UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Análisis de vigas híbridas para reducir los aceros convencionales en puentes

vehiculares con luces de 50m de Ayacucho

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Huamani Ferrel, Freddy Aundencio (0000-0002-8576-9868)

Sarmiento Quispe, Maribel Sandra (0000-0002-6436-3631)

ASESOR

Orihuela Dávila, Junior Didi (0000-0002-0209-2055)

Lima, 05 de agosto de 2020

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mi madre Victoria Ferrel H. que desde el cielo me alienta a seguir cumpliendo mis objetivos y a mi padre Ildefonso Huamani T., personas importantes en mi vida personal y profesional que siempre anhelaron lo mejor para mí y mis hermanos. A mi esposa e hijos por su comprensión y apoyo en todo momento.

FREDDY HUAMANI

A mi madre, Damiana Quispe M, por el compromiso y el apoyo incondicional y por enseñarme a ser una persona perseverante. A mi hija, Diana Gabriela Galindo S., por la paciencia y la empatía que demostró durante toda la etapa de mi formación profesional pues gracias a ella, pude lograr muchos retos, su amor incondicional me dio la fuerza para avanzar y lograr con cada meta que me trazaba en la vida.

MARIBEL SARMIENTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por cuidarnos de la salud en esta etapa del año, brindando la oportunidad de poder superar todo y así concretar un proyecto de vida, culminando nuestra carrera profesional.

A nuestros Padres, por apoyarnos en cada etapa de nuestras vidas, por orientarnos y dar la fortaleza con su apoyo de seguir avanzando a pesar de tantas dificultades, la perseverancia y la constancia que nos enseñaron fue muy importante en esta etapa.

A nuestro Asesor de Tesis, que nos apoyaron, orientaron y guiaron en el desarrollo de este trabajo de investigación.

RESUMEN

En la presente tesis se realizó un análisis de vigas híbridas en puentes vehiculares con luces de 50m de Ayacucho, considerando el diseño alternativo en la superestructura de sección compuesta con vigas homogéneas de aceros convencionales que es el proyecto existente versus las vigas híbridas con aceros A709 Grado 50 y de Grado HPS-70W, la misma que determinará cual es la alternativa de diseño que brinda mejores resultados desde el punto de vista como propuesta técnica y económica.

Para este análisis se desarrollan seis capítulos. El capítulo número uno, se describe el plan de trabajo a seguir para alcanzar los objetivos planteados. El segundo capítulo, comprende el marco teórico en el cual se definen los conceptos, clasificación de puentes, tipos de aceros estructurales, propiedades, normativas y filosofía de diseño. En el tercer capítulo, se realiza el estudio de caso aplicado a un proyecto existente, donde utilizamos los antecedentes e información del proyecto. En el cuarto capítulo, se realiza el modelamiento y resultados de análisis estructural; en este capítulo se emplea el software SCibridges para el cálculo de las demandas en la estructura. En el quinto capítulo, se realiza el diseño de las vigas en el cual se presenta ensayos de material de una muestra de acero de grado HPS 70W, así mismo, se realiza el diseño de viga I según AASHTO LRFD donde se obtiene resultados considerables para reducir los aceros convencionales.

Finalmente, en el capítulo seis se presenta las conclusiones y recomendaciones alineados a los objetivos planteados.

Palabras clave: Vigas híbridas; aceros de alto rendimiento; construcción de puentes; comportamiento de flexión

ABSTRACT

In this thesis, an analysis of hybrid beams in vehicular bridges with spans of 50m in Ayacucho was carried out, considering the alternative design in the superstructure of composite section with homogeneous beams of conventional steels that is the existing project versus the hybrid beams with A709 Grade steels. 50 and Grade HPS-70W, which will determine which is the design alternative that provides the best results from the point of view as a technical and economic proposal.

Six chapters are developed for this analysis. Chapter number one describes the work plan to follow to achieve the objectives set. The second chapter includes the theoretical framework in which the concepts, classification of bridges, types of structural steels, properties, regulations and design philosophy are defined. In the third chapter, the case study applied to an existing project is carried out, where we use the background and information of the project. In the fourth chapter, the modeling and results of structural analysis are carried out; In this chapter, the SCibridges software is used to calculate the demands on the structure. In the fifth chapter, the design of the beams is carried out in which material tests of a sample of HPS 70W grade steel are presented, likewise, the I-beam design is carried out according to AASHTO LRFD where considerable results are obtained to reduce conventional steels.

Finally, chapter six presents the conclusions and recommendations aligned to the objectives set.

Keyword: hybrid beams; high performance steels; bridge construction; Flexural behavior

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I: PLAN DE TESIS	12
1.1 Título.....	12
1.2 Introducción	12
1.2.1 Realidad problemática	12
1.2.2 Formulación del problema.....	13
1.3 Estado del Arte.....	13
1.3.1 Introducción.....	13
1.3.2 Vigas Armadas	15
1.3.3 Vigas Homogéneas	16
1.3.4 Vigas Híbridas	16
1.4 Justificación	18
1.5 Objetivos o Hipótesis.....	19
1.5.1 Hipótesis	19
1.5.2 Objetivo General.....	19
1.5.3 Objetivos Específicos	19
1.6 Metodología.....	19
1.7 Limitaciones.....	20
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	22
2.1 Marco Conceptual.....	22
2.2 Tipos de Puentes	23
2.2.1 Por el Material de la Superestructura	23
2.2.2 Por la Forma de la Superestructura.....	24
2.2.3 Por su Trazo Geométrico	25
2.2.4 Según el Tipo de Vida Útil	26
2.2.5 Según el Tipo de Apoyo	26

2.2.6	Por el Proceso Constructivo	26
2.2.7	Por el Tipo de Cimentaciones.....	27
2.3	Superestructura de Sección Compuesta.....	27
2.4	Aceros Estructurales	27
2.4.1	Aceros Convencionales	27
2.4.2	Aceros de Alto Límite Elástico	28
2.4.3	Utilizacion de Aceros de Alto Límite Elástico (HSS).....	31
2.4.4	En Estados Unidos.....	32
2.4.5	Ventajas de los Aceros HPS (FHWA).....	33
2.5	Propiedades del Acero Estructural.....	33
2.5.1	Propiedades Mecánicas según AASHTO	34
2.6	Normativa	35
2.6.1	Reglamento AASHTO-LRFD	35
2.6.2	Otros Reglamentos	35
2.6.3	Secciones de la norma AASHTO LRFD	36
2.7	Filosofía de diseño	37
2.8	Sobrecarga de Diseño	39
2.9	Análisis Sísmico	40
CAPÍTULO III: ESTUDIO DE CASO		41
3.1	INTRODUCCIÓN	41
3.2	Nombre del proyecto	41
3.3	Localización.....	41
3.4	Vías de Acceso.....	41
3.5	Antecedentes	42
3.6	Información del Proyecto.....	43

CAPÍTULO IV: MODELAMIENTO Y RESULTADOS DE ANALISIS ESTRUCTURAL 44

4.1	Modelamiento y Cargas de Diseño	44
4.1.1	Descripción del modelo	44
4.1.2	Cargas Vehiculares	44
4.1.3	Normas	44
4.1.4	Validación del modelo.....	45
4.1.5	Combinaciones de carga.....	45
4.2	Resultados de Análisis Estructural	46
4.2.1	Introducción.....	46
4.2.2	Normativa Utilizada para el Diseño	47
4.2.3	Solución Estructural	47
4.2.4	Materiales	47
4.2.5	Cargas	48
4.2.6	Consideraciones para el Diseño.....	49
4.2.7	Análisis y Diseño de la Superestructura	49
4.2.8	Verificación de las Deflexiones por Carga Viva.....	59
4.2.9	Resultados del Analisis Estructural	60

CAPÍTULO V: DISEÑO DE LAS VIGAS 64

5.1	Validación de la Resistencia a Usar (F_y)	64
5.1.1	Ensayo de Tracción con Probeta (Norma ASTM A370).....	64
5.1.2	Análisis Químico Cuantitativo (ASTM E415)	66
5.1.3	Informe Técnico	67
5.1.4	Conclusiones.....	67
5.2	Diseño de Viga de Alma Llena Según AASHTO LRFD	67
5.2.1	Propiedades y Parámetros.....	67

5.2.2	Diseño a Flexión.....	69
5.2.3	Diseño a Corte	76
5.2.4	Generación de Planos	77
5.2.5	Ratio por Peso Propio (DC).....	77
5.3	Discusión de Resultados	77
5.3.1	Metrados de Vigas de Alma Llena de la Superestructura de Puente.....	77
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		80
6.1	Conclusiones.....	80
6.2	Recomendaciones	82
BIBLIOGRAFÍA		84
ANEXOS		88
Anexo A. Encuesta de tema de investigación.....		88
Anexo B. Plano topográfico		89
Anexo C. Plano Vigas planta y elevación		90
Anexo D. Detalle de la Superestructura del Puente.....		91
Anexo E. Combinaciones de Carga.....		92
Anexo F. Informe de Ensayo de Tracción y Análisis Químico.....		93
Anexo G. Plano Vigas Homogéneas (G1).....		95
Anexo H. Plano Vigas Híbridas (G2).....		96
Anexo I. Metrado de Vigas G1 y G2.....		99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Histograma de investigaciones de vigas híbridas.	14
Figura 2. Puente de sección compuesta.	23
Figura 3. Puentes en arco.	24
Figura 4. Puente atirantado.	25
Figura 5. Puente reticulado.	25
Figura 6. Puentes prefabricados.	26
Figura 7. Puente por voladizos sucesivos.	27
Figura 8. Evolución histórica de los tipos de acero.	29
Figura 9. Tensión-deformación en aceros.	30
Figura 10. Tensión-deflexión en aceros.	30
Figura 11. Puente Snyder South Bridge en Nebraska.	32
Figura 12. Probabilidad de ocurrencia Q_u y R_n	38
Figura 13. Sobrecarga HL93.	40
Figura 14. Ubicación de Sondondo.	42
Figura 15. Vista panorámica de Sondondo.	42
Figura 16. Calculo manual de M y V por DC.	45
Figura 17. Sección transversal de la superestructura del puente de Sondondo.	46
Figura 18. Sección longitudinal de la superestructura del puente de Sondondo.	47
Figura 19. Análisis y Diseño con Csi Bridge.	50
Figura 20. Análisis y Diseño con Csi Bridge	51
Figura 21. Análisis y Diseño con Csi Bridge	51
Figura 22. Análisis y Diseño con Csi Bridge	52
Figura 23. Sección transversal del tablero del puente de Sondondo.	52
Figura 24. Análisis y Diseño con Csi Bridge	53
Figura 25. Análisis y Diseño con Csi Bridge	53
Figura 26. Análisis y Diseño con Csi Bridge	54
Figura 27. Análisis y Diseño con Csi Bridge.	55
Figura 28. Análisis y Diseño con Csi Bridge	55
Figura 29. Análisis y Diseño con Csi Bridge	56
Figura 30. Análisis y Diseño con Csi Bridge	56
Figura 31. Análisis y Diseño con Csi Bridge	57

Figura 32. Análisis y Diseño con Csi Bridge	57
Figura 33. Análisis y Diseño con Csi Bridge	58
Figura 34. Análisis y Diseño con Csi Bridge	58
Figura 35. Deflexión debida HL93.....	59
Figura 36. Diagrama de momentos flector por DC	60
Figura 37. Diagrama de momentos flector por DW	61
Figura 38. Envolvente de momentos flector por [HL93] LL+IM	61
Figura 39. Diagrama de fuerza cortante por DC	62
Figura 40. Diagrama de fuerza cortante por DW.	62
Figura 41. Envolvente de fuerza cortante por [HL93] LL+IM.	63
Figura 42. Máquina de universal de ensayo a tracción.	64
Figura 43. Probeta de placa metálica.....	65
Figura 44. Deformacion unitaria y diagrama esfuerzo-deformación.	66
Figura 45. Equipo de espectrometría de emisión.	66
Figura 46. Definición de variables en sección de momento positivo.....	73
Figura 47. Comparativo de metrados y costos de vigas homogéneas e híbridas.	78
Figura 48. Comparativo de pesos viga G1 vs G2.....	78
Figura 49. Comparativo de costos viga G1 vs G2.....	79
Figura 50. Comparativo de costos por metro lineal de vigas..	79

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Resumen Cronológico De Autores Sobre El Studio De Vigas Híbridas	14
Tabla 2	Proceso Cuantitativo.....	19
Tabla 3	Propiedades Mecanicas Por Forma, Resistencia Y Espesor.....	34
Tabla 4	Secciones de AASHTO LRFD.....	36
Tabla 5	Modificadores De Carga Ni.....	38
Tabla 6	Combinaciones De Carga	45

CAPÍTULO I: PLAN DE TESIS

1.1 TÍTULO

Análisis de vigas híbridas para reducir los aceros convencionales en puentes vehiculares con luces de 50m de Ayacucho.

1.2 INTRODUCCIÓN

1.2.1 Realidad problemática

En la actualidad los proyectos de puentes vehiculares en el Perú, son desarrollados y diseñados con luces considerables sobre todo para conectar vías inaccesibles en el interior del país que por la naturaleza de su geografía son necesarios y requeridos frecuentemente.

Es por ello, que en esta tesis se analiza el puente con vigas de acero en la superestructura que generalmente los proyectistas consideran en el diseño de estructuras metálicas las vigas homogéneas (vigas armadas homogéneas o perfiles laminados comerciales) con aceros convencionales, siendo no siempre las decisiones óptimas. En vista de la falta de investigación y ensayos en los aceros estructurales para obras de ingeniería de gran importancia como los puentes vehiculares en el Perú, se plantea un diseño alternativo mediante las vigas armadas híbridas.

Las vigas híbridas están conformadas por placas de diferente límite elástico, es decir el acero de alas y almas es distinto. Se conciben con la necesidad de construir elementos a medida, que cumplan los requisitos estructurales y principalmente aporten incremento en la resistencia a flexión y en consecuencia reducir significativamente el peso. Para ello, se dispone un acero de mayores prestaciones resistentes en las alas; para poder lograr de manera eficiente se utilizará los aceros tipo HPS.

En el Perú existe desconocimiento sobre los aceros estructurales tipo HPS que son parte del grupo de los aceros de alta resistencia denominados HSS, en efecto no se conoce los beneficios que aportaría estos materiales en la ingeniería estructural, a causa de esta situación es de interés la búsqueda de optimización en el diseño y la construcción de puentes vehiculares con luces de 50m. Asimismo se puede plantear la interrogante: ¿qué antecedentes existen en el Perú sobre el uso de aceros HPS en vigas híbridas para la superestructura de un puente?, ¿Tener la mayor

resistencia del acero puede resultar un ahorro sustancial para la construcción de un puente?, ¿Qué limitaciones existen en la actualidad para seguir diseñando con aceros convencionales?

El problema principal se centra en: la necesidad de diseñar puentes vehiculares con luces de 50m de Ayacucho con vigas homogéneas de aceros convencionales.

Como problemas secundarios se pueden mencionar: la falta de investigación sobre el comportamiento de las vigas híbridas, desconocimiento del resultado económico, no se va a conocer parámetros de nuevos aceros estructurales, desconocimiento de los aceros tipo HPS, falta de investigación y ensayos de este tipo de material.

1.2.2 Formulación del problema

¿Qué recomendaciones genera el análisis de vigas híbridas para reducir los aceros convencionales en puentes vehiculares con luces de 50m de Ayacucho? Revisar Anexo A.

1.3 ESTADO DEL ARTE

1.3.1 Introducción

El desarrollo de este tema de estudio manifiesta el interés por mejorar el comportamiento estructural a partir de las características y propiedades de los materiales en el acero de alta resistencia de grados 50 y 70W. En el diseño de estructuras metálicas es frecuente que las demandas superen las características de vigas comerciales por lo que se decide utilizar los formatos de las firmas comerciales obligando a un rediseño y un incremento en el peso total de la estructura. Entonces como una solución estructural a estas limitaciones existentes se propone promover su uso y analizar los aceros de alta resistencia en las vigas híbridas para lograr una disminución del área de acero en la sección y sus componentes del elemento, en efecto una reducción de peso de los elementos de la superestructura influye en los elementos de soporte de las subestructuras que ayudaría a reducir las cimentaciones y aprovechar al máximo la capacidad portante del suelo (Terreros, 2014).

Elaborando un histograma con el propósito de observar la cantidad de investigaciones por década (figura 1.), se logra conocer cómo fueron los inicios y que toma como referente la primera investigación en la década de los 40; También se observa que las investigaciones de vigas híbridas tienen relevancia entre el año 2000 y 2010.

Figura 1. Histograma de investigaciones de vigas híbridas. Adaptado de "Estudio de la interacción flector cortante en viga híbridas de acero", por Terreros, 2014

Adicionalmente se presenta en la **Tabla 1**, un resumen cronológico de autores donde se observa más detallado como fue desarrollándose la cantidad de investigaciones sobre este tema de estudio.

Tabla 1

Resumen cronológico de autores sobre el estudio de vigas híbridas

Investigador	País	Año	Tipo	Temática
Wilson	USA	1944	T	Primer estudio
Haaijer	USA	1961	T	HSS
Frost	USA	1964	T y E	Flexión y cortante
Toyoda	USA	1967	T	Comportamiento estático
Schilling	USA	1967	T y E	Patch Loading
Lew	USA	1967	E	Comportamiento estático
Lew & Toprac	USA	1968	E	Comportamiento estático
Carskaddan	USA	1968	T y E	Abolladura por cortante
Maeda	USA	1971	T y E	Resistencia a flexión
Rockey & Skaloud	UK	1972	E	Capacidad cortante

Kamtekar et al	UK	1972	E	Capacidad a cortante
Kamtekar et al	UK	1974	E	Capacidad a cortante
Nethercot	UK	1976	T y E	Abolladura por cortante
Rockey et al	UK	1981	T y E	Capacidad a cortante
Adorisio	UK	1982	T y E	Capacidad a cortante
Evans & Tang	UK	1983	E	Capacidad a cortante
Evans	UK	1984	E	Capacidad a cortante
Tang & Evans	UK	1984	E	Capacidad a cortante
Nakai et al	Japón	1985	E	Abolladura y capacidad
Evans	UK	1986	T y E	Capacidad a cortante
Ahlenius	Suecia	1994	General	Diseño
Barker et al	USA	2000	Económico	Ventajas económicas
Rush	USA	2001	E	Capacidad a cortante
Barker et al	USA	2002	T	Capacidad a cortante
Veljkovic et al	Suecia	2002	General	Diseño
Ito et al	Japón	2002	T, E y N	Resistencia a flexión
Zentz	USA	2002	E	Capacidad a cortante
Bitar et al	Francia	2003	T, E y N	Flexión, fatiga
Barker et al	USA	2005	E	TFA
Felkel et al	USA	2006	T, E y N	Pandeo lateral
Barth et al	USA	2007	N	Flexión
Combri	Europa	2007	T, E y N	Diseño
Chacon et al	España	2007	T, E y N	Patch loading
Azizinamini et al	USA	2007	E	Capacidad a cortante
Real et al	España	2008	E	Capacidad a cortante
Petel et al	Francia	2008	Económico	Reducción de peso
Chacon et al	España	2008	E y N	Patch loading
Gallardo et al	Chile	2009	Económico	Viabilidad técnica y económica
Chacon	España	2010	T, E y N	Patch loading
Rojas	España	2013	T, E y N	Diseño
Terreros	España	2014	T, E y N	Flexión cortante

Nota: Se presenta un resumen de las investigaciones de vigas híbridas. Fuente: Extraído de (Terreros, 2014)

1.3.2 Vigas Armadas

Las vigas armadas son consideradas como elementos prefabricados que se construyen a medida del diseño, asimismo pueden ser vigas homogéneas y vigas no homogéneas o híbridas.

1.3.3 Vigas Homogéneas

Son perfiles laminados de formato comercial o vigas armadas con propiedades del acero convencional de bajo límite elástico, actualmente estos elementos son comunes en la industria de la construcción, pesquera y minera.

1.3.4 Vigas Híbridas

Se define como vigas armadas, cuyas placas son de diferente límite elástico. Está comprendida dentro de vigas no homogéneas y se caracterizan principalmente por utilizar en sus componentes aceros convencionales y aceros de alto límite elástico. El uso de las vigas híbridas en puentes vehiculares se considera como una gran solución estructural cuando se requiera diseñar puentes de grandes luces y estructuras importantes en la industria de la construcción sometidas a cargas transitorias y constantes. Se plantea usar este tipo de vigas para estructuras no convencionales, es decir donde el catálogo de vigas comerciales o armadas (vigas homogéneas de acero convencionales) no satisface al requerimiento de las oficinas de proyectos a causa de que resultan poco económicas. Las vigas híbridas se caracterizan por su esbeltez, por lo general es necesario rigidizarlo con placas horizontales y/o verticales equidistantes y simétricos que permiten dar mayor resistencia a la viga y en efecto a la sección compuesta de la superestructura del puente vehicular frente a los fenómenos de pandeo local e inestabilidad (Rojas, 2013).

Las principales ventajas que presenta el uso de vigas híbridas, radica en la posibilidad de reducir espesores de las diferentes placas que componen la viga y por consecuencia lograr una reducción significativa del peso de la viga, finalmente transmite a la subestructura de los estribos y la cimentación menores cargas por peso propio, que a su vez exigiría menor capacidad portante del suelo, por tanto, se lograría un ahorro económico significativo. Los primeros en plantear fueron Barker (Barker M.G., 2000) y posteriormente Veljkovic (Veljkovic M., 2004) quienes presentan la comparación en el costo de puentes diseñados con diferentes configuraciones variando los límites elásticos del alma y las alas, haciendo distinción entre el ala superior e inferior siendo esta última la más exigida y por tanto la que se variará, evidenciando que logran resultados significativos en el aspecto económico siempre en cuando se aumente el límite elástico del ala inferior y dejando constante tanto el ala superior como el alma (Terreros, 2014).

Según Wang et al. (2016), en su artículo de “Progreso de investigación de puentes de acero de alto rendimiento y aplicación de ingeniería”, proponen un concepto de alto rendimiento y larga duración, es decir una estructura de alto rendimiento y larga vida útil. El desarrollo de la investigación y la aplicación de la ingeniería de puentes de acero de alto rendimiento se basa en tres niveles: nivel de material, nivel de componentes y nivel estructural. Según los resultados del estudio experimental se diseña y construye considerando en la etapa de constructibilidad la técnica de construcción prefabricada donde los elementos se adaptan a las condiciones ambientales severas y en la etapa de servicio sugirió un sistema inteligente de monitoreo y gestión de puentes.

Por tanto, estas variables tomadas aplican a las demandas de transporte en lugares inaccesibles de condiciones ambientales severas, lo que demuestra los beneficios en seguridad de la estructura, durabilidad, larga vida útil, baja emisión de carbono y economía.

En otro artículo Wang et al. (2016), sostienen en su publicación de “Comportamiento a la flexión y ductilidad de vigas híbridas I de acero de alto rendimiento”, como resultado de varios ensayos experimentales donde se probaron y compararon vigas I con aceros HPS 485W en las alas y aceros de diferentes calidades Q235, Q345 y HPS 485W en el alma, teniendo como resultado la reducción de peso en el ala y alma; siendo el factor que afecta la flexión y la ductilidad de una viga. Por tanto, determino que a medida que reduce el espesor del ala se produce el pandeo local antes de la carga inelástica que reduce la ductilidad de la viga. A medida que aumenta la esbeltez del alma, disminuye la deformación en la etapa inelástica. En conclusión, cuando se utiliza acero HPS 485W (70W) en las alas, se sugiere que la resistencia del alma no sea inferior a Q345. Con ello, cabe resaltar que es importante indicar un límite de esbeltez cuando se utilizan aceros de alto rendimiento.

Por otro lado, Collins et al. (2019), afirma que los aceros HPS en la construcción de nuevos puentes va en aumento a medida que los ingenieros reconocen el significativo ahorro de costos y beneficios de rendimiento mejorado. Este artículo presenta una prueba de resistencia a la fractura con aceros A709 de Grado HPS 70W y 100W en las bridas de una viga representativa, donde los valores resultantes se utilizan para determinar los tamaños de defecto tolerables, en tanto, se comparan basados en estimaciones de tenacidad con la especificación del material

actual. Por lo tanto, se sostiene el aumento de resistencia a la fractura en comparación con el acero convencional para puentes, es debido a la combinación con los avances modernos en la producción de acero, el análisis y la mecánica de fractura. Esto evidencia que los aceros HPS están mostrando una resistencia muy superior a los requisitos de especificación actual.

Asimismo, Peng et al. (2019), llevaron a cabo una investigación experimental para determinar los daños generados por corrosión para analizar el impacto en la respuesta de flexión de las vigas de acero de alto rendimiento (HPS). Los resultados verifican que una pérdida por corrosión inferior al 10% conlleva a una ligera degradación tanto en resistencia como en rigidez, mientras que un mayor daño por corrosión generara una disminución considerable. En consecuencia, los modelos predictivos desarrollados de relación constitutiva de plástico elástico y endurecimiento lineal pueden adecuar los valores de límite inferior y superior para el momento de flexión final.

Según lo propuesto por Xiao et al. (2020), se llevó muestras a un estudio experimental para comparar la disminución de las propiedades de los aceros HPS sometidas a corrosión electroquímica y corrosión acelerada. Luego de una evaluación mediante el uso de tecnología de escaneo 3D se obtuvieron resultados donde el método de corrosión tiene un efecto en los comportamientos de ductilidad, fuerza y falla; en relación con la pérdida de espesor que tiene una mayor respuesta en la resistencia estructural y la rigidez.

Finalmente, un aspecto que se debe tomar en cuenta, es que las vigas híbridas aun no tienen un reconocimiento importante en el diseño y construcción de las estructuras por múltiples razones que pasan desde el desconocimiento de las mismas, restricciones en las normativas, la industria de la construcción en contra de las nuevas tecnologías, donde prefieren seguir utilizando los materiales y técnicas desfasadas en el tiempo dejando de lado la investigación y ensayo de las nuevas tecnologías.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El trabajo de investigación contribuirá a romper la inercia a los cambios en el diseño y la construcción en los elementos estructurales en relación a las vigas metálicas de la superestructura de un puente vehicular para entender la importancia de las nuevas tecnologías en el acero como es el caso de los aceros tipo HPS. Asimismo, los resultados del estudio ayudarán a crear antecedentes para superar las limitaciones que existen en la actualidad de seguir

diseñando con aceros convencionales y generar un impacto satisfactorio en las firmas comerciales que mejoraría el stock de materiales disponibles. Por otro lado, fomentar la oferta local y aumentar el uso de esta tecnología de materiales por parte de los diseñadores. Finalmente, este proyecto permitirá fomentar la investigación y el ensayo de este tipo de acero.

1.5 OBJETIVOS O HIPÓTESIS

1.5.1 Hipótesis

La utilización de aceros HPS reciente en puentes vehiculares con luces de 50m de Ayacucho mejora la resistencia de las vigas híbridas en relación a los diferentes parámetros sobre las vigas homogéneas de aceros convencionales.

1.5.2 Objetivo General

Desarrollar el análisis de vigas híbridas para reducir los aceros convencionales en puentes vehiculares con luces de 50m de Ayacucho.

1.5.3 Objetivos Específicos

- Usar aceros de grado HPS en las vigas híbridas metálicas de la súper-estructura del puente.
- Modelar, analizar y diseñar la viga metálica en el escenario híbrido para interpretar los nuevos parámetros.
- Determinar un análisis y diseño óptimo con reducción de acero en la viga metálica para las mismas solicitaciones.

1.6 METODOLOGÍA

En la **Tabla 2**, se construye un cuadro que muestra la metodología con enfoque cuantitativo en los diferentes procesos que comprende el tema de estudio.

Tabla 2

Proceso Cuantitativo

Fase	Trabajo de investigación
Idea	Importancia de vigas híbridas con aceros estructurales de diferentes límites elásticos en los puentes vehiculares

Planteamiento del problema	¿Qué recomendaciones genera el comportamiento de vigas híbridas utilizando aceros HPS reciente en puentes vehiculares con luces de 50m en Perú?
Revisión de la literatura y desarrollo del marco teórico	Histograma de investigación de vigas Híbridas.
Visualización del alcance del estudio	Aplicado al mejoramiento de la superestructura de un puente vehicular en el departamento Ayacucho, Perú. Las vigas tienen la particularidad de estar conformadas por diferentes aceros.
Elaboración de hipótesis y definición de variables	La utilización de aceros HPS reciente en puentes vehiculares con luces de 50m de Ayacucho mejora la resistencia de las vigas híbridas en relación a los diferentes parámetros sobre las vigas homogéneas de aceros convencionales. La variable independiente: aceros convencionales en exceso. Variable dependiente: análisis de vigas híbridas.
Desarrollo del diseño de investigación	Diseño experimental
Definición y selección de la muestra	Materiales de diferente limite elástico.
Recolección de los datos	Bibliográfico, académico, encuestas a especialistas, experimentación.
Análisis de los datos	Modelado, análisis y diseño de vigas híbridas con acero Gr-50 y Gr-HPS 70W con elaboración de ensayos de material del acero.
Elaboración del reporte de resultados	Discusión y obtención de resultados como parámetros y pesos.

Nota: Se presenta un cuadro resumen aplicando la metodología de enfoque cuantitativo. Fuente: Propia

1.7 LIMITACIONES

El trabajo de estudio comprende los siguientes alcances:

- La investigación aplica en puentes vehiculares con vigas de acero I con luces de 50m. de Ayacucho.
- El tema de estudio se enfoca en el análisis y desarrollo de la viga simplemente apoyada con un análisis lineal elástico.

- Modelamiento, análisis y diseño de vigas en relación a un escenario híbrido con dos aceros de diferente límite elástico.
- La investigación toma todos los estudios básicos de ingeniería de un proyecto existente de acuerdo a la complejidad para determinar su análisis y diseño.
- La presentación de un informe técnico sobre ensayos de material de una muestra.
- Los resultados y recomendaciones del comportamiento de las vigas híbridas utilizando aceros HPS en el mejoramiento de las superestructuras.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 MARCO CONCEPTUAL

En el libro Manual de Diseño de Puentes del ICG (2013), se define algunos conceptos preliminares que son comunes en relación a puentes vehiculares que ha continuación se menciona.

Anteproyecto. - Conjunto de estudios iniciales que hacen posible la evaluación de una solución propuesta, antes de su desarrollo definitivo.

Proyecto. - Comprende todos los estudios y documentos necesarios que hacen posible la construcción del puente. Los estudios son definitivos y realizados con información más completa y detallada que a nivel de anteproyecto.

Estudios Básicos de ingeniería. - Conjunto de estudios para obtener los datos necesarios para la elaboración de los anteproyectos y proyectos del puente. Los estudios que pueden ser necesarios dependiendo de la magnitud y complejidad de la obra son:

- Estudios Topográficos
- Estudios Hidrológicos e Hidráulicos
- Estudios Geológicos Geotécnicos
- Estudios de Riesgo Sísmico
- Estudios de Impacto Ambiental
- Estudios de Trafico
- Estudios Complementarios
- Estudios de Trazos de la Vía

Obras de Arte Especiales. - Conjuntos estructurales tales como puentes, viaductos, pasarela, túneles, muros de gran tamaño y otras obras de magnitud, desarrollados por ingenieros calificados, construidos bajo la responsabilidad de profesionales de experiencia y con la supervisión constante y adecuada en todas las fases dela construcción.

Puente. - Obra de arte especial requerida para atravesar a desnivel un accidente geográfico o un obstáculo artificial por el cual no es posible el tránsito en la dirección de su eje.

Viaducto. - Puente a desnivel sobre una vía de tráfico.

Pontón. - Puente de longitud menor de 10 metros.

Superestructura. - Partes estructurales del puente que provee el tramo horizontal.

Subestructura. - Partes estructurales del puente que soporta el tramo horizontal.

2.2 TIPOS DE PUENTES

Hay diferentes tipos de puentes y se pueden clasificar por las siguientes características:

2.2.1 Por el Material de la Superestructura

- De concreto armado
- De concreto presforzado
- De acero
- De sección compuesta

Figura 2. Puente de sección compuesta. Adaptado de "Seminario web diseño de puentes con Csi Bridge", por Innova, 2016

2.2.2 Por la Forma de la Superestructura

- Losa maciza
- Losa aligerada
- Vigas T
- Vigas I
- Vigas cajón
- En arco
- Colgante
- Atirantado
- Reticulado
- Pórticos

Figura 3. Puentes en arco. Adaptado de "Seminario web diseño de puentes con Csi Bridge", por Innova, 2016

Figura 4. Puente atirantado. Adaptado de "Seminario web diseño de puentes con Csi Bridge", por Innova, 2016

Figura 5. Puente reticulado. Adaptado de "Seminario web diseño de puentes con Csi Bridge", por Innova, 2016.

2.2.3 Por su Trazo Geométrico

- Recto
- Esviado
- Curvo

2.2.4 Según el Tipo de Vida Útil

- Provisionales
- Definitivos

2.2.5 Según el Tipo de Apoyo

- Isostático
- Simplemente apoyado
- Cantiliver o Gerber
- Hiperestático
- Continuo
- Pórtico o marco

2.2.6 Por el Proceso Constructivo

- Vaciado en sitio
- Prefabricados
- Compuestos
- Por voladizos sucesivos

Figura 6. Puentes prefabricados. Adaptado de "Seminario web diseño de puentes con Csi Bridge", por Innova, 2016.

Figura 7. Puente por voladizos sucesivos. Adaptado de "Seminario web diseño de puentes con Csi Bridge", por Innova, 2016.

2.2.7 Por el Tipo de Cimentaciones

- Con caissons
- Con pilotaje
- Con cámaras de anclaje
- Con cimentación aligerada (Morales & Sapallanay, 2001, págs. 19-20)

2.3 SUPERESTRUCTURA DE SECCIÓN COMPUESTA

Cuando la superestructura de un puente está conformada por vigas metálicas y losa de concreto armado.

2.4 ACEROS ESTRUCTURALES

2.4.1 Aceros Convencionales

Son los aceros de formato comercial de uso general en las estructuras metálicas, muy utilizado actualmente en la industria de la construcción, vienen en presentaciones como planchas o perfiles laminados.

No son apropiados para construcciones importantes de ingeniería por tener bajo límite elástico y se consideran como aceros convencionales con código de diseño el S235 ($f_y=2500 \text{ kg/cm}^2$) y S355 ($f_y=3500 \text{ kg/cm}^2$).

2.4.2 Aceros de Alto Límite Elástico

Actualmente, se entiende aceros de alto límite elástico cuando la resistencia a la tracción supera los 460 MPa, esta comprendido dentro de este grupo de aceros estructurales: Primero, el acero de baja aleación tratado térmicamente obteniendo un $F_y = 70 \text{ ksi}$ (485Mpa) que contribuye en la mejora de las propiedades de resistencia, dureza y tenacidad. Segundo, el acero aleado de alta resistencia tratado térmicamente obteniendo un $F_y = 100 \text{ ksi}$ (690Mpa) que aporta una mayor tenacidad a baja temperatura.

De acuerdo al avance de la tecnología de materiales en estos tiempos, para obtener un acero de alto rendimiento (HPS) se debe contar con las características importantes del acero estructural que son la resistencia, soldabilidad, tenacidad, ductilidad, resistencia a la corrosión y conformabilidad. Estos materiales están disponibles en el mercado en forma de placas o láminas que permiten construir elementos como vigas o columnas armadas a medidas del diseño requerido que fácilmente aplican a construcciones de puentes, petroleras y edificaciones no convencionales. Debido a la existencia de los aceros de alto rendimiento (HPS) se puede entender con un concepto mas amplio las ventajas que aportarían incluso en la durabilidad en relación a la corrosión de estos aceros de altas prestaciones (Barker, 2013).

El acero de alto rendimiento (HPS), tiene un equilibrio optimizado en relación a las propiedades de los aceros para otorgar un máximo desempeño estructural en las construcciones de puentes, edificaciones e infraestructura en la industria de la construcción, minera y pesquera. Este grupo de aceros se distinguen por el aumento de la mejor soldabilidad y tenacidad.

En la **Figura 8**, se presenta una gráfica donde se verifica como fue la evolución de los tipos de acero estructural en los últimos años generando diferentes códigos de diseño, en función del límite elástico o grado de calidad del acero.

Figura 8. Evolución histórica de los tipos de acero. Adaptado de “Estudio de la interacción flector cortante en vigas híbridas de acero, Terreros, 2014.

Otro autor que desarrolló investigaciones sobre los aceros de alta resistencia fue Sedlaseck (Sedlaseck, 2004), quien determina la disminución de pesos de la estructura del puente sobre todo cuando el acero convencional S235 era reemplazado por aceros de alta resistencia tales como el S690 donde logra una reducción de pesos llegando hasta un 60%, asimismo concluyó que las diferencias significativas de pesos representaba un ahorro desde el punto de vista económico que comprende en materiales, insumos, mano de obra tanto en el proceso de fabricación hasta la instalación y lanzamiento.

Según Terreros (2014), en su tesis afirma que en el diagrama de la curva esfuerzo-deformación se verifica el comportamiento de tracción de todos los aceros estructurales donde tienen una similitud en la zona elástica hasta que cada uno de ellos llega a su respectivo límite elástico, siendo en la región de plastificación donde el acero convencional de menor límite elástico presenta mayor deformación en relación a los aceros de alta resistencia; posterior a esta meseta, se verifica el endurecimiento de la sección hasta terminar en la rotura de la sección.

En la Figura 9, se presenta la gráfica que verifica la descripción a mayor límite elástico menor deformación.

Figura 9. Tensión-deformación en aceros. Adaptado de “Vigas híbridas sometidas a sollicitaciones de cortante”, Rojas, 2013.

Como se observa en la **Figura 10**, a medida que aumenta la resistencia del acero, disminuye la ductilidad del mismo.

Figura 10. Curva típica de esfuerzo-deformacion para aceros estructurales. Adaptado por Barker, 2013.

En relación a las características de la ductilidad propia de todos los aceros estructurales, resultan los aceros de alto límite elástico poco eficientes ante un evento sísmico, llegando a una conclusión que es posible tomar en consideración la experiencia y el buen criterio del especialista estructural ante el análisis y diseño de las estructuras de puentes vehiculares. Entonces cuando se diseña en zonas sísmicas se requiere tomar en cuenta los aceros convencionales y los aceros de alta resistencia, aprovechando la mejor capacidad de los materiales de deformación de uno y el desempeño estructural del otro, obteniendo como resultado nuevos parámetros que son temas de investigación y discusión (Terrerros, 2014).

Existen distintos tipos de aceros de alto límite elástico, están en función de sus propiedades mecánicas, composición química, por lo general todos son denominados aceros de alto límite elástico HSS que a continuación se enumeran (Rojas, 2013).

- Acero de alta resistencia y baja aleación HSLA (High Strength Low Alloy Steel).
- Acero de alto desempeño HPS (High Performance Steel).
- Acero resistente a la corrosión W (High Weathering Steel).
- Acero con límite elástico constante (Constant Yield Point Steel).
- Acero con alta dureza (High Toughness Steel).
- Acero de alto desempeño para puentes BHS (Bridge High Performance Steels).

2.4.3 Utilización de Aceros de Alto Límite Elástico (HSS)

En Europa existe una serie de calidades HSS que no han sido ampliamente utilizadas para proyectos importantes, siendo una de las principales razones la falta de códigos de diseño adaptados para el uso de aceros entre el S700 y el S1100.

Por el contrario, en otros países como Suecia, Estados Unidos y Japón vienen utilizando el HSS desde hace décadas desarrollando las tecnologías de producción de acero.

2.4.4 En Estados Unidos

Una investigación publicada en 2002 (Azizinamini et al), realiza un resumen de las experiencias de Nebraska en Estados Unidos con respecto al uso de acero HPS en puentes de carretera. **En la Figura 11**, se muestra el primer puente construido con acero HPS, fue el Snyder South Bridge en Nebraska en 1997; es un puente de un solo vano y tiene una luz de 45.72m con cinco líneas de vigas armadas.

Figura 11. Puente Snyder South Bridge en Nebraska. Adaptado de “Vigas híbridas sometidas a solicitaciones de cortante propuesta de actualización de la norma venezolana COVENIN 1618:1998”, Rojas, 2013.

El puente original había sido construido en acero convencional de 345W y luego se volvió a construir utilizando acero HPS 485W sin modificar el diseño, solo con el propósito de investigar los procesos de fabricación.

En Estados Unidos, los aceros de límite elástico de 690 MPa (ASTM A514) existieron desde hace más de 40 años y además presentaban un comportamiento inadecuado con la ductilidad cuando esta era medida a través de un ensayo uniaxial tensión-deformación. Por estas razones se desarrolló en 1991 un programa de investigación que involucró a la Administración federal de Autopistas de los Estados Unidos (FHWA), al Instituto Americano de Hierro y Acero (AISI), y la Naval de Estados Unidos con el objetivo de mejorar las propiedades de los aceros de alta resistencia manteniendo su límite elástico. Los nuevos aceros de alto límite elástico HPS, se

consiguió como resultado de la aplicación de controles termo mecánicos en el proceso de fabricación. Esto permitió controlar los niveles de carbono, azufre y fósforo, para incrementar la soldabilidad, dureza ante la fractura y resistencia al agrietamiento. La aparición de los aceros HPS con distintos límites elásticos se clasifican: HPS 50W (50 Ksi - 344.7 MPa), HPS 70W (70 Ksi – 482.6 MPa), HPS 100W (100 Ksi – 698.54 MPa) (Rojas, 2013, pág. 14).

2.4.5 Ventajas de los Aceros HPS (FHWA)

- Mayores luces y menor cantidad de apoyos.
- Cimentaciones y superestructuras más económicas.
- Mayor espacio entre vigas y menor cantidad de vigas en una sección transversal.
- Menores requerimientos de mantenimiento.
- Menores costos iniciales y de ciclo de vida. (Rojas, 2013, pág. 14)

2.5 PROPIEDADES DEL ACERO ESTRUCTURAL

El acero es uno de los materiales estructurales más versátiles, cuenta con un alto límite elástico, poco peso, facilidad de fabricación e instalación en relación a otros materiales del sector construcción, por ello en la tesis de grado de Allauca (2009) se mencionan las propiedades más importantes que destacan del acero:

Elasticidad.- Propiedad de los cuerpos de volver a su forma original al cesar una fuerza deformante. Se consideran perfectamente elásticos si no han rebasado su límite de elasticidad.

Ductilidad.- Propiedad que tienen los materiales de soportar grandes deformaciones sin fallar bajo altos esfuerzos de tensión. Un material que no tenga esta propiedad probablemente será duro y frágil y se romperá al someterlo a un golpe repentino. Al sobrecargar una estructura dúctil, sus grandes deflexiones ofrecen evidencia visible de la inminencia de la falla.

Tenacidad.- También se le conoce como la capacidad de un material para absorber energía en grandes cantidades.

Alta resistencia.- La alta resistencia del acero por unidad de peso implica que será relativamente bajo el peso de las estructuras, gran ventaja en la construcción de grandes claros como el caso de puentes o edificios altos.

Uniformidad.- Las propiedades del acero no cambian apreciablemente en el tiempo como es el caso de las estructuras de concreto reforzado.

2.5.1 Propiedades Mecánicas según AASHTO

De la **Tabla 3**, se observa que los aceros estructurales se clasifican por los grados de acero para las estructuras metálicas y cada una de estas se definen por sus propiedades físicas y químicas.

Tabla 3

Propiedades Mecánicas por Forma, Resistencia y Espesor

Designación AASHTO	M 270M/ M 270 Grado 36	M 270M/ M270 Grado 50	M 270M/ M 270 Grado 50S	M 270M/ M 270 Grado 50W	M 270M/ M 270 Grado HPS 50W	M 270M/ M 270 Grado HPS 70W	M 270M/ M 270 Grado HPS 100W	
Designación Equivalente ASTM	A709/ A709M Grado 36	A709/ A709M Grado 50	A709/ A709M Grado 50S	A709/ A709M Grado 50W	A709/ A709M Grado HPS 50W	A709/ A709M Grado HPS 70W	A709/ A 709M Grado HPS 100W	
Espesor de planchas, in.	Hasta 4.0 incl.	Hasta 4.0 incl.	No aplica	Hasta 4.0 incl.	Hasta 4.0 incl.	Hasta 4.0 incl.	Hasta 2.5 incl.	Sobre 2.5 hasta 4.0 incl.
	(100 mm)	(100 mm)		(100 mm)	(100 mm)	(100 mm)	(65 mm)	(65 mm a 100 mm)
Formas (secciones)	Todos los grupos	Todos los grupos	Todos los grupos	Todos los grupos	No aplicable	No aplicable	No aplicable	No aplicable
Resistencia a la Tracción mínima, F_u , ksi (kg/cm ²)	58 ksi	65 ksi	65 ksi	70 ksi	70 ksi	85 ksi	110 ksi	100 ksi
	4000 kg/cm ²	4600 kg/cm ²	4600 kg/cm ²	4950 kg/cm ²	4950 kg/cm ²	6000 kg/cm ²	7750 kg/cm ²	7050 kg/cm ²
Esfuerzo de Fluencia Mínimo o Resistencia a la Fluencia Mínima F_y , ksi (kg/cm ²)	36 ksi	50 ksi	50 ksi	50 ksi	50 ksi	70 ksi	100 ksi	90 ksi
	2500 kg/cm ²	3500 kg/cm ²	3500 kg/cm ²	3500 kg/cm ²	3500 kg/cm ²	4950 kg/cm ²	7050 kg/cm ²	6340 kg/cm ²

Fuente: Extraído de manual de puentes MTC, 2018.

2.6 NORMATIVA

2.6.1 Reglamento AASHTO-LRFD

En el Perú, dentro del marco de sus atribuciones y competencias, la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (DGCF) del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), elaboró la propuesta de reglamento de puentes, basado en las Especificaciones AASHTO LRFD para el diseño de Puentes Carreteros del American Association of State Highway and Transportation Officials. Este manual precisa requisitos mínimos para el análisis y diseño de puentes vehiculares y peatonales, quedando a criterio del especialista la relevancia y los límites de las especificaciones cuando resulte pertinente.

Este manual contiene aspectos relevantes a considerar:

- Filosofía del Diseño
- Sobrecarga de Diseño

2.6.2 Otros Reglamentos

Según Arellano (2008), en su tesis señala que como antecedente de los diferentes sismos producidos alrededor del mundo, muchos códigos de la calidad de los materiales y normas sobre diseños de puentes fueron revisados a causa de la incorporación ; teniendo como los principales códigos mundiales que fueron actualizados tales el Eurocode, el Design Specifications of Highway Bridges de Japón, el Transit New Zealand Bridge Manual, el AASHTO y el Caltrans (California Transportation).

Los requerimientos de análisis, diseño y desempeño de cada puente dependen de la importancia del mismo en cada reglamento. En los códigos europeos y la norma de Nueva Zelanda, la fuerza de diseño es factorizada por el factor de importancia. En los códigos americanos (ASSHTO y Caltrans), la importancia del puente influye en el factor de modificación de respuesta; mientras que, en el código japonés, la importancia del puente es reflejada en la evaluación del factor de ductilidad permitida en la infraestructura (Arellano, 2008, pág. 19).

2.6.3 Secciones de la norma AASHTO LRFD

Para aplicar la herramienta del software CSiBridge en el diseño de puentes se requiere como base a las normas que están divididas en secciones y estas contienen artículos. En la **Tabla 4**, se indica las secciones y artículos revizados del AASHTO.

Tabla 4

Secciones de AASHTO LRFD

Sección	Artículo	Descripción
Introducción	1.3.2.1-1	Expresión general para el diseño LRFD.
	3.3.2	Cargas.
	3.4.1-1	Combinaciones de carga.
Cargas y factores de carga	3.5.1-1	Densidades.
	3.6.1.1.2-1	Factor de presencia múltiple.
	3.6.2.1-1	Incremento por carga dinámica.
Análisis y evaluación estructural	4.6.2.6	Ancho del ala superior
	6.4.1-1	Propiedades mecánicas de los aceros estructurales.
	6.7.3	Requerimientos mínimos
	6.10.1	Sección de miembros a flexión.
	6.10.5.1	Secuencia de cargado.
	6.10.2.1	Comprobación de las proporciones de los miembros.
	D6.1	Cálculo del momento plástico.
Estructuras de Acero	D6.2	Cálculo del momento de fluencia.
	D6.3	Cálculo de la profundidad comprimida del alma.
	6.10.3	Constructibilidad.
	6.10.8.2.2	Resistencia al pandeo local.
	6.10.8.2.3	Resistencia al pandeo lateral torsional.
	6.5.2/6.10.4	Estado límite de servicio.
	6.5.4/6.10.6	Estado límite de resistencia.
	6.10.9.3	Diseño por corte en almas rigidizadas.

Fuente: Propia

2.7 FILOSOFÍA DE DISEÑO

Según Kulicki (2014), en el capítulo 5 del Bridge Engineering Handbook: los puentes deberán ser diseñados teniendo en cuenta los Estados Límite que se especificarán, para cumplir con los objetivos de constructibilidad, seguridad y servicialidad, así como con la debida consideración en lo que se refiere a inspección, economía y estética.

Todos los componentes y conexiones deberán satisfacer, para cada estado limite la ecuación 1.3.2.1-1 de las especificaciones de la AASHTO. Para los estados límite de servicio y evento extremo, los factores de resistencia deberán tomarse como 1.0

$$\sum n_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n = R_r$$

(Ec. 1.3.2.1-1 de las especificaciones de la AASHTO)

Siendo:

Para cargas donde se utiliza el valor máximo de γ_i : $n_i = n_D \ n_R \ n_I \geq 0.95$

Para cargas donde se utiliza el valor mínimo de γ_i : $n_i = 1/ \ n_D \ n_R \ n_I \leq 1.0$

Donde:

γ_i = Factor de carga, aplicado a las solicitaciones.

ϕ = Factor de resistencia, aplicado a la resistencia nominal.

n_i = Modificador de carga.

n_D = Factor relacionado a la ductilidad.

n_R = Factor relacionado a la redundancia.

n_I = Factor relacionado a la importancia operacional.

Q_i = Solicitación

R_n = Resistencia nominal

R_r = Resistencia factorizada = ϕR_n

La **Tabla 5**, muestra los valores de los modificadores de carga para el estado límite de Resistencia. Para todos los demás estados límite los modificadores de carga serán iguales a 1.

Tabla 5

Modificadores de Carga n_i

Modificador de carga		Aplicación
n_D	≥ 1.05	Componentes y conexiones no dúctiles.
	$= 1.00$	Diseños convencionales y detalles que cumplan con las especificaciones AASHTO.
	≥ 0.95	Componentes y conexiones dúctiles.
n_R	≥ 1.05	Miembros no redundantes.
	$= 1.00$	Niveles convencionales de redundancia.
	≥ 0.95	Miembros redundantes.
n_I	≥ 1.05	Puentes críticos o esenciales.
	$= 1.00$	Puentes típicos.
	≥ 0.95	Puentes relativamente poco importantes.

Fuente: Extraído de Acevedo (2015)

Figura 12. Probabilidad de ocurrencia Q_u y R_n . Adaptado de “Introducción a la fiabilidad como base a la filosofía de diseño”, por Kulicki, 2014.

Estado Límite de Servicio. - Considerado como una restricción sobre los esfuerzos, deformaciones y ancho de grietas bajo condiciones regulares de servicio.

Estados Límites de Fatiga y Fractura. - Referido como un juego de restricciones en el rango de esfuerzos causados por un solo camión de diseño que ocurre en el número esperado de ciclos correspondientes a ese rango de esfuerzos.

El estado de límite de fractura será tomado en cuenta como un juego de requerimientos de tenacidad del material.

El estado límite de fatiga asegura limitar el desarrollo de grietas bajo cargas repetitivas para evitar la rotura durante la vida de diseño de puentes.

Estado Límite de Resistencia. - Referido para asegurar la resistencia y estabilidad. Ambas, local y global son dadas para resistir las combinaciones especificadas de carga que se espera que un puente experimente durante su vida de diseño. Bajo el estado límite de resistencia podría ocurrir un daño estructural, pero la integridad completa de la estructura se espera que se mantenga.

Estado Límite de Evento Extremo. - Será tomado en cuenta para asegurar la supervivencia estructural de un puente durante un sismo importante o durante inundaciones o cuando es chocado por un buque, vehículos o flujos de hielo, ocurridos bajo condiciones especiales. Se considera que el Estado Límite de Evento Extremo ocurrirá una sola vez con un periodo de retorno más grande que el de la vida de diseño del puente. (Manual de Puentes MTC, 2018, págs. 84-85)

2.8 SOBRECARGA DE DISEÑO

A continuación, se presenta una comparación de los diferentes tipos de sobrecarga que se han venido usando en el diseño de puentes en nuestro medio, incluyendo los dos camiones más representativos del Reglamento Nacional de Vehículos vigente.

- AASHTO Estándar: HS20, HS25
- AASHTO LRFD: HL-93
- Reglamento Francés: Sistema A, C-30

- Reglamento Nacional de Vehículos: T3S3, C4 (Ampuero Alata, 2014, pág. 129)

En la **Figura 13**, se muestra el camión de diseño mas representativo con sobrecarga HL93.

Figura 13. Características del camión de diseño.

Adaptado del manual de puentes del MTC, 2018.

2.9 ANÁLISIS SÍSMICO

En un puente simplemente apoyado el análisis sísmico aplica para la subestructura que son los estribos que interactúan con el suelo; asimismo el alcance del trabajo de investigación comprende toda la superestructura es decir el tablero de concreto y las vigas metálicas, quedando definido que este análisis no se desarrollará.

CAPÍTULO III: ESTUDIO DE CASO

3.1 INTRODUCCIÓN

El proyecto de Investigación está delimitado al mejoramiento de las superestructuras de un puente del tipo sección compuesta con la utilización de vigas híbridas, estas vigas tienen la particularidad de estar conformadas con aceros de alta resistencia en los elementos de las vigas. Para demostrar la nueva configuración estructural híbrida aplicamos a un proyecto existente la “Construcción del Puente Vehicular Sondondo” diseñado con el acero convencional de Grado 36 (ASTM A36) y tomamos todos los estudios básicos de ingeniería que requiere de acuerdo a la complejidad para determinar su análisis y diseño de las nuevas vigas.

3.2 NOMBRE DEL PROYECTO

“CONSTRUCCIÓN PUENTE VEHICULAR SONDONDO”

3.3 LOCALIZACIÓN

Departamento : Ayacucho

Provincia : Lucanas

Distrito : Cabana Sur

Lugar : Río Sondondo

3.4 VÍAS DE ACCESO

Para acceder a la zona del proyecto se tiene el siguiente recorrido: Ayacucho – Huancapi – Cangallo – Querobamba – Huacaña – Santa Ana de Huaycahuacho – Aucará – Cabana Sur – Sondondo con una distancia de 340 km.

Sondondo, se encuentra a una altitud de 2900 msnm, y está situada entre los 14°17'44.25" de latitud sur y los 73°56'30.88" de longitud oeste del meridiano de Greenwich.

Limita por el Norte con el centro poblado Ccecca, por el Sur con el distrito de Chipao, por el Este con el distrito de Huacaña y por el Oeste con el distrito de Cabana Sur. Para la vía de comunicación terrestre desde la capital: conecta Lima - Ica – Nasca – Puquio – Cabana Sur – Sondondo con una distancia de 720 km.

Figura 14. Ubicación de Sondondo.

Fuente: Extraído de Sondondo, 2020.

3.5 ANTECEDENTES

El Proyecto Construcción del puente vehicular Sondondo es parte integrante del PIP “Construcción Carretera Cabana – Sondondo – Chipao”, tiene un estudio de pre-inversión a nivel de perfil con declaración de Viabilidad el mismo que ha sido registrado con el código 11868. Este Estudio Definitivo, ha sido elaborado por la Municipalidad Distrital de Aucará conforme a las exigencias del Inade.

Figura 15. Vista panorámica de Sondondo. Fuente:

Extraído de Sondondo, 2020.

3.6 INFORMACIÓN DEL PROYECTO

Según la Municipalidad Distrital de Aucará, el proyecto comprende la construcción de un puente carrozable acorde a la siguiente información y anexos (B, C, y D).

Tipo	: Losa de concreto armado y vigas metálicas
Luz	: 50.00 ml
Número de vía	: Uno
Ancho de vía	: 3.60 ml
Ancho de vereda	: 0.80 ml cada uno
Sobrecarga	: HL-93
Norma de diseño	: AASHTO – LRFD
Estribos	: Altura = 15.00 m
Concreto	: $f'_c=280 \text{ kg/cm}^2$ para la losa del puente : $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ para el parapeto de estribos y aletas
Acero	: $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$
Cimentación	: A 5.00 m por debajo del punto más bajo del río
Espesor del tablero	: 0.20 ml
Número de vigas	: Dos
Baranda	: De fierro galvanizado

CAPÍTULO IV: MODELAMIENTO Y RESULTADOS DE ANALISIS

ESTRUCTURAL

4.1 MODELAMIENTO Y CARGAS DE DISEÑO

4.1.1 Descripción del modelo

Para el proyecto se aplica el software CSI Bridge versión 18.1.1 como herramienta para el modelado, análisis y diseño. El programa tiene predefinido las secciones donde facilita las características de diseño es decir es un software paramétrico donde cualquier dato que cambiamos se refleja en el modelo.

El programa construye un modelo de elementos finitos de la estructura analizada, para el caso de la viga se denomina frame y para el elemento losa se denomina Shell.

4.1.2 Cargas Vehiculares

La carga viva vehicular (HL-93) de la especificación AASHTO LRFD está conformada por la combinación de:

Camión de Diseño + Carga Distribuida o Tándem de Diseño + Carga Distribuida

- Camión de Diseño: corresponde al camión de 32.6Ton (72kip) con el eje delantero de 3.63Ton (8kip) y 2 ejes posteriores de 14.52Ton (32kip). La distancia entre líneas de ruedas es de 1.80m.
- Tándem de Diseño: conformado por 2 ejes de 110kN (25kip) espaciados longitudinalmente 1.20m y con distancia entre ejes de ruedas de 1.80m.
- Carga Distribuida: Consiste de una carga de 0.95 ton/m (0.64kip/ft) distribuida uniformemente en dirección longitudinal, y aplicada transversalmente en un ancho de 3.00m. A diferencia de la carga HS20 no considera cargas concentradas.

4.1.3 Normas

- AASHTO LRFD 2017
- Manual de Puentes MTC 2018

4.1.4 Validación del modelo

Flector y cortante por peso propio.

Figura 16. Calculo manual de M y V por DC.

Fuente: Elaboracion propia

4.1.5 Combinaciones de carga

Para este caso de interés se considera las combinaciones de cargas por estado límites por Resistencia I y Servicio II. Estos estados se evalúan de manera independiente con sus propias condiciones.

El estado límite de resistencia, evalúa la capacidad de resistencia de los elementos a la rotura.

El estado límite de servicio, evalúa la fisuración y las deflexiones de los elementos.

Tabla 6

Combinaciones de carga

Cargas	DC	DW	LL	IM
Factores	1.25	1.50	1.75	1.75

Fuente: Propia

4.2 RESULTADOS DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Para realizar el análisis estructural de un puente vehicular de sección compuesta fue necesario referir la tesis de Barrantes (2018), quien aplica la norma, materiales, cargas, y filosofía de diseño que a continuación se desarrollará con datos propios de la investigación que determinará resultados de parámetros desconocidos para su debida interpretación y discusión.

4.2.1 Introducción

El puente a construir es parte del proyecto “Construcción Carretera Cabana-Sondondo-Chipao. La concepción del puente es del tipo sección compuesta donde la superestructura está conformada de un tablero de concreto y vigas metálicas híbridas para su análisis y diseño.

En la Figura 17, El puente consta de una vía de 3.60 metros, un ancho de vereda de 0.80 metros cada uno, la sección en total tendrá 5.30 metros de ancho y la superficie de rodadura es de 5 centímetros de espesor de asfalto (Municipalidad Distrital de Aucará, s.f.).

Figura 17. Sección transversal de la superestructura del puente de Sondondo. Adaptado de “Construcción puente vehicular Sondondo”, por la Municipalidad de Aucará.

Figura 18. Sección longitudinal de la superestructura del puente de Sondondo. Adaptado de “Construcción puente vehicular Sondondo”, por la Municipalidad de Aucará.

El puente tendrá un tramo de 50 metros de luz, teniendo dos apoyos que constan de una viga cabezal soportadas sobre un estribo izquierdo y otro estribo derecho con cimentación directa.

4.2.2 Normativa Utilizada para el Diseño

- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications
- AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design
- Manual de Puente MTC

4.2.3 Solución Estructural

El análisis y diseño de vigas híbridas reducirá los aceros convencionales en puentes vehiculares con luces de 50m de Ayacucho.

4.2.4 Materiales

4.2.4.1 Concreto

- Resistencia a la compresión: $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$ (losa del tablero)
- Peso específico $\gamma_c = 2500 \text{ kg/m}^3$

4.2.4.2 Acero de refuerzo

- Límite de fluencia: $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$
- Peso específico $\gamma_s = 7850 \text{ kg/m}^3$

4.2.4.3 Acero Estructural

- ASTM A709 Grado50: $f_y = 50 \text{ ksi} = 3515 \text{ kg/cm}^2$
- ASTM A709 HPS Grado70: $f_y = 70 \text{ ksi} = 3515 \text{ kg/cm}^2$
- Peso específico $\gamma_s = 7850 \text{ kg/m}^3$

4.2.5 Cargas

Según Barrantes (2018), en su tesis sobre puentes de sección compuesta con vigas metálicas I y tablero de concreto, se consideran las siguientes cargas definidas y empleadas para determinar las demandas actuantes en los componentes de la estructura.

4.2.5.1 Peso Propio (DC)

Se utilizaron los pesos unitarios del concreto armado de 2.50 ton/m^3 y del acero de 7.85 ton/m^3 para la determinación de las demandas por peso propio en los elementos estructurales.

4.2.5.2 Cargas Muertas (DW)

Se ha considerado como cargas muertas la superficie de rodadura con un peso unitario de 2.20 ton/m^3 , la vereda y barrera con un peso para el concreto armado de 2.50 ton/m^3 , la baranda metálica con un peso de 0.05 ton/m .

4.2.5.3 Carga Viva Vehicular (LL+IM)

La carga viva de diseño es la denominada HL93 de la especificación AASHTO LRFD. Esta carga considera la aplicación de cargas correspondientes al camión de diseño, al tándem de diseño y a la carga distribuida de diseño.

4.2.5.4 Carga Viva Peatonal (PL)

La carga viva peatonal se considera una carga uniforme distribuida de 0.36 ton/m^2 según la especificación AASHTO LRFD.

4.2.6 Consideraciones para el Diseño

4.2.6.1 Filosofía de Diseño

Los puentes se deben diseñar considerando los estados límites especificados en la metodología LRFD a fin de lograr los objetivos de constructibilidad, seguridad y serviciabilidad, considerando debidamente los aspectos relacionados con la inspeccionabilidad, economía y estética.

- Metodología de Diseño LRFD
- Estados Límites
- Factores de Modificación de cargas

4.2.7 Análisis y Diseño de la Superestructura

4.2.7.1 Principales Características del Puente

- Número de tramos: $N_{spans} = 1$
- Longitud de tramo: $L_{span} = 50.00 \text{ m}$
- Angulo de inclinación: $Skew = 0 \text{ deg}$
- Numero de vigas: $N_{girders} = 2$
- Espaciado entre vigas: $S = 2.30 \text{ m.}$
- Voladizo de la sección: $Soverhang = 0.85 \text{ m}$
- Espaciado entre tramas: $L_b = 5.00 \text{ m}$
- Límite elástico del alma: $F_{yw} = 3515 \text{ kgf/cm}^2$
- Límite elástico de alas: $F_{yf} = 3515 \text{ kgf/cm}^2 - F_{yf} = 4920 \text{ kgf/cm}^2$
- Resistencia del concreto: $f'_c = 280 \text{ kgf/cm}^2$
- Resistencia del reforzamiento: $f_y = 4200 \text{ kgf/cm}^2$
- Espesor del tablero: $t_{deck} = 20 \text{ cm}$

- Densidad del acero: $W_s = 7850 \text{ kg/m}^3$
- Densidad del concreto: $W_c = 2500 \text{ kg/m}^3$
- Peso del parapeto: $W_{par} = 50 \text{ kg/m}$
- Ancho de la sección: $w_{deck} = 5.30 \text{ m}$
- Ancho de la carretera: $w_{roadway} = 3.60 \text{ m}$

4.2.7.2 Modelo de Análisis Estructural

Para el cálculo de las demandas en la estructura se desarrolló un modelo de análisis en computadora, para ello se empleó el programa de análisis CSi Bridge. A continuación, se describe el diagrama de flujo de diseño para un puente aplicado al programa.

Paso 01:

- Definir una alineación en planta y elevación.
- Definir la longitud.
- Definir el carril.

Figura 19. Análisis y Diseño con Csi Bridge.

Fuente: Elaboración propia

Paso 02:

Definir materiales

- Concreto: 280 kg/cm²
- Acero de refuerzo: A615Gr60
- Acero A36, acero A709 Gr50 y acero A709 Gr HPS-70W

Figura 20. Análisis y Diseño con Csi Bridge

Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Análisis y Diseño con Csi Bridge

Fuente: Elaboración propia

Figura 22. Análisis y Diseño con Csi Bridge

Fuente: Elaboracion propia

Paso 03:

- Elegimos la sección transversal para el tablero

Figura 23. Sección transversal del tablero del puente de Sondondo. Adaptado de “Construcción puente vehicular Sondondo”, por la Municipalidad de Aucará.

Paso 5:

- Definir el tipo de diafragma

Figura 26. Análisis y Diseño con Csi Bridge

Fuente: Elaboración propia

Paso 06:

- Definir el tipo de apoyo (apoyo fijo o móvil)

Figura 27. Análisis y Diseño con Csi Bridge.

Fuente: Elaboración propia

Paso 07:

- Definir la carga viva de diseño HL 93

Figura 28. Análisis y Diseño con Csi Bridge

Fuente: Elaboración propia

Paso 08:

- Definir los patrones de carga.

Figura 29. Análisis y Diseño con Csi Bridge

Fuente: Elaboración propia

Paso 09:

- Definir la carga muerta.

Figura 30. Análisis y Diseño con Csi Bridge

Fuente: Elaboración propia

Paso 10:

- Asignamos apoyos, diafragmas y cargas al objeto puente.

Figura 31. Análisis y Diseño con Csi Bridge

Fuente: Elaboración propia

Paso 11:

- Generar o actualizar el modelo.

Figura 32. Análisis y Diseño con Csi Bridge

Fuente: Elaboración propia

Paso 12:

- Definir los casos de carga.

Figura 33. Análisis y Diseño con Csi Bridge

Fuente: Elaboración propia

Paso 13:

- Definir las combinaciones de cargas.

Ver Anexo E, donde se encuentran los valores que corresponde según las cargas consideradas en el análisis y diseño de nuestro estudio, que aplica en este caso.

Figura 34. Análisis y Diseño con Csi Bridge

Fuente: Elaboración propia

Para la determinación de los esfuerzos en la estructura y para el cálculo de la capacidad de los elementos se emplearon los criterios establecidos en el Especificación de Diseño de Puentes de AASHTO-LRFD.

Todos los esfuerzos calculados durante la Construcción, Servicio y Resistencia Última de la estructura se encuentran por debajo de los valores para sus respectivas propiedades resistentes establecidas en la especificación AASHTO LRFD.

4.2.8 Verificación de las Deflexiones por Carga Viva

La verificación de deflexión debido a la sobrecarga de diseño HL93 es como sigue:

La máxima deflexión absoluta con 1 carril cargado, se ha investigado la carga que produce la máxima deflexión de acuerdo al Art. 3.6.1.3.2 la deflexión se deberá tomar como el mayor de los siguientes valores:

- La deflexión debida al camión de diseño solamente, o
- La deflexión debida al 25 por ciento del camión de diseño considerado juntamente con la carga del carril.

En la **Figura 35**, se muestra la deflexión calculada utilizando el programa de cálculo estructural.

Figura 35. Deflexión debida HL93

Fuente: Elaboración propia

La deflexión leída del modelo es 46.18 mm.

El valor máximo para la deflexión es:

$$L / 800 = 50000 \text{ mm} / 800 = 62.5 \text{ mm}$$

$$46.18 \text{ mm} < 62.5 \text{ mm} \quad \text{OK!}$$

Por lo tanto, el puente cumple con la verificación de deflexión para la carga viva de diseño.

4.2.9 Resultados del Analisis Estructural

A continuación, se presentan los resultados del análisis estructural para la viga, se presentan los diagramas de momentos flector y fuerza cortante para los diferentes tipos de carga DC, DW, LL, IM.

Figura 36. Diagrama de momentos flector por DC

Fuente: Elaboración propia

Figura 38. Diagrama de momentos flector por DW

Fuente: Elaboración propia

Figura 37. Envolvente de momentos flector por [HL93] LL+IM

Fuente: Elaboración propia

Figura 39. Diagrama de fuerza cortante por DC

Fuente: Elaboración propia

Figura 40. Diagrama de fuerza cortante por DW.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4141. Envolverte de fuerza cortante por [HL93] LL+IM.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO V: DISEÑO DE LAS VIGAS

5.1 VALIDACIÓN DE LA RESISTENCIA A USAR (FY)

5.1.1 Ensayo de Tracción con Probeta (Norma ASTM A370)

5.1.1.1 Objetivos

- Determinar el comportamiento del acero estructural realizando un ensayo de tracción en una muestra de acero estructural.
- Determinar las principales propiedades del acero ensayado.

5.1.1.2 Equipo

- Máquina Universal de Ensayos, marca LG, capacidad 30 toneladas.
- Vernier digital, marca MITUTOYO, aproximación 0.01 mm.
- Dial de deformaciones para tracción. Apreciación: 0.0001 in.
- Compás de porcentajes Apreciación: 1 %.

Figura 42. Máquina de universal de ensayo a tracción. Adaptado de “Ensayo de tracción en acero”, por Ochoa, 2012.

5.1.1.3 Probeta

Lámina de Acero: a mm x b mm (Dimensiones de la sección expuesta para la tracción).

Figura 43. Probeta de placa metálica. Adaptado de “Ensayo de tracción en acero”, por Ochoa, 2012.

5.1.1.4 Procedimiento

- Determinar la capacidad y apreciación de cada equipo a utilizar.
- Determinar las dimensiones (a , b , l) de la probeta utilizando el calibrador.
- Preparar la máquina para ensayos a tracción, colocar los aditamentos correspondientes para sujetar la lámina de acero.
- Colocar el Dial de Deformaciones para Tracción de manera que permita observar las lecturas obtenidas al aplicar las cargas de manera controlada hasta que la lámina de acero falle.
- Registrar los valores de las deformaciones y las cargas en tablas.
- Medir longitudes finales en los tramos de la longitud de medida.
- Con los valores, obtener gráfico Esfuerzo vs. Deformación, gráfico de % de deformación vs. Tramos.

Figura 44. Deformación unitaria y diagrama esfuerzo-deformación.

Fuente: Extraído de <https://www.youtube.com/watch?v=RYHkxIAnvOk>

5.1.2 Análisis Químico Cuantitativo (ASTM E415)

Este tipo de análisis permite determinar los elementos presentes en una muestra, así como el porcentaje de cada uno de ellos. Este método consiste en detectar las longitudes de onda característica de cada elemento cuando sus electrones son excitados mediante una chispa. En la **Figura 45**, se muestra el método de ensayo para el análisis de espectrometría de emisión, principalmente para probar tales materiales para el cumplimiento de las especificaciones de composición. El estándar más popular para este tipo de análisis en materiales metálicos es el ASTM-E415.

Figura 45. Equipo de espectrometría de emisión.

Fuente: Extraído de <http://www.cyti.com.mx>

5.1.3 Informe Técnico

Revisar Anexo F.

5.1.4 Conclusiones

- Con el ensayo se determinó de forma experimental la resistencia mecánica y la ductilidad de la lámina de acero estructural al aplicarle una fuerza de tracción con velocidad constante.
- Se comprobó que la probeta sometida a un esfuerzo de tracción uniaxial desarrolla una curva esfuerzo-deformación hasta llegar a la rotura.
- La ductilidad de la lámina de acero se va perdiendo a medida que aumenta su resistencia.
- En el gráfico se observó una zona plástica donde los esfuerzos permanecen prácticamente constante, pero va aumentando continuamente la deformación.
- La probeta N°1 determina una resistencia mecánica con $f_y=480$ MPa, quedando demostrado que el acero corresponde al tipo A709 grado HPS 70W como lo indicó el proveedor.
- Los ensayos de tracción y análisis químico del acero estructural en conclusión permiten cumplir con los requerimientos de las especificaciones técnicas del proyecto, asimismo debe estar conforme a los certificados de calidad del material emitido por los fabricantes.

5.2 DISEÑO DE VIGA DE ALMA LLENA SEGÚN AASHTO LRFD

5.2.1 Propiedades y Parámetros

5.2.1.1 Propiedades Geométricas de la Sección Compuesta

$L := 50.00\text{m}$	Luz entre ejes de apoyos
$W_t := 4.00\text{m}$	Ancho total de puente
$W := 3.60\text{m}$	Ancho de calzada
$S := 2.30\text{m}$	Separación entre eje de vigas
$O_v := 0.85\text{m}$	Volado medido al eje de viga

$t_s := 0.216\text{m}$	Espesor de losa
$t_h := 0\text{m}$	Altura de Haunch
$b_h := 0\text{m}$	Ancho de Haunch
$N_b := 2$	Número de vigas

5.2.1.2 Propiedades Geométricas de Viga

$t_{f.1} := 38\text{mm}$	Espesor del ala inferior
$b_{f.1} := 500\text{mm}$	Ancho del ala inferior
$t_w := 16\text{mm}$	Espesor del alma
$D := 1800\text{mm}$	Altura del alma
$t_{f.2} := 25\text{mm}$	Espesor del ala superior
$b_{f.2} := 500\text{mm}$	Ancho del ala superior
$L_{b.cf} := 5000\text{mm}$	Separación entre diafragmas
$L_b := 2500\text{mm}$	Longitud no arriostrada (arriostramiento horizontal)

5.2.1.3 Propiedades de los Materiales

$f'_c := 280\text{ kgf/cm}^2$	Resistencia a la compresión del concreto
$F_y := 50\text{ ksi}$	Límite de fluencia del acero estructural
$F_{yf.1} := 70\text{ ksi}$	Límite de fluencia del acero estructural ala inferior
$E_s := 29000\text{ ksi}$	Módulo de elasticidad del acero

5.2.1.4 Resultados del Análisis Estructural

$MDC := 512.42\text{ t.m}$
$MDW := 194.97\text{ t.m}$
$MLL_{IM} := 509.22\text{ t.m}$

$MLL_{IM. \text{ fatiga }} := 211.36 \text{ t.m}$

$V_u := 164.34 \text{ t}$

5.2.1.5 Parámetros

$NL := 1$ Numero de vías

$\phi_f := 1.00$ Factor de reducción por flexión

$\phi_v := 1.00$ Factor de reducción por corte

$\eta := 1$ Factor de modificación de cargas

$n := 8$ Relación Modular E_s/E_c

Requerimientos de Diseño

Para el puente compuesto utilizaremos secciones compuestas y de peralte constante en toda la longitud, no usaremos rigidizadores en el alma.

El grosor mínimo para las planchas de acero estructural es 8mm [A.6.7.3]

Las exigencias mínimas para el peralte según [A.2.5.2.6.3] es:

Peralte mínimo de sección compuesta $h_c \text{ min} = 0.040 L = 2\text{m}$

Peralte mínimo de viga $h_s \text{ min} = 0.033 L = 1.63\text{m}$

El peralte elegido para la viga es de 1.80m que es mayor que el mínimo requerido.

5.2.2 Diseño a Flexión

5.2.2.1 a. Esfuerzos en Sección compuesta

La secuencia de carga tal como se especifica en el [A.6.10.1.1.1] establece que en cualquier ubicación de la sección el esfuerzo elástico debido a las cargas aplicadas será la suma de los esfuerzos causados por las cargas aplicadas por separado de:

- (1) Viga metálica.
- (2) Sección compuesta a corto plazo (use $n = E_s/E_c$).

(3) Sección compuesta a largo plazo (use $3n = 3E_s/E_c$) para considerar la fluencia del concreto.

(4) Para el cálculo de la losa de concreto flexible en la región de momento negativo use la relación a corto plazo (use $= E_s/E_c$).

La carga permanente que se aplica antes de que la losa alcance el 75% de f'_c debe ser tomada por la viga de acero sola. Cualquier carga permanente y carga viva aplicada después de que la losa alcance el 75% de f'_c deberá ser tomada por la sección compuesta.

5.2.2.2 b. Esfuerzos en alas y miembros en flexión lateral [A.6.10.1.6]

Como se trata de un puente recto y sin esviamiento los esfuerzos por flexión lateral se consideran mínimos y el esfuerzo f_l se considera aquí cero.

$$f_l = 0 \text{ ksi}$$

5.2.2.3 c. Propiedades de sección fundamental

(1) Considerando la secuencia de cargado [A.6.10.5.1.1a]

Etapas 1.- Viga y losa fresca soportado solamente por la viga de acero.

Etapas 2.- Cargas muertas (carpeta asfáltica, bordillos, veredas y barandas) soportado por la sección compuesta a largo plazo.

Etapas 3.- Carga viva vehicular (LL + IM) soportado por la sección compuesta a corto plazo.

(2) Determinación de ancho efectivo de ala superior [A.4.6.2.6]

Viga interior

$$b_i = S = 2.3\text{m} \quad b_i = 2.00\text{m}$$

Viga exterior

$$b_e = b_i / 2 + O_v = 1.85\text{m}$$

(3) Relación modular [A.6.10.5.1.1b]

$$f'_c = 280 \text{ kgf/cm}^2 \quad n = 8$$

(4) Cálculo de las propiedades de sección

Viga de acero sola

$$n_p = 3$$

$$A_t = 6.03 \cdot 10^4 \text{ mm}^2 \quad y_{cg} = 837.59 \text{ mm} \quad I = 3.363 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4 \quad d = 1.863 \cdot 10^3 \text{ mm}$$

$$y_t = -1.025 \cdot 10^3 \text{ mm} \quad y_b = y_{cg} = 837.59 \text{ mm} \quad S_t = -3.279 \cdot 10^7 \text{ mm}^3 \quad S_b = 4.015 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

Sección compuesta a corto plazo $n=8$, $b_i = 2.00\text{m}$

$$n_p = 5$$

$$A_t = 1.143 \cdot 10^5 \text{ mm}^2 \quad y_{cg} = 1.373 \cdot 10^3 \text{ mm} \quad I = 7.043 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4 \quad d = 1.863 \cdot 10^3 \text{ mm}$$

$$H = 2.079 \cdot 10^3 \text{ mm} \quad y_{t\text{-slab},n} = -705.941 \text{ mm} \quad y_{t,n} = -489.941 \text{ mm} \quad y_{b,n} = y_{c,g} = 1.373 \cdot 10^3 \text{ mm}$$

$$S_{t\text{-slab},n} = -9.977 \cdot 10^7 \text{ mm}^3 \quad S_{t,n} = -1.438 \cdot 10^8 \text{ mm}^3 \quad S_{b,n} = 5.13 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

Sección compuesta a largo plazo $3n = 24$, $b_i = 2.00\text{m}$

$$n_p = 5$$

$$A_t = 7.83 \cdot 10^4 \text{ mm}^2 \quad y_{cg} = 1.098 \cdot 10^3 \text{ mm} \quad I = 5.15 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4 \quad d = 1.863 \cdot 10^3 \text{ mm}$$

$$H = 2.079 \cdot 10^3 \text{ mm} \quad y_{t\text{-slab},3n} = -980.856 \text{ mm} \quad y_{t,3n} = -764.856 \text{ mm}$$

$$y_{b,3n} = y_{c,g} = 1.098 \cdot 10^3 \text{ mm} \quad S_{t\text{-slab},3n} = -5.251 \cdot 10^7 \text{ mm}^3 \quad S_{t,3n} = -6.734 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

$$S_{b,3n} = 4.69 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

(5) Comprobación de las proporciones de los miembros [A.6.10.2.1]

Para almas sin rigidizador longitudinal:

$$D/t_w = 112.5 \leq 150 \quad \text{OK}$$

Para alas:

$$b_{f,1}/2t_{f1} = 6.579 \leq 12, \text{ OK} \quad b_{f,2}/2t_{f2} = 10 \leq 12, \text{ OK}$$

$$b_{f,1} = 500 \text{ mm} \geq D/6, \text{ OK} \quad b_{f,2} = 500 \text{ mm} \geq D/6, \text{ OK} \quad D/6 = 300 \text{ mm}$$

$$t_{f,1} = 38 \text{ mm} \geq 1.1 t_w, \text{ OK} \quad t_{f,2} = 25 \text{ mm} \geq 1.1 t_w, \text{ OK} \quad 1.1 t_w = 17.6 \text{ mm}$$

$$I_{yc} = 2.604 \cdot 10^8 \text{ mm}^4 \quad I_{yt} = 3.958 \cdot 10^8 \text{ mm}^4 \quad I_{yc}/I_{yt} = 0.658$$

$$0.1 \leq 0.658 \leq 10, \text{ OK}$$

(6) Cálculo del momento plástico [A.D6.1]

Para momento positivo

$$b_t = b_{f1} = 500 \text{ mm} \quad t_f = t_{f,1} = 38 \text{ mm}$$

$$D = 1.8 \cdot 10^3 \text{ mm} \quad t_w = 16 \text{ mm}$$

$$b_c = b_{f,2} = 500 \text{ mm} \quad t_c = t_{f,2} = 25 \text{ mm}$$

$$b_s = b_i = 2 \cdot 10^3 \text{ mm} \quad t_s = 216 \text{ mm}$$

$$F_{yt} = F_{yf,1}$$

$$P_t = F_{yt} \cdot b_t \cdot T_t = 935.083 \text{ tonnef} \quad P_c = F_y \cdot b_c \cdot t_c = 439.418 \text{ tonnef}$$

$$P_w = F_y \cdot D \cdot t_w = 1.012 \cdot 10^3 \text{ tonnef} \quad P_s = 0.85 \cdot f_c \cdot b_s \cdot t_s = 1.028 \cdot 10^3 \text{ tonnef}$$

En la **Figura 46**, aplica el caso I por lo que determinamos el caso donde nos encontramos; se puede observar que el eje neutro pasa por el alma de la viga de acero, esto indica que parte de la viga híbrida se encuentra en compresión, asimismo se puede señalar que la viga no trabaja aprovechando el material y más bien va disminuir su capacidad debido a que el tablero y las vigas no guardan una proporcionalidad desde el predimensionamiento a causa de las restricciones que se aplican al límite de la normativa.

Figura 46. Definición de variables en sección de momento positivo

Fuente: AASHTO LRFD, 2017

Calculo de la ubicación del eje neutro plástico (PNA)

$$Y_{PNA} = 426.633 \text{ mm} \quad Y_{PNA,t} = 667.633 \text{ mm}$$

$$Y_t = 2.06 \cdot 10^3 \text{ mm} \quad Y_w = 1.141 \cdot 10^3 \text{ mm} \quad Y_c = 228.5 \text{ mm} \quad Y_s = 108 \text{ mm}$$

$$d_t = 1.392 \cdot 10^3 \text{ mm} \quad d_w = 473.367 \text{ mm} \quad d_c = 439.133 \text{ mm} \quad d_s = 559.633 \text{ mm}$$

Por lo tanto el: $M_p = 2.652 \cdot 10^3 \text{ tonnef-m}$

(7) Cálculo del momento de fluencia [A.D6.2]

Momento positivo: $M_y = 2.319 \cdot 10^3 \text{ tonnef-m}$

(8) Cálculo de la profundidad comprimida del alma [A.D6.3]

Para momento positivo en el rango elástico [A.D6.3.1]

$D_c = 815.384 \text{ mm}$ Porción del alma en compresión rango elástico

Para momento positivo cuando se produce el momento plástico [A.D6.3.2]

$D_{cp} = 426.633 \text{ mm}$ Porción del alma en compresión para M_p

5.2.2.4 d. Constructibilidad [A.6.10.3]

(1) General [A.2.5.3] [A.6.10.3.1]

La Resistencia de las vigas durante la construcción se verifica que las alas sometidas

a compresión deben poseer un adecuado arriostramiento para evitar el pandeo local torsional bajo cargas de peso de la cubierta del concreto fresco.

(2) Flexión [A.6.10.3.2] [A.6.10.8.2]

Se debe comprobar el arriostramiento de las alas en compresión para garantizar que se desarrolle la capacidad de flexión del material.

$D_c / t_w = 101.923$ Relación de esbeltez para el alma

Factor de balanceo: $R_b = 1$

Factor de hibridez: $R_h = 0.976$

$\lambda_f = \frac{b_{fc}}{2t_{fc}} = 10$ Relación de esbeltez para el ala en compresión

$$\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E_s}{F_{yc}}} = 9.152$$

Verif_Ala= si ($\lambda_{pf} \geq \lambda_f$, “Ala compacta”, “Ala No compacta”)

Verif_Ala= “Ala No compacta”

Por lo tanto:

$$F_{nc} = \min (F_{nc.FLB}, F_{nc.LTB}) = (3.313 \cdot 10^3) \text{ kgf/cm}^2$$

El esfuerzo último máximo de compresión en ala en compresión:

$$f_{bu} = \frac{n * 1.25(M_{DC})}{S_t} = 1.953 * 10^3 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$f_l = 0 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$f_{bu} + \frac{1}{3}f_l = -1.953 * 10^3 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\phi_f * F_{nc} = 3.313 * 10^3 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Índice D/C para la resistencia a flexión en la etapa de construcción:

$$\frac{\left|f_{bu} + \frac{1}{3}f_l\right|}{\phi_f * F_{nc}} = 0.59 \quad OK!$$

5.2.2.5 e. Estado límite de servicio [A.6.5.2] [A.6.10.4]

(1) Deformaciones elásticas [A.2.5.2.6.2]

La deflexión máxima debido a la aplicación de la carga viva: 46.179 mm

(2) Deformaciones permanentes [A.6.10.4.2]

Se calculará los esfuerzos en las alas de la viga para la combinación de servicio II, teniendo en cuenta la secuencia de cargado antes expuesta.

$f_{fb} = 2.983 \cdot 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ Esfuerzo ala inferior

$f_{ft} = 2.313 \cdot 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ Esfuerzo ala superior

Índice D/C para la verificación en servicio en flexión

Ala inferior:

$$\frac{f_{f.b} + \frac{f_l}{2}}{0.95 * R_h * F_{yf.1}} = 0.654 \quad OK!$$

Ala superior:

$$\frac{|f_{f.t}|}{0.95 * R_h * F_y} = 0.71 \quad OK!$$

5.2.2.6 f. Estado límite de Resistencia [A.6.5.4] [A.6.10.6]

Sección compuesta en flexión positiva

Como la resistencia mínima a fluencia del ala superior y el ala inferior son diferentes la sección se clasifica como una sección No Compacta.

Chequeo de requerimiento de ductilidad

$D_p = Y_{PNA,t} = 667.663 \text{ mm}$ Distancia de la cara superior sección al E.N plástico.

$D_t = H = 2.079 \cdot 10^3 \text{ mm}$ Altura total de sección compuesta

$$0.42 D_t = 873.18 \text{ mm}$$

Verif_Ductilidad= si ($D_p \leq 0.42 D_t$, “OK”, “No Cumple”)

$D_p \leq 0.42 D_t$, OK Verificación de ductilidad

Se calculará los esfuerzos en alas de la viga para combinación de Resistencia I.

$f_{bu,t} = 3.956 \cdot 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ Esfuerzo ala inferior

$f_{bu,c} = -3.007 \cdot 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ Esfuerzo ala superior

Resistencia a flexión nominal:

$F_{nt} = 4.803 \cdot 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ Resistencia nominal a tensión

$F_{nc} = 3.431 \cdot 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ Resistencia nominal a compresión

Por lo tanto, los índices D/C para la capacidad a flexión:

Ala inferior:

$$\frac{f_{bu,t} + \frac{1}{3} f_l}{\phi_f * F_{nt}} = 0.824 \text{ OK!}$$

Ala superior:

$$\frac{|f_{bu,c}|}{\phi_f * F_{nc}} = 0.877 \text{ OK!}$$

5.2.3 Diseño a Corte

Almas rigidizadas [A.6.10.9.3]

$d_0 = 2500 \text{ mm}$ Separación entre rigidizadores

$V_p = 587.204 \text{ tonnef}$ Fuerza de corte plástico

$K = 7.592$ Coeficiente de pandeo por corte

$C=0.546$ Relación entre la resistencia al pandeo y a la fluencia

$$V_{cr} = C * V_p$$

$V_{cr} = 320.751$ tonnef Resistencia al pandeo por corte

$$V_n = V_{cr}$$

$\phi_v * V_n = 320.751$ tonnef Fuerza de corte resistente

$V_u = 164.34$ kg Fuerza de corte ultima

Índice D / C para la resistencia a corte en estado límite de resistencia será:

$$\frac{V_u}{\phi_v * V_n} = 0.512 \text{ OK!}$$

5.2.4 Generación de Planos

5.2.4.1 a. Plano Viga Homogénea Gr36 (G1)

Ver Anexo G.

5.2.4.2 b. Plano Viga Híbrida Gr-50 y Gr-HPS 70W (G2)

Ver Anexo H

5.2.5 Ratio por Peso Propio (DC)

En el caso de la viga G2 el índice D/C es de 0.87 por lo que el diseño estaría cumpliendo.

5.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.3.1 Metrados de Vigas de Alma Llena de la Superestructura de Puente

Ver Anexo I. Metrados de vigas G1 y G2.

En la **Figura 47**, se realizó un resumen comparativo de pesos y costos entre las vigas homogéneas e híbridas, obteniendo diferencias considerables. El comparativo se realizó a nivel de material de las vigas que se halla en la diferencia de pesos y el precio unitario en relacion a los aceros convencionales y aceros tipo HPS.

COMPARATIVO DE COSTOS DE VIGAS SEGÚN EL ACERO		
Luz=50m un carril	Viga Homogenea G1 Acero ASTM A36	Viga Híbrida G2 Acero ASTM A709 Gr-50+Gr-HPS 70W
Peso (Kg.)	73603.56	52789.17
P. Unitario (\$/Kg.)	1.32	1.44
Costo (\$)	97156.69	76016.41
Costo (\$/m.)	1943.13	1520.33

Figura 47. Comparativo de metrados y costos de vigas homogéneas e híbridas

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 48**, se muestra la gráfica obtenido de los pesos totales de las vigas de acero G1 y G2.

Figura 48. Comparativo de pesos viga G1 vs G2

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 49**, se describe una gráfica que expresa los costos parciales de las vigas G1 y G2 tomando en consideración el recurso material acero estructural.

Figura 49. Comparativo de costos viga G1 vs G2.

Fuente: Propia.

En la **Figura 50**, se obtiene una grafica que representa los costos por metro lineal tomando en cuenta solamente el recurso del material acero estructural para las vigas G1 y G2.

Figura 50. Comparativo de costos por metro lineal de vigas. Fuente:

Elaboración propia.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En relación al tema de estudio desarrollado, se puede concluir con los objetivos propuestos y hacer algunas recomendaciones que podría servir de consulta a los lectores que decidan seguir la investigación. Asimismo, es importante destacar que el tema en estudio abarca específicamente la superestructura de un puente tipo sección compuesta con luces de 50m de Ayacucho, sin embargo, el diseño alternativo empleado aplica a cualquier otro tipo de puentes con propiedades geométricas y parámetros propios.

6.1 CONCLUSIONES

Objetivo Específico 1: Usar aceros de grado HPS en las vigas híbridas metálicas de la súper-estructura del puente

- Se concluye que al realizar un diseño alternativo mediante las vigas híbridas en la superestructura del puente vehicular con luces de 50m de Ayacucho se está proponiendo utilizar los aceros A709 Gr-50 y A709 Gr-HPS 70W.
- Se concluye que al analizar aceros de alto rendimiento estructural como los tipos HPS 70W en algunas componentes de la viga se obtiene una reducción significativa de pesos con relación a las vigas homogéneas que están conformadas de un acero convencional de bajo límite elástico.
- Se concluye que una de las causas por el cual no tiene antecedentes el uso de estos aceros en el medio local se debe a la falta de investigación y ensayos de nuevos materiales.
- Se concluye que las normas locales como el manual de puentes del MTC no detalla a profundidad sobre las vigas de configuración híbrida que está en estudio.

Objetivo Específico 2: Modelar, analizar y diseñar la viga metálica en el escenario híbrido para interpretar los nuevos parámetros.

- Se concluye que el proyecto existente tiene algunas deficiencias según la normativa sobre los requerimientos mínimos de ancho de calzada y vereda en una zona rural, asimismo no están bien dados la relación de proporción entre el tablero de concreto y las vigas de acero; cuando se realizan los cálculos se presenta la compresión en la

parte superior de la viga disminuyendo su capacidad y por tanto no trabaja aprovechando el material.

- Se concluye que para el predimensionamiento de la viga se utilizó los requerimientos mínimos de diseño, sin embargo, se obtuvieron resultados con buen desempeño estructural cumpliendo las verificaciones en resistencia de momento y cortante y de servicio las deflexiones.
- Se concluye que en el análisis se cumple con las restricciones y verificaciones para una viga híbrida de un puente vehicular con luces de 50m de Ayacucho donde el ala superior y el alma trabajan con un acero A709 Gr-36 y para el ala inferior con un acero A709 Gr-HPS 70W.
- Se concluye que para elaborar un diseño alternativo con vigas híbridas en la superestructura se utilizó las especificaciones de diseño el AASHTO LRFD-2017.

Objetivo Específico 3: Determinar un análisis y diseño óptimo con reducción de acero en la viga metálica para las mismas solicitaciones.

- Se concluye que la viga híbrida propuesta logra esfuerzos a tracción y compresión debido a que el eje neutro pasa por el alma de la viga metálica como consecuencia de trabajar al límite con las restricciones en el predimensionamiento que se consideró tanto para las del proyecto existente.
- Se concluye que el cálculo de las vigas híbridas con aceros de diferente límite elástico en la sección compuesta contribuye a un diseño óptimo con reducción considerable de acero y en efecto se minimiza los costos, por lo tanto, en este proyecto aplica la configuración híbrida como una solución estructural por la contribución de los aceros de grado HPS en el desempeño de la superestructura de sección compuesta en puentes vehiculares con luces de 50m de Ayacucho.
- Se concluye que los ensayos realizados en la muestra del acero A709 Gr-70W por tracción y análisis químico validan la resistencia del acero con un $F_y=480$ Mpa, esto presenta un aporte importante cuando se calcula y diseña una viga híbrida que aplica a una sección compuesta.

- Se concluye con la determinación de los resultados y parámetros como el factor de hibridez de 0.976 que cumple las restricciones y afectan a la resistencia nominal. Por lo tanto, se comprueba el cumplimiento, los índices D/C de servicio en flexión en el ala inferior es 0.654, en el ala superior es 0.71; los índices D/C para la capacidad a flexión en el ala inferior es 0.824, en el ala superior 0.877 y finalmente el índice D/C para resistencia a corte en estado límite de resistencia es 0.512.

6.2 RECOMENDACIONES

Objetivo Específico 1: Usar aceros de grado HPS en las vigas híbridas metálicas de la súper-estructura del puente

- Se recomienda orientar la aceptación de los aceros tipo HPS en las vigas híbridas cuando se requiera diseños de estructuras importantes en puentes vehiculares con grandes volúmenes de acero, asimismo los proyectistas pueden incorporar en las especificaciones de los proyectos y las constructoras requerirlas para que finalmente las empresas proveedoras de acero puedan importarlos.
- Se recomienda el diseño de vigas híbridas en puentes vehiculares hasta luces de 60m como máximo, siempre que se mantenga dentro del tipo de puente de sección compuesta. Particularmente existen otros tipos de puentes para mayores luces que serán los apropiados.
- Se debe tener un especial énfasis en el proceso constructivo de las vigas híbridas con aceros de diferente límite elástico, por lo que se recomienda a la empresa contratista realizar el recalcu de las contraflechas de acuerdo a su metodología de montaje de tal manera de garantizar la geometría final de la estructura.

Objetivo Específico 2: Modelar, analizar y diseñar la viga metálica en el escenario híbrido para interpretar los nuevos parámetros

- Se recomienda que cuando se tiene puentes con vigas simplemente apoyadas mejorar el ala inferior con aceros de alto rendimiento HPS 70W en una configuración estructural híbrida y cuando se presente durante el proceso de diseño de las vigas.

- Se recomienda que, cuando se predimensiona se requiere tener experiencia y criterio para generar la mejor sección aprovechando la calidad de los materiales y la proporcionalidad entre viga y tablero.
- Se recomienda considerar en el análisis y diseño de la viga híbrida dos grados cercanos como el caso que aplica en el tema de estudio que conforman la hibridez el acero convencional A709 Gr-50 y el acero de alto rendimiento A709 Gr-HPS 70W.

Objetivo Específico 3: Determinar un análisis y diseño optimo con reducción de acero en la viga metálica para las mismas solicitaciones

- Se recomienda que, durante el proceso constructivo se debe realizar el diseño de montaje para verificar los esfuerzos y deformaciones que se hallen dentro de los limites.
- Se recomienda indagar sobre la unión del alma A709 Gr-50 y el ala A709 Gr-HPS 70W para futuras investigaciones que comprende al tema de la soldadura.
- Se recomienda que cuando se utilicen las vigas híbridas no es necesario emplear en la sección un refuerzo o platabanda en el ala inferior que comúnmente utilizan las vigas homogéneas por la cantidad de acero que requiere el diseño.

BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (2017). AASHTO-LRFD Bridge Design Specifications (8th Ed.). Washington DC (EE.UU.). Recuperado de <https://aportesingecivil.com/aashto-lrfd-bridge-design-specifications-8th-edition-2017/> [Consulta: 20 de marzo de 2020].
- Acevedo, V. (2015). Diseño de un Puente con Estructura de acero. (Tesis de Licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Lima: Perú). Recuperado de <http://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/9134/browse?type=author&value=Acevedo+Laos%2C+V%C3%ADctor+Manuel> [Consulta: 13 de abril de 2020].
- Allauca, J. (2009). Simulación de Puentes Mediante el Software SAP 2000 y Calificación de materiales y Soldaduras. (Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica. Riobamba: Ecuador). Recuperado de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/272> [Consulta: 10 de febrero de 2020].
- Ampuero, J. (2014). Manual de Diseño de Puentes. En ICG, Análisis, Diseño y Construcción de Puentes. Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia.
- Arellano, E. (2008). Análisis, Diseño y Comparación Estructural y Económica de Puentes en Concreto Presforzado con Sistemas de Aislamiento Sísmico. (Tesis de Licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Facultad de Ingeniería. Lima: Perú). Recuperado de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/browse?type=author&value=Arellano+Meza%2C+Eduardo+Francisco> [Consulta: 24 de febrero de 2020].
- Barker, R., & Puckett, J. (2013). Design of highway bridges: An LRFD approach. John Wiley & sons.
- Barrantes, A. (2018). Diseño de un puente tipo compuesto con vigas de acero y losa de concreto ubicado sobre la quebrada Japolccaya, distrito de Maca, Caylloma, Arequipa. (Tesis de Licenciatura, Universidad Católica de Santa María, Facultad de Arquitectura e

- Ingeniería Civil y del Ambiente. Arequipa: Perú). Recuperado de <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/7769> [Consulta: 30 de marzo de 2020].
- Centro de Diseño y Metrología Sena. (2016). Deformación unitaria y diagrama esfuerzo deformación [Archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=RYHkxIANvOk> [Consulta: 9 de mayo de 2020].
- Cervera, V. (2003). La intención de estos apuntes revisarlos periódicamente e introducir las nuevas filosofías de diseño de estructuras metálicas.
- Chen, W. F., & Duan, L. (2014). Bridge engineering handbook: Superstructure design (Vol. 2). CRC press.
- Collins, W., Sherman, R., Leon, R., & Connor, R. (2019). Fracture Toughness Characterization of High-Performance Steel for Bridge Girder Applications. Journal of Materials in Civil Engineering, 31(4), art. n°. 04019027. <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002636>
- Cyti. [Sitio web] [<https://cyti.com.mx/servicios/analisis-de-materiales/>]; equipos que determinan la composición química de los materiales metálicos. [Consulta: 15 de mayo de 2020].
- Innova Training Center. (2016). Seminario web diseño de puentes con CSI BRIDGE [Archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=QrIsB33hKv0> [Consulta: 09 de marzo de 2020].
- Instituto de la Construcción y Gerencia. (2013). Manual de Diseño de Puentes. Lima, Perú: Fondo Editorial ICG.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018). Manual de Puentes. Lima, Perú. Recuperado de https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/300272/d285999_opt.pdf [Consulta: 25 de marzo de 2020].

- Morales, R. & Sapallanay, R. (2001). Diseño de Superestructura Puente de Sección Compuesta. Lima, Perú.
- Municipalidad Distrital de Aucará. (s.f.). Construcción puente vehicular Sondondo. Expediente Técnico Definitivo, con registro de viabilidad 11868.
- Ochoa, A. (2012). Ensayo de tracción en acero [Captura de pantalla]. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/90512876/ENSAYO-DE-TRACCION-EN-ACERO> [Consulta: 15 de febrero de 2020].
- Peng, J., Xiao, L., Zhang, J., Cai, C. S., & Wang, L. (2019). Flexural behavior of corroded HPS beams. *Engineering Structures*, 195(0), 274–287. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.06.006>
- Kulicki, J. (2014). Highway bridge design specifications. *Bridge Engineering Handbook: Fundamentals*, Second Edition, pp. 113-130. <https://doi.org/10.1201/b15616>.
- Rojas, J. (2013). Vigas híbridas sometidas a solicitaciones de cortante Propuesta de actualización de la Norma Venezolana COVENIN 1618: 1998 (Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de Catalunya, Facultat de Ingenieria Civil. Barcelona: España). Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/18448>. [Consulta: 21 de febrero de 2020].
- Sondondo. (2020). [Sitio web] [<https://www.sondondo.com/>]; contiene información sobre la institución. [Consulta: 15 de febrero de 2020].
- Terreros, A. (2014). Estudio de la interacción flexión-cortante en vigas híbridas de acero (Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de Catalunya, Facultat de Ingenieria Civil. Barcelona: España). Recuperado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/21134/Agusztine_Terreros_Bedoya.pdf. [Consulta: 24 de febrero de 2020].
- Wang, C. S., Ou, C. Y., Xia, N., Zhai, M. S., Duan, L., & Brühwiler, E. (2016). Long lasting high performance steel bridge research progress and engineering application. *Maintenance, Monitoring, Safety, Risk and Resilience of Bridges and Bridge Networks*

- Proceedings of the 8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2016, pp. 1563–1569. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85000899972&partnerID=40&md5=a08dc1b9e119e362ba329b6fe85e19> [Consulta: 20 de abril de 2020].

Wang, Chun Sheng, Duan, L., Chen, Y. F., & Wang, S. C. (2016). Flexural behavior and ductility of hybrid high performance steel I-girders. *Journal of Constructional Steel Research*, 125, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.06.001>

Xiao, L., Peng, J., Zhang, J., Ma, Y., & Cai, C. S. (2020). Comparative assessment of mechanical properties of HPS between electrochemical corrosion and spray corrosion. *Construction and Building Materials*, 237(0), 117735. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117735>

ANEXOS

Anexo A. Encuesta de tema de investigación

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN ACADÉMICA – PIA 3 [Pág. 1 / 2]

ENCUESTA DE INVESTIGACIÓN DE TESIS

Fecha: 20/03/20

Datos del profesional encuestado:

Nombre y apellidos: PAUL CONDORI MOJO

Profesión: INGENIERO CIVIL

Colegiatura: CIP 175771

Especialidad: INGENIERIA ESTRUCTURAL

Empresa en la que labora: Q'ENKO INGENIERIA Y CONSTRUCCION SAC

Cargo: ESPECIALISTA ESTRUCTURAL

La siguiente encuesta tiene como objetivo sustentar la problemática de tema de tesis de la carrera de ingeniería civil. Se pide al encuestado llenar sus datos y responder, en base a su experiencia profesional, la encuesta con el mayor profesionalismo en beneficio de la investigación.

Tema:

"Evaluación óptima con aceros HPS en vigas híbridas para proyectos de puente sección compuesta en el Perú".

1.- ¿Del 1 al 5 qué tan informado está usted sobre los aceros tipo HPS en vigas híbridas de puentes, su uso y sus beneficios?

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

2.- ¿Del 1 al 5 qué tan beneficioso cree usted que es el acero HPS para un puente en cuanto a seguridad estructural?

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

3.- ¿Del 1 al 5 qué tan importante considera usted que es el factor económico que implica esta tecnología de materiales en el presupuesto de un proyecto?

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

4.- Para el caso de un proyecto de puente sección compuesta con vigas híbridas, ¿cuánto cree que sería el incremento económico del acero HPS con respecto al convencional? y ¿Hasta cuánto cree que sería aceptable para que este proyecto sea económicamente viable?

0-10%	11-20%	21-30%	31-40%	41-50%	>50%
0-10%	11-20%	21-30%	31-40%	41-50%	>50%

Anexo B. Plano topográfico

Anexo C. Plano Vigas planta y elevación

Anexo D. Detalle de la Superestructura del Puente

Anexo E. Combinaciones de Carga

Load Combination Limit State	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU	TG	SE	Use One of These at a Time				
										EQ	BL	IC	CT	CV
Strength I (unless noted)	γ_p	1.75	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—	—
Strength II	γ_p	1.35	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—	—
Strength III	γ_p	—	1.00	1.4 0	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—	—
Strength IV	γ_e	—	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	—	—	—	—	—	—	—
Strength V	γ_p	1.35	1.00	0.4 0	1.0	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—	—
Extreme Event I	γ_p	γ_{EQ}	1.00	—	—	1.00	—	—	—	1.00	—	—	—	—
Extreme Event II	γ_p	0.50	1.00	—	—	1.00	—	—	—	—	1.00	1.00	1.00	1.00
Service I	1.00	1.00	1.00	0.3 0	1.0	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—	—
Service II	1.00	1.30	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	—	—	—	—	—	—	—
Service III	1.00	0.80	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—	—
Service IV	1.00	—	1.00	0.7 0	—	1.00	1.00/1.20	—	1.0	—	—	—	—	—
Fatigue I— LL, IM & CE only	—	1.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fatigue II— LL, IM & CE only	—	0.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Anexo F. Informe de Ensayo de Tracción y Análisis Químico

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Mecánica

Laboratorio de Mecánica N° 4

INFORME TÉCNICO
Lb4-1891-2016

**ENSAYO DE TRACCIÓN Y ANÁLISIS QUÍMICO
A PLANCHA DE ACERO**

SOLICITANTE : **HUAMANI FERREL FREDDY AUDENCIO**

REFERENCIA : Orden de Laboratorio N° 103053

FECHA : Lima, 31 de Octubre de 2016

1.	ANTECEDENTES	<p>Se recibió una (01) muestra de plancha de acero, con la finalidad de realizarle los siguientes ensayos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de tracción con probeta. • Análisis químico cuantitativo.
2.	DE LA MUESTRA	<p>Se identificó según el Cliente, como:</p> <p>Una (01) muestra de plancha de acero de 32 mm de espesor</p> <p>Material : Acero A709 Gr-HPS 70W</p> <p>Proyecto: PUENTE VEHICULAR SONDONDO</p> <p>Tesis : "DISEÑO COMPARATIVO Y OPTIMIZADO ENTRE EL ACERO CONVENCIONAL M270 G-250 Y EL ACERO DE ALTA RESISTENCIA M270 G-890 EN VIGAS HIBRIDAS DE PUENTES TIPO SECCIÓN COMPUESTA"</p>
3.	EQUIPOS UTILIZADOS	<ul style="list-style-type: none"> • Máquina Universal de Ensayos marca L.G. capacidad 30 Ton. • Vernier digital, marca MITUTOYO, aproximación 0,01 mm. • Equipo de emisión óptica computarizado, marca BIRD.
4.	CONDICIONES DE ENSAYO	<p>T. : 21 °C</p> <p>H.R. : 68 %</p>
5.	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	<ul style="list-style-type: none"> • Norma ASTM A370 • Norma ASTM E 415

Av. Túpac Amaru 210 – Lima 25, Perú

☎ Teléfono: 381-3833 / 481-1070 Anexo 255 / ✉ Email: laboratorio_4@outlook.com

Pág. 1 de 2

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
Facultad de Ingeniería Mecánica
Laboratorio de Mecánica N° 4

Lb4-1891-2016

RESULTADOS

6.1 Ensayo de tracción

ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	LONGITUD INICIAL (mm)	LONGITUD FINAL (mm)	FUERZA DE FLUENCIA (Kgf)	FUERZA MÁXIMA (Kgf)	ESFUERZO DE FLUENCIA Kgf/mm ² (Mpa)	ESFUERZO MÁXIMO Kgf/mm ² (Mpa)	ELONGACIÓN (%)
32	12,60	50,80	65,86	5,87	9,25	48,96 (480)	77,11 (756)	29,6

6.2 Análisis químico cuantitativo

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	Al %	Cu %	Fe %
0,182	0,324	1,19	0,0165	0,0143	0,0470	0,0021	0,0257	0,0358	0,0064	98,1

* Código de autenticación : OCDNXMGI NOCDNXDT EVDE UEIU

ING. SEBASTIAN LAZO OCHOA
CIP. 74236
Jefe del Laboratorio de Mecánica

Anexo G. Plano Vigas Homogéneas (G1)

Anexo H. Plano Vigas Híbridas (G2)

SECCIÓN TÍPICA

SECCIÓN CON RIGIDIZADOR
DE ALMA

SECCIÓN CON RIGIDIZADOR
DE DIAFRAGMA

SECCIÓN TIPO S-01

ESCALA : 1/20

Anexo I. Metrado de Vigas G1 y G2

METRADO DE VIGAS METÁLICAS (G1)						
Item	Descripción	Espesor	Ancho	Largo	Peso	Nº
1	Ala superior	35	400	50900	5601.04	2
2	Alma	28	1800	50900	20163.73	2
3	Ala inferior	50	400	50900	8001.48	2
4	Platabanda	35	300	22000	1815.66	2
5	Rigidizador (RA)	50	150	1800	106.11	8
6	Rigidizador (RD)	0	0	0	0.00	2
7	Rigidizador (RW)	0	0	0	0.00	2
8	Diafragma / alas	12	200	2300	43.39	22
9	Diafragma / alma	8	400	2300	57.85	11
TOTAL (kg)						73603.56

METRADO DE VIGAS METÁLICAS (G2)						
Item	Descripción	Espesor	Ancho	Largo	Peso	Nº
1	Ala superior	25	500	50900	5000.93	2
2	Alma	16	1800	50900	11522.13	2
3	Ala inferior	38	500	29600	4420.46	2
4	Platabanda	32	500	21300	2678.69	2
5	Rigidizador (RA)	38	200	1800	107.52	8
6	Rigidizador (RD)	20	200	1800	56.59	36
7	Rigidizador (RW)	16	200	1750	44.02	24
8	Diafragma / alas	12	200	2300	43.39	22
9	Diafragma / alma	8	400	2300	57.85	11
TOTAL (kg)						52789.17