

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**



**Departamento de Obras Civiles  
Ingeniería Civil**

# **“ANÁLISIS DE APLICABILIDAD DEL SOFTWARE IDEA STATICA CONNECTION EN CHILE”**

Memoria para optar al título profesional de Ingeniero Civil

**Presentada por**

Rubén Andrés Morales Aguayo

**Profesor Guía**

Germán Matzner Stange

**Profesor Correferente**

Claudio Sepúlveda Contreras

Enero del 2025



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción):  Memoria o trabajo de título;  Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Análisis de aplicabilidad del software IDEA StatiCa Connection en Chile

Nombre del candidato(a): Rubén Andrés Morales Aguayo

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Santiago San Joaquín ; Departamento: Departamento de Obras Civiles

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Claudio Sepúlveda, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses;  12 meses;  2 años;  3 años;  5 años;  10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

### 4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 31-07-2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 31-07-2025

; Firma:

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

# ANÁLISIS DE APLICABILIDAD DEL SOFTWARE IDEA STATICA CONNECTION EN CHILE

Rubén Morales Aguayo<sup>1</sup>, Germán Matzner<sup>2</sup>, Claudio Sepúlveda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Técnica Federico Santa María

## Resumen

Este estudio evalúa la viabilidad de implementar IDEA StatiCa como herramienta de análisis y diseño estructural en Chile, proponiéndolo como una alternativa al método tradicional establecido por la normativa vigente. Basado en el Método de Elementos Finitos (MEF), este software permite un análisis más detallado y realista del comportamiento estructural, especialmente en conexiones consideradas complejas y no contempladas explícitamente en los documentos normativos actuales. La investigación analiza la precisión de los resultados proporcionados por IDEA StatiCa, destacando sus beneficios en términos de optimización y eficiencia, y su potencial para mejorar los procesos de diseño y construcción de conexiones de acero en el contexto nacional.

Palabras claves: diseño estructural, método de elementos finitos, conexiones complejas, normativa vigente, método tradicional, comportamiento estructural, conexiones de acero.

## 1 Introducción

Las conexiones de acero siempre han sido un desafío ingenieril en la construcción, buscando rentabilidad económica, y al mismo tiempo procurando cumplir las leyes vigentes; intentando lograr eficiencia y minimización en los recursos utilizables. Sin embargo, el método tradicional de diseño presenta falencias en cuanto a lo que estas características se refieren (Arroyo Amell, 2004). Este método, regido por las normas NCh 427 y NCh 2369, no especifica ningún diseño para uniones con geometrías irregulares, y los criterios que se utilizan en los cálculos están basados en simplificaciones, que muchas veces pueden llevar a inconvenientes en sistemas más particulares (Romero Castillo, 2021), debido a que no siempre es posible extrapolar resultados hacia uniones complejas, teniendo como consecuencia que la actual solución para resolver este problema, sea sobredimensionar preventivamente las conexiones con la finalidad de cumplir los requisitos normativos dictados principalmente por el código AISC (ANSI/AISC 360-10). Esto finalmente se traduce en una pérdida considerable en tiempo de análisis y en material.

Actualmente hay varias alternativas que solucionan estas problemáticas, las cuales expresan una mejor descripción del comportamiento real de la estructura en menos tiempo, permitiendo predecir los estados de falla en conexiones complejas y disminuir así el material necesario en su diseño. Estas alternativas implican el uso de softwares que apliquen el “Método de Elementos Finitos” (MEF) como SAP2000, ABAQUS, entre otros. IDEA StatiCa, por su parte, también cuenta con un análisis mediante MEF mientras ofrece otras utilidades al usuario.

IDEA StatiCa Connection es un software de elementos finitos basado en el criterio de tensión/deformación, ya utilizado en parte de Europa y Latinoamérica, y especializado en diseño de conexiones de acero estructural. Este posee grandes ventajas al permitir modelar o importar una conexión de acero desde un software de detallamiento; comprueba exhaustivamente el cumplimiento de los códigos normativos; entrega resultados detallados del comportamiento de las conexiones; y presta facilidades en cuanto al uso del software debido a su cómoda interfaz, permitiendo además trabajar bajo metodología BIM optimizando así la eficiencia en los procesos (IDEA StatiCa, s. f.).

A pesar de todos los beneficios en el uso de IDEA StatiCa Connection, éste carece de confianza en sus resultados ante empresas y clientes chilenos, habiendo incluso proyectos en los que directamente no se acepta este método de diseño en sus procesos debido a no haber una validación en sus resultados para

el contexto local. Considerando todo lo anterior, surge el objetivo de esta memoria de validar el cumplimiento normativo al utilizar IDEA StatiCa como software de diseño estructural para conexiones de acero, y demostrar sus beneficios en el uso para el diseño estructural en contexto chileno.

## **2 Objetivos Ajustados**

### **2.1 Objetivo General**

Evaluar la viabilidad de adoptar IDEA StatiCa Connection como software estructural en el diseño de conexiones de acero en el contexto chileno.

### **2.2 Objetivos Específicos**

1. Validar los resultados del software bajo la normativa AISC (Asociación Latinoamericana del Acero, 2010) y NCh 427 para conexiones simples contempladas en los documentos normativos.
2. Validar los resultados del software para conexiones complejas no contempladas en la normativa, haciendo uso de ensayos experimentales obtenidos de la literatura y demostrando el correcto análisis del software ante sistemas complejos, validando su uso para cualquier tipo de conexión.
3. Demostrar beneficios tangibles del uso del software IDEA StatiCa Connection como software de diseño estructural en cuanto a facilidad de modelado, formato de los resultados, compatibilidad con otros softwares, entre otros; acreditando o no la viabilidad en su uso.

### **3 Marco Teórico**

Para evaluar y validar los resultados entregados por el software IDEA StatiCa en cuanto a cumplimiento normativo chileno, y comprobar su viabilidad económica y de seguridad, se consideran los siguientes procesos investigativos.

#### **3.1 Diseño tradicional de conexiones bajo la normativa AISC-360**

La normativa de diseño estructural de acero AISC-360 es la principal fuente de criterios a seguir para diseñar correctamente una conexión de acero, siendo éste el documento vigente y estipulado legalmente por el Instituto Nacional de Normalización (INN). Este documento ha sido resultado de la historia y de diversos estudios de efectividad de elementos estructurales ante cargas tanto cíclicas como monotónicas y establece criterios para el diseño, fabricación y el montaje de edificios de acero estructural y o tras estructuras, definidas como aquellas estructuras diseñadas, fabricadas y montadas de manera similar al de edificios (ANSI/AISC 360-10 “Specification for Structural Steel Buildings”).

El documento cuenta con criterios, recomendaciones y métodos para diseñar distintos elementos de una estructura de acero, siendo una de ellas las conexiones. “Las conexiones entre los miembros, representan uno de los aspectos más importantes y de mayor incidencia cuando se trata del comportamiento sismorresistente de edificaciones aporticadas de acero estructural” (Loges, 2017). Por ello la importancia y énfasis que se le entrega en el documento normativo y el cual debe respetar el ingeniero a cargo de un diseño estructural.

El código AISC-360, sin embargo, establece criterios para simplificaciones y no para conexiones con formas geométricas irregulares, lo cual dificulta el juicio del ingeniero cuando se enfrenta a diseños más elaborados o específicos para una sección, ya que todos estos cálculos, siguiendo la metodología propuesta en el AISC-360, comprende un procedimiento manual y analítico.

Por lo anterior, el diseño estructural se limita a las conexiones abordadas por el documento normativo y se trata de evitar la elaboración de sistemas complejos (apernados inusuales, diversidad de ejes, etc.). Si bien esto podría resolverse con modelos experimentales, esta alternativa implica un costo y tiempo mayor, desincentivando a la inversión en estos ensayos (Romero Castillo, 2021), resultando en una limitación a diseñar en función de las conexiones abordadas en el documento AISC-360.

#### **3.2 Simulación de conexiones mediante software IDEA StatiCa Connection que utiliza Método de Elementos Finitos**

Para abordar estos problemas se concibe la importancia de la simulación mediante MEF. Adrian (2010) luego de simular una estructura metálica haciendo uso del MEF expresa que los modelos de elementos finitos son útiles para resolver una gran cantidad de problemas de ingeniería. Por otra parte, el autor Asdrubal et al. (2017) evaluó la resistencia de vigas esbeltas de acero bajo cargas concentradas utilizando MEF y concluye que el modelo no lineal por elementos finitos propuesto representa adecuadamente el comportamiento estructural, obteniéndose variaciones en los resultados obtenidos no mayores al 10% respecto a los obtenidos experimentalmente. Por último, Abasolo Bilbao et al. (2017) expresan en su guía práctica de elementos finitos en estática “El método de los Elementos Finitos (MEF) es sin duda una de las herramientas más utilizadas actualmente en el ámbito del análisis y diseño de sistemas mecánicos. Permite validar y optimizar diseños de forma rápida y versátil, reduciendo la necesidad de costosas campañas experimentales y ofreciendo al diseñador información muy valiosa sobre el comportamiento del sistema y la influencia que tienen en él aspectos como la geometría, el material, la naturaleza de las cargas, etc.”.

Abordar estos problemas con un software como IDEA StatiCa, que se basa en este método, entrega la oportunidad de evaluar puntos críticos de una conexión y también evaluar el comportamiento esperado ante combinaciones de cargas, permitiendo optimizar y, más aún, entregando la información necesaria para reforzar solo la sección de ruptura de una conexión, ahorrando tanto en costos como en tiempo.

### **3.3 Amenaza sísmica chilena y normas estipuladas**

El autor Araya Letelier et al. (2019) expresa “Las edificaciones chilenas están periódicamente sometidas a sismos y su buen desempeño previniendo el colapso es conocido. Sin embargo, debido al terremoto Mw 8.8 de 2010 en Chile, un edificio de hormigón armado colapsó y muchos otros fueron severamente dañados, motivando interés en la determinación del potencial de colapso de estas estructuras. Posterior al sismo del 2010, los códigos de diseño chilenos han sufrido modificaciones, pero en éstos la estimación del riesgo de colapso sigue siendo limitada”.

Debido a la alta sismicidad del país y al factor de seguridad adicional que deben poseer las estructuras chilenas para evitar el riesgo de colapso, se crea la norma de diseño sísmico NCh 2369, la cual refleja el estado del arte del diseño sísmico en Chile, basado en la experiencia obtenida durante terremotos pasados (Riquelme Herrera, 2022).

La norma NCh 2369 establece los requisitos para el diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, ya sea livianas o pesadas (NCh433.Of1996, Mod2009). Por ello, es primordial entender y satisfacer los criterios que se exponen en esta normativa a la hora de diseñar estructuralmente una conexión de acero en Chile.

Se da entonces importancia al buen criterio de diseño estructural del ingeniero a la hora de evaluar los resultados del software, ya que es su palabra, y su análisis de los resultados, lo que determina si la conexión simulada en el software cumple las normativas vigentes.

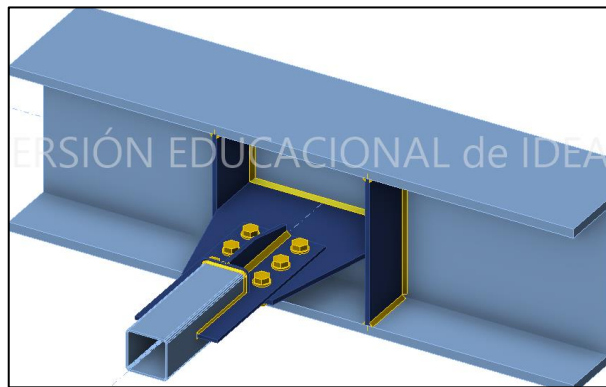


**Tabla 2: Detalle elementos conexión simple 1.**

CONEXIÓN GUSSET		PLACA DE REFUERZO - CONEXIÓN		CONEXIÓN PLACA - GUSSET		REFUERZO DE LOS TIRANTES DE LOS	
eg min [mm]	12	ep min [mm]	8	Tipo de pernos	3/4" A325	e_ref min [mm]	0
Bw min [mm]	270	Bp min [mm]	200	N° Column Nc	2	br min [mm]	0
Lmax1 [mm]	350	Ls/D1 min [mm]	200	N° Total Pernos	6	Ls_ref/Dr.1 min [mm]	0
Lmax2 [mm]	640		5	St min [mm]	120		0
		sb max [mm]	10	S max [mm]	80	Ls2/Dr.2 min [mm]	0
		tf [mm]	5	Lat min [mm]	40		0
				Lah min [mm]	40		

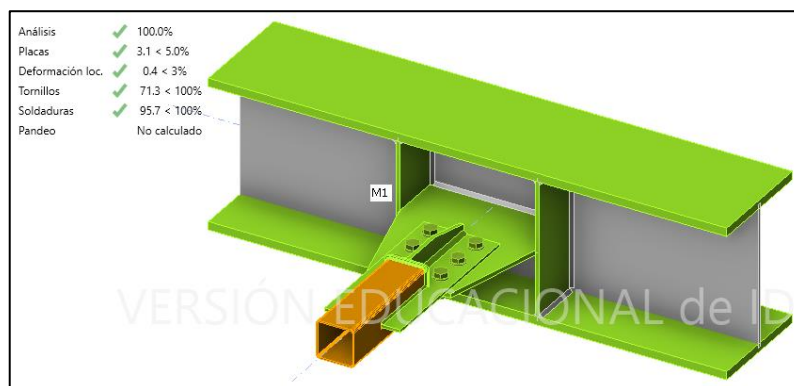
Realizando un diseño bajo método tradicional con las ecuaciones obtenidas de normativa AISC, se obtiene una condición de falla dominada por un pandeo por compresión del Gusset, el cual tiene una resistencia admisible de 228.0 [kN], lo que entrega un FU del 98.3%.

En la Figura 2 se observa la conexión estudiada utilizando IDEA StatiCa para su análisis.



**Figura 2: Modelo IDEA StatiCa conexión simple 1.**

Los elementos fueron analizados en el software IDEA StatiCa bajo la normativa ASD, considerando una carga de tracción de 223.77 [kN]. El análisis del sistema de conexión arrojó los siguientes resultados.



**Figura 3: Verificación general mediante IDEA StatiCa de conexión simple 1.**

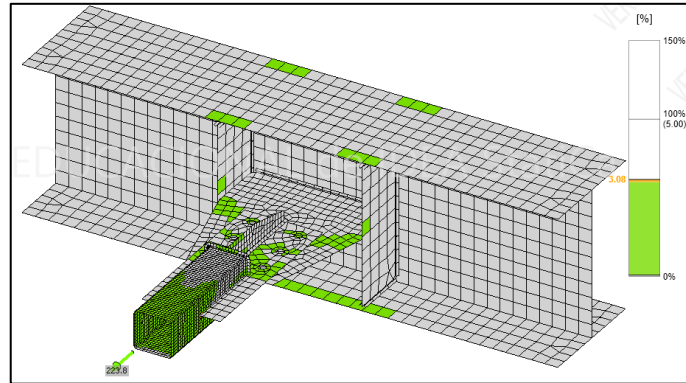


Figura 4: Deformaciones alcanzadas mediante IDEA StatiCa de conexión simple 1.

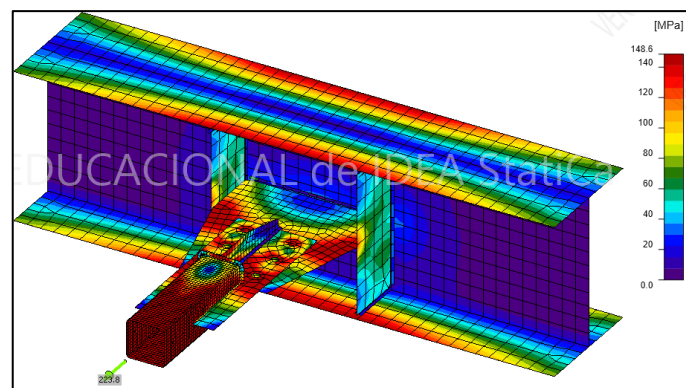


Figura 5: Tensiones equivalentes mediante IDEA StatiCa de conexión simple 1.

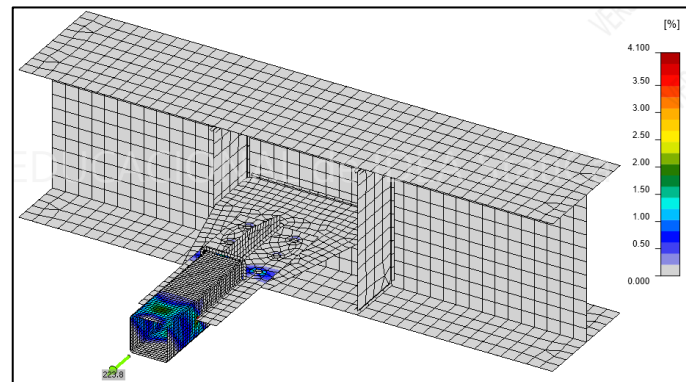


Figura 6: Deformaciones plásticas mediante IDEA StatiCa de conexión simple 1.

El análisis realizado con el software IDEA StatiCa muestra que el perfil cajón es el elemento más solicitado y cercano a la falla, con zonas significativamente tensionadas, lo cual coincide con el diseño realizado según la normativa AISC. Este perfil fue seleccionado específicamente para lograr una capacidad cercana al 100 % bajo la carga de diseño.

Asimismo, se observan plastificaciones en la placa gusset, resultado que también concuerda con los resultados del método tradicional, donde este elemento se identificó como el que presentaba el mayor

factor de utilización en la conexión. En cuanto a los tornillos y soldaduras, se verifica su cumplimiento estructural, sin evidenciarse un sobredimensionamiento de estos componentes.

El software entrega una resistencia admisible de 225.0 [kN], lo que corresponde a un factor de utilización (FU) del 99.5 % según el método ASD.

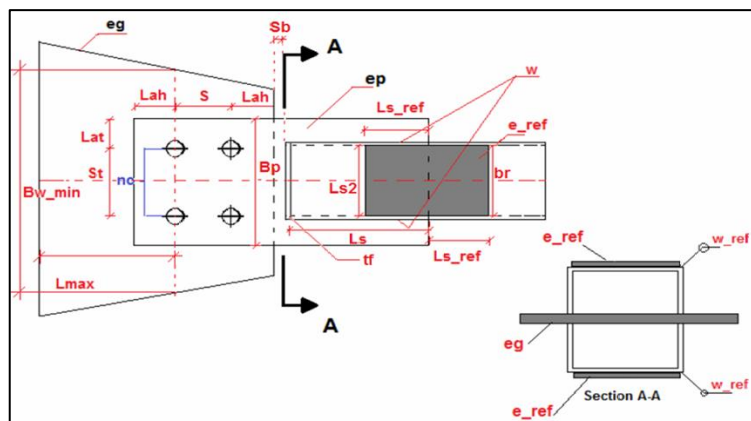
En conclusión, al comparar los resultados del cálculo normativo y los obtenidos mediante el software, se confirma que la conexión cumple con las cargas de diseño, logrando factores de utilización altos en ambos análisis.

#### 4.2 Conexión simple 2: Cajón apernado CJ15.0x15.0x26.4 sometido a tensión.

En las tablas y la imagen referencial que se presentan a continuación, se detallan las características de la conexión estudiada.

**Tabla 3: Características generales conexión simple 2.**

ELEMENTO	Tirante
FORMA	CJ15.0x15.0x26.4
GRADO DE ACERO	A250ES
GRADO SOLDADURA	E70
FUERZA	Tensión, T
CARGA [kN]	503.49



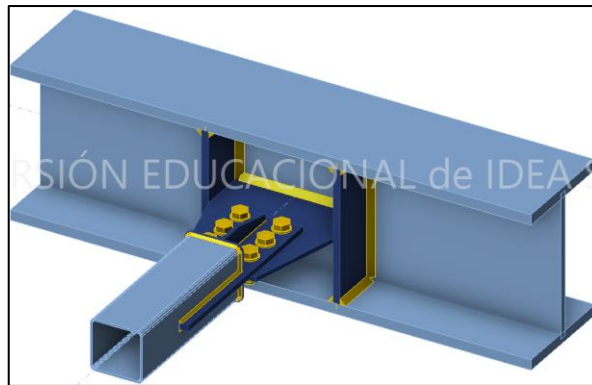
**Figura 7: Plano referencial conexión simple 2.**

**Tabla 4: Detalle elementos conexión simple 2.**

CONEXIÓN GUSSET		PLACA DE REFUERZO - CONEXIÓN		CONEXIÓN PLACA - GUSSET		REFUERZO DE LOS TIRANTES	
eg min [mm]	14	ep min [mm]	18	Tipo de pernos	1 A325	e_ref min [mm]	0
Bw min [mm]	300	Bp min [mm]	200	N° Column Nc	2	br min [mm]	0
Lmax1 [mm]	200	Ls/D1 min [mm]	300	N° Total Pernos	6	Ls_ref/Dr.1 min [mm]	0
Lmax2 [mm]	330		6	St min [mm]	120		0
		sb max [mm]	10	S max [mm]	80	Ls2/Dr.2 min [mm]	0
		tf [mm]	6	Lat min [mm]	40		0
				Lah min [mm]	50		

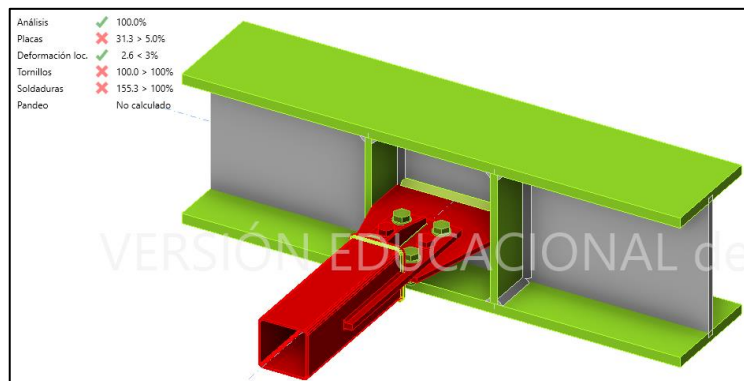
Mediante el diseño tradicional basado en las ecuaciones de la normativa AISC, se determina una condición de falla dominada por la fractura del perfil en el área neta, con una resistencia admisible de 508.33 [kN]. Al aplicar el diseño según el método ASD, se obtiene un factor de utilización (FU) del 99 %.

En la Figura 8 se muestra la conexión modelada en IDEA StatiCa para su análisis.

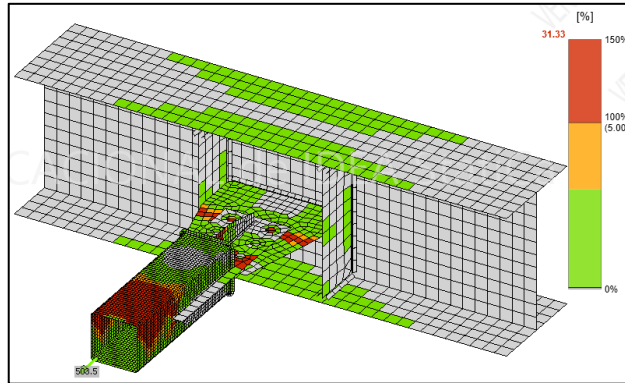


**Figura 8: Modelo IDEA StatiCa conexión simple 2.**

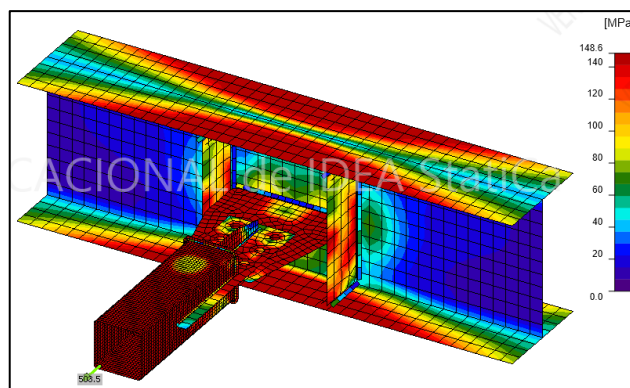
Los elementos se analizaron en el software IDEA StatiCa bajo normativa ASD, considerando una carga de tracción de 503.49 [kN]. Los resultados entregados se presentan a continuación.



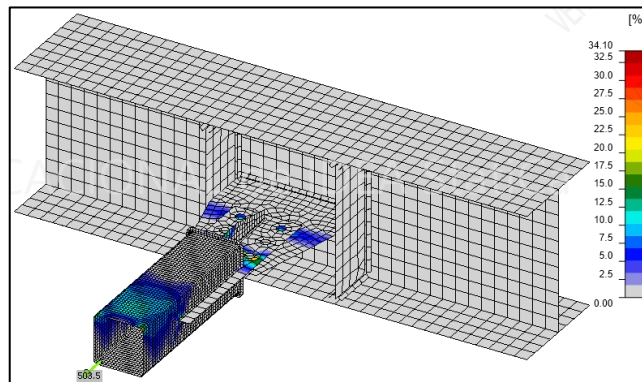
**Figura 9: Verificación general mediante IDEA StatiCa de conexión simple 2.**



**Figura 10: Deformaciones alcanzadas mediante IDEA StatiCa de conexión simple 2.**



**Figura 11: Tensiones equivalentes mediante IDEA StatiCa de conexión simple 2.**

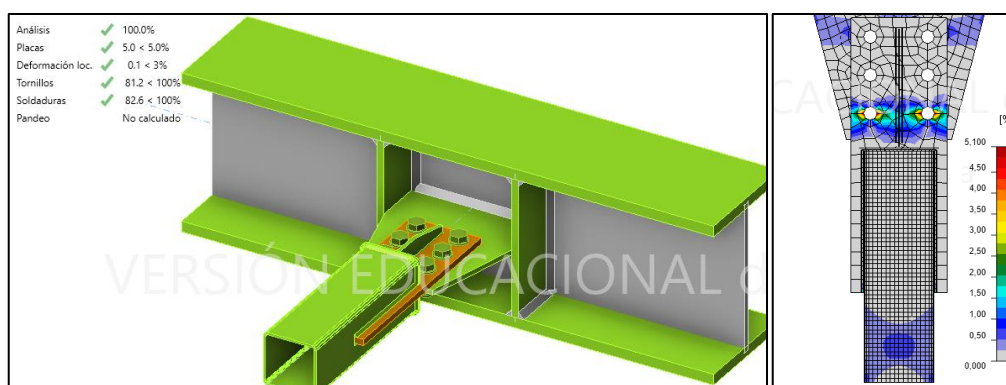


**Figura 12: Deformaciones plásticas mediante IDEA StatiCa de conexión simple 2.**

El análisis realizado en el software revela que la conexión no cumple con los criterios de diseño según la metodología de tensión/deformación utilizada por IDEA StatiCa, debido a que tanto las placas de conexión como el perfil cajón han superado considerablemente el 5% de deformación plástica.

No obstante, al igual que en el caso de estudio anterior, las zonas propensas a la falla se concentran tanto en el perfil como en la placa. Esto se debe a que estos elementos fueron seleccionados con el objetivo de alcanzar una resistencia nominal muy cercana al límite.

En la Figura 13 se muestra la conexión sometida a la carga última que resiste, según los cálculos desarrollados por el software, correspondiente a una carga de 443.0 [kN].



**Figura 13: Estado de conexión simple 2 para carga de 443.0 [kN] en IDEA StatiCa: A) Verificación general; B) Deformaciones plásticas.**

Se observa que el error relativo entre la carga última que resiste la conexión, calculada mediante las fórmulas del método tradicional, y la obtenida con el software IDEA StatiCa, es del 12%, siendo el análisis del software más conservador que la normativa local.

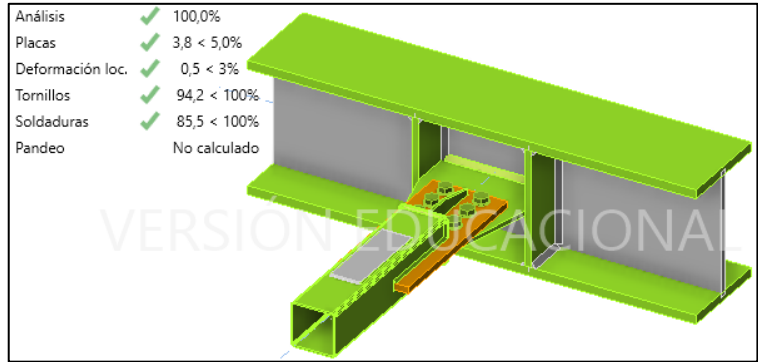
La falla se produce en la placa conectada al elemento, específicamente en la zona circundante a los agujeros de los pernos, tal como se muestra en la figura 13B. Esto sugiere que la falla correspondería a una fractura de la placa en el área neta.

Al comparar el análisis obtenido mediante el cálculo tradicional con los resultados del software, se concluye que IDEA StatiCa ofrece resultados más conservadores que la metodología planteada por la normativa AISC. Sin embargo, el comportamiento en la distribución de fuerzas, la zona de falla y la proximidad entre las resistencias nominales de cada elemento concuerdan con los cálculos manuales presentados en la memoria de cálculo de la conexión.

En la Tabla 5 se presenta una alternativa de diseño que satisface las cargas solicitadas para la conexión ante los criterios de IDEA StatiCa. En la Figura 14 se muestran los resultados obtenidos para los cambios propuestos.

**Tabla 5: Alternativa de cambios de conexión simple 2 para satisfacer cargas solicitadas.**

DISEÑO ORIGINAL		DISEÑO PROPUESTO	
eg min [mm]	14	eg min [mm]	16
ep min [mm]	18	ep min [mm]	22
Bp min [mm]	200	Bp min [mm]	250
e_ref min [mm]	0	e_ref min [mm]	6
br min [mm]	0	br min [mm]	100
Ls_ref [mm]	0	Ls_ref [mm]	150
Ls2 [mm]	0	Ls2 [mm]	150



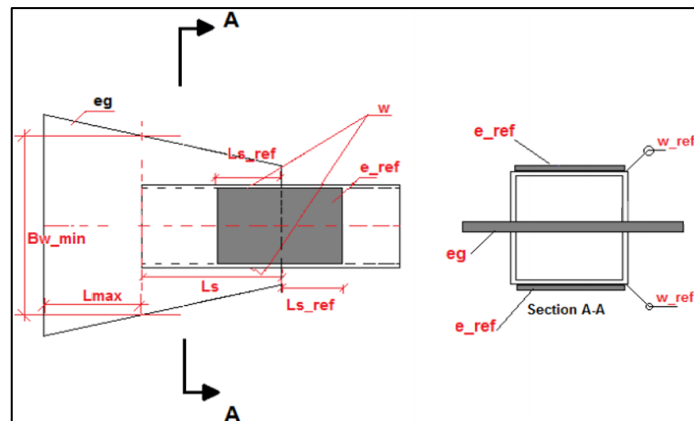
**Figura 14: Verificación general diseño propuesto para conexión simple 2.**

### 4.3 Conexión simple 3: Cajón soldado CJ10.0x10.0x4 sometido a tensión.

En las tablas y la imagen referencial a continuación, se detallan las características de la conexión estudiada.

**Tabla 6: Características generales conexión simple 3.**

ELEMENTO	Tirante
FORMA	CJ100x100x4
GRADO DE ACERO	A36
GRADO SOLDADURA	E70
FUERZA	Tensión, T
CARGA [kN]	222.17



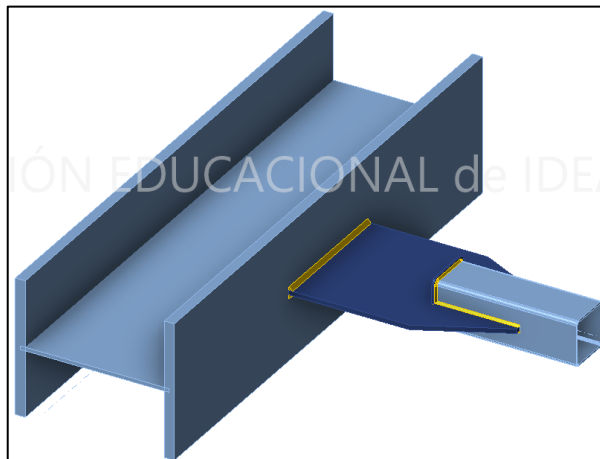
**Figura 15: Plano referencial conexión simple 3.**

**Tabla 7: Detalle elementos conexión simple 3.**

CONEXIÓN GUSSET		REFUERZO DE LOS TIRANTES	
eg min [mm]	10	e_ref min [mm]	0
Bw min [mm]	300	br min [mm]	0
Ls [mm]	185	Ls_ref/Dr.1 min [mm]	0
w [mm]	4		0
Lmax1 [mm]	270	Ls2/Dr.2 min [mm]	0
Lmax2 [mm]	450		0

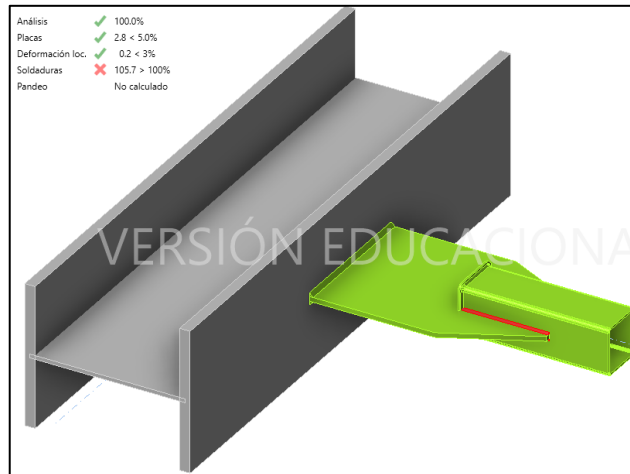
Realizando un diseño bajo el método tradicional con las ecuaciones obtenidas de la normativa AISC, se obtiene una condición de falla dominada por la fractura del perfil en el área neta, con una resistencia admisible de 223.52 [kN]. Al aplicar el diseño según el método ASD, se obtiene un factor de utilización (FU) del 99%. Luego se encuentra la condición de pandeo del gusset soldado a un solo lado, con una resistencia admisible de 229.73 [kN], teniendo un FU del 97% según el método ASD.

En la Figura 16 se muestra la conexión modelada en IDEA StatiCa para su análisis.

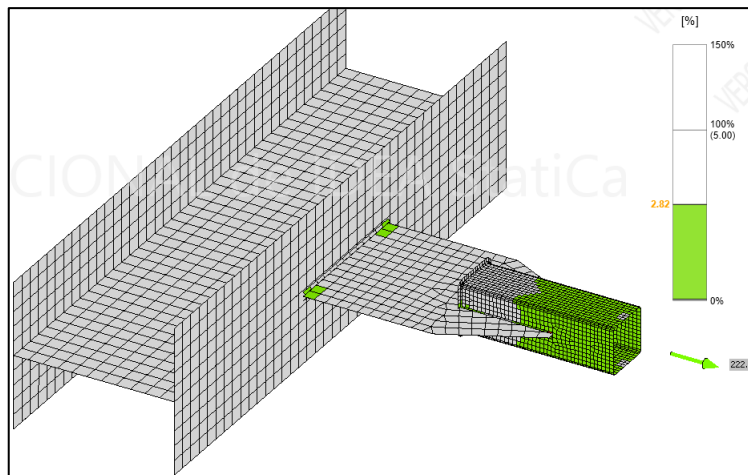


**Figura 16: Modelo IDEA StatiCa conexión simple 3.**

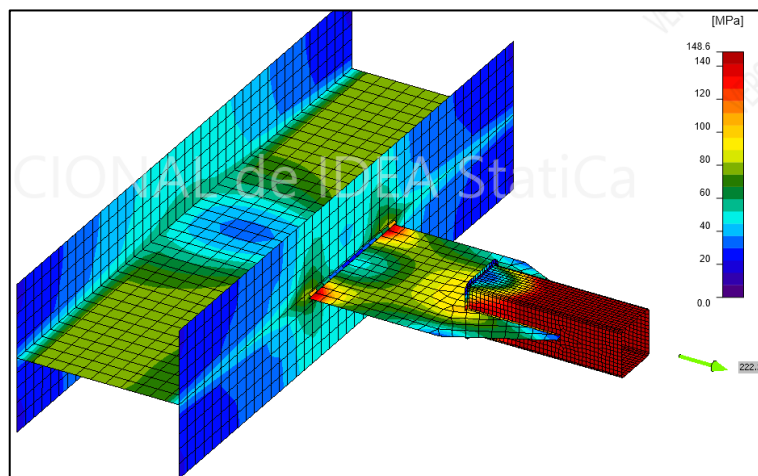
Los elementos fueron analizados en el software IDEA StatiCa bajo una carga de tracción de 222.17 [kN] siguiendo la normativa ASD, obteniéndose los siguientes resultados del análisis del sistema de conexión.



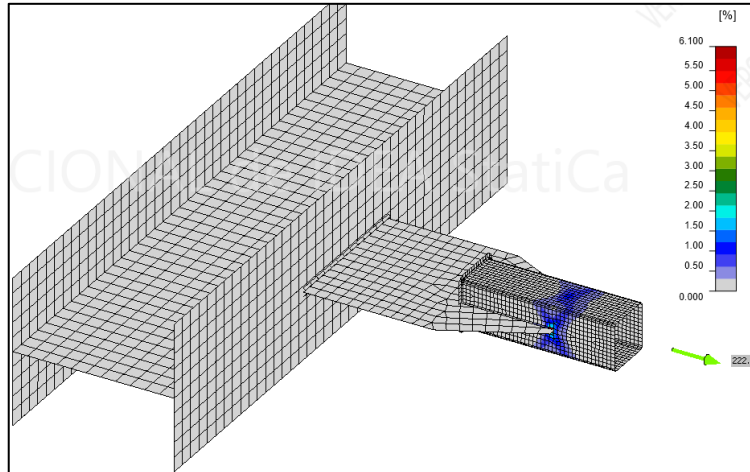
**Figura 17: Verificación general mediante IDEA StatiCa de conexión simple 3.**



**Figura 18: Deformaciones alcanzadas mediante IDEA StatiCa de conexión simple 3.**



**Figura 19: Tensiones equivalentes mediante IDEA StatiCa de conexión simple 3.**

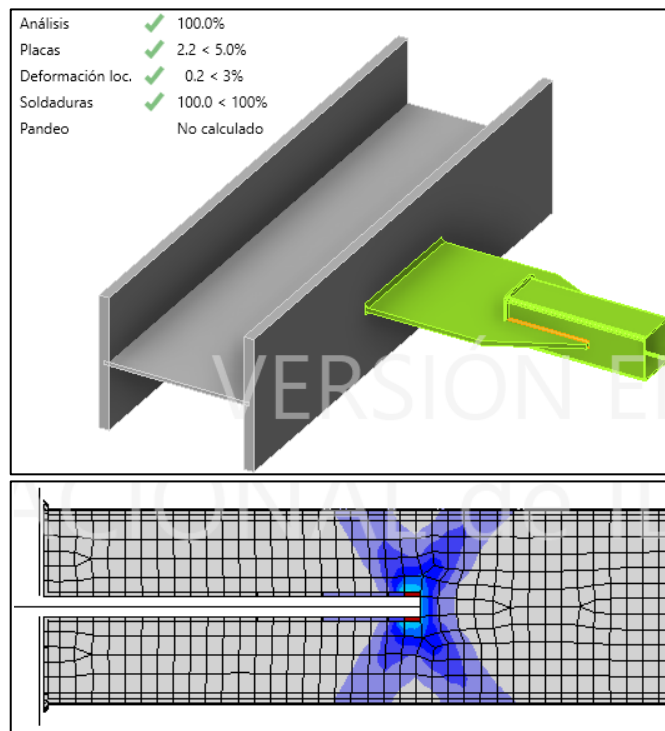


**Figura 20: Deformaciones plásticas mediante IDEA StatiCa de conexión simple 3.**

El análisis realizado en el software muestra que la conexión no cumple con los criterios de diseño según la metodología de tensión/deformación utilizada por IDEA StatiCa, debido a que la soldadura que conecta el tirante a la placa gusset supera su resistencia límite.

Aunque la soldadura alcanza su límite de falla, se observa que los perfiles seleccionados cumplen satisfactoriamente los criterios de diseño de tensión/deformación, ya que no alcanzan el 5% de deformación plástica. Sin embargo, estos elementos están cerca de la falla, lo que indica que el diseño es optimizado.

En la Figura 21 se presenta la conexión solicitada por la carga última que resiste la soldadura que une el perfil a la placa gusset. Según los cálculos desarrollados por el software, esta carga correspondería a 221.2 [kN].



**Figura 21: Estado de conexión simple 3 para carga de 221.2 [kN] en IDEA StatiCa: A) Verificación general; B) Deformaciones plásticas en zona de falla.**

El error relativo entre la carga última que resiste la conexión, calculada mediante las fórmulas del método tradicional, y la obtenida utilizando IDEA StatiCa es del 0.43%, lo que puede considerarse despreciable. Esto indica que el análisis realizado por el software concuerda con el diseño optimizado propuesto para esta conexión.

Tal como se observa en el análisis, la falla ocurre en la zona cercana a la soldadura que une el perfil a la placa gusset, lo que puede interpretarse como una ruptura debido a la fuerza de tracción directamente relacionada con la soldadura aplicada al elemento.

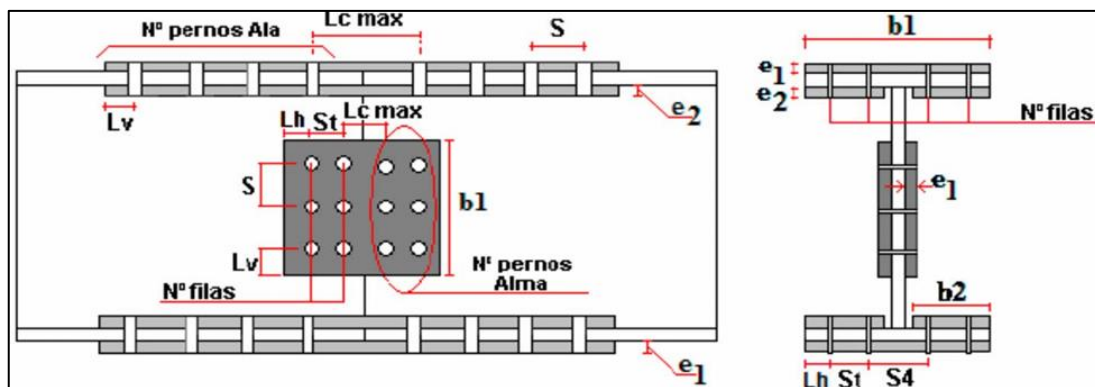
En conclusión, al comparar el análisis obtenido mediante el cálculo tradicional con los resultados proporcionados por el software, se observa que los resultados son casi idénticos en términos de diseño estructural, siendo el resultado del software ligeramente más conservador que la metodología planteada por la normativa AISC. El comportamiento de la distribución de cargas y la zona predominante a la falla concuerdan tanto con los criterios tradicionales de cálculo establecidos por la normativa vigente como con el análisis entregado por el software IDEA StatiCa.

#### 4.4 Conexión simple 4: Empalme de columna IN350x300x22x8 sometido a tensión.

En las siguientes tablas y en la imagen referencial se presentan las características relevantes de la conexión estudiada.

**Tabla 8: Características generales conexión simple 4.**

<b>ELEMENTO</b>	Columna
<b>FORMA</b>	IN350X300X22X8
<b>GRADO DE ACERO</b>	A250ES
<b>FUERZA</b>	Tensión, T
<b>CARGA [kN]</b>	2325,75



**Figura 22: Plano referencial conexión simple 4.**

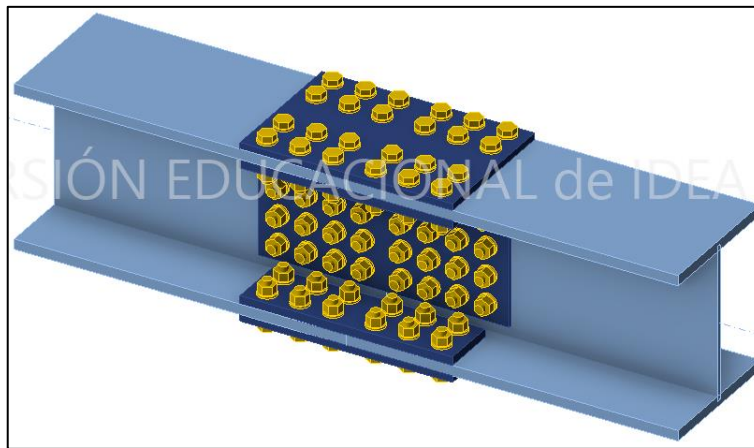
**Tabla 9: Detalle elementos conexión simple 4.**

PLACA SUPERIOR DEL ALA		PLACA INFERIOR DEL ALA		PLACA DEL ALMA	
e1 [mm]	14	e2 [mm]	18	e1 [mm]	10
b1 [mm]	300	b2 [mm]	120	b1 [mm]	260
Tipo de perno	3/4" A325	Tipo de perno	3/4" A325	Tipo de perno	3/4" A325
Agujero de Placa	STD	Agujero de Placa	STD	Agujero de Placa	STD
Agujero de Perfil	STD	Agujero de Perfil	STD	Agujero de Perfil	STD
N° pernos ala	12	N° pernos ala	6	N° pernos ala	16
N° filas	4	N° filas	2	N° filas	4
Lh [mm]	30	Lh [mm]	30	Lv [mm]	40
St [mm]	60	St [mm]	60	St [mm]	60
Lv [mm]	40	Lv [mm]	40	Lh [mm]	40
S [mm]	70	S [mm]	70	S [mm]	60
S4 [mm]	120	Lc max [mm]	90	Lc max [mm]	90
Lc max [mm]	90				

STD: Dimensiones de agujero estándar (AISC 360-10 TABLA J3.3)

Realizando un diseño bajo el método tradicional con las ecuaciones obtenidas de la normativa AISC, se obtiene una condición de falla dominada por bloque de corte y por fractura de área neta. Al realizar el diseño según la normativa AISC mediante el método ASD, se obtiene un factor de utilización (FU) del 90% para las solicitaciones de la conexión.

En la Figura 23 se muestra la conexión modelada en IDEA StatiCa para su análisis.



**Figura 23: Modelo IDEA StatiCa conexión simple 4.**

Se realizó el análisis de los elementos en el software IDEA StatiCa, aplicando una carga de tracción de 2325.75 [kN] y utilizando la normativa ASD. A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis del sistema de conexión.

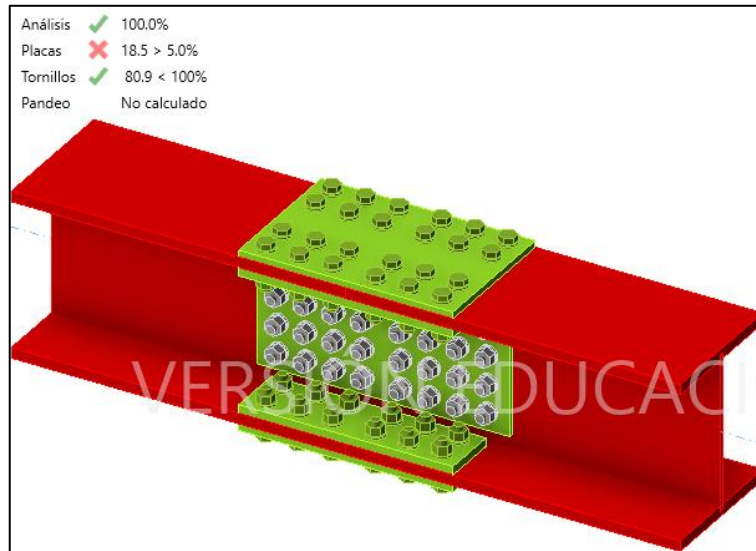


Figura 24: Verificación general mediante IDEA StatiCa de conexión simple 4.

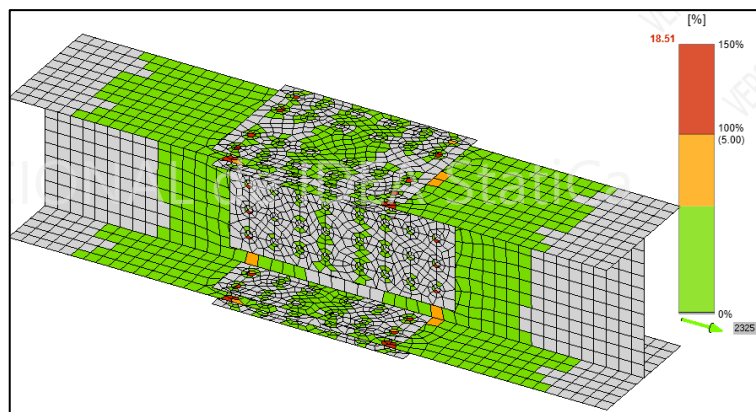


Figura 25: Deformaciones alcanzadas mediante IDEA StatiCa de conexión simple 4.

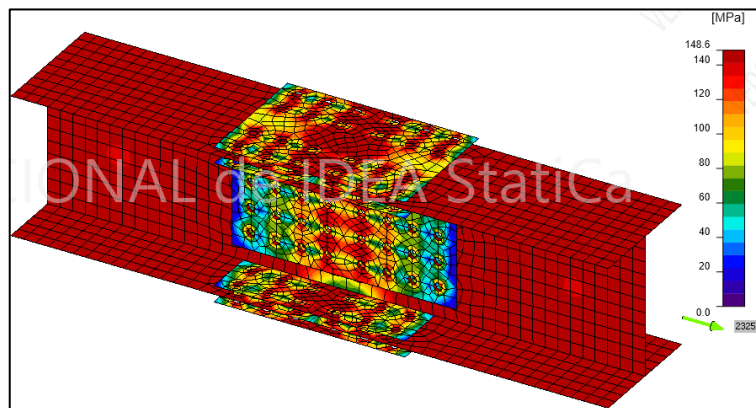
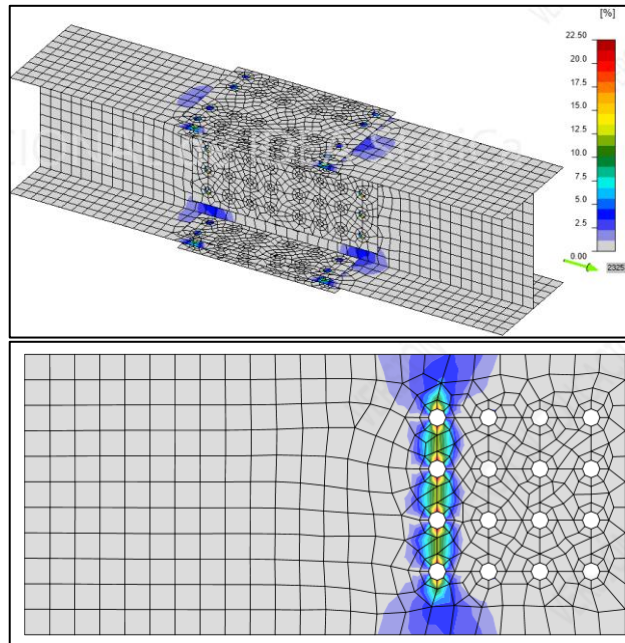


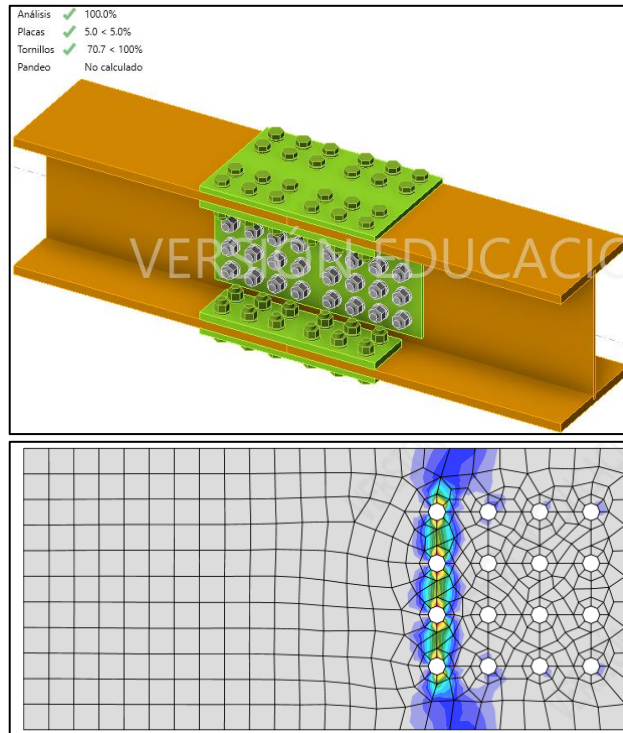
Figura 26: Tensiones equivalentes mediante IDEA StatiCa de conexión simple 4.



**Figura 27: Deformaciones plásticas mediante IDEA StatiCa de conexión simple 4: A) Vista general; B) Alma del perfil.**

El análisis realizado en el software revela que la conexión no cumple con los criterios de diseño según la metodología de tensión/deformación empleada por IDEA StatiCa, ya que los perfiles de la conexión superan considerablemente el límite de deformación plástica del 5%. Este comportamiento se observa específicamente en la cuarta fila de tornillos, donde se alcanza una deformación inelástica del 18.5%. Este comportamiento induce una falla por bloque de corte, ya que la deformación se extiende a través del área neta del perfil.

En la Figura 28 se presenta la conexión sometida a la carga última que resiste, según los cálculos desarrollados por el software, correspondiente a una carga de 2131.0 [kN].



**Figura 28: Estado de conexión simple 4 para carga de 2131.0 [kN] en IDEA StatiCa: A) Verificación general; B) Deformaciones plásticas en zona de falla.**

El error relativo entre la carga última que resiste la conexión, calculada mediante las fórmulas del método tradicional, y la obtenida utilizando IDEA StatiCa es del 8.4%, lo que indica que el análisis realizado por el software es ligeramente más conservador que la normativa local.

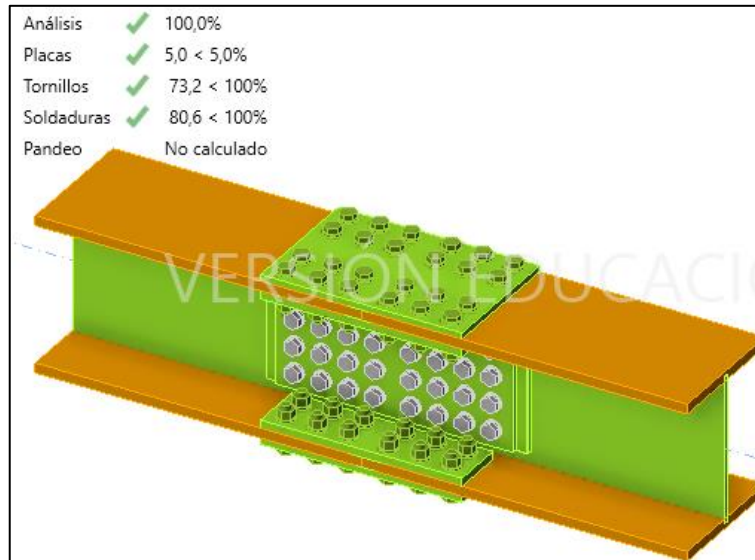
La falla se produce en el área neta de la cuarta fila de pernos, y tanto las placas como los tornillos presentan un factor de utilización cercano al 70%, según el diagrama de colores de los resultados.

En conclusión, al comparar el análisis obtenido mediante el cálculo tradicional con los resultados proporcionados por el software, se observa que este último entrega resultados más conservadores que la metodología planteada por la normativa AISC. Sin embargo, la zona de falla es la misma que la obtenida mediante el método tradicional, y el resto de los elementos no relacionados con la falla presentan factores de utilización menores, lo que concuerda con los cálculos manuales realizados.

En la Tabla 10 se presenta una alternativa de diseño que satisface las cargas solicitadas para la conexión ante los criterios de IDEA StatiCa, esta propuesta corresponde a la implementación de placas de refuerzo por ambos lados en el alma de los perfiles para evitar la falla provocada debido a la fractura del área neta. En la Figura 29 se muestran los resultados obtenidos para los cambios propuestos.

**Tabla 10: Alternativa de cambios de conexión simple 4 para satisfacer cargas solicitadas.**

DISEÑO ORIGINAL		DISEÑO PROPUESTO	
PLACA DE REFUERZO	-	PLACA DE REFUERZO	290x260x8 [mm] (por ambos lados)



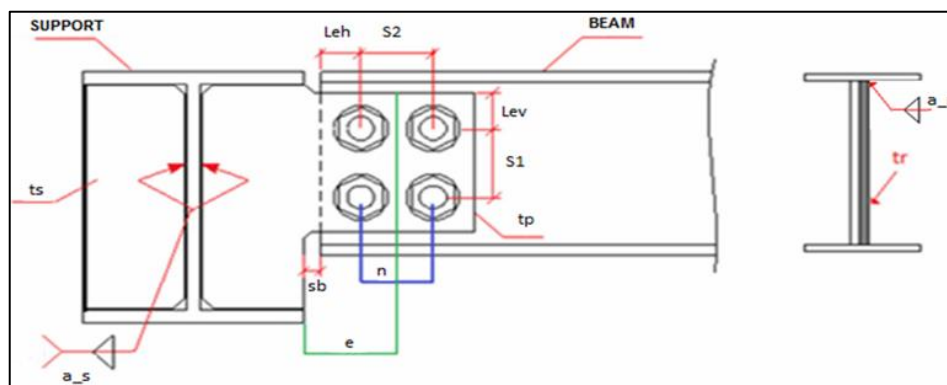
**Figura 29: Verificación general diseño propuesto para conexión simple 4.**

#### 4.5 Conexión simple 5: Placa de corte de Viga IN35x123 sometido a corte.

En las siguientes tablas y en la imagen referencial se presentan las características relevantes de la conexión estudiada.

**Tabla 11: Características generales conexión simple 5.**

ELEMENTO	Viga	Soporte
FORMA	IN35x123	IN35x123
GRADO DE ACERO	A250ES	A250ES
FUERZA	Corte, V	-
CARGA [kN]	124.85	-



**Figura 30: Plano referencial conexión simple 5.**

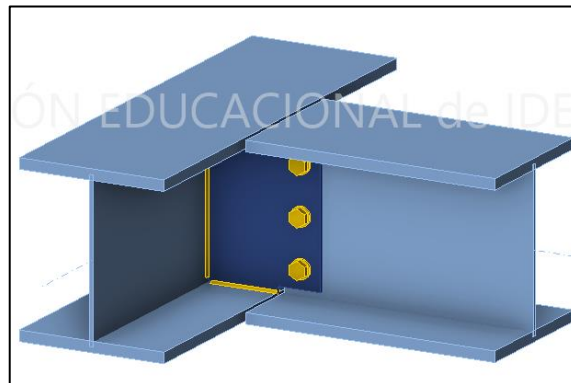
**Tabla 12: Detalle elementos conexión simple 5.**

PLACA SUPERIOR DEL ALA		ATIESADOR	
tp (mm)	8	ts (mm)	8
db (mm)	3/4	Lw/a_t alma min (mm)	262
N	3	Lw/a_t ala min (mm)	124
n	1	Reforzamiento de alma de Viga	
Agujero de Perfil	STD	tr (mm)	0
Leh (mm)	40	Lw/a_r alma min (mm)	0
S1 (mm)	100	Lw/a_r ala min (mm)	0
Lev (mm)	40		
S2 (mm)	0		
sb (mm)	10		
e max (mm)	50		
a_s alma min (mm)	262		
a_s ala min (mm)	124		

STD: Dimensiones de agujero estándar (AISC 360-10 TABLA J3.3)

Al realizar el diseño bajo el método tradicional utilizando las ecuaciones de la normativa AISC, se obtiene una condición de falla dominada por el aplastamiento de los pernos de conexión y por la resistencia de los pernos bajo carga excéntrica. Tras aplicar el método ASD de la normativa AISC, se obtiene un factor de utilización (FU) del 95% para las solicitaciones de la conexión.

En la Figura 31 se presenta la conexión modelada en IDEA StatiCa para su análisis.



**Figura 31: Modelo IDEA StatiCa conexión simple 5.**

Los elementos fueron analizados en el software IDEA StatiCa bajo una carga de corte de 124.85 [kN], siguiendo la normativa ASD, obteniéndose los siguientes resultados del análisis del sistema de conexión.

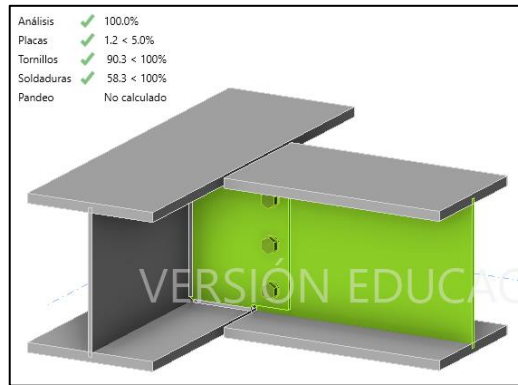


Figura 32: Verificación general mediante IDEA StatiCa de conexión simple 5.

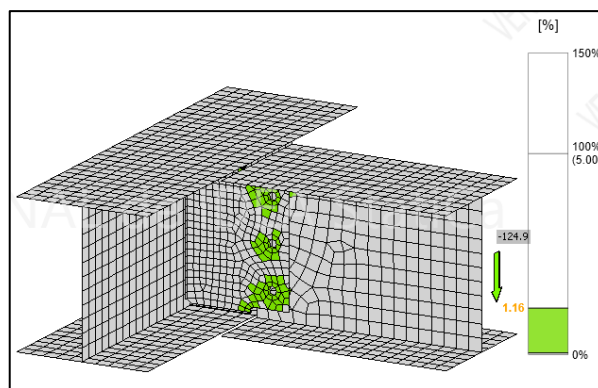


Figura 33: Deformaciones alcanzadas mediante IDEA StatiCa de conexión simple 5.

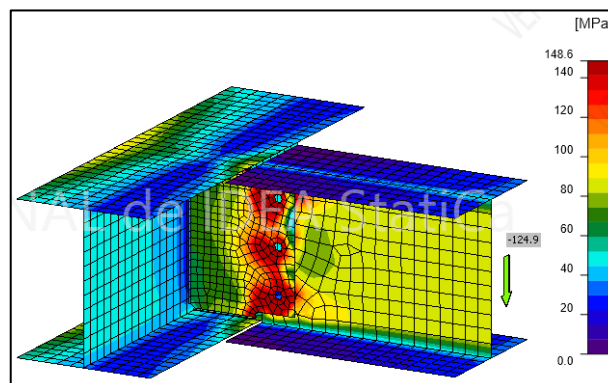
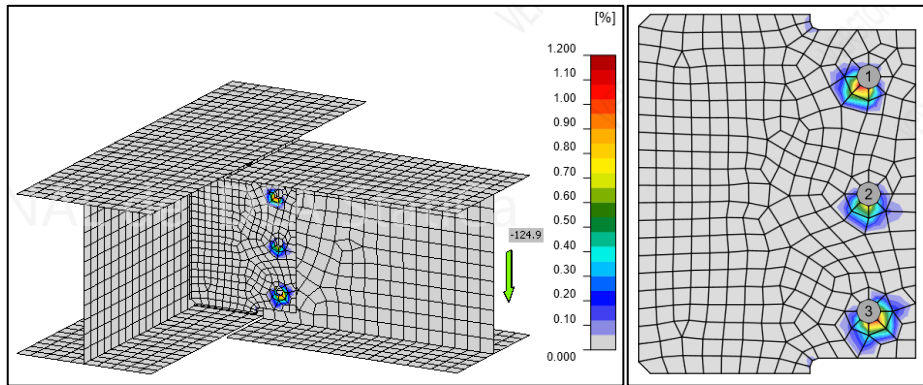


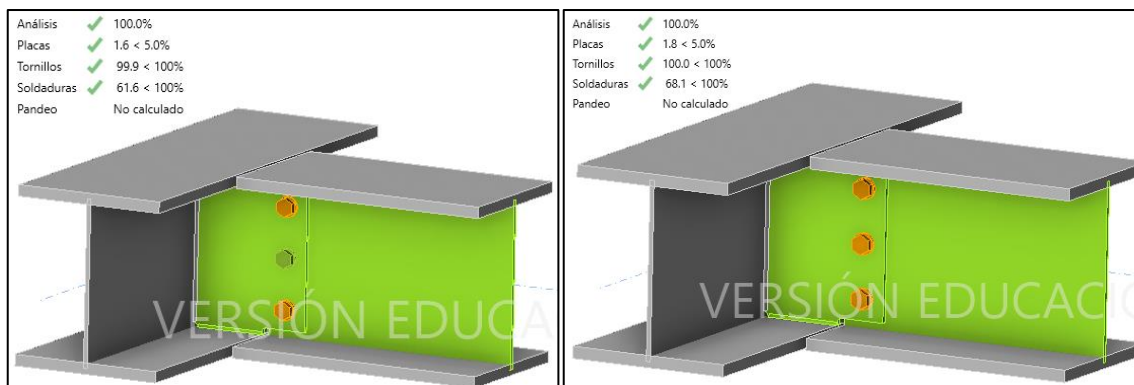
Figura 34: Tensiones equivalentes mediante IDEA StatiCa de conexión simple 5.



**Figura 35: Deformaciones plásticas mediante IDEA StatiCa de conexión simple 5: A) Vista general; B) Placa Gusset.**

El análisis realizado en el software muestra que la conexión cumple con los criterios de diseño según la metodología de tensión/deformación propuesta por IDEA StatiCa. Los perfiles de la conexión se encuentran alejados de alcanzar su estado de falla, siendo los elementos más cercanos a la ruptura los tornillos, los cuales presentan una resistencia nominal de 138.9 [kN], lo que da como resultado un factor de utilización (FU) del 89.9%. Además, al alcanzar un factor de utilización alto en los tornillos, el software redistribuye los esfuerzos, lo que lleva a que los tornillos dejen de estar solicitados debido a la plastificación de estos.

En la Figura 36 se presenta la conexión solicitada por una carga de A) 138.9 [kN] y B) 151.0 [kN]. A pesar de aumentar la carga, el porcentaje de utilización de los tornillos se mantiene constante, lo que indica un comportamiento de redistribución de esfuerzos dentro de la conexión.



**Figura 36: Estado de conexión simple 5 en IDEA StatiCa: A) Carga de 138.9 [kN]; B) Carga de 151.0 [kN].**

El error relativo entre la carga última que resiste la conexión, calculada mediante las fórmulas del método tradicional, y la obtenida utilizando IDEA StatiCa es del 14.05%, lo que indica que el análisis normativo es más conservador en este caso. No obstante, se observa que IDEA StatiCa no analiza la resistencia de los pernos de manera lineal, sino que considera las plastificaciones de estos mientras la conexión sigue tomando cargas, lo que difiere del enfoque propuesto por la normativa vigente en Chile.

Finalmente, se destaca que la zona de falla, dominada por los pernos, y la baja utilización porcentual de los perfiles son características comunes en ambos análisis de diseño.

## 5 Análisis de conexiones complejas.

Para la verificación de los resultados obtenidos por el software en conexiones con geometrías irregulares o elementos complejos, se extrajeron los resultados de tres ensayos experimentales de la literatura. Estos ensayos fueron sometidos a cargas puntuales aplicadas a una distancia determinada desde el centro de la viga, lo que generó corte y momento hasta alcanzar una deformación plástica considerable o se obtuvieron los datos necesarios para evaluar el comportamiento de los sistemas de conexión.

El primer sistema de conexión evaluado consiste en una viga W24x68 conectada al ala de una columna W14x120 mediante una placa, que estaría soldada en toda la superficie del perfil transversal de la viga y atornillada al ala de la columna. La columna, además, contaría con atiesadores de continuidad en ambos lados para las cargas provenientes de la viga, y una placa de refuerzo en uno de los lados del alma para aumentar la rigidez y resistencia en la zona panel.

El segundo sistema de conexión corresponde a una viga W30x99 con secciones reducidas (RBS) en ambas alas, conectada mediante una soldadura de penetración completa al ala de una columna W14x176. Esta columna también contaría con atiesadores de continuidad en ambos lados según las alas provenientes de la viga.

Finalmente, el tercer sistema de conexión es similar al anterior, con la diferencia de que la viga tiene una geometría W27x94 y la columna es una W24x131. Además, la columna está reforzada con una placa soldada para proporcionar rigidez y resistencia a la zona panel.

### 5.1 Metodología de resultados.

Para cada conexión, se aumentaron progresivamente las cargas de corte y momento con el objetivo de obtener un comportamiento progresivo de los sistemas de conexión. Este enfoque permitió identificar las zonas más solicitadas, las primeras plastificaciones y el estado de falla. Los resultados obtenidos fueron comparados con los comportamientos observados en los ensayos experimentales, tanto de forma cualitativa como cuantitativa.

### 5.2 Configuraciones iniciales de IDEA StatiCa Connection.

Dado que el objetivo de esta sección es comparar los resultados obtenidos con el comportamiento real, se omiten los factores de minoración de resistencia de los elementos establecidos por el diseño LRFD. En la Figura 37 se presenta la configuración utilizada en el software.

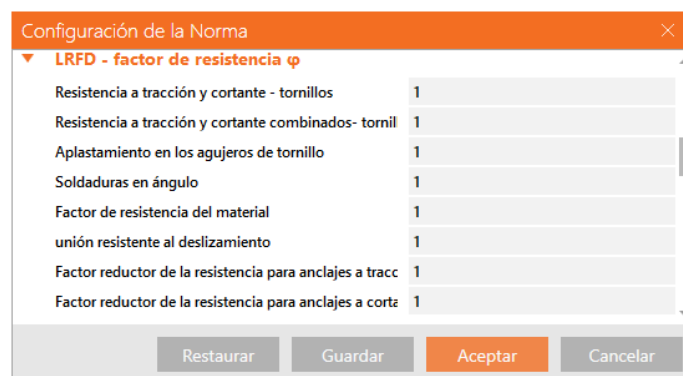


Figura 37: Configuración inicial factores de resistencia conexiones complejas.

En cuanto a las resistencias nominales de los aceros utilizados, estas se configurarán en cada caso de acuerdo con la resistencia de probeta obtenida en los ensayos experimentales. Asimismo, las unidades de los resultados se ajustarán a las utilizadas en las mediciones de dichos ensayos.

### 5.3 Caso de estudio 1: Viga con placa End-Plate atornillada

En la Figura 38 se presenta una imagen referencial de la conexión ensayada, mientras que en la Tabla 13 se detallan las características de la conexión.

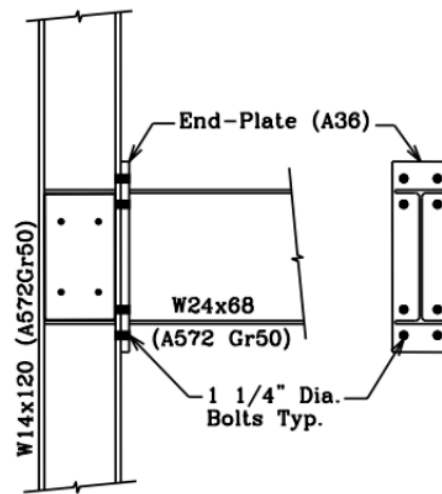


Figura 38: Plano referencial conexión compleja 1 (Sumner III, 2003).

Tabla 13: Características generales conexión compleja 1.

Perfil	W14x120	W24x68
Tipo	Columna	Viga
Atiesadores	1'-0"5/8x7"1/16x5/8"	-
Placa de refuerzo	1'-11"x1'-0"5/8x1/2	-
Placa de conexión	-	2'-9"1/4x10'x1"1/2

En la Figura 39 se muestra la curva histerética registrada en el sistema de conexión, mientras que en la Figura 40 se presenta el comportamiento observado en el ensayo experimental bajo cargas cíclicas, registrándose el mayor momento alcanzado de 11702.6 [kip-in].

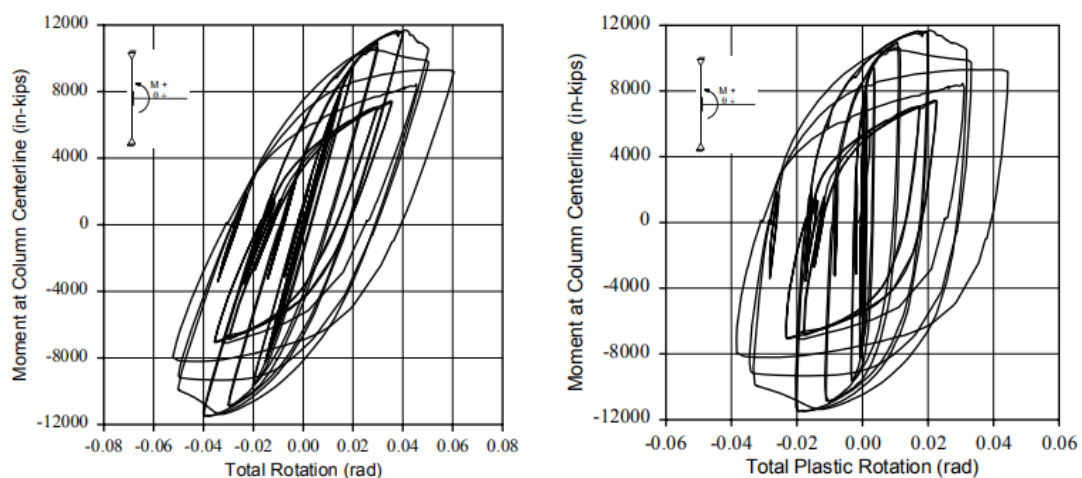
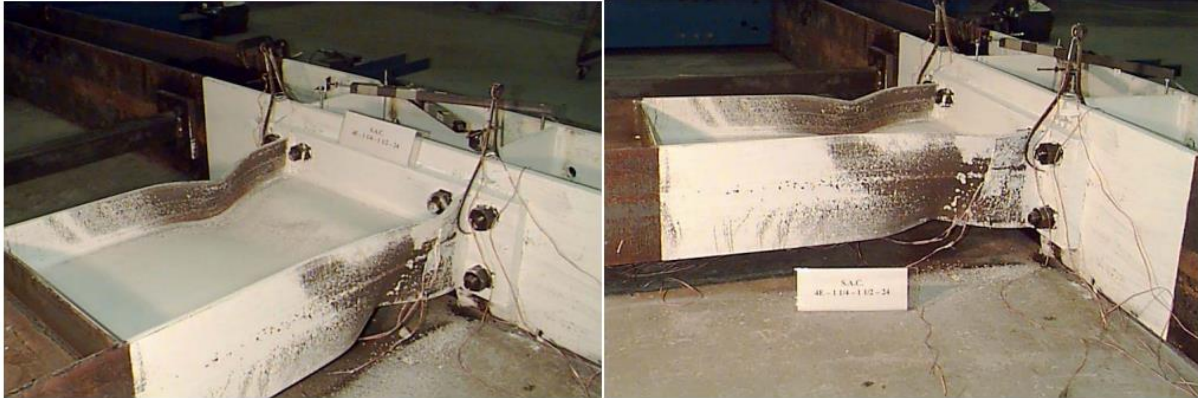


Figura 39: Curvas experimentales conexión compleja 1: A) Relación momento-rotación total; B) Relación momento-rotación total plástica (Sumner III, 2003).



**Figura 40: Comportamiento experimental conexión compleja 1: A) Vista general; B) Vista alas (Sumner III, 2003).**

Se observa que las mayores concentraciones de esfuerzos se presentan en las alas de la viga, en una zona cercana al extremo soldado a la placa atornillada, donde se aprecia una deformación plástica considerable. Además, se identifica una deformación plástica en la zona del alma de la viga, la cual disminuye hacia el centro del alma. También se observan concentraciones de esfuerzos en la zona de la placa atornillada, específicamente alrededor de los pernos. Este comportamiento se obtuvo ante cargas cíclicas, siendo la carga puntual positiva máxima de 68.94 [kip], la cual genera un momento de 1 1702.57 [kip-in] en la conexión.

En la Figura 41 se presenta el modelo analizado en IDEA StatiCa.



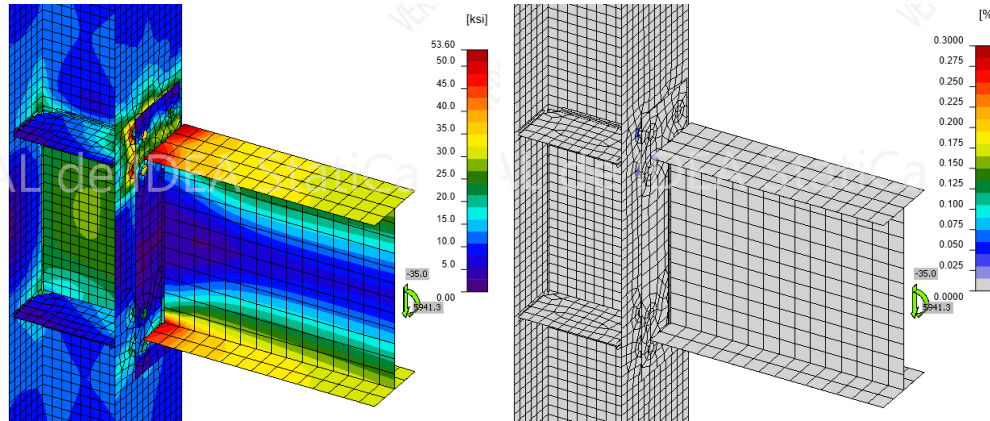
**Figura 41: Modelo IDEA StatiCa conexión compleja 1.**

Las cargas aplicadas para el análisis del comportamiento de la conexión se resumen en la Tabla 14.

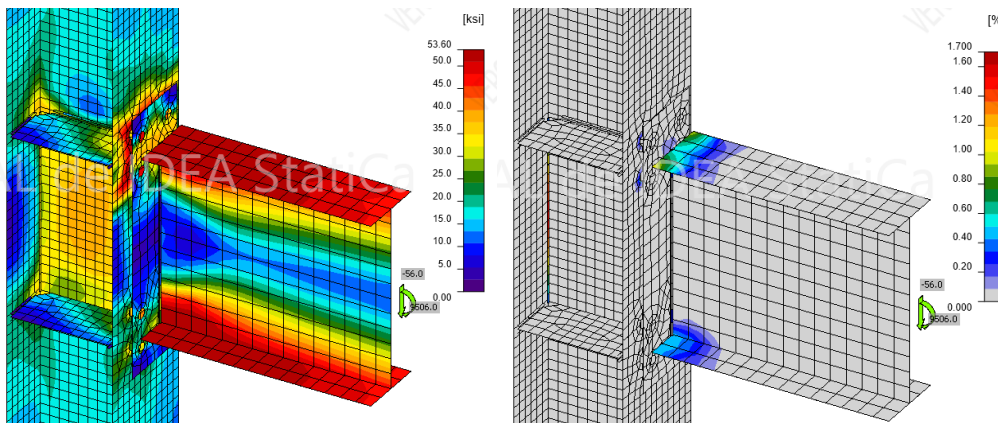
**Tabla 14: Cargas aplicadas de interés conexión compleja 1.**

V aplicado [kip]	M producido [kip-in]	Observación Zona de Falla
35.0	5941.3	Primera Plastificación
56.0	9506.0	Deformación Plástica = 1.0%
60.8	10320.8	Deformación Plástica = 2.5%
62.5	10600.9	Falla de conexión

En las siguientes figuras se presentan gráficamente los comportamientos observados de la conexión.



**Figura 42: Resultados de IDEA StatiCa en conexión compleja 1 ante primera plastificación en zona de falla: A) Tensiones equivalentes; B) Deformaciones plásticas.**



**Figura 43: Resultados de IDEA StatiCa en conexión compleja 1 ante deformación plástica de 1.0% en zona de falla: A) Tensiones equivalentes; B) Deformaciones plásticas.**

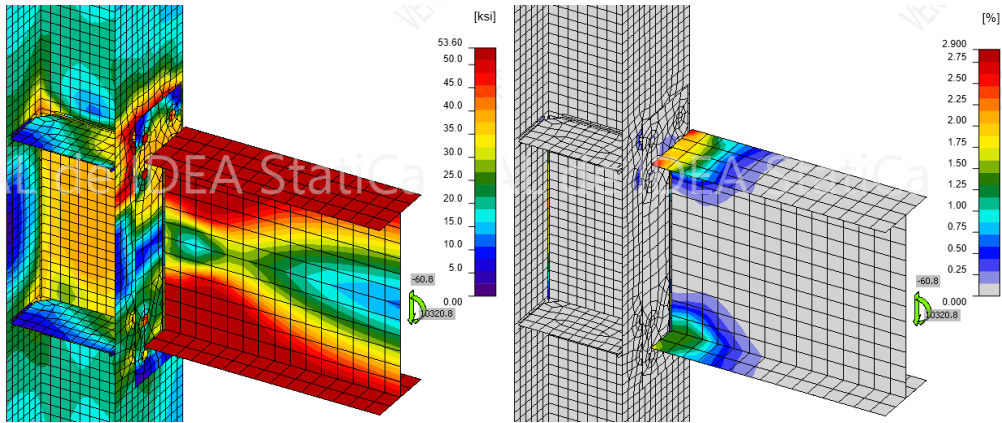


Figura 44: Resultados de IDEA StatiCa en conexión compleja 1 ante deformación plástica de 2.5% en zona de falla: A) Tensiones equivalentes; B) Deformaciones plásticas.

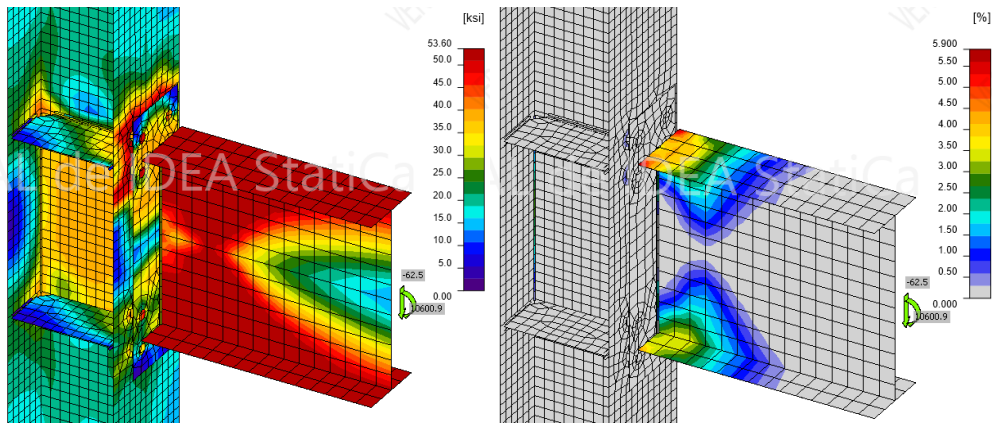


Figura 45: Resultados de IDEA StatiCa en conexión compleja 1 ante falla de conexión: A) Tensiones equivalentes; B) Deformaciones plásticas.

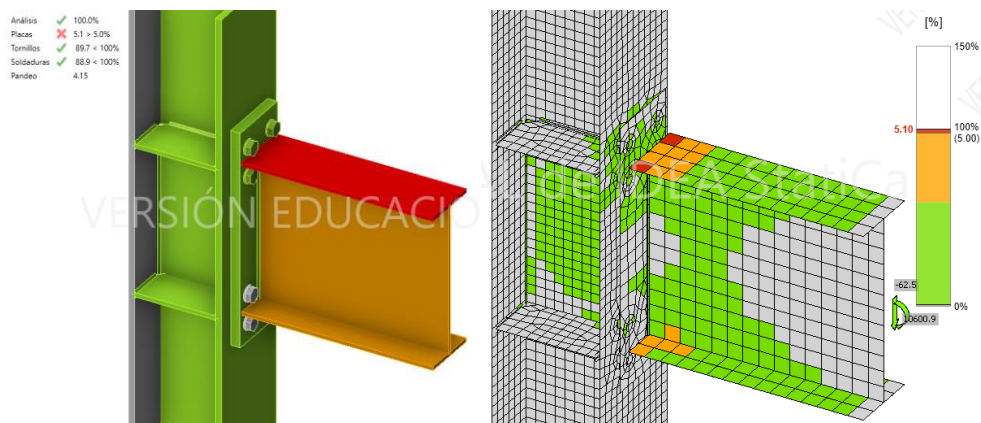
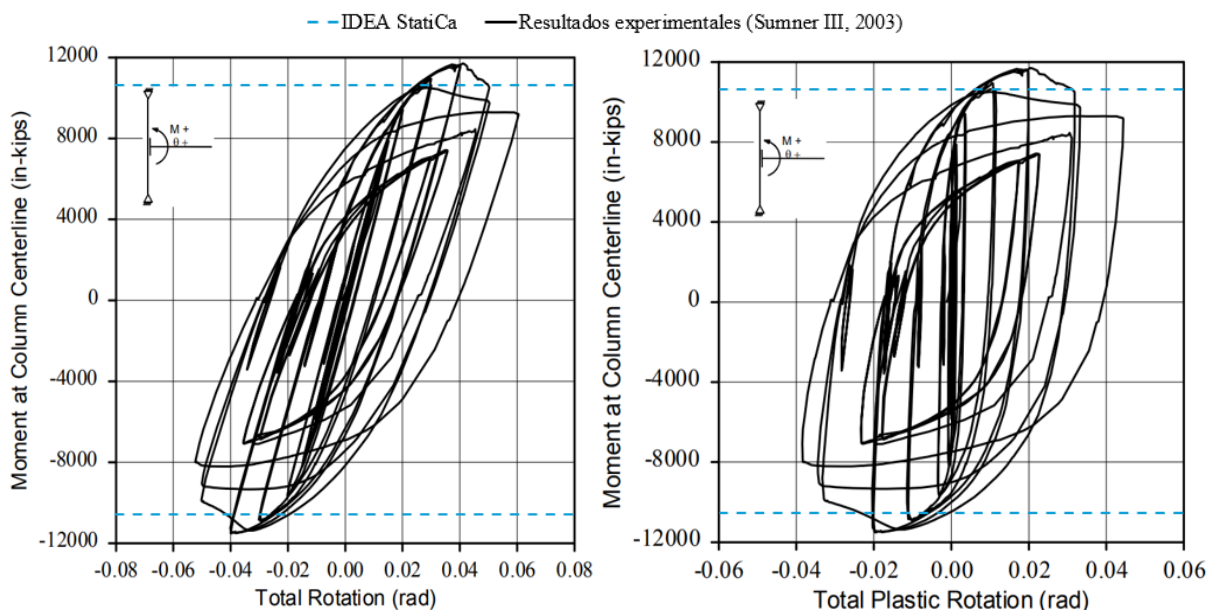


Figura 46: Resultados de IDEA StatiCa en conexión compleja 1 ante falla de conexión: A) Verificación general; B) Deformaciones alcanzadas.

Se observa que, conforme aumenta la carga, la parte más solicitada corresponde a las alas de la viga, tanto superior como inferior, a lo largo de todo el tramo. El alma de la viga también recibe parte de las cargas, pero estas disminuyen hacia el centro del perfil. Además, se identifican zonas tensionadas en el ala conectada de la columna, específicamente detrás de la zona superior de la placa atornillada. Por último, se presenta una concentración de esfuerzos en el alma de la columna, en la zona del panel, la cual está reforzada con una placa dobladora para evitar que la falla se concentre en esta área.

La zona detectada como la de mayor concentración de esfuerzos y eventual falla corresponde al ala superior de la viga, específicamente en la zona extrema que está soldada a la placa atornillada. La falla se produce al aplicar una carga de 62.45 [kip] a una distancia de 169.75 [in] desde el centro de la columna, generando un momento último de 10600.89 [kip-in] en el sistema de conexión.

En la Figura 47 se presenta la comparación entre el momento máximo registrado en IDEA StatiCa y el comportamiento histerético obtenido experimentalmente.



**Figura 47: Comparación de momentos experimentales e IDEA StatiCa – Conexión compleja 1.**

Como conclusión para el modelo estudiado, el software demuestra un comportamiento preciso en la distribución de esfuerzos y en la identificación de las zonas plastificadas. En ambos análisis, tanto los resultados experimentales como los obtenidos mediante IDEA StatiCa, se observa que las alas de la viga en la zona extrema cercana a la placa atornillada son las más afectadas. Además, se encuentra una gran similitud entre la carga positiva última alcanzada en el ensayo experimental y la carga de falla detectada en el software, con un error relativo del 9.41% respecto al valor real, siendo el análisis del software el que entregaría resultados más conservadores en comparación a los ensayos.

## 5.4 Caso de estudio 2: Viga RBS conectada a Columna tipo 1

El segundo sistema de conexión, que se muestra en la Figura 48, corresponde a una conexión con aberturas tipo RBS. Las características importantes de este sistema de conexión se presentan en la Tabla 15.

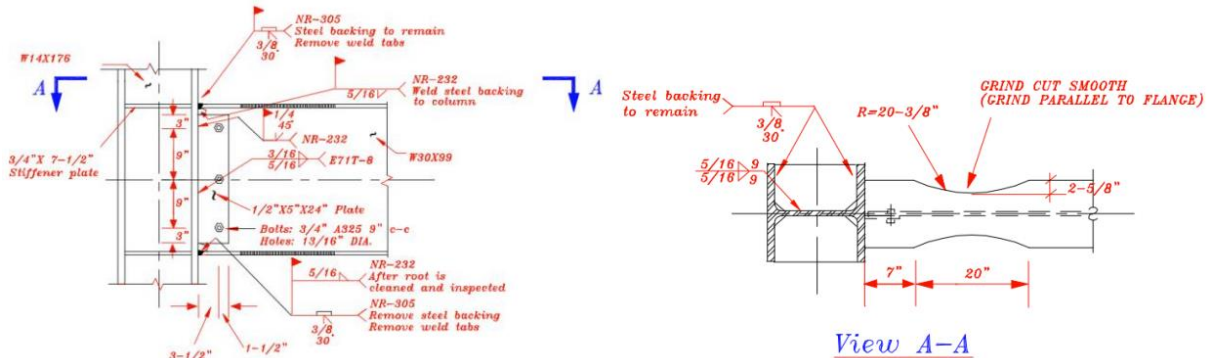


Figura 48: Plano referencial conexión compleja 2 (Uang et al., 2000).

Tabla 15: Características generales conexión compleja 2.

Perfil	W14x176	W30x99
Tipo	Columna	Viga
Atiesadores	1'-0"9/16x7"7/16x3/4"	-
RBS	-	1'-8"x2"5/8

En la Figura 49 se presenta la curva histerética registrada para el sistema de conexión, mientras que la Figura 50 ilustra el comportamiento observado en el ensayo experimental bajo cargas cíclicas. La mayor carga puntual positiva registrada en el ensayo corresponde a aproximadamente 116 [kip], aplicada a una distancia de 149 [in] desde el centro de la columna, lo que resultó en un momento máximo de 17284 [kip-in].

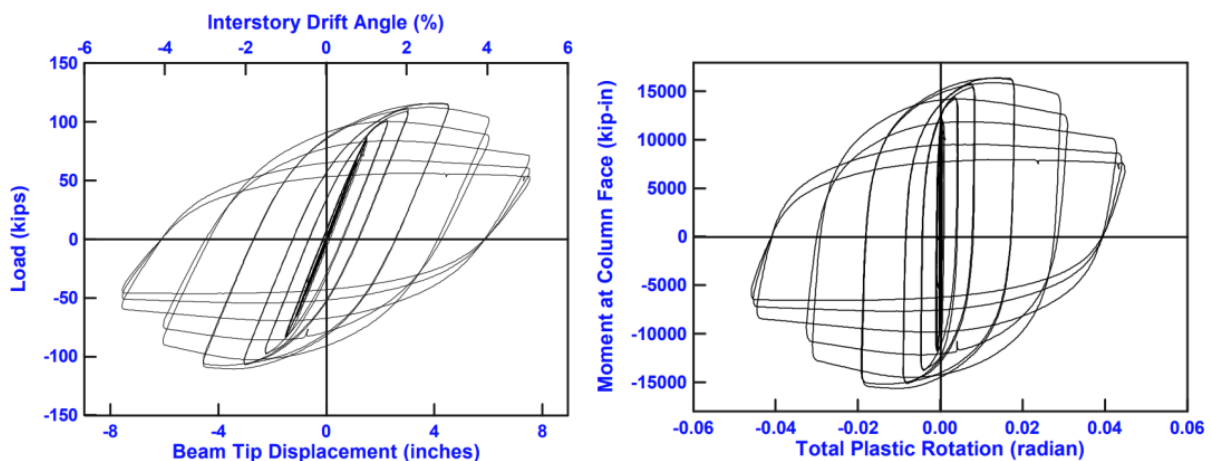
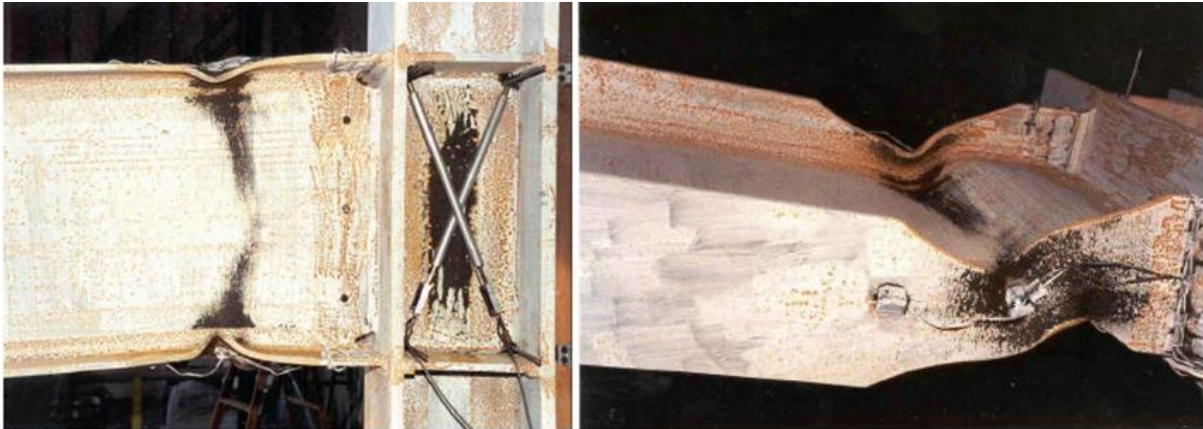


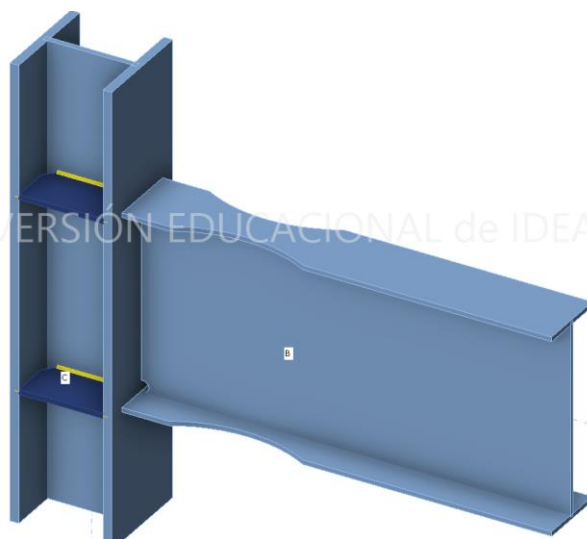
Figura 49: Curvas experimentales conexión compleja 2: A) Relación carga-desplazamiento del extremo de la viga; B) Relación momento-rotación total plástica (Uang et al., 2000).



**Figura 50: Comportamiento experimental conexión compleja 2: A) Vista lateral; B) Vista alas y alma de viga (Uang et al., 2000).**

En el espécimen se observan grandes concentraciones de deformaciones plásticas en la zona RBS y en la zona panel. Esta última no cuenta con una placa de refuerzo, lo que provoca que se supere el límite de fluencia, ocasionando la deformación visible en la Figura 50A. Al igual que en el caso anterior, también se presentan deformaciones plásticas en el alma de la viga, las cuales disminuyen conforme se acercan al centro del perfil.

En la Figura 51 se presenta el modelo de IDEA StatiCa utilizado para el análisis.



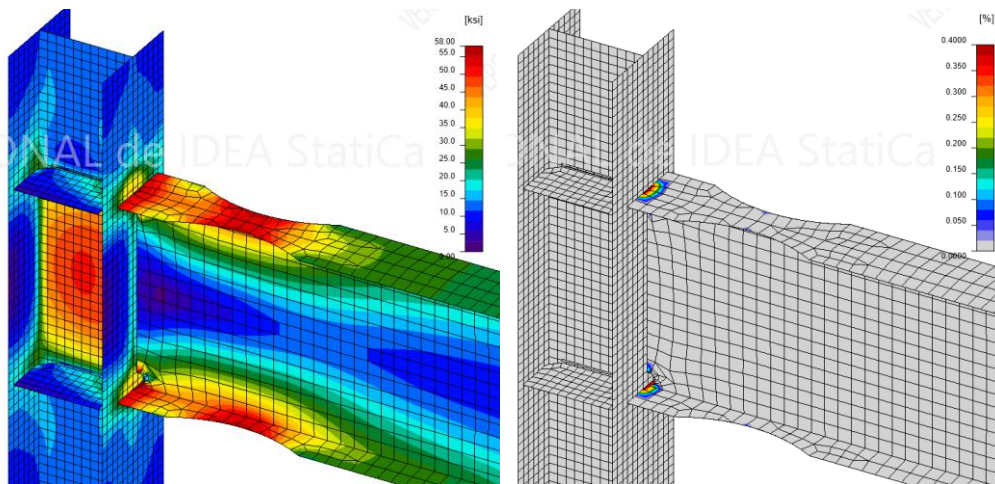
**Figura 51: Modelo IDEA StatiCa conexión compleja 2.**

Las cargas aplicadas y los resultados obtenidos del software se resumen en la Tabla 16.

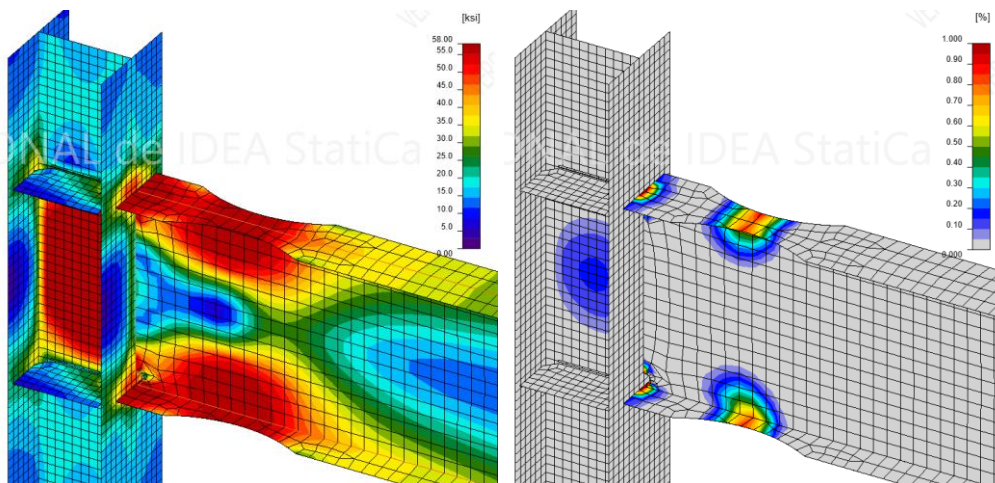
**Tabla 16: Cargas aplicadas de interés conexión compleja 2.**

V aplicado [kip]	M producido [kip-in]	Observación Zona de Falla
75.0	11175.0	Primera Plastificación
96.0	14304.0	Deformación Plástica = 1.0%
98.0	14602.0	Deformación Plástica = 2.5%
102.7	15308.3	Falla de conexión

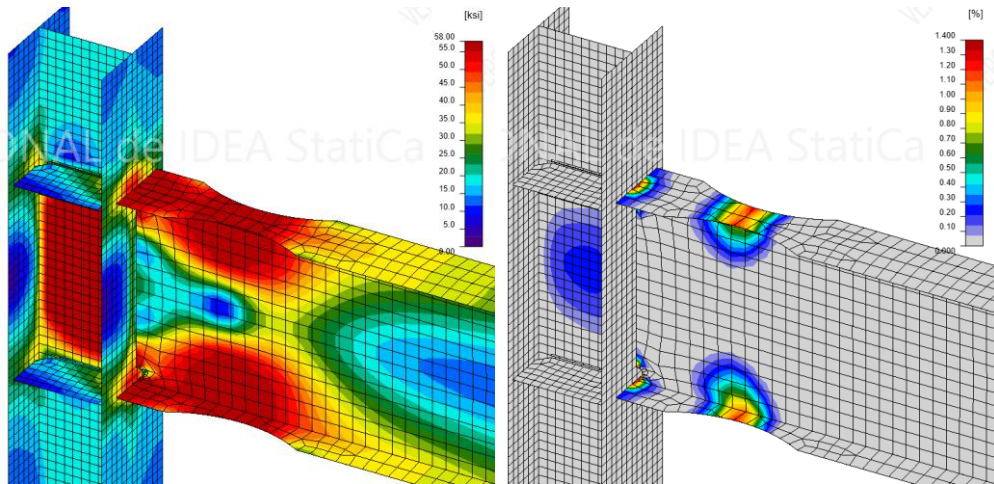
A continuación, se presentan las figuras que ilustran gráficamente los comportamientos obtenidos de la conexión.



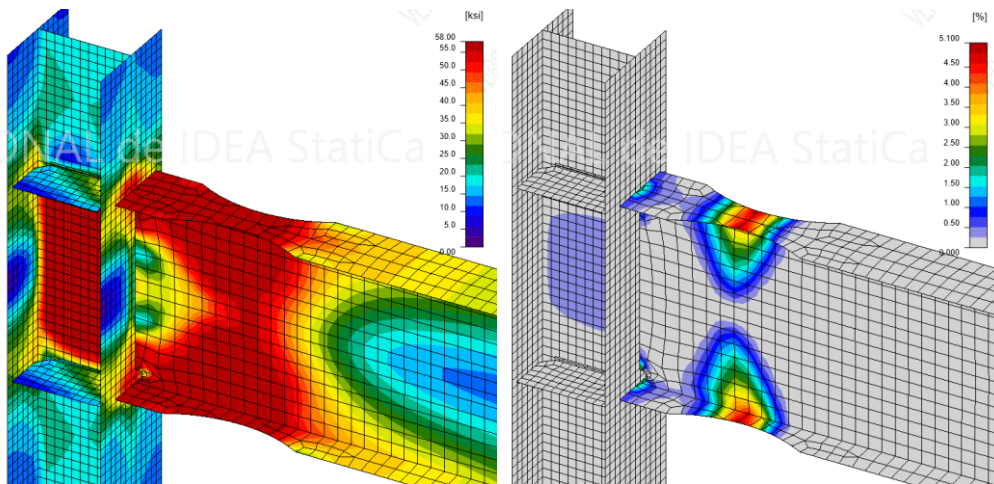
**Figura 52: Resultados de IDEA StatiCa en conexión compleja 2 ante primera plastificación en zona de falla: A) Tensiones equivalentes; B) Deformaciones plásticas.**



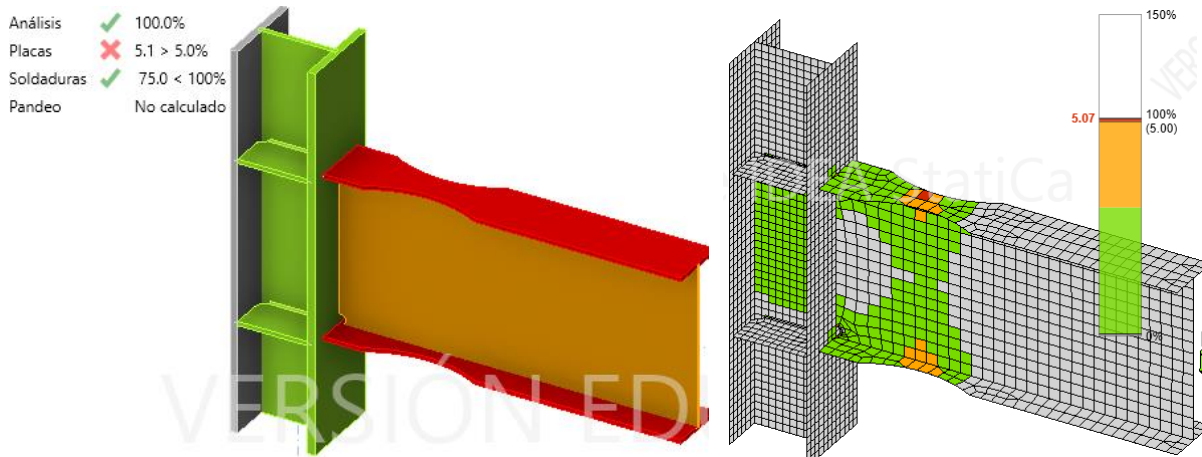
**Figura 53: Resultados de IDEA StatiCa en conexión compleja 2 ante deformación plástica de 1.0% en zona de falla: A) Tensiones equivalentes; B) Deformaciones plásticas.**



**Figura 54: Resultados de IDEA StatiCa en conexión compleja 2 ante deformación plástica de 2.5% en zona de falla: A) Tensiones equivalentes; B) Deformaciones plásticas.**



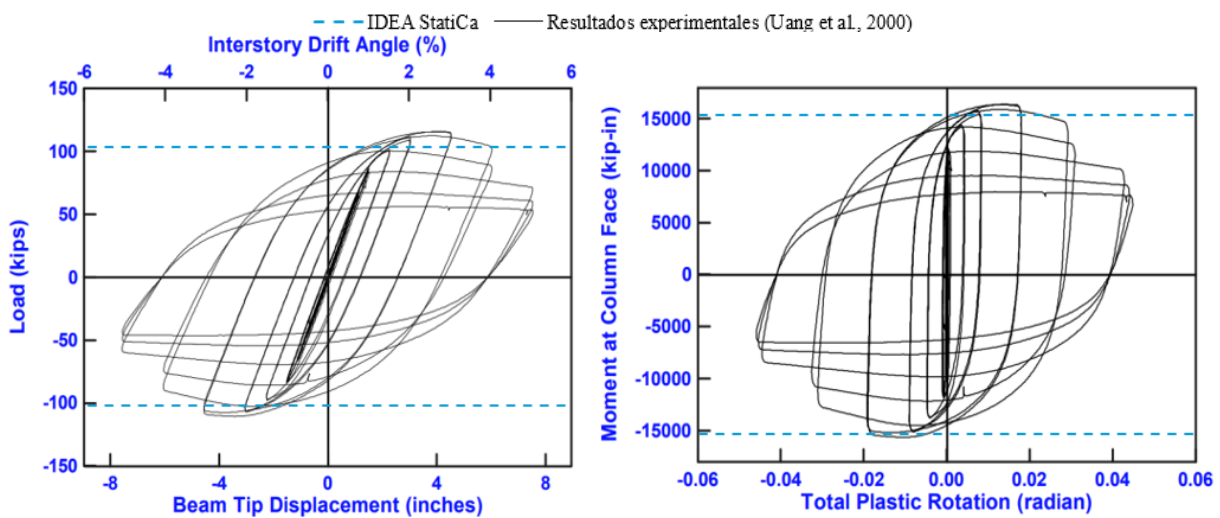
**Figura 55: Resultados de IDEA StatiCa en conexión compleja 2 ante falla de conexión: A) Tensiones equivalentes; B) Deformaciones plásticas.**



**Figura 56: Resultados de IDEA StatiCa en conexión compleja 2 ante falla de conexión: A) Verificación general; B) Deformaciones alcanzadas.**

Se observa que, a medida que aumenta la carga aplicada, las mayores concentraciones de tensiones equivalentes se localizan en las alas de la viga, específicamente en la zona de RBS, seguidas por altas concentraciones en el alma de la columna. La zona más plastificada se encuentra en la región RBS, que falla cuando se aplica una carga puntual de 102.74 [kip], lo que genera un momento de 15308.26 [kip-in] en la conexión. No obstante, tanto el alma de la columna como los extremos soldados de las alas de la viga presentan plastificaciones significativas debido a las cargas aplicadas.

En la Figura 57 se presenta la comparación entre el momento máximo registrado en IDEA StatiCa y el comportamiento histerético obtenido experimentalmente.

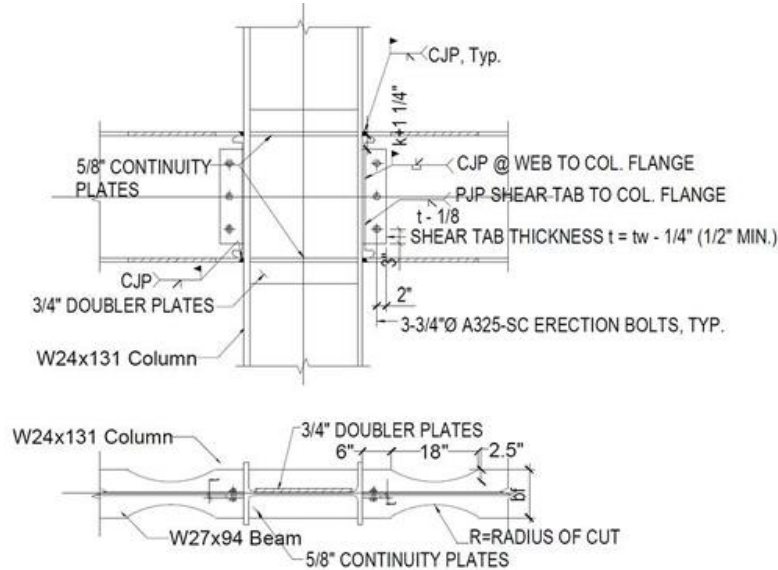


**Figura 57: Comparación de momentos experimentales e IDEA StatiCa – Conexión compleja 2.**

En conclusión, la distribución de las tensiones equivalentes obtenida por el software muestra una notable similitud con las observadas en el ensayo experimental, destacándose la zona RBS como la más afectada y dominante en el momento de la falla. Las zonas plastificadas predichas por el modelo coinciden con las observadas en el ensayo real, con especial atención en la deformación plástica que se produce en la zona panel, la cual no cuenta con una placa de refuerzo adicional, lo que indica que el software no solo identificó la zona de falla, sino también las concentraciones de esfuerzo en el alma de la columna. Además, se observa una coincidencia en el comportamiento del alma de la viga, donde las deformaciones plásticas disminuyen progresivamente hacia el centro del alma, tal como ocurre en el ensayo experimental. La carga de falla predicha por IDEA StatiCa presenta un error relativo del 11.43% respecto al valor positivo experimental, siendo el software el que arroja resultados moderadamente más conservadores.

### 5.5 Caso de estudio 3: Viga RBS conectada a Columna tipo 2

Como tercer sistema de conexión, se analiza un diseño similar al anterior, pero con características y parámetros distintos. En la Figura 58 se presenta una imagen representativa de la conexión, mientras que en la Tabla 17 se detallan sus principales características.

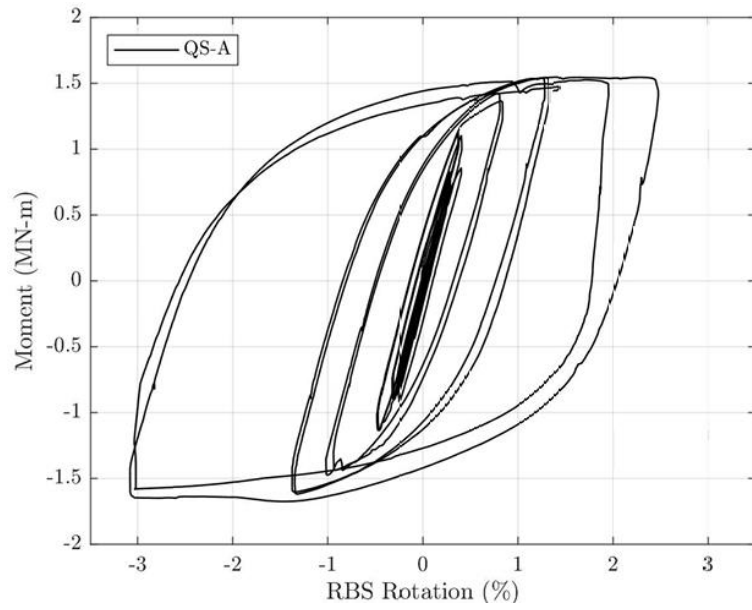


**Figura 58: Plano referencial conexión compleja 3 (Sepulveda et al., 2025).**

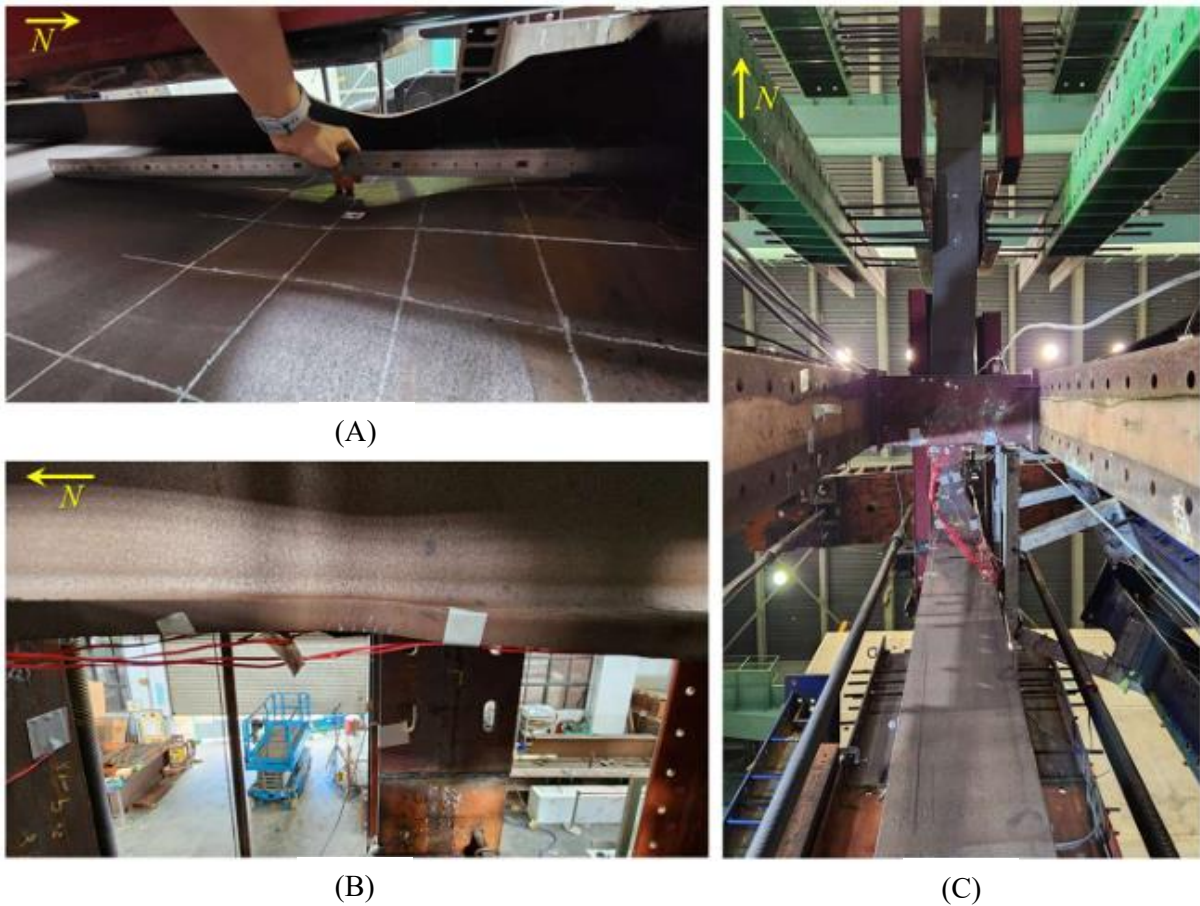
**Tabla 17: Características generales conexión compleja 3.**

Perfil	W24x131	W27x94
Tipo	Columna	Viga
Atiesadores	573.5x156.2x20 [mm]	-
RBS	-	457x64 [mm]
Placa de refuerzo	917x516x20 [mm]	-

En la Figura 59 se muestra la curva histerética obtenida durante el ensayo experimental, mientras que en la Figura 60 se presenta el estado final de la conexión ante una serie de cargas aplicadas en una de las vigas. La mayor carga positiva registrada alcanzó aproximadamente 387.6 [kN] aplicada a una distancia de 4.00 [m] desde el centro de la columna, lo que generó un momento máximo de 1550.42 [kN-m].



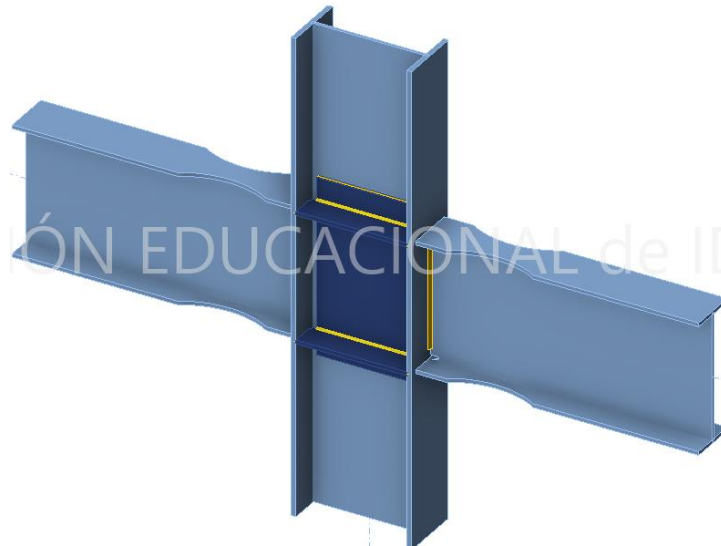
**Figura 59: Curva experimental momento-rotación RBS conexión compleja 3 (Sepulveda et al., 2025).**



**Figura 60: Comportamiento experimental conexión compleja 3: A) Pandeo local RBS; B) Roturas dúctiles en el sur del RBS; C) Pandeo lateral (Sepulveda et al., 2025).**

El ensayo experimental muestra un pandeo en el alma de la viga próximo a la zona RBS, con una magnitud que disminuye progresivamente al acercarse al centro del alma. Asimismo, se identifica una deformación considerable en las alas de la viga en la zona RBS, la cual se espera que determine la falla del elemento debido a la reducción de sección inducida en dicha área.

En la Figura 61 se presenta el modelo de la conexión estudiada.



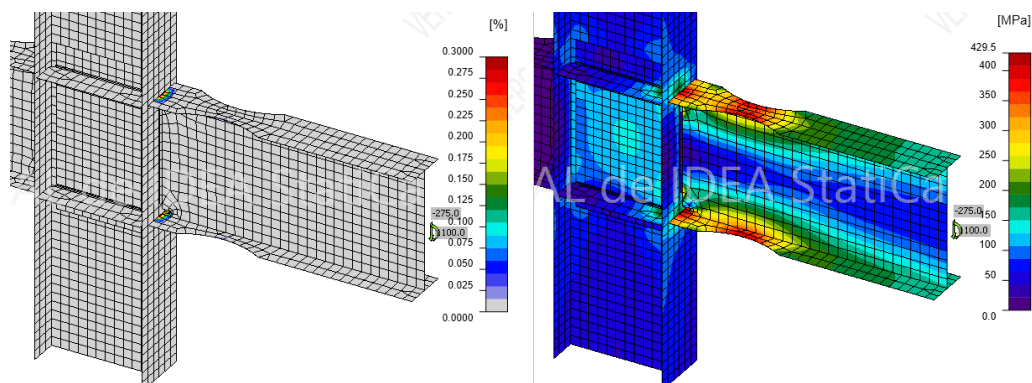
**Figura 61: Modelo IDEA StatiCa conexión compleja 3.**

Las cargas aplicadas y el comportamiento obtenido en el software se presentan resumidos en la Tabla 18.

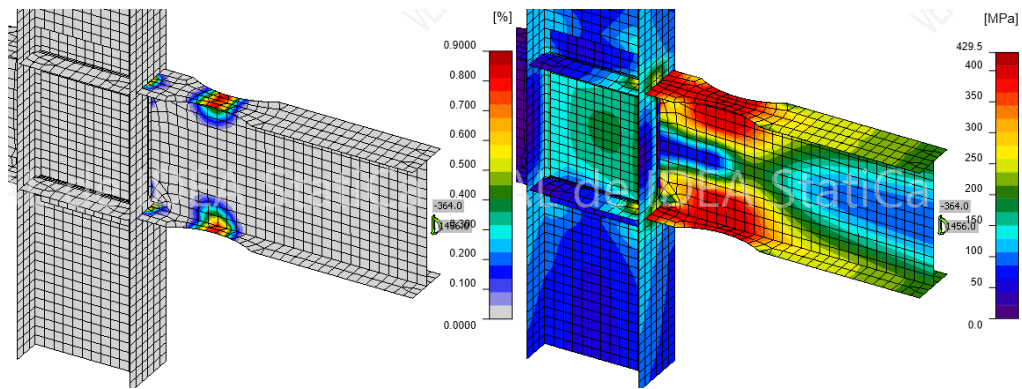
**Tabla 18: Cargas aplicadas de interés conexión compleja 3.**

V aplicado [kN]	M producido [kN-m]	Observación Zona de Falla
275.0	1100.0	Primera Plastificación
364.0	1456.0	Deformación Plástica = 1.0%
380.0	1520.0	Deformación Plástica = 2.5%
387.1	1548.5	Falla de conexión

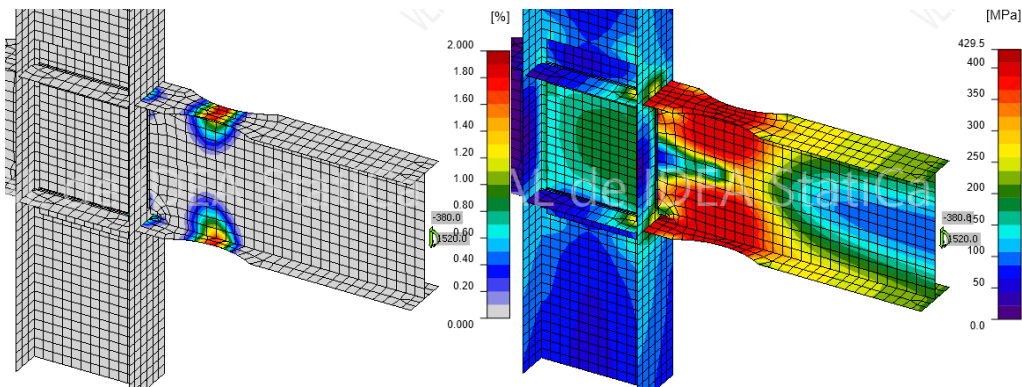
Los comportamientos obtenidos de la conexión se representan gráficamente en las figuras siguientes.



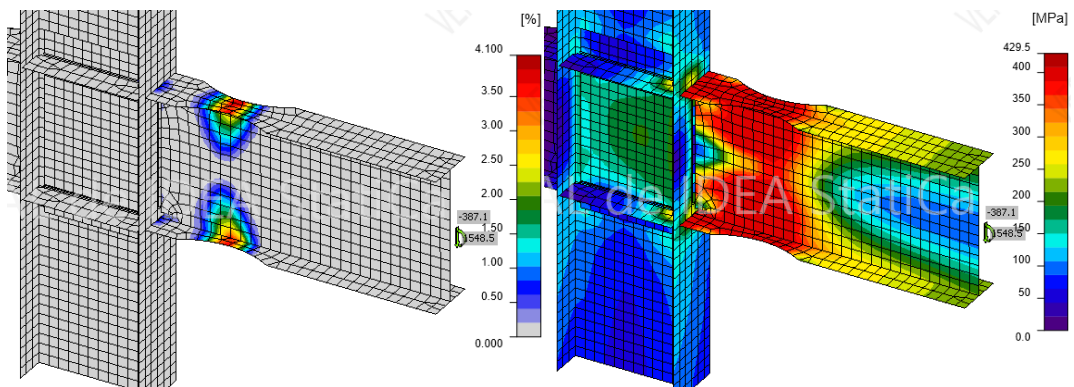
**Figura 62: Resultados de IDEA StatiCa en conexión compleja 3 ante primera plastificación en zona de falla: A) Tensiones equivalentes; B) Deformaciones plásticas.**



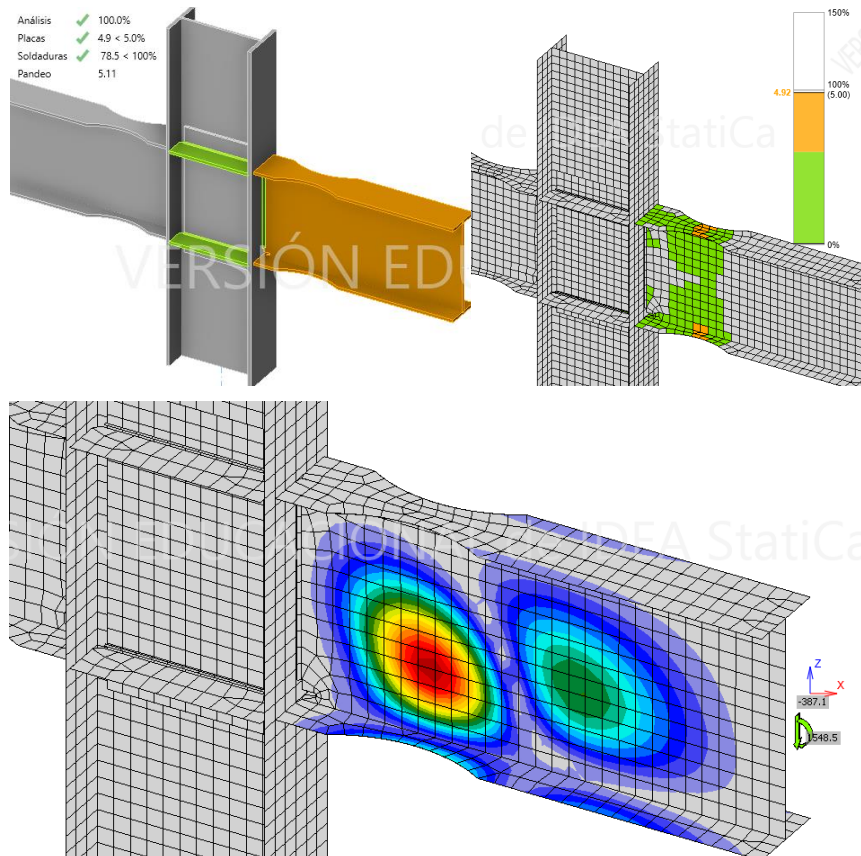
**Figura 63: Resultados de IDEA StatiCa en conexión compleja 3 ante deformación plástica de 1.0% en zona de falla: A) Tensiones equivalentes; B) Deformaciones plásticas.**



**Figura 64: Resultados de IDEA StatiCa en conexión compleja 3 ante deformación plástica de 2.5% en zona de falla: A) Tensiones equivalentes; B) Deformaciones plásticas.**



**Figura 65: Resultados de IDEA StatiCa en conexión compleja 3 ante falla de conexión: A) Tensiones equivalentes; B) Deformaciones plásticas.**

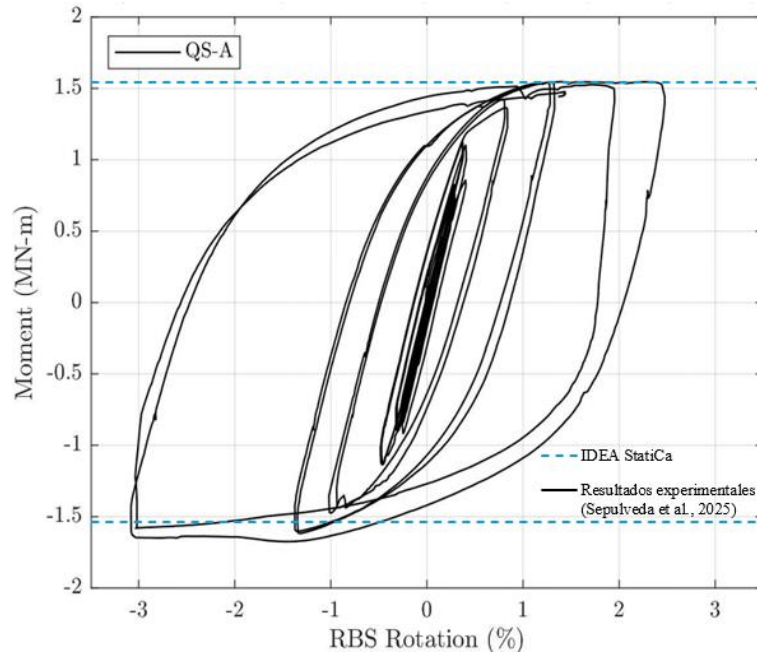


**Figura 66: Resultados de IDEA StatiCa en conexión compleja 3 ante falla de conexión: A) Verificación general; B) Deformaciones alcanzadas; C) Forma de pandeo.**

Tal como en la conexión anterior, las mayores concentraciones de tensiones equivalentes se localizan en la zona RBS y en la zona panel de la columna. Sin embargo, gracias a la adición de una placa de refuerzo, el panel de la columna permanece lejos de alcanzar el límite de fluencia. En consecuencia, las áreas plastificadas y más afectadas se concentran en las alas de la viga, las cuales experimentan deformaciones significativas y determinan el límite de falla de la conexión.

El análisis de pandeo realizado en el software muestra un pandeo considerable en el alma de la viga, cerca de la abertura del ala inferior. Además, se observa que las zonas de las alas cercanas a la soldadura alcanzan la fluencia bajo cargas elevadas, aunque con una deformación plástica mucho menor que la registrada en la zona RBS. Según el análisis obtenido de IDEA StatiCa, la falla de la conexión ocurre bajo una carga de corte de 387.12 [kN], la cual genera un momento de 1548.48 [kN-m].

En la Figura 67 se presenta la comparación entre el momento máximo registrado en IDEA StatiCa y el comportamiento histerético obtenido experimentalmente.



**Figura 67: Comparación de momentos experimentales e IDEA StatiCa – Conexión compleja 3.**

Como conclusión, tanto en el ensayo experimental como en el modelo desarrollado en IDEA StatiCa se identifica que las zonas más solicitadas corresponden a las alas en la región RBS, las cuales experimentan plastificación y transmiten una deformación plástica decreciente hacia el centro de la viga. Asimismo, se presentan similitudes en el comportamiento de pandeo del alma de la viga, ya que, tanto en el análisis experimental como el desarrollado en el software, la zona próxima a la abertura de las alas muestra un pandeo significativo.

En relación con las cargas positivas máximas alcanzadas antes de la falla de la conexión, el error relativo entre los resultados del software y los obtenidos en los ensayos experimentales es de solo un 0.125%, siendo una diferencia despreciable en términos de diseño estructural.

## 6 Análisis de viabilidad de uso.

IDEA StatiCa Connection se ha posicionado como una excelente opción para el diseño de conexiones de acero, especialmente aquellas con geometrías complejas. Su principal ventaja radica en su capacidad para realizar análisis no lineales mediante el método de elementos finitos (MEF), lo que permite obtener resultados más precisos y confiables que los métodos tradicionales. Sin embargo, en el caso de Chile, que usa normativa norteamericana AISC, éste no posee requisito de aceptación para MEF, por lo que no hay manera de validar una conexión utilizando IDEA StatiCa mediante el análisis de tensión/deformación que entrega el software. Esto no quiere decir que los resultados sean incorrectos, sino que hay que adoptar algunos criterios provenientes del eurocódigo, el cual sí acepta MEF y junto a ello el criterio de aceptación de una deformación plástica de hasta el 5% de los elementos. Por otra parte, IDEA StatiCa también posee en su base de datos la normativa AISC, por lo que, si el usuario lo desea, el software realizaría sus comprobaciones de diseño en base a este código.

### 6.1 Registro de eficiencia en el uso de IDEA StatiCa Connection en proyectos reales en contexto chileno

En el desarrollo de esta sección se recopilaron entrevistas realizadas a dos ingenieros con experiencia en el uso de IDEA StatiCa. Este estudio solo lleva por objetivo documentar información referencial con respecto al rendimiento del software, dado que IDEA StatiCa sigue siendo relativamente desconocido en la industria del diseño estructural en Chile. A continuación, se exponen los aspectos más relevantes extraídos de dichas entrevistas; para mayor detalle, se incluye el contenido completo en los anexos.

#### 6.1.1 Ventajas destacadas por los usuarios

##### 1. Flexibilidad en el diseño estructural:

Los ingenieros destacan la capacidad del software para abordar configuraciones geométricas complejas, incorporando una amplia variedad de elementos en un sistema de conexión. IDEA StatiCa permite entender de forma precisa el comportamiento estructural y optimizar los diseños, garantizando factores de seguridad confiables sin caer en sobredimensionamientos innecesarios.

##### 2. Realismo en el análisis estructural:

La consideración de plastificación en zonas específicas del sistema, mientras que éste continúa tomando cargas redistribuidas a otras secciones, es una característica muy útil del software. Esto permite identificar con claridad las áreas que podrían sufrir pandeo, ruptura de elementos, o las secciones de pernos y soldaduras con mayor tensión. Esta funcionalidad refleja un comportamiento más realista en comparación con enfoques tradicionales que asumen distribuciones uniformes de carga.

##### 3. Eficiencia en el proceso de modelado y análisis:

- **Modelado:** La interfaz intuitiva del software permite crear una conexión estándar en pocos minutos y hasta una hora para diseños más complejos.
- **Procesamiento de resultados:** Los tiempos de cálculo varían entre 5 y 30 segundos para conexiones comunes, extendiéndose hasta 3 minutos en casos particulares de mayor complejidad, siempre que no existan problemas de indefinición en el modelo.

##### 4. Compatibilidad con normativas vigentes en Chile:

IDEA StatiCa puede configurarse para cumplir con los requisitos de las normativas locales, tanto por el método de tensiones admisibles (ASD) como por estados límites (LRFD). Esto facilita la evaluación de diseños al entregar resultados con las resistencias de los materiales ya minorados.

## 5. **Colaboración y exportación:**

El software ofrece la posibilidad de visualizar detalladamente las conexiones y exportar los modelos en formato IFC, promoviendo una integración eficiente con otras disciplinas dentro del proyecto. Esto contribuye a detectar incompatibilidades durante las fases tempranas de diseño y mejora la coordinación en procesos constructivos.

## 6.1.2 **Consideraciones**

### 1. **Resultados conservadores, pero no siempre óptimos:**

Dado que IDEA StatiCa generalmente entrega resultados con cierto grado conservador, existen casos en los que normativas como el AISC pueden resultar como la opción más económica, particularmente en diseños simples. En este sentido, el software demuestra su mayor utilidad en sistemas con geometrías y elementos complejos.

En resumen, IDEA StatiCa se presenta como una herramienta robusta y eficiente para el diseño y análisis de conexiones estructurales, especialmente para el caso de sistemas complejos no abordados a fondo en el documento normativo vigente en Chile.

## 6.2 Experiencia personal con IDEA StatiCa.

Como experiencia personal con IDEA StatiCa desde un punto de vista de usuario novato, la interfaz intuitiva y gráfica del software facilita enormemente el proceso de aprendizaje. La capacidad de modelar conexiones de manera rápida y precisa, gracias a herramientas de modelado eficientes y una extensa biblioteca de perfiles y materiales, ha sido fundamental en el proceso.

El modelado es sencillo y rápido, dependiendo de su complejidad. Esta eficiencia se debe en gran medida a la facilidad de uso del software y a la disponibilidad de herramientas automatizadas para la creación de elementos y ensamblajes.

Una vez creado el modelo, el tiempo de análisis de las conexiones evaluadas suele ser de entre 3 y 15 segundos, siempre y cuando la conexión esté correctamente definida y las cargas aplicadas sean razonables. En casos de cargas excesivas o errores en el modelo, el análisis puede converger lentamente o incluso fallar.

La capacidad de crear múltiples variaciones de una conexión y evaluar su comportamiento de manera rápida ha sido una característica muy valiosa en el transcurso del proceso. La visualización gráfica del modelo en 3D facilita la identificación de posibles errores o áreas de mejora, asegurando así la calidad del diseño, sin embargo, al contener una interfaz gráfica tan detallada, es importante tener en cuenta que los elementos que se estén utilizando en el modelamiento representen matemáticamente la conexión y no se utilicen elementos que solo entreguen una claridad gráfica, ya que se podrían indefinir los cálculos que contiene la base de datos del software.

En cuanto a la precisión de los resultados, IDEA StatiCa ha demostrado ser una herramienta confiable. Los resultados obtenidos se han mostrado consistentes con los resultados experimentales, proporcionando un alto grado de confianza en el diseño. Además, el software permite identificar de manera precisa las zonas más solicitadas de la conexión, así como las posibles zonas de falla, lo que facilita la toma de decisiones de diseño.

Otra ventaja importante es la capacidad de generar memorias de cálculo detalladas que incluyen toda la información necesaria para la revisión y aprobación del diseño. Esto no solo ahorra tiempo, sino que también garantiza la trazabilidad y la calidad del trabajo realizado.

Finalmente, la colaboración entre los diferentes actores del proyecto se ve facilitada por la capacidad de exportar archivos en formatos estándar. Los modelos IFC pueden ser fácilmente integrados en plataformas BIM, permitiendo una coordinación eficiente entre los equipos de diseño, construcción y gestión de proyectos.

En resumen, IDEA StatiCa destaca como una herramienta altamente eficiente y versátil, permitiendo un aprendizaje rápido gracias a su interfaz intuitiva. Su capacidad para modelar conexiones estructurales de manera precisa y con tiempos reducidos en el desarrollo y análisis de los modelos refuerza su utilidad en proyectos de diseño estructural. Asimismo, ofrece resultados confiables con una similitud significativa respecto de datos experimentales, lo que asegura la precisión en las evaluaciones. El software facilita la optimización de diseños al permitir la exploración de múltiples alternativas y el análisis detallado de su comportamiento. Finalmente, su capacidad para generar informes técnicos completos y modelos tridimensionales detallados contribuye a una comunicación efectiva y una mejor coordinación entre las distintas disciplinas de un proyecto.

### 6.3 Síntesis y organización de beneficios y consideraciones datados.

#### Beneficios clave:

- **Modelado rápido e intuitivo:** La interfaz intuitiva y las herramientas de automatización permiten modelar conexiones complejas en un tiempo significativamente menor en comparación a otros softwares de diseño mediante MEF.
- **Análisis no lineal:** Simula de forma realista el comportamiento de las conexiones tanto simples como complejas bajo combinaciones de cargas, permitiendo evaluar con precisión los estados de tensión, deformación y pandeo.
- **Flexibilidad y Versatilidad en el diseño:** Amplia la variedad de diseños posibles y se adapta a diferentes tipos de conexiones, permitiendo a su vez ser utilizado en conjunto con otras normativas, como la AISC, aunque su base teórica se fundamenta en la normativa europea.
- **Optimización del diseño:** Permite evaluar diferentes escenarios de carga y geometría, lo que facilita la toma de decisiones y la optimización del diseño.
- **Mayor confianza en los resultados:** Los análisis detallados brindan una mayor certeza sobre el comportamiento de las conexiones, especialmente en casos complejos.
- **Facilita la colaboración:** La generación de modelos detallados en formato IFC facilita la comunicación y coordinación entre los diferentes actores del proyecto.
- **Visualización clara:** La capacidad de exportar modelos IFC permite una visualización clara y detallada de las conexiones, lo que reduce el riesgo de errores en la construcción.
- **Optimización de recursos:** Al permitir evaluar la necesidad de elementos adicionales (como atiesadores), se pueden reducir costos y tiempos de construcción.
- **Adaptabilidad a diferentes normativas:** Aunque el software se basa en la normativa europea, puede ser utilizado en proyectos que siguen otras normativas, como la AISC, siempre y cuando se apliquen criterios de aceptación adecuados.
- **Análisis de casos especiales:** Permite evaluar conexiones con características no convencionales, como giros excéntricos o cargas cíclicas.
- **Verificación de estados de tensión y deformación:** Permite evaluar de manera precisa la distribución de tensiones y deformaciones en las conexiones, asegurando que se cumplan los criterios de diseño.
- **Análisis de pandeo:** Permite identificar zonas críticas de pandeo en las conexiones y evaluar su estabilidad.
- **Diseño de conexiones especiales:** Es ideal para el diseño de conexiones complejas, como las que involucran grandes cargas, geometrías irregulares o materiales compuestos.

#### Consideraciones del software:

- **Dependencia de criterios de aceptación:** El criterio de aceptación del 5% de deformación plástica, aunque conservador, está basado en la normativa europea. Es importante que el ingeniero tenga un claro entendimiento de este criterio y sus implicaciones.

- **Modelo constitutivo del acero:** El modelo constitutivo utilizado por el software puede no ser del todo preciso para ciertos tipos de análisis, como aquellos que requieren un alto nivel de detalle en el comportamiento del material, sobre todo para deformaciones muy altas, provocando que para la investigación no sea una opción totalmente fiable en cuanto a precisión.

## 7 Conclusiones:

El software IDEA StatiCa Connection se posiciona como una herramienta de gran utilidad para ingenieros civiles, especialmente en el diseño de conexiones estructurales complejas. Su capacidad para analizar geometrías detalladas, que serían difíciles o incluso imposibles de calcular mediante fórmulas convencionales o criterios basados en las normativas chilenas vigentes, lo convierte en una solución eficiente para diversos problemas de la ingeniería.

Los beneficios dados demuestran claramente un aumento en la cadena productiva de construcción junto a una mayor seguridad en cuanto al diseño de conexiones potencialmente importantes en un proyecto de cargas muy altas o complejidades en el sistema estructural, lo que se respalda dada las similitudes entre los resultados registrados en el software y los obtenidos al utilizar otros métodos o estudios.

El análisis detallado que plantea mediante elementos finitos permite obtener información importante del comportamiento de la conexión, y la facilidad y eficiencia de su uso permite obtener una gran ventaja en la cadena de producción frente a otros métodos de diseño, además, permite entre sus comprobaciones revisar el correcto cumplimiento de normativa AISC, por lo que extrae lo mejor del método tradicional mediante fórmulas simplificadas así como del análisis mediante tensión/deformación que entrega el método de elementos finitos.

La gran cantidad de herramientas y utilidades permite obtener ventajas no solo para el ingeniero estructural a cargo del diseño, sino también hacia otros miembros del proyecto, incentivando a una mayor colaboración y coordinación, generando ganancias importantes en recursos utilizables del proyecto al permitir optimizar tanto en tiempo como en material de construcción dentro de la obra.

Sin embargo, es preciso mencionar que existen ciertas desventajas en su uso en contexto chileno, principalmente debido a que utiliza un criterio no definido en la normativa norteamericana, pero si incluye el eurocódigo, el cual es la aceptación de una deformación plástica de hasta el 5% utilizando elementos finitos. Es importante que el ingeniero a cargo del diseño estructural tenga un claro conocimiento de estos conceptos y a su vez tenga un criterio propio para decidir hasta qué punto aceptar los resultados entregados por el software, asumiendo que su aprobación indica que el diseño satisface sin problemas las exigencias dictadas por la normativa local.

En resumen, IDEA StatiCa Connection es una herramienta útil que, utilizada de forma adecuada, puede mejorar significativamente la eficiencia y la calidad del diseño de conexiones de acero. Los ingenieros que la adopten tendrían más alternativas para enfrentar proyectos de ingeniería cada vez más complejos con la certeza de que los resultados serán acertados a la realidad con un grado conservador ideal.

## 8 Referencias

- Abasolo Bilbao, M., Aguirrebeitia Celaya, J., Coria Martínez, I., & Heras Miguel, I. (2017). *Guía práctica de elementos finitos en estática*. Ediciones Paraninfo, SA.
- Adrian, M. R. (2010). Simulación mediante el método de los elementos finitos de una estructura metálica. *Madrid: Universidad Carlos III de Madrid*.
- Araya Letelier, G., Parra, P., Lopez-Garcia, D., Garcia-Valdes, A., Candia, G., & Lagos, R. (2019). *Evaluación de la probabilidad de colapso de un edificio de oficinas chileno de hormigón armado debido a actividad sísmica*.
- Arroyo Amell, O. D. (2004). *Métodos para optimizar el diseño de sistemas estructurales*.
- Asdrubal, A., Graciano, C., & Estrada, O. A. G. (2017). Resistencia de vigas esbeltas de acero inoxidable bajo cargas concentradas mediante elementos finitos. *Revista UIS Ingenierías*, 16(2), 61–70.
- Asociación Latinoamericana del Acero. (2010). Especificación ANSI/AISC 360-10 para construcciones de acero. *Santiago de Chile: Asociación Latinoamericana del Acero*.
- IDEA StatiCa. (s. f.). *Connection design*. <https://www.ideastatica.com/es/disenio-conexiones>
- Loges, S. (2017). Importancia de las conexiones en el comportamiento sismorresistente de edificaciones aporticadas de acero estructural. *XI Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica CONVESIS*. (págs. 780-792). Caracas: CONVESIS.
- Riquelme Herrera, R. I. (2022). *Efectos de las modificaciones a la demanda y requisitos de diseño de la Norma NCH 2369 sobre el dimensionamiento y desempeño sísmico de estructuras industriales de marco arriostrado*.
- Romero Castillo, J. A. (2021). *Análisis de elementos finitos en uniones metálicas de acuerdo a las normas internacionales utilizando el software Idea Statica Connection*.
- Sepulveda, C., Ozkula, G., Mosqueda, G., Uang, C.-M., Chou, C.-C., Wang, K.-J., El-Tawil, S., & McCormick, J. (2025). *FULL-SCALE BEAM-TO-COLUMN SUBASSEMBLAGE TESTING FOR SEISMIC EVALUATION OF DEEP COLUMNS*.
- Sumner III, E. A. (2003). *Unified design of extended end-plate moment connections subject to cyclic loading*. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Uang, C. M., Yu, Q. S., & Gilton, C. S. (2000). Effects of loading history on cyclic performance of steel RBS moment connections. *Proceedings of the 12th WCEE, Upper Hutt, New Zealand*.

## 9 Anexos

### 9.1 Caso de estudio: Ingeniero 1

En proyectos del primer ingeniero entrevistado, la implementación de IDEA StatiCa Connection ha demostrado ser un factor clave para optimizar el proceso de diseño y construcción. A continuación, se detallan los beneficios específicos obtenidos:

- **Ahorro de tiempo y costos:** El modelado intuitivo y eficiente del software permitió reducir drásticamente los tiempos de diseño de las conexiones, especialmente aquellas con geometrías complejas. Esto se tradujo en un ahorro significativo en costos de ingeniería y aceleró el avance del proyecto.
- **Mejora de la comunicación y coordinación:** La generación de modelos 3D detallados en formato IFC facilitó la comunicación y colaboración entre los equipos de diseño, construcción y supervisión. La visualización clara de las conexiones permitió identificar y resolver posibles conflictos de diseño en etapas tempranas.
- **Optimización del uso de materiales:** Al permitir evaluar de manera precisa el comportamiento de las conexiones, se pudo optimizar el diseño y reducir el uso de elementos de refuerzo, como atiesadores, lo que resultó en un ahorro significativo en materiales y costos de construcción.
- **Mayor seguridad y confiabilidad:** Los análisis detallados proporcionados por IDEA StatiCa Connection permitieron identificar y mitigar posibles problemas estructurales, como concentraciones de tensiones y pandeo, garantizando la seguridad y durabilidad de la estructura.
- **Diseño más eficiente:** El software permitió explorar diferentes alternativas de diseño y seleccionar la solución óptima en términos de costo, eficiencia y seguridad.
- **Exportación de modelo de conexión inclinada:** La capacidad de modelar conexiones con inclinaciones complejas permitió generar modelos 3D precisos y facilitar la comprensión de la geometría por parte de todos los involucrados en el proyecto.

En resumen, la implementación de IDEA StatiCa Connection en proyectos realizado por el **ingeniero 1** ha demostrado ser una decisión acertada, ya que ha permitido acelerar procesos de diseño, mejorar el desempeño grupal, aumentar el factor de seguridad y reducir costos generales de un proyecto.

## 9.2 Caso de estudio: Ingeniero 2

La implementación de IDEA StatiCa Connection en proyectos estructurales para el Ingeniero 2 entrevistado ha demostrado una serie de ventajas significativas, especialmente en el diseño de conexiones de acero. A continuación, se detallan los beneficios más destacados:

- **Mayor libertad de diseño:** Facilita la exploración de diversas alternativas de diseño, permitiendo encontrar soluciones más innovadoras y eficientes.
- **Información detallada:** Proporciona información detallada sobre el comportamiento de la conexión, como zonas de fluencia, deformaciones y distribución de tensiones, lo que permite una mejor comprensión del comportamiento estructural y con ello una mejor toma de decisiones en cuanto a refuerzos o modificaciones.
- **Flexibilidad y Gestión de irregularidades:** Permite modelar y analizar conexiones con irregularidades geométricas y de carga, que son comunes en la práctica real y no siempre se ajustan a las simplificaciones normativas tradicionales.
- **Consideración de efectos no lineales:** Incluye la consideración de efectos no lineales del material, lo que proporciona resultados más realistas y confiables.
- **Integración con otras disciplinas:** Facilita la coordinación con otras especialidades, como arquitectura e instalaciones, al permitir modelar conexiones complejas y con múltiples restricciones.
- **Verificación detallada:** Permite verificar el cumplimiento de los requisitos dictados por la normativa vigente de manera más detallada y precisa, reduciendo las incertidumbres asociadas al cálculo tradicional, proporcionando una mayor seguridad en el diseño.
- **Optimización de la seguridad:** Permite encontrar un diseño equilibrado entre seguridad y economía, evitando sobredimensionamientos innecesarios y reduciendo costos y materiales.
- **Herramientas de modelado intuitivas:** Facilita el modelado de conexiones complejas de manera rápida y eficiente, tardando a lo más 1 hora para conexiones particulares y menos de 20 minutos en general.
- **Resultados rápidos:** Proporciona resultados de análisis en tiempos relativamente cortos incluso para conexiones complejas, tardando entre 5 y 30 segundos normalmente y entre 1 a 3 minutos para caso particulares.

En resumen, IDEA StatiCa Connection se presenta como una herramienta valiosa para el ingeniero 2, al permitir un análisis más preciso y flexible de las conexiones de acero, lo que se traduce en diseños más seguros, eficientes y adaptados a las particularidades de cada proyecto.