

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Escuela de Posgrado



Estudio sobre el comportamiento a flexión de viga I
reforzada con CFRP para puente grúa de hasta 20 Ton

Tesis para obtener el grado académico de Maestro en Ingeniería
Mecánica que presenta:

presentado por:

José Luis Serna Landivar

Asesor:

Daniel Lavayen Farfan

Lima, 2025

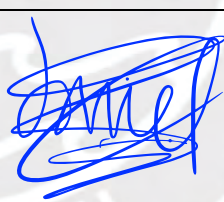
Informe de Similitud

Yo, **Daniel Lavayen Farfán**, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada “**Estudio sobre el comportamiento a flexión de viga I reforzada con CFRP para puente grúa de hasta 20 Ton**”, del autor **José Luis Serna Landívar**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 15%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 15/04/2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio, al ser todas las similitudes menores a 1%.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

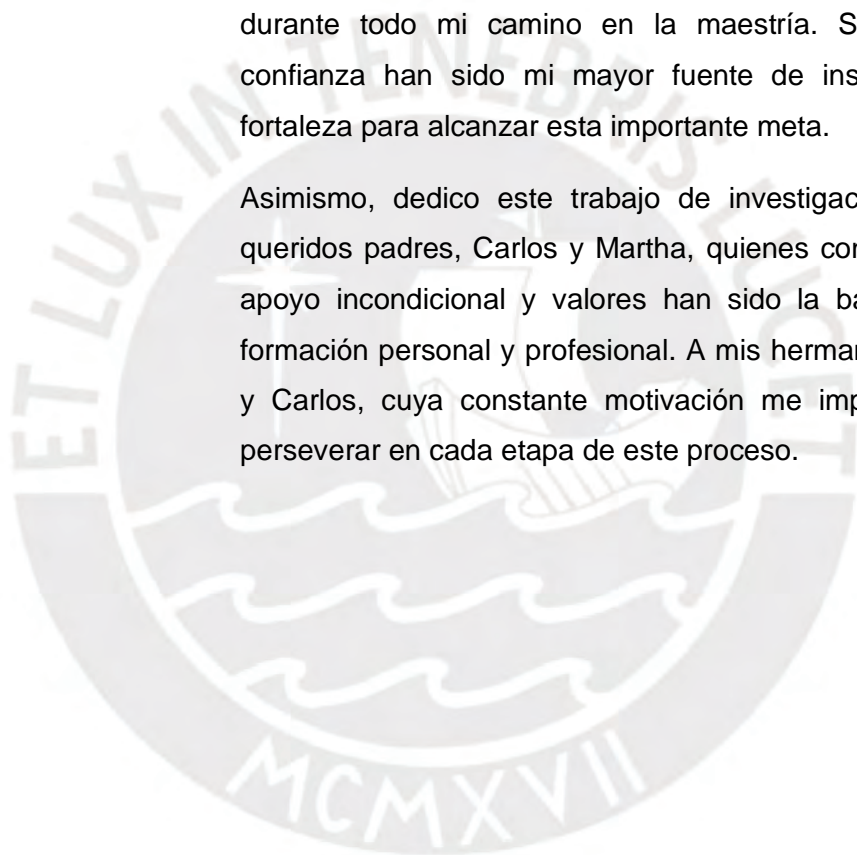
Lima, 15 de abril de 2025

Apellidos y nombres del asesor: <u>Lavayen Farfán, Daniel</u>	
DNI: 72965380	Firma 
ORCID: 0000-0003-2932-0238	

Dedicatoria

De manera especial, dedico este logro a mi pareja, por su apoyo incondicional, paciencia y sus palabras de aliento durante todo mi camino en la maestría. Su amor y confianza han sido mi mayor fuente de inspiración y fortaleza para alcanzar esta importante meta.

Asimismo, dedico este trabajo de investigación a mis queridos padres, Carlos y Martha, quienes con su amor, apoyo incondicional y valores han sido la base de mi formación personal y profesional. A mis hermanos, Leslie y Carlos, cuya constante motivación me impulsaron a perseverar en cada etapa de este proceso.



Agradecimiento

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para enfrentar cada desafío en este camino académico.

Quiero agradecer a mi pareja, quien ha sido mi mayor inspiración y motivación durante todo el proceso de esta maestría. Su paciencia, comprensión y aliento inquebrantable han sido fundamentales para superar cada obstáculo.

Además, el agradecimiento a mis padres, Carlos y Martha, por ser mi pilar de apoyo incondicional. Su amor, sacrificio y enseñanzas me han guiado en cada etapa de mi vida, permitiéndome alcanzar esta importante meta. A mis hermanos, Leslie y Carlos, por su constante motivación, que siempre me han impulsado a seguir adelante.

Mi agradecimiento al Dr. Daniel Lavayen Farfan por su guía, conocimiento y valiosas aportaciones en esta investigación. También agradezco al grupo de investigación Applied Mechanics, Machines and Mechanisms (AMMM) por su respaldo y colaboración. De igual manera, agradezco al CITE de Materiales de la PUCP por su apoyo fundamental en la realización de los ensayos de laboratorio.

Finalmente, agradezco a mis amigos y compañeros de maestría, quienes compartieron conmigo momentos de aprendizaje, anécdotas y a todas las personas que, de alguna manera, contribuyeron al logro de este objetivo.

Resumen

Este estudio investiga el comportamiento a flexión de vigas I reforzadas con polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) en puentes grúa con capacidad de carga de hasta 20 toneladas, con el objetivo de evaluar su rigidez estructural. La investigación se desarrolla debido a la necesidad de mejorar la rigidez, resistencia y factor de seguridad de las vigas principales de estos equipos críticos en la industria minera, mantenimiento y manufacturera. Además, se busca llenar un vacío en la normativa CMAA 70, que no contempla el uso de materiales compuestos como el CFRP en el refuerzo estructural.

Se analizaron los modelos numéricos y analíticos que permitieron evaluar el comportamiento de las vigas en cuatro configuraciones: sin refuerzo, con refuerzo inferior, con refuerzo superior y con refuerzo en ambas caras. Los resultados muestran que el uso de CFRP incrementa significativamente la rigidez y resistencia de las vigas, reduciendo las deflexiones hasta en un 8.1% y los esfuerzos en un 10.2%. Estas mejoras confirman la eficacia del refuerzo con CFRP para aplicaciones estructurales, cumpliendo con los parámetros de la norma CMAA 70 en cuanto a la rigidez y seguridad.

Se concluye que el refuerzo con CFRP es una solución viable para el diseño y la rehabilitación de puentes grúa, proporcionando un marco técnico para su diseño. Este estudio contribuye a la literatura científica al combinar análisis experimental, numérico y analítico, validando los refuerzos con CFRP en estructuras metálicas sometidas a cargas extremas

Índice

Informe de similitud	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimiento.....	iv
Resumen.....	v
Índice	6
Capítulo 1. Introducción	10
1.1 Problemática.....	10
1.2 Justificación	13
1.3 Alcances y limitaciones	13
1.4 Objetivos de la tesis	14
1.4.1 Objetivos específicos:.....	14
1.5 Metodología del trabajo.....	15
Capítulo 2. Marco Teórico.....	17
2.1 Introducción a los Materiales Compuestos.....	17
2.1.1 Definición y Clasificación de Materiales Compuestos	17
2.1.2 Micromecánica: Propiedades Elásticas de una Lámina Unidireccional con Fibras Continuas	19
2.1.3 Macromecánica: Teoría clásica de laminas.....	24
2.2 Reforzamiento de Vigas con CFRP	30
2.2.1 Métodos de Refuerzo y Técnicas de Aplicación del CFRP	30
2.3 Puente Grúa	32
2.3.1 Tipos de Puente Grúa	33
2.4 Especificaciones y normativa para el diseño de vigas estructurales de grúas 35	
2.4.1 Clasificación de Servicio de la Grúa	35
Capítulo 3. Estado del Arte	38
3.1 Introducción general al uso de CFRP en estructuras metálicas	38
3.2 Comportamiento a flexión de vigas de acero reforzadas con CFRP.....	38

3.3	Durabilidad de la unión adhesiva CFRP-acero.....	39
3.4	Análisis numérico y validación experimental	40
3.5	Aplicaciones de CFRP en distintos tipos de grúas	40
Capítulo 4.	Análisis teórico.....	43
4.1	Cálculo de clasificación de servicio de grúa	43
4.2	Análisis de carga	44
4.2.1	Carga Muerta (Dead Load - DL)	44
4.2.2	Carga del Carro (Trolley Load - TL).....	44
4.2.3	Carga Nominal o de Levantamiento (Lifted Load - LL).....	44
4.2.4	Fuerzas de Inercia Vertical (Vertical Inertia Forces - VIF)	44
4.2.5	Cálculo de cargas adicionales	47
4.2.6	Cargas extraordinarias	47
4.2.7	Combinación de cargas.....	47
4.3	Dimensionamiento de viga principal del puente grúa.....	49
4.3.1	Cálculo de la deflexión máxima permisible.....	50
4.3.2	Cálculo del momento de inercia de la viga	50
4.3.3	Análisis estático de la viga puente.....	52
Capítulo 5.	Análisis Experimental.....	58
5.1	Materiales	58
5.1.1	Acero Estructural	58
5.1.2	CFRP Fibra de carbono	58
5.1.3	Adhesivo Sikadur-30	59
5.2	Preparación y configuraciones de las probetas.....	60
5.2.1	Registro fotográfico de la preparación de probetas ensayadas.....	61
5.2.2	Ensayo de flexión de probeta.....	62
5.2.3	Análisis de los ensayos de flexión de 3 puntos	67
5.2.4	Cálculo del ensayo de flexión de 3 puntos	72
5.2.5	Análisis numérico del ensayo de flexión de 3 puntos.....	76

5.2.6	Comparación del cálculo analítico, numérico y experimental del ensayo flexión de 3 puntos	79
5.2.7	Ensayo de corte de probeta	83
5.2.8	Análisis de los ensayos de corte para evaluar el adhesivo	86
5.2.9	Cálculo de corte del adhesivo	95
5.2.10	Comparación del cálculo analítico y experimental del ensayo de corte. 96	
Capítulo 6.	Diseño de la grúa reforzada	97
6.1	Simulación mediante elementos finitos de la viga W610x155 reforzada y sin reforzar con CFRP Carbodur S1514.	98
6.1.1	Condiciones de borde.....	98
6.1.2	Modelado y representación del refuerzo con CFRP y adhesivo en el análisis de elementos finitos	99
6.1.3	Interpretación de los resultados gráficos de la viga W610x155 reforzada con CFRP	100
6.2	Simulación mediante elementos finitos de la viga W610x140 reforzada y sin reforzar con CFRP Carbodur.....	102
6.2.1	Interpretación de los resultados gráficos de la viga W610x140 reforzada con CFRP	103
6.3	Resultados parciales	105
Conclusiones	108
Referencias	110
Anexos	116
7.1	Anexo A: Códigos y Algoritmos.....	116
7.2	Anexo B: Perfiles	133
7.3	Anexo C: Data sheet del adhesivo Sikadur 30	134
7.4	Anexo D: Data sheet del CFRP Carbodur	138
7.5	Anexo E: Cálculo de micromecánica	143
7.6	Anexo F: Cálculo de micromecánica.....	145
7.7	Registro fotográfico de la preparación de probetas ensayadas.....	153
7.8	Medición de datos con galgas extensométricas:	157

7.9	Registro fotográfico de los ensayos de flexión 3 puntos experimental	158
7.10	Registro fotográfico de los ensayos de corte.....	161
7.11	Anexo G: Tabla comparativa de esfuerzos, deflexión del análisis analítico y FEM del ensayo de flexión de 3 puntos.	163



Capítulo 1. Introducción

1.1 Problemática

Los puentes grúas se utilizan ampliamente en la industria minera, almacenes, talleres de fabricación, fábricas de ensamblaje, fundiciones, puertos y otros sitios importantes. Wu et al. (2020). El funcionamiento básico de este tipo de grúas es izar las cargas, desplazarlas de manera longitudinal y transversal, normalmente se emplea dos tipos de velocidades (lento/rápido) en función a su requerimiento. Los movimientos verticales (izaje) lo realiza con el polipasto el cuál transmite la carga mediante sus 4 ruedas apoyadas a las dos vigas principales del puente grúa, estas cargas generan deflexiones en las vigas, esfuerzos normales y cortantes.

La normativa que regula el diseño y cálculo de puentes grúa birriel son diversas, siendo la más destacada de la Crane Manufacturers Association of America (CMAA, 2020), reconocida como el estándar principal para grúas birriel. Esta norma establece requisitos detallados para el diseño estructural, las cargas máximas permitidas, la selección de materiales y los criterios de seguridad para garantizar un rendimiento confiable y seguro en aplicaciones industriales. Además de la CMAA 70, existen otras normativas relevantes entre ellas se encuentra la norma Rules for The Design Of hoisting Appliances (FEM, 1998), ISO 8686 (ISO, 2012), ASME B30.2 (ASME 2022) (Overhead and Gantry Cranes), NTP E.020 (Ministerio de Vivienda 2006).

Por otro lado, el uso de materiales compuestos está siendo utilizado ampliamente en la industria, permitiendo alcanzar propiedades mecánicas y operativas requeridas. Existen tres tipos aplicaciones de polímeros reforzados con fibra (FRP) que se utilizan en el ámbito de ingeniería: (1) estructuras totalmente de FRP para nuevas construcciones; (2) barras de refuerzo de FRP; (3) Sistemas de fortalecimiento de FRP, (Qureshi 2022). El sistema de reforzamiento con polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) es muy demandado, porque tiene muchos beneficios, este material tiene un peso ligero, alta resistencia, resistencia a la corrosión (Li et al. 2021; Zhang et al. 2020) y excelente resistencia a la fatiga (Deng et al. 2021). Además, las tiras de CFRP se pueden adherir a las estructuras de acero y son fáciles de aplicar en la ubicación de la estructura, lo que las hace ampliamente aplicables. Por tanto, el CFRP es un material ideal para reforzar estructuras nuevas en la fase de diseño y también en estructuras de acero existentes (Rajak et al. 2019; Zhao and Zhang 2007).

El reforzamiento de vigas de acero con CFRP, aumenta la rigidez y resistencia a la flexión, al corte, disminuyendo la deflexión en las vigas, como lo mencionan las investigaciones (Narmashiri, Jumaat, and Sulong 2011; Park and Yoo 2015; Prasertsri,

Lenwari, and Thepchatri 2020; Tahar et al. 2019), estos refuerzos CFRP pueden ser adheridos con resina epóxica (pegamento) o empernada (AbouEl-Hamd et al. 2023; AbouEl-Hamd, Sweedan, and El-Ariss 2022), a su vez el reforzamiento con CFRP pueden ser pretensados o sin pretensado (Hu et al. 2022; Li, Zhu, and Deng 2022; H.-T. Wang et al. 2023). Sin embargo, el reforzamiento con CFRP pretensado es complejo y más costo en comparación con el reforzamiento sin pretensado.

Los ensayos experimentales de flexión pueden ser de tres puntos o de cuatro puntos, y permiten evaluar el comportamiento mecánico de vigas bajo cargas. Estos ensayos son importantes para analizar la resistencia estructural y la capacidad de carga de materiales reforzados con polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP). En el caso específico del refuerzo de vigas de acero con CFRP, los modos de falla más comunes son el pandeo local, corte y flexión, lo que puede influir significativamente en la seguridad y eficiencia estructural de la viga (Shekarchi and Khaloo 2021). La identificación de estos modos de falla es crucial para desarrollar estrategias de refuerzo que mejoren la resistencia y prolonguen la vida útil de las estructuras sometidas a cargas dinámicas y estáticas.

Las investigaciones sobre la utilización de materiales compuestos en equipos de elevación, como las grúas existen muy pocos artículos científicos indexados en Scopus, propuestas como (Suvorov et al. 2023a), estudiaron la reducción de peso de la estructura una de grúa de barco utilizando materiales compuestos, lo cual lograron la reducción de peso del 18%. De manera similar (Solazzi and Vaccari 2022) plantearon una propuesta del diseño de una grúa pescante utilizando materiales compuestos y otros metales, logrando una reducción del peso del 44% para la fibra de vidrio (GRFP) y del 82% para la fibra de carbono (CFRP), ambas investigaciones mencionadas tienen el enfoque en el diseño de grúas, pero en la totalidad de la estructura de grúas, sin embargo, en el reforzamiento de vigas de grúas también existe poca investigación científica, tenemos el caso de las investigaciones (Yang et al. 2013; Yue et al. 2016) las cuales trataron sobre el comportamiento de la fatiga de vigas de grúa de acero reforzado con CFRP. Así como (H. et al. 2012), los tres coincidieron que el refuerzo con CFRP puede mejorar significativamente la resistencia de las vigas de las grúas. Por lo tanto, existe un vacío en la investigación por lo cual se debe de abordar el reforzamiento de vigas de grúas con CFRP, con un enfoque numérico y una validación experimental por ensayo de flexión.

La operación y manipulación de los puentes grúas birriel son de alto riesgo, debido a que las cargas de izaje generan grandes esfuerzos y deformaciones en las vigas

principales del puente grúas, es importante proponer soluciones para evitar posibles daños y fallas en su estructura como en los siguientes casos de fallas catastróficas de grúas como se observa en la figura 1.1 y 1.2, cuando ocurren fallas en los equipos, muchas veces se pierden vidas humanas de las personas que se encuentran en el entorno de la catástrofe. Por lo tanto, en el presente estudio, se plantea la siguiente pregunta: ¿Cuál es el comportamiento a flexión de viga I reforzada con CFRP para puente grúa de hasta 20 Ton?



Figura 1.1 Falla estructural de una grúa puente debido a colapso viga principal. Tomado de: (Panacea Engineers. 2025).



Figura 1.2 Colapso del brazo telescópico de una grúa todoterreno causado por pandeo elástico. Tomado de: (Yao et al. 2015)

1.2 Justificación

El presente estudio se fundamenta a nivel práctico, debido que esta investigación busca contribuir significativamente al campo del diseño de grúas birriel con reforzamiento con CFRP al ofrecer mayor rigidez, aumento del factor de seguridad y resistencia de las vigas principales. Esto no solo beneficiará al entendimiento del comportamiento de las vigas reforzadas con CFRP a la flexión, sino que también tendrá implicaciones como asegurar la confiabilidad del equipo, evitar accidentes o accidente de personas, minimizar las fallas o deterioro del equipo de izaje, además el reforzamiento de las vigas con el material CFRP es menos tóxico en comparación con el reforzamiento de vigas con polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP, Glass Fiber Reinforced Polymer) (Qiu et al. 2022), de esta manera se cuida la vida y salud del operario, ya que es un trabajo de alto riesgo manipular estos equipos de izaje.

La norma CMAA-70 abarca los aspectos de diseño y cálculo de grúas, la cual no contempla aspectos de reforzamiento con materiales compuestos como el CFRP. Por lo tanto, existe un vacío que se puede explorar.

La metodología de este estudio se basa en un enfoque analítico, numérico y experimental, permitiendo una evaluación el comportamiento a flexión de vigas I reforzadas con CFRP. Para ello, se han fabricado y sometido a ensayos de flexión y corte en laboratorio probetas diseñadas bajo condiciones controladas, con el propósito de analizar la transferencia de esfuerzos, la adherencia entre el acero y el CFRP, así como los modos de falla predominantes. Este enfoque, respaldado por simulaciones numéricas, no solo valida los resultados obtenidos, sino que también aporta conocimientos sobre la efectividad del refuerzo.

1.3 Alcances y limitaciones

Este estudio se enfoca en reforzamiento de vigas I para vigas principales de puente grúas, con el objetivo de aumentar la rigidez de las vigas de grúas, evitar accidentes resguardando la vida de los operarios. Los alcances de este trabajo son los siguientes:

- Esta cumplirá con los lineamientos de la norma CMAA-70 solo para determinar la sección transversal de la viga principal del puente grúa.
- Proponer 3 configuraciones de refuerzos de CFRP.
- Se preparan probetas (platinas de acero reforzadas con CFRP) a escala de laboratorio y se realizan ensayos de flexión en tres puntos, a fin de estudiar la adherencia con adhesivo epóxico.
- Se desarrolla un modelo numérico de la viga principal en condiciones de carga y apoyo semejantes a las de un puente grúa de 20 toneladas, con y sin refuerzo

CFRP, a fin de evaluar su comportamiento estructural y estimar la reducción de deflexiones y esfuerzos.

- Se analizan los datos obtenidos de la simulación numérica de la viga y del ensayo experimental de las probetas, para determinar la configuración de CFRP que maximice la rigidez y minimice la deflexión.

Sin embargo, es crucial reconocer las limitaciones inherentes a este estudio. A pesar de nuestros esfuerzos por abordar analizar experimentalmente el puente grúa birriel de hasta 20 Ton, existen ciertas restricciones que podrían influir en la amplitud y profundidad de nuestra investigación. Entre las limitaciones más destacadas se encuentran:

- Fabricación del puente grúa a escala real.
- Analizar experimentalmente los refuerzos y deflexiones en las vigas principales del puente grúa a escala real.
- Reforzar el puente grúa a escala real.

Es importante tener presente que, debido a estas limitaciones, algunos aspectos relevantes pueden no ser abordados en esta investigación. No obstante, se buscará minimizar su impacto mediante:

- Se construyen y refuerzan probetas de platina de acero con CFRP, permitiendo realizar ensayos de flexión en un entorno controlado y económicamente viable.
- Se realizan pruebas experimentales de flexión con las probetas de platina reforzadas con CFRP, lo que permite recopilar datos confiables sobre la efectividad del refuerzo y la adhesión.
- Para complementar los resultados de los ensayos a escala, se recurre a modelos de Elementos Finitos, los cuales permiten extrapolar resultados y estimar el comportamiento de la viga principal en condiciones de mayor envergadura.

1.4 Objetivos de la tesis

El objetivo general de esta investigación es realizar un estudio de la influencia del reforzamiento de la viga con CFRP para un puente grúa con capacidad de 20 Ton.

1.4.1 Objetivos específicos:

- Determinar analíticamente la sección transversal de la viga I para una carga de hasta 20 Ton.
- Proponer una distribución de refuerzos con CFRP en la viga I.

- Diseñar probetas de acero reforzada con CFRP, y llevar a cabo ensayos de flexión en tres puntos a fin de evaluar la efectividad de la unión con adhesivo epóxico.
- Comparar los resultados del análisis analítico y de las simulaciones por Elementos Finitos (FEM) con los datos experimentales de las probetas.
- Modelar numéricamente la viga principal reforzada y no reforzada con CFRP, con el propósito de estimar la reducción de deflexiones, los esfuerzos y verificar el cumplimiento del factor de seguridad exigido por la normativa.
- Evaluar la efectividad del CFRP como refuerzo, identificando la configuración de laminado que ofrece mayor rigidez y capacidad de carga en la viga principal.

1.5 Metodología del trabajo

La metodología de esta investigación es basa en el estado de arte de la presente investigación, recopilar información de artículos científicos indexados en Scopus y normas internacionales. Con ello se expondrán los principales alcances teóricos para el desarrollo del modelo. Se iniciará la investigación con el modelo estructural de un puente grúa con capacidad de hasta 20 Toneladas, se determinará analíticamente la sección transversal de la viga I, en función a la carga de trabajo establecida.

Luego, se realizarán probetas de platinas de acero con láminas de CFRP unidas con un adhesivo, para realizar los ensayos de flexión de 3 en el CITE de materiales de la sección de ingeniería mecánica de la PUCP, la medición de los esfuerzos, deformaciones se emplearán strain gauges, de esta manera se determinarán y validarán los resultados del análisis analítico y numérico de la platina de acero reforzada con CFRP.

En la simulación numérica y el análisis analítico de la viga principal del puente grúa se propone tres configuraciones de refuerzo con CFRP a la viga principal. El primer caso es la viga sin reforzamiento, el segundo caso es con CFRP en la parte inferior, el tercer caso es con reforzamiento superior e inferior, finalmente el cuarto caso es con reforzamiento solo en la parte superior; como se aprecia en la Figura 1.2.

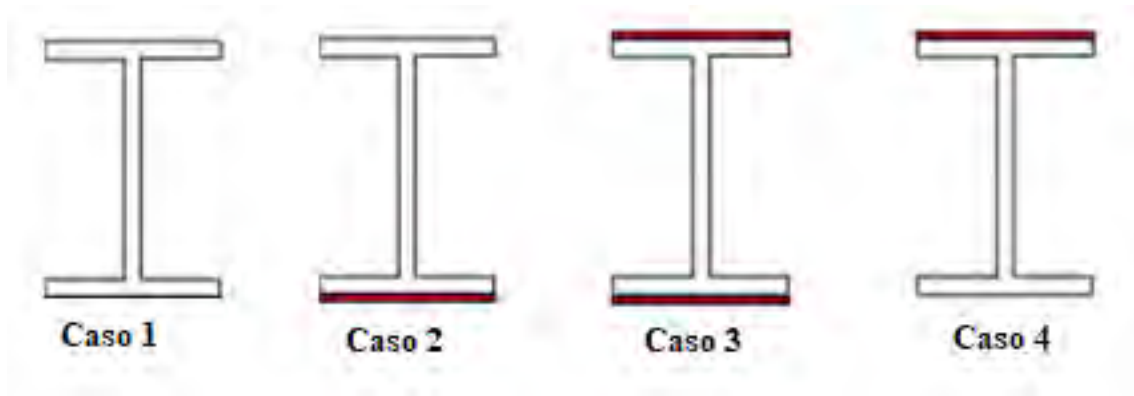


Figura 1.2 Configuración del reforzamiento de viga I con CFRP. Tomado de: (Shekarchi and Khaloo 2021)

Finalmente, los resultados analíticos y numéricos (FEM) se validarán con el ensayo experimental de flexión y se compararán los resultados como los esfuerzos máximos, flechas (deflexión), índice de flexión y graficas de curvas esfuerzos vs deformaciones, Carga vs deflexiones.



Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Introducción a los Materiales Compuestos

Los materiales compuestos son aquellos formados por la combinación de dos o más materiales diferentes, con el fin de obtener un material con propiedades superiores a las de sus componentes individuales. Estos materiales combinan las ventajas de sus componentes, resultando en propiedades mejoradas para diversas aplicaciones en ingeniería y la industria.

2.1.1 Definición y Clasificación de Materiales Compuestos

Los materiales compuestos se definen como materiales formados por la combinación de dos o más componentes materiales distintos que resultan en propiedades superiores a las de sus componentes individuales. La mayoría de los materiales compuestos artificiales están hechos de dos materiales: un material de refuerzo llamado fibra y un material base, llamado material matriz. La matriz actúa como un aglutinante que mantiene el refuerzo en una posición fija, mientras que el refuerzo proporciona las propiedades mecánicas deseadas como la resistencia y la rigidez Jones. (1975).

Los materiales compuestos pueden clasificarse en función del tipo de matriz y de la forma del refuerzo, como se aprecia en la Figura 2.1.

2.1.1.1 Matrices:

Matrices Poliméricas: Utilizan polímeros como matriz. Los polímeros pueden ser termoplásticos o termoestables. Los termoplásticos, como el polietileno y el polipropileno, pueden ser reciclados y remodelados mediante calentamiento. Los termoestables, como las resinas epoxi y poliéster, no pueden ser remodelados una vez curados, pero ofrecen mejor resistencia térmica y química.

Matrices Metálicas: Utilizan metales como matriz, tales como aluminio y magnesio. Estos compuestos son conocidos por su alta resistencia y son utilizados en aplicaciones de alta temperatura y estructurales.

Matrices Cerámicas: Utilizan cerámicas como matriz, como el carburo de silicio. Estos materiales son extremadamente duros y resistentes a la corrosión y al desgaste, siendo utilizados en aplicaciones aeroespaciales

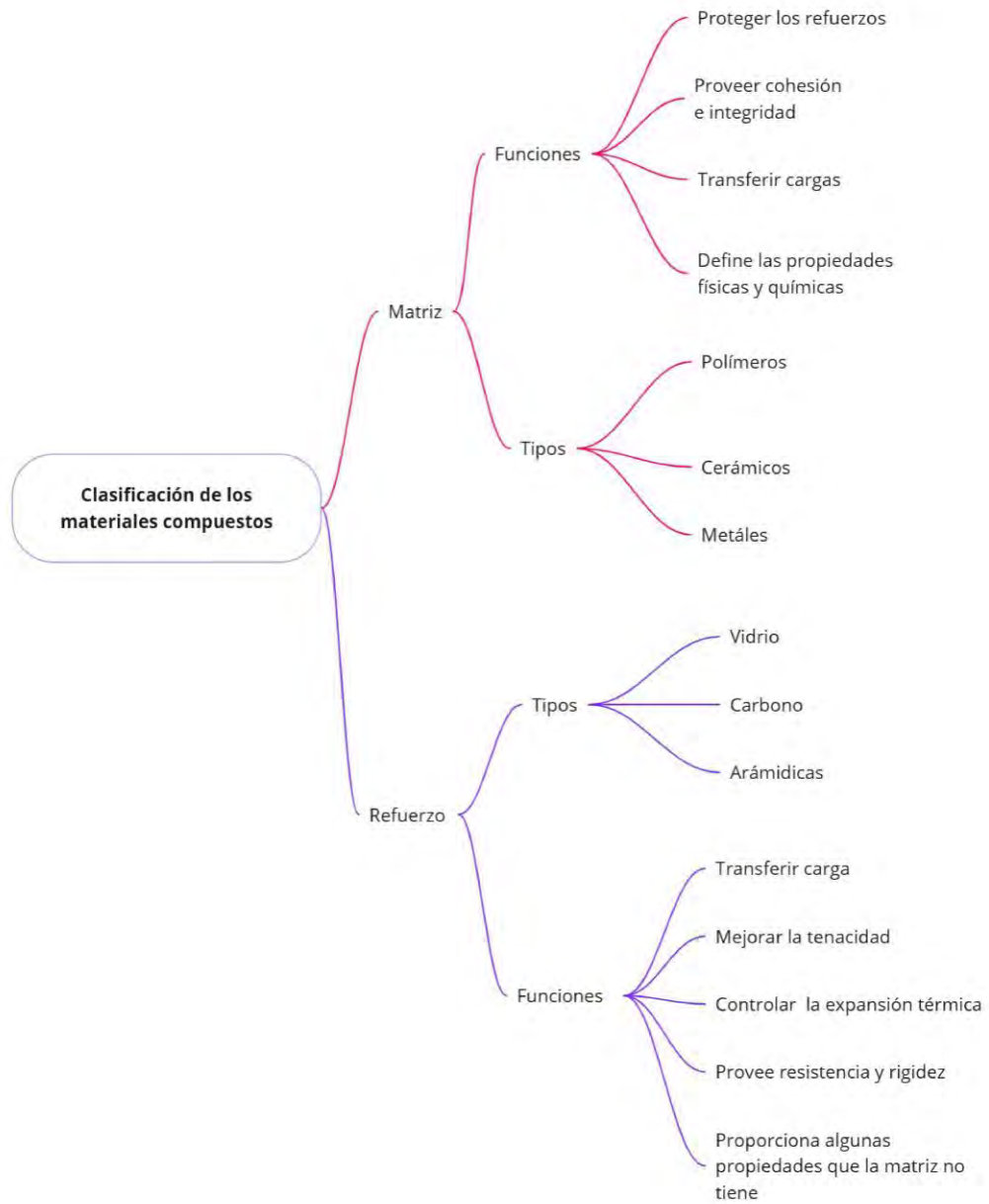


Figura 2.1 Clasificación de los materiales compuestos. Adaptado de: (Gay, Hoa, and Tsai 2002)

2.1.1.2 Refuerzos:

Fibra Continua: Incluye fibras largas y continuas que proporcionan alta resistencia y rigidez en la dirección de las fibras. Por ejemplo, la fibra de carbono, Fibra de vidrio y aramida.

Fibra Corta: Consiste en fibras cortas y discretas que son más fáciles de procesar y pueden distribuirse más uniformemente en la matriz. Ejemplos incluyen fibras cortas de vidrio y carbono.

Partículas: Incluyen partículas discretas que pueden mejorar ciertas propiedades como la resistencia al desgaste. Ejemplos incluyen partículas de cerámica y metal.

Láminas y Tejidos: Se utilizan láminas continuas o tejidos de fibras para mejorar las propiedades de los materiales en múltiples direcciones.

2.1.2 Micromecánica: Propiedades Elásticas de una Lámina Unidireccional con Fibras Continuas

En el análisis de compuestos unidireccionales, se utilizan modelos micromecánicos para predecir las propiedades elásticas en distintas direcciones. Estos modelos consideran las propiedades de las fibras y la matriz, así como su distribución en el compuesto.

2.1.2.1 Módulo de Elasticidad Longitudinal

El módulo de elasticidad longitudinal, denotado como E_{11} es un parámetro clave que mide la rigidez del compuesto en la dirección de las fibras. Esta propiedad es de importante en aplicaciones donde la resistencia a la tracción en la dirección de las fibras es crítica. Para calcular el módulo de elasticidad longitudinal se realiza utilizando la Regla de Mezclas, que es una aproximación basada en las fracciones volumétricas y los módulos de elasticidad de los componentes, los detalles se muestran en la Ecuación 2.1, (F. L. Matthews 1999):

$$E_{11} = E_f * V_f + E_m * V_m \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

E_{11} : Módulo de elasticidad Longitudinal.

E_f : Módulo de elasticidad de la fibra.

V_f : Volumen de las fibras

E_m : Módulo de elasticidad de la matriz.

V_m : Volumen de la matriz.

La ecuación 2.1 es una expresión lineal que combina las contribuciones de las fibras y la matriz a la rigidez total del compuesto en la dirección longitudinal. Dado que las fibras tienen un módulo de elasticidad generalmente mucho más alto que la matriz, la rigidez longitudinal del compuesto estará E_{11} dominada por las propiedades de las fibras. Sin

embargo, la matriz no es irrelevante; su presencia es vital para la integridad estructural del compuesto y para la distribución de cargas entre las fibras.

Una consideración importante de esta ecuación se asume algunas consideraciones ideales, asume una unión perfecta entre las fibras y la matriz, lo que significa que no existe deslizamiento en la interfaz fibra-matriz y que las deformaciones en ambas fases (fibras y matriz) son equivalentes bajo la aplicación de una carga longitudinal. Esta suposición simplifica significativamente el análisis y proporciona una buena aproximación para compuestos con una interfaz bien adherida y una distribución uniforme de fibras (Mallick 1993).

2.1.2.2 Módulo de Elasticidad Transversal

El módulo de elasticidad transversal E_{22} , es un parámetro crucial en el estudio de materiales compuestos unidireccionales, este módulo mide la rigidez del material en la dirección perpendicular a la orientación de las fibras, conocida como la 2-dirección. A diferencia del módulo de elasticidad longitudinal, que evalúa la resistencia a la deformación en la dirección de las fibras, describe la capacidad del compuesto para resistir la deformación cuando se aplican cargas perpendiculares a las fibras, los detalles se muestran en la ecuación 2.2.

$$E_{22} = \frac{E_f * E_m}{E_f * V_m + E_m * V_f}$$

Ec. 2.2

Donde:

E_{22} : Módulo de elasticidad transversal.

E_f : Módulo de elasticidad de la fibra.

V_f : Volumen de las fibras.

E_m : Módulo de elasticidad de la matriz.

V_m : Volumen de la matriz.

El módulo de elasticidad transversal es importante tener en cuenta que la precisión de esta fórmula depende de varias suposiciones, como la homogeneidad de la distribución de las fibras y la calidad de la interfaz fibra-matriz. En la práctica, cualquier irregularidad en la distribución de las fibras, la presencia de vacíos, o una adherencia imperfecta entre la matriz y las fibras puede resultar en desviaciones significativas de los valores teóricos

2.1.2.3 Ratio de Poisson Mayor

Este parámetro describe la relación entre la deformación en la dirección transversal (2-dirección) y la deformación en la dirección longitudinal (1-dirección) cuando el material está sometido a una carga en la dirección de las fibras. Es decir, nos indica de qué manera se contrae la lámina en la dirección transversal cuando se aplica una carga en la dirección longitudinal, los detalles se muestran en la ecuación 2.3.

$$\nu_{12} = \nu_f * V_f + \nu_m * V_m \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde:

ν_{12} : Ratio de Poisson mayor

V_f : Volumen de las fibras

V_m : Volumen de la matriz.

ν_f : Ratio de Poisson de las fibras.

ν_m : Ratio de Poisson de la matriz.

La ecuación asume una distribución homogénea de las fibras y una perfecta adherencia en la interfaz fibra-matriz, lo que en la práctica puede no ser completamente cierto. Factores como la calidad de la adhesión en la interfaz, la presencia de defectos, y la variabilidad en la orientación de las fibras pueden influir en el valor efectivo.

2.1.2.4 Ratio de Poisson Menor

La razón de Poisson menor, denotada como ν_{21} es un parámetro crítico en la caracterización de materiales compuestos unidireccionales, ya que describe la relación entre las deformaciones en diferentes direcciones bajo la acción de una carga transversal. Este parámetro cuantifica la deformación en la dirección longitudinal (1-dirección) como respuesta a una carga aplicada en la dirección transversal (2-dirección). Es decir, indica cuánto se alargará o acortará el material en la dirección de las fibras (1-dirección) cuando se comprima o estire perpendicularmente a ellas (2-dirección)., los detalles se muestran en la ecuación 2.4.

$$\nu_{21} = \frac{\nu_{12} * E_{22}}{E_{11}} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde:

ν_{21} : Ratio de Poisson menor

ν_{12} : Ratio de poisson mayor.

E_{22} : Módulo de elasticidad transversal.

E_{11} : Módulo de elasticidad Longitudinal.

El valor de ν_{21} generalmente será menor que ν_{12} , debido a que E_{22} es típicamente menor que E_{11} en compuestos unidireccionales. Esto se debe a que las fibras, que tienen un módulo de elasticidad mucho mayor que la matriz, dominan el comportamiento en la dirección longitudinal, mientras que la matriz contribuye de manera más significativa a la rigidez en la dirección transversal.

2.1.2.5 Módulo de Corte en el Plano

El módulo de corte en el plano G_{12} es un parámetro esencial en la caracterización de materiales compuestos, particularmente en aquellos con una orientación unidireccional de las fibras. Este módulo mide la capacidad del material compuesto para resistir deformaciones cuando está sujeto a fuerzas cortantes aplicadas en el plano definido por las direcciones 1 (longitudinal) y 2 (transversal). En términos simples, el módulo de corte en el plano describe la rigidez del material frente a fuerzas que intentan deslizar unas capas del material sobre otras a lo largo de estas direcciones. Los detalles se muestran en la ecuación 2.5.

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde:

G_{12} : El módulo de corte en el plano.

G_f : Módulo de corte de las fibras.

G_m : Módulo de corte de la matriz

V_f : Volumen de las fibras.

V_m : Volumen de la matriz

En los compuestos unidireccionales, la anisotropía es un factor determinante en la magnitud de G_{12} . Dado que las fibras están orientadas en una dirección específica, su contribución a la resistencia al corte en direcciones perpendiculares es limitada. En consecuencia, la matriz del compuesto se convierte en el principal agente de resistencia al corte. El valor de G_{12} depende en gran medida de las propiedades mecánicas de la matriz, particularmente su módulo de corte, y su capacidad para transferir eficazmente

las fuerzas entre las fibras. Esta transferencia de fuerzas es crucial para la cohesión y el rendimiento del material bajo condiciones de carga cortante.

Módulo de Corte de las Fibras

El módulo de corte de las fibras de carbono G_f mide la resistencia de las fibras a la deformación cuando se aplican fuerzas cortantes paralelas a la dirección de la fibra. Este módulo es un parámetro importante en materiales compuestos, ya que las fibras son el principal componente que contribuye a la rigidez y resistencia del material en la dirección longitudinal.

El módulo de corte de las fibras se puede determinar a partir del módulo de elasticidad longitudinal E_{11} y el ratio de Poisson de las fibras ν_f , utilizando la siguiente ecuación 2.6 derivada de la teoría de la elasticidad para materiales isotrópicos:

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde:

G_f : Módulo de corte de las fibras.

E_f : Módulo de elasticidad longitudinal de las fibras.

ν_f : Ratio de Poisson de las fibras

Módulo de Corte de la matriz

El módulo de corte de la matriz G_m mide la capacidad de la matriz, que puede estar compuesta por materiales poliméricos, metálicos o cerámicos, para resistir deformaciones cuando se aplican fuerzas cortantes. La matriz rodea y sostiene las fibras dentro del material compuesto, desempeñando un papel esencial en la transferencia de cargas entre las fibras y proporcionando cohesión y estabilidad estructural al conjunto. A diferencia de las fibras, que son anisotrópicas, la matriz es generalmente isotrópica, lo que significa que sus propiedades mecánicas, incluido el módulo de corte, son uniformes en todas las direcciones. Esta isotropía permite un cálculo más sencillo del módulo de corte y facilita la evaluación de la contribución de la matriz a la resistencia global del material compuesto. A continuación, se los detalles se muestran en la ecuación 2.7.

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde:

G_m : Módulo de corte de las fibras.

E_m : Módulo de elasticidad longitudinal de la matriz

ν_m : Ratio de Poisson de la matriz

2.1.3 Macromecánica: Teoría clásica de laminas

2.1.3.1 Matriz de cumplimiento

El comportamiento de un material compuesto bajo carga se describe mediante la relación entre los esfuerzos σ_{12} y las deformaciones ϵ_{12} de la ecuación 2.8. Esta relación se expresa en términos de la matriz de cumplimiento S , esta matriz permite describir cómo un material responde a esfuerzos en diferentes direcciones y cómo se deforma, (F. L. Matthews 1999).

$$\epsilon_{12} = S * \sigma_{12} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Donde S es la matriz de cumplimiento, definida por la siguiente ecuación 2.9:

$$S = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.9}$$

Donde:

S : Matriz de cumplimiento

E_{11} : Módulo de elasticidad Longitudinal

E_{22} : Módulo de elasticidad transversal.

G_{12} : El módulo de corte en el plano.

ν_{12} : Ratio de Poisson mayor.

2.1.3.2 Matriz de rigidez

La matriz de rigidez nos permite determinar de qué manera los materiales responden a las fuerzas aplicadas. Esta matriz rigidez Q es una herramienta fundamental para relacionar las tensiones y las deformaciones, permitiendo así una comprensión del comportamiento mecánico del material en aplicaciones estructurales.

Matemáticamente, la matriz de rigidez Q se define como la inversa de la matriz de cumplimiento S , y su propósito es proporcionar una relación directa entre las tensiones σ_{12} y las deformaciones ϵ_{12} en un material compuesto anisotrópico, en la siguiente ecuación 2.10:

$$\sigma_{12} = Q * \epsilon_{12} \quad \text{Ec. 2.10}$$

La estructura de la matriz de rigidez Q está compuesta por elementos que integran las propiedades elásticas fundamentales del material, y se expresa en la siguiente ecuación 2.11:

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{12}E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.11}$$

Donde:

Q : Matriz de rigidez

E_{11} : Módulo de elasticidad Longitudinal.

E_{22} : Módulo de elasticidad transversal.

G_{12} : El módulo de corte en el plano.

ν_{12} : Ratio de Poisson mayor.

ν_{21} : Ratio de Poisson menor.

La matriz Q no solo es una representación matemática, sino también una herramienta analítica que permite predecir el comportamiento del material bajo cargas complejas. A través de la inversión de la matriz de cumplimiento S , la matriz de rigidez Q integra estas

propiedades elásticas y proporciona una representación detallada de cómo las tensiones inducen deformaciones dentro del material.

2.1.3.3 Transformación de Tensiones y Deformaciones

El estudio de materiales compuestos unidireccionales demanda un análisis riguroso y preciso, especialmente cuando las fibras no están alineadas con las direcciones principales de carga. Este desalineamiento, comúnmente referido como carga fuera del eje (off-axis loading), introduce una complejidad adicional que requiere una transformación cuidadosa de las tensiones y deformaciones. La matriz de transformación T es importante porque permite relacionar las tensiones y deformaciones en las nuevas direcciones de referencia, como se observa la ecuación 2.12.

$$T = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.12}$$

onde:

T : Matriz de transformación

$$m = \cos \theta$$

$$n = \sin \theta$$

θ : Ángulo de orientación de las fibras

El ángulo θ indica la orientación de las fibras respecto a las direcciones de carga aplicadas. La matriz T no solo transforma las componentes de esfuerzos y deformación, sino que también refleja cómo la dirección de las fibras afecta el comportamiento anisotrópico del material.

2.1.3.4 Matriz de Rigidez Transformada

La orientación de las fibras respecto a las tensiones aplicadas juega un papel crucial en el comportamiento mecánico del material. Cuando las fibras están alineadas en un ángulo θ distinto a las direcciones principales de carga, es necesario reformular la matriz de rigidez original Q para reflejar adecuadamente la influencia de dicha orientación. Esta reformulación se realiza mediante la matriz de rigidez transformada \bar{Q} , la cual permite evaluar las propiedades efectivas del material en la nueva dirección de referencia, (F. L. Matthews 1999).

La matriz de rigidez transformada se obtiene aplicando una transformación tensorial a la matriz de rigidez original Q , según la relación de la ecuación 2.13:

$$\bar{Q} = T^{-1}QRTR^{-1} \quad \text{Ec. 2.13}$$

Donde:

T : Matriz de transformación

Q : Matriz de rigidez

\bar{Q} : Matriz de rigidez transformada.

R : Matriz de conversión de deformaciones

La representación de la ecuación 2.14 expandida de la matriz transformada \bar{Q} es la siguiente:

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{12}E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.14}$$

$$\begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

2.1.3.5 Matriz de Rigidez Extensional

La matriz de rigidez extensional $[A]$ describe la relación entre los esfuerzos normales y las deformaciones en el plano. Se calcula integrando la contribución de rigidez de cada lámina a lo largo del espesor del laminado:

$$A_{rs} = \sum_{j=1}^P \bar{Q} [h_j - h_{j-1}] = \sum_{j=1}^P \bar{Q}_{rsj} t_j \quad \text{Ec. 2.15}$$

Donde:

\bar{Q}_{rsj} : Matriz de rigidez reducida transformada de la lámina k .

t_j : Posición de las interfaces superior e inferior de la lámina.

2.1.3.6 Matriz de Acoplamiento

La matriz de acoplamiento $[B]$ representa la interacción entre esfuerzos normales y curvaturas, lo que implica un acoplamiento entre deformación y flexión. Se expresa en la siguiente ecuación:

$$B_{rs} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^P \bar{Q}_{rsj} [h_j^2 - h_{j-1}^2] \quad \text{Ec. 2.16}$$

Donde:

\bar{Q}_{rsj} : Matriz de rigidez reducida transformada de la lámina k.

h_j : Posición de la interfaz superior de la lámina k.

h_{j-1} : Posición de la interfaz inferior de la lámina k.

En laminados simétricos, la matriz [B] se anula, eliminando el acoplamiento entre esfuerzos normales y momentos.

2.1.3.7 Matriz de Rigidez a la Flexión

La matriz de rigidez a flexión [D] describe la resistencia del laminado a la flexión y está determinada por la integración cúbica de la rigidez de cada lámina:

$$D_{rs} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^P \bar{Q}_{rsj} [h_j^3 - h_{j-1}^3] \quad \text{Ec. 2.17}$$

Donde:

\bar{Q}_{rsj} : Matriz de rigidez reducida transformada de la lámina k.

h_j : Posición de la interfaz superior de la lámina k.

h_{j-1} : Posición de la interfaz inferior de la lámina k.

2.1.3.8 Matriz constitutiva del laminado

Para analizar la respuesta mecánica de un laminado compuesto, es fundamental definir su matriz de rigidez generalizada, que relaciona los esfuerzos y momentos con las deformaciones y curvaturas. Esta matriz está compuesta por tres submatrices [A], [B], [D]; además de los vectores fuerza N, momentos M, deformaciones e y curvaturas k , (F. L. Matthews 1999).

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^\circ \\ k \end{bmatrix} = [E] \begin{bmatrix} e^\circ \\ k \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.18}$$

Según Kollár and Springer (2003) La matriz constitutiva de forma completa desarrollada es:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_{xy} \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}$$

Ec. 2.19

Donde:

N_x : Esfuerzo normal en la dirección x.

N_y : Esfuerzo normal en la dirección y.

N_{xy} : Esfuerzo normal en el plano xy.

M_x : Momento flector en la dirección al eje x.

M_y : Momento flector en la dirección al eje y.

M_{xy} : Momento torsional en el plano xy.

A_{11} : Rigidez a la tracción/compresión en dirección x.

A_{22} : Rigidez a la tracción/compresión en dirección y.

A_{66} : Rigidez al corte en el plano xy.

A_{12} : Acoplamiento entre los esfuerzos en x y y

A_{16} : Acoplamiento entre los esfuerzos esfuerzos normales.

B_{11} : Acoplamiento entre esfuerzos normales.

B_{22} : Acoplamiento entre curvaturas.

B_{12} : Interacción entre los esfuerzos en x y curvatura y.

B_{16} : Acoplamiento entre esfuerzos normales.

B_{26} : Acoplamiento entre esfuerzos torsión.

B_{66} : Acoplamiento entre cortante en xy y curvatura torsional.

e_x : Deformación normal en x.

e_y : Deformación normal en y.

e_{xy} : Deformación de cortante en el plano xy.

k_x : Curvatura con respecto al eje x.

k_y : Curvatura con respecto al eje y.

k_{xy} : Curvatura torsional en el plano xy.

2.1.3.9 Esfuerzos en las Láminas

Es importante determinar los esfuerzos internos en cada una de las láminas que conforman el laminado. Dado que cada capa puede estar compuesta por distintos materiales con propiedades mecánicas únicas, los esfuerzos varían a lo largo del espesor del laminado, (F. L. Matthews 1999). Para calcular estos esfuerzos, se emplea la siguiente ecuación:

$$\sigma_{xy} = \bar{Q}_{ij}e^{\circ} + z\bar{Q}_{ij}k \quad \text{Ec. 2.20}$$

Donde:

σ_{xy} : Esfuerzos en una lámina determinada.

\bar{Q}_{ij} : Matriz de rigidez transformada para la lámina.

e° : Vector de deformación en el plano medio.

z : Distancias de la lámina con respecto al plano medio del laminado.

k : Vector de curvaturas del laminado.

2.2 Reforzamiento de Vigas con CFRP

El refuerzo de vigas de acero con CFRP se ha consolidado como una técnica altamente eficiente para mejorar la capacidad estructural y alargar la vida útil de los elementos en condiciones severas de carga. Este método combina las propiedades inherentes del acero, como su alta resistencia y ductilidad, con las ventajas de los CFRP, como su ligereza, alta resistencia específica y resistencia a la corrosión. Su aplicación es especialmente valiosa en proyectos de rehabilitación y fortalecimiento de infraestructuras críticas como puentes, edificios industriales y otras estructuras metálicas que han sufrido deterioro debido a la fatiga, la corrosión o el incremento de las cargas de diseño.

2.2.1 Métodos de Refuerzo y Técnicas de Aplicación del CFRP

El refuerzo de vigas con polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) ha emergido como una solución eficaz para mejorar la capacidad estructural de elementos sometidos a flexión. Los métodos más comunes son los siguientes:

Adherencia mediante adhesivo estructural: Este método utiliza adhesivos epóxicos de alta resistencia para fijar el CFRP a la superficie metálica, ofreciendo una transferencia uniforme de tensiones. La preparación adecuada de la superficie metálica es crucial para maximizar la adherencia y prevenir fallos prematuros en la unión, (Mohabeddine et al. 2023; Z. Wang, Xian, and Yue 2023).

Adherencia mediante pretensado del CFRP: Este enfoque introduce una tensión inicial en el laminado antes de fijarlo a la viga, optimizando su capacidad para contrarrestar las tensiones de tracción en la estructura base. Estudios como (Hosseini et al. 2019; Hu et al. 2022; Li et al. 2022) han demostrado que este método puede reducir las deformaciones estructurales y aumentar la rigidez global de la viga

Unión mediante empernado: En este método, el laminado de CFRP se fija mecánicamente mediante tornillos o pernos. Aunque es menos eficiente en la transferencia uniforme de cargas, (AbouEl-Hamd et al. 2022), es útil en escenarios donde se requiere inspección o reemplazo frecuente del laminado. Sin embargo, puede generar concentraciones de esfuerzos alrededor de los puntos de fijación, lo que limita su uso en aplicaciones altamente exigentes.

Combinación de adhesivo y anclajes mecánicos: Este sistema combina adhesivos estructurales con anclajes mecánicos, proporcionando redundancia y mitigando el riesgo de fallo por delaminación. Según Li et al. (2021), este método es ideal para estructuras expuestas a altas vibraciones o condiciones ambientales extremas.

Refuerzo mediante envoltura completa (wrapping): Este método envuelve completamente la viga con laminados de CFRP, aumentando la resistencia tanto a flexión como a torsión. (Park and Yoo 2015) ha demostrado que este enfoque incrementa la capacidad de carga, siendo especialmente útil en estructuras expuestas a esfuerzos multidireccionales.

Uso de abrazaderas metálicas (clamping): Las abrazaderas metálicas fijan el laminado de CFRP sin necesidad de adhesivos o perforaciones permanentes, siendo una opción útil para refuerzos temporales o experimentales. Este método es eficaz en condiciones controladas, aunque su capacidad de transferencia de cargas puede ser limitada, (Hosseini et al. 2019).

Preparación de la Superficie

La adecuada preparación de la superficie es uno de los pasos más críticos para asegurar la eficacia del refuerzo con CFRP. La limpieza y la rugosidad superficial juegan un papel esencial en la adhesión óptima entre el material compuesto y la viga de acero.

Una superficie rugosa mejora la adhesión mecánica del adhesivo, permitiendo una transferencia efectiva de esfuerzos.

Descontaminación de la superficie: La eliminación de óxidos, grasa, polvo y pintura es esencial. Se recomienda el uso de técnicas como el granallado o lijado mecánico para lograr una superficie limpia y rugosa.

Medición de la rugosidad: La rugosidad óptima puede variar dependiendo del tipo de adhesivo, pero generalmente se recomienda un perfil de rugosidad de 50-100 μm .

Protección contra la oxidación: Una vez preparada, la superficie debe ser protegida de la humedad y otros agentes corrosivos antes de aplicar el adhesivo y el CFRP

2.3 Puente Grúa

El puente grúa es un equipo mecánico diseñado para la elevación y transporte de cargas pesadas en sectores industriales, logísticos y de construcción. Gracias a su estructura, permite desplazarse en tres ejes: longitudinal, transversal y vertical, para el manejo de materiales en áreas amplias y reduciendo los tiempos operativos. Este equipo es importante en industrias que demandan eficiencia y seguridad en sus procesos, como la metalurgia, la construcción naval, la minería y la manufactura.

Las partes principales del puente grúa birriel incluyen diversos componentes que trabajan en conjunto para garantizar el correcto funcionamiento y manejo seguro de las cargas. Estas partes son: la carga, que representa el objeto o material a movilizar; las eslingas de izaje, encargadas de sujetar la carga de forma segura; el gancho, que conecta las eslingas al sistema de elevación; el cable de acero del polipasto, que permite el movimiento vertical de la carga; y el polipasto, que es el mecanismo que ejecuta el levantamiento, como se observa en la Figura 2.2. Además, están las vigas principales del puente grúa, que soportan la estructura y permiten el desplazamiento transversal, las testeras, que son los extremos del puente que proporcionan soporte lateral, las ruedas de testeras, que permiten el movimiento longitudinal sobre las vigas carrileras, las cuales funcionan como guía para el desplazamiento del puente a lo largo de su recorrido.

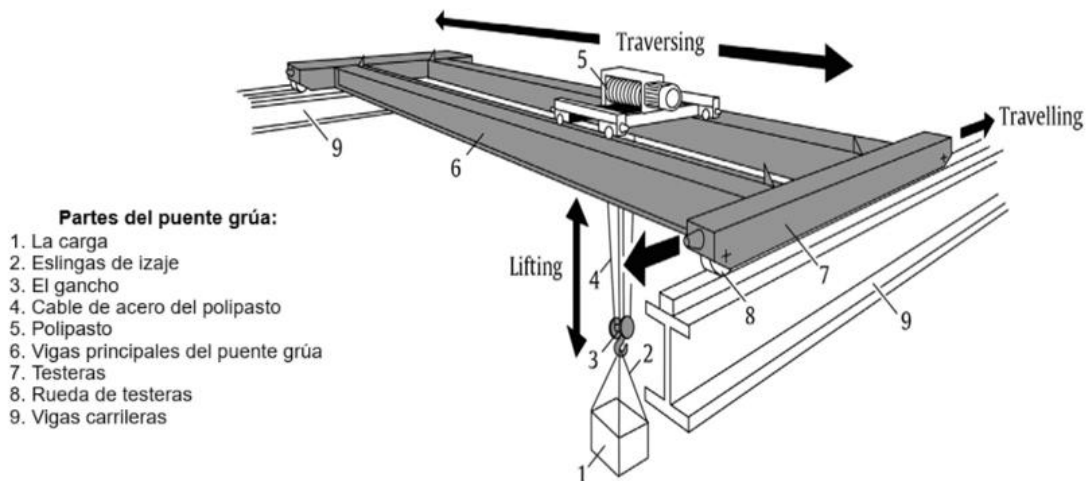


Figura 2.2 Partes principales del puente grúa birriel. Tomado de: (Euler and Taylor 2021)

El puente grúa se desplaza sobre carriles fijados a una estructura superior, la cual puede ser construida específicamente para este fin o integrada a la infraestructura existente, como en galpones industriales. Cuando opera al aire libre, requiere estructuras adicionales para su soporte, mientras que en instalaciones internas puede aprovechar las vigas del edificio. Su diseño estructural asegura la estabilidad y resistencia, permitiendo su uso en condiciones industriales exigentes.

El manejo del puente grúa puede realizarse desde una cabina de control situada en uno de los extremos del puente, lo que permite al operador tener un control cercano del equipo. Sin embargo, es cada vez más común el uso de controles remotos, que brindan mayor flexibilidad y seguridad, especialmente en aplicaciones donde no se sigue un ciclo de operación definido.

2.3.1 Tipos de Puente Grúa

Los puentes grúa son equipos esenciales en la industria para el manejo de materiales pesados. Se clasifican según diferentes criterios que incluyen su configuración estructural, tipo de operación, lugar de instalación, movilidad y aplicación. Cada clasificación responde a necesidades específicas y ofrece soluciones adaptadas a distintos entornos y procesos industriales

2.3.1.1 Configuración de Vigas principales

Una de las principales formas de clasificar los puentes grúa es según la disposición de sus vigas. Los puentes grúa monorriel utilizan un único riel sobre el cual se desplaza el carro, lo que los hace ideales para cargas ligeras y recorridos lineales en talleres pequeños o almacenes. En contraste, los puentes grúa birriel están compuestos por dos rieles paralelos que les permiten soportar mayores cargas y proporcionar mayor

estabilidad. Esta configuración es común en aplicaciones que implican la manipulación de objetos pesados o voluminosos.

2.3.1.2 Tipo de Operación

El tipo de operación de un puente grúa define cómo se controla y maneja el equipo. Los puentes grúa manuales operan mediante sistemas de poleas o cadenas, siendo adecuados para operaciones de menor escala y donde no se requiere velocidad. Los puentes grúa eléctricos, equipados con motores, permiten mayor eficiencia y capacidad de carga, siendo los más utilizados en la industria moderna. Por último, los puentes grúa automatizados integran tecnología avanzada, como sensores y controles programables, para operar de forma autónoma y precisa, siendo ideales en procesos industriales automatizados.

2.3.1.3 Ubicación

Según su ubicación, los puentes grúa pueden instalarse en interiores o exteriores. Los puentes grúa de interior se encuentran dentro de fábricas, talleres o almacenes, donde aprovechan estructuras superiores como vigas de techo para su instalación. Por otro lado, los puentes grúa de exterior están diseñados para operar al aire libre en entornos como puertos o patios de carga, requiriendo estructuras robustas que soporten condiciones climáticas adversas como lluvia, viento o corrosión.

2.3.1.4 Movilidad

La movilidad de un puente grúa determina su capacidad para trasladarse dentro del área de trabajo. Los puentes grúa fijos permanecen en una ubicación específica, limitando su movimiento al área cubierta por sus rieles. Son ideales para procesos repetitivos en zonas delimitadas. En cambio, los puentes grúa móviles pueden desplazarse entre diferentes ubicaciones dentro de una planta industrial, gracias a sistemas de ruedas o rieles portátiles, proporcionando mayor flexibilidad operativa.

2.3.1.5 Aplicación

Los puentes grúa también se clasifican según su aplicación. Los puentes grúa de gancho son los más comunes y versátiles, diseñados para levantar y transportar cargas mediante un gancho. Los puentes grúa electroimán son ideales para manipular materiales ferromagnéticos como chapas de acero, y suelen emplearse en la industria metalúrgica. Por su parte, los puentes grúa cuchara o polipasto están equipados con mecanismos tipo cuchara para manejar materiales a granel, como arena o minerales, mientras que los puentes grúa pinza cuentan con pinzas hidráulicas para sujetar objetos específicos como troncos o tubos.

2.4 Especificaciones y normativa para el diseño de vigas estructurales de grúas

La norma ((CMAA) 2020) establece las especificaciones y criterios técnicos necesarios para el diseño de grúas puente de múltiples vigas. Esta sección detalla los parámetros relevantes al diseño de la viga principal de un puente grúa birriel, basándose en los principios de clasificación del servicio y los factores de carga que afectan el diseño estructural.

2.4.1 Clasificación de Servicio de la Grúa

La norma define las clases de servicio de las grúas en función del espectro de carga y el número de ciclos operativos que se espera a lo largo de su vida útil. Estas clases de servicio permiten seleccionar el diseño más eficiente según las condiciones de operación específicas. La clasificación utiliza el factor de carga media efectiva (K), calculado en la siguiente ecuación 2.21:

$$K = \sqrt[3]{(W_1)^3 P_1 + (W_2)^3 P_2 + \dots + (W_n)^3 P_n} \quad \text{Ec. 2.21}$$

Donde:

W : Magnitud de la carga como un ratio de la carga levantada respecto a la capacidad nominal

P : Probabilidad de la carga

K : factor de carga media efectiva.

La norma CMAA 70 clasifica las grúas en diferentes categorías de servicio basándose en el uso, la frecuencia de las operaciones y la magnitud de las cargas que estas manejan. Estas clases permiten seleccionar el diseño más adecuado según las condiciones operativas y los ciclos de carga esperados durante la vida útil de la grúa, se detalla en la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Clases de servicio de grúa. Extraído de CMAA (2020)

Clase de Servicio	Descripción	Aplicaciones Comunes	Frecuencia y Carga
Clase A: Servicio de Reserva o Poco Frecuente	Operaciones esporádicas con períodos prolongados de inactividad. Manejo de cargas precisas a baja velocidad.	Plantas de energía, servicios públicos, salas de máquinas, estaciones transformadoras.	Levantamientos infrecuentes, carga nominal ocasional.
Clase B: Servicio Ligero	Requisitos de servicio ligeros con baja velocidad operativa.	Talleres de reparación, ensamblaje ligero, almacenes pequeños.	2-5 levantamientos por hora, altura promedio de 10 pies.

Clase C: Servicio Moderado	Operaciones industriales moderadas con cargas promedio del 50% de la capacidad nominal.	Talleres mecánicos, plantas de papel y cartón.	5-10 levantamientos por hora, altura promedio de 15 pies, no más del 50% de los levantamientos a plena capacidad.
Clase D: Servicio Pesado	Operaciones frecuentes en entornos industriales exigentes con altas velocidades.	Fundiciones, talleres de fabricación, almacenes de contenedores, operaciones con cubos o imanes.	10-20 levantamientos por hora, altura promedio de 15 pies, no más del 65% de los levantamientos a plena capacidad.
Clase E: Servicio Severo	Manejo constante de cargas cercanas a la capacidad nominal durante toda la vida útil.	Operaciones con cubos magnéticos, plantas de fertilizantes, manipulación de contenedores.	Más de 20 levantamientos por hora cerca de la capacidad nominal.
Clase F: Servicio Continuo y Severo	Operaciones continuas en condiciones severas. Diseñada para máxima confiabilidad y facilidad de mantenimiento.	Aplicaciones personalizadas en operaciones críticas de producción.	Levantamientos constantes y severos a plena capacidad, diseñadas para producción industrial intensa.

La norma CMAA 70 establece una clasificación técnica de las grúas en función de las clases de carga y los ciclos de operación, proporcionando un marco para definir su aplicación óptima y las condiciones de exigencia a las que estarán sometidas. Esta clasificación se fundamenta en el análisis del espectro de carga promedio y el número acumulado de ciclos a lo largo de la vida útil del equipo. Los parámetros correspondientes se presentan en la Tabla 2.2, donde se especifican las clases de carga junto con los factores de carga media efectiva (k) asociados a cada categoría.

Tabla 2.2 Definición de la clase de servicio de grúa CMAA en términos de clase de carga y ciclos de carga. Extraído de CMAA (2020)

Clase de carga	Ciclos de carga				k: factor de carga efectiva media
	N_1	N_2	N_3	N_4	
L_1	A	B	C	D	0.35 - 0.53
L_2	B	C	D	E	0.531 - 0.67
L_3	C	D	E	F	0.671 - 0.85
L_4	D	E	F	F	0.851 - 1.00
	Uso ocasional seguido de largos periodos de inactividad	Uso regular en operaciones intermitentes	Uso regular en operaciones continuas	Uso regular en operaciones continuas severas	

Clases de Carga

Las clases de carga se definen de acuerdo con la magnitud de las cargas que la grúa debe manejar en relación con su capacidad nominal:

Clase L_1 :

Las grúas en esta categoría levantan la carga nominal de manera excepcional y normalmente manejan cargas ligeras.

Clase L_2 :

Las grúas rara vez levantan la carga nominal y manejan cargas normales de aproximadamente un tercio ($1/3$) de la capacidad nominal.

Clase L_3 :

Estas grúas levantan la carga nominal de manera frecuente y manejan cargas entre $1/3$ y $2/3$ de la capacidad nominal.

Clase L_4 :

Las grúas en esta clase operan regularmente con cargas cercanas a la capacidad nominal.

Ciclos de Operación

Los ciclos de operación se clasifican en cuatro categorías, según el número acumulado de ciclos durante la vida útil de la grúa:

N_1 : Entre 20,000 y 100,000 ciclos.

N_2 : Entre 100,000 y 500,000 ciclos.

N_3 : Entre 500,000 y 2,000,000 ciclos.

N_4 : Más de 2,000,000 ciclos.

Capítulo 3. Estado del Arte

3.1 Introducción general al uso de CFRP en estructuras metálicas

El uso de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) en el refuerzo de estructuras metálicas ha ganado relevancia en la ingeniería mecánica y civil debido a sus propiedades, como alta resistencia, rigidez y resistencia a la corrosión. En el contexto de vigas utilizadas en puentes grúa el refuerzo con CFRP se presenta como una solución efectiva para mejorar el comportamiento a flexión y prolongar la vida útil de estas estructuras Yang et al. (2013). La aplicación de CFRP se presenta como una solución para mejorar el comportamiento a flexión y prolongar la vida útil de estas estructuras, Elkhabeery, Safar, and Mourad (2018) estudiaron el efecto del refuerzo de vigas de acero tipo I con CFRP adherido a la brida inferior bajo flexión, encontrando que este método puede aumentar la capacidad de carga hasta en un 37%, dependiendo de factores como la relación de esbeltez del alma. Además, demostraron que el uso de CFRP de alto módulo de elasticidad mejora la rigidez de la viga, retrasando la fluencia plástica y reduciendo las deformaciones y esfuerzos.

3.2 Comportamiento a flexión de vigas de acero reforzadas con CFRP

El comportamiento mecánico de las vigas reforzadas con CFRP ha sido objeto de numerosos estudios experimentales y numéricos. Tahar et al. (2019) (Tahar et al. 2019) realizaron un estudio sobre vigas de acero reforzadas con CFRP, observando que la adhesión entre el CFRP y la viga de acero juega un papel crucial en la transferencia de esfuerzos. Encontraron que el refuerzo con CFRP puede aumentar significativamente la capacidad de carga y la rigidez de la viga, aunque también identificaron que la falla por adhesión del refuerzo es un problema frecuente debido a la alta concentración de esfuerzos en los extremos de la placa de CFRP

Por su parte, Selvaraj y Madhavan (2020) analizaron el uso de laminados de CFRP de bajo módulo en vigas de acero y concluyeron que la configuración de refuerzo influye directamente en la rigidez estructural. Encontraron que los CFRP de bajo módulo pueden mejorar la capacidad última de momento de las vigas hasta en un 62% y que el diseño de refuerzo debe considerar la esbeltez de la viga y la cantidad de CFRP aplicado para maximizar su efectividad.

En aplicaciones dinámicas, como los puentes grúa, el CFRP también ha demostrado ser efectivo en la mejora del comportamiento estructural. Wang et al. (2023) llevaron a cabo una modelización numérica avanzada mediante elementos finitos para estudiar la falla por adhesión en vigas de acero reforzadas con CFRP y concluyeron que el uso de adhesivos dúctiles mejora la distribución de esfuerzos y retrasa la falla por adhesión. Su

estudio resaltó la importancia de seleccionar adecuadamente el adhesivo y la configuración del refuerzo para minimizar los efectos adversos de la separación entre el CFRP y la viga de acero.

3.3 Durabilidad de la unión adhesiva CFRP-acero

Un aspecto crítico en el refuerzo con CFRP es la calidad de la unión adhesiva entre el material compuesto y el acero. Esta unión es responsable de la transferencia adecuada de las cargas, por lo que cualquier deficiencia en la adherencia puede comprometer el desempeño estructural. Nguyen et al. (2012) evaluaron la durabilidad de uniones adhesivas acero-CFRP expuestas a ambientes agresivos, incluyendo agua de mar y ciclos térmicos, demostrando que la resistencia de la unión se ve afectada significativamente con el tiempo, especialmente en condiciones de alta humedad y temperatura. Asimismo, Guao et al. (2023) analizaron los mecanismos de falla en uniones adhesivas FRP-metal, identificando que la diferencia en los coeficientes de expansión térmica, la corrosión del metal y la degradación del adhesivo influyen en la integridad estructural de la unión en condiciones de envejecimiento acelerado. Resaltaron la necesidad de tratamientos superficiales del acero y adhesivos para mejorar la adherencia y prevenir fallas prematuras. Lu Ke et al. (2020) estudiaron el efecto de temperaturas elevadas en uniones híbridas CFRP-acero utilizando adhesivos epóxicos, demostrando que el rendimiento mecánico del adhesivo se degrada significativamente a medida que aumenta la temperatura, afectando la resistencia a la tracción y la rigidez de la unión.

El comportamiento mecánico de las uniones adhesivas también está influenciado por las condiciones de curado del adhesivo. Nguyen et al. (2013) estudiaron el impacto del curado en uniones acero-CFRP sometidas a carga mecánica y ciclos térmicos, concluyendo que el curado a temperaturas elevadas mejora la resistencia de la unión y prolonga su vida útil bajo condiciones ambientales exigentes. Por otro lado, Zhang et al. (2022) investigaron la resistencia interfacial de vigas de acero reforzadas con CFRP bajo temperatura y fluencia, evidenciando que la interacción entre el CFRP y la viga de acero se ve afectada por deslizamientos en la interfaz, lo que puede reducir la capacidad de carga y la rigidez de la estructura. Estos estudios recalcan la importancia de considerar tanto los efectos ambientales como los procesos de fabricación en la optimización de uniones adhesivas para aplicaciones estructurales.

3.4 Análisis numérico y validación experimental

El análisis numérico, complementado con la validación experimental y analítica, constituye una herramienta fundamental para evaluar el comportamiento estructural de vigas de acero reforzadas con CFRP. Zhao et al. (2024) realizaron un estudio combinando ensayos experimentales y simulaciones por elementos finitos (FEA) para analizar la capacidad de carga de vigas reforzadas bajo distintos patrones de refuerzo. Sus hallazgos indicaron que un aumento en el número de capas de CFRP puede incrementar la capacidad de carga en hasta un 11.1%, evidenciando la efectividad del refuerzo en la mejora de la resistencia estructural de las vigas. De manera similar, Kyriadis et al. (2021) evaluaron el impacto del espesor, la longitud del parche y el tipo de adhesivo en el comportamiento mecánico de vigas de acero reforzadas, concluyendo que el uso de CFRP no solo incrementa la rigidez estructural, sino que también optimiza la capacidad máxima de carga. Adicionalmente, sus modelos de elementos finitos validaron con alta precisión los resultados experimentales, permitiendo una mejor predicción del comportamiento estructural.

Por su parte, Siwowski y Siwowska (2018) compararon esquemas de refuerzo con CFRP pasivos y activos, destacando que el uso de placas pretensadas incrementa la resistencia última de las vigas en hasta un 28%, dependiendo del nivel de pretensado y las propiedades del material. Asimismo, identificaron la delaminación y la adhesión del CFRP como modos de falla críticos, lo que resalta la necesidad de un adecuado anclaje y del control de esfuerzos interfaciales para evitar fallas prematuras. En este sentido, la integración de estudios experimentales y simulaciones numéricas permite ajustar parámetros importantes, como el espesor y la orientación de las fibras de CFRP, garantizando que las vigas reforzadas cumplan con los requisitos estructurales en aplicaciones sometidas a carga complejas y dinámicas.

3.5 Aplicaciones de CFRP en distintos tipos de grúas

El desarrollo de materiales compuestos ha sido ampliamente estudiado para aplicaciones en diversos tipos de grúas, demostrando mejoras significativas en la reducción de peso y resistencia estructural. Investigaciones recientes han explorado el uso de estos materiales en grúas torre, grúas portuarias, grúas sobre orugas, grúas tipo "jib" y puentes grúas, entre otras, aportando enfoques en el diseño y mejorando sus componentes.

La investigación de Tulekov et al (2023) analizó el uso de materiales compuestos en grúas torre, destacando que la implementación de materiales compuestos permite

reducir el peso estructural en aproximadamente un 20% en comparación con las grúas de acero, manteniendo la capacidad de carga y aumentando la eficiencia en términos de transporte y ensamblaje. De manera similar, (Suvorov et al. 2023b) demostraron que las grúas portuarias equipadas con CFRP experimentan una reducción de peso del 18%, lo que contribuye a mejorar su capacidad operativa en ambientes marítimos, a la vez que enfrentan retos relacionados con el proceso de fabricación y la estabilidad estructural.

Por otro lado, Solazzi (2024) realizó un estudio de viabilidad en una grúa sobre orugas de gran tamaño utilizando materiales compuestos. El rediseño del brazo principal de la grúa, combinado con el uso de materiales avanzados como fibra de carbono y resina epóxica, permitió una reducción del peso del 34%, sin comprometer la resistencia estructural ni la capacidad de carga dinámica. Asimismo, Solazzi and Danzi (2024) investigaron una grúa pescante tipo "jib", exploraron la viabilidad de rediseñar una grúa giratoria utilizando materiales compuestos y técnicas de pretensado para reducir su peso total y mejorar el rendimiento estructural. El estudio incluyó el rediseño de componentes importantes, como el brazo y la columna, utilizando acero estructural, aleación de aluminio y compuestos de fibra de carbono con resina epóxica (CFRP). A través de análisis analíticos y numéricos con software de elementos finitos ANSYS se demostró que la configuración compuesta con pretensado logró la mayor reducción de peso, representando solo el 21 % del peso de una grúa en acero. Además, la técnica de pretensado permitió minimizar las deflexiones verticales inducidas por la carga de izaje, lo que posibilitó un diseño con menor sección transversal.

En el ámbito de puentes grúas, diversas investigaciones han explorado el uso de materiales compuestos como el CFRP, como una estrategia para aligerar estructuras y mejorar su resistencia bajo condiciones críticas de carga. Por ejemplo, (H. et al. 2012) investigaron el comportamiento mecánico de vigas de grúas reforzadas con capas de CFRP bajo cargas estáticas y cíclicas. Sus resultados experimentales demostraron que el número de capas de CFRP tiene un impacto en la mejora de la capacidad de carga y en la resistencia a la fatiga. Las vigas reforzadas con tres y cuatro capas de CFRP lograron incrementos del 24.6% y 26.1% en la resistencia a fluencia, respectivamente. Además, los modelos numéricos desarrollados mediante el método de elementos finitos (FEM) confirmaron que los resultados experimentales son consistentes, confirmaron la viabilidad de este método para mejorar diseños estructurales reforzados con CFRP

Por otro lado, (Yang et al. 2013) analizaron la aplicación de CFRP en vigas de grúas utilizadas en talleres de una planta siderúrgica, cuyo objetivo principal era mejorar la

resistencia a la fatiga causado por el desgaste y aumento de las cargas. Los autores describieron un proceso constructivo minucioso que incluyó el tratamiento superficial del acero, la disposición de capas de CFRP y el uso de adhesivos estructurales. Este estudio destacó que el refuerzo con CFRP no solo mejoró la resistencia estructural, sino que también permitió extender la vida útil de las vigas bajo condiciones ambientales adversas, como altas temperaturas y exposición al polvo industrial.

Finalmente, Yue et al (2016) llevaron a cabo un análisis sobre el refuerzo a fatiga de vigas de grúa mediante CFRP, enfocándose en las regiones críticas, como las conexiones entre el alma y los extremos inferiores de los rigidizadores. Este estudio confirmó que la aplicación de capas longitudinales de CFRP, combinadas con refuerzos en forma de U, reduce significativamente los factores de concentración de esfuerzos, prolongando la vida a fatiga de las vigas. Además, el análisis de factores de intensidad de esfuerzo mostró que las vigas reforzadas con CFRP experimentan un crecimiento más lento de fracturas por fatiga, particularmente cuando se aplican configuraciones óptimas en las capas de refuerzo. Estas mejoras subrayan la eficacia del CFRP en la mitigación de problemas de fatiga en estructuras sometidas a altas cargas cíclicas.

A pesar de los avances logrados, el uso de CFRP enfrenta desafíos prácticos y económicos que deben ser considerados, como las limitaciones principales el alto costo inicial de los materiales y la complejidad de los procedimientos de instalación, que requieren mano de obra especializada. Además, (Alsuhaibani, Yazdani, and Benerberu 2022) señalaron que las condiciones ambientales adversas, como la exposición a agentes químicos y humedad, representan un riesgo para la durabilidad del refuerzo. Estas limitaciones nos indica la necesidad de implementar estrategias de mantenimiento y monitoreo que garanticen el reforzamiento a largo plazo de las estructuras.

Capítulo 4. Análisis teórico

4.1 Cálculo de clasificación de servicio de grúa

La norma CMAA 70 establece categorías de servicio para puentes grúa con el objetivo de diseñar equipos económicos y adecuados para sus condiciones específicas de trabajo. En el presente estudio, se analiza el comportamiento a flexión de una viga I reforzada con CFRP destinada a soportar un puente grúa de hasta 20 toneladas, ubicado en un taller de manufactura dedicado a la fabricación de estructuras metálicas.

Para determinar la clasificación del puente grúa dentro del taller, de acuerdo con la norma CMAA 70, se consideraron las condiciones operativas específicas del equipo. El peso máximo unitario de las estructuras metálicas a transportar es de 20 toneladas, coincidiendo con la capacidad nominal del puente grúa. Este operará durante jornadas diarias de 9 horas, realizando un promedio de 7 ciclos de izaje por hora, lo que representa un total de 63 ciclos diarios.

Para el cálculo del factor medio efectivo de carga (k) se asignaron valores de pesos relativos (W) y sus probabilidades (P) de acuerdo con los escenarios de trabajo de la grúa. En la Tabla 4.1 se observan los valores:

Tabla 4.1 Asignación de Pesos Relativos y Probabilidades para el Cálculo del Factor Medio Efectivo de Carga. Fuente propia.

Porcentaje de levantamientos	Peso relativo (W)	Probabilidad (P)
50%	$W_1 = 0.50$	$P_1 = 0.30$
30%	$W_2 = 1.0$	$P_2 = 0.20$
20%	$W_3 = 0.25$	$P_3 = 0.50$

Ahora sustituyendo los valores de la fórmula 2.15:

$$K = \sqrt[3]{(0.50)^3 * (0.30) + (1.0)^3(0.20) + (0.25)^3 * (0.50)}$$

$$K = 0.6227$$

Según el valor de K hallado nos indica que la carga promedio es del 62.27% de la capacidad máxima de la grúa.

En los ciclos de carga de consideró N_2 , debido a que la grúa tiene aplicación para uso de taller manufacturero de estructuras metálicas con uso intermitente

Según los cálculos realizados, la grúa pertenece a la Categoría C conforme a la clasificación establecida por la norma CMAA-70. Esta categoría corresponde a un nivel de servicio moderado, lo que implica que la grúa operará con cargas que promedian el 50% de su capacidad nominal, con entre 5 y 10 ciclos de elevación por hora y una altura promedio de 15 pies por elevación. Además, no se permite que más del 50% de los ciclos se realicen a plena capacidad nominal. Esta clasificación asegura que la grúa cumple con los requisitos operativos y de desempeño para su aplicación para la industria de manufactura de estructuras metálicas.

4.2 Análisis de carga

4.2.1 Carga Muerta (Dead Load - DL)

La carga muerta incluye el peso de todas las partes fijas de la estructura del puente grúa, como las vigas principales, testeras, rieles, motoredutores y componentes asociados. Aún no se tienen los valores exactos de las vigas estructurales, pero este cálculo se incorporará después de seleccionarlos.

4.2.2 Carga del Carro (Trolley Load - TL)

Esta carga corresponde al peso del polipasto, el carro y sus accesorios. Según los datos técnicos del polipasto seleccionado, el peso es de 700 kg.

4.2.3 Carga Nominal o de Levantamiento (Lifted Load - LL)

La carga de levantamiento corresponde al peso de la carga útil que será manipulada por la grúa, en este caso, hasta un máximo de 20 toneladas. Además, se incluyen las cargas adicionales generadas por dispositivos de levantamiento como ganchos, eslingas, y otros accesorios.

4.2.4 Fuerzas de Inercia Vertical (Vertical Inertia Forces - VIF)

Las fuerzas de inercia vertical son generadas por el movimiento del puente y sus componentes y por los polipastos que levantan o bajan cargas. Estas fuerzas adicionales se incluyen en el diseño para simplificar los efectos dinámicos mediante la aplicación de factores específicos como el factor de carga muerta (DLF) y el factor de carga de elevación (HLF).

A continuación, se muestra la Tabla 4.2 con las especificaciones técnicas del polipasto:

Tabla 4.2 Especificaciones técnicas del polipasto.

Especificación	Detalle
Carga máxima	20000 kg
Altura de elevación	4.0 m
Velocidad de elevación	Rápida: 3.00 m/min (9.84 ft/min) Lenta: 0.50 m/min (1.64 ft/min)
Velocidad del carro	Rápida: 20.0 m/min (65.61 ft/min) Lenta: 5.0 m/min (16.40 ft/min)
Frecuencia	60 Hz
Grado de protección	IP66

4.2.4.1 Factor de Carga Muerta (DLF)

Este factor se aplica al peso muerto del puente grúa, el trolley y los equipos, considerando la velocidad de desplazamiento en pies por minuto (FPM). Según la norma CMAA 70, este factor se define mediante la ecuación 4.1:

$$DLF = 1.1 \leq 1.05 + \frac{\text{travel speed} \left(\frac{ft}{min} \right)}{2000} \leq 1.2 \quad \text{Ec. 4.1}$$

Calculando los DLF para el polipasto:

$$DLF_T = 1.05 + \frac{65.61 \frac{ft}{min}}{2000} = 1.08 \approx 1.1$$

Calculando los DLF para el puente grúa:

$$DLF_B = 1.05 + \frac{80 \frac{ft}{min}}{2000} = 1.09 \approx 1.1$$

4.2.4.2 Factor de Carga de Alzamiento (HLF)

Este factor se aplica al movimiento de la carga nominal en la dirección vertical y tiene como objetivo cubrir las fuerzas de inercia generadas durante el levantamiento o descenso de la carga mediante el polipasto. Este factor considera las incertidumbres asociadas al funcionamiento del sistema de elevación, como aceleraciones repentinas y posibles oscilaciones de la carga.

El HLF se calcula como un porcentaje de la velocidad de elevación en pies por minuto (FPM) del polipasto, conforme a la ecuación 4.2 establecida por la norma CMAA 70:

$$HLF = 0.15 \leq 0.005 * \text{velocidad de elevación (FPM)} \leq 0.5 \quad \text{Ec. 4.2}$$

Considerando la velocidad rápida se obtiene:

$$HLF = 0.005 * 9.84 \frac{ft}{min} = 0.0492$$

Según los límites mínimos de la norma CMAA se considera el HLF el valor mínimo de 0.15.

4.2.4.3 Cargas de Inercia Debido al Manejo (Inertia Forces from Drives IFD)

Las fuerzas de inercia asociadas a los accionamientos de desplazamiento son generadas por la aceleración o desaceleración del puente grúa y del carro. Estas fuerzas dependen del par aplicado a las ruedas motrices. El cálculo del factor IFD se realizó utilizando la siguiente ecuación:

$$IFD = 0.078 * \text{Tasa de aceleración o desaceleración} \left(\frac{ft}{s^2} \right) \geq 0.025$$

Las tasas de aceleración se determinaron de acuerdo con la norma CMAA, usando la tabla correspondiente (Tabla 4.3) y considerando las velocidades de desplazamiento del puente y del polipasto.

Tabla 4.3 Guía para el rango típico de tasas de aceleración del movimiento de desplazamiento. Extraído de ((CMAA) 2020)

Free Running Full Load Speed	a= acceleration Rate in Feet per Sec. Per Sec. For AC or DC ² Motors
Ft. Per Min.	Ft. Per Sec.
60	1.0
120	2.0
180	3.0
240	4.0
300	5.0
360	6.0
420	7.0
480	8.0
540	9.0
600	10.0

En el caso de la grúa se seleccionó una velocidad máxima del desplazamiento transversal que es del polipasto con un valor de $65.61 \frac{ft}{min}$, según la tabla 4.4 se obtiene la tasa de aceleración más cercano $0.25 \frac{ft}{s^2}$. Para el caso del movimiento longitudinal de la grúa se tiene la velocidad de 80 ft/min, interpolando obtenemos su tasa de aceleración es de $0.267 \frac{ft}{s^2}$.

$$\text{Factor } IFD_{polipasto} = 0.078 * 0.25 = 0.0195$$

El valor de IFD no puede ser menos a 0.025, por lo tanto, el *Factor IFD_{Polipasto}* se selecciona el valor mínimo de 0.025.

$$\text{Factor IFD}_{\text{Grúa}} = 0.078 * 0.267 = 0.0208$$

El valor de IFD no puede ser menos a 0.025, por lo tanto, el *Factor IFD_{Grúa}* se selecciona el valor mínimo de 0.025.

En ese sentido, calculando el valor del IFD se multiplica por la carga nominal que la grúa la izar, en la siguiente ecuación se obtiene el resultado:

$$\text{IFD} = 20000\text{Kg} * 0.025 = 500\text{Kg}$$

$$\text{IFD} = 4905\text{N}$$

4.2.5 Cálculo de cargas adicionales

4.2.5.1 Cálculo de la carga de viento en funcionamiento (WLO)

No se realizó el cálculo de esta carga debido a que el diseño de la grúa no contempla su uso en ambientes exteriores, lo que elimina la exposición a este tipo de cargas.

4.2.5.2 Cálculo de la carga por inclinación (SK)

No se efectuó el cálculo de este tipo de carga, ya que el diseño de la grúa no considera situaciones donde estaría sometida a dichas condiciones.

4.2.6 Cargas extraordinarias

No se llevó a cabo el cálculo de cargas extraordinarias, tales como la carga por viento máximo (WLS) o por colisión (CF), dado que el diseño de la grúa asegura que no estará expuesta a estas situaciones.

4.2.7 Combinación de cargas

La norma CMAA (2020), en su inciso 3.3.2.6, establece que la combinación de cargas para un puente grúa en uso normal bajo condiciones de carga típicas debe incluir tanto las cargas principales como las cargas adicionales derivadas de los movimientos del puente y del polipasto. Para el diseño del puente grúa con capacidad nominal de 20 toneladas, se utiliza la ecuación 4.3:

$$P = DL(DLF_B) + TL(DLF_T) + LL(1 + HLF) + IFD \quad \text{Ec. 4.3}$$

Donde:

DL: Carga muerta (no se incluye, posteriormente se considerará).

DLF_B: Factor peso muerto grúa (1.1)

TL: Carga del polipasto (700 kg)

DLF_T: Factor peso del polipasto (1.1)

LL: Carga nominal (20000 kg)

HLF: Factor de Carga de Alzamiento (0.15)

IFD: Cargas de Inercia Debido al Manejo (500 kg)

La carga principal de diseño P se determina de acuerdo con la Ecuación 4.3, la carga principal de diseño P es soportada por el polipasto que apoya sobre sus 4 ruedas del polipasto, y a su vez se apoyan por dos vigas puente, por tanto, la carga P es dividida para un factor de 4 como se indica en la ecuación 4.4.

$$P = \frac{DL(DLF_B) + TL(DLF_T) + LL(1 + HLF) + IFD}{4} \quad \text{Ec. 4.4}$$

$$P = \frac{700Kg (1.1) + 20000 Kg(1 + 0.15) + 500Kg}{4} =$$

$$P = 6067.5 Kg$$

En la Figura 4.1 se presenta una vista isométrica del puente grúa birriel propuesta, donde se pueden observar sus principales componentes estructurales y su disposición sobre los rieles de desplazamiento. Por otro lado, la Figura 4.2 muestra un detalle de la zona de contacto entre las ruedas del puente grúa y el riel de la viga principal.

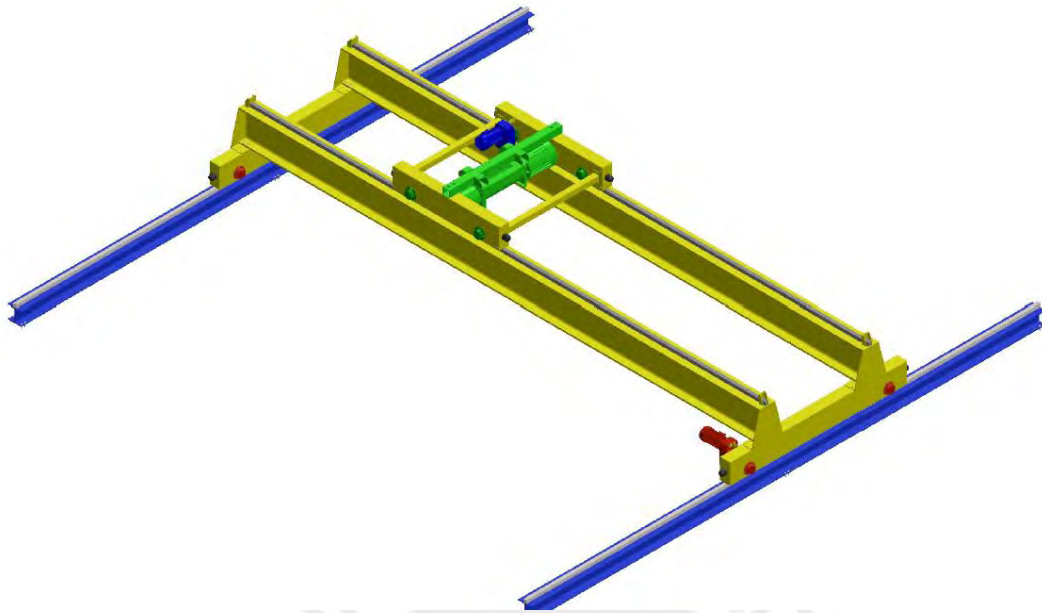


Figura 4.1 Vista isométrica del puente grúa birriel.



Figura 4.2 Zona de contacto de las ruedas y la viga principal del puente grúa birriel.

4.3 Dimensionamiento de viga principal del puente grúa

Las vigas puente del puente grúa birriel representan los elementos estructurales más críticos y determinantes del diseño, debido a que están encargadas de resistir la totalidad de la carga de trabajo transmitida por el polipasto. En este contexto, la luz efectiva entre los apoyos, definida como la distancia libre entre los extremos de las vigas, se ha establecido en 10 metros, considerando tanto las restricciones físicas del espacio como los requisitos de diseño estructural.

Para el presente análisis, se asume que las vigas están simplemente apoyadas en ambos extremos y sometidas a la acción de dos cargas puntuales generadas por las ruedas del polipasto. Dichas cargas se encuentran separadas entre sí por una distancia

longitudinal de 1.5 metros ($l_c = 1.5 \text{ m}$). La carga principal de diseño P tiene un valor de 24270 kg, las cuales se distribuyen equitativamente entre las dos cargas puntuales, resultando en 6067.5 Kg por cada punto de apoyo de la rueda.

La disposición simétrica de las cargas puntuales, equidistantes de los extremos de la viga, produce una deflexión máxima en su punto medio, lo que la convierte en una parte crítica del diseño y verificación estructural.

4.3.1 Cálculo de la deflexión máxima permisible

De acuerdo con la Norma CMAA 70, inciso 3.5.5.1, se establece que la deflexión vertical máxima permisible para las vigas de un puente grúa no debe superar el valor de $\frac{L}{888}$ corresponde a la luz efectiva entre los apoyos de la viga puente. Este criterio asegura que las deformaciones estructurales se mantengan dentro de límite aceptable, garantizando la integridad funcional del puente grúa y la seguridad en su funcionamiento.

En el caso de este diseño, considerando una luz de $L = 10000\text{mm}$, la deflexión máxima permitida se calcula mediante la ecuación 4.5:

$$y_{max} < \frac{L}{888} \quad \text{Ec. 4.5}$$

$$y_{max} = \frac{10000\text{mm}}{888} = 11.26\text{mm}$$

4.3.2 Cálculo del momento de inercia de la viga

Antes de determinar la sección transversal de la viga puente, se establece un valor de momento de inercia referencial utilizando la deflexión máxima permisible previamente calculada. Para ello, se plantea el Diagrama de Cuerpo Libre (DCL) de la viga puente, que corresponde a una viga simplemente apoyada en sus extremos. La viga está sujeta a dos cargas puntuales de magnitud igual y equidistantes respecto a los extremos, como se muestra en la Figura 4.3.

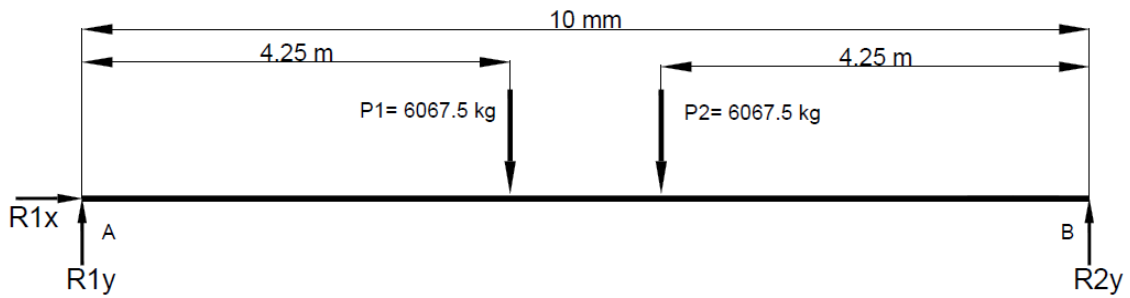


Figura 4.3 DCL de la viga principal del puente grúa.

Las cargas P_1 y P_2 tienen un valor de 6067.5 kg, esta carga esta aplicadas en dos puntos de la viga que representan los apoyos de las ruedas del polipasto, el P_1 esta localizado a 4250mm desde el extremo izquierdo (A) y P_2 a 5750mm desde el mismo extremo. Estas posiciones de las cargas son simétricas, permitiendo calcular el momento de inercia mediante la ecuación de flexión para vigas bajo cargas puntuales, como se observa en la Figura 4.4. Se aplica el método de superposición, expresado en la ecuación 4.6,

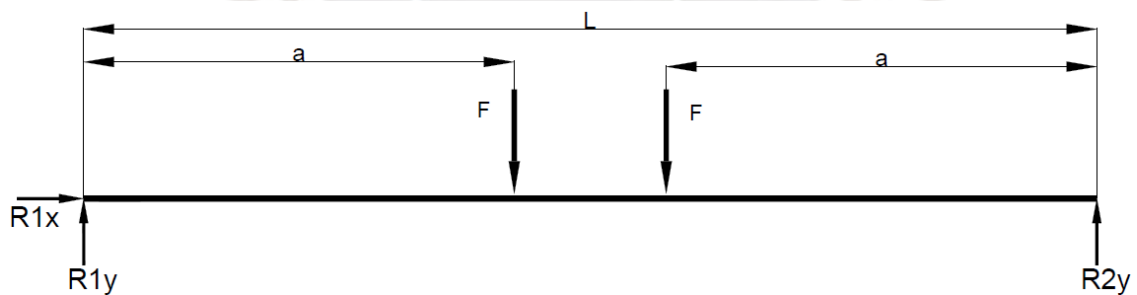


Figura 4.4 DCL de la viga simplemente apoyada con cargas puntuales equidistantes

$$y_{max} = \frac{f * a}{24 * E * I} (3 * l^2 - 4 * a^2) \quad \text{Ec. 4.6}$$

Donde:

y_{max} : Deflexión máxima

f : Fuerza

l : Distancia entre apoyos

a : Distancia entre apoyos y la carga puntual

L : Distancia entre apoyos

I : Momento de inercia

$$I = \frac{f * a}{24 * E * y_{max}} (3 * l^2 - 4 * a^2)$$

$$I = \frac{6067.5Kg * 4.25m}{24 * 200 * 10^9Pa * (11.26 * 10^{-3}m^4)} (3 * (10m)^2 - 4 * (4.25m)^2)$$

$$I = 0.001066 m^4 \approx 106597.36 cm^4$$

Según el cálculo obtenido del momento de inercia se selecciona el perfil $W 610 \times 155$, el cual tiene $129583 cm^4$ un valor de cumple con el requisito mínimo.

4.3.3 Análisis estático de la viga puente.

El análisis estático de la viga puente se realizó considerando las condiciones de carga distribuidas y puntuales, tal como se presenta en el diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 4.5. Para el cálculo, se aplicaron los principios de equilibrio estático mediante la sumatoria de fuerzas y momentos, considerando el peso propio de la sección transversal de la viga.

En el análisis se incluyeron una carga distribuida uniforme debido al peso de la propia viga seleccionada ($W 610 \times 155$) con un valor de $1520.55 N/m$ a lo largo de toda la longitud de la viga, y dos cargas puntuales de $P_1 = P_2 = 59522.18 N$ localizadas a $4250mm$ y $5750mm$, respectivamente. En donde los puntos de apoyo de la viga en el extremo izquierda (A) y un apoyo móvil en el extremo derecho (B).

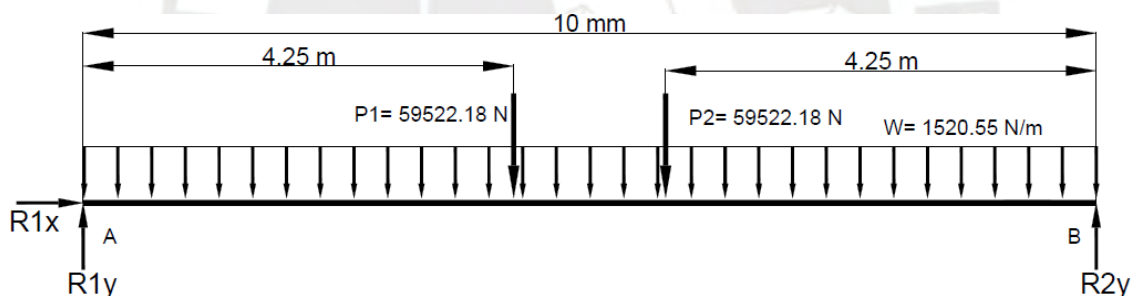


Figura 4.5 DCL de la viga principal del puente grúa con carga distribuida y puntuales.

4.3.3.1 Cálculo de diagramas de fuerza cortante

De acuerdo con las reacciones obtenidas mediante las ecuaciones 5.15 y 5.16, se graficó el diagrama de fuerzas cortantes mostrado en la Figura 4.6, el cual refleja la distribución de las fuerzas internas a lo largo de la viga bajo la carga muerta y los puntos de apoyo. En el apoyo, A se registra una fuerza cortante máxima positiva de $67.12 KN$. Es importante precisar que los trazos oblicuos del diagrama corresponden a curvas de segundo grado (parabólicas) debido a la acción de la carga distribuida, aunque el cambio de pendiente es pequeño. Los cambios del momento flector en los tramos $4.250m$ y $5.750m$, se deben a las 2 ruedas que están apoyadas en la viga y estas cargas son puntuales, las cuales tienen un valor de $1.14KN$.

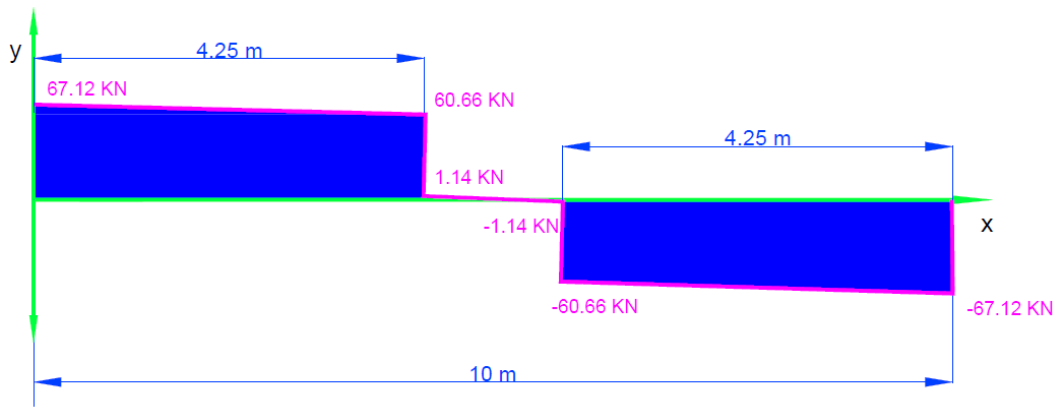


Figura 4.6 Diagrama de carga cortante de la viga del puente grúa.

4.3.3.2 Cálculo de diagramas de momento flector

El diagrama de momento flector de la viga del puente grúa, presentado en la Figura 4.7, muestra la distribución de momentos a lo largo de la viga bajo las condiciones de carga y apoyos. El momento máximo es de 271.98 kN*m, este momento se localiza en la mitad de la viga (5000mm), en valor es crítico debido a las cargas puntuales P_1 y P_2 y la carga distribuida uniformemente.

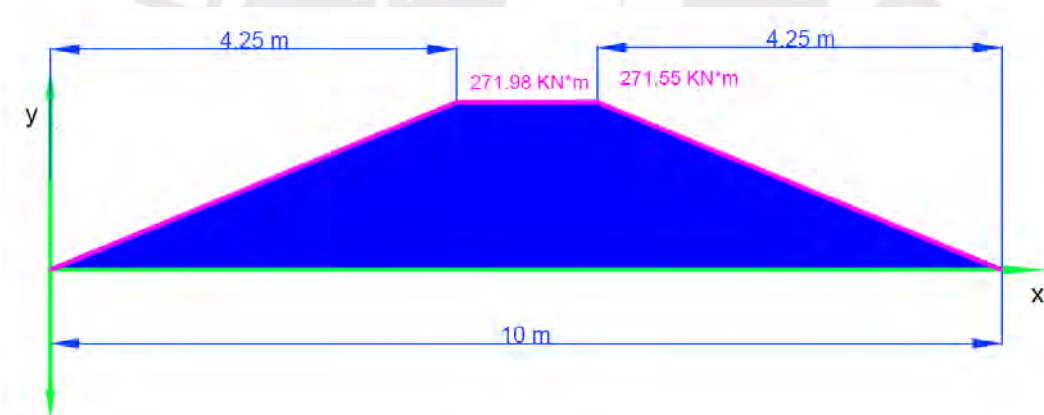


Figura 4.7 Diagrama de momento flector de la viga del puente grúa.

Para calcular el momento flector máximo de la viga, se consideran los aportes de las cargas puntuales y la carga distribuida, utilizando las ecuaciones 4.6 y 4.7.

La ecuación 4.6 se aplica para las cargas puntuales equidistantes y está definida como:

$$M_p = F * a \quad \text{Ec. 4.7}$$

Donde:

M_p : Momento flector debido a las cargas puntuales equidistantes.

F : Carga puntual

a : Distancia entre el apoyo y la carga puntual

Por otro lado, la ecuación 4.8 considera el efecto de la carga distribuida uniforme a lo largo de la viga, expresada como:

$$M_W = \frac{w * l}{8} \quad \text{Ec. 4.8}$$

Donde:

M_W : Momento flector por la carga distribuida.

w : Carga distribuida

l : Longitud de la viga (distancia entre los puntos de apoyo).

Para obtener el momento flector máximo, se suma el resultado de los momentos calculados de las ecuaciones 4.7 y 4.8, con la ecuación 4.9. Esto nos permite determinar las máximas solicitaciones internas que experimenta la viga bajo las condiciones de carga y apoyo analizadas, facilitando el diseño y validación estructural de la misma.

$$M_{max} = M_W + M_P \quad \text{Ec. 4.9}$$

$$M_{max} = \frac{w * l^2}{8} + F * a$$

$$M_{max} = \frac{(1520.55 \text{ N/m}) * (10\text{m})^2}{8} + (59522.18 \text{ N} * 4.25\text{m})$$

$$M_{max} = 19.0069 \text{ KN} * m + 252.9693 \text{ KN} * m$$

$$M_{max} = 271.976 \text{ KN} * m$$

4.3.3.3 Cálculo final de la deflexión de la viga puente

En este apartado se presenta el cálculo de la deflexión máxima de una viga puente sometida a dos cargas puntuales con un valor de 6068.5 kg, el valor de la deflexión obtenido es 9.26mm.

$$y_P = \frac{F * a}{24 * E * I} (3 * l^2 - 4 * a^2)$$

$$y_P = \frac{6067.5 \text{ kg} * 4.25 \text{ m}}{24 * (200 * 10^9 \text{ Pa}) * (12.9583 * 10^{-3} \text{ m}^4)} (3 * (10 \text{ m})^2 - 4 * (4.25 \text{ m})^2)$$

$$y_P = 0.00926 \text{ m} \approx 9.26 \text{ mm}$$

De manera similar se calcula la deflexión debido al peso de la misma viga (peso muerto), esta carga se representa de manera distribuida a lo largo de la viga, esta carga tiene un valor de 1520.55 N/m, el valor obtenido en la deflexión fue de 0.764mm.

$$y_w = \frac{5 * w * l}{384 * E * I}$$

$$y_w = \frac{5 * \left(1520.55 \frac{N}{m}\right) * (10m)}{384 * (200 * 10^9 Pa) * (12.9583 * 10^{-3} m^4)}$$

$$y_w = 0.000764 m \approx 0.764 mm$$

Calculando la deflexión total producido por las dos cargas de las ruedas y por el peso de la viga, A continuación, se detalla la suma de las dos deflexiones de la viga.

$$y_{total} = y_P + y_w$$

$$y_{total} = 9.26 mm + 0.764 mm = 10.024 mm \rightarrow Cumple$$

De acuerdo con el cálculo realizado utilizando la viga W 610x155, se tiene una deflexión máxima de 10.024mm, el cual cumple con el criterio establecido de la norma CMAA 70, debe de ser menor a 11.26 mm, debido a la condición del criterio $y_{max} < \frac{L}{888}$.

4.3.3.4 Esfuerzo de flexión y factor de seguridad de la viga

El cálculo de los esfuerzos máximos en la viga está directamente relacionado con el momento flector y este momento flector es producido por las cargas que actúan en la viga. Este cálculo es fundamental para evaluar la resistencia de la viga y garantizar que opere dentro de los límites permisibles establecidos por la norma CMAA70. El esfuerzo máximo debido a flexión se calculó utilizando la siguiente expresión:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} * c}{I_x}$$

Donde:

σ_{max} : Esfuerzo máximo

M_{max} : Momento flector máximo de la viga del puente grúa.

c : Distancia del centroide de la sección de la viga al borde más alejado.

I_x : Momento de inercia de la viga.

$$\sigma_{max} = \frac{(271.976 KN * m) * (0.3055m)}{0.0012958 m^4}$$

$$\sigma_{max} = 64.12 \text{ Mpa}$$

Posteriormente, se verificó que este esfuerzo máximo cumple con la condición de diseño para el material de la viga, considerando el límite elástico σ_y .

Posteriormente, se verificó que el esfuerzo máximo actuante en la viga cumple con la condición de diseño establecida para el material, tomando como referencia el 75 % del límite elástico σ_y . Esta condición tiene como finalidad garantizar que la estructura opere dentro del rango elástico del material, evitando así deformaciones plásticas permanentes.

$$\sigma_{max} < 0.75 \sigma_y$$

$$64.12 \text{ MPa} < (0.75) * 250 \text{ MPa}$$

$$64.12 \text{ MPa} < 187.5 \text{ MPa} \rightarrow \text{CUMPLE}$$

En relación con el análisis del factor de seguridad, se establece que este debe ser superior a 1.33 para garantizar un comportamiento estructural seguro bajo las condiciones de carga calculadas. Este valor representa el margen mínimo requerido al considerar el 75 % del límite elástico del material en el diseño. A continuación, se presenta el cálculo correspondiente para verificar que la viga cumple con este criterio:

$$n = \frac{0.75 \sigma_y}{\sigma_{max}} = \frac{187.5 \text{ MPa}}{64.12 \text{ MPa}} = 2.92$$

$$n = 2.92 > 1.33 \rightarrow \text{CUMPLE}$$

Durante el dimensionamiento de la viga principal de la grúa inicialmente se había seleccionado la viga W 610x140, el cumplió con el criterio de factor de seguridad en esfuerzos (valor en verde: 74.50 MPa, dentro del límite permitido de 187.5 MPa) y con el factor de seguridad mínimo exigido por la norma (valor en verde: 3.36, superior al mínimo requerido de 1.33). Sin embargo, este perfil no cumplió con el criterio de la norma CMAA 70 que la deflexión sea menor a $\frac{L}{888}$, con un valor de 11.54 mm, un valor superior al máximo permitido de 11.26 mm, lo que se resalta en rojo. Por esta razón, se optó por el perfil inmediato superior W 610x155, el cual sí cumplió tanto con el criterio de factor de seguridad (valor en verde: 3.90) como con el de deflexión (valor en verde: 10.02 mm), asegurando así el cumplimiento total de la norma CMAA 70. Como se observa en la Tabla 4.4.

Ante esta situación, una alternativa es reforzar el perfil W 610x140 con láminas de CFRP, lo que nos permite aumentar la rigidez de la viga, de esta manera la viga cumpliría los criterios de deflexión y factor de seguridad que la norma requiere. En los próximos capítulos se detallará la propuesta de reforzamiento de la viga con CFRP y su impacto en la mejora estructural del perfil original.

Tabla 4.4 Comparación de vigas en función a la norma CMAA70.

Parámetro	W 610 x 140	W 610 x 155	Parámetro máximo de norma CMAA 70
Deflexión (mm)	11.54	10.02	11.26
Esfuerzos (Mpa)	74.50	64.12	187.5
Factor de seguridad	3.36	3.90	1.33



Capítulo 5. Análisis Experimental

En este capítulo se presentan los ensayos experimentales realizados en el CITE de Materiales de la PUCP, con el objetivo de caracterizar la unión adhesiva entre la lámina de Carbodur S512 y las platinas de Acero A36, así como evaluar el comportamiento a flexión del material compuesto. Para ello, se llevaron a cabo pruebas de resistencia de la unión adhesiva y ensayos de flexión, siguiendo normas para garantizar la reproducibilidad de los resultados. A partir de los datos obtenidos, se analizó la capacidad de carga, la rigidez estructural y los modos de falla predominantes. Finalmente, se realizó una validación numérica mediante simulaciones por elementos finitos, permitiendo comparar los resultados experimentales con el comportamiento teórico y establecer criterios de mejoras para el diseño de refuerzos estructurales con CFRP.

5.1 Materiales

5.1.1 Acero Estructural

El acero A36 es ampliamente utilizado en la ingeniería estructural debido a su equilibrio entre resistencia y ductilidad. Este material es capaz de soportar cargas significativas, lo que lo hace ideal para aplicaciones en las que se requiere una estructura robusta y maleable. Además, su buena soldabilidad y resistencia lo convierten en una opción preferida para la construcción de puentes, grúas, edificios, y componentes industriales. Ver la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Propiedades mecánicas del acero A36

Parámetro	Símbolo	A36	Referencia
Resistencia a la fluencia (MPa)	σ_y	250	
Resistencia última a la tracción (MPa)	σ_u	400-500	(ASTM International 2019)
Módulo de elasticidad (GPa)	E	200	
Módulo de corte (GPa)	G	79.92	
Ratio de Poisson	ν	0.3	
Densidad ($\frac{kg}{m^3}$)	ρ	7800	

5.1.2 CFRP Fibra de carbono

El CFRP Sika S512 es un material compuesto avanzado, diseñado para el refuerzo estructural, que combina fibras de carbono con una matriz polimérica. Este material es conocido por su alta resistencia a la tracción y rigidez, lo que lo convierte en una opción

superior para aplicaciones que requieren una alta capacidad de carga sin añadir un peso considerable a la estructura. Para encontrar sus propiedades mecánicas de este compuesto se debe de analizar tanto la matriz como la fibra (ver Tabla 5.2), a continuación, se detallan las propiedades mecánicas de estos componentes y luego se unifica como un solo material.

Tabla 5.2 Propiedades mecánicas de la carbodur S512

Parámetro	Símbolo	Valor	Referencia
Volumen de la fibra	V_f	0.68	
Módulo de Elasticidad de la Fibra [GPa]	E_f	241	
Coefficiente de Poisson de la Fibra	ν_f	0.2	(Sika Corporation 2020)
Volumen de la Matriz	V_m	0.32	(F. L. Matthews 1999)
Módulo de Elasticidad de la Matriz [GPa]	E_m	3.6	
Coefficiente de Poisson de la Matriz	ν_m	0.35	

5.1.3 Adhesivo Sikadur-30

El Sikadur-30 es un adhesivo epóxico de alta resistencia, ampliamente utilizado para unir materiales como por ejemplo acero con CFRP en aplicaciones estructurales que requieren transferir los esfuerzos. Este material se caracteriza por su excelente rigidez, resistencia al corte y propiedades mecánicas isotrópicas. Su formulación está diseñada para garantizar un desempeño adecuado en condiciones de carga estática y dinámica, lo que lo convierte en una elección ideal para reforzar estructuras en combinación con materiales compuestos como CFRP.

Las propiedades mecánicas relevantes del Sikadur-30, obtenidas de su ficha técnica, se resumen en la Tabla 5.3. Estas propiedades son fundamentales para evaluar su desempeño en aplicaciones de refuerzo estructural y para modelar su comportamiento en simulaciones.

Tabla 5.3 Propiedades mecánicas de la sikadur-30

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Módulo de Elasticidad	E	11.2	GPa	
Coefficiente de Poisson	ν	0.3	-	
Módulo de incompresibilidad	K	9.33	GPa	(Sika 2020) (Wang and Wu 2018)
Módulo Cortante	G	4.31	GPa	
Densidad	ρ	1.7	g/cm^3	

5.2 Preparación y configuraciones de las probetas

En este estudio se han preparado diferentes configuraciones de probetas para evaluar el comportamiento a flexión de una platina de acero reforzada con CFRP S512 Carbodur (Carbon Fiber Reinforced Polymer). Las probetas constan de una platina de acero, láminas de CFRP y un adhesivo estructural de alta resistencia Sikadur-30 utilizado para adherir las láminas de CFRP a la platina. Las propiedades mecánicas se observan en la siguiente tabla 5.1, 5.2 y 5.3.

Las configuraciones de las probetas se observan en la siguiente Figura 5.1:

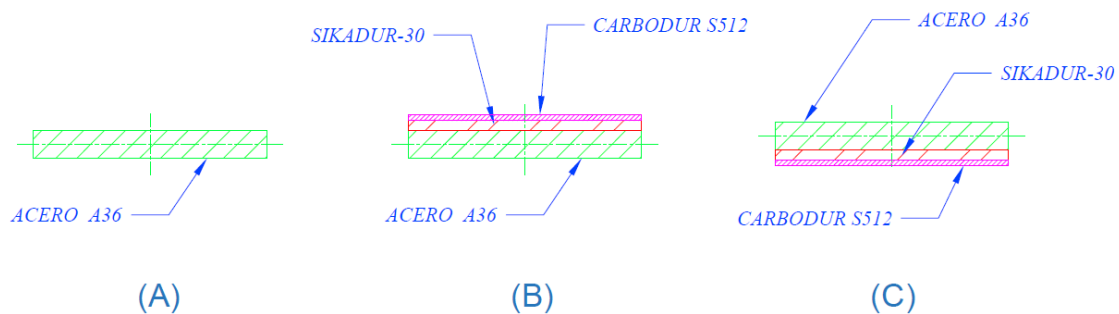


Figura 5.1 Configuraciones de las probetas: 1. Platina de Acero. 2. Placa CFRP S512 Carbodur.

La preparación de las probetas es un paso crucial para garantizar la validez y reproducibilidad de los ensayos de flexión. A continuación, se detallan las configuraciones y dimensiones de las probetas utilizadas en el estudio

- Configuración A: Platina de acero de 2"x1/8"x150mm.

- Configuración B: Platina de acero de 2"x1/8"x150mm con una lámina de CFRP de 2"x1.2mmx150mm en la parte superior, adheridas con resina epoxi Sikadur-30 espesor de 2mm.
- Configuración C: Platina de acero de 2"x1/8"x150mm con una lámina de CFRP de 2"x1.2mmx150mm en la parte inferior, adheridas con resina epoxi Sikadur-30 espesor de 2mm.

La preparación de las probetas es un paso crucial para garantizar la validez y reproducibilidad de los ensayos de flexión. A continuación, en la Tabla 5.4 se detalla las configuraciones y dimensiones de las probetas utilizadas de las probetas ensayadas en el laboratorio de materiales.

Tabla 5.4 Dimensiones y configuración de las probetas del ensayo de flexión.

Código de probetas	Configuración	Dimensiones [mm]	Material	Adhesivo	Cantidad
A1	A	200	Acero	N/A	1
B1-B3	B	150	CFRP+Acero	Sikadur-30	3
C1-C3	C	150	Acero+CFRP	Sikadur-30	3

5.2.1 Registro fotográfico de la preparación de probetas ensayadas

Paso 1. Habilitado y limpieza de platinas de acero A36 y láminas de CFRP carbodur S512.

En la Figura 5.2 se muestra el proceso de habilitado y limpieza de las platinas de acero A36 y las láminas de CFRP Carbodur S512, etapa es importante para garantizar una adecuada adhesión en la siguiente fase del proceso. La limpieza superficial de ambos materiales permite mejorar la rugosidad y eliminar impurezas que puedan afectar la adherencia del adhesivo estructural. Posteriormente, como se observa en la Figura 5.3, se lleva a cabo la preparación del adhesivo Sikadur-30 y la unión de las platinas de acero con las láminas de CFRP Cabodur S512. Las imágenes adicionales de este procedimiento se encuentran en el Anexo 7.9.



Figura 5.2 Habilitado y pulido de platinas de acero A36 y láminas de CFRP carbodur S512.



Figura 5.3 Preparación del adhesivo sikadur30 y pegado de las platinas de acero y láminas de carbodur S512.

5.2.2 Ensayo de flexión de probeta

Los ensayos de flexión se realizarán conforme a la norma ASTM D790 (ASTM 2017), utilizando una máquina de ensayo universal equipada con un accesorio de tres puntos de flexión. Las configuraciones específicas de cada tipo de probeta se ilustran en la Figura 5.4.

Además, la Tabla 5.5 detalla las dimensiones y codificación de las probetas utilizadas en los ensayos, especificando parámetros como la longitud total, espesor, ancho y la ubicación de la galga extensiométrica.

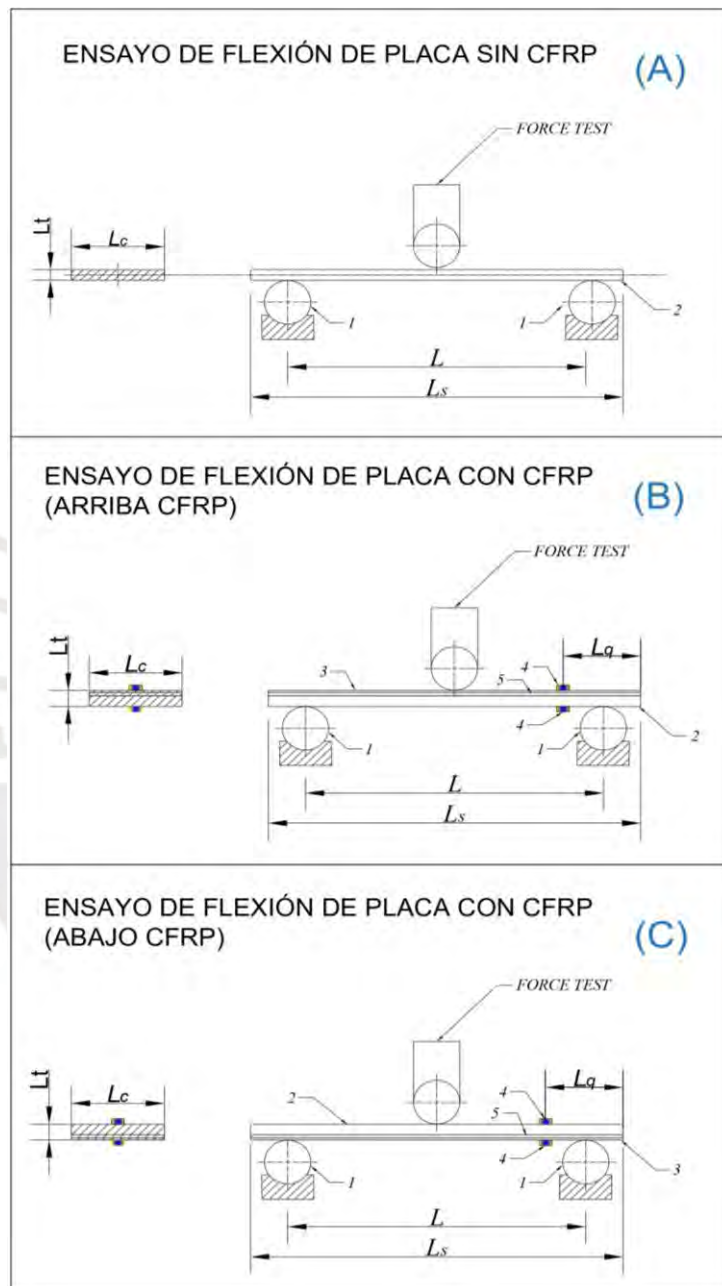


Figura 5.4 Configuraciones del ensayo de flexión de las probetas. Fuerza del ensayo de flexión, 1. Rodillos de los soportes, 2. Placa de acero A36 3mm, 3. Placa de CFRP S512, 4. Galga extensiométrica, 5. Adhesivo sikadur-30.

El nombre de las variables para el ensayo de flexión son los siguientes:

L : Longitud entre centro de los soportes rodillo.

L_s : Longitud total de la probeta.

L_t : Espesor total de la probeta.

L_c : Ancho de la probeta

L_q : Distancia de la galga extensiométrica

Tabla 5.5 Dimensiones y codificación de las probetas para el ensayo de flexión.

Configuración probeta	Código	L_s [mm]	L [mm]	L_t [mm]	L_c [mm]	L_q [mm]
SIN CFRP	A	200	180	3	50	N/A
	B1	150	130	6.2	50	40
CFRP ARRIBA	B2	150	130	6.2	50	40
	B3	150	130	6.2	50	40
CFRP ABAJO	C1	150	130	6.2	50	40
	C2	150	130	6.2	50	40
	C3	150	130	6.2	50	40

5.2.2.1 Máquina de ensayo de flexión

Para los ensayos experimentales de flexión se utilizará una máquina de ensayo Zwick Roell Z250. La máquina es ideal para realizar ensayos de resistencia estática, ensayos de tracción y flexión, y para evaluar el comportamiento y la resistencia mecánica de diferentes materiales y configuraciones estructurales. La máquina tiene una fuerza máxima aplicable de 250KN. En la Figura 5.5, se observa la máquina Zwick Roell Z250 de materiales en la cual se hicieron los ensayos.



Figura 5.5 Configuraciones de las probetas



5.2.2.2 Registro fotográfico de los ensayos de flexión 3 puntos experimental



Figura 5.6 Preparación del equipo de Zwick Roell Z250



Figura 5.7 Ensayo de probeta C1

5.2.3 Análisis de los ensayos de flexión de 3 puntos

En el presente ensayo de flexión de tres puntos, se ensayaron 10 probetas con diferentes configuraciones de forzamiento de carbodur S512 y 3 probetas sin reforzamiento. Los resultados obtenidos de las curvas de fuerza vs desplazamiento proporcionan una perspectiva del comportamiento mecánico de los diferentes sistemas bajo carga, en la Figura 5.8, se muestran las curvas de los ensayos de flexión realizadas, en la cual se establece una línea vertical en la posición 4mm para realizar una comparación equitativa de la energía absorbida por cada probeta.

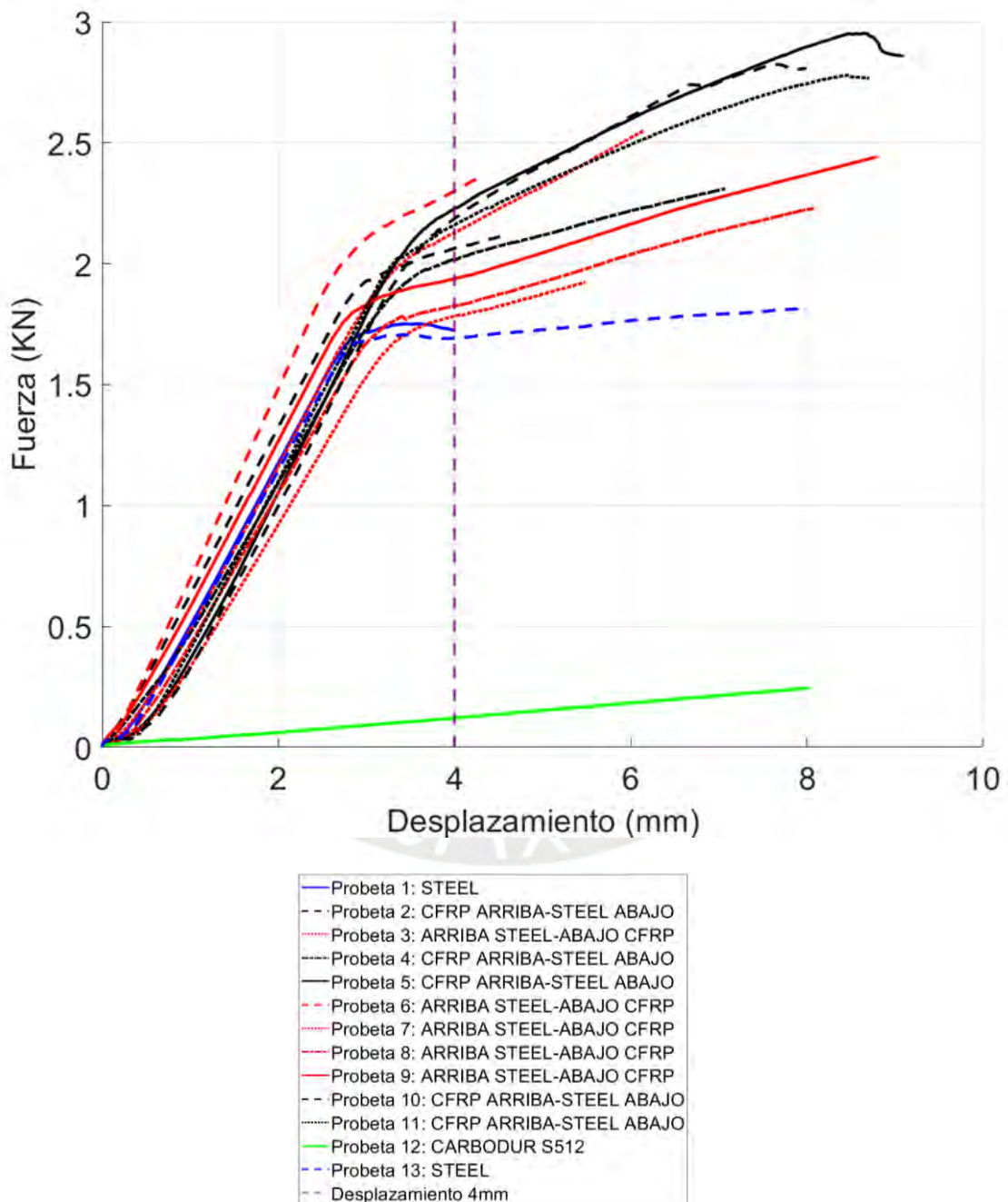


Figura 5.8 Curvas de fuerza vs desplazamiento ensayo de flexión 3 puntos

5.2.3.1 Probeta de Acero (probeta 1 y 13)

Las probetas sin refuerzo mostraron un comportamiento elástico lineal en la fase inicial, seguida de un punto de inflexión que indica el inicio de la deformación plástica. Se estableció una comparación de la energía absorbida hasta un desplazamiento de 4 mm, obteniendo valores que se encuentran dentro del rango esperado para el acero estructural A36.

En la Tabla 5.6 se presentan los valores de fuerza máxima, energía absorbida y rigidez elástica. Se observa que la probeta 13 alcanzó un desplazamiento mayor a 4 mm, lo que permitió evaluar su energía absorbida hasta 5 mm.

Tabla 5.6 Capacidad de Carga y Energía Absorbida en Probetas de acero.

Probeta	Fuerza Máxima (N) (hasta 4 mm)	Energía Total (J) (hasta 4 mm)	Energía Total (J) (hasta 5 mm)	Rigidez Elástica (F/mm)	Rigidez Plástica (F/mm)
1	1727	4274	----	569	----
13	1692	4164	5874	568	30

5.2.3.2 Probeta carbodur S512 (probeta 12)

La probeta solo de CFRP Carbodur S512 presentó un comportamiento menos resistente en comparación con las probetas reforzadas (acero + CFRP). Su respuesta estructural mostró una baja rigidez y una menor capacidad de carga.

Como se observa en la Tabla 5.7, esta probeta fue evaluada hasta los 5 mm de desplazamiento. A pesar de haber alcanzado esta deformación, los valores de rigidez elástica y energía absorbida permanecieron muy por debajo de los valores obtenidos para el acero A36 y las configuraciones reforzadas. Esto confirma que, si bien el CFRP puede actuar como refuerzo estructural, por sí solo no proporciona la resistencia suficiente para aplicaciones de carga elevada.

Tabla 5.7 Capacidad de carga y energía absorbida en probetas de CFRP.

Probeta	Fuerza Máxima (N) (hasta 4 mm)	Energía Total Absorbida (J) (hasta 4 mm)	Energía Total (J) (hasta 5 mm)	Rigidez Elástica (F/mm)	Rigidez Plástica (F/mm)
12	121	253	390	28.75	----

5.2.3.3 Probetas reforzadas con CFRP arriba (probetas 2; 4; 5; 10; 11)

Las probetas con laminado de CFRP adherido en la cara superior del acero mostraron un aumento considerable en la capacidad de carga y en la energía absorbida en comparación con las probetas de acero puro y la probeta de CFRP. En la Tabla 5.8 se presentan los valores experimentales obtenidos. Se destaca que la mayoría de estas probetas alcanzaron una deflexión de 4 mm, pero solo algunas alcanzaron la deflexión hasta 5mm, excepto la probeta 2, permitiendo una evaluación adicional de la energía absorbida a esta deflexión. Se observó que la ubicación del refuerzo en la cara superior mejora la resistencia a flexión, favoreciendo la redistribución de esfuerzos y retrasando el inicio de la deformación plástica.

Tabla 5.8 Capacidad de carga y energía absorbida en probetas con CFRP arriba.

Probeta	Fuerza Máxima (N) (hasta 4 mm)	Energía Total (J) (hasta 4 mm)	Energía Total (J) (hasta 5 mm)	Rigidez Elástica (F/mm)	Rigidez Plástica (F/mm)
2	2063	4929	----	620	135
4	2015	4330	6400	583	125
5	2228	4307	6634	667	140
10	2187	4120	6424	588	167
11	2160	4391	6640	588	160

5.2.3.4 Probetas Reforzadas con CFRP abajo (probetas 3; 6; 7; 8;9)

Las probetas con CFRP en la parte inferior mostraron una mayor capacidad de carga y absorción de energía que las sin refuerzo (Tabla 5.6 y Tabla 5.7) y, en varios casos, superaron a las reforzadas en la parte superior (Tabla 5.8). Aunque el refuerzo superior mejora la rigidez, los resultados indican que el refuerzo inferior mejora la resistencia global y la absorción de la energía. En la Tabla 5.9 se observa que solo la probeta 6 fue evaluada hasta 4 mm, mientras que las probetas 3; 7; 8 y 9 alcanzaron los 5 mm, permitiendo analizar su respuesta a mayor deflexión.

Tabla 5.9 Capacidad de carga y energía absorbida en probetas con CFRP abajo.

Probeta	Fuerza Máxima (N) (hasta 4 mm)	Energía Total (J) (hasta 4 mm)	Energía Total (J) (hasta 5 mm)	Rigidez Elástica (F/mm)	Rigidez Plástica (F/mm)
3	2128	4543	6769	633	190
6	2300	5451	----	690	140
7	1783	3675	5500	520	160
8	1825	4045	5920	550	120
9	1938	4682	6671	640	100

5.2.3.5 Análisis Estadístico del ensayo de flexión mediante Prueba t de Student

Para evaluar la diferencia en la Fuerza Máxima (N) y la Energía Total (J) entre los distintos grupos de probetas ensayadas, se aplicó la prueba t de Student para muestras independientes. Esta prueba permite determinar si las diferencias observadas en las mediciones son estadísticamente significativas.

Se analizaron los siguientes conjuntos de probetas:

Acero Puro: Probetas 1 y 13 (acero sin refuerzo).

CFRP Puro: Probeta 12 (solo CFRP sin acero) - (no aplica).

CFRP Arriba: Probetas 2, 4, 5, 10, 11 (CFRP adherido en la parte superior).

CFRP Abajo: Probetas 3, 6, 7, 8, 9 (CFRP adherido en la parte inferior).

Se formularon las siguientes hipótesis para cada comparación:

Hipótesis nula (H_0): No existen diferencias significativas entre los grupos comparados con respecto a la Fuerza Máxima y Energía Total.

Hipótesis alternativa (H_A): Existen diferencias significativas entre los grupos en Fuerza Máxima y/o Energía Total.

El criterio de significancia estadística considerado es $p < 0.05$, lo que indicaría que las diferencias entre los grupos no son producto del azar.

Resultados del t-test

En la Tabla 5.10 se presentan los valores promedio y la desviación estándar para cada variable analizada en los distintos grupos de probetas.

Tabla 5.10 Estadística Descriptiva de las probetas del ensayo de flexión

Grupo	Fuerza Máxima (N) (hasta 4 mm)	Desviación Estándar (N)	Energía Total (J) (hasta 4 mm)	Desviación Estándar (J) (hasta 4 mm)	Energía Total (J) (hasta 5 mm)	Desviación Estándar (J) hasta 5 mm
Acero Puro	1709.5	24.75	4219	77.78	5874	No aplica
CFRP Solo	121	No aplica	253	No aplica	390	No aplica
CFRP Arriba	2110.6	96.67	4411.4	332.91	6499.6	110.35
CFRP Abajo	1994.8	209.04	4479.2	678.58	6415.5	361.9

Los resultados del t-test de Student se presentan en la Tabla 5.11, incluyendo el estadístico t y el p-valor para cada comparación.

Tabla 5.11 Resultados del t-test entre los grupos de probetas del ensayo de flexión

Comparación	t-Statistic	p-Valor	Significancia Estadística
Acero vs CFRP Arriba (Fuerza)	-9.71	0.0002	Significativo
Acero vs CFRP Arriba (Energía 4mm)	-1.34	0.2239	No significativo
Acero vs CFRP Arriba (Energía 5mm)	-2.9	0.0412	Significativo
Acero vs CFRP Abajo (Fuerza)	-3.2	0.0295	Significativo
Acero vs CFRP Abajo (Energía 4mm)	-0.85	0.4321	No significativo
Acero vs CFRP Abajo (Energía 5mm)	-1.8	0.2482	No significativo
CFRP Arriba vs CFRP Abajo (Fuerza)	1.3	0.2482	No significativo
CFRP Arriba vs CFRP Abajo (Energía 4mm)	-0.19	0.8541	No significativo
CFRP Arriba vs CFRP Abajo (Energía 5mm)	-2.1	0.0615	No significativo

Interpretación de los resultados

El análisis estadístico mediante prueba t de Student permitió evaluar la influencia del CFRP en la Fuerza Máxima (N) y la Energía Total (J) de las probetas ensayadas.

Comparación entre acero puro y CFRP arriba

La Fuerza Máxima mostró una diferencia altamente significativa ($t = -9.71$, $p = 0.0002$), confirmando que el CFRP en la parte superior incrementa la resistencia mecánica. Sin embargo, en la Energía Total hasta 4 mm, la diferencia no fue significativa ($t = -1.34$, $p = 0.2239$), lo que indica que el refuerzo no influye en pequeñas deflexiones. En cambio, la Energía Total hasta 5 mm sí mostró una diferencia significativa ($t = -2.9$, $p = 0.0412$), lo que sugiere que el CFRP en la parte superior mejora la absorción de energía en grandes deflexiones.

Comparación entre acero puro y CFRP abajo

La Fuerza Máxima también mostró un aumento significativo con el refuerzo en la parte inferior ($t = -3.2$, $p = 0.0295$). Sin embargo, tanto la Energía Total hasta 4 mm como la Energía Total hasta 5 mm no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$), indicando que el CFRP en la parte inferior no influye de manera relevante en la absorción de energía.

Comparación entre CFRP arriba y CFRP abajo

No se encontraron diferencias significativas en la Fuerza Máxima entre ambas configuraciones ($t = 1.30$, $p = 0.2482$), lo que indica que la ubicación del CFRP no afecta la rigidez. Para la Energía Total hasta 4 mm, ambos refuerzos mostraron un

comportamiento similar ($t = -0.19$, $p = 0.8541$). En la Energía Total hasta 5 mm, se observó una ligera tendencia a que el CFRP en la parte superior absorba más energía ($t = -2.1$, $p = 0.0615$), aunque sin significancia estadística.

Conclusión general

Los resultados confirman que el CFRP mejora significativamente la rigidez, tanto en la parte superior como en la inferior. Sin embargo, su influencia en la absorción de energía depende de la magnitud de la deformación, siendo más efectiva en deformaciones grandes cuando está en la parte superior. No se encontraron diferencias significativas entre ambas configuraciones en fuerza máxima, lo que sugiere que el refuerzo actúa de manera similar en ambas posiciones. Estos hallazgos pueden aplicarse en el diseño de vigas reforzadas con CFRP, estableciendo su ubicación según las exigencias de resistencia y disipación de energía.

5.2.4 Cálculo del ensayo de flexión de 3 puntos

5.2.4.1 Análisis estático de la probeta del ensayo de flexión

En este análisis se presenta el comportamiento de una viga sometida a un ensayo de flexión de 3 puntos, donde se aplica una carga puntual 1000N en el punto medio de la viga. La viga tiene un apoyo simple en ambos extremos, representados por los puntos A y B. La longitud total de la viga es de 130mm, y la carga se aplica a 65mm del extremo A, como se observa en la Figura 5.9.

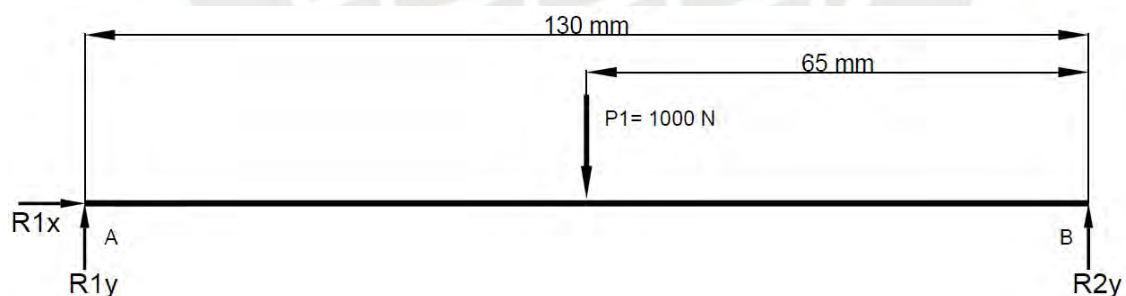


Figura 5.9 Diagrama de cuerpo libre de la Viga en Flexión

En la Figura 5.10, se presenta el diagrama de fuerzas cortantes. Este diagrama muestra cómo varían las fuerzas internas a lo largo de la viga cuando se aplica la carga puntual. La fuerza cortante es máxima en los extremos de la viga, donde los apoyos proporcionan la reacción necesaria para equilibrar la carga aplicada.

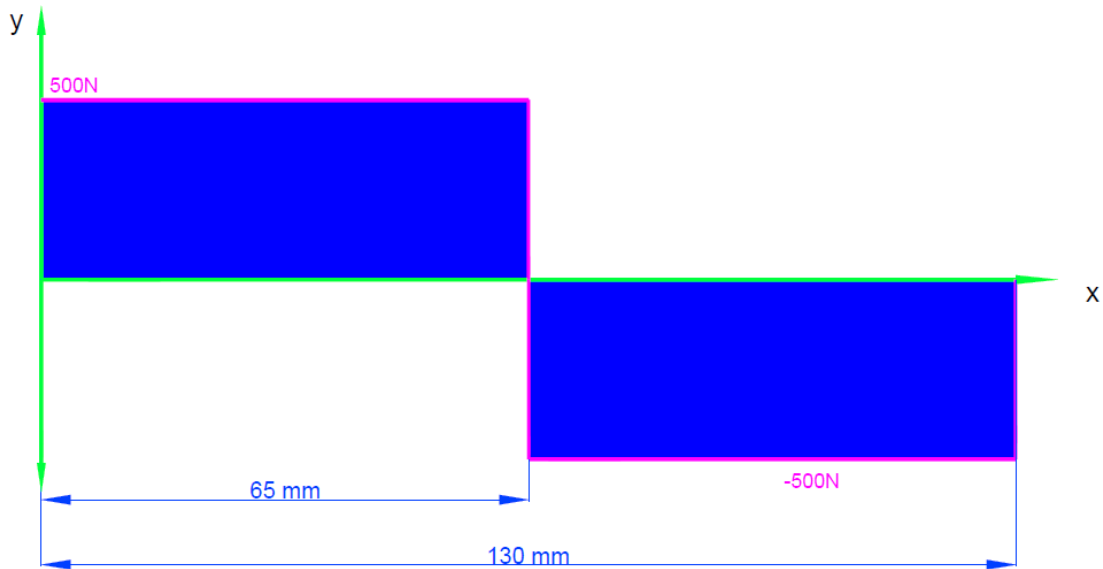


Figura 5.10 Diagrama de Fuerzas Cortantes de la probeta

La Figura 5.11 muestra el diagrama de momentos flectores, que describe cómo varía el momento a lo largo de la viga. Como es característico en ensayos de flexión de 3 puntos, el momento flector alcanza su valor máximo en el centro de la viga donde se aplica la carga. El valor máximo del momento se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$M = \frac{P * L}{4} = \frac{1000N * 130mm}{4} = 32500 \text{ Nmm}$$

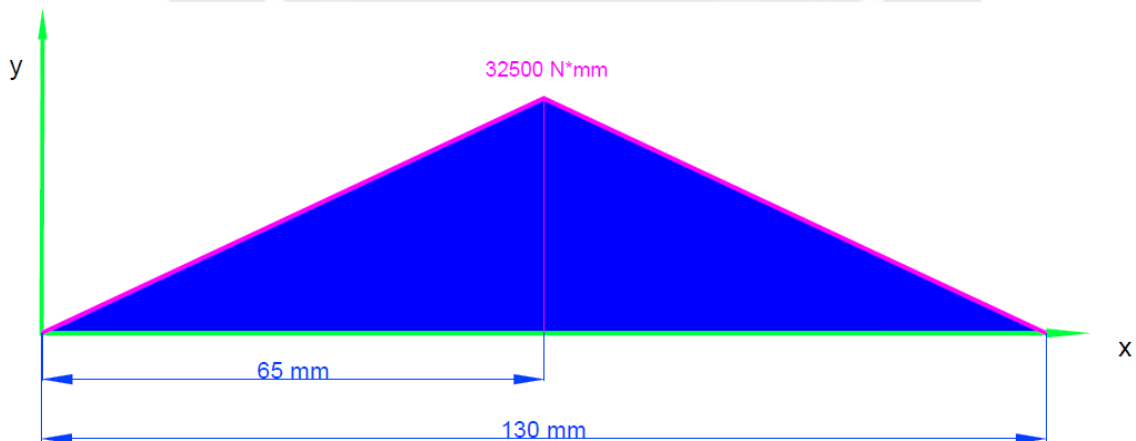


Figura 5.11 Diagrama de Momento Flector de la probeta

Para calcular la deflexión máxima de una viga sometida a un ensayo de flexión de 3 puntos, utilizamos la fórmula de deflexión para una viga simplemente apoyada con una carga puntual aplicada en su centro

$$\delta_{max} = \frac{P * L^3}{48 * E * I}$$

$$\delta_{max} = \frac{1000 \text{ N} * (130\text{mm})^3}{48 * 200\text{GPa} * \left(\frac{50\text{mm} * (6.2\text{mm})^3}{12}\right)}$$

$$\delta_{max} = 0.23 \text{ mm}$$

Donde:

δ_{max} : Deflexión de la viga (mm)

P : Fuerza (N)

L : Longitud de la viga (mm)

E : Módulo de elasticidad (GPa)

I : Momento de inercia (mm^4)

5.2.4.2 Micromecánica

En esta sección se analizan las propiedades elásticas del laminado compuesto, calculando el módulo de elasticidad transversal E_{22} y longitudinal E_{11} a partir de las propiedades individuales de las fibras y la matriz, así como de sus fracciones volumétricas.

La Tabla 5.12 presenta las propiedades mecánicas de los materiales constituyentes del laminado compuesto. En ella están los valores del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson tanto de la fibra como de la matriz, así como sus respectivas fracciones volumétricas. Estos parámetros son importantes para la aplicación de las ecuaciones de micromecánica en la predicción de las propiedades globales del material compuesto carbodur S512.

Tabla 5.12 Propiedades de la fibra y la matriz en el laminado compuesto

Propiedad	Símbolo	Valor
Propiedades de las fibras		
Volumen de fibra	V_f	0.68
Módulo de elasticidad de la fibra (GPa)	E_f	241
Coficiente de Poisson de la fibra	ν_f	0.2
Propiedades de la matriz		
Volumen de la matriz	V_m	0.32

Módulo de elasticidad de la matriz (GPa)	E_m	3.6
Coefficiente de Poisson de la matriz	ν_m	0.35

A partir de los datos presentados en la Tabla 5.13, se han calculado las propiedades elásticas del laminado compuesto, las cuales se muestran en la Tabla 5.9. En esta tabla se presentan los valores obtenidos para el módulo de elasticidad longitudinal, y transversal, los coeficientes de Poisson mayor, y menor, así como los módulos de corte de la fibra, de la matriz, y del laminado en el plano; en la última columna de la tabla se indican las ecuaciones utilizadas para cada uno de estos cálculos.

Tabla 5.13 Cálculo de Propiedades Elásticas del Laminado Compuesto Carbodur S512.

Parámetro	Símbolo	Valor (GPa)	Ecuación Utilizada
Módulo de elasticidad longitudinal	E_{11}	165.032	2.1
Módulo de elasticidad transversal	E_{22}	10.904	2.2
Coefficiente de Poisson mayor	ν_{12}	0.248	2.3
Coefficiente de Poisson menor	ν_{21}	0.0164	2.4
Módulo de corte de la fibra	G_f	100.417	2.6
Módulo de corte de la matriz	G_m	1.33	2.7
Módulo de corte en el plano	G_{12}	4.052	2.5

5.2.4.3 Macromecánica

La Figura 5.12 muestra la configuración macromecánica de un laminado compuesto, compuesto por una platina de Acero A36, una capa intermedia de adhesivo Sikadur-30 y una lámina superior de refuerzo Carbodur S512. Se muestran las posiciones y espesores de cada lámina, indicando su ubicación relativa al eje neutro.

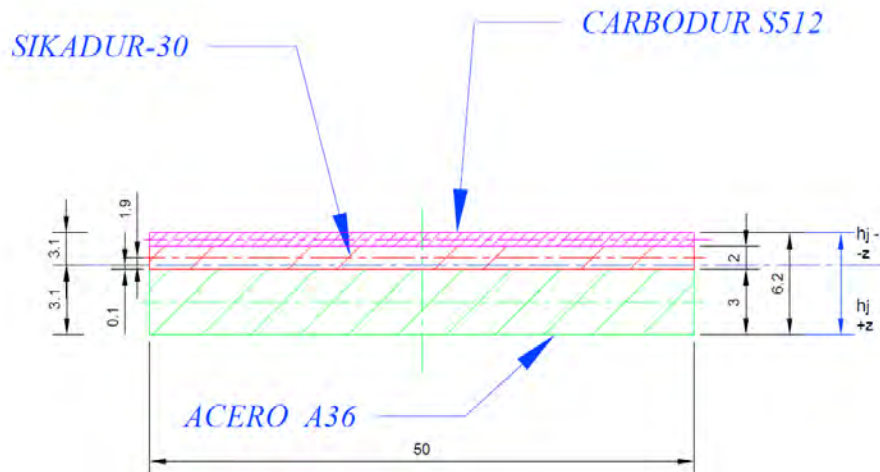


Figura 5.12 Configuración macromecánica del laminado compuesto de Acero A36, Sikadur-30 y Carbodur S512

El desarrollo detallado de los cálculos de esfuerzos por lámina se detalla paso a paso en los anexos 7.6. En la Tabla 5.14, se muestran los valores de esfuerzo obtenidos en cada lámina de la probeta durante el ensayo de flexión de 3 puntos.

Tabla 5.14 Esfuerzos calculados en las láminas de la probeta

Lámina	Z (mm)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	τ_{xy} (MPa)
A36 (Inferior)	+ 3.1	219.72	1.210	0
A36 (Superior)	+ 0.1	-38.35	-1.480	0
Sikadur-30 (Inferior)	+ 0.1	-2.15	-0.083	0
Sikadur-30 (Superior)	-1.9	-11.78	-0.184	0
Carbodur S512 (Inferior)	-1.9	-172.67	0.430	0
Carbodur S512 (Superior)	-3.1	-257.51	0.671	0

5.2.5 Análisis numérico del ensayo de flexión de 3 puntos

Se definieron condiciones de borde para replicar el ensayo de flexión a tres puntos llevado a cabo experimentalmente. Los apoyos laterales (identificados como puntos B y D) se modelaron como ejes cilíndricos con diámetro de 25mm los cuales que permiten la rotación libre en el plano longitudinal de la placa, restringiendo únicamente el movimiento en la dirección perpendicular. El rodillo central (identificado como punto A) fue configurado como una superficie de contacto que aplica una carga puntual en la parte superior de la placa, como se observa en la Figura 5.13. Esto representa la carga en el ensayo experimental, esto simula las condiciones del modelo numérico se asemejen a las del laboratorio.

V: Static Structural-SOLIDO LAMINAS 3- CON SOPORTE
Static Structural
Time: 1. s
10/01/2025 00:13

- A Displacement
- B Displacement 2
- C Displacement 3
- D Displacement 5

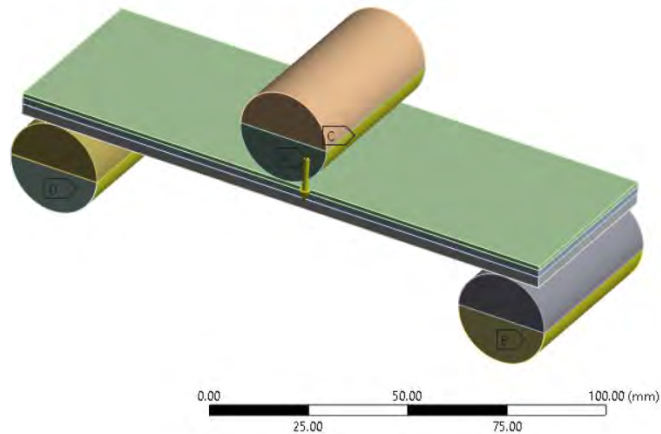


Figura 5.13 Condiciones de borde de ensayo de flexión de 3 puntos.

El modelo estructural fue discretizado utilizando elementos finitos sólidos en 3D para capturar el comportamiento mecánico de la placa reforzada con laminados de CFRP. Se empleó un mallado refinado en las regiones de contacto (zona de carga y apoyos) debido a la concentración de esfuerzos, ver Figura 5.14. La lámina de CFRP, adhesivo y la placa de acero A36 fueron modeladas como materiales separados con una adecuada interacción entre sus interfaces. El tamaño de los elementos fue optimizado para garantizar un equilibrio entre la precisión de los resultados y el tiempo procesamiento computacional, es decir se realizó la convergencia de malla.

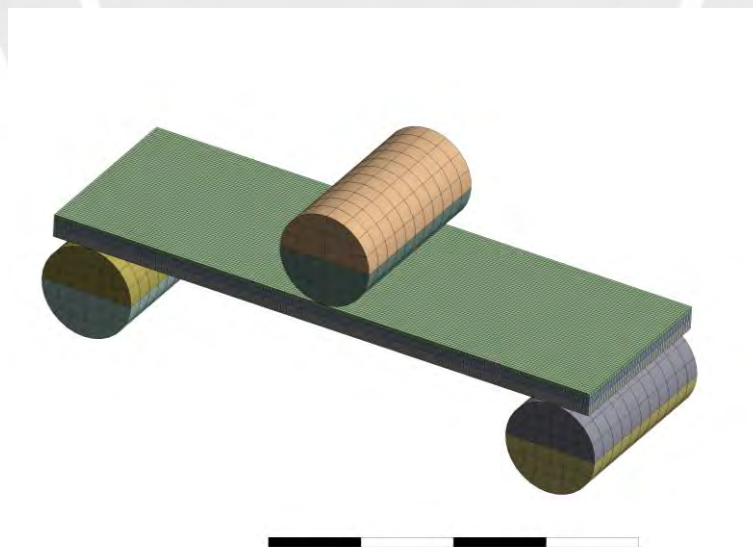


Figura 5.14 Mallado de los elementos de ensayo de flexión de 3 puntos.

La viga reforzada con CFRP alcanzó una deflexión máxima de 0.32626 mm, esta deformación se dio en el centro de la viga justo en el contacto del rodillo, como se observa en la Figura 5.15.

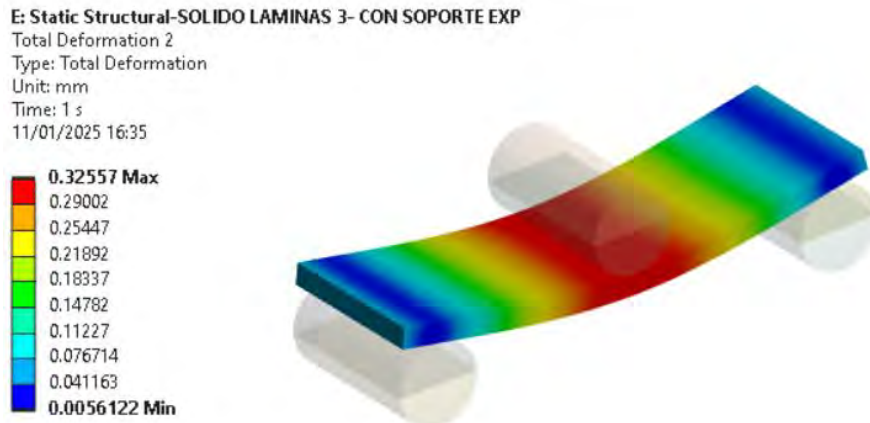


Figura 5.15 Deflexión máxima del ensayo de flexión de 3 puntos.

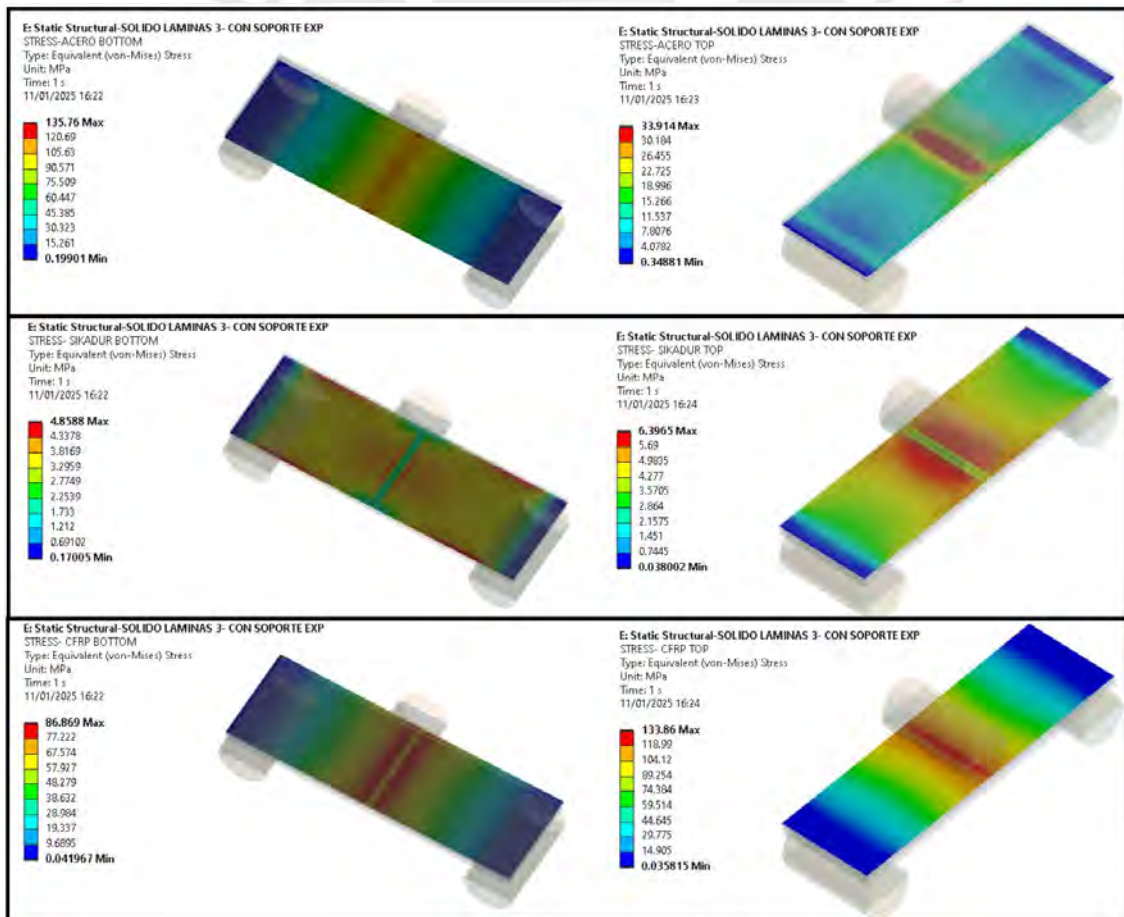


Figura 5.16 Esfuerzos máximos del ensayo de flexión de 3 puntos.

En el ensayo de flexión a tres puntos realizado para la viga reforzada con láminas, en la Figura 5.16 se observan los resultados de la placa de acero, la cara inferior registró un esfuerzo máximo de 135.76 MPa, correspondiente a la máxima tensión de tracción, mientras que en la cara superior alcanzó 33.941 MPa, asociado a las tensiones de compresión. Por su parte, en el adhesivo Sikadur-30, los esfuerzos máximos fueron de 4.588 MPa en la cara inferior y 6.396 MPa en la cara superior, demostrando una adecuada transferencia de esfuerzos entre los materiales. En cuanto al laminado de CFRP, la cara inferior soportó un esfuerzo máximo de 86.869 MPa, destacando su resistencia frente a las tensiones de tracción, mientras que la cara superior alcanzó 133.86 MPa. Estos resultados confirman la eficacia del refuerzo con CFRP para mejorar la resistencia estructural de la viga y redistribuir las tensiones de manera uniforme en las zonas críticas, mientras que el adhesivo Sikadur-30 garantiza una interacción adecuada entre las láminas.

5.2.6 Comparación del cálculo analítico, numérico y experimental del ensayo flexión de 3 puntos

En la presente evaluación, se ha analizado el comportamiento a flexión de la probeta mediante un enfoque comparativo entre el cálculo analítico, experimental y numérico (FEM) del ensayo de flexión.

La Figura 5.17 muestra la comparación de las curvas fuerza-deflexión obtenidas mediante el enfoque experimental, analítico y numérico a través del Método de Elementos Finitos (FEM) para las probetas de acero puro y CFRP. Se observa que la probeta de acero puro presenta una mayor capacidad de carga y rigidez en comparación con la probeta de CFRP, la cual exhibe una menor resistencia estructural. Además, los resultados analíticos y numéricos presentan una correlación significativa con los datos experimentales, validando la precisión del modelo y la metodología empleada. Estos resultados confirman que el CFRP, cuando se utiliza sin refuerzo metálico, no tiene la resistencia suficiente para soportar esfuerzos de flexión elevados, pero su combinación con acero mejora considerablemente la rigidez.

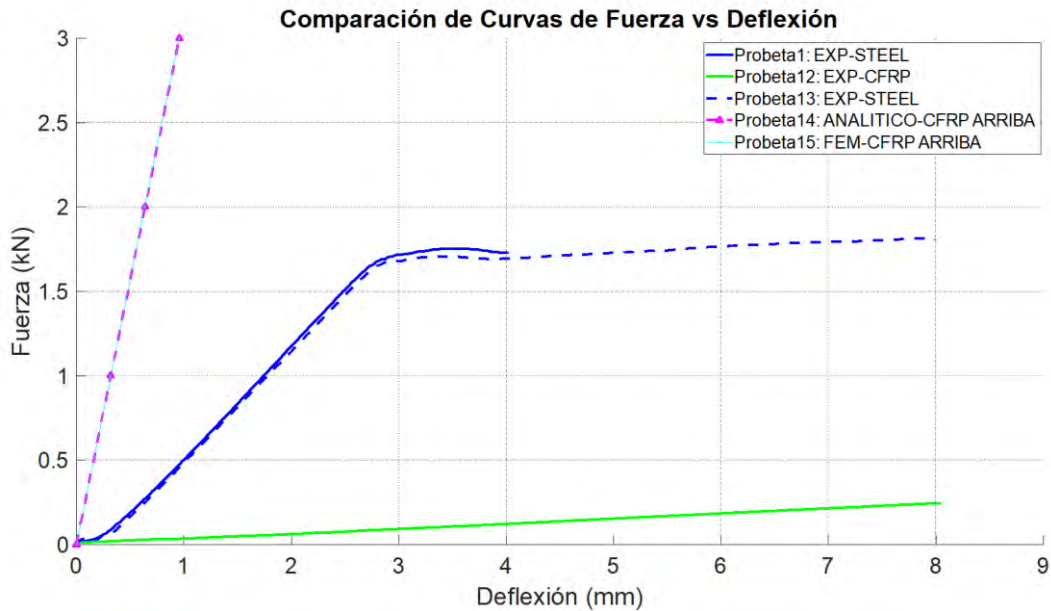


Figura 5.17 Comparación de curvas de fuerza vs deflexión para acero puro, CFRP y de acero reforzada con CFRP.

La Figura 5.20 presenta las curvas de fuerza vs deflexión para las probetas reforzadas con CFRP en la parte inferior, comparando los resultados experimentales con el análisis analítico y numérico mediante FEM. Se observa que adicionando el CFRP en la parte inferior de la probeta aumenta significativamente la capacidad de carga y la energía absorbida en comparación con las probetas sin refuerzo. Esto se debe a que el CFRP, ubicado en la zona de tracción, contribuye a mejorar la resistencia estructural y la distribución de esfuerzos.

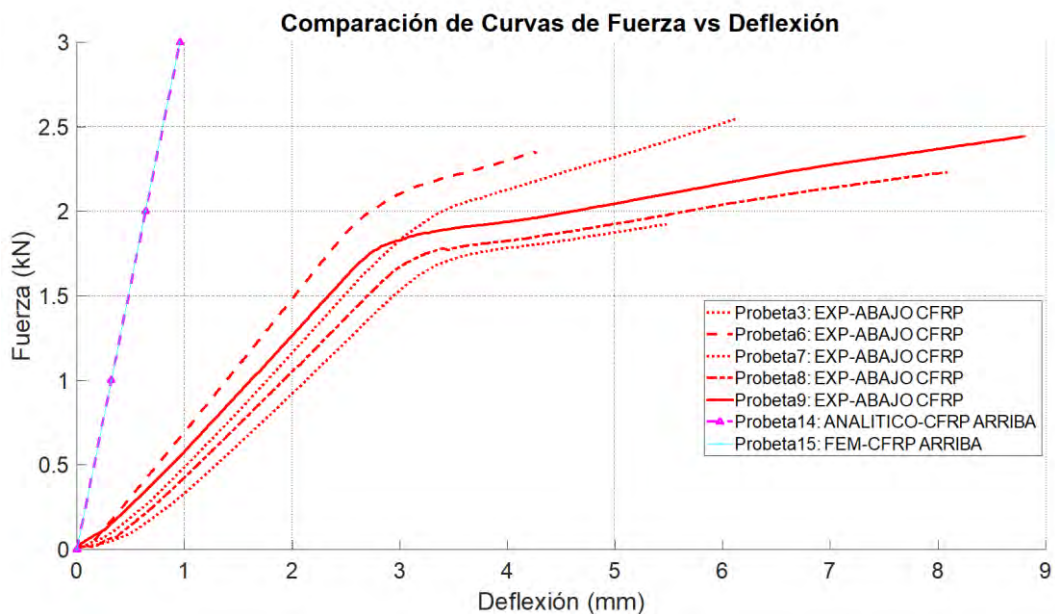


Figura 5.18 Comparación de curvas de fuerza vs deflexión para CFRP ubicado en la parte inferior.

En la Figura 5.19 ilustra la respuesta mecánica de las probetas reforzadas con CFRP en la parte superior, comparando los resultados experimentales con los análisis analítico y numérico mediante FEM. Se observa que esta configuración genera un incremento significativo en la resistencia a la flexión, mejorando la capacidad estructural de la probeta. La disposición del CFRP en la parte superior mejora la distribución de tensiones en la zona comprimida, reduciendo la deformación y aumentando la rigidez de la estructura. Los resultados del análisis FEM y la solución analítica presentan una buena concordancia con los datos experimentales, validando la predicción del comportamiento mecánico de la probeta.

En la Figura 5.20, se analiza la distribución de esfuerzos a lo largo de la probeta en función de la carga aplicada. Se comparan los valores obtenidos para las distintas capas del compuesto: la base de acero A36, la capa adhesiva de Sikadur-30 y la lámina de CFRP (Carbodur S512). Sin embargo, se identifican discrepancias sutiles entre los enfoques analítico y numérico, especialmente en las zonas de máxima exigencia estructural. Estas diferencias sugieren que, si bien el modelo teórico ofrece una aproximación válida, la simulación FEM captura con mayor precisión la distribución real de esfuerzos, incorporando efectos como la interacción en la interfaz adhesiva y posibles concentraciones de tensión en el refuerzo.

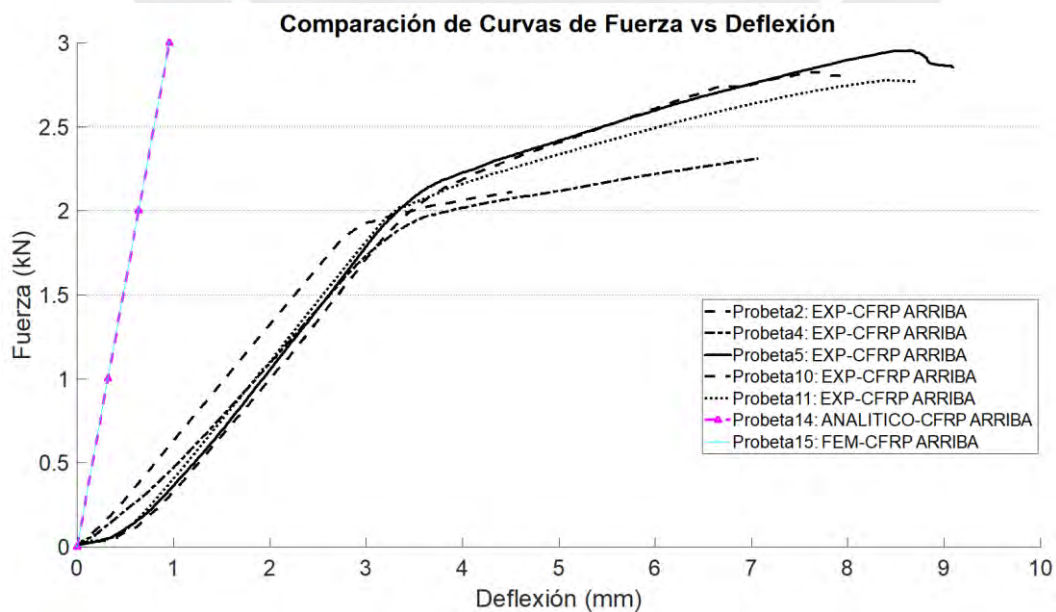


Figura 5.19 Comparación de curvas de fuerza vs deflexión para CFRP ubicado en la parte superior.

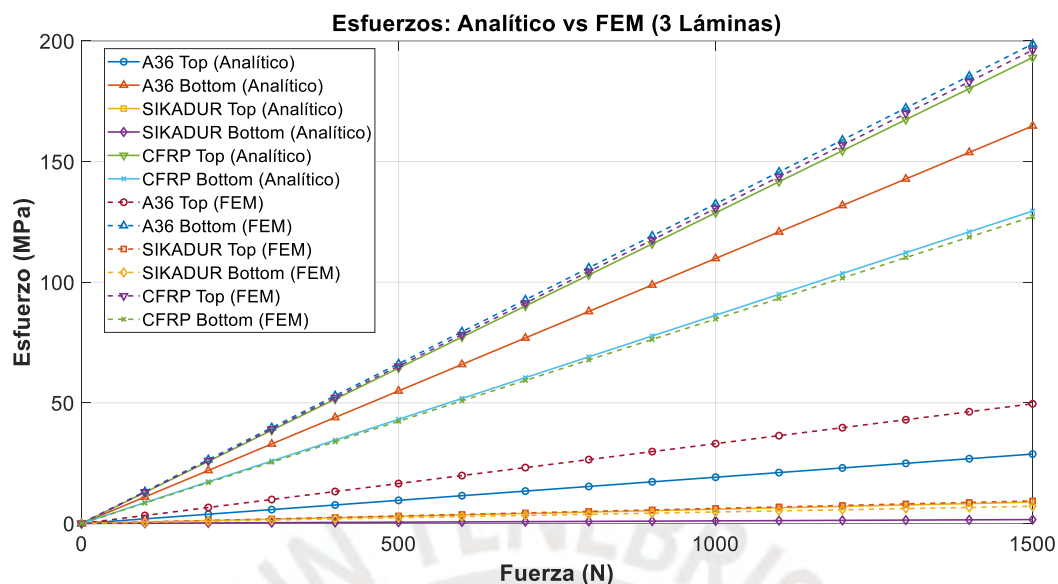


Figura 5.20 Comparación de esfuerzos obtenidos analíticamente y mediante FEM para la probeta del ensayo de flexión de 3 puntos.

La Figura 5.21 presenta el error relativo entre los valores obtenidos analíticamente y los calculados mediante FEM para la deflexión y los esfuerzos en distintos materiales y posiciones dentro de la viga reforzada con CFRP. Se observa que el error relativo en la deflexión es menor al 0.5 %, lo que indica una alta concordancia entre ambos modelos en términos de desplazamiento global. Sin embargo, los errores relativos en los esfuerzos presentan valores significativamente más altos, destacándose el esfuerzo en la parte inferior del adhesivo Sikadur-30, que mantiene un error superior al 77 % a lo largo de todo el intervalo de carga. Asimismo, el error relativo en el esfuerzo superior del acero A36 se mantiene alrededor del 42 %, mientras que en la capa inferior del mismo material es del 17 %. Estas discrepancias evidencian las limitaciones del modelo analítico para capturar con precisión la interacción entre las capas de acero, adhesivo y CFRP.

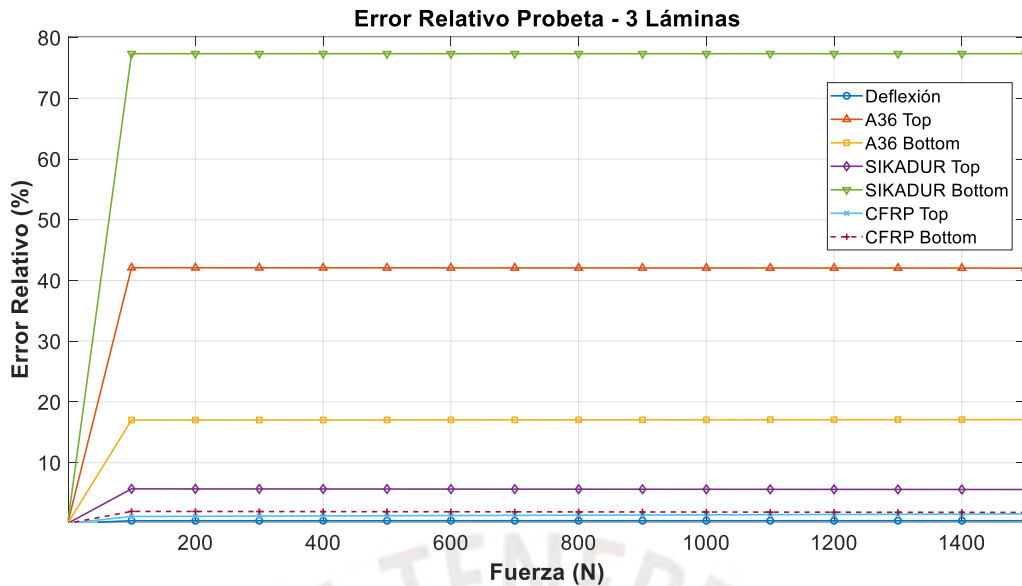


Figura 5.21 Error relativo entre los esfuerzos y deflexiones obtenidos analíticamente y mediante FEM para la probeta del ensayo de flexión de 3 puntos.

El alto error relativo observado se debe a diversos factores. En primer lugar, el modelo analítico supone una distribución homogénea de esfuerzos y una transferencia de carga idealizada entre materiales, mientras que la simulación FEM incorpora efectos más complejos, como concentraciones de tensión, variaciones en la rigidez y deformaciones diferenciales en la interfaz adhesiva. Además, en la capa inferior del adhesivo Sikadur-30, el comportamiento viscoelástico del material y su interacción con el acero y las láminas de CFRP generan una respuesta estructural que no es completamente capturada por la formulación teórica. Estos resultados refuerzan la importancia de combinar enfoques analíticos con modelos numéricos en Ansys para obtener predicciones más precisas en el diseño de estructuras reforzadas con CFRP, asegurando un buen comportamiento confiable en aplicaciones como los puentes grúa.

5.2.7 Ensayo de corte de probeta

El ensayo de corte se realizó utilizando probetas con tres configuraciones, con el propósito de evaluar la resistencia al esfuerzo cortante en diferentes combinaciones de materiales. Las probetas fueron unidas con el adhesivo estructural Sikadur-30, aplicando un espesor uniforme de 2 mm en todas las uniones para garantizar una transferencia de esfuerzos homogénea y consistente. Las configuraciones analizadas fueron las siguientes:

CFRP + CFRP: Ambas laminas estaban compuestas por laminados de fibra de carbono reforzada con polímero Carbodur S512. Para esta configuración, se siguieron los

procedimientos establecidos en la norma ASTM D5868 (ASTM 2023), para la evaluación de adhesivos utilizados en materiales compuestos reforzados con fibras.

CFRP + Acero: Esta configuración consistió en una unión híbrida entre láminas de CFRP Carbodur S512 y una de acero A36. También se utilizó la norma ASTM D5868 (ASTM 2023), ya que permite evaluar uniones adhesivas en las que interactúan materiales de propiedades mecánicas diferentes (compuestos reforzados y metales).

Acero + Acero: En este caso, ambas laminas son de acero A36, lo que representó una configuración completamente metálica. Para esta configuración, se utilizó la norma ASTM D1002 – 10 (ASTM 2019b), diseñada para medir la resistencia al corte en uniones adhesivas de materiales homogéneos, como el acero.

Las características de las probetas se presentan en la Tabla 5.15 a continuación:

Tabla 5.15 Dimensiones y Configuración de las Probetas del ensayo de corte.

Código de probetas	Longitud de adhesivo [mm]	Material	Adhesivo	Cantidad
4; 5; 6	50	Acero A36 + Acero A36	Sikadur-30	3
7; 8; 9	50	CFRP + Acero A36	Sikadur-30	3
1; 2; 3	50	CFRP + CFRP	Sikadur-30	3

Los ensayos se llevaron a cabo en un equipo universal de ensayo Zwick Roell Z250, aplicando cargas de corte a una velocidad constante de 2 mm/min, como lo especifican las normas. Durante los ensayos, se evaluaron la resistencia al corte máximo y los modos de falla observados, ya sean adhesivos, cohesivos o interfaciales. En la siguiente Figura 5.22 se detallan la geometría de las probetas.

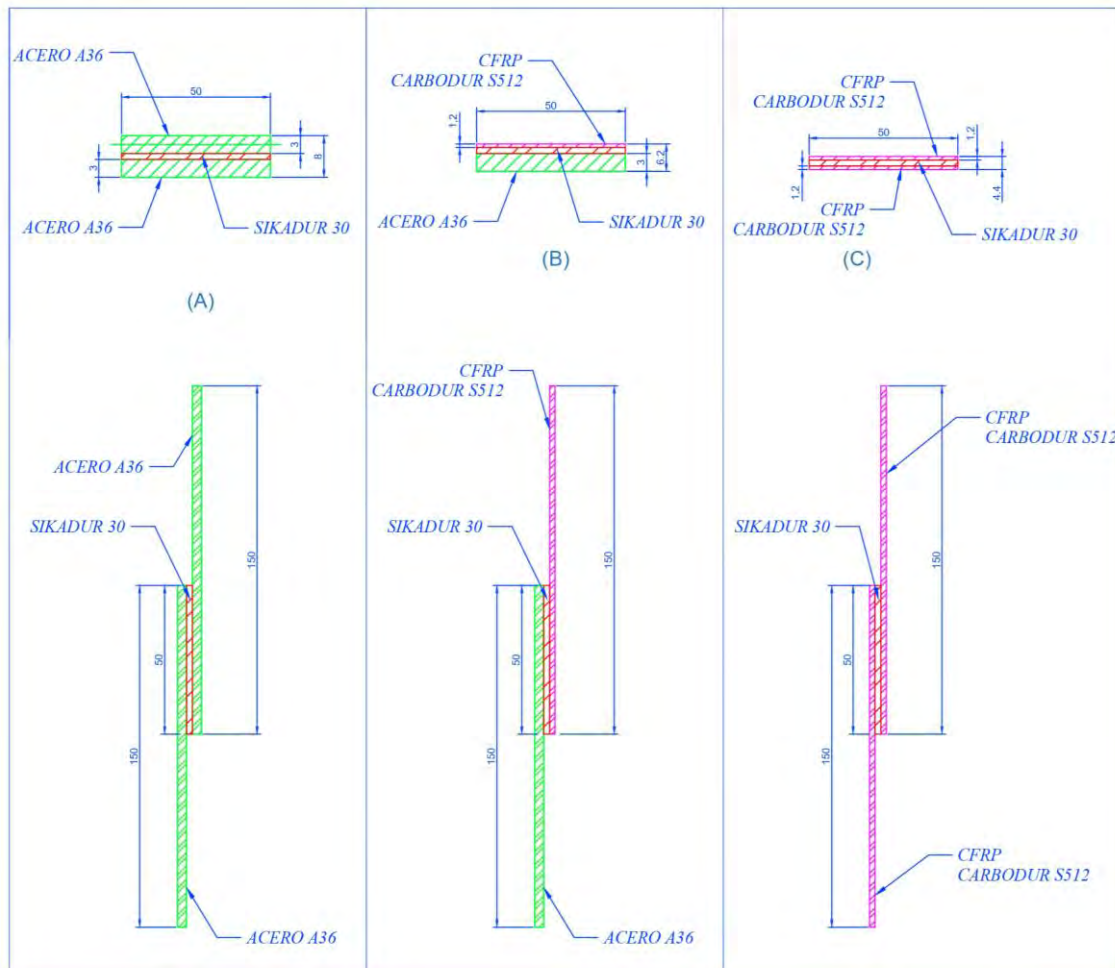


Figura 5.22 Configuraciones del ensayo de corte de las probetas.

5.2.7.1 Registro fotográfico de los ensayos de corte

En la Figura 5.23 se presenta el registro fotográfico de los ensayos de corte realizados en las probetas 2 y 3, utilizando una máquina de ensayo Zwick/Roell. En estas imágenes se observa el dispositivo de sujeción y la configuración del ensayo, donde las probetas de material compuesto han sido sometidas a esfuerzos de corte para evaluar la resistencia y el comportamiento de la unión adhesiva sikadur-30. Las imágenes adicionales de este proceso se encuentran en el Anexo 7.10.



Figura 5.23 Ensayo de probeta 2 y 3.

5.2.8 Análisis de los ensayos de corte para evaluar el adhesivo

Se realizaron ensayos mecánicos sobre diferentes configuraciones de probetas compuestas por materiales como acero (Steel A36) y CFRP carbodur-S512, unidas mediante el adhesivo Sikadur-30. Los resultados obtenidos muestran variaciones significativas en parámetros importantes, como fuerza máxima, energía absorbida, desplazamiento y módulo elástico, dependiendo del tipo de configuración evaluada. Ver Figura 5.24.

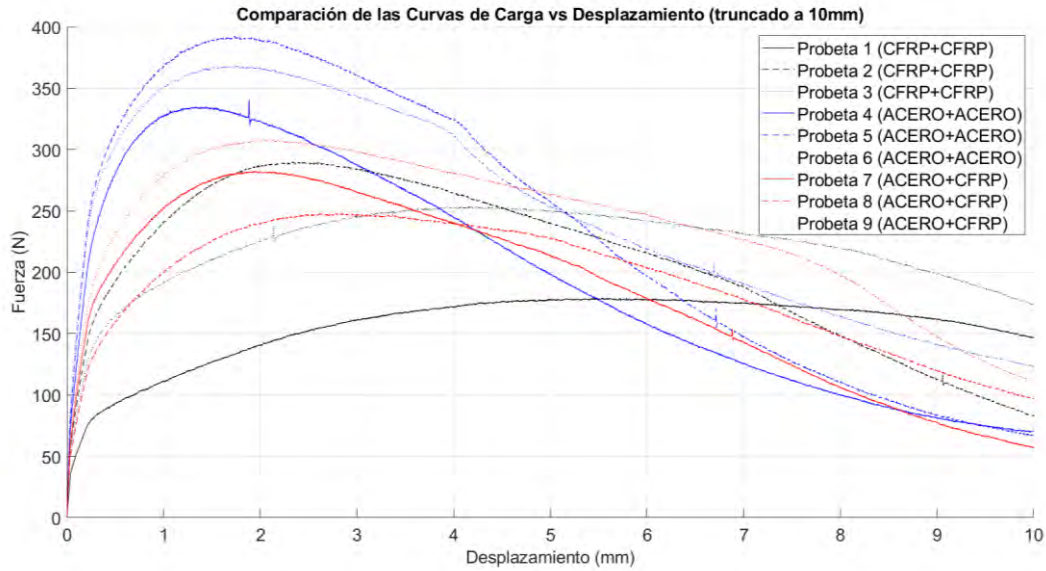


Figura 5.24 Curvas de fuerza vs desplazamiento (truncada a 10mm).

5.2.8.1 Probetas CFRP + CFRP

Las probetas conformadas exclusivamente por CFRP presentaron los valores más bajos de fuerza máxima, con un rango entre 178.92 N y 299.39 N, debido a su limitada resistencia a la tracción transversal y la dependencia de la unión epóxica. La energía absorbida varió entre 1.55 J y 2.20 J, reflejando una moderada capacidad de disipación de energía. En la deflexión, los valores oscilaron entre 2.33 mm y 5.54 mm, indicando mayor deformación antes de la fractura. El módulo elástico fue el más bajo de todas las configuraciones, confirmando su limitada rigidez estructural.

Tabla 5.16 Capacidad de Carga y Energía Absorbida en Probetas del ensayo de corte

Probeta	Materiales	Fuerza Máxima (N)	Energía Absorbida (J)	Desplazamiento (mm)	Módulo Elástico (MPa)
1	CFRP + CFRP	178.92	1.55	5.54	0.2
2	CFRP + CFRP	299.39	2.09	2.33	0.42
3	CFRP + CFRP	253.7	2.2	4.24	0.36

5.2.8.2 Probetas Acero + CFRP

Las probetas con configuración mixta (Acero + CFRP) mostraron un comportamiento intermedio en términos de rigidez y ductilidad. La fuerza máxima osciló entre 248.95 N y 308.11 N, superando a las probetas CFRP + CFRP, pero siendo inferior a las de acero puro. La energía absorbida varió entre 1.91 J y 2.38 J, evidenciando una combinación favorable entre rigidez y capacidad de disipación de energía. El desplazamiento máximo se situó entre 1.95 mm y 3.38 mm, mostrando menor deformación respecto a las

probetas exclusivamente de CFRP. El módulo elástico se encontró entre 0.34 MPa y 0.50 MPa, indicando una mejora en rigidez respecto al CFRP puro. (ver *Tabla 5.17*)

Tabla 5.17 Capacidad de Carga y Energía Absorbida en Probetas del ensayo de corte

Probeta	Materiales	Fuerza Máxima (N)	Energía Absorbida (J)	Desplazamiento (mm)	Módulo Elástico (MPa)
7	ACERO + CFRP	282.39	1.86	1.95	0.45
8	ACERO + CFRP	248.95	1.91	3.38	0.34
9	ACERO + CFRP	308.11	2.38	2.05	0.5

5.2.8.3 Probetas Acero + Acero

Las probetas homogéneas de acero presentaron el mejor desempeño mecánico, alcanzando fuerzas máximas entre 340.37 N y 392.24 N, consistentes con la alta resistencia del acero. La energía absorbida se situó en el rango de 2.37 J a 2.50 J, la más alta de todas las configuraciones. El desplazamiento máximo, entre 1.64 mm y 1.88 mm, confirmó la baja deformación del material antes de la fractura. El módulo elástico, con valores entre 0.61 MPa y 0.68 MPa, reflejó su mayor rigidez. (ver *Tabla 5.18*)

Tabla 5.18 Capacidad de Carga y Energía Absorbida en Probetas del ensayo de corte

Probeta	Materiales	Fuerza Máxima (N)	Energía Absorbida (J)	Desplazamiento (mm)	Módulo Elástico (MPa)
4	ACERO + ACERO	340.37	1.97	1.88	0.61
5	ACERO + ACERO	392.24	2.37	1.74	0.68
6	ACERO + ACERO	368.19	2.5	1.64	0.66

5.2.8.4 Análisis Comparativo de las Curvas Carga-Desplazamiento

El análisis de las curvas de fuerza versus desplazamiento muestra comportamientos claramente diferenciados para cada configuración ensayado. Las probetas Acero + Acero exhibieron un comportamiento altamente rígido, con picos de carga altos y desplazamientos mínimos antes de la falla del adhesivo.

Por otro lado, las probetas CFRP + CFRP presentaron curvas más alargadas, evidenciando una mayor capacidad de deformación antes del fallo. Este comportamiento es característico de materiales diseñados para absorber energía en lugar de soportar cargas elevadas, destacándose por su ductilidad superior, pero con menor resistencia en comparación con el acero.

En cuanto a las probetas Acero + CFRP, estas demostraron un comportamiento intermedio, combinando características de rigidez y ductilidad. Este equilibrio se tradujo en curvas que integran tanto la estabilidad del acero como la capacidad de disipación de energía del CFRP.

5.2.8.5 Análisis Estadístico del ensayo de corte mediante Prueba t de Student

Para evaluar la diferencia en la Fuerza Máxima (N) y la Energía Total (J) entre los distintos grupos de probetas ensayadas, se aplicó la prueba t de Student para muestras independientes. Esta prueba permite determinar si las diferencias observadas en las mediciones son estadísticamente significativas.

Se analizaron los siguientes conjuntos de probetas:

CFRP + CFRP: Probetas solo de CFRP.

Acero + CFRP: Probetas híbridas con una combinación de acero y CFRP.

Acero + Acero: Probetas solo de acero.

Se formularon las siguientes hipótesis para cada comparación:

Hipótesis nula (H_0): No existen diferencias significativas entre los grupos en Fuerza Máxima y/o Energía Total.

Hipótesis alternativa (H_A): Existen diferencias significativas entre los grupos en Fuerza Máxima y/o Energía Total.

El criterio de significancia estadística considerado es $p < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula, indicando que la diferencia entre los grupos es estadísticamente significativa.

Resultados del t-test

Los valores de t-Statistic y p-Valor obtenidos en la prueba t de Student se presentan en la Tabla 5.19.

Tabla 5.19 Estadísticos Descriptivos de las probetas del ensayo de corte

Grupo	Fuerza Máxima (N) - Media	Fuerza Máxima (N) - Desviación Estándar	Energía Total (J) - Media	Energía Total (J) - Desviación Estándar
CFRP + CFRP	219.94	61.29	1.80	0.27
Acero + CFRP	279.12	29.60	2.43	0.74
Acero + Acero	364.29	26.17	2.66	0.39

Tabla 5.20 Resultados del t-test entre los grupos de probetas del ensayo de corte

Comparación	t-Statistic	p-Valor	Significancia Estadística
CFRP + CFRP vs Acero + CFRP (Fuerza)	-1.51	0.2326	No significativo
Acero + CFRP vs Acero + Acero (Fuerza)	-3.73	0.0208	Significativo
CFRP + CFRP vs Acero + Acero (Fuerza)	-3.75	0.0394	Significativo
CFRP + CFRP vs Acero + CFRP (Energía)	-1.39	0.2749	No significativo
Acero + CFRP vs Acero + Acero (Energía)	-0.47	0.6712	No significativo

Interpretación de los resultados

Comparación entre CFRP + CFRP y Acero + CFRP

Para la Fuerza Máxima, el resultado del t-test (-1.51, $p = 0.2326$) indica que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las probetas completamente de CFRP y las híbridas con acero. Esto sugiere que la incorporación del acero no mejora de manera considerable la capacidad de carga respecto a CFRP puro en este tipo de ensayo. En cuanto a la Energía Total absorbida, el resultado (-1.39, $p = 0.2749$) confirma que no hay una diferencia estadísticamente significativa, lo que indica que ambas configuraciones tienen una capacidad de disipación de energía similar.

Comparación entre Acero + CFRP y Acero + Acero

Para la Fuerza Máxima, el resultado (-3.73, $p = 0.0208$) muestra una diferencia estadísticamente significativa, indicando que las probetas homogéneas de acero soportan cargas mayores en comparación con las híbridas de acero y CFRP. Este resultado confirma que el acero puro presenta mayor resistencia estructural en estos ensayos. Sin embargo, en términos de Energía Total absorbida, el resultado (-0.47, $p = 0.6712$) indica que no hay diferencias significativas, lo que sugiere que la capacidad de disipación de energía es similar en ambos casos.

Comparación entre CFRP + CFRP y Acero + Acero

Para la Fuerza Máxima, el resultado (-3.75 , $p = 0.0394$) indica que la diferencia entre CFRP puro y acero puro es significativa, lo que confirma que las probetas de acero soportan cargas significativamente mayores que las de CFRP. Sin embargo, la Energía Total absorbida no mostró diferencias significativas en ninguna de las comparaciones realizadas, lo que sugiere que el comportamiento en términos de disipación de energía es independiente del tipo de material utilizado.

Conclusión general

Los resultados obtenidos permiten establecer conclusiones importantes sobre el comportamiento de las probetas en el ensayo de corte:

El acero puro presenta la mayor resistencia mecánica, ya que soporta mayores cargas antes de la falla, con diferencias estadísticamente significativas respecto a CFRP puro y configuraciones híbridas.

El CFRP puro tiene menor resistencia a cargas elevadas, pero su desempeño en términos de absorción de energía es comparable al de configuraciones híbridas o de acero.

Las configuraciones híbridas de Acero + CFRP tienen un desempeño intermedio en resistencia mecánica, mostrando una capacidad de carga menor que el acero puro pero similar al CFRP.

La disipación de energía no mostró diferencias significativas entre los grupos, lo que indica que la absorción de energía es más dependiente de la estructura del material y su deformación que de la composición específica de acero o CFRP.

5.2.8.6 Modo de falla de los ensayos de corte

Las Figuras 5.25 a la Figura 5.29 muestran los modos de falla de las probetas tras los ensayos de corte, fallas mixtas (adhesiva y cohesiva) en la mayoría de los casos, mientras que algunas probetas presentaron fallas cohesivas. Estos resultados permiten evaluar el adhesivo Sikadur 30 en la unión entre las platinas de acero A36 y la lámina de CFRP Carbodur S512, proporcionando información clave sobre la adherencia y resistencia mecánica de la unión.



Figura 5.25 Ensayo de corte: probeta 1 – modo de falla mixta (adhesivo y cohesivo).

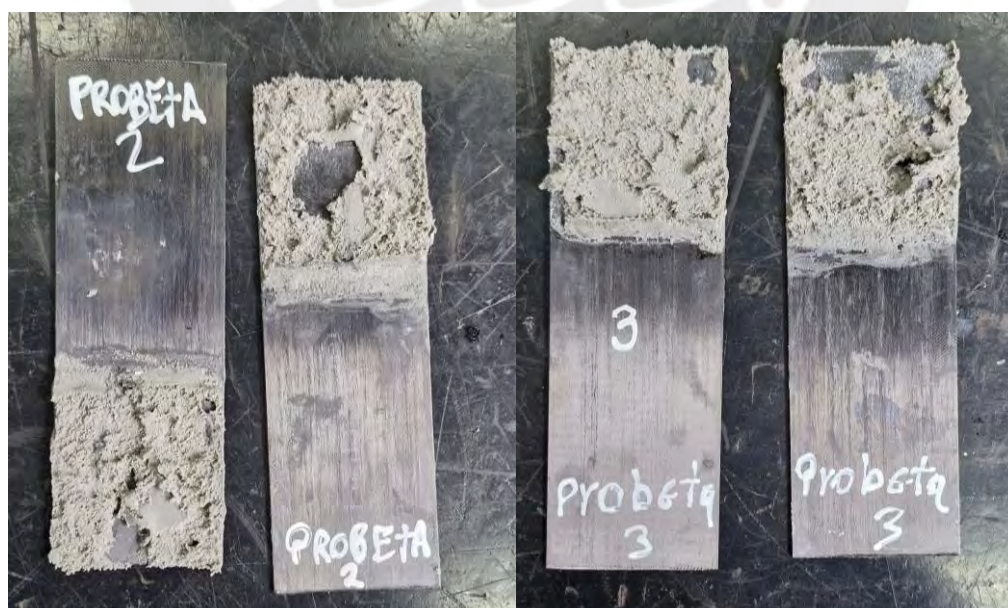


Figura 5.26 Ensayo de corte: probeta 2 y 3 – modo de falla mixta (adhesivo y cohesivo).



Figura 5.27 Ensayo de corte: probeta 4 y 5 – modo de falla cohesiva.



Figura 5.28 Ensayo de corte: probeta 6 modo de falla cohesiva - probeta 7 modo de falla mixta (adhesivo y cohesivo).

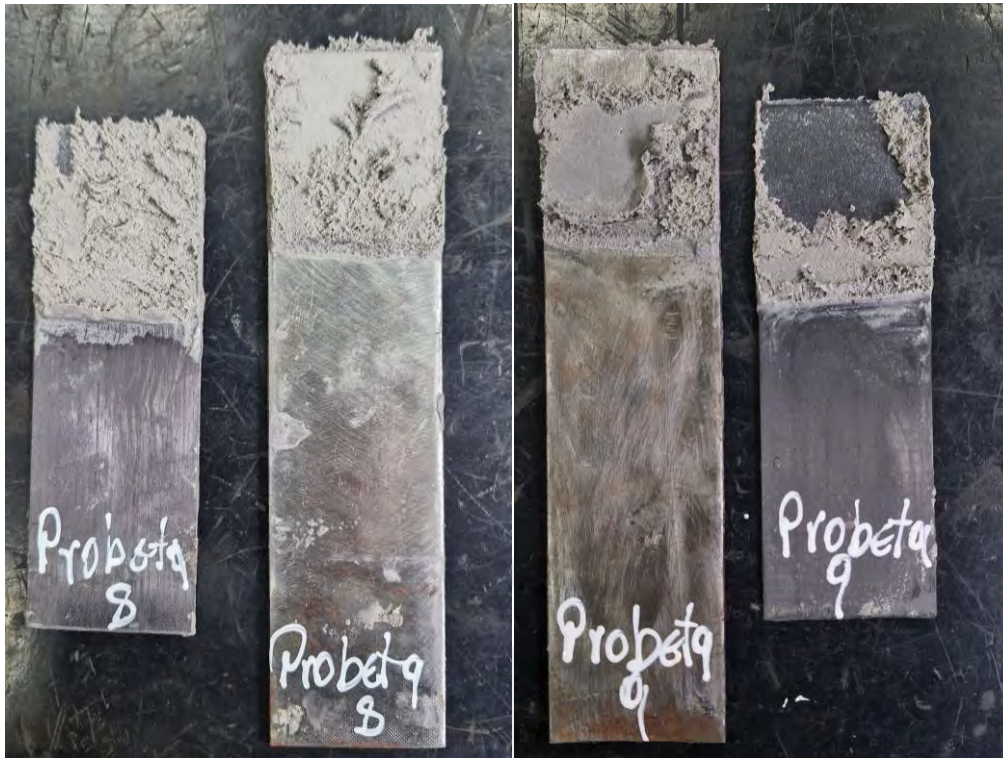


Figura 5.29 Ensayo de corte: probeta 8 y 9 – modo de falla mixta (adhesivo y cohesivo).

Los modos de falla observados en las probetas muestran una correlación directa con la resistencia máxima al corte del adhesivo. Las probetas con fallas cohesivas, como las probetas 4; 5 y 6, alcanzaron una mayor resistencia, lo que indica que el adhesivo es capaz de soportar las cargas internas antes de fracturarse, evidenciando una buena interacción adhesiva entre el adhesivo y los materiales base. Estos patrones se observan en las probetas con configuración Acero A36 + Acero A36.

Por otro lado, las probetas con fallas mixtas (adhesiva y cohesiva), como las probetas 1; 2; 3; 7; 8 y 9, muestran una menor resistencia al corte. En estas probetas, las fracturas combinan desprendimientos en la interfaz adhesivo-sustrato y fallas internas del adhesivo, lo que limita su capacidad máxima. Estos patrones se observan en las probetas con configuraciones de CFRP + CFRP y Acero A36 + CFRP, donde las propiedades disímiles de los materiales afectan la distribución de tensiones y la calidad de la adherencia. La clasificación de los modos de fallas de las uniones se encuentran en la norma ASTM D5573-99 (ASTM 2019a).

A continuación, se muestra la Tabla 5.21, en donde se muestra el resumen de los códigos de probetas con el modo de fallas del ensayo de corte.

Tabla 5.21 Probetas del ensayo al corte con el modo de falla.

Código de probetas	Modo de Falla	Configuración de Material
1	Mixta (Adhesiva y Cohesiva)	CFRP + CFRP
2	Mixta (Adhesiva y Cohesiva)	CFRP + CFRP
3	Mixta (Adhesiva y Cohesiva)	CFRP + CFRP
4	Cohesiva	Acero A36 + Acero A36
5	Cohesiva	Acero A36 + Acero A36
6	Cohesiva	Acero A36 + Acero A36
7	Mixta (Adhesiva y Cohesiva)	CFRP + Acero A36
8	Mixta (Adhesiva y Cohesiva)	CFRP + Acero A36
9	Mixta (Adhesiva y Cohesiva)	CFRP + Acero A36

5.2.9 Cálculo de corte del adhesivo

Cálculo Teórico de la Resistencia al Corte del Adhesivo

En este análisis, se calculó la fuerza máxima de cizallamiento que el adhesivo estructural Sikadur 30, puede resistir antes de fallar. Para ello, se consideraron las propiedades mecánicas del adhesivo, en particular su resistencia máxima al cizallamiento $\tau = 24.8 \text{ MPa}$, proporcionada en la ficha técnica del producto.

El área adherida utilizada en este cálculo fue de $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ lo que equivale a 2500 mm^2 , Se aplicó la siguiente formula de cizallamiento:

$$F = \tau * A \quad \text{Ec. 5.1}$$

Se obtuvo que la fuerza máxima soportada por el adhesivo antes de fallar es de:

$$F = 24.8 \text{ MPa} * 2500 \text{ mm}^2 \rightarrow F = 62000 \text{ N}$$

Este cálculo asume un espesor uniforme del adhesivo de 2mm y condiciones ideales de aplicación, respetando las recomendaciones del fabricante con un espesor máximo de 3mm, según la ficha técnica de Sikadur 30.

Cálculo Experimental de la Resistencia al Corte del Adhesivo

Los ensayos experimentales de corte realizados en el laboratorio han revelado una resistencia significativamente inferior al valor teórico. Los valores medidos en los ensayos variaron en el siguiente rango: 178.92N a 392.24 N. Utilizando la ecuación de corte, se calcula la resistencia experimental al corte (Ecuación 5.1):

$$\tau = \frac{178.92N}{2500 \text{ mm}^2} \rightarrow \tau = 0.0716 \text{ MPa}$$

$$\tau = \frac{392.24N}{2500 \text{ mm}^2} \rightarrow \tau = 0.1569 \text{ MPa}$$

El valor promedio experimental de la resistencia al corte se encuentra muy por debajo del valor teórico reportado en la ficha técnica, lo que sugiere la presencia de factores que afectan la capacidad real de adhesión.

5.2.10 Comparación del cálculo analítico y experimental del ensayo de corte.

Al comparar los resultados del cálculo analítico y los obtenidos experimentalmente para el ensayo de corte del adhesivo Sikadur 30, se observa una discrepancia en la fuerza máxima alcanzada. El cálculo analítico estima una fuerza máxima de 62000N, mientras que los resultados experimentales muestran valores inferiores, con un rango para las configuraciones mixtas entre 392.24 N. Esta diferencia puede atribuirse a múltiples factores que afectan la resistencia final del adhesivo.

El modelo analítico asume una distribución uniforme de esfuerzos y propiedades ideales del adhesivo, lo cual rara vez ocurre en la práctica. En los ensayos experimentales, factores como la calidad del contacto entre las superficies, la baja rugosidad en las láminas, la presencia de microdefectos, y las variaciones en el espesor del adhesivo, los cuales reducen la capacidad máxima de carga. Además, es posible que el curado del adhesivo no haya sido óptimo, afectando su desempeño mecánico, o que la proporción de la mezcla del adhesivo epóxico no haya sido la adecuada, lo que impactaría negativamente en su cohesión y resistencia al corte.

Asimismo, la resistencia del adhesivo puede verse influenciada por factores adicionales como la presencia de burbujas de aire atrapadas durante la aplicación, el grado de humedad en el ambiente durante el curado, y posibles contaminaciones en la superficie de adherencia, lo que generaría una disminución en la adhesión. La falta de control preciso en estos parámetros puede explicar la discrepancia significativa entre los valores teóricos y los obtenidos experimentalmente.

Capítulo 6. Diseño de la grúa reforzada

En el presente estudio se analizan cuatro configuraciones de refuerzo en la viga principal de la grúa, considerando la aplicación de laminados de fibra de carbono (CFRP) Carbodur S1514 y adhesivo estructural Sikadur-30. Las configuraciones evaluadas son: (A) viga sin refuerzo, (B) viga con refuerzo CFRP en la parte inferior, (C) viga con refuerzo CFRP en la parte superior y (D) viga con refuerzo CFRP en ambas caras (superior e inferior). A continuación, se presenta la representación esquemática de cada caso (ver Figura 6.1).

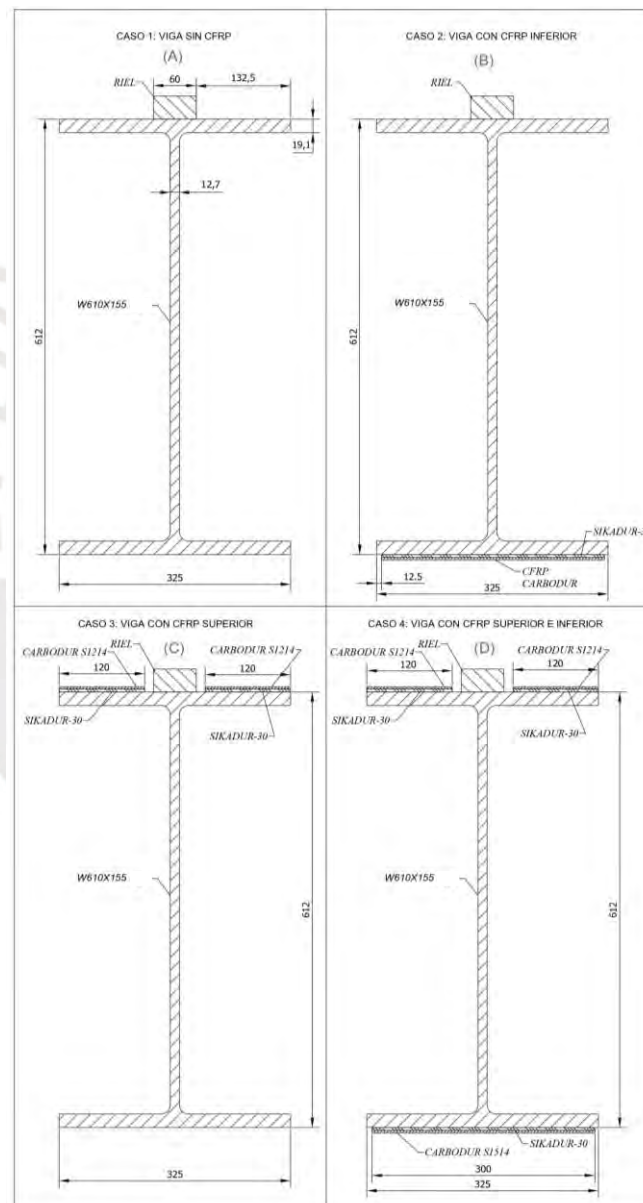


Figura 6.1 Configuraciones reforzamiento con carbodur S1514 en la viga (W610x155) principal de la grúa.

6.1 Simulación mediante elementos finitos de la viga W610x155 reforzada y sin reforzar con CFRP Carbodur S1514.

6.1.1 Condiciones de borde

En la Figura 6.2 se presentan las condiciones de borde aplicadas en la simulación estructural de la viga de la grúa. La viga está sujeta a restricciones en sus extremos, las cuales limitan sus grados de libertad y simulan su conexión con la estructura de la grúa. Además, se han definido cargas para representar el contacto de las ruedas con la viga, así como cargas distribuidas que modelan el peso del sistema de traslación.

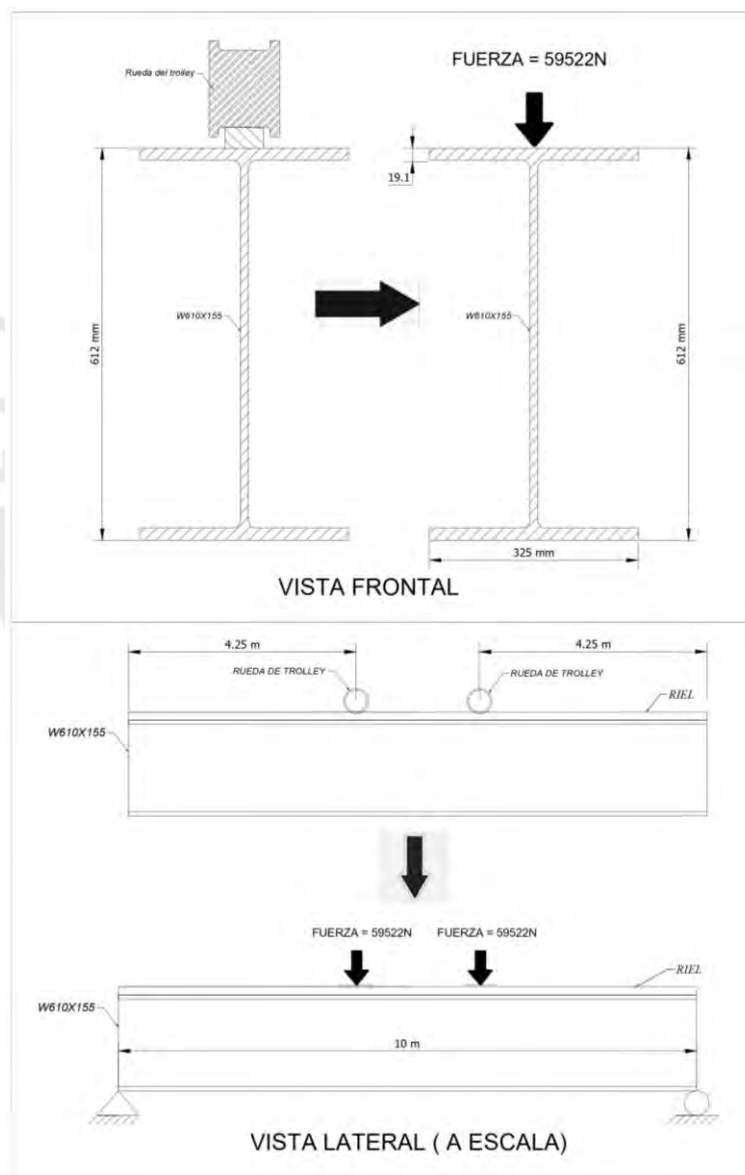


Figura 6.2 Representación esquemática del diagrama de cuerpo libre y condiciones de borde en la viga de la grúa.

Por otro lado, la Figura 6.3 muestra la implementación de estas condiciones en el modelo de elementos finitos dentro del software ANSYS. En esta representación se observan las restricciones en los apoyos, las fuerzas aplicadas y la respuesta estructural de la viga ante dichas condiciones. Este modelo permite evaluar con precisión el comportamiento de la estructura bajo diferentes configuraciones de refuerzo con CFRP. También se considera la aceleración gravitacional estándar para incorporar el efecto del peso propio de la viga en el análisis.

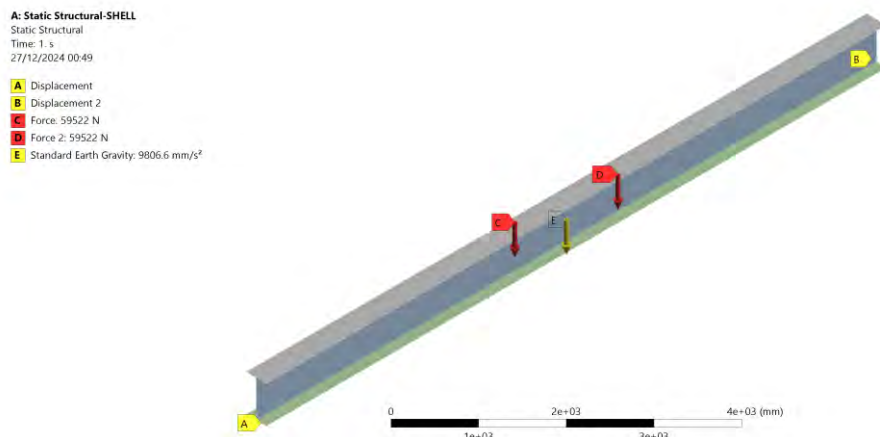


Figura 6.3 Condiciones de borde la viga de la grúa sin reforzar en Ansys.

6.1.2 Modelado y representación del refuerzo con CFRP y adhesivo en el análisis de elementos finitos

La lámina de CFRP Carbodur S1514 se adhiere a la viga mediante un adhesivo epóxico, con el objetivo de transferir eficientemente las solicitaciones de tracción y compresión entre el acero y CFRP carbodur S1514. Para capturar este comportamiento en ANSYS, tanto la viga como la lámina de CFRP y el adhesivo Sikadur-30 se discretizan con elementos sólidos 3D (SOLID185), asignándoles el espesor y propiedades mecánicas pertinentes a cada material. De esta forma, la interfaz se define con un contacto tipo “bonded” entre las láminas, de modo que se evite el deslizamiento o separación indebida, y se represente adecuadamente la transferencia de cargas a través del adhesivo. En el caso de la lámina de CFRP, se establecen propiedades ortótropas de acuerdo con la ficha técnica y la orientación de las fibras, mientras que el adhesivo se modela con el espesor y sus propiedades de resistencia a tracción y módulo de elasticidad.

6.1.3 Interpretación de los resultados gráficos de la viga W610x155 reforzada con CFRP

En la Figura 6.4 se presenta la deflexión vertical de la viga W610x155 a medida que se incrementa el espesor de la lámina CFRP, abarcando distintos casos de refuerzo (solo en la parte inferior, solo en la parte superior o en ambas caras). Se aprecia que, al aumentar el espesor, la rigidez de la viga mejora, reflejándose en una reducción progresiva de la deflexión. Sin embargo, tal como ocurre en otros perfiles, llega un punto (aproximadamente entre 5 mm y 10 mm de CFRP) a partir del cual la disminución de la deflexión se hace menos significativa, lo cual sugiere que elevar más el espesor no conlleva un beneficio sustancial adicional.

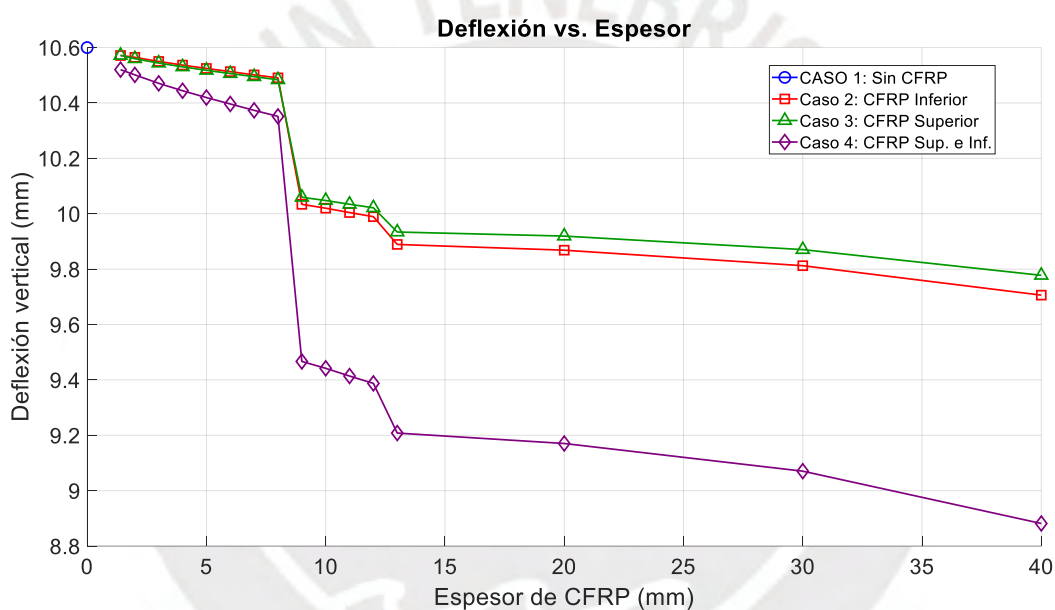


Figura 6.4 Grafica de deflexión vs espesor de la viga (W610x155)

En la Figura 6.5 se muestran los esfuerzos equivalentes en función del espesor de la lámina CFRP para la misma viga. Aquí se observa que el incremento en el espesor del refuerzo disminuye los esfuerzos de manera notable, especialmente en los primeros milímetros de espesor del CFRP. No obstante, al igual que con la deflexión, la reducción de esfuerzos tiende a estabilizarse después de cierto rango de espesores, indicando que el material adicional deja de ser tan eficiente en términos de reducción de esfuerzos.

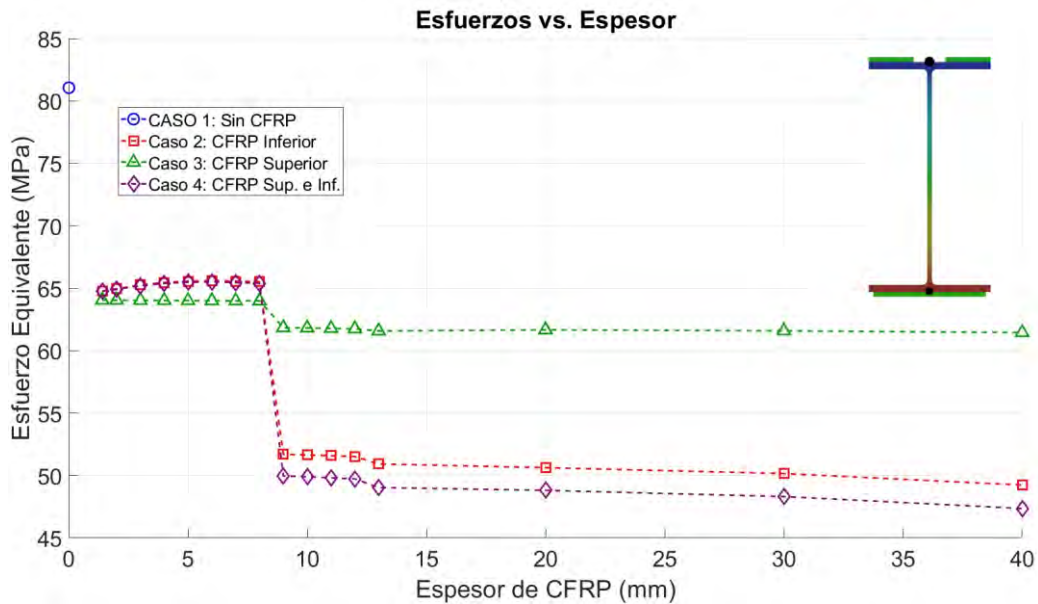


Figura 6.5 Grafica de esfuerzos vs espesor de la viga (W610x155)

En la Figura 6.6 se ilustra cómo varían los esfuerzos en la viga W610x155 en función del espesor de la lámina de CFRP para cada una de las configuraciones de refuerzo consideradas. Se observa que, al incrementar gradualmente el espesor hasta aproximadamente 5 mm, los esfuerzos se mantienen en niveles relativamente bajos; sin embargo, a partir de espesores mayores (alrededor de 10 mm), se evidencia un incremento significativo en los valores de esfuerzo cortante, el cual tiende a estabilizarse conforme se añaden espesores más grandes. Este comportamiento sugiere que existe un rango de espesor del CFRP donde se mejora la reducción de esfuerzos sin incurrir en sobrecostos o sobredimensionamientos innecesarios.

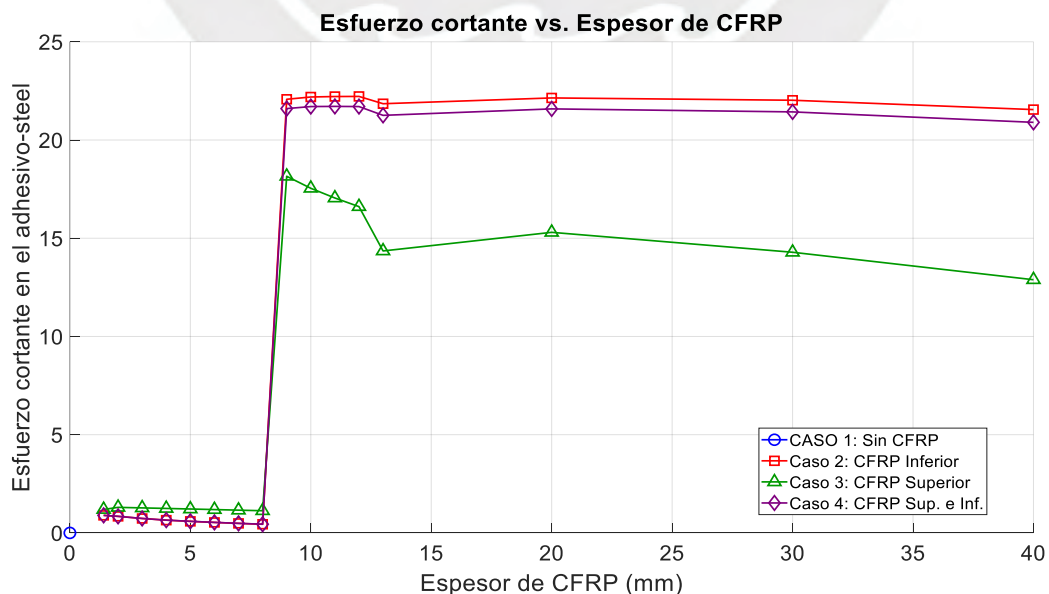


Figura 6.6 Grafica de esfuerzos cortantes vs espesor de la viga (W610x155)

6.2 Simulación mediante elementos finitos de la viga W610x140 reforzada y sin reforzar con CFRP Carbodur.

En este análisis se evaluó el comportamiento estructural de la viga W610x140 mediante simulaciones por el método de elementos finitos, comparando una configuración sin refuerzo y otra con refuerzo de CFRP Carbodur. Los resultados mostraron que la viga sin refuerzo no cumple con los criterios normativos de resistencia ni de deflexión, por lo que se propusieron tres configuraciones adicionales con CFRP aplicado en la cara superior, inferior y en ambas caras de la viga.

La Figura 6.7 presenta las cuatro configuraciones analizadas. Las simulaciones permitieron comprobar que el refuerzo con CFRP Carbodur mejora significativamente la resistencia estructural y la rigidez de la viga, logrando cumplir con la normativa vigente. Esta mejora se refleja en una menor deflexión y una mayor capacidad estructural.

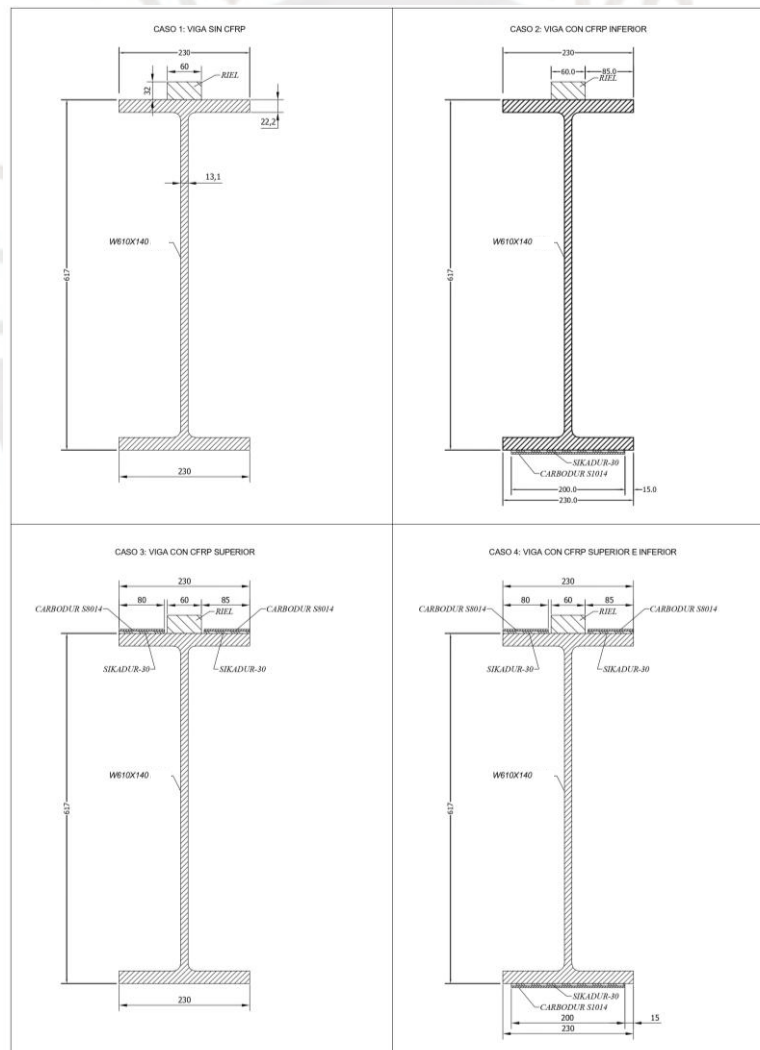


Figura 6.7 Configuraciones reforzamiento con carbodur en la viga principal W610x140 de la grúa.

6.2.1 Interpretación de los resultados gráficos de la viga W610x140 reforzada con CFRP

La Figura 6.8 es la gráfica de deflexión vertical de la viga conforme se incrementa el espesor de la lámina CFRP. Se representan distintos casos de refuerzo (inferior, superior y ambas caras) a fin de visualizar cómo, a partir de cierto espesor, la disminución en la deflexión tiende a estabilizarse, lo que indica que más allá de ese punto el beneficio adicional de aumentar espesor es limitado.

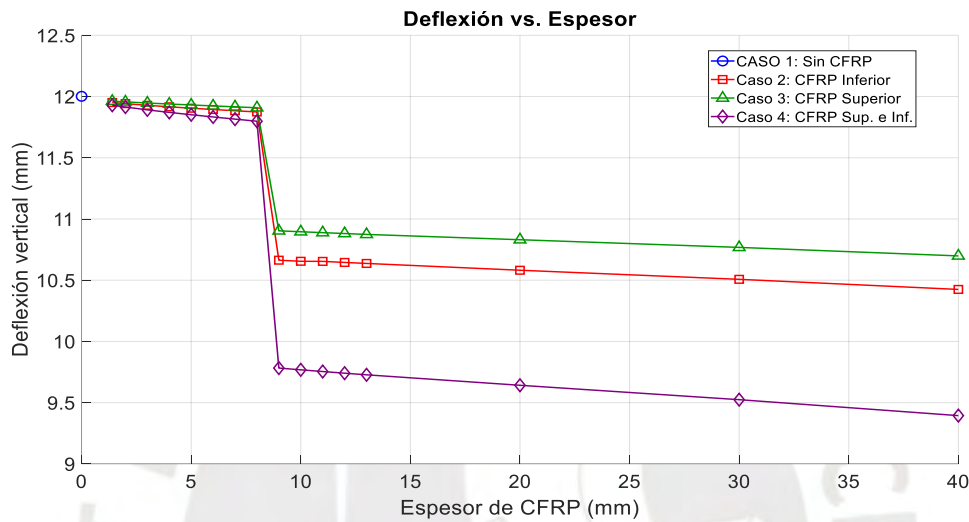


Figura 6.8 Grafica de deflexión vs espesor de la viga (W610x140)

En la Figura 6.9 se muestran los esfuerzos máximos también en función del espesor de la lámina CFRP, distinguiendo cada caso de ubicación del refuerzo. Se observa que, al incrementar el espesor, los esfuerzos se reducen de manera significativa, aunque con ligeras variaciones según la posición de la lámina (solo inferior, solo superior o ambas).

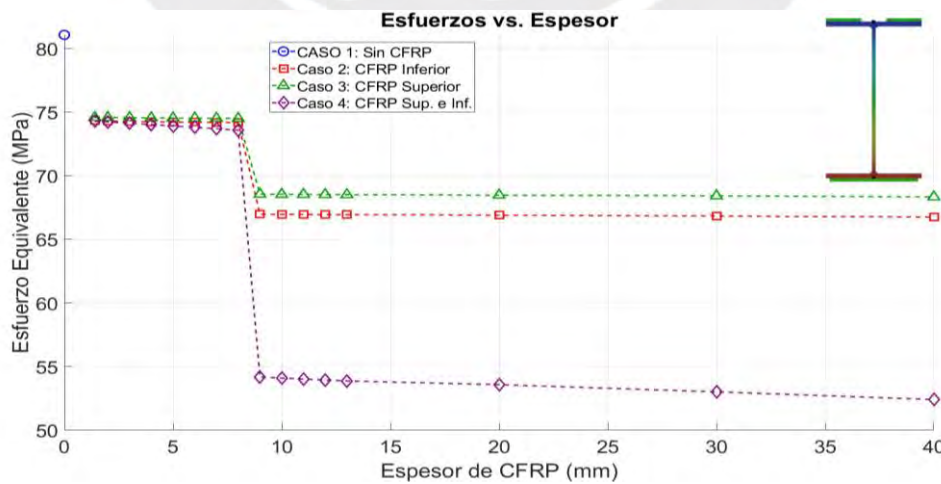


Figura 6.9 Grafica de esfuerzos vs espesor de la viga (W610x140)

En la Figura 6.10 se presenta la variación del esfuerzo cortante en la interfaz adhesivo-acero con respecto al espesor de la lámina de CFRP para la viga W610x140, considerando los cuatro casos de refuerzo analizados. Se observa que, para espesores menores de aproximadamente 5 mm, el esfuerzo cortante se mantiene en niveles relativamente bajos; sin embargo, al superar este umbral, se produce un incremento brusco en los esfuerzos, sobre todo en la configuración con CFRP en la cara inferior (CASO 2). A partir de espesores mayores (entre 10 mm y 15 mm), los valores tienden a estabilizarse, evidenciando que un incremento adicional en el espesor no aporta mejoras significativas en la disminución de los esfuerzos en la interfaz. Este comportamiento pone de manifiesto que existe una relación óptima entre el espesor de la lámina de CFRP y la demanda de esfuerzos cortantes, la cual debe considerarse para evitar sobredimensionamientos del refuerzo CFRP.

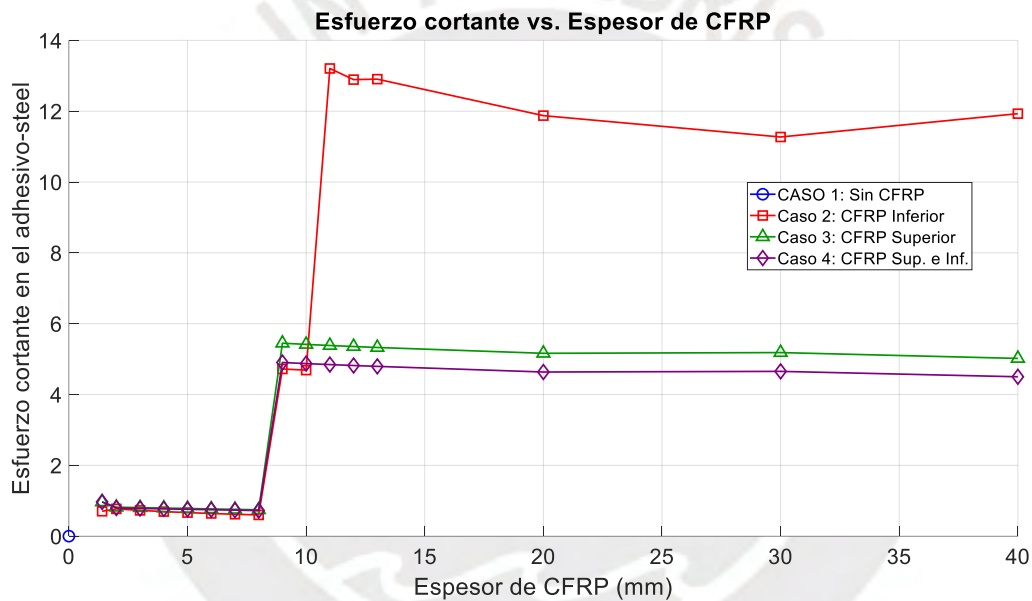


Figura 6.10 Grafica de esfuerzos cortantes vs espesor de la viga (W610x140)

6.3 Resultados parciales

A continuación, se presentan los resultados parciales correspondientes a la inclusión de CFRP en vigas de secciones W610x155 y W610x140, con énfasis en la reducción de la deflexión y de los esfuerzos, así como en la verificación normativa según CMAA 70. En la Figura 6.11 (viga W610x155), se aprecia la evolución de la disminución de deflexión y de esfuerzos en función del espesor de la lámina de CFRP para cuatro configuraciones de refuerzo (cara inferior, cara superior, ambas caras y sin refuerzo). De manera general, la configuración sin refuerzo (Caso 1) exhibe una deflexión máxima de 10,60 mm y un esfuerzo de 63,84 MPa. Al reforzar la cara inferior (Caso 2), la deflexión desciende a 10,19 mm (3,9 % menos) y el esfuerzo se reduce a 59,30 MPa (7,1 % menos). Por su parte, el refuerzo en la cara superior (Caso 3) también disminuye la deflexión a 10,19 mm, si bien el esfuerzo apenas varía (63,60 MPa, un 0,4 % menos). El mayor beneficio se obtiene al disponer CFRP en ambas caras (Caso 4), pues la deflexión baja hasta 9,71 mm (8,4 % menos) y el esfuerzo se sitúa en 58,67 MPa (8,1 % menos).

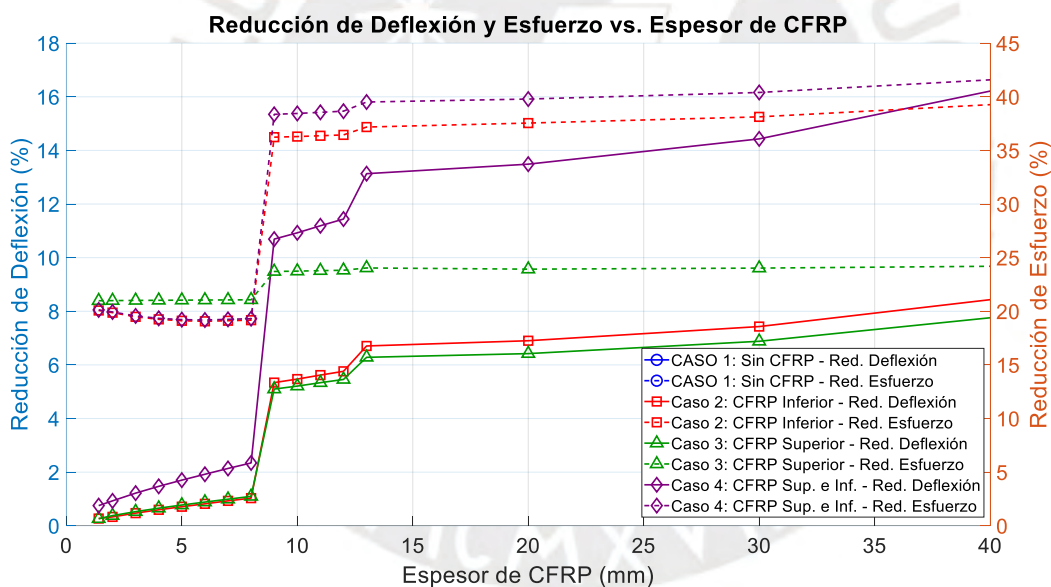


Figura 6.11 Gráfica de Reducción de deflexión y esfuerzos vs espesor de la viga (W610x155)

En contraste, la Figura 6.12 recoge el comportamiento de la viga W610×140, estructuralmente más ligera, donde las deformaciones y tensiones iniciales son más altas que en la viga de mayor sección. Sin refuerzo (Caso 1), la deflexión alcanza 12,06 mm y el esfuerzo llega a 75,50 MPa. Al reforzar únicamente la cara inferior (Caso 2), se logra una reducción de la deflexión a 11,18 mm (7,5 % menos) y una disminución del esfuerzo a 69,70 MPa (7,7 % menos). El refuerzo en la cara superior (Caso 3) ofrece una mejora más moderada (deflexión de 11,94 mm y esfuerzo de 74,50 MPa), mientras que la incorporación de CFRP en ambas caras (Caso 4) consigue la reducción simultánea más pronunciada, con una deflexión de 10,80 mm (10,6 % menos) y un esfuerzo de 63,80 MPa (15,5 % menos).

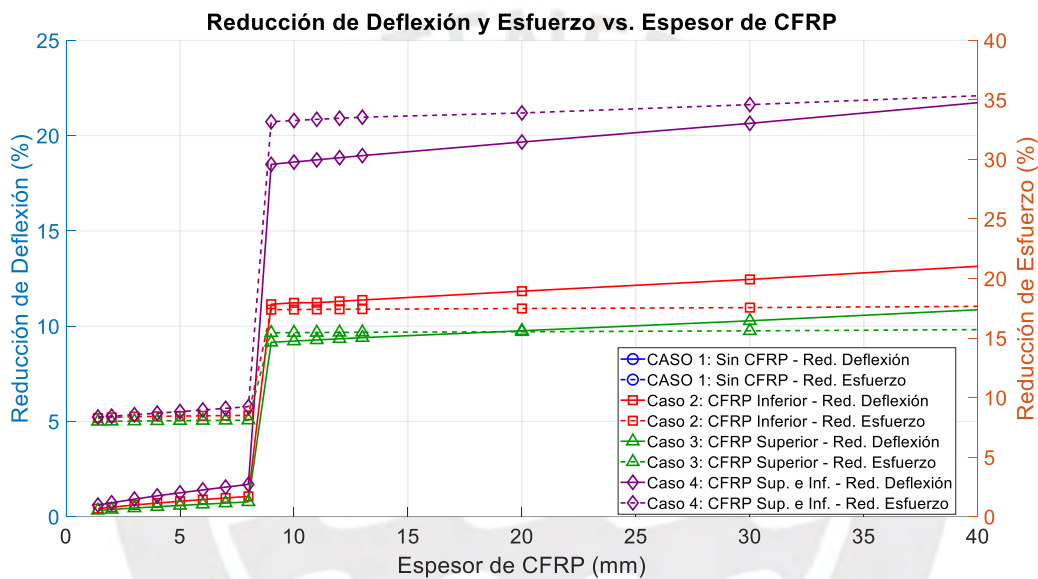


Figura 6.12 Grafica de Reducción de deflexión y esfuerzos vs espesor de la viga (W610x140)

La Tabla 6.1 resume la evaluación de dichas configuraciones de refuerzo frente a la norma CMAA 70, relacionando la deflexión máxima y el esfuerzo normal máximo con los límites establecidos. Para facilitar la interpretación, el color verde en las celdas correspondientes a los valores que cumplen el criterio de la norma, mientras que el color rojo indica los casos en que no se cumple dicho requisito. De esta forma, puede observarse que, en la viga W610×140, el Caso 1 (sin refuerzo) y el Caso 3 (refuerzo superior) presentan la deflexión marcada en rojo, evidenciando que exceden el límite de la norma, aun cuando el esfuerzo se mantiene en niveles aceptables (en verde). Por el contrario, reforzar la cara inferior (Caso 2) o ambas caras (Caso 4) se traduce en celdas verdes tanto para la deflexión como para el esfuerzo, satisfaciendo así el criterio de CMAA 70. Con respecto a la viga W610×155, incluso la configuración sin refuerzo

exhibe valores en verde (cumple) para ambos parámetros, si bien la adición de CFRP permite mejorar aún más su comportamiento estructural.

Tabla 6.1 Cumplimiento De Casos Según La Norma CMAA 70 en la viga W610x140 y viga W610x155

Tipo de viga	Configuración	Deflexión Máxima (mm)	Cumple Deflexión CMAA 70	Esfuerzo Normal Máximo (MPa)	Cumple Esfuerzo CMAA 70
w 610x140	CASO 1: FEM Sin Refuerzo	12.06	No	75.5	Sí
	CASO 2: FEM Refuerzo Inferior	11.18	Sí	69.7	Sí
	CASO 3: FEM Refuerzo Superior	11.96	No	74.5	Sí
	CASO 4: FEM Refuerzo Superior e Inferior	11.08	Sí	69	Sí
w 610x155	CASO 1: FEM Sin Refuerzo	10.60	Sí	63.8	Sí
	CASO 2: FEM Refuerzo Inferior	10.19	Sí	59.3	Sí
	CASO 3: FEM Refuerzo Superior	10.19	Sí	61.3	Sí
	CASO 4: FEM Refuerzo Superior e Inferior	9.71	Sí	58.7	Sí

Estos resultados ponen de manifiesto que, para ambas secciones de viga, la incorporación de CFRP en las dos caras (superior e inferior) ofrece la reducción más significativa tanto en la deflexión como en los esfuerzos; sin embargo, recurrir únicamente a la cara inferior puede ser una solución conveniente cuando se requiere un equilibrio entre eficiencia y costo, en especial para controlar flexiones positivas. En particular, en la viga W610x140, la disminución de la deflexión resulta importante para cumplir con los límites de la norma CMAA 70. Asimismo, se evidencia que, aunque la viga W610x155 satisface los requerimientos reglamentarios aun sin refuerzo, la sección más ligera W610x140 reforzada con CFRP brinda ventajas notables en cuanto a eficiencia estructural y reducción de peso. Desde una perspectiva de un mejor diseño, reforzar ambas caras maximiza la disminución conjunta de deflexión y esfuerzos, si bien la elección definitiva puede ponderarse con criterios económicos y de constructibilidad. En consecuencia, el uso de CFRP en vigas de menor sección se erige como una estrategia efectiva para alcanzar rigidez y resistencia adecuadas, respetando los lineamientos de la norma CMAA 70 y beneficiándose de un menor peso total en la estructura.

Conclusiones

Conclusiones del ensayo de corte adhesivo: El adhesivo Sikadur demostró ser una solución eficaz para la unión de materiales tanto homogéneos como heterogéneos, adaptándose a las propiedades mecánicas de cada configuración. Su desempeño fue más destacado en configuraciones con materiales Acero + Acero, donde la compatibilidad mecánica permitió una transferencia eficiente de esfuerzos. Sin embargo, en configuraciones con materiales más flexibles como el CFRP, su contribución se vio limitada por las características intrínsecas del material adherido. Por último, la configuración mixta Acero + CFRP ofrece un enfoque balanceado, ampliando su potencial en aplicaciones donde se requiera combinar propiedades mecánicas.

Discusiones de los ensayos de flexión de 3 puntos experimental: El análisis comparativo entre las probetas reforzadas con CFRP arriba y CFRP abajo demuestra que ambas configuraciones mejoran sustancialmente la fuerza máxima y la energía absorbida en comparación con las probetas de acero puro A36 y Carbodur S512. No obstante, la ubicación del CFRP en la parte superior se destaca como la opción más eficaz, no solo por su capacidad superior para absorber energía, sino también por permitir un mayor desplazamiento antes de alcanzar el fallo, lo que la convierte en la elección ideal para aplicaciones que exigen mayor flexibilidad y disipación de energía. En contraste, el CFRP en la parte inferior ofrece una ligera ventaja en la resistencia a la carga máxima, pero su desempeño en cuanto a la absorción de energía y capacidad de deformación es inferior.

Conclusiones de la comparación de las 2 vigas principales: El análisis comparativo evidenció que el perfil W610x140 kg/m, si bien no cumplía inicialmente con los criterios de deflexión establecidos por la norma CMAA 70, logró satisfacer dichos requerimientos al ser reforzado con láminas de CFRP. Este refuerzo incrementó la rigidez estructural y un buen factor de seguridad, evitando el uso de perfiles más pesados como el W610x155 kg/m. Estos resultados validan la eficacia del uso de materiales compuestos como una alternativa viable y adecuado para mejorar la resistencia estructural.

Conclusiones de la viga W610x140: El análisis de la viga W610x140 reforzada con láminas de CFRP demuestra que las configuraciones Caso 2 (refuerzo inferior) y Caso 4 (refuerzo superior e inferior) cumplen plenamente con los requisitos de la norma CMAA 70 en la deflexión y esfuerzos máximos. Los resultados del Caso 2 (refuerzo inferior) y del Caso 4 (refuerzo superior e inferior) son muy cercanos en la deflexión y esfuerzo máximos, con reducciones del 7.3% y 8.1% en la deflexión, respectivamente, y del 9.1% y 10.2% en el esfuerzo máximo. Esta similitud indica que el refuerzo superior podría no ser tan eficiente en comparación con el refuerzo inferior, ya que el incremento de la rigidez es mínimo relación al uso adicional de material.

Desde una perspectiva económica y funcional, el uso del refuerzo superior podría representar un desperdicio de material y un aumento innecesario en los costos sin un beneficio proporcional en la mejora estructural. Por lo tanto, el Caso 2, que utiliza el refuerzo inferior, se presenta como una solución simple y eficiente, maximizando la rigidez de la viga con un menor consumo de material. Esto sugiere que el refuerzo superior debe ser evaluado cuidadosamente para determinar su utilidad real y evitar costos adicionales que no se traduzcan en mejoras significativas.

Conclusiones sobre la implicación de la modelación numérica en el diseño: La validación experimental de las probetas reforzadas con CFRP permite calibrar modelos de Elementos Finitos que, a su vez, resultan altamente útiles para predecir el comportamiento de la viga principal en múltiples escenarios de carga. Esta sinergia entre experimentos y simulaciones confiere una herramienta robusta para la toma de decisiones en etapas tempranas de diseño y en trabajos de rehabilitación, mejorar recursos y reduciendo ensayos costosos a escala real.

Conclusiones sobre el potencial de la técnica para la rehabilitación de estructuras existentes: La metodología de refuerzo con CFRP no se limita al diseño de vigas para nuevos puentes grúa, sino que, por su versatilidad y eficiencia, se presenta como una alternativa atractiva para la rehabilitación de estructuras metálicas que presenten daño por fatiga, corrosión o sobrecargas. El aporte adicional de rigidez y resistencia que ofrece el laminado de fibra de carbono prolonga la vida útil de los elementos estructurales existentes y retrasa las intervenciones de reemplazo total, traduciéndose en ahorro de costos y mayor seguridad operativa.

Referencias

- (ASME), American Society of Mechanical Engineers. 2022. *ASME B30.2-2022 (Overhead and Gantry Cranes)*. New York, NY, USA: American Society of Mechanical Engineers.
- (CMAA), Crane Manufacturers Association of America. 2020. *CMAA Specification No. 70–2020: Specifications for Top Running Bridge and Gantry Type Multiple Girder Electric Overhead Traveling Cranes*. United States.
- (FEM), European Materials Handling Federation. 1998. *FEM 1.001 (Rules for The Design Of Hoisting Appliances)*. Brussels, Belgium: European Materials Handling Federation.
- (ISO), International Organization for Standardization. 2012. *ISO 8686-1:2012 (Cranes - Design Principles for Loads and Load Combinations)*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- AbouEl-Hamd, O. R., A. M. I. Sweedan, and B. El-Ariss. 2022. "Flexural Performance of Steel Beams Strengthened by Fastened Hybrid FRP Strips Utilizing Staggered Steel Bolts." *Buildings* 12(12). doi: 10.3390/buildings12122150.
- AbouEl-Hamd, O. R., A. M. I. Sweedan, B. El-Ariss, and K. M. El-Sawy. 2023. "Experimental and Numerical Investigation of the Behavior of Steel Beams Strengthened by Bolted Hybrid FRP Composites." *Buildings* 13(3). doi: 10.3390/buildings13030824.
- Alsuhaibani, Eyad, Nur Yazdani, and Eyosias Beneberu. 2022. "Durability and Long-Term Performance Prediction of Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates." *Polymers* 14(15).
- ASTM. 2017. "D790: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials." *Annual Book of ASTM Standards* 1–12. doi: 10.1520/D0790-17.2.
- ASTM. 2019a. "ASTM D5573—99: Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints." *ASTM International* i(Reapproved):1–3. doi: 10.1520/D5573-99R19.2.
- ASTM. 2019b. "D1002 – 10: Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to- Metal)." *ASTM International* 01(Reapproved):1–5. doi: 10.1520/D1002-10R19.1.2.
- ASTM. 2023. "D5868 – 01: Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding." *American Society for Testing and Materials International* 01(Reapproved):3–5. doi: 10.1520/D5868-01R23.2.
- ASTM International. 2019. *ASTM A36/A36M-19: Standard Specification for Carbon Structural Steel*. doi: 10.1520/A0036_A0036M-19.

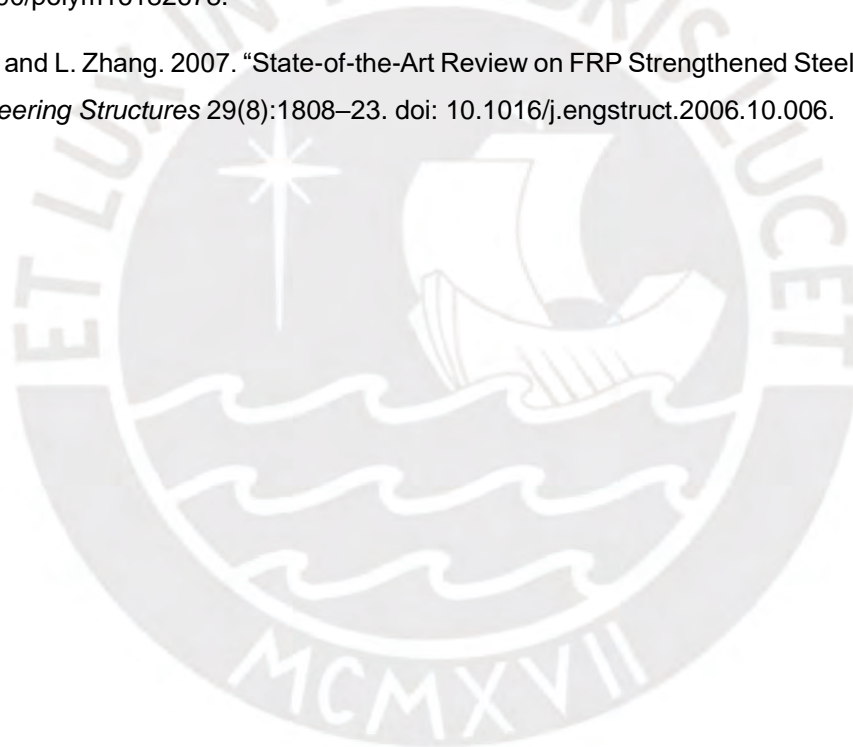
- Deng, L., M. Zhong, Y. Liu, L. Liao, S. Lai, L. Lei, and Z. Zhou. 2021. "Study on the Flexural Fatigue Performance of CFRP-OFBG Plate Reinforced Damaged Steel Beams." *KSCE Journal of Civil Engineering* 25(12):4686–97. doi: 10.1007/s12205-021-1138-y.
- Elkhabeery, O. H., S. S. Safar, and S. A. Mourad. 2018. "Flexural Strength of Steel I-Beams Reinforced with CFRP Sheets at Tension Flange." *Journal of Constructional Steel Research* 148:572–88. doi: 10.1016/j.jcsr.2018.05.038.
- Euler, Mathias, and Colin Taylor. 2021. "Fatigue Action on Crane Runway Beams." *Journal of Constructional Steel Research* 181:106476. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106476>.
- F. L. Matthews, R. D. Rawlings. 1999. *Composite Materials: Engineering and Science*. 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Frendo, Francesco. 2013. "Analysis of the Catastrophic Failure of a Dockside Crane Jib." *Engineering Failure Analysis* 31:394–411. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.02.026>.
- Gay, D., S. V Hoa, and S. W. Tsai. 2002. *Composite Materials: Design and Applications*. CRC Press.
- Guo, Jinzhan, Lihua Zhan, Bolin Ma, Dechao Zhang, Yisa Fan, Shunming Yao, and Jingpeng Feng. 2023. "A Review on Failure Mechanism and Mechanical Performance Improvement of FRP-Metal Adhesive Joints under Different Temperature-Humidity." *Thin-Walled Structures* 188(November 2022):110788. doi: 10.1016/j.tws.2023.110788.
- H., Qi B., Yan S., Sun W., and Zou C. Y. 2012. "Mechanical Properties of Steel Crane Beam Strengthened by CFRP." *Earth and Space* 2010 3262–69. doi: doi:10.1061/41096(366)311.
- Hosseini, A., E. Ghafoori, R. Al-Mahaidi, X. L. Zhao, and M. Motavalli. 2019. "Strengthening of a 19th-Century Roadway Metallic Bridge Using Nonprestressed Bonded and Prestressed Unbonded CFRP Plates." *Construction and Building Materials* 209:240–59. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.095.
- Hu, L., P. Feng, W. Gao, and Y. Wang. 2022. "Flexural Behavior of Light Steel Purlins Reinforced by Prestressed CFRP Laminates." *Thin-Walled Structures* 174. doi: 10.1016/j.tws.2022.109125.
- Jones, R. M. 1975. *Mechanics of Composite Materials*. edited by S. B. Company. Scripta Book Company.
- Ke, Lu, Chuanxi Li, Jun He, Shuai Dong, Can Chen, and Yang Jiao. 2020. "Effects of Elevated Temperatures on Mechanical Behavior of Epoxy Adhesives and CFRP-Steel Hybrid Joints." *Composite Structures* 235(November 2019). doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111789.
- Kollár, L. P., and G. S. Springer. 2003. *Mechanics of Composite Structures*. Cambridge University Press.

- Kyriadis, Minos E., Elias P. Bilalis, and Nicholas G. Tsouvalis. 2021. "Experimental and Numerical Study of CFRP Reinforced Steel Beams." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 235(4):931–43. doi: 10.1177/1475090220960266.
- Li, H., S. Xu, Z. Zhang, and C. Song. 2021. "Experimental and Numerical Investigation on the Corrosion Effects on the Bonding Behavior between CFRP and Steel." *Composite Structures* 259. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113465.
- Li, J., M. Zhu, and J. Deng. 2022. "Flexural Behaviour of Notched Steel Beams Strengthened with a Prestressed CFRP Plate Subjected to Fatigue Damage and Wetting/Drying Cycles." *Engineering Structures* 250. doi: 10.1016/j.engstruct.2021.113430.
- Mallick, P. K. 1993. *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design, Second Edition*. Taylor & Francis.
- Marquez, A. A., P. Venturino, and J. L. Otegui. 2014. "Common Root Causes in Recent Failures of Cranes." *Engineering Failure Analysis* 39:55–64. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.01.012>.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. 2006. *NTP E.020 (Cargas)*. Lima, Peru: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- Mohabeddine, Anis, Ghassan Malik, José Correia, Filipe Silva, Abílio De Jesus, Nicholas Fantuzzi, and José Miguel Castro. 2023. "Experimental Parametric Investigation on the Behavior of Adhesively Bonded CFRP/Steel Joints." *Composite Structures* 307:116598. doi: 10.1016/j.compstruct.2022.116598.
- Narmashiri, K., M. Z. Jumaat, and N. H. R. Sulong. 2011. "Failure Modes of CFRP Flexural Strengthened Steel I-Beams." Pp. 590–95 in *Key Engineering Materials*. Vols. 471–472.
- Nguyen, Tien Cuong, Yu Bai, Xiao Ling Zhao, and Riadh Al-Mahaidi. 2012. "Durability of Steel/CFRP Double Strap Joints Exposed to Sea Water, Cyclic Temperature and Humidity." *Composite Structures* 94(5):1834–45. doi: 10.1016/j.compstruct.2012.01.004.
- Nguyen, Tien Cuong, Yu Bai, Xiao Ling Zhao, and Riadh Al-Mahaidi. 2013. "Curing Effects on Steel/CFRP Double Strap Joints under Combined Mechanical Load, Temperature and Humidity." *Construction and Building Materials* 40:899–907. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.035.
- Panacea Engineers. 2025. "Crane Failure Analysis." EOT Crane Maintenance. Retrieved (<https://www.eotcranemaintenance.com/crane-failure-analysis.html>).
- Park, J. W., and J. H. Yoo. 2015. "Flexural and Compression Behavior for Steel Structures Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRPs) Sheet." *Steel and Composite Structures* 19(2):441–65. doi: 10.12989/scs.2015.19.2.441.

- Prasertsri, T., A. Lenwari, and T. Thepchatrri. 2020. "Flexural Response of CFRP-Strengthened Steel Beams with Initial Bond Defects." *Engineering Journal* 24(1):115–27. doi: 10.4186/ej.2020.24.1.115.
- Qiu, T., F. Ge, C. Li, and S. Lu. 2022. "Study of the Thermal Degradation of Flame-Retardant Polyester GFRP Using TGA and TG-FTIR-GC/MS." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 147(10):5743–60. doi: 10.1007/s10973-021-10895-z.
- Qureshi, Jawed. 2022. "A Review of Fibre Reinforced Polymer Structures." *Fibers* 10(3). doi: 10.3390/fib10030027.
- Rajak, D. K., D. D. Pagar, R. Kumar, and C. I. Pruncu. 2019. "Recent Progress of Reinforcement Materials: A Comprehensive Overview of Composite Materials." *Journal of Materials Research and Technology* 8(6):6354–74. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.09.068.
- Rusiński, E., A. Iluk, K. Malcher, and D. Pietrusiak. 2013. "Failure Analysis of an Overhead Traveling Crane Lifting System Operating in a Turbogenerator Hall." *Engineering Failure Analysis* 31:90–100. doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.02.008.
- Selvaraj, S., and M. Madhavan. 2020. "Design of Steel Beams Strengthened with Low-Modulus CFRP Laminates." *Journal of Composites for Construction* 24(1). doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000983.
- Shekarchi, M., and A. Khaloo. 2021. "Shear and Flexural Strengthening of Steel Beams with Thick Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminate." *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering* 9(4):148–70. doi: 10.22075/JRCE.2021.22339.1473.
- Shi, Hongjun. 2023. "Failure Analysis of Fixed Crane Boom Fracture." Pp. 275 – 282 in *Advances in Transdisciplinary Engineering*. Vol. 40.
- Sika Corporation. 2020. *Sika® CarboDur®* S. Lyndhurst, NJ, USA.
- Sika, Corporation. 2020. *Sikadur®-30*. Lyndhurst, NJ, USA.
- Siwowski, Tomasz W., and Paulina Siwowska. 2018. "Experimental Study on CFRP-Strengthened Steel Beams." *Composites Part B: Engineering* 149(April):12–21. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.04.060.
- Solazzi, L., and N. Danzi. 2024. "Jib Crane Lightweighting through Composite Material and Prestressing Technique." *Composite Structures* 343. doi: 10.1016/j.compstruct.2024.118283.
- Solazzi, L., and M. Vaccari. 2022. "Feasibility Study of a Jib Crane Made of Composite Materials Considering Deterministic and Probabilistic Approach." *Composites Part C: Open Access* 9. doi: 10.1016/j.jcomc.2022.100323.
- Solazzi, Luigi. 2024. "Feasibility Study of a Very Big Crawler Crane Using Composite Materials."

- Composites Part C: Open Access* 13(January):100430. doi: 10.1016/j.jcomc.2024.100430.
- Suvorov, V., R. Vasilyev, B. Melnikov, I. Kuznetsov, and M. R. Bahrami. 2023a. "Weight Reduction of a Ship Crane Truss Structure Made of Composites." *Applied Sciences (Switzerland)* 13(15). doi: 10.3390/app13158916.
- Suvorov, V., R. Vasilyev, B. Melnikov, I. Kuznetsov, and M. R. Bahrami. 2023b. "Weight Reduction of a Ship Crane Truss Structure Made of Composites." *Applied Sciences (Switzerland)* 13(15). doi: 10.3390/app13158916.
- Tahar, H. D., A. Boussad, R. Abderezak, B. Rabia, A. Fazilay, and A. Belkacem. 2019. "Flexural Behaviour of Steel Beams Reinforced by Carbon Fibre Reinforced Polymer: Experimental and Numerical Study." *Structural Engineering and Mechanics* 72(4):409–19. doi: 10.12989/sem.2019.72.4.409.
- Tulekov, A., B. Togizbayeva, I. Kenesbek, A. Kenesbek, and A. Zabayeva. 2023. "The Use of Composite Materials in the Production of Tower Cranes." *Acta Polytechnica Hungarica* 20(9):277–91. doi: 10.12700/APH.20.9.2023.9.16.
- Wang, H. T., Z. N. Bian, M. S. Chen, L. Hu, and Q. Wu. 2023. "Flexural Strengthening of Damaged Steel Beams with Prestressed CFRP Plates Using a Novel Prestressing System." *Engineering Structures* 284. doi: 10.1016/j.engstruct.2023.115953.
- Wang, H. T., and G. Wu. 2018. "Bond-Slip Models for CFRP Plates Externally Bonded to Steel Substrates." *Composite Structures* 184:1204–14. doi: 10.1016/j.compstruct.2017.10.033.
- Wang, Z., G. Xian, and Q. Yue. 2023. "Finite Element Modeling of Debonding Failure in CFRP-Strengthened Steel Beam Using a Ductile Adhesive." *Composite Structures* 311. doi: 10.1016/j.compstruct.2023.116818.
- Wu, Qingxiang, Xiaokai Wang, Lin Hua, and Minghui Xia. 2020. "Dynamic Analysis and Time Optimal Anti-Swing Control of Double Pendulum Bridge Crane with Distributed Mass Beams." *Mechanical Systems and Signal Processing* 144. doi: 10.1016/j.ymsp.2020.106968.
- Yang, Y., Q. Yue, J. Lian, J. He, and X. Xia. 2013. "Construction Technology of the Fatigue Property of CFRP Reinforce Steel Crane Beam." Pp. 986–90 in *Applied Mechanics and Materials*. Vols. 256–259.
- Yao, J., F. Xing, Y. Fu, X. Qiu, Z. Zhou, and J. Hou. 2017. "Failure Analysis of Torsional Buckling of All-Terrain Crane Telescopic Boom Section." *Engineering Failure Analysis* 73:72–84. doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.12.006.
- Yao, Jia, Xiaoming Qiu, Zhenping Zhou, Yuqin Fu, Fei Xing, and Erfei Zhao. 2015. "Buckling Failure Analysis of All-Terrain Crane Telescopic Boom Section." *Engineering Failure Analysis* 57:105–17. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.07.038>.

- Yue, Q. R., Y. Zheng, X. Chen, and X. G. Liu. 2016. "Research on Fatigue Performance of CFRP Reinforced Steel Crane Girder." *Composite Structures* 154:277–85. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.07.066.
- Zhang, Ni, Xuetian Gu, and Wenyu Hou. 2022. "Analysis of Interfacial Mechanical Properties of Steel Beams Strengthened with CFRP Sheets under Temperature and Creep." *Polymers* 14(12). doi: 10.3390/polym14122384.
- Zhang, Z. X., S. H. Xu, L. Mu, and S. Y. Peng. 2020. "Experimental and Theoretical Investigation on Flexural Behavior of Corroded Steel Beams Strengthened by CFRP Plate." *KSCE Journal of Civil Engineering* 24(7):2160–72. doi: 10.1007/s12205-020-2140-5.
- Zhao, Jian, Yongxing Huang, Kun Gong, Zhiguo Wen, Sinan Liu, Yanyan Hou, Xuewu Hong, Xuecheng Tong, Kai Shi, and Ziyi Qu. 2024. "Analysis and Evaluation of Load-Carrying Capacity of CFRP-Reinforced Steel Structures." *Polymers* 16(18). doi: 10.3390/polym16182678.
- Zhao, X. L., and L. Zhang. 2007. "State-of-the-Art Review on FRP Strengthened Steel Structures." *Engineering Structures* 29(8):1808–23. doi: 10.1016/j.engstruct.2006.10.006.



Anexos

7.1 Anexo A: Códigos y Algoritmos

CALCULO DE VIGA SIMPLEMENTE APOYADA - PLACA CON CFRP

```
%% MICROMECAÁNICA ESTA PARTE INICIAL
%% SON 3 LAMINAS ABAJO ACERO, ADHESIVO SIKADUR30, CARBODUR S512
% Datos de entrada

%% CARBODUR S512

Vf = 0.68;          % Volumen de la fibra
Ef = 241;          % Módulo de elasticidad de la fibra (GPa)
vf = 0.2;          % Coeficiente de Poisson de la fibra
Vm = 0.32;          % Volumen de la matriz
Em = 3.6;          % Módulo de elasticidad de la matriz (GPa)
vm = 0.35;          % Coeficiente de Poisson de la matriz

% Cálculo de las propiedades efectivas de la lámina
% Módulo de elasticidad longitudinal (E11)
E11aa = Vf * Ef + Vm * Em;

% Módulo de elasticidad transversal (E22)
E22aa = 1 / (Vf / Ef + Vm / Em);

% Coeficiente de Poisson (v12)
v12aa = Vf * vf + Vm * vm;

% Minor Poisson's ratio (v21)
v21aa = v12aa * E22aa / E11aa;

% Módulo de corte de la fibra (Gf) y de la matriz (Gm)
Gf = Ef / (2 * (1 + vf));
Gm = Em / (2 * (1 + vm));
```

```

% Módulo de corte (G12)
G12aa = 1 / (Vf / Gf + Vm / Gm);

% Resultados
disp('Propiedades mecánicas de la lámina CFRP SIKA S512:');
fprintf('Módulo de elasticidad longitudinal, E11aa = %.4f GPa\n', E11aa);
fprintf('Módulo de elasticidad transversal, E22aa = %.4f GPa\n', E22aa);
fprintf('Coeficiente de Poisson, v12aa = %.4f\n', v12aa);
fprintf('Minor Poisson\'s ratio, v21aa = %.4f\n', v21aa);
fprintf('Módulo de corte de la fibra, Gf = %.4f GPa\n', Gf);
fprintf('Módulo de corte de la matriz, Gm = %.4f GPa\n', Gm);
fprintf('Módulo de corte, G12aa = %.4f GPa\n', G12aa);

```

MACROMECHANICA - DE VIGA SIMPLEMENTE APOYADA - PLACA CON CFRP

```

%DEFINICIÓN DE MATERIALES PARA MACROMECHANICO

```

```

%%% CASO 3

```

```

%DATOS ADICIONALES: ENSAYO LABORATORIO PUCP_ LONGITUD DE PLACA 150mm,
%distancia entre apoyos 130mm.

```

```

%PARA ESTE CASO SE EMPLEA TRES MATERIALES (1 LAMINA ACERO A36, ADHESIVO
SIKADUR-30 Y 1 PLACHA DE CFRP)

```

```

%LAMINA3 DE CFRP S512 SUPERIOR (1.2mm)

```

```

%LAMINA 2 CENTRAL SIKADUR-30 (2mm)

```

```

%LAMINA1 DE ACERO INFERIOR A36 (3mm)

```

```

% Prop. Material 1 Lamina CFRP CARBODUR S512

```

```

E11aa = 165.0320 ; % [GPa]

```

```

E22aa = 10.9039 ; % [GPa]

```

```

v12aa = 0.248 ;

```

```

v21aa = 0.0164 ;
G12aa = 4.0523 ; % [GPa]

%Saa: es la matrix compliance
Saa = [ 1/E11aa    -v21aa/E22aa    0    ;...
        -v12aa/E11aa  1/E22aa      0    ;...
        0          0          1/G12aa]; %GPa

%Qaa: es la matriz de rigidez (stiffness)
Qaa = inv(Saa); %GPa

% Mostrar resultados para el material 1 CFRP S512
disp('Matriz de compliance Saa para el material CFRP S512:');
disp(Saa);
disp('Matriz de rigidez Qaa para el material CFRP S512:');
disp(Qaa);

%-----
%-----

% Prop. Material 2 (isotropico)A36
E11bb = 200 ; % [GPa]
E22bb = 200 ; % [GPa]
v12bb = 0.3 ;
G12bb = E11bb / (2*(1+v12bb)); % [GPa]
v21bb = E22bb*v12bb/E11bb;

%Saa: es la matrix compliance

Sbb = [ 1/E11bb    -v21bb/E22bb    0    ;...
        -v12bb/E11bb  1/E22bb      0    ;...
        0          0          1/G12bb]; %GPa

%Qaa: es la matriz de rigidez (stiffness)

```

```

Qbb = inv(Sbb); %GPa

% Mostrar resultados para el material 2 (A36)
disp('Matriz de compliance Sbb para el material A36:');

disp(Sbb);

disp('Matriz de rigidez Qbb para el material A36:');

disp(Qbb);

%-----
%-----

% Prop. Material 3 (isotropico) SIKADUR -30:

E11cc = 11.2 ; % [GPa]
E22cc = 11.2 ; % [GPa]

v12cc = 0.3 ;

G12cc = E11cc / (2*(1+v12cc)); % [GPa]
v21cc = E22cc*v12cc/E11cc;

%Saa: es la matrix compliance

Scc = [ 1/E11cc    -v21cc/E22cc    0    ;...
        -v12cc/E11cc  1/E22cc      0    ;...
        0          0          1/G12cc]; %GPa

%Qaa: es la matriz de rigidez (stiffness)
Qcc = inv(Scc); %GPa

% Mostrar resultados para el material 3 (SIKADUR-30)
disp('Matriz de compliance Sbb para el material SIKADUR-30:');

disp(Scc);

disp('Matriz de rigidez Qbb para el material SIKADUR-30:');

disp(Qcc);

```

DEFINICIÓN DE LAMINADOS PARA MACROMECAÁNICA

```
% Debemos de calcular el tensor "T"  
% Donde m = cos(angle); n = sin(angle)  
  
% Definir los ángulos en grados  
angle_1 = 0 * pi / 180;  
angle_2 = 0 * pi / 180;  
  
% Calcular los tensores para los ángulos especificados  
T1 = Trans(angle_1);  
T2 = Trans(angle_2);  
  
% Mostrar los resultados  
disp('Tensor T para angle_1 = 0° grados:');  
disp(T1);  
  
disp('Tensor T para angle_2 = 0° grados:');  
disp(T2);  
  
% Definir la matriz R - este R es por teoria  
R = [1 0 0; 0 1 0; 0 0 2];  
  
% Calcular las matrices de rigidez transformadas  
  
Q_trans_1 = T1 \ (Qbb * R / T1) / R; % primer laminado a +0° A36 (INFERIOR)  
Q_trans_2 = T2 \ (Qaa* R / T2) / R; % TERCERO laminado a +0° CFRP (SUPERIOR)  
Q_trans_3 = T2 \ (Qcc* R / T2) / R; % SEGUNDO laminado a +0° SIKADUR-30  
(medio)  
  
% Mostrar los resultados de las matrices de rigidez transformadas  
disp('Matriz de rigidez transformada Q_trans_1 para el primer laminado A36  
(0 grados):');  
disp(Q_trans_1);
```

```

disp('Matriz de rigidez transformada Q_trans_2 para el tercer laminado CFRP
(0 grados):');
disp(Q_trans_2);

disp('Matriz de rigidez transformada Q_trans_3 para el segundo laminado
SIKADUR-30 (0 grados):');
disp(Q_trans_3);

% Coordinadas de inicio y fin de cada laminado, el orden del ZP es solo las
% alturas (espesor de laminas)

zp = [+3.5 +0;...
      +0 -2.8;...
      -2.8 -3.5];

% Mostrar la matriz zp
disp('Matriz zp:');
disp(zp);

% Por teoria se consideran solo dos laminas: p=3
num_lam = 3;

A=zeros(3,3);
B=zeros(3,3);
D=zeros(3,3);

for i=1:3
    for j=1:3
        A(i,j) = (zp(1,1) - zp(1,2))*Q_trans_1(i,j) +...
                (zp(2,1) - zp(2,2))*Q_trans_3(i,j) +... % [KN/mm
                (zp(3,1) - zp(3,2))*Q_trans_2(i,j);
        % (zp(4,1) - zp(4,2))*Q_trans_4(i,j); % [KN/mm]

        B(i,j) = 0.5*( (zp(1,1)^2 - zp(1,2)^2)*Q_trans_1(i,j) +...

```

```

        (zp(2,1)^2 - zp(2,2)^2)*Q_trans_3(i,j) +... %[KN]
        (zp(3,1)^2 - zp(3,2)^2)*Q_trans_2(i,j));
    % (zp(4,1)^2 - zp(4,2)^2)*Q_trans_4(i,j)); % [KN]

    D(i,j) = 1/3 * ( (zp(1,1)^3 - (zp(1,2)^3))*Q_trans_1(i,j) +...
        ((zp(2,1)^3 - (zp(2,2)^3))*Q_trans_3(i,j) +... %[KN*mm]
        (zp(3,1)^3 - zp(3,2)^3)*Q_trans_2(i,j));
        % (zp(4,1)^3 - zp(4,2)^3)*Q_trans_4(i,j)); % [KN*mm]

    end
end

% Mostrar las matrices A, B, D
disp('Matriz A: CFRP+A36+ADHESIVO');
disp(A);

disp('Matriz B: CFRP+A36+ADHESIVO');
disp(B);

disp('Matriz D: CFRP+A36+ADHESIVO');
disp(D);

```

Cálculo de matriz constitutiva

%ESTA MATRIZ CONSTITUTIVA ES LA GENERAL COMPLETA DE MATERIALES COMPUESTOS

%La matriz constitutiva es tambien llamada [E] ;

Constitutiva_Matrix = [A B; B D];

% Mostrar la matriz constitutiva

disp('Matriz constitutiva Const_Matrix:');

disp(Constitutiva_Matrix);

Lv=130 %mm longitud de la viga entre apoyos

```
F0=1000; % Empieza en 10N, paso de 10N, hasta 1500mm.
```

```
%F0=1000
```

```
M=(F0*Lv)/4
```

```
LX=50 %ancho de la viga
```

```
Mxx=M/LX
```

```
fprintf('Mx = %.4f N*mm/mm \n', Mxx)
```

```
NM_vector = [0 0 0 Mxx 0 0]'; % Nx Ny Nxy Mx My Mxy
```

```
disp('Vector de fuerzas y momentos NM_vector:');
```

```
fprintf('Nx = %.4f MPa*mm o ((N/mm^2)*mm\n', NM_vector(1));
```

```
fprintf('Ny = %.4f MPa*mm o ((N/mm^2)*mm\n', NM_vector(2));
```

```
fprintf('Nxy = %.4f MPa*mm o ((N/mm^2)*mm\n', NM_vector(3));
```

```
fprintf('Mx = %.4f N*mm*mm\n', NM_vector(4));
```

```
fprintf('My = %.4f N*mm*mm\n', NM_vector(5));
```

```
fprintf('Mxy = %.4f N*mm*mm\n', NM_vector(6));
```

CALCULO DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES

%EPSILON ES LA DEFORMACIÓN EN LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA VIGA (mm/mm)

%Tambien considera la curvatura (1/mm)

```
epsilon_kappa = Constitutiva_Matrix \ NM_vector; % e_x_0 e_y_0 e_xy_0 kx  
ky kxy
```

```
% Mostrar el vector de deformaciones y curvaturas con unidades  
disp('Vector de deformaciones en el plano medio y curvaturas:');
```

```
fprintf('e_x_0 = %.6f mm/mm\n', epsilon_kappa(1));
```

```
fprintf('e_y_0 = %.6f mm/mm\n', epsilon_kappa(2));
```

```
fprintf('e_xy_0 = %.6f mm/mm\n', epsilon_kappa(3));
```

```
fprintf('k_x = %.6f 1/mm\n', epsilon_kappa(4));
fprintf('k_y = %.6f 1/mm\n', epsilon_kappa(5));
fprintf('k_xy = %.6f 1/mm\n', epsilon_kappa(6));
```

```
%ESTO DE ABAJO ES LO MISMO QUE LO DE ARRIBA.
```

```
% Mostrar el vector de deformaciones
```

```
% Mostrar el vector epsilon_kappa con más decimales
```

```
disp('Vector de deformaciones epsilon_kappa:');
```

```
%%%
```

```
for i = 1:length(epsilon_kappa)
```

```
    fprintf('%.6f\n', epsilon_kappa(i));
```

```
end
```

CALCULO DE DEFORMACIONES Y ESFUERZOS

```
% Definición de las posiciones z de cada lámina
```

```
%AQUI SE COLOCAR LA POSICIÓN DE LAS LAMINAS EN DIRECCIÓN Z, ARRIBA ES -Z,
```

```
%ABAJO +Z (POSITIVO)
```

```
% Definir las posiciones z de las láminas en dirección Z
```

```
z_top1 = 0; % mm, A36 superficie SUPERIOR de la lámina #1 (0°)
```

```
z_bottom1 = 3.5; % mm, A36 superficie INFERIOR de la lámina #1 (0°)
```

```
z_top2 = -2.8; % mm, SIKADUR-30 ADHESIVO superficie SUPERIOR de la lámina #2 (0°)
```

```
z_bottom2 = 0; % mm, SIKADUR-30 ADHESIVO superficie INFERIOR de la lámina #2 (0°)
```

```
z_top3 = -3.5; % mm, CFRP superficie SUPERIOR de la lámina #3 (0°)
```

```
z_bottom3 = -2.8; % mm, CFRP superficie INFERIOR de la lámina #3 (0°)
```

```
% Calcular deformaciones totales en la superficie superior e inferior de cada lámina
```

```
%% Cálculo de deformaciones para la capa #1 (A36)
```

```

% Deformaciones en la superficie superior de la capa #1 (A36)
epsilon_x_A36_top = epsilon_kappa(1) + z_top1 * epsilon_kappa(4);
epsilon_y_A36_top = epsilon_kappa(2) + z_top1 * epsilon_kappa(5);
gamma_xy_A36_top = epsilon_kappa(3) + z_top1 * epsilon_kappa(6);

% Deformaciones en la superficie inferior de la capa #1 (A36)
epsilon_x_A36_bottom = epsilon_kappa(1) + z_bottom1 * epsilon_kappa(4);
epsilon_y_A36_bottom = epsilon_kappa(2) + z_bottom1 * epsilon_kappa(5);
gamma_xy_A36_bottom = epsilon_kappa(3) + z_bottom1 * epsilon_kappa(6);

%% Cálculo de deformaciones para la capa #2 (Sikadur-30)

% Deformaciones en la superficie superior de la capa #2 (Sikadur-30)
epsilon_x_Sikadur_top = epsilon_kappa(1) + z_top2 * epsilon_kappa(4);
epsilon_y_Sikadur_top = epsilon_kappa(2) + z_top2 * epsilon_kappa(5);
gamma_xy_Sikadur_top = epsilon_kappa(3) + z_top2 * epsilon_kappa(6);

% Deformaciones en la superficie inferior de la capa #2 (Sikadur-30)
epsilon_x_Sikadur_bottom = epsilon_kappa(1) + z_bottom2 * epsilon_kappa(4);
epsilon_y_Sikadur_bottom = epsilon_kappa(2) + z_bottom2 * epsilon_kappa(5);
gamma_xy_Sikadur_bottom = epsilon_kappa(3) + z_bottom2 * epsilon_kappa(6);

%% Cálculo de deformaciones para la capa #3 (CFRP)

% Deformaciones en la superficie superior de la capa #3 (CFRP)
epsilon_x_CFRP_top = epsilon_kappa(1) + z_top3 * epsilon_kappa(4);
epsilon_y_CFRP_top = epsilon_kappa(2) + z_top3 * epsilon_kappa(5);
gamma_xy_CFRP_top = epsilon_kappa(3) + z_top3 * epsilon_kappa(6);

% Deformaciones en la superficie inferior de la capa #3 (CFRP)
epsilon_x_CFRP_bottom = epsilon_kappa(1) + z_bottom3 * epsilon_kappa(4);
epsilon_y_CFRP_bottom = epsilon_kappa(2) + z_bottom3 * epsilon_kappa(5);
gamma_xy_CFRP_bottom = epsilon_kappa(3) + z_bottom3 * epsilon_kappa(6);

```

```

%% Mostrar resultados de las deformaciones por capa y superficie

% Capa #1 (A36)
disp('Deformaciones en la capa #1 (A36):');
fprintf('Superficie superior:\n');
fprintf('epsilon_x = %.6f mm/mm, epsilon_y = %.6f mm/mm, gamma_xy = %.6f
mm/mm\n', ...
    epsilon_x_A36_top, epsilon_y_A36_top, gamma_xy_A36_top);
fprintf('Superficie inferior:\n');
fprintf('epsilon_x = %.6f mm/mm, epsilon_y = %.6f mm/mm, gamma_xy = %.6f
mm/mm\n', ...
    epsilon_x_A36_bottom, epsilon_y_A36_bottom, gamma_xy_A36_bottom);

% Capa #2 (Sikadur-30)
disp('Deformaciones en la capa #2 (Sikadur-30):');
fprintf('Superficie superior:\n');
fprintf('epsilon_x = %.6f mm/mm, epsilon_y = %.6f mm/mm, gamma_xy = %.6f
mm/mm\n', ...
    epsilon_x_Sikadur_top, epsilon_y_Sikadur_top, gamma_xy_Sikadur_top);
fprintf('Superficie inferior:\n');
fprintf('epsilon_x = %.6f mm/mm, epsilon_y = %.6f mm/mm, gamma_xy = %.6f
mm/mm\n', ...
    epsilon_x_Sikadur_bottom,                epsilon_y_Sikadur_bottom,
    gamma_xy_Sikadur_bottom);

% Capa #3 (CFRP)
disp('Deformaciones en la capa #3 (CFRP):');
fprintf('Superficie superior:\n');
fprintf('epsilon_x = %.6f mm/mm, epsilon_y = %.6f mm/mm, gamma_xy = %.6f
mm/mm\n', ...
    epsilon_x_CFRP_top, epsilon_y_CFRP_top, gamma_xy_CFRP_top);
fprintf('Superficie inferior:\n');
fprintf('epsilon_x = %.6f mm/mm, epsilon_y = %.6f mm/mm, gamma_xy = %.6f
mm/mm\n', ...
    epsilon_x_CFRP_bottom, epsilon_y_CFRP_bottom, gamma_xy_CFRP_bottom);

```

```

%% Cálculo de los esfuerzos en cada lámina

% Definir las deformaciones en las posiciones z (en formato vector)
% Capa #1 (A36)

epsilon_z_top1_A36      =      [epsilon_x_A36_top;      epsilon_y_A36_top;
gamma_xy_A36_top];
epsilon_z_bottom1_A36  =  [epsilon_x_A36_bottom;  epsilon_y_A36_bottom;
gamma_xy_A36_bottom];

%%Capa #2 (Sikadur-30)

epsilon_z_top2_sikadur = [epsilon_x_Sikadur_top;  epsilon_y_Sikadur_top;
gamma_xy_Sikadur_top];
epsilon_z_bottom2_sikadur      =      [epsilon_x_Sikadur_bottom;
epsilon_y_Sikadur_bottom; gamma_xy_Sikadur_bottom];

%%%% Capa #3 (CFRP)
% Deformaciones en la superficie superior de la capa #3 (CFRP)

epsilon_z_top3_CFRP      =      [epsilon_x_CFRP_top;      epsilon_y_CFRP_top;
gamma_xy_CFRP_top];

epsilon_z_bottom3_CFRP  =  [epsilon_x_CFRP_bottom;  epsilon_y_CFRP_bottom;
gamma_xy_CFRP_bottom];

% Cálculo de los esfuerzos en cada lámina
sigma_top1 = Q_trans_1 * epsilon_z_top1_A36;  % MPa para A36 (superior)
sigma_bottom1 = Q_trans_1 * epsilon_z_bottom1_A36;  % MPa para A36
(inferior)

sigma_top2 = Q_trans_3 * epsilon_z_top2_sikadur;  % MPa para Sikadur-30
(superior)

sigma_bottom2 = Q_trans_3 * epsilon_z_bottom2_sikadur;  % MPa para Sikadur-
30 (inferior)

sigma_top3 = Q_trans_2 * epsilon_z_top3_CFRP;  % MPa para CFRP (superior)

```


METODO 2: METODO DE VIGAS- LIBRO GERE

```
%% -----  
% CÁLCULO DE ESFUERZOS Y DEFLECCIÓN DE VIGA SIMPLEMENTE APOYADA  
% -----  
  
% Limpieza de pantalla y variables  
clear; clc;  
  
%% 1) DATOS INICIALES: FUERZA, LONGITUD Y MOMENTO FLECTOR  
% -----  
% Para una viga simplemente apoyada con una carga concentrada F  
% en el centro, el momento flector máximo en el centro es:  
%  $M = F * (L/4)$   
  
F = 1000; % Fuerza aplicada en el centro (en N)  
L = 130; % Longitud de la viga (en mm)  
  
% Cálculo del momento flector máximo (en N·mm)  
M = F * (L / 4); % M = 1000 * (130/4) = 32500 N·mm  
  
fprintf('--- DATOS INICIALES ---\n');  
fprintf('Fuerza (F): %.2f N\n', F);  
fprintf('Longitud de la viga (L): %.2f mm\n', L);  
fprintf('Momento flector máximo (M): %.2f N·mm\n\n', M);  
  
%% 2) PROPIEDADES DE LOS MATERIALES Y GEOMETRÍA  
% -----  
% Módulos de elasticidad (en MPa)  
E_CFRP = 165e3; % CFRP  
E_adhesivo = 11.2e3; % Adhesivo Sikadur  
E_acero = 200e3; % Acero A36  
  
% Dimensiones de las capas (en mm)  
b = 50; % Ancho de la viga  
h1 = 1.2; % Espesor de la capa de CFRP (parte superior)  
h2 = 2; % Espesor de la capa de adhesivo  
h3 = 3; % Espesor de la capa de acero (parte inferior)  
  
% Áreas de cada sección transversal (en mm2)  
A1 = b * h1; % Área CFRP  
A2 = b * h2; % Área adhesivo  
A3 = b * h3; % Área acero  
  
% Altura total de la viga (en mm)  
H = h1 + h2 + h3;  
  
fprintf('--- PROPIEDADES Y GEOMETRÍA ---\n');  
fprintf('Módulo Young CFRP: %.2f MPa\n', E_CFRP);  
fprintf('Módulo Young Adhesivo: %.2f MPa\n', E_adhesivo);
```

```

fprintf('Módulo Young Acero: %.2f MPa\n', E_acero);
fprintf('Ancho (b): %.2f mm\n', b);
fprintf('Espesor CFRP (h1): %.2f mm\n', h1);
fprintf('Espesor Adhesivo (h2): %.2f mm\n', h2);
fprintf('Espesor Acero (h3): %.2f mm\n', h3);
fprintf('Área CFRP (A1): %.2f mm^2\n', A1);
fprintf('Área Adhesivo (A2): %.2f mm^2\n', A2);
fprintf('Área Acero (A3): %.2f mm^2\n', A3);
fprintf('Altura total de la viga (H): %.2f mm\n\n', H);

%% 3) POSICIÓN DEL EJE NEUTRO
% -----
% Centroides (desde la parte inferior)
y3 = h3/2;           % Centroide del acero
y2 = h3 + h2/2;     % Centroide del adhesivo
y1 = h3 + h2 + h1/2; % Centroide del CFRP

% Declaramos variable simbólica para la ecuación del eje neutro
syms y
hn_eq = E_acero*A3*(y3 - y) + E_adhesivo*A2*(y2 - y) + E_CFRP*A1*(y1 - y)
== 0;

% Resolución de la ecuación para y (posición del eje neutro)
hn = double(solve(hn_eq, y));

% Distancia del eje neutro a la parte superior
hn_top = H - hn;

fprintf('--- POSICIÓN DEL EJE NEUTRO ---\n');
fprintf('Eje neutro (hn) medido desde la base: %.6f mm\n', hn);
fprintf('Distancia hn a la parte superior de la viga: %.6f mm\n\n', hn_top);

%% 4) CÁLCULO DEL MOMENTO DE INERCIA COMPUESTO (I_total)
% -----
% Momento de inercia de cada capa respecto al eje neutro

% ACERO (sección 3)
I3_seccion = (1/12)*b*(h3^3); % I base
d3 = (y3 - hn); % Distancia centroide - eje neutro
I3 = I3_seccion + A3*(d3^2); % I total para acero

% ADHESIVO (sección 2)
I2_seccion = (1/12)*b*(h2^3);
d2 = (y2 - hn);
I2 = I2_seccion + A2*(d2^2);

% CFRP (sección 1)
I1_seccion = (1/12)*b*(h1^3);
d1 = (y1 - hn);

```

```

I1 = I1_seccion + A1*(d1^2);

% Momento de inercia total
I_total = I1 + I2 + I3;

fprintf('--- MOMENTOS DE INERCIA ---\n');
fprintf('I3 (Acero): %.6f mm^4\n', I3);
fprintf('I2 (Adhesivo): %.6f mm^4\n', I2);
fprintf('I1 (CFRP): %.6f mm^4\n', I1);
fprintf('I_total: %.6f mm^4\n\n', I_total);

%% 5) CÁLCULO DE ESFUERZOS EN CADA CAPA
% -----
% Denominador común para esfuerzos: D = E_acero*I3 + E_adhesivo*I2 +
E_CFRP*I1
D = (E_acero*I3 + E_adhesivo*I2 + E_CFRP*I1);

% --- Esfuerzos en el acero ---
% Distancia desde el eje neutro a las fibras más extrema (inferior y
superior)
c_acero_inferior = (y3 - h3/2) - hn;
c_acero_superior = (y3 + h3/2) - hn;

% Esfuerzos (convención: signo negativo -> tracción en fibra inferior,
etc.)
sigma_acero_inferior = - (M * c_acero_inferior * E_acero) / D;
sigma_acero_superior = - (M * c_acero_superior * E_acero) / D;

fprintf('--- ESFUERZOS EN EL ACERO (A36) ---\n');
fprintf('Esfuerzo en fibra inferior: %.6f MPa\n', sigma_acero_inferior);
fprintf('Esfuerzo en fibra superior: %.6f MPa\n\n', sigma_acero_superior);

% --- Esfuerzos en el adhesivo ---
c_adhesivo_inferior = (y2 - h2/2) - hn;
c_adhesivo_superior = (y2 + h2/2) - hn;

sigma_adhesivo_inferior = - (M * c_adhesivo_inferior * E_adhesivo) / D;
sigma_adhesivo_superior = - (M * c_adhesivo_superior * E_adhesivo) / D;

fprintf('--- ESFUERZOS EN EL ADHESIVO (Sikadur) ---\n');
fprintf('Esfuerzo en fibra inferior: %.6f MPa\n', sigma_adhesivo_inferior);
fprintf('Esfuerzo en fibra superior: %.6f MPa\n\n',
sigma_adhesivo_superior);

% --- Esfuerzos en el CFRP ---
c_CFRP_inferior = (y1 - h1/2) - hn;
c_CFRP_superior = (y1 + h1/2) - hn;

sigma_CFRP_inferior = - (M * c_CFRP_inferior * E_CFRP) / D;
sigma_CFRP_superior = - (M * c_CFRP_superior * E_CFRP) / D;

```

```

fprintf('--- ESFUERZOS EN EL CFRP ---\n');
fprintf('Esfuerzo en fibra inferior: %.6f MPa\n', sigma_CFRP_inferior);
fprintf('Esfuerzo en fibra superior: %.6f MPa\n\n', sigma_CFRP_superior);

%% 6) MÓDULO DE ELASTICIDAD EQUIVALENTE (REGLA DE MEZCLAS)
% -----
%  $E_{eq\_mix} = (E_{acero} \cdot A_3 + E_{adhesivo} \cdot A_2 + E_{CFRP} \cdot A_1) / (A_1 + A_2 + A_3)$ 
E_eq_mix = (E_acero*A3 + E_adhesivo*A2 + E_CFRP*A1) / (A1 + A2 + A3);

fprintf('--- MÓDULO DE ELASTICIDAD EQUIVALENTE (REGLA DE MEZCLAS) ---\n');
fprintf('E_eq_mix = %.2f MPa (%.2f GPa)\n\n', E_eq_mix, E_eq_mix/1000);

%% 7) CÁLCULO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA EN EL CENTRO
% -----
% Fórmula de la deflexión máxima de una viga simplemente apoyada
% con carga F en el centro:
%  $\Delta_{max} = (F \cdot L^3) / (48 \cdot E \cdot I)$ 
%
% Usaremos el E equivalente y el I_total calculado.

delta_max = (F * (L^3)) / (48 * E_eq_mix * I_total);

fprintf('--- DEFLEXIÓN MÁXIMA ---\n');
fprintf('Deflexión máxima en el centro = %.6f mm\n', delta_max);

```

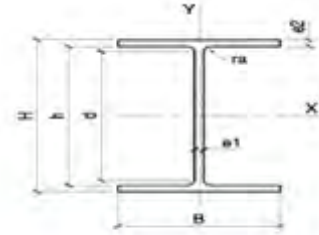


7.2 Anexo B: Perfiles



DOMICILIO COMERCIAL

Límite del Municipio 4515 A - Rosario
 Tel.: (+54 341) 458 1045 - 0800 888 1045
 Fax: (+54 341) 458 1212 - 0800 555 8121
 E-Mail: galea@galea.com.ar
 www.galea.com.ar



PERFIL W																									
Designación del Perfil mm x g/g	Mass Nominal kg/m	Alura h mm	Ancho de ala b mm	ESPESES				k	d	Sección Nominal cm ²	I _x cm ⁴	I _y cm ⁴	I _{xy} cm ⁴	Z _x cm	Z _y cm	r _x cm	r _y cm	r _{xy} cm	f ₁ mm	f ₂ mm	ADM - I _x kg/m ²	ADM - I _y kg/m ²	C _g cm ²	a mm	Espesor del Perfil mm x g/g
				t	t ₁	t ₂	t ₃																		
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,5	138	118	16,6	835	85,8	6,16	98,4	82	16,4	2,22	25,5	2,60	1,72	10,25	27,49	4,181	0,67			W 150 x 13,0
W 150 x 16,0	16,0	153	102	5,8	7,1	136	116	25,4	938	122,9	6,34	136,4	126	24,7	2,32	28,6	2,69	4,34	7,16	20,48	6,883	0,69			W 150 x 16,0
W 150 x 24,0	24,0	166	102	6,6	10,3	136	116	31,5	1.384	173,0	6,63	187,6	183	26,8	2,41	35,6	2,73	11,08	4,95	17,48	10,208	0,69			W 150 x 24,0
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	1.305	130,5	8,20	147,8	87	17,4	2,12	27,3	2,55	2,05	8,62	39,44	6,232	0,77			W 200 x 15,0
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	26,1	1.686	168,1	8,19	180,6	116	22,7	2,14	35,9	2,39	4,62	7,85	29,31	11,288	0,76			W 200 x 19,3
W 200 x 22,5	22,5	208	102	6,3	8,0	190	170	29,0	2.029	197,0	8,37	225,5	142	27,0	2,22	43,9	2,43	8,18	5,38	27,42	13,668	0,79			W 200 x 22,5
W 200 x 26,6	26,6	207	102	5,8	8,4	190	170	34,3	2.811	262,3	8,73	262,3	136	49,9	3,16	76,3	2,54	7,92	29,34	32,477	0,82				W 200 x 26,6
W 200 x 31,3	31,3	210	104	6,4	10,2	190	170	40,3	3.168	301,7	8,86	336,6	410	61,2	3,16	94,0	3,00	12,59	5,57	28,93	40,822	0,83			W 200 x 31,3
W 250 x 17,9	17,9	251	101	4,8	5,3	240	220	23,1	2.291	182,6	9,96	211,0	81	18,1	1,99	38,8	2,48	2,54	9,53	45,92	13,735	0,88			W 250 x 17,9
W 250 x 22,3	22,3	254	102	5,8	6,9	240	220	28,9	2.939	231,4	10,08	267,7	123	24,1	2,06	38,4	2,54	4,77	7,36	37,97	18,623	0,89			W 250 x 22,3
W 250 x 25,3	25,3	257	102	6,1	8,4	240	220	32,8	3.473	270,2	10,31	311,1	148	29,3	2,14	48,4	2,54	7,68	8,07	36,10	22,855	0,89			W 250 x 25,3
W 250 x 28,4	28,4	260	102	6,4	10,0	240	220	36,6	4.046	311,2	10,51	357,3	178	34,8	2,20	54,9	2,62	10,34	5,10	34,38	27,838	0,90			W 250 x 28,4
W 250 x 32,7	32,7	268	106	6,1	9,1	240	220	42,1	4.937	362,7	10,83	428,5	473	69,8	3,35	99,7	3,86	10,44	8,02	36,03	73,124	1,07			W 250 x 32,7
W 250 x 36,5	36,5	262	147	6,8	11,2	240	220	48,6	6.057	462,4	11,03	517,1	584	80,8	3,46	124,1	3,93	17,63	8,56	33,27	93,242	1,08			W 250 x 36,5
W 250 x 44,8	44,8	266	148	7,8	13,0	240	220	57,6	7.158	538,2	11,35	606,3	704	95,1	3,50	146,4	4,39	27,14	5,69	29,85	112,396	1,09			W 250 x 44,8
W 310 x 21,0	21,0	303	101	5,1	5,7	282	272	27,5	3.776	249,3	11,77	291,9	84	19,9	1,90	31,4	2,42	3,27	8,86	53,25	21,628	0,96			W 310 x 21,0
W 310 x 23,8	23,8	305	101	5,8	6,7	282	272	30,7	4.246	285,0	11,89	333,2	118	22,9	1,94	38,0	2,45	4,85	7,54	48,50	25,594	0,99			W 310 x 23,8
W 310 x 28,5	28,5	309	102	6,0	8,6	291	271	36,5	5.050	358,5	12,28	412,0	188	31,0	2,08	46,4	2,55	8,14	5,79	45,30	35,441	1,00			W 310 x 28,5
W 310 x 32,7	32,7	313	102	6,0	10,8	291	271	42,1	6.570	419,8	12,48	485,3	192	37,0	2,15	58,8	2,58	12,91	4,72	41,12	43,612	1,00			W 310 x 32,7
W 310 x 38,7	38,7	310	105	6,8	9,7	291	271	49,7	8.581	523,6	13,14	616,4	327	88,1	3,82	134,9	4,38	13,20	6,31	46,66	163,728	1,25			W 310 x 38,7
W 310 x 44,5	44,5	313	108	6,0	11,2	291	271	57,2	9.997	636,8	13,22	712,8	655	103,0	3,87	158,0	4,41	18,90	7,41	41,00	184,433	1,26			W 310 x 44,5
W 310 x 52,0	52,0	317	107	7,6	13,2	291	271	67,0	11.899	791,4	13,33	842,5	1.020	132,8	3,91	188,8	4,45	31,81	8,33	35,61	236,432	1,27			W 310 x 52,0
W 360 x 32,9	32,9	340	127	6,8	8,5	332	308	42,1	8.256	479,5	14,02	547,6	391	45,9	2,63	72,0	3,30	9,15	7,47	53,10	94,111	1,17			W 360 x 32,9
W 360 x 39,0	39,0	363	128	6,5	10,7	332	308	50,2	10.331	666,3	14,35	667,7	375	56,6	2,73	91,9	3,27	15,83	5,98	47,32	102,851	1,18			W 360 x 39,0
W 360 x 44,0	44,0	362	127	6,9	9,8	332	308	57,7	12.255	886,5	14,68	794,3	616	56,7	2,77	148,0	4,40	18,70	8,72	44,70	239,891	1,20			W 360 x 44,0
W 360 x 51,0	51,0	355	171	7,2	11,0	332	308	64,8	14.222	801,2	14,81	889,5	688	113,3	3,87	174,7	4,49	24,05	7,37	42,75	284,964	1,35			W 360 x 51,0
W 360 x 57,6	57,6	358	172	7,8	15,1	332	306	72,5	16.543	901,9	14,92	1.014,8	1.113	123,4	3,82	198,8	4,53	34,85	9,06	38,96	330,384	1,37			W 360 x 57,6
W 360 x 64,4	64,4	347	203	7,7	13,5	320	288	81,7	17.890	1.031,1	14,85	1.145,5	1.065	185,7	4,80	204,5	5,44	44,57	7,52	37,40	523,362	1,46			W 360 x 64,4
W 360 x 72,0	72,0	350	204	8,8	15,1	320	288	91,3	20.199	1.152,5	14,88	1.285,3	1.140	239,6	4,84	321,8	5,47	61,16	8,75	53,87	589,682	1,47			W 360 x 72,0
W 360 x 79,0	79,0	354	205	9,4	16,8	320	288	101,2	22.713	1.283,2	14,98	1.427,0	2.416	233,7	4,89	361,9	5,51	82,41	5,10	60,08	685,751	1,48			W 360 x 79,0
W 410 x 38,8	38,8	399	140	6,4	8,8	381	357	50,3	12.777	840,5	15,84	738,8	404	57,7	2,83	93,6	3,49	11,69	7,26	55,94	153,190	1,32			W 410 x 38,8
W 410 x 46,1	46,1	403	140	7,0	14,3	381	357	59,2	15.890	1.178,7	16,27	891,1	514	73,4	3,05	115,3	3,55	20,06	8,25	59,94	195,571	1,33			W 410 x 46,1
W 410 x 53,0	53,0	402	177	7,5	10,9	381	357	68,4	18.734	939,7	16,55	1.052,2	1.029	114,0	3,84	170,9	4,59	23,38	8,12	47,93	287,944	1,40			W 410 x 53,0
W 410 x 65,0	65,0	407	176	7,7	12,8	381	357	79,2	21.707	1.099,7	16,88	1.201,5	1.205	135,4	3,98	209,2	4,85	33,76	8,95	46,42	407,404	1,49			W 410 x 65,0
W 410 x 87,0	87,0	410	179	8,8	14,4	381	357	86,3	24.678	1.203,8	16,81	1.362,7	1.379	154,7	4,00	239,0	4,87	48,11	8,22	49,59	536,546	1,50			W 410 x 87,0
W 410 x 95,0	95,0	413	186	9,7	16,0	381	357	95,8	27.618	1.337,3	16,98	1.516,8	1.559	173,2	4,03	269,1	4,70	65,21	5,63	38,80	612,784	1,51			W 410 x 95,0
W 410 x 85,0	85,0	417	181	10,9	18,2	381	357	108,0	31.058	1.516,4	17,07	1.751,7	1.804	199,3	4,08	310,4	4,74	24,48	4,07	32,72	715,165	1,52			W 410 x 85,0
W 460 x 52,0	52,0	450	192	7,8	10,8	426	404	69,6	21.370	949,8	17,91	1.005,9	534	83,5	3,09	131,7	3,79	21,79	7,04	53,21	304,837	1,47			W 460 x 52,0
W 460 x 60,0	60,0	465	193	8,6	13,3	426	404	79,2	25.052	1.127,6	18,35	1.232,1	796	104,1	3,23	183,4	3,89	34,60	5,79	59,99	387,330	1,49			W 460 x 60,0
W 460 x 68,0	68,0	459	194	8,1	15,8	426	404	87,6	29.851	1.303,7	18,48	1.465,4	941	122,2	3,28	192,4	3,93	52,29	5,00	44,42	461,103	1,50			W 460 x 68,0
W 460 x 74,0	74,0	457	190	9,0	14,8	426	404	94,9	33.410	1.462,4	18,77	1.687,4	1.181	174,0	4,16	271,3	4,93	52,97	6,58	44,89	611,417	1,64			W 460 x 74,0
W 460 x 82,0	82,0	460	191	9,9	16,0	426	404	104,																	

7.3 Anexo C: Data sheet del adhesive Sikadur 30



PRODUCT DATA SHEET

Sikadur®-30

High-modulus, high-strength, structural epoxy paste adhesive for use with Sika® CarboDur® reinforcement.

PRODUCT DESCRIPTION

Sikadur®-30 is a 2-component, 100% solids, moisture-tolerant, high-modulus, high-strength, structural epoxy paste adhesive. It conforms to the current ASTM C-881 Type I, IV Grade 3, Class C and AASHTO M-235 specifications.

USES

Sikadur®-30 may only be used by experienced professionals.

- Adhesive for bonding external reinforcement to concrete, masonry, steel, wood, stone, etc.
- Structural bonding of composite laminates (Sika® CarboDur® CFRP) to concrete.
- Structural bonding of steel plates to concrete.
- Suitable for use in vertical and overhead configurations.
- As a binder for epoxy mortar repairs.

CHARACTERISTICS / ADVANTAGES

- Long pot life.
- Long open time.
- Tolerant of moisture before, during and after cure.
- High strength, high modulus, structural paste adhesive.
- Excellent adhesion to concrete, masonry, metals, wood and most structural materials.
- Fully compatible and excellent adhesion to Sika® CarboDur® CFRP composite laminate.
- Paste consistency ideal for vertical and overhead applications of Sika® CarboDur®.
- High abrasion and shock resistance.
- Convenient easy mix ratio A:B=3:1 by volume.
- Solvent-free.
- Color-coded components to ensure proper mixing control.

PRODUCT INFORMATION

Chemical Base	Epoxy resin
Packaging	1 gal. units.
Color	Light gray
Shelf Life	2 years in original, unopened containers.
Storage Conditions	Store dry at 40°-95°F (4°-35°C). Condition material to 65°-85°F (18°- 29°C) before using.
Consistency	Non-sag paste.

Product Data Sheet
Sikadur®-30
March 2020, Version 03.02
020206040010000001

TECHNICAL INFORMATION

Compressive Strength	Bond Strength: Hardened Concrete to Hardened Concrete			
	2 day (moist cure)	2,700 psi (18.6 MPa)		(ASTM C-882)
	2 day (dry cure)	3,200 psi (22.0 MPa)		
	14 day (moist cure)	3,100 psi (21.3 MPa)		
	Bond Strength: Hardened Concrete to Steel			
	2 day (moist cure)	2,600 psi (17.9 MPa)		(ASTM C-882)
	2 day (dry cure)	3,000 psi (20.6 MPa)		
	14 day (moist cure)	2,600 psi (17.9 MPa)		
Compressive Properties (ASTM D-695) - Compressive Strength, psi (MPa)				
		40°F* (4°C)	73°F* (23°C)	90°F* (32°C)
4 hour	-	-	-	5,500 (37.9)
8 hour	-	-	3,500 (24.1)	6,700 (46.2)
16 hour	-	-	6,700 (46.2)	7,400 (51.0)
1 day	750 (5.1)	-	7,800 (53.7)	7,800 (53.7)
3 day	6,800 (46.8)	-	8,300 (57.2)	8,300 (57.2)
7 day	8,000 (55.1)	-	8,600 (59.3)	8,600 (59.3)
14 day	8,500 (58.6)	-	8,600 (59.3)	8,900 (61.3)
28 day	8,500 (58.6)	-	8,600 (59.3)	9,000 (62.0)
Modulus of Elasticity in Compression	7 day			3.9 x 10 ⁵ psi (2,689 MPa)
Flexural Strength	14 day		6,800 psi (46.8 MPa)	(ASTM D-790)
Modulus of Elasticity in Flexure	14 day		1.7 X 10 ⁶ psi (11,721 MPa)	(ASTM D-790)
Tensile Strength	7 day		3,600 psi (24.8 MPa)	(ASTM D-638)
Tensile Modulus of Elasticity	7 day		6.5 X 10 ⁵ psi (4,482 MPa)	(ASTM D-638)
Elongation at Break	7 day	1%		(ASTM D-638)
Shear Strength	14 day		3,600 psi (24.8 MPa)	(ASTM D-732)
Heat Deflection Temperature	7 day		[fiber stress loading=264 psi (1.8 MPa)] 118°F (47°C)	(ASTM D-648)

APPLICATION INFORMATION

Mixing Ratio	Component 'A': Component 'B' = 3:1 by volume.		
Coverage	Type S 512 CarboDur®: approx. 50 LF/gal.; Type S 812 CarboDur: approx. 32 LF/gal.; Type S 1012 CarboDur®: approx. 22 LF/gal.		
Substrate Moisture Content	7 day (24 hour immersion)	0.03%	(ASTM D-570)
Pot Life	Approximately 70 minutes @ 73°F (23°C) (1 qt.)		

Product Data Sheet
Sikadur®-30
March 2020, Version 03.02
02020604001.0000001

BUILDING TRUST



APPLICATION INSTRUCTIONS

SUBSTRATE PREPARATION

The concrete surface should be prepared to a minimum concrete surface profile (CSP) 3 defined by the ICRI surface-profile chips. Localized out-of-plane variations, including form lines, should not exceed 1/32 in. (1 mm). Surface must be clean and sound. It may be dry or damp, but free of standing water and frost. Remove dust, laitance, grease, curing compounds, impregnations, waxes, foreign particles, disintegrated materials, and other bond inhibiting materials from the surface. Existing uneven surfaces must be filled with an appropriate repair mortar (e.g., Sikadur® 30 with the addition of 1 part oven-dried sand). The adhesive strength of the concrete must be verified after surface preparation by random pull-off testing (as defined by ACI 503R, ASTM C1583) at the discretion of the engineer. Minimum tensile strength, 200 psi (1.4 MPa) with concrete substrate failure.

Concrete - Blast clean, shot blast or use other approved mechanical means to provide an open roughened texture.

Steel - Should be cleaned and prepared thoroughly by blast cleaning to a white metal finish.

CarboDur® - Wipe clean with appropriate cleaner (e.g. MEK)

MIXING

Pre-mix each component. Proportion 1 part Component 'B' to 3 parts Component 'A' by volume into a clean pail or appropriately sized mixing container. Mix thoroughly for 3 minutes with Sika paddle on low speed (400-600 rpm) drill until uniform in color. Mix only that quantity which can be used within its pot life.

To prepare an epoxy mortar: slowly add up to 1 part by loose volume of an oven-dried aggregate to 1 part of the mixed Sikadur® 30 and mix until uniform in consistency.

APPLICATION METHOD / TOOLS

For bonded, external reinforcement: Apply the neat mixed Sikadur® 30 onto the concrete with a trowel or spatula to a nominal thickness of 1/16" (1.5 mm). Apply the mixed Sikadur® 30 onto the CarboDur® laminate with a "roof-shaped" spatula to a nominal thickness of 1/16" (1.5 mm). Within the open time of the epoxy, depending on the temperature, place the CarboDur® laminate onto the concrete surface. Using a hard rubber roller, press the laminate into the epoxy resin until the adhesive is forced out on both sides. Remove excess adhesive. Glue line should not exceed 1/8 inch (3 mm). The external reinforcement must not be disturbed for a minimum of 24 hours. The epoxy will reach its design strength after 7 days.

For interior vertical and overhead patching: Work the material into the prepared substrate, filling the cavity. Strike off level. Lifts should not exceed 1 inch (25 mm).

Product Data Sheet
Sikadur®-30
March 2020, Version 03.02
02020604001.0000001

3 / 4

LIMITATIONS

- Minimum substrate and ambient temperature is 40°F (4°C).
- Do not thin. Addition of solvents will prevent proper cure.
- Use oven-dried aggregate only.
- Maximum glue line of neat epoxy is 1/8 inch (3 mm).
- Maximum epoxy mortar thickness is 1 inch (25 mm) per lift.
- Minimum age of concrete must be 21-28 days, depending upon curing and drying conditions.
- Porous substrates must be tested for moisture vapor transmission prior to mortar applications.
- Not an aesthetic product. Color may alter due to variations in lighting and/or UV exposure.

BASIS OF PRODUCT DATA

Results may differ based upon statistical variations depending upon mixing methods and equipment, temperature, application methods, test methods, actual site conditions and curing conditions.

OTHER RESTRICTIONS

See Legal Disclaimer.

ENVIRONMENTAL, HEALTH AND SAFETY

For further information and advice regarding transportation, handling, storage and disposal of chemical products, user should refer to the actual Safety Data Sheets containing physical, environmental, toxicological and other safety related data. User must read the current actual Safety Data Sheets before using any products. In case of an emergency, call CHEMTREC at 1-800-424-9300, International 703-527-3887.

LEGAL DISCLAIMER

- KEEP CONTAINER TIGHTLY CLOSED
- KEEP OUT OF REACH OF CHILDREN
- NOT FOR INTERNAL CONSUMPTION
- FOR INDUSTRIAL USE ONLY
- FOR PROFESSIONAL USE ONLY

Prior to each use of any product of Sika Corporation, its subsidiaries or affiliates ("SIKA"), the user must always read and follow the warnings and instructions on the product's most current product label, Product Data Sheet and Safety Data Sheet which are available at usa.sika.com or by calling Sika's Technical Service Department at 1-800-933-7452. Nothing contained in any SIKA literature or materials relieves the user of the obligation to read and follow the warnings and instructions for each SIKA product as set forth in the current product label, Product Data Sheet and Safety Data Sheet prior to use of the SIKA product.

BUILDING TRUST



SIKA warrants this product for one year from date of installation to be free from manufacturing defects and to meet the technical properties on the current Product Data Sheet if used as directed within the product's shelf life. User determines suitability of product for intended use and assumes all risks. User's and/or buyer's sole remedy shall be limited to the purchase price or replacement of this product exclusive of any labor costs. **NO OTHER WARRANTIES EXPRESS OR IMPLIED SHALL APPLY INCLUDING ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. SIKA SHALL NOT BE LIABLE UNDER ANY LEGAL THEORY FOR SPECIAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES. SIKA SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR THE USE OF THIS PRODUCT IN A MANNER TO INFRINGE ON ANY PATENT OR ANY OTHER INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS HELD BY OTHERS.**

Sale of SIKA products are subject to the Terms and Conditions of Sale which are available at <https://usa.sika.com/en/group/SikaCorp/termsandconditions.html> or by calling 1-800-933-7452.

Sika Corporation
201 Polito Avenue
Lyndhurst, NJ 07071
Phone: +1-800-933-7452
Fax: +1-201-933-6223
usa.sika.com

Sika Mexicana S.A. de C.V.
Carretera Libre Celaya Km. 8.3
Fracc. Industrial Balmora
Corregidora, Queretaro
C.P. 76920
Phone: 52 442 2389600
Fax: 52 442 2250537



Product Data Sheet
Sikadur®-30
March 2020, Version 03.02
32020604001.000000

4 / 4

Sikadur-30-en-US-03-2020-3-Z.pdf

BUILDING TRUST



7.4 Anexo D: Data sheet del CFRP CarboDur



HOJA DE DATOS DEL PRODUCTO

Sika® CarboDur® S

Platinas a base de Polimeros Reforzados con fibras de carbono para Refuerzo Estructural como parte del Sistema Sika® CarboDur®

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Las platinas Sika® CarboDur® son laminados de polímero de fibra de carbono (CFRP), diseñados para reforzar estructuras de concreto, madera, mampostería y acero. Las platinas Sika® CarboDur® se unen a la estructura como refuerzo externo adherido mediante el uso de adhesivo a base de resina epoxi Sikadur®-30. Consulte la hoja técnica del producto correspondiente para obtener información más detallada sobre el adhesivo.

USOS

Sika® CarboDur® S debe ser utilizado sólo por profesionales expertos.

Los sistemas Sika® CarboDur® se utilizan para mejorar, aumentar o restituir el rendimiento y la resistencia de las estructuras para:

Mayor Capacidad de Carga:

- Aumentar la capacidad de carga de losas, vigas y secciones de puentes.
- Para la instalación de maquinaria más pesada en edificaciones industriales.
- Para estabilizar estructuras con vibración.
- Para cambios en el uso de edificaciones.
- Incremento de cargas vivas en almacenes.

Daños a Elementos Estructurales:

- Deterioro en el tiempo de los materiales de construcción originales.
- Refuerzo de acero con corrosión.
- Accidentes (impacto de vehículos, terremotos, incendios).

Mejora de la Capacidad de Servicio y Durabilidad:

- Reducción de la deformación y el ancho de fisuras.
- Reducción de tensiones en el acero de refuerzo.
- Resistencia a la fatiga mejorada.

Cambio de Sistema Estructural:

- Eliminación de muros y/o columnas.
- Eliminación de secciones en losa y pared para crear accesos / aberturas.

Resistencia a Posibles Eventos:

- Mayor resistencia a terremotos, impactos o explosiones, etc.

Para Reparar Defectos de Diseño o Construcción tales como:

- Refuerzo insuficiente / inadecuado.
- Profundidad estructural insuficiente / inadecuada (recubrimiento insuficiente).

CARACTERÍSTICAS / VENTAJAS

- No corrosivo.
- Muy alta resistencia a la tracción.
- Excelente durabilidad y resistencia a la fatiga.
- Disponible en varios Módulos de Elasticidad.
- Longitudes ilimitadas, sin necesidad de traslapes.
- Bajo espesor del sistema.
- Simple ejecución de intersecciones o cruces de platinas (emparrillados).
- Fácil transporte (rollos).
- Ligero, no requiere manipulación compleja ni equipo de instalación.
- Preparación mínima de la platina, aplicable en varias capas.
- Bordes lisos sin fibras expuestas como resultado de la producción por pultrusión.
- Amplias pruebas y aprobaciones disponibles en muchos países del mundo.
- Permite ser pintado sin preparación previa.
- Resistente a los álcalis.

INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

Hoja De Datos Del Producto
Sika® CarboDur® S
Septiembre 2022, Versión 05.03
020206010010000040

Contenido de Fibra en Volumen	> 68 %																																																																																									
Empaques	<ul style="list-style-type: none"> Lámina CarboDur® : Rollo x 100 m (Sika CarboDur S512 / Sika CarboDur S1012) Lámina CarboDur® : Rollo x 250 m (Sika CarboDur S626) Sikadur®-30: Unidades pre-selladas (componentes A+B) x 5 kg 																																																																																									
Vida Útil	Lámina CFRP Indefinido Sikadur®-30 24 meses																																																																																									
Condiciones de Almacenamiento	Lámina CFRP El producto no debe de ser expuesto a la luz solar directa. Sikadur®-30 El producto debe ser almacenado en su envase original entre +5°C y +25°C.																																																																																									
Apariencia / Color	Color Negro Fibra de Carbono Reforzada con Matriz Epóxica.																																																																																									
Dimensiones	<p>Sika® CarboDur® Tipo S - Módulo E > 165,000N/mm² / Resist.: Tracción > 2,800 N/mm² - Rotura > 3,050 N/mm² / Elongación a la Rotura: > 1.7%</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sika® CarboDur® Tipo S</th> <th>Ancho</th> <th>Espesor</th> <th>Área sección transv.</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>512</td><td>50 mm</td><td>1.2 mm</td><td>60 mm²</td><td>Probeta pl</td></tr> <tr><td>514</td><td>50 mm</td><td>1.4 mm</td><td>70 mm²</td><td></td></tr> <tr><td>614</td><td>60 mm</td><td>1.4 mm</td><td>84 mm²</td><td></td></tr> <tr><td>626</td><td>60 mm</td><td>2.6 mm</td><td>156 mm²</td><td></td></tr> <tr><td>812</td><td>80 mm</td><td>1.2 mm</td><td>96 mm²</td><td></td></tr> <tr><td>814</td><td>80 mm</td><td>1.4 mm</td><td>112 mm²</td><td>WB10X14</td></tr> <tr><td>914</td><td>90 mm</td><td>1.4 mm</td><td>126 mm²</td><td></td></tr> <tr><td>1012</td><td>100 mm</td><td>1.2 mm</td><td>120 mm²</td><td></td></tr> <tr><td>1014</td><td>100 mm</td><td>1.4 mm</td><td>140 mm²</td><td>WB10X14</td></tr> <tr><td>1214</td><td>120 mm</td><td>1.4 mm</td><td>168 mm²</td><td>WB10X15E</td></tr> <tr><td>1512</td><td>150 mm</td><td>1.2 mm</td><td>180 mm²</td><td></td></tr> <tr><td>1514</td><td>150 mm</td><td>1.4 mm</td><td>210 mm²</td><td>WB10X15</td></tr> </tbody> </table> <p>Sika® CarboDur® Tipo M - Módulo E > 210,000N/mm² / Resist.: Tracción > 2,400 N/mm² - Rotura > 2,900 N/mm² / Elongación a la Rotura: > 1.2%</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sika® CarboDur® Tipo M</th> <th>Ancho</th> <th>Espesor</th> <th>Área sección transv.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>614</td><td>60 mm</td><td>1.4 mm</td><td>84 mm²</td></tr> <tr><td>914</td><td>90 mm</td><td>1.4 mm</td><td>126 mm²</td></tr> <tr><td>1214</td><td>120 mm</td><td>1.4 mm</td><td>168 mm²</td></tr> </tbody> </table> <p>Sika® CarboDur® Tipo H - Módulo E > 300,000N/mm² / Resist.: Tracción > 1,300 N/mm² - Rotura > 1,450 N/mm² / Elongación a la Rotura: > 0.45%</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sika® CarboDur® Tipo H</th> <th>Ancho</th> <th>Espesor</th> <th>Área sección transv.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>514</td><td>50 mm</td><td>1.4 mm</td><td>70 mm²</td></tr> </tbody> </table> <p>Seleccione las dimensiones según la gama de productos Sika local.</p>	Sika® CarboDur® Tipo S	Ancho	Espesor	Área sección transv.		512	50 mm	1.2 mm	60 mm ²	Probeta pl	514	50 mm	1.4 mm	70 mm ²		614	60 mm	1.4 mm	84 mm ²		626	60 mm	2.6 mm	156 mm ²		812	80 mm	1.2 mm	96 mm ²		814	80 mm	1.4 mm	112 mm ²	WB10X14	914	90 mm	1.4 mm	126 mm ²		1012	100 mm	1.2 mm	120 mm ²		1014	100 mm	1.4 mm	140 mm ²	WB10X14	1214	120 mm	1.4 mm	168 mm ²	WB10X15E	1512	150 mm	1.2 mm	180 mm ²		1514	150 mm	1.4 mm	210 mm ²	WB10X15	Sika® CarboDur® Tipo M	Ancho	Espesor	Área sección transv.	614	60 mm	1.4 mm	84 mm ²	914	90 mm	1.4 mm	126 mm ²	1214	120 mm	1.4 mm	168 mm ²	Sika® CarboDur® Tipo H	Ancho	Espesor	Área sección transv.	514	50 mm	1.4 mm	70 mm ²
Sika® CarboDur® Tipo S	Ancho	Espesor	Área sección transv.																																																																																							
512	50 mm	1.2 mm	60 mm ²	Probeta pl																																																																																						
514	50 mm	1.4 mm	70 mm ²																																																																																							
614	60 mm	1.4 mm	84 mm ²																																																																																							
626	60 mm	2.6 mm	156 mm ²																																																																																							
812	80 mm	1.2 mm	96 mm ²																																																																																							
814	80 mm	1.4 mm	112 mm ²	WB10X14																																																																																						
914	90 mm	1.4 mm	126 mm ²																																																																																							
1012	100 mm	1.2 mm	120 mm ²																																																																																							
1014	100 mm	1.4 mm	140 mm ²	WB10X14																																																																																						
1214	120 mm	1.4 mm	168 mm ²	WB10X15E																																																																																						
1512	150 mm	1.2 mm	180 mm ²																																																																																							
1514	150 mm	1.4 mm	210 mm ²	WB10X15																																																																																						
Sika® CarboDur® Tipo M	Ancho	Espesor	Área sección transv.																																																																																							
614	60 mm	1.4 mm	84 mm ²																																																																																							
914	90 mm	1.4 mm	126 mm ²																																																																																							
1214	120 mm	1.4 mm	168 mm ²																																																																																							
Sika® CarboDur® Tipo H	Ancho	Espesor	Área sección transv.																																																																																							
514	50 mm	1.4 mm	70 mm ²																																																																																							

INFORMACIÓN TÉCNICA

Resistencia a Tracción del Laminado	Valor medio	3,100 N/mm ²	(EN 2561)
	5% de valor fractil	2,900 N/mm ²	(ASTM 3039)

Hoja De Datos Del Producto
Sika® CarboDur® S
Septiembre 2022, Versión 05.05
020206010010000040

CONSTRUYENDO CONFIANZA



	Valor medio	3,200 N/mm ²	(EN ISO 527)
	5 % de valor fractil	2,800 N/mm ²	
Valores en la dirección longitudinal de las fibras. Seleccione normas relevantes.			
Módulo de Elasticidad a Tracción del Laminado	Valor medio	170 000 N/mm ²	(EN 2561)
	5 % valor fractil	165 000 N/mm ²	
	Valor medio	165 000 N/mm ²	(ASTM 3039)
	Valor medio	155 000 N/mm ²	(EN ISO 527)
Valores en la dirección longitudinal de las fibras. Seleccione normas relevantes.			
Elongación de Rotura del Laminado	Valor medio	1.80 %	(EN 2561)
Valores en la dirección longitudinal de las fibras.			

INFORMACIÓN DEL SISTEMA

Estructura del Sistema

La configuración del sistema descritas deben cumplirse en su totalidad y no se pueden modificar.
Adhesivo de resina - Sikadur[®]-30.
Refuerzo estructural Platinas de carbono - Sika[®] CarboDur[®] S.
Para obtener información detallada sobre Sikadur[®]-30, junto con los detalles de la aplicación, consulte la Hoja Técnica del producto Sikadur[®]-30.

INFORMACIÓN DE APLICACIÓN

Consumo

Ancho de la placa Sika [®] CarboDur [®]	Consumo típico de Sikadur [®] -30*
50 mm	0.45 – 0.50 kg/m
60 mm	0.60 – 0.65 kg/m
80 mm	0.70 – 0.75 kg/m
90 mm	0.80 – 0.85 kg/m
100 mm	0.85 – 0.90 kg/m
120 mm	1.00 – 1.10 kg/m
150 mm	1.20 – 1.30 kg/m

* Nota: El consumo es solo para aplicación estándar. Las superficies de sustrato ásperas o desiguales, los cruces de placas, la pérdida y el desperdicio pueden llevar a un mayor consumo de adhesivo de hasta el 20%.

NOTAS

Las láminas CarboDur[®] (CFRP) no presentan reserva de deformación plástica, por lo que la resistencia máxima de flexión de una sección reforzada se alcanza cuando se produce la falla de la lámina cuando el acero fluye o el concreto falla. El modo de falla depende de la sección transversal de la lámina. Para limitar el ancho de la fisura y la deformación, el punto de fluencia no debe producirse en las barras de refuerzo cuando el material se encuentre en servicio. No debe permitirse ninguna fisura por cortante, porque esto puede causar el desplazamiento de la superficie reforzada por consiguiente desplazamiento de la lámina. Se puede emplear los métodos convencionales para realizar los cálculos de tensión y deformación. Todos los datos técnicos recogidos en esta hoja técnica se basan en ensayos de laboratorio. Las medidas de los datos actuales pueden variar por circunstancias fuera de nuestro control.

DOCUMENTOS ADICIONALES

Pruebas

- Informe EMPA N° 154490/1
- Informe EMPA N° 154490
- Informe EMPA N° 161782
- Informe IBMB, IU Braunschweig N° 144B/325
- Informe CISMID, Perú

Referencias

Bauzinger H. Steiner W. 1989: Adhesivos epóxicos para juntas flexibles Schweizer Baublatt N° 64, Agosto 1980.
Deuring M. 1993: Reforzamiento de concreto armado con materiales compuestos pretensados. Centro Federal de Investigación y Pruebas de Materiales (EMPA), Informe EMPA N° 224, 1993.
Deuring M., 1994: Láminas CFRP en la industria de la construcción.
Reforzamiento de estructuras de concreto. Revista Swiss Engineer and Architect N° 26, 23 de julio de 1994.

Hoja De Datos Del Producto
Sika[®] CarboDur[®] S
Septiembre 2022, Versión 03.03
020205010010000040



Deuring M., Oser M., Burgi B. 1994: Refuerzos pegados. Análisis de adhesivos epóxicos. Centro Federal de Investigación y Pruebas de Materiales (EMPA), Informe EMPA N° (ilegible), 1994.
Meier U., 1994: Reforzamiento de estructuras con materiales compuestos.
Informe VDI N° 1080, 1994, pp. 587-594
SIA/EMPA: Refuerzo posterior de estructuras con lámina CarboDur.
Documentación D0120.21 de setiembre de (ilegible).

LIMITACIONES

Un ingeniero estructural calificado debe ser responsable del diseño de los trabajos de reforzamiento. Además, como esta aplicación es estructural, también se debe tener mucho cuidado al seleccionar contratistas especializados con experiencia y capacitación.
Los sistemas de refuerzo Sika® CarboDur® con platinas Sika® CarboDur® deben protegerse de la exposición permanente a la luz solar directa, la humedad y/o el agua. Consulte las Hojas Técnicas del producto para seleccionar los materiales de recubrimiento adecuados, en situaciones donde los sistemas estarán total o parcialmente expuestos. La temperatura máxima permitida de servicio continuo es de aprox. 70°C.

ECOLOGÍA, SALUD Y SEGURIDAD

Para información y asesoría referente al transporte, manejo, almacenamiento y disposición de productos químicos, los usuarios deben consultar la Hoja de Seguridad del Material actual, la cual contiene información médica, ecológica, toxicológica y otras relacionadas con la seguridad.

INSTRUCCIONES DE APLICACIÓN

CALIDAD DEL SUSTRATO

Platinas Sika® CarboDur® unidas externamente a la superficie del concreto

Resistencia mínima de adherencia del concreto recomendada después de la preparación de la superficie:

- Media: 2.0 N/mm²
- Mínimo: 1.4 N/mm²

Si la resistencia de adherencia del concreto está por debajo de los requisitos mínimos establecidos, hay soluciones alternativas disponibles de Sika:

- CarboDur® aplicado en ranuras como refuerzo cerca de la superficie (NSM).
- SikaWrap®, consulte la hoja técnica del producto para los tejidos SikaWrap®

El concreto generalmente debe tener más de 28 días (dependiendo de las condiciones de curado y del tipo de concreto, etc.)

Sika® CarboDur® unido externamente a otros sustratos

Para la aplicación de las platinas CarboDur® a todos los demás sustratos (ladrillo, piedra, acero, madera, etc.), póngase en contacto con el técnico de Sika. Servicio de asesoramiento detallado.

Hoja De Datos Del Producto
Sika® CarboDur® S
Septiembre 2022, Versión 05.03
020206010010000040

PREPARACIÓN DEL SUSTRATO

El concreto debe limpiarse y prepararse para lograr una superficie con textura abierta y libre de contaminantes.

Verificar las tensiones para el concreto y acero.

- Concreto

El concreto debe estar limpio, libre de grasa y aceite, seco, sin partículas libres. La edad del concreto dependiendo de las condiciones de clima debe ser por lo menos de 4 a 6 semanas (% de humedad).

Preparación: Arenado, escobillado o escarificado.

- Madera

La superficie debe encontrarse limpia, libre de grasa o aceite, sin partículas sueltas.

Preparación: Arenado, escobillado o escarificado.

La superficie debe ser pareja. Las marcas de trabajo o ranurados no deben ser de más de 0.5 mm.

Después de limpiar, eliminar el polvo de la superficie empleando una aspiradora industrial.

Verificar el sustrato con un nivel de metal. La tolerancia es de 10 mm para dos metros de longitud, o de 2.5 mm para 50 cm de longitud, respectivamente.

Si la superficie del concreto presenta burbujas, rellénelas con el mortero epóxico de reparación Sikadur®-31 Hi Mod-GEL. El adhesivo Sikadur®-30 se debe emplear como capa de contacto para asegurar una buena adhesión al sustrato de concreto.

MÉTODO DE APLICACIÓN / HERRAMIENTAS

Consultar la hoja técnica del producto:

- Sikadur®-30

Con una espátula, aplique con cuidado el adhesivo Sikadur®-30 bien mezclado al sustrato correctamente preparado. Cubra la superficie con una capa de aproximadamente 1.0 mm. Coloque la lámina CarboDur® en una mesa y límpiela con Sika Solvente. Aplique a la lámina Sika® CarboDur® una capa de 1 a 2 mm del adhesivo Sikadur®-30 empleando una espátula.

Mientras el adhesivo está al aire, y dependiendo de la temperatura, coloque la lámina en la superficie de concreto. Use un rodillo para presionar la lámina contra el material epóxico hasta que el adhesivo se salga por ambos lados del laminado. Elimine el exceso de adhesivo epóxico.

Cuando se haya secado el adhesivo Sikadur®-30 se puede retirar la película que recubre la lámina. Como última comprobación, verifique que la lámina CarboDur® no presente burbujas golpeando suavemente. La parte superior de la lámina se puede pintar con un material de recubrimiento como SikaGard®-63N o SikaGuard®-62 para protección.

RESTRICCIONES LOCALES

Nótese que el desempeño del producto puede variar dependiendo de cada país. Por favor, consulte la hoja técnica local correspondiente para la exacta descripción de los campos de aplicación del producto



NOTAS LEGALES

La información y en particular las recomendaciones sobre la aplicación y el uso final de los productos Sika son proporcionadas de buena fe, en base al conocimiento y experiencia actuales en Sika respecto a sus productos, siempre y cuando éstos sean adecuadamente almacenados, manipulados y transportados; así como aplicados en condiciones normales. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones de la obra en donde se aplicarán los productos Sika son tan particulares que de esta información, de alguna recomendación escrita o de algún asesoramiento técnico, no se puede deducir ninguna garantía respecto a la comercialización o adaptabilidad del producto a una finalidad particular, así como ninguna responsabilidad contractual. Los derechos de propiedad de las terceras partes deben ser respetados. Todos los pedidos aceptados por Sika Perú S.A.C. están sujetos a Cláusulas Generales de Contratación para la Venta de Productos de Sika Perú S.A.C. Los usuarios siempre deben remitirse a la última edición de la Hojas Técnicas de los productos; cuyas copias se entregarán a solicitud del interesado o a las que pueden acceder en Internet a través de nuestra página web www.sika.com.pe. La presente edición anula y reemplaza la edición anterior, misma que deberá ser destruida.

Sika Perú
Habilitación Industrial
El Lúcumo Mt. "B" Lote 6
Lurín, Lima
Tel. (511) 618-6060

Hoja De Datos Del Producto
Sika® CarboDur® S
Septiembre 2021, Versión 03.03
020209010010000040

5 / 5

SikaCarboDurS-res-PE-(09-2021)-D-3.pdf

CONSTRUYENDO CONFIANZA



7.5 Anexo E: Cálculo de micromecánica

Cálculo del módulo de elasticidad longitudinal:

El módulo de elasticidad longitudinal se calcula mediante la expresión 2.1:

$$E_{11} = E_f * V_f + E_m * V_m \quad \text{Ec. 7.1}$$

$$E_{11} = 0.68 * 241\text{GPa} + 0.32 * 3.6\text{GPa}$$

$$. E_{11} = 165.032 \text{ GPa}$$

Cálculo del módulo de elasticidad transversal:

El módulo de elasticidad transversal se calcula utilizando la ecuación micromecánica 2.2:

$$E_{22} = \frac{E_f * E_m}{E_f * V_m + E_m * V_f} \quad \text{Ec. 7.2}$$

$$E_{22} = \frac{241 \text{ GPa} * 3.66 \text{ GPa}}{241 \text{ GPa} * 0.32 + 3.6 \text{ GPa} * 0.68}$$

$$E_{22} = 10.904 \text{ GPa}$$

Ratio de poisson mayor:

Ratio de poisson mayor se calcula mediante la expresión 2.3:

$$\nu_{12} = \nu_f * V_f + \nu_m * V_m \quad \text{Ec. 7.3}$$

$$\nu_{12} = 0.2 * 0.68 + 0.35 * 0.32$$

$$\nu_{12} = 0.248$$

Ratio de poisson menor:

Ratio de poisson menor se calcula mediante la expresión 2.4:

$$\nu_{21} = \frac{\nu_{12} * E_{22}}{E_{11}} \quad \text{Ec. 7.4}$$

$$\nu_{21} = \frac{0.248 * 10.904\text{GPa}}{165.032 \text{ GPa}}$$

$$\nu_{21} = 0.0164$$

Módulo de Corte de las Fibras

El módulo de Corte de las Fibras se calcula mediante la expresión 2.6:

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)} \quad \text{Ec. 7.5}$$

$$G_f = \frac{241 \text{ GPa}}{2(1 + 0.2)}$$

$$G_f = 100.417 \text{ GPa}$$

Módulo de Corte de la matriz

El módulo de Corte de la matriz se calcula mediante la expresión 2.7:

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad \text{Ec. 7.6}$$

$$G_m = \frac{3.6 \text{ GPa}}{2(1 + 0.35)}$$

$$G_m = 1.33 \text{ GPa}$$

Módulo de corte en el plano

El Módulo de corte en el plano se calcula mediante la expresión 2.5:

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad \text{Ec. 7.7}$$

$$G_{12} = \frac{1}{\frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m}}$$

$$G_{12} = \frac{1}{\frac{0.68}{100.42 \text{ GPa}} + \frac{0.32}{1.33 \text{ GPa}}}$$

$$G_{12} = 4.052 \text{ GPa}$$

7.6 Anexo F: Cálculo de micromecánica

En esta sección se desarrollarán todos los cálculos realizados en el apartado “5.2.4.3. micromecánica” de la probeta de acero reforzada con CFRP Carbodur S 512.

Se establecen las posiciones de las láminas que componen la probeta, especificando sus límites superior e inferior respecto al eje neutro del sistema. Estas coordenadas son fundamentales para calcular las contribuciones individuales de cada capa en los términos de rigidez global.

Lamina 1 Acero A36:

$$h_j = +3.1 \text{ mm} \rightarrow \text{Inferior}$$

$$h_{j-1} = +0.1 \text{ mm} \rightarrow \text{Superior}$$

Lamina 2 Siakdur-30:

$$h_j = +0.1 \text{ mm} \rightarrow \text{Inferior}$$

$$h_{j-1} = -1.9 \text{ mm} \rightarrow \text{Superior}$$

Lamina 3 Siakdur-30:

$$h_j = -1.9 \text{ mm} \rightarrow \text{Inferior}$$

$$h_{j-1} = -3.1 \text{ mm} \rightarrow \text{Superior}$$

El ángulo de las fibras se define como $\theta = 0^\circ$, indicando que las fibras están alineadas longitudinalmente respecto al eje principal del laminado. Este ángulo implica que $m = \cos \theta = \cos 0^\circ = 1$ y $n = \sin \theta = \sin 0^\circ = 0$, simplificando el análisis a un estado en el que las direcciones principales de la matriz coinciden con las del material.

Cálculo de matriz de rigidez del Carbodur S512:

La matriz de rigidez Q_{CFRP} del laminado unidireccional de Carbodur S512 se determina mediante la ecuación 2.12.

$$Q_{CFRP} = \begin{bmatrix} \frac{165.032 \text{ GPa}}{1 - (0.248)(0.016)} & \frac{(0.016)(165.032 \text{ GPa})}{1 - (0.248)(0.016)} & 0 \\ \frac{(0.248)(10.96 \text{ GPa})}{1 - (0.248)(0.016)} & \frac{10.96 \text{ GPa}}{1 - (0.248)(0.016)} & 0 \\ 0 & 0 & 4.0523 \text{ GPa} \end{bmatrix}$$

$$Q_{CFRP} = \begin{bmatrix} 165.706 & 2.7176 & 0 \\ 2.715 & 10.948 & 0 \\ 0 & 0 & 4.0523 \end{bmatrix} GPa$$

Matriz de Rigidez Transformada del carbodur S512:

La matriz de rigidez transformada \bar{Q}_{CFRP} se calcula mediante la fórmula 2.13.

$$\bar{Q}_{CFRP} = T^{-1}Q_{CFRP}RTR^{-1} \quad \text{Ec. 7.8}$$

$$\bar{Q}_{CFRP} = \begin{bmatrix} 1^2 & 0^2 & -2(1)(0) \\ 0^2 & 1^2 & 2(1)(0) \\ (1)(0) & -(1)(0) & (1^2 - 0^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 165.706 GPa & 2.7176 GPa & 0 \\ 2.715 GPa & 10.948 GPa & 0 \\ 0 & 0 & 4.052 GPa \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1^2 & 0^2 & 2(1)(0) \\ 0^2 & 1^2 & -2(1)(0) \\ -(1)(0) & (1)(0) & (1^2 - 0^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$\bar{Q}_{CFRP} = \begin{bmatrix} 165.706 & 2.7176 & 0 \\ 2.715 & 10.948 & 0 \\ 0 & 0 & 4.0523 \end{bmatrix} GPa$$

Notamos que la matriz de rigidez y la matriz de rigidez transpuesta del CFRP son iguales.

$$\therefore \bar{Q}_{CFRP} = Q_{CFRP}$$

Cálculo de matriz de rigidez del Acero A36:

La matriz de rigidez Q_{Acero} del laminado unidireccional de Acero A36 se determina mediante la ecuación 2.12.

$$Q_{Acero} = \begin{bmatrix} \frac{200 GPa}{1 - (0.3)(0.3)} & \frac{(0.3)(200 GPa)}{1 - (0.3)(0.3)} & 0 \\ \frac{(0.3)(200 GPa)}{1 - (0.3)(0.3)} & \frac{200 GPa}{1 - (0.3)(0.3)} & 0 \\ 0 & 0 & 76.92 GPa \end{bmatrix}$$

$$Q_{Acero} = \begin{bmatrix} 219.78 & 65.934 & 0 \\ 65.934 & 219.78 & 0 \\ 0 & 0 & 76.92 \end{bmatrix} GPa$$

Matriz de Rigidez Transformada del Acero A36:

La matriz de rigidez transformada \bar{Q}_{Acero} se calcula mediante la fórmula 2.13.

$$\bar{Q}_{Acero} = T^{-1}Q_{Acero}RTR^{-1} \quad \text{Ec. 7.9}$$

$$\bar{Q}_{Acero} = \begin{bmatrix} 1^2 & 0^2 & -2(1)(0) \\ 0^2 & 1^2 & 2(1)(0) \\ (1)(0) & -(1)(0) & (1^2 - 0^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 219.78 \text{ GPa} & 65.934 \text{ GPa} & 0 \\ 65.934 \text{ GPa} & 219.78 \text{ GPa} & 0 \\ 0 & 0 & 76.92 \text{ GPa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1^2 & 0^2 & 2(1)(0) \\ 0^2 & 1^2 & -2(1)(0) \\ -(1)(0) & (1)(0) & (1^2 - 0^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$\bar{Q}_{Acero} = \begin{bmatrix} 219.78 & 65.934 & 0 \\ 65.934 & 219.78 & 0 \\ 0 & 0 & 76.92 \end{bmatrix} \text{ GPa}$$

Notamos que la matriz de rigidez y la matriz de rigidez transpuesta del Acero A36 son iguales.

$$\therefore \bar{Q}_{Acero} = Q_{Acero}$$

Cálculo de matriz de rigidez del sikadur-30:

La matriz de rigidez $Q_{Sikadur}$ del laminado unidireccional de Carbodur S512 se determina mediante la ecuación 2.12.

$$Q_{Sikadur} = \begin{bmatrix} \frac{11.2 \text{ GPa}}{1 - (0.3)(0.3)} & \frac{(0.3)(11.2 \text{ GPa})}{1 - (0.3)(0.3)} & 0 \\ \frac{(0.3)(11.2 \text{ GPa})}{1 - (0.3)(0.3)} & \frac{11.2 \text{ GPa}}{1 - (0.3)(0.3)} & 0 \\ 0 & 0 & 4.307 \text{ GPa} \end{bmatrix}$$

$$Q_{Sikadur} = \begin{bmatrix} 12.308 & 3.692 & 0 \\ 3.692 & 12.308 & 0 \\ 0 & 0 & 4.307 \end{bmatrix} \text{ GPa}$$

Matriz de Rigidez Transformada del sikadur-30:

La matriz de rigidez transformada $\bar{Q}_{Sikadur}$ se calcula mediante la fórmula 2.13.

$$\bar{Q}_{Sikadur} = T^{-1}Q_{Sikadur}RTR^{-1} \quad \text{Ec. 7.10}$$

$$\bar{Q}_{Sikadur} = \begin{bmatrix} 1^2 & 0^2 & -2(1)(0) \\ 0^2 & 1^2 & 2(1)(0) \\ (1)(0) & -(1)(0) & (1^2 - 0^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 12.308 \text{ GPa} & 3.692 \text{ GPa} & 0 \\ 3.692 \text{ GPa} & 12.308 \text{ GPa} & 0 \\ 0 & 0 & 4.307 \text{ GPa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1^2 & 0^2 & 2(1)(0) \\ 0^2 & 1^2 & -2(1)(0) \\ -(1)(0) & (1)(0) & (1^2 - 0^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$\bar{Q}_{Sikadur} = \begin{bmatrix} 12.308 & 3.692 & 0 \\ 3.692 & 12.308 & 0 \\ 0 & 0 & 4.307 \end{bmatrix} \text{ GPa}$$

Notamos que la matriz de rigidez y la matriz de rigidez transpuesta del sikadur-30 son iguales.

$$\therefore \bar{Q}_{Sikadur} = Q_{Sikadur}$$

Cálculo de matrices de rigidez de un laminado [A; B; C]

Cálculo Matriz de rigidez extensional [A]:

La matriz rigidez extensional [A] se calcula integrando las contribuciones de rigidez Q de cada lámina sobre sus espesores. Esta matriz describe el comportamiento del laminado ante esfuerzos en el plano. La ecuación es la siguiente:

$$A_{rs} = \sum_{j=1}^P \bar{Q} [h_j - h_{j-1}] = \sum_{j=1}^P \bar{Q}_{rsj} t_j$$

$$A_{rs} = \bar{Q}_{rs-Acero} [+3.1 - (0.1)] + \bar{Q}_{rs-Sikadur} [+0.1 - (-1.9)] + \bar{Q}_{rs-CFRP} [-1.9 - (-3.1)]$$

Al sustituir las propiedades de las láminas (Acero A36, Sikadur-30 y Carbodur S512), se obtienen los valores de los términos:

$$A_{rs} = 3\bar{Q}_{rs-Acero} + 2\bar{Q}_{rs-Sikadur} + 1.2 \bar{Q}_{rs-CFRP}$$

$$A_{11} = 3(219.78 \text{ GPa}) + 2(12.308 \text{ GPa}) + 1.2 (165.706 \text{ GPa}) = 882.803 \text{ GPa}$$

$$A_{12} = 3(65.934 \text{ GPa}) + 2(3.6923 \text{ GPa}) + 1.2 (2.7176 \text{ GPa}) = 208.8032 \text{ GPa}$$

$$A_{13} = 3(0 \text{ GPa}) + 2(0 \text{ GPa}) + 1.2(0 \text{ GPa}) = 0 \text{ GPa}$$

$$A_{22} = 3(219.78 \text{ GPa}) + 2(12.308 \text{ GPa}) + 1.2(10.9484 \text{ GPa}) = 697.094 \text{ GPa}$$

$$A_{23} = 3(0 \text{ GPa}) + 2(0 \text{ GPa}) + 1.2(0 \text{ GPa}) = 0 \text{ GPa}$$

$$A_{33} = 3(76.9231 \text{ GPa}) + 2(4.307 \text{ GPa}) + 1.2(4.0523 \text{ GPa}) = 244.247 \text{ GPa}$$

La matriz resultante es:

$$A = \begin{bmatrix} 882.8032 & 208.4477 & 0 \\ 208.4477 & 697.094 & 0 \\ 0 & 0 & 244.247 \end{bmatrix} \text{ KN/mm}$$

Calculo Matriz rigidez de acoplamiento [B]:

La matriz de rigidez de acoplamiento [B] describe el acoplamiento entre esfuerzos planos y curvaturas debido a la asimetría del laminado. La ecuación es la siguiente:

$$B_{rs} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^P \bar{Q}_{rsj} [h_j^2 - h_{j-1}^2]$$

$$B_{rs} = \frac{1}{2} \{ \bar{Q}_{rs-Acero} [(+3.1)^2 - (0.1)^2] + \bar{Q}_{rs-Sikadur} [(+0.1)^2 - (-1.9)^2] \\ + \bar{Q}_{rs-CFRP} [(-1.9)^2 - (-3.1)^2] \}$$

$$B_{rs} = \frac{1}{2} \{ \bar{Q}_{rs-Acero} [9.6] - \bar{Q}_{rs-Sikadur} [3.6] - \bar{Q}_{rs-CFRP} [6] \}$$

$$B_{rs} = \bar{Q}_{rs-Acero} [4.8] - \bar{Q}_{rs-Sikadur} [1.8] - \bar{Q}_{rs-CFRP} [3]$$

Al sustituir las propiedades de las láminas (Acero A36, Sikadur-30 y Carbodur S512), se obtienen los valores de los términos:

$$B_{11} = (4.8)(219.78) - (1.8)(12.308) - (3)(165.706) = 535.67$$

$$B_{12} = (4.8)(65.934) - (1.8)(3.6923) - (3)(2.7176) = 301.684$$

$$B_{13} = (4.8)(0) - (1.8)(0) - (3)(0) = 0$$

$$B_{22} = (4.8)(219.78) - (1.8)(12.308) - (3)(10.9484) = 999.944$$

$$B_{23} = (4.8)(0) - (1.8)(0) - (3)(0) = 0$$

$$B_{33} = (4.8)(76.9231) - (1.8)(4.307) - (3)(4.0523) = 349.321$$

La matriz resultante es:

$$B = \begin{bmatrix} 535.67 & 301.684 & 0 \\ 301.684 & 999.944 & 0 \\ 0 & 0 & 349.321 \end{bmatrix} KN$$

Cálculo de la matriz de rigidez a la flexión [D]:

La matriz de rigidez a la flexión [D] describe la rigidez del laminado frente a momentos flectores. Su cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$D_{rs} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^P \bar{Q}_{rsj} [h_j^3 - h_{j-1}^3]$$

$$D_{rs} = \frac{1}{3} \{ \bar{Q}_{rs-Acero} [(+3.1)^3 - (0.1)^3] + \bar{Q}_{rs-Sikadur} [(+0.1)^3 - (-1.9)^3] + \bar{Q}_{rs-CFRP} [(-1.9)^3 - (-3.1)^3] \}$$

$$D_{rs} = \frac{1}{3} \{ \bar{Q}_{rs-Acero} [29.79] + \bar{Q}_{rs-Sikadur} [6.86] + \bar{Q}_{rs-CFRP} [22.932] \}$$

$$D_{rs} = \bar{Q}_{rs-Acero} [9.93] + \bar{Q}_{rs-Sikadur} [2.287] + \bar{Q}_{rs-CFRP} [7.644]$$

Al sustituir las propiedades de las láminas (Acero A36, Sikadur-30 y Carbodur S512), se obtienen los valores de los términos:

$$D_{11} = (9.93)(219.78) - (2.287)(12.308) - (7.644)(165.706) = 3477.22$$

$$D_{12} = (9.93)(65.934) - (2.287)(3.6923) - (7.644)(2.7176) = 683.942$$

$$D_{13} = (9.93)(0) - (2.287)(0) - (7.644)(0) = 0$$

$$D_{22} = (9.93)(219.78) - (2.287)(12.308) - (7.644)(10.9484) = 2294.253$$

$$D_{23} = (9.93)(76.9231) - (2.287)(4.307) - (7.644)(4.0523) = 804.672$$

$$D_{33} = (9.93)(76.9231) - (2.287)(4.307) - (7.644)(4.0523) = 804.672$$

La matriz resultante es:

$$D = \begin{bmatrix} 3477.22 & 683.942 & 0 \\ 683.942 & 2294.253 & 0 \\ 0 & 0 & 804.672 \end{bmatrix} KN * mm$$

Relación entre esfuerzos, momentos y deformaciones:

La relación entre los esfuerzos en el plano N y los momentos M con las deformaciones planas e y las curvaturas k , en el laminado compuesto se expresa mediante la matriz constitutiva:

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^\circ \\ k \end{bmatrix} = [E] \begin{bmatrix} e^\circ \\ k \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ 1300 \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 882.8032 & 208.4477 & 0 & 535.67 & 301.684 & 0 \\ 208.4477 & 697.094 & 0 & 301.684 & 999.944 & 0 \\ 0 & 0 & 244.247 & 0 & 0 & 349.321 \\ 535.67 & 301.684 & 0 & 3477.22 & 683.942 & 0 \\ 301.684 & 999.944 & 0 & 683.942 & 2294.253 & 0 \\ 0 & 0 & 349.321 & 0 & 0 & 804.672 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_{xy} \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}$$

En el caso de la probeta el momento M_x esta dado por el momento flector máximo dividido entre el ancho de la probeta, es decir $M_x = \frac{32500 \text{ Nmm}}{50\text{mm}} \rightarrow M_x = 1300 \frac{\text{Nmm}}{\text{mm}}$

Cálculo de las deformaciones y curvaturas:

Para determinar las deformaciones e y las curvaturas k se utiliza la relación inversa de la matriz constitutiva.

$$\begin{bmatrix} e^\circ \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = [E]^{-1} \begin{bmatrix} e^\circ \\ k \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_{xy} \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.232360 \\ 0.062553 \\ 0 \\ 0.428721 \\ -0.124516 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{mm/mm} \\ \text{mm/mm} \\ \text{mm/mm} \\ 1/\text{mm} \\ 1/\text{mm} \\ 1/\text{mm} \end{matrix}$$

Cálculo de esfuerzos en las láminas

Para determinar los esfuerzos en cada lámina del laminado compuesto, se utiliza la ecuación:

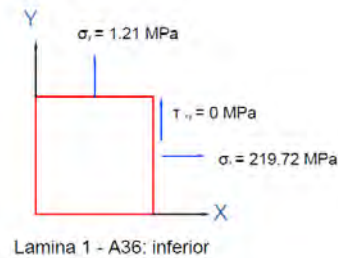
$$\sigma_{xy} = \bar{Q}_j e^\circ + z \bar{Q}_j k$$

Lamina 1 – A36: inferior $Z=+3.1 \text{ mm}$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 219.8 & 65.93 & 0 \\ 65.93 & 219.8 & 0 \\ 0 & 0 & 76.92 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.232360 \\ 0.062553 \\ 0 \end{bmatrix} + 3.1 \begin{bmatrix} 219.8 & 65.93 & 0 \\ 65.93 & 219.8 & 0 \\ 0 & 0 & 76.92 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.428721 \\ -0.124516 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 219.72 \\ 1.21 \\ 0 \end{bmatrix} MPa$$

En la siguiente figura se muestra el estado de esfuerzos en la lámina lado inferior de la del material acero A36.

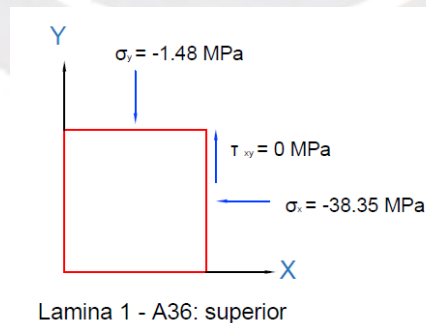


Lamina 1 – A36: superior Z=+0.1 mm

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 219.8 & 65.93 & 0 \\ 65.93 & 219.8 & 0 \\ 0 & 0 & 76.92 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.232360 \\ 0.062553 \\ 0 \end{bmatrix} + 0.1 \begin{bmatrix} 219.8 & 65.93 & 0 \\ 65.93 & 219.8 & 0 \\ 0 & 0 & 76.92 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.428721 \\ -0.124516 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -38.35 \\ -1.48 \\ 0 \end{bmatrix} MPa$$

En la siguiente figura se muestra el estado de esfuerzos en la lámina lado superior del material acero A36.

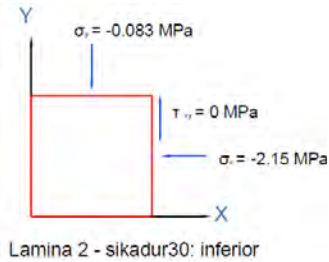


Lamina 2 – sikadur30: inferior Z=+0.1 mm

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 12.308 & 3.6923 & 0 \\ 3.6923 & 12.308 & 0 \\ 0 & 0 & 4.307 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.232360 \\ 0.062553 \\ 0 \end{bmatrix} + 0.1 \begin{bmatrix} 12.308 & 3.6923 & 0 \\ 3.6923 & 12.308 & 0 \\ 0 & 0 & 4.307 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.428721 \\ -0.124516 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.15 \\ -0.083 \\ 0 \end{bmatrix} MPa$$

En la siguiente figura se muestra el estado de esfuerzos en la lámina lado inferior de la del material Sikadur 30.



Lamina 2 – sikadur30: superior Z= -1.9 mm

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 12.308 & 3.6923 & 0 \\ 3.6923 & 12.308 & 0 \\ 0 & 0 & 4.307 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.232360 \\ 0.062553 \\ 0 \end{bmatrix} - 1.9 \begin{bmatrix} 12.308 & 3.6923 & 0 \\ 3.6923 & 12.308 & 0 \\ 0 & 0 & 4.307 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.428721 \\ -0.124516 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -11.78 \\ -0.184 \\ 0 \end{bmatrix} MPa$$

En la siguiente figura se muestra el estado de esfuerzos en la lámina lado superior del material sikadur 30.

7.7 Registro fotográfico de la preparación de probetas ensayadas



Figura 7.1 Secado de las probetas por 4 semanas



Figura 7.2 Control dimensional de las probetas post secado.



Figura 7.3 Marcado de las zonas de pegado de las galgas extensiométricas.



Figura 7.4 Lijado y limpieza de las zonas marcadas para el pegado de las galgas extensiométricas.

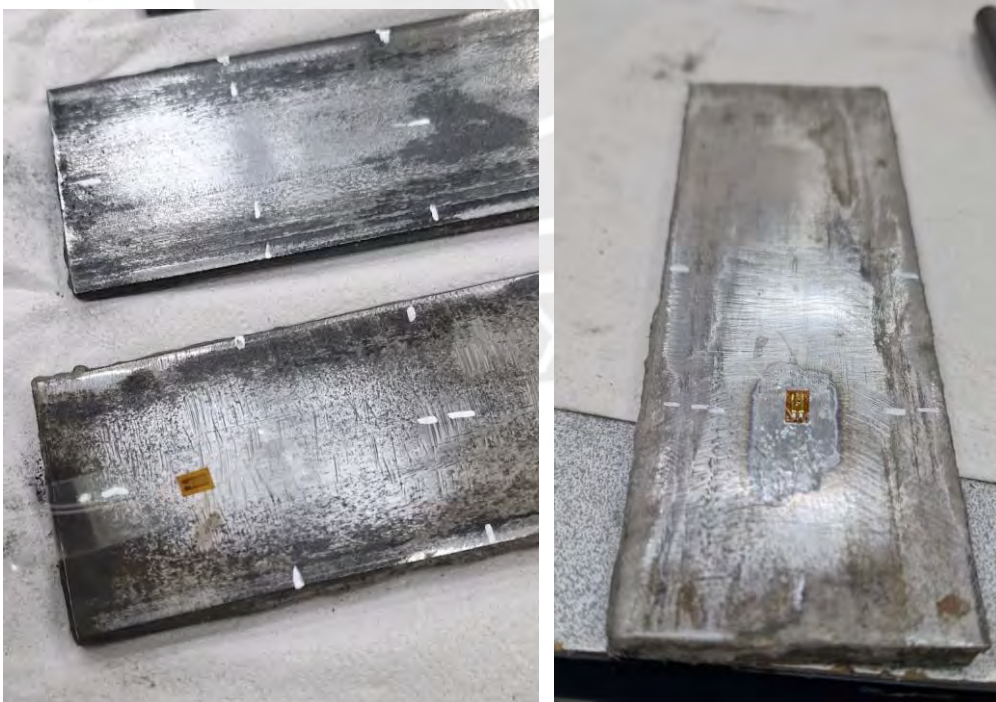


Figura 7.5 Pegado de las galgas extensiométricas.

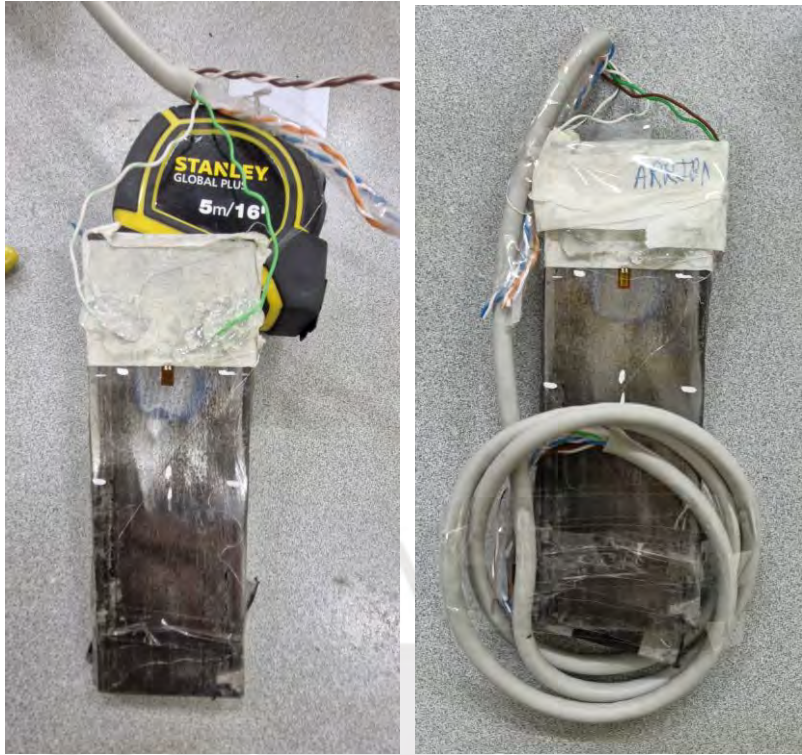


Figura 7.6 Soldadura con estaño de cables ethernet a las galgas extensiométricas

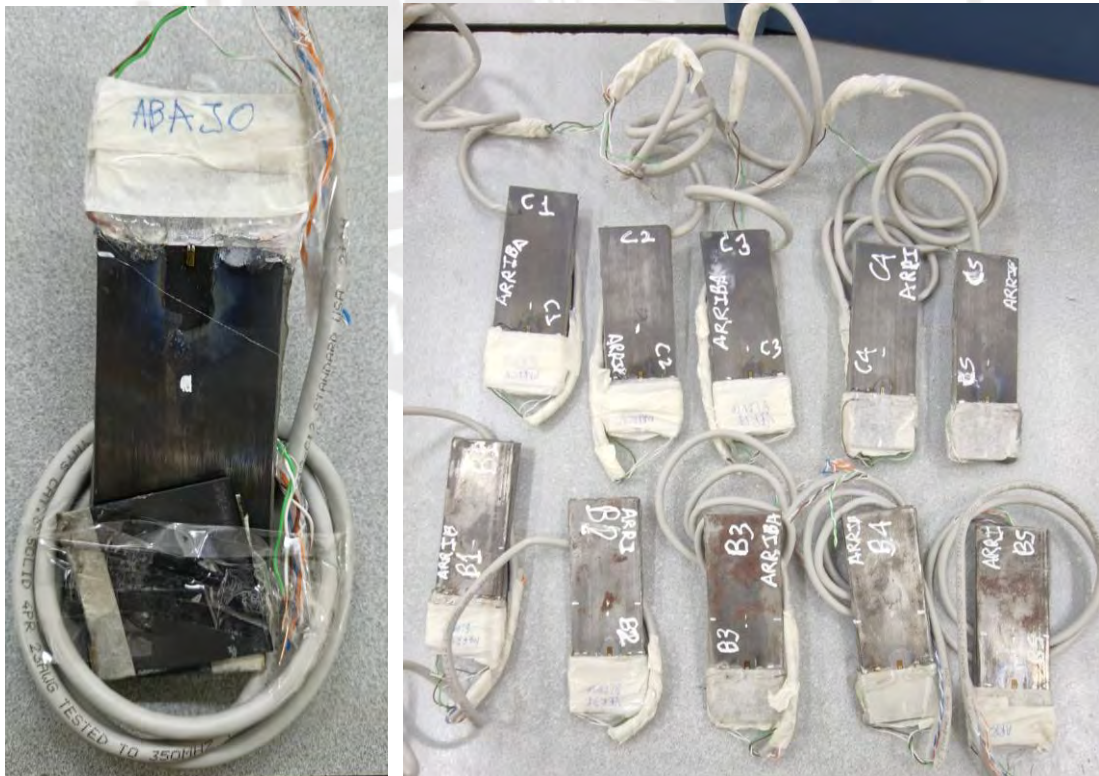


Figura 7.7 Codificación de las probetas a ensayar



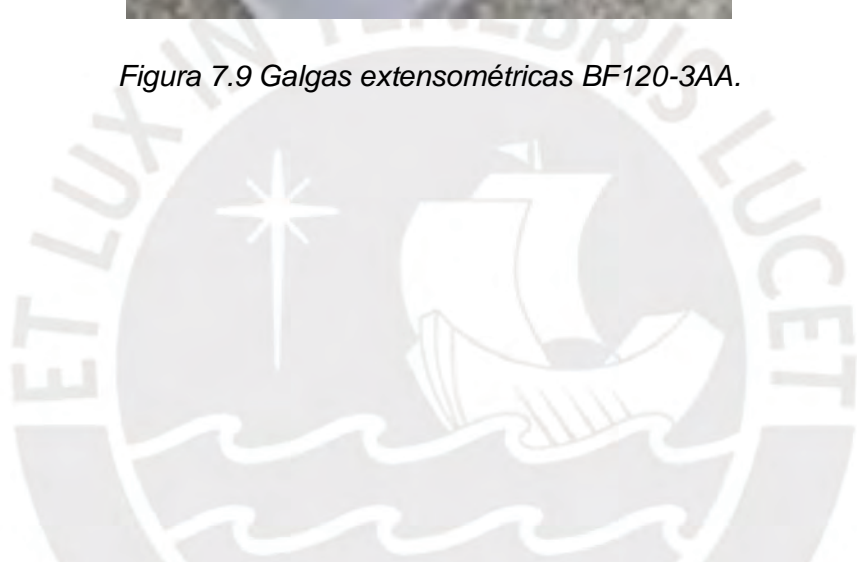
Figura 7.8 Almacenamiento de las probetas

7.8 Medición de datos con galgas extensométricas:

Para la medición de las deformaciones en las probetas durante los ensayos de flexión, se utilizarán galgas extensiométricas modelo BF120-3AA, con una resistencia nominal de 120 ohmios. Estas galgas serán adheridas a la superficie de las probetas utilizando un adhesivo especializado, asegurando una correcta transferencia de la deformación del material a la galga. Durante los ensayos, las galgas registrarán las variaciones de resistencia eléctrica causadas por las deformaciones, las cuales serán convertidas en datos de deformación mediante un circuito de puente de Wheatstone conectado a un sistema de adquisición de datos. Este método permitirá cuantificar con alta precisión las deformaciones experimentadas por las probetas bajo diferentes configuraciones de carga, proporcionando información crucial sobre el comportamiento estructural de los materiales evaluados.



Figura 7.9 Galgas extensométricas BF120-3AA.



7.9 Registro fotográfico de los ensayos de flexión 3 puntos experimental



Figura 7.10 Ensayo de probeta C2.

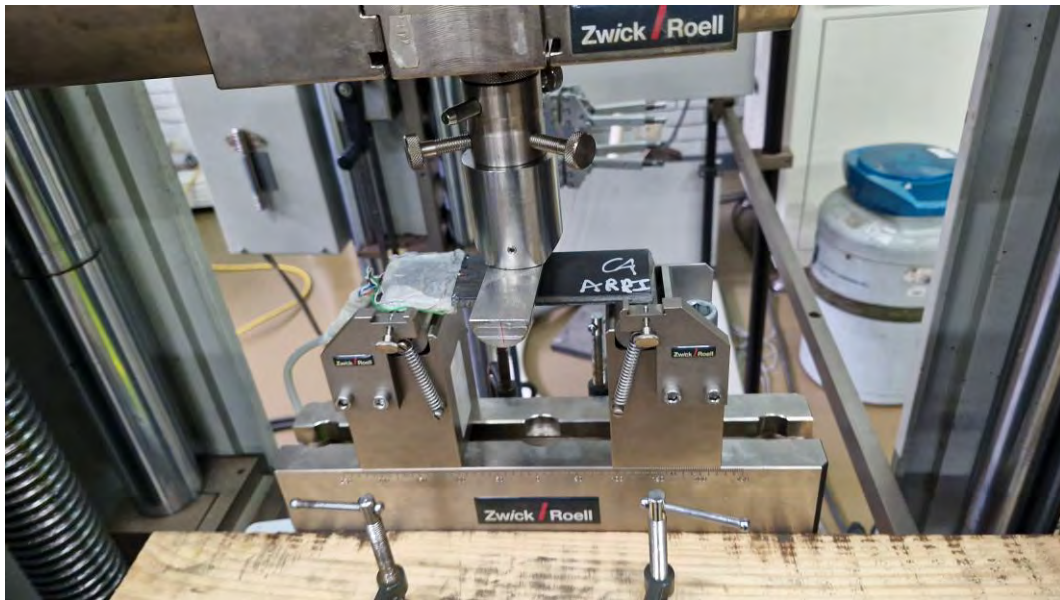


Figura 7.11 Ensayo de probeta C4.



Figura 7.12 Ensayo de probeta B1.



Figura 7.13 Ensayo de probeta B2.

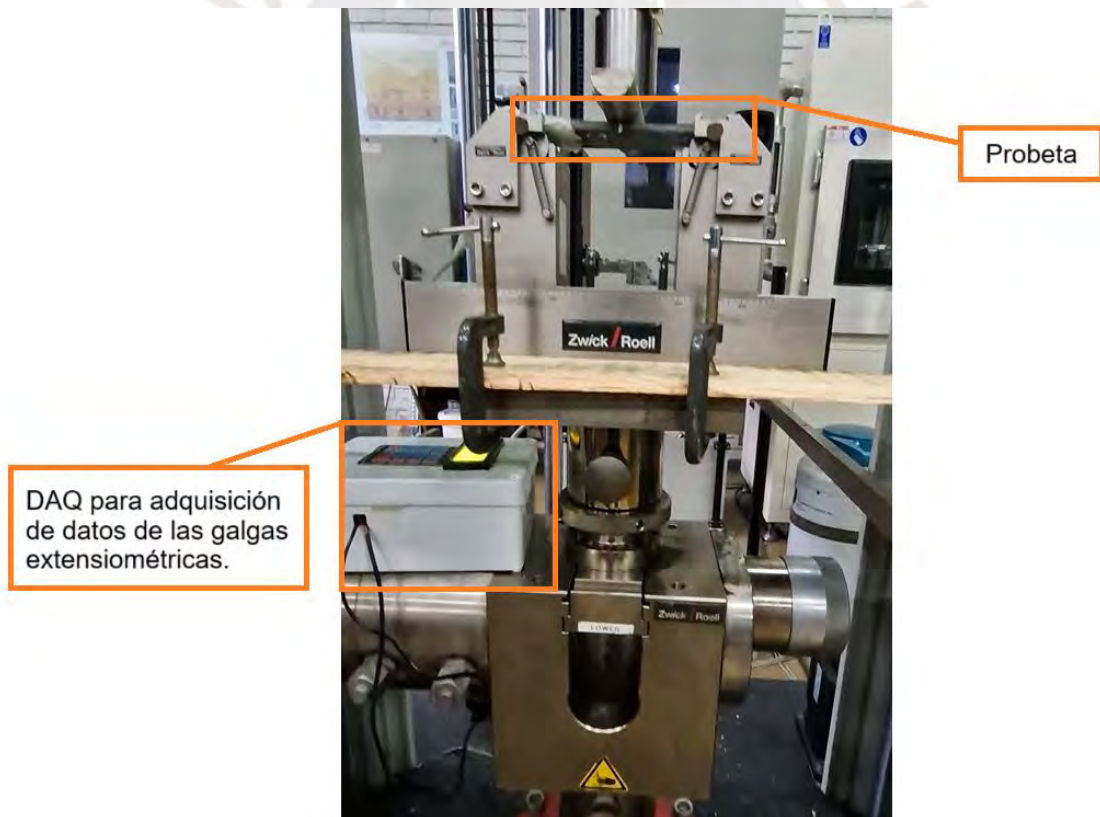


Figura 7.14 Ensayo de probeta con DAQ.

7.10 Registro fotográfico de los ensayos de corte



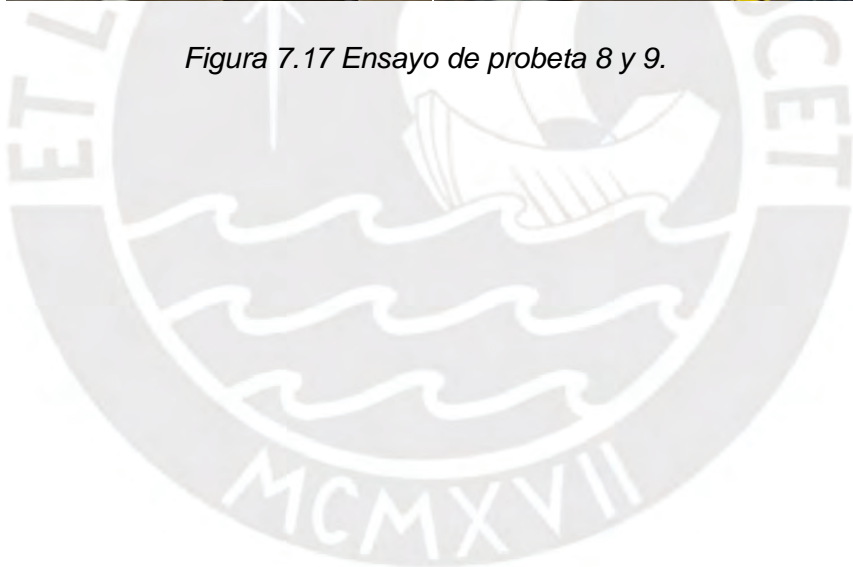
Figura 7.15 Ensayo de probeta 4 y 5.



Figura 7.16 Ensayo de probeta 6 y 7.



Figura 7.17 Ensayo de probeta 8 y 9.



7.11 Anexo G: Tabla comparativa de esfuerzos, deflexión del análisis analítico y FEM del ensayo de flexión de 3 puntos.

FUERZA N	DEFLEXIÓN mm (analítico)	DEFLEXIÓN mm (FEM)	Esfuerzo A36 top (analítico) Mpa	Esfuerzo A36 bottom (analítico) Mpa	Esfuerzo SIKADUR top (analítico) Mpa	Esfuerzo SIKADUR bottom (analítico) Mpa	Esfuerzo CFRP top (analítico) Mpa	Esfuerzo CFRP bottom (analítico) Mpa	Esfuerzo A36 top (FEM) Mpa	Esfuerzo A36 bottom (FEM) Mpa	Esfuerzo SIKADUR top (FEM) Mpa	Esfuerzo SIKADUR bottom (FEM) Mpa	Esfuerzo CFRP top (FEM) Mpa	Esfuerzo CFRP bottom (FEM) Mpa	Error relativo Deflexión %
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%
100	0.032	0.032	1.917	10.985	0.589	0.107	12.876	8.633	3.311	13.238	0.625	0.474	13.024	8.467	0.436%
200	0.064	0.064	3.834	21.970	1.178	0.215	25.751	17.267	6.622	26.478	1.249	0.948	26.056	16.935	0.437%
300	0.096	0.095	5.752	32.955	1.767	0.322	38.627	25.900	9.933	39.719	1.873	1.422	39.096	25.405	0.437%
400	0.128	0.127	7.669	43.941	2.356	0.429	51.503	34.534	13.242	52.962	2.498	1.896	52.144	33.878	0.438%
500	0.160	0.159	9.586	54.926	2.945	0.537	64.378	43.167	16.551	66.207	3.122	2.370	65.199	42.352	0.435%
600	0.191	0.191	11.503	65.911	3.534	0.644	77.254	51.801	19.860	79.453	3.746	2.844	78.263	50.828	0.438%
700	0.223	0.222	13.420	76.896	4.123	0.752	90.130	60.434	23.168	92.700	4.370	3.318	91.334	59.306	0.436%
800	0.255	0.254	15.338	87.881	4.712	0.859	103.006	69.068	26.476	105.950	4.994	3.793	104.410	67.787	0.438%
900	0.287	0.286	17.255	98.866	5.301	0.966	115.881	77.701	29.783	119.200	5.617	4.267	117.500	76.269	0.436%
1000	0.319	0.318	19.172	109.851	5.891	1.074	128.757	86.335	33.088	132.450	6.241	4.741	130.590	84.752	0.436%
1100	0.351	0.349	21.089	120.837	6.480	1.181	141.633	94.968	36.395	145.710	6.865	5.215	143.700	93.240	0.437%
1200	0.383	0.381	23.006	131.822	7.069	1.288	154.508	103.602	39.700	158.960	7.488	5.689	156.810	101.730	0.435%
1300	0.415	0.413	24.924	142.807	7.658	1.396	167.384	112.235	43.005	172.220	8.111	6.163	169.930	110.220	0.437%
1400	0.447	0.445	26.841	153.792	8.247	1.503	180.260	120.869	46.309	185.480	8.734	6.637	183.060	118.710	0.436%
1500	0.479	0.476	28.758	164.777	8.836	1.610	193.135	129.502	49.613	198.740	9.358	7.111	196.190	127.210	0.437%