

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS COMPUTACIONALES PROPUESTOS POR DENNIS LAM (2005) Y JORGE BONILLA (2007) PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DE CONECTORES DE CORTANTE EN VIGAS COMPUESTAS CON LOSAS MACIZAS Y LOSAS SOBRE STEEL DECK.



Wilmer Ruiz¹, Rosy Paba²

RESUMEN

El presente trabajo detalla una comparación de modelos computacionales propuestos por algunas investigaciones de conectores de cortante usados en vigas compuestas con losas sobre Steel deck. Esta comparación se realiza en cuanto a resultados de precisión de la carga, desplazamientos, estados tensionales y costo computacional de los modelos (eficiencia en tiempo). Utilizando la metodología de elementos finitos. Dicha comparación se realizará con base a las metodologías propuesta por los autores Dennis Lam (2005) y Jorge Bonilla (2007), desarrollando la simulación computacional del ensayo Push – out, de conector tipo espigo con cabeza, utilizando el software ABAQUS CAE (2017). El ensayo Push – out, es un ensayo ampliamente utilizado para determinar la resistencia de conectores de cortante en vigas compuestas. Ambos autores Dennis Lam (2005) y Jorge Bonilla (2007) proponen en sus investigaciones unas características y propiedades para los materiales, las cuales fueron tomadas para la realización de este trabajo.

Palabras claves: Conectores de cortante, Ensayos Push out, Elementos finitos, ABAQUS CAE.

ABSTRACT: The present work details a comparison of computational models proposed by some investigations of shear connectors used in composite beams with slabs on Steel deck. This comparison is made in terms of precision results of the load, displacements, stress states and computational of the models (efficiency in time). Using the finite element methodology. Said comparison will be carried out based on the methodologies proposed by the authors Dennis Lam and Jorge Bonilla, developing the computational simulation of the Push-out test, of a spike-type connector with head, using the ABAQUS CAE software (2017). The Push-out test is a widely used test to determine the resistance of shear connectors in composite beams.

Both authors Dennis Lam and Jorge Bonilla propose in their investigations some characteristics and properties for the materials, which were taken to carry out this work.

Keywords: Shear connectors, Push out tests, Finite elements, ABAQUS CAE.

¹ Wilmer Andres Ruiz Tobias
Estudiante de último semestre de la Universidad Cooperativa de Colombia.
[TEL:3212883862](tel:3212883862).
wilmer.ruizt@campusucc.edu.co

² Rosy Estefany Paba Flecher
Estudiante de último semestre de la universidad Cooperativa de Colombia.
[TEL:3016400955](tel:3016400955)
Rosy.pabaf@campusucc.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Sin duda día a día se van generando nuevos retos para los ingenieros civiles por ello se busca desarrollar proyectos innovadores, eficaces y versátiles, que permitan garantizar, seguridad, bajos costos y rápida ejecución, lo que ha generado la labor de descubrir nuevas combinaciones de los materiales, por ejemplo, concreto – acero para satisfacer las exigencias de carácter estructural y las solicitaciones del cliente en el sector construcción.

Para la construcción de vigas compuestas construidas en estructuras metálicas normalmente entre pisos de concretos, se utiliza mucho los conectores de cortante. Estos consisten en unas barras corta de acero con una cabeza redonda diseñadas para anclar el concreto con las vigas de acero, lo que permite que trabajen de forma monolítica, es decir como un solo elemento.

Los efectos generados por los conectores de cortante han sido estudiados por medio de dos ramas, una ha sido la parte experimental por medio de ensayos Push out y otra la parte analítica por medio de modelación computacional. El ensayo Push- out consiste en aplicar una carga hasta lograr la falla del espécimen compuesto por perfiles metálicos. La parte de modelación computacional ha tenido gran acogida debido que los modelos propuestos por los diferentes investigadores han dado buenos resultados con respecto a la comparación de la parte experimental.

El presente estudio se basa en las metodologías propuestas por los investigadores Dennis Lam (2005) y Jorge Bonilla (2007), realiza un análisis y comparación de sus metodologías para conocer el comportamiento de los conectores de cortante usados para conectar las vigas de acero con losas macizas y en Steel deck. La primera metodología la del señor Dennis Lam (2005) contempla un comportamiento bilineal en el acero y el concreto, mientras que la segunda metodología la del señor Jorge Bonilla (2007), contempla un comportamiento de daño plástico para en concreto.

Para nuestro caso se maneja la simulación computacional del ensayo Push – out, utilizando el software **ABAQUS CAE (2017)** el cual desarrolla sus modelaciones por elementos finitos, lo que permite garantizar que se tiene un mejor análisis de las condiciones a las que se encuentran sometidas las estructuras o elementos a estudiar al momento de estar expuestos a fuerzas internas o externas.

El comportamiento de los materiales se basó en la mecánica del daño, que planea **Jorge Bonilla**, conocido como modelo de daño plástico y bilineal que plantea **Lam y Ellobody (2005)**, para conector tipo espigo con cabeza.

2. OBJETIVOS.

2.1. OBJETIVO GENERAL.

- Comparar las metodologías planteadas por Denis Lam y Jorge Bonilla para conocer el comportamiento de los conectores de cortante usados para conectar las vigas de acero con losas macizas o en Steel deck, mediante modelos computacionales creados usando el software Abaqus cae (2007).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Crear modelos computacionales para simular la prueba push-out usando las metodologías propuestas por Denis Lam y Jorge Bonilla.
- Verificar 5 investigaciones hechas sobre estas pruebas para crear los modelos computacionales.
- Analizar cada uno de los resultados obtenidos mediante el modelo computacional y compararlos con los obtenidos por la prueba push-out.

3. JUSTIFICACIÓN.

Con el pasar del tiempo el ser humano se ha visto en la necesidad de analizar el resultado de la interacción de las fuerzas externas que rodean el entorno de las construcciones. Los profesionales del sector construcción, debemos afrontar continuamente nuevos retos, que nos exigen soluciones técnicas, que cumplan los

requerimientos de las normativas propias de cada país.

En esta investigación analizamos el comportamiento de vigas compuestas sometidas a cargas cortantes en ensayos push out. Los elementos estructurales que conforman estas vigas son: láminas de acero, losa de concreto, conector de cortante.

La función del conector de cortante es transferir la fuerza cortante horizontal en la interfase losa-viga, por lo que el espaciamiento requerido de los conectores en cualquier sección transversal se determina dividiendo el cortante VQ/I en la sección entre la resistencia de un conector (o dos si están en par, etc.).³

Esta investigación se enfoca en el análisis y comparación de modelos computacionales usando la metodología de elementos finitos, lo cual nos permitirá conocer el comportamiento de los elementos de una manera más precisa o en tiempo real, de las variables de estudio al ser sometidos a fuerzas externas.

Los autores a considerar son Jorge Bonilla y Dennis Lam, quienes proponen cada uno una metodología de análisis mediante modelos computacionales y estos han sido escogidos debido a la gran trayectoria que tienen en el estudio de las modelaciones de los conectores de cortante.

Básicamente lo que se busca es realizar por medio del software, una simulación del ensayo “push-out” en conectores de cortante usados para conectar las vigas de acero con losas macizas o losas sobre Steel Deck. Posteriormente se comparan los resultados obtenidos en el software, con las prácticas de laboratorio y se valida la información obtenida de las modelaciones. Para esto es necesario ser detallista y preciso durante la simulación con el fin de lograr el resultado esperado.

Como principal estrategia para delimitar esta investigación, se tomaron 5 ensayos

³ Tomado de <https://www.arqhys.com/arquitectura/conectores-cortante.html>

experimentales presentados por algunos autores de conectores de cortante y se construirán unos modelos con base en las metodologías propuestas por los investigadores Dennis Lam (2005) y Jorge Bonilla (2007), para su análisis y comparación sobre el comportamiento de los conectores de cortante usados para conectar las vigas de acero con losas macizas y en Steel deck.

4. MARCO TEÓRICO

Carga: Es la fuerza exterior que actúan sobre los diferentes elementos. Podemos diferenciar tres tipos de cargas, como son: la carga estática, la carga dinámica y la carga cíclica.⁴

Tensión: Es la reacción que se produce en el interior de la pieza a ensayar, cuando sobre ésta se aplica una carga. La tensión es siempre de la misma magnitud y de sentido contrario a la carga aplicada. Se mide en Pascales, que es la tensión que genera una carga de un Newton de fuerza aplicada sobre una superficie de un metro cuadrado.⁵

Compresión: Es la que se opone a una fuerza que tiende a comprimir el cuerpo. Se produce sometiendo al cuerpo a dos cargas de igual dirección y sentido contrario y convergente.⁶

Losas: Es un elemento estructural horizontal que tiene como característica que su dimensión en planta es considerablemente más grande en comparación con su altura y las cargas que son transmitidas a ella están perpendiculares a su plano.

Viga: En ingeniería y arquitectura se denomina viga a un elemento estructural lineal que trabaja principalmente a flexión. En las vigas, la longitud predomina sobre las otras dos dimensiones y suele ser horizontal.⁷

Conectores de cortante: Son barras cortas de acero con una cabeza redonda los cuales están diseñados con el fin de proporcionar anclaje al concreto con las vigas de acero para aumentar la

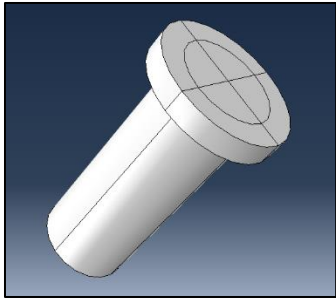
⁴ Tomado de feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8567.pdf

⁵ Tomado de feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8567.pdf

⁶ Tomado de feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8567.pdf

⁷ Tomado de es.scribd.com/document/415380707/En-Ingenieria-y-Arquitectura-Se-Denomina-Viga.

resistencia ante fuerzas cortante horizontal en la interfase de losa-viga.



Conector de cortante en acero (elaboración propia).

Ensayos Push out: Se encuentra descrito en el eurocódigo 4. Este ensayo consiste en aplicar una carga hasta lograr la falla en el espécimen compuesto por perfiles metálicos previamente conocidos y una lámina colaborante (Metaldeck), unidos entre sí, por medio de conectores de cortante, con el objetivo de transmitir esfuerzos a los conectores.

Software Abaqus: Actualmente, los grupos de ingeniería suelen realizar la simulación de productos mediante herramientas de simulación del nicho de diferentes proveedores para simular distintos atributos de diseño. El uso de productos de software de varios proveedores genera ineficiencia y aumenta los costes. SIMULIA ofrece una serie escalable de productos de análisis unificados que permite a todos los usuarios, independientemente de su experiencia en simulación o foco de dominio, colaborar y compartir perfectamente datos de simulación y métodos aprobados sin perder la fidelidad de la información.

La serie de productos de análisis de elementos finitos unificado de Abaqus ofrece soluciones potentes y completas para problemas de ingeniería rutinarios y más sofisticados que abarcan un amplio espectro de aplicaciones industriales. En el sector de la automoción, los grupos de trabajo de ingeniería pueden tener en cuenta las cargas de vehículo completas, la vibración dinámica, los sistemas de varios cuerpos, el impacto/golpe, los elementos estáticos no lineales, el acoplamiento térmico y el acoplamiento estructural acústico gracias a una estructura de datos de modelos

común y a una tecnología de solver integrada. Las mejores empresas de su clase se benefician del análisis de elementos finitos unificado de Abaqus con el fin de consolidar sus procesos y herramientas, reducir los costes y la ineficiencia, y aumentar la ventaja competitiva.⁸

Modelación por elementos finitos: El MEF es un método por aproximación numérica que parte del conocido Método Matricial, elevándolo de modo “discreto” a “continuo”.

La gran ventaja que aporta el Método de los Elementos Finitos sobre el Método Matricial es la capacidad de evaluar estructuras de más de una dimensión. Es decir, si el Método Matricial sólo admite modelos de barras, el MEF permite además modelos tipo área y volúmenes. Esto nos permite que, por ejemplo, podamos calcular una losa como un medio continuo y no como un emparrillado, tal y como nos obligaba el Método Matricial.⁹

Lam (2005): Es una investigación realizada por el Ingeniero Civil Dennis Lam en el año 2005 donde por medio de pruebas experimentales propone un modelo numérico, utilizando el método de elementos finitos por medio de la herramienta computacional Abaqus (2001), con el fin de estudiar las variaciones de la resistencia de los conectores de cortante y del concreto en el diseño de vigas compuestas.¹⁰

Chapman y Balakrishnan (1964): Esta probeta fue tomada de la investigación del señor Jorge Bonilla en la que analiza el comportamiento de los pernos (conector de cortante) en estructuras compuesta de hormigón – acero, con el comportamiento de los materiales bilineal y el método del daño, con el fin de obtener una estimación de la resistencia y capacidad de los pernos, teniendo en cuenta las normativas del

⁸ Tomado de : <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/abaqus/>

⁹ Tomado de: Tomado de: <https://www.eadic.com/calculo-estructural-el-metodo-de-los-elementos-finitos/>

¹⁰ Lam, D. y Ellobody, E. (2005): Behavior of Headed Stud Shear Connectors in Composite Beam, Journal of Structural Engineering

eurocódigo 4 (2004), la AISC-LRFD (2005) y la normativa rural cubana NR-080-2004.¹¹

Robinson (1988): Esta probeta fue tomada de la investigación realizada por los señores Jayas & Hosain en la que analizan la tipología viga – losa con presencia de lámina nervada (Steel deck).¹²

Jayas y Hosain (1988): En esta investigación los señores Jayas & Hosain realizan una simulación computacional por medio del ensayo push out en el software Abaqus, el cual está basado en la metodología de elementos finitos, simulando que el comportamiento del acero es bilineal y utilizando en el hormigón el modelo de daño plástico. Con el fin de estudiar la tipología viga – losa en presencia de lámina nervada (Steel deck).¹³

5. SIMULACIÓN DEL ENSAYO DE CONECTORES.

En este trabajo se mostraran y plantearan las bases metodológicas que se usaron para la simulación virtual del ensayo de conectores de cortante (ensayo Push-out), en sección de vigas metálicas con losas macizas y con losas con Steel deck, en el transcurso del trabajo se definirán las especificaciones de cada probeta escogida y de la misma forma las condiciones usadas para crear el modelo computacional, tales como las condiciones de contorno de los cuerpos que componen los modelos y los aspectos que sirvieron para la calibración de los diferentes modelos de probetas. Todas las probetas escogidas cuentan con los resultados experimentales obtenidos por los investigadores respectivos, para tal fin se escogieron las siguientes probetas: **(SP3-SP4) Lam y Ellobody (2005)**, **(PB1) Chapman y Balakrisman (1964)**, **(TVIII) Robinson (1988)**, **(JDT-8) Jayas y Hossain (1988)**.

¹¹ Chapman, J. C. y Balakrishnan, S. (1964): Experiments on Composite Beams. Journal of Structural Engineer

¹² Robinson, H. (1988): Multiple Stud Shear Connectors in Deep Ribbed Metal Deck. Canadian Journal of Civil Engineering

¹³ Jayas, B. S. y Hosain, M. U. (1988): Behavior of Headed Studs in Composite Beams: Pushout Test. Canadian Journal of Civil Engineering

5.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ESPECIMENES.

5.1.1 PROBETAS DE LAM Y ELLOBODY (2005).

El primer estudio experimental que se eligió fue el presentado por **Lam y Ellobody (2005)** como medio y base para el estudio del comportamiento de la conexión. La probeta estudiada fue la **(SP-3 y SP-4)** (figura 1) está compuesta por un segmento con medidas de perfil W 10 x 49, y dos losas de concreto rectangular construida a cada lado del perfil en contacto con las alas. La unión entre el perfil y las losas se realiza mediante pernos soldados de 19,05 x 100 mm, con una tensión de fluencia de 470.8Mpa y un módulo de deformación de 200000Mpa. Las losas de hormigón tienen una resistencia a la compresión de 30 y 35 Mpa respectivamente.

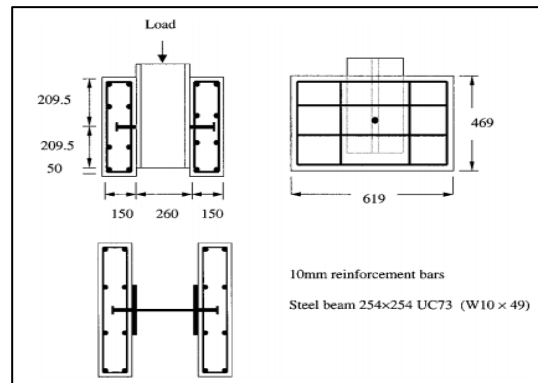


Figura 1: espécimen ensayado por Lam y Ellobody (2005) (Sp3-Sp4).

5.1.2 PROBETA CHAPMAN Y BALAKRISHNAN (1964).

Con el fin de validar los modelos computacionales y poder realizar un mejor análisis al momento de comparar las metodologías planteadas por los autores hemos elegido la probeta **(PB-1)**(figura 2) analizada por **Chapman y Balakrisman (1964)**.La cual se encuentra compuesta por un perfil W 12 x 44, con losas de concreto de 305 x 457 x 152 mm (largo x ancho x espesor) y resistencia a la compresión de 34.48 Mpa en cada lado, unidas a las alas con dos conectores de espárragos de 19,05 x 100 mm, tensión máxima

de tracción de 522 Mpa y módulo de deformación de 210000Mpa.

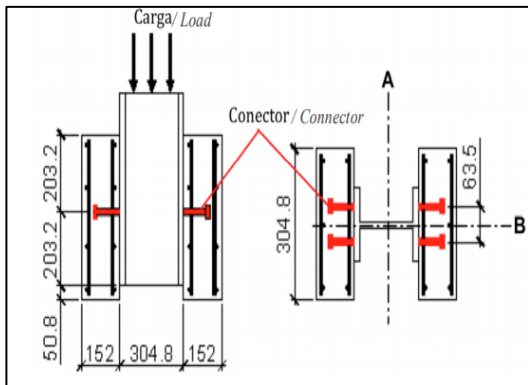


Figura 2: espécimen ensayado por Chapman y Balakrisman (1964) (PB-1)

5.1.4 PROBETA JAYAS Y HOSSAIN (1988).

La probeta de (JDT-8) de Jayas y Hossain (1988)(figura 4) está conformada por un losa de concreto y una lámina colaborante de Steel Deck, se escoge esta probeta con el fin de tener diversos resultados que nos indiquen el verdadero comportamiento de los pernos en diferentes casos, esta probeta está compuesta por dos conectores de 19.05 x 127 mm con resistencia ultima a la tracción de 448.18 Mpa y módulo de deformación 200000Mpa, los conectores en la probeta se ubican a cada del perfil W 200 x 59, excéntricamente en posición favorable quedando embebidos en la losa de concreto de resistencia de 24.4 Mpa con relación a el eje del mismo y lamina de Steel deck QL-Lock con resistencia ultima a la tracción de 377 Mpa

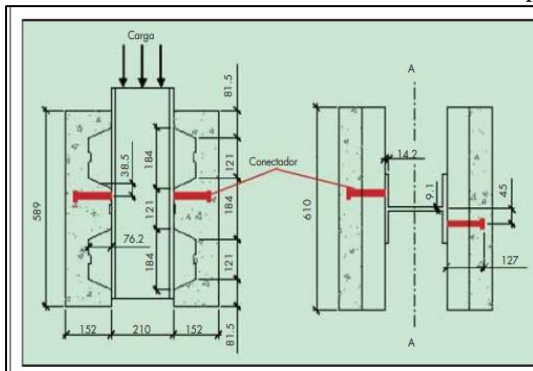


Figura 4: Especimen ensayado por Jayas y Hossain (1988) (JDT-8).

5.1.3 PROBETA ROBINSON (1988).

Para determinar el comportamiento de los conectores de cortantes en losas con láminas colaborantes de Steel Deck escogimos la probeta (TVIII) ensayada por Robinson en 1988 (figura 3) la cual se encuentra compuesta por cuatro conectores de 19.05 x 116 mm y resistencia ultima a la tracción de 448.18 Mpa, ubicados dos a cada lado del Perfil I en posición desfavorable. Se utiliza un perfil tipo W 150 x 30. La resistencia del concreto de las losas es de 22.1 Mpa, y lámina de Steel Deck es una QL-Lock Rib con resistencia ultima de 388 Mpa

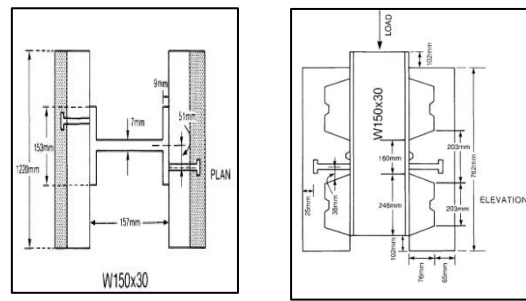


Figura 3: espécimen ensayados por Robinson (1988) (TVIII)

6. MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE LA GEOMETRIA.

A partir de las facilidades en cuanto a la representación geométrica que brinda ABAQUS/CAE y siendo consecuente con lo que se realiza en el ensayo push-out estandarizado se ha tomado como referencia la modelación tridimensional de las probetas, tratando de respetar la fidelidad del modelo, se modela de tal forma en el que se aprovecha la simetría de la

probeta. Para lograr esta simetría se modela solo una cuarta parte de la probeta tanto para los modelos que poseen losas macizas (modelos de Dennis Lam) como para los modelos que poseen lamina colaborante (modelos Jorge Bonilla) teniendo como partes del modelo los siguientes elementos:

- Conectores tipo espigo
- Losas rectangulares de concreto o losas de concreto con láminas colaborantes
- Perfil I Laminado en caliente.

Cada elemento que se mencionó anteriormente fue construido individualmente en el módulo de partes de **ABAQUS** y posteriormente ensamblados de tal forma que se respete los parámetros bajo los cuales se realiza el ensayo push out.

a) Perno:

Elemento de acero de diferentes diámetros respetando el vástago y la cabeza. El perno es uno de los elementos más importante al momento a realizar en este tipo de modelaciones ya que el transmitirá directamente la carga hacia las losas de concreto, por ende, se debe dividir en pequeñas partes que posibiliten realizar un óptimo mallado.

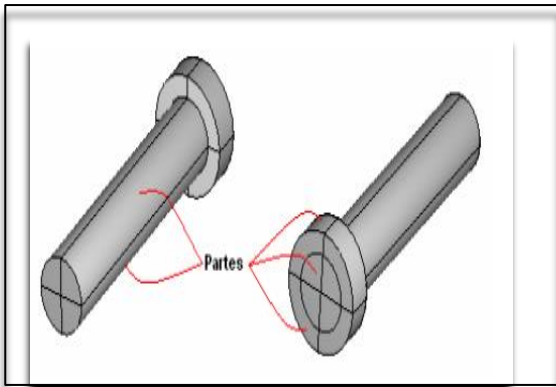


Figura 5: Vista en isométrico de la geometría del conector particionado (elaboración propia)

Si se particiona el perno como se ve en la imagen anterior se garantiza que se pueda utilizar cualquiera de las tres familias de elementos que se manejan en el software **ABAQUS/CAE**.

b) Losa Maciza de concreto:

Las losas macizas de concreto es una estructura que se encuentra modelada en forma de un paralelepípedo con cavidades en las zonas donde van embebidos los pernos o conectores. Para lograr esa cavidad se debe restar a la losa de concreto el volumen del perno.

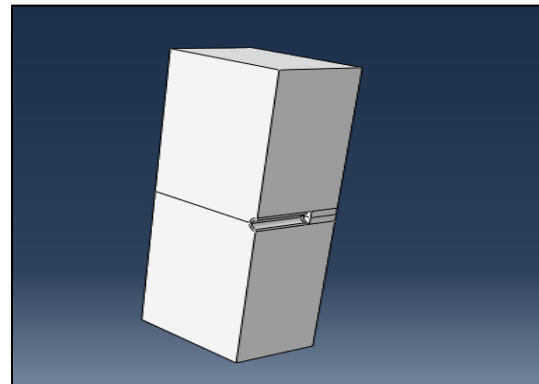


Figura 6: Vista en isométrico de la geometría de la losa en concreto de la probeta Lam y Ellobody (2005) (elaboración propia)

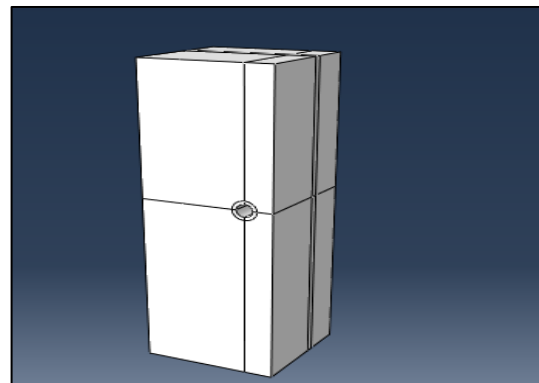


Figura 7: Vista en isométrico de la geometría de la losa en concreto probeta Chapman y Balakrisnan (1964) (elaboración propia)

c) Losa en concreto con lámina nervada.

A diferencia de la losa rectangular anterior esta geometría presenta ciertas irregularidades debidos a la forma de la lámina de Steel Deck. Esta debe ser particionada como se muestra en la siguiente imagen con el fin de permitir un mallado óptimo dentro del software **ABAQUS/CAE**.

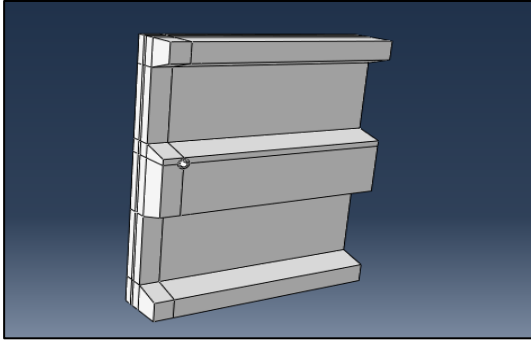


Figura 8: Vista en isométrico de la geometría de la losa con lamina de Steel Deck probeta Robinson (1988) (elaboración propia)

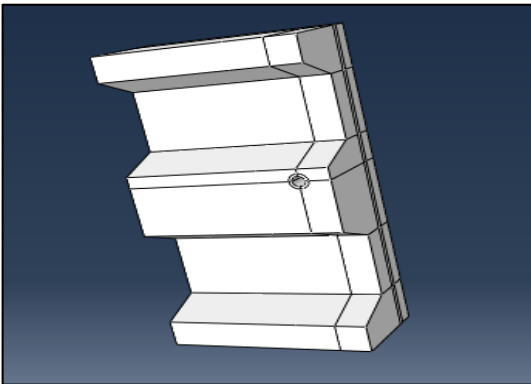


Figura 9: Vista en isométrico de la geometría de la losa particionada con lamina de Steel Deck Probeta Jaya – Hossain (1988) (elaboración propia).

d) Lamina Nervada:

Este elemento es la lámina de Steel Deck que sirve como refuerzo de acero en tracción a la losa de concreto a continuación, se mostrará que la geometría de este elemento adoptará la forma de la parte inferior de la losa de concreto con la diferencia que para modelar este elemento no se considera como un sólido sino como un elemento tipo Shell (cascará).

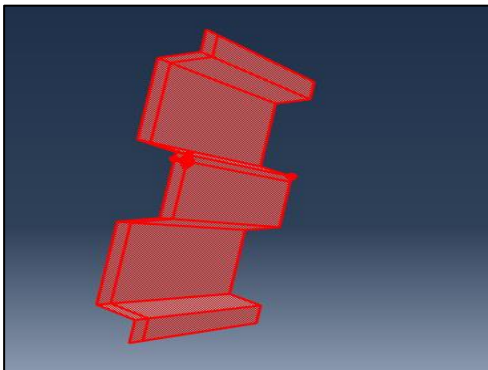


Figura 10: Vista en isométrico de la modelación de la lámina en Steel deck (elaboración propia).

7. MODELACIÓN DE LAS CONDICIONES DE APOYO, FRONTERAS Y BORDES.

a) Perno:

Este elemento será el encargado de transmitir los esfuerzos del perfil a la losa de concreto. En ese orden de ideas existen dos superficies de interacción, primeramente, se debe considerar la superficie que garantiza la unión perno-perfil y luego la interfase perno-hormigón.

La unión perno perfil es tratada como una unión rígida, ya que realmente esta conexión se logra mediante soldadura en todo el perímetro del perno, este tipo de elementos se diseñan para que las fallas no ocurran en el lugar de soldadura.

Si nos vamos a la interfaz perno-concreto se sabe que este tiene una importante fuerza de fricción en algunas zonas de su superficie, debido a los elevados esfuerzos normales que se originan, sobre todo en las zonas cercanas a la base del conector, sin embargo, para este tipo de análisis se considera que este conjunto está conectado mediante una conexión rígida sin rozamiento, esta consideración se hace siguiendo las recomendaciones del manual para usuarios **ABAQUS** que sugiere no considerar la fuerza de fricción en problemas que involucren contactos , a menos que esta tenga una influencia muy significativa .

De la misma forma al momento de usar el modelo bilineal del concreto planteado por **Lam et (2005)**, se deben desconectar las zonas del perno ubicadas en el área semicilíndrica del mismo, opuesto a la dirección de aplicación de la carga. Esta desconexión se basa en la investigación de **Jayas y Hossain (1987)**, y **Kitoh y Sonoda (1990)**, que concluyen que a bajo niveles de carga existe una pérdida de contacto en la parte trasera del perno.



Figura 11: vista isométrica de zonas de desconexión mediante modelo bilineal del concreto (Bonilla ,2015)

b) Losa de concreto maciza o con lamina en Steel deck:

Este elemento aparte de interactuar con el perno tiene un vínculo directo con el suelo de apoyo. Pero para efectos de modelación no se toma en cuenta la fuerza de rozamiento que se genera en la interfase losa-perfil, para así ser consecuente con los procedimientos especificados para realizar el ensayo push out, donde básicamente se coloca una capa de grasa en la parte exterior del ala del perfil que se encuentra en contacto con la losa.

En la geometría creada que básicamente fue solo un cuarto de la probeta experimental, se deben tener 3 superficies en consideración, la superficie 1 que es donde se apoyara la losa se deben restringir los desplazamientos en los ejes X y Z y se liberan los desplazamientos en Y. Para la superficie 2 que básicamente es la parte donde se cortó la losa y la viga para lograr la simetría se deben restringir los desplazamientos en el eje X. y la superficie 3 es la parte de la viga que se cortó para la lograr la simetría respectiva del perfil, aquí se deben restringir los desplazamientos en el eje Y.

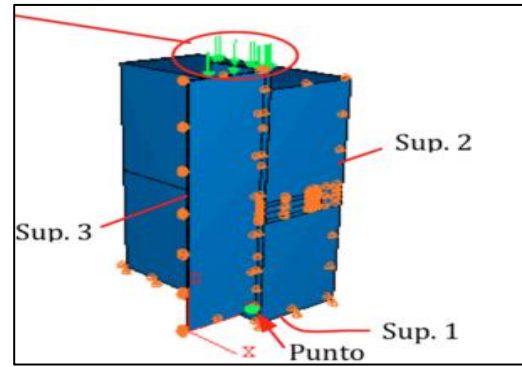


Figura 12: ubicación de las superficies respectivas para las probetas (Bonilla,2015)

c) Perfil I:

El perfil es unido a los pernos mediante una conexión rígida, la cual ya fue mencionada anteriormente la carga es aplicada de forma distribuida en el alma y ala del perfil, de tal forma que se simule el experimento real, los incrementos de la carga son aplicados de manera automática por el software ABAQUS/CAE y este se encuentra relacionado con la convergencia numérica que encuentre el software.

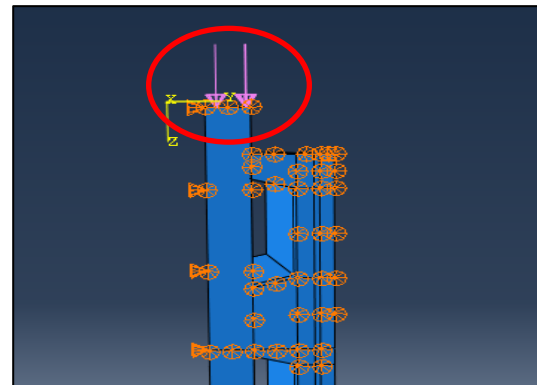


Figura 13: zona de aplicación de la carga (Elaboración propia).

8. MODELACIÓN COMPUTACIONAL DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES.

8.1. MODELAMIENTO DEL ACERO.

De acuerdo a lo consultado en los trabajos de Nie y Cai (2004), Lam y Ellobody (2005), Ellobody y Young (2006), Bonilla et al. (2007a), (2007b), (2007c), sobre la modelación en estructuras compuestas, se optó por usar un comportamiento bilineal para el acero con criterio de rotura de Von Mises. Para lograr esto se debió utilizar el comando ***PLASTIC*** dentro del programa **ABAQUS**. Cabe resaltar que dentro del desarrollo de los trabajos mencionados se han obtenido muchos resultados, que tienen relación con los modelos creados y se hace visible en gran manera la factibilidad de usar este modelo idealizado del acero.

8.2. MODELAMIENTO DEL CONCRETO.

8.2.1. MODELAMIENTO SEGÚN DENNIS LAM.

Este criterio se tiene en cuenta de acuerdo con lo planteado por Lam et al (2005) para la deformación de fluencia del concreto, tensión de fluencia y módulo de Young los cuales se deben calcular con las siguientes ecuaciones.

$$\epsilon_{yc} = 0.00024 \sqrt{f_{cu}} \quad Ec. (1)$$

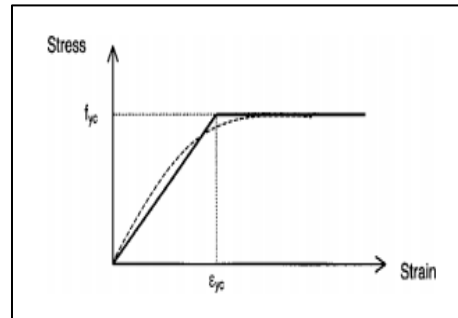
$$f_{yc} = 0.8 f_{cu} \quad Ec. (2)$$

$$E_c = f_{yc} / \epsilon_{yc} \quad Ec. (3)$$

El valor de (f_{cu}) se toma cuando estamos considerando probetas cúbicas para el cálculo de resistencia del concreto, para todos los demás casos se debe tomar (f_{yc}).

Para poder especificar el comportamiento bilineal del concreto se debe usar el comando ***PLASTIC*** en el software **ABAQUS CAE**, en

donde se tomará el concreto con el siguiente comportamiento.



Gráfica 1: comportamiento bilineal del concreto Lam (2005).

8.2.2. MODELAMIENTO SEGÚN JORGE BONILLA.

Dentro del software **ABAQUS/CAE** existente varios criterios para modelar el concreto, en este caso usaremos el planteado por (Bonilla,2007), denominado “Modelo de daño plástico del concreto” o CDPM, este modelo requiere de una relación constitutiva de los comportamientos a tracción y compresión del concreto, se deben tener en cuenta unos parámetros de daño por rotura y aplastamiento y otros parámetros esenciales para el análisis como lo son el ángulo de dilatación, la excentricidad, la relación de carga biaxial, el coeficiente K y el parámetro de viscosidad. Estos parámetros ya se encuentran predeterminado por investigaciones anteriores, por ende, para nuestros modelos se usarán los parámetros de la siguiente tabla.

Dilatancia:		15°	
Excentricidad	F_{50} / F_{cd}	K	Parámetro de viscosidad
0,1	1,16	0,666	0,001

Tabla 1: Parámetros para modelo de daño plástico, (Bonilla,2007-Yunus Dere,2017).

Debido a que este modelo considera la resistencia del concreto a la tensión, está fácilmente se puede hallar por medio de ensayos de laboratorio, sin embargo, se ha definido que esta resistencia se

encuentra dentro del rango de 10 a 15 por ciento de la resistencia a la compresión del concreto, en este caso como no disponemos de los datos experimentales para determinar esta resistencia, se calculara a partir de la siguiente ecuación:

$$f_{exp} = 1.38(f_c)^{0.69} \quad \text{psi} \quad \text{Ec. (4)}$$

El módulo de elasticidad del concreto al igual que la relación de Poisson son más difíciles de calcular mediante ensayos de laboratorio. La estimación de el modulo de elasticidad se da a partir de la siguiente ecuación, considerando el método usado en este caso y para la relación de Poisson respetiva se tomará un valor de 0.17 según lo planteado en la investigación de (Bonilla, 2007).

$$E_c = 57000\sqrt{f_c} \quad \text{psi} \quad \text{Ec. (5)}$$

Para este caso de estudio el modelo de la relación tensión-deformación no confinada para el concreto que fue propuesto por primera vez por **Popovics** y posteriormente modificado por **Thoronfeldt**. De acuerdo con lo mencionado anteriormente la relación entre la deformación compresiva y el esfuerzo esta dada por la siguiente ecuación.

$$\frac{f_c}{f_c'} = \frac{n \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)}{(n-1) + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^n} \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde f_c' , E_{co} son la resistencia a la compresión correspondiente a el máximo esfuerzo. Para el cálculo del valor "n" se debe usar la siguiente ecuación.:

$$n = 0.4 \times 10^{-3} f_c' (\text{psi}) + 1.0 \quad \text{Ec. (7)}$$

Thoronfeldt modifico la ecuación de **Popovics** para la rama descendente de la relación tensión-deformación multiplicando la potencia n por un

coeficiente que se determinó mediante ensayos de laboratorio y que para nuestro caso es de 1.25, para la curva de tensión-deformación se asume que la curva es lineal hasta la resistencia a la tracción uniaxial y luego de allí se debe calcular con la siguiente ecuación exponencial.

$$\sigma = f_t \left(\frac{\epsilon_t}{\epsilon} \right)^{(0.7+1000\epsilon)}, \quad \epsilon_t = \frac{f_t}{E_c} \quad \text{Ec. (8)}$$

En este modelo que vamos a utilizar es muy importante tener en cuenta el daño que se genera en el concreto tanto a compresión como a tensión, para este caso usaremos unas ecuaciones que definen estos parámetros de daño y son exitosas en muchas investigaciones. Los parámetros me indican el porcentaje de daño que tendrá el concreto en cada deformación, estos parámetros partirán desde 0 (sin daño) a 1 que significa totalmente dañado.

Los parámetros de daño a compresión y tensión serán determinados por las siguientes ecuaciones respectivamente.

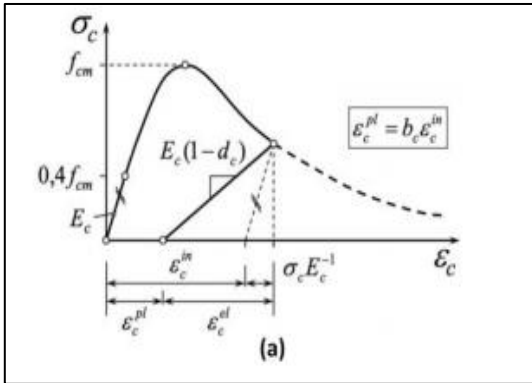
$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\epsilon_c^{bc} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}} \quad \text{Ec. (9)}$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\epsilon_t^{bt} (1/b_t - 1) + \sigma_t E_c^{-1}} \quad \text{Ec. (10)}$$

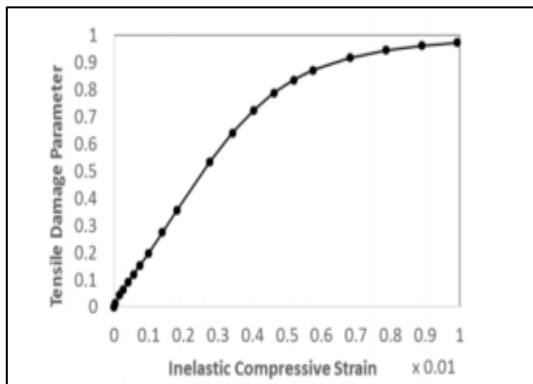
Para los coeficientes b_c y b_t se pueden tomar valores entre 0 y 1 según **Britel y Mark**, sin embargo, en diferente análisis se han determinado que los mejores valores para estos coeficientes son b_c : 0.7 y b_t : 0.4.

Para lograr agregar este comportamiento en el software **ABAQUS** se debe usar el comando **ELASTIC** en donde se coloca el módulo de elasticidad y el módulo de Poisson calculado con las ecuaciones mencionadas anteriormente, posterior a esto se debe usar el comando **CONCRETE DAMAGE PLASTICITY**, en

donde se debe colocar como primera medida los parámetros de ángulo de dilatación, excentricidad, relación biaxial de carga y viscosidad. Que ya fueron mencionados anteriormente. Luego de esto se procede a agregar el comportamiento a compresión del concreto y el daño asociado a este comportamiento que viene dado por las gráficas creadas a partir de las ecuaciones mencionadas anteriormente.

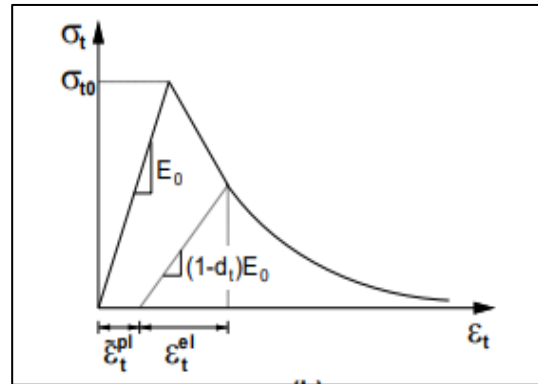


Grafica 2: comportamiento a compresión del concreto (Yunus Dere,2017)

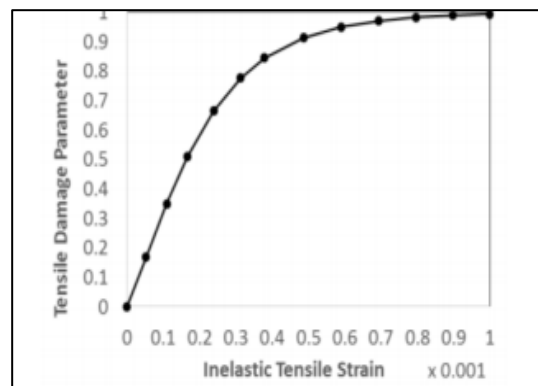


Grafica 3: daño asociado a la compresión del concreto. (Yunus Dere,2017)

Habiendo colocado el comportamiento a compresión del concreto, se procede a realizar la misma operación para colocar el comportamiento a tensión del mismo.



Grafica 4: comportamiento a tensión del concreto (Yunus Dere,2017)



Grafica 5: daño asociado a la tensión del concreto (Yunus Dere,2017)

9. ESTUDIO Y SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS A EMPLEAR.

Luego de realizar diversas pruebas con los elementos que **ABAQUS** posee para un análisis lineal por elementos finitos, tales como C3D8R, C3D4, C3D6, pudimos deducir que en algunos casos hacía falta combinar estos elementos para poder lograr una convergencia en el modelo, a continuación, se hará una breve explicación de los elementos que se eligieron para las diferentes probetas. La diferencia entre estos tres elementos radica en su geometría, los elementos C3D4 y C3D6 son elementos prismáticos mientras que los elementos C3D8R son elementos cuadrados.

Para las probetas (SP3-SP4) de Lam (2005) se usaron elementos C3D6 en todas sus partes, es decir, en la losa de concreto, en el perno y en la viga de acero.

Para las probetas que posee laminas colaborantes en Steel Deck, la cuales son la probeta (TVIII) de Robinson (1988) y la probeta Jayas y Hossain (JDT-8)(1988), se debieron usar elementos C3D6 en la losa de concreto y elementos C3D8R en una zona que circunda a él conector y hace parte de la misma losa de concreto, esta zona circundante se creó en todas las probetas con el fin de poder construir un mallado más fino en la zona del concreto receptora de los esfuerzos provenientes del perno, de la misma manera para el perno y la viga se emplearon elementos C3D8R, con esta combinación se logró la perfecta convergencia del análisis del modelo.

Para la última probeta analizada la cual fue la de Chapman y Balakrisman (1964) (PB-1), se logró la convergencia usando elementos C3D4 en la losa de concreto y elementos C3D6 en la zona circundante a él conector, en el conector y en la viga de acero.

10. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS.

Luego de realizar los análisis computacionales de las probetas, teniendo en cuenta las metodologías planteadas por los autores Dennis Lam y Jorge Bonilla se obtuvieron los siguientes resultados, en cuanto a tiempo de análisis, carga última del perno y desplazamiento de la viga:

Tabla de resultados.

PROBETA	RESULTADO EXPERIEMNTAL (KN)	RESULTADO USANDO MODELO BILINEAL PARA EL CONCRETO (KN)	RESULTADO USANDO CDPM(KN)	DIF-EXP-BILINEAL (%)	DIF -EXP-CDPM(%)	DURACIÓN DEL ANALISIS-BILINEAL (MIN).	DURACIÓN DEL ANALISIS CDPM(MIN)
SP3	93	93.8	93.9	0.860215054	0.967741935	10	30
SP4	102	96.5	106.7	5.392156863	4.607843137	12	40
TVIII	47.75	48	44	0.523560209	7.853403141	40	120
JDT-8	74.5	78	53	4.697986577	28.8590604	40	120
PB-1	103	96	113	6.796116505	9.708737864	20	70

Tabla2: resultados obtenidos (elaboración propia).

ALGUNAS GRAFICAS DE CARGA VS DESPLAZAMIENTO.

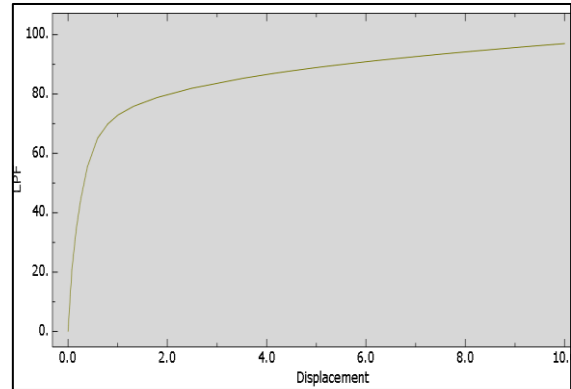
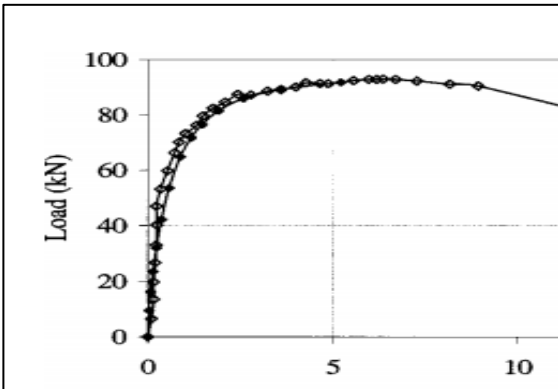


Fig 1: Grafica obtenida por ensayo push-out Lam (2005) Vs grafica obtenida con el modelo bilineal del concreto (elaboración propia). probeta (Sp3)

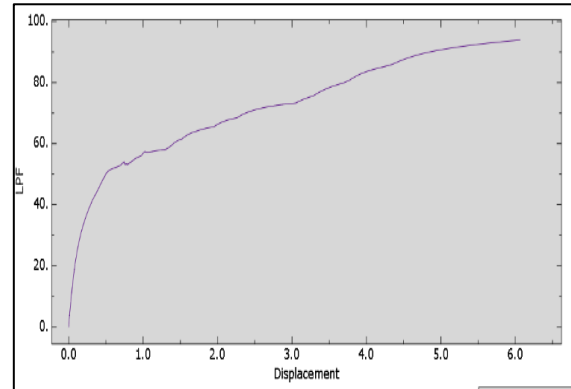
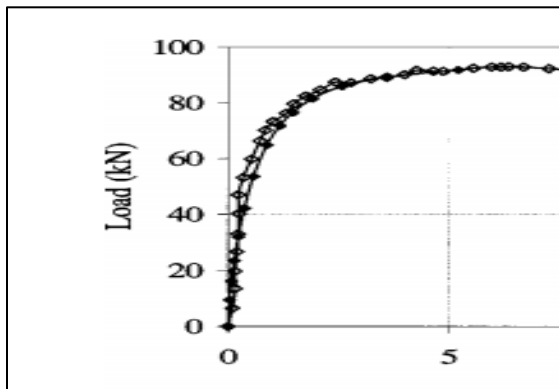


Fig2: Grafica obtenida por ensayo push-out Lam (2005) Vs grafica obtenida con CDPM (elaboración propia) probeta (Sp3)

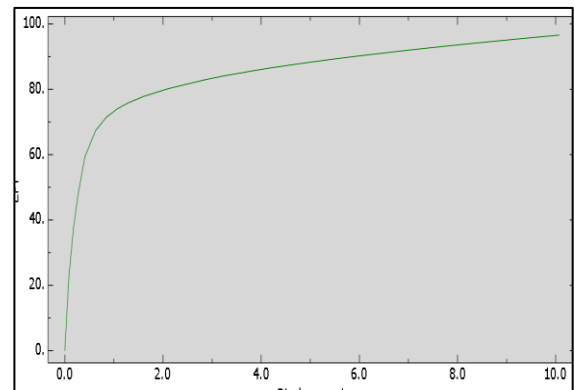
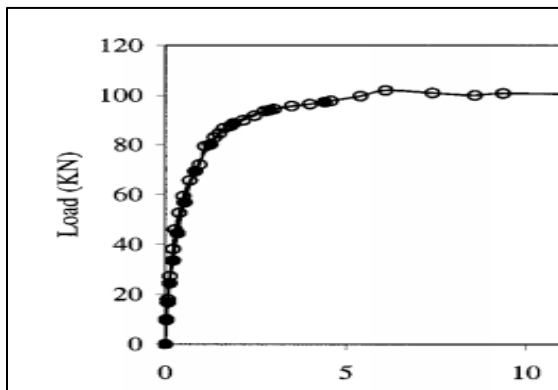


Fig3: Grafica obtenida por ensayo push-out Lam (2005) Vs grafica obtenida con el modelo bilineal del concreto (elaboración propia). probeta (Sp4).

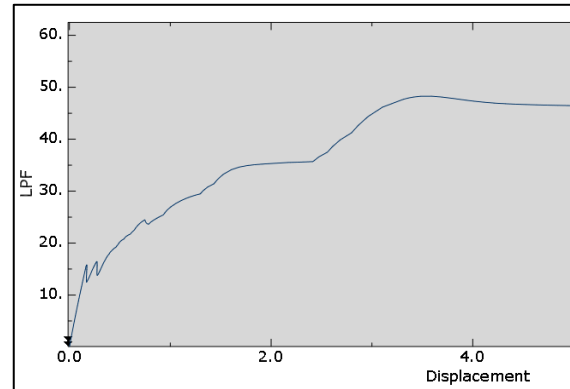
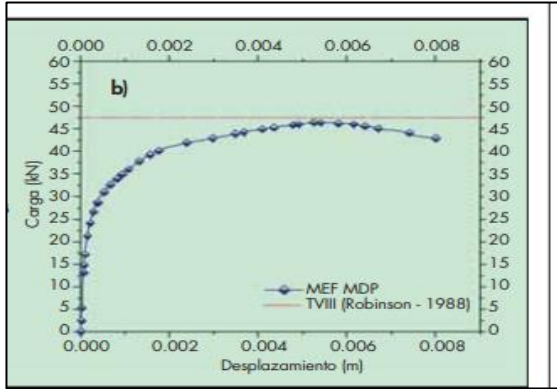


Fig 4: Grafica obtenida por ensayo push-out Bonilla (2010)) Vs grafica obtenida con el modelo bilineal del concreto (elaboración propia). Probeta (TVIII).

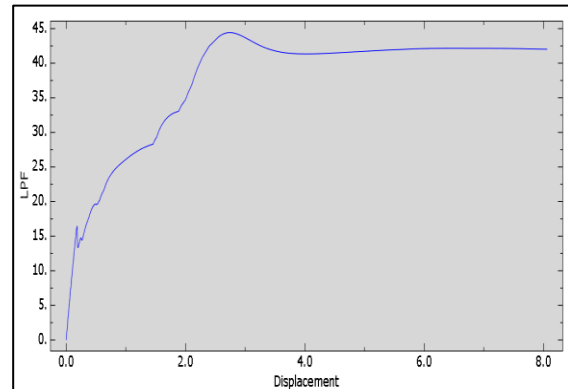
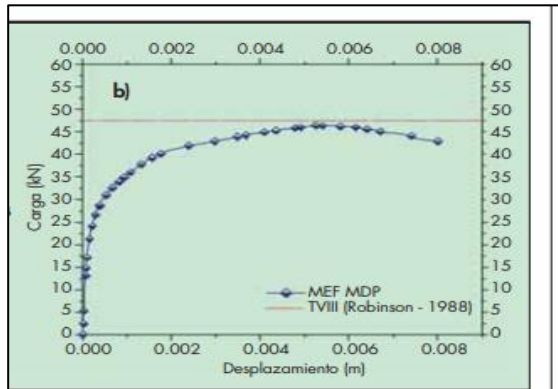


Fig 5: Grafica obtenida por ensayo push-out Bonilla (2010)) Vs grafica obtenida con el CDPM (elaboración propia). probeta (TVIII).

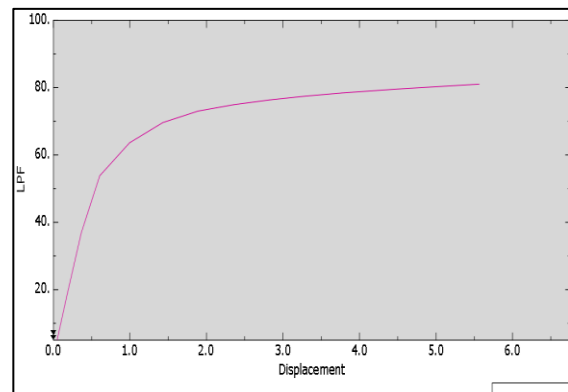
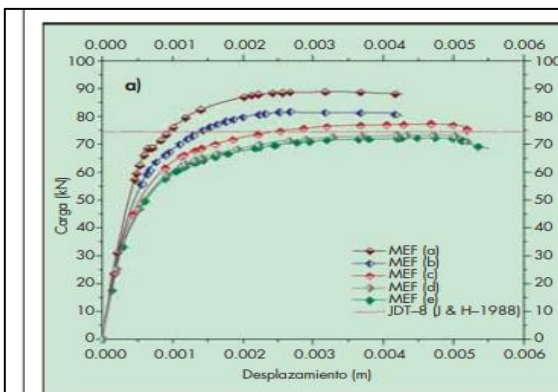


Fig 7: Grafica obtenida por ensayo push-out Bonilla (2010)) Vs grafica obtenida con el modelo bilineal del concreto (elaboración propia). Probeta (JDT-8)

11. CONCLUSIONES:

- Teniendo en cuenta las gráficas obtenidas usando los dos modelos de material para el concreto podemos concluir que ambos modelos son bastante adecuados para simular el ensayo Push-out, ya que se presentan errores inferiores al 10% con respecto a la carga real obtenida por ensayo de laboratorio.
- El costo computacional en cuanto al tiempo aumenta considerablemente cuando usamos el Modelo de daño plástico en el concreto (CDPM), una recomendación es tomar los puntos de la curva esfuerzo deformación de manera distanciada con el objeto de reducir los cálculos por parte del software.
- Teniendo en cuenta la adecuada correspondencia entre experimentación y simulación virtual, podemos concluir que la simulación virtual no solo se puede implementar en las investigaciones que los investigadores consideran proponen, sino para cualquiera otra investigación debido a que los resultados obtenidos son aceptables.
- La mayoría de los modelos que utilizan el CDPM dieron errores menores al 10%, sin embargo, hubo una probeta que no alcanzó los resultados esperados, pero cuya convergencia se logró

cuando se colocó una conexión del tipo fricción y en contacto. Esta conexión no es la utilizada por Jorge Bonilla, sino que ha sido recomendada por otros autores como Dennis Lam.

- Teniendo en cuenta que la mayoría de las probetas bajo el uso de CDPM cumplió y arrojó resultados similares a los experimentales, podemos concluir que este es uno de los modelos más complejos y útiles para el determinar los comportamientos de los conectores, y de la misma forma determinar el comportamiento real de la losa de concreto ya que podemos observar de manera clara las zonas del concreto más afectadas.

REFERENCIAS.

1. *ABAQUS. (2003): User's Manual, Ver. 6.4-1, Hibbit, Karlson and Sorensen, Inc.*
2. *Lam D. y Ellobody E. (2005), Behavior of Headed Stud Shear Connectors in Composite Beam, Journal of Structural Engineering, Vol 131, No 1, p 96-106.*
3. *Kitoh H. y Sonoda K. (1990), Forces on the Studs in a Steel Plate and Concrete Slab. International Association for Bridge and Structural Engineering (LABSE) Symposium, Brussels, p 185-190.*

4. Chapman J. C. y Balakrishnan S. (1964), *Experiments on Composite Beams. Journal of Structural Engineer, Vol 42, No 11, p 369-383.*
5. Eurocode 4 (EN 1994-1-1), *Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1.1(2004), European Committee for Standardization, Brussels.*
6. Jayas B. S. y Hosain M. U. (1988), *Behavior of Headed Studs in Composite Beams: Push-out Test. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol 15, No 2, p 240-253.*
7. Bonilla J. (2008), *Estudio del comportamiento de conectadores tipo perno de estructuras compuestas de hormigón y acero mediante modelación numérica. Tesis Doctoral. Universidad Central de Las Villas. Sta. Clara, Cuba. 201 p*
8. Ellobody E., Young B. (2006), *Performance of shear connection in composite beams with profiled steel sheeting, Journal of Constructional Steel Research, No 62, p 682-694.*
9. Y. Dere, A. Asgari, E. D. Sotelino, and G. C. Archer, *“Failure prediction of skewed jointed plain concrete pavements using 3D FE analysis,” Eng. Fail. Analysis, vol. 13, no. 6, pp. 898-913, 2006.*
10. Jayas, B. S., and Hosain, M. U. (1987). *“Behaviour of headed studs in composite beams: Push-out tests.” Can. J. Civ. Eng. 15, 240–253.*
11. Robinson, H. (1988): *Multiple Stud Shear Connectors in Deep Ribbed Metal Deck. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol 15, No 4, p 553-569*
12. Davies, C. (1967): *Small-Scale Push-Out Tests on Welded Stud Shear Connectors. Journal of Structural Engineer, Vol 40, No 2, p 311-316.*
13. E. Thorenfeldt, A. Tomaszewicz y JJ Jensen, *"Propiedades mecánicas del hormigón de alta resistencia y aplicación en el diseño", en Proc. Simposio sobre la utilización de hormigón de alta resistencia, Tapir, Trondheim, Noruega, 1987, págs. 149-159.*
14. S. Popovics, *"Un enfoque numérico para las curvas completas de tensión-deformación del hormigón", Investigación de cemento y hormigón, vol. 3, no. 5, págs. 583-599, 1973.*
15. Broche, J. L. (2005): *Conceptualización del comportamiento estructural de las cimentaciones superficiales aisladas desde una óptica integral, aplicando técnicas de modelación*

- numérica. Tesis de Doctorado, UCLV, Sta Clara, Cuba, 141 p.
16. Lam, D., Elliott, K. S., and Nethercot, D. A. (1998). "Push-off tests on shear studs with hollow-cored floor slabs." *Struct. Eng.*, 76(9), 167–174.
 17. British Standards Institution (BSI). (1997). "Code of practice for design and construction." *BS 8110, Parts 1,2, Structural use of concrete*, London
 18. Y. Dere and F. T. Dede, "Nonlinear finite element analysis of a R/C frame under lateral loading," *Mathematical and Computational Applications*, vol. 16, no. 4, pp. 947-958, 2011.
 19. V. Birtel and P. Mark, "Parameterised finite element modelling of RC beam shear failure," presented at *ABAQUS Users' Conference*, 2006
 20. AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. 1986. *Load and resistance factor design specification for structural steel buildings*. Chicago, IL. BRATTLAND,
 21. ROBINSON, H. 1967. *Tests of composite beams with cellular deck*. *ASCE Journal of Structural Division*, 93(ST4): 139-163.
 22. ROBINSON, H., and WALLACE, I. W. 1973. *Composite beams with 1-112 inch metal deck and partial and full shear connection*. *Transactions of the Canadian society for Civil Engineering*, 16(A-8): I-VIII.
 23. FISHER, J. W. 1970. *Design of composite beams with formed metal deck*. *AISC Engineering Journal*, 7(3): 88-96.
 24. JAYAS, B. S., and HOSAIN, M. U. 1986. *Behaviour of headed studs in hollow composite beams*. *Structural engineering research report No. 30*, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Sask.
 25. Oller, S. (2001): *Fractura mecánica. Un enfoque global*. CIMNE, Primera edición, Barcelona, España, 286 p.