

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN

Facultad de Ingeniería

Programa de Postgrado en Ingeniería Civil

Maestría en Ciencias de la Ingeniería Civil



EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO DE
VIGAS MIXTAS

Trabajo final de maestría para la obtención del título de Master en Ciencias de la
Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras

Rafael Prieto Florentin

San Lorenzo - Paraguay

2019

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO DE
VIGAS MIXTAS

Tesis presentada al Programa de Postgrado en Ingeniería Civil de la Universidad
Nacional de Asunción, como requisito para la obtención del Grado de Máster en
Ciencias de la Ingeniería Civil, énfasis en Estructuras

Orientadores:

Prof. MSc. José Luis Gutiérrez Dichirico
Prof. MSc. Hermann Rigoberto Segovia Lohse

SAN LORENZO – PARAGUAY

Noviembre - 2019

PRIETO FLORENTÍN, Rafael

Evaluación experimental y numérica del comportamiento de vigas mixtas/ Prieto Florentín, Rafael. – San Lorenzo: PPGIC / UNA, 2019.

126 p.(108)

Tesis de Maestría, Programa de Postgrado en Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Asunción; Maestría en Ciencias de la Ingeniería Civil. Orientadores: Prof. MSc. José Luis Gutiérrez Dichirico - Prof. Ing. Hermann Rigoberto Segovia Lohse

1. Vigas Mixtas 1. 2. Chapas plegadas 2. 3. Vigas de Hormigón-Acero 3. 4. Modelo Elementos Finitos 4. 5. Vigas con Pernos 5.

CCAA2

RAFAEL PRIETO FLORENTÍN

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO DE
VIGAS MIXTAS

Esta tesis fue juzgada adecuada para la obtención del Grado de MASTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CIVIL, y aprobada en su forma final por los profesores orientadores y por el Programa de Postgrado en Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Asunción.

San Lorenzo, 29 de marzo de 2019.

Orientador. Prof. Ing. José Luis Gutiérrez Dichirico.

MSc. Por la Universidad Nacional De Tucumán, Argentina. ~~Orientador~~

Orientador. Prof. Ing. Hermann Rigoberto Segovia Lohse. –

MSc. Por la Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Ing. UFRGS – Brasil.

~~Orientador~~

Prof. Fulgencio Antonio Aquino Duarte

Coordinador del PPGIC/UNA

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sergio Gavilán
PhD. UFRGS -Brasil

Prof. Miembro 1

Prof. Ing. Paola Villalba
MSc. Ing. UFRGS -Brasil

Prof. Miembro 2

Prof. Ing. ~~Juan Pablo Bellasai Zayas~~Hermann Rigoberto Segovia Lohse
MSc. Ing. ~~ITA-UFRGS~~ -Brasil

Prof. Miembro 3

Agradecimientos

A los organizadores del curso de pos graduación de la FIUNA, en especial al decano Prof. Dr. Rubén López quien, ha destinado tiempo y no escatimó esfuerzo en la coordinación y continuidad del curso.

A mis orientadores el Prof. José Luis Gutiérrez, al Prof. Hermann R. Segovia, al Prof. Dr. F. Antonio Aquino, quienes apoyaron desde un inicio el desarrollo del trabajo de esta maestría.

A la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por su aporte tecnológico y ha financiado el curso de pos graduación.

Una mención especial al Ing. Iván Semeniuk P. quien puso a disposición todos los recursos de sus instalaciones y experiencia para la realización de los ensayos e interpretación de los resultados. A los compañeros, que con solidaridad y camaradería, acompañaron aportando ideas y han enriquecido, con conocimientos, cada participación durante el curso

Finalmente; a mis hijos Andrés y Gabriela, que me apoyaron y alentaron a continuar y, mi esposa Edelira que me acompañó incondicionalmente durante este proceso del curso.

PRIETO, R. Evaluación experimental y numérica del comportamiento de vigas mixtas. Tesis. 2019. Tesis (Maestría en Ciencias de la Ingeniería Civil) – Programa de Postgrado en Ingeniería Civil, UNA, San Lorenzo, Paraguay.

Resumen:

Este trabajo realiza un aporte en el uso de la viga de chapa de acero plegada mixta es decir mesa de compresión de hormigón y viga de acero. Mediante ensayos se probará la viga mixta para determinar el comportamiento de la chapa doblada en U sin pliegue de aletas superiores, consecuentemente el soldado de los pernos de anclaje se harán directamente al borde de la chapa, utilizando pernos de varillas conformadas de 10 mm de diámetro. Se acompañan los ensayos con cuatro modelos de elementos finitos tres realizados con el programa ANSYS y uno con el SAP2000 a fin de comparar los resultados de las deformaciones. Un punto de partida es el uso reducido de materiales en la elaboración de los especímenes de prueba y acompañados de procesos de elaboración de encofrado y armado de la losa, común a la práctica local con materiales de construcción típicos.

El conjunto estructural en estudio presenta una unión solidaria entre la chapa y la mesa de hormigón, esto hace que los modelos adoptados para representar la prueba experimental en el modelo numérico no presenten grandes diferencias entre aquellos en los que son representados con pernos de unión o como un simple empotramiento

Palabras-clave: 1. Vigas Mixtas. 2. Chapas plegadas 3. Vigas de Hormigón-Acero
4. Modelo Elementos Finitos. 5. Vigas con Pernos.

PRIETO, R. Experimental and numerical evaluation of the behavior of composite beams. Thesis Dissertation 2019 (Master of Science in Civil Engineering) – Graduate Curricula of the School of Civil Engineering – National University of Asunción (UNA), San Lorenzo, Paraguay.

Abstract:

The purpose of this work is to make a contribution in the use of composite folded steel plate girder, that is to say, tension of a slab of reinforced concrete and steel beam. By means of tests it shall be tested the folded plate girder to determine the behavior of the U-bent folded plate sheet without upper lips, consequently the welding of the anchor bolts will be made directly to the edge of the sheet, using 10 mm diameter shaped steel rods. With the tests there are four models of finite elements, three of them performed with the ANSYS program, and one with the SAP2000, in order to compare the results of the deformations. A starting point is the reduced use of materials in the preparation of test specimens and accompanied by elaboration processes of framing and assembling of the slab, an ordinary local practice with typical building materials.

The structural set being studying shows a joint solidarity between the sheet and the reinforced concrete slab, and this makes that the models adopted to represent the experimental test in the numerical model do not show large differences between those in which they were represented with joining bolts or as a simple embedding.

Keywords: 1. Composite Beams – Folded Plate Girder. 2. Folded steel plate. 3. Reinforced Concrete - Steel Beams. 4. Finite Elements Model. 5. Bolted Beams

Contenido

LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABLAS	xviii
CAPITULO 1	1
1. CONSIDERACIONES GENERALES	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y LIMITACIONES.....	3
3. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN	4
4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
5. ALCANCE.....	5
CAPITULO 2	6
1. ANTECEDENTES GENERALES	6
2. MARCO TEÓRICO.....	17
• COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA VIGA MIXTA.....	17
• SECCIÓN HOMOGENEIZADA PARA CALCULO EN RÉGIMEN ELÁSTICO.....	20
• FUERZA DE CORTE LONGITUDINAL.....	22
• ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DE LA SECCIÓN A FLEXIÓN	24
• PROCESO DE FABRICACIÓN DE VIGAS DE CHAPA PLEGADA	26
3. ESTADO DEL ARTE:.....	27
• SISTEMA DE PUENTE DE VIGA DE ACERO PLEGADO (Taly y Gangarao 1979).....	27
• VIGAS PLEGADAS PRETENSADAS SEGÚN NAKAMURA, (2002).....	29
• SISTEMA DE BURGEÑO Y PAVLICH, (2008).....	31
• INVESTIGACIÓN DE BARTH Y OTROS, (2017).....	32
• DISEÑO PRELIMINAR DE UNA VIGA TUBULAR DE CHAPA PLEGADA PROPUESTO POR BAHRT Y OTROS.....	33
CAPITULO 3	36

1. MARCO METODOLÓGICO.....	36
2. EXPERIENCIA PREVIA.....	36
• RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA SAP2000.....	39
3. CUERPOS EXPERIMENTALES	40
• GEOMETRÍA DE LA SECCIÓN.....	42
• PROPIEDADES DEL ACERO DE LA CHAPA PLEGADA.....	45
• CONECTORES UTILIZADOS	46
• TIPOS DE SOLDADURA EMPLEADA.....	46
• HORMIGÓN.....	47
• ARMADURA.....	47
• DETERMINACIÓN DEL ANCHO EFECTIVO	47
• PROPIEDADES DE LA SECCIÓN DE HORMIGÓN	49
4. ELABORACIÓN DE LOS CUERPOS DE PRUEBA	49
5. PRUEBA DE CARGA.....	54
6. PÓRTICO DE CARGA Y ACCESORIOS DE CARGA Y MEDICIÓN.....	54
• CILINDRO HIDRÁULICO DE CARGA	55
• MEDIDOR DE CARGA.....	56
• MEDIDORES DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL	56
7. PROCEDIMIENTO DE PRUEBA	56
8. MODELOS NUMÉRICOS	57
• CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES EN EL MODELO	58
• HORMIGÓN.....	58
• GRAUT.....	59
• ARMADURA PASIVA.....	59
• CHAPA DE ACERO PARA VIGA PLEGADA	60
9. MODELOS GENERADOS POR MEDIO DE ANSYS	61

10. MODELO GENERADO POR SAP2000.....	63
• MODELADO DE MATERIALES PARA SAP2000.....	63
• MODELADO GEOMÉTRICO	63
• MODELADO DE CONEXIONES ENTRE ELEMENTOS	64
• CONDICIONES DE APOYO.....	64
• CARGAS APLICADAS	65
11. VERIFICACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CARGA ENTRE LA LOSA DE HORMIGÓN Y LA CHAPA DE ACERO	65
12. ANÁLISIS DE LA SECCIÓN HOMOGENEIZADA.....	66
CAPITULO 4	67
1. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS.....	67
• RESULTADOS DE MODELOS EXPERIMENTALES.....	67
• RESPUESTA CARGA-DESPLAZAMIENTO	67
• RESULTADOS DE CARGA ÚLTIMA.....	71
• RESULTADOS DE FISURACIÓN	72
2. RESULTADOS DE MODELOS NUMÉRICOS	75
• RESPUESTA CARGA-DESPLAZAMIENTO	76
• TENSIÓN EN LA CHAPA PLEGADA.....	77
3. RESULTADOS DE LOS PROCESOS ANALÍTICOS.....	78
• CARGA DESPLAZAMIENTO	78
• CARGA ÚLTIMA.....	79
• MODELO DE LA NBR 8800:2008	79
• ANÁLISIS DE EQUILIBRIO ÚLTIMO DE LA SECCIÓN	79
4. ANÁLISIS DE DATOS	80
• CARGA-DESPLAZAMIENTO.....	80
• CARGA ÚLTIMA.....	82

• FISURACIÓN.....	83
• COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA UNIÓN.....	85
5. COMPARATIVAS ENTRE MODELO ELÁSTICO SEGÚN SAP2000 Y LOS MODELOS EXPERIMENTALES	85
CAPITULO 5	88
• CONCLUSIÓN	88
• RECOMENDACIONES.....	89
BIBLIOGRAFÍA:	91
ANEXO.....	95
• ANEXO 1 ENSAYO CHAPA METÁLICA	95
• ANEXO 2 CALIBRACIÓN GATO HIDRÁULICO	96
• ANEXO 3 RESULTADOS DEL PROCESAMIENTO CON EL SAP2000...	99
• ANEXO 4 RESISTENCIA ÚLTIMA DE LA SECCIÓN.....	100
• ANEXO 5 COMPARACIÓN VIGA DE HORMIGÓN Y VIGA MIXTA...	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Puente Amish Sawmill, extraída de Evaluation of a Folded Plate Girder Bridge System Final Report June 2017	2
Figura 2: Muestra de la forma final de la sección transversal, (mm)	3
Figura 3: Viga mixta, vista longitudinal	4
Figura 4: Esquema constructivo del sistema mixto planteada por Monier, Paris 1902, Biblioteca Google digital de Libros de Dominio Público.....	6
Figura 5: Vista placa Orto trópica utilizada en cubiertas de barcos, AISC (1963), Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges, American Institute of Steel Construction. Chicago, IL	7
Figura 6: Aberturas de fisuras por agrietamiento en la línea de conectores, Chávez, I. (2009).....	9
Figura 7: Sección transversal de viga metálica de chapa plegada, The Short Span Steel Bridge Alliance (SSSBA).....	12
Figura 8: Unidad modular, viga metálica de chapa doblada y mesa de compresión. The Short Span Steel Bridge Alliance (SSSBA).....	12
Figura 9: Curva carga deformación Kips/in, Azizinamini (2009).....	13
Figura 10: Sección de viga de chapa plegada estándar (FPG), Sit, Man Hou (2014)	15
Figura 11: Tres secciones investigadas en el informe presentado Pu Ke1, a, Mengmeng Guo (2015), medidas en mm.	16
Figura 12: Módulo de construcción del Cannelville Road Bridge, (The Short Span Steel Bridge Alliance).....	16
Figura 13: Comportamiento de la sección mixta, según W. Pfeil, y otros, 2000.....	19
Figura 14: Viga típica mixta, Pfeil, W. (2008).....	20
Figura 15: Sección homogeneizada para cálculos en régimen elástico, Pfeil, W. (2008)	20
Figura 16: Diagramas de tensión deformación Hormigón y Acero, Pfeil W. (2008).....	21
Figura 17: Esquema estructural simple, viga metálica, conectores y mesa de compresión. ABNT (2008).....	22
Figura 18: Distribución de tensiones, LN Plástica en el alma, LN Plástica en la mesa superior de la viga y LNP en la losa, ABNT (2008).....	23
Figura 19: Distribución de tensiones en vigas mixtas de alma llena bajo momento positivo, ABNT (2008).	23

Figura 20: Análisis de la resistencia de la sección bajo momento positivo, Pfeil (2009).	24
Figura 21: Análisis de la resistencia de la sección bajo momento positivo, Pfeil (2009).	25
Figura 22: Viga U simple terminada, de Evaluation of a Folded Plate Girder Bridge System, Brent Phares y otros.....	26
Figura 23: Fabricación Viga U simple, figura 14.2 Bridge Engineering Handbook, Wai- Fah Chen Lian Duan	26
Figura 24: Secuencias de doblado, según una presentación de Phares et al, 2017.....	27
Figura 25: Viga de chapa de acero plegada y tablero de acero reforzado con vigas doble T tipo WT, Taly y Cangarao 1979.....	28
Figura 26: Viga de chapa doblada y tablero de hormigón, Taly y Cangarao 1979.....	29
Figura 27: Propuesta de Nakamura, 2002 De Bahrt, 2013	29
Figura 28: Sección transversal en la región de momento positivo, 2002 De Bahrt, 2013	30
Figura 29: Ubicación invertida para el experimento de la sección transversal en la región de momento negativo, 2002 De Bahrt, 2013.....	30
Figura 30: Modulo propuesto y ensayado por Burgueño y Pavlich en el año 2008.....	32
Figura 31: Prensa dobladora de gran dimensión, 2002 De Bahrt, 2013	33
Figura 32: Altura óptima de 23 pulgadas, resultado del estudio de secciones y tensiones de flexión máximas y concepto idealizado de viga y losa de compresión, 2002 De Bahrt, 2013.....	34
Figura 33: Sección transversal optima utilizada en el ensayo se utilizó diafragma de cierre para evitar fallas en los apoyos y losa de compresión de 6 pulgadas, 2002 De Bahrt, 2013	34
Figura 34: Resultados obtenidos referente a la longitud óptima de aproximadamente 60 pies o 18m y curva de carga deformación hasta la rotura, 2002 De Bahrt, 2013.....	35
Figura 35: Viga mixta, sección transversal	37
Figura 36: Esquema formas de pernos verticales y en gusanillo.....	37
Figura 37: Viga mixta, vista longitudinal	37
Figura 38: Comparación de dos forma de apoyo, Foto izq. caballete de apoyo. Foto der. bloque extremo de apoyo, Con-Struct™ Prefabricated Bridge System, (2017)	38
Figura 39: Vista de la colocación de la muestra en posición para la ejecución del experimento y fisuras luego de fallar la pieza. Viga 3, Ho 30MPa.	38

Figura 40: Tensiones máximas según SAP2000, para la combinación de servicio, vista general, unidades en Nmm.....	39
Figura 41: Tensiones máximas según SAP2000, para la combinación de servicio, vista en el apoyo unidades en Nmm. El valor máximo medido en el nodo representativo de la fibra más extrema traccionada y próximo al borde de la chapa es de 9.32 N/mm2	39
Figura 42: Sistema de apoyo, se muestra viga de chapa metálica plegada y diafragma extremo embebido en viga transversal de apoyo, de Evaluation of a Folded Plate Girder Bridge System Final Report June 2017.....	40
Figura 43: Sección típica propuesta por Michaelson, 2014	41
Figura 44: Proceso en 3 pasos, 1 corte, 2 y 3 plegado de la chapa, según una presentación de Phares y otros, 2017	41
Figura 45: Muestra de la forma final	42
Figura 46: Alzado, vista longitudinal.....	42
Figura 47: Chapa doblada y perno, $K= \emptyset 10 \text{ mm}$ y $J= 60 \text{ mm}$, soldado a cada lado con una separación de 100 mm.....	43
Figura 48: Viga mixta, sección transversal	44
Figura 49: Procesos de corte, producto y dobladora, fotos propias.....	44
Figura 50: Dimensión típica de la probeta para ensayo de tracción según la norma ASTM A 370 Métodos de prueba estándar y Definiciones de Pruebas Mecánicas de productos de Acero, medidas en mm.....	45
Figura 51: Fotos de pernos soldados a la chapa	46
Figura 52: Sección transversal, ancho efectivo de la viga, $b_e= 450\text{mm}$	48
Figura 53: Viga mixta, vista longitudinal	48
Figura 54: Disposición terminada de la armadura en viga típica	50
Figura 55: Preparación y ejecución de la soldadura de los pernos de corte.....	50
Figura 56: Camión Mixer provisionando el hormigón, traslado de la mezcla al sitio de fabricación de los cuerpos de prueba	51
Figura 57: Moldeado de los cuerpos para rotura para control de la resistencia del hormigón	51
Figura 58: Presentación de los resultados de 2 cuerpos de prueba, se aprecia rotura cónica	52
Figura 59: Vista en proceso de elaboración de las formas de encofrado sobre piso	52
Figura 60: Vista de hormigonado de la mesa de compresión.....	53

Figura 61: Vista del proceso de reparación con Graut, limpieza, pintado con epoxi, terminado.....	53
Figura 62: Vista en alzado del pórtico de carga, se muestran las vigas 1 y 2 en posición	54
Figura 63: Proceso de colocación de la muestra en posición para ensayo.....	54
Figura 64: Esquema, vista elevación Pórtico de carga	55
Figura 65: Esquema y cortes, Pórtico de carga y Viga de fundación	55
Figura 66: Prensa hidráulica, Medidor de desplazamiento y Manómetro	56
Figura 67: Diagrama de tensión-deformación del hormigón	58
Figura 68: Diagrama de tensión-deformación del Graut	59
Figura 69: Diagrama de tensión-deformación de las barras de acero.....	60
Figura 70: Diagrama de tensión-deformación de las chapas de acero.....	61
Figura 71: Vista 3D según ANSYS, varillas longitudinales	61
Figura 72: Vista 3D según ANSYS, pernos.....	62
Figura 73: Vista 3D según ANSYS, varillas transversales	62
Figura 74: Propiedades del elemento modelado de barras de conexión entre chapa plegada y losa de hormigón según SAP2000	64
Figura 75: Condiciones de apoyo en la viga aplicados en los extremos de la mesa de compresión	64
Figura 76: Resultados pruebas de carga punto 1	68
Figura 77: Resultados pruebas de carga punto 2.....	68
Figura 78: Resultados pruebas de carga punto 3	68
Figura 79: Resultados promedio de carga punto 1 (VPRO).....	69
Figura 80: Resultados promedio de carga punto 2 (VPRO).....	69
Figura 81: Resultados promedio de carga punto 3 (VPRO).....	70
Figura 82: Resultado promedio desplazado de carga punto 1 (VPRO).....	70
Figura 83: Resultado promedio desplazado de carga punto 2 (VPRO).....	71
Figura 84: Resultado promedio desplazado de carga punto 3 (VPRO).....	71
Figura 85: Fisuración en el centro de la mesa de compresión viga V1	72
Figura 86: Fisuración apoyo de viga V1	73
Figura 87: Fisuración lado inferior mesa de compresión viga V2	73
Figura 88: Fisura en mesa de compresión viga V2, se observa el actuador y las fisuras marcadas con tinta	74
Figura 89: Fisuración lado inferior mesa de compresión viga V3	74

Figura 90: Vista de viga deformada, sin carga, viga V3.....	75
Figura 91: Vista inferior viga deformada, en viga V3 (volteada)	75
Figura 92: Resultados de modelo numérico punto 1	76
Figura 93: Resultados de modelo numérico punto 2	76
Figura 94: Resultados de modelo numérico punto	76
Figura 95: Tensiones normales bajo carga ultima viga VNEHE	77
Figura 96: Tensiones normales bajo carga ultima viga VNPHE.....	77
Figura 97: Curva Carga Desplazamiento para sección homogeneizada con constantes elásticas del material, P1 y P2	78
Figura 98: Curva Carga Desplazamiento para sección homogeneizada con constantes elásticas del material, P3	78
Figura 99: Deformación máxima del hormigón a compresión de -3.5‰,	79
Figura 100: Fuerzas equivalentes y brazos de palanca, VAEQ	80
Figura 101: Carga-Desplazamiento punto 1.....	81
Figura 102: Carga-Desplazamiento punto 2.....	81
Figura 103: Carga-Desplazamiento punto 3.....	81
Figura 104: Comparación de cargas últimas entre distintos métodos de análisis	82
Figura 105: Vista de la viga 3 en el momento de máxima deformación	84
Figura 106: Disposición de fisuras, final de las fisuras medida desde el borde superior de la losa aproximadas a la profundidad calculada = 50 mm	84
Figura 107: Disposición de fisuras en viga 3, vista de fisuras verticales y horizontal ...	84
Figura 108: Carga-Desplazamiento punto 1.....	85
Figura 109: Curva carga desplazamiento medidas en el punto P1, de los valores experimentales promedios y los valores resultados del SAP2000	87
Figura 110: Tensión en la chapa = 275.82 MPa, según modelo VNEHE para carga aplicada de 108 kN, tomado del modelo ANSYS	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Resumen del programa de pruebas	4
Tabla 2: Selección de criterios y factores de importancia en Burgueño y Pavlich, 2008	31
Tabla 3: Detalle de viga mixta, sección transversal	37
Tabla 4: Detalle de chapa doblada.....	43
Tabla 5: Detalle de viga mixta, sección transversal	43
Tabla 6: Extracto del informe del ensayo de la chapa	45
Tabla 7: De American Welding Society (AWS) Miami, Florida, (2011), Para pernos de diámetro 6 mm se recomienda como mínimo 5 mm de filete de soldadura.	47
Tabla 8: Resumen del programa de pruebas	49
Tabla 9: Resultados de carga última experimentales.....	72
Tabla 10: Fisuras en cuerpos experimentales.....	72
Tabla 11: Máximas tensiones alcanzadas en los modelos numéricos para la carga de 174kN.....	77
Tabla 12: Porcentaje de carga última experimental promedio alcanzada en los métodos analíticos.....	83
Tabla 13: Tabla comparativa de valores de Carga y Desplazamiento en los modelos experimentales y de elementos finitos según SAP2000.....	86

CAPITULO 1

1. CONSIDERACIONES GENERALES

Una viga compuesta es un miembro estructural formado por dos o más materiales diferentes unidos para actuar como una unidad. La acción conjunta se basa en tener una unión eficiente entre todos los materiales. Dicha unión se realiza mediante conectores de corte, que actúan de dos maneras, primero permiten la transferencia de fuerzas transversales o de corte entre el hormigón y el acero y viceversa; y segundo proporcionan la unión de los elementos.

Con el desarrollo industrializado del acero y el hormigón y la producción especializada de elementos de alta calidad especialmente con mejores resistencias estructurales y de durabilidad por una parte, y por otra, han surgido nuevos métodos estructurales y constructivos, entre ellos los sistemas mixtos, cuya combinación de perfiles de acero y hormigón se busca aprovechar las ventajas individuales de cada material, con el potencial de disminuir el efecto de peso propio de la estructura y los tiempos de ejecución.

Internacionalmente la combinación de los dos materiales es cada vez más usada, ya que el acero como sabemos presenta una elevada resistencia a la tracción y el hormigón presenta las características óptimas para resistir a la compresión. Pensando de esta manera, los dos materiales presentan características y comportamientos diferentes, pero juntos se conforman para resistir los esfuerzos estructurales y las condiciones de exposición de las estructuras.

En Paraguay, aunque contamos con industrias procesadoras de acero, Acepar y Vemar-Corp, el campo de fabricación se concentra en la producción de barras de sección circular de construcción. Por ende, la provisión de perfilierías laminadas y chapas de acero es de origen de importación. Por otra parte, el acero compuesto con estructuras de hormigón es todavía poco común, por lo antes dicho y los costos implicados.

En el campo que realmente interesa para el desarrollo del país, el de las Obras Públicas, el Ministerio de Obras ha incursionado en los últimos años con algunas propuestas de puentes de uso rural que utilizan acero como principal componente estructural. Véase por ejemplo los puentes Modulares de una vía que están constituidos de ángulos y perfiles y el puente mixto con vigas de acero sobre el río Ypané en el tramo Tacuatí – Horqueta con tres tramos de 40 m, probablemente el puente más largo construidos con vigas metálicas en nuestro país. En el ámbito de la construcción civil también el sistema mixto comienza a expandirse, aunque en poca escala. Se ve un aumento significativo debido a su

aplicación en losas y en coberturas de medios a grandes vanos para la construcción de centros comerciales.

Como es de esperar las empresas de construcción civil o los dueños de obra buscan, cada vez más, soluciones con mayor durabilidad, menor tiempo de ejecución y menor costo. Por lo tanto, hay permanentemente presión sobre la comunidad ingenieril para investigar, desarrollar y viabilizar nuevas tecnologías de construcción.

Este trabajo de maestría se basa en un concepto relativamente nuevo en el ámbito de la construcción que en los últimos 10 años se ha utilizado en los Estados Unidos para construcción de puentes cortos, ya que según la experiencia que se encuentra en la literatura es de rápida y fácil construcción, conocido como vigas mixtas de chapa plegada, Brent Phares y otros, 2017.



Figura 1: Puente Amish Sawmill, extraída de Evaluation of a Folded Plate Girder Bridge System Final Report June 2017

La viga mixta de chapa plegada inicialmente es una chapa de acero que se pliega o dobla específicamente en una forma estructural dando la forma de viga que sirve como parte de tracción de una mesa de compresión de hormigón. En el proceso constructivo, estas partes metálicas de chapa plegada, ofrecen la facilidad, por una parte; de ser livianas y transportables, sin necesidad de maquinarias pesadas de construcción para su montaje. Para la construcción final en el sitio se podrían entonces lanzar las vigas metálicas y posteriormente adosar la mesa de compresión con hormigón en el sitio o formarla mediante paneles prefabricados. En el caso de construcción de puentes las chapas por su menor peso contribuyen a la disminución del peso de la súper estructura y que por ende afecta la fundación de los estribos que se simplificarían. El montaje rápido favorecería también a poder disminuir el tiempo de construcción de los puentes, como se ha

demostrado en experiencias realizadas por Brent Phares en el estado de Iowa USA, en la construcción del puente Amish Sawmill con vigas mixtas.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y LIMITACIONES

El objetivo de este trabajo es realizar una comparación entre los análisis experimentales y los realizados por medio de programas de elementos finitos con verificaciones elaboradas en forma manual. Para cumplir el objetivo se ha preparado un programa de ensayos de 3 vigas mixtas para determinar el comportamiento del conjunto.

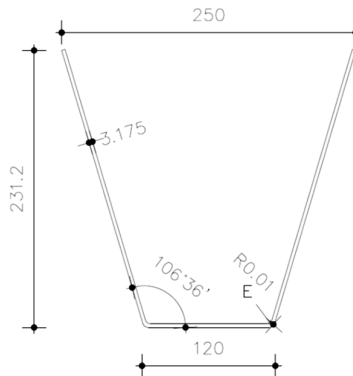


Figura 2: Muestra de la forma final de la sección transversal, (mm) [HSL1]

Como característica de la chapa doblada en V, se planteó sin pliegue de aletas superiores economizando dos procesos de plegado, así como el material que conlleva estas aletas y se ganaría en altura de viga terminada. Consecuentemente, la unión soldada de los pernos de anclaje se hará directamente al borde de la chapa utilizando barras redondas de acero de 10 mm de diámetro. Como apoyos se optó por construir bloques transversales en los extremos a fin de evitar la torsión del conjunto bajo carga. Todo el conjunto se sometió a carga aplicada en el medio del tramo bajo un pórtico de reacción, donde se midieron, la fuerza aplicada y los desplazamientos que ésta ocasionó en 3 puntos de la viga. Un punto de partida de la experiencia es el uso mínimo de materiales acompañados de procesos de elaboración del encofrado y armado de la losa con práctica local con materiales de construcción típicos.

De acuerdo a la geometría y características de los materiales empleados en la construcción del pórtico, las cargas máximas de uso se deben limitar en el orden de 220 kN.

Conservando la idea inicial se aplicarán solo cargas centradas en el vano medio de la viga, de esta manera se tendrán esfuerzos de corte y flexión en el vano central

Se ha desarrollado un programa de prueba para la viga mixta es decir como sigue: traslado de los elementos de prueba en el sitio de prueba, ubicación centrada con los ejes del pórtico, colocación del actuador en posición vertical y encastre con el gato de presión, verificación de la ubicación de los aparatos de apoyos que en este caso fueron construidos a medida, ubicación de los elementos de medición atendiendo que la carrera de los émbolos esté coincidentemente en cero, ubicación de la cámara fotográfica para toma de información general, disposición de los elementos de apuntes de los eventos.

Para la realización de los modelos numéricos se cuenta con los programas de elementos finitos: el ANSYS, para elaboración de los modelos no lineales y; el programa SAP2000V21, para la comparación de modelos en el régimen elástico.

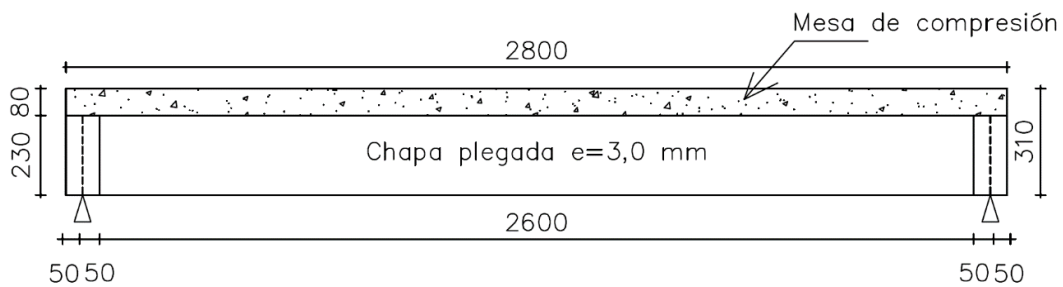


Figura 3: Viga mixta, vista longitudinal

Tabla 1: Resumen del programa de pruebas

Identificación	Muestra	Longitud total	Longitud de apoyo	Ancho de la mesa	Aplicación de la carga	Pernos rectos	Resistencia característica del Graut N/mm ²	Resistencia característica del Hormigón N/mm ²
A1	1	2800 mm	2700 mm	450 mm	centrada	si	14	21
A2	2	2800 mm	2700 mm	450 mm	centrada	si	14	21
A3	3	2800 mm	2700 mm	450 mm	Centrada	si	14	21

3. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

Evaluar el comportamiento de vigas mixtas de hormigón y chapa plegada con pernos de unión.

4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Comparar los resultados de carga-desplazamiento obtenidos en modelos numéricos con cuerpos experimentales.

Evaluar la carga última de la viga mixta obtenida por métodos analíticos y por pruebas de carga en cuerpos experimentales

Identificar el tipo de comportamiento estructural entre la unión de la chapa plegada con la mesa de hormigón armado

Discutir resultados entre modelos numéricos no lineales utilizando ANSYS con un modelo numérico lineal mediante SAP2000, para el uso práctico.

5. ALCANCE

En este trabajo de investigación se realizan ensayos de cargas a tres cuerpos de pruebas experimentales de vigas mixtas de chapa plegada y mesa colaborante de compresión de hormigón armado con una disposición de pernos iguales para todas las vigas y sin pliego superior de la chapa. Se medirán los desplazamientos obtenidos en tres puntos que luego serán contrastados con modelos numéricos, realizados en software de elementos finitos, con dos variantes de uniones entre la chapa y el hormigón. También son contrastadas las cargas últimas encontradas en los ensayos experimentales con las cargas determinadas por la norma Brasileira de cálculo que atañan a este tipo de conjunto estructural y por medio de equilibrio de esfuerzos en la sección por medio del análisis de deformaciones.

CAPITULO 2

1. ANTECEDENTES GENERALES

Una de las primeras ideas publicadas para el uso de sistemas mixtos, acero y hormigón fue hecha por Monier; con una técnica llamada con su nombre, Sistema Monier calculado por métodos empíricos y donde se proponía una losa de 8 cm a 10 cm de espesor armada en cruz con hierros de sección circular apoyada sobre vigas doble T metálicas separadas de 1,0 a 2,0 m. La propuesta de Monier fue publicada en Paris en el año 1902 por el ingeniero francés Paul Christophe en su libro, *Le Béton Arme Et Ses Applications* por la Editora CH Béranger, Biblioteca Google digital de Libros de Dominio Público.



Fig. 132.

Figura 4: Esquema constructivo del sistema mixto planteada por Monier, Paris 1902, Biblioteca Google digital de Libros de Dominio Público

En la fase llamada Inicial en el uso de vigas compuestas desde los años 1850 hasta 1900 se establecieron las bases para la interpretación del funcionamiento del sistema hormigón acero. En el principio se colocaron las vigas de acero embebidas en el concreto bajo la premisa que la fuerza de tracción se transmitía a través de unión solidaria de ambos materiales, cerca del año 1900 al utilizar las vigas por debajo de la estructura de piso, estaba claro que, en el comportamiento estructural del conjunto, la fuerza de compresión se encontraba en el concreto y se transmitía a través de los conectores a las vigas de acero que trabajan a tracción.

Esto fue seguido por la fase de Constitución (1900-1925), caracterizada por la separación constructiva de los elementos de la sección transversal. Se establece el uso de vigas metálicas trabajando a tracción y conjuntamente con las mesas de hormigón responsables

de llevar la compresión, a pesar de la falta de conectores de corte se confirman las suposiciones respecto al comportamiento estructural y se establecen las bases para el uso de unión de los materiales mediante elementos que absorbían el cortante.

Durante la fase de Establecimiento (1925–1950), caracterizada porque la losa de hormigón armado no eran hormigonadas monolíticamente con las vigas, sin embargo, requerían elementos restrictivos de posicionamiento; de esta manera aparece el surgimiento de los primeros conectores de corte, inicialmente constructivos, de manera práctica este hecho hizo que el constructor se fuera dando cuenta gradualmente de que los elementos de la sección transversal debían conectarse estructuralmente, inicialmente como restricción posicional, luego como conector de corte mecánico. La conexión cuantificada de los elementos de la sección transversal a través de pruebas estandarizadas y la formación de teorías en la fase Clásica (1950-1975) permitió la realización de múltiples formas de construcción compuesta de acero y hormigón para edificios industriales y puentes, Pelke, Eberhard y otros extractado de On the Evolution of Steel-Concrete Composite Construction, 5th International Congress on Construction History.

Respecto a la forma V o U de las vigas de chapas plegadas se conocen de las cubiertas de barcos construidos en Europa a principio de los años 1930. Esta técnica se utilizó ampliamente en construcción de puentes en la post guerra de principio de 1945 frente a la escasez de materiales y necesidad de estructuras livianas.

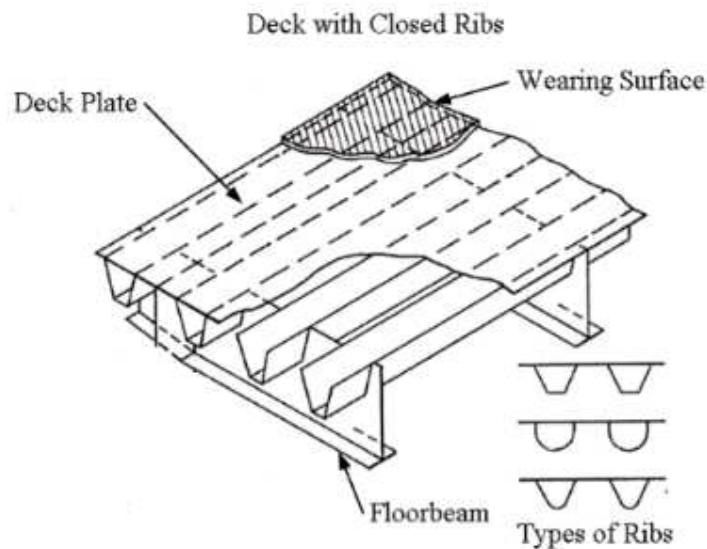


Figura 5: Vista placa Orto trópica utilizada en cubiertas de barcos, AISC (1963), Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges, American Institute of Steel Construction. Chicago, IL

De esta corta revisión bibliográfica inicial se concluye que el uso de las vigas mixtas con el uso de perfiles laminados de hierro sin conectores a la losa de compresión, comenzaron a finales de 1800. Posteriormente por motivos de simplicidad constructiva se vio la necesidad de una conexión metálica entre el perfil y la losa. En el uso práctico los constructores de esa época han generado formulaciones empíricas para el uso y dimensionamiento de los conectores, comenzando así la base para los estudios del uso de distintos conectores hacia el año 1930. En los albores de la Segunda Guerra mundial específicamente en Alemania ante la escasez de materiales y la carrera armamentista, se intensificó el uso de estructuras livianas introduciéndose la chapa plegada como material estructural portante de pisos metálicos tanto, en la industria como en la fabricación de navíos. En la post guerra la tecnología se utilizó ampliamente en toda Europa en la reconstrucción de puentes como parte de tableros de puentes metálicos.

Slutter y Driscoll (1965) en un Proyecto patrocinado por la American Institute of Steel Construction (AISC): *Flexural strength of steel and concrete composite beams*. Se investigó cuidadosamente la resistencia última de las vigas compuestas a flexión, lo que se usó como base para la determinación de los requisitos mínimos para conectores de corte de miembros compuestos. Algunos resultados fueron: El momento último teórico puede ser alcanzado si la suma de las resistencias últimas de todos los conectores fuera suficiente para satisfacer el equilibrio de fuerzas internas. Los conectores de corte pueden estar espaciados de manera uniforme independientemente de la forma del diagrama de corte. Un requisito definitivo de cantidad de conector de corte mínimo para desarrollar el momento final se basa en la resistencia máxima de los conectores de corte.

Como se cita en Chávez, I. (2009), Davies en el año 1969, realizó una serie de ensayos en vigas mixtas simplemente apoyadas y cargadas céntricamente, donde analizó el efecto de variación de la distribución y ubicación de los conectores y la variación de la cuantía de armadura transversal en la losa de hormigón. En cuanto al primer análisis, se concluye que la separación entre conectores prácticamente no influyó en el comportamiento de la viga mixta. En cuanto a la cuantía de armadura transversal, se representó una influencia considerable en la resistencia última de la viga mixta, teniendo en cuenta que cuantías inadecuadas permitirían la ocurrencia de fisuras por agrietamiento en la línea de conectores.

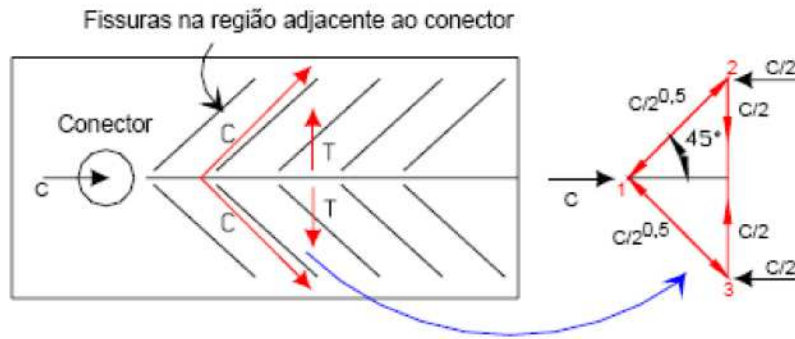


Figura 6: Aberturas de fisuras por agrietamiento en la línea de conectores, Chávez, I. (2009)

Donahey y Darwin (1988) presentan el efecto del grado de conexión de corte en la capacidad última de momento de vigas compuestas simplemente apoyadas que se refleja en los códigos de diseño, como en la Norma Australiana, AS 2327.1 1996, la Norma Europea, EURO-CODE 4 1994 y Norma Norte Americana, LRFD AISC 1999. Los códigos suponen que el alma de la viga de acero resiste todo el corte vertical, y no considera en la resistencia al corte vertical de las vigas compuestas el efecto de la conexión de corte. Esta suposición permite que se dé un modelo simple, pero da como resultado diseños conservadores. En una construcción compuesta real, la resistencia al corte vertical de una viga compuesta es, de hecho, una función del grado de conexión al corte.

Experimentos más recientes como los desarrollados por Hernández, Bonilla y Rodríguez, (2014), compararon un espécimen, caracterizado por Davies (1969) como D4 hecho de acero estructural I 127 mm x 76 mm x 13 kg/m y mesa de compresión de 381 mm de ancho 63.5 mm de espesor, la conexión entre ambos elementos se realizó por medio de pernos ubicados en el medio de la viga con separación de 38.1 mm, la longitud total de viga era de 1220 mm. Durante el experimento se cubrió la superficie de contacto entre viga metálica y hormigón con una delgada capa de película lubricante. Se probó que utilizando modelos numéricos previamente calibrados existe una consistencia proporcionada entre los resultados numéricos y experimentales. Fue posible probar que la fricción entre la pieza de metal y el hormigón no contribuye en forma significativa a la capacidad última de la viga. En todos los casos analizados, hay una separación en la interfaz de acero estructural de la losa, que se incrementa siempre que el área de

separación entre los conectores también se incrementa, provocando así una pérdida de contacto físico entre las dos superficies. Por lo tanto, la contribución a la capacidad de resistencia que podría proporcionar la resistencia a la fricción es menor. Como resultado de este estudio, se puede concluir que el modelado numérico y las pruebas experimentales son herramientas de investigación complementarias. Los métodos numéricos ofrecen soluciones aproximadas para problemas de ingeniería. Estos métodos no están exentos de errores; por lo tanto, los posibles errores pueden controlarse mediante una calibración basada en resultados experimentales

Tentativas de modelar numéricamente sistemas estructurales mixtos son continuos temas de interés en el ámbito académico ya que de hecho actualmente existe también a la par mayor elección y mejor tecnología computacional. Un ejemplo encontrado en la literatura contextual se tiene en Liang et al. (2004) se presenta un modelo tridimensional utilizando el programa ABAQUS versión 6.3 (2002) con el fin de confirmar la resistencia última de vigas mixtas. Para este caso se usó un modelo tridimensional desarrollando comportamientos geométricos y materiales no lineales, la losa de hormigón y la viga metálica fueron modeladas por medio de elementos superficiales tipo Shell en tanto que los conectores por elementos tipo viga. La rigidez y resistencia se obtuvo modificando las secciones transversales de cada elemento. Como resultado del presente estudio se tiene que el modelo diseñado es aplicable a vigas simplemente apoyadas de cualquier sección transversal. El modelo en sí tomó en cuenta el efecto de la acción compuesta de ambas acciones, el momento último y la capacidad al corte de la viga y provee un procedimiento económico y consistente procedimiento de diseño de vigas simplemente apoyadas.

Existe un sinnúmero de experiencias de vigas mixtas con elementos metálicos de fundición o laminación, sin embargo, también encontramos en la literatura estudios realizados con elementos de chapas dobladas como ser en Oliveira (2001), se presentan los resultados de una investigación envolviendo un análisis teórico experimental sobre el comportamiento y la resistencia de vigas mixtas de acero y hormigón empleando piezas de acero conformados en frío y losas de hormigón armado.

Tristao (2002) se presentan simulaciones numéricas en elementos finitos de ensayos tipo push-out con conectores tipo pernos con cabeza y perfiles U deformados en frío, incluyendo un estudio paramétrico con vista a la determinación de la resistencia última

de la relación fuerza desplazamiento de los conectores. Como conclusión el autor explica que los resultados empíricos propuestos representan satisfactoriamente el comportamiento experimental de los conectores.

David (2003) presenta un otro estudio experimental a fin de evaluar el comportamiento estructural de vigas reticuladas con perfiles de chapa plegada en frío, el mismo investigador presenta en el año 2007 un estudio teórico experimental al respecto del comportamiento estructural de vigas mixtas constituidas por perfiles de acero conformados en frío y losas prefabricadas. De este análisis se verificó la influencia de la armadura de conexión su ubicación en relación a la viga reticulada y el deslizamiento en la interface y sus implicaciones principalmente en la determinación del desplazamiento vertical. Los resultados indicaron un momento flector resistente ligeramente inferior al momento de plastificación total de la sección mixta y que la posición y cuantía de la armadura transversal interfiere en el dimensionamiento de la losa, pero tiene poca influencia en la resistencia de la viga mixta. En general el modelo de plastificación total puede ser considerado también satisfactorio para las vigas de perfiles conformados en frío de sección compacta definida como no sujeta a pandeo local. Los valores finales de resistencia pudieron haber sufrido pequeñas variaciones, pero el comportamiento final de la falla caracterizada por la compresión de la losa de hormigón fue verificado en todos los especímenes del experimento.

The Short Span Steel Bridge Alliance (SSSBA), (2009). La viga de chapa de acero doblada es una nueva tecnología para aplicaciones de puentes de tramo corto. En 2009, la Administración Federal de Carreteras (FHWA) desafió a la industria siderúrgica de América del Norte a "desarrollar un puente de acero corto y rentable con componentes modulares que se pueda colocar en puentes cortos y satisfacer las necesidades de los propietarios de puentes actuales, incluida la construcción de puentes acelerados (A B C)." Short Span Steel Bridge Alliance (SSSBA) organizó el Grupo de Trabajo Modular Steel Bridge, que consta de 30 organizaciones que representan a SSSBA, el Instituto de Desarrollo del Mercado de Acero, la National Steel Bridge Alliance, la Asociación Nacional de Ingenieros del Condado, los fabricantes de puentes de acero, los miembros de la facultad de la universidad, los fabricantes de acero, organizaciones gubernamentales y propietarios de puentes, para desarrollar ideas para enfrentar este desafío. Dirigido por Karl Barth, PhD., PE, Profesor de Ingeniería Civil y Ambiental en la Universidad de West

Virginia, el grupo decidió en octubre de 2011 que una tecnología de viga de chapa de acero doblada proporcionaba la mejor oportunidad para cumplir los objetivos de FHWA para valor económico, innovación y prácticas ABC. Se desarrolló un diseño de muestra preliminar para tramos de hasta 60 pies (18 m). La idea pasó del concepto a la realidad en solo tres años, un logro significativo

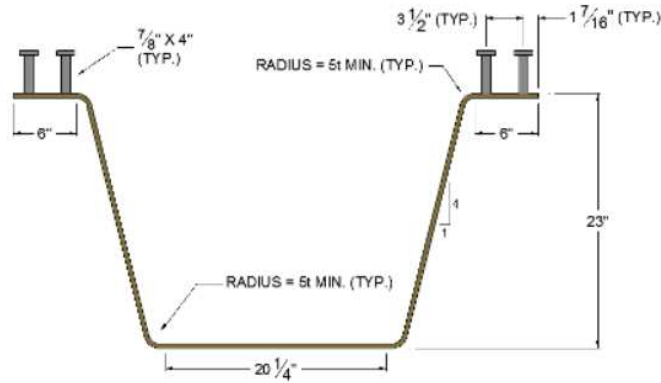


Figura 7: Sección transversal de viga metálica de chapa plegada, The Short Span Steel Bridge Alliance (SSSBA)

El sistema de viga de chapa de acero doblada consiste en cajas trapezoidales modulares galvanizadas de poco canto fabricadas con placa de acero estructural doblada en frío. Es posible prefabricar la mesa de hormigón sobre la viga y la unidad modular puede enviarse en camión al sitio del puente.

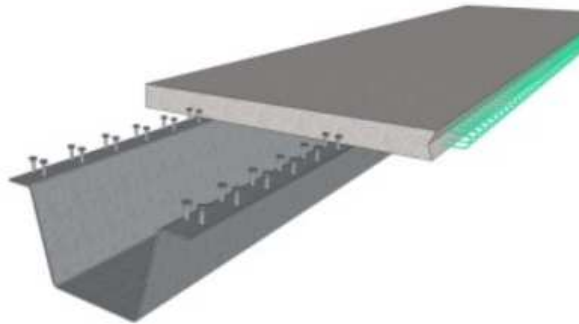


Figura 8: Unidad modular, viga metálica de chapa doblada y mesa de compresión. The Short Span Steel Bridge Alliance (SSSBA)

El sistema utiliza prácticas de construcción acelerada de puentes (ABC), ya que: Se puede instalar en uno o dos días, es modular, lo que permite el uso de una mesa de compresión prefabricada, es rentable, (para el mercado de Estados Unidos) como 1/3 menos costo que

una estructura de viga de hormigón estándar y es simple de fabricar, requiere muy poca soldadura, sin embargo requiere de dobladoras a presión de gran capacidad, no disponibles en el mercado de Paraguay. El sistema de viga de acero de chapa doblada con prensa plegadora es de código abierto (open source).

Azizinamini (2009), realizó experimentos en cuerpos de prueba de vigas de chapa doblada con abertura inferior, y proporciona una descripción general del trabajo que lleva al desarrollo y la aplicación del Sistema de puente de viga de placa plegada (Folded Plate Girder Bridge System FPGBS) que proporciona una alternativa económica para puentes de tramo corto. El sistema consta de una serie de formas estándar que se construyen doblando placas planas en secciones trapezoidales invertidas utilizando una dobladora de chapa de gran capacidad. Quizá la principal ventaja de la viga de placa plegada es la abertura desde el lado inferior que permite la inspección de la viga. Otra ventaja proporciona galvanizar el FPGBS porque es una muy buena opción para la protección contra la corrosión. El galvanizado en caliente proporciona más de 75 años de vida útil a un costo muy económico.

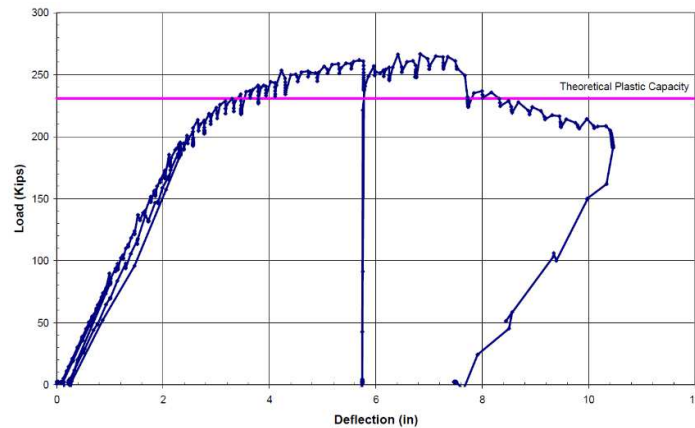


Figura 9: Curva carga deformación, Carga (Kips)/Deformación (in), Azizinamini (2009)

En la figura anterior una curva que muestra la capacidad de momento plástico teórico que exhibe significativa ductilidad de desplazamiento antes de la falla.

Chavez, I. A. (2009). Realizó experimentos con vigas de chapa doblada utilizando diferentes tipos de conectores de corte. Concluyendo que los conectores de corte presentan ductilidad y resistencia compatibles con la requerida por las vigas mixtas analizadas. Desde el punto de vista constructivo, los conectores al ser soldados al perfil

facilita la industrialización del sistema. Los valores encontrados analíticamente por medio del modelaje numérico se mostraron bastante coherentes como para describir el comportamiento estructural de la viga. Los desplazamientos máximos medidos experimentalmente fueron compatibles con los determinados tanto analíticamente como numéricamente dentro del régimen elástico de verificación. La posición de la línea neutra de plastificación obtenida experimentalmente, analíticamente ~~e y~~ numéricamente dan valores ~~fue~~ muy próximos ~~aos~~. Se observó una significativa contribución del hormigón a la resistencia de la fuerza cortante una vez que las deformaciones experimentales se mostraron en torno a 45 % inferiores a los valores teóricos admitiendo solamente la resistencia al cortante de la viga de acero. El modelo de resistencia a flexión, para una condición de interacción completa comprueba que la hipótesis de plastificación total de la sección describe con precisión el comportamiento estructural del sistema propuesto. Para la simulación se utilizó un modelo con el programa ANSYS, reológico cast-iron con elementos Shell 181 asociados al criterio de plastificación de ~~von~~ Von Mises. Inicialmente se intentó utilizar conectores tipo resorte y también se intentó mantener la adherencia entre los elementos usando modelos sólidos. A pesar que estas estrategias fueron utilizadas en varios experimentos a lo largo de años anteriores se concluye que existe una extrema dificultad de convergencia de los resultados. Como estrategia final se simuló una interacción completa sin deslizamiento entre la interface lo que resultó en fuerzas máximas próximas a las experimentales.

Barth K. y otros (2013). Para verificar los resultados obtenidos a partir de las soluciones analíticas y los resultados desarrollados con programas de computadora. Pocos estudios experimentales se llevaron a cabo en puentes de viga mixta de chapa plegada. La mayoría de las pruebas experimentales se han realizado en los laboratorios de puentes a pequeña escala. Por ejemplo, Karl E. Barth y Gregory K. Michaelson Major Units Laboratory at West Virginia University, junio 2013, Brent Phares, Bridge Engineering Center Iowa State University, en junio 2017. Los resultados experimentales reportados concordaron con el comportamiento elástico. Resultados predichos por un modelado 3D de elementos finitos obtenido de estas pruebas mostraron buena tendencia de concordancia entre el experimental y el teórico, los resultados apoyan la confiabilidad de usar el modelado de elementos finitos. El hallazgo experimental se utilizó para verificar y fundamentar el modelo de elementos finitos.

Sit, Man Hou (2014). Esta tesis de maestría estudia el primer puente integral utilizando Sistema FPG de viga de chapa plegada (folded plate girder, FPG). El puente con vigas metálicas de chapa plegada fue construido en Uxbridge, Massachusetts. Para realizar el cometido el puente está equipado con una variedad de indicadores para capturar el comportamiento del puente, en un periodo total de dos años y un mes [11/2011 ~ 12/2013]. De esta forma fue realizado el monitoreo y recopilación de datos a largo plazo.

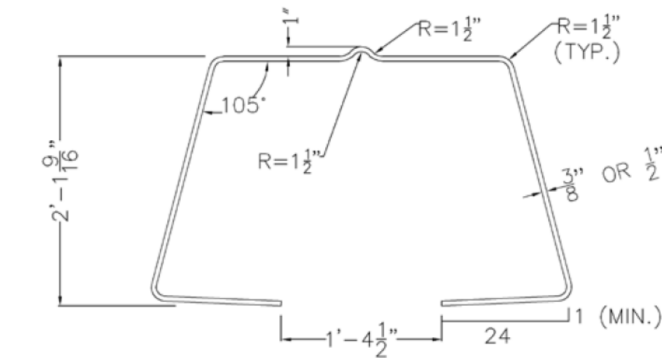


Figura 10: Sección de viga de chapa plegada estándar (FPG), Sit, Man Hou (2014)

La prueba de carga en vivo y el efecto de temperatura a largo plazo en el puente son estudiados usando modelado de elementos finitos y comparados con datos de campo reales. Fueron investigadas la tensión en el tramo medio y cuarto de tramo en vigas y pilares. Se usaron datos de campo reales para validar los resultados analíticos. Se utilizaron cálculos y modelos de elementos finitos (FEM) desarrollados en SAP2000 y ANSYS para analizar el comportamiento del puente durante la construcción, pruebas de carga viva y etapas de carga térmica estacional. A partir de los resultados, primero se descubrió que el puente mostraba un buen rendimiento. Se descubrió que el efecto de cizallamiento estaba ocurriendo en la unión de la brida inferior a la banda de la viga de acero cuando se somete a una carga concentrada. Fue encontrado un Gradiente térmico significativo en la tensión de la viga y las rotaciones de pilares.

Pu Ke1, a, Mengmeng Guo (2015), y otros investigaron las secciones en forma de U, V y trapecoidales que se usan ampliamente como secciones de costillas cerradas en cubiertas de puente de navíos orto trópicas de acero. Este estudio se basó en el cálculo de tres modelos de sección a gran escala basados en el método de elementos finitos, y analizó la magnitud y distribución del estrés en los extremos de los miembros constituyentes comparativamente.

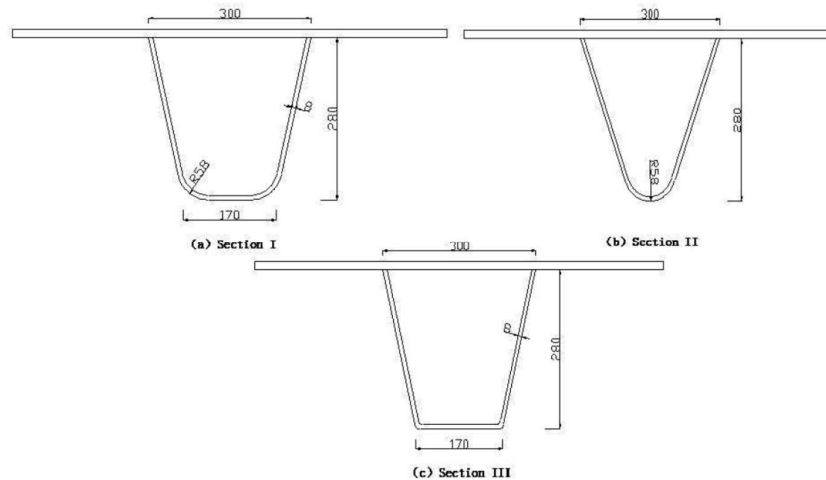


Figura 11: Tres secciones investigadas en el informe presentado Pu Ke1, a, Mengmeng Guo (2015), medidas en mm.

La investigación indica que la sección en forma de V contribuye a distribución más ventajosa de la tensión para cubiertas de puentes de acero orto trópico. Sin embargo; siguiendo las gráficas, se ve una elevada concentración de tensiones en las formas con cantos agudos.

Underwood, Nicole (2019), Presenta un estudio de análisis y conclusiones de las pruebas experimentales y el modelado analítico del Cannelville Road Bridge.

Antecedentes, después de un extenso trabajo experimental de pruebas y diseño en la Universidad de West Virginia, miembros de la SSSBA (The Short Span Steel Bridge Alliance) en colaboración con Intelligent Engineering de Ottawa, Canadá y El ingeniero del condado Douglas Davis, P.E., diseñaron y construyeron el puente de Cannelville Road en Condado de Muskingum, Ohio.



Figura 12: Módulo de construcción del Cannelville Road Bridge, (The Short Span Steel Bridge Alliance)

La estructura se compone de dos módulos, de viga de chapa plegada y unidades de tablero de puente (SPS®) sandwich plate steel) chapa de acero tipo sándwich que se construyeron en el taller y se erigieron utilizando métodos de construcción acelerado (ABC) (accelerated bridge construction). Los resultados de estos análisis se utilizaron para generar tensión de flexión de la chapa inferior, factores de distribución de carga viva (LLDF) en vigas interiores y exteriores. Estos valores, experimentales y analíticos, se compararon con LLDF equivalentes y calificaciones de vigas de carga viva calculadas tomando como referencia a las Especificaciones AASHTO LRFD. Como resultado de estas pruebas se evidencia que las especificaciones actuales de AASHTO LRFD para el análisis de vigas de chapa plegada de canto reducido son conservadoras, con un rendimiento de campo que excede el rendimiento calculado.

2. MARCO TEÓRICO

En este apartado del estudio trataremos las consideraciones teóricas del comportamiento de las vigas mixtas de hormigón y acero.

- **COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA VIGA MIXTA**

Las vigas mixtas de hormigón y acero son estructuras combinadas, formadas por vigas de acero unidas mecánicamente por medio de conectores de corte o por otros medios a estructuras laminares de hormigón. La acción conjunta de esos elementos confiere mayor capacidad a la viga para resistir momentos flectores, lo que posibilita reducir la sección de acero y como consecuencia la economía de material.

El comportamiento de una viga mixta se puede analizar según Walter Pfeil y otros, 2000 como muestra los tres casos de vigas bi-apoyadas mixtas, en la figura 14, en este ejemplo se ve que la viga metálica es un perfil I, para una carga distribuida como se ve en (a).

Caso 1 en la figura (b): En ausencia de conectores de corte, sección de elementos trabajando independientemente, solamente se tiene la interacción entre los elementos por el rozamiento existente entre el hormigón y el acero, los dos elementos trabajan solos a la flexión, cada uno con su rigidez (sección no mixta) si la fricción entre la losa de hormigón y la viga metálica en la superficie del contacto es despreciada, ocurre el

deslizamiento entre ambos elementos. La cara superior de la viga se acorta por presentar fuerzas de compresión a medida que la cara inferior de la losa de hormigón se alarga por fuerzas de tracción. Así ocurrirá un desplazamiento relativo entre las dos superficies y la formación de ejes neutros independientes, con uno de los ejes situado en el centro de gravedad del perfil metálico y el otro en el centro de gravedad de la losa de hormigón.

Cuando la conexión de acero - hormigón se realiza por medio de conectores mecánicos, se pueden presentar una gama de condiciones que sin embargo pueden ser representadas por dos situaciones.

Caso 2 en la figura (c): Existe una interacción total entre los elementos, la flexión ocurre alrededor del eje que pasa por el centroide de la sección mixta. Los conectores o pernos de corte influyen el comportamiento estructural de la viga mixta, pues garantizan el trabajo conjunto de la sección. Cuando ocurre un desplazamiento relativo mínimo, pero significativo, entre el acero y el concreto se asume que las secciones planas permanecen planas y el diagrama de deformaciones como se dijo presenta sólo una línea neutra. En estas condiciones suponemos que existe interacción completa acero y hormigón.

Caso 3 en la figura (d): Se presenta en una gama de esfuerzos intermedios a la del Caso 2 y se puede decir que la interacción es parcial, el deslizamiento es menor, que en el caso de una sección no mixta a menos que se produzca la rotura total de las uniones de los pernos y los elementos se separen y deslicen independientemente.

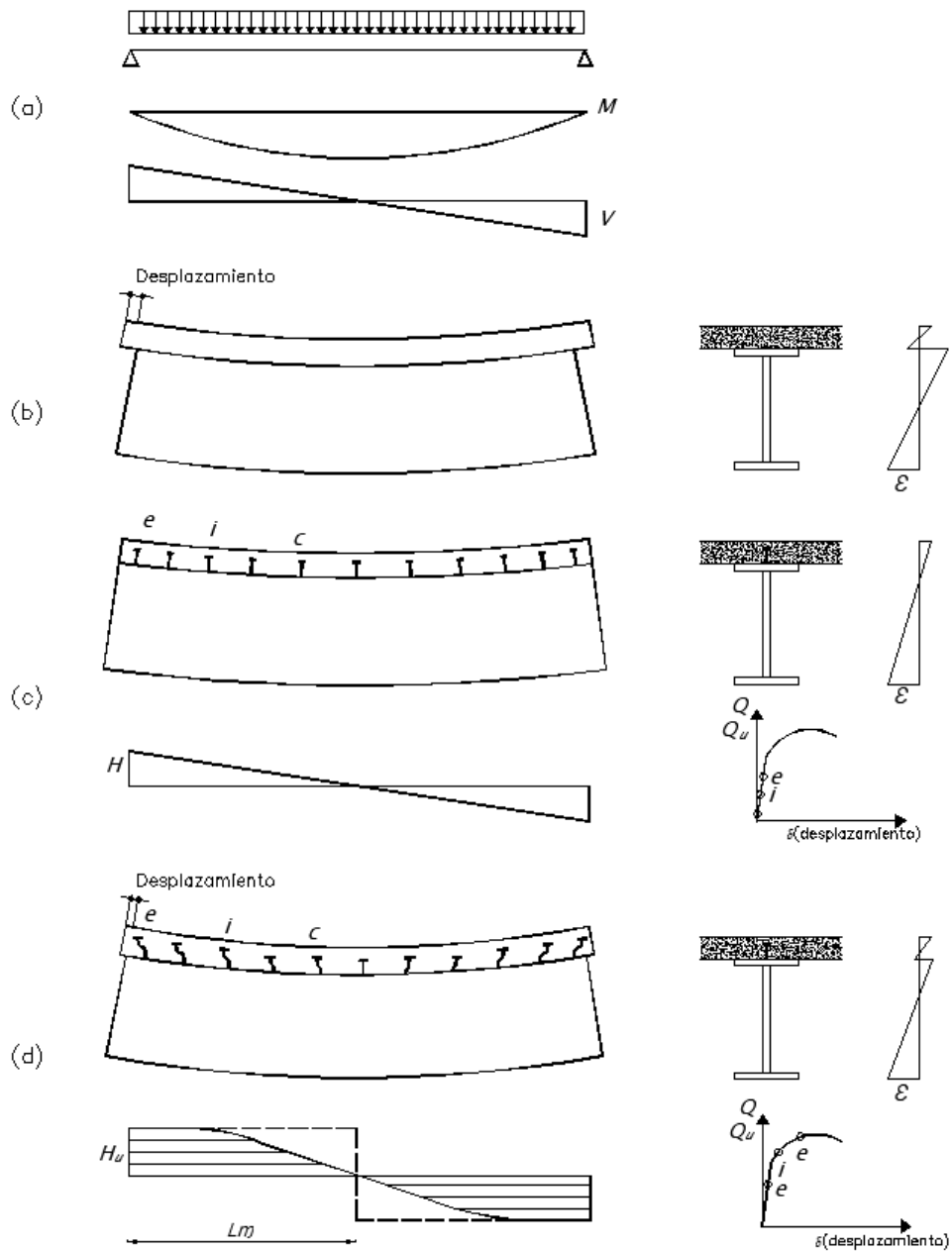


Figura 13: Comportamiento de la sección mixta, según W. Pfeil, y otros, 2000

La viga mixta, de acero y hormigón, se fundamenta en el uso en un elemento de acero comúnmente simétrico en relación a su plano de flexión, usualmente como perfil I, viga cajón tubular rectangular, con una losa de hormigón encima de la cara superior, para la mesa de compresión se utilizan hormigón prefabricado o hormigonada en el sitio. Como se vio anteriormente, para que ambos elementos absorban los esfuerzos de flexión como una sola pieza debe haber unión mecánica por medio de conectores de corte. En cualquier

situación la flexión ocurrirá en el plano que pasa por los centros geométricos de la mesa y la viga de acero, Silva (2013).

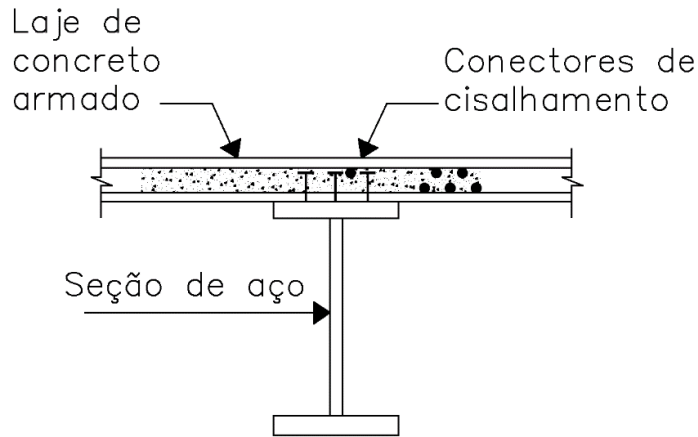


Figura 14: Viga típica mixta, Pfeil, W. (2008)

- SECCIÓN HOMOGENEIZADA PARA CALCULO EN RÉGIMEN ELÁSTICO

Las propiedades geométricas de la sección mixta deben ser obtenidas por medio de la homogenización teórica de la sección formada por ambos componentes.

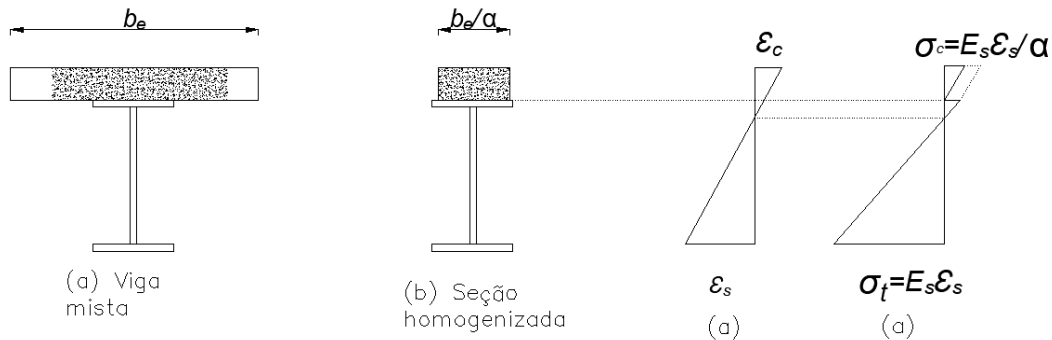


Figura 15: Sección homogeneizada para cálculos en régimen elástico, Pfeil, W. (2008)

Tomando el ancho efectivo b_e de la mesa de hormigón dividiendo por la razón modular $\alpha_E = \frac{E}{E_c}$, siendo E y E_c los módulos de Elasticidad del hormigón y del acero respectivamente. Ignorando la participación del hormigón en la zona traccionada, la posición de la línea neutra debe ser obtenida admitiendo una distribución de tensiones lineal en la sección homogeneizada, ABNT (2008).

Según Silva (2013), en cualquier situación, la flexión ocurrirá en un plano que pasa por los centros geométricos de las mesas o entre las cabezas de compresión del acero.

La interacción entre el hormigón y el acero es llamada Completa en la región de momento positivo, si los conectores situados en esa región tienen la resistencia de cálculo igual o superior a la resistencia de cálculo del componente de acero a tracción o de la losa de hormigón a compresión, tomando el valor menor. Para Pfeil W. (2008), Viga mixta con unión Total al cortante es aquella cuyo momento flector resistente no es determinada por corte de los conectores, esto significa que el aumento del número de conectores no produce un aumento en la resistencia a flexión (Euro código 4). La interacción llamada Parcial se da en el caso que la resistencia de cálculo de los conectores sea inferior a las dos resistencias antes mencionadas, ABNT (2008). En general, para un proyecto la opción por una conexión parcial o total es una cuestión económica, Pfeil W. (2008). En los dos casos para secciones de acero compactas, la determinación de la resistencia a flexión se realiza en el régimen plástico.

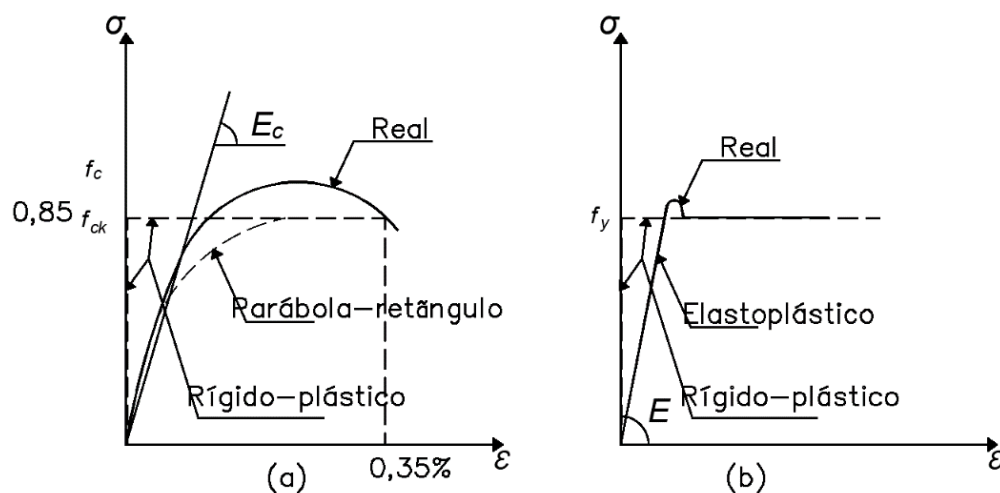


Figura 16: Diagramas de tensión deformación Hormigón y Acero, Pfeil W. (2008)

En la figura anterior se muestran los diagramas tensión deformación simplificados usualmente utilizados en vigas Mixtas. La relación tensión deformación del hormigón en compresión es no lineal. En las aplicaciones en hormigón armado se utiliza el diagrama idealizado parábola – rectángulo, sin embargo en estructuras mixtas se adopta el diagrama rígido plástico para cálculos en el estado limite último. Ambos diagramas son afectados por el factor de reducción 0,85 sobre la resistencia característica f_{ck} el cual lleva en cuenta la reducción de resistencia del hormigón bajo cargas de larga duración en relación a aquella obtenida en ensayos rápidos, este hecho se tomó en cuenta en la evaluación de los cuerpos de prueba ensayados. Tampoco se considera el hormigón a tracción. La viga con

unión total llega a su momento resistente con la plastificación de la sección caracterizada por la distribución de tensiones en línea llena de la figura 18 (c) siguiente. El cálculo del momento resistente está realizado con tensiones uniformes representada por la línea de puntos de la misma figura. El diagrama de tensiones plásticas asume la hipótesis de ausencia de deslizamiento para el cálculo del momento resistente de la sección más solicitada. La viga dimensionada, para tener unión parcial al cortante, posee menos conectores que la misma viga con unión total y su momento resistente es función de la resistencia al cizallamiento horizontal de los conectores, Pfeil W. (2008).

- FUERZA DE CORTE LONGITUDINAL

La fuerza de corte longitudinal V_h resulta de la distribución de tensiones de cortante que actúan en la sección transversal de una viga. La presencia de rozamiento, adherencia o algún tipo de conector físico impide que los elementos deslicen entre sí y funcione como viga mixta. Es decir para que el sistema mixto funcione como un único elemento y se desarrolle la acción conjunta es necesario que las dos partes estén estructuralmente conectados.

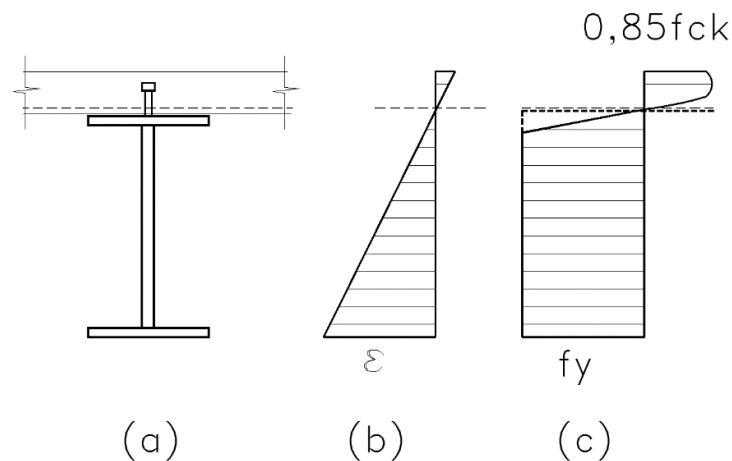


Figura 17: Esquema estructural simple, viga metálica, conectores y mesa de compresión. ABNT (2008)

Si no existiese esa acción conjunta entre la losa y la viga metálica la acción conjunta no se desarrolla, es decir, al recibir una acción externa, los elementos se deformarían separadamente y la resistencia del conjunto sería simplemente la suma de las resistencias individuales de cada elemento, como vimos en el Caso 1 en la figura considerada con anterioridad. Si hubiese simplemente una ligación mínima de rozamiento el conjunto se

convierte en una viga mixta. Utilizando la NBR 8800 se habla de una interacción completa si $\sum Q_{Rd}$ es superior al menor de los dos valores $(Afy)/\gamma_{a1}$ o $0.85f_{ck}bt_c/\gamma_c$. Donde: $\sum Q_{Rd}$ es la suma de las resistencias de cálculo individuales de los conectores de corte situados entre la sección de momento positivo máximo y la sección adyacente de momento nulo y, $(Afy)/\gamma_{a1}$ es la fuerza de tracción resistente de cálculo del perfil metálico y $0.85f_{ck}bt_c/\gamma_c$ es la fuerza de compresión resistente de cálculo de la losa. Consideramos para todos los casos el análisis de estado de carga de servicio $\gamma = 1$. Consecuentemente el grado de integración de ambos materiales en una viga mixta está dado por $\eta = \frac{\sum Q_{Rd}}{F_{hRd}}$, donde F_{hRd} es el menor valor entre $(Afy)/\gamma_{a1}$ y $0.85f_{ck}bt_c/\gamma_c$

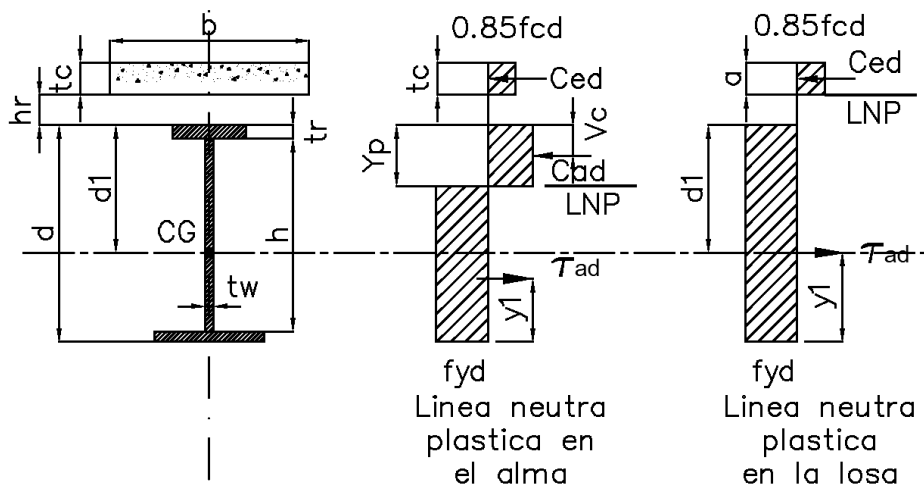


Figura 18: Distribución de tensiones, LN Plástica en el alma, LN Plástica en la mesa superior de la viga y LNP en la losa, ABNT (2008)

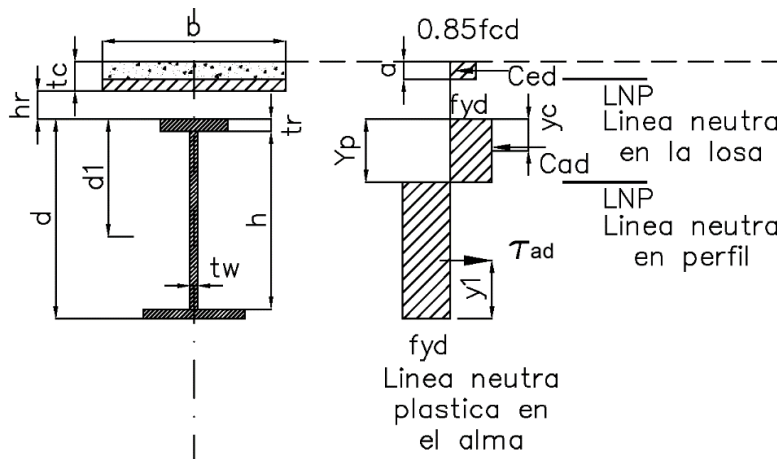


Figura 19: Distribución de tensiones en vigas mixtas de alma llena bajo momento positivo, ABNT (2008).

- ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DE LA SECCIÓN A FLEXIÓN

Dependiendo del tipo de ligación de la mesa de hormigón armado con la chapa plegada pueden presentarse diferentes métodos de análisis para determinar la capacidad resistente de la sección ante esfuerzos flectores. En esta investigación se trata principalmente una sección con unión total y con secciones compactas de acero, motivo por el cual, a continuación se presentan los dos métodos utilizados en la normativa guía para determinar la resistencia de la sección. En general, se debe determinar si la resultante de compresiones cuando se coloca el eje neutro dentro de la sección de hormigón supera a la resultante de la sección de acero plastificada, donde se define a la resultante de la compresión como;

$$R_{cd} = \frac{0.85 * f_{ck}}{\gamma_c} * b_e * h_c$$

Y a la resultante de tracción como;

$$R_{td} = \frac{A * f_y}{\gamma_{a1}}$$

Por lo que si

$R_{cd} > R_{td}$ La línea neutra plástica se encuentra en la losa

$R_{cd} < R_{td}$ La línea neutra plástica se encuentra en la chapa plegada

A continuación se muestran el cálculo de la resistencia de la sección para ambas posiciones de línea neutra

Línea neutra dentro de la mesa de hormigón: En este punto la mesa se encuentra comprimida y la chapa plegada solo presenta esfuerzos de tracción

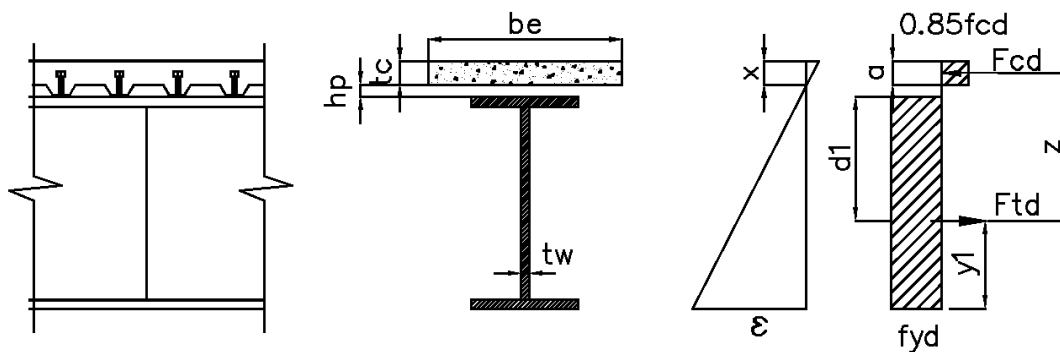


Figura 20: Análisis de la resistencia de la sección bajo momento positivo, Pfeil (2009).

Se determina la profundidad del bloque comprimido de hormigón con la expresión:

$$x = \frac{\frac{A * f_y}{\gamma_{a1}}}{\frac{0.85 * f_{ck} * b_e}{\gamma_c}} < hc$$

Por lo cual se puede determinar el momento resistente de la sección con la siguiente expresión:

$$M_{dres} = \frac{A * f_y}{\gamma_{a1}} \left(y_s + h_p + h_c - \frac{x}{2} \right)$$

Línea neutra dentro de la chapa plegada: En este caso una porción de la chapa se encuentra comprimida

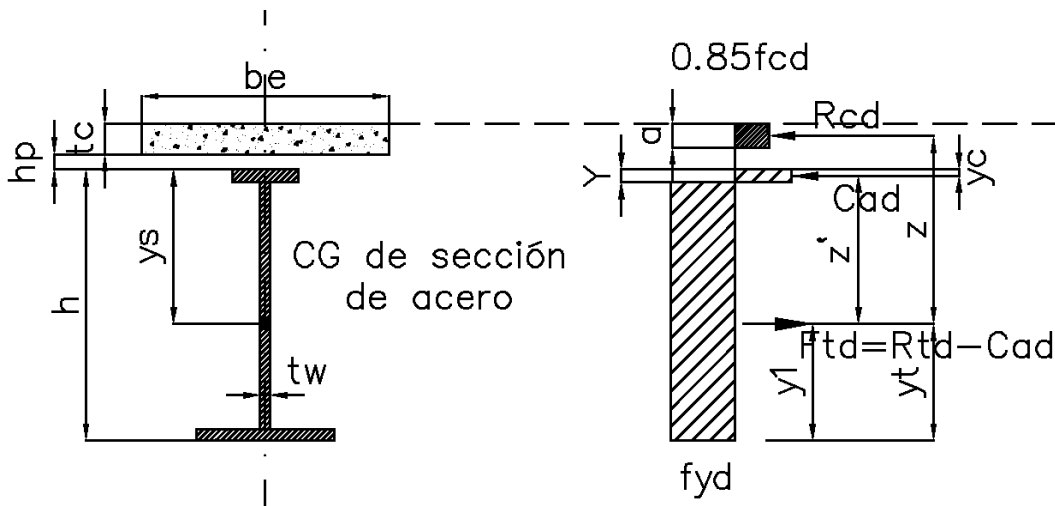


Figura 21: Análisis de la resistencia de la sección bajo momento positivo, Pfeil (2009).
Donde las fuerzas de compresión se representan con la expresión

$$F_{cd} = R_{cd} + C_{ad}$$

$$C_{ad} = \frac{1}{2} (R_{td} - R_{cd})$$

Las fuerzas de tracción son representadas por

$$F_{td} = R_{td} - C_{ad}$$

Y el momento resistente de la sección es igual a:

$$M_{dres} = R_{cd} * z + C_{ad} * z' = R_{cd} \left(h - y_t + h_p + \frac{h_c}{2} \right) + C_{ad} (h - y_t - y_c)$$

- PROCESO DE FABRICACIÓN DE VIGAS DE CHAPA PLEGADA

La fabricación de un módulo de viga de chapa plegada compuesta comienza con una única placa de acero del grosor deseado. Luego, la chapa se conforma en frío con una prensa plegadora, y cada curva se produce a lo largo del eje longitudinal de la chapa. Una prensa generalmente consiste en una viga superior grande móvil con una herramienta en forma de U que se asemeja a una guillotina unida a la parte inferior y una mesa de acero larga. La herramienta y la viga se empujan con dos pistones hidráulicos en una abertura en la mesa larga de acero, en las figuras siguientes se muestran dos estados de diferentes vigas.



Figura 22: Viga U simple terminada, de Evaluation of a Folded Plate Girder Bridge System, Brent Phares y otros

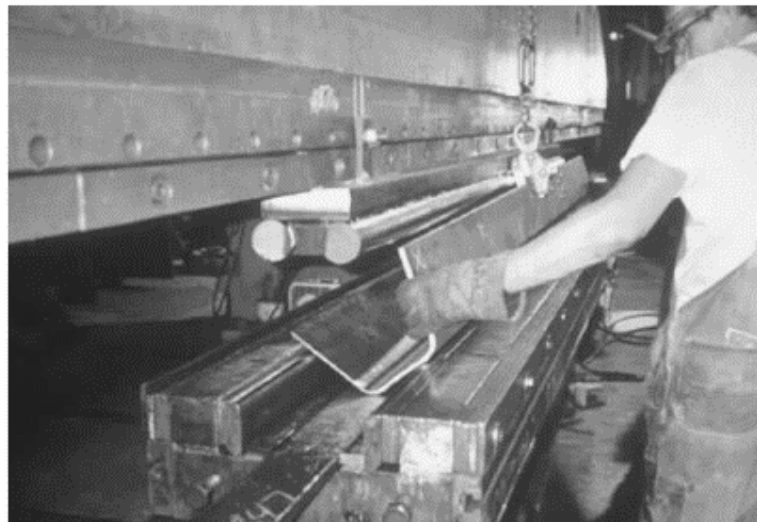


Figura 23: Fabricación Viga U simple, figura 14.2 Bridge Engineering Handbook, Wai-Fah Chen Lian Duan

Una posible secuencia de doblado de la viga de placa plegada se muestra en los esquemas siguientes

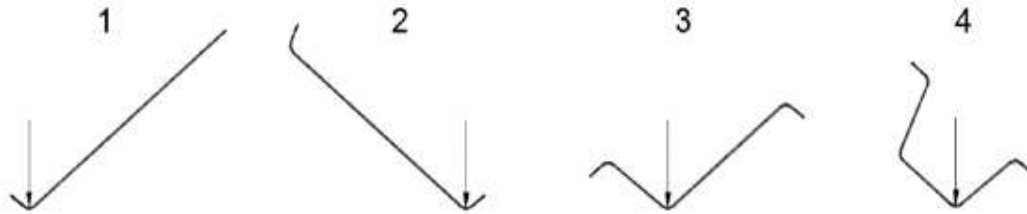


Figura 24: Secuencias de doblado, según una presentación de Phares et al, 2017

Una vez finalizado el proceso de doblado, se sueldan los diafragmas en los extremos que servirán para rigidizar en los apoyos y también se agregan los pernos de corte que se sueldan a lo largo de ambos lados de las bridas superiores de la viga.

3. ESTADO DEL ARTE:

La intención de este apartado es la de compilar brevemente el resultado de las investigaciones que hasta una fecha reciente se ha llevado adelante sobre el tema.

- SISTEMA DE PUENTE DE VIGA DE ACERO PLEGADO (Taly y Gangarao 1979)

En el trabajo de Taly y Gangarao (1979), se propusieron dos sistemas de puentes para la carga del HS20-44 para vanos de hasta 65 pies (=20m). Estos fueron solo diseños propuestos, y no se presentó información sobre uno que se haya fabricado o probado. El primer diseño estaba compuesto por una superestructura completamente de acero (ver Figura siguiente).

Desde el diseño inicial propuesto de un puente de tramo corto que utiliza secciones en U de chapa doblada y plataforma de hormigón de Taly y Gangarao en 1979 hasta los esfuerzos más recientes de Barth y otros en el año 2013, (en Development and Experimental Testing of press-brake-formed Steel Tub Girders for short span Bridge

applications), se puede ver que las vigas formadas chapas de acero plegadas pueden convertirse en una alternativa viable para los puentes de cortos.

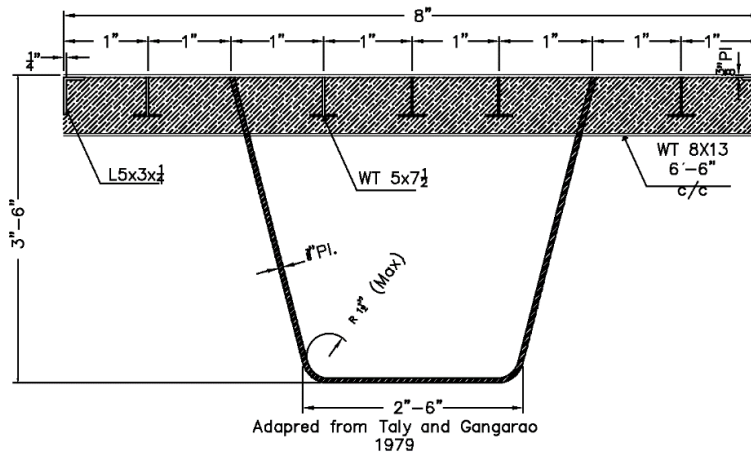
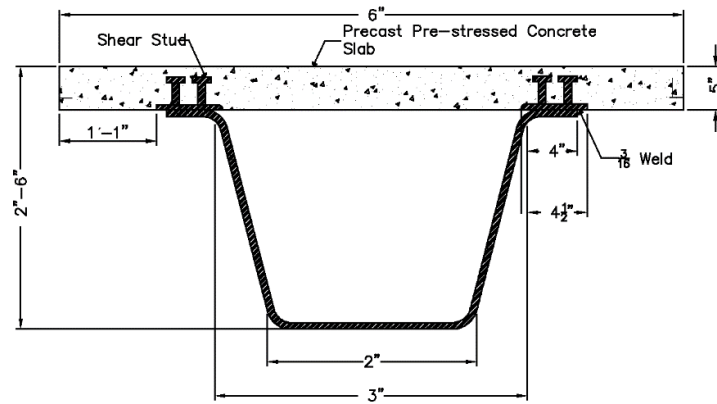


Figura 25: Viga de chapa de acero plegada y tablero de acero reforzado con vigas doble T tipo WT, Taly y Cangarao 1979

La viga consistía en una sección en forma de U trapezoidal formada por una placa de acero A36 de 3/8 pulgadas de grosor y una plataforma completamente de acero. La plataforma estaba compuesta por una placa de acero de 3/8 pulgadas y un sistema de secciones WT soldadas paralelas y perpendiculares a la viga para aumentar la rigidez de la placa de la plataforma. Los refuerzos de los apoyos se proporcionaron en la sección U de tal manera que los extremos de la viga estaban completamente encerrados por un diafragma de placa de acero.

El sistema alternativo que se propuso fue usar paneles prefabricados y pretensados en lugar de una plataforma completamente de acero según la siguiente Figura.



Taly and Ganganao 1979

Figura 26: Viga de chapa doblada y tablero de hormigón, Taly y Cangarao 1979

- VIGAS PLEGADAS PRETENSADAS SEGÚN NAKAMURA, (2002)

Comportamiento de las vigas compuestas con la sección en U de acero conformado en frío (Nakamura 2002)

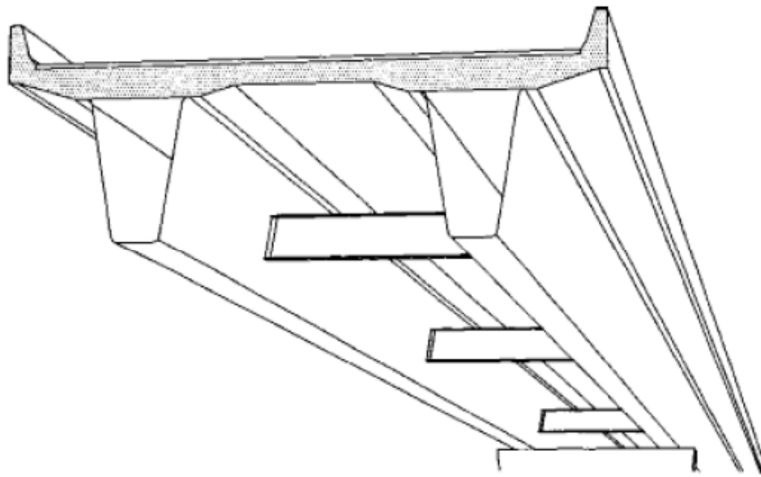


Figura 27: Propuesta de Nakamura, 2002 De Bahrt, 2013

El trabajo de Nakamura (2002) propuso un sistema de puente compuesto por vigas en U continuas con losa de hormigón reforzado. La pestaña superior de la sección en U está unida a la losa de hormigón con pernos, lo que permitió que la sección en U y la plataforma actuaran en forma compuesta. Los pernos también restringieron del pandeo local a la brida superior, que estaba en compresión.

En los apoyos intermedios, donde hay un momento de flexión negativo, toda la sección en U se llenó con hormigón para evitar que la brida inferior pandeara debido a las fuerzas de compresión. La plataforma de la viga también fue postensada en estas ubicaciones para resistir las fuerzas de tracción y evitar la fisuración.

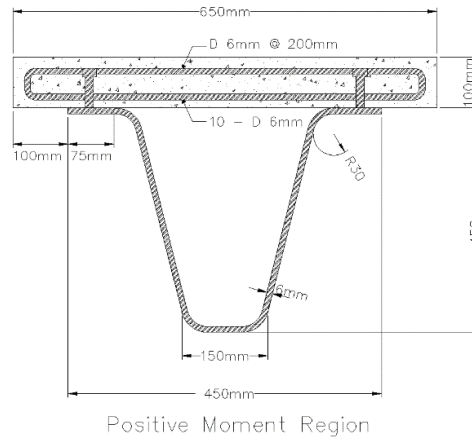


Figura 28: Sección transversal en la región de momento positivo, 2002 De Bahrt, 2013

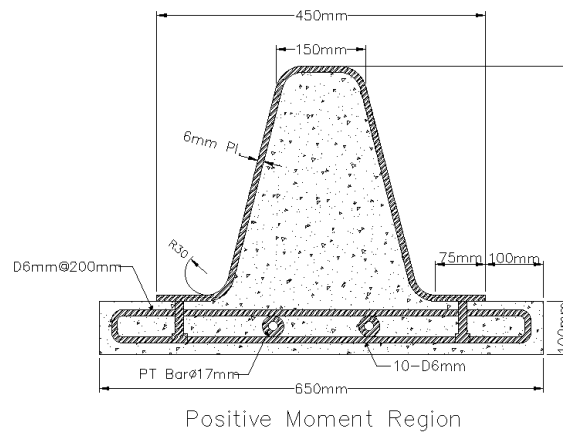


Figura 29: Ubicación invertida para el experimento de la sección transversal en la región de momento negativo, 2002 De Bahrt, 2013

Las pruebas encontraron que la viga y la mesa de compresión actuaron de manera compuesta. En las regiones de momento positivo, la viga se comportó como una viga postensada en las regiones de momento negativo, y la región rellena de hormigón restringió el pandeo local de la brida inferior de la viga.

- SISTEMA DE BURGEÑO Y PAVLICH, (2008)

Sistema de viga tipo cajón de acero plegado prefabricado (Burgueño y Pavlich 2008)

El estudio de Burgueño y Pavlich, 2008 se centró en la idea de un sistema de puente de vigas tipo cajón prefabricados postensados juntos transversalmente. Una parte del estudio fue identificar la mejor configuración para un sistema de viga tipo cajón de acero compuesto.

El diseño de la conexión de la plataforma de hormigón, viga tipo cajón de acero plegado y la plataforma longitudinal fueron los tres componentes principales examinados. Se clasificaron varios diseños para cada componente según los criterios seleccionados. Estos criterios habían designado factores de importancia determinados por el equipo de investigación (ver Tabla 5)

Tabla 2: Selección de criterios y factores de importancia en Burgueño y Pavlich, 2008

Table 2.1. Selection criteria and importance factors

Criteria ID	Description	Importance Factor
A	Cost efficiency	3
B	Structural efficiency	2
C	Design versatility	1
D	Design/analysis ease	1
E	Construction ease	3
F	Fatigue performance	3
G	Durability and corrosion resistance	3
H	Replacement/removal ease	2

Importance Factor: 1 – Low, 2 – Medium, 3 – High
Adapted from Burgueño and Pavlich 2008

El estudio descubrió que la mejor configuración para un sistema viga tipo cajón de acero plegado tendría una sección de vigas de acero con una mesa de compresión de hormigón que se colara en el lugar o en una planta de prefabricación. El mejor tipo de conexión de la transversal para la configuración fue una llave de corte hembra a hembra con lechada posterior de algún tipo de Graut.

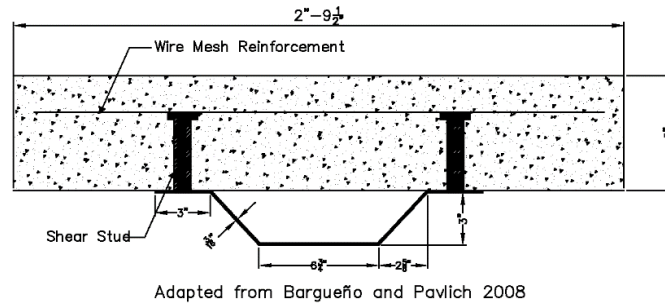


Figura 30: Módulo propuesto y ensayado por Burgueño y Pavlich en el año 2008

Este estudio demostró que las unidades de viga tipo cajón de acero plegado compuestas prefabricadas conectadas con juntas longitudinales de cubierta son una opción viable para la construcción acelerada de puentes.

- INVESTIGACIÓN DE BARTH Y OTROS, (2017)

Evaluación de sistemas de vigas de chapas plegadas, Desarrollo y pruebas experimentales de vigas tubulares formadas de chapa plegada para aplicación en puentes cortos, Karl E. Barth, PhD. y Gregory K. Michaelson, PhD., Reporte final año 2017.

Este proyecto quizás el de mayor alcance de los últimos años desarrollado en el Centro para Puentes de la Universidad estatal de Iowa, se realizó en cinco etapas.

1- Se desarrollaron metodologías racionales, basadas en estimaciones de la capacidad nominal del sistema, para diseñar y fabricar la viga de acero,

2- Se realizaron pruebas a escala real de flexión destructiva en muestras representativas,

3- Se desarrollaron herramientas analíticas que utilizan elementos finitos no lineales para comparar con datos experimentales,

4- Por medio de esas herramientas se realizaron exhaustivos estudios de comportamiento del sistema propuesto para evaluar la aplicabilidad de las especificaciones actuales de AASHTO LRFD en la predicción de la capacidad de las vigas de chapas plegadas de acero y

5- Finalmente se realizaron estudios de factibilidad económica comparando con los sistemas tradicionales de construcción de puentes. Los resultados de este proyecto demuestran que el sistema propuesto es una opción económicamente competitiva para el mercado de los llamados puentes cortos, en el orden de 12 m hasta 18 m.



Figura 31: Prensa dobladora de gran dimensión, 2002 De Bahrt, 2013

- DISEÑO PRELIMINAR DE UNA VIGA TUBULAR DE CHAPA PLEGADA PROPUESTO POR BAHRT Y OTROS.

El diseño preliminar de la muestra se completó en dos etapas. Primero se calculó las propiedades de la sección de cualquier configuración de la viga de chapa plegada. A continuación, se diseñó por medio de iteraciones y estimaciones conservadoras de la capacidad de la viga (En teoría, este es el momento de flexión máximo que la sección puede resistir esencialmente, limitando la Capacidad de las vigas compuestas para el momento al punto de tensión de fluencia) para evaluar su validez para el mercado de puentes de corto alcance

Para este esfuerzo, Dos espesores de placa diferentes fueron evaluados ($7/16" = 11.1$ mm y $1/2" = 12.70$ mm) y tres diferentes anchos de placa estándar eran evaluados ($72" = 1828.8$ mm, $84" = 2133.6$ mm y $96" = 2438.4$ mm). Para cada variación, se realizó un estudio de diseño investigando diferentes variaciones de las dimensiones de la viga para obtener una configuración óptima. Para este estudio, la pendiente de los laterales se mantuvo constante de 1:4, y los radios de curvatura interior de las vigas se mantuvieron a un valor constante de cinco veces el espesor de la placa respectiva. La figura siguiente presenta los resultados de estos estudios en una Sección óptima, en este caso el mayor rendimiento se obtuvo placa de $84" \times 7/16"$. El ancho de la brida superior de 6 pulgadas y una profundidad total de 23 pulgadas.

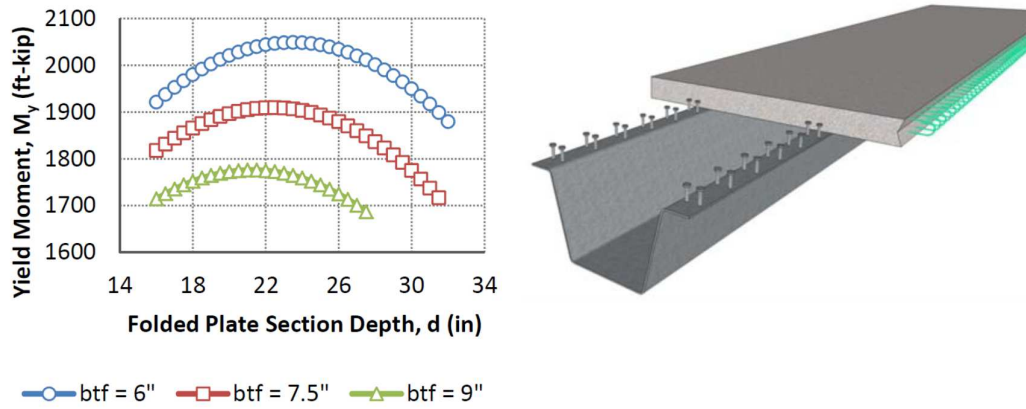


Figura 32: Altura óptima de 23 pulgadas, resultado del estudio de secciones y tensiones de flexión máximas y concepto idealizado de viga y losa de compresión, 2002 De Bahrt, 2013

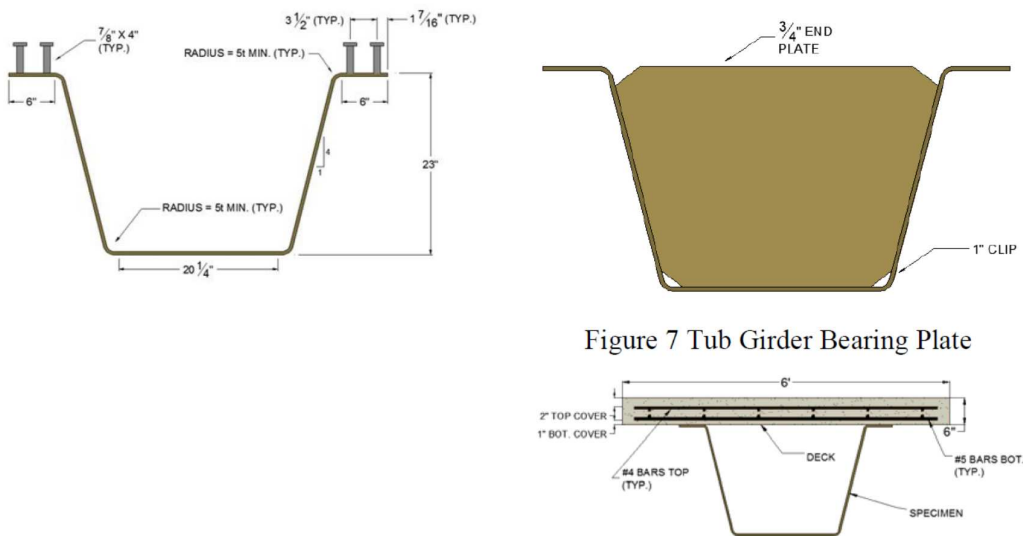


Figura 33: Sección transversal óptima utilizada en el ensayo se utilizó diafragma de cierre para evitar fallas en los apoyos y losa de compresión de 6 pulgadas, 2002 De Bahrt, 2013

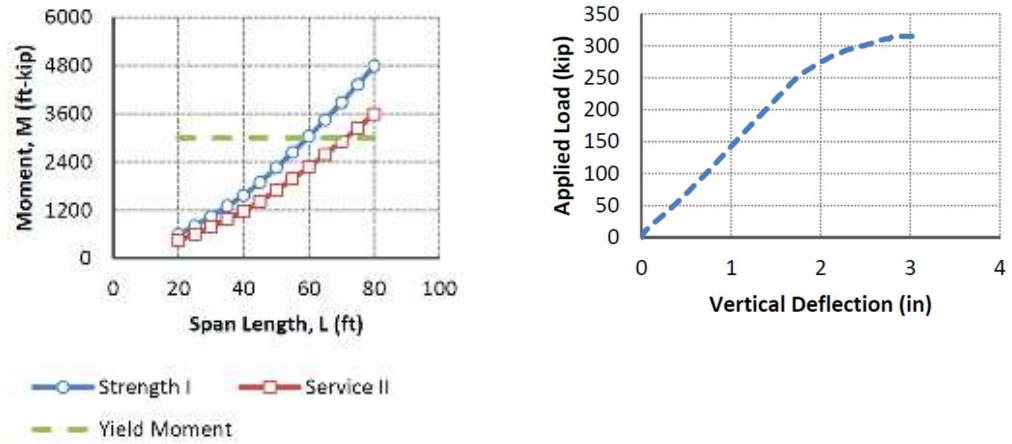


Figura 34: Resultados obtenidos referente a la longitud óptima de aproximadamente 60 pies o 18 m y curva de carga deformación hasta la rotura, 2002 De Bahrt, 2013

CAPITULO 3

1. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se hace referencia a los distintos procedimientos de análisis de modelos experimentales y numéricos utilizados. Se busca representar, por medio experimental y numérico, la respuesta de la viga a cargas aplicadas. La variable que se quiere medir es el desplazamiento, medido en 3 puntos; un punto inferior en el centro de la viga; un punto inferior de la mesa de compresión en el centro de la viga y; un tercer punto tomado en el cuarto del cuerpo de la viga.

Se construyen 3 vigas de geometrías idénticas constituidas por una parte traccionada compuesta de chapa metálica plegada y mesa de compresión de hormigón.

Los desplazamientos se miden mediante 3 medidores de desplazamiento lineales digitales y las cargas mediante un manómetro digital para determinar las cargas aplicadas a través del gato hidráulico.

El procedimiento a seguir es aplicar cargas en las vigas mediante un actuador ubicado en el centro de la misma y medir los desplazamientos mediante difractómetros ubicados según se explicó anteriormente.

Se realizan curvas comparativas de cargas deformación mediante el programa Excel. El estudio se centra en medir las deformaciones de las muestras experimentales contrastadas con 3 muestras numéricas, la primera, simulando la mesa de hormigón totalmente empotrada a la chapa, la segunda, simulando la mesa de hormigón y la chapa unida mediante pernos de anclaje y por último la tercera, simulando la mesa de hormigón y la chapa unida mediante pernos de anclaje a lo que se le agregó rozamiento.

2. EXPERIENCIA PREVIA

Previo al presente trabajo, en diciembre del año 2018, se realizaron experimentos en 6 cuerpos de prueba de vigas mixtas de chapa plegada. Las vigas tenían una sección transversal semejante a las actuales cuyas dimensiones eran, la mesa de compresión de 750 mm de ancho, 100 mm de espesor y 3000 mm de longitud. La parte metálica es la misma que se utiliza en el presente experimento, es decir 3 mm de espesor, 600 mm de desarrollo, 2700 mm de longitud, 300 mm más corta que la mesa de compresión.

Tabla 3: Detalle de viga mixta, sección transversal

	Altura losa	Ancho mesa	Armadura Trans.	Armadura Long.	Altura chapa	Chapa lado mayor	Chapa lado menor	Espesor	Radio de doblado	Tensión de fluencia
Unidad	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	MPa
Nombre	J	K	L	M	A	C	G	E	I	
	100	750	10	10	231.2	250	112	3.17	6	275

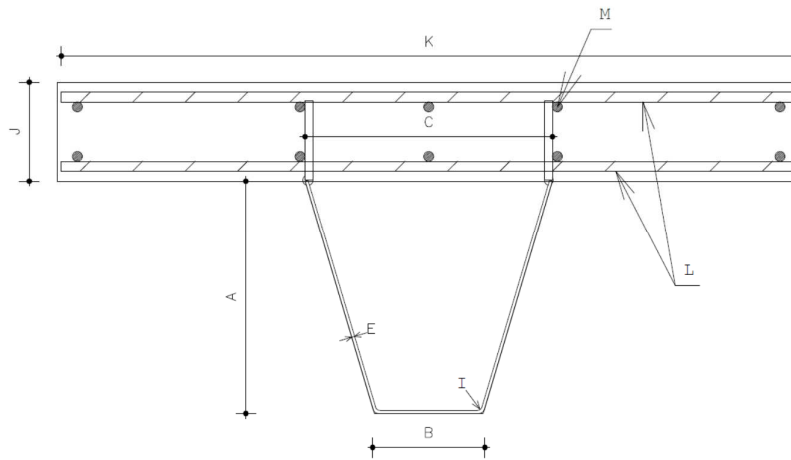


Figura 35: Viga mixta, sección transversal

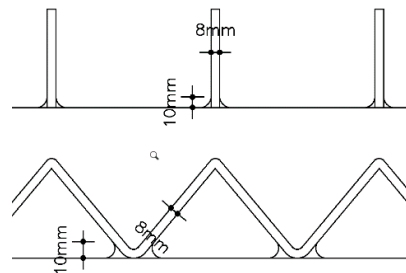


Figura 36: Esquema formas de pernos verticales y en gusanillo

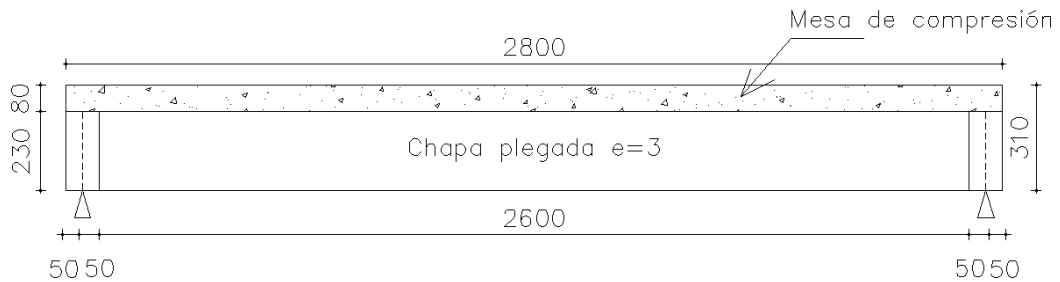


Figura 37: Viga mixta, vista longitudinal

Se utilizaron dos clases de pernos, primero pernos rectos y segundo utilizando pernos en diagonal tipo gusanillos en zigzag. Con la variación de anclajes se utilizaron 2 tipos de hormigones de diferentes resistencias características, de 25 MPa y 30 MPa. Se acompañan los ensayos con un modelo de elementos finitos realizado con el programa de uso comercial SAP2000, a fin de comparar los resultados de las deformaciones y análisis de las tensiones en el apoyo. Durante el experimento se apoyaron las vigas sobre la mesa de compresión con el uso de un caballete metálico construido especialmente para la prueba.



Figura 38: Comparación de dos forma de apoyo, Foto izq. caballete de apoyo. Foto der. bloque extremo de apoyo, Con-Struct™ Prefabricated Bridge System, (2017)

Los 6 especímenes de prueba se llevaron a ensayos hasta lograr el máximo desplazamiento medible, posteriormente se retiraron los instrumentos de medición y se cargó la mesa hasta la rotura de la losa.



Figura 39: Vista de la colocación de la muestra en posición para la ejecución del experimento y fisuras luego de fallar la pieza. Viga 3, Ho 30 MPa.

- RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA SAP2000
Verificación de las tensiones máximas tomadas en un nudo ubicado en el apoyo y en el vano central para la carga de rotura, para la Viga 3, Ho 30 MPa .

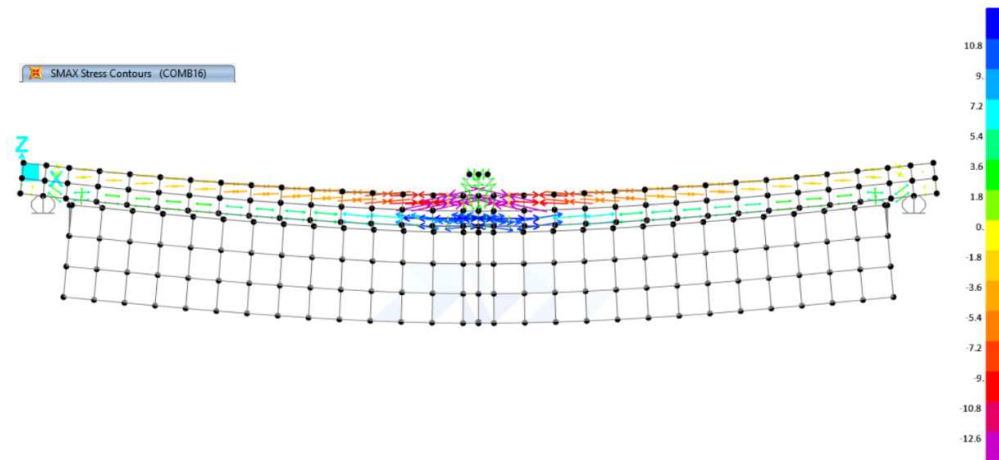


Figura 40: Tensiones máximas según SAP2000, para la combinación de servicio, vista general, unidades en Nmm

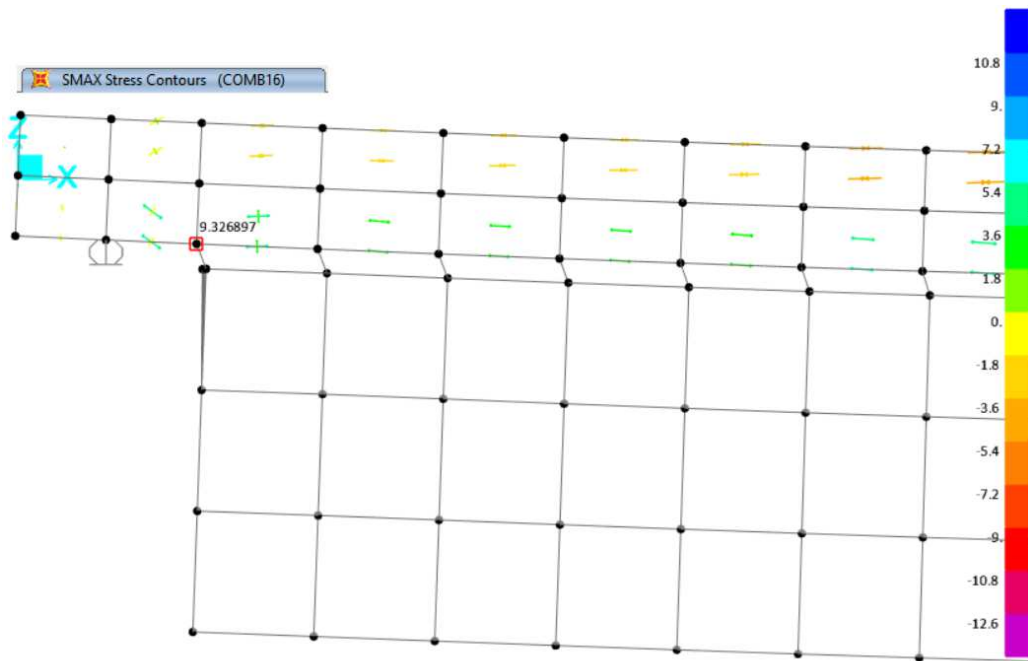


Figura 41: Tensiones máximas según SAP2000, para la combinación de servicio, vista en el apoyo unidades en Nmm. El valor máximo medido en el nudo representativo de la fibra más extrema traccionada y próximo al borde de la chapa es de 9.32 N/mm²

Se ha encontrado que el apoyo de las vigas mixtas directamente sobre la mesa de compresión lleva a fallas prematuras y no deseadas de las muestras. Se ha encontrado también que; utilizando pernos con forma de gusanillo, el comportamiento es mejor que utilizando los pernos que son rectos, aun con el uso de hormigón de mayor resistencia. El haber apoyado la viga sobre el caballete cambió la naturaleza del experimento que inicialmente debió aportar como experiencia en el uso de vigas mixtas de acero y hormigón. Sin embargo, sirvió para tomar la decisión de construir un bloque de apoyo en el extremo como lo muestra la Figura 40 utilizado en Evaluation of a Folded Plate Girder Bridge System Final Report June 2017 y en Con-Struct™ Prefabricated Bridge System

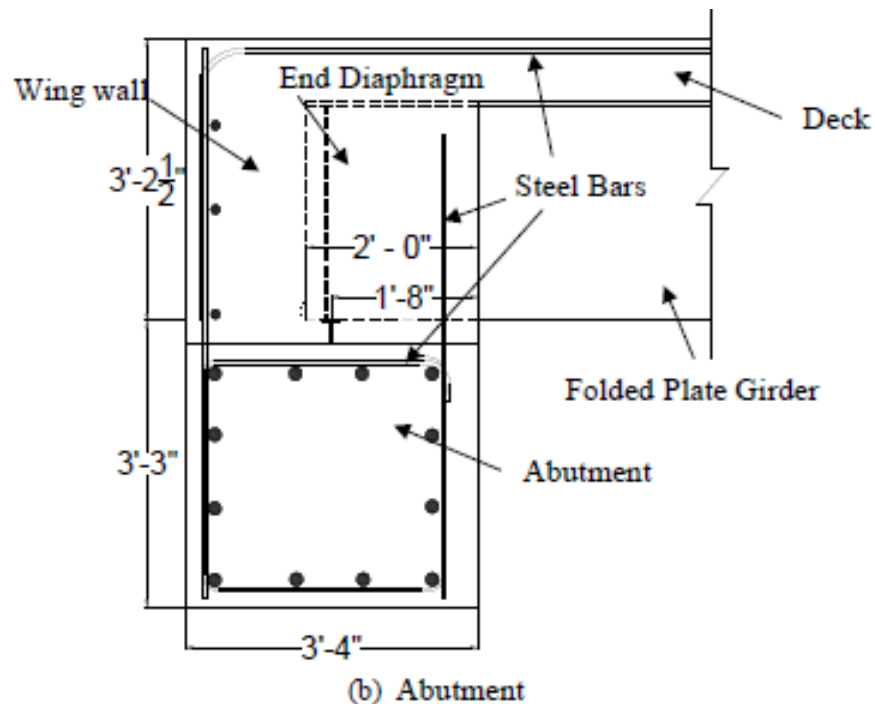


Figura 42: Sistema de apoyo, se muestra viga de chapa metálica plegada y diafragma extremo embebido en viga transversal de apoyo, de Evaluation of a Folded Plate Girder Bridge System Final Report June 2017

3. CUERPOS EXPERIMENTALES

Los cuerpos experimentales consisten en vigas T mixtas cuya mesa de compresión es de hormigón armado y la zona de tracción está compuesta de una chapa plegada de acero. Las dimensiones se adoptaron siguiendo aproximadamente las proporciones de la sección

óptima desarrollada por Michaelson y otros en Development and experimental testing of Press-Brake formed Steel Tub Girder for Short Span Bridge applications.

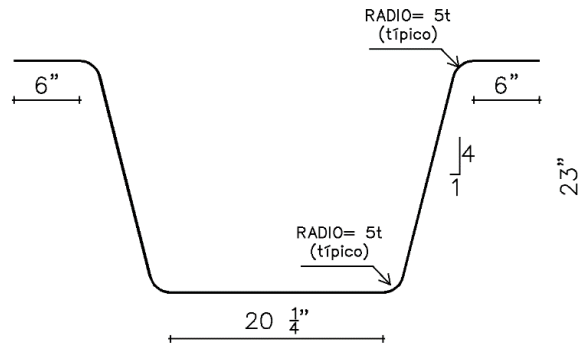


Figura 43: Sección típica propuesta por Michaelson, 2014

La parte metálica de chapa plegada se asemeja a una caja de sección trapezoidal de acero invertida, donde la base menor está en la parte inferior. Las partes de la placa como se dijo están dobladas y no soldadas. Hay aspectos de la parte metálica que son únicos en comparación con las vigas que encontramos en la literatura, véase (1) Brent Phares, Evaluation of a Folded Plate Girder Bridge System, June 2017, (2) Paul Horbaly, Accelerated Bridge Construction accomplished with - Press brake formed or folded steel plate girders (3) K. Barth y otros, Development of a shallow press-brake formed tub girder for short-span steel bridges. Primero, se pliegan de una sola placa de acero sin bordes superiores. En segundo lugar, que es un factor de control para el plegado se toma una sola longitud de cada lado.

Otro factor de control para la longitud de la viga es la longitud de la chapa que se fabricó a partir de una sola placa de acero de grado A36 cuyas dimensiones son 1200 mm de ancho y 3000 mm de largo.

La fabricación de la viga comienza con una placa plana, paso 1. Se corta la placa longitudinalmente en dos partes iguales, en los pasos 2 y 3 se doblan con pendiente aproximada de 1 en 4, en lo que serán los lados inclinados.



Figura 44: Proceso en 3 pasos, 1 corte, 2 y 3 plegado de la chapa, según una presentación de Phares y otros, 2017

- GEOMETRÍA DE LA SECCIÓN

Los cuerpos experimentales consisten en vigas compuestas de mesa de hormigón armado y parte inferior de chapa plegada de acero.

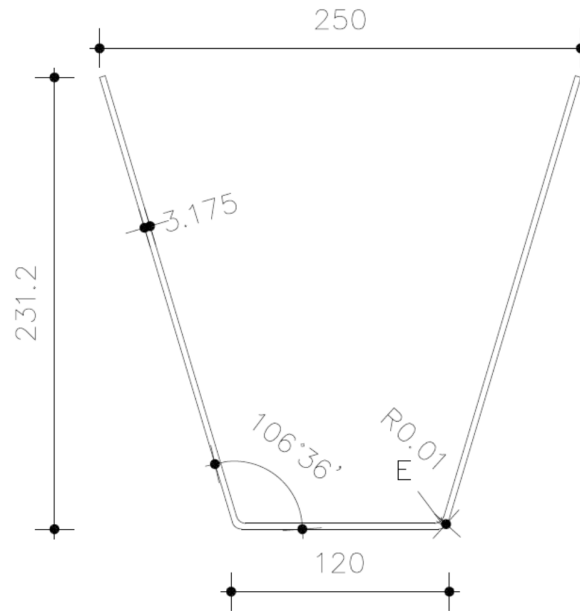


Figura 45: Muestra de la forma final

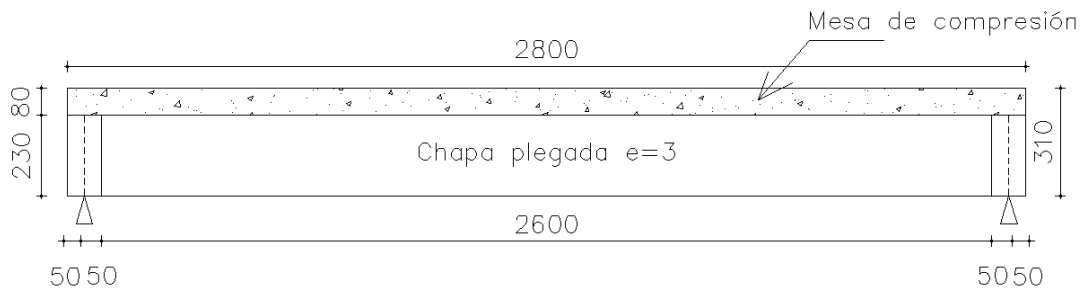


Figura 46: Alzado, vista longitudinal

Los diafragmas en los extremos y los pernos se sueldan a las vigas, una vez que la forma básica de la viga esta lista.

Tabla 4: Detalle de chapa doblada

	Altura	Ancho recto	Ancho superior	Espesor	Longitud	Diámetro barra	Angulo de doblado	Radio de doblado	Tensión de fluencia
Unidad	mm	mm	mm	mm	mm	mm	grados	mm	MPa
Nombre	A	B	C	E	F	G	H	I	
	231.20	120	250	3.175	241.4	10	105,53	6	275

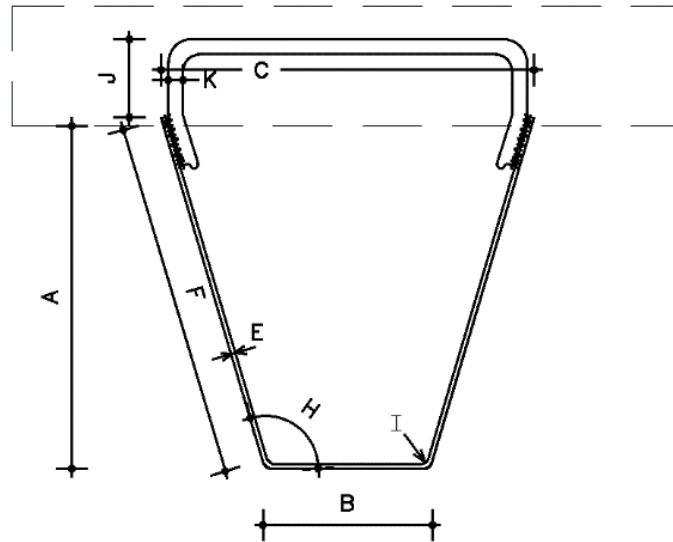


Figura 47: Chapa doblada y perno, $K = \varnothing 10 \text{ mm}$ y $J = 60 \text{ mm}$, soldado a cada lado con una separación de 100 mm

Tabla 5: Detalle de viga mixta, sección transversal

	Altura losa	Ancho mesa	Armadura Trans.	Armadura Long.	Altura chapa	Chapa lado mayor	Chapa lado menor	Espesor	Long chapa	Radio de doblado
Unidad	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Nombre	J	K	L	M	A	C	G	E	F	I
	80	450	10	10	231.20	250	120	3,17	241.4	6

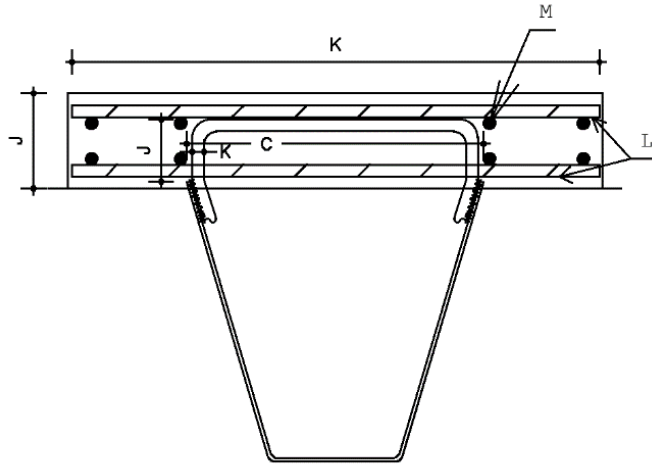


Figura 48: Viga mixta, sección transversal



Figura 49: Procesos de corte, producto y dobladora, fotos propias

Se construyen tres vigas de chapas plegadas de características similares. Las vigas tienen una longitud total de 2800 mm de largo y probadas sobre un tramo de 2700 mm. Las mismas se fabrican de una placa de acero de 1200 mm x 3000 mm y 1/8" (3.175 mm) de grosor. La placa se plegó como se describe en la sección anterior dando como resultado una Viga de acero cuya sección transversal mide 230 mm de alto, 110 mm de base menor y 250 mm de base mayor. La mesa de hormigón tiene una sección transversal de 450 mm de ancho y 80 mm de alto. Todas las mesas de compresión son armadas de igual manera, cuentan con dos camadas de varillas de diámetro 10 mm, longitudinalmente se colocan 4 varillas longitudinales y varillas transversales $c/200$ mm.

- PROPIEDADES DEL ACERO DE LA CHAPA PLEGADA

El ensayo de tracción se realizó en una muestra tomada de una de las vigas una vez que se habían realizado las pruebas. Las muestras se cortaron de la chapa, cerca del extremo de la viga, donde las tensiones se asumen permanecieron dentro del límite elástico durante la prueba. Las muestras se analizaron de acuerdo con la norma ASTM A 370, Métodos de prueba estándar y Definiciones de Pruebas Mecánicas de productos de Acero.

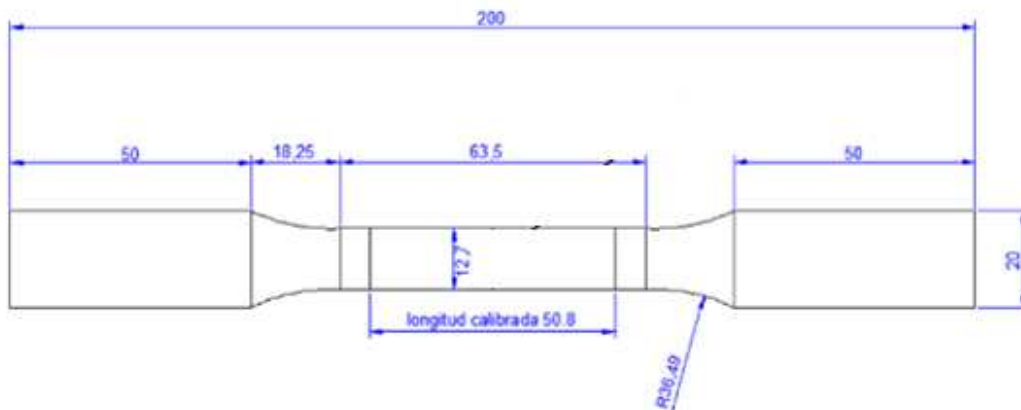


Figura 50: Dimensión típica de la probeta para ensayo de tracción según la norma ASTM A 370 Métodos de prueba estándar y Definiciones de Pruebas Mecánicas de productos de Acero, medidas en mm

Las muestras fueron ensayadas en los laboratorios del INTN (Instituto Nacional de Tecnología y Normalización).

Se obtuvo el comportamiento Esfuerzo-Deformación del ensayo. Se determinó el esfuerzo de fluencia por el método Offset al 0,002 o 0,2% de la deformación según las características de la curva. Se calculó la resistencia a la tracción de la probeta como la división entre la máxima fuerza registrada sobre la probeta durante el ensayo y el área original de la sección transversal

Tabla 6: Extracto del informe del ensayo de la chapa

ENSAYO DE TRACCION (NORMA ASTM A 370)								
Items	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Carga de Fluencia (kN)	Carga Máxima (kN)	Tensión de Fluencia Mpa	Resistencia a la Tracción /Mpa	Alarg./%
M 1	12,10	2,70	32,67	9,00	14,56	275	446	27,90

- CONECTORES UTILIZADOS

Los conectores seleccionados corresponden a cortes de barras de construcción conformados, de calidad acero S500, cuyo proceso de fabricación no presenta tratamientos térmicos que pueda afectar la resistencia luego de aplicar los procesos de soldadura en la conexión entre sí y con la chapa metálica.



Figura 51: Fotos de pernos soldados a la chapa

- TIPOS DE SOLDADURA EMPLEADA

Para la especificación del tipo de soldadura a utilizar para la conexión entre la chapa metálica y el conector de cortante tipo barra $\varnothing 10$ se realiza una aproximación a la especificación del tipo de soldadura de acuerdo a lo establecido por el Código de Soldadura Estructural – Acero (Structural Welding Code - Steel) D1.1 de la American Welding Society, en referencia al tamaño mínimo de la soldadura de filete para pernos, de acuerdo a la siguiente tabla. Soldadura ejecutada con electrodo revestido arco manual, tipo 60/13

Tabla 7: De American Welding Society (AWS) Miami, Florida, (2011), Para pernos de diámetro 6 mm se recomienda como mínimo 5 mm de filete de soldadura.

Stud Diameter		Min. Size Fillet	
in	mm	in	mm
1/4 thru 7/16	6 thru 11	3/16	5
1/2	12	1/4	6
5/8, 3/4, 7/8	16, 20, 22	5/16	8
1	25	3/8	10

- **HORMIGÓN**

Para los tres cuerpos de prueba se utiliza hormigón elaborado, de resistencia solicitada en planta de 30 MPa, cubriendo así con una única amasada todos los cuerpos de prueba y muestras para rotura a fin de lograr homogeneidad suficiente en los mismos.

En el anexo se pueden observar los distintos valores de caracterización por medio de distintos controles tecnológicos y ensayos ejecutados.

- **ARMADURA**

Para el acero de refuerzo se utiliza materiales de la marca GERDAU, con las siguientes características:

Denominación: AP-500S

Tipo: Barras conformadas de dureza natural aptas para soldadura

Tensión de fluencia: $f_y=500$ MPa

- **DETERMINACIÓN DEL ANCHO EFECTIVO**

$b_{eft} \leq L/8, 2800/8= 350$ mm

$b_{eft} \leq L_g, =750$ mm

b_{eff} ≤ S/2, no es aplicable

El ancho efectivo de la sección se considera el menor de los valores anteriores, en este caso solo utilizamos las dos primeras revisiones porque esta viga es única, para nuestro caso el ancho efectivo será de 225 mm a cada lado de la viga tomándolo desde su eje central.

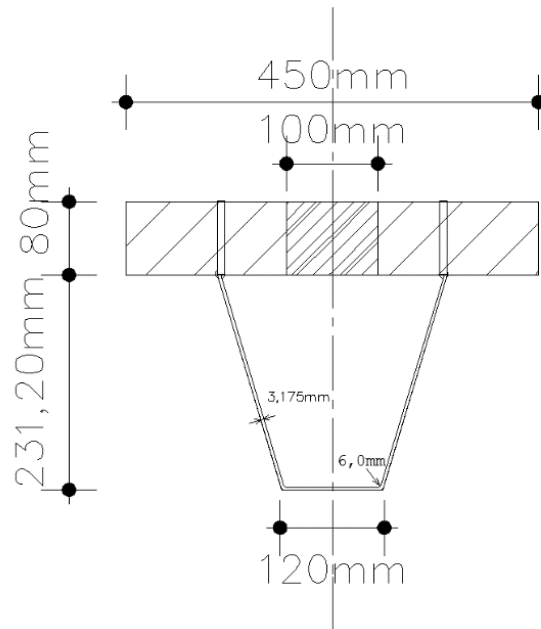


Figura 52: Sección transversal, ancho efectivo de la viga, $b_e = 450\text{mm}$

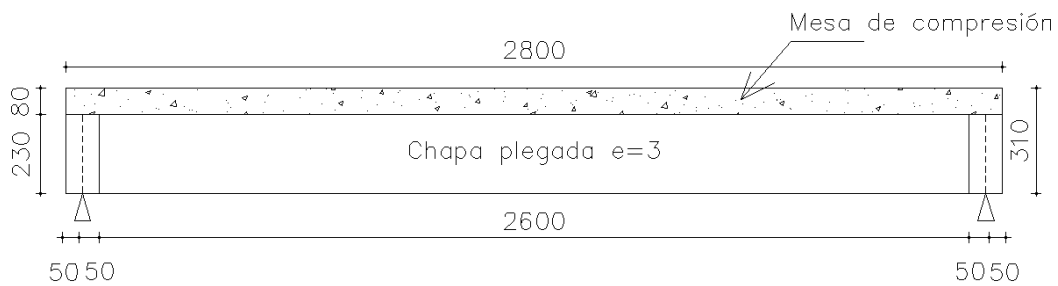


Figura 53: Viga mixta, vista longitudinal

Tabla 8: Resumen del programa de pruebas

Identificación	Muestra	Longitud total	Longitud de apoyo	Ancho de la mesa	Aplicación de la carga	Pernos rectos	Resistencia característica del Graut N/mm ²	Resistencia característica del Hormigón N/mm ²
A1	1	2800 mm	2700 mm	450 mm	centrada	si	-14	21
A2	2	2800 mm	2700 mm	450 mm	centrada	si	-14	21
A3	3	2800 mm	2700 mm	450 mm	Centrada	si	-14	21

- PROPIEDADES DE LA SECCIÓN DE HORMIGÓN

$h_c = 80 \text{ mm}$

$b_e = 450 \text{ mm}$

$f_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2$, Viga

$E_c = 4700 \sqrt{f_{ck}} = 21019 \approx 21000 \text{ N/mm}^2$

$f_{gc} = 14 \text{ N/mm}^2$, Viga Graut

$E_{gc} = 4700 \sqrt{f_{gc}} = 17586 \text{ N/mm}^2$

$E_a = 200000 \text{ N/mm}^2$

4. ELABORACIÓN DE LOS CUERPOS DE PRUEBA

Para la elaboración de la armadura una vez medida y cortada se procede a doblarlas según la geometría determinada, dejando un recubrimiento general de 150 mm. Los pernos que están formados por barras en U se solidarizan a la chapa por medio de soldadura por filete continuo. Las demás barras se atan con alambre formando el conjunto de armaduras dobles cruzadas de la losa.



Figura 54: Disposición terminada de la armadura en viga típica



Figura 55: Preparación y ejecución de la soldadura de los pernos de corte

Se elaboran tres muestras de prueba para a ser ensayados. El hormigón vertido, como se dijo, es producto de una sola amasada a fin de contar con una homogeneidad en los cuerpos. A fin de lograr una compactación óptima del hormigón, una vez colocado es compactado por medio de vibradores de aguja.



Figura 56: Camión Mixer provisionando el hormigón, traslado de la mezcla al sitio de fabricación de los cuerpos de prueba



Figura 57: Moldeado de los cuerpos para rotura para control de la resistencia del hormigón

Con la idea de simplificar en lo posible todos los procedimientos y por ende economizar en recursos, la mesa de compresión es hormigonada poniendo los cuerpos en forma invertida contra el piso. Como fondo de losa se coloca una placa terciada multilaminar y lo mismo se utiliza para formar los bordes, para separar longitudinalmente las mesas se colocan 2 tirantes de madera clavados a los lados y fondo, como se muestra en las fotos siguientes.



Figura 58: Presentación de los resultados de 2 cuerpos de prueba, se aprecia rotura cónica



Figura 59: Vista en proceso de elaboración de las formas de encofrado sobre piso



Figura 60: Vista de hormigonado de la mesa de compresión

Se generó un inconveniente al llenar la mesa de compresión en forma invertida, quedando el centro de la misma vacío. Eso se debió a que, al verter el hormigón, la doble armadura de la mesa de hormigón actuó como barrera bloqueando el flujo de la masa y no permitieron el llenado completo dejando un espacio central sin hormigonar. Para subsanar este inconveniente se resuelve simplemente llenar el espacio con Graut. Se voltean las vigas para realizar el llenado. Se procede al volteo de las vigas el segundo día después del hormigonado, primeramente se procede a completar el fondo de la mesa con una lámina de madera y luego de pintar las superficies expuestas con material epóxico, el espacio se llena con Graut. El Graut utilizado es de la marca Sika tipo Graut In, mortero para anclajes y reparaciones



Figura 61: Vista del proceso de reparación con Graut, limpieza, pintado con epoxi, terminado

5. PRUEBA DE CARGA

El ensayo realizado se puede calificar como del tipo de carga controlada con medición de deformación, de una duración inmediata. El ensayo se realiza en un pórtico de carga con ayuda de un gato hidráulico con manómetro calibrado; la operación consiste en someter a deformación las probetas, en este caso vigas mixtas de características ya especificadas.



Figura 62: Vista en alzado del pórtico de carga, se muestran las vigas 1 y 2 en posición



Figura 63: Proceso de colocación de la muestra en posición para ensayo

6. PÓRTICO DE CARGA Y ACCESORIOS DE CARGA Y MEDICIÓN

El Pórtico de cargas está elaborado con Chapas de acero tipo A36 de medidas y espesores como se muestra en la figura siguiente. Las dimensiones internas son de 4500 mm y 4750 mm de eje a eje. La altura del fondo de viga superior es de 2250 mm. El Pórtico está fundado sobre una platea de hormigón armado de 150 mm de espesor, con viga de fundación en el eje del pórtico de 400 mm x 500 mm. El hormigón es tipo fck 25 MPa.

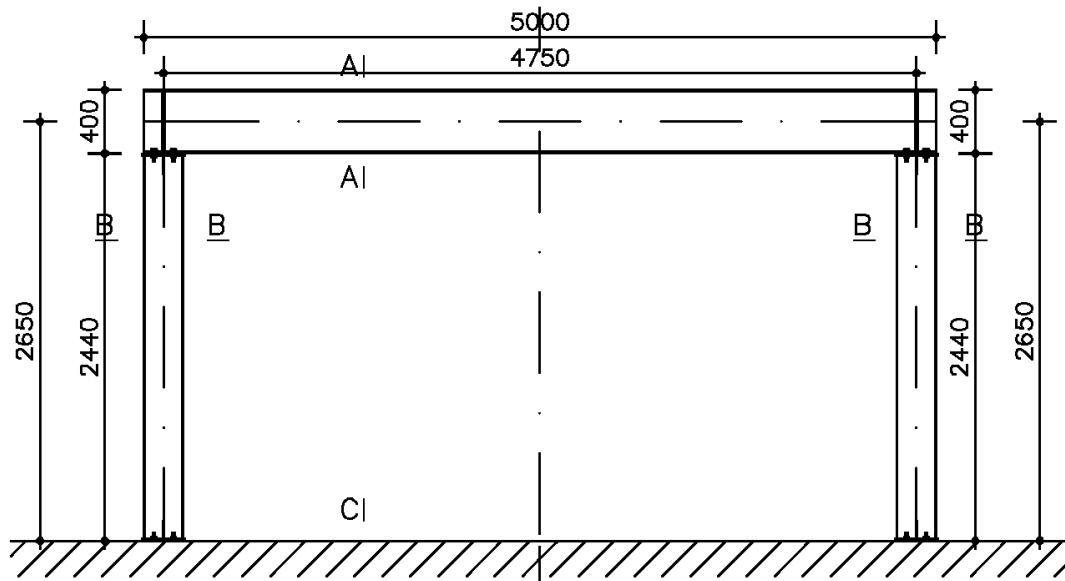


Figura 64: Esquema, vista elevación Pórtico de carga

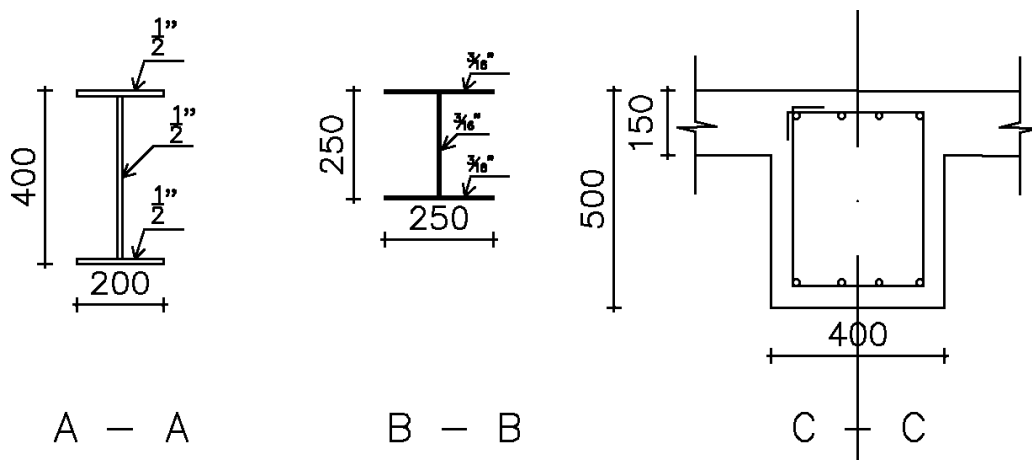


Figura 65: Esquema y cortes, Pórtico de carga y Viga de fundación

- CILINDRO HIDRÁULICO DE CARGA

Se utiliza para aplicar la carga una prensa hidráulica manual de la marca Bovenau 30ST. Con capacidad última de 294 kN. La misma se adapta al pórtico de carga.

- MEDIDOR DE CARGA

La carga es medida mediante un manómetro digital de marca XZT con capacidad nominal máxima de 700 bar. El manómetro fue calibrado por el ing. Fabio Servín de la empresa PROEM S.A, el cual registra la presión de aceite aplicada al cilindro hidráulico. La presión es registrada en MPa con una precisión de 0.01 MPa.

- MEDIDORES DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL

Se utilizan para medir los desplazamientos de los puntos medidos, medidores de desplazamiento vertical Anytime Tools, con precisión de 0.01mm, y carrera de desplazamiento máximo de 25 mm.



Figura 66: Prensa hidráulica, Medidor de desplazamiento y Manómetro

7. PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

Las piezas se colocan según los esquemas mostrados más arriba, una vez puesta la pieza es colocada la barra de transferencia de carga y los medidores de desplazamiento lineal, destacando que para los análisis de valores de desplazamiento no se tienen en cuenta los valores de peso propio.

Las cargas se aplican con incrementos de presión de 2 MPa en manómetro, su equivalencia en fuerza aplicada puede verse en el anexo para las tablas provistas por la empresa de control y calibración del gato hidráulico. Los desplazamientos se miden hasta el final de carrera de los deflectómetros que alcanzan un límite de 20mm. Una vez superado este límite impuesto por la tecnología disponible, se retiran los deflectómetros y se lleva cada cuerpo de prueba experimental hasta la rotura.

8. MODELOS NUMÉRICOS

Se realizan 4 modelos numéricos utilizando software comercial; uno de elementos finitos SAP2000, V21 y, tres con el software de elementos finitos ANSYS, en su módulo ANSYS Workbench – Static Structural.

En el modelo elaborado con el SAP2000, V21 se analizan comportamientos elásticos de los materiales y el modelo final se elabora en toda su dimensión y representando la losa de hormigón por medio de elementos sólidos y la chapa plegada de acero por medio de elementos Shell.

En el modelo elaborado con el ANSYS, son incluidos algunos comportamientos no lineales del material por medio de macros que modifican el material base asignado, así como otros estados no lineales de carga. Se utilizan distintos elementos representativos de los cuerpos experimentales cuyas variantes son aclarados más adelante. El modelo se realiza considerando solo la mitad de la viga y aplicando una opción de simetría propia del software. Se aplican las cargas hasta 174 kN, (debido a que en el modelo numérico se aplicó la función de simetría fue introducida la mitad de la carga) se colocan los incrementos de estas cargas en función a las cargas medidas en los ensayos experimentales.

Se colocan con anterioridad a las cargas que representan a la fuerza aplicada por el gato hidráulico, las cargas de peso propio de la losa de hormigón y la de la barra de transferencia utilizada entre el gato hidráulico y el cuerpo de prueba, se desprecia el peso de la chapa metálica por practicidad de cálculo. Las cargas se introducen de tal manera que representen el esfuerzo con una no linealidad geométrica para que cada escalón sea introducido con el efecto de la deformación del cuerpo en el escalón de carga antecedente, condición que interfiere en la plasticidad de la chapa y generan mayores y más significativas deformaciones, para los resultados se restan los desplazamientos originados por las cargas de peso propio ya que en los ensayos experimentales estos no son considerados.

- CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES EN EL MODELO

A continuación listamos las características de los materiales utilizados en la modelación numérica

- HORMIGÓN

Para reproducir el comportamiento del hormigón se utiliza un elemento tipo sólido de orden lineal definido como SOLID65 al que se le agregan los siguientes modelos de comportamientos:

Comportamiento de hormigón (CONCR). Para este modelo son definidas las características con sus respectivos valores:

- Coeficiente de transferencia de carga en fisuras abiertas=0.2
- Coeficiente de transferencia de carga en fisuras cerradas=0.8
- Resistencia a la tracción=4 MPa
- Resistencia al aplastamiento=20 MPa
- Comportamiento lineal elástico

En el régimen elástico se incluye el módulo de elasticidad correspondiente:

$E=21000$ MPa

Módulo de Poisson, el valor correspondiente a $\mu=0.2$

Comportamiento multilíneal, se introduce un comportamiento multilíneal del material, teniendo en cuenta las propiedades descritas en las normativas consultadas, en donde se representa al hormigón por medio de la siguiente curva de tensión-deformación.

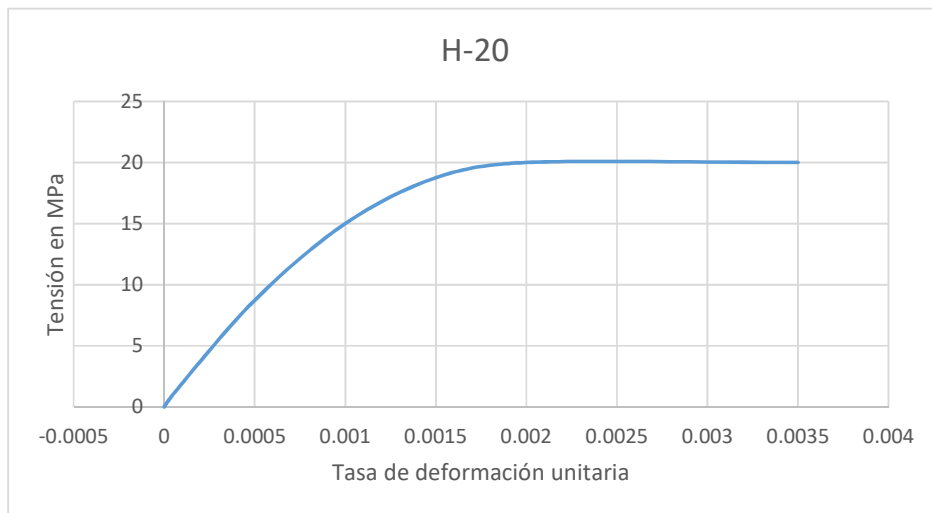


Figura 67: Diagrama de tensión-deformación del hormigón

- GRAUT

Para reproducir el comportamiento del Graut, al igual que el hormigón se utiliza un elemento tipo sólido de orden lineal definido como SOLID65 al que se le agregan los siguientes modelos de comportamientos:

Comportamiento del Graut (Se toma como referencia inicial valores de, CONCR). Para este modelo son definidas las características con sus respectivos valores:

- Coeficiente de transferencia de carga en fisuras abiertas=0.2
- Coeficiente de transferencia de carga en fisuras cerradas=0.8
- Resistencia a la tracción=4 MPa
- Resistencia al aplastamiento=14 MPa
- Comportamiento lineal elástico

En el régimen elástico se incluye el módulo de elasticidad correspondiente.

E=17586 MPa

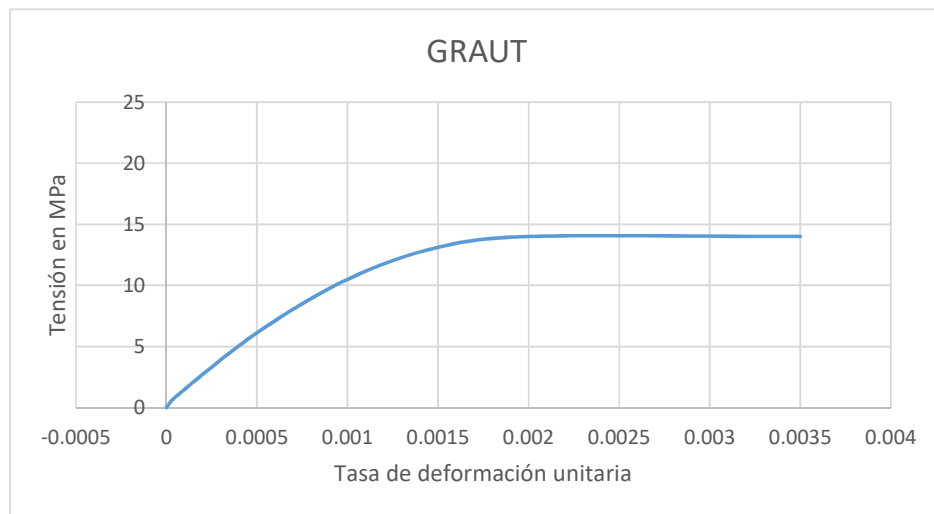


Figura 68: Diagrama de tensión-deformación del Graut

- ARMADURA PASIVA

Las armaduras son discretizadas según cada modelo por medio de elementos sólidos (SOLID186) o armaduras espaciales (LINK180), se colocan características de modelos de materiales para representar el régimen elástico y el comportamiento de fluencia del material con los siguientes parámetros.

Comportamiento lineal elástico

En el régimen elástico se incluye el módulo de elasticidad correspondiente.

E=20000 MPa

Módulo de Poisson

El valor correspondiente a $\mu=0.3$

Comportamiento de dureza bilineal isotrópica – Plasticidad de Von Mises

- Resistencia de fluencia a la tracción=500 MPa

- Modulo tangencial= 2500 MPa

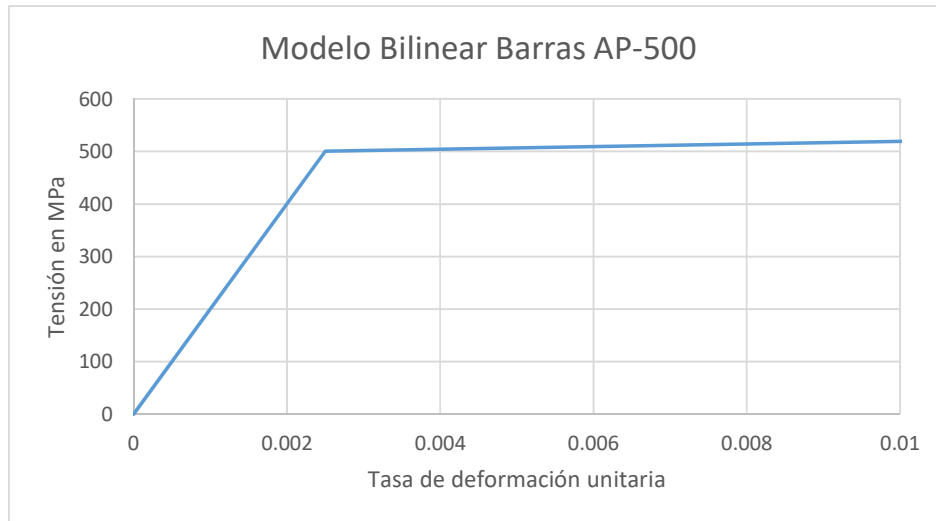


Figura 69: Diagrama de tensión-deformación de las barras de acero

- CHAPA DE ACERO PARA VIGA PLEGADA

La Chapa es discretizada como elementos de sólido (solid186) o elementos laminares (Shell181) dependiendo del modelo, únicamente se colocan características de modelos de materiales para representar el régimen elástico y el comportamiento de fluencia del material con los siguientes parámetros.

Comportamiento linear elástico

En el régimen elástico se incluye el módulo de elasticidad correspondiente.

$E=200000$ MPa

Módulo de Poisson

El valor correspondiente a $\mu=0.3$

Modelo bilineal de rango variable – Plasticidad de Von Mises

Resistencia de fluencia a la tracción=446 MPa

Tensión de fluencia: $f_y=275$ MPa

Modulo tangencial= 625 MPa

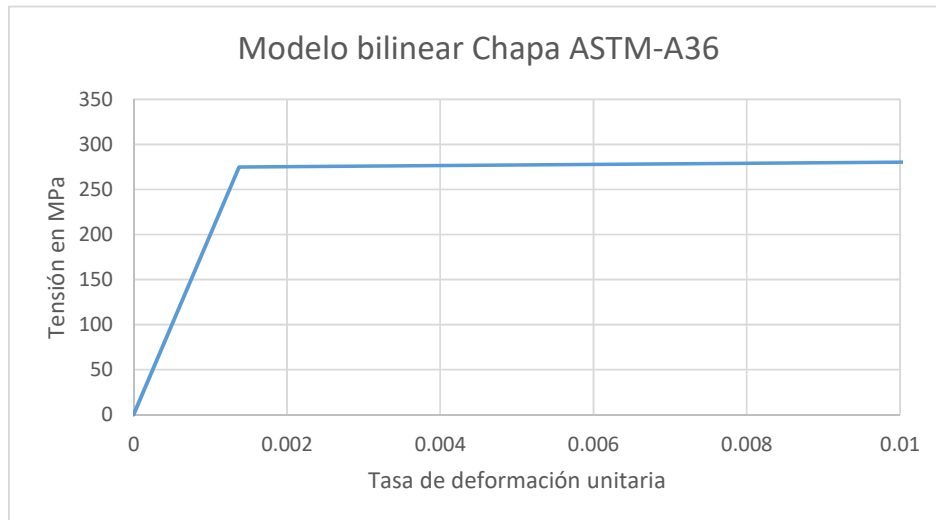


Figura 70: Diagrama de tensión-deformación de las chapas de acero

9. MODELOS GENERADOS POR MEDIO DE ANSYS

Para obtener una respuesta en deformación y esfuerzos en el modelo numérico, se utiliza una aplicación de carga con los mismos valores en los que se realizaron los registros del ensayo de carga.

-VNEHE – Viga numérica con chapa empotrada: para este modelo se considera que la chapa se encuentra unida de forma empotrada en todos los puntos de contacto con los cuerpos de hormigón (Contact: bonded) Todos los elementos se discretizan como sólidos (SOLID186).

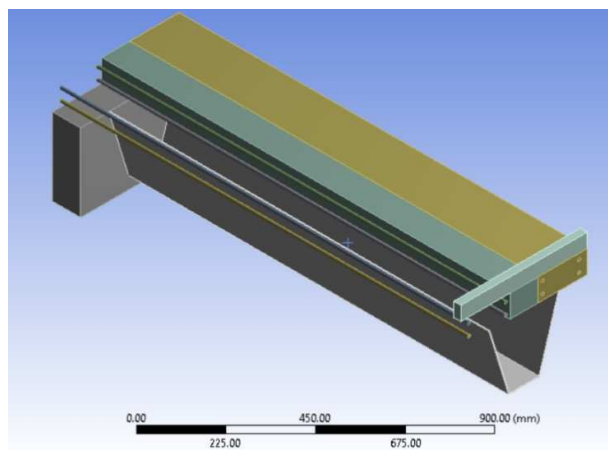


Figura 71: Vista 3D según ANSYS, varillas longitudinales

-VNPHE – Viga numérica con pernos: para este modelo se considera que la chapa se encuentra unida por medio de pernos empotrados en el hormigón y son superficies de chapa que actúan con contactos que admitan aberturas, pero no inserciones entre los cuerpos y sin ningún tipo de fricción (Contact: frictionless). Los contactos entre la chapa y el muro de apoyo se consideran empotrados (Contact: bonded). Para los pernos se utiliza el mismo material de la chapa ya que se generó un solo cuerpo con esta y el perno está empotrado, por lo que, lo que se representó en realidad fue una discontinuidad en el empotramiento de la chapa con la separación de estos (7.5cm). Todos los elementos se discretizan como sólidos (SOLID186)

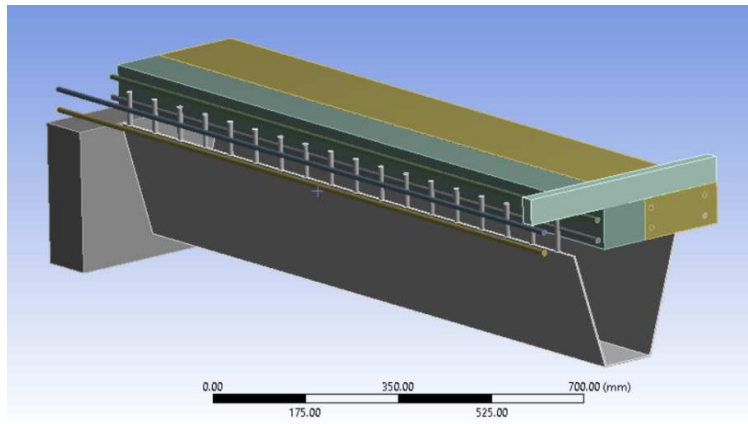


Figura 72: Vista 3D según ANSYS, pernos

VNEHP – Viga numérica con empotramiento perfecto y hormigón no lineal. El hormigón es modelado como solido (SOLID65), la chapa plegada como elementos laminares (SHELL181) y las barras como elementos de armaduras espaciales (LINK180)

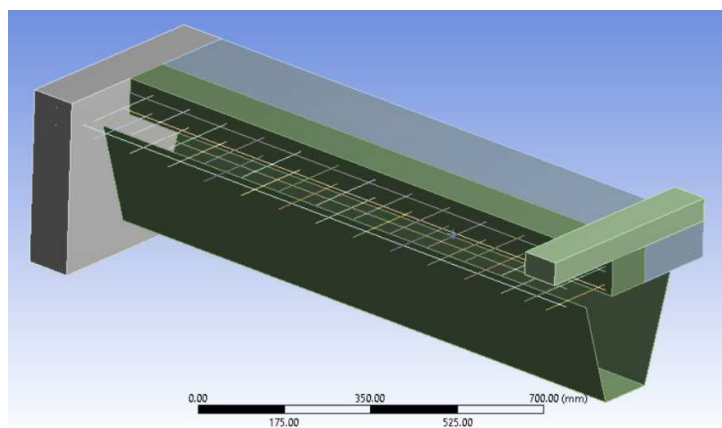


Figura 73: Vista 3D según ANSYS, varillas transversales

10. MODELO GENERADO POR SAP2000

Hay muchos paquetes de programas de software de elementos finitos disponibles comercialmente para aplicaciones de ingeniería estructural, El “Software SAP2000” desarrollado por Ed Wilson y otros en la Universidad de Berkeley en California en 1978, es considerado uno de los paquetes de programas de elementos finitos más utilizados para ingeniería estructural. El programa se utiliza para aplicaciones de propósito general, incluyendo Puentes, edificios de estructuras offshore y muchos otros. Este programa se adopta en este trabajo para realizar el modelo de elementos finitos comparativo en la fase elástica.

- **MODELADO DE MATERIALES PARA SAP2000**

Las propiedades requeridas para SAP2000 son el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y el peso específico. La resistencia a la compresión del hormigón (f_c) se considera según nuestro caso en clases A y B en MPa y el peso específico (γ_c) 24 kN / m³. El módulo de elasticidad del hormigón (E_c) considerada en el análisis es de acuerdo a la resistencia característica en MPa en base a la siguiente ecuación:

$$E_c = 4700 \times (f_c)^{0.5}$$

La relación de Poisson para la deformación elástica del hormigón se toma como 0.20. El módulo de elasticidad del acero (E_s) se toma como 200,000 MPa y la relación de Poisson para la deformación elástica del acero se toma como 0.30

- **MODELADO GEOMÉTRICO**

Se selecciona elementos en las direcciones transversal y longitudinal para simular con precisión las configuraciones geométricas de la estructura. Se desarrolla un modelo tridimensional de elementos finitos para simular la viga mixta considerada en este estudio. Se seleccionan elementos tipo Shell para modelar la viga de chapa plegada de acero que conforma la viga inferior y se hacen pruebas utilizando elementos tipo Shell y elementos tipo Solido para modelar la mesa de compresión.

El modelo numérico de la mesa de compresión desarrollado con elementos “Sólidos” es generado en el programa SAP2000 simplemente extruyendo elementos “Shell” y asignando el valor del espesor correspondiente.

- **MODELADO DE CONEXIONES ENTRE ELEMENTOS**

La viga de acero y la losa de hormigón no comparten los mismos nodos en la interfaz. Sino que en la unión entre los dos materiales se utilizan elementos tipo barras de unión que simulan los pernos soldados a la chapa, debido a que de otra manera la unión se localizaría en el perímetro del sólido y no en la placa media, los valores resultantes de ambos modelos comparativos no se muestran en este trabajo porque excede el alcance del mismo. La conexión resultante entre la viga de acero y la losa de hormigón es de empotramiento y no se consideró en el análisis ningún deslizamiento entre la viga de acero y la losa de hormigón.

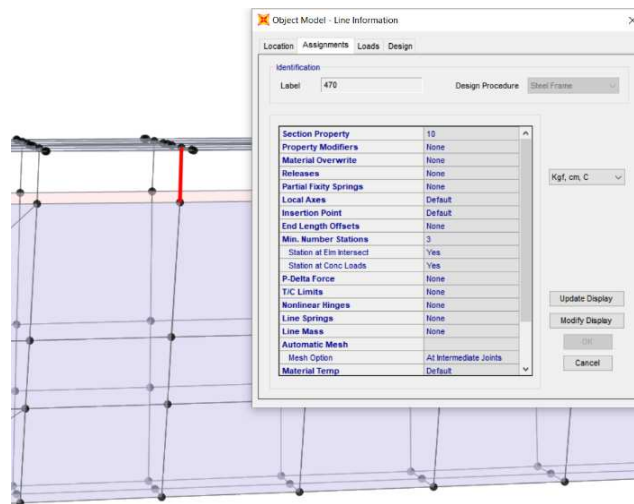


Figura 74: Propiedades del elemento modelado de barras de conexión entre chapa plegada y losa de hormigón según SAP2000

- **CONDICIONES DE APOYO**

Todas las condiciones de apoyo se aplican en el extremo inferior del bloque en el extremo de la mesa de compresión de la viga simulando la ubicación geométrica en escala real de los elementos de apoyo utilizados, es decir consideramos la viga apoyada directamente. Los nodos de las líneas de apoyo externas e internas, se muestra en la Figura siguiente.

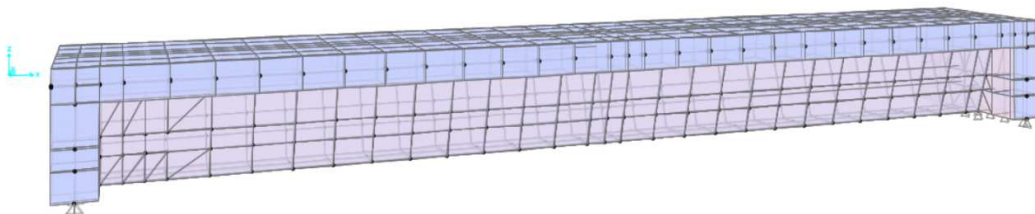


Figura 75: Condiciones de apoyo en la viga aplicados en los extremos de la mesa de compresión

- CARGAS APLICADAS

A fin de realizar la comparación de resultados utilizando el modelo de elementos finitos hechos con ayuda del SAP2000, se cargó el modelo con la misma escala de cargas de la experiencia. De manera a mantener las similitudes del modelo con los especímenes de prueba se dio al modelo en el punto de carga una excentricidad fija de 50mm eso con el fin de considerar las excentricidades accidentales que ocurren durante la colocación del actuador y el posicionamiento de la viga. Para los valores finales no se consideran las cargas de peso propio.

11. VERIFICACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CARGA ENTRE LA LOSA DE HORMIGÓN Y LA CHAPA DE ACERO

Para el momento positivo se supondrá que la totalidad de la fuerza cortante horizontal en la interface entre losa de hormigón y la chapa de acero se transfiere a través de los conectores.

Resistencia de los conectores a cortante según el área de soldadura posible. V_{cn}

$t = 3$ mm, espesor de la chapa

$\varnothing = 10$ mm, diámetro de cada conector

$l = 10$ mm, longitud mínima del cordón de soldadura en cada lado de la varilla

$e = 5$ mm, longitud adoptada para sección transversal de soldadura

$A_{sc} = 5\text{mm} \times 10\text{mm} \times 2 = 100$ mm², sección transversal de corte

$\sigma_{\text{última}} = 427$ MPa, para electrodos tipo E60xx

$\sigma_{\text{mat}} = 275$ MPa, tensión de fluencia de la chapa

$\sigma_{\text{fluencia}} = 0.5 \times 427 = 213.5$ MPa

$\tau_{\text{adm}} = 0.4 \times \sigma_{\text{mat}} = 0.4 \times 275 = 110$ MPa, adoptamos el valor de la tensión admisible

(τ_{adm}) que deberá ser menor que la tensión del material (σ_{mat}) de la soldadura más solicitada (Para los casos prácticos de uso corriente se debería multiplicar por 0,4 según las especificaciones del AISC).

$V_{cn} = \tau_{\text{adm}} \times A_{sc} = 110 \times 100 = 11000$ N, adoptamos este valor para un perno.

Obs.: Verificando la fuerza cortante máxima generada durante los ensayos, $V_u = 86.572,5$ N y la capacidad de corte total de los pernos soldados $V_{st} = 11000 * 2 * 10 = 220.000$ N, asumimos que se ha llegado a proporciones próximas a 0,40 de la capacidad de la soldadura recomendada por AISC ya que durante la experiencia no se ha reportado separación de la chapa de la mesa de hormigón

12. ANÁLISIS DE LA SECCIÓN HOMOGENEIZADA

La comparación entre los análisis elásticos brindados por normativas con fines prácticos de representar las deformaciones de forma ágil se dispone como se muestra en el marco teórico las aproximaciones de una sección de inercia equivalente a la estructura real generalizando un solo tipo de material. A los efectos fue seleccionado un solo material de trabajo con módulo de elasticidad $E = 200000$ MPa, correspondiente al material de acero, y con este se encontró la inercia a flexión de la sección homogenizada, cuyo valor corresponde a $I_{hom} = 4.8526 * 10^7$ mm⁴.

CAPITULO 4

1. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

En este capítulo se presentan los resultados de los diferentes puntos estudiados en este trabajo. Así también, se comparan las respuestas de los modelos al ensayo realizado para interpretar el conjunto estructural de la sección mixta bajo las sollicitaciones de flexión y corte.

En general, se presentan los resultados de los lugares de medición 1, 2 y 3 en los ensayos experimentales y numéricos. Así también, para los resultados de Carga-Deformación son presentados los resultados hasta la carga total de 165 kN, esto debido a que no se pudieron realizar las mediciones hasta la carga de rotura, ya que todos tienen deflexiones mayores a las que los instrumentos pudieron medir.

- **RESULTADOS DE MODELOS EXPERIMENTALES**

En los capítulos anteriores se han expuesto con detalles los experimentos y la forma en que se han realizado. Ya se han expuesto los conjuntos de datos a partir de los cuales se organizaron los experimentos; materiales, forma y procesos, y donde los resultados de estos se han tabulado. En este capítulo se incluyen los resultados de los modelos experimentales combinados en forma de planillas Excel para la elaboración de las curvas de representación carga versus desplazamiento.

- **RESPUESTA CARGA-DESPLAZAMIENTO**

A continuación, se presentan las mediciones en los lugares de medición 1, 2 y 3. Estos lugares de medición se representan; 1) El punto medio de la viga, 2) El punto medio en la losa, y 3) El punto correspondiente al cuarto de la viga, los cuales se obtienen en los cuerpos experimentales mediante los ensayos de prueba de carga.

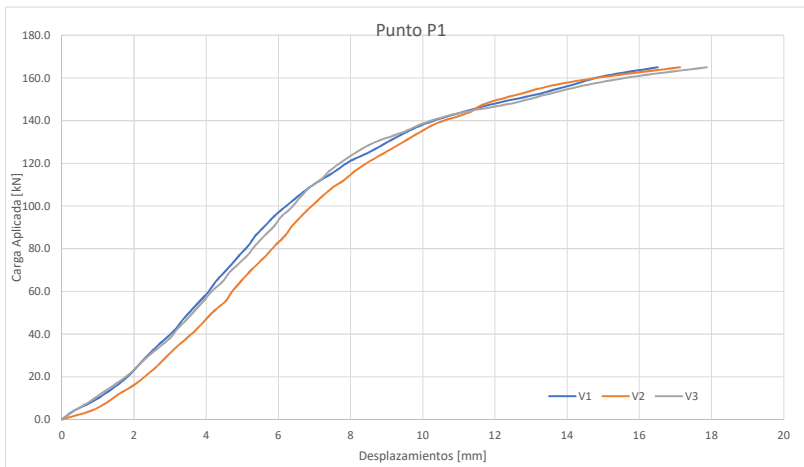


Figura 76: Resultados pruebas de carga punto 1

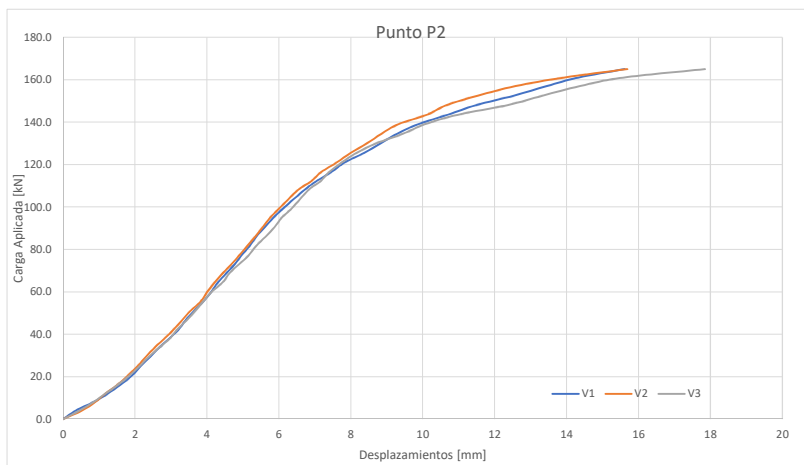


Figura 77: Resultados pruebas de carga punto 2

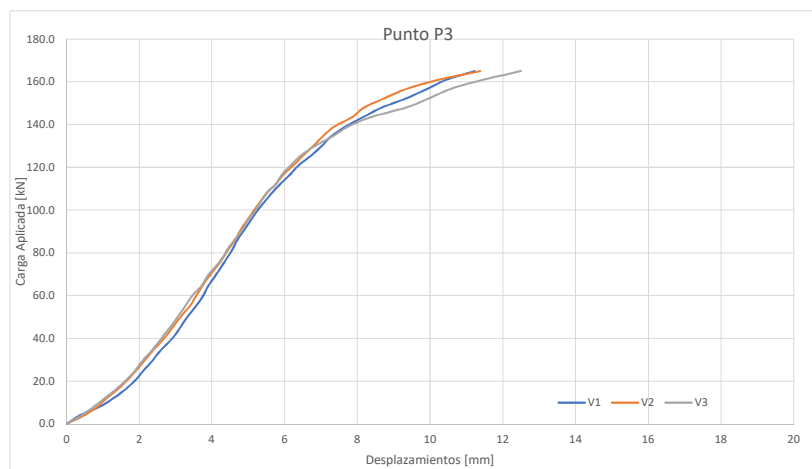


Figura 78: Resultados pruebas de carga punto 3

En general a fin de tener mejores valores de comparación de los resultados de los ensayos experimentales, son promediados los desplazamientos obtenidos.

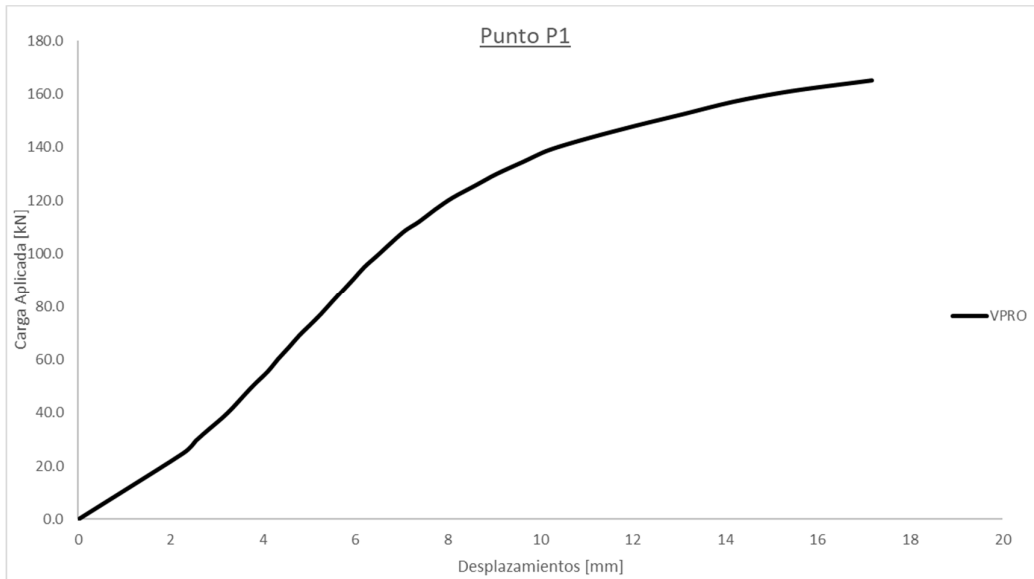


Figura 79: Resultados promedio de carga punto 1 (VPRO)

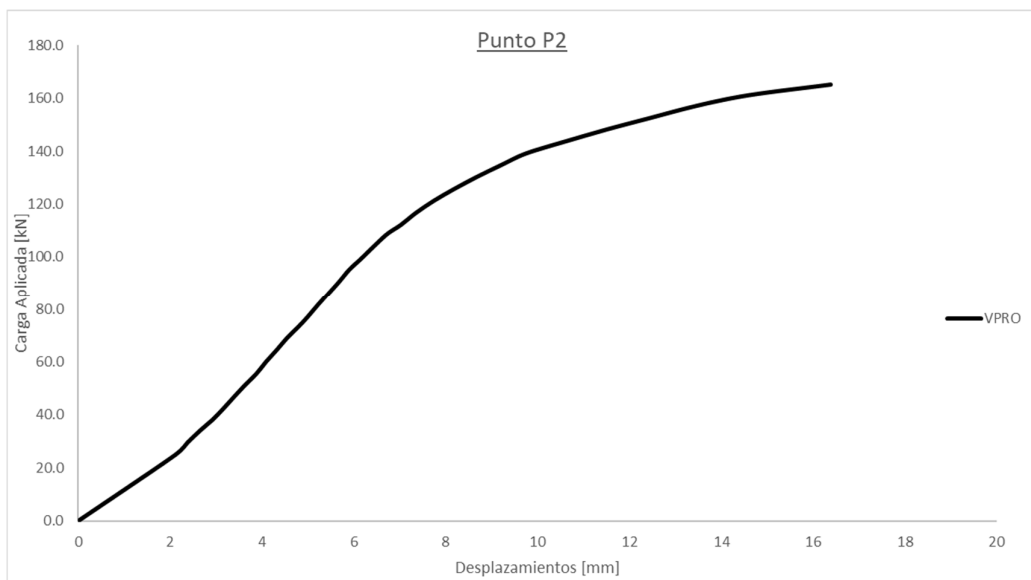


Figura 80: Resultados promedio de carga punto 2 (VPRO)

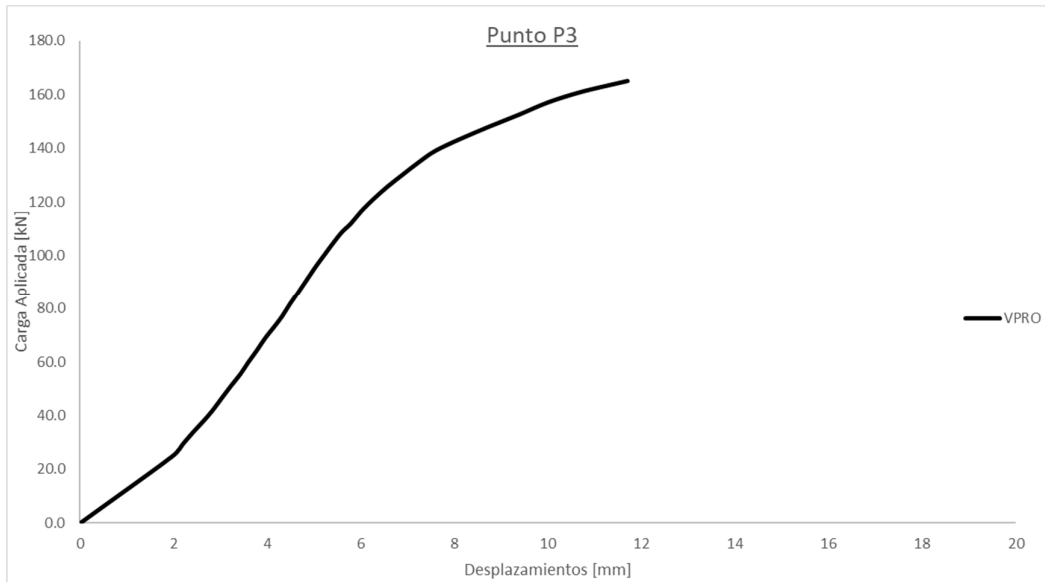


Figura 81: Resultados promedio de carga punto 3 (VPRO)

En los distintos ensayos se pueden observar acomodos que se denotan como una inclinación pronunciada en el régimen elástico de la viga, este comportamiento surge debido al acomodo de los materiales, así como el alivio de tensiones debido al proceso de soldadura y otros procesos constructivos, son descontados trasladando la curva hallando la pendiente de la recta de carga deformación e interceptándola con el eje horizontal de los diagramas.

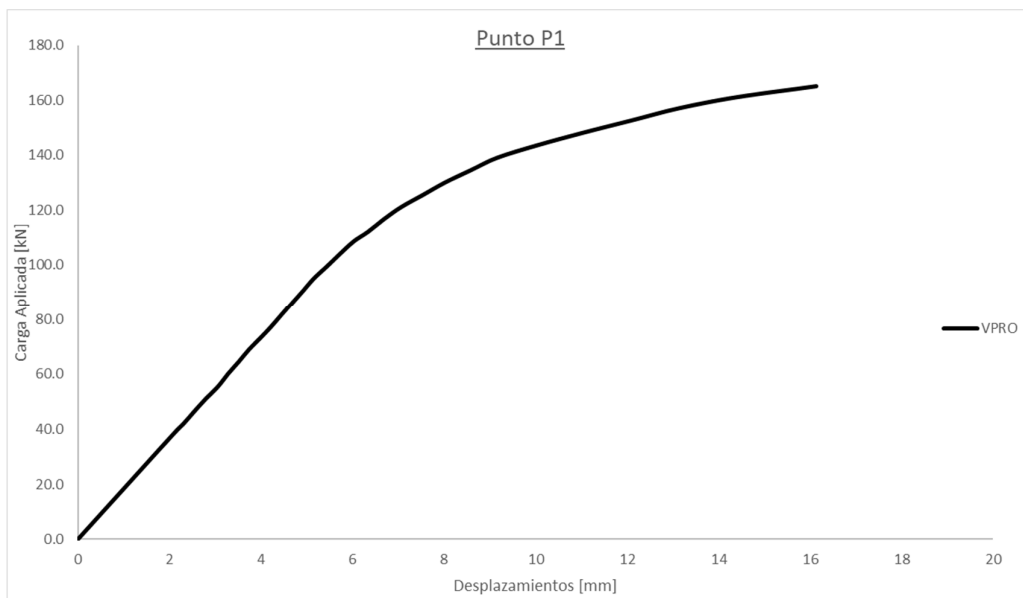


Figura 82: Resultado promedio desplazado de carga punto 1 (VPRO)

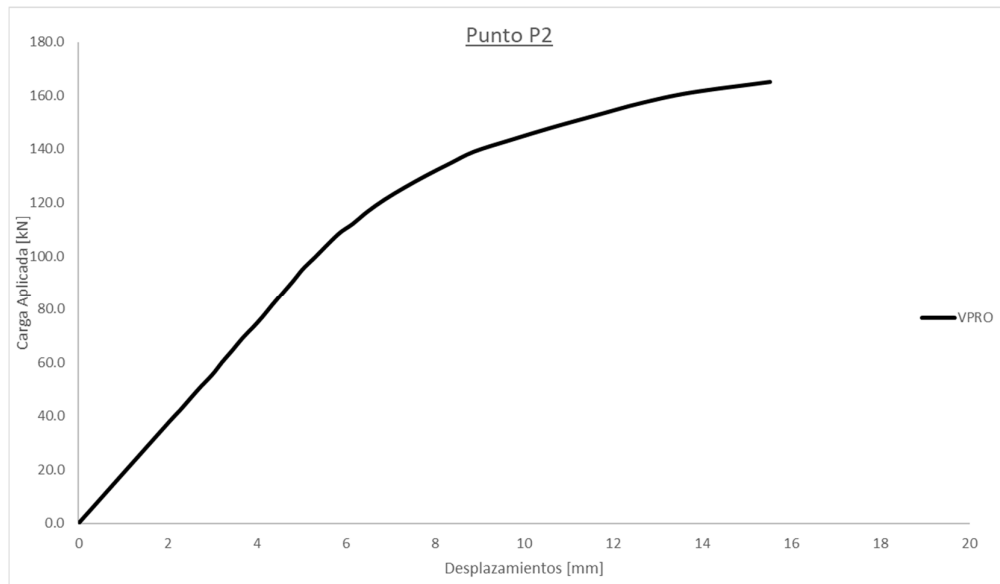


Figura 83: Resultado promedio desplazado de carga punto 2 (VPRO)

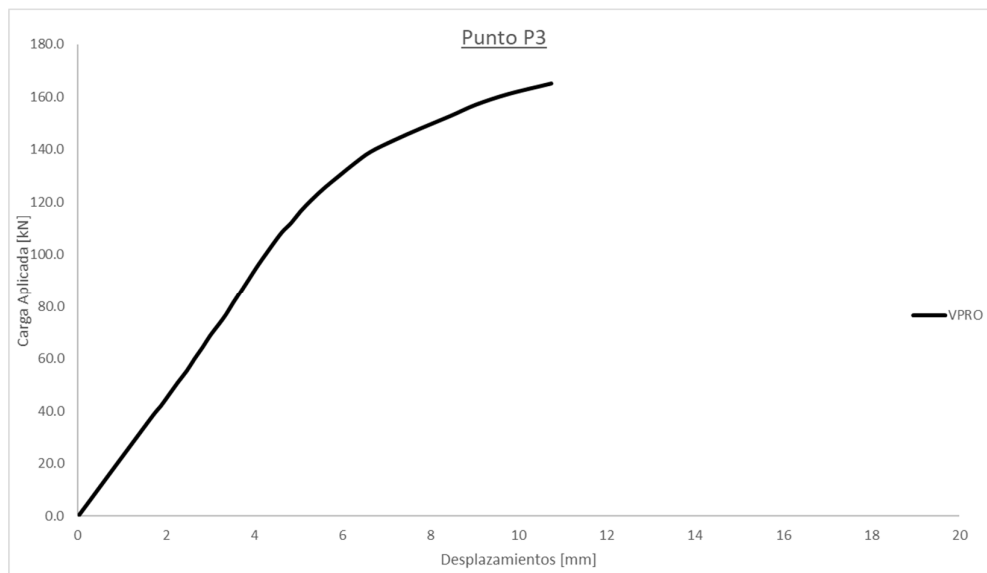


Figura 84: Resultado promedio desplazado de carga punto 3 (VPRO)

- RESULTADOS DE CARGA ÚLTIMA

En las pruebas de carga son llevadas hasta la rotura los cuerpos experimentales V2 y V3. En ambos casos el mecanismo de rotura fue una falla dúctil, en donde la lámina, chapa plegada de acero, se deforma excesivamente levantando el eje neutro en la losa de compresión hasta que este presentó una rotura por compresión debido a la disminución del bloque de compresión.

Tabla 9: Resultados de carga última experimentales

Viga	Carga (kN)
V2	171.75
V3	174.54

- RESULTADOS DE FISURACIÓN

En este punto se presentan las fisuras observadas durante la prueba de carga, se indica la carga de aparición.

Tabla 10: Fisuras en cuerpos experimentales

VIGA	CARGA (kN)
	APARICIÓN
V1	157
V2	161
V3	152.5



Figura 85: Fisuración en el centro de la mesa de compresión viga V1



Figura 86: Fisuración apoyo de viga V1



Figura 87: Fisuración lado inferior mesa de compresión viga V2



Figura 88: Fisura en mesa de compresión viga V2, se observa el actuador y las fisuras marcadas con tinta



Figura 89: Fisuración lado inferior mesa de compresión viga V3



Figura 90: Vista de viga deformada, sin carga, viga V3



Figura 91: Vista inferior viga deformada, en viga V3 (volteada)

2. RESULTADOS DE MODELOS NUMÉRICOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos mediante modelos numéricos basados en el método de los elementos finitos utilizando el software ANSYS así como un modelo en el régimen elástico por medio del software SAP2000.

Se toman varios modelos en el programa ANSYS variando los elementos mediante los cuales se idealizan los componentes de la estructura para una comparativa más amplia entre los modelos estructurales tanto experimentales como numéricos.

- RESPUESTA CARGA-DESPLAZAMIENTO

En los siguientes gráficos se muestra la respuesta a carga en consideración de la deformación de los modelos numéricos. Se presentan los puntos de medición de los desplazamientos con las mismas ubicaciones que los modelos experimentales.

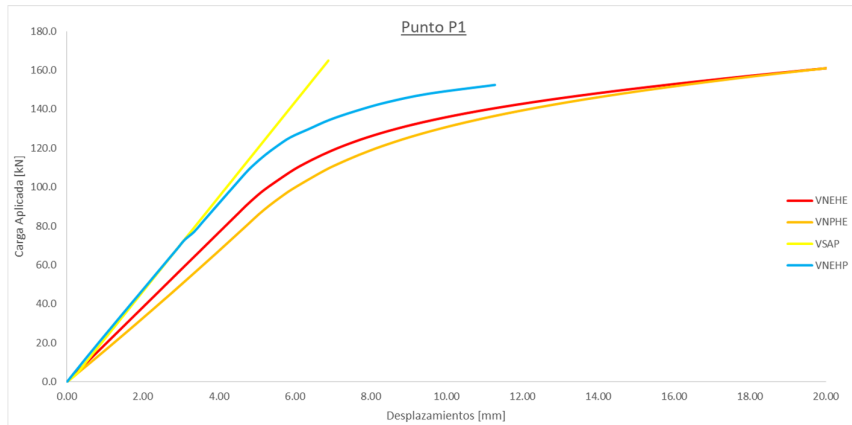


Figura 92: Resultados de modelo numérico punto 1

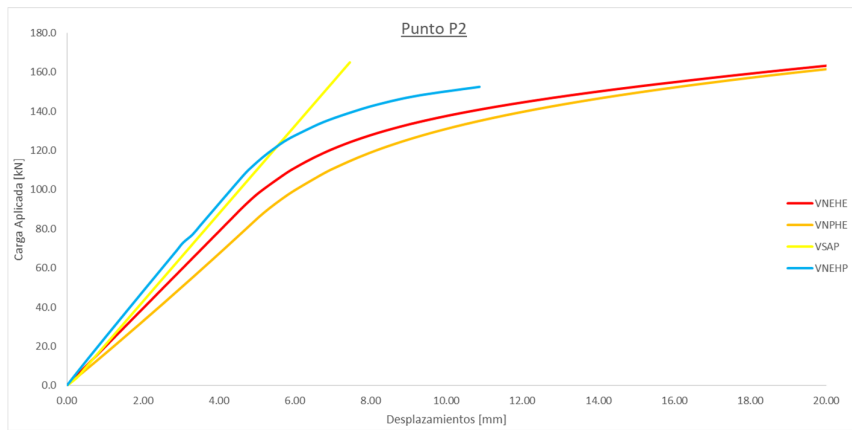


Figura 93: Resultados de modelo numérico punto 2

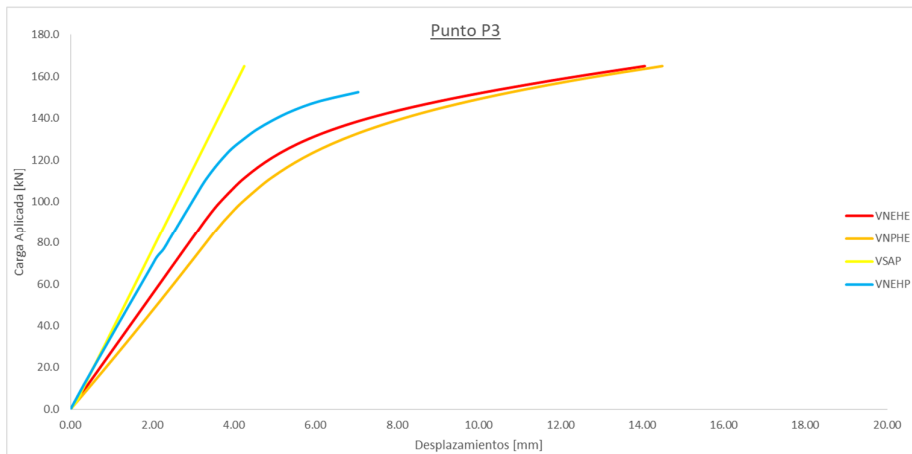


Figura 94: Resultados de modelo numérico punto

- TENSION EN LA CHAPA PLEGADA

En los siguientes gráficos se pueden apreciar las tensiones alcanzadas en las chapas plegadas de acero para los modelos VNE y VNP para las cargas últimas alcanzadas en los modelos experimentales

Tabla 11: Máximas tensiones alcanzadas en los modelos numéricos para la carga de 174kN

Viga	Tensión (MPa)
VNE	283.7
VNP	289.5

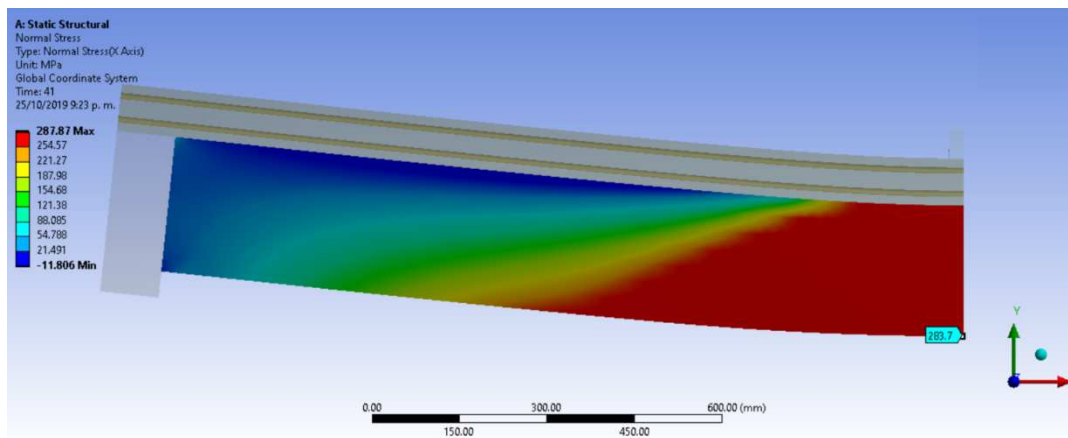


Figura 95: Tensiones normales bajo carga ultima viga VNEHE

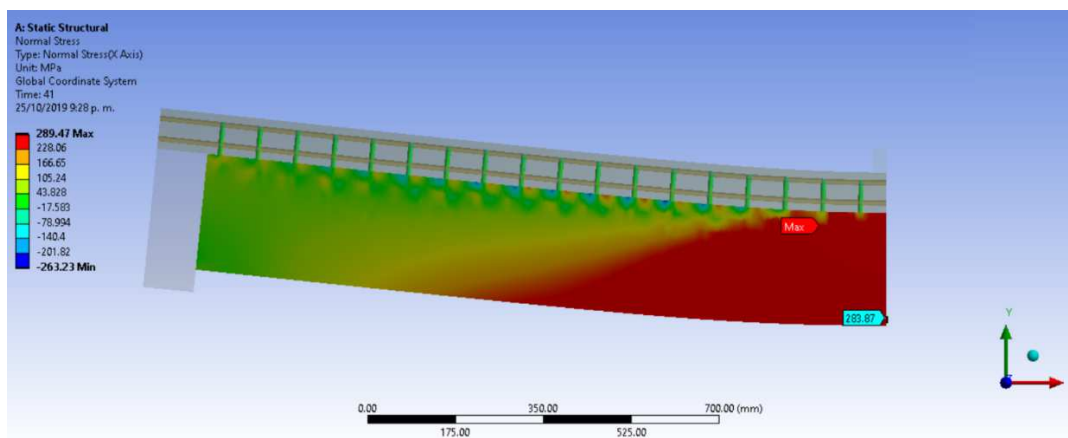


Figura 96: Tensiones normales bajo carga ultima viga VNPHE

3. RESULTADOS DE LOS PROCESOS ANALÍTICOS

Las curvas de Carga Desplazamiento se grafican utilizando los valores derivados de la homogenización de los materiales

- CARGA DESPLAZAMIENTO

Se muestran los resultados obtenidos para el cálculo de una sección con inercia homogeneizada con constantes elásticas del material. Este procedimiento es usual en esquemas de cálculos normativos para aproximaciones de desplazamientos en estructuras cuya resistencia última se encuentran dominados por coeficientes de seguridad elevados, donde las cargas de servicio no se aproximan a la plastificación de la sección.

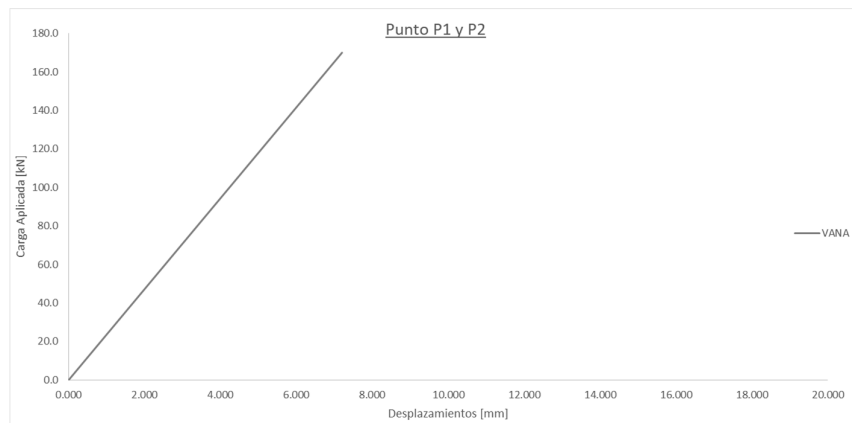


Figura 97: Curva Carga Desplazamiento para sección homogeneizada con constantes elásticas del material, P1 y P2

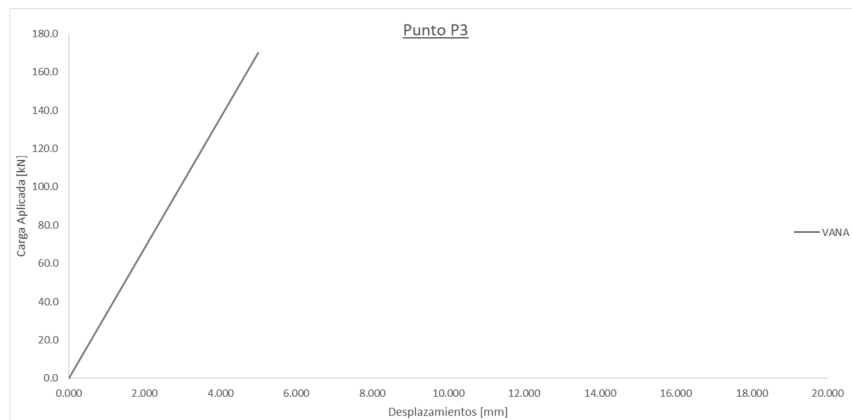


Figura 98: Curva Carga Desplazamiento para sección homogeneizada con constantes elásticas del material, P3

- CARGA ÚLTIMA

Es este apartado se muestran las capacidades resistentes obtenidas para la sección de estudio por medio de dos aproximaciones, una que cuenta con el respaldo normativo utilizado y otro por medio del análisis de las deformaciones últimas de la sección compuesta. Es importante resaltar que los cálculos normativos no incluyen la presencia de la armadura comprimida dentro de la losa de hormigón armado, en el segundo modelo propuesto se incluye este punto.

- MODELO DE LA NBR 8800:2008

Se muestra la carga obtenida, a partir del momento resistente de la sección, sin los coeficientes de seguridad. $PVANO=137.7$ kN, La verificación está en el ANEXO 4: Resistencia última de la sección.

- ANÁLISIS DE EQUILIBRIO ÚLTIMO DE LA SECCIÓN

En este caso, se partió de las observaciones de los ensayos experimentales donde se produjo una falla dúctil de la viga, por lo que se hizo variar la recta de deformaciones de la sección en el pivote de deformación máxima del hormigón a compresión de -3.5% , para luego posicionar al eje neutro para un equilibrio de fuerzas resultantes de la sección. A partir del momento resistente de la sección se encuentra la carga representativa al ensayo experimental.

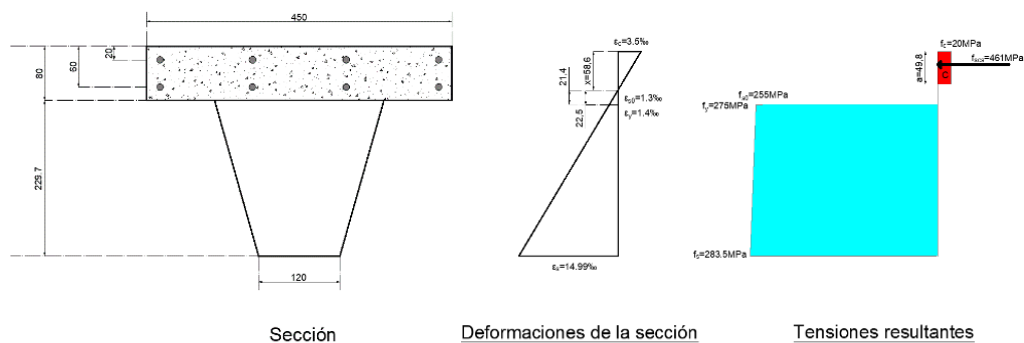
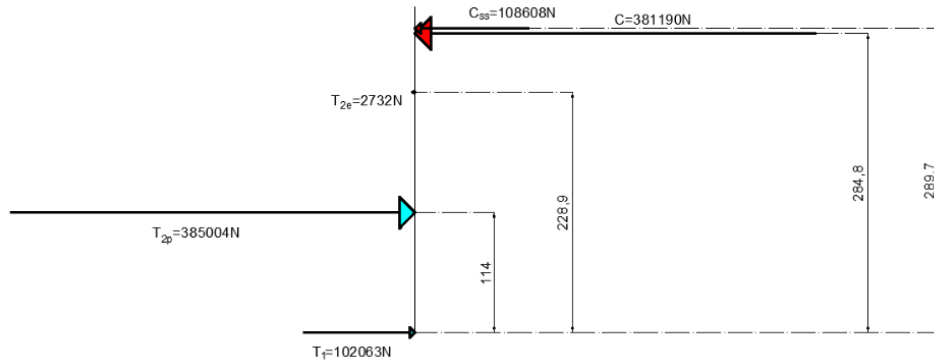


Figura 99: Deformación máxima del hormigón a compresión de -3.5% ,



Fuerzas equivalentes y brazos de palanca

Figura 100: Fuerzas equivalentes y brazos de palanca, VAEQ

4. ANÁLISIS DE DATOS

A continuación, se realizan contrastes entre los distintos modelos estudiados, así como pequeñas observaciones en la experiencia de prueba de carga de modelos experimentales.

- **CARGA-DESPLAZAMIENTO**

A fin de observar la concordancia, de los distintos modelos numéricos con los cuerpos experimentales, ante la rigidez flexional, se presentan gráficos que competen a los puntos de medición 1, 2 y 3 entre los modelos experimentales y numéricos, teniendo en cuenta los promedios obtenidos entre los modelos experimentales.

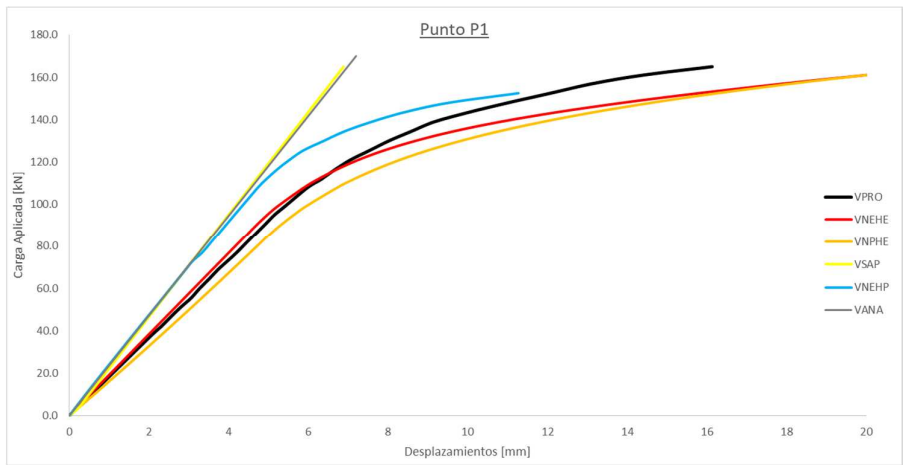


Figura 101: Carga-Desplazamiento punto 1

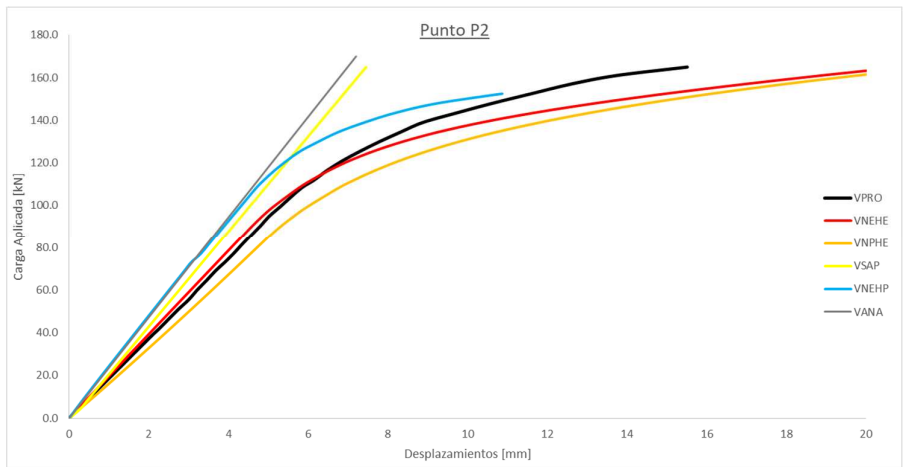


Figura 102: Carga-Desplazamiento punto 2

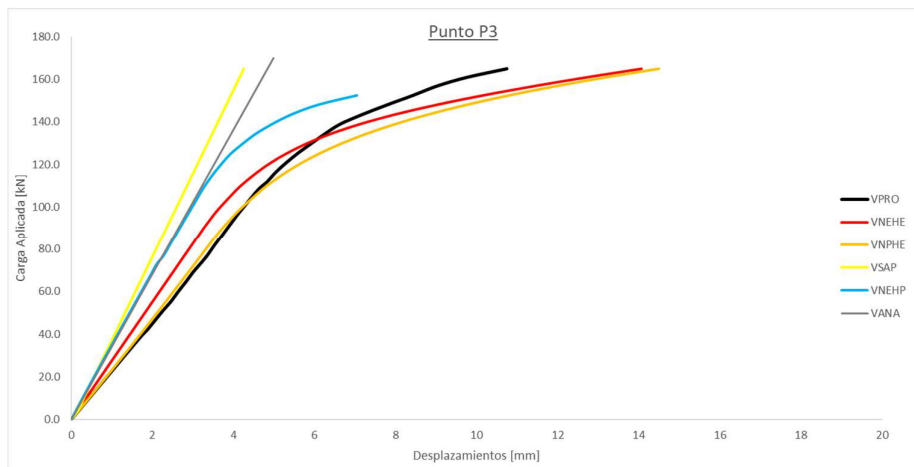


Figura 103: Carga-Desplazamiento punto 3

En los resultados de contraste entre los modelos numéricos y experimentales de las vigas, se observa que los modelos numéricos VNEHE y VNPHE poseen muy buena aproximación entre sí y con las vigas experimentales representadas por el promedio de estas, VPRO, en la fase elástica de la estructura. Ya entrando en el régimen plástico de la estructura se mantienen próximos los valores de los modelos numéricos y se alejan mínimamente del valor experimental.

En el caso del modelo numérico VNEHP posee un comportamiento diferente, un desfase en el régimen elástico con respecto a los promedios experimentales y en contrapartida poseen una aproximación en las curvas de carga-desplazamiento en el régimen plástico. En el caso de este último modelo numérico mencionado es apreciable la aproximación que poseen a la recta de desplazamientos elásticos calculados por medio de inercia de la sección equivalente con un material con módulo elástico homogeneizado.

- **CARGA ÚLTIMA**

En la siguiente tabla se pueden constatar los resultados obtenidos determinados por medios analíticos y experimentales.

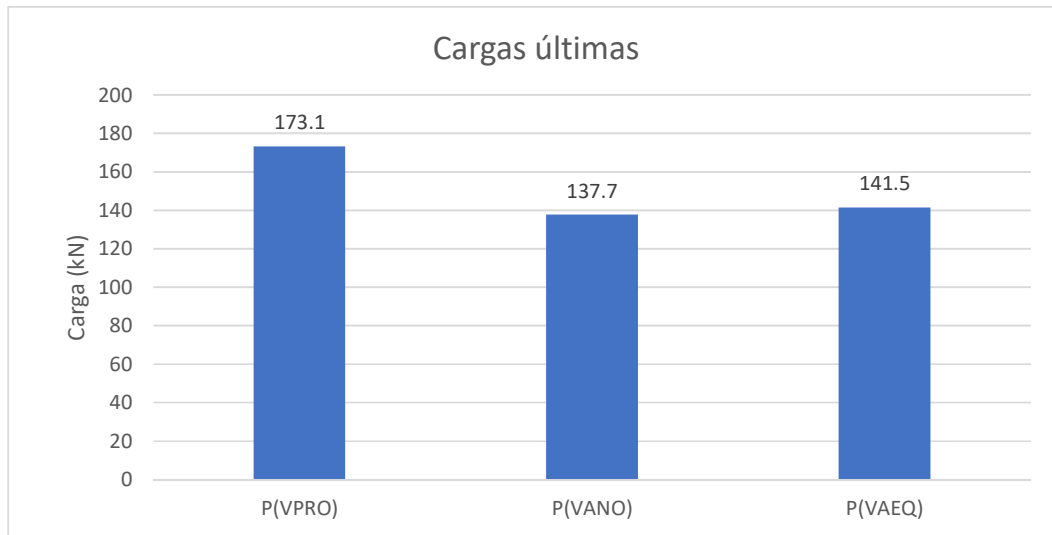


Figura 104: Comparación de cargas últimas entre distintos métodos de análisis

En el grafico se leen las siguientes leyendas y sus valores de carga correspondientes:

P(VPRO): Viga experimental promedio

P(VANO): Viga analítica normativa

P(VAEQ): Viga analítica con equilibrio de la sección

Se puede apreciar que los cuerpos experimentales (VPRO) han demostrado mayor capacidad resistente que los cálculos analíticos. La mejor aproximación (VAEQ) se ha obtenido por medio de la consideración que la sección permanece plana luego de sufrir las deformaciones por flexión, lo que nos lleva a analizar la sección como una de hormigón armado tradicional, conociendo el tipo de falla dúctil, por rotura de hormigón por falla a compresión debido al alargamiento excesivo de la chapa, con las propiedades utilizadas en los modelos numéricos. Los análisis normativos usuales (VANO), no incluyen en el cálculo la armadura en la mesa comprimida de hormigón armado, lo que dio variaciones aún mayores con los modelos experimentales, además de que considera que la chapa trabaja únicamente a tensión de fluencia, lo que no representa lo observado en los modelos numéricos realizados en la investigación, en donde se nota claramente que la armadura una vez entra en fluencia posee un aumento de resistencia a una tasa menor que en el régimen elástico pero que colabora en la resistencia última de la sección. En general ambos modelos analíticos desarrollados representaron los siguientes porcentajes de la carga última de ensayo:

Tabla 12: Porcentaje de carga última experimental promedio alcanzada en los métodos analíticos

Análisis	%VPRO
VANO	76.06
VAEQ	81.72

- FISURACIÓN

En general las fisuras que se presentan fueron debido a la excesiva deformación de la chapa plegada, lo que obligó al eje neutro a posicionarse dentro de la losa, una vez que el hormigón superó su carga de tracción se generaron las fisuras que traspasaron la fuerza de tracción a las armaduras inferiores de la losa y de este modo se lleva al hormigón hasta su máxima carga de compresión donde se observa una falla por compresión, dejando en evidencia las fisuras y fallas de rotura.



Figura 105: Vista de la viga 3 en el momento de máxima deformación



Figura 106: Disposición de fisuras, final de las fisuras medida desde el borde superior de la losa aproximadas a la profundidad calculada = 50 mm



Figura 107: Disposición de fisuras en viga 3, vista de fisuras verticales y horizontal

- COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA UNIÓN

Como parte de los objetivos específicos está el de identificar el tipo de comportamiento estructural entre la unión de la chapa plegada con la mesa de hormigón armado.

Para resolver esta incógnita tomaremos los modelos, ~~VNPHE~~=Viga numérica con pernos y hormigón elástico (VNPHE), ~~VNEHE~~=Viga numérica con empotramientos entre la chapa y la losa y hormigón elástico (VNEHE),

De acuerdo a los valores de deformación observados en todos los modelos realizados con el programa ANSYS, y reflejados en las curvas de Carga Deformación, no se aprecian grandes diferencias en el tipo de unión de ambos elementos. En conclusión, no se tienen diferencias significativas entre los modelos que representan ligaciones por pernos o que representan ligaciones con empotramientos para la disposición de pernos utilizados en este experimento.

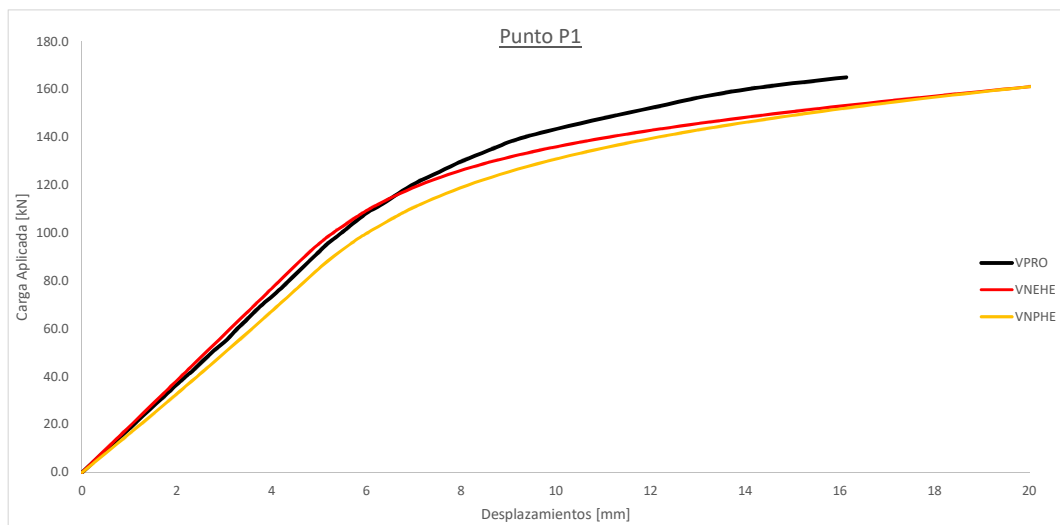


Figura 108: Carga-Desplazamiento punto 1

5. COMPARATIVAS ENTRE MODELO ELÁSTICO SEGÚN SAP2000 Y LOS MODELOS EXPERIMENTALES

A continuación, se muestra la planilla de Carga en kN y Desplazamiento en mm con los valores de:

VPRO: Valores medidas en los especímenes de prueba en el punto P1 en promedio;

VSAP: Valores resultantes de la modelación con el SAP2000 tomadas en el punto P1;

%: Relación en porcentaje de VPRO/VSAP.

Si observamos los valores porcentuales de variación de las deformaciones comparadas, vemos que existe una franja de valores que se mantiene en un rango de valores aproximadamente similar, se pudiera decir que el modelo de elementos finitos elaborado con ayuda del SAP2000 representa al modelo experimental promedio.

Tabla 13: Tabla comparativa de valores de Carga y Desplazamiento en los modelos experimentales y de elementos finitos según SAP2000

CARGA		P1		
MPa	kN	VPRO	VSAP	%
0	0.0	0	0.00	100
9	38.0	2.07	1.65	80
10	42.0	2.31	1.82	79
11	46.5	2.55	2.00	79
12	51.0	2.79	2.19	78
13	55.5	3.06	2.37	77
14	60.0	3.28	2.56	78
15	64.5	3.52	2.74	78
16	69.0	3.74	2.93	78
17	73.0	3.98	3.09	78
18	77.0	4.21	3.26	77
19	81.5	4.44	3.44	78
20	86.0	4.68	3.63	78
21	90.5	4.92	3.82	78
22	95.0	5.15	4.00	78
23	99.5	5.44	4.19	77
25	108.0	5.99	4.54	76
26	112.0	6.34	4.70	74
27	116.5	6.68	4.89	73
28	121.0	7.06	5.07	72
29	125.5	7.54	5.26	70
30	130.0	8.02	5.44	68
31	134.5	8.59	5.63	66
32	139.0	9.17	5.81	63
33	143.5	10.03	6.00	60
34	148.0	11.02	6.19	56
35	152.5	12.08	6.37	53
36	157.0	13.14	6.56	50
37	161.0	14.39	6.72	47
38	165.0	16.13	6.89	43

La franja de valores comprendidos desde la carga de 13 MPa con 77 % de variación porcentual representa un límite inferior y la carga de 25 MPa representaría un límite superior de la carga, manteniendo un porcentaje de variación de 76%. Por otra parte, si observamos los valores de tensión medidos en la chapa dentro del modelo numérico generado por el programa ANSYS, da un valor de tensión próximo al de fluencia.

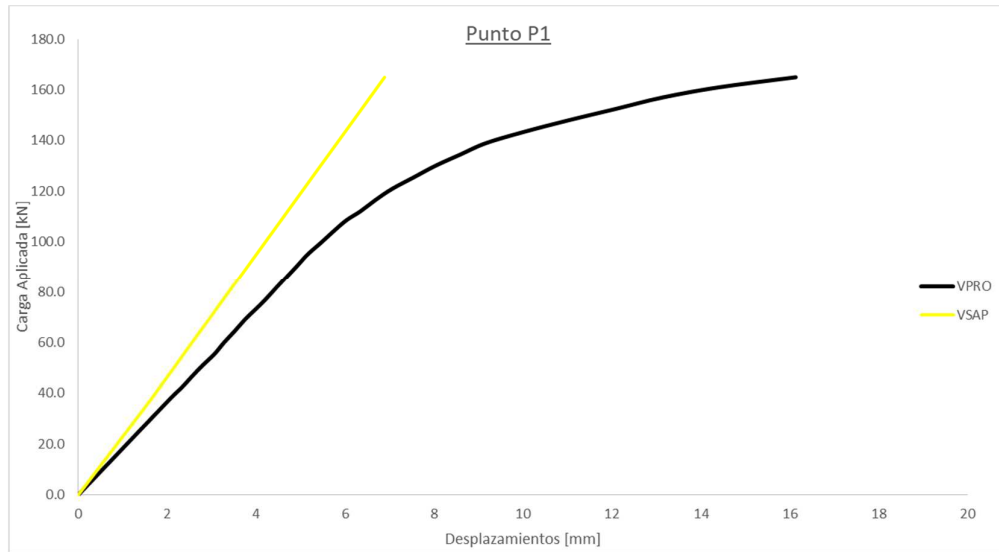


Figura 109: Curva carga desplazamiento medidas en el punto P1, de los valores experimentales promedios y los valores resultados del SAP2000

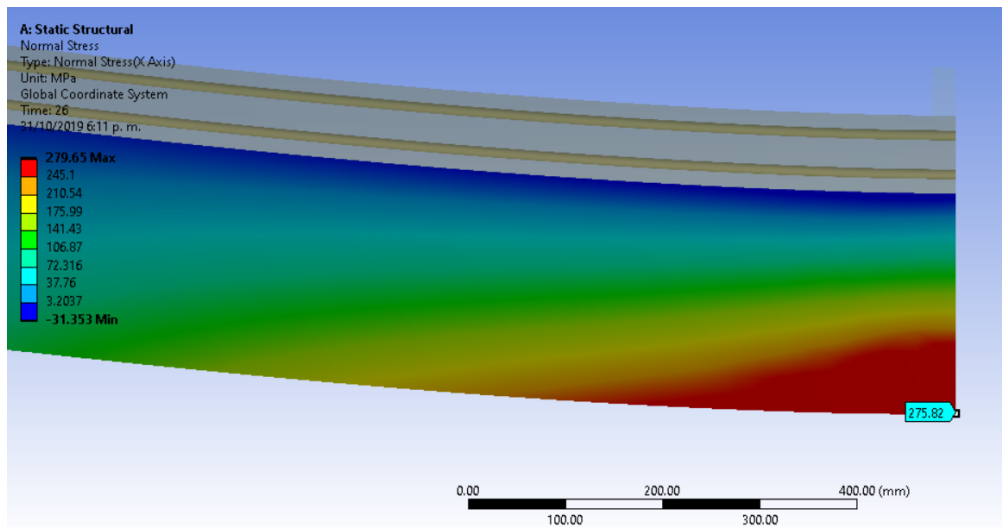


Figura 110: Tensión en la chapa = 275.82 MPa, según modelo VNEHE para carga aplicada de 108 kN, tomado del modelo ANSYS

CAPITULO 5

- CONCLUSIÓN

La utilización conjunta de estructuras en hormigón y acero permite aprovechar las mejores características de cada material. La revisión bibliográfica evidenció que el sistema de chapa doblada y hormigón puede ser una solución para el uso en puentes pequeños y donde se necesite una rápida acción

Este trabajo tuvo el objetivo de ser un aporte para la utilización de estructuras mixtas con chapas plegadas de acero.

A lo largo de la investigación se ve la importancia del tema tratado, debido principalmente al alto contenido bibliográfico desenvuelto en la actualidad. El trabajo se centra en un contraste de resultados entre modelos numéricos y experimentales, así como a las aproximaciones analíticas obtenidas de los recursos bibliográficos y de los métodos de cálculo tradicionales. Tanto la cuantificación como la descripción de la experiencia, junto con el gran aporte teórico de las bibliografías, son las herramientas para desarrollar las siguientes conclusiones y recomendaciones.

El conjunto estructural de estudio presentó una unión constructiva solidaria entre la chapa y la mesa de hormigón, esto hizo que los modelos adoptados para representar la prueba experimental en el modelo numérico no presentaran grandes diferencias entre aquellos en los que fueron representados con pernos de unión o como un simple empotramiento.

En un principio se utilizó todo el modelo con sus componentes generados como sólidos, esto debido a la gran facilidad de trabajo que implica al realizar el modelo en el programa de elementos finitos ANSYS Workbench, asimilando fácilmente los contactos y la generación de los componentes estructurales. Como la representación de la prueba carga desplazamiento fue altamente representada por la plasticidad del acero en los modelos de sólidos se dejó de lado los comportamientos no lineales físicos propios del hormigón, lo que ayuda a disminuir el tiempo de cálculo. Fue preparado un segundo modelo con elementos de lámina para la chapa doblada y colocada las no linealidades del hormigón en donde se apreciaron aproximaciones mejores en la zona plástica del ensayo. En general la estructura se vio influenciada por el comportamiento de la chapa de acero, motivo por el cual es sumamente ventajoso al instante de determinar las deflexiones en este tipo de

estructura considerar el comportamiento elástico del hormigón para ahorrar tiempo de cálculo. Fueron evidenciados desplazamientos medidos en las pruebas de cargas que no corresponden a los desplazamientos de las cargas aplicadas contra la rigidez a flexión de la estructura, sino que se encuentran adicionados pequeños efectos parásitos de la estructura por efecto del acomodo de los materiales, así como alivio de tensiones generadas por la retracción del hormigón y el proceso de soldadura de los pernos.

En lo que respecta a carga de falla de la estructura, se evidenció que el eje neutro se encontraba dentro de la losa por el fallo experimentado en las pruebas de carga, las capacidades portantes experimentales fueron mayores a los cálculos normativos y también, si bien en escala menor, a los cálculos por equilibrio de la sección en flexión. La principal discrepancia entre los cálculos analíticos fueron que estos no consideraron la presencia de armadura en la losa comprimida así como la ganancia de resistencia de la chapa entre el régimen plástico hasta la rotura, la segunda discrepancia es que los cuerpos experimentales posiblemente hayan tenido mayor resistencia a compresión en los hormigones, debido a que las probetas ensayadas fueron mantenidas en agua de curado hasta el momento de los controles tecnológicos del hormigón, mientras que los cuerpos experimentales no fueron sumergidos y pudieron poseer una ganancia de resistencia mayor al estar expuestos a una temperatura ambiente más variable y alta.

Si observamos los valores porcentuales de variación de las deformaciones comparadas vemos que existe una franja de valores que en fin representa el tramo elástico del conjunto de materiales y que se mantiene en un rango de valores aproximadamente similar, se pudiera decir que el modelo de elementos finitos elaborado con ayuda del SAP2000 representa al modelo experimental promedio en la fase elástica.

- **RECOMENDACIONES**

Con los resultados obtenidos y las observaciones realizadas en el trabajo se dan las siguientes recomendaciones correspondientes:

Evaluar disposición de pernos en forma variable.

Probar distintos espesores de chapa de acero, conjuntamente variar el espesor de la mesa de compresión.

Aumentar el espesor del fondo de la chapa doblada, mejorando el desempeño de la viga de acero.

Disponer de medidores de desplazamiento lineal de mayor orden a fin de tener valores indicativos del punto de rotura del cuerpo de prueba.

Aumentar el espesor de la chapa de acero, disminuyendo el espesor de la mesa de compresión con el fin de lograr la rotura frágil de la muestra. En este trabajo se ha observado una rotura del hormigón por deformación excesiva del acero es decir una rotura dúctil, la idea sería aumentar la cantidad de acero con el fin de revertir el tipo de falla.

BIBLIOGRAFÍA:

1. -ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8800 (2008) Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro.
2. -ANSYS. Documentation. ANSYS, Inc.
3. -American Welding Society (AWS), Miami, Florida, (2011)
4. -ASTM A370 Métodos y definiciones para las pruebas mecánicas de los productos de acero de prueba estándar
5. -Azizinamini, Atorod. (2009). “A New Era for Short-Span Bridges.” Modern Steel Construction. AISC. September.
6. -AISC (1963), Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges, American Institute of Steel Construction. Chicago, IL
7. -Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD)
8. -Biblioteca Google digital de Libros de Dominio Público
9. -Brent Phares, Yaohua (Jimmy) Deng, and Owen Steffens, Evaluation of a Folded Plate Girder Bridge System, June 2017, Bridge Engineering Center Iowa State University
10. -Burgueño, Rigoberto, PhD. and Pavlich, Benjamin S. Evaluation of Prefabricated Composite Steel Box Girder Systems for Rapid Bridge Construction
11. -Barth, K. J. Mash & G. Michaelson, Development of a shallow press-brake formed tub girder for short-span steel bridges, West Virginia University, Morgantown, WV, USA,
12. -Código de Soldadura Estructural – Acero (Structural Welding Code – Steel) American Welding Society, 2015
13. -Computers and Structures (CSI). SAP 2000 Plus v.21.02 – Integrated Software for Structural Analysis & Design
14. -Conrad P Heins, Jr. Designers Guide to Steel Box Girder Bridges, Bethlehem Steel -Corporation, Pennsylvania, Booklet No. 3500
15. -Chaves, Igor Avelar, Viga mista de aço e concreto constituída por perfil formado a frio preenchido, Escola de Engenharia de Sao Carlos da Universidade de Sao Paulo, Sao Carlos, Brasil (2009).
16. -Eurocodes. Euro código N°4: Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón. “EN 1994-1-1”.



17. -Folded Plate Girder System, <http://foldedplate.com/>
18. -Fernández, William Luiz, Software para análise e dimensionamento de vigas mistas aço-concreto, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. -Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção metálica. em pontes rodoviárias - 2008.
19. -Garino, Patricia, Estructuras mixtas de acero y hormigón, Universidad de la Republica, Montevideo Uruguay (2010)
20. -Glaser, Luke A., "Constructability Testing of Folded Plate Girders" (2010). Civil Engineering Theses, Dissertations, and Student Research. 9.
21. -Gere, J. E. e Timoshenko, S. P. (1983). Mecânica dos sólidos. Livros Técnicos e Científicos Editora, v. 1.
22. -Gibbs, Cory L., "Field Performance Assessment of Press-Brake-Formed Steel Tub Girder Superstructures" (2017). Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports. 5671. <https://researchrepository.wvu.edu/etd/5671>
23. -Hildemar Hernández, Jorge Bonilla, Gilberto Rodríguez Study of the behavior of composite beams made of concrete and steel by using numerical simulation Universidad de Ciego de Ávila, Ciego de Ávila. CUBA, Revista Ingeniería de Construcción Vol. 29 No1, Abril de 2014 www.ricuc.cl Pag. 5-21
24. -Michaelson G (2014) Development and Feasibility Assessment of Shall Press-Brake-Formed Steel Tub Girders for Short Span Bridge Applications. PhD. Thesis, West Virginia University
25. -Liang, Q. Q., Uy, Brian, Bradford, Mark A. Ronagh Hamid R. Strength Analysis of Steel – Concrete Composite Beams in Combined Bending and Shear, Constructional Steel, Research. v.60, p.1109-1128.
26. -Lucas Henrique Reginato, Estudo da Largura Efetiva de Vigas Mistas de Aço-Concreto em Carregamento de Serviço: Método dos Elementos Finitos versus Códigos de Projeto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre - RS - Brasil 2017
27. -Oliveira, L. A. F. (2001). Estudo do comportamento e da resistencia das vigas mistas aco-concreto constituídas por perfis formados a frio e lajes prefabricadas. Dissertacao (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 92 p.
28. -Paul Horbaly, Accelerated Bridge Construction accomplished with - Press brake formed or folded steel plate girders. West Virginia University, 2014

29. -Pelke, Eberhard, Kurrer, Karl-Eugen, On the Evolution of Steel-Concrete Composite Construction, 5th International Congress on Construction History.
30. -Pu Ke, Mengmeng Guo, Lixin Xia, The Influence of Common Closed Longitudinal Rib Sections on Stress Distribution of Orthotropic Decks, Kashgar University .School of Civil Engineering, China - International Conference on Architectural, Civil and Hydraulics Engineering (ICACHE 2015).
31. -Repositorio Institucional da UFOP, en Escola de Minas, DECIV, Departamento de Engenharia Civil, PROPEC - Mestrado, <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2733>
32. -Pamela Renon Eller, Pré-dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto para Pontes de pequeno porte, Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Minas G.Brasil-2011
33. -Pfeil, Walter, Estruturas de aço: dimensionamento prático I Walter Pfeil, Michele Pfeil . - 8.ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2009.
34. -Silva, Augusto Ottoni Bueno da, Trelica tubular mista com multiplos paineis Vierendeel / Augusto Ottoni Bueno da Silva. --Campinas, SP: [s.n.], 2013.
35. -Slutter, R. G. and Driscoll, G. C. Jr., "Flexural strength of steel and concrete composite beams," (1963). Fritz Laboratory Reports. Paper 1806. <http://preserve.lehigh.edu/engr-civil-environmental-fritz-lab-reports/1806>
36. -Sit, Man Hou, "Field and Analytical Studies of the First Folded Plate Girder Bridge" (2014).Masters Theses. 46. [Thttps://scholarworks.umass.edu/masters-theses/2/46](https://scholarworks.umass.edu/masters-theses/2/46)
37. -Structural Welding Code—Steel ,AWS D1.1/D1.1M:2015
38. -TecCivil, 1505 44th Street, Suite B SW, Wyoming, MI 49509, PH. (616) 261-8630, www.constructbridge.com, Con-Struct™ Prefabricated Bridge System, (2017)
39. -Trindade, Luiz Gustavo Cruz. Analise estrutural de vigas trelicadas de aco com mesa de concreto. – Ilha Solteira: (s.n.), 2015
40. -Tristao, G. A. (2002). Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aco-concreto com analise da resposta numerica. Dissertacao (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de Sao Carlos, Universidade de Sao Paulo. Sao Carlos, 126 p.
41. -Underwood, Nicole Marie Hegele, "Field Performance and Rating Evaluation of a Modular Press-Brake-Formed Steel Tub Girder with a Steel Sandwich Plate Deck" (2019). Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports. 3871. <https://researchrepository.wvu.edu/etd/3871>

ANEXO

- ANEXO 1 ENSAYO CHAPA METÁLICA

Certificado del ensayo en el laboratorio de metalúrgica del INTN en Asunción.

	INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA, NORMALIZACIÓN Y METROLOGÍA		GOBIERNO NACIONAL	<i>Paraguay de la gente</i>
---	---	---	------------------------------	---------------------------------

INFORME DE ENSAYO

Cliente: RAFAEL PRIETO FLORENTIN	METL N°: 0238 / 2019
Dirección: Teodocio González N° 1168	Entrada N°: 204138 / 2019
Dpto. ejecutor: Metalurgia-ONI	

Fecha de recepción: 14-02-2019	Fecha de inicio del servicio: 18-02-2019
---------------------------------------	---

Descripción del/los ítem/s de ensayo: 1 (una) muestra de probeta normalizada para ensayo de tracción.



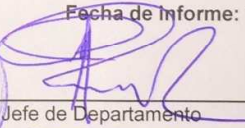
ENSAYO DE TRACCION (NORMA ASTM A 370)

Items	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Carga de Fluencia (kN)	Carga Máxima (kN)	Tensión de Fluencia Mpa	Resistencia a la Tracción /Mpa	Alarg./%
M 1	12,10	2,70	32,67	9,00	14,56	275	446	27,90

Notas

- La longitud inicial para el cálculo del Alargamiento Porcentual fue de 50,80 mm.
- El/Los resultado/s obtenido/s corresponden única y exclusivamente a la/s muestra/s ensayada/s, que fueron suministradas por el solicitante.
- No se podrá reproducir total o parcialmente el presente documento sin la autorización del laboratorio.

Fecha de informe: 19-02-2019

 Profesional / Técnico Ing. Ulises Larrosa Único Departamento Metalurgia INTN		 Jefe de Departamento Ing. GUSTAVO ROMAN Jefe Dpto. Metalurgia I.N.T.N.
---	---	--

Fin del informe
FOR -ONI-34 Version 04

Página 1 de 1

TEMBIPOTA: Oipytyvô tekoaty, mba'eapopyha, ñemureko ha opaité mba'e'aporáme, taha'e jehapereka, kuave'ëmby ñepytyvômbý, mbojojaha, mba'era'ãha, tendyry ñangareko rupive, avei kuatia mboaje ha jesareko iporáve ha'gua mba'eapopy, kuave'ëmby tapichakuéra jeikoporá ha tekomo'ã, tembiapo omomba'eguasuva tekoaty ha tekoha reheve. **MISION:** Contribuir con la sociedad, la industria, el comercio, el sector productivo, mediante la investigación, servicios de asistencia técnica, normalización, metrología, seguridad eléctrica, certificación e inspección, para el mejoramiento de la calidad de los productos, los servicios, el bienestar y seguridad de las personas, con un enfoque de responsabilidad social y ambiental. **TEMBIHECHA:** Temimoĩmby hembiapopyahukuáva ha ojepytyaso añetéva, ojehechakuáva tetápyre ha tetá ambue rupi omo'guahé porá rehe kuave'ëmbyeta puruharakuérape, imba apoharakuéra ikatupyry ha imba'erechakuágui, ha upéichante avei oipytyvôhaguére tekoatyre. **VISION:** Ser una institución innovadora y competitiva.

- ANEXO 2 CALIBRACIÓN GATO HIDRÁULICO

Certificado de calibración del manómetro XZT



Epifanio Méndez Fleitas 4035 – Asunción – Paraguay
+59521522181
proem@proem.com.py

EQUIPO CALIBRANDO

- GATO HIDRAULICO CON MANOMETRO DE 700 BAR DE CAPACIDAD

Capacidad máxima alcanzada: 600 bar

Visor: XZT digital pressure gauge

Unidades de medida: BAR, MPa, kg/cm² y PSI

EQUIPO PATRON

Equipo de verificación: Celda de carga de 300 kN marca MATEST y transductor de fuerza.

Elaborado por: Ing. Fabio Servín

Observaciones: El equipo fue sometido hasta 600 bar debido que a presiones mayores se presencié retorno del fluido de compresión.

TABLA DE RELACIÓN PRESIÓN/FUERZA

PRESIÓN EN MANOMETRO				FUERZA	
BAR	MPa	kg/cm ²	PSI	kN	TON
0	0	0,0	0	0	0,0
20	2	20,4	290	8	0,8
40	4	40,8	580	16	1,7
60	6	61,2	870	25	2,6
80	8	81,6	1160	34	3,4
100	10	102,0	1450	42	4,3
120	12	122,4	1740	51	5,2
140	14	142,8	2031	60	6,1
160	16	163,2	2321	69	7,0
180	18	183,5	2611	77	7,9
200	20	203,9	2901	86	8,8
220	22	224,3	3191	95	9,7
240	24	244,7	3481	104	10,6
260	26	265,1	3771	112	11,5
280	28	285,5	4061	121	12,4
300	30	305,9	4351	130	13,3
320	32	326,3	4641	139	14,1
340	34	346,7	4931	148	15,1
360	36	367,1	5221	157	16,0
380	38	387,5	5511	165	16,9
400	40	407,9	5802	174	17,7
420	42	428,3	6092	183	18,7
440	44	448,7	6382	192	19,6
460	46	469,1	6672	201	20,5
480	48	489,5	6962	210	21,4
500	50	509,9	7252	219	22,3
520	52	530,3	7542	227	23,2
540	54	550,8	7832	236	24,1
560	56	571,0	8122	245	24,9
580	58	591,4	8412	254	25,9
600	60	611,8	8702	262	26,8

Tab.: Relación de unidades de medida de presión / fuerza

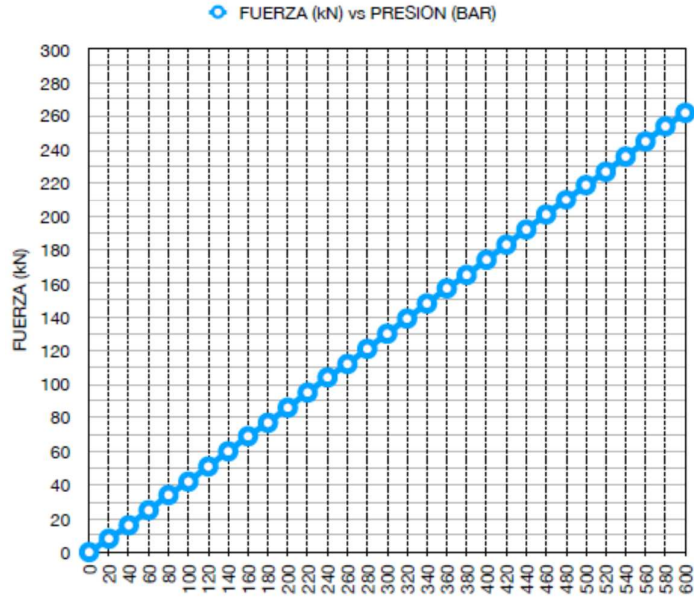


Fig.: Relación, fuerza, presión

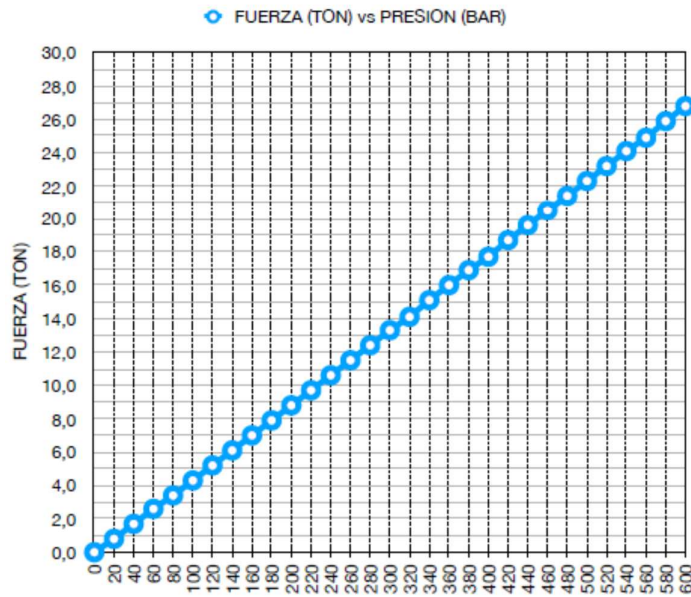


Fig.: Relación, fuerza, presión

- ANEXO 3 RESULTADOS DEL PROCESAMIENTO CON EL SAP2000

TABLE: Joint Displacements				
Joint	OutputCase	U3-P1	U3-P2	U3-P3
Text	Text	mm	mm	mm
925	COMB1	-0.2	-0.3	-0.2
925	COMB2	-0.4	-0.4	-0.3
925	COMB3	-0.6	-0.6	-0.4
925	COMB4	-0.7	-0.8	-0.5
925	COMB5	-0.9	-1.0	-0.6
925	COMB6	-1.1	-1.2	-0.7
925	COMB7	-1.3	-1.4	-0.8
925	COMB8	-1.5	-1.6	-0.9
925	COMB9	-1.7	-1.8	-1.0
925	COMB10	-1.8	-2.0	-1.1
925	COMB11	-2.0	-2.2	-1.2
925	COMB12	-2.2	-2.4	-1.4
925	COMB13	-2.4	-2.6	-1.5
925	COMB14	-2.6	-2.8	-1.6
925	COMB15	-2.7	-3.0	-1.7
925	COMB16	-2.9	-3.2	-1.8
925	COMB17	-3.1	-3.3	-1.9
925	COMB18	-3.3	-3.5	-2.0
925	COMB19	-3.4	-3.7	-2.1
925	COMB20	-3.6	-3.9	-2.2
925	COMB21	-3.8	-4.1	-2.4
925	COMB22	-4.0	-4.3	-2.5
925	COMB23	-4.2	-4.5	-2.6
925	COMB24	-0.1	-0.1	-0.1
925	COMB25	-4.5	-4.9	-2.8
925	COMB26	-4.7	-5.1	-2.9
925	COMB27	-4.9	-5.3	-3.0
925	COMB28	-5.1	-5.5	-3.1
925	COMB29	-5.3	-5.7	-3.3
925	COMB30	-5.4	-5.9	-3.4
925	COMB31	-5.6	-6.1	-3.5
925	COMB32	-5.8	-6.3	-3.6
925	COMB33	-6.0	-6.5	-3.7
925	COMB34	-6.2	-6.7	-3.8
925	COMB35	-6.4	-6.9	-3.9
925	COMB36	-6.6	-7.1	-4.1
925	COMB37	-6.7	-7.3	-4.2
925	COMB38	-6.9	-7.5	-4.3
925	COMB39	-8.7	-9.5	-5.4

Tab.: Valores de desplazamiento según SAP2000, U3= Viga 3, P1/2/3= puntos de medición de los valores de desplazamiento.

- ANEXO 4 RESISTENCIA ÚLTIMA DE LA SECCIÓN

CONDICIÓN: SECCIÓN COMPACTA Y LIGACIÓN TOTAL

REF.: WALTER PFEIL 10.2.5 (2008) PARA CARGA DE FLUENCIA SIN ARMADURA DE COMPRESIÓN

$$f_y = 275$$

$$f_c = 20$$

$$b_e = 450$$

$$h_c = 80$$

$$h_s = 229.7 + 1.5 = 231.2$$

$$y_s = h_s - CG_s = 139.082$$

$$CG_s = 92.118$$

$$\gamma_c = 24$$

$$A_s = 1.785 \times 10^3$$

$$x = f_y * A_s / f_c * b_e = 54.537$$

$$M = f_y * A_s * y_s + h_c - x \cdot 21000000 = 94.149$$

$$M_q = \gamma_c * b_e / 1000 * h_c / 1000 * 2.728 = 0.787$$

$$P = \frac{M - M_q}{2.7} * 4 - 0.6 = 137.714 \text{ kN}$$

- ANEXO 5 COMPARACIÓN VIGA DE HORMIGÓN Y VIGA MIXTA

Comparación entre viga mixta de chapa plegada y losa de compresión de hormigón y viga T de hormigón

El objetivo del presente anexo es simplemente exponer 2 opciones de vigas de igual longitud y con misma placa de compresión de hormigón y su respectivas respuestas a la acción de una carga viva representada por un tren de carga similar al tren de carga de AASHTO 3.6.1.2.2 Camión de diseño y 3.6.1.2.4 Carga de carril.

En ambos casos se medirá el desplazamiento inmediato mayor del vano tomado del programa SAP2000.

1 Características de los materiales:

Densidad hormigón (N/mm³)

$$\gamma_{\text{horm}} := 2.5 \cdot 10^{-5}$$

Densidad asfalto (N/mm³)

$$\gamma_{\text{asf}} := 2.2 \cdot 10^{-5}$$

Densidad acero (N/m³)

$$\gamma_{\text{ac}} := 7.7 \cdot 10^{-5}$$

Fluencia del acero (N/mm²)

$$f_y := 420$$

Acero tipo A36, tensión mínima de fluencia (N/mm²)

$$\sigma_{\text{adm}} := 2531$$

Resistencia característica del hormigón (N/mm²)

$$f_y := 25$$

Soldadura tipo filete electrodo E60_[HSL2]

2 Geometría:

. Viga T de hormigón:

Ancho de base, b (mm)

$$b := 240$$

Altura de viga, h_v (mm)

$$h_v := 620$$

Altura de losa compresión, h_l (mm)

$$h_l := 180$$

Ancho de la losa de compresión (mm)

$$b := 1200$$

Longitud de viga, l (mm)

$$l := 8000$$

Volumen total de hormigón (mm^3)

$$V_h := 2.7712 \cdot 10^9$$

Peso de la viga (N)

$$V_h \cdot \gamma_{\text{horm}} = 6.93 \times 10^4$$

[HSL3]

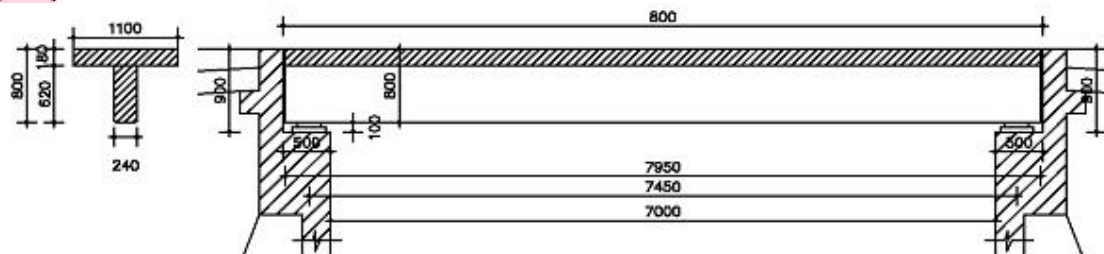


Figura: Representación de la viga de hormigón, apoyada en un estribo de puente, se ve sección transversal

3 Geometría:

Viga de chapa doblada

Ancho de base, b(mm)

$$b := 400$$

Altura de viga, hv (mm)

$$h_v := 520$$

Espesor de la chapa metálica t (mm)

$$t := 6$$

Altura de losa compresión, hl (mm)

$$h_l := 180$$

Ancho de la losa de compresión (mm)

$$b := 1200$$

Longitud de viga, l(mm)

$$l := 8000$$

Volumen mesa de hormigón (mm³)

$$V_{mh} := 1.584 \cdot 10^9$$

Peso de la mesa (N)

$$P_{mh} := V_{mh} \cdot \gamma_{horm} = 3.96 \times 10^4$$

Perímetro (mm) $per := 1535$

Superficie extremos (mm²)

$$sup_{ext} := 285780.35$$

Volumen de acero (mm³)

$$V_{ca} := (\text{sup}_{\text{ext}} \cdot 2 + \text{per} \cdot 1) \cdot t = 7.71 \times 10^7$$

Peso chapa metálica (N)

$$p_{ch} := \gamma_{ac} \cdot V_{ca} = 5.94 \times 10^3$$

Peso de la viga mixta (N)

$$P_{vm} := p_{mh} + p_{ch} = 4.55 \times 10^4 \quad \text{[HSL4]}$$

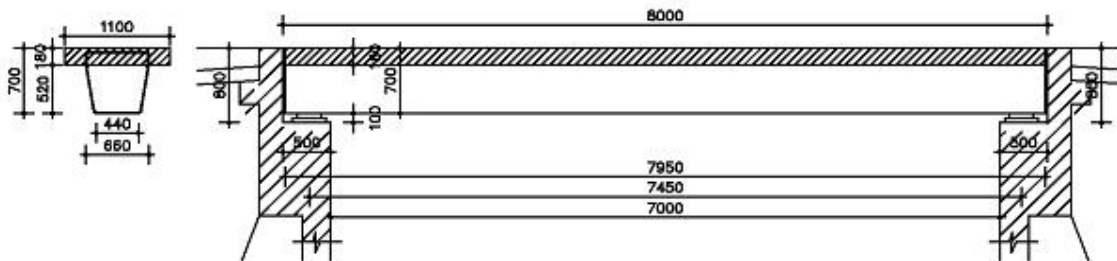


Figura: Representación de la viga de chapa plegada, apoyada en un estribo de puente, se ve sección transversal

4 Modelo de elementos finitos:

Se usa el programa SAP2000V21, con el fin de modelar ambas vigas. El modelo en cada caso está compuesto de elementos de chapa tipo Shell y elementos de barras.

La viga de hormigón: La losa está representada por una placa tipo Shell de espesor constante $t=180$ mm y $b=1200$ mm de ancho, el largo es igual a $L=8000$ mm, La viga se representa por medio de una barra de sección rectangular de ancho $a=240$ mm y altura total $h=800$ mm.

La viga de chapa plegada: La losa es similar para ambos, la viga de chapa metálica está representada por elementos Shell. En la viga metálica se colocaron dos cierres en los extremos para mejorar el apoyo y la estabilidad general. La viga metálica tiene una altura de $h=520$ mm, chapa de espesor $t=3$ mm

Esquema estático: Viga simplemente apoyada, un extremo tiene apoyos que permiten la libre rotación pero está restringido de desplazarse, el otro extremo los apoyos pueden rotar y desplazarse.

Para determinar los esfuerzos: COMB 2: DL x 1,25 + LL x 1.75 x 1,3 + LL x 1.75

7 Resultados del procesamiento para la viga de hormigón

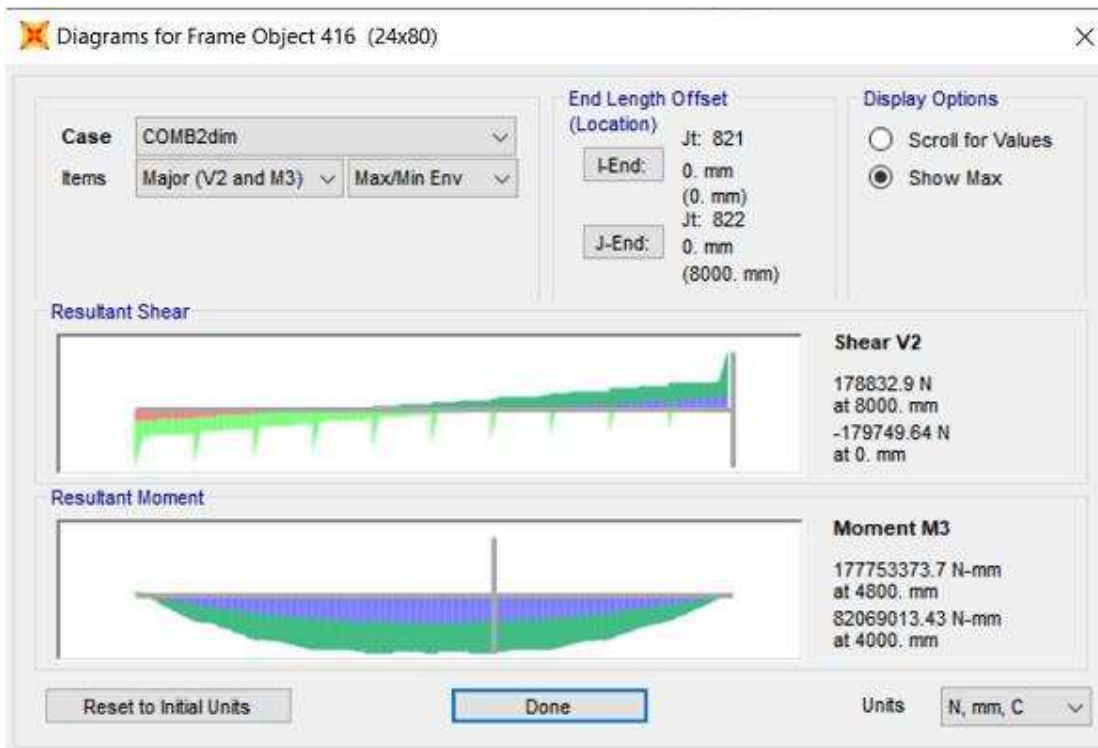


Figura: COMB2

Esfuerzo de corte máximo V2 y momento flector máximo y mínimo debido al móvil.

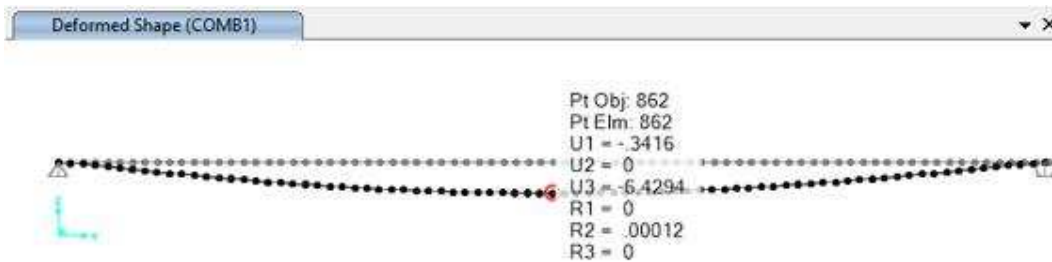


Figura: Deformación instantánea máxima para la carga de servicio= 6.43 mm

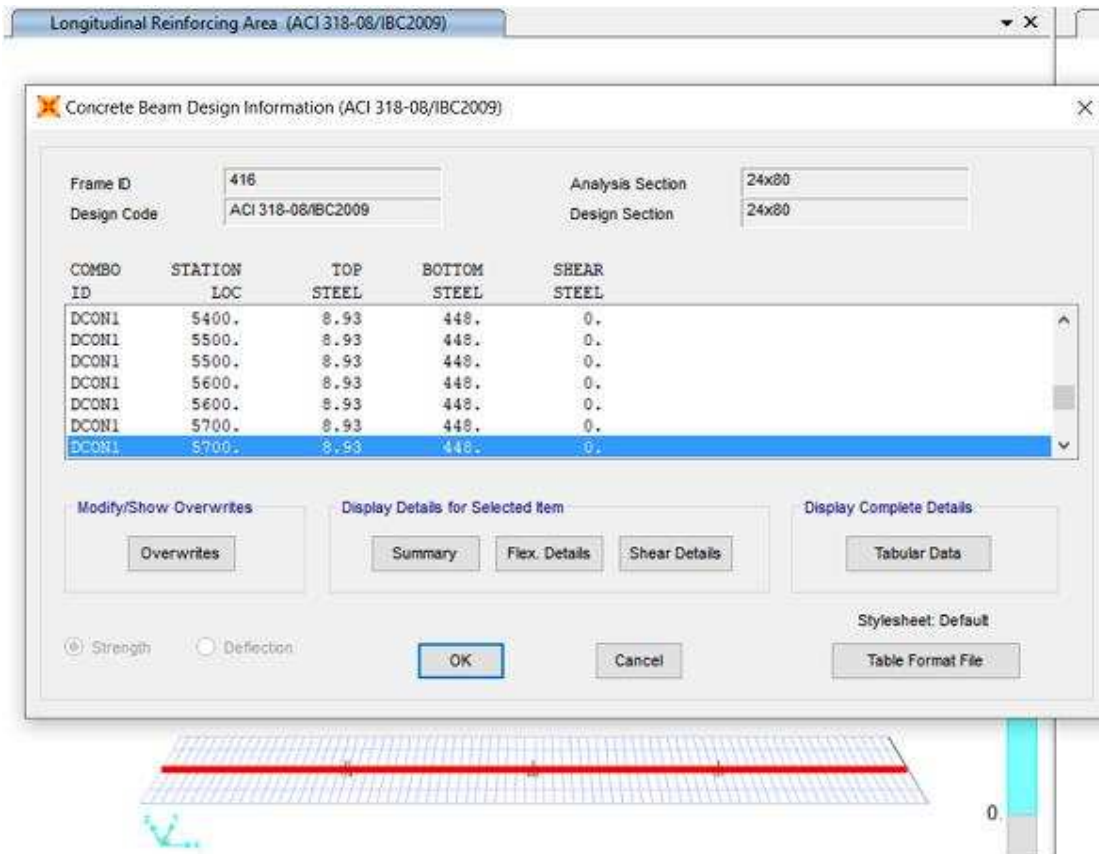


Figura: Armadura propuesta por SAP2000 con ACI318, A_s inferior= 448 mm², armadura de corte mínima.

8 Resultados del procesamiento para la viga mixta de chapa doblada

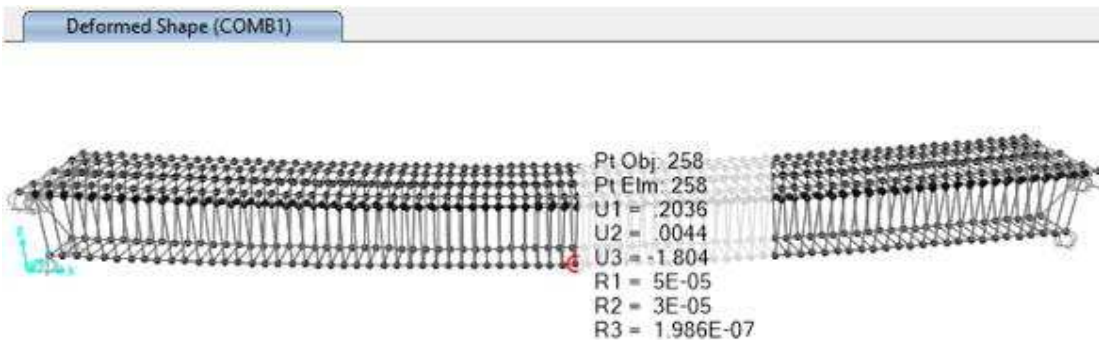


Figura: Deformación instantánea máxima para la carga de servicio= 1.8 mm

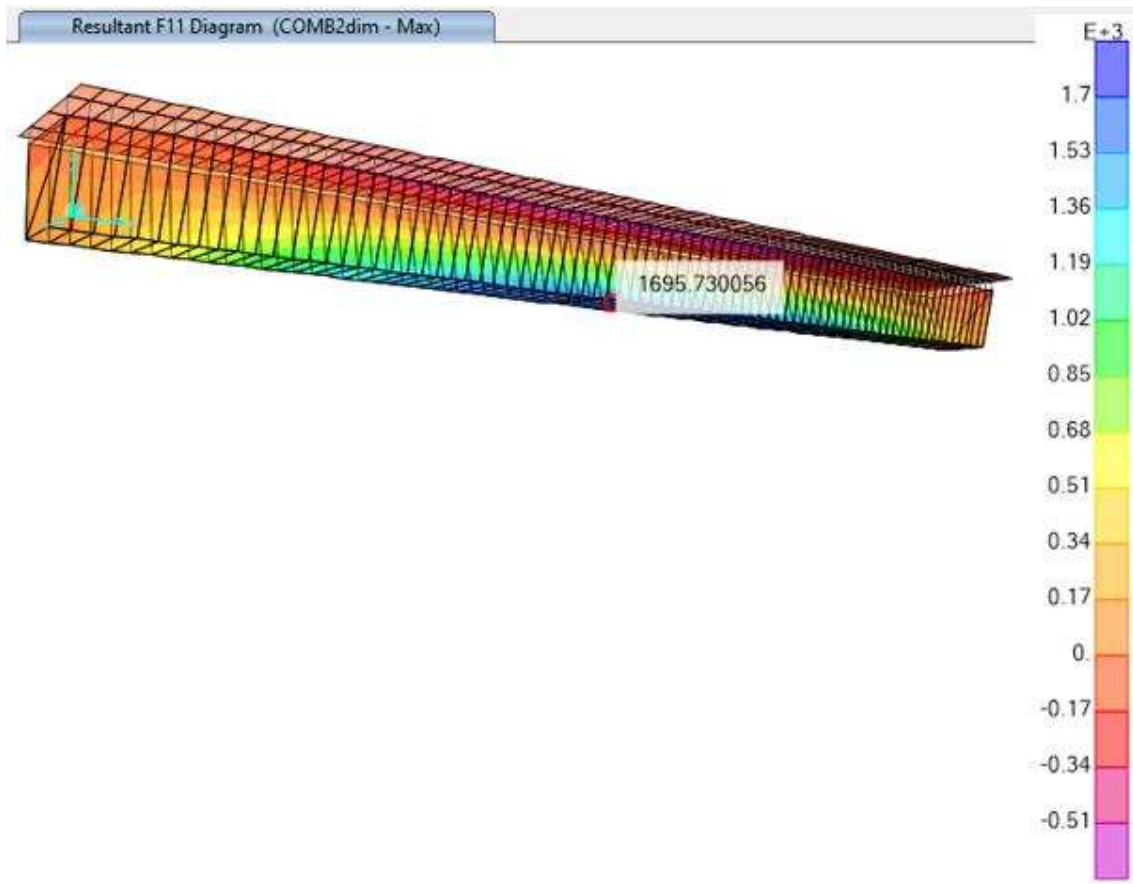


Figura: Resultados de Tensiones $F_{11} = 1695.73 \text{ N/mm}$

Algunas observaciones:

- El peso de la viga metálica mixta es aproximadamente 65 % más liviana
- La deformación instantánea en la viga mixta es 27 % menor que en la viga de hormigón
- La viga mixta tiene 100 mm altura total menor