicadas en las alas del perfil. Se utilizaron pernos ASTM A325 Galvanizado al Caliente con Rosca Gruesa de 5/8 in por 2 in de largo. Los espesores del perfil fue de 6 mm anteriormente analizado su resistencia y dureza, se utilizó placas de 8 mm que conecten las alas de los perfiles (Anexo 2), para la fabricación de las probetas se tomó en cuenta varios aspectos como el lugar y dimensiones de la máquina para realizar los ensayos.

Las muestras para los ensayos de prueba fueron de dimensiones 110x80x110x6mm para el perfil en UV (Fig. 35(a)), las dimensiones de la placa fueron de 300x106x8mm con 6 pernos por placa, es decir 3 pernos por ala en el perfil. Para los ensayos de tracción fue necesario realizar otro tipo de tratamiento el cual se basa en soldar una T invertida en los perfiles (Fig. 35(b)). La placa base tiene dimensiones de 222x145x10 mm y el parante de 145x110x10 mm, para ello se tomó en cuenta las pasadas de soldadura, resistencia del material y resistencia del electrodo (Anexo 2).



a) Conformado en Frío de Perfiles



b) Proceso de soldadura SMAW para el perfil UV y placa base

Fig. 35.Preparación de los especímenes de prueba

Finalmente con base a un prediseño se procede a realizar las muestras necesarias que dictan la norma RCSC 2020 y AISC 360, para ello fue necesario cambiar tanto las dimensiones del perfil en UV como las de la placa de conexión (Anexo 3), resultando las dimensiones de 60x60x60x6mm para el perfil UV y 216x55x8mm con 4 pernos para la placa, a su vez para este caso en el ensayo de tracción fue necesario realizar otro tipo de conexión soldada siendo necesario placas de 270x75x15mm y placas de 70x30.7x8mm posterior al soldado de cada una de ellas con una junta precalificada (Fig. 36).



Fig. 36. Soldadura de placas y soportes necesarios para realizar el respectivo ensayo

Manufactura de los especímenes

En un inicio los especímenes de prueba fueron realizados de manera manual, es decir cada uno de los elementos para cada probeta fue diseñada mediante de manera manual mediante taladros y sierras de metal. El proceso de soldadura se lo realizó de manera muy cuidadosa con el propósito de que cumpla con la resistencia calculada y requerida. Para los especímenes finales se cambió de proceso de fabricación de la probeta, para el corte de los elementos de cada probeta se utilizó corte láser con el propósito de que las dimensiones de la probeta sean exactas y con ello lo resultados experimentales sean los correctos.

En el proceso de ensamblaje se tomó en cuenta varios aspectos como:

- Esfuerzos residuales en el cortado y agujerado de placas
- Tipos de electrodo al momento de soldar
- Esfuerzos residuales en el doblado del perfil
- Defectos y discontinuidades de soldadura

Configuración del ensayo y patrón de carga

En estos ensayos se prestó especial atención al comportamiento de rotura tanto de las placas de unión como en los perfiles para determinar la resistencia máxima de la conexión. El proceso de carga para los ensayos se detendrá cuando suceda alguno de estos fenómenos:

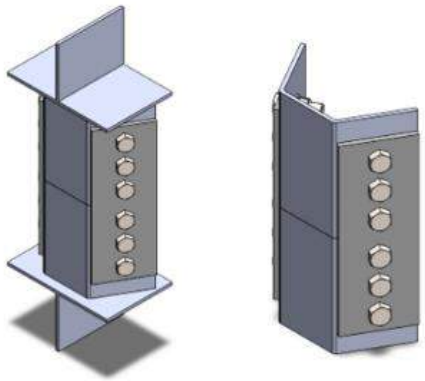
1. El espécimen esté visiblemente dañado y no pueda seguir cargándose
2. Las fuerzas de reacción en los puntos de carga disminuyan por debajo del 85 % de su carga máxima **[39]**.

La carga de tracción sobre la conexión fue constante, el cual la T soldada fue instalado sobre un soporte tipo mordaza tanto en la parte superior como en la parte inferior, la parte superior estuvo conectado a un gato hidráulico que aplicaba la carga a una velocidad de 1 mm/min. La carga de compresión axial fue aplicada en las bases de los dos perfiles en UV, su carga al igual que la de tracción fue de manera cíclica con una velocidad de 1 mm/min.

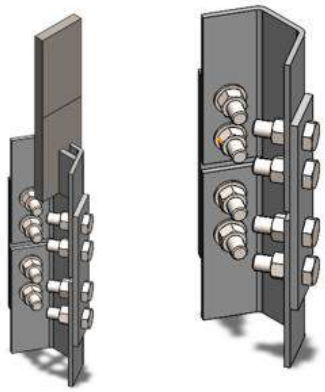
Resultados experimentales

Teniendo en consideración la resistencia mecánica en función de la sección transversal del material se empleó ensayos de tracción y compresión como se presentan en las TABLA IX y TABLA X.

Los ensayos se realizaron con una capacidad de 600 kN y 2000 kN con el propósito de evaluar y analizar la diferencia en resistencia, ductilidad y tenacidad de la conexión empernada, las muestras a ensayar se observan en la (Fig. 37(a)) denotando un leve cambio en su diseño (Fig. 37(b)).



a) Muestras de prueba para ensayos para tracción y compresión



b) Muestra para ensayos de tracción y compresión

Fig. 37. Representación de muestras tanto a tracción y a compresión.

Mediante los ensayos a tracción se pudo estipular que el miembro más afectado en este caso será la placa de conexión, al principio se denota que los miembros cargados a tracción como son la placa y perfil se estiran alrededor de su longitud efectiva producto de la fuerza de tracción, siendo las más afectada la placa, ya que esta se alarga considerablemente y se fractura de manera transversal producto del endurecimiento por su deformación lo que le estaría restando utilidad en la vida real causando una falla en el sistema estructura de una torre de telecomunicaciones. Podemos acotar que, una vez realizado el ensayo a tracción, verificamos mediante una cámara termográfica el estado de la temperatura de la conexión empernada el cual se pudo denotar varios aspectos

fundamentales justamente en el área donde ocurrió la rotura del perfil como se muestra en la (Fig. 38).

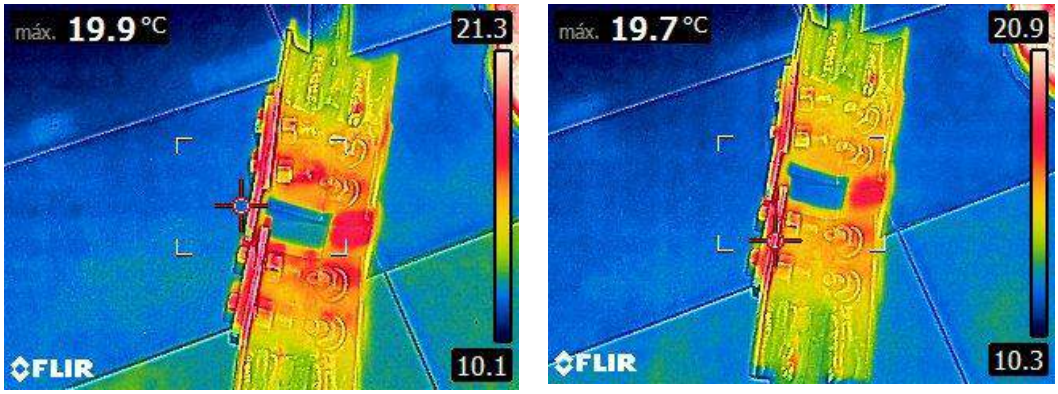


Fig. 38. Ilustración de los efectos térmicos ocurridos en la fractura de la conexión

Como solución a este tipo de problemática se puede implementar dos placas por ala, es decir aumentar la resistencia para las dos alas y verificar la resistencia de los pernos, así como también la verificación de las resistencias los perfiles y placas, ya que de esa forma estaríamos aumentando drásticamente la resistencia por ala del perfil UV (Fig. 39).



Fig. 39. Esquema de doble placa por ala

Ensayo a compresión de la conexión empernada de prueba

Se realizó un ensayo a compresión y tracción de prueba con el propósito de determinar dimensiones de la máquina, así como también determinar el grado de deformación de la conexión complementando con cálculos y simulaciones correspondientes.

TABLA IX

RESULTADO A COMPRESIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA DE PRUEBA

<table>
<tr><td colspan="5">UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECANICA
INGENIERÍA MECÁNICA</td></tr>
<tr><td colspan="5">ENSAYO DE COMPRESIÓN</td></tr>
<tr><td colspan="5">Datos informativos:</td></tr>
<tr><td>Probeta:</td><td>PC1-3P</td><td>Fecha</td><td colspan="2">18/10/2025</td></tr>
<tr><td>Material:</td><td>ASTM A572 Gr.50</td><td>Espesor perfil UV:</td><td colspan="2">6 mm</td></tr>
<tr><td>Pernos:</td><td>A325</td><td>Espesor placa:</td><td colspan="2">8 mm</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Características del ensayo</td><td>Sección Transversal</td><td colspan="3">Velocidad de aplicación</td></tr>
<tr><td>1701 mm^2</td><td colspan="3">1 mm/min</td></tr>
<tr><td>Longitud de Calibración</td><td colspan="3">Tiempo de ejecución</td></tr>
<tr><td>78.4 mm</td><td colspan="3">15 min</td></tr>
<tr><td>Norma aplicable</td><td>AISC 360-22</td><td>Laboratorio</td><td colspan="2">LenMaV Laboratorio Ensayo de Materiales</td></tr>
<tr><td>Instrumento de medida</td><td>Máquina Universal de Ensayos-WAW600B</td><td>Capacidad</td><td colspan="2">600 kN</td></tr>
<tr><td>Revisado por:</td><td>Ing. Francisco Peña</td><td>Realizado por:</td><td colspan="2">A. Salazar
M. Chico</td></tr>
<tr><td colspan="5">RESULTADOS DEL ENSAYO:</td></tr>
<tr><td>Carga Máxima [kN]</td><td>248.94</td><td colspan="3">Fotografía de la probeta</td></tr>
<tr><td>Deformación máxima [mm]</td><td>5.233</td><td colspan="3" rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>Esfuerzo [MPa]</td><td>146.35</td></tr>
</table>

Área efectiva [mm^2]	918.258		

Discusión de resultados de la muestra PC1-3P

En la curva esfuerzo deformación proporcionada en el ensayo se pudo denotar que tiene un tramo recto seguido de una línea pronunciada que va en función del esfuerzo y la deformación, lo que evidencia un gobierno elástico (ley de Hooke). En esta fase se podrá determinar que el material y la junta se deforman de manera reversible y su rigidez de la sección permanecerá constante.

Acorde a la ficha técnica, la sección de 1701 mm^2 sometida a compresión resiste una carga máxima de 248.94 kN con un esfuerzo máximo de 146.35 MPa deformándose 5.233 mm en el eje que se aplica la carga. Estos datos nos resumen que dentro de esta categoría la conexión empernada no llega a la fluencia típica de un acero de alta resistencia, la curva no muestra un pico o una caída de material por el cual no se produjo una falla frágil sino una pérdida de rigidez relacionada con deformaciones incrementales.

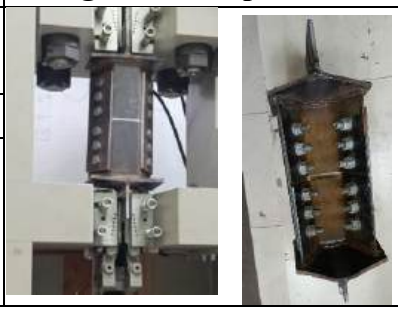
La junta ensayada presenta un rango elástico estable, una rigidez suficiente en el rango de servicio y a su vez es adecuada para una torre de telecomunicaciones en donde las cargas son de flexión y compresión el cual ayude a construir una base sólida para la comparación y rediseño de las demás muestras a ensayar.

Ensayo a tracción de la conexión empernada de prueba

Para la verificación de la resistencia al corte y fractura tanto del perfil como de la placa fue necesario la implementación de una conexión soldada el cual ayude a traccionar el perfil, siendo necesario cálculos de soldadura para que pueda resistir la carga aplicada (Anexo 2).

El ensayo propuesto tuvo el propósito de determina la elongación de la placa y perfil el cual los datos finales del ensayo se los determina en la siguiente (TABLA X).

TABLA X
ENSAYO A TRACCIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA DE PRUEBA

<table>
<tr><td colspan="4">UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECANICA
INGENIERÍA MECÁNICA</td></tr>
<tr><td colspan="4">ENSAYO DE TRACCIÓN</td></tr>
<tr><td colspan="4">Datos informativos:</td></tr>
<tr><td>Probeta:</td><td>PT2-3P</td><td>Fecha</td><td>24/10/2025</td></tr>
<tr><td>Material:</td><td>ASTM A572 Gr.50</td><td>Espesor perfil UV:</td><td>6 mm</td></tr>
<tr><td>Pernos:</td><td>A325 de 5/8 in x 2 in</td><td>Espesor placa:</td><td>8 mm</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Características del ensayo</td><td>Sección Transversal</td><td colspan="2">Velocidad de aplicación</td></tr>
<tr><td>1701 mm^2</td><td colspan="2">1 mm/min</td></tr>
<tr><td>Longitud de Calibración</td><td colspan="2">Tiempo de ejecución</td></tr>
<tr><td></td><td>78.4 mm</td><td colspan="2">20 min</td></tr>
<tr><td>Norma aplicable</td><td>AISC 360-22</td><td>Laboratorio</td><td>Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica</td></tr>
<tr><td>Instrumento de medida</td><td>Máquina Universal de Ensayos-C0820/CZ</td><td>Capacidad</td><td>2000 kN</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Revisado por:</td><td rowspan="2">Ing. Francisco Peña</td><td rowspan="2">Realizado por:</td><td>A. Salazar</td></tr>
<tr><td>M. Chico</td></tr>
<tr><td colspan="4">RESULTADOS DEL ENSAYO:</td></tr>
<tr><td>Carga Máxima [kN]</td><td>325.8</td><td colspan="2">Fotografía de la probeta</td></tr>
<tr><td>Desplazamiento máximo [mm]</td><td>12.54 mm</td><td rowspan="3" colspan="2"></td></tr>
<tr><td>Esfuerzo [MPa]</td><td>191.55</td></tr>
<tr><td>Área efectiva [mm^2]</td><td>918.259</td></tr>
</table>

Discusión de resultados de la muestra PT2-3P

Los resultados de este ensayo proporcionan un desplazamiento en la placa soldada de conexión, mas no en el perfil UV o en la placa empernada de conexión, lo cual este ensayo ayudó a determinar la rigidez y resistencia de la conexión frente a las demás cargas aplicadas. La fase plástica del ensayo se identificó en la placa T de conexión ya que ocurrió un pandeo imprevisto generando grandes desplazamientos hasta llegar a la rotura del Parante vertical de la T (Fig. 40).



Fig. 40. Rotura de la placa de conexión del ensayo de tracción

3.2. Ensayos de tracción y compresión

Con base a los primeros ensayos de prueba se pudo realizar un rediseño con el propósito de determinar la zona plástica de los elementos sometidos tanto a tracción como a compresión. El diseño de estas probetas implicó la reducción del número de pernos en cada ala, así como también un rediseño en base al centro de gravedad en la probeta de tracción ya que fue necesario para poder acomodar la probeta en función de las mordazas de la máquina.

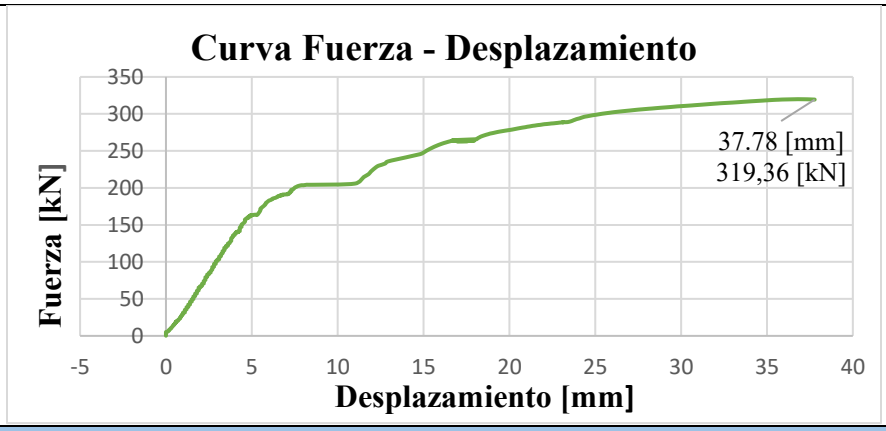
3.2.1. Ensayos a tracción de la conexión empernada

Los resultados de cada uno de los ensayos se mostrarán en cada una de las fichas técnicas que están desde la TABLA XI hasta la TABLA XIII.

TABLA XI

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO A TRACCIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA DE LA PROBETA 1

<table>
<tr><td colspan="5">UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECANICA
INGENIERÍA MECÁNICA</td></tr>
<tr><td colspan="5">ENSAYO DE TRACCIÓN</td></tr>
<tr><td colspan="5">Datos informativos:</td></tr>
<tr><td>Probeta:</td><td>P1-T</td><td>Fecha</td><td colspan="2">24/10/2025</td></tr>
<tr><td>Material:</td><td>ASTM A572 Gr.50</td><td>Espesor perfil UV:</td><td colspan="2">6 mm</td></tr>
<tr><td>Pernos:</td><td>A325</td><td>Espesor placa:</td><td colspan="2">8 mm</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Características del ensayo</td><td>Sección Transversal</td><td colspan="3">Velocidad de aplicación</td></tr>
<tr><td>1026.82 mm^2</td><td colspan="3">1 mm/min</td></tr>
<tr><td>Longitud de Calibración</td><td colspan="3">Tiempo de ejecución</td></tr>
<tr><td>35 mm</td><td colspan="3">20 min</td></tr>
<tr><td>Norma aplicable</td><td>AISC 360-22</td><td>Laboratorio</td><td colspan="2">Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica</td></tr>
<tr><td>Instrumento de medida</td><td>Máquina Universal de Ensayos-C0820/CZ</td><td>Capacidad</td><td colspan="2">2000 kN</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Revisado por:</td><td rowspan="2">Ing. Francisco Peña</td><td rowspan="2">Realizado por:</td><td>A. Salazar</td></tr>
<tr><td>M. Chico</td></tr>
<tr><td colspan="5">RESULTADOS:</td></tr>
</table>



DATOS DEL ENSAYO:		
Carga Máxima [kN]	319.3680	**Fotografía de la probeta**
Desplazamiento máximo [mm]	37.78 mm	
Esfuerzo [MPa]	311.026	
Área efectiva [mm²]	479.292	

RESULTADO DE DEFORMACIÓN





Discusión de resultados de la muestra P1-T

La curva fuerza-desplazamiento de la probeta P1-T, evidencia un comportamiento inicial dúctil hasta un límite máximo bajo la carga de tracción, la sección bruta del ensayo fue de 1026.82 mm^2 con una longitud de calibración de 35 mm y velocidad de aplicación de la carga en 1 mm/min soportando una carga máxima de 319.37 kN, un esfuerzo máximo de 311.03 MPa desplazándose 37.78 mm. En la zona inicial de la gráfica podemos observar un tramo lineal donde la fuerza va en proporción al desplazamiento, lo que indica que en

este rango se está cumpliendo la ley de Hooke. La rigidez axial está controlada por la elasticidad del perfil y las placas, los primeros milímetros de desplazamiento se asocian al acomodo de pernos, ajuste de superficies en contacto y a su vez cierre de holguras, como se puede observar en la curva, ya que la pendiente se mantiene constante mostrando un módulo de elasticidad coherente con el acero.

La pérdida de rigidez de la conexión sucede cuando la carga se aproxima a la máxima, apareciendo varias fallas localizadas en la placa de unión (Fig. 41) .Se puede observar una aparición de plastificación seguido de un endurecimiento por la deformación y rotura o corte en bloque de la placa (Fig. 42), también se puede observar que ocurrió una aparición de plastificación alrededor de los agujeros de los pernos (deformaciones por tracción), la conexión empernada según la curva detalla una respuesta altamente dúctil con capacidad de redistribuir esfuerzos antes de su rotura final, favoreciendo la transferencia gradual de carga a través del conjunto de pernos.



Fig. 41. Fallo de corte en bloque

Al comparar los resultados con la resistencia de diseño en LRFD calculados según la AISC 360-22 la fuerza máxima experimental y la fuerza calculada tienen el mismo orden de magnitud tanto indicando que los criterios normativos son coherentes. En los pernos se puede observar que no fallan de manera prematura ya sea por corte frágil o por deslizamiento crítico, es decir la unión se moviliza de forma conjunta entre las placas el

perfil y los pernos, tal como se pretende en una configuración para una torre de telecomunicaciones.

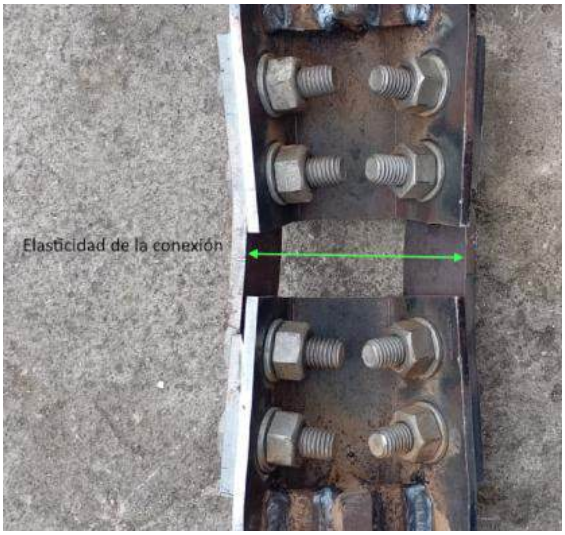


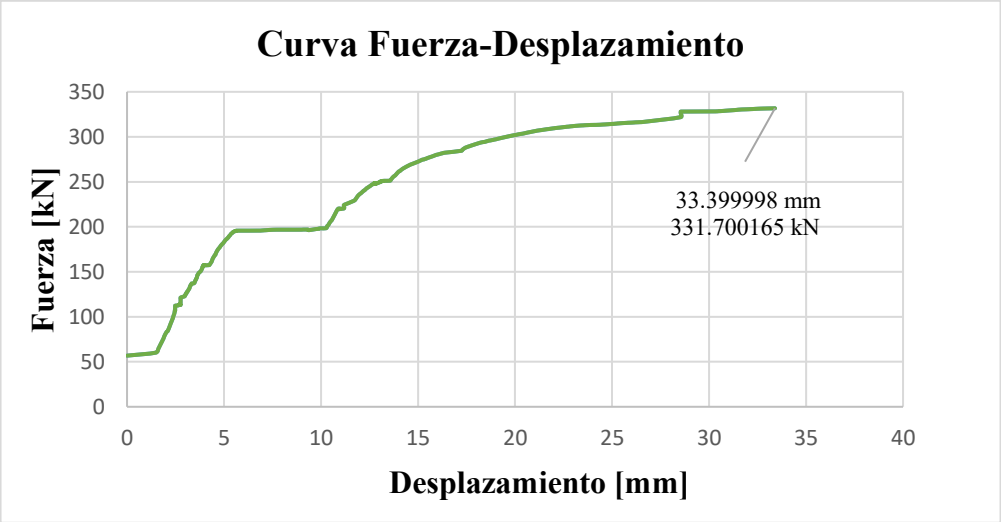
Fig. 42. Plasticidad de la conexión empernada

TABLA XII
FICHA TÉCNICA DE ENSAYO A TRACCIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA DE LA PROBETA 2

UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECANICA** **INGENIERÍA MECÁNICA**			
ENSAYO DE TRACCIÓN			
Datos informativos:			
Probeta:	P2-T	**Fecha**	24/10/2025
Material:	ASTM A572 Gr.50	**Espesor perfil UV:**	6 mm
Pernos:	A325	**Espesor placa:**	8 mm
Características del ensayo	**Sección Transversal**	**Velocidad de aplicación**	
	1026.82 mm^2	1 mm/min	
	Longitud de Calibración	**Tiempo de ejecución**	
	35 mm	20 min	
Norma aplicable	AISC 360-22	**Laboratorio**	Facultad de Ingeniería

			Civil y Mecánica
Instrumento de medida	Máquina Universal de Ensayos-C0820/CZ	**Capacidad**	2000 kN
Revisado por:	Ing. Francisco Peña	**Realizado por:**	A. Salazar
			M. Chico

RESULTADOS:



DATOS DEL ENSAYO:

Carga Máxima [kN]	331.70	**Fotografía de la probeta**
Desplazamiento máximo [mm]	33.399 mm	
Esfuerzo [MPa]	323.063	
Área efectiva [mm^2]	479.292	

RESULTADO DE DEFORMACIÓN



Discusión de resultados de la muestra P2-T

La curva de la probeta P2-T muestra un comportamiento bastante estable y dúctil bajo la carga de tracción, los registros de resistencia fueron de 331.70 kN con un desplazamiento máximo de 33.399 mm y un esfuerzo máximo de 323.06 MPa. En el tramo inicial de la curva se puede observar que hasta los 5 mm existe una zona lineal donde la fuerza será proporcional al desplazamiento, a su vez existe el incremento de la rigidez de la conexión en este caso las placas. Se identificaron varios tipos de efectos ocurridos como el cierre de holguras entre los pernos y agujeros (Fig. 43), reacomodación de las placas laterales y la alineación del perfil UV en dirección de la carga, en este intervalo la curva tiende a ser una pendiente constante denotando que la conexión empezó a trabajar en un régimen elástico estable, relacionándose con la ley de Hooke en ese tramo.

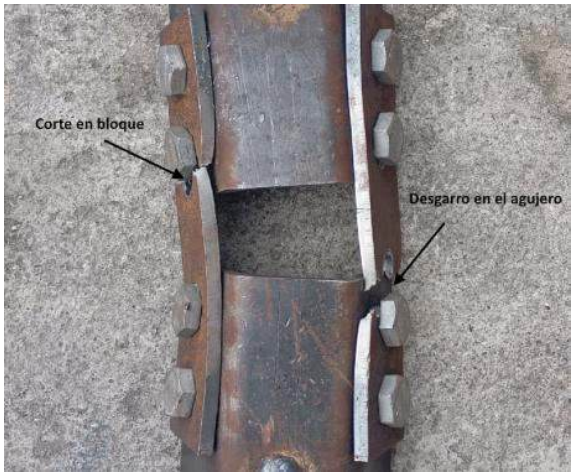


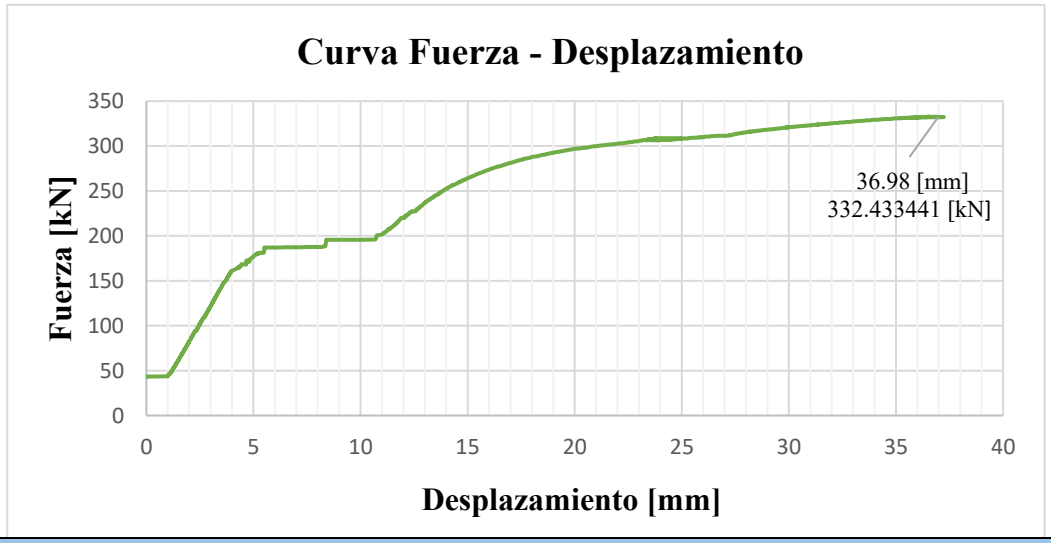
Fig. 43. Fallos en la probeta 2 a Tracción

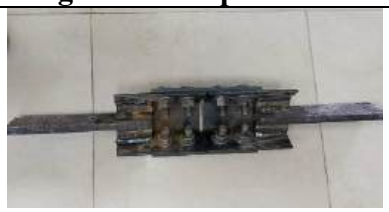
Cuando se acerca a su carga máxima se puede observar en la gráfica que su pendiente disminuye de manera progresiva lo cual es el indicador de una plastificación en su área neta de la placa. A diferencia de un material frágil la conexión sigue resistiendo cargas muy próximas a la máxima y su desplazamiento seguirá aumentando revelando una ductilidad de la conexión distribuyendo los esfuerzos por medio de las placas laterales. Los pernos limitan las concentraciones excesivas permitiendo que el comportamiento de la conexión empernada no dependa solamente de un perno o de una sola sección reducida.

TABLA XIII

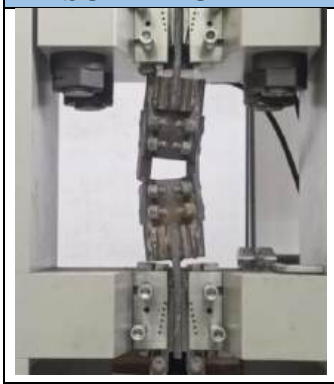
FICHA TÉCNICA DE ENSAYO A TRACCIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA DE LA PROBETA 3

<table>
<tr><td colspan="5">UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECANICA
INGENIERÍA MECÁNICA</td></tr>
<tr><td colspan="5">ENSAYO DE TRACCIÓN</td></tr>
<tr><td colspan="5">Datos informativos:</td></tr>
<tr><td>Probeta:</td><td>P3-T</td><td>Fecha</td><td colspan="2">24/10/2025</td></tr>
<tr><td>Material:</td><td>ASTM A572 Gr.50</td><td>Espesor perfil UV:</td><td colspan="2">6 mm</td></tr>
<tr><td>Pernos:</td><td>A325</td><td>Espesor placa:</td><td colspan="2">8 mm</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Características del ensayo</td><td>Sección Transversal</td><td colspan="3">Velocidad de aplicación</td></tr>
<tr><td>1026.82 mm^2</td><td colspan="3">1 mm/min</td></tr>
<tr><td>Longitud de Calibración</td><td colspan="3">Tiempo de ejecución</td></tr>
<tr><td></td><td>35 mm</td><td colspan="3">20 min</td></tr>
<tr><td>Norma aplicable</td><td>AISC 360-22</td><td>Laboratorio</td><td colspan="2">Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica</td></tr>
<tr><td>Instrumento de medida</td><td>Máquina Universal de Ensayos-C0820/CZ</td><td>Capacidad</td><td colspan="2">2000 kN</td></tr>
<tr><td>Revisado por:</td><td>Ing. Francisco Peña</td><td>Realizado por:</td><td colspan="2">A. Salazar
M. Chico</td></tr>
<tr><td colspan="5">RESULTADOS:</td></tr>
</table>



DATOS DEL ENSAYO:		
Carga Máxima [kN]	332.433	**Fotografía de la probeta**
Desplazamiento máximo [mm]	36.98 mm	
Esfuerzo [MPa]	323.75	
Área efectiva [mm^2]	479.292	

RESULTADO DE DEFORMACIÓN





Discusión de resultados de la muestra P3-T

La gráfica de fuerza desplazamiento para esta conexión registra un máximo de 332.46 kN en carga y desplazamiento de 36.98 mm el cual tiene un esfuerzo máximo de 323.75 MPa sobre su área efectiva. Al igual que los demás ensayos la gráfica al inicio presenta una tendencia lineal durante los 5 mm de desplazamiento en el rango elástico, siendo este

comportamiento el dominante en un 70-75 % de su carga máxima, después se observará que la pendiente disminuye lo cual es la transición a un régimen de manera inelástica.

La carga máxima presentada en la figura denota que existe una relación del 99.7% con las cargas calculadas mediante la AISC 360-22, la suma de las resistencias de la placa y perfil fueron de 333.4 kN y la carga máxima de resistencia fue de 332.43 kN denotando que la conexión ensayada depende del diseño de corte en bloque, en cambio la suma de resistencias de las placas fue de 257.9 kN y la carga fue de alrededor del 129 % de su resistencia, ocurriendo las fallas mostradas en los resultados del ensayo.

Relación fuerza-deformación de los ensayos a tracción

Se puede observar características importantes como son, la cantidad de deformación en función de su carga aplicada cumpliendo la ley de Hooke hasta su zona de elasticidad, la ley de Hooke detalla que la fuerza es la cantidad de deformación del elemento por una constante que depende de su forma composición y dirección de la fuerza, seguido de aquello, la conexión se fractura en las placas de unión al instante de aplicar la fuerza producto de su endurecimiento después de su deformación plástica. En la (Fig. 44) podemos observar que la región elástica está dentro de los valores de 194.15 kN a los 6.20 mm de desplazamiento, después se puede observar que entre los valores de 326.67 kN a los 35.99 mm ocurre la fractura de la conexión.

En la gráfica mencionada se puede observar que en las 3 probetas ocurre una deformación elástica, endurecimiento por deformación, su límite proporcional, un límite elástico, su resistencia a la tracción y posteriormente un punto de fractura con un porcentaje de elongación de las placas del 10.3 % desde su longitud de ensamble inicial.

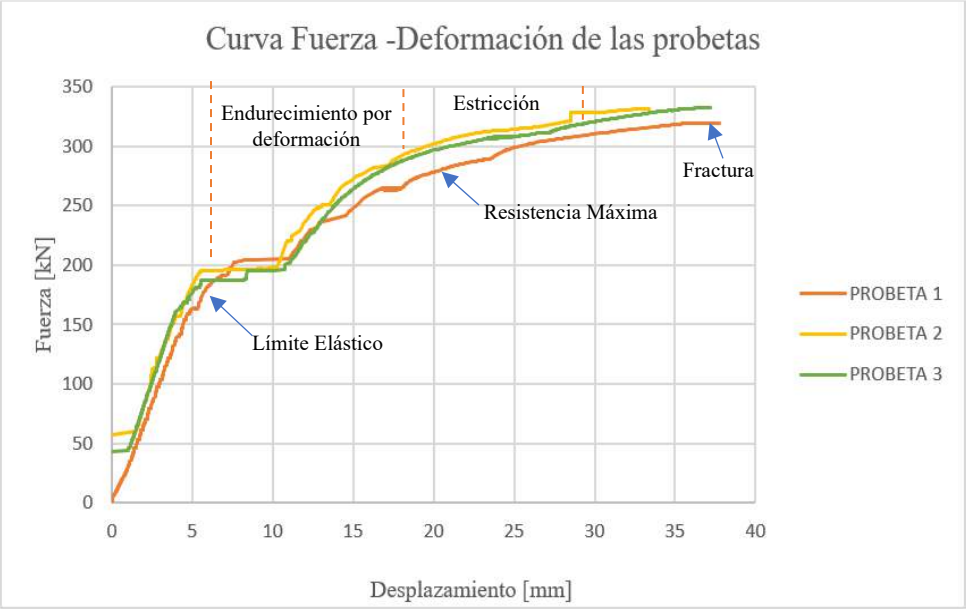


Fig. 44. Relación fuerza – Deformación de las muestras.

Los tres ensayos realizados denotan valores muy cercanos, la probeta P3-T alcanza una resistencia mayor que las demás, el decir la carga máxima de la tercera probeta fue de un 4.1 % mayor que la de P1-T y un 0.2 % mayor que la P2-T denotando una dispersión mínima entre las probetas. El rango total entre el máximo y mínimo de carga máxima de las probetas es un 4 %. En cuanto a los desplazamientos la P2-T y P3-T tiene el mismo desplazamiento, mientras que existe un 1.6 % de desfase menor en la probeta P1-T mostrando una deformación elevada y repetida. En conjunto el coeficiente de variación de la carga máxima de las tres probetas esta menor del 2 % y de los desplazamientos por debajo del 1 %.

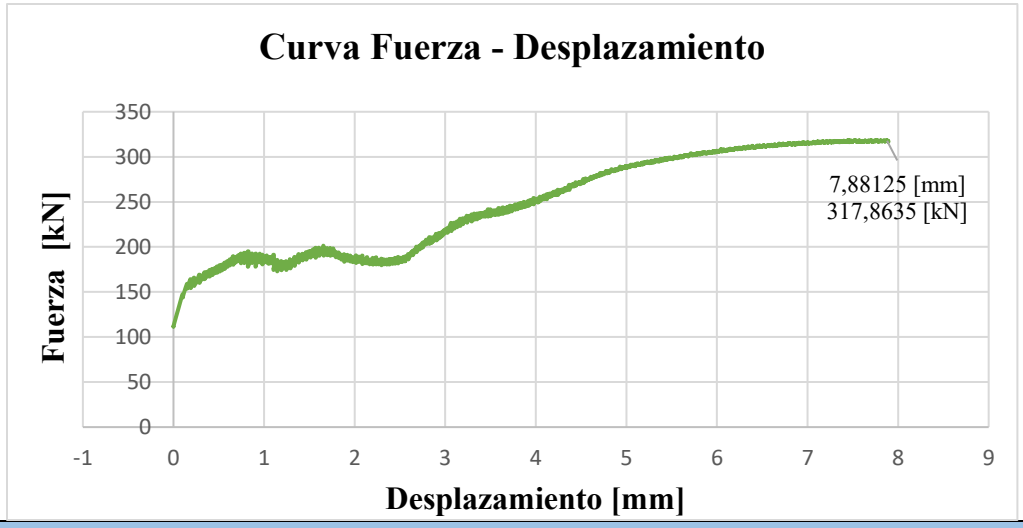
Ensayos a compresión de la conexión empernada

Tomando en cuenta los modos de fallo para columnas cargadas axialmente, los miembros a compresión tuvieron un pandeo local como se puede observar en los resultados de deformación de la TABLA XIV, el pandeo ocurrió justamente en la longitud efectiva de la placa deformándose en conjunto con el perfil UV.

TABLA XIV

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA DE LA PROBETA 1

<table>
<tr><td colspan="5">UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECANICA
INGENIERÍA MECÁNICA</td></tr>
<tr><td colspan="5">ENSAYO A COMPRESIÓN</td></tr>
<tr><td colspan="5">Datos informativos:</td></tr>
<tr><td>Probeta:</td><td>P1-C</td><td>Fecha</td><td colspan="2">24/10/2025</td></tr>
<tr><td>Material:</td><td>ASTM A572 Gr.50</td><td>Espesor perfil UV:</td><td colspan="2">6 mm</td></tr>
<tr><td>Pernos:</td><td>A325</td><td>Espesor placa:</td><td colspan="2">8 mm</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Características del ensayo</td><td colspan="2">Sección Transversal</td><td colspan="2">Velocidad de aplicación</td></tr>
<tr><td colspan="2">1026.82 mm^2</td><td colspan="2">1 mm/min</td></tr>
<tr><td colspan="2">Longitud de Calibración</td><td colspan="2">Tiempo de ejecución</td></tr>
<tr><td colspan="2">35 mm</td><td colspan="2">15 min</td></tr>
<tr><td>Norma aplicable</td><td>AISC 360-22</td><td>Laboratorio</td><td colspan="2">Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica</td></tr>
<tr><td>Instrumento de medida</td><td>Máquina SHIMADZU concreto 2000x</td><td>Capacidad</td><td colspan="2">2000 kN</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Revisado por:</td><td rowspan="2">Ing. Francisco Peña</td><td rowspan="2">Realizado por:</td><td colspan="2">A. Salazar</td></tr>
<tr><td colspan="2">M. Chico</td></tr>
<tr><td colspan="5">RESULTADOS:</td></tr>
</table>



RESULTADOS DEL ENSAYO:		
Carga Máxima [kN]	317.8635	**Fotografía de la probeta**
Desplazamiento máximo [mm]	7.88125 mm	
Esfuerzo [MPa]	309.561	
Área efectiva [mm²]	479.292	

RESULTADO DE DEFORMACIÓN





Discusión de resultados de la muestra P1-C

El ensayo a compresión de la probeta P1-C demuestra que la carga máxima de resistencia es de 317.8635 kN, esfuerzo máximo de 309.561 MPa y un desplazamiento de 7.88125 mm, lo que indica que la conexión tiene la capacidad de transmitir grandes esfuerzos de compresión antes de alcanzar su pérdida de estabilidad, en este caso se flexiona. La gráfica

fuerza desplazamiento denota un comportamiento elástico en la conexión, es decir hay una proporción en la carga y el desplazamiento, se puede observar que la rigidez de la conexión está controlada por el perfil UV y la placa, generando un cierre de holguras, y asiento de los pernos, después se puede observar que la rigidez de la conexión empieza a disminuir y a ocasionar un pandeo en la conexión que a su vez se puede observar en la gráfica.

Mediante la resistencia de diseño LRFD calculada, se demostró que el perfil UV placas está trabajando a un 100 % de su capacidad de diseño LRFD, mientras que las placas de conexión trabajan al 60-100% de su capacidad de diseño, lo cual indica que esta configuración con placas laterales en los lados permite superar las predicciones conservadoras asociadas al aplastamiento local sin que este modo se refleje como una falla controladora.

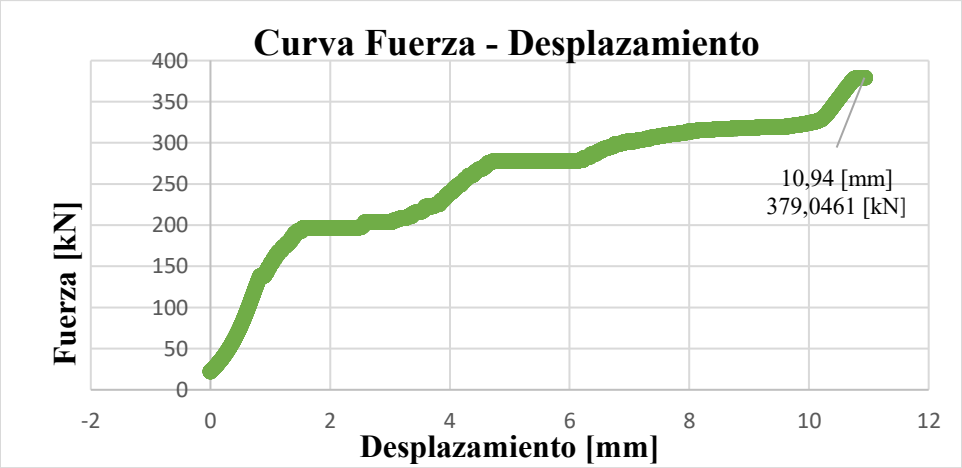
TABLA XV

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA DE LA PROBETA 2

<table>
<tr><td colspan="5">UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECANICA
INGENIERÍA MECÁNICA</td></tr>
<tr><td colspan="5">ENSAYO A COMPRESIÓN</td></tr>
<tr><td colspan="5">Datos informativos:</td></tr>
<tr><td>Probeta:</td><td>P2-C</td><td>Fecha</td><td colspan="2">24/10/2025</td></tr>
<tr><td>Material:</td><td>ASTM A572 Gr.50</td><td>Espesor perfil UV:</td><td colspan="2">6 mm</td></tr>
<tr><td>Pernos:</td><td>A325</td><td>Espesor placa:</td><td colspan="2">8 mm</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Características del ensayo</td><td>Sección Transversal</td><td colspan="3">Velocidad de aplicación</td></tr>
<tr><td>1026.82 mm^2</td><td colspan="3">1 mm/min</td></tr>
<tr><td>Longitud de Calibración</td><td colspan="3">Tiempo de ejecución</td></tr>
<tr><td>35 mm</td><td colspan="3">20 min</td></tr>
<tr><td>Norma aplicable</td><td>AISC 360-22</td><td>Laboratorio</td><td colspan="2">Facultad de Ingeniería</td></tr>
</table>

			Civil y Mecánica
Instrumento de medida	Máquina SHIMADZU concreto 2000x	**Capacidad**	2000 kN
Revisado por:	Ing. Francisco Peña	**Realizado por:**	A. Salazar
			M. Chico

RESULTADOS:



RESULTADOS DEL ENSAYO:

Carga Máxima [kN]	379.0461	**Fotografía de la probeta**
Desplazamiento máximo [mm]	10.9427	
Esfuerzo [MPa]	369.146	
Área efectiva [mm^2]	479.292	

RESULTADO DE DEFORMACIÓN



Discusión de resultados de la muestra P2-C

En el ensayo de la probeta P2-C podemos denotar que existe un desplazamiento máximo de 10.9427 mm con una carga máxima de 379.0461 kN y un esfuerzo máximo de 369.146 MPa, en la curva fuerza desplazamiento se ilustra un comportamiento no lineal pero estable, en el primer milímetro de desplazamiento la fuerza aumenta desde 0 hasta los 160 kN lo cual en esta zona se ubica el rango elástico de la conexión, entre los desplazamiento de 2 y 4 mm la curva continua creciendo alcanzado las fuerzas de 200 y 220 kN empezando la plastificación del material en específico el perfil UV, generando una redistribución de los esfuerzos hacia las placas laterales, entre los 6 y 8 mm la curva toma una pendiente que va por los 260 – 300 kN lo que evidencia un ablandamiento del material asociándose a una no linealidad física y a su vez geométrica dando inicio al pandeo de la conexión **(**Fig. 45).

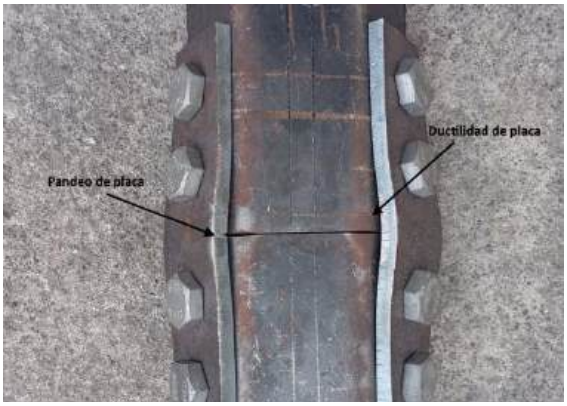


Fig. 45. Fallas a compresión de la conexión empernada

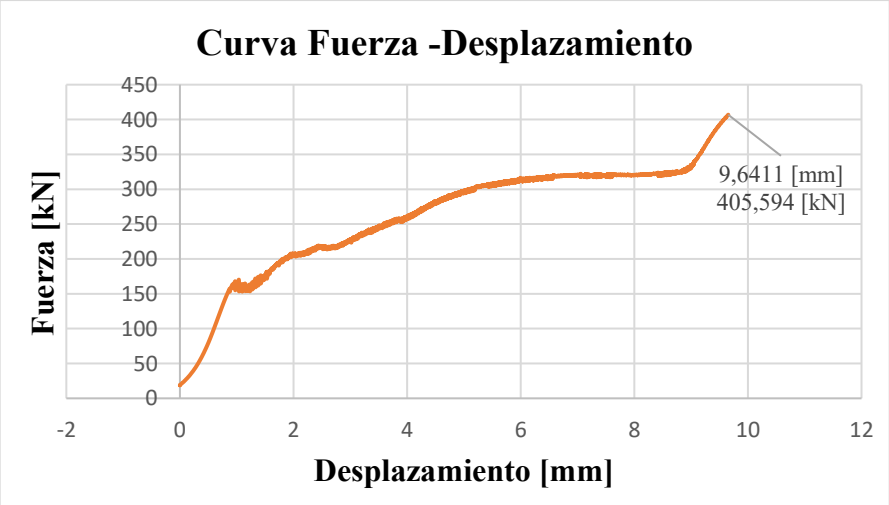
En la parte final entre los 10-11 mm de desplazamiento la carga se aproxima hacia los 320-380 kN siendo muy similar a la carga máxima calculada, ocasionando incrementos el desplazamiento indicando que la conexión agotó su rigidez y esta previo a suceder la inestabilidad. En general la gráfica fuerza desplazamiento indica que, al inicio la conexión tiene una resistencia rígida pero poco después ocurre el ablandamiento progresivo del material hasta llegar a su carga máxima generando modos de falla como el pandeo de las placas de conexión y el perfil UV, aplastamiento en los orificios y plastificación local, denotando que los pernos conservan sus márgenes de seguridad.

TABLA XVI

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA DE LA PROBETA 3

<table>
<tr><td colspan="4">UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECANICA
INGENIERÍA MECÁNICA</td></tr>
<tr><td colspan="4">ENSAYO A COMPRESIÓN</td></tr>
<tr><td colspan="4">Datos informativos:</td></tr>
<tr><td>Probeta:</td><td>P3-C</td><td>Fecha</td><td>24/10/2025</td></tr>
<tr><td>Material:</td><td>ASTM A572 Gr.50</td><td>Espesor perfil UV:</td><td>6 mm</td></tr>
<tr><td>Pernos:</td><td>A325</td><td>Espesor placa:</td><td>8 mm</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Características del ensayo</td><td colspan="2">Sección Transversal</td><td colspan="2">Velocidad de aplicación</td></tr>
<tr><td colspan="2">1026.82 mm^2</td><td colspan="2">1 mm/min</td></tr>
<tr><td colspan="2">Longitud de Calibración</td><td colspan="2">Tiempo de ejecución</td></tr>
<tr><td colspan="2">35 mm</td><td colspan="2">20 min</td></tr>
<tr><td>Norma aplicable</td><td>AISC 360-22</td><td>Laboratorio</td><td>Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica</td></tr>
<tr><td>Instrumento de medida</td><td>Máquina SHIMADZU concreto 2000x</td><td>Capacidad</td><td>2000 kN</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Revisado por:</td><td rowspan="2">Ing. Francisco Peña</td><td rowspan="2">Realizado por:</td><td>A. Salazar</td></tr>
<tr><td>M. Chico</td></tr>
</table>

RESULTADOS:



RESULTADOS DEL ENSAYO:

Carga Máxima [kN]	405.5942	**Fotografía de la probeta**
Desplazamiento máximo [mm]	9.641126	
Esfuerzo [MPa]	395	
Área efectiva [mm^2]	479.292	

RESULTADO DE DEFORMACIÓN







Discusión de resultados de la muestra P3-C

En el ensayo de la conexión empernada con el código P3-C se puede denotar que tuvo un desplazamiento máximo de 9.641126 mm con una carga de 405.5942 kN y un esfuerzo máximo de 395 MPa sobre su sección transversal.

En la gráfica fuerza desplazamiento (Fig. 46), tenemos un tramo inicial de 0 a 1 mm el cual en este tramo la fuerza asciende de 0 a 140 kN, lo que genera una pendiente que va de forma proporcional, es decir la carga en función del desplazamiento, entre 1 y 3 milímetros podemos denotar que la caga de aplicación fue de 200 a 220 kN , en este tramo empieza a plastificarse tanto el perfil como la placa de conexión, en el tramo de 3 a 6 mm la fuerza se dispara situándose entre los 240-280 kN indicando que el perfil y la placa empezó a pandearse, entre los 8 y 9 mm de desplazamiento la fuerza se acerca a los 320 kN y posterior a eso ocurren los desplazamientos relativamente grandes llegando a un valor de 9.64 mm lo que indica que la conexión ha llegado al máximo de su estabilidad y rigidez. En conclusión, la pendiente de la gráfica demuestra una linealidad y plasticidad de la conexión para que después ocurra un pandeo inelástico por la redistribución de sus esfuerzos a través de las placas.

Relación fuerza-deformación de los ensayos a compresión

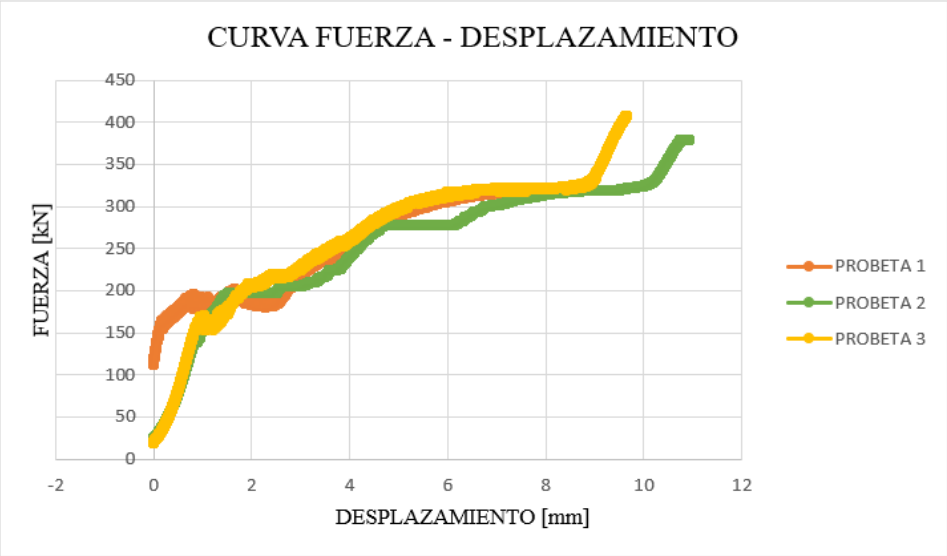


Fig. 46. Relación fuerza Deformación de las muestras ensayadas

Mediante la información de la gráfica se puede estimar que entre las tres probetas hay un rango de aplicación de carga que va desde el 27 % al 37 % mayor que la probeta P1-C. Las curvas presentadas en la gráfica presentan un tramo inicial que va desde los 0.5 a 1 mm y 150 a 200 kN de carga cumpliendo la ley de Hooke que se refiere a la elasticidad del material. Después podemos observar que todas las muestras a partir de este nivel empiezan a perder su rigidez empezando a plastificarse posterior a su pandeo loca, efecto común en elementos esbeltos a compresión.

3.2. Método numérico y análisis paramétrico

Modelado numérico y verificación

En esta sección se presentarán los enfoques de modelado por elementos finitos de la conexión empernada, los resultados de esfuerzo deformación de los elementos sometidos tanto a tracción como a compresión dependerán de la resistencia mecánica del material y el tipo de restricciones que se coloque en el modelo. Se ha desarrollado un enfoque de modelo basado en superficies, con el objetivo de optimizar el coste computacional siempre y cuando los resultados sean coherentes con la realidad, para realizar el análisis en pernos estos fueron modelados mediante conexiones simplificadas tipo *Bolt Connection*. Para su definición se emplearon grupos de agujeros (*Hole Groups*), los cuales permiten vincular los agujeros enfrentados de las placas y representar la rigidez mecánica de los pernos sin modelar explícitamente su geometría. Adicionalmente, se incorporó una fuerza de pretensión para simular el apriete inicial de los pernos. Un conjunto de pernos y tuerca en el mallado de un elemento sólido proporciona más cantidad de nodos conectados tanto en el perno como en la tuerca, lo que limita un mallado más fino del elemento, obligando a aumentar el tamaño de la malla **[40]**. Es importante recordar que el uso de superficies en una simulación 3D ayuda a simplificar geometrías con el propósito de reducir el número de elementos de una malla.

Geometría CAD del espécimen

Por medio de un software de elementos finitos se logró determinar el comportamiento tanto a tracción como a compresión de la conexión empernada tomando en cuenta cargas de resistencia y dimensiones nominales del perfil y la placa de conexión, en el modelo

intervienen cuatro pares de contacto superficie a superficie, como a continuación: la placa al contacto de la cada una de las alas del perfil en UV, relaciones de concentricidad entre los agujeros de la placa y perfil UV (Fig. 47), los contactos van a tener un coeficiente de rozamiento dependiendo del material a ensayar así como también se agregará restricciones para fijar una base del perfil, para el caso de compresión, para la asignación de cargas se tomó en cuenta la resistencias del perfil y placa el cual deberá estar en función de los cálculos realizados posteriormente en el Anexo 3.

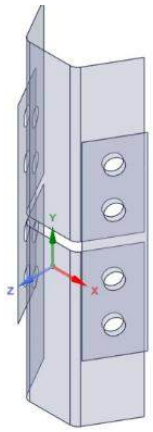


Fig. 47. Modelado de geometría
para su posterior análisis

Se utilizó un enfoque sintetizado el cual se resume en los siguientes pasos:

- Creación de la geometría en base (modelado de la placa y perfil mediante superficies)
- Utilizar la geometría para asignar materiales y propiedades mecánicas de los mismos.
- Simular la conexión a tracción con el material conformado en frío
- Simular la conexión a tracción con el material conformado en frío
- Obtención de gráficas de fuerza deformación

Se tomó en cuenta varios parámetros como la no linealidad geométrica con el propósito de poder modelar grandes desplazamiento o deformaciones y poder comparar estas gráficas denotando cuanta similitud tendrán en cada una de ellas.

3.2.1. Propiedades mecánicas del material

Es necesario que asignación de los materiales tengan un comportamiento elástico plástico con endurecimiento isotrópico el cual significa que existirá una expansión uniforme del elemento a fluencia en todas las direcciones durante el flujo plástico, este endurecimiento nos ayudará a capturar de formas más realista los ciclos de carga, descarga y distribución de esfuerzos ocurridos en la conexión **[37]**.

En la asignación del material se tomará en cuenta valores como el módulo de elasticidad con 200 GPa, coeficiente de poisson de 0.3, su limite a la fluencia de 345 MPa y limite a la rotura de 450 MPa, cada uno de ellos controla la resistencia mecánica del material, es decir controlar la rigidez del material su limite a la fluencia y rotura, en el entorno de modelación será necesario definir al material como elasto-plástico que tenga un endurecimiento isotrópico (Fig. 48).

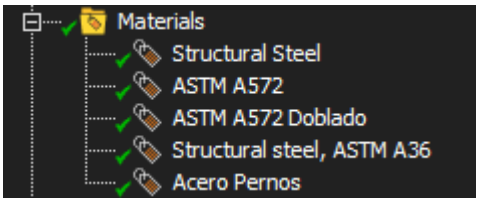
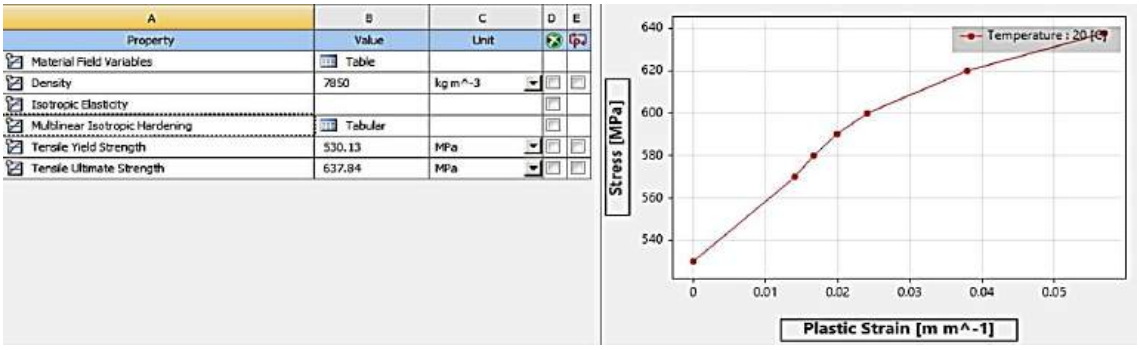


Fig. 48 Verificación de materiales Ansys Workbench

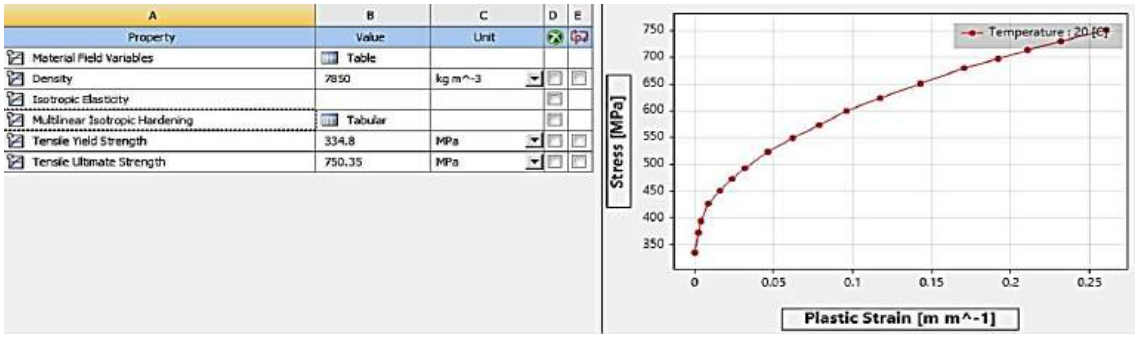
Si se denota que el esfuerzo de Von Mises tiene una tendencia a su valor máximo de la resistencia a fluencia el modelo empezará a acumular deformación plástica lo que reduce su rigidez como se pudo observar en los ensayos realizados anteriormente, permitiéndonos predecir la plastificación en la sección neta del perfil o aplastamiento de los agujeros y mecanismos de corte en bloque observados anteriormente **[38]**.

Identificación de parámetros

Es necesario considerar esfuerzos y módulos de elasticidad del perfil en UV doblado en frío, es decir el elemento cambia su módulo de elasticidad y resistencia en la zona doblada, para ello fue necesario dividir el modelo de la geometría en sus partes dobladas y planas con el propósito clave de agregar el cambio de resistencia en cada una de las partes mencionadas. Por esta razón fue necesario agregar propiedades mecánicas, así como también el endurecimiento isotrópico multilineal de las secciones curvas y planas (Fig. 49(a)). Se puede inferir que su módulo de elasticidad tiene un leve cambio en su resistencia por el doblado en frío de los perfiles en UV **[41]**. Los datos para el endurecimiento isotrópico fueron obtenidos de ensayos anteriormente realizados con el material **[42]**. La configuración de los especímenes y simulación de los mismos se lo realizará mediante *Static Structural* del *Ansys Workbench* (Fig. 49(b)).



a) Asignación de materiales para la parte curva del perfil UV

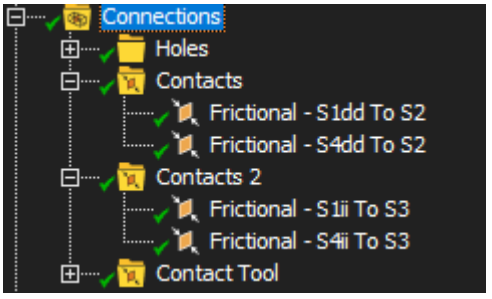


b) Asignación de materiales para las partes planas del perfil

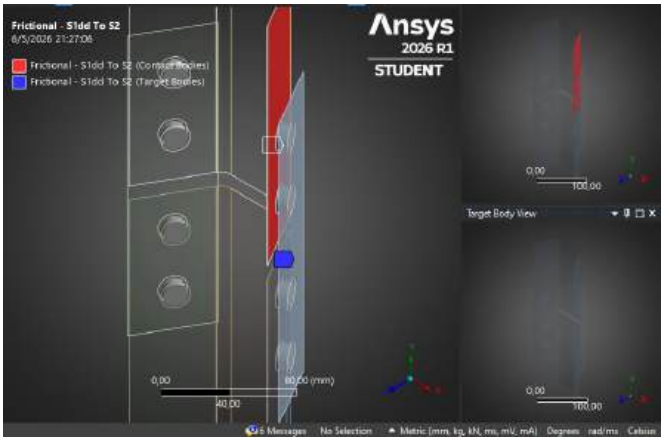
Fig. 49.Propiedades mecánicas de placa y perfil UV

Parámetros de contacto

En *Ansys workbench* en el apartado de *connections* tenemos varios tipos de contactos, los contactos tipo *bonded* y *bonded initial* son utilizados para superficies que no se separan bajo ninguna carga y cuando existen imperfecciones en la geometría, el contacto tipo *frictionless* es utilizado cuando las superficies se deslizan sin resistencia solamente transmitiendo fuerzas de compresión normales y *frictional* ofrece un deslizamiento con resistencia que es definida por un coeficiente de fricción (μ) acercándose a la realidad del ensayo. En concordancia a lo mencionado, se utilizó un tipo de contacto tipo *frictional* entre las superficies de contacto de placa y perfil UV colocando de manera manual un valor de rozamiento de 0.15 lo que estipula que es la fuerza de resistencia al rozamiento entre las placas y perfiles, se modelaron con elementos target (material rígido) y *contact* (material blando) siendo una superficie de la placa target y la superficie lateral del perfil en UV se modela como *contact*, en el apartado de *connections* se crean dos grupos de contactos, es decir para los dos lados de perfil y las dos placas, como se ilustra en la Fig. 50(b)).



a) Verificación de asignación de contactos en el model de workbench.

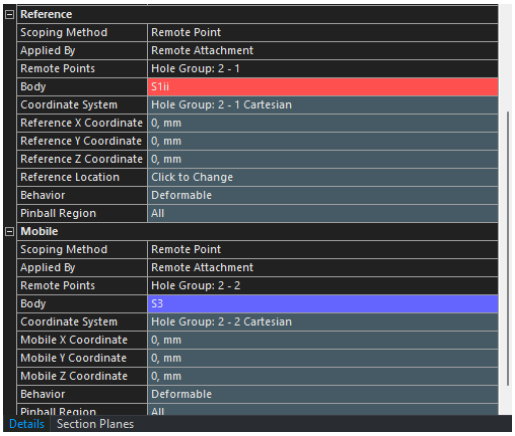


b)Visualización de contactos de tipo Contact y Target.

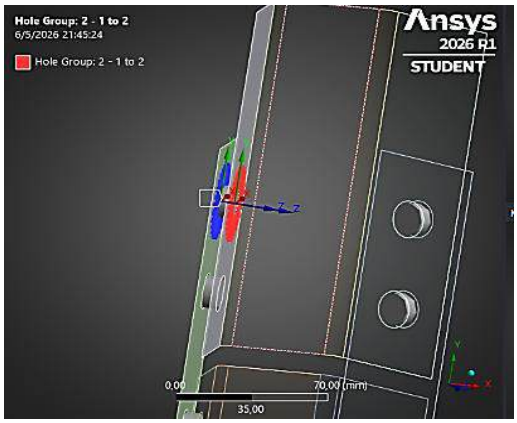
Fig. 50. Parámetros de contacto entre placa y perfil UV.

En el apartado Connections, en la (Fig. 50(a)) podemos observar que existe una carpeta denominada *holes*, esta carpeta se creó porque los pernos se están modelando mediante una herramienta (*holes)* para identificar los agujeros que estarán conectados mediante una conexión empernada virtual.

Resultado de esto ahora tendremos una arista que pasa por el agujero del perfil y la placa. En el entorno de *model* en *connections* se procede a utilizar *hole* dando las referencias de sujeción del primer nodo de la arista en función de la placa y el final de la arista en función del perfil UV, es decir colocar *reference* o *mobile*, *reference* es utilizado en la cara donde va a ir sujeto el perno con la placa y *mobile* se lo utiliza para el nodo de la arista como es ilustra en la (Fig. 52(a)) del mismo modo se deberá realizar lo mismo para el perfil UV y en todos los agujeros generando planos coordenados en cada uno de los nodos de la viga lo que indica la dirección axial del perno y el plano de corte transversal como se muestra en la (Fig. 52(b)).



a) Verificación de referencias de sujeción del perno.

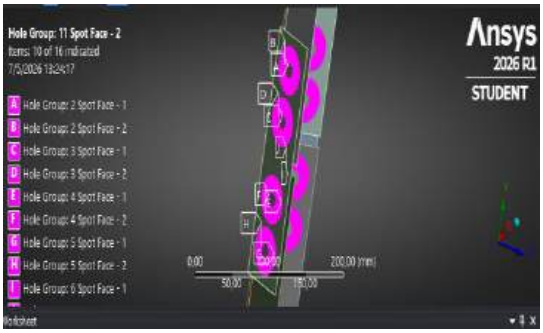


b) Representación de superficies seleccionadas para la sujeción del perno

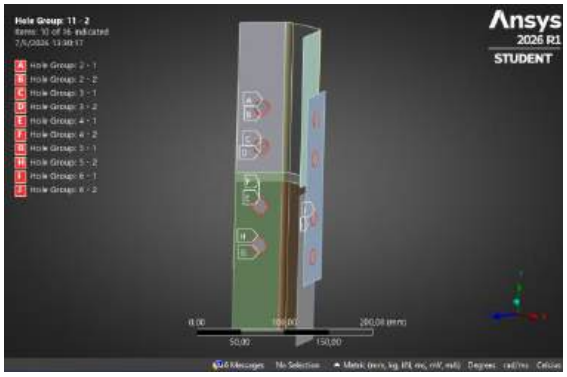
Fig. 51. Consignación de sujeciones empernadas entre el perfil y la placa

Por lo consiguiente ahora tendremos representado un perno como un elemento viga, en los parámetros también debemos acotar que es necesario colocar el material del perno A325 y a su vez es necesario colocar el radio del perno y su longitud.

Mediante el uso de *named selections*, se generó el grupo de contactos superficiales de placa y perfil donde va colocado el perno (Fig. 53(a)). Mediante otro *named salection* se generó los finales de cada borde de los pernos (Fig. 53(b)).



a) Selección y agrupación de las caras de sujeción entre todas las areas de contacto



b) Asignación y agrupación de finales de borde de los agujeros donde va los pernos

Fig. 52. Consignación de áreas de contacto y finales de borde de los agujeros mediante *named selections*.

En resumen, englobando cada uno de los contactos, se ha generado contactos tipo *frictional* entre las placas y perfiles, generamos pernos modelados como tipo viga el cual tiene una holgura de 2 mm, mediante *named selections* se agrupó y parametrizó todos los agujeros donde van los pernos, de la misma forma para verificar que todos los contactos sean correctamente asignados utilizamos el *contact tool*, herramienta de Ansys que nos ayuda a verificar que los contactos sean correctos ayudando a generar una convergencia de los resultados como se muestra en la (Fig. 54).

Worksheet

Initial Information

For additional options, please visit the context menu for this table (right mouse button)

Name	Contact Side	Type	Status	Number Contacting	Penetration (mm)	Gap (mm)	Geometric Penetration (mm)	Geometric Gap (mm)	Resulting Pinball (mm)	Real Constant
Frictional - S1dd To S2	Contact	Frictional	Closed	947,	7,706e-009	0,	0,	7,	24,	13,
Frictional - S1dd To S2	Target	Frictional	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	14,
Frictional - S1ii To S3	Contact	Frictional	Closed	915,	7,0623e-008	0,	0,	7,	24,	15,
Frictional - S1ii To S3	Target	Frictional	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	16,
Frictional - S4dd To S2	Contact	Frictional	Closed	825,	7,7002e-009	0,	0,	7,	24,	17,
Frictional - S4dd To S2	Target	Frictional	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	18,
Frictional - S4ii To S3	Contact	Frictional	Closed	893,	6,432e-008	0,	0,	7,	24,	19,
Frictional - S4ii To S3	Target	Frictional	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	20,

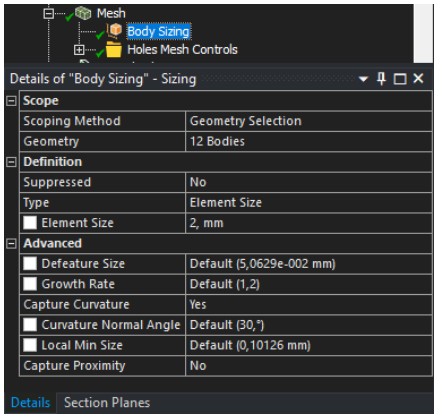
Color Legend

Red	The contact status is open but the type of contact is meant to be closed. This applies to bonded and no separation contact types.
Yellow	The contact status is open. This may be acceptable.
Orange	The contact status is closed but has a large amount of gap or penetration. Check penetration and gap compared to pinball and depth.

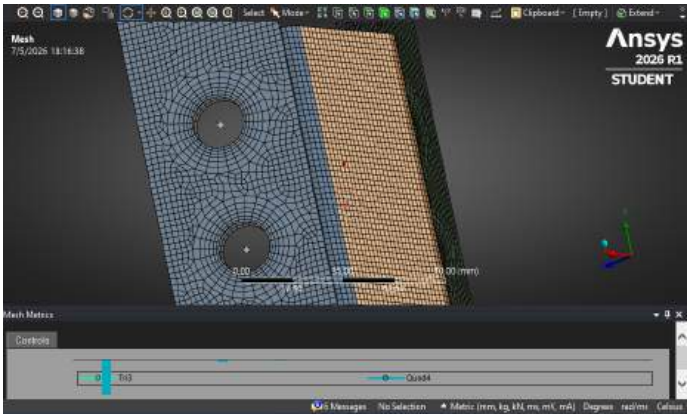
Fig. 53. Información del estado de los contactos entre la placa y perfil del apartado de *connections*.

Mallado de los elementos

En este estudio se utilizaron elementos cuadráticos para el perfil UV, ya que según **[43]** esta función resulta más adecuada para poder realizar una interpolación en sus desplazamientos. Se estableció un refinamiento de la malla en todo el cuerpo, es decir, en el apartado de *mesh* aplicamos un *body sizing* con el tamaño de los elementos de 2 mm. Con el propósito de observar más a fondo si existe un cambio en la dimensión de los agujeros al aplicar una carga se aplicó el método *inflation* en cada una las zonas donde hay contacto entre los pernos y el perfil como se muestra en la (Fig. 55(b)). Para finalizar se aplicó el método de *body sizing* el cual se basa principalmente en refinar los agujeros y para ello colocamos un tamaño de elementos de 2 mm.



a) Detalles de configuración del tamaño de malla.



b) Visualización de la aplicación del método *inflation*.

Fig. 54. Aplicación de métodos de mallado y determinación de parámetros de refinamiento.

En definitiva, las dos placas de conexión junto con los dos perfiles en UV suman un total de 18 987 elementos y 19 735 nodos, considerando así que el número elevado de nodos debe ser por el uso de los varios métodos de afinación de la malla, la (Fig. 55(a)) muestra la configuración de la malla según las especificaciones descritas anteriormente. El propósito del uso de este mallado fue utilizar elementos hexaédricos en el perfil UV y placa sin embargo el algoritmo de mallado también generó elementos piramidales y prismáticos.

Condiciones de Contorno

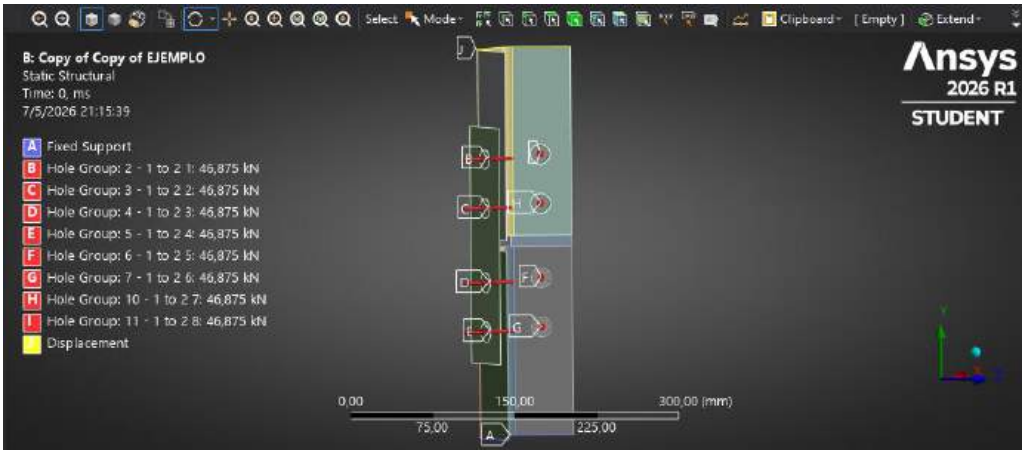


Fig. 55. Condiciones de sujeción y parámetros de carga para el modelo FEM

Las restricciones y las condiciones de carga deben colocarse en el modelo FEM para asegurar que el sistema esté en equilibrio. No obstante, hay un parámetro importante a considerar, la pretensión en los pernos es el punto clave el cual permite que las superficies en contacto no se desunan al momento realizar la simulación. El elemento de pretensión fue asignado en el apartado de Static Structural, es decir mediante la herramienta de *Bolt Pretension*, La precarga en los pernos debe ser individual para cada una de las vigas (Fig. 56). La carga se aplicó en dos pasos, el primer paso se aplicó para la pretensión de los pernos y en el segundo paso se aplicó el desplazamiento de la conexión, es importante mencionar que en *Analysis Setting* el primer paso es necesario que la precarga se active y después se desactive al iniciar el segundo paso. Las cargas aplicadas para los análisis de la conexión fueron cargas promedio obtenidas en cada uno de los ensayos realizados. Hay que acotar que Ansys Workbench utiliza el método de Newton-Raphson para este análisis de tipo no lineal. Los elementos fueron configurados como flexibles y no rígidos ya que con esto podemos permitimos deformaciones **[44]**.

Las sujeciones en la base del perfil UV se los agregó mediante el apartado de *Static estructural* con la herramienta *Fixed Support* con el propósito de que al simular la mordaza sujeta y por consiguiente el lado superior tendrá un desplazamiento del perfil, es decir, el parámetro de desplazamiento ayuda a controlar como la conexión se desplaza hasta su punto máximo.

Predicción de fallos

Según el procedimiento experimental se denotó deformaciones leves en el perfil y rotura de la placa de conexión, por lo tanto, el enfoque de simulación numérica tiene una estrecha relación que demuestra el rendimiento hasta su punto de rotura máximo de las placas de unión. Las juntas sometidas a tracción tuvieron un desplazamiento promedio de 36 mm hasta la rotura de la placa de conexión (Fig. 57(b)), las juntas a compresión tuvieron un desplazamiento promedio de 10 mm ocurriendo un pandeo en las placas de conexión (Fig. 57(a)). Los resultados de análisis de elementos finitos fueron realizados mediante el criterio de falla por tracción máxima. El modelo FEM validado, se centra en las zonas de contacto donde existen más posibilidad de daño el cual mediante condiciones de contorno y propiedades de material refleja las fallas posibles de la conexión empernada.

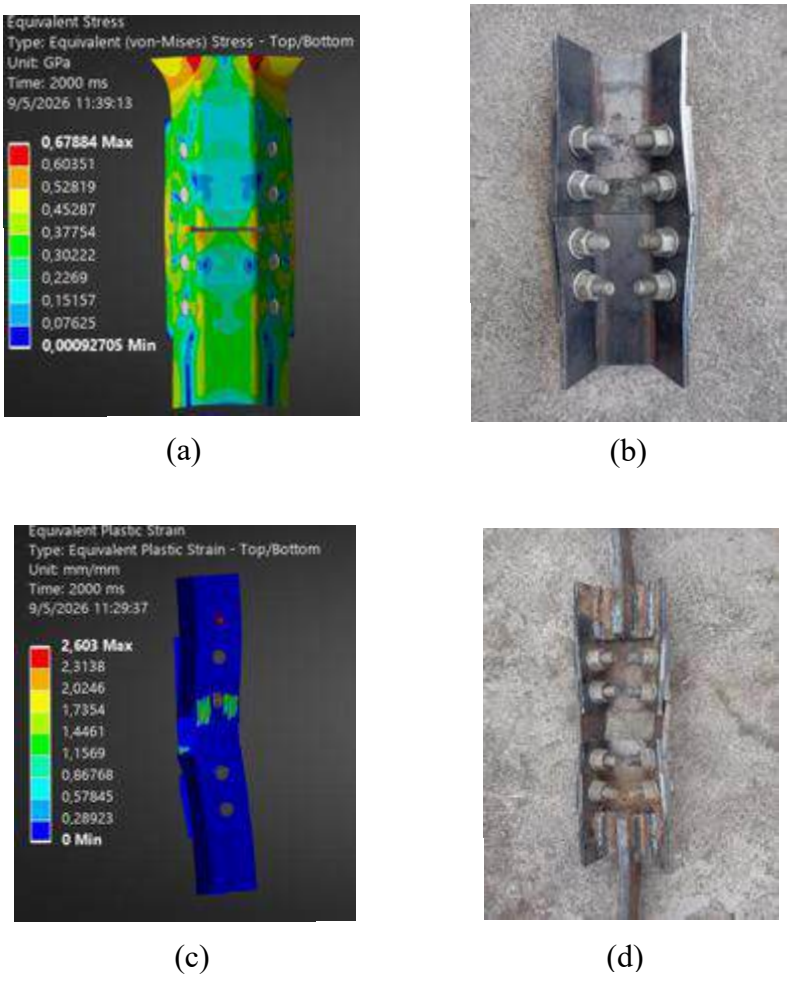
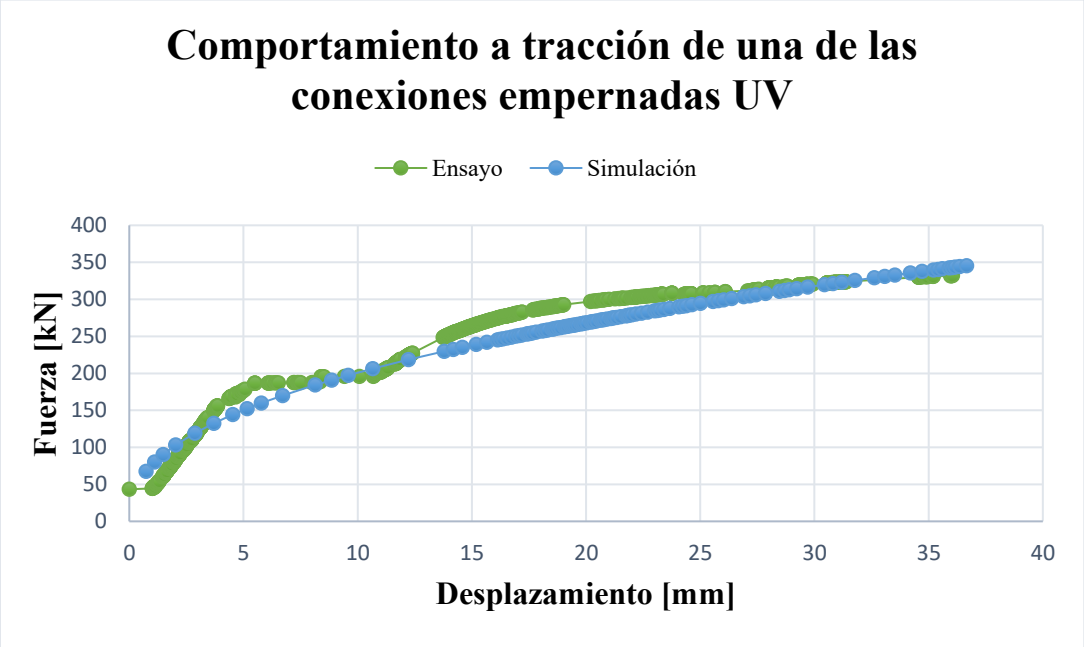


Fig. 56. Predicciones de fallo del espécimen: (a) Distribución de esfuerzos y pandeo de la conexión; (b) Muestra ensayada a compresión; (c) Deformación plástica y posible rotura en la placa de conexión; (d) Muestra ensayada a tracción

Relaciones carga Deformación a tracción

Es importante establecer una comparativa entre datos experimentales y datos obtenidos de la simulación numérica con el fin de validar el modelo hecho en MEF, esto mediante un criterio de validez estadístico. A continuación, se presenta un ejemplo comparativo gráfico entre la curva fuerza-desplazamiento obtenida mediante MEF y la curva de un ensayo experimental realizado, con el propósito de apreciar la similitud del comportamiento experimental y numérico de la conexión empernada:



Discusión de resultados

Este texto trata de demostrar la relación entre el comportamiento de la simulación numérica de la conexión y los ensayos realizados. Para iniciar se tomará de referencia los tramos del desplazamiento para poder determinar la relación con la fuerza y cada uno de los datos del porcentaje de error se tomará de la (TABLA XVII), donde los desplazamientos fueron seleccionados ya que entre cada una de las probetas existía un error promedio del 0.0055% entre sus desplazamientos por ende el error calculado está en función de las fuerzas. En (Fig. 58) se ilustra que el tramo inicial desde los 0 a 5 mm existe un comportamiento rígido y plástico demostrando que el ensayo desarrolla una resistencia

correspondiente a la fase elástica del material, a su vez en la simulación se presenta una rigidez inicialmente superior a la del ensayo, denotando un porcentaje de error del 16.2% hasta la fuerza de 152.275 kN, esto puede ser ocurrido por condiciones idealizadas del modelo. En el eje de las fuerzas se denota que existe un porcentaje de variación del 3.5 % es decir hasta los 170.054 kN donde las dos gráficas tienen a ser elásticas. Del tramo de los 6 a 10 mm se puede observar que las dos gráficas pasan de su límite elástico e inicia la zona elástico plástica denotando una variación del 1.7 % hasta la fuerza de 206.233 kN para el desplazamiento en ese tramo. En el tramo de los 10 hasta los 20 mm podemos observar que las dos gráficas están llegando a su límite de resistencia antes de la fractura, lo cual indica que el máximo que resiste la conexión es de 277.779 kN a tracción, el porcentaje de convergencia de los dos valores fue del 8.4 % para ese tramo de desplazamiento. Seguido de ello se procede a observar la fractura del material entre los 327.253 kN para el ensayo real mientras que en la simulación se denota que llega hasta los 345.479 kN de resistencia última hasta la fractura, los porcentajes de error fueron del 5.2 % para un desplazamiento a tracción total del 36 mm.

La gráfica demuestra que la simulación genera una respuesta dúctil y fuertemente rígida lo cual permite describir tendencias y mecanismos globales para poder determinar la evolución experimental de la conexión empernada UV. El rango de variación de los datos denota que existe una correcta calibración de la curva *Multilinear Isotropic Hardening* del material ingresado en el *Engineering Data*.

TABLA XVII
COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FUERZA A TRACCIÓN

Modelo de Elementos Finitos (FEM)		**Promedio de los especímenes ensayados a tracción**		**% Error**
Fuerza (kN)	Desplazamiento (mm)	Fuerza (kN)	Desplazamiento (mm)	
0	0	0	0	0
103.274	2.03	77.609	2.03	24.9%
132.562	3.70	141.215	3.70	6.5%
144.285	4.53	163.050	4.49	13.0%
152.275	5.15	176.937	5.17	16.2%
170.054	6.71	175.951	6.70	3.5%
184.314	8.14	195.410	8.09	6.0%
197.324	9.59	193.741	9.23	1.8%
206.233	10.66	202.786	10.73	1.7%
218.438	12.23	230.755	12.23	5.6%
229.628	13.78	247.642	13.57	7.8%
232.401	14.19	254.908	14.39	9.7%
242.151	15.65	268.262	15.68	10.8%
245.143	16.12	272.017	16.13	11.0%
247.840	16.55	274.439	16.56	10.7%
251.817	17.19	275.461	17.09	9.4%
255.643	17.82	279.972	17.79	9.5%
258.602	18.32	284.260	18.35	9.9%
260.596	18.66	286.371	18.70	9.9%
262.793	19.04	288.060	19.03	9.6%
264.737	19.38	289.749	19.38	9.4%
266.243	19.64	290.504	19.57	9.1%
267.804	19.92	292.237	19.96	9.1%
269.337	20.19	292.904	20.17	8.8%
270.829	20.46	293.948	20.45	8.5%
272.206	20.71	295.148	20.72	8.4%
274.199	21.08	296.748	21.16	8.2%
277.779	21.74	298.415	21.69	7.4%
280.107	22.18	299.837	22.19	7.0%
284.350	23.00	301.970	22.99	6.2%
286.456	23.41	302.925	23.40	5.7%
287.796	23.67	303.703	23.63	5.5%
289.792	24.06	304.547	24.03	5.1%
292.669	24.64	306.036	24.59	4.6%
294.496	25.01	307.125	25.01	4.3%
299.444	26.03	309.302	26.03	3.3%
301.110	26.38	309.991	26.34	2.9%
304.867	27.17	310.924	27.23	2.0%

308.049	27.85	312.369	27.91	1.4%
310.871	28.47	312.191	28.41	0.4%
314.283	29.22	313.324	29.05	0.3%
319.658	30.43	320.368	30.36	0.2%
322.972	31.20	321.857	31.21	0.3%
325.432	31.77	322.857	31.75	0.8%
330.962	33.08	324.768	32.99	1.9%
335.617	34.20	326.012	34.17	2.9%
337.686	34.71	326.123	34.65	3.4%
339.733	35.21	326.745	35.05	3.8%
342.473	35.90	327.167	35.46	4.5%
343.523	36.16	327.345	35.67	4.7%
345.479	36.66	327.523	35.97	5.2%
ERROR PROMEDIO				6.5%
ERROR MÍNIMO				0.2%
ERROR MÁXIMO				24.9%

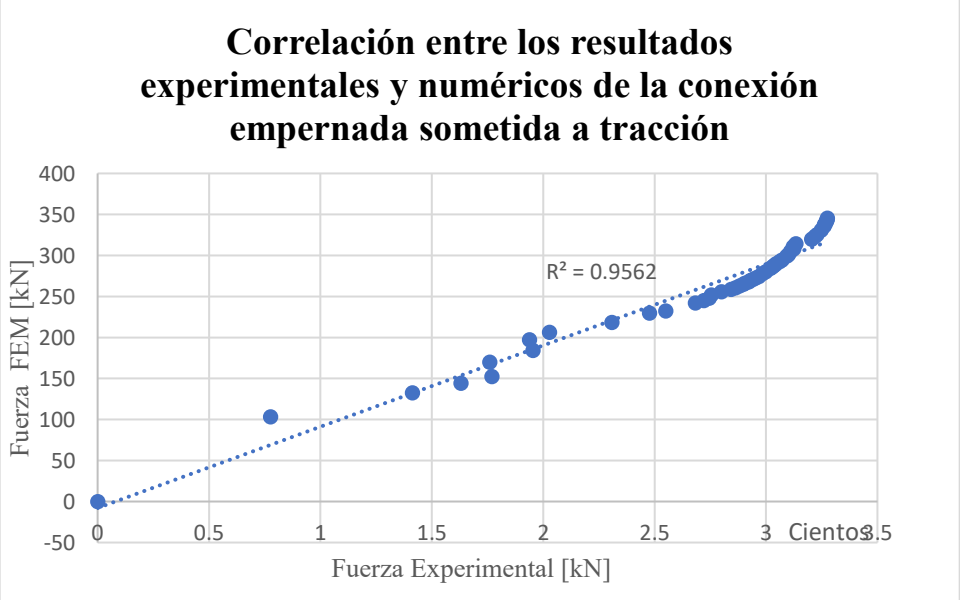


Fig. 58. Correlación entre los resultados experimentales y numéricos de la conexión empernada sometida a tracción

La figura Fig. 59 presenta la correlación entre los resultados obtenidos experimentalmente y los predichos por el modelo de elementos finitos para la conexión empernada sometida a tracción. Cada punto representa un par de datos correspondientes a los valores experimentales y numéricos evaluados para un mismo estado de carga. La proximidad de los puntos a la línea de tendencia evidencia una adecuada concordancia entre ambos

conjuntos de datos. Asimismo, el coeficiente de determinación (R^2) obtenido indica el grado de correlación existente entre los resultados experimentales y los numéricos, permitiendo evaluar la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento observado en los ensayos.

El coeficiente de determinación obtenido (R^2=0.95) indica que aproximadamente el 95% de la variabilidad de los resultados experimentales es explicada por el modelo numérico, evidenciando una fuerte correlación entre ambos métodos de análisis y respaldando la validez del modelo desarrollado.

La validación del modelo de elementos finitos frente a los ensayos de tracción mostró un error promedio de 6.5 %, lo que evidencia una alta concordancia entre la respuesta numérica y experimental. Este nivel de discrepancia indica que el modelo es capaz de reproducir con precisión el comportamiento mecánico de la conexión empernada bajo cargas de tracción, representando adecuadamente su rigidez y capacidad resistente.

Aunque se registró un error máximo de 24.9 % en los primeros puntos de carga, estas diferencias se concentran en la etapa inicial del ensayo, donde factores como el cierre de holguras entre pernos y agujeros, el asentamiento de las superficies de contacto y las variaciones propias del montaje experimental pueden influir significativamente en la respuesta de la estructura. Conforme aumenta la carga aplicada, la discrepancia entre los resultados experimentales y numéricos disminuye progresivamente, alcanzando errores inferiores al 5 % e incluso cercanos al 0 % en gran parte de la curva de comportamiento.

El error promedio de 6.5 % obtenido es considerablemente menor al registrado en la validación a compresión, lo que demuestra que el modelo numérico presenta una excelente capacidad predictiva para el análisis de la conexión sometida a tracción. En consecuencia, puede considerarse que el modelo se encuentra adecuadamente validado y es apto para representar el comportamiento estructural de la conexión dentro del rango de cargas estudiado.

Relaciones carga Deformación a compresión

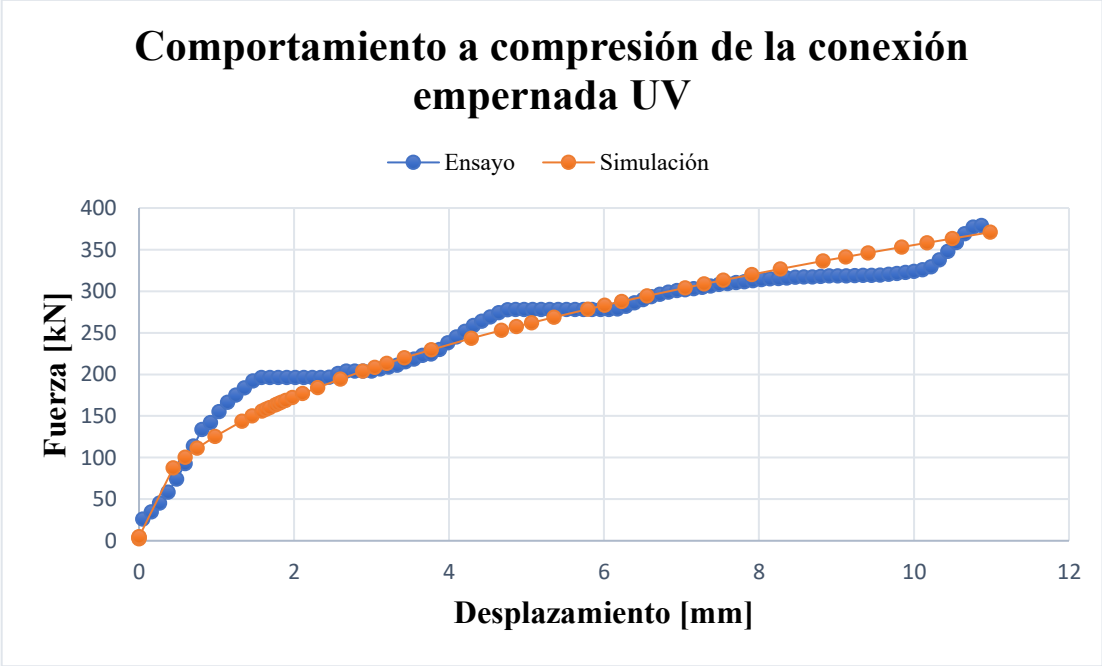


Fig. 59. Diagrama fuerza vs desplazamiento del ensayo- Simulación a compresión

Discusión de resultados

Recapitulando, hay que tomar en cuenta que el análisis del porcentaje de error está basado en función a los desplazamientos ya que las fuerzas aplicadas en los tres ensayos tenían un error de 0.0048 % en su fuerza aplicada, para ello se tomó en cuenta los desplazamientos ya que estos varían en función de la carga aplicada como se muestra en la TABLA XVIII, además se tuvo que interpolar datos del primer ensayo ya que la fuerza máxima fue de 313 kN desplazándose solamente 7 mm siendo necesario que las tres probetas se desplacen hasta una máximo de 11 mm. Ahora en la (Fig. 60) se ilustra que desde 0 hasta los 2.89 mm de desplazamiento existe una transición elástica de las dos gráficas denotando un error porcentual del 7.44 % cuando llega la fuerza a los 203.859 kN. Desde los 2.89 hasta los 4.87 mm de desplazamiento a compresión podemos denotar que empieza su rango plástico es decir la probeta empieza a doblarse, en otras palabras, las placas de conexión empiezan a pandearse habiendo un error del 9,86% a una fuerza de 257.610 kN. La ilustración mostrada tiene dos picos en su ensayo de la probeta, esto sucede porque la máquina trata de interpolar los valores para que salga más exacta la

gráfica. Desde el tramo de 4.87 hasta los 8.83 mm finaliza su resistencia elástica de la conexión y comienza el rango de su límite de resistencia a rotura, el cual las gráficas del ensayo y simulación presentan una relación porcentual del 4.36% a una fuerza de 336.299 kN. Seguido de aquello la conexión inicia su proceso de fractura o estricción, en este caso se pandeo de forma que los dos perfiles en UV se unieron mientras que las placas de conexión estaban totalmente pandeadas. A los 370.921 kN la conexión tuvo un desplazamiento de 11 mm denotando un error porcentual del 8.73 %. En conclusión, el comportamiento entre las dos gráficas denota que existe asentamiento progresivo de las superficies de contacto entre las placas y el perfil UV durante las etapas de aplicación de la carga. El modelo numérico responde con mayor rigidez, denotando valores de carga más resistentes y desplazamientos menores.

TABLA XVIII
COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FUERZA A COMPRESIÓN

Modelo de Elementos Finitos (FEM)		**Promedio de los especímenes ensayados a Compresión**		**% Error**
Fuerza (kN)	**Desplazamiento (mm)**	**Fuerza (kN)**	**Desplazamiento (mm)**	
0	0	0	0	0
125.629	0.98	125.662	0.76	22.91%
143.902	1.33	143.938	0.87	34.69%
150.060	1.46	150.130	0.90	38.30%
155.927	1.59	155.974	1.06	33.08%
158.055	1.64	158.030	1.08	33.92%
160.153	1.69	160.183	1.08	36.01%
163.232	1.76	163.198	1.01	42.69%
164.823	1.80	164.854	1.03	42.54%
166.391	1.84	166.360	1.17	36.31%
168.713	1.89	168.702	1.22	35.62%
172.127	1.98	172.169	1.30	34.42%
177.094	2.11	177.066	1.36	35.73%
184.237	2.31	184.238	1.98	14.29%
194.352	2.60	194.386	1.91	26.35%
203.859	2.89	203.888	2.67	7.44%
208.638	3.04	208.668	3.00	1.34%
213.285	3.20	213.233	3.15	1.57%
220.032	3.43	220.032	3.39	1.18%
229.699	3.77	229.694	3.65	3.28%
243.327	4.29	243.336	3.97	7.44%
252.960	4.68	252.933	4.29	8.33%

257.610	4.87	257.557	4.39	9.86%
262.162	5.07	262.176	4.51	10.97%
268.811	5.36	268.815	4.63	13.54%
278.420	5.79	278.410	5.32	8.10%
283.074	6.01	283.077	5.49	8.64%
287.637	6.23	287.636	5.65	9.32%
294.319	6.56	294.323	5.85	10.85%
304.004	7.05	304.018	6.36	9.74%
308.708	7.29	308.692	6.71	8.03%
313.324	7.54	313.327	7.08	6.08%
320.096	7.91	319.939	8.09	2.34%
326.696	8.28	326.423	9.00	8.72%
336.299	8.83	335.028	9.21	4.36%
341.208	9.12	340.280	9.35	2.50%
346.031	9.41	345.591	9.48	0.71%
353.115	9.84	352.516	9.62	2.27%
358.309	10.17	358.024	9.75	4.12%
363.428	10.50	363.504	9.88	5.86%
370.921	10.99	370.623	10.03	8.73%
ERROR PROMEDIO				15.80%
ERROR MÍNIMO				0.71%
ERROR MÁXIMO				42.69%

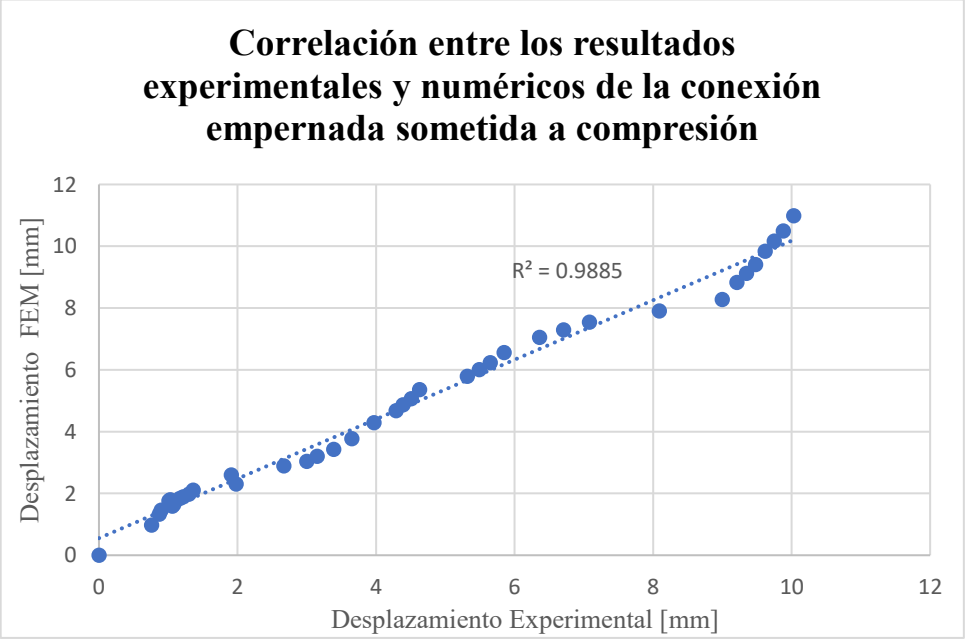


Fig. 60. Correlación entre los resultados experimentales y numéricos de la conexión empernada sometida a compresión

La figura Fig. 61 presenta la correlación entre los resultados obtenidos experimentalmente y los predichos por el modelo de elementos finitos para la conexión empernada sometida a compresión. Cada punto representa un par de datos correspondientes a los valores experimentales y numéricos evaluados para un mismo estado de carga. La proximidad de los puntos a la línea de tendencia evidencia una adecuada concordancia entre ambos conjuntos de datos. Asimismo, el coeficiente de determinación (R^2) obtenido indica el grado de correlación existente entre los resultados experimentales y los numéricos, permitiendo evaluar la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento observado en los ensayos.

El coeficiente de determinación obtenido (R^2=0.98) indica que aproximadamente el 98% de la variabilidad de los resultados experimentales es explicada por el modelo numérico, evidenciando una fuerte correlación entre ambos métodos de análisis y respaldando la validez del modelo desarrollado.

El modelo numérico presentó un error promedio de 15.80 % respecto a los desplazamientos experimentales obtenidos en los ensayos de compresión. Este nivel de discrepancia se encuentra dentro de márgenes aceptables para procesos de validación de modelos de elementos finitos aplicados a conexiones estructurales, evidenciando una adecuada capacidad predictiva del modelo. En consecuencia, se considera que la simulación reproduce satisfactoriamente la rigidez y el comportamiento global de la conexión, permitiendo su utilización para el análisis de la respuesta estructural bajo condiciones de carga similares.

3.2. Verificación de hipótesis

Con el propósito de validar el modelo numérico desarrollado para las conexiones entre perfiles conformados en frío de sección transversal UV en acero ASTM A572 Grado 50, se llevó a cabo una comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos mediante un programa de modelación numérica basado en el método de los elementos finitos. El modelo fue formulado considerando un análisis no lineal con grandes deformaciones, permitiendo representar de manera más realista el comportamiento mecánico de la conexión bajo las condiciones de carga evaluadas.

A partir de los resultados obtenidos, se construyeron las curvas fuerza–desplazamiento correspondientes a cada configuración analizada, las cuales constituyeron el principal criterio de comparación entre la respuesta experimental y la numérica. Adicionalmente, se evaluaron parámetros representativos del comportamiento estructural de la conexión, tales como la carga máxima alcanzada, la rigidez inicial y la evolución de las deformaciones a lo largo del proceso de carga.

La concordancia entre ambas metodologías fue analizada mediante herramientas estadísticas y comparaciones directas de las curvas obtenidas, permitiendo determinar el grado de representatividad del modelo numérico respecto al comportamiento observado experimentalmente. Los resultados evidenciaron una adecuada correspondencia entre ambas respuestas, demostrando que el modelo desarrollado es capaz de reproducir satisfactoriamente la respuesta mecánica de las conexiones estudiadas dentro del rango de análisis considerado.

En consecuencia, la similitud observada entre los resultados experimentales y numéricos permite validar el modelo de elementos finitos propuesto para el estudio de conexiones entre perfiles conformados en frío de sección transversal UV. Por tanto, se concluye que la metodología de modelación empleada constituye una herramienta confiable para la evaluación del comportamiento estructural de este tipo de conexiones y para el análisis de configuraciones similares en aplicaciones asociadas a torres de telecomunicaciones.

Costos

En este apartado se presentará el análisis de los costos, se deberá considerar costos adquisición de materiales y ensamblaje de la conexión, tomado en cuenta que para el desarrollo de cada una de las probetas fue necesario mano de obra de soldadores, maquinaria de doblado y soldado etc. Se realizará una clasificación de costos directos e indirectos denotando que algunos ensayos fueron realizados en los laboratorios de civil de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y en el Laboratorio de ensayo de Materiales LenMaV.

- Costos directo

TABLA XIX

LISTADO DE COMPONENTES Y COSTOS PARA LA FABRACIÓN

COMPONENTE	**CANTIDAD**	**COSTO UNITARIO [USD]**	**COSTO TOTAL [USD]**
Plancha de acero ASTM A572 Gr.50 de 6 mm	1	$ 110.00	$ 110.00
Plancha de acero ASTM A572 Gr.50 de 8 mm	1	$ 110.00	$ 110.00
Pernos ASTM A325	100	$ 1.50	$ 150.00
Placas de 270x75x15mm	4	$ 8.25	$ 33.00
TOTAL [USD]			**$ 403**

TABLA XX

LISTADO DE INSUMOS Y COSTOS PARA MUESTRAS DE TRACCIÓN

PROCESO	**CANTIDAD**	**COSTO UNITARIO**	**COSTO TOTAL**
Cortado de placas 110x80x110x6mm	4	$ 2.00	$ 8.00
Cortado de placas de 300x106x8mm	4	$ 2.00	$ 8.00
Agujerado de placas	48	$ 1.00	$ 48.00
Doblado de placas 110x80x110x6mm	4	$ 5.00	$ 20.00
Cortado a láser de placas 216x55x8mm	12	$ 3.00	$ 36.00
Cortado a láser de placas 60x60x60x6mm	24	$ 3.00	$ 72.00
Doblado de placas de 60x60x60x6mm	12	$ 2.00	$ 24.00
Cortado a láser de retazos de 70x30.69x8mm	1	$ 1.00	$ 1.00
Cortado de una muesca láser en la placa de 270x75x15mm	6	$ 4.00	$ 24.00
Soldado de perfiles UV y placa	8	$ 30.00	$ 240.00
Ajuste de pernos con torquímetro	72	$ 2.00	$ 144.00
Ensayo en el Laboratorio de ensayo de Materiales LenMaV	1	$ 80.00	$ 80.00
TOTAL [USD]			**$ 705.00**

- Costos indirectos

TABLA XXI

LISTADO DE ENSAYOS Y COSTOS DE MANO DE OBRA

INSUMOS	**CANTIDAD**	**COSTO UNITARIO**	**COSTO TOTAL**
Electrodo 6011	2 libras	$ 2.50	$ 5.00
Electrodo 7018	5 libras	$ 4.50	$ 22.50
1 disco de cortar acero	1	$ 1.45	$ 1.45
1 disco de pulir acero	1	$ 2.20	$ 2.20
TOTAL [USD]			**$ 31.15**

- Costo total

TABLA XXII

LISTADO TOTAL DE COSTOS

TIPO DE COSTOS	**COSTO TOTAL [USD]**
Costos directos	$ 434.15
Costos indirectos	$ 705.00
TOTAL [USD]	**$ 1,139.15**

CAPÍTULO IV

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

- La construcción y ejecución de los ensayos bajo las normativas RCSC 2020, AISC 360 y AWS D1.1, las cuales permitieron parametrizar el diseño a tracción y compresión de la estructura a ser ensayada, permitieron identificar efectos como el cierre de holguras entre pernos y agujeros, redistribución geométrica de las placas laterales y la alineación del perfil UV en dirección de la carga.
- Los ensayos de tracción evidenciaron la pérdida de rigidez de la conexión cuando la carga se aproxima a la resistencia máxima, observándose plastificación seguida de endurecimiento por deformación y posterior falla por corte en bloque de las placas de conexión. Las tres probetas mostraron un comportamiento estable y dúctil, alcanzando una carga máxima promedio de 327.83 kN (tracción) y 367.49 kN (compresión), evidenciando una elevada capacidad resistente bajo este tipo de solicitación.
- Los ensayos de compresión realizados evidencian que la conexión empernada resiste más a compresión, así lo demuestra la carga promedio máxima a compresión de 367.49 kN frente a la carga máxima promedio de tracción de 327.83 kN. Esto implica que la estructura tiene la capacidad de transmitir grandes esfuerzos de compresión antes de perder su estabilidad estructural. Además, la mayor capacidad a compresión (367.49 kN) frente a tracción indica que para esta conexión el modo de falla gobernante es la fractura en bloque de las placas a tracción, mientras que a compresión la falla es dúctil por pandeo. Por lo tanto, el diseño debe verificarse prioritariamente a tracción, porque allí gobierna la falla.
- El planteamiento y uso de un modelo matemático en conjunto con un modelo de elementos finitos (FEM) permitió reproducir la falla en los componentes de la conexión. El análisis de la resistencia a tracción y compresión de la conexión empernada mediante el método de elementos finitos (FEM) y los ensayos de manera experimental indican una discrepancia promedio del 6.5% de su resistencia

a tracción y una discrepancia promedio del 15.80% de su resistencia a compresión. Tal discrepancia de compresión se atribuye a la mayor sensibilidad del modelo numérico a las condiciones de borde y la imperfección inicial numérica.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda utilizar las normativas RCSC 2020, AISC 360 y AWS D1.1 como referencia principal en el diseño de conexiones similares, ya que permiten establecer criterios técnicos claros para el dimensionamiento, la disposición de los pernos, las distancias mínimas entre perforaciones y los requisitos de fabricación y montaje. Esto contribuirá a que futuras investigaciones y aplicaciones estructurales mantengan un nivel adecuado de confiabilidad y comparabilidad en sus resultados.
- Se recomienda revisar y fortalecer el diseño de las placas de conexión en la zona sometida a tracción, debido a que en los ensayos se evidenció falla por corte en bloque y pérdida de rigidez cercana a la resistencia máxima. Para ello, podría considerarse el aumento del espesor de la placa, la modificación de la geometría de anclaje o la incorporación de refuerzos locales.
- Se recomienda tomar en cuenta, en futuras aplicaciones de la conexión, que su respuesta estructural fue superior bajo compresión que, bajo tracción, lo cual puede ser útil al momento de definir su uso en elementos sometidos a esfuerzos predominantes de compresión. No obstante, también debe verificarse que esta mayor capacidad no se vea afectada por fenómenos de inestabilidad, deformación local o pérdida de rigidez en servicio.
- Se recomienda continuar con la calibración del modelo de elementos finitos mediante la incorporación de más ensayos experimentales y el ajuste de los parámetros constitutivos del material, con el fin de reducir las discrepancias obtenidas entre el modelo numérico y los resultados reales, especialmente en compresión. De esta manera, el modelo podrá representar con mayor fidelidad el comportamiento de la conexión y servir como una herramienta más precisa para el análisis y diseño de futuras configuraciones estructurales. Es importante incluir imperfecciones modales escaladas en futuros modelos.

MATERIALES DE REFERENCIA

Referencias Bibliográficas

[1] N. Dhandar, A. Y. Vyavahare, y T. Nikose, “Along Wind Response of Communication Tower”, *Lect. Notes Civ. Eng.*, vol. 12, pp. 81–92, 2019, doi: 10.1007/978-981-13-0365-4_7.

[2] S. H. Lee y B. J. Choi, “Mechanical Properties of ASTM A572 Grades 50 and 60 Steels at High Temperatures”, *Appl. Sci. 2021, Vol. 11, Page 11833*, vol. 11, núm. 24, p. 11833, dic. 2021, doi: 10.3390/APP112411833.

[3] K. Poologanathan, G. Perampalam, S. Gunalan, y M. Corradi, “Structural Performance of Cold-Formed Steel (CFS) Structures”, *Build. 2023, Vol. 13, Page 1689*, vol. 13, núm. 7, p. 1689, jun. 2023, doi: 10.3390/BUILDINGS13071689.

[4] M. P. Groover, *FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA*, 3a ed. México D. F., 2007.

[5] A. Abidelah, A. Bouchaïr, y D. E. Kerdal, “Experimental and analytical behavior of bolted end-plate connections with or without stiffeners”, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 76, pp. 13–27, sep. 2012, doi: 10.1016/J.JCSR.2012.04.004.

[6] “Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-22) Download | American Institute of Steel Construction”. Consultado: el 21 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.aisc.org/Specification-for-Structural-Steel-Buildings-ANSIAISC-360-22-Download

[7] “Tensile test (a), b specimen and c dimensional procedure | Download Scientific Diagram”. Consultado: el 21 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Tensile-test-a-b-specimen-and-c-dimensional-procedure_fig1_342696352

[8] J. A. Swanson y R. T. Leon, “Bolted Steel Connections: Tests on T-Stub Components”, *J. Struct. Eng.*, vol. 126, núm. 1, pp. 50–56, ene. 2000, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:1(50).

[9] M. C. H. Yam y J. J. R. Cheng, “Behavior and design of gusset plate connections in compression”, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 58, núm. 5–8, pp. 1143–1159, ene. 2002, doi: 10.1016/S0143-974X(01)00103-1.

[10] K. K. Hon y R. E. Melchers, “Experimental behaviour of steel column bases”, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 9, núm. 1, pp. 35–50, ene. 1988, doi: 10.1016/0143-974X(88)90055-7.

[11] “Schematic of compression test | Download Scientific Diagram”. Consultado: el 21 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-compression-test_fig1_339458337

[12] L. An, J. Wu, y W. Jiang, “Experimental and numerical study of the axial stiffness of bolted joints in steel lattice transmission tower legs”, *Eng. Struct.*, vol. 187, pp. 490–503, may 2019, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.02.070.

[13] “(PDF) Analysis and Design of Telecommunication Monopole Towers with and without Camouflaged”. Consultado: el 21 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/370902457_Analysis_and_Design_of_Telecommunication_Monopole_Towers_with_and_without_Camouflaged

[14] P. S. Lee y G. McClure, “A general three-dimensional L-section beam finite element for elastoplastic large deformation analysis”, *Comput. Struct.*, vol. 84, núm. 3–4, pp. 215–229, ene. 2006, doi: 10.1016/J.COMPSTRUC.2005.09.013.

[15] W. Xu, Y. Hu, Y. Dai, N. Zhang, y T. Tong, “Finite element model analysis of bolt overlap for angle steel connections of 5G shared transmission towers”, *Front. Mech. Eng.*, vol. 11, p. 1584991, jul. 2025, doi: 10.3389/FMECH.2025.1584991/BIBTEX.

[16] M. Mahmood y W. Tizani, “A component model for column face in bending of extended HolloBolt connections”, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 182, p. 106655, jul. 2021, doi: 10.1016/J.JCSR.2021.106655.

[17] P. Wang, L. Sun, B. Zhang, X. Yang, F. Liu, y Z. Han, “Experimental studies on T-stub to hollow section column connection bolted by T-head square-neck one-side bolts under tension”, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 178, p. 106493, mar. 2021, doi: 10.1016/J.JCSR.2020.106493.

[18] M. D’Antimo, J. F. Demonceau, J. P. Jaspart, M. Latour, y G. Rizzano, “Experimental and theoretical analysis of shear bolted connections for tubular structures”, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 138, pp. 264–282, nov. 2017, doi: 10.1016/J.JCSR.2017.07.015.

[19] Z. Chen, J. Liu, y Y. Yu, “Experimental study on interior connections in modular steel buildings”, *Eng. Struct.*, vol. 147, pp. 625–638, sep. 2017, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.06.002.

[20] S. V. Sendanayake, D. P. Thambiratnam, N. J. Perera, T. H. T. Chan, y S. Aghdamy, “Enhancing the lateral performance of modular buildings through innovative inter-modular connections”, *Structures*, vol. 29, pp. 167–184, feb. 2021, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2020.10.047.

[21] F. W. Shi y Y. M. Li, “Innovative inner sleeve composite bolted connections for modular steel constructions: Experimental and numerical studies”, *J. Build. Eng.*, vol. 64, p. 105624, abr. 2023, doi: 10.1016/J.JOBE.2022.105624.

[22] C. Yang, H. Chen, y J. Ou, “Experimental study on seismic performance of modular steel construction beam-to-beam combined side column joint with blind bolted connection”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 184, p. 110431, mar. 2023, doi: 10.1016/J.TWS.2022.110431.

[23] M. Couchaux, M. D’Aniello, L. Falciano, B. Faggiano, M. Hjiaj, y R. Landolfo, “Finite Element Simulations on the Tensile Resistance of Bolted End-Plate Connections with Tubular Members”, *Open Constr. Build. Technol. J.*, vol. 12, núm. 1, pp. 177–186, may 2018, doi: 10.2174/1874836801812010177.

[24] A. T. Wheeler, M. J. Clarke, G. J. Hancock, y T. M. Murray, “Design Model for Bolted Moment End Plate Connections Joining Rectangular Hollow Sections”, *J.*

Struct. Eng., vol. 124, núm. 2, pp. 164–173, feb. 1998, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:2(164).

[25] R. Yan, H. Xin, M. Veljkovic, y L. S. Da Silva, "Tensile behaviour of asymmetric bolted square hollow section column splices", *Thin-Walled Struct.*, vol. 190, p. 111014, sep. 2023, doi: 10.1016/J.TWS.2023.111014.

[26] R. Yan, K. Mela, H. El Bamby, y M. Veljkovic, "Experimental investigation on the tensile behaviour of welded RHS high strength steel X-joints", *Eng. Struct.*, vol. 276, p. 115357, feb. 2023, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2022.115357.

[27] R. He, X. Shu, y Z. Zhang, "Experimental study on the tensile performance of high-strength blind-bolted T-stub with endplate tapping", *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, vol. 11, núm. 5, pp. 109–118, 2018, doi: 10.25103/JESTR.115.13.

[28] Y. Steige y K. Weynand, "Design resistance of end plate splices with hollow sections", *Steel Constr.*, vol. 8, núm. 3, pp. 187–193, sep. 2015, doi: 10.1002/STCO.201510023.

[29] L. Roquete, M. M. de Oliveira, A. M. C. Sarmanho, E. M. Xavier, y V. N. Alves, "Behavior and design formulation of steel CHS with sleeve connections", *J. Constr. Steel Res.*, vol. 177, p. 106465, feb. 2021, doi: 10.1016/J.JCSR.2020.106465.

[30] "Placa de acero laminada en caliente ASTM A572 Grado 50 Fabricante, proveedores, fábricas y compañía - SHAANXI SHEW-E STEEL PIPE CO., LTD". Consultado: el 12 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.shew-esteelpipe.com/steel-plate-coil/hot-rolled-steel-plate-astm-a572-grade-50.html

[31] "Lámina A36 - Cia. General de Aceros S.A." Consultado: el 12 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.cga.com.co/producto/lamina-a36/

[32] "Electrodo Aga 6011 1/8" 3,25Mm C/Kg Reta - AGA - Kywi". Consultado: el 12 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en:

https://www.kywi.com.ec/electrodo-aga-6011-1-8-3-25mm-c-kg-reta/p

[33] “Electrodo E 7018 / 3.2 mm de diámetro / 1/8 pulgadas y 35 cm. Electrodo con revestimiento de bajo hidrógeno. - AGA - Kywi”. Consultado: el 12 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.kywi.com.ec/electrodo-aga-7018-1-8-325mm-c-kg/p?srsltid=AfmBOoqLvy_ej3elnD9akr7lCdw8LKKceOlWdlfs-ltsUYFCSmywFeH6

[34] “Dobladora de metal: ¿cómo usarla adecuadamente? - Tecnomaquinaria”. Consultado: el 12 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.tecnomaquinaria.com/dobladora-de-metal-como-usarla-adecuadamente/

[35] “EQUIPO DE SOLDADURA SMAW GTAW GMAW FCAW CAC-A – RGA – Diseño y Construcción”. Consultado: el 12 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://rga-ec.com/product/equipo-de-soldadura-smaw-gtaw-gmaw-fcaw-cac-a/

[36] “TORQUIMETRO DIGITAL DE 1/2 10-200 NWETONS METRO | Pintulac”. Consultado: el 12 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.pintulac.com.ec/torquimetro-1-2-pulgada-digital-10-200nm-jtc.html?srsltid=AfmBOoqLEHFMB3lvvZu2MDIGMdp_63U1T7JtCq9GWmzGLASFd36ZH_z2

[37] Y. F. Li, O. Jobe, C. C. Yu, y Y. T. Chiu, “Experiment and analysis of bolted GFRP beam–beam connections”, *Compos. Struct.*, vol. 127, pp. 480–493, sep. 2015, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2015.03.001.

[38] D. Hinse, M. Thode, A. Rademacher, K. Pantke, y C. Spura, “Numerical identification of position-dependent friction coefficients from measured displacement data in a bolt-nut connection”, *Results Eng.*, vol. 19, p. 101214, sep. 2023, doi: 10.1016/J.RINENG.2023.101214.

[39] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, “Riesgo sísmico, evaluación, rehabilitación de estructuras. Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-SE-

RE", Quito, Ecuador, 2014.

[40] I. Díaz-Velazco y A. A. Del Savio, "Numerical simulation of extended end-plate connections under combined loading and bolt pretension", *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 30, núm. 6, p. 100530, jun. 2026, doi: 10.1016/J.KSCEJ.2026.100530.

[41] C. L. Li, H. Yuan, y H. P. Hong, "Predicting yield strength of cold-formed carbon steel: A review and new approaches", *J. Constr. Steel Res.*, vol. 206, p. 107926, jul. 2023, doi: 10.1016/J.JCSR.2023.107926.

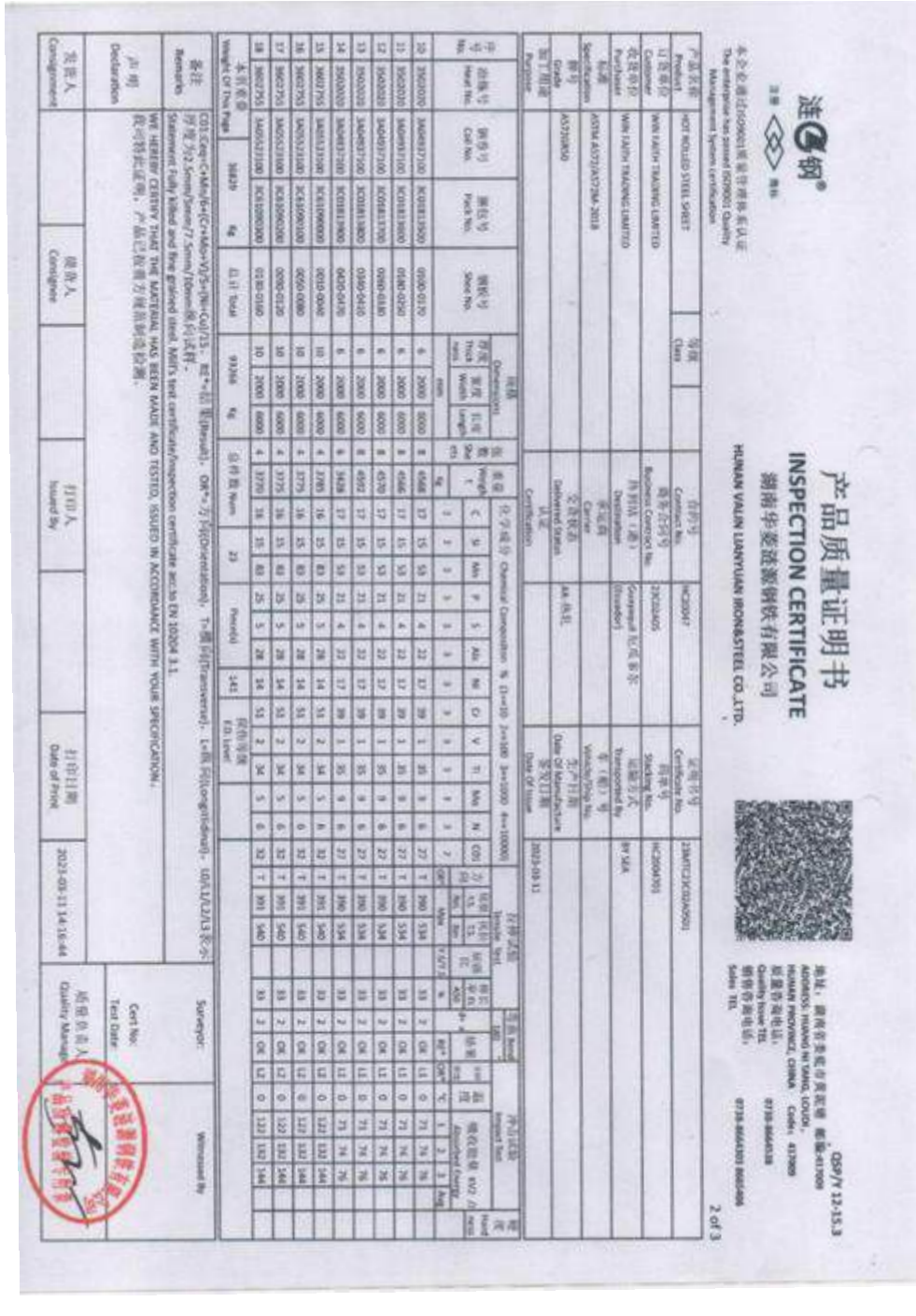
[42] O. D. A. Castro y J. I. T. Bonilla, "MODELO DE MATERIAL PARA PERFILES CONFORMADO EN FRÍO DE SECCIÓN TRANSVERSAL UV DE ACERO A572, PARA ESPESORES DE 10 mm Y 12 mm.", Universidad Técnica de Ambato, 2024.

[43] L. Yang, M. Wang, Y. Sun, Z. Li, y Y. Li, "Experimental and numerical study of LY315 steel moment connection with bolted cover plates", *Thin-Walled Struct.*, vol. 159, p. 107277, feb. 2021, doi: 10.1016/J.TWS.2020.107277.

[44] M. Seif, J. Main, J. Weigand, T. P. McAllister, y W. Luecke, "Finite element modeling of structural steel component failure at elevated temperatures", *Structures*, vol. 6, pp. 134–145, may 2016, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2016.03.002.

Anexos

Anexo 1. Certificados de calidad del Acero ASTM A572 Gr.50



产品质量证明书

INSPECTION CERTIFICATE

湖南华菱涟源钢铁有限公司

HUNAN VALIN LIANYUAN IRON&STEEL CO.,LTD.

鞍钢股份有限公司
Angang Steel Company Limited

产品质量证明书
INSPECTION CERTIFICATE

中国鞍山市铁东区团结街42号 邮编 114002
No.42 Tuanjie Street Tiedong District 114002
Anshan. P. R. China
Tel 0086-8008900858 Fax 0086-0412-6728486

制造厂 Manufacturer: 鞍钢股份有限公司鲅鱼圈中厚板厂3800线 Bayuquan Heavy Plate Plant 3800 Line of AnSteel

订货单位 Buyer	鞍钢集团国际经济贸易有限公司	产品名称 Product	中厚板 Medium and Heavy plate	合同编号 Contract No.	C2520160001	证明书编号 Certificate No.	C02503020028
收货单位 Consignee	鞍钢股份有限公司（外贸出口）	客户名称 Customer	鞍钢集团国际经济贸易有限公司			交货状态 Delivery Condition	热轧
标准 Specification	Q/ASB 146.6-2023	许可证编号 License No.					
钢牌号 Grade	A572Gr.50	发货日期 Date of Delivery	20250302	计重方式 Weight Mode	理论重量 Theory		

序号 No.	物料号 Pack No.	熔炼号 Heat No.	规格(mm) Dimensions mm	重量(kg) Weight	件数 Pcs	化学成分 Chemical Composition (%)										冷弯Bend		
						*1	C	Si	Mn	P	S	N	Nb	V	Ti	Cev	试样描述 *2	α°	试批号 Batch No.
							10 -3	10 -2	10 -2	10 -3	10 -3	10 -4	10 -3	10 -3	10 -3	10 -3			
1	S52281981000	25BD1177	8*2440*6000	919	1	0	169	18	136	16	10	30	1	2	14	403			
2	S52281991000	25BD1177	8*2440*6000	919	1	0	169	18	136	16	10	30	1	2	14	403			
3	S52281992000	25BD1177	8*2440*6000	919	1	0	169	18	136	16	10	30	1	2	14	403			
4	S52281993000	25BD1177	8*2440*6000	919	1	0	169	18	136	16	10	30	1	2	14	403			
5	S52281994000	25BD1177	8*2440*6000	919	1	0	169	18	136	16	10	30	1	2	14	403			
6	S52281995000	25BD1177	8*2440*6000	919	1	0	169	18	136	16	10	30	1	2	14	403			
7	S52281996000	25BD1177	8*2440*6000	919	1	0	169	18	136	16	10	30	1	2	14	403			
8	S52281997000	25BD1177	8*2440*6000	919	1	0	169	18	136	16	10	30	1	2	14	403			
合计Total				7352	8														

序号 No.	物料号 Pack No.	拉伸Tension							冲击Charpy										硬度Hardness					厚度方向性能(Z)						
		试样描述 p&d *2	屈服 Y.S. ReH	抗拉 T.S.	伸长率 El %	收缩率 Sh %	屈强比 Y.S./T.S. %	试批号 Batch No.	试样描述 p&d *2	温度 C	J					纤维率 SA %				试批号 Batch No.	试样描述 p&d *2	1	2	3	Ave	试批号 Batch No.	试样描述 p&d *2	1	2	3	Ave	试批号 Batch No.
			MPa	MPa							1	2	3	Ave	1	2	3	Ave										%			
1	S52281981000	T141	395	521	41			5P1017665900																						
2	S52281991000	T141	392	521	42.5			5P1017668000																						
3	S52281992000	T141	392	521	42.5			5P1017668000																						
4	S52281993000	T141	392	521	42.5			5P1017666000																						
5	S52281994000	T141	392	521	42.5			5P1017666000																						
6	S52281995000	T141	392	521	42.5			5P1017666000																						
7	S52281996000	T141	392	521	42.5			5P1017666000																						
8	S52281997000	T141	392	521	42.5			5P1017666000																						

探伤NDT	标准Standard：	级别Class：	结果Result：

注释 Notes

*1化学成分：0.熔炼分析 Heat Analysis，1.产品分析Product Analysis；*2试样描述 大样位置-T.头部Head，B.尾部Tail + 试验方向-1.横向 Transverse，2.纵向Longitudinal，3.Z向 + 取样位置-1.板宽1/4，2.板宽1/2，3.板边 + 状态-P.热轧 + 厚度方向位置-1、原厚，2、表面下2mm，3、厚度1/4，4、厚度1/2，5、保留一个机制面，6、表面下小于2mm，7、厚度1/3，8、厚度之半 + 试样热处理前后区分-0.交货态Delivery Condition，1.模拟焊后 PWHT，2.最大模拟焊后热处理 Max PWHT，3.最小模拟焊后热处理 Min PWHT。

1、CEV=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15.

备注 Remarks

上述元素仅列出参与复合公式的有意添加元素，但复合元素结果是严格按公式计算得出。The above elements only list the intentionally added elements that participate in the composite formula, but the composite element results are strictly calculated according to the formula. Elongation in 50 mm.

说明 Description

本产品已按上述标准制造和检验，其结果符合要求。特此证明。贵方如查询有关问题，请与我公司联系。
We hereby certify that material described herein has been manufactured and tested with satisfactory results in accordance with requirements of the above material specification. If you have any questions, please contact our company.

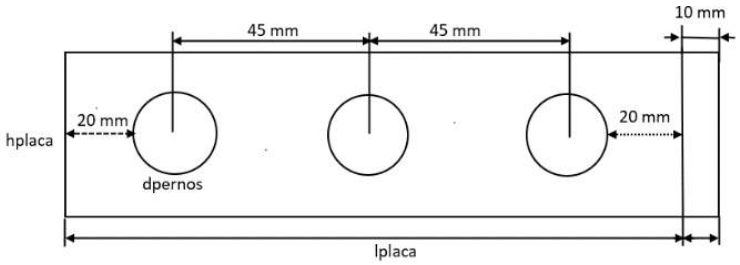
鞍钢股份有限公司 ANGANG STEEL COMPANY LIMITED CHINA 产品质量专用章

质量保证工程师 Quality Manager	监理 Surveyor

Anexo 2. Cálculos de la resistencia de la conexión empernada de prueba

CALCULOS DE RESISTENCIA DE LOS MIEMBROS A TRACCIÓN DE LA CONEXIÓN EMPERNADA DE PRUEBA

RESISTENCIA DE LA PLACA



Datos:

$h_{placa} = 109.05\ mm$

$l_{placa} = 149\ mm$

$d_{pernos} = 18\ mm \rightarrow Considerando\ el\ \frac{1}{8} in$

$e_{placa} = 8\ mm$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$

Solución:

Elementos cargados estáticamente a tracción:

Fluencia de los elementos de conexión:

$R_n = F_y A_g \qquad Ec1.\ \ J4-1\ del\ AISC$

$$\emptyset = 0.9\ (LRFD), \Omega = 1.67\ (ASD)$$

Fractura de los elementos de conexión:

$$R_n = F_u A_e \qquad Ec2.\ \ J4-2\ del\ AISC$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

Área total:

$A_g = e_{placa} * h_{placa}$

$A_g = 8\ mm * 109.05\ mm\ = 872.4\ mm^2$

Área neta:

$$A_n = A_g - d_{pernos} * e_{placa}$$

$$A_n = 872.4\ mm^2 - 16\ mm * 8\ mm$$

$$A_n = 744.4\ mm^2$$

$$0.85\ A_g = 741.54\ mm^2$$

Área neta efectiva:

$$\cup = 1\ (\ Tabla\ D3.1\ del\ AISC)$$

$$A_e = \cup\ A_n \qquad Ec3.\ \ D3-1\ del\ AISC$$

$$A_e = 1 * 744.4\ mm^2$$

$$A_e = 744.4\ mm^2$$

LRFD:

$\emptyset R_n = \emptyset F_y A_g = 0.9\ (344.738\ MPa)\ (872.4\ mm^2) = 262.794\ kN$

$\emptyset R_n = \emptyset F_u A_e = 0.75\ (448.156\ MPa)\ (744.4\ mm^2) = 250.207\ kN$

Calculo para obtener el espesor de la placa para que tenga una resistencia mayor que el perfil:

LRFD:

$$\emptyset R_n = \emptyset F_u A_e$$

$$250.207\ kN = 0.75\ (448.156\ MPa) A_n$$

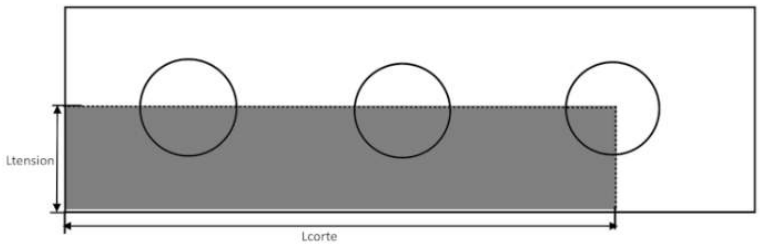
$$A_n = \frac{250207\ N}{0.75\ (344.73\ MPa)} = 967.72\ mm^2$$

$$0.85 A_g = 967.72 mm^2 \rightarrow A_g = 1138.494\ mm^2$$

$$1138.494\ mm^2 = e_{placa} * 149\ mm$$

$$e_{placa} = \frac{1138.494\ mm^2}{149\ mm} = 7.64\ mm \rightarrow 8\ mm$$

RESISTENCIA DE LA PLACA AL CORTE (TRACCIÓN):



Datos:

$L_{corte} = 119.525\ mm$

$L_{tension} = 54.525\ mm$

$d_{pernos} = 18\ mm \rightarrow Considerando\ el\ \frac{1}{8} in$

$e_{placa} = 8\ mm$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$

Solución:

Fluencia al corte:

$$R_n = 0.60F_yA_{gv} \quad Ec4.\ J4-3\ del\ AISC$$

$$\emptyset = 1.00\ (LRFD), \Omega = 1.50\ (ASD)$$

$$A_{gv} = L_{corte} * e_{placa}$$

$$A_{gv} = 119.525\ mm * 8\ mm = 956.2\ mm^2$$

$$R_n = 0.60F_y * A_{gv}$$

$$R_n = 0.60(344.738\ MPa) * 956.2\ mm^2$$

$$R_n = 197.783\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = \emptyset R_n = 197.783\ kN$

Rotura por cizallamiento de la placa:

$$R_n = 0.60F_uA_{nv} \quad Ec5.\ J4-4\ del\ AISC$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

$$A_{nv} = \left(A_{gv} - 2.5\left(d_{pernos}\right) * \left(e_{placa}\right)\right)$$

$$A_{nv} = (956.2\ mm^2 - 2.5(19\ mm)(8\ mm))$$

$$A_{nv} = 575.2\ mm^2$$

$$R_n = 0.60F_uA_{nv}$$

$$R_n = 0.60 * (448.156\ MPa) * (575.2\ mm^2)$$

$$R_n = 154.669\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = \emptyset R_n = 116.002\ kN$

Resistencia al corte en bloque:

$$R_n = 0.60F_uA_{nv} + U_{bs}F_uA_{nt} \leq 0.60F_yA_{gv} + U_{bs}F_uA_{nt} \qquad Ec6.\ J4-5\ del\ AISC$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

$$U_{bs} = 1 \rightarrow Esfuerzo\ uniforme$$

$$A_{nt} = L_{tension} * e_{placa} - 0.5\left(d_{pernos}\right) * e_{placa}$$

$$A_{nt} = 54.525\ mm * 8\ mm - 0.5\ (19\ mm) * 8mm$$

$$A_{nt} = 360\ mm^2$$

$$R_n = 0.60F_uA_{nv} + U_{bs}F_uA_{nt} \leq 0.60F_yA_{gv} + U_{bs}F_uA_{nt}$$

$$R_n = 0.60(448.156\ MPa)(575.2mm^2) + (1)(448.156\ MPa)(360\ mm^2)$$
$$\leq 0.60(344.738\ MPa)(956.2\ mm^2) + (1)(448.156\ MPa)(360\ mm^2)$$

LRFD:

$\emptyset R_n = 237.005\ kN \leq 269.34\ kN$

$$\emptyset R_n = \ 237.005\ kN$$

ELEMENTOS AFECTADOS DE LOS MIEMBROS Y CONEXIONES A TRACCIÓN

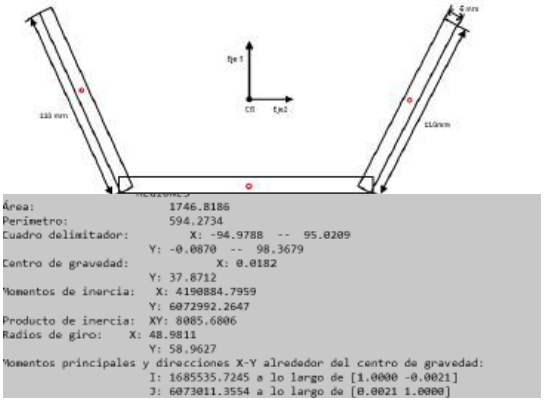
DISEÑO DE RESISTENCIA DEL PERFIL

Datos:

$e_{perfil} = 6\ mm$

$d_{agujeros} = 18\ mm$

$\rightarrow Considerando\ el\ \frac{1}{8} in$



$A_g = 1758.43\ mm^2$

$\bar{x} = 37.8712\ mm$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$

Solución:

Fluencia de los elementos de conexión:

$$R_n = F_y A_g$$

$$\emptyset = 0.9\ (LRFD), \Omega = 1.67\ (ASD)$$

Fractura de los elementos de conexión:

$$R_n = F_u A_e$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

Área total:

$A_g = 1758.43\ mm^2 \rightarrow Software$

Área neta:

$$A_n = A_g - 2\left(d_{agujeros}\right) * e_{perfil}$$

$$A_n = (1758.43\ mm^2) - 2(19\ mm) * 6\ mm$$

$$A_n = 1518.819\ mm^2$$

Área efectiva:

$l = 45\ mm$

$$\cup = 1 - \frac{\bar{x}}{l} \quad Ec7.\ Tabla\ D3.1\ del\ AISC$$

$$\cup = 1 - \frac{\bar{x}}{l} = 1 - \frac{37.87\ mm}{45\ mm} = 0.16$$

Mediante el caso 8 se obtiene: $\cup = 0.60$

$$A_e = \cup * A_n = 0.60 * 1530.43\ mm^2$$

$$A_e = 911.291\ mm^2$$

Fluencia de los elementos de conexión:

$$R_n = F_y A_g$$

$$R_n = (344.738\ MPa) * (1758.43\ mm^2)$$

$$R_n = 606.195\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = \emptyset R_n = \ 541.975\ kN$

Fractura de los elementos de conexión:

$$R_n = F_u A_e$$

$$R_n = (448.156\ MPa) * (911.291\ mm^2)$$

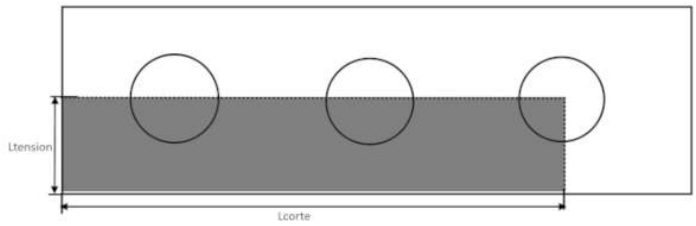
$$R_n = 408.4005\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = \emptyset R_n = \ 306.303\ kN$

RESISTENCIA DEL PERFIL AL CORTE (TRACCIÓN):

Datos:



$L_{corte} = 117.938\ mm$

$L_{tension} = 55\ mm$

$d_{pernos} = 18\ mm \rightarrow Considerando\ el\ \frac{1}{8} in$

$e_{perfil} = 6\ mm$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$

Solución:

Fluencia al corte:

$$R_n = 0.60 F_y A_{gv}$$

$$\emptyset = 1.00\ (LRFD), \Omega = 1.50\ (ASD)$$

$$A_{gv} = L_{corte} * e_{placa}$$

$$A_{gv} = 117.938\ mm * 6\ mm = 707.628\ mm^2$$

$$R_n = 0.60 F_y * A_{gv}$$

$$R_n = 0.60(344.738\ MPa) * 707.628\ mm^2$$

$$R_n = 146.368\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = \emptyset R_n = 146.368\ kN$

Rotura por cizallamiento del perfil:

$$R_n = 0.60 F_u A_{nv}$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

$$A_{nv} = \left(A_{gv} - 2.5\left(d_{pernos}\right) * \left(e_{placa}\right)\right)$$

$$A_{nv} = (707.628\ mm^2 - 2.5(19\ mm)(6\ mm))$$

$$A_{nv} = 422.628\ mm^2$$

$$R_n = 0.60 F_u A_{nv}$$

$$R_n = 0.60 * (448.156\ MPa) * (422.628\ mm^2)$$

$$R_n = 113.643\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = \emptyset R_n = 85.232\ kN$

Resistencia al corte en bloque:

$$R_n = 0.60 F_u A_{nv} + U_{bs} F_u A_{nt} \leq 0.60 F_y A_{gv} + U_{bs} F_u A_{nt}$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

$$U_{bs} = 1 \rightarrow Esfuerzo\ uniforme$$

$$A_{nt} = L_{tension} * e_{perfil} - 0.5\left(d_{pernos}\right) * e_{perfil}$$

$$A_{nt} = 55\ mm * 6\ mm - 0.5\ (19\ mm) * 6mm$$

$$A_{nt} = 273\ mm^2$$

$$R_n = 0.60 F_u A_{nv} + U_{bs} F_u A_{nt} \leq 0.60 F_y A_{gv} + U_{bs} F_u A_{nt}$$

$$R_n = 0.60(448.156\ MPa)(422.628\ mm^2) + (1)(448.156\ MPa)(273\ mm^2)$$
$$\leq 0.60(344.738\ MPa)(707.628\ mm^2)$$
$$+ (1)(448.156\ MPa)(273\ mm^2)$$

LRFD:

$$\emptyset R_n = 353.985\ kN \leq 403.073\ kN$$

$$\emptyset R_n = 353.985\ kN$$

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y CORTE DE LOS PERNOS:

Datos del perno:

$$\sigma_{A325} = 370\ \frac{N}{mm^2} \quad Tabla\ J3 - 2\ del\ AISC$$

$$A_b = 148.81\ mm^2$$

Acero ASTM A572 Gr.50

$$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$$

$$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$$

Solución:

TABLE J3.2
Nominal Stress of Fasteners and Threaded Parts, ksi (MPa)

Description of Fasteners	Nominal Tensile Stress, F_{nt}, ksi (MPa)[a][b]	Nominal Shear Stress in Bearing-Type Connections, F_{nv}, ksi (MPa)[c]	
		Threads Not Excluded from Shear Planes—(N)[e]	Threads Excluded from Shear Planes—(X)
A307 bolts	45 (310)	27 (190)[d]	27 (190)[d]
Group 120 (e.g., A325)	90 (620)	54 (370)	68 (470)
Group 144 (e.g., F3148)	108 (750)	65 (450)	81 (560)
Group 150 (e.g., A490)	113 (780)	68 (470)	84 (580)
Group 200 (e.g., F3043)	150 (1 000)	90 (620)[f]	113 (780)[f]
Threaded parts meeting the requirements of Section A3.4	$0.75F_u$	$0.450F_u$	$0.563F_u$

Roscas no excluidas de los planos de corte

Resistencia a la tracción y al corte de pernos y piezas cortadas:

$$R_n = F_n A_b \quad Ec8.J3 - 1\ del\ AISC$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

Tensile and Shear Strength of Bolts and Threaded Parts

The design tensile or shear strength, ϕR_n, and the allowable tensile or shear strength, R_n/Ω, of a snug-tightened or pretensioned high-strength bolt or threaded part shall be determined according to the limit states of tension rupture and shear rupture as

$$R_n = F_n A_b \qquad (J3\text{-}1)$$

$$\phi = 0.75\ (LRFD) \qquad \Omega = 2.00\ (ASD)$$

where

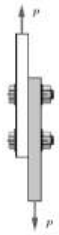
A_b = nominal unthreaded body area of bolt or threaded part, in.^{2} (mm^2)
F_n = nominal tensile stress, F_{nt}, or shear stress, F_{nv}, from Table J3.2, ksi (MPa)

Resistencia al deslizamiento crítico:

$$R_n = \mu D_u h_f T_b n_s \quad Ec9.J3 - 4\ del\ AISC$$

$$\emptyset = 1.00\ (LRFD), \Omega = 1.50\ (ASD)$$

$\mu = 0.35$



$D_u = 1.13$

$T_b = 54\ kN$

$h_f = 1$

$n_s = 0.85$

$$R_n = \mu D_u h_f T_b n_s$$

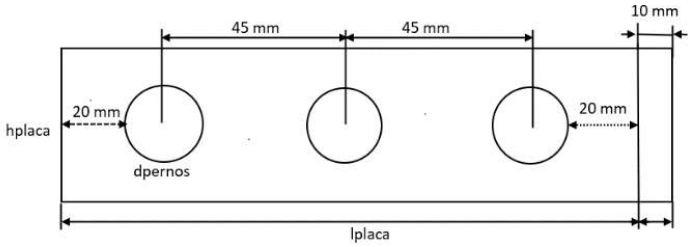
$$R_n = (0.5) * (1.13) * (1) * (54\ kN) * (0.85)$$

$$R_n = 18.153\ kN$$

LRFD:

$$\emptyset R_n = 18.153\ kN \rightarrow\ Pernos\ 5/8$$

PANDEO ELASTICO E INELASTICO DE LA PLACA



Datos:

$l_{placa} = 308.1\ mm$

$h_{placa} = 109.5\ mm$

$d_{pernos} = 18\ mm \rightarrow Considerando\ el\ \frac{1}{8} in$

$e_{placa} = 8\ mm$

$l_{critica} = 68\ mm$

$K = 1$

$A_g = 872.4\ mm^2$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$

Solución:

$$I_x = \frac{h_{placa} * (l_{placa})^3}{12} = \frac{109\ mm * (149.05\ mm)^3}{12} = 265778299.758\ mm^4$$

$$I_y = \frac{(h_{placa})^3 * l_{placa}}{12} = \frac{(109\ mm)^3 * 149.05\ mm}{12} = 33295647.269\ mm^4$$

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A_g}} = 551.953\ mm \qquad r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_g}} = 195.36\ mm$$

Resistencia de los elementos a compresión:

$$P_n = F_y A_g \quad Ec10.J3 - 1\ del\ AISC$$

$$\emptyset = 0.90\ (LRFD), \Omega = 1.67\ (ASD)$$

$$\frac{K * l_{critica}}{r_x} = 0.123\ < 25 \rightarrow menor$$

$$\frac{K * l_{critica}}{r_y} = 0.348 < 25$$

$$P_n = F_y A_g$$

$$P_n = (344.738\ MPa) * (872.4\ mm^2)$$

$$P_n = 300.749\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = 270.674\ kN$

APLASTAMIENTO DE LOS ORIFICIOS DE LA PLACA

Datos:

$d_{entre\ pernos} = 45\ mm$

$t = 8\ mm$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$

11a. Snug-Tightened or Pretensioned High-Strength Bolted Connections

All plies of the connected elements shall be in firm contact.

(1) The nominal strength of a connected element at a bolt in a connection with standard, oversized, and short-slotted holes, independent of the direction of loading, or a long-slotted hole with the slot parallel to the direction of the bearing force, shall be the lesser of the following:

(a) Bearing

(i) When deformation at the bolt hole at service load is a design consideration

$R_n = 2.4dtF_u$ (J3-6a)

Solución:

Conexiones atornilladas de alta resistencia ajustadas o pretensadas:

Cojinete en el perno 1 y 2:

$$R_n = 2.4d_tF_u \quad Ec11.J3-6a \ \ del\ AISC$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

$$R_n = 2.4dtF_u$$

$$R_n = 2.4(45\ mm)(8mm)(448.156\ MPa)$$

$$R_n = 163.919\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = 122.939\ kN$

Desgarro en el perno 1:

Distancia del perno al borde: $l_c = 20\ mm$

$$R_n = 1.2l_ctF_u$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

$$R_n = 1.2l_ctF_u$$

$$R_n = 1.2(20\ mm)(8mm)(448.156\ MPa)$$

$$R_n = 86.047\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = 64.535\ kN$

Desgarro en el perno 2:

Distancia entre pernos: $l_{c\ perno2} = 25.95\ mm$

$$R_n = 1.2 l_c t F_u$$

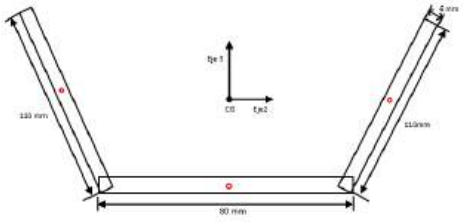
$$R_n = 1.2(25.95\ mm)(8mm)(448.156\ MPa)$$

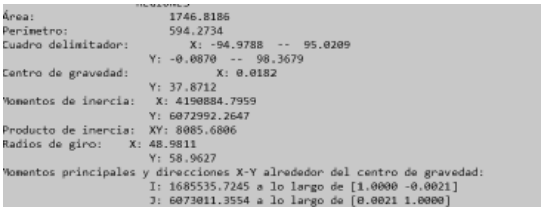
$$R_n = 111.645\ kN$$

LRFD: $\emptyset R_n = 83.734\ kN$

PANDEO ELASTICO E INELASTICO DEL PERFIL EN UV

Datos:





$e_{perfil} = 6\ mm$

$d_{agujeros} = 18\ mm$

$$\rightarrow Considerando\ el\ \frac{1}{8} in$$

$A_g = 1758.43\ mm^2$

$\bar{x} = 37.8712\ mm$

$r_x = 48.911\ mm$

$r_y = 58.9627\ mm$

$l_{critica} = 68\ mm$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$

Solución:

Resistencia de los elementos a compresión:

$$P_n = F_y A_g \quad Ec12.J3 - 1\ del\ AISC$$

$$\emptyset = 0.90\ (LRFD), \Omega = 1.67\ (ASD)$$

$$\frac{K * l_{critica}}{r_x} = \frac{1 * 68\ mm}{48.911\ mm} = 3.527\ < 25$$

$$\frac{K * l_{critica}}{r_y} = \frac{1 * 68mm}{58.9627\ mm} = 2.926 < 25 \rightarrow menor$$

$$P_n = F_y A_g$$

$$P_n = (344.738\ MPa) * (1758.43\ mm^2)$$

$$P_n = 606.197\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = 545.578\ kN$

APLASTAMIENTO DE LOS ORIFICIOS DEL PERFIL EN UV

Datos:

$d_{entre\ pernos} = 45\ mm$

$t = 6\ mm$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$

Solución:

Conexiones atornilladas de alta resistencia ajustadas o pretensadas:

Cojinete en el perno 1 y 2:

$$R_n = 2.4 d_t F_u \quad Ec13.J3 - 6a \ \ del\ AISC$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

$$R_n = 2.4 dt F_u$$

$$R_n = 2.4(45\ mm)(6mm)(448.156\ MPa)$$

$$R_n = 117.292\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = 87.969\ kN$

Desgarro en el perno 1:

Distancia del perno al borde: $l_c = 20\ mm$

$$R_n = 1.2 l_c t F_u$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

$$R_n = 1.2 l_c t F_u$$

$$R_n = 1.2(20\ mm)(6mm)(448.156\ MPa)$$

$$R_n = 64.535\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = 48.401\ kN$

Desgarro en el perno 2:

Distancia entre pernos: $l_{c\ perno2} = 25.95\ mm$

$$R_n = 1.2 l_c t F_u$$

$$R_n = 1.2(25.95\ mm)(6mm)(448.156\ MPa)$$

$$R_n = 86.557\ kN$$

LRFD: $\emptyset R_n = 64.918\ kN$

DISEÑO DE LA SOLDADURA A FILETE PARA PROBETA DE PRUEBA A TRACCIÓN

J2. WELDS AND WELDED JOINTS

Welding shall conform to the provisions of the *Structural Welding Code—Steel* (AWS D1.1/D1.1M), hereafter referred to as AWS D1.1/D1.1M, except where those provisions differ from this Specification. This Specification governs where provisions differ from AWS D1.1/D1.1M.

RESISTENCIA DE DISEÑO:

Datos:

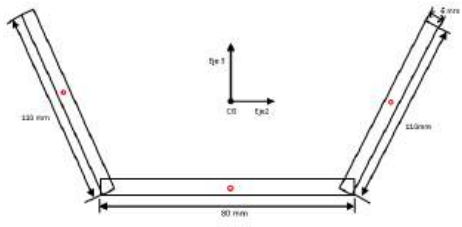
$Electrodo\ E7018$

$F_{EXX} = 482.63\ MPa$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$



Hablando desde un punto de vista general, las puntas de terminación de las soldaduras de filete no tienen mucho efecto sobre la resistencia y la capacidad de servicio de las conexiones. Sin embargo, para ciertas situaciones, esto no es totalmente correcto. Por ejemplo, las muescas no solamente afectan adversamente a la resistencia estática de una conexión, sino que también pueden reducir de manera marcada a la resistencia de la soldadura al desarrollo de grietas si se aplican cargas cíclicas de suficiente tamaño y frecuencia. Para estas situaciones, es aconsejable terminar las soldaduras antes de llegar al extremo de la junta.

Si las soldaduras se terminan a uno o dos tamaños (o tamaños de ala) del extremo de las juntas, se puede despreciar la reducción de resistencia. De hecho, estas reducciones de longitud generalmente no se consideran en el cálculo de la resistencia. Se presenta una discusión detallada de este tema en la Sección J2.2b del Comentario del Manual del AISC.

Resistencia a la fluencia por tracción de la sección total del perfil:

LRFD:

$\emptyset R_n = 541.975\ kN$

Resistencia a la fractura por tracción de la sección total del perfil

LRFD:

$\emptyset R_{nf} = 367.563\ kN$

DISEÑO DE LA SOLDADURA

TABLA 14.2 Tamaños mínimos para las soldaduras de filete.

Espesor del material de la parte unida más delgada, plg (mm)	Tamaño mínimo de las soldaduras de filete,[a] plg (mm)
Hasta $\frac{1}{4}$ (6) inclusive	$\frac{1}{8}$ (3)
Mayor de $\frac{1}{4}$ (6) hasta $\frac{1}{2}$ (13)	$\frac{5}{16}$ (5)
Mayor de $\frac{1}{2}$ (13) hasta $\frac{3}{4}$ (19)	$\frac{1}{4}$ (6)
Mayor de $\frac{3}{4}$ (19)	$\frac{5}{16}$ (8)

[a] Dimensión del ala de las soldaduras de filete. La soldadura debe ser de una sola pasada. Véase la Sección J2.2b de la Especificación LRFD para el tamaño máximo de las soldaduras de filete.
Fuente: Especificación del AISC, Tabla J2.4, p. 16.1-111, junio 22, 2010.
"Derechos reservados © American Institute of Steel Construction. Reimpreso con autorización. Todos los derechos reservados."

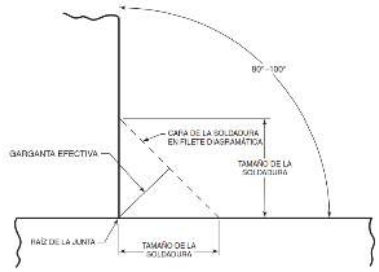
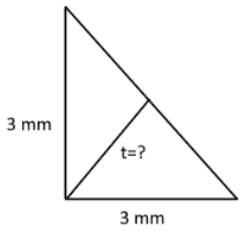


Figura 4.1—Soldadura en filete (ver 4.4.2.6)

$$T_{soldadura} = 6mm$$

RESISTENCIA DE DISEÑO



$Garganta\ efectiva:$

$t = 0.707 * T_{soldadura}$

$t = 0.707 * 6mm = 4.242\ mm$

En este estudio se consideran las soldaduras de filete de la Figura 14.15. Para determinar la resistencia nominal total de las soldaduras, parece lógico que debamos sumar la resistencia nominal de las soldaduras laterales, que se calcula con $R_n = F_w A_w$ y con $F_w = 0.60F_{EXX}$, a la resistencia nominal de las soldadura de extremo o transversales, que se calculan con $R_n = 0.60F_{EXX}(1.0 + 0.50\ \text{sen}^{1.5}\theta)A_w$. Sin embargo, este procedimiento no es correcto, ya que las soldaduras transversales menos dúctiles alcanzan su capacidad de deformación última antes de que las soldaduras laterales o longitudinales alcancen su resistencia máxima. Como resultado de este hecho, el AISC en su Sección J2.4c establece que la resistencia nominal total de una conexión con soldaduras laterales y transversales debe ser igual al mayor de los valores obtenidos con las dos siguientes ecuaciones:

Resistencia nominal de la soldadura transversal

$A_\omega = l_{perfil} * t = 1230.18\ mm^2$

$\alpha = 90°$

$$R_n = 0.30F_{EXX}(1 + 0.5 * \sin^{1.5}\alpha) * A_\omega \qquad Ec14.J2 - 5\ \ del\ AISC$$

$R_n = 0.30(482.63\ MPa) * (1 + 0.5 * \sin^{1.5}90) *\ 1230.18\ mm^2$

$R_n = 534.35\ kN$

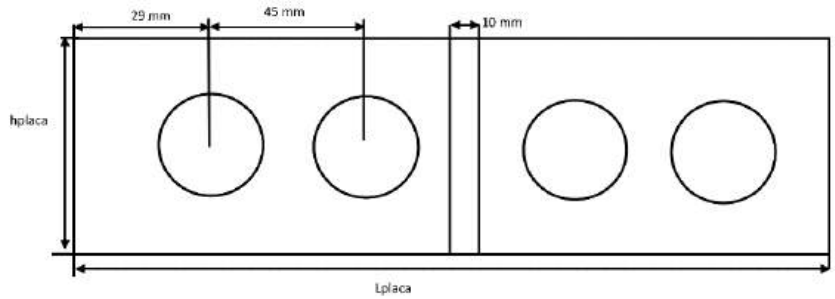
$\boldsymbol{LRFD: \theta = 0.75}$

$$\theta R_n = \theta * R_n = 0.75 * 534.35\ kN = 400.762\ kN$$

Anexo 3. Cálculos de la conexión empernada a ensayar

CALCULOS DE RESISTENCIA DE LOS MIEMBROS A TRACCIÓN DE LA CONEXIÓN PERNADA

RESISTENCIA DE LA PLACA



Datos:

$h_{placa} = 55.05\ mm$

$l_{placa} = 104.05\ mm$

$d_{pernos} = 18\ mm \rightarrow Considerando\ el\ \frac{1}{8} in$

$e_{placa} = 8\ mm$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$

Solución:

Elementos cargados estáticamente a tracción:

Fluencia de los elementos de conexión:

$R_n = F_y A_g$

$$\emptyset = 0.9\ (LRFD), \Omega = 1.67\ (ASD)$$

Fractura de los elementos de conexión:

$$R_n = F_u A_e$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

Área total:

$A_g = e_{placa} * h_{placa}$

$A_g = 8\ mm * 55.05\ mm\ = 440.4\ mm^2$

Área neta:

$$A_n = A_g - d_{pernos} * e_{placa}$$

$$A_n = 440.4\ mm^2 - 16\ mm * 8\ mm$$

$$A_n = 288\ mm^2$$

$$0.85\ A_g = 374.34\ mm^2$$

Área neta efectiva:

$$\cup = 1\ (\ Tabla\ D3.1\ del\ AISC)$$

$$A_e = \cup A_n \qquad Ec3.\ \ D3 - 1\ del\ AISC$$

$$A_e = 1 * 288\ mm^2$$

$$A_e = 288\ mm^2$$

LRFD:

$\emptyset R_n = \emptyset F_y A_g = 0.9\ (344.738\ MPa)\ (374.34\ mm^2) = 116.14\ kN$

$\emptyset R_n = \emptyset F_u A_e = 0.75\ (448.156\ MPa)\ (288\ mm^2) = 96.802\ kN$

Calculo para obtener el espesor de la placa para que tenga una resistencia mayor que el perfil:

LRFD:

$$\emptyset R_n = \emptyset F_u A_e$$

$$250.207\ kN = 0.75\ (448.156\ MPa) A_n$$

$$A_n = \frac{250207\ N}{0.75\ (344.73\ MPa)} = 374.4 mm^2$$

$$0.85 A_g = 374.4 mm^2 \rightarrow A_g = 440.470\ mm^2$$

$$440.470\ mm^2 = e_{placa} * 104.05\ mm$$

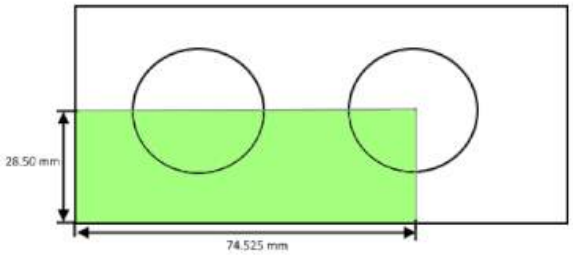
$$e_{placa} = \frac{440.470 mm^2}{104.05\ mm} = 4.23\ mm \rightarrow 5\ mm$$

RESISTENCIA DE LA PLACA AL CORTE (TRACCIÓN):

Strength of Elements in Tension

The design strength, ϕR_n, and the allowable strength, R_n/Ω, of affected and connecting elements loaded in tension shall be the lower value obtained according to the limit states of tensile yielding and tensile rupture.

Datos:



$L_{corte} = 74.525\ mm$

$L_{tension} = 37.525\ mm$

$d_{pernos} = 18\ mm \rightarrow Considerando\ el\ \frac{1}{8} in$

$e_{placa} = 8\ mm$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$

Solución:

Fluencia al corte:

$$R_n = 0.60F_yA_{gv}$$

$$\emptyset = 1.00\ (LRFD), \Omega = 1.50\ (ASD)$$

$$A_{gv} = L_{corte} * e_{placa}$$

$$A_{gv} = 119.525\ mm * 8\ mm = 596.2\ mm^2$$

$$R_n = 0.60F_y * A_{gv}$$

$$R_n = 0.60(344.738\ MPa) * 596.2\ mm^2$$

$$R_n = 123.32\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = \emptyset R_n = 123.32\ kN$

Rotura por cizallamiento de la placa:

$$R_n = 0.60F_uA_{nv}$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

$$A_{nv} = \left(A_{gv} - 1.5\left(d_{pernos}\right) * \left(e_{placa}\right)\right)$$

$$A_{nv} = (596.2\ mm^2 - 1.5(18\ mm)(8\ mm))$$

$$A_{nv} = 367.6\ mm^2$$

$$R_n = 0.60F_uA_{nv}$$

$$R_n = 0.60 * (448.156\ MPa) * (367.6\ mm^2)$$

$$R_n = 98.846\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = \emptyset R_n = 74.134\ kN$

Resistencia al corte en bloque:

$$R_n = 0.60F_uA_{nv} + U_{bs}F_uA_{nt} \leq 0.60F_yA_{gv} + U_{bs}F_uA_{nt}$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

$$U_{bs} = 1 \rightarrow Esfuerzo\ uniforme$$

$$A_{nt} = L_{tension} * e_{placa} - 0.5(d_{pernos}) * e_{placa}$$

$$A_{nt} = 37.525\ mm * 8\ mm - 0.5\ (18\ mm) * 8mm$$

$$A_{nt} = 224\ mm^2$$

$$R_n = 0.60F_uA_{nv} + U_{bs}F_uA_{nt} \leq 0.60F_yA_{gv} + U_{bs}F_uA_{nt}$$

$$R_n = 0.60(448.156\ MPa)(367.6\ mm^2) + (1)(448.156\ MPa)(224\ mm^2)$$
$$\leq 0.60(344.738\ MPa)(596.2\ mm^2) + (1)(448.156\ MPa)(224\ mm^2)$$

LRFD:

$\emptyset R_n = 149.425\ kN \leq 167.78\ kN$

$\emptyset R_n = \ 149.425\ kN$

PORCENTAJE DE ELONGACIÓN DE LA PROBETA 1

$L_{inicial} = 350\ mm$

$L_{final} = L_{inicial} + 37.78\ mm = 387.78\ mm$

$$\%P1 = \frac{L_{final} - L_{inicial}}{L_{final}} * 100 = 10.794\ \%$$

PORCENTAJE DE ELONGACIÓN DE LA PROBETA 2

$L_{inicial} = 350\ mm$

$L_{final} = L_{inicial} + 33.39\ mm = 383.39\ mm$

$$\%P2 = \frac{L_{final} - L_{inicial}}{L_{final}} * 100 = 9.54\ \%$$

PORCENTAJE DE ELONGACIÓN DE LA PROBETA 3

$L_{inicial} = 350\ mm$

$L_{final} = L_{inicial} + 36.98\ mm = 383.39\ mm$

$$\%P2 = \frac{L_{final} - L_{inicial}}{L_{final}} * 100 = 10.56\ \%$$

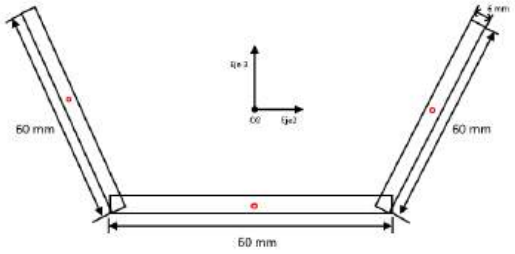
PORCENTAJE DE PONDERACION DE LAS PROBETAS

$$P_{probetas} = \frac{\%P1 + \%P2 + \%P3}{3} = 10.3\ \%$$

ELEMENTOS AFECTADOS DE LOS MIEMBROS Y CONEXIONES A TRACCIÓN

DISEÑO DE RESISTENCIA DEL PERFIL

Datos:



$e_{perfil} = 6\ mm$

$d_{agujeros} = 18\ mm \rightarrow Considerando\ el\ \frac{1}{8} in$

$A_g = 1026.6024\ mm^2$

$\bar{x} = 20.18\ mm$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$

Solución:

Fluencia de los elementos de conexión:

$$R_n = F_y A_g$$

$$\emptyset = 0.9\ (LRFD), \Omega = 1.67\ (ASD)$$

Fractura de los elementos de conexión:

$$R_n = F_u A_e$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

Área total:

$A_g = 1026.6024\ mm^2 \rightarrow Software$

Área neta:

$$A_n = A_g - 2\left(d_{agujeros}\right) * e_{perfil}$$

$$A_n = (1026.6024\ mm^2) - 2(18\ mm) * 6\ mm$$

$$A_n = 810.82\ mm^2$$

Área efectiva:

8	Single and double angles. (If U is calculated per Case 2, the larger value is permitted to be used.)	with four or more fasteners per line in the direction of loading	$U = 0.80$	–
		with three fasteners per line in the direction of loading (with fewer than three fasteners per line in the direction of loading, use Case 2)	$U = 0.60$	–

$l = 45\ mm$ $(longitud\ de\ la\ linea\ con\ el\ número\ máximo\ de\ tornillos\ )$

$$\cup = 1 - \frac{\bar{x}}{l} \qquad Tabla\ D3.1\ del\ AISC$$

$$\cup = 1 - \frac{\bar{x}}{l} = 1 - \frac{20.18\ mm}{45\ mm} = 0.55$$

Mediante el caso 8 se obtiene: $\cup = 0.60$

$$A_e = \cup * A_n = 0.60 * 798.82\ mm^2$$

$$A_e = 486.492\ mm^2$$

Fluencia de los elementos de conexión:

$$R_n = F_y A_g$$

$$R_n = (344.738\ MPa) * (1026.82\ mm^2)$$

$$R_n = 353.984\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = \emptyset R_n =\ 318.585\ kN$

Fractura de los elementos de conexión:

$$R_n = F_u A_e$$

$$R_n = (448.156\ MPa) * (911.291\ mm^2)$$

$$R_n = 218.026\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = \emptyset R_n =\ 163.519\ kN$

RESISTENCIA DEL PERFIL AL CORTE (TRACCIÓN):

Datos:

$L_{corte} = 74.525\ mm$

$L_{tension} = 27.5\ mm$

$d_{pernos} = 18\ mm \rightarrow Considerando\ el\ \frac{1}{8} in$

$e_{perfil} = 6\ mm$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$

Solución:

Fluencia al corte:

$$R_n = 0.60 F_y A_{gv}$$

$$\emptyset = 1.00\ (LRFD), \Omega = 1.50\ (ASD)$$

$$A_{gv} = L_{corte} * e_{placa}$$

$$A_{gv} = 74.525\ mm * 6\ mm = 447.15\ mm^2$$

$$R_n = 0.60 F_y * A_{gv}$$

$$R_n = 0.60(344.738\ MPa) * 447.15\ mm^2$$

$$R_n = 92.49\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = \emptyset R_n = 92.49\ kN$

Rotura por cizallamiento del perfil:

$$R_n = 0.60 F_u A_{nv}$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

$$A_{nv} = \left(A_{gv} - 1.5\left(d_{pernos}\right) * \left(e_{placa}\right)\right)$$

$$A_{nv} = (447.15\ mm^2 - 1.5(18\ mm)(6\ mm))$$

$$A_{nv} = 285.15\ mm^2$$

$$R_n = 0.60 F_u A_{nv}$$

$$R_n = 0.60 * (448.156\ MPa) * (285.15\ \ mm^2)$$

$$R_n = 76.767\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = \emptyset R_n = 57.507\ kN$

Resistencia al corte en bloque:

$$R_n = 0.60F_uA_{nv} + U_{bs}F_uA_{nt} \leq 0.60F_yA_{gv} + U_{bs}F_uA_{nt}$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

$$U_{bs} = 1 \rightarrow Esfuerzo\ uniforme$$

$$A_{nt} = L_{tension} * e_{perfil} - 0.5\left(d_{pernos}\right) * e_{perfil}$$

$$A_{nt} = 27.5\ mm * 6\ mm - 0.5\ (18\ mm) * 6mm$$

$$A_{nt} = 111\ mm^2$$

$$R_n = 0.60F_uA_{nv} + U_{bs}F_uA_{nt} \leq 0.60F_yA_{gv} + U_{bs}F_uA_{nt}$$

$$\begin{aligned} R_n = {} & 0.60(448.156\ MPa)(285.15\ mm^2) + (1)(448.156\ MPa)(111\ mm^2) \\ & \leq 0.60(344.738\ MPa)(447.15\ mm^2) \\ & + (1)(448.156\ MPa)(111\ mm^2) \end{aligned}$$

LRFD:

$\emptyset R_n = 189.632\ kN \leq 213.353\ kN$

$$\emptyset R_n = \ 189.632\ kN$$

PANDEO ELASTICO E INELASTICO DE LA PLACA

Datos:

$l_{placa} = 218\ mm$

$h_{placa} = 55.05\ mm$

$d_{pernos} = 18\ mm \rightarrow Considerando\ el\ \frac{1}{8} in$

$e_{placa} = 8\ mm$

$l_{critica} = 68\ mm$

$K = 1$

$A_g = 440.4\ mm^2$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$

Solución:

$$I_x = \frac{h_{placa} * (l_{placa})^3}{12} = \frac{55.05\ mm * (218\ mm)^3}{12} = 5167759.939\ mm^4$$

$$I_y = \frac{(h_{placa})^3 * l_{placa}}{12} = \frac{(218\ mm)^3 * 55.05\ mm}{12} = 1446547.864\ mm^4$$

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A_g}} = 108.325\ mm \qquad r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_g}} = 57.312\ mm$$

Resistencia de los elementos a compresión:

$$P_n = F_y A_g$$

$$\emptyset = 0.90\ (LRFD), \Omega = 1.67\ (ASD)$$

$$\frac{K * l_{critica}}{r_x} = 0.628 < 25 \rightarrow menor$$

$$\frac{K * l_{critica}}{r_y} = 1.186 < 25$$

$$P_n = F_y A_g$$

$$P_n = (344.738\ MPa) * (440.4\ mm^2)$$

$$P_n = 151.823\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = 136.64\ kN$

APLASTAMIENTO DE LOS ORIFICIOS DE LA PLACA

Datos:

$d_{entre\ pernos} = 45\ mm$

$t = 8\ mm$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$

11a. Snug-Tightened or Pretensioned High-Strength Bolted Connections

All plies of the connected elements shall be in firm contact.

(1) The nominal strength of a connected element at a bolt in a connection with standard, oversized, and short-slotted holes, independent of the direction of loading, or a long-slotted hole with the slot parallel to the direction of the bearing force, shall be the lesser of the following:

(a) Bearing

(i) When deformation at the bolt hole at service load is a design consideration

$$R_n = 2.4dtF_u \qquad \text{(J3-6a)}$$

Solución:

Conexiones atornilladas de alta resistencia ajustadas o pretensadas:

Cojinete en el perno 1 y 2:

$$R_n = 2.4 d_t F_u$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

$$R_n = 2.4 dt F_u$$

$$R_n = 2.4(45\ mm)(8mm)(448.156\ MPa)$$

$$R_n = 163.919\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = 122.939\ kN$

Desgarro en el perno 1:

Distancia del perno al borde: $l_c = 20\ mm$

$$R_n = 1.2 l_c t F_u$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

$$R_n = 1.2 l_c t F_u$$

$$R_n = 1.2(20\ mm)(8mm)(448.156\ MPa)$$

$$R_n = 86.047\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = 64.535\ kN$

Desgarro en el perno 2:

Distancia entre pernos: $l_{c\ perno2} = 25.95\ mm$

$$R_n = 1.2 l_c t F_u$$

$$R_n = 1.2(25.95\ mm)(8mm)(448.156\ MPa)$$

$$R_n = 111.645\ kN$$

LRFD: $\emptyset R_n = 83.734\ kN$

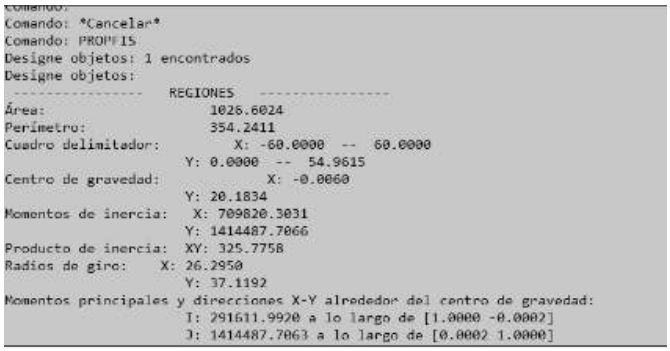
PANDEO ELASTICO E INELASTICO DEL PERFIL EN UV

Datos:



$e_{perfil} = 6\ mm$

$d_{agujeros} = 18\ mm \rightarrow Considerando\ el\ \frac{1}{8} in$



$A_g = 1026.6024\ mm^2$

$\bar{x} = 20.1834\ mm$

$r_x = 26.2950\ mm$

$r_y = 37.1192\ mm$

$l_{critica} = 68\ mm$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$

Solución:

Resistencia de los elementos a compresión:

$$P_n = F_y A_g$$

$$\emptyset = 0.90\ (LRFD), \Omega = 1.67\ (ASD)$$

$$\frac{K * l_{critica}}{r_x} = \frac{1 * 68\ mm}{26.2950\ mm} = 6.56\ < 25$$

$$\frac{K * l_{critica}}{r_y} = \frac{1 * 68mm}{37.1192\ mm} = 4.647 < 25 \rightarrow menor$$

$$P_n = F_y A_g$$

$$P_n = (344.738\ MPa) * (1026.6024\ mm^2)$$

$$P_n = 353.984\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = 318.585\ kN$

APLASTAMIENTO DE LOS ORIFICIOS DEL PERFIL EN UV

Datos:

$d_{entre\ pernos} = 45\ mm$

$t = 6\ mm$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$

Solución:

Conexiones atornilladas de alta resistencia ajustadas o pretensadas:

Cojinete en el perno 1 y 2:

$$R_n = 2.4 d_t F_u$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

$$R_n = 2.4 dt F_u$$

$$R_n = 2.4(45\ mm)(6mm)(448.156\ MPa)$$

$$R_n = 117.292\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = 87969\ kN$

Desgarro en el perno 1:

Distancia del perno al borde: $l_c = 20\ mm$

$$R_n = 1.2 l_c t F_u$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

$$R_n = 1.2 l_c t F_u$$

$$R_n = 1.2(20\ mm)(6mm)(448.156\ MPa)$$

$$R_n = 64.535\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = 48.401\ kN$

Desgarro en el perno 2:

Distancia entre pernos: $l_{c\ perno2} = 25.95\ mm$

$$R_n = 1.2 l_c t F_u$$

$$R_n = 1.2(25.95\ mm)(6mm)(448.156\ MPa)$$

$$R_n = 56.557\ kN$$

LRFD: $\emptyset R_n = 64.918\ kN$

PORCENTAJE DE ELONGACIÓN DE LA PROBETA 1

$L_{inicial} = 350\ mm$

$L_{final} = L_{inicial} + 7.88125\ mm = 357.881\ mm$

$$\% = \frac{L_{final} - L_{inicial}}{L_{final}} * 100 = 2.252\ \%$$

PORCENTAJE DE ELONGACIÓN DE LA PROBETA 2

$L_{inicial} = 350\ mm$

$L_{final} = L_{inicial} + 10.9427\ mm = 360.943\ mm$

$$\% = \frac{L_{final} - L_{inicial}}{L_{final}} * 100 = 3.126\ \%$$

PORCENTAJE DE ELONGACIÓN DE LA PROBETA 3

$L_{inicial} = 350\ mm$

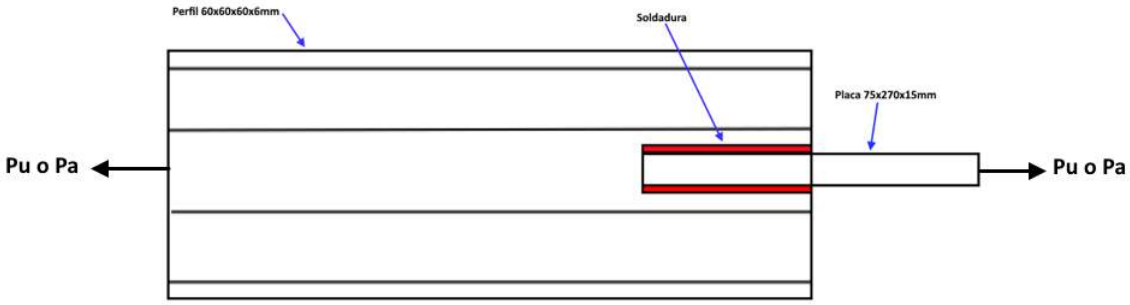
$L_{final} = L_{inicial} + 9.641126\ mm = 359.641\ mm$

$$\% = \frac{L_{final} - L_{inicial}}{L_{final}} * 100 = 2.755\ \%$$

PORCENTAJE DE PONDERACION DE LAS PROBETAS

$$P_{probetas} = \frac{\%P1 + \%P2 + \%P3}{3} = 10.3\ \%$$

DISEÑO DE LA SOLDADURA PARA PROBETA A TRACCIÓN



J2. WELDS AND WELDED JOINTS

Welding shall conform to the provisions of the *Structural Welding Code—Steel* (AWS D1.1/D1.1M), hereafter referred to as AWS D1.1/D1.1M, except where those provisions differ from this Specification. This Specification governs where provisions differ from AWS D1.1/D1.1M.

RESISTENCIA DE DISEÑO:

Datos:

$Electrodo\ E7018$

$F_{EXX} = 482.63\ MPa$

Acero ASTM A572 Gr.50

$F_y = 50\ ksi \rightarrow 344.738\ MPa$

$F_u = 65\ ksi \rightarrow 448.156\ MPa$

Resistencia a la fluencia por tracción de la sección total del perfil UV:

LRFD:

$\emptyset R_n = 318.518\ kN$

Resistencia a la fractura por tracción de la sección total del perfil UV:

LRFD:

$\emptyset R_{nf} = 196.223\ kN$

Resistencia a la fluencia y fractura por tracción de la sección total de la placa:

Acero ASTM A36

$F_y = 36\ ksi \rightarrow 248.211\ MPa$

$F_u = 58\ ksi \rightarrow 399.896\ MPa$

$$A_g = 1125\ mm^2$$

Fluencia de los elementos de conexión:

$$R_n = F_y A_g$$

$$\emptyset = 0.9\ (LRFD), \Omega = 1.67\ (ASD)$$

Fractura de los elementos de conexión:

$$R_n = F_u A_e$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

Área total:

$A_g = 1125\ mm^2 \rightarrow Software$

Área neta:

$$A_n = A_g - (L_{placa} * e_{placa})$$

$$A_n = (1125\ mm^2) - (15\ mm * 6\ mm)$$

$$A_n = 1035\ mm^2$$

Área neta efectiva:

$$\cup = 1\ (Tabla\ D3.1\ del\ AISC)$$

$$A_e = \cup\ A_n$$

$$A_e = 1 * 1035\ mm^2$$

$$A_e = 1035\ mm^2$$

Fluencia de los elementos de conexión:

$$R_n = F_y A_g$$

$$R_n = (250\ MPa\ ) * (1125\ mm^2)$$

$$R_n = 279.238\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = \emptyset R_n =\ 251.314\ kN$

Fractura de los elementos de conexión:

$$R_n = F_u A_e$$

$$R_n = (448.156\ MPa) * (1035\ mm^2)$$

$$R_n = 413.892\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = \emptyset R_n =\ 372.503\ kN$

DISEÑO DE LA SOLDADURA

TABLA 14.2 Tamaños mínimos para las soldaduras de filete.

Espesor del material de la parte unida más delgada, plg (mm)	Tamaño mínimo de las soldaduras de filete,[a] plg (mm)
Hasta $\frac{1}{4}$ (6) inclusive	$\frac{1}{8}$ (3)
Mayor de $\frac{1}{4}$ (6) hasta $\frac{1}{2}$ (13)	$\frac{3}{16}$ (5)
Mayor de $\frac{1}{2}$ (13) hasta $\frac{3}{4}$ (19)	$\frac{1}{4}$ (6)
Mayor de $\frac{3}{4}$ (19)	$\frac{5}{16}$ (8)

[a] Dimensión del ala de las soldaduras de filete. La soldadura debe ser de una sola pasada. Véase la Sección J2.2b de la Especificación LRFD para el tamaño máximo de las soldaduras de filete.
Fuente: Especificación del AISC, Tabla J2.4, p. 16.1-111, junio 22, 2010.
"Derechos reservados © American Institute of Steel Construction. Reimpreso con autorización. Todos los derechos reservados."

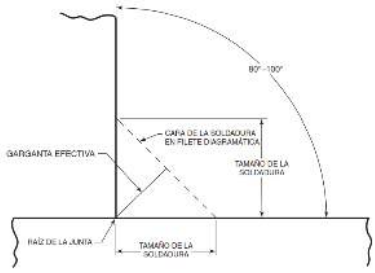
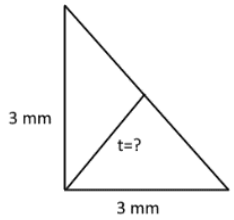


Figura 4.1—Soldadura en filete (ver 4.4.2.6)



$T_{soldadura} = 6mm$

RESISTENCIA DE DISEÑO

$Garganta\ efectiva$:

$t = 0.707 * T_{soldadura} = 4.242\ mm$

CARGA PARALELA AL EJE LONGITUDINAL DE LAS SOLDADURAS:

Resistencia de diseño de una soldadura específica y resistencia permisible:

$$R_n = F_{n\omega} * A_{\omega e} \quad Ec15.\ J2-3\ del\ AISC$$

$$\emptyset = 0.75\ (LRFD), \Omega = 2.00\ (ASD)$$

$$F_{n\omega} = Esfuero\ nominal\ del\ metal\ de\ la\ soldadura$$

$$A_{\omega e} = Área\ efectiva\ de\ la\ soldadura$$

RESISTENCIA DE LA SOLDADURA :

$$R_n = (0.60 * F_{EXX}) * (t * L_{cordón})$$

$$R_n = (0.60 * 482.63\ MPa) * (4.242\ mm * 140\ mm)$$

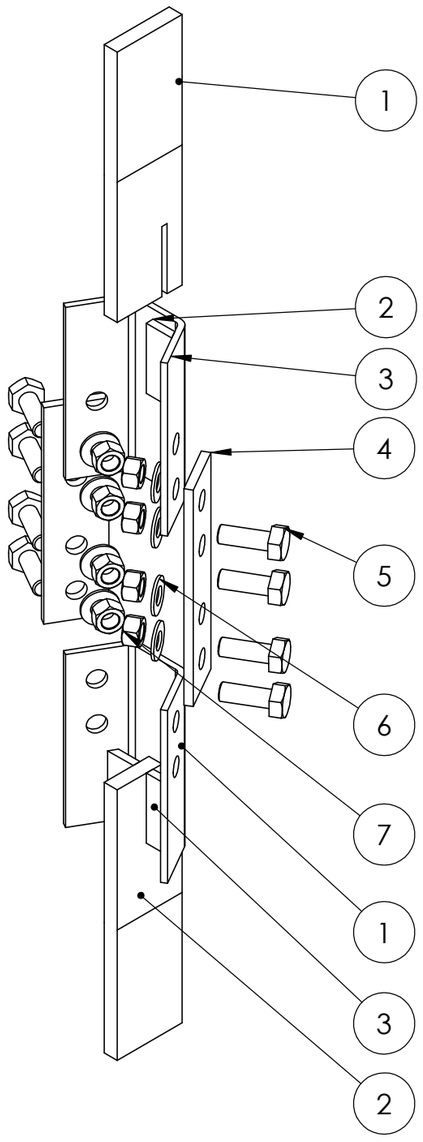
$$R_n = 171.975\ kN$$

LRFD:

$\emptyset R_n = \emptyset R_n = \ 0.75 * 171.975\ kN$

$\emptyset R_n = 128.981\ kN$

Anexo 4. Planos



No. de piez.	Denominación	Material	No. de orden	No. del Modelo/semiproducto	Observaciones
1	Placa de sujeción	ASTM A36	2	Placa de 15 mm de espesor	Soldar con electrodo E6011 para el pase de raiz y E7018 para los demás pases de soldadura
2	Laterales de conexion	ASTM A572 Gr.50	4	Placas de conexión de 8 mm de espesor	Soldar con electrodo E7018
3	Perfil UV	ASTM A572 Gr.50	2	Perfíl Doblado con espesor de 6 mm	Doblar la placa con un radio de 6 mm
4	Placa de conexión	ASTM A572 Gr.50	4	Placa de conexión con espesor de 8 mm	Cortar los agujeros mediante corte laser
5	Perno A325	ASTM A325	8	Diametro de 5/8 in por 2 in de largo	Realizar una pretención adecuada a la AISC 360-22
6	Rodela plana	ASTM F436	8	Rodela plana para aplicaciones de alta resistencia	Rodela de fijación para perno de 5/8 in
7	Tuerca	ASTM A563	8	Tuerca de fijación roscada de alta resistencia	Tuerca de fijacion para perno de 5/8 in

Edición	Modificación	Fecha	Nombre

Tolerancia: ±2

Peso: 9372.68 g

Materiales: ASTM A 572 GR.50

	Fecha	Nombre
Dibujó:	27/5/2026	Chico,Salazar
Revisó:	27/5/2026	Ing. F Peña
Aprobó:	27/5/2026	Ing. F Peña

UTA
Ingeniería Mecánica

Denominación: Conexión empernada de sección UV

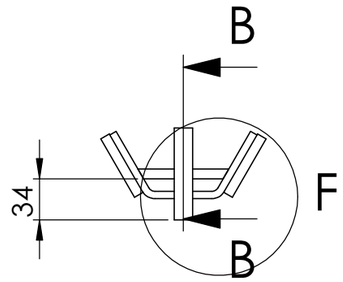
Escala: 1:5

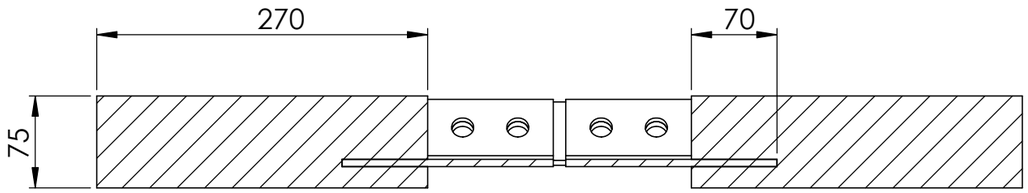
Número del dibujo: 01 de 02

(Sustitución)

N10

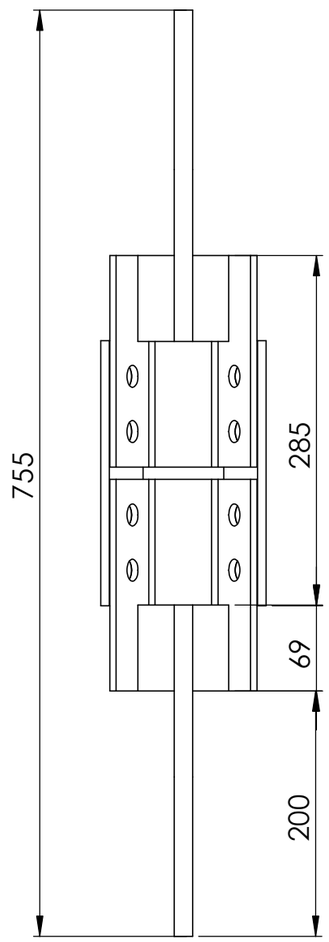
PERFIL UV Y PLACA
ESCALA 1:5

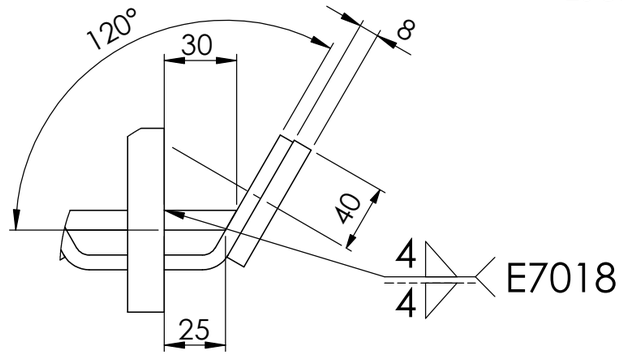




SECCIÓN B-B
ESCALA 1:5

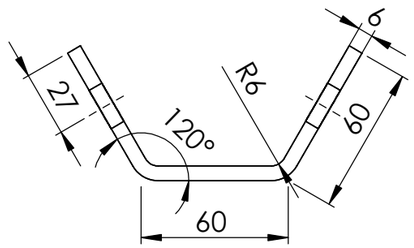
CONEXION EMPERNADA
ESCALA 1:5



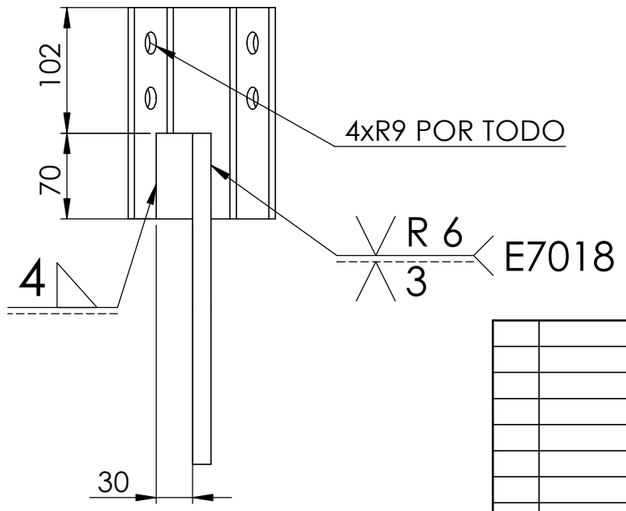


DETALLE F
ESCALA 1 : 2.5

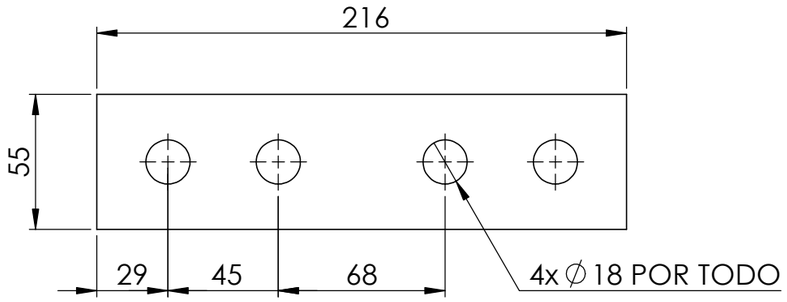
PERFIL UV
ESCALA 1:2.5



PERFIL UV Y PLACA DE SUJECIÓN
ESCALA 1:5



PLACA DE CONEXIÓN
ESCALA 1:2.5



Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Tolerancia: ±2	Peso: 9372.68 g	Materiales: ASTM A572 GR.50	
					Fecha / Nombre	Denominación: Montaje de la conexión empernada	Escala: N/A
				UTA Ingeniería Mecánica	Dibujó: 27/5/2026 Chico,Salazar Revisó: 27/5/2026 Ing. F Peña Aprobó: 27/5/2026 Ing. F Peña	Número del dibujo: 02 de 02 (Sustitución)	