

NUEVOS MÉTODOS Y HERRAMIENTAS PARA EL CÁLCULO DE UNIONES EN ESTRUCTURAS

NEW METHODS AND TOOLS FOR CONNECTION DESIGN IN STRUCTURES

Hipólito Ortiz ^a, Albert Jiménez ^b y Miguel Alquézar ^c

^aIngeniero Civil. Construsoft. Ingeniero de estructuras en Departamento de cálculo. hipolito.ortiz@construsoft.com

^bIngeniero Industrial. Construsoft. Responsable en Departamento de cálculo. albert.jimenez@construsoft.com

^cIngeniero Mecánico. Construsoft. Ingeniero de estructuras en Departamento de cálculo. miguel.alquezar@construsoft.com

RESUMEN

Las normativas actuales, como los Eurocódigos, establecen métodos para el cálculo de uniones metálicas y regiones D en hormigón armado, pero solo aplican a configuraciones estándar, complicando diseños complejos. Esto obliga a los ingenieros a usar software de elementos finitos avanzado, que no siempre está optimizado para estas necesidades. El método **CBFEM** integra el análisis de elementos finitos con verificaciones normativas en software especializado, permitiendo evaluar esfuerzos y deformaciones con precisión, optimizar el diseño estructural y asegurar el cumplimiento de los estándares vigentes.

ABSTRACT

Current standards, such as the Eurocodes, provide methods for calculating steel connections and D-regions in reinforced concrete but are limited to standard configurations, complicating complex designs. This limitation compels engineers to rely on advanced finite element software, which is not always optimized for these specific needs. The **CBFEM** method integrates finite element analysis with code-based checks in specialized software, enabling precise evaluation of stresses and deformations, optimizing structural design, and ensuring compliance with existing standards.

PALABRAS CLAVE: Cálculo de uniones, Bielas y tirantes, Uniones, Regiones D, CBFEM.

KEYWORDS: Connection design, Strut-and-tie, Connection, D-regions, CBFEM.

1. Método CBFEM para el cálculo de uniones metálicas

1.1. Método de los componentes y evolución hacia el CBFEM

El método de los componentes (MC), en el cual se basan la mayoría de las normativas de diseño estructural, intenta reducir el comportamiento de la unión a un sistema de elementos (componentes) interconectados y que permiten conocer la capacidad máxima de la unión a partir

de las resistencias máximas de cada componente según la relación entre ellos, como se muestra en esquema de la Figura 1. La ventaja es que cada componente puede verificarse con las fórmulas descritas en la normativa, pero el modelo se tiene que ajustar a cada tipo de unión y configuración

de cargas, y la normativa solo contempla unas pocas tipologías.

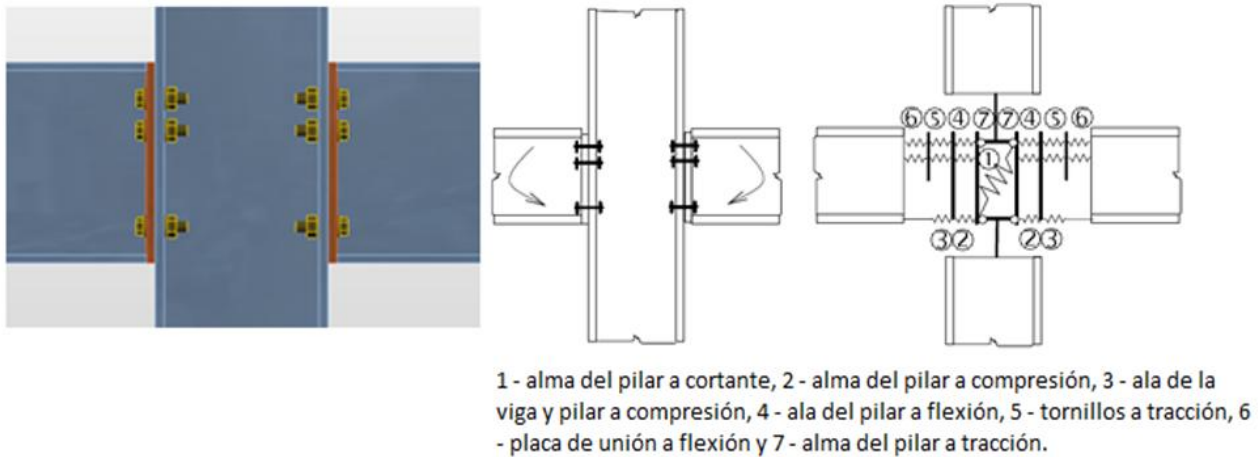


Figura 1. Componentes en una unión con placas atornilladas, representadas como muelles.

El equipo del departamento de Estructuras Metálicas de la Facultad de Ingeniería Civil en Praga liderado por el profesor František Wald y el Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de Berno han desarrollado un nuevo método llamado CBFEM – Component Based Finite Element Model (Modelo de elementos finitos basado en los componentes) que combina las verificaciones llevadas a cabo por el MC con la obtención de esfuerzos mediante el método de elementos finitos y que permite ser:

- Lo suficientemente general para poder ser utilizado en la inmensa mayoría de las uniones, anclajes y detalles utilizados en ingeniería estructural.

- Simple y rápido en la práctica diaria para obtener resultados en un tiempo parecido a los actuales métodos y herramientas.
- Lo suficientemente intuitivo para dar información clara al ingeniero estructural acerca del comportamiento global de la unión además de sus tensiones, deformaciones y el nivel de aprovechamiento de los componentes individuales.

El método de elementos finitos desarrollado en el CBFEM está calibrado mediante modelos complejos de elementos finitos volumétricos y ensayos de laboratorio para que represente el mismo comportamiento que el método de las componentes, permitiendo extender su uso a cualquier tipo de geometría.

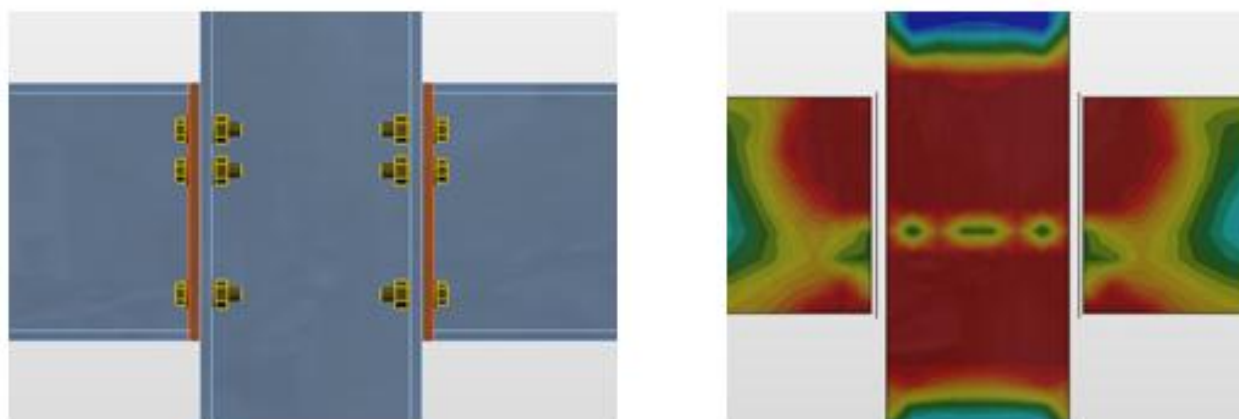


Figura 2. Método de elementos finitos aplicado al modelo de una unión con placa atornillada.

1.2. Modelo de análisis – CBFEM y calibración del método

El método de los elementos finitos es un método general comúnmente utilizado para el análisis estructural y que puede ofrecer resultados en uniones metálicas de cualquier geometría (Virdi, 1999) pero se requiere de un análisis no lineal con comportamiento elástico-plástico del material para captar un comportamiento más realista, ya que generalmente el acero plastifica en puntos de concentración de tensiones imposibles de tratar si se realiza un análisis lineal elástico.

El método CBFEM utiliza elementos placa tipo “Shell” donde se han calibrado todos los parámetros de mallado, enlaces y condiciones de contorno comparando con modelos más sofisticados de elementos volumétricos no lineales, para que ofrezcan los mismos resultados que los ensayos experimentales y la formulación empírica de la normativa establecida para casos simples como la Tequivalente o Tstub.

La ventaja de utilizar modelos de elementos finitos tipo placa es que el tiempo y los requerimientos computacionales son muy inferiores a los necesarios utilizando modelos finitos volumétricos, así que, mediante la calibración especial llevada a cabo en los centros

de investigación mencionados anteriormente, podemos llegar a los mismos resultados, pero utilizando menos recursos.

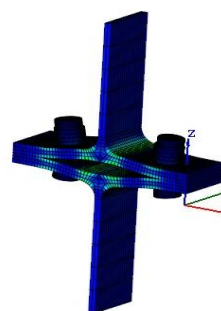


Figura 3. Modelo de análisis de elementos finitos de la unión para investigación utilizado para calibrar los modelos de placas utilizados en el CBFEM.

En la Figura 4 se puede observar cómo las almas y las alas de los perfiles estructurales se modelan utilizando placas delgadas con elementos Shell, donde se define un comportamiento elasto-plástico del material y condiciones especiales para simular en “contacto” entre placas para captar las conocidas fuerzas de palanca debidas a la deformabilidad de las placas.

Los elementos de enlace como los tornillos y soldaduras suelen ser elementos complicados de simular en programas generales de elementos finitos ya que éstos no ofrecen las herramientas directas para su simulación. Por lo tanto, deben desarrollarse procedimientos especiales en esos programas para modelar las soldaduras y el comportamiento de los tornillos en las uniones.

El método CBFEM calibrado, utiliza condiciones de contorno especiales llamadas “interpolation constrains” en las partes de unión para conocer las fuerzas y tensiones en los tornillos y las soldaduras para luego aplicar las fórmulas normativas para su posterior validación. Este hecho permite desvincular todas las placas del modelo para realizar mallados independientes y conectar todos los elementos mediante dichas condiciones. Este proceso es clave para obtener modelos livianos de cálculo posibles de solucionar utilizando pocos recursos de máquina.

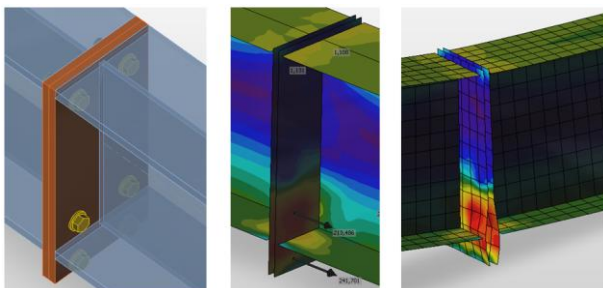


Figura 4. Modelo CBFEM de la conexión atornillada con placas de unión.

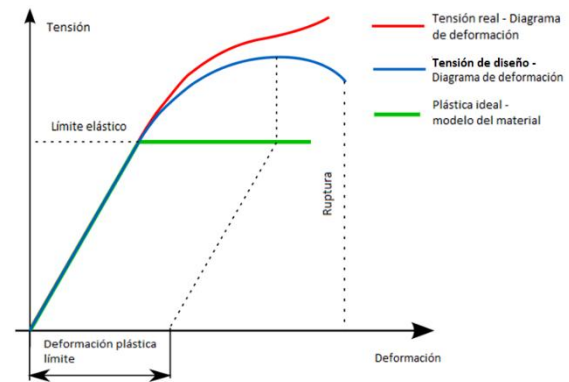


Figura 5. Curva real de tensiones y diagrama ideal elástico-plástico del material.

1.3. Comparación de resultados

El método CBFEM compara las acciones obtenidas en el modelo MEF con las resistencias de los diferentes componentes que forman la unión utilizando los criterios de la normativa como son el caso de los tornillos y las soldaduras. Aunque la ductilidad del acero de construcción puede llegar al 15%, para la validación de las placas que forman la unión en el método CBFEM se utiliza el criterio de que la deformación plástica no exceda o supere el 5% (valor recomendado en 1993-1-5 Apéndice C párrafo C.8 nota 1). A partir de ese valor, se frena el cálculo para no sobrepasar esos límites. Para otros criterios, el método permite establecer otros valores diferentes de deformación plástica máxima permitida.

En este apartado se describe una de las verificaciones realizadas para el CBFEM, concretamente para el caso de una soldadura en una unión rígida viga-pilar. Los resultados del método se comparan con los obtenidos por el clásico método de las componentes.

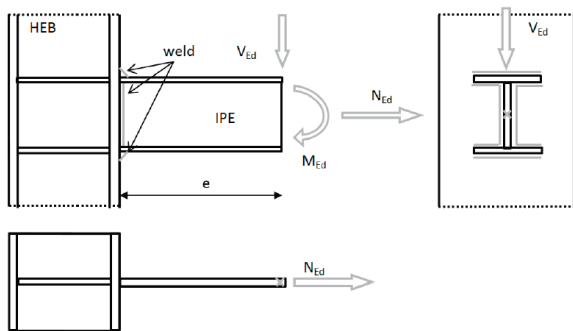


Figura 6. Definición geométrica de la unión (Wald, F. et al., 2016).

En las gráficas que se muestran a continuación, se puede observar la comparación de resultados obtenidos con el método de las componentes (CM) y el CBFEM. La evaluación realizada consiste en la obtención de la resistencia de diseño que presenta la unión, debido a la soldadura, para diferentes perfiles IPE en el elemento viga.

Como se puede ver, se comparan los resultados obtenidos para los tres principales tipos de esfuerzos que se han definido en la Figura 6.

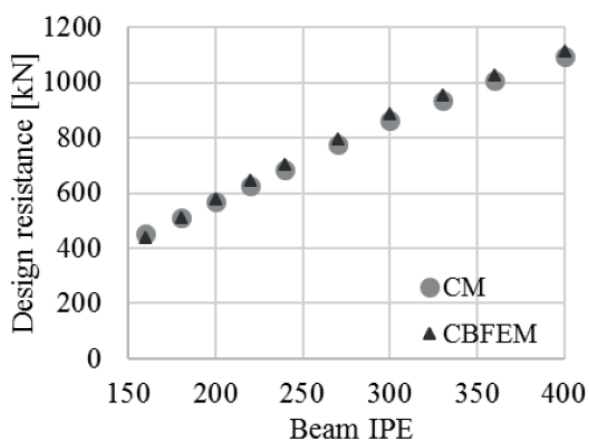


Figura 7. Estudio comparativo de la unión soldada viga-pilar solicitada axialmente (Wald, F. et al., 2016).

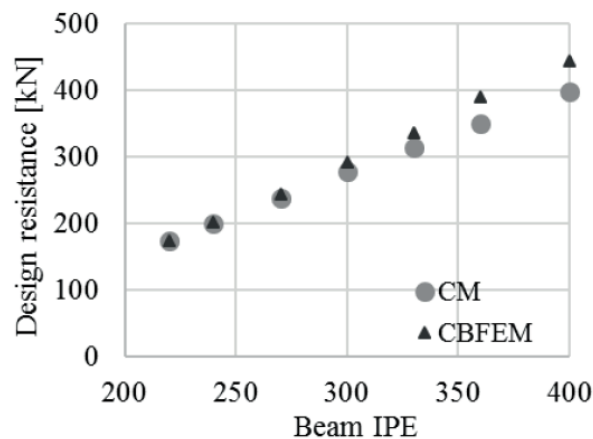


Figura 8. Estudio comparativo de la unión soldada viga-pilar solicitada a cortante (Wald, F. et al., 2016).

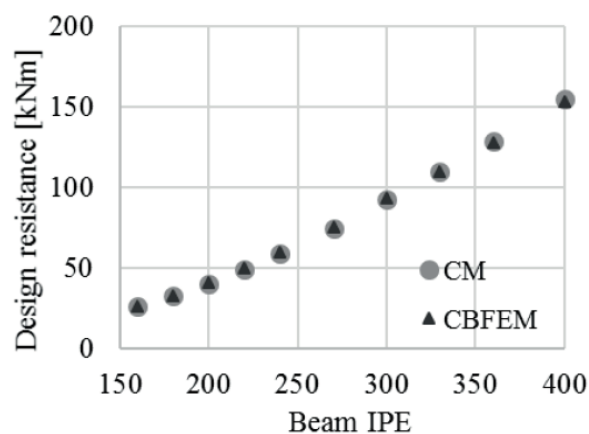


Figura 9. Estudio comparativo de la unión soldada viga-pilar solicitada a flexión (Wald, F. et al., 2016).

2. Método CBFEM para el cálculo de regiones D

2.1. Método de los bielas y tirantes y evolución a la optimización topológica.

El método de las bielas y tirantes, en el cual se basan la mayoría de las normativas de diseño estructural para las regiones D en el H.A, intenta reducir el comportamiento de la región D a un sistema de entramado de barras ficticias trabajando a compresión (bielas) y otras a tracción (tirantes) y que forman una cercha de transmisión de cargas dentro de la región.

Aunque este método ofrece distintas soluciones estructurales válidas para un mismo problema, su verificación es únicamente para resistencia, sin dar una respuesta directa sobre el comportamiento en servicio ni sobre la fisuración. Sin embargo, como señala el Eurocódigo 2 (apartados 6.5.3 y 3.2), el método de bielas y tirantes controla indirectamente la fisuración limitando la tensión en la armadura a valores próximos a 400 MPa en Estado Límite Último (ELU), lo que reduce implícitamente las deformaciones excesivas del acero y la aparición de fisuras. Ante estas limitaciones, el método CBFEM destaca al integrar el análisis de elementos finitos con verificaciones normativas, ofreciendo no solo una evaluación de la resistencia, sino también una respuesta directa y eficiente a los estados de servicio y control de fisuración en regiones D.

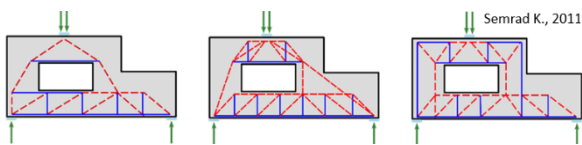


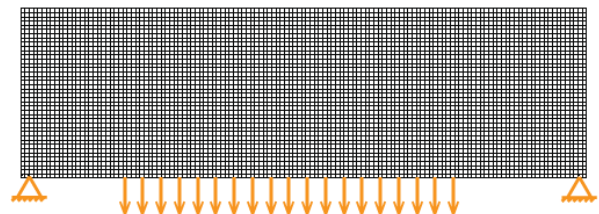
Figura 10. Diferentes modelos para la solución de la región.

2.2. Método de optimización de topología.

El método de optimización topológica permite obtener una geometría eficiente utilizando

únicamente un porcentaje determinado del volumen original de material, adaptándola específicamente al sistema de cargas actuantes. Esta geometría resultante puede servir como guía para identificar claramente las zonas sometidas a tracción y compresión en la estructura original de hormigón. Aunque este proceso presenta similitudes con el método de bielas y tirantes, la principal diferencia radica en que, mediante la optimización topológica, la generación del modelo puede realizarse de forma automática. Esto supone una reducción significativa del tiempo y del esfuerzo requerido por parte del ingeniero estructural.

La geometría optimizada puede obtenerse utilizando un algoritmo iterativo, empezando con una geometría con una distribución de 'densidad' de material homogénea y cambiando la densidad de cada elemento en cada iteración de una forma que conduce a disminuir la energía total de deformación.



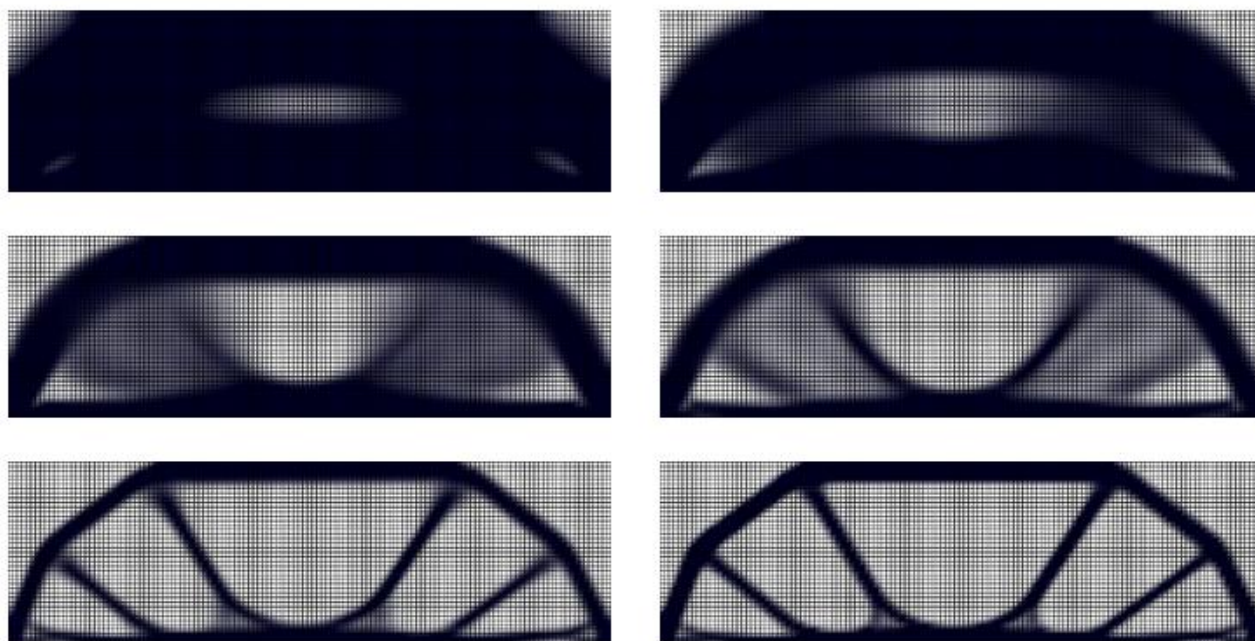


Figura 11. Convergencia gradual de una estructura cargada verticalmente con dos puntos de apoyo, iteraciones 1, 3, 7, 10, 15 y 19.

En cada iteración se lleva a cabo un análisis de elementos finitos. Esto se utiliza para calcular la energía total de deformación y también para calcular la derivada de la energía total de deformación con respecto a la densidad del elemento $((\partial E_{\epsilon})/(\partial \rho_i))$ para cada uno. Los cambios en las densidades de todos los elementos se calculan de manera que el volumen de material total converja a un valor preestablecido, llamado volumen efectivo (típicamente 20-80% del volumen de la estructura original). Esto resulta en nuevas densidades de los elementos. Entonces se lleva a cabo una nueva iteración. El algoritmo se detiene una vez el cambio en la energía de deformación total es razonablemente pequeño.

2.3. Definición de armaduras y análisis no lineal.

Una vez visualizada las zonas donde es más efectivo la introducción de armaduras a tracción, el ingeniero las define y el software empieza un análisis no lineal de un modelo generado automáticamente y calibrado en la ETH donde se entrelazan elementos finitos tipo Shell, con las propiedades características del hormigón definidas en la norma, con elementos lineales para la introducción de las armaduras, donde se definen las propiedades elasto-plásticas del acero y la adherencia con el hormigón y se consideran todas las interacciones entre materiales según las hipótesis de la norma como se muestra en la imagen siguiente.

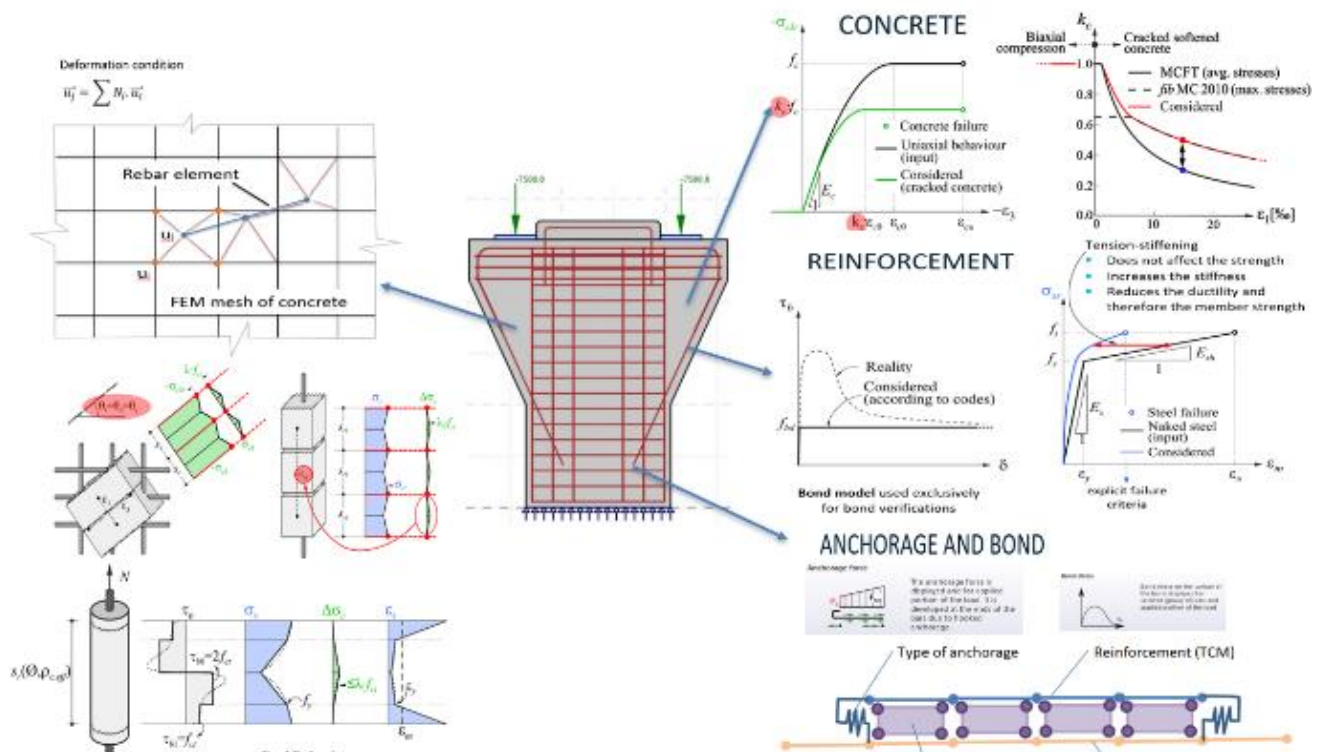


Figura 12. Descripción del modelo numérico material para la evaluación de regiones D.

Mediante un análisis de este estilo en software de nueva generación como es IDEA Statica, podemos llegar a obtener resultados de estos modelos en pocos minutos y realizar una verificación de todos los elementos que conforman la región D aplicando las fórmulas del código de diseño como es la resistencia a compresión del hormigón, tensión de adherencia del acero y resistencia a tracción, junto con la verificación de estado de fisuraciones en ELS.

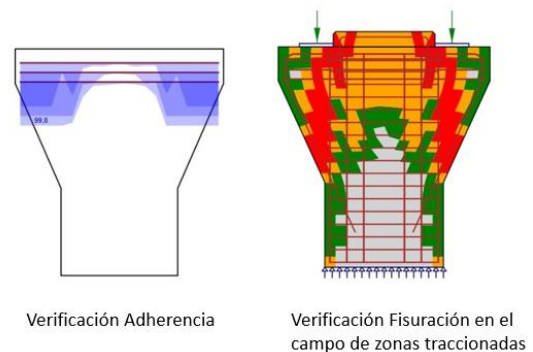
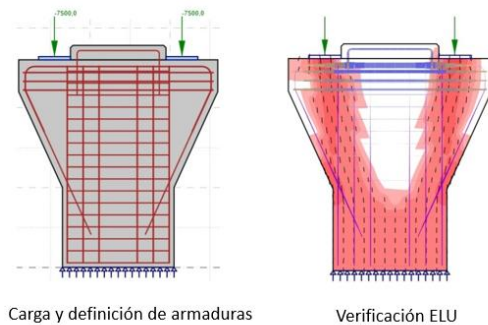


Figura 13. Ejemplo de definición de región de discontinuidad, así como las verificaciones obtenidas.



3. Conclusiones

El método CBFEM permite integrar la potencia de las nuevas tecnologías de software para el análisis y aplicar al mismo tiempo las fórmulas clásicas de verificación en ELU y ELS definidas en las normas de construcción a todos los elementos de las uniones y regiones D para una verificación global en un tiempo muy competitivo y con pocos requerimientos de computador.

El método permite obtener una representación mas real del comportamiento de las uniones y regiones D permitiendo al ingeniero diseñar los armados de una manera mucho más racional y con más seguridad, permitiendo también una reducción de armados y optimización cuando el caso lo permite.

Mediante este procedimiento de cálculo es posible dar solución a cualquier geometría de unión o región D salvando las limitaciones existentes cuando se siguen los métodos clásicos de análisis.

Referencias

- [1] WALD, F. et al, (2016) *Benchmark cases for advanced design of structural steel connections*, Česká Technika, Nakladatelství.
- [2] KINDMANN, R., KRÜGER, U., (2013) *Stahlbau, Teil 1: Grundlagen*, Ernst & Sohn, Auflage.
- [3] CEN (2015), *EN 1992-1-1 Eurocode 2, Design of Concrete Structures – Part 1: General rules and rules for buildings*, European Committee for Standardization, Brussels.
- [4] IDEA StatiCa (2024) *User guide*, IDEA RS s.r.o., (www.ideastatica.com).
- [5] KAUFMANN, W., MATA-FALCON, J. (2017) *Structural Concrete Design in the 21st Century: are Limit Analysis Methods Obsolete?*, Sborník ke konferenci 24. BETONÁŘSKÉ DNY 2017, Czech Republic, ČBS ČSSI.
- [6] KONEČNÝ, M., KABELÁČ, J., NAVRÁTIL, J. (2017) *Use of topology optimization in concrete reinforcement design*, Sborník ke konferenci 24. BETONÁŘSKÉ DNY 2017, Czech Republic, ČBS ČSSI.
- [7] MATA-FALCON, J., TRAN, D., T., KAUFMANN, W., NAVRÁTIL, J. (2018) *Computer-aided stress field analysis of discontinuity concrete regions*, EURO-C 2018, Computational Modelling of Concrete and Concrete Structures, Austria, in print.