# UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

## FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

## ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA

**TESIS:**

# Comportamiento estructural de las uniones y apoyos en armaduras metálicas de acuerdo al RNE - Ayacucho 2023

Para optar el título profesional de:
**INGENIERO AGRÓNOMO**

PRESENTADO POR:
**Bach. David CURI ORE**

ASESOR:
**Ing. Orlando Fidel SULCA CASTILLA**

**AYACUCHO - PERÚ**

**2026**

## DEDICATORIA

*Por el amor eterno a Dios que en todo momento está con nosotros.*

*A mi padre Amador, mi madre Honorata y mi hermana Ida, que desde el cielo me iluminan para seguir adelante con mis proyectos.*

*A mis hermanos que han sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores lo cual me ha ayudado a seguir adelante en los momentos difíciles.*

*Ruth mi amada esposa y a mis hijos Lionel y Fabricio, que me han brindado su apoyo, comprensión, tolerancia e infinita paciencia y cedieron su tiempo para que "papá estudie" para permitir así llevar adelante un proyecto que paso de ser una meta personal a otro emprendimiento más de familia. A ellos mi eterno amor y gratitud.*

## AGRADECIMIENTO

Agradecer de lo mejor a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, a la Escuela Profesional de Agronomía, alma Mater donde pude formarme como estudiante y persona.

A la Facultad de Ciencias Agrarias, en especial agradecimiento a la Escuela Profesional de Agronomía, a la plana de docentes de esta gloriosa escuela, quienes me compartieron sus vastos conocimientos y experiencias durante mi formación académica y profesional.

Al Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla, por sus conocimientos, paciencia, disposición y asesoramiento, que me permitió concluir el presente trabajo de investigación.

Al Gobierno Regional de Ayacucho, por darme la oportunidad de participar en la construcción e instalación de estructuras de techo metálicos.

A los profesionales a fines del Gobierno Regional y otros externos.

A mis compañeros de la Escuela profesional de Agronomía, por compartir momentos inolvidables.

# ÍNDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA ..... ii
AGRADECIMIENTO ..... iii
ÍNDICE GENERAL ..... iv
ÍNDICE DE TABLAS ..... vii
ÍNDICE DE FIGURAS ..... viii
ÍNDICE DE ANEXOS ..... ix
RESUMEN ..... x
INTRODUCCIÓN ..... 1
CAPÍTULO I ..... 3
MARCO TEÓRICO ..... 3
1.1. Antecedentes de investigación ..... 3
*1.1.1. Antecedentes internacionales* ..... 3
*1.1.2. Antecedentes nacionales* ..... 4
*1.1.3. Antecedentes locales* ..... 5
*1.1.4. Síntesis y aporte de los antecedentes* ..... 6
1.2. Bases teóricas ..... 6
*1.2.1. Sistemas estructurales de acero* ..... 6
*1.2.2. Acero estructural* ..... 8
*1.2.3. Ventajas de las estructuras de acero* ..... 10
*1.2.4. Clases de acero* ..... 11
*1.2.5. Propiedades mecánicas del acero* ..... 11
*1.2.6. Apoyos estructurales* ..... 11
*1.2.7. Apoyo fijo y apoyo móvil* ..... 12
*1.2.8. Armaduras metálicas* ..... 12
*1.2.9. Elementos rectos de una armadura* ..... 13
*1.2.10. Cercha o armadura* ..... 13
*1.2.11. Tipos clásicos de armaduras de puentes y de cubiertas* ..... 14
*1.2.12. Transferencia de cargas* ..... 15
*1.2.13. Cargas estructurales* ..... 15
*1.2.14. Carga permanente* ..... 16
*1.2.15. Carga viva* ..... 16
*1.2.16. Acción del viento* ..... 16

*1.2.17. Combinaciones de carga* ..... 17
*1.2.18. Cargas debidas al viento* ..... 17
*1.2.19. Combinación de cargas para diseños por esfuerzos admisibles* ..... 19
*1.2.20. Estructuras metálicas* ..... 19
*1.2.21. Diseño por esfuerzos admisibles (ASD)* ..... 20
*1.2.22. Desplazamientos y deformaciones* ..... 20
*1.2.23. Vigas con cargas inclinadas* ..... 22
*1.2.24. Comportamiento estructural* ..... 24
*1.2.25. Rigidez estructural* ..... 24
*1.2.26. Resistencia estructural* ..... 24
*1.2.27. Modelamiento estructural* ..... 25
*1.2.28. Condiciones de apoyo y respuesta estructural* ..... 25
*1.2.29. Estabilidad estructural* ..... 26
*1.2.30. Diseño de placas de apoyo* ..... 26
*1.2.31. Correspondencia entre modelo y detalle constructivo* ..... 26
CAPÍTULO II ..... 28
METODOLOGÍA ..... 28
2.1. Ubicación ..... 28
2.2. Materiales y equipos ..... 29
2.3. Normas de referencia ..... 29
2.4. Procedimiento general de análisis y diseño ..... 29
*2.4.1. Diseño por condiciones de resistencia* ..... 29
*2.4.2. Diseño de elementos sometidos a tracción* ..... 30
*2.4.3. Diseño de elementos sometidos a compresión* ..... 30
*2.4.4. Cargas* ..... 30
*2.4.5. Combinación de cargas* ..... 31
*2.4.6. Pre dimensión* ..... 31
*2.4.7. Casos de ubicación de los apoyos* ..... 33
2.5. Problemas específicos ..... 33
CAPÍTULO III ..... 35
RESULTADOS Y DISCUSIÓN ..... 35
3.1. Fuerzas internas en las barras de la armadura ..... 35
*3.1.1. Reacciones* ..... 39
*3.1.2. Desplazamientos* ..... 39

*3.1.3. Verificación de diseño* ..... 40
*3.1.4. Verificación por compresión* ..... 40
*3.1.5. Verificación complementaria de la barra 67 mediante curva de compresión LRFD* ..... 41
*3.1.6. Verificación a la flexión* ..... 42
*3.1.7. Verificación del esfuerzo a la flexión* ..... 43
*3.1.8. Verificación por cortante* ..... 44
3.2. Dimensiones del apoyo ..... 45
3.3. Proceso de diseño y construcción del apoyo ..... 46
3.4. Discusiones ..... 47
*3.4.1. Correas* ..... 47
*3.4.2. Armadura* ..... 47
*3.4.3. Apoyos* ..... 48
3.5. Observaciones ..... 48
*3.5.1. Armadura* ..... 49
*3.5.2. Apoyos* ..... 50
CONCLUSIONES ..... 52
RECOMENDACIONES ..... 54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 56
ANEXOS ..... 61

# ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

**Tabla 1.1** *Factores de forma (C)* ..... 18

**Tabla 1.2** *Aberturas en la cubierta* ..... 18

**Tabla 3.1** *Fuerzas internas en cada elemento de la armadura bajo las condiciones de apoyo estudiadas* ..... 36

**Tabla 3.2** *Resultado del proceso con el SAP 2000 versión 22, para ambas condiciones de apoyos* ..... 39

**Tabla 3.3** *Resultado del proceso con el programa* ..... 40

## ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

**Figura 1.1** *Tipos de estructuras de apoyo* ..... 8
**Figura 1.2** *Tipos de soldadura* ..... 9
**Figura 1.3** *Elemento mecánico roscado (perno)* ..... 10
**Figura 1.4** *Elemento mecánico roscado (perno)* ..... 14
**Figura 1.5** *Coordenadas generales y locales* ..... 21
**Figura 1.6** *Deformación ante fuerzas axiales* ..... 21
**Figura 1.7** *Ubicación del eje neutro en vigas con cargas inclinadas* ..... 23
**Figura 1.8** *Ángulo de referencia en vigas con cargas inclinadas* ..... 23
**Figura 2.1** *Ubicación geogafica de la investigación* ..... 28
**Figura 2.2** *Tipos de apoyos fijos y móviles* ..... 33
**Figura 3.1** *Diagrama del cuerpo libre y descomposición de fuerzas de la barra 67* . 43
**Figura 3.2** *Excentricidad en las uniones de las barras* ..... 49
**Figura 3.3** *Excentricidad en el apoyo fijo* ..... 51

## ÍNDICE DE ANEXOS

Pág.

**Anexo 1.** *Guía paso a paso para el diseño de la cobertura metálica* ..... 62

**Anexo 2.** *Panel fotográfico* ..... 66

## RESUMEN

La creciente necesidad de construir espacios cubiertos para actividades agrícolas y ganaderas en la región de Ayacucho ha impulsado el uso de armaduras metálicas debido a su resistencia, durabilidad y capacidad para cubrir mayores luces estructurales; sin embargo, en muchos casos las uniones y apoyos son ejecutados sin considerar adecuadamente las exigencias establecidas en el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), lo que puede generar deformaciones y fallas estructurales. En ese contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el comportamiento estructural de las uniones y apoyos en armaduras metálicas de acuerdo con las disposiciones del RNE en Ayacucho durante el año 2023. La investigación correspondió a un enfoque aplicado, de nivel descriptivo y comparativo, utilizando el método de análisis estructural mediante modelamiento computacional. Se trabajó con armaduras metálicas de acero ASTM A36, considerando diferentes condiciones de apoyo y cargas estructurales establecidas en las Normas Técnicas E.020 y E.090 del RNE. Para el procesamiento y análisis de datos se empleó el software SAP 2000 versión 22, evaluándose fuerzas internas, desplazamientos y esfuerzos en los elementos estructurales. Los resultados evidenciaron diferencias significativas en el comportamiento estructural según el tipo y ubicación de los apoyos, observándose que las armaduras con apoyos adecuadamente diseñados presentaron menores deformaciones y mejor distribución de esfuerzos internos. Asimismo, se comprobó que las uniones y apoyos influyen directamente en la estabilidad, resistencia y seguridad de la estructura metálica. Se concluyó que el diseño estructural de armaduras metálicas debe considerar de manera obligatoria las especificaciones técnicas del RNE respecto a uniones y apoyos, debido a que estos elementos determinan el adecuado comportamiento estructural y reducen el riesgo de fallas durante el funcionamiento de la estructura.



**Palabras clave:** acero, armaduras metálicas, apoyos, comportamiento estructural, estabilidad estructural, uniones.

# INTRODUCCIÓN

En las actividades agrícolas y ganaderas, los espacios cubiertos cumplen una función importante dentro de los procesos de producción, almacenamiento y protección de productos, animales y maquinaria. Estas estructuras requieren sistemas resistentes y funcionales capaces de cubrir grandes luces y soportar diferentes condiciones de carga. Tradicionalmente, en muchas zonas de la región Ayacucho se emplearon estructuras de madera; sin embargo, en los últimos años el uso de armaduras metálicas se ha incrementado debido a las ventajas que ofrece el acero estructural, tales como mayor resistencia, durabilidad, facilidad de montaje y capacidad para cubrir mayores distancias entre apoyos.

A pesar de ello, en muchas construcciones metálicas destinadas a coberturas agrícolas y ganaderas aún existen deficiencias relacionadas con el diseño y ejecución de las uniones y apoyos estructurales. En numerosas obras menores, la fabricación y montaje son realizados únicamente por personal con experiencia práctica en cerrajería, sin considerar criterios técnicos de análisis estructural. Del mismo modo, en proyectos de mayor envergadura, los diseños suelen enfocarse principalmente en el dimensionamiento de las barras estructurales mediante programas computacionales, dejando en segundo plano el análisis de las uniones y apoyos, elementos que cumplen una función fundamental dentro del comportamiento estructural de la armadura.

Esta situación constituye un problema importante, debido a que un diseño inadecuado de las uniones y apoyos puede generar deformaciones excesivas, distribución incorrecta de esfuerzos internos e incluso posibles fallas estructurales. Las barras que conforman una armadura metálica trabajan principalmente a tracción y compresión; por ello, las conexiones deben permitir una adecuada transmisión de cargas y garantizar estabilidad durante el funcionamiento de la estructura. Sin embargo, en la práctica muchas

de estas conexiones no cumplen completamente las condiciones estructurales requeridas, afectando el comportamiento general de la armadura.

La presente investigación se justifica porque permitirá analizar el comportamiento estructural de las uniones y apoyos en armaduras metálicas utilizadas en la ciudad de Ayacucho, aportando información técnica que contribuya a mejorar los criterios de diseño y construcción de este tipo de estructuras. Asimismo, el estudio tiene importancia práctica, ya que los resultados podrán servir como referencia para profesionales, técnicos y entidades encargadas del diseño, fabricación y ejecución de coberturas metálicas, promoviendo estructuras más seguras, estables y eficientes. De igual manera, la investigación permitirá comparar diferentes configuraciones de apoyos y verificar su influencia en la distribución de esfuerzos y deformaciones estructurales.

Para el desarrollo de la investigación se trabajó con armaduras metálicas fabricadas con acero ASTM A36, considerando cargas permanentes y variables establecidas en las normas técnicas correspondientes. El análisis estructural fue realizado mediante el software SAP 2000 versión 22, permitiendo evaluar fuerzas internas, desplazamientos y condiciones de estabilidad en los diferentes casos estudiados.

**Objetivo general**

Evaluar el comportamiento estructural de las uniones y apoyos en armaduras metálicas empleadas en la ciudad de Ayacucho durante el año 2023.

**Objetivos específicos**

1. Determinar las fuerzas internas presentes en los elementos de la armadura bajo diferentes condiciones de apoyo.
2. Analizar los desplazamientos y deformaciones generadas en la estructura metálica.
3. Verificar el comportamiento estructural de las uniones y apoyos frente a las cargas aplicadas.
4. Comparar el comportamiento estructural de la armadura metálica bajo diferentes condiciones de apoyo, considerando criterios técnicos de diseño estructural.

# CAPÍTULO I
# MARCO TEÓRICO

## 1.1. Antecedentes de investigación

### *1.1.1. Antecedentes internacionales*

Lazarev (2023), en la Universidad de Missouri, desarrolló la tesis de maestría Experimental study of cold formed steel roof truss connections, cuyo objetivo fue estudiar experimentalmente el comportamiento de conexiones utilizadas en armaduras de cubierta de acero conformado en frío. Se evaluaron diferentes configuraciones de elementos, número de tornillos y espaciamiento entre estos, considerando parámetros como rigidez, deformación y capacidad resistente. Los resultados mostraron que el incremento del número de tornillos aumentó la capacidad de carga y la rigidez de las conexiones, mientras que una reducción excesiva del espaciamiento generó efectos de grupo que disminuyeron el aporte individual de los conectores. También se identificaron modos de falla asociados con aplastamiento, desgarro, extracción, cortante de bloque y falla de los tornillos. Estos resultados evidencian que el comportamiento de una armadura no depende únicamente de la capacidad de sus barras, sino también de las características mecánicas y geométricas de sus conexiones.

Fan et al. (2022) realizaron un estudio experimental sobre una conexión entre armaduras y columnas de acero en una estructura prefabricada. Se realizaron ensayos a escala real para analizar la rigidez, capacidad resistente y mecanismos de falla de la conexión. Los resultados mostraron que la configuración de las placas de respaldo y los detalles constructivos tuvieron una influencia significativa sobre la respuesta de la conexión. Los autores también desarrollaron un modelo mecánico complementado con análisis numérico para representar el comportamiento de la unión. El estudio evidencia que los detalles geométricos y constructivos de una conexión pueden modificar la capacidad resistente y la rigidez del sistema estructural.

Choong et al. (2022) analizaron mediante modelamiento numérico las características de transferencia de carga entre armaduras de acero conformado en frío y diferentes sistemas de apoyo. El estudio comparó distintas configuraciones de conexión y evaluó la distribución de las reacciones producidas por las cargas aplicadas. Los resultados mostraron que las conexiones ubicadas en el lado de aplicación de la carga desarrollaron mayores reacciones que aquellas situadas a mayor distancia. Los autores también plantearon una forma simplificada de representar las conexiones en modelos estructurales mediante elementos lineales.

Choong et al. (2022) analizaron mediante modelamiento numérico las características de transferencia de carga entre armaduras de acero conformado en frío y diferentes sistemas de apoyo. El estudio comparó distintas configuraciones de conexión y evaluó la distribución de las reacciones producidas por las cargas aplicadas. Los resultados mostraron que las conexiones ubicadas en el lado de aplicación de la carga desarrollaron mayores reacciones que aquellas situadas a mayor distancia. Los autores también plantearon una forma simplificada de representar las conexiones en modelos estructurales mediante elementos lineales.

Wuryanti (2018) realizó ensayos estáticos a escala real en seis armaduras de techo de acero conformado en frío, fabricadas por distintos proveedores, pero diseñadas para una misma luz, pendiente y carga de cobertura. Cuatro armaduras no alcanzaron la capacidad requerida; las fallas predominantes fueron el pandeo local y el aplastamiento del alma en el cordón superior, especialmente cerca de la unión de arranque o apoyo. El estudio demuestra que la proximidad del apoyo, la geometría del perfil y la ejecución de la unión pueden controlar la resistencia real, aun cuando el esquema general de la armadura sea semejante.

### *1.1.2. Antecedentes nacionales*

Daga (2023), en la Universidad Peruana Los Andes, desarrolló la investigación Análisis y diseño de coberturas con tijerales metálicos mediante SAP2000 de la planta de acondicionamiento y almacén, E.E.A. Santa Ana, Junín. El estudio tuvo como objetivo realizar el análisis y diseño de una cobertura con tijerales metálicos mediante SAP2000. La investigación fue aplicada, descriptivo-explicativa y de diseño no experimental. Para el diseño de los elementos estructurales se consideró la Norma E.090 y se analizaron

cuatro tijerales apoyados sobre columnas y vigas. Las conexiones se plantearon mediante platinas de 1/4 de pulgada y pernos de 5/8 de pulgada.

Bravo y Sánchez (2024) desarrollaron una investigación sobre la optimización económica de coberturas metálicas en el centro poblado de Colpa Tuapampa. El estudio comparó tres alternativas estructurales utilizando los métodos LRFD y ASD, considerando perfiles de acero A36 y A500. Para el análisis se empleó SAP2000 y se aplicaron las normas E.020, E.030 y E.090, evaluándose variables relacionadas con el comportamiento estructural, desplazamientos, flechas y relación demanda/capacidad.

Siancas (2025) desarrolló en la Pontificia Universidad Católica del Perú una investigación sobre el análisis y diseño estructural de una nave industrial de 24 m de luz. El sistema estaba constituido por siete tijerales metálicos separados cada 5,5 m y fue evaluado frente a cargas gravitacionales, viento y sismo. El estudio utilizó normativa nacional y norteamericana, incluyendo ASCE/SEI 7-22, y analizó el comportamiento de los elementos estructurales para determinar su capacidad y respuesta frente a las solicitaciones consideradas.

Díaz (2014), en la Universidad Nacional de Cajamarca, evaluó y optimizó cubiertas metálicas de gran luz aplicando las especificaciones AISC 2010, el método LRFD y el Reglamento Nacional de Edificaciones. Comparó sistemas espaciales, perfiles tubulares HSS y elementos de alma llena frente a acciones de viento, lluvia, servicio y sismo. Además, comprobó manualmente los resultados de SAP2000 y diseñó las soldaduras de las conexiones. Concluyó que el sistema espacial fue el más liviano y presentó el mejor comportamiento entre las alternativas evaluadas. Este antecedente respalda la necesidad de verificar los resultados del programa mediante cálculos independientes y de incluir las conexiones dentro del diseño.

### *1.1.3. Antecedentes locales*

Ruiz (2024) desarrolló la investigación Uso de perfiles de acero como sistema constructivo del centro de formación y exposición de artes mixtas en Ayacucho 2023. El estudio tuvo como propósito analizar la utilización de perfiles de acero estructural como sistema constructivo en un proyecto ubicado en Ayacucho. Se empleó un enfoque cualitativo y participaron diez especialistas relacionados con ingeniería, materiales y

arquitectura. Los resultados recogieron coincidencias entre los especialistas y la literatura consultada respecto a las propiedades mecánicas, estructurales, económicas y constructivas del acero.

Díaz (2018), en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, evaluó el desempeño sísmico de una nave industrial de acero estructurada con armaduras. Empleó SAP2000 versión 19 y análisis estático no lineal para estudiar el comportamiento en ambas direcciones. La estructura cumplió los niveles mínimos en la dirección X, pero presentó comportamiento inaceptable en Y, por lo que propuso reforzar los arriostres. El antecedente evidencia que la respuesta de una estructura metálica cambia según la dirección, el arriostramiento y las restricciones del modelo; por ello, la presente tesis compara configuraciones de apoyo y revisa fuerzas y desplazamientos por componente.

### *1.1.4. Síntesis y aporte de los antecedentes*

Los antecedentes revisados coinciden en que el comportamiento de las coberturas metálicas no debe evaluarse únicamente a partir de la resistencia nominal de las barras. La geometría, la rigidez de las conexiones, la orientación de los apoyos, el pandeo local, el arriostramiento y la correspondencia entre el modelo y la construcción modifican la respuesta real. La diferencia de esta investigación es que analiza de manera específica una armadura metálica de arco rebajado utilizada en Ayacucho y compara dos condiciones de apoyo, relacionando los cambios de fuerzas internas, reacciones y desplazamientos con el diseño de las uniones y placas de apoyo.

## 1.2. Bases teóricas

### *1.2.1. Sistemas estructurales de acero*

Las estructuras metálicas son sistemas resistentes conformados por elementos de acero que trabajan de manera conjunta para recibir, transmitir y distribuir las acciones aplicadas hacia los apoyos y, finalmente, hacia la cimentación. Su comportamiento depende de la geometría del sistema, las propiedades mecánicas del material, las características de las secciones, las condiciones de apoyo y la configuración de las conexiones. La Norma Técnica E.090 establece criterios para el diseño, fabricación y montaje de estructuras metálicas y reconoce los métodos de diseño por factores de carga y resistencia (LRFD) y por esfuerzos permisibles (ASD) como procedimientos aplicables

al diseño de estructuras de acero en el territorio nacional (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2006).

Desde una perspectiva de diseño contemporánea, la especificación ANSI/AISC 360-22 establece requisitos generales para el diseño y construcción de estructuras de acero y contempla tanto LRFD como ASD. Esta especificación sustituyó a la edición AISC 360-16 y constituye una referencia internacional actual para el diseño de miembros, conexiones y sistemas estructurales de acero (American Institute of Steel Construction [AISC], 2022).

Las estructuras se dividen, desde el punto de vista de los métodos de análisis, en isostáticas o estáticamente determinadas, y en hiperestáticas o estáticamente indeterminada. Las primeras son aquellas que pueden analizarse utilizando únicamente las ecuaciones de equilibrio de la estática. Es decir, que pueden encontrarse las fuerzas cortantes, momentos de flexión, fuerzas normales y momentos de torsión a partir de condiciones de equilibrio solamente. Por el contrario, para analizar estructuras hiperestáticas es necesario plantear, además de las ecuaciones de equilibrio, ecuaciones de compatibilidad de deformaciones entre los miembros de la estructura o entre los miembros y los apoyos (González, 2014).

Uno de los pasos necesarios para establecer si una estructura es isostática o hiperestática consiste en calcular el número de reacciones que se desarrollan en los apoyos de la estructura. Por lo tanto, es necesario determinar las reacciones que ocurren en los diversos tipos de apoyo que se encuentran en la práctica (González, 2014).

El primero es de tipo rótula, solamente evita desplazamiento vertical (Rz). El segundo es apoyo fijo, evita desplazamiento vertical y horizontal (Rz y Rx). El tercero es apoyo empotrado, evita desplazamiento vertical, horizontal y evita también el giro (Rz, Rx y My) (González, 2014).

Una estructura debe ser adecuada para soportar todas las cargas a las que pueda estar previsiblemente expuesta durante su vida útil. No solamente debe sustentar estas cargas con seguridad, sino que debe hacerlo de manera tal que las deflexiones y las

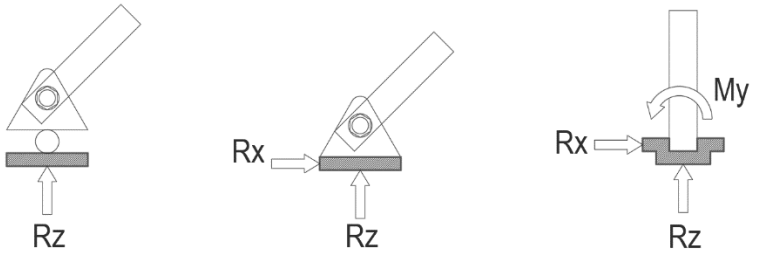
vibraciones no sean tan grandes como para asustar a los ocupantes o causar fallas visibles (Jack McCormac, 2012).

El diseño de la mayoría de las estructuras está regulado por especificaciones. Aun cuando no sea así, el ingeniero probablemente se remitirá a las especificaciones como guía (Jack McCormac, 2012).

Las autoridades estatales responsables de la seguridad pública han establecido reglamentos de construcción de diversas estructuras.

**Figura 1.1**

*Tipos de estructuras de apoyo*




Nota: Información obtenida del libro de Estructuras de Jack McCormac.

### *1.2.2. Acero estructural*

El acero estructural es un material empleado en elementos resistentes debido a sus propiedades mecánicas y a su capacidad para transmitir esfuerzos de tracción, compresión, flexión y corte. En estructuras metálicas, la selección del acero debe considerar la resistencia del material, las propiedades geométricas de la sección y las condiciones bajo las cuales se desarrollará el elemento. La Norma E.090 considera como acero estructural a los elementos que forman parte esencial del sistema resistente, entre ellos vigas, columnas, puntales, bridas y montantes (MVCS, 2006).

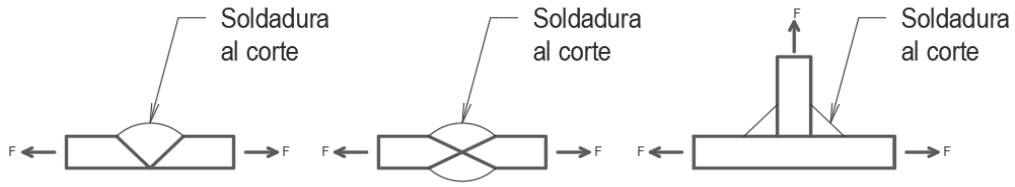
En la presente investigación se considera acero ASTM A36, material utilizado para los elementos de la armadura estudiada. La especificación ASTM A36/A36M corresponde a un acero estructural al carbono destinado a elementos como perfiles, placas y barras empleados en construcciones atornilladas, remachadas o soldadas. La especificación establece requisitos relacionados con las propiedades mecánicas y características del acero utilizado con fines estructurales (ASTM International, 2019).

Los miembros de acero estructural se unen, casi por lo general, mediante soldadura o por medio de pernos de alta resistencia. Para el atornillado o empernado, se acoplan los elementos planos con barrenos taladrados sobre plantilla en ambas piezas, en los cuales actúan los pernos como pasadores de articulación. Los agujeros reducen el área de sección transversal de los miembros, problema un tanto especial cuando la conexión debe resistir tensión (Parker, 2010).

Uniones de tipo aplastamiento a esfuerzo cortante. En el diagrama se observa una unión simple entre dos soleras de acero, cuya función es transmitir una fuerza de tracción. Aunque esta unión sea para transmitir tracción, se hace referencia a ella llamándola unión a cortante, por la manera en que trabaja en la unión el dispositivo de conexión (Parker, 2010).

**Figura 1.2**

*Tipos de soldadura*



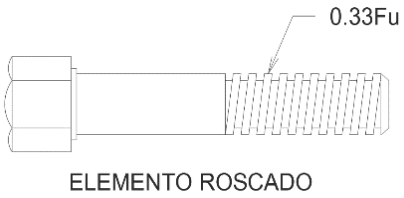

Nota: Tipos de soldaduras presentadas por Harry Parker.

Uniones del tipo fricción. Cuando la tuerca que lleva un perno es suficientemente segura, las partes que se están uniendo con el perno quedan apretadas que se desarrolla en la unión esfuerzo de fricción entre las dos partes unidas.

Uniones a tensión. Cuando los miembros sujetos a tensión tienen secciones transversales reducidas se deben considerar dos análisis de esfuerzo. Para pernos con barreno cortado, el esfuerzo de tensión admisible en la sección transversal reducida que pasa por el barreno es de 0.50Fu, en donde Fu es la resistencia máxima del acero a la tensión. Se debe comparar la resistencia total en esta sección reducida (Llamada también sección neta), con la resistencia en otras secciones no reducidas en las que el esfuerzo permitido sea 0.60Fy. Para las varillas de acero roscadas, el esfuerzo máximo admisible a la tensión en las roscas es 0.33Fu.

**Figura 1.3**

*Elemento mecánico roscado (perno)*




Nota: Elemento roscado por Parker.

Mediante la soldadura puede lograrse con facilidad conexiones resistentes a momento; por consiguiente, se acostumbra en la construcción las conexiones soldadas para poder desarrollar continuidad en las estructuras. También puede usarse soldadura en construcciones de carácter discontinuo (Parker, 2010).

### *1.2.3. Ventajas de las estructuras de acero*

Avisan con sus grandes deformaciones de la posibilidad del colapso. El material es homogéneo y de calidad controlada. Dan lugar a construcciones más ligeras. Se construyen con rapidez. Se adaptan con facilidad y flexibilidad a las dimensiones del espacio. No padecen fenómenos reológicos conservando, si se les mantiene adecuadamente, sus propiedades. Ocupan poco espacio permitiendo una utilización de las plantas al máximo, al estorbar poco los soportes. Reducen las dimensiones de la estructura portante, sin muros resistentes. Permite cubrir con facilidad grandes luces. Facilitan la integración racional de las instalaciones en la estructura. Admiten con facilidad reformas por adaptación de la construcción a nuevas necesidades o usos, siendo fáciles de reforzar. Son de fácil desmontaje, manteniendo un cierto valor residual (García, 1998).

De los diferentes ensayos realizados sobre el acero estructural, el análisis de su comportamiento a tracción es uno de los más significativos y del que se extraen los parámetros fundamentales para el cálculo de las obras ejecutadas con el mismo, por cuanto la resistencia, su ductilidad y otras propiedades se dan en términos del comportamiento en un ensayo de tracción simple (García, 1998).

El módulo de elasticidad o de Young es de E = 2 100 000 Kg/cm$^2$. El módulo de elasticidad transversal se considera G = 810 000 Kg/cm$^2$. El coeficiente de Poisson u = 0.30.

### *1.2.4. Clases de acero*

Luego de pasar por los hornos convertidores, el acero de acuerdo al tratamiento y al cuidado del proceso se clasifica en:

**Aceros calmados**. Son aquellos aceros a los que se les ha extraído la mayor cantidad de oxígeno de los gases de su solidificación, lo que origina un producto con un alto grado de uniformidad en su estructura cristalina. Es un acero de alta soldabilidad adecuado para planchas y perfiles gruesos que están sometidos a fuertes tensiones internas para las soldaduras (SENCICO, 2013).

**Aceros semi calmados**. Son los aceros parcialmente calmados. Se utilizan en la manufactura de perfiles estructurales.

**Aceros efervescentes.** Son aceros débilmente desoxidados. Presentan un alto grado de segregación de elementos (SENCICO, 2013).

### *1.2.5. Propiedades mecánicas del acero*

Las propiedades mecánicas del acero permiten establecer su capacidad para resistir las acciones producidas por las cargas estructurales. Entre las propiedades que intervienen en el diseño se encuentran el esfuerzo de fluencia, la resistencia última a la tracción y el módulo de elasticidad. Estas propiedades se utilizan conjuntamente con las características geométricas de las secciones para determinar la resistencia de los miembros estructurales (AISC, 2022).

El esfuerzo de fluencia representa el nivel de esfuerzo a partir del cual el material comienza a presentar deformaciones permanentes, mientras que la resistencia última corresponde al máximo esfuerzo asociado con la capacidad resistente del material antes de la falla. En el diseño de estructuras de acero, estos parámetros intervienen en la determinación de la resistencia disponible de los elementos sometidos a diferentes tipos de solicitación (AISC, 2022).

### *1.2.6. Apoyos estructurales*

Los apoyos son elementos mediante los cuales las acciones que llegan a la estructura son transferidas hacia los elementos que la sostienen. Desde el punto de vista

del análisis estructural, las condiciones de apoyo representan restricciones al movimiento de los nodos y determinan las reacciones que se desarrollan en la estructura (MVCS, 2006).

En una estructura metálica, la idealización del apoyo debe guardar correspondencia con la conexión realmente utilizada. La Norma E.090 establece que las conexiones y las condiciones estructurales asumidas deben ser compatibles con el sistema resistente y quedar reflejadas en los documentos de diseño (MVCS, 2006).

### *1.2.7. Apoyo fijo y apoyo móvil*

El apoyo fijo restringe determinados desplazamientos de la estructura y permite la transmisión de las reacciones correspondientes hacia el elemento de soporte. El apoyo móvil, en cambio, permite el desplazamiento en una dirección determinada, de manera que pueda producirse el movimiento previsto por efectos como deformaciones o variaciones dimensionales. La representación de estos apoyos en el modelo estructural debe corresponder con las restricciones reales del sistema (MVCS, 2006).

La investigación sobre transferencia de cargas entre armaduras de acero conformado en frío y sistemas de apoyo ha mostrado que las características de la conexión y su configuración pueden modificar la distribución de las reacciones. Choong et al. (2022) analizaron experimentalmente este comportamiento y resaltaron la importancia de considerar la transferencia de carga entre la armadura y su sistema de soporte.

### *1.2.8. Armaduras metálicas*

Las armaduras metálicas son sistemas estructurales constituidos por barras rectas conectadas entre sí para formar configuraciones trianguladas. Su funcionamiento estructural se basa principalmente en la transmisión de fuerzas axiales a través de sus elementos, de manera que algunas barras trabajan a tracción y otras a compresión. La distribución de estas fuerzas depende de la geometría de la armadura, las cargas aplicadas y las condiciones de apoyo y conexión (MVCS, 2006; AISC, 2022).

El comportamiento de una armadura no depende únicamente de la resistencia individual de sus barras. Las investigaciones experimentales recientes han mostrado que las conexiones entre los elementos pueden modificar la rigidez, la capacidad resistente y

el mecanismo de falla del sistema. Fan et al. (2022), mediante ensayos a escala real de conexiones entre armaduras y columnas, identificaron diferentes mecanismos de falla y analizaron la influencia de los componentes de la conexión sobre su comportamiento estructural.

### *1.2.9. Elementos rectos de una armadura*

Los elementos rectos constituyen las barras que forman los cordones, diagonales y montantes de una armadura. En el modelo estructural idealizado, estas barras transmiten principalmente esfuerzos axiales, por lo que su diseño requiere identificar si cada elemento se encuentra sometido a tracción o compresión para aplicar el procedimiento de verificación correspondiente (MVCS, 2006; AISC, 2022).

La identificación de los elementos sometidos a tracción y compresión resulta necesaria para evaluar la seguridad estructural de la armadura. En particular, los elementos comprimidos requieren considerar condiciones de estabilidad y pandeo, mientras que los elementos traccionados deben verificarse frente a los estados límite asociados con la fluencia y fractura de las secciones correspondientes (AISC, 2022).

### *1.2.10. Cercha o armadura*

Se puede definir una cercha o viga triangulada como una estructura compuesta por cierto número de barras, que están todas en un plano, articuladas entre sí en sus extremos, de modo que se forme un entramado rígido. Deben de cumplir con las siguientes condiciones: las barras están unidas entre sí en sus extremos por nudos de pasador sin rozamiento. Las cargas y reacciones se aplican solo en los nudos. El eje de cada barra es recto, coincide con la línea que une los centros de los nudos en cada extremo de la misma, y está en el plano que contiene también a las líneas de acción de todas las cargas y reacciones. Indudablemente, es físicamente imposible que se cumplan todas estas condiciones en una cercha real, por lo que aquella en que se supone que se verifican se llama cercha ideal (Norris, 1973).

Es posible aislar cualquier barra de una cercha ideal como cuerpo libre, desconectándolo del nudo de cada extremo. Como todas las cargas exteriores y reacciones están aplicadas a la cercha solo en los nudos y no hay ninguna carga aplicada entre los extremos de las barras; sobre la barra aislada solo actuarán dos fuerzas, una en cada

extremo, que representarán la acción del nudo sobre la barra en ese extremo. Como se supone que todos los nudos están articulados y no tienen rozamiento, cada una de estas dos fuerzas debe estar dirigida hacia el centro de su correspondiente nudo articulado; estas condiciones, conlleva a que se deben de cumplir con:

$$\Sigma Fx = 0$$
$$\Sigma Fz = 0$$
$$\Sigma M = 0$$

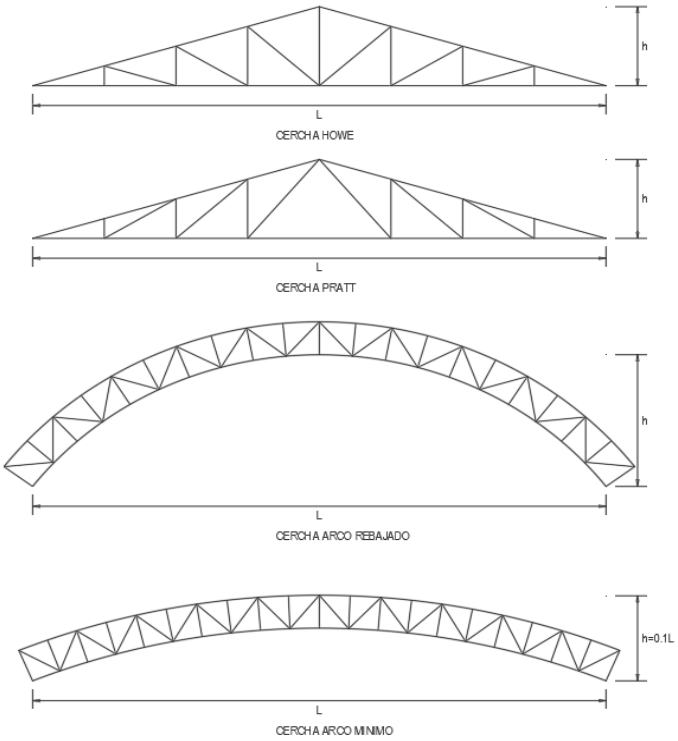
Como los ejes de las barras de una cercha ideal son rectos y coinciden en las líneas que unen los nudos de cada extremo, toda sección transversal de una barra estará sometida a la misma fuerza axial, pero no a momento flector o fuerza cortante (Norris, 1973).

### *1.2.11. Tipos clásicos de armaduras de puentes y de cubiertas*

Se pueden disponer los elementos de una armadura casi de un número ilimitado de maneras, pero la inmensa mayoría de las armaduras que se encuentran en puentes o cubiertas pertenecen a uno de los tipos corrientes.

**Figura 1.4**

*Elemento mecánico roscado (perno)*




Nota: Tipos de cerchas obtenidas del libro de Norris (1973)

### *1.2.12. Transferencia de cargas*

La transferencia de cargas corresponde al recorrido mediante el cual las acciones aplicadas sobre una estructura son transmitidas entre sus diferentes componentes hasta llegar a los apoyos y elementos de cimentación. En una cobertura metálica, este recorrido puede comprender la cobertura, correas, armaduras, conexiones, placas de apoyo, columnas y cimentación (MVCS, 2006).

La adecuada transferencia de cargas requiere que cada elemento tenga una capacidad suficiente para transmitir las solicitaciones que recibe. En consecuencia, el análisis de una armadura debe considerar no solamente las barras principales, sino también las conexiones y los apoyos que permiten completar el recorrido de las fuerzas. Los estudios experimentales sobre conexiones de armaduras han mostrado que las características de estas zonas pueden influir en la respuesta global del sistema (Fan et al., 2022; Choong et al., 2022).

### *1.2.13. Cargas estructurales*

Las cargas estructurales son acciones capaces de producir esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en los elementos resistentes. Para el análisis de una cobertura metálica deben identificarse las cargas permanentes, cargas variables y acciones ambientales que correspondan a las condiciones del proyecto (MVCS, 2006).

La Norma E.020 establece criterios para la determinación de cargas utilizadas en el diseño de edificaciones. Entre otros aspectos, establece valores mínimos para cargas vivas de acuerdo con el uso de los ambientes y exige que las cargas de diseño queden claramente identificadas en la documentación del proyecto (MVCS, 2006).

Como referencia internacional complementaria, ASCE/SEI 7-22 establece criterios para determinar diferentes acciones de diseño, entre ellas cargas permanentes, vivas, lluvia, viento, sismo y otras acciones ambientales, así como procedimientos para las combinaciones de carga. Esta norma corresponde a una referencia internacional contemporánea para la determinación de acciones estructurales (American Society of Civil Engineers [ASCE], 2022).

### *1.2.14. Carga permanente*

La carga permanente corresponde al peso de los elementos que permanecen incorporados a la estructura durante su vida útil. En una cobertura metálica puede incluir el peso propio de las armaduras, correas, cobertura, elementos de fijación y otros componentes permanentes considerados en el proyecto (MVCS, 2006).

En el modelamiento estructural, el peso propio debe incorporarse de manera coherente con las propiedades de los materiales y las secciones asignadas. Una representación incorrecta del peso propio puede modificar las reacciones, fuerzas internas y desplazamientos calculados para la estructura (MVCS, 2006; Computers and Structures, Inc., 2022).

### *1.2.15. Carga viva*

La carga viva corresponde a las acciones variables asociadas con el uso, ocupación, mantenimiento u otras condiciones temporales que pueden actuar sobre la estructura. La Norma E.020 establece valores mínimos de carga viva según el uso y las características del espacio analizado (MVCS, 2006).

En las coberturas, la determinación de la carga variable debe realizarse de acuerdo con el uso previsto y las condiciones específicas de mantenimiento y operación. Los valores adoptados deben quedar claramente identificados en la memoria de cálculo para permitir la reproducción y revisión del análisis estructural (MVCS, 2006).

### *1.2.16. Acción del viento*

El viento produce presiones y succiones sobre las superficies expuestas de una estructura. En las coberturas metálicas, estas acciones pueden generar fuerzas verticales y horizontales que afectan tanto a los elementos principales como a las conexiones y apoyos. Por ello, la acción del viento debe incorporarse de acuerdo con las características geométricas y ubicación de la estructura (MVCS, 2006).

ASCE/SEI 7-22 considera el viento entre las acciones ambientales que deben contemplarse en el diseño estructural y proporciona procedimientos para determinar las cargas correspondientes. Aunque esta norma constituye una referencia internacional, para el desarrollo de la presente investigación deben mantenerse como referencia normativa

principal las disposiciones del Reglamento Nacional de Edificaciones aplicables al proyecto (ASCE, 2022; MVCS, 2006).

### *1.2.17. Combinaciones de carga*

Las combinaciones de carga representan diferentes escenarios en los que pueden actuar simultáneamente las acciones consideradas en el diseño. Su finalidad es determinar las solicitaciones de diseño que pueden resultar más desfavorables para los diferentes elementos estructurales (MVCS, 2006; AISC, 2022).

La selección de las combinaciones debe corresponder al método de diseño utilizado. La AISC 360-22 incorpora tanto LRFD como ASD y establece procedimientos diferenciados para la evaluación de la resistencia requerida y la resistencia disponible (AISC, 2022).

### *1.2.18. Cargas debidas al viento*

La estructura, los elementos de cierre y los componentes exteriores de todas las edificaciones expuestas a la acción del viento, serán diseñados para resistir las cargas (presiones y/o succiones) exteriores e interiores debidos al viento, suponiendo que éste actúa en dos direcciones horizontales perpendiculares entre sí. En la estructura la ocurrencia de presiones y/o succiones exteriores serán consideradas simultáneamente (Ministerio de Vivienda, 2006).

**a) Velocidad de diseño**

La velocidad de diseño del viento hasta 10 m de altura será la velocidad máxima adecuada a la zona de ubicación de la edificación, pero no menos a 75 Km/h. La velocidad de diseño del viento en cada altura de la edificación se obtendrá de:

$$V_h = V\left(\frac{h}{10}\right)^{0.22}$$

Donde:

$V_h = Velocidad\ de\ diseño\ en\ la\ altura\ h\ en\ Km/h$

$V = Velocidad\ de\ diseño\ hasta\ 10\ m\ de\ altura\ en\ Km/h$

$h = Altura\ sobre\ el\ terreno\ en\ m.$

**b) Carga exterior de viento**

La carga exterior (presión o succión) ejercida por el viento se supondrá estática y perpendicular a la superficie sobre la cual se actúa (Ministerio de Vivienda, 2006). Se calcula mediante la expresión:

$$P_h = 0.005CV_h^2$$

Donde:

$P_h = Presión\ o\ succión\ Kg/m2$

$C = Factor\ (tabla)$

$V_h = Velocidad\ de\ diseño\ en\ la\ altura\ h\ en\ Km/h$

**Tabla 1.1**

*Factores de forma (C)*

| Construcción | Barlovento | Sotavento |
|---|---|---|
| Superficies verticales de edificios | +0.8 | -0.6 |
| Arcos y cubiertas cilíndricas con un ángulo de inclinación que no exceda 45° | ±0.8 | -0.5 |
| Superficies inclinadas a 15° o menos | +0.3 -0.7 | -0.6 |
| Superficies inclinadas entre 15° y 60° | +0.7 -0.3 | -0.6 |
| Superficies inclinadas entre 60° y la vertical | -0.8 | -0.6 |
| Superficies verticales o inclinadas (planas o curvas) paralelas a la dirección del viento | -0.7 | -0.7 |

Nota: El signo positivo indica presión y el negativo succión.

**c) Carga interior de viento**

Para el diseño de los elementos de cierre, incluyendo sus fijaciones y anclajes, que limitan en cualquier dirección el nivel que se analiza, tales como paneles de vidrio, coberturas, alféizares y elementos de cerramiento, se adicionará a las cargas exteriores calculadas, las cargas interiores (presiones y succiones) calculadas con los factores para presión interior (Ministerio de Vivienda, 2006).

**Tabla 1.2**

*Aberturas en la cubierta*

| ±0.3 | +0.8 | -0.6 |
|---|---|---|
| Uniforme en lados a barlovento y sotavento | Principales en lado a barlovento | Principales en el lado a sotavento o en los costados |

### *1.2.19. Combinación de cargas para diseños por esfuerzos admisibles*

La Norma considera que las cargas actúan de la siguiente manera:

- Combinación 1: D (Carga permanente o muerta)
- Combinación 2: D + L (carga permanente más variable o viva)
- Combinación 3: D + W (carga permanente más carga de viento)
- Combinación 4: α (D + W + T) (carga permanente, viento y temperatura; α = 0.75) (Ministerio de Vivienda, 2006)

### *1.2.20. Estructuras metálicas*

La Norma de diseño, fabricación y montaje de estructuras metálicas para edificaciones acepta los criterios del método de Factores de Carga y Resistencia (LRFD) y el método por Esfuerzos Admisibles (ASD).

Su obligatoriedad se reglamenta en esta misma Norma y su ámbito de aplicación comprende todo el territorio nacional. La exigencia de esta Norma se consideran mínimas.

**a) Acero estructural**

Se refiere a aquellos elementos de acero de sistemas estructurales de pórticos y reticulados que sean parte esencial para soportar las cargas de diseño.

**b) Designaciones ASTM**

- Acero estructural ASTM A36. Tubos redondos de acero negro y galvanizado, soldados y sin costura, ASTM A53, Gr. B.
- Tubos estructurales de acero al carbono, doblados en frío, soldados y sin costura, ASTM A500.
- Tubos estructurales de acero al carbono, doblados en caliente, soldados y sin costura, ASTM A501.

**c) Pernos arandelas y tuercas**

Los pernos, arandelas y tuercas de acero cumplirán una de las siguientes especificaciones estándar:

- Tuercas de acero al carbono y de aleación para pernos de servicio de alta precisión y alta temperatura, ASTM A194.

- Pernos y pernos de cortante de acero al carbono, de resistencia a la tracción 414 MPa, ASTM A307.
- Pernos y pernos de cortante de acero templado y revenido, ASTM A449.

### *1.2.21. Diseño por esfuerzos admisibles (ASD)*

El método ASD utiliza las cargas de servicio y compara los efectos producidos por estas con una resistencia admisible. La AISC 360-22 mantiene este procedimiento como una alternativa de diseño junto con LRFD, por lo que el proyectista debe identificar claramente cuál de los métodos utiliza para verificaciones estructurales (AISC, 2022).

En la presente investigación debe existir correspondencia entre las combinaciones de carga, las fuerzas obtenidas mediante SAP2000 y las ecuaciones utilizadas para verificar la resistencia de los elementos. No debe mezclarse una combinación correspondiente a LRFD con una expresión de resistencia admisible sin justificar previamente el procedimiento empleado (AISC, 2022).

### *1.2.22. Desplazamientos y deformaciones*

Los desplazamientos representan los movimientos que experimentan los nodos de una estructura como consecuencia de las acciones aplicadas. La evaluación de estos movimientos permite analizar el comportamiento de la estructura bajo condiciones de servicio y determinar si las deformaciones resultan compatibles con los criterios establecidos para el sistema estructural (AISC, 2022).

En el análisis mediante SAP2000, los desplazamientos pueden obtenerse para diferentes casos de carga y combinaciones. El programa permite representar gráficamente la forma deformada de la estructura y obtener valores tabulados de desplazamientos, fuerzas internas y otros resultados (Computers and Structures, Inc. [CSI], 2022).

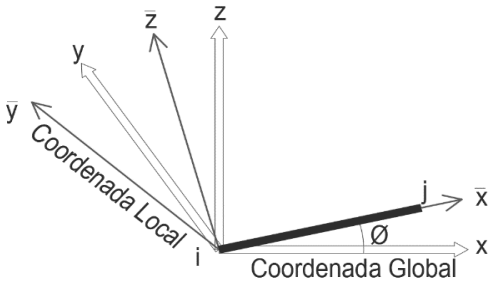
**a) Sistema de coordenadas**

Consideramos un sistema general de coordenadas y otra local.

En la gráfica se presenta las coordenadas generales como flechas planas y las locales con líneas, diferenciados por un ángulo Ø.

**Figura 1.5**

*Coordenadas generales y locales*



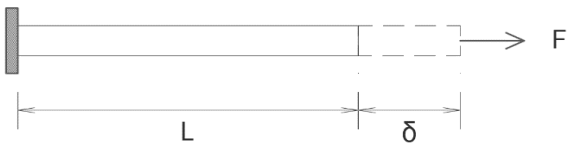

Nota: Representación cartográfica de coordenadas según Jairo Uribe.

Barra prismática sometida a tensión o compresión simple. En resistencia de materiales se vio que dicha barra experimenta una elongación δ dada por:

$$\delta = \frac{FL}{AE}$$

**Figura 1.6**

*Deformación ante fuerzas axiales*




Donde:

$\delta = Deformación\ de\ la\ barra$

$F = Fuerza\ aplicada\ de\ tracción\ o\ compresión$

$L = Longitud\ de\ la\ barra$

$A = Area\ de\ la\ sección\ de\ la\ barra$

$E = Módulo\ de\ elasticidad\ de\ la\ barra$

Para una carga unitaria, desde un punto de vista físico, la rigidez responde a:

$$k_c = \frac{AE}{L}$$

Para un conjunto de barras la rigidez total es:

$$\left| K \right| = AE / L \begin{vmatrix} ui & vi & uj & vj \\ c^2 & cs & -c^2 & -cs \\ cs & s^2 & -cs & -s^2 \\ -c^2 & -cs & c^2 & cs \\ -cs & -s^2 & cs & s^2 \end{vmatrix}$$

Donde:

$$c^2 = cos^2 Ø$$

$$s^2 = sen^2 Ø$$

$$cs = (cosØ)(senØ)$$

Para las fuerzas internas:

$$S_{ij} = \frac{AE}{L}[c \quad s]_{ij}\begin{bmatrix} u_j & -u_i \\ v_j & -v_i \end{bmatrix}$$

Donde:

$$S_{ij} = Barra\ ij$$

$$u_i = Desplazamiento\ horizontal\ del\ punto\ inicial$$

$$v_i = Desplazamiento\ vertical\ del\ punto\ incial$$

$$u_j = Desplazamiento\ horizontal\ del\ punto\ final$$

$$v_j = Desplazamiento\ vertical\ del\ punto\ final$$

### *1.2.23. Vigas con cargas inclinadas*

Las tensiones normales vinculadas con los momentos My y Mz se obtienen con la fórmula de la flexión. Entonces, estas tensiones producidas cuando ambos momentos actúan al mismo tiempo; por ejemplo, considérense las tensiones en un punto de la sección transversal que tenga coordenadas positivas "y" y "z". Un momento positivo My produce tracción en este punto y un momento positivo Mz produce compresión; así, la tensión normal en el punto A es:

$$\sigma_x = \frac{M_y z}{I_y} - \frac{M_z y}{I_z}$$

En donde Iy e Iz son los momentos de inercia del área de la sección transversal con respecto a los ejes "y" y "z", respectivamente. Con esta ecuación es posible encontrar la tensión normal en cualquier punto de la sección transversal sustituyendo los valores algebraicos apropiados (James Gere, 2009).

**a) Eje neutro**

La ecuación del eje neutro puede determinarse igualando la tensión normal a cero.

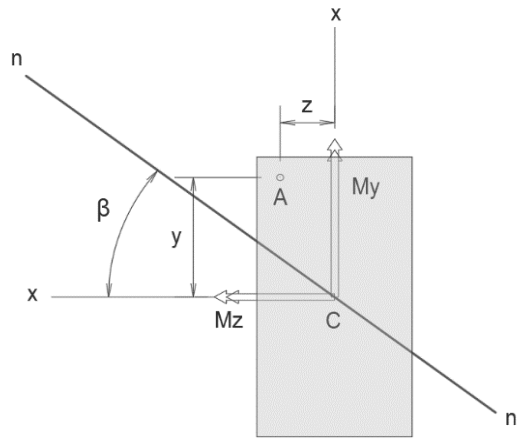
$$\frac{M_y z}{I_y} - \frac{M_z y}{I_z} = 0$$

Esta ecuación muestra que el eje neutro nn es una línea recta que pasa por el centroide C. El ángulo β entre el eje neutro y el eje "z" se determina como sigue:

$$tan\beta = \frac{y}{z} = \frac{M_y I_z}{M_z I_y}$$

**Figura 1.7**

*Ubicación del eje neutro en vigas con cargas inclinadas*



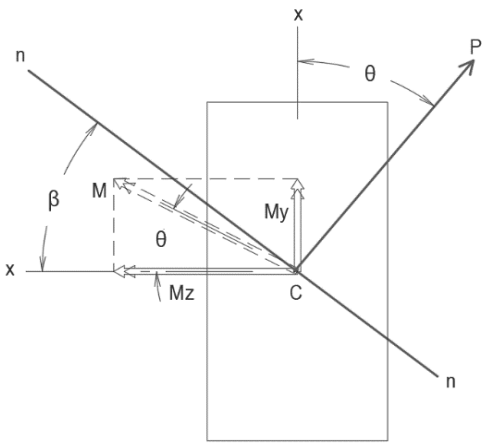

Nota: Eje neutro en vigas por James y Barry.

**b) Relación entre el eje neutro y la inclinación de las cargas**

La orientación del eje neutro con respecto al eje "z" se determina por medio de los momentos flectores y de los momentos de inercia. Ahora queremos determinar la orientación del eje neutro respecto al ángulo de inclinación de las cargas que actúan sobre la viga (James, 2009).

**Figura 1.8**

*Ángulo de referencia en vigas con cargas inclinadas*



$$\frac{M_y}{M_z} = \tan\theta$$

$$\tan\beta = \frac{M_y I_z}{M_z I_y} = \frac{I_z}{I_y}\tan\theta$$

### *1.2.24. Comportamiento estructural*

El comportamiento estructural corresponde a la respuesta que desarrolla una estructura frente a las acciones aplicadas. Esta respuesta puede evaluarse mediante variables como reacciones, fuerzas axiales, esfuerzos, desplazamientos, deformaciones y condiciones de estabilidad. En una armadura metálica, estas variables están relacionadas con la geometría, propiedades del material, condiciones de apoyo y comportamiento de las conexiones (AISC, 2022; MVCS, 2006).

En las conexiones entre armaduras y columnas, los estudios experimentales recientes han demostrado que la configuración de los componentes puede modificar la rigidez y capacidad resistente de la conexión. Fan et al. (2022) encontraron diferentes mecanismos de falla durante ensayos a escala real, evidenciando que la conexión forma parte del comportamiento resistente del sistema.

### *1.2.25. Rigidez estructural*

La rigidez representa la capacidad de un elemento o sistema estructural para oponerse a las deformaciones producidas por las acciones aplicadas. En una estructura metálica, la rigidez depende de las propiedades del material, la geometría de las secciones, la configuración del sistema y las condiciones de conexión y apoyo (AISC, 2022).

La rigidez de las conexiones puede influir en la respuesta de una estructura. Los ensayos realizados por Fan et al. (2022) mostraron que las características de una conexión entre armaduras y columnas intervienen en su respuesta frente a cargas estáticas. Por ello, las conexiones deben considerarse dentro de la evaluación del comportamiento estructural cuando su deformabilidad pueda afectar la respuesta del sistema.

### *1.2.26. Resistencia estructural*

La resistencia estructural corresponde a la capacidad de un elemento o sistema para soportar las solicitaciones producidas por las cargas sin alcanzar un estado límite no

permitido. En estructuras de acero, la resistencia depende de las propiedades del material, geometría de la sección, condiciones de estabilidad y características de las conexiones (AISC, 2022).

La verificación de resistencia debe realizarse comparando la demanda obtenida del análisis con la capacidad disponible del elemento. La AISC 360-22 proporciona procedimientos para evaluar la resistencia disponible de miembros sometidos a tracción, compresión, flexión, corte y combinaciones de acciones, además de procedimientos específicos para conexiones (AISC, 2022).

### *1.2.27. Modelamiento estructural*

El modelamiento estructural consiste en representar mediante un modelo matemático las características geométricas, materiales, conexiones, apoyos y acciones que intervienen en el comportamiento de una estructura. La calidad del análisis depende, entre otros aspectos, de la correspondencia entre el modelo utilizado y las condiciones físicas que se pretenden representar (CSI, 2022).

SAP2000 permite construir modelos estructurales mediante elementos de marco, asignar propiedades de materiales y secciones, definir apoyos y cargas, realizar análisis estáticos y dinámicos y obtener resultados en forma gráfica y tabulada. Estas funciones permiten utilizar el programa para analizar sistemas estructurales metálicos y revisar las fuerzas internas y desplazamientos de los elementos (CSI, 2022).

### *1.2.28. Condiciones de apoyo y respuesta estructural*

Las condiciones de apoyo constituyen una parte fundamental del modelo estructural porque determinan los grados de libertad restringidos y las reacciones que desarrolla la estructura. Una modificación de las restricciones puede producir cambios en la distribución de las fuerzas internas y en los desplazamientos de los elementos (MVCS, 2006; CSI, 2022).

Esta relación es especialmente relevante para la presente investigación, debido a que uno de sus objetivos consiste en comparar el comportamiento de una armadura metálica bajo diferentes condiciones de apoyo. El análisis debe realizarse manteniendo

constantes las demás condiciones del modelo para que las diferencias observadas puedan atribuirse a la modificación de los apoyos.

### *1.2.29. Estabilidad estructural*

La estabilidad estructural se refiere a la capacidad del sistema para mantener una configuración resistente frente a las acciones aplicadas sin desarrollar mecanismos de inestabilidad incompatibles con las condiciones de diseño. En estructuras metálicas, la estabilidad puede estar relacionada con el comportamiento global de la estructura o con fenómenos locales de los elementos comprimidos (AISC, 2022).

La AISC 360-22 contempla procedimientos para considerar la estabilidad mediante diferentes métodos de análisis. La selección del procedimiento debe ser coherente con las características de la estructura y con el nivel de precisión requerido para representar los efectos de estabilidad (AISC, 2022).

### *1.2.30. Diseño de placas de apoyo*

Las placas de apoyo constituyen elementos de conexión destinados a transferir las fuerzas provenientes de la estructura metálica hacia los elementos que la sostienen. Su diseño debe considerar las fuerzas de compresión, corte y, cuando corresponda, tracción y momentos producidos por las condiciones de carga y apoyo (AISC, 2022).

La geometría y espesor de la placa deben guardar relación con las fuerzas que se transmiten y con las características de los elementos conectados. En consecuencia, el diseño de la placa no debe realizarse independientemente de las reacciones obtenidas en el análisis estructural, sino a partir de las solicitaciones correspondientes al apoyo analizado (AISC, 2022).

### *1.2.31. Correspondencia entre modelo y detalle constructivo*

La correspondencia entre el modelo estructural y el detalle constructivo constituye una condición necesaria para que los resultados del análisis representen adecuadamente el comportamiento esperado de la estructura. Si el modelo considera un apoyo móvil, una conexión articulada o una determinada restricción, el detalle constructivo debe permitir un comportamiento compatible con dicha idealización (MVCS, 2006).

La importancia de esta correspondencia también se relaciona con el comportamiento experimental observado en conexiones metálicas. Fan et al. (2022) demostraron mediante ensayos a escala real que la configuración física de una conexión determina su respuesta frente a las cargas aplicadas. Por ello, los detalles de placas, pernos, soldaduras y apoyos deben ser consistentes con las hipótesis adoptadas en el modelo estructural.

# CAPÍTULO II
# METODOLOGÍA

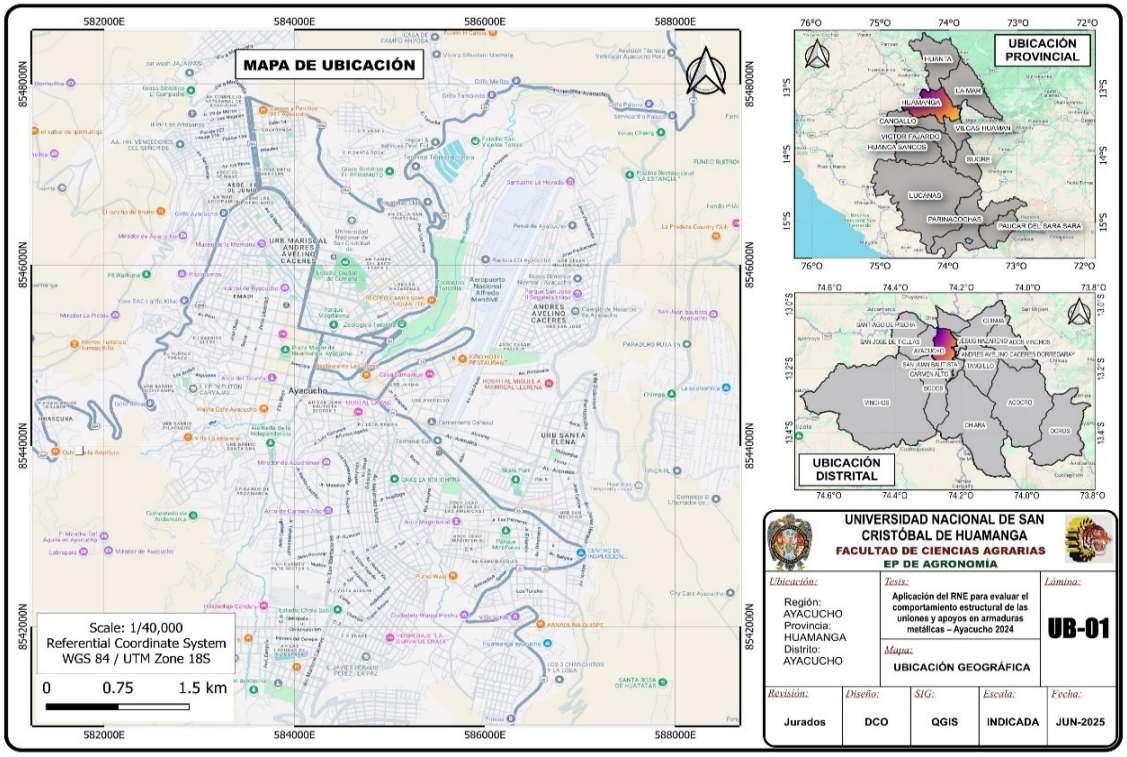
## 2.1. Ubicación

La investigación se realizó en la ciudad de Ayacucho – Huamanga – Ayacucho, cuyos análisis se desarrollaron en diferentes puntos de la ciudad de Ayacucho.

- Altitud : 2 761 m.s.n.m.
- Norte : 8511962.00 m.
- Este : 558312.00 m.
- Ubigeo : 050101

**Figura 2.1**

*Ubicación geogafica de la investigación*




Nota: Elaboración propia, QGIS 3.8

## 2.2. Materiales y equipos

Se consideraron tubos metálicos, de sección cuadrática; corresponde al acero estructural ASTM – A36; cuyas características mecánicas se indican:

- Peso específico 7,850 Kg/$m^3$.
- Esfuerzo a la fluencia 250 MPa (Mega Pascales).
- Tensión ultima 400 MPa (Mega Pascales).
- Esfuerzo a la tracción 480 MPa (Mega Pascales).

La resistencia de diseño a compresión se determinó según la esbeltez KL/r y el estado límite de pandeo; no se adopta como una propiedad constante independiente del material.

- Módulo de elasticidad E = 190 – 210 GPa (Giga Pascales).
- Módulo de rigidez a cortante, G = 32 – 69 GPa (Giga Pascales).
- Coeficiente de dilatación térmica, α = 9.9 – 12(10^-6)/°C
- Coeficiente de Poisson 0.2 – 0.3.

## 2.3. Normas de referencia

Todo el trabajo se realizó bajo la Norma Técnica E.090 Estructuras Metálicas. Las cargas bajo las condiciones de la Norma Técnica E.020 Cargas.

## 2.4. Procedimiento general de análisis y diseño

El proceso aplicado se organizó en una secuencia verificable: (1) recopilación de la geometría y de los detalles construidos; (2) definición de materiales y secciones; (3) determinación de cargas permanentes y variables; (4) formulación de combinaciones de carga; (5) idealización de nudos y apoyos; (6) modelamiento tridimensional en SAP2000; (7) obtención de fuerzas internas, reacciones y desplazamientos; (8) control independiente de equilibrio; (9) verificación de barras a tracción, compresión, flexión y corte; (10) diseño de pernos, placas y soldaduras de los apoyos; y (11) comparación entre la configuración existente y la alternativa con apoyo móvil. La guía desarrollada con los datos de la investigación se presenta en el Anexo 1.

### *2.4.1. Diseño por condiciones de resistencia*

Para el método LRFD la resistencia de diseño de cada sistema o componente estructural deberá ser igual o mayor a la resistencia requerida por las cargas factorizadas.

La resistencia de diseño ØRn para cada estado límite se calculará multiplicando la resistencia nominal Rn por el factor de resistencia Ø.

Para el método ASD los esfuerzos debidos a las cargas externas en cada sistema o componente estructural no deberán exceder los esfuerzos admisibles.

### *2.4.2. Diseño de elementos sometidos a tracción*

La verificación LRFD de una barra a tracción exige que la resistencia de diseño sea mayor o igual que la fuerza axial requerida: $\varphi tPn \geq Pu$. Deben revisarse, como mínimo, la fluencia de la sección bruta, $Pn = FyAg$ con $\varphi t = 0.90$, y la rotura de la sección neta efectiva, $Pn = FuAe$ con $\varphi t = 0.75$. Cuando la barra está soldada y no presenta perforaciones, el área neta puede coincidir con el área bruta; si existen pernos, se descuentan los agujeros y se determina el área efectiva. También deben verificarse el bloque de cortante y la resistencia de la conexión, porque una barra suficiente puede fallar antes en su nudo (MVCS, 2006; AISC, 2016).

### *2.4.3. Diseño de elementos sometidos a compresión*

En compresión, además de la resistencia del material, se debe controlar la inestabilidad por pandeo. La condición LRFD es $\varphi cPn \geq Pu$, donde $Pn = FcrAg$ y $\varphi c = 0.90$. La tensión crítica Fcr depende de la esbeltez KL/r y de la tensión elástica de Euler $Fe = \pi^2E/(KL/r)^2$. Para el intervalo inelástico puede emplearse Fcr = 0.658^(Fy/Fe)Fy; para el intervalo elástico, Fcr = 0.877Fe. Por tanto, no corresponde adoptar un único valor constante de resistencia a compresión para el acero: la capacidad cambia con la longitud libre, el radio de giro y las condiciones de apoyo (MVCS, 2006; AISC, 2016).

### *2.4.4. Cargas*

Las cargas consideradas para el presente trabajo, están recomendadas en las Normas Técnicas Peruanas; éstos consisten en: cargas permanentes y cargas variables.

**a) Cargas permanentes**

Son aquellas que no varían en el tiempo y permanecen en el lugar de ubicación establecidas; dentro de ellas tenemos: el peso propio de la estructura, peso de la cobertura y algún otro elemento que cumpla con las condiciones de permanencia.

**b) Cargas variables**

Se denominan así, a las cargas que se presentan ocasionalmente y no siempre con la misma magnitud. Dentro de ellas tenemos: cargas presentes durante el proceso constructivo (personal obrero y equipos de construcción); cargas de viento, lluvia o granizo.

Para el caso del diseño de armaduras metálicas; las cargas permanentes y variables se aplican en su condición estática.

### *2.4.5. Combinación de cargas*

Para el caso del Método LRFD, el Reglamento, recomienda la siguiente combinación.

$$U = 1.2\,CP + 1.2\,CV$$

Donde:

U : Carga ultima de diseño

CP : Carga permanente

CV : Carga variable

Una vez obtenida la solicitación, a este se le afecta Ø (Coeficiente de resistencia); el producto deberá igual o menor a la resistencia Nominal. Los esfuerzos admisibles del material, son aquellos valores límites recomendados.

Para el Método ASD; el Reglamento, recomienda:

$$U = CP + CV$$

Una vez determinada la solicitación, se verifica el esfuerzo requerido; este valor deberá ser siempre menor al admisible nominal.

### *2.4.6. Pre dimensión*

Responde al proceso, donde se determina: la geometría de la estructura, altura de la misma, espacios de distribución de los elementos estructurales; todos están en función al tipo de cobertura a utilizar. Básicamente obedecen a ecuaciones pre establecidas, las que recomienda la Norma Técnica Peruana.

**a) Cobertura**

Evaluada las bondades y propiedades físicas del material a conformar la cobertura, aceptamos el uso de plantas metálicas galvanizadas tipo Aluzin. Menor peso frente a la calamina, requiere apoyos a mayor distancia entre ellas, adecuada fijación a la estructura de techo (correas).

**b) Correa**

Son aquellos elementos estructurales, donde van apoyados las planchas de la cobertura; cubren la luz entre armaduras. La pre dimensión de la sección de la correa, más bien responde a un cálculo luego de efectuar el proceso de diseño.

Las correas son vigas, que pueden ser simplemente apoyadas o continuas, en nuestro caso consideramos como viga continua.

**c) Armadura**

Por cuestiones de arquitectura, presentación y funcionalidad; optamos por un arco rebajado; la armadura por estabilidad y resistencia es un elemento tridimensional, con una altura y base definida. La altura está conformada por un cordón inferior y otra superior, esta altura se pre dimensiona en función a la luz libre a cubrir.

$$h = \frac{L}{40}$$

Donde:

h = Altura buscada (m)

L = Luz libre (20 m)

Procesado, tenemos: h = 0.50 m

La base usualmente es h/2; por facilidad de construcción consideramos, b = 0.30 m. El espaciamiento de los componentes menores: tirantillos y parecillos. Para evitar posibles pandeos y guardando relación en distancias con la altura, consideramos el espaciado de los tirantillos a 0.70 m y las diagonales o parecillos hacen la hipotenusa del cuadrilátero conformado, entre el par, tirante y tirantillos; buscando en todo momento conformar triángulos con la unión de los elementos considerados.

**d) Apoyos**

Para el tipo de estructura planteada, el reglamento recomienda dos tipos de apoyos: fijo y móvil. El fijo restringe desplazamientos en dos direcciones, previamente establecidos; pero no así los giros. El apoyo móvil restringe desplazamiento en una sola dirección.

### *2.4.7. Casos de ubicación de los apoyos*

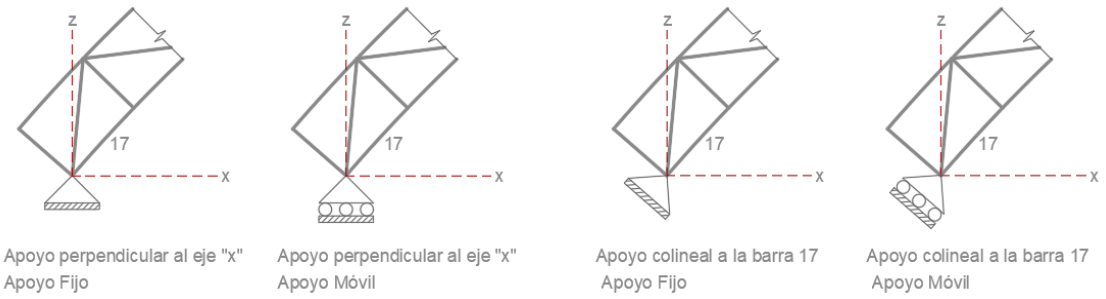
Si la armadura obedece a una forma de una curva y los apoyos están en el plano XZ, la estructura predomina en su trabajo a flexión, por lo tanto, se recomienda utilizar apoyos fijos en ambos lados. Puede presentarse sobre esfuerzos por variación de temperatura ambiental, siendo necesario considerar una rótula con restricción vertical en la parte central, evitando efectos adversos por efectos ambientales.

Si la armadura es del mismo tipo al anterior descrito; los apoyos son perpendiculares a la tangente del inicio de curva; es recomendable utilizar, apoyo fijo y móvil; la estructura tienda a trabajar a compresión.

En nuestro caso, consideramos los dos apoyos fijos; debido a que el interés del diseño responde a una comparación entre una armadura existente y el diseño que realizaremos.

**Figura 2.2**

*Tipos de apoyos fijos y móviles*




Nota: Apoyo perpendicular y colineal en sus diferentes apoyos.

## 2.5. Problemas específicos

1. Los diseños estructurales se desarrollan sin considerar las uniones y apoyos recomendados, plasmándose en los planos sin la presencia de estos detalles.

2. La construcción con las deficiencias indicadas, están expuestas a sufrir deformaciones, no solo por las acciones de cargas externas, sino también por variaciones de temperatura, generando mayores esfuerzos internos.

# CAPÍTULO III
# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 3.1. Fuerzas internas en las barras de la armadura

En la tabla adjunto presentamos: la primera columna indica el número de orden; la segunda el nombre o número de barra; la tercera la fuerza interna, compresión con signo negativo y tracción con signo positivo; la cuarta columna nos indica la fuerza cortante presente en el nudo; por último, la quinta columna nos indica el momento total en el nudo.

En la siguiente tabla, presentamos los resultados de: la armadura con apoyos fijos ubicados en el plano XX y la siguiente responde cuando los apoyos son perpendiculares a la tangente de la curvatura, un apoyo fijo y el otro en rodillo. Se observa la diferencia de resultados.

Nota: En las figuras antes presentadas; tales como el resultado de la fuerzas axiales y cortantes, exponemos gráficamente antes que valores, por simple didáctica. En el caso de las fuerzas axiales, las barras representadas con color azul nos indican que trabajan a Tracción, y las de color rojo a Compresión; y en los de corte, color azul cortes positivos y rojo negativos.

**Tabla 3.1**

*Fuerzas internas en cada elemento de la armadura bajo las condiciones de apoyo estudiadas*

| N° | Barra | APOYOS FIJOS HORIZONTAL | | | FIJO Y ROTULA PERPENDICULAR | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Paxial(Kg) | Vz(Kg) | My(m-Kg) | Paxial(Kg) | Vz(Kg) | My(m-Kg) |
| 1 | 17 | -4,243.80 | -19.23 | -10.89 | -4,391.51 | -20.74 | -11.52 |
| 2 | 49 | -422.30 | 15.81 | 4.72 | -420.91 | 17.62 | -8.56 |
| 3 | 65 | -177.99 | -11.29 | -8.30 | -72.05 | -11.70 | -8.56 |
| 4 | 33 | 28.22 | -20.56 | -11.21 | 30.00 | -22.00 | -11.81 |
| 5 | 32 | -357.43 | 27.32 | -12.63 | -189.92 | 26.78 | -12.66 |
| 6 | 64 | 335.06 | 15.50 | -9.14 | 231.15 | 15.55 | -9.35 |
| 7 | 48 | -177.78 | 8.24 | -2.27 | -184.81 | 5.97 | -1.65 |
| 8 | 16 | -4,235.23 | 29.53 | -13.16 | -4,385.26 | 28.94 | -13.18 |
| 9 | 15 | -3,731.12 | -23.33 | -10.57 | -4,044.77 | -24.73 | -11.42 |
| 10 | 63 | -277.12 | -14.33 | -8.29 | -182.15 | -14.67 | -8.72 |
| 11 | 47 | -323.74 | -7.09 | -2.01 | -332.03 | -4.96 | -1.41 |
| 12 | 31 | -281.31 | -21.35 | -10.11 | -111.72 | -22.60 | -10.90 |
| 13 | 30 | -658.97 | 24.15 | -11.08 | -341.44 | 23.77 | -11.38 |
| 14 | 62 | 215.81 | 14.68 | -8.46 | 123.41 | 14.73 | -8.84 |
| 15 | 46 | -149.08 | 4.31 | -1.22 | -164.87 | 2.34 | -0.68 |
| 16 | 14 | -3,726.68 | 26.85 | -11.79 | -4,042.34 | 26.47 | -12.11 |
| 17 | 13 | -3,189.51 | -19.77 | -8.69 | -3,649.01 | -21.13 | -9.74 |
| 18 | 61 | -436.73 | -13.06 | -7.24 | -354.28 | -13.38 | -7.82 |
| 19 | 45 | -125.10 | -7.65 | -2.16 | -141.28 | -5.77 | -1.63 |
| 20 | 29 | -643.52 | -17.23 | -8.01 | -324.16 | -18.44 | -8.99 |
| 21 | 28 | -1,117.69 | 21.57 | -9.40 | -670.17 | 21.38 | -9.96 |
| 22 | 60 | 176.46 | 13.68 | -7.43 | 96.60 | 13.75 | -7.97 |
| 23 | 44 | -125.72 | 5.83 | -1.63 | -149.14 | 4.14 | -1.16 |
| 24 | 12 | -3,183.49 | 24.78 | -10.32 | -3,644.74 | 24.60 | -10.91 |
| 25 | 11 | -2,575.46 | -16.91 | -6.91 | -3,159.18 | -18.21 | -8.12 |
| 26 | 59 | -562.30 | -12.09 | -6.20 | -493.30 | -12.39 | -6.92 |
| 27 | 43 | 8.54 | -8.44 | -2.39 | -14.46 | -6.84 | -1.94 |
| 28 | 27 | -1,107.24 | -14.09 | -6.13 | -658.16 | -15.25 | -7.26 |
| 29 | 26 | -1,638.56 | 19.48 | -7.79 | -1,082.57 | 19.46 | -8.58 |
| 30 | 58 | 121.16 | 12.93 | -6.40 | 54.75 | 13.02 | -7.08 |
| 31 | 42 | -97.60 | 6.84 | -1.89 | -127.51 | 5.51 | -1.50 |
| 32 | 10 | -2,568.44 | 22.93 | -8.80 | -3,153.61 | 22.94 | -9.62 |
| 33 | 9 | -1,982.34 | -15.55 | -5.64 | -2,667.20 | -16.77 | -6.97 |
| 34 | 57 | -591.10 | -11.64 | -5.39 | -536.32 | -11.91 | -6.21 |
| 35 | 41 | 94.07 | -7.90 | -2.24 | 65.39 | -6.60 | -1.87 |
| 36 | 25 | -1,634.65 | -12.64 | -4.84 | -1,077.39 | -13.72 | -6.09 |
| 37 | 24 | -2,132.32 | 18.24 | 6.97 | -1,490.62 | 18.40 | -7.49 |
| 38 | 56 | 51.42 | 12.62 | 5.89 | -0.76 | 12.73 | -6.37 |
| 39 | 40 | -68.51 | 6.76 | 1.86 | -103.70 | 5.64 | 1.55 |
| 40 | 8 | -1,975.40 | 21.69 | 7.89 | -2,661.41 | 21.90 | -8.52 |

| N° | Barra | APOYOS FIJOS HORIZONTAL | | | FIJO Y ROTULA PERPENDICULAR | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Paxial(Kg) | Vz(Kg) | My(m-Kg) | Paxial(Kg) | Vz(Kg) | My(m-Kg) |
| 41 | 7 | -1,508.59 | -16.62 | 6.30 | -2,270.38 | -17.75 | -6.90 |
| 42 | 55 | -516.24 | -12.33 | 5.90 | -476.29 | -12.58 | -6.22 |
| 43 | 39 | 119.45 | -5.60 | -1.59 | 86.28 | -4.61 | -1.31 |
| 44 | 23 | -2,128.96 | -13.95 | 5.47 | -1,486.29 | -14.94 | -6.16 |
| 45 | 22 | -2,725.13 | 22.07 | 9.16 | -2,021.45 | 22.39 | -8.27 |
| 46 | 54 | 258.11 | 13.82 | 7.06 | 220.77 | 13.95 | -6.38 |
| 47 | 38 | -38.75 | 8.91 | 2.49 | -77.95 | 8.09 | 2.27 |
| 48 | 6 | -1,499.45 | 25.00 | 9.84 | -2,262.07 | 25.40 | -9.09 |
| 49 | 5 | -930.28 | -18.53 | 7.88 | -1,743.91 | -19.55 | 7.14 |
| 50 | 53 | -433.95 | -13.33 | 7.06 | -409.28 | -13.56 | 6.31 |
| 51 | 37 | -27.94 | -6.93 | -1.97 | -64.35 | -6.26 | -1.78 |
| 52 | 21 | -2,734.92 | -16.61 | 7.32 | -2,030.58 | -17.49 | 6.60 |
| 53 | 20 | -3,349.56 | 24.43 | 10.84 | -2,608.34 | 24.91 | 9.94 |
| 54 | 52 | 358.32 | 14.74 | 8.13 | 336.26 | 14.89 | 7.33 |
| 55 | 36 | -4.20 | 8.84 | 2.46 | -46.11 | 8.34 | 2.32 |
| 56 | 4 | -921.22 | 26.74 | 11.30 | -1,735.35 | 27.31 | 10.39 |
| 57 | 3 | -345.20 | -19.82 | 9.28 | -1,184.98 | -20.70 | 8.46 |
| 58 | 51 | -341.92 | -13.95 | 8.08 | -332.80 | -14.15 | 7.29 |
| 59 | 35 | -113.26 | -7.30 | -2.07 | -151.63 | -6.96 | -1.98 |
| 60 | 19 | -3,360.96 | -8.42 | 8.90 | -2,619.41 | -19.18 | 8.09 |
| 61 | 18 | -3,841.89 | 24.76 | 11.77 | -3,087.99 | 25.38 | 10.90 |
| 62 | 50 | 276.18 | 15.09 | 8.97 | 269.67 | 15.27 | 8.16 |
| 63 | 34 | 27.94 | 7.02 | 1.96 | -15.33 | 6.87 | 1.91 |
| 64 | 2 | -338.00 | 26.39 | 12.04 | -1,177.95 | 27.12 | 11.16 |
| 65 | 1 | -53.71 | -23.34 | 11.06 | -893.65 | -24.07 | 10.17 |
| 66 | 114 | -69.58 | 15.25 | 9.05 | -76.09 | 15.42 | 8.24 |
| 67 | 130 | -205.33 | -3.16 | -0.90 | -244.35 | -3.16 | -0.90 |
| 68 | 97 | -3,845.00 | -22.58 | 10.93 | -3,091.11 | -23.21 | 10.06 |
| 69 | 96 | -4,034.10 | 27.07 | 13.08 | -3,292.55 | 27.83 | 12.27 |
| 70 | 115 | 166.79 | -15.99 | 9.79 | 175.91 | -16.19 | 8.99 |
| 71 | 98 | 47.70 | -3.76 | -1.11 | 4.43 | -3.93 | -1.16 |
| 72 | 81 | -49.84 | 27.14 | 12.80 | -889.62 | 28.02 | 11.97 |
| 73 | 80 | -405.76 | -30.61 | 13.97 | -1,220.88 | -31.18 | 13.06 |
| 74 | 116 | 601.05 | 15.82 | 9.71 | 578.99 | 15.98 | 8.91 |
| 75 | 99 | -543.63 | -3.86 | -1.09 | -582.00 | -3.52 | -1.00 |
| 76 | 95 | -4,021.26 | -29.74 | 14.11 | -3,280.04 | -30.22 | 13.21 |
| 77 | 94 | -2,858.17 | 12.26 | 6.06 | -2,153.84 | 13.14 | 5.34 |
| 78 | 117 | -885.12 | -12.71 | 7.11 | -860.46 | -12.93 | 6.37 |
| 79 | 100 | 21.72 | 18.08 | 5.11 | -20.18 | 17.59 | 4.98 |
| 80 | 79 | -425.30 | 13.36 | 6.56 | -1,238.92 | 14.37 | 5.83 |

| N° | Barra | APOYOS FIJOS HORIZONTAL | | | FIJO Y ROTULA PERPENDICULAR | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Paxial(Kg) | Vz(Kg) | My(m-Kg) | Paxial(Kg) | Vz(Kg) | My(m-Kg) |
| 81 | 78 | -1,692.02 | -28.85 | 11.05 | -2,454.64 | -29.24 | -10.60 |
| 82 | 118 | 654.64 | 14.41 | 7.21 | 617.30 | 14.55 | -6.77 |
| 83 | 101 | 13.64 | -16.14 | -4.59 | -22.77 | -15.47 | -4.40 |
| 84 | 93 | -2,840.75 | -25.51 | 10.35 | -2,137.07 | -25.83 | -9.63 |
| 85 | 92 | -1,676.73 | 11.41 | -4.38 | -1,034.07 | 12.40 | -5.71 |
| 86 | 119 | -836.75 | -11.95 | -5.50 | -796.81 | -12.20 | -6.40 |
| 87 | 102 | -48.13 | 16.27 | 4.51 | -87.33 | 15.45 | 4.29 |
| 88 | 77 | -1,708.69 | 13.89 | -4.98 | -2,470.48 | 15.02 | -6.39 |
| 89 | 76 | -2,699.00 | -25.58 | -9.83 | -3,385.00 | -25.79 | -10.86 |
| 90 | 120 | 367.11 | 13.39 | -6.68 | 314.93 | 13.50 | -7.47 |
| 91 | 103 | 96.14 | -12.62 | -3.58 | 62.97 | -11.63 | -3.30 |
| 92 | 91 | -1,673.22 | -21.82 | -8.71 | -1,031.52 | -21.97 | -9.68 |
| 93 | 90 | -815.24 | 12.37 | -5.90 | -257.99 | 13.46 | -7.15 |
| 94 | 121 | -711.84 | -11.72 | -6.35 | -657.07 | -12.00 | -7.18 |
| 95 | 104 | -103.73 | 11.38 | 3.13 | -138.91 | 10.25 | 2.82 |
| 96 | 75 | -2,710.66 | 15.22 | -6.71 | -3,395.51 | 16.45 | -8.04 |
| 97 | 74 | -3,490.50 | -24.78 | -10.75 | -4,075.66 | -24.79 | -11.57 |
| 98 | 122 | 235.98 | 13.23 | -7.55 | 169.58 | 13.32 | -8.23 |
| 99 | 105 | 51.63 | -10.29 | -2.92 | 22.95 | -8.99 | -2.55 |
| 100 | 89 | -816.80 | -21.15 | -9.64 | -260.81 | -21.13 | -10.42 |
| 101 | 88 | -192.93 | 14.61 | -7.64 | 256.14 | 15.77 | -8.77 |
| 102 | 123 | -565.94 | -12.17 | -7.32 | -496.94 | -12.47 | -8.03 |
| 103 | 106 | -144.43 | 8.15 | -2.25 | -174.34 | 6.73 | -1.86 |
| 104 | 73 | -3,498.85 | 17.52 | -8.50 | -4,082.55 | 18.83 | -9.71 |
| 105 | 72 | -4,093.30 | -25.15 | -11.79 | -4,554.53 | -24.97 | -12.37 |
| 106 | 124 | 156.37 | 13.64 | -8.45 | 76.51 | 13.72 | -8.99 |
| 107 | 107 | -27.56 | -8.18 | -2.32 | -50.56 | -6.58 | -1.86 |
| 108 | 87 | -202.34 | -21.81 | -10.78 | 245.17 | -21.61 | -11.33 |
| 109 | 86 | 178.50 | 18.29 | -9.64 | 497.85 | 19.50 | -10.62 |
| 110 | 125 | -339.98 | -13.16 | -8.30 | -257.53 | -13.47 | -8.89 |
| 111 | 108 | -172.60 | 4.73 | -1.32 | -196.02 | 3.03 | -0.85 |
| 112 | 71 | -4,098.14 | 21.09 | -10.47 | -4,557.63 | 22.46 | -11.52 |
| 113 | 70 | -4,429.40 | -25.57 | -12.44 | -4,745.05 | -25.19 | -12.76 |
| 114 | 126 | 62.38 | 14.22 | -9.11 | -30.02 | 14.28 | -9.49 |
| 115 | 109 | -134.79 | -4.82 | -1.37 | -150.97 | -2.95 | -0.83 |
| 116 | 85 | 162.37 | -22.69 | -11.61 | 479.90 | -22.31 | -11.91 |
| 117 | 84 | 265.05 | 22.27 | -11.40 | 434.64 | 23.52 | -12.19 |
| 118 | 127 | -83.78 | -14.24 | -9.05 | 11.18 | -14.58 | -9.48 |
| 119 | 110 | -186.29 | 1.04 | -0.31 | -202.08 | -0.93 | -0.28 |
| 120 | 69 | -4,430.47 | 24.85 | -12.13 | -4,744.10 | 26.25 | -12.99 |

| N° | Barra | APOYOS FIJOS HORIZONTAL | | | FIJO Y ROTULA PERPENDICULAR | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Paxial(Kg) | Vz(Kg) | My(m-Kg) | Paxial(Kg) | Vz(Kg) | My(m-Kg) |
| 121 | 68 | -4,464.81 | -25.19 | -12.27 | -4,614.83 | -24.61 | -12.28 |
| 122 | 128 | -42.15 | 14.46 | -9.19 | -146.07 | 14.51 | -9.39 |
| 123 | 111 | -237.52 | -0.63 | 0.18 | -245.81 | 1.49 | 0.43 |
| 124 | 83 | 241.03 | -22.85 | -11.66 | 408.54 | -22.31 | -11.69 |
| 125 | 82 | 33.05 | 23.79 | -12.37 | 34.83 | 25.22 | -12.97 |
| 126 | 129 | 196.14 | -11.85 | -8.60 | 302.07 | -12.26 | -8.86 |
| 127 | 112 | -190.32 | -0.31 | -0.12 | -197.35 | -2.58 | -0.75 |
| 128 | 67 | -4,464.56 | 23.05 | -12.32 | -4,612.24 | 24.56 | -12.96 |
| 129 | 113 | -335.58 | 20.75 | 6.21 | -334.19 | 22.56 | 6.74 |

Nota: Resultado obtenido con el software SAP 2000.

### *3.1.1. Reacciones*

**Tabla 3.2**

*Resultado del proceso con el SAP 2000 versión 22, para ambas condiciones de apoyos*

CON APOYO FIJO

| Apoyo | | Fx(Kg) | | Fz(Kg) |
|---|---|---|---|---|
| A | | 2,582.50 | | 3,555.14 |
| B | | -2,762.50 | | 3,281.86 |

CON APOYO MOVIL

| Apoyo | Ø(Radian) | coseno(Ø) | Fuerza(Kg) | Fx(Kg) | seno(Ø) | Fz(Kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 0.86 | 0.66 | 4,437.27 | 2,911.10 | 0.75 | 3,348.86 |
| | 0.72 | 0.75 | 315.16 | 237.85 | 0.66 | 206.76 |
| Total | | | | 2,673.25 | | 3,555.62 |
| B | 0.86 | 0.66 | -4,349.16 | -2,853.30 | 0.75 | -3,282.36 |
| | 0.72 | 0.75 | 0.00 | 0.00 | 0.66 | 0.00 |
| Total | | | | -2,853.30 | | 3,282.36 |

Nota: Los valores nos indican que no existe mayor diferencia en valores finales; sin embargo, comparando por cada dirección existe la diferencia.

### *3.1.2. Desplazamientos*

Refiere al cambio de posición de los nudos por efecto de acción de las cargas externas; mostramos los valores en el nudo central o clave de la armadura.

**Tabla 3.3**

*Resultado del proceso con el programa*

CON APOYO FIJO

| Nudo | Δx(cm) | Δy(cm) | Δz(cm) |
|---|---|---|---|
| Central | 0.14 | 0.00 | -1.42 |
| Apoyo B | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

CON APOYO MOVIL

| Nudo | Δx(cm) | Δy(cm) | Δz(cm) |
|---|---|---|---|
| Central | 0.48 | 0.00 | -0.71 |
| Apoyo B | -2.98 | 0.00 | 0.00 |

### *3.1.3. Verificación de diseño*

Consideramos los resultados de la armadura con apoyos fijos en el plano XX. Seleccionamos la barra que mayor solicitación exige; en este caso es la barra 67 (Apoyo móvil), con una fuerza a compresión de 4,464.56 Kg.

**a) Carga última por Euler**

La ecuación Euler, permite verificar la carga última de compresión a soportar sin sufrir pandeo, en una columna o similar.

$$P_u = \frac{EI\pi^2}{(kL)^2}\ Kg.$$

Donde:

Pu = Carga última a soportar (Kg).

E = Módulo de elasticidad del tubo (Kg/cm$^2$).

I = Momento de inercia de la sección del tubo (cm$^4$).

k = Coeficiente de acuerdo al tipo de apoyo (1).

L = Longitud de la barra (cm).

| Pu(Kg) | E(Kg/cm2) | I(cm4) | ∏ | k | L(cm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 59,001.65 | 1,936,100.00 | 15.52 | 3.1416 | 1.00 | 70.90 |

La carga máxima a soportar es de 59,001.65 Kg.

### *3.1.4. Verificación por compresión*

Consiste en la evaluación del elemento estructural, frente a la carga actuando en forma perpendicular respecto al área neta de la sección; cuyo resultado se refiere a la

propiedad de respuesta del material, de acuerdo a la propiedad interna de ductilidad, medida como esfuerzo.

$$\sigma_c = \frac{P}{A}\ Kg/A = cm^2$$

Donde:

σc = Esfuerzo a la compresión solicitante (Kg/cm$^2$).

P = Fuerza axial de compresión solicitada (Kg).

A = Area neta de la sección de la barra (cm2).

| σc(Kg/cm2) | P(Kg) | A(cm2) |
|---|---|---|
| 1,143.65 | 4,464.81 | 3.90 |

La sección de la barra considera es: 50.8X50.8X2 mm (2”X2”X2 mm).

El esfuerzo a la compresión resistente, por el método LRFD, corresponde a:

σ_n=70 MPa.

σ_n=713.30 Kg/cm$^2$.

σ_u=0.85σ_n

σ_u=641.97 Kg/cm$^2$

Observamos que el esfuerzo solicitado es de 1,143.65 Kg/cm$^2$; sin embargo, soportan dos barras; por lo tanto, la solicitud real es de: 571.83 Kg/cm$^2$, significa que la sección está en condiciones de responder adecuadamente.

### *3.1.5. Verificación complementaria de la barra 67 mediante curva de compresión LRFD*

Para el tubo cuadrado de 50.8 × 50.8 × 2.0 mm se tiene Ag = 3.904 cm², I = 15.52 cm⁴ y r = √(I/Ag) = 1.994 cm. Con K = 1.00 y L = 70.90 cm, la esbeltez es KL/r = 35.56. Usando E = 1 936 100 kg/cm² y Fy = 2 549.29 kg/cm², resulta Fe = 15 111.83 kg/cm² y Fcr = 2 375.50 kg/cm². La resistencia de diseño es φcPn = 0.90FcrAg = 8 346.55 kg. Como Pu = 4 464.56 kg, se obtiene Pu/(φcPn) = 0.535 < 1.00. Por tanto, la barra 67 cumple a compresión aun verificándola individualmente, sin dividir artificialmente su fuerza entre dos barras. El valor de Euler de 59 001.65 kg se conserva como referencia

del pandeo elástico, mientras que la curva LRFD proporciona la resistencia de diseño aplicable.

**Ejemplo de verificación de una barra a tracción**

De la Tabla 3, la mayor tracción del caso con apoyos fijos corresponde a la barra 118, con Pu = 654.64 kg. Para la misma sección tubular, la fluencia de la sección bruta proporciona φtPn = 0.90FyAg = 8 957.19 kg. Al no considerar agujeros en una unión soldada, la rotura de la sección efectiva proporciona φtPn = 0.75FuAe = 11 942.92 kg, usando Fu = 4 078.86 kg/cm² y Ae = Ag. Controla la fluencia, con una relación demanda/capacidad de 654.64/8 957.19 = 0.073 < 1.00; por consiguiente, la barra cumple a tracción. La conexión soldada debe verificarse por separado para garantizar que pueda desarrollar, como mínimo, la fuerza requerida.

### *3.1.6. Verificación a la flexión*

Proceso mediante el cual, verificamos la respuesta del elemento estructural, frente a cargas que generan curvatura; en este caso se presenta el esfuerzo a la tensión por flexión; algunas veces la magnitud es similar al esfuerzo a la tracción.

Cálculo de la solicitud por flexión de la barra 67.

| Ø° | Ø(radian) | coseno | seno | P(Kg) | coseno(P) | seno(P) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 47.46 | 0.83 | 0.68 | 0.74 | 4,464.56 | 3,018.50 | 3,289.52 |

**Momentos:**

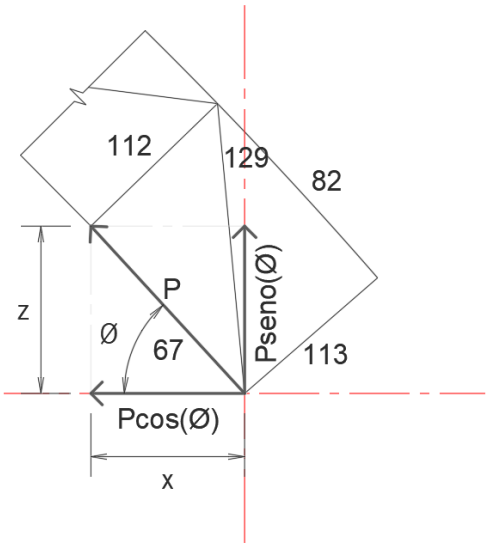
| Px(Kg) | z(m) | My(mKg) |
|---|---|---|
| 3,018.50 | 0.48 | 1,448.88 |

| Pz(Kg) | x(m) | My(mKg) |
|---|---|---|
| 3,289.52 | 0.52 | 1,710.55 |

La diferencia corresponde al momento solicitado: 261.77 m-Kg.

**Figura 3.1**

*Diagrama del cuerpo libre y descomposición de fuerzas de la barra 67*




La barra 67 trabaja a compresión, se representa como fuerza interna; la descomposición vectorial se muestra en componentes vertical y horizontal; los brazos para obtener los momentos se indican como "x" y "z" respectivamente. Las barras 129 y 113 convergen en un punto único con la barra 76.

### *3.1.7. Verificación del esfuerzo a la flexión*

Por tensión en vigas, tenemos:

$$\sigma_f = \frac{M(y)}{I}\ Kg/cm^2$$

Donde:

$\sigma_f = Esfuerzo\ a\ la\ flexión\ solicitada\ (Kg/cm2)$.

$M = Momento\ flexionante\ (26177\ cm\ Kg)$.

$y = Distancia\ del\ eje\ neutro\ a\ la\ fibra\ externa\ (2.54\ cm)$.

$I = Momento\ de\ inercia\ de\ la\ sección\ (15.52\ cm4)$.

Efectuado los cálculos la tensión solicitada es 4,282.45 Kg/cm$^2$.

Por otro lado, la tensión nominal es 400 MPa o 4,076 Kg/cm$^2$, multiplicado por Ø = 0.90, se tiene; una tensión resistente 3,668.40 Kg/cm$^2$.

El valor de la tensión resistente es menor, respecto a la solicitada; sin embargo, debido a que existen dos barras, el valor solicitado es mitad: 2,141.22 Kg/cm2; valor que es menor al resistente.

### *3.1.8. Verificación por cortante*

Proceso mediante el cual evaluamos deflexiones angulares en la sección del elemento estructural, se considera la no existencia de variación de dimensiones. La fuerza actuante es en forma paralela respecto al área neta resistente. También es un esfuerzo propio del material, con la que responde a una acción externa.

Por definición:

$$\tau_c = \frac{VQ}{Ib}\ Kg/cm^2$$

Donde:

$\tau_c = Cortante\ solicitida\ \ (Kg/cm2)$.

$V = Fuerza\ cortante\ solicitada\ (Kg)$.

$Q = Momento\ estático\ (Ad)cm3$.

$I = Momento\ de\ inercia\ de\ la\ sección\ (cm4)$.

$b = Base\ de\ la\ sección\ (cm)$.

El esfuerzo cortante solicitado es:

| v(Kg/cm2) | V(Kg) | Q(cm3) | I(cm4) | b(cm) |
|---|---|---|---|---|
| 100.33 | 2,224.05 | 3.56 | 15.52 | 5.08 |

Teniendo en cuenta que, el esfuerzo nominal es 32 GPa, o 326,080 Kg/cm2, factorado por Ø = 0.85, se tiene: 277,168 Kg/cm2. También la deformación unitaria angular se considera 0.002; entonces:

$$\tau_u = E_1 G\ (\frac{Kg}{cm^2}).$$

Donde:

$\tau_u = Esfuerzo\ cortante$ último $Kg/cm^2$.

$E_1 = Deformación\ angular\ unitaria.$

$G = Módulo\ de\ esfuerzo\ cortante\ Kg/cm^2$.

Luego, se tiene:

$$\tau_u = 554.34\ Kg/cm^2.$$

El valor obtenido, frente a lo solicitado es mayor. Significa que la sección responde adecuadamente al corte.

### 3.2. Dimensiones del apoyo

Los apoyos están conformados por planchas metálicas, fijas en cada extremo de la armadura; una base fija al parante o columna y la otra al terminal de la armadura; estas dos planchas se unen y fijan entre sí, con pernos, cuyo número responde a un cálculo. Las cargas actuantes, son las reacciones a las fuerzas internas de los elementos de la armadura, previamente comparadas con las reacciones exigidas por las cargas externas.

Debido a que el desarrollo analítico, realizamos en el plano xz; finalmente contamos con una carga o fuerza en la dirección "z", este valor es importante de preferencia para el diseño de la columna; en el caso de las planchas metálicas, utilizaremos la fuerza en la dirección "x", cuya acción es de cortante.

El material considerado en es acero dulce, nombre con el que se le conoce comercialmente. Los esfuerzos cortante resistentes, para las planchas metálicas y pernos consideramos el 50% del acero de los tubos.

Cálculo del número de pernos:

Datos:

$Fx = Fuerza\ cortante\ actuante\ (Kg)$.

$\tau_u = Esfuerzo\ cortante$ último $Kg/cm^2$.

$A = Area\ de\ sección\ requerida\ (cm^2)$.

Por corte directo:

$$\tau_c = \frac{Fx}{A}\ Kg/cm^2$$

La fuerza Fx = 2,582.50 Kg; para el desarrollo por el método LRFD, debemos factorar, utilizando el coeficiente 1.20; cuyo resultado es: 3,099.00 Kg.

| A(cm2) | Fx(Kg) | Corte(Kg/cm2) | Ø 1/2" | Ø 5/8" | Ø 3/4 |
|---|---|---|---|---|---|
| 11.181 | 3,099.000 | 277.168 | 8.804 | 5.590 | 3.937 |

Esto indica, que podemos utilizar 6 pernos de Ø 5/8", de lo contrario 4 Ø ¾". Optamos por el de Ø 5/8".

**Cálculo del espesor de la plancha metálica**

**Por cortadura en contacto**

El área de contacto se considera, el diámetro, multiplicado por el espesor. La fuerza cortante es aquella que actúa en un orificio de un perno; si tenemos seis pernos cada uno de Ø 5/8", la fuerza es dividida en seis partes.

$$Fx = 516.50\ Kg.$$

$$A = D(e)\ cm^2.$$

$$D = 1.905\ cm.$$

$$e = \frac{Fx}{\tau_c D}\ cm.$$

| e(cm) | Ø(cm) | F(kg) | Corte(Kg/cm2) |
|---|---|---|---|
| 0.978 | 1.905 | 516.500 | 277.168 |

Significa que se requiere una plancha de acero con espesor de 3/8".

## 3.3. Proceso de diseño y construcción del apoyo

El diseño del apoyo se inicia con las reacciones del modelo. Para la condición de apoyo fijo, la Tabla 4 proporciona en A una reacción horizontal Fx = 2 582.50 kg y una reacción vertical Fz = 3 555.14 kg. La reacción horizontal factorizada utilizada en la verificación es Vu = 1.20(2 582.50) = 3 099.00 kg. Con esta demanda se revisaron el corte de los pernos, el aplastamiento de la placa, su espesor y la transferencia de las fuerzas hacia la columna. La solución adoptada comprende seis pernos de 5/8 de pulgada y una placa de acero A36 de 3/8 de pulgada de espesor, sin perjuicio de comprobar en los planos definitivos las distancias al borde, separaciones, soldaduras y dimensiones reales.

Para la construcción se debe: replantear los ejes y cotas; comprobar la resistencia y nivelación de la columna; fabricar y perforar las placas de acuerdo con el plano;

presentar el conjunto sin forzar la armadura; ejecutar las soldaduras especificadas; colocar pernos, arandelas y tuercas; ajustar en secuencia uniforme; verificar la alineación y el libre desplazamiento del apoyo móvil; y realizar una inspección visual final. El apoyo fijo debe restringir las traslaciones previstas, mientras que el móvil debe permitir el desplazamiento horizontal de diseño sin perder la capacidad de transmitir la reacción vertical.

## 3.4. Discusiones

### *3.4.1. Correas*

La idealización responde a una viga continua, con una luz de eje a eje de 6.20 m. Como carga a soportar se considera: el peso propio, peso de la cobertura y por ser de mayor incidencia tomamos en cuenta la acción del viento.

El material considerado es: acero tipo ASTM-A36, cuyas especificaciones técnicas se exponen al inicio.

La sección es un tubo de 40x60x1.8 mm.

El comportamiento, por la forma curva de las armaduras, no responden a un momento de inercia netamente hacia la base de la sección de correa, más bien mantiene una inclinación respecto a la vertical, también este ángulo varía de una a otra correa; obligándonos a determinar la sección real reducida, bajo estas consideraciones. Esta sección reducida muestra una solicitud de esfuerzo a la tensión mucho mayor que el ultimo, esfuerzo resistente; se presenta en el apoyo intermedio (negativo).

### *3.4.2. Armadura*

Se idealiza como una viga transformada, recomendada para soportar en este caso techos de menor peso; la forma y posición de los apoyos determinan las solicitaciones estructurales de cada elemento de la armadura. La forma de arco responde al objetivo de que trabaje a compresión preferentemente, la visión arquitectónica complementa con la belleza en su conjunto.

La estructura responde a una geometría de un arco rebajado.

Consta de un montante superior o Par y un montante inferior o Tirante ubicados en paralelo, a una distancia de 0.50 m, de eje a eje; tirantillos ubicados a 0.70 m a lo largo

del arco, en forma perpendicular al Par y Tirante, conformando figuras triangulares, se tienen los parecillos diagonales, uniendo alternadamente, la intersección del tirantillo con el par y el tirantillo con el tirante. Esta conformación está referenciada en el plano xz; a una distancia de 0.30 m, en la dirección "y"; de modo que forme una figura tridimensional, cuadrilátero con una sección de 0.30X0.50 m; fijados por elementos horizontales.

Consta de apoyos fijos, posicionados en el plano "x"; las restricciones en el plano son, hacia el eje xx y zz; y en el espacio también en el eje yy. Teóricamente no existe restricción al giro a los ejes xx y zz, pero sí existe restricción hacia el eje yy.

Por otro lado, la posición de los apoyos permite el comportamiento de la armadura, a manera de una viga curva, facilitando la presencia de momentos flectores marcados en los elementos y la estructura total.

Verificado las secciones, éstas resisten las cargas externas asignadas; con uniones de eje a eje.

Las uniones entre elementos deberán ser a base de soldadura corrida de 0.5 cm de ancho.

### *3.4.3. Apoyos*

Se consideran elementos planos, de acuerdo a la propuesta; consta de una plancha superior metálica adherida al terminal de la armadura, mediante soldadura corrida. Son las encargadas de absorber la fuerza horizontal de reacción en condición de cortadura, éstas son resistidas por seis pernos de un diámetro de 5/8" cada uno. La plancha metálica es de 40x80 cm, y un espesor de 1 cm, o 3/8"; el material es el acero dulce (A36).

La posición horizontal permite excentricidad respecto a la reacción vertical o gravitatoria.

## 3.5. Observaciones

En los planos definitivos de la estructura referencial, así como la construcción responden a:

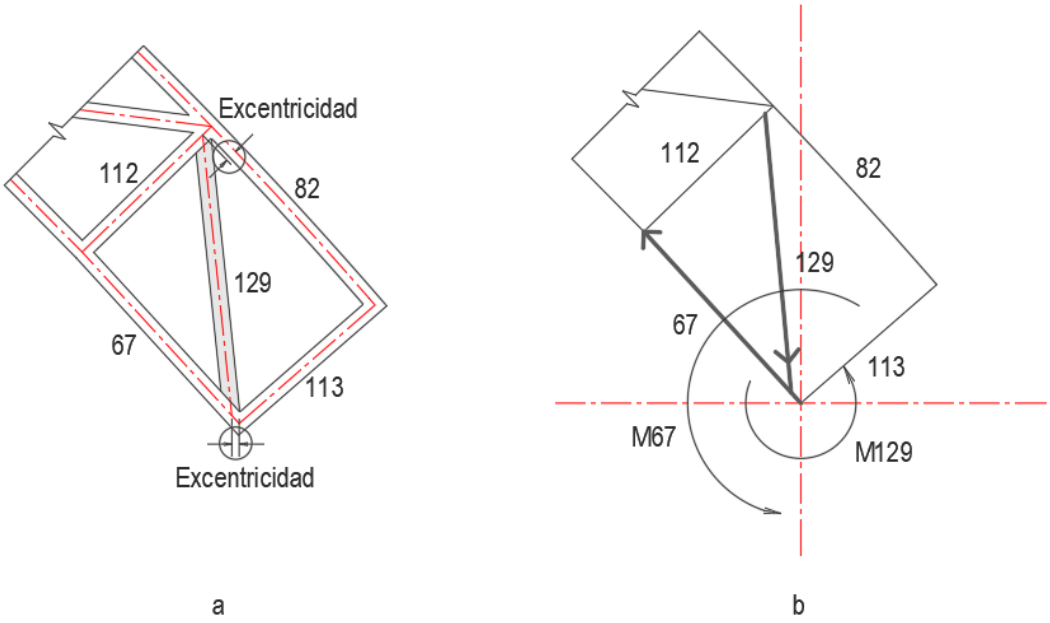
### *3.5.1. Armadura*

La estructura construida, responde a una viga curva, antes que a un arco. Verificado las fuerzas internas de los elementos, observamos una distribución irregular de resultados; llámese fuerzas de compresión y tracción. Esta irregularidad permite comportamiento inadecuado en el trabajo, frente a las cargas externas, el caso de flexión es inevitable; generan doble curvatura causando mayor estrés en el material.

La convergencia de algunas barras, no son axiales; por excentricidad incrementa momentos, propiciando mayores esfuerzos de respuesta a la tensión solicitada. Tal es el caso de la barra 67 con la 129. La barra 129 se representa en los planos, en el nudo de convergencia soldada en su total sección a la barra 67; se presenta una excentricidad del eje axial de la barra 129 al punto de convergencia, multiplicado por la fuerza interna obtenemos un momento de giro; este valor incrementa al momento propio de la barra 67, causando desbalance con el momento al otro extremo de esta barra. La acción opuesta diferenciada de los giros produce mayor estrés.

**Figura 3.2**

*Excentricidad en las uniones de las barras*




Las barras 67 y 129 no convergen axialmente; la barra 129 genera un incremento de momento en la 67. Del mismo modo existe excentricidad entre las barras 112 y 129, (a). En (b), la barra 67 trabaja a compresión, la representación interna es saliendo del nudo

y el momento es en sentido anti horario (M67); la barra 129 trabaja a tracción, por excentricidad genera momento también en sentido anti horario (M129), incrementando al anterior.

| Barra | Carga(Kg) | e(cm) | M(cm-Kg) |
|---|---|---|---|
| 67 | | | -26,167.00 |
| 129 | 196.14 | 5.08 | -996.39 |
| Sumatoria | | | -27,163.39 |

El incremento en momentos responde a un 3.81%; sin embargo, la excentricidad permisible es solamente 0.85 cm; en caso de cargas mayores es incidente.

$$e_{permisible} = \frac{b}{6}$$

Siendo "b" la base de la sección de barra, 5.08 cm.

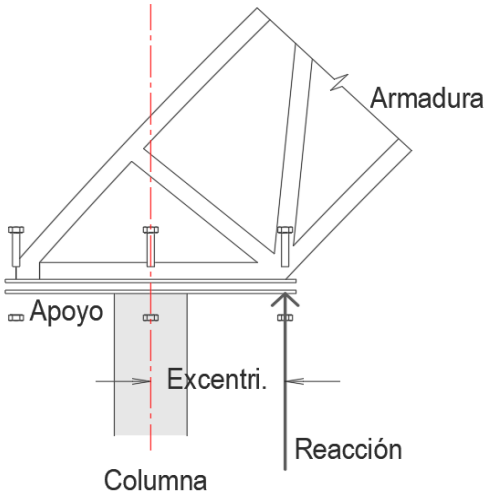
### *3.5.2. Apoyos*

Tal como se muestra en los planos de construcción, apoyos ubicados en el eje "x", en posición horizontal, condiciona el comportamiento de la armadura como una viga curva; expuesta a la flexión; por otro lado, no es recomendable considerar un apoyo móvil, debido a que se presentarían desplazamientos horizontales mayores; razón por la que plantearon apoyos fijos, con espacio limitado, permitiendo desplazamiento horizontal. Esta modalidad conlleva a incrementar la fuerza de cortadura en los pernos de sujeción, debido a que el movimiento es violento y en condiciones dinámicas hay presencia de un impacto, matemáticamente resulta ser el doble en magnitud frente a la fuerza horizontal estática considerada.

El tipo apoyo horizontal genera excentricidad respecto a la reacción en la dirección "z", esto conlleva a que la columna está expuesta a flexión por compresión, incrementando la tensión a la acción del viento.

**Figura 3.3**

*Excentricidad en el apoyo fijo*




Considerar un apoyo móvil, es de suma importancia; frente a cargas intempestivas y ambientales, se le permite a la estructura una reacción estructural mesurada.

Usualmente el objetivo de una estructura en arco, es que trabaje básicamente a compresión; para cumplir con esto, los arranques o apoyos deberán estar orientados en forma perpendicular respecto al eje en arco de la estructura. En estas condiciones funciona adecuadamente un apoyo fijo y el otro móvil, y en el caso de optar por dos apoyos fijos, se recomienda considerar una rótula en el punto clave o cima de la estructura.

## CONCLUSIONES

1. Se comprobó que la orientación y el tipo de apoyo modifican el comportamiento global de la armadura metálica. Al pasar de dos apoyos fijos horizontales a una configuración con apoyo fijo y apoyo móvil perpendicular a la tangente del arco, cambiaron las fuerzas internas, las reacciones y los desplazamientos; por tanto, los apoyos no deben representarse como un detalle secundario, sino como parte del modelo resistente.

2. Las fuerzas axiales variaron entre las configuraciones analizadas. En la barra crítica 67 se obtuvo una compresión de 4 464.56 kg para el caso con apoyos fijos y 4 612.24 kg para el caso con apoyo móvil. La verificación complementaria LRFD de la sección tubular 50.8 × 50.8 × 2.0 mm proporcionó una resistencia de diseño a compresión de 8 346.55 kg y una relación demanda/capacidad de 0.535, por lo que la barra cumple frente al pandeo y la compresión.

3. El apoyo móvil redujo el desplazamiento vertical del nudo central de 1.42 cm a 0.71 cm, equivalente a una disminución del 50 %. A la vez, permitió un desplazamiento horizontal de -2.98 cm en el apoyo B, coherente con su función de liberar la traslación. Esto evidencia que evaluar únicamente la disminución vertical sería insuficiente: también debe comprobarse que exista espacio y detalle constructivo para el movimiento horizontal previsto.

4. El diseño del apoyo se efectuó con las reacciones del análisis. Para el apoyo A del caso fijo se obtuvo Fx = 2 582.50 kg y Fz = 3 555.14 kg; al factorizar la fuerza horizontal se consideró Vu = 3 099.00 kg. La solución calculada emplea seis pernos de 5/8 de pulgada y una placa de acero A36 de 3/8 de pulgada, debiendo complementarse con el control de soldaduras, distancias al borde, aplastamiento y transferencia hacia la columna.

5. La comparación entre el modelo y los detalles construidos mostró que las excentricidades en los nudos y la disposición horizontal de los apoyos introducen momentos secundarios y favorecen un comportamiento de viga curva. Para que la armadura se aproxime al comportamiento axial previsto, los ejes de las barras deben converger en los nudos y los apoyos deben orientarse conforme a la tangente del arco. Los resultados son válidos para la geometría, secciones, cargas y condiciones analizadas y no deben generalizarse sin una nueva verificación estructural.

## RECOMENDACIONES

1. En futuras coberturas de arco rebajado se recomienda modelar explícitamente un apoyo fijo y uno móvil, orientados de acuerdo con la tangente del arco, y comprobar simultáneamente las reacciones, las fuerzas internas y los desplazamientos en los tres ejes antes de aprobar los planos de fabricación.

2. Se recomienda que los planos de uniones y apoyos indiquen dimensiones de placas, espesor, diámetro y distribución de pernos, distancias a bordes, longitud y tamaño de soldaduras, tolerancia de montaje y dirección permitida de desplazamiento del apoyo móvil. Estos detalles deben corresponder exactamente a las restricciones asignadas en el modelo estructural.

3. Para la armadura estudiada se recomienda conservar como controles mínimos la verificación individual de la barra 67 a compresión y pandeo, y la verificación de la barra más solicitada a tracción. No debe dividirse una fuerza obtenida para un elemento del modelo entre dos barras, salvo que el modelo y el detalle constructivo demuestren que ambas conforman un solo elemento compuesto y comparten la carga.

4. Se recomienda verificar que el apoyo móvil disponga de una longitud de recorrido compatible con el desplazamiento horizontal calculado de 2.98 cm, incorporando tolerancia constructiva y evitando soldaduras, topes o pernos que bloqueen accidentalmente el movimiento previsto.

5. Antes de ejecutar estructuras semejantes en Ayacucho, se recomienda realizar una memoria de cálculo específica con la geometría, velocidad de viento, cargas de cobertura, separaciones, calidad real del acero y características de la cimentación del proyecto. Los resultados de esta tesis constituyen una referencia metodológica y no sustituyen el diseño particular de cada obra.

6. Se recomienda implementar un programa de mantenimiento preventivo para las armaduras metálicas, con especial atención a las uniones soldadas, los pernos, las placas y los apoyos. Este programa debe contemplar inspecciones periódicas para identificar corrosión, deterioro de la pintura protectora, aflojamiento de elementos de fijación, fisuras y deformaciones visibles. Asimismo, debe verificarse que el apoyo móvil conserve el recorrido previsto en el diseño, sin acumulación de residuos ni obstáculos que impidan su desplazamiento. La frecuencia de inspección deberá establecerse según las condiciones ambientales de Ayacucho, la exposición y el estado de conservación de la estructura, incluyendo revisiones después de sismos o vientos intensos. Los hallazgos y las intervenciones deberán registrarse en una ficha de mantenimiento, y cualquier daño que pueda comprometer la estabilidad deberá ser evaluado por un profesional competente antes de efectuar reparaciones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


American Institute of Steel Construction. (2022). *Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-22).* AISC.

American Institute of Steel Construction. (2022). *Steel construction manual* (16th ed.). AISC.

American Society of Civil Engineers. (2022). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-22).* ASCE.

ASTM International. (2019). *Standard specification for carbon structural steel (ASTM A36/A36M-19)*. ASTM International.

Bravo Torres, J. W., & Sánchez Quintana, L. A. (2024). *Optimización económica de coberturas metálicas con distintos materiales y métodos de diseño, en el centro poblado de Colpa Tuapampa, 2023* [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Huancavelica.

Choong, K., De'nan, F., Chew, S. H., & Hashim, N. S. (2022). Determination of load transfer characteristics to connections between cold-formed steel truss and supporting system. *World Journal of Engineering, 20*(6), 1239–1248. https://doi.org/10.1108/WJE-03-2022-0121

Computers and Structures, Inc. (2022). SAP2000: *Structural analysis and design software.* Computers and Structures, Inc.

Daga Tacuri, Y. Y. (2023). *Análisis y diseño de coberturas con tijerales metálicos mediante SAP2000 de la planta de acondicionamiento y almacén, E.E.A. Santa Ana, Junín* [Tesis de grado, Universidad Peruana Los Andes]. Repositorio Institucional UPLA. https://hdl.handle.net/20.500.12848/7960

Díaz Briceño, K. R. (2014). *Evaluación y optimización en el diseño de estructuras metálicas aplicado a cubiertas según las especificaciones AISC-2010 por el método LRFD* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Cajamarca]. http://hdl.handle.net/20.500.14074/368

Díaz Vivanco, V. H. (2018). *Evaluación del desempeño sísmico de una nave industrial de acero estructurada a base de armaduras en el Centro Comercial de Talara-PROMART* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/3573

Fan, J., Li, T., Sun, P., Wang, D., & Chen, X. (2022). Experimental analysis of the truss-to-column connection in a modularized prefabricated steel structure. *Journal of Building Engineering, 49*, 104115. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104115

Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2009). *Mecánica de materiales* (7.ª ed.). Cengage Learning.

González Cuevas, O. M. (2014). *Análisis estructural*. Limusa.

Lazarev, N. E. (2023). *Experimental study of cold formed steel roof truss connections* [Master's thesis, University of Missouri]. Mizzou Institutional Repository. https://doi.org/10.32469/10355/96204

Marco García, J. (1998). *Fundamentos para el cálculo y diseño de estructuras metálicas de acero laminado.* McGraw-Hill.

McCormac, J. C., & Csernak, S. F. (2012). *Diseño de estructuras de acero* (5.ª ed.). Alfaomega.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006a). *Norma E.020 Cargas*. Reglamento Nacional de Edificaciones. https://web.municarabayllo.gob.pe/storage/archivos/modernizacion/Gesti%C3%B3n%20de%20Riesgo%20de%20Desastres/RNE2006_E_020.pdf

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006a). *Norma técnica E.020: Cargas.* Reglamento Nacional de Edificaciones.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006b). *Norma E.090 Estructuras Metálicas.* Reglamento Nacional de Edificaciones. Decreto Supremo N.º 011-2006-VIVIENDA.

Norris, C. H., & Wilbur, J. B. (1973). *Análisis elemental de estructuras* (2.ª ed.). McGraw-Hill.

Ruiz Alva, E. P. (2024). *Uso de perfiles de acero como sistema constructivo del centro de formación y exposición de artes mixtas en Ayacucho 2023* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. https://hdl.handle.net/20.500.12692/143768

Siancas Huallpa, K. K. (2025). *Análisis y diseño estructural de una nave industrial de 24 m de luz* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio de Tesis PUCP.

Uribe Escamilla, J. (2004). *Análisis de estructuras* (2.ª ed., reimp.). Escuela Colombiana de Ingeniería.

Wuryanti, W. (2018). Kapasitas rangka atap baja canai dingin dengan berbagai model geometris dalam memikul beban statis [Capacidad de armaduras de techo de acero conformado en frío con distintos modelos geométricos bajo cargas estáticas]. *Jurnal Permukiman, 13*(2), 90–103. https://doi.org/10.31815/jp.2018.13.90-103

## LISTA DE ABREVIATURAS

**RNE** : Reglamento Nacional de Edificaciones

**LRFD** : Load and Resistance Factor Design (Diseño por factores de carga y resistencia)

**ASD** : Allowable Stress Design (Diseño por Esfuerzos Admisibles)

**ASTM** : American Society for Testing and Materials

**AWS** : American Welding Society

**SAP 2000** : Structural Analysis Program 2000

**MPa** : Mega Pascal

**GPa** : Giga Pascal

**Kg/m³** : Kilogramos por metro cúbico

**CP** : Carga Permanente

**CV** : Carga Variable

**U** : Carga Última de Diseño

**E** : Módulo de Elasticidad

**G** : Módulo de Rigidez a Cortante

**ØRn** : Resistencia de Diseño

**Rn** : Resistencia Nominal

**Fy** : Esfuerzo de Fluencia

**Fu** : Resistencia Última del Acero

# GLOSARIO

- **Acero estructural:** Material metálico empleado en la construcción de estructuras debido a su elevada resistencia mecánica y capacidad para soportar cargas.
- **Apoyo fijo:** Elemento estructural que restringe los desplazamientos horizontales y verticales de una estructura, permitiendo únicamente el giro.
- **Apoyo móvil:** Tipo de apoyo que permite el desplazamiento en una dirección, reduciendo esfuerzos ocasionados por dilataciones o movimientos.
- **Armadura metálica:** Sistema estructural conformado por barras de acero unidas entre sí para resistir cargas mediante esfuerzos de tracción y compresión.
- **Barra:** Elemento lineal que forma parte de una armadura y transmite esfuerzos internos.
- **Carga ambiental:** Fuerza externa producida por fenómenos naturales como viento, lluvia, nieve o sismos.
- **Carga permanente:** Peso constante de todos los elementos fijos que conforman la estructura.
- **Carga variable:** Carga que puede cambiar de magnitud o posición durante la vida útil de la estructura.
- **Cercha:** Estructura triangulada diseñada para cubrir grandes luces y distribuir eficientemente las cargas.
- **Compresión:** Esfuerzo interno que tiende a disminuir la longitud de un elemento estructural.
- **Correa:** Elemento secundario que sirve de soporte para la cobertura del techo y transmite las cargas hacia las armaduras.
- **Deformación:** Cambio en la forma o dimensiones de un elemento debido a la acción de fuerzas externas.
- **Eje neutro:** Línea imaginaria de una sección estructural donde los esfuerzos de tracción y compresión son nulos.
- **Esfuerzo cortante:** Fuerza interna que provoca el deslizamiento entre las secciones de un elemento.
- **Estructura metálica:** Conjunto de elementos de acero diseñados para soportar y transmitir cargas de manera segura.
- **Flexión:** Fenómeno estructural producido cuando un elemento se curva debido a la aplicación de cargas.

- **Nudo:** Punto de unión entre dos o más elementos estructurales dentro de una armadura.
- **Pandeo:** Inestabilidad que ocurre en elementos comprimidos cuando se deforman lateralmente.
- **Soldadura:** Procedimiento de unión permanente entre piezas metálicas mediante calor o presión.
- **Tracción:** Esfuerzo que provoca el alargamiento de un elemento estructural al ser sometido a fuerzas opuestas.

# ANEXOS

## **Anexo 1.** *Guía paso a paso para el diseño de la cobertura metálica*

La presente guía sistematiza el procedimiento seguido en la investigación. Sus valores corresponden al caso analizado y deben sustituirse por los datos del proyecto cuando se utilice como referencia en otra cobertura. El diseño definitivo debe ser revisado y firmado por el profesional responsable.

### **Paso 1. Definir el alcance y los datos de entrada**

Registrar la ubicación, el uso de la edificación, la luz libre, la separación entre armaduras, la altura disponible, el tipo de cobertura y las condiciones ambientales. En el ejemplo se considera Ayacucho, una luz de 20.00 m, separación entre armaduras de 6.20 m y cobertura liviana de Aluzinc.

### **Paso 2. Definir la geometría estructural**

Adoptar la geometría de arco rebajado y definir la posición de nudos y barras. La armadura tiene 0.50 m de altura entre cordones, 0.30 m de base transversal y paneles de aproximadamente 0.70 m. Los ejes de las diagonales, montantes y cordones deben converger en los nudos para evitar excentricidades.

### **Paso 3. Seleccionar materiales y secciones preliminares**

Para el modelo se adoptó acero estructural con Fy = 250 MPa, Fu = 400 MPa y densidad de 7 850 kg/m³. Las barras verificadas tienen sección tubular cuadrada de 50.8 × 50.8 × 2.0 mm y las correas sección tubular rectangular de 40 × 60 × 1.8 mm. Antes de fabricar, se debe comprobar mediante certificados que la especificación del perfil comercial coincide con la empleada en el cálculo.

### **Paso 4. Determinar las cargas**

Calcular el peso propio de perfiles, correas, cobertura y accesorios. Incorporar las cargas variables de montaje y mantenimiento previstas por la Norma E.020, y calcular la presión o succión del viento perpendicular a la cubierta. Para Ayacucho se utilizó una velocidad de diseño de 85 km/h. La carga de cada correa se transforma en fuerzas nodales sobre la armadura según su ancho tributario.

**Paso 5. Formular las combinaciones de carga**

Aplicar las combinaciones LRFD pertinentes de la Norma E.090, incluyendo los casos en que el viento actúa como presión y como succión. No se debe elegir una combinación por conveniencia: para cada barra, unión y apoyo controla la combinación que produzca la mayor demanda absoluta o el efecto más desfavorable.

**Paso 6. Modelar la armadura en SAP2000**

Crear el modelo tridimensional, definir unidades consistentes, materiales, secciones y ejes locales. Asignar las cargas y construir dos casos: (a) apoyos fijos horizontales y (b) apoyo fijo más apoyo móvil perpendicular a la tangente del arco. Las liberaciones de giro y traslación deben coincidir con el detalle que realmente se construirá.

**Paso 7. Validar el modelo**

Revisar conectividad de nudos, duplicidad de barras, orientación de perfiles, peso total y deformada. Comprobar que la suma de las reacciones sea compatible con las cargas aplicadas. Un resultado de software no se acepta si no supera estos controles básicos de equilibrio y coherencia física.

**Paso 8. Interpretar fuerzas y desplazamientos**

Extraer las fuerzas axiales, cortantes, momentos, reacciones y desplazamientos para cada combinación. En el caso fijo, el nudo central presentó $\Delta z = -1.42$ cm. Con el apoyo móvil presentó $\Delta z = -0.71$ cm y el apoyo B se desplazó $\Delta x = -2.98$ cm. La reducción vertical fue 50 %, pero el desplazamiento horizontal debe ser admitido por el detalle constructivo.

**Paso 9. Verificar una barra a tracción**

Para la barra 118, Pu = 654.64 kg. Con Ag = 3.904 cm² y Fy = 2 549.29 kg/cm²: $\varphi tPn = 0.90FyAg = 8\,957.19$ kg. Para rotura, con Fu = 4 078.86 kg/cm² y Ae = Ag: $\varphi tPn = 0.75FuAe = 11\,942.92$ kg. Controla 8 957.19 kg y $Pu/\varphi tPn = 0.073$; la barra cumple.

**Paso 10. Verificar una barra a compresión**

Para la barra 67, Pu = 4 464.56 kg, Ag = 3.904 cm², I = 15.52 cm⁴, r = 1.994 cm, K = 1.00 y L = 70.90 cm. Se obtiene KL/r = 35.56, Fe = 15 111.83 kg/cm² y Fcr = 2

375.50 kg/cm². Luego, φcPn = 0.90FcrAg = 8 346.55 kg y Pu/φcPn = 0.535; la barra cumple. También debe revisarse el pandeo local del tubo y el arriostramiento fuera del plano.

**Paso 11. Verificar las correas**

La presión del viento actúa perpendicularmente a la cubierta. Debido a la inclinación de la correa, la carga debe descomponerse respecto a sus dos ejes principales y verificarse como flexión oblicua. Se deben controlar la resistencia, la deflexión y la estabilidad lateral usando los momentos de inercia correspondientes a cada eje.

**Paso 12. Diseñar el apoyo y los pernos**

Usar las reacciones del caso crítico. Para el apoyo A fijo: Fx = 2 582.50 kg y Fz = 3 555.14 kg. La fuerza horizontal factorizada empleada fue Vu = 3 099.00 kg. Verificar corte de pernos, aplastamiento, distancias a bordes, sección neta y espesor de la placa. El cálculo de la tesis conduce a seis pernos de 5/8 de pulgada y una placa A36 de 3/8 de pulgada.

**Paso 13. Diseñar y detallar las soldaduras**

Definir el proceso, electrodo, tamaño y longitud efectiva de cada cordón según la Norma E.090 y AWS D1.1. Los cordones deben transmitir la fuerza requerida sin inducir excentricidades innecesarias. En los planos deben mostrarse símbolos de soldadura, continuidad, preparación de bordes y criterios de inspección.

**Paso 14. Elaborar los planos de fabricación y montaje**

Incluir geometría completa, numeración de barras, secciones, placas, pernos, soldaduras, apoyos, arriostramientos y tolerancias. El apoyo móvil debe señalar claramente la dirección y el recorrido permitido. Las restricciones dibujadas deben ser las mismas utilizadas en SAP2000.

**Paso 15. Ejecutar y controlar el montaje**

Ensamblar la armadura sobre una superficie nivelada, controlar diagonales y soldaduras, izar con puntos definidos por el responsable, colocar arriostramientos temporales, alinear los apoyos y ajustar los pernos. Antes de liberar el equipo de izaje se

debe verificar la estabilidad fuera del plano y la continuidad de los arriostramientos. Finalmente, documentar las dimensiones y condiciones realmente ejecutadas.

**Criterio de aceptación**

La cobertura se considera aceptable cuando todas las relaciones demanda/capacidad son menores o iguales a 1.00, los desplazamientos cumplen los límites normativos, las reacciones pueden ser transmitidas por apoyos y cimentaciones, y los detalles construibles reproducen las hipótesis del modelo. La revisión debe abarcar barras, conexiones, apoyos y estabilidad global como un solo sistema.

**Anexo 2.** *Panel fotográfico*



**Foto 1.** Elaboración de estructuras de acero



**Foto 2.** Colocado de estructuras de acero de apoyo



**Foto 3.** Se observa armadura de estructuras de acero



**Foto 4.** Vista del techo



**Foto 5.** Colocado del techo sobre la estructura armada



**Foto 6.** Vista longitudinal de la estructura del techo

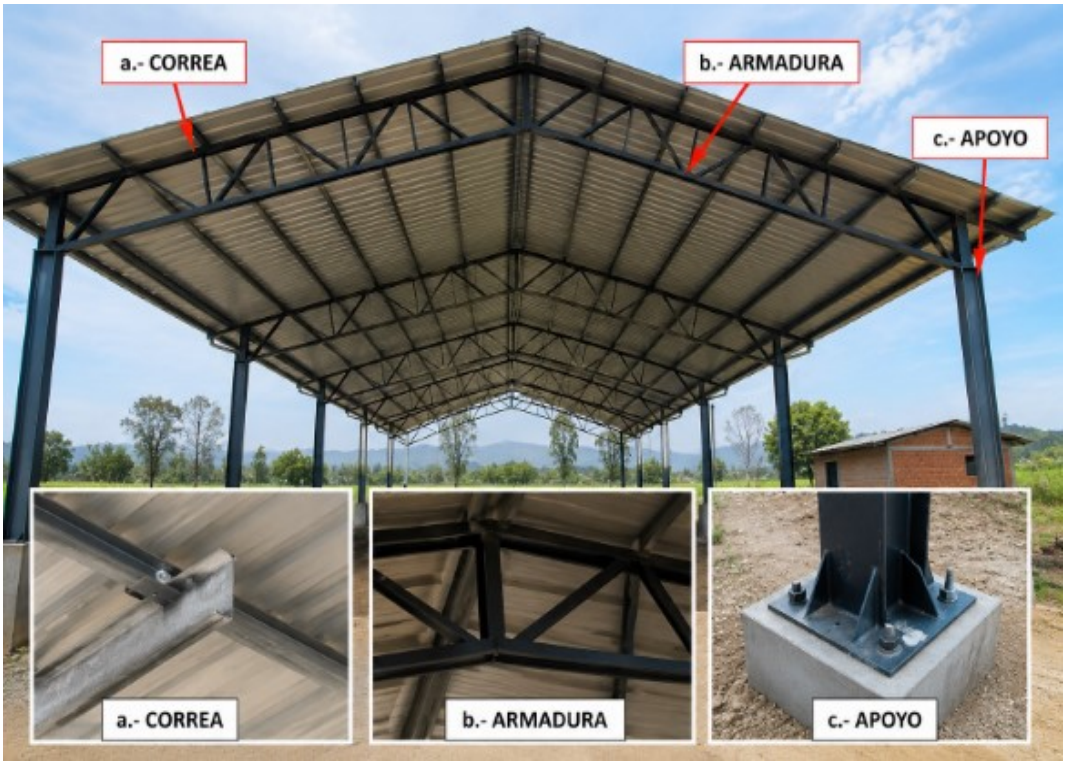



**Foto 7.** a.- correa, b.- armadura y c.- apoyo

UNSCH FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**
**Bach. DAVID CURI ORE**

**R.D. N° 369-2026-UNSCH-FCA-D**

En la ciudad de Ayacucho, a los veintisiete días del mes de agosto del año dos mil veintiséis, siendo las dieciséis horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por el M.Sc. Federico Quicaño Suarez, Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla como asesor y el Ing. Vance Giorgio Fernández Huamán; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Comportamiento estructural de las uniones y apoyos en armaduras metálicas de acuerdo al RNE - Ayacucho 2023**, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agrónomo, presentado por el Bachiller **DAVID CURI ORE.**

El señor Decano previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invitó a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberación y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

| Jurado evaluador | Exposición | Respuestas a las preguntas | Generación de conocimiento | Promedio |
|---|---|---|---|---|
| M.Sc. Federico Quicaño Suarez | 15 | 15 | 14 | 15 |
| Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla | 14 | 17 | 16 | 16 |
| Ing. Vance Giorgio Fernández Huamán | 12 | 14 | 14 | 13 |
| **PROMEDIO GENERAL** | | | | **15** |

Acto seguido se invita a la sustentante y público en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.

*M.Sc. Federico Quicaño Suarez*
*Presidente*

*Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla*
*Asesor*

*Ing. Vance Giorgio Fernández Huamán*
*Jurado*

*Mtro. Rodolfo Alca Mendoza*
*Secretario Docente*

UNSCH FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

## CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe, miembro de la comisión de docentes instructores responsables de operativizar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de **TESIS** de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizado por la R.D N° 437-2026-UNSCH-FCA-D; hace constar que el trabajo titulado:

**Comportamiento estructural de las uniones y apoyos en armaduras metálicas de acuerdo al RNE - Ayacucho 2023**

Autor : David CURI ORE
Asesor : Orlando Fidel SULCA CASTILLA

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de Originalidad de Trabajos de Tesis, aprobado mediante RCU 039-2021-UNSCH-CU, arrojando un resultado de diez por ciento **(10 %)** de índice de similitud, realizado con **depósito de trabajo estándar**.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

Nota: Se adjunta el resultado con identificador de la entrega: 3043349037

Ayacucho, 27 de setiembre de 2026

**Dimas Alberto Quintanilla Melgar**
M. Sc. en Producción Animal
E.P. Agronomía
Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

# Comportamiento estructural de las uniones y apoyos en armaduras metálicas de acuerdo al RNE - Ayacucho 2023

*por* David Curi Ore

**Fecha de entrega:** 27-sept-2026 12:23p. m. (UTC-0500)
**Identificador de la entrega:** 3043349037
**Nombre del archivo:** TESIS_DAVID_CURI_ORE_EPA.pdf (2.79M)
**Total de palabras:** 18139
**Total de caracteres:** 99784

# Comportamiento estructural de las uniones y apoyos en armaduras metálicas de acuerdo al RNE - Ayacucho 2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

| 10% | 10% | 1% | 7% |
|---|---|---|---|
| INDICE DE SIMILITUD | FUENTES DE INTERNET | PUBLICACIONES | TRABAJOS DEL ESTUDIANTE |

FUENTES PRIMARIAS

| | | |
|---|---|---|
| 1 | vsip.info<br>Fuente de Internet | 1% |
| 2 | hdl.handle.net<br>Fuente de Internet | 1% |
| 3 | www.slideshare.net<br>Fuente de Internet | 1% |
| 4 | es.scribd.com<br>Fuente de Internet | 1% |
| 5 | pt.scribd.com<br>Fuente de Internet | 1% |
| 6 | pdfcoffee.com<br>Fuente de Internet | 1% |
| 7 | es.slideshare.net<br>Fuente de Internet | 1% |
| 8 | idoc.pub<br>Fuente de Internet | 1% |
| 9 | www.buenastareas.com<br>Fuente de Internet | <1% |
| 10 | www.uns.edu.pe<br>Fuente de Internet | <1% |
| 11 | Submitted to Universidad Católica de Santa María<br>Trabajo del estudiante | <1% |
| 12 | repositorio.untels.edu.pe<br>Fuente de Internet | <1% |
| 13 | repositorio.unsch.edu.pe<br>Fuente de Internet | <1% |
| 14 | Submitted to Universidad Catolica de Trujillo<br>Trabajo del estudiante | <1% |

| | | |
|---|---|---|
| 15 | idoc.tips<br>Fuente de Internet | <1 % |
| 16 | repositorio.uasb.edu.bo<br>Fuente de Internet | <1 % |
| 17 | pdfcookie.com<br>Fuente de Internet | <1 % |
| 18 | Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga<br>Trabajo del estudiante | <1 % |
| 19 | repositorio.upla.edu.pe<br>Fuente de Internet | <1 % |
| 20 | kupdf.net<br>Fuente de Internet | <1 % |
| 21 | repositorio.ucv.edu.pe<br>Fuente de Internet | <1 % |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Excluir citas | Activo | Excluir coincidencias | < 30 words |
| Excluir bibliografía | Activo | | |

# Comportamiento estructural de las uniones y apoyos en armaduras metálicas de acuerdo al RNE - Ayacucho 2023

David Curi Ore[1] : david.curi.01@unsch.edu.pe
Orlando Fidel Sulca Castilla[2] : orlando.sulca@unsch.edu.pe
Área de investigación : Medio ambiente
Línea de investigación : Infraestructura

## RESUMEN

La creciente necesidad de construir espacios cubiertos para actividades agrícolas y ganaderas en la región de Ayacucho ha impulsado el uso de armaduras metálicas debido a su resistencia, durabilidad y capacidad para cubrir mayores luces estructurales; sin embargo, en muchos casos las uniones y apoyos son ejecutados sin considerar adecuadamente las exigencias establecidas en el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), lo que puede generar deformaciones y fallas estructurales. En ese contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el comportamiento estructural de las uniones y apoyos en armaduras metálicas de acuerdo con las disposiciones del RNE en Ayacucho durante el año 2023. La investigación correspondió a un enfoque aplicado, de nivel descriptivo y comparativo, utilizando el método de análisis estructural mediante modelamiento computacional. Se trabajó con armaduras metálicas de acero ASTM A36, considerando diferentes condiciones de apoyo y cargas estructurales establecidas en las Normas Técnicas E.020 y E.090 del RNE. Para el procesamiento y análisis de datos se empleó el software SAP 2000 versión 22, evaluándose fuerzas internas, desplazamientos y esfuerzos en los elementos estructurales. Los resultados evidenciaron diferencias significativas en el comportamiento estructural según el tipo y ubicación de los apoyos, observándose que las armaduras con apoyos adecuadamente diseñados presentaron menores deformaciones y mejor distribución de esfuerzos internos. Asimismo, se comprobó que las uniones y apoyos influyen directamente en la estabilidad, resistencia y seguridad de la estructura metálica. Se concluyó que el diseño estructural de armaduras metálicas debe considerar de manera obligatoria las especificaciones técnicas del RNE respecto a uniones y apoyos, debido a que estos elementos determinan el adecuado comportamiento estructural y reducen el riesgo de fallas durante el funcionamiento de la estructura.

**Palabras clave:** acero, armaduras metálicas, apoyos, comportamiento estructural, estabilidad estructural, uniones.

Escuela Profesional de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Tesista[1] Asesor[2]

# Structural behavior of connections and supports in steel trusses according to the RNE – Ayacucho 2023

David Curi Ore[1] : david.curi.01@unsch.edu.pe
Orlando Fidel Sulca Castilla[2] : orlando.sulca@unsch.edu.pe
Research area : Environment
Research line : Infrastructure

## ABSTRACT

The growing need to construct covered spaces for agricultural and livestock activities in the Ayacucho region has driven the use of metal trusses due to their strength, durability, and ability to span greater distances; however, in many cases, connections and supports are executed without adequately considering the requirements established in the National Building Code (RNE), which can lead to deformations and structural failures. Against this backdrop, this research aimed to evaluate the structural behavior of connections and supports in metal trusses in accordance with RNE provisions in Ayacucho during 2023. The study employed an applied approach descriptive and comparative in nature utilizing a structural analysis method based on computational modeling. The study involved ASTM A36 steel trusses, taking into account various support conditions and structural loads specified in the RNE Technical Standards E.020 and E.090. SAP2000 (version 22) software was used for data processing and analysis to evaluate internal forces, displacements, and stresses within the structural elements. The results revealed significant differences in structural behavior depending on the type and location of the supports; trusses with properly designed supports exhibited lower deformations and a more favorable distribution of internal stresses. Furthermore, it was confirmed that connections and supports directly influence the stability, strength, and safety of the steel structure. The study concluded that the structural design of steel trusses must strictly adhere to RNE technical specifications regarding connections and supports, as these elements ensure proper structural behavior and reduce the risk of failure during the structure's service life.

**Keywords:** steel, steel frameworks, supports, structural behavior, structural stability, connections.

Escuela Profesional de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Tesista[1] Asesor[2]

# I. INTRODUCCIÓN

En las actividades agrícolas y ganaderas, los espacios cubiertos cumplen una función importante dentro de los procesos de producción, almacenamiento y protección de productos, animales y maquinaria. Estas estructuras requieren sistemas resistentes y funcionales capaces de cubrir grandes luces y soportar diferentes condiciones de carga. Tradicionalmente, en muchas zonas de la región Ayacucho se emplearon estructuras de madera; sin embargo, en los últimos años el uso de armaduras metálicas se ha incrementado debido a las ventajas que ofrece el acero estructural, tales como mayor resistencia, durabilidad, facilidad de montaje y capacidad para cubrir mayores distancias entre apoyos.

A pesar de ello, en muchas construcciones metálicas destinadas a coberturas agrícolas y ganaderas aún existen deficiencias relacionadas con el diseño y ejecución de las uniones y apoyos estructurales. En numerosas obras menores, la fabricación y montaje son realizados únicamente por personal con experiencia práctica en cerrajería, sin considerar criterios técnicos de análisis estructural. Del mismo modo, en proyectos de mayor envergadura, los diseños suelen enfocarse principalmente en el dimensionamiento de las barras estructurales mediante programas computacionales, dejando en segundo plano el análisis de las uniones y apoyos, elementos que cumplen una función fundamental dentro del comportamiento estructural de la armadura.

Esta situación constituye un problema importante, debido a que un diseño inadecuado de las uniones y apoyos puede generar deformaciones excesivas, distribución incorrecta de esfuerzos internos e incluso posibles fallas estructurales. Las barras que conforman una armadura metálica trabajan principalmente a tracción y compresión; por ello, las conexiones deben permitir una adecuada transmisión de cargas y garantizar estabilidad durante el funcionamiento de la estructura. Sin embargo, en la práctica muchas de estas conexiones no cumplen completamente las condiciones estructurales requeridas, afectando el comportamiento general de la armadura.

La presente investigación se justifica porque permitirá analizar el comportamiento estructural de las uniones y apoyos en armaduras metálicas utilizadas en la ciudad de Ayacucho, aportando información técnica que contribuya a mejorar los criterios de diseño y construcción de este tipo de estructuras. Asimismo, el estudio tiene importancia práctica, ya que los resultados podrán servir como referencia para profesionales, técnicos y entidades encargadas del diseño, fabricación y ejecución de coberturas metálicas, promoviendo estructuras más seguras, estables y eficientes. De igual manera, la investigación permitirá comparar diferentes configuraciones de apoyos y verificar su influencia en la distribución de esfuerzos y deformaciones estructurales.

Para el desarrollo de la investigación se trabajó con armaduras metálicas fabricadas con acero ASTM A36, considerando cargas permanentes y variables establecidas en las normas técnicas correspondientes. El análisis estructural fue realizado mediante el software SAP 2000 versión 22, permitiendo evaluar fuerzas internas, desplazamientos y condiciones de estabilidad en los diferentes casos estudiados.

**Objetivo general**

Evaluar el comportamiento estructural de las uniones y apoyos en armaduras metálicas empleadas en la ciudad de Ayacucho durante el año 2023.

Escuela Profesional de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Tesista[1] Asesor[2]

**Objetivos específicos**

1. Determinar las fuerzas internas presentes en los elementos de la armadura bajo diferentes condiciones de apoyo.
2. Analizar los desplazamientos y deformaciones generadas en la estructura metálica.
3. Verificar el comportamiento estructural de las uniones y apoyos frente a las cargas aplicadas.
4. Comparar el comportamiento estructural de la armadura metálica bajo diferentes condiciones de apoyo, considerando criterios técnicos de diseño estructural.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Ubicación

La investigación se realizó en la ciudad de Ayacucho – Huamanga – Ayacucho, cuyos análisis se desarrollaron en diferentes puntos de la ciudad de Ayacucho.

- Altitud : 2 761 m.s.n.m.
- Norte : 8511962.00 m.
- Este : 558312.00 m.
- Ubigeo : 050101

### 2.2. Materiales y equipos

Se consideraron tubos metálicos, de sección cuadrática; corresponde al acero estructural ASTM – A36; cuyas características mecánicas se indican:

- Peso específico 7,850 Kg/m$^3$.
- Esfuerzo a la fluencia 250 MPa (Mega Pascales).
- Tensión ultima 400 MPa (Mega Pascales).
- Esfuerzo a la tracción 480 MPa (Mega Pascales).

La resistencia de diseño a compresión se determinó según la esbeltez KL/r y el estado límite de pandeo; no se adopta como una propiedad constante independiente del material.

- Módulo de elasticidad E = 190 – 210 GPa (Giga Pascales).
- Módulo de rigidez a cortante, G = 32 – 69 GPa (Giga Pascales).
- Coeficiente de dilatación térmica, α = 9.9 – 12(10^-6)/°C
- Coeficiente de Poisson 0.2 – 0.3.

### 2.3. Normas de referencia

Todo el trabajo se realizó bajo la Norma Técnica E.090 Estructuras Metálicas. Las cargas bajo las condiciones de la Norma Técnica E.020 Cargas.

### 2.4. Procedimiento general de análisis y diseño

El proceso aplicado se organizó en una secuencia verificable: (1) recopilación de la geometría y de los detalles construidos; (2) definición de materiales y secciones; (3) determinación de cargas permanentes y variables; (4) formulación de combinaciones de carga; (5) idealización de nudos y apoyos; (6) modelamiento tridimensional en SAP2000; (7) obtención de fuerzas internas, reacciones y desplazamientos; (8) control independiente de equilibrio; (9) verificación de barras a tracción, compresión, flexión y corte; (10) diseño de pernos, placas y soldaduras de los apoyos; y (11)

Escuela Profesional de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Tesista[1] Asesor[2]

comparación entre la configuración existente y la alternativa con apoyo móvil. La guía desarrollada con los datos de la investigación se presenta en el Anexo 1.

### *2.4.1. Diseño por condiciones de resistencia*

Para el método LRFD la resistencia de diseño de cada sistema o componente estructural deberá ser igual o mayor a la resistencia requerida por las cargas factorizadas. La resistencia de diseño ØRn para cada estado límite se calculará multiplicando la resistencia nominal Rn por el factor de resistencia Ø.

Para el método ASD los esfuerzos debidos a las cargas externas en cada sistema o componente estructural no deberán exceder los esfuerzos admisibles.

### *2.4.2. Diseño de elementos sometidos a tracción*

La verificación LRFD de una barra a tracción exige que la resistencia de diseño sea mayor o igual que la fuerza axial requerida: φtPn ≥ Pu. Deben revisarse, como mínimo, la fluencia de la sección bruta, Pn = FyAg con φt = 0.90, y la rotura de la sección neta efectiva, Pn = FuAe con φt = 0.75. Cuando la barra está soldada y no presenta perforaciones, el área neta puede coincidir con el área bruta; si existen pernos, se descuentan los agujeros y se determina el área efectiva. También deben verificarse el bloque de cortante y la resistencia de la conexión, porque una barra suficiente puede fallar antes en su nudo (MVCS, 2006; AISC, 2016).

### *2.4.3. Diseño de elementos sometidos a compresión*

En compresión, además de la resistencia del material, se debe controlar la inestabilidad por pandeo. La condición LRFD es φcPn ≥ Pu, donde Pn = FcrAg y φc = 0.90. La tensión crítica Fcr depende de la esbeltez KL/r y de la tensión elástica de Euler Fe = π²E/(KL/r)². Para el intervalo inelástico puede emplearse Fcr = 0.658^(Fy/Fe)Fy; para el intervalo elástico, Fcr = 0.877Fe. Por tanto, no corresponde adoptar un único valor constante de resistencia a compresión para el acero: la capacidad cambia con la longitud libre, el radio de giro y las condiciones de apoyo (MVCS, 2006; AISC, 2016).

### *2.4.4. Cargas*

Las cargas consideradas para el presente trabajo, están recomendadas en las Normas Técnicas Peruanas; éstos consisten en: cargas permanentes y cargas variables.

**a) Cargas permanentes**

Son aquellas que no varían en el tiempo y permanecen en el lugar de ubicación establecidas; dentro de ellas tenemos: el peso propio de la estructura, peso de la cobertura y algún otro elemento que cumpla con las condiciones de permanencia.

**b) Cargas variables**

Se denominan así, a las cargas que se presentan ocasionalmente y no siempre con la misma magnitud. Dentro de ellas tenemos: cargas presentes durante el proceso constructivo (personal obrero y equipos de construcción); cargas de viento, lluvia o granizo.

Para el caso del diseño de armaduras metálicas; las cargas permanentes y variables se aplican en su condición estática.

### *2.4.5. Combinación de cargas*

Para el caso del Método LRFD, el Reglamento, recomienda la siguiente combinación.

$$U = 1.2\,CP + 1.2\,CV$$

Donde:

Escuela Profesional de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Tesista[1] Asesor[2]

U : Carga ultima de diseño

CP : Carga permanente

CV : Carga variable

Una vez obtenida la solicitación, a este se le afecta Ø (Coeficiente de resistencia); el producto deberá igual o menor a la resistencia Nominal. Los esfuerzos admisibles del material, son aquellos valores límites recomendados.

Para el Método ASD; el Reglamento, recomienda:

$$U = CP + CV$$

Una vez determinada la solicitación, se verifica el esfuerzo requerido; este valor deberá ser siempre menor al admisible nominal.

### *2.4.6. Pre dimensión*

Responde al proceso, donde se determina: la geometría de la estructura, altura de la misma, espacios de distribución de los elementos estructurales; todos están en función al tipo de cobertura a utilizar. Básicamente obedecen a ecuaciones pre establecidas, las que recomienda la Norma Técnica Peruana.

**a) Cobertura**

Evaluada las bondades y propiedades físicas del material a conformar la cobertura, aceptamos el uso de plantas metálicas galvanizadas tipo Aluzin. Menor peso frente a la calamina, requiere apoyos a mayor distancia entre ellas, adecuada fijación a la estructura de techo (correas).

**b) Correa**

Son aquellos elementos estructurales, donde van apoyados las planchas de la cobertura; cubren la luz entre armaduras. La pre dimensión de la sección de la correa, más bien responde a un cálculo luego de efectuar el proceso de diseño.

Las correas son vigas, que pueden ser simplemente apoyadas o continuas, en nuestro caso consideramos como viga continua.

**c) Armadura**

Por cuestiones de arquitectura, presentación y funcionalidad; optamos por un arco rebajado; la armadura por estabilidad y resistencia es un elemento tridimensional, con una altura y base definida. La altura está conformada por un cordón inferior y otra superior, esta altura se pre dimensiona en función a la luz libre a cubrir.

$$h = \frac{L}{40}$$

Donde:

h = Altura buscada (m)

L = Luz libre (20 m)

Procesado, tenemos: h = 0.50 m

La base usualmente es h/2; por facilidad de construcción consideramos, b = 0.30 m. El espaciamiento de los componentes menores: tirantillos y parecillos. Para evitar posibles pandeos y guardando relación en distancias con la altura, consideramos el espaciado de los tirantillos a 0.70 m y las diagonales o parecillos hacen la hipotenusa del cuadrilátero conformado, entre el par, tirante y tirantillos; buscando en todo momento conformar triángulos con la unión de los elementos considerados.

**d) Apoyos**

Para el tipo de estructura planteada, el reglamento recomienda dos tipos de apoyos: fijo y móvil. El fijo restringe desplazamientos en dos direcciones, previamente establecidos; pero no así los giros. El apoyo móvil restringe desplazamiento en una sola dirección.

***2.4.7. Casos de ubicación de los apoyos***

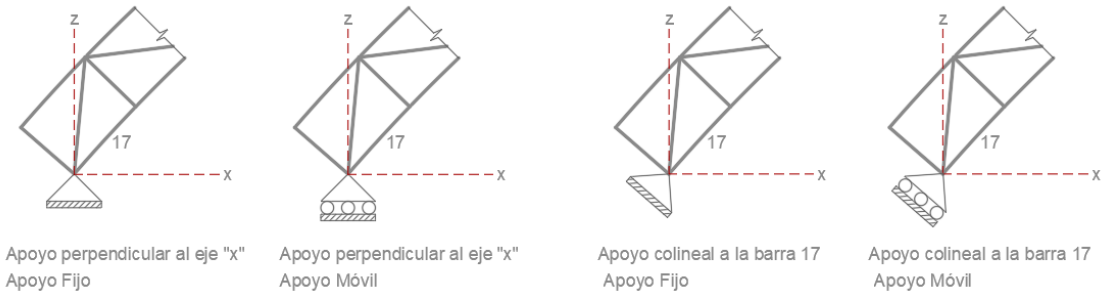
Si la armadura obedece a una forma de una curva y los apoyos están en el plano XZ, la estructura predomina en su trabajo a flexión, por lo tanto, se recomienda utilizar apoyos fijos en ambos lados. Puede presentarse sobre esfuerzos por variación de temperatura ambiental, siendo necesario considerar una rótula con restricción vertical en la parte central, evitando efectos adversos por efectos ambientales.

Si la armadura es del mismo tipo al anterior descrito; los apoyos son perpendiculares a la tangente del inicio de curva; es recomendable utilizar, apoyo fijo y móvil; la estructura tienda a trabajar a compresión.

En nuestro caso, consideramos los dos apoyos fijos; debido a que el interés del diseño responde a una comparación entre una armadura existente y el diseño que realizaremos.

**Figura 2.1**

*Tipos de apoyos fijos y móviles*




Nota: Apoyo perpendicular y colineal en sus diferentes apoyos.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Fuerzas internas en las barras de la armadura

En la tabla adjunto presentamos: la primera columna indica el número de orden; la segunda el nombre o número de barra; la tercera la fuerza interna, compresión con signo negativo y tracción con signo positivo; la cuarta columna nos indica la fuerza cortante presente en el nudo; por último, la quinta columna nos indica el momento total en el nudo.

En la siguiente tabla, presentamos los resultados de: la armadura con apoyos fijos ubicados en el plano XX y la siguiente responde cuando los apoyos son perpendiculares a la tangente de la curvatura, un apoyo fijo y el otro en rodillo. Se observa la diferencia de resultados.

**Nota:** En las figuras antes presentadas; tales como el resultado de la fuerzas axiales y cortantes, exponemos gráficamente antes que valores, por simple didáctica. En el caso de las fuerzas axiales, las barras representadas con color azul nos indican que trabajan a Tracción, y las de color rojo a Compresión; y en los de corte, color azul cortes positivos y rojo negativos.

Escuela Profesional de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Tesista[1] Asesor[2]

## Tabla 3.1

*Fuerzas internas en cada elemento de la armadura bajo las condiciones de apoyo estudiadas*

| N° | Barra | APOYOS FIJOS HORIZONTAL | | | FIJO Y ROTULA PERPENDICULAR | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Paxial(Kg) | Vz(Kg) | My(m-Kg) | Paxial(Kg) | Vz(Kg) | My(m-Kg) |
| 1 | 17 | -4,243.80 | -19.23 | -10.89 | -4,391.51 | -20.74 | -11.52 |
| 2 | 49 | -422.30 | 15.81 | 4.72 | -420.91 | 17.62 | -8.56 |
| 3 | 65 | -177.99 | -11.29 | -8.30 | -72.05 | -11.70 | -8.56 |
| 4 | 33 | 28.22 | -20.56 | -11.21 | 30.00 | -22.00 | -11.81 |
| 5 | 32 | -357.43 | 27.32 | -12.63 | -189.92 | 26.78 | -12.66 |
| 6 | 64 | 335.06 | 15.50 | -9.14 | 231.15 | 15.55 | -9.35 |
| 7 | 48 | -177.78 | 8.24 | -2.27 | -184.81 | 5.97 | -1.65 |
| 8 | 16 | -4,235.23 | 29.53 | -13.16 | -4,385.26 | 28.94 | -13.18 |
| 9 | 15 | -3,731.12 | -23.33 | -10.57 | -4,044.77 | -24.73 | -11.42 |
| 10 | 63 | -277.12 | -14.33 | -8.29 | -182.15 | -14.67 | -8.72 |
| 11 | 47 | -323.74 | -7.09 | -2.01 | -332.03 | -4.96 | -1.41 |
| 12 | 31 | -281.31 | -21.35 | -10.11 | -111.72 | -22.60 | -10.90 |
| 13 | 30 | -658.97 | 24.15 | -11.08 | -341.44 | 23.77 | -11.38 |
| 14 | 62 | 215.81 | 14.68 | -8.46 | 123.41 | 14.73 | -8.84 |
| 15 | 46 | -149.08 | 4.31 | -1.22 | -164.87 | 2.34 | -0.68 |
| 16 | 14 | -3,726.68 | 26.85 | -11.79 | -4,042.34 | 26.47 | -12.11 |
| 17 | 13 | -3,189.51 | -19.77 | -8.69 | -3,649.01 | -21.13 | -9.74 |
| 18 | 61 | -436.73 | -13.06 | -7.24 | -354.28 | -13.38 | -7.82 |
| 19 | 45 | -125.10 | -7.65 | -2.16 | -141.28 | -5.77 | -1.63 |
| 20 | 29 | -643.52 | -17.23 | -8.01 | -324.16 | -18.44 | -8.99 |
| 21 | 28 | -1,117.69 | 21.57 | -9.40 | -670.17 | 21.38 | -9.96 |
| 22 | 60 | 176.46 | 13.68 | -7.43 | 96.60 | 13.75 | -7.97 |
| 23 | 44 | -125.72 | 5.83 | -1.63 | -149.14 | 4.14 | -1.16 |
| 24 | 12 | -3,183.49 | 24.78 | -10.32 | -3,644.74 | 24.60 | -10.91 |
| 25 | 11 | -2,575.46 | -16.91 | -6.91 | -3,159.18 | -18.21 | -8.12 |
| 26 | 59 | -562.30 | -12.09 | -6.20 | -493.30 | -12.39 | -6.92 |
| 27 | 43 | 8.54 | -8.44 | -2.39 | -14.46 | -6.84 | -1.94 |
| 28 | 27 | -1,107.24 | -14.09 | -6.13 | -658.16 | -15.25 | -7.26 |
| 29 | 26 | -1,638.56 | 19.48 | -7.79 | -1,082.57 | 19.46 | -8.58 |
| 30 | 58 | 121.16 | 12.93 | -6.40 | 54.75 | 13.02 | -7.08 |
| 31 | 42 | -97.60 | 6.84 | -1.89 | -127.51 | 5.51 | -1.50 |
| 32 | 10 | -2,568.44 | 22.93 | -8.80 | -3,153.61 | 22.94 | -9.62 |
| 33 | 9 | -1,982.34 | -15.55 | -5.64 | -2,667.20 | -16.77 | -6.97 |
| 34 | 57 | -591.10 | -11.64 | -5.39 | -536.32 | -11.91 | -6.21 |
| 35 | 41 | 94.07 | -7.90 | -2.24 | 65.39 | -6.60 | -1.87 |
| 36 | 25 | -1,634.65 | -12.64 | -4.84 | -1,077.39 | -13.72 | -6.09 |
| 37 | 24 | -2,132.32 | 18.24 | 6.97 | -1,490.62 | 18.40 | -7.49 |
| 38 | 56 | 51.42 | 12.62 | 5.89 | -0.76 | 12.73 | -6.37 |
| 39 | 40 | -68.51 | 6.76 | 1.86 | -103.70 | 5.64 | 1.55 |
| 40 | 8 | -1,975.40 | 21.69 | 7.89 | -2,661.41 | 21.90 | -8.52 |
| 41 | 7 | -1,508.59 | -16.62 | 6.30 | -2,270.38 | -17.75 | -6.90 |
| 42 | 55 | -516.24 | -12.33 | 5.90 | -476.29 | -12.58 | -6.22 |
| 43 | 39 | 119.45 | -5.60 | -1.59 | 86.28 | -4.61 | -1.31 |
| 44 | 23 | -2,128.96 | -13.95 | 5.47 | -1,486.29 | -14.94 | -6.16 |
| 45 | 22 | -2,725.13 | 22.07 | 9.16 | -2,021.45 | 22.39 | -8.27 |
| 46 | 54 | 258.11 | 13.82 | 7.06 | 220.77 | 13.95 | -6.38 |
| 47 | 38 | -38.75 | 8.91 | 2.49 | -77.95 | 8.09 | 2.27 |
| 48 | 6 | -1,499.45 | 25.00 | 9.84 | -2,262.07 | 25.40 | -9.09 |
| 49 | 5 | -930.28 | -18.53 | 7.88 | -1,743.91 | -19.55 | 7.14 |
| 50 | 53 | -433.95 | -13.33 | 7.06 | -409.28 | -13.56 | 6.31 |
| 51 | 37 | -27.94 | -6.93 | -1.97 | -64.35 | -6.26 | -1.78 |
| 52 | 21 | -2,734.92 | -16.61 | 7.32 | -2,030.58 | -17.49 | 6.60 |
| 53 | 20 | -3,349.56 | 24.43 | 10.84 | -2,608.34 | 24.91 | 9.94 |
| 54 | 52 | 358.32 | 14.74 | 8.13 | 336.26 | 14.89 | 7.33 |
| 55 | 36 | -4.20 | 8.84 | 2.46 | -46.11 | 8.34 | 2.32 |
| 56 | 4 | -921.22 | 26.74 | 11.30 | -1,735.35 | 27.31 | 10.39 |
| 57 | 3 | -345.20 | -19.82 | 9.28 | -1,184.98 | -20.70 | 8.46 |
| 58 | 51 | -341.92 | -13.95 | 8.08 | -332.80 | -14.15 | 7.29 |
| 59 | 35 | -113.26 | -7.30 | -2.07 | -151.63 | -6.96 | -1.98 |
| 60 | 19 | -3,360.96 | -8.42 | 8.90 | -2,619.41 | -19.18 | 8.09 |
| 61 | 18 | -3,841.89 | 24.76 | 11.77 | -3,087.99 | 25.38 | 10.90 |
| 62 | 50 | 276.18 | 15.09 | 8.97 | 269.67 | 15.27 | 8.16 |
| 63 | 34 | 27.94 | 7.02 | 1.96 | -15.33 | 6.87 | 1.91 |
| 64 | 2 | -338.00 | 26.39 | 12.04 | -1,177.95 | 27.12 | 11.16 |
| 65 | 1 | -53.71 | -23.34 | 11.06 | -893.65 | -24.07 | 10.17 |
| 66 | 114 | -69.58 | 15.25 | 9.05 | -76.09 | 15.42 | 8.24 |
| 67 | 130 | -205.33 | -3.16 | -0.90 | -244.35 | -3.16 | -0.90 |
| 68 | 97 | -3,845.00 | -22.58 | 10.93 | -3,091.11 | -23.21 | 10.06 |
| 69 | 96 | -4,034.10 | 27.07 | 13.08 | -3,292.55 | 27.83 | 12.27 |
| 70 | 115 | 166.79 | -15.99 | 9.79 | 175.91 | -16.19 | 8.99 |
| 71 | 98 | 47.70 | -3.76 | -1.11 | 4.43 | -3.93 | -1.16 |
| 72 | 81 | -49.84 | 27.14 | 12.80 | -889.62 | 28.02 | 11.97 |
| 73 | 80 | -405.76 | -30.61 | 13.97 | -1,220.88 | -31.18 | 13.06 |
| 74 | 116 | 601.05 | 15.82 | 9.71 | 578.99 | 15.98 | 8.91 |
| 75 | 99 | -543.63 | -3.86 | -1.09 | -582.00 | -3.52 | -1.00 |
| 76 | 95 | -4,021.26 | -29.74 | 14.11 | -3,280.04 | -30.22 | 13.21 |
| 77 | 94 | -2,858.17 | 12.26 | 6.06 | -2,153.84 | 13.14 | 5.34 |
| 78 | 117 | -885.12 | -12.71 | 7.11 | -860.46 | -12.93 | 6.37 |
| 79 | 100 | 21.72 | 18.08 | 5.11 | -20.18 | 17.59 | 4.98 |
| 80 | 79 | -425.30 | 13.36 | 6.56 | -1,238.92 | 14.37 | 5.83 |
| 81 | 78 | -1,692.02 | -28.85 | 11.05 | -2,454.64 | -29.24 | -10.60 |
| 82 | 118 | 654.64 | 14.41 | 7.21 | 617.30 | 14.55 | -6.77 |
| 83 | 101 | 13.64 | -16.14 | -4.59 | -22.77 | -15.47 | -4.40 |
| 84 | 93 | -2,840.75 | -25.51 | 10.35 | -2,137.07 | -25.83 | -9.63 |
| 85 | 92 | -1,676.73 | 11.41 | -4.38 | -1,034.07 | 12.40 | -5.71 |
| 86 | 119 | -836.75 | -11.95 | -5.50 | -796.81 | -12.20 | -6.40 |
| 87 | 102 | -48.13 | 16.27 | 4.51 | -87.33 | 15.45 | 4.29 |
| 88 | 77 | -1,708.69 | 13.89 | -4.98 | -2,470.48 | 15.02 | -6.39 |
| 89 | 76 | -2,699.00 | -25.58 | -9.83 | -3,385.00 | -25.79 | -10.86 |
| 90 | 120 | 367.11 | 13.39 | -6.68 | 314.93 | 13.50 | -7.47 |
| 91 | 103 | 96.14 | -12.62 | -3.58 | 62.97 | -11.63 | -3.30 |
| 92 | 91 | -1,673.22 | -21.82 | -8.71 | -1,031.52 | -21.97 | -9.68 |
| 93 | 90 | -815.24 | 12.37 | -5.90 | -257.99 | 13.46 | -7.15 |
| 94 | 121 | -711.84 | -11.72 | -6.35 | -657.07 | -12.00 | -7.18 |
| 95 | 104 | -103.73 | 11.38 | 3.13 | -138.91 | 10.25 | 2.82 |
| 96 | 75 | -2,710.66 | 15.22 | -6.71 | -3,395.51 | 16.45 | -8.04 |
| 97 | 74 | -3,490.50 | -24.78 | -10.75 | -4,075.66 | -24.79 | -11.57 |
| 98 | 122 | 235.98 | 13.23 | -7.55 | 169.58 | 13.32 | -8.23 |
| 99 | 105 | 51.63 | -10.29 | -2.92 | 22.95 | -8.99 | -2.55 |
| 100 | 89 | -816.80 | -21.15 | -9.64 | -260.81 | -21.13 | -10.42 |
| 101 | 88 | -192.93 | 14.61 | -7.64 | 256.14 | 15.77 | -8.77 |
| 102 | 123 | -565.94 | -12.17 | -7.32 | -496.94 | -12.47 | -8.03 |
| 103 | 106 | -144.43 | 8.15 | -2.25 | -174.34 | 6.73 | -1.86 |
| 104 | 73 | -3,498.85 | 17.52 | -8.50 | -4,082.55 | 18.83 | -9.71 |
| 105 | 72 | -4,093.30 | -25.15 | -11.79 | -4,554.53 | -24.97 | -12.37 |
| 106 | 124 | 156.37 | 13.64 | -8.45 | 76.51 | 13.72 | -8.99 |
| 107 | 107 | -27.56 | -8.18 | -2.32 | -50.56 | -6.58 | -1.86 |
| 108 | 87 | -202.34 | -21.81 | -10.78 | 245.17 | -21.61 | -11.33 |
| 109 | 86 | 178.50 | 18.29 | -9.64 | 497.85 | 19.50 | -10.62 |
| 110 | 125 | -339.98 | -13.16 | -8.30 | -257.53 | -13.47 | -8.89 |
| 111 | 108 | -172.60 | 4.73 | -1.32 | -196.02 | 3.03 | -0.85 |
| 112 | 71 | -4,098.14 | 21.09 | -10.47 | -4,557.63 | 22.46 | -11.52 |
| 113 | 70 | -4,429.40 | -25.57 | -12.44 | -4,745.05 | -25.19 | -12.76 |
| 114 | 126 | 62.38 | 14.22 | -9.11 | -30.02 | 14.28 | -9.49 |
| 115 | 109 | -134.79 | -4.82 | -1.37 | -150.97 | -2.95 | -0.83 |
| 116 | 85 | 162.37 | -22.69 | -11.61 | 479.90 | -22.31 | -11.91 |
| 117 | 84 | 265.05 | 22.27 | -11.40 | 434.64 | 23.52 | -12.19 |
| 118 | 127 | -83.78 | -14.24 | -9.05 | 11.18 | -14.58 | -9.48 |
| 119 | 110 | -186.29 | 1.04 | -0.31 | -202.08 | -0.93 | -0.28 |
| 120 | 69 | -4,430.47 | 24.85 | -12.13 | -4,744.10 | 26.25 | -12.99 |
| 121 | 68 | -4,464.81 | -25.19 | -12.27 | -4,614.83 | -24.61 | -12.28 |
| 122 | 128 | -42.15 | 14.46 | -9.19 | -146.07 | 14.51 | -9.39 |
| 123 | 111 | -237.52 | -0.63 | 0.18 | -245.81 | 1.49 | 0.43 |
| 124 | 83 | 241.03 | -22.85 | -11.66 | 408.54 | -22.31 | -11.69 |
| 125 | 82 | 33.05 | 23.79 | -12.37 | 34.83 | 25.22 | -12.97 |
| 126 | 129 | 196.14 | -11.85 | -8.60 | 302.07 | -12.26 | -8.86 |
| 127 | 112 | -190.32 | -0.31 | -0.12 | -197.35 | -2.58 | -0.75 |
| 128 | 67 | -4,464.56 | 23.05 | -12.32 | -4,612.24 | 24.56 | -12.96 |
| 129 | 113 | -335.58 | 20.75 | 6.21 | -334.19 | 22.56 | 6.74 |

Nota: Resultado obtenido con el software SAP 2000.

### *3.1.1. Reacciones*

**Tabla 3.2**

*Resultado del proceso con el SAP 2000 versión 22, para ambas condiciones de apoyos*

CON APOYO FIJO

| Apoyo | | Fx(Kg) | | Fz(Kg) |
|---|---|---|---|---|
| A | | 2,582.50 | | 3,555.14 |
| B | | -2,762.50 | | 3,281.86 |

CON APOYO MOVIL

| Apoyo | Ø(Radian) | coseno(Ø) | Fuerza(Kg) | Fx(Kg) | seno(Ø) | Fz(Kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 0.86 | 0.66 | 4,437.27 | 2,911.10 | 0.75 | 3,348.86 |
| | 0.72 | 0.75 | 315.16 | 237.85 | 0.66 | 206.76 |
| Total | | | | 2,673.25 | | 3,555.62 |
| B | 0.86 | 0.66 | -4,349.16 | -2,853.30 | 0.75 | -3,282.36 |
| | 0.72 | 0.75 | 0.00 | 0.00 | 0.66 | 0.00 |
| Total | | | | -2,853.30 | | 3,282.36 |

Nota: Los valores nos indican que no existe mayor diferencia en valores finales; sin embargo, comparando por cada dirección existe la diferencia.

### *3.1.2. Desplazamientos*

Refiere al cambio de posición de los nudos por efecto de acción de las cargas externas; mostramos los valores en el nudo central o clave de la armadura.

**Tabla 3.3**

*Resultado del proceso con el programa*

CON APOYO FIJO

| Nudo | Δx(cm) | Δy(cm) | Δz(cm) |
|---|---|---|---|
| Central | 0.14 | 0.00 | -1.42 |
| Apoyo B | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

CON APOYO MOVIL

| Nudo | Δx(cm) | Δy(cm) | Δz(cm) |
|---|---|---|---|
| Central | 0.48 | 0.00 | -0.71 |
| Apoyo B | -2.98 | 0.00 | 0.00 |

### *3.1.3. Verificación de diseño*

Consideramos los resultados de la armadura con apoyos fijos en el plano XX. Seleccionamos la barra que mayor solicitación exige; en este caso es la barra 67 (Apoyo móvil), con una fuerza a compresión de 4,464.56 Kg.

**a) Carga última por Euler**

La ecuación Euler, permite verificar la carga última de compresión a soportar sin sufrir pandeo, en una columna o similar.

$$P_u = \frac{EI\pi^2}{(kL)^2}\ Kg.$$

Donde:

Pu = Carga última a soportar (Kg).

E = Módulo de elasticidad del tubo (Kg/cm$^2$).

I = Momento de inercia de la sección del tubo (cm$^4$).

k = Coeficiente de acuerdo al tipo de apoyo (1).

L = Longitud de la barra (cm).

| Pu(Kg) | E(Kg/cm2) | I(cm4) | ΠΠ | k | L(cm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 59,001.65 | 1,936,100.00 | 15.52 | 3.1416 | 1.00 | 70.90 |

La carga máxima a soportar es de 59,001.65 Kg.

### *3.1.4. Verificación por compresión*

Consiste en la evaluación del elemento estructural, frente a la carga actuando en forma perpendicular respecto al área neta de la sección; cuyo resultado se refiere a la propiedad de respuesta del material, de acuerdo a la propiedad interna de ductilidad, medida como esfuerzo.

$$\sigma_c = \frac{P}{A}\ Kg/A = cm^2$$

Donde:

σc = Esfuerzo a la compresión solicitante (Kg/cm$^2$).

P = Fuerza axial de compresión solicitada (Kg).

A = Area neta de la sección de la barra (cm2).

| σc(Kg/cm2) | P(Kg) | A(cm2) |
|---|---|---|
| 1,143.65 | 4,464.81 | 3.90 |

La sección de la barra considera es: 50.8X50.8X2 mm (2"X2"X2 mm).

El esfuerzo a la compresión resistente, por el método LRFD, corresponde a:

σ_n=70 MPa.

σ_n=713.30 Kg/cm$^2$.

σ_u=0.85σ_n

σ_u=641.97 Kg/cm$^2$

Observamos que el esfuerzo solicitado es de 1,143.65 Kg/cm$^2$; sin embargo, soportan dos barras; por lo tanto, la solicitud real es de: 571.83 Kg/cm$^2$, significa que la sección está en condiciones de responder adecuadamente.

### *3.1.5. Verificación complementaria de la barra 67 mediante curva de compresión LRFD*

Para el tubo cuadrado de 50.8 × 50.8 × 2.0 mm se tiene Ag = 3.904 cm², I = 15.52 cm⁴ y r = √(I/Ag) = 1.994 cm. Con K = 1.00 y L = 70.90 cm, la esbeltez es KL/r = 35.56. Usando E = 1 936 100 kg/cm² y Fy = 2 549.29 kg/cm², resulta Fe = 15 111.83 kg/cm² y Fcr = 2 375.50 kg/cm². La resistencia de diseño es φcPn = 0.90FcrAg = 8 346.55 kg. Como Pu = 4 464.56 kg, se obtiene Pu/(φcPn) = 0.535 < 1.00. Por tanto, la barra 67 cumple a compresión aun verificándola individualmente, sin dividir artificialmente su fuerza entre dos barras. El valor de Euler de 59 001.65 kg se conserva como referencia del pandeo elástico, mientras que la curva LRFD proporciona resistencia de diseño.

**Ejemplo de verificación de una barra a tracción**

De la Tabla 3.3, la mayor tracción del caso con apoyos fijos corresponde a la barra 118, con Pu = 654.64 kg. Para la misma sección tubular, la fluencia de la sección bruta proporciona φtPn = 0.90FyAg = 8 957.19 kg. Al no considerar agujeros en una unión soldada, la rotura de la sección efectiva proporciona φtPn = 0.75FuAe = 11 942.92 kg, usando Fu = 4 078.86 kg/cm² y Ae = Ag. Controla la fluencia, con una relación demanda/capacidad de 654.64/8 957.19 = 0.073 < 1.00; por consiguiente, la barra cumple a tracción. La conexión soldada debe verificarse por separado para garantizar que pueda desarrollar, como mínimo, la fuerza requerida.

### *3.1.6. Verificación a la flexión*

Proceso mediante el cual, verificamos la respuesta del elemento estructural, frente a cargas que generan curvatura; en este caso se presenta el esfuerzo a la tensión por flexión; algunas veces la magnitud es similar al esfuerzo a la tracción.

Cálculo de la solicitud por flexión de la barra 67.

| Ø° | Ø(radian) | coseno | seno | P(Kg) | coseno(P) | seno(P) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 47.46 | 0.83 | 0.68 | 0.74 | 4,464.56 | 3,018.50 | 3,289.52 |

**Momentos:**

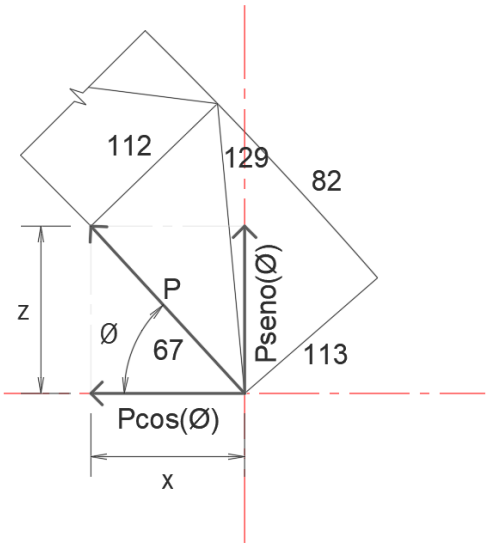
| Px(Kg) | z(m) | My(mKg) |
|---|---|---|
| 3,018.50 | 0.48 | 1,448.88 |

| Pz(Kg) | x(m) | My(mKg) |
|---|---|---|
| 3,289.52 | 0.52 | 1,710.55 |

La diferencia corresponde al momento solicitado: 261.77 m-Kg.

**Figura 3.1**

*Diagrama del cuerpo libre y descomposición de fuerzas de la barra 67*




La barra 67 trabaja a compresión, se representa como fuerza interna; la descomposición vectorial se muestra en componentes vertical y horizontal; los brazos para obtener los momentos se indican como "x" y "z" respectivamente. Las barras 129 y 113 convergen en un punto único con la barra 76.

### *3.1.7. Verificación del esfuerzo a la flexión*

Por tensión en vigas, tenemos:

$$\sigma_f = \frac{M(y)}{I}\ Kg/cm^2$$

Donde:

$\sigma_f = Esfuerzo\ a\ la\ flexión\ solicitada\ (Kg/cm2)$.

$M = Momento\ flexionante\ (26177\ cm\ Kg)$.

$y = Distancia\ del\ eje\ neutro\ a\ la\ fibra\ externa\ (2.54\ cm)$.

$I = Momento\ de\ inercia\ de\ la\ sección\ (15.52\ cm4)$.

Efectuado los cálculos la tensión solicitada es 4,282.45 Kg/cm$^2$.

Por otro lado, la tensión nominal es 400 MPa o 4,076 Kg/cm$^2$, multiplicado por Ø = 0.90, se tiene; una tensión resistente 3,668.40 Kg/cm$^2$.

El valor de la tensión resistente es menor, respecto a la solicitada; sin embargo, debido a que existen dos barras, el valor solicitado es mitad: 2,141.22 Kg/cm2; valor que es menor al resistente.

### *3.1.8. Verificación por cortante*

Proceso mediante el cual evaluamos deflexiones angulares en la sección del elemento estructural, se considera la no existencia de variación de dimensiones. La fuerza actuante es en forma paralela respecto al área neta resistente. También es un esfuerzo propio del material, con la que responde a una acción externa.

Por definición:

$$\tau_c = \frac{VQ}{Ib}\ Kg/cm^2$$

Donde:

$\tau_c = Cortante\ solicitida\ \ (Kg/cm2).$

$V = Fuerza\ cortante\ solicitada\ (Kg).$

$Q = Momento\ estático\ (Ad)cm3.$

$I = Momento\ de\ inercia\ de\ la\ sección\ (cm4).$

$b = Base\ de\ la\ sección\ (cm).$

El esfuerzo cortante solicitado es:

| v(Kg/cm2) | V(Kg) | Q(cm3) | I(cm4) | b(cm) |
|---|---|---|---|---|
| 100.33 | 2,224.05 | 3.56 | 15.52 | 5.08 |

Teniendo en cuenta que, el esfuerzo nominal es 32 GPa, o 326,080 Kg/cm2, factorado por Ø = 0.85, se tiene: 277,168 Kg/cm2. También la deformación unitaria angular se considera 0.002; entonces:

$$\tau_u = E_1 G\ (\frac{Kg}{cm^2}).$$

Donde:

$\tau_u = Esfuerzo\ cortante\ último\ Kg/cm^2.$

$E_1 = Deformación\ angular\ unitaria.$

$G = Módulo\ de\ esfuerzo\ cortante\ Kg/cm^2.$

Luego, se tiene:

$$\tau_u = 554.34\ Kg/cm^2.$$

El valor obtenido, frente a lo solicitado es mayor. Significa que la sección responde adecuadamente al corte.

## 3.2. Dimensiones del apoyo

Los apoyos están conformados por planchas metálicas, fijas en cada extremo de la armadura; una base fija al parante o columna y la otra al terminal de la armadura; estas dos planchas se unen y fijan entre sí, con pernos, cuyo número responde a un cálculo. Las cargas actuantes, son las reacciones a las fuerzas internas de los elementos de la armadura, previamente comparadas con las reacciones exigidas por las cargas externas.

Debido a que el desarrollo analítico, realizamos en el plano xz; finalmente contamos con una carga o fuerza en la dirección "z", este valor es importante de preferencia para el diseño de la columna; en

el caso de las planchas metálicas, utilizaremos la fuerza en la dirección "x", cuya acción es de cortante.

El material considerado en es acero dulce, nombre con el que se le conoce comercialmente. Los esfuerzos cortante resistentes, para las planchas metálicas y pernos consideramos el 50% del acero de los tubos.

Cálculo del número de pernos:

Datos:

$Fx = Fuerza\ cortante\ actuante\ (Kg)$.

$\tau_u = Esfuerzo\ cortante\ último\ Kg/cm^2$.

$A = Area\ de\ sección\ requerida\ (cm^2)$.

Por corte directo:

$$\tau_c = \frac{Fx}{A}\ Kg/cm^2$$

La fuerza Fx = 2,582.50 Kg; para el desarrollo por el método LRFD, debemos factorar, utilizando el coeficiente 1.20; cuyo resultado es: 3,099.00 Kg.

| A(cm2) | Fx(Kg) | Corte(Kg/cm2) | Ø 1/2" | Ø 5/8" | Ø 3/4 |
|---|---|---|---|---|---|
| 11.181 | 3,099.000 | 277.168 | 8.804 | 5.590 | 3.937 |

Esto indica, que podemos utilizar 6 pernos de Ø 5/8", de lo contrario 4 Ø ¾". Optamos por el de Ø 5/8".

**Cálculo del espesor de la plancha metálica**

**Por cortadura en contacto**

El área de contacto se considera, el diámetro, multiplicado por el espesor. La fuerza cortante es aquella que actúa en un orificio de un perno; si tenemos seis pernos cada uno de Ø 5/8", la fuerza es dividida en seis partes.

$$Fx = 516.50\ Kg.$$

$$A = D(e)\ cm^2.$$

$$D = 1.905\ cm.$$

$$e = \frac{Fx}{\tau_c D}\ cm.$$

| e(cm) | Ø(cm) | F(kg) | Corte(Kg/cm2) |
|---|---|---|---|
| 0.978 | 1.905 | 516.500 | 277.168 |

Significa que se requiere una plancha de acero con espesor de 3/8".

### 3.3. Proceso de diseño y construcción del apoyo

El diseño del apoyo se inicia con las reacciones del modelo. Para la condición de apoyo fijo, la Tabla 4 proporciona en A una reacción horizontal Fx = 2 582.50 kg y una reacción vertical Fz = 3 555.14 kg. La reacción horizontal factorizada utilizada en la verificación es Vu = 1.20(2 582.50) = 3 099.00 kg. Con esta demanda se revisaron el corte de los pernos, el aplastamiento de la placa, su espesor y la transferencia de las fuerzas hacia la columna. La solución adoptada comprende seis pernos de 5/8 de pulgada y una placa de acero A36 de 3/8 de pulgada de espesor, sin perjuicio de comprobar en los planos definitivos las distancias al borde, separaciones, soldaduras y dimensiones reales.

Escuela Profesional de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Tesista[1] Asesor[2]

Para la construcción se debe: replantear los ejes y cotas; comprobar la resistencia y nivelación de la columna; fabricar y perforar las placas de acuerdo con el plano; presentar el conjunto sin forzar la armadura; ejecutar las soldaduras especificadas; colocar pernos, arandelas y tuercas; ajustar en secuencia uniforme; verificar la alineación y el libre desplazamiento del apoyo móvil; y realizar una inspección visual final. El apoyo fijo debe restringir las traslaciones previstas, mientras que el móvil debe permitir el desplazamiento horizontal de diseño sin perder la capacidad de transmitir la reacción vertical.

## 3.4. Discusiones

### *3.4.1. Correas*

La idealización responde a una viga continua, con una luz de eje a eje de 6.20 m. Como carga a soportar se considera: el peso propio, peso de la cobertura y por ser de mayor incidencia tomamos en cuenta la acción del viento.

El material considerado es: acero tipo ASTM-A36, cuyas especificaciones técnicas se exponen al inicio.

La sección es un tubo de 40x60x1.8 mm.

El comportamiento, por la forma curva de las armaduras, no responden a un momento de inercia netamente hacia la base de la sección de correa, más bien mantiene una inclinación respecto a la vertical, también este ángulo varía de una a otra correa; obligándonos a determinar la sección real reducida, bajo estas consideraciones. Esta sección reducida muestra una solicitud de esfuerzo a la tensión mucho mayor que el ultimo, esfuerzo resistente; se presenta en el apoyo intermedio (negativo).

### *3.4.2. Armadura*

Se idealiza como una viga transformada, recomendada para soportar en este caso techos de menor peso; la forma y posición de los apoyos determinan las solicitaciones estructurales de cada elemento de la armadura. La forma de arco responde al objetivo de que trabaje a compresión preferentemente, la visión arquitectónica complementa con la belleza en su conjunto.

La estructura responde a una geometría de un arco rebajado.

Consta de un montante superior o Par y un montante inferior o Tirante ubicados en paralelo, a una distancia de 0.50 m, de eje a eje; tirantillos ubicados a 0.70 m a lo largo del arco, en forma perpendicular al Par y Tirante, conformando figuras triangulares, se tienen los parecillos diagonales, uniendo alternadamente, la intersección del tirantillo con el par y el tirantillo con el tirante. Esta conformación está referenciada en el plano xz; a una distancia de 0.30 m, en la dirección “y”; de modo que forme una figura tridimensional, cuadrilátero con una sección de 0.30X0.50 m; fijados por elementos horizontales.

Consta de apoyos fijos, posicionados en el plano “x”; las restricciones en el plano son, hacia el eje xx y zz; y en el espacio también en el eje yy. Teóricamente no existe restricción al giro a los ejes xx y zz, pero sí existe restricción hacia el eje yy.

Por otro lado, la posición de los apoyos permite el comportamiento de la armadura, a manera de una viga curva, facilitando la presencia de momentos flectores marcados en los elementos y la estructura total.

Verificado las secciones, éstas resisten las cargas externas asignadas; con uniones de eje a eje.

Escuela Profesional de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Tesista[1] Asesor[2]

Las uniones entre elementos deberán ser a base de soldadura corrida de 0.5 cm de ancho.

### *3.4.3. Apoyos*

Se consideran elementos planos, de acuerdo a la propuesta; consta de una plancha superior metálica adherida al terminal de la armadura, mediante soldadura corrida. Son las encargadas de absorber la fuerza horizontal de reacción en condición de cortadura, éstas son resistidas por seis pernos de un diámetro de 5/8" cada uno. La plancha metálica es de 40x80 cm, y un espesor de 1 cm, o 3/8"; el material es el acero dulce (A36).

La posición horizontal permite excentricidad respecto a la reacción vertical o gravitatoria.

## 3.5. Observaciones

En los planos definitivos de la estructura referencial, así como la construcción responden a:

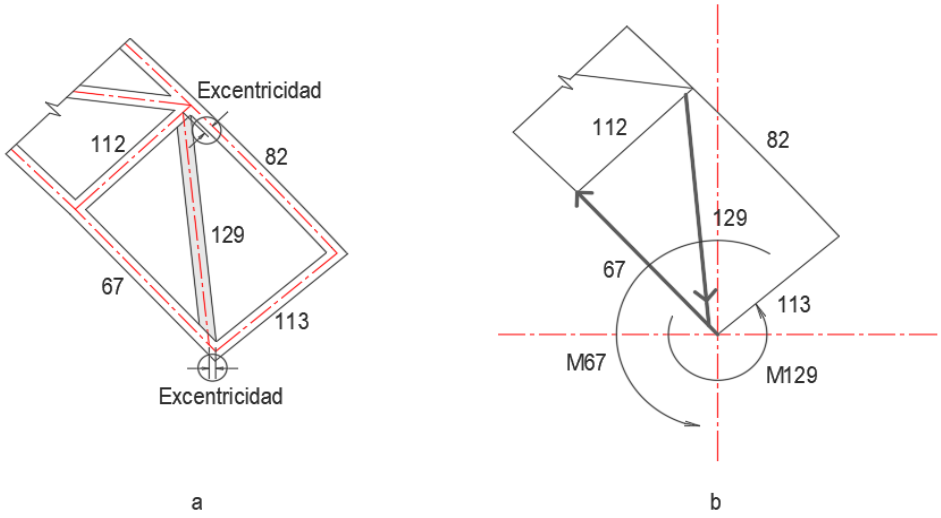
### *3.5.1. Armadura*

La estructura construida, responde a una viga curva, antes que a un arco. Verificado las fuerzas internas de los elementos, observamos una distribución irregular de resultados; llámese fuerzas de compresión y tracción. Esta irregularidad permite comportamiento inadecuado en el trabajo, frente a las cargas externas, el caso de flexión es inevitable; generan doble curvatura causando mayor estrés en el material.

La convergencia de algunas barras, no son axiales; por excentricidad incrementa momentos, propiciando mayores esfuerzos de respuesta a la tensión solicitada. Tal es el caso de la barra 67 con la 129. La barra 129 se representa en los planos, en el nudo de convergencia soldada en su total sección a la barra 67; se presenta una excentricidad del eje axial de la barra 129 al punto de convergencia, multiplicado por la fuerza interna obtenemos un momento de giro; este valor incrementa al momento propio de la barra 67, causando desbalance con el momento al otro extremo de esta barra. La acción opuesta diferenciada de los giros produce mayor estrés.

**Figura 3.2**

*Excentricidad en las uniones de las barras*




Las barras 67 y 129 no convergen axialmente; la barra 129 genera un incremento de momento en la 67. Del mismo modo existe excentricidad entre las barras 112 y 129, (a). En (b), la barra 67 trabaja a compresión, la representación interna es saliendo del nudo y el momento es en sentido anti horario

(M67); la barra 129 trabaja a tracción, por excentricidad genera momento también en sentido anti horario (M129), incrementando al anterior.

| Barra | Carga(Kg) | e(cm) | M(cm-Kg) |
|---|---|---|---|
| 67 | | | -26,167.00 |
| 129 | 196.14 | 5.08 | -996.39 |
| Sumatoria | | | -27,163.39 |

El incremento en momentos responde a un 3.81%; sin embargo, la excentricidad permisible es solamente 0.85 cm; en caso de cargas mayores es incidente.

$$e_{permisible} = \frac{b}{6}$$

Siendo "b" la base de la sección de barra, 5.08 cm.

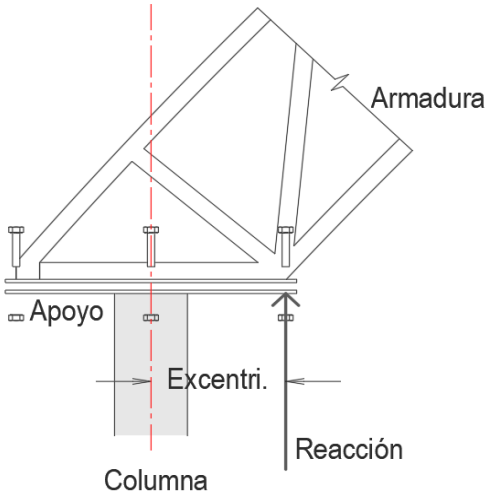
### *3.5.2. Apoyos*

Tal como se muestra en los planos de construcción, apoyos ubicados en el eje "x", en posición horizontal, condiciona el comportamiento de la armadura como una viga curva; expuesta a la flexión; por otro lado, no es recomendable considerar un apoyo móvil, debido a que se presentarían desplazamientos horizontales mayores; razón por la que plantearon apoyos fijos, con espacio limitado, permitiendo desplazamiento horizontal. Esta modalidad conlleva a incrementar la fuerza de cortadura en los pernos de sujeción, debido a que el movimiento es violento y en condiciones dinámicas hay presencia de un impacto, matemáticamente resulta ser el doble en magnitud frente a la fuerza horizontal estática considerada.

El tipo apoyo horizontal genera excentricidad respecto a la reacción en la dirección "z", esto conlleva a que la columna está expuesta a flexión por compresión, incrementando la tensión a la acción del viento.

**Figura 3.3**

*Excentricidad en el apoyo fijo*




Considerar un apoyo móvil, es de suma importancia; frente a cargas intempestivas y ambientales, se le permite a la estructura una reacción estructural mesurada.

Usualmente el objetivo de una estructura en arco, es que trabaje básicamente a compresión; para cumplir con esto, los arranques o apoyos deberán estar orientados en forma perpendicular respecto al eje en arco de la estructura. En estas condiciones funciona adecuadamente un apoyo fijo y el otro

móvil, y en el caso de optar por dos apoyos fijos, se recomienda considerar una rótula en el punto clave o cima de la estructura.

## CONCLUSIONES

1. Se comprobó que la orientación y el tipo de apoyo modifican el comportamiento global de la armadura metálica. Al pasar de dos apoyos fijos horizontales a una configuración con apoyo fijo y apoyo móvil perpendicular a la tangente del arco, cambiaron las fuerzas internas, las reacciones y los desplazamientos; por tanto, los apoyos no deben representarse como un detalle secundario, sino como parte del modelo resistente.
2. Las fuerzas axiales variaron entre las configuraciones analizadas. En la barra crítica 67 se obtuvo una compresión de 4 464.56 kg para el caso con apoyos fijos y 4 612.24 kg para el caso con apoyo móvil. La verificación complementaria LRFD de la sección tubular 50.8 × 50.8 × 2.0 mm proporcionó una resistencia de diseño a compresión de 8 346.55 kg y una relación demanda/capacidad de 0.535, por lo que la barra cumple frente al pandeo y la compresión.
3. El apoyo móvil redujo el desplazamiento vertical del nudo central de 1.42 cm a 0.71 cm, equivalente a una disminución del 50 %. A la vez, permitió un desplazamiento horizontal de -2.98 cm en el apoyo B, coherente con su función de liberar la traslación. Esto evidencia que evaluar únicamente la disminución vertical sería insuficiente: también debe comprobarse que exista espacio y detalle constructivo para el movimiento horizontal previsto.
4. El diseño del apoyo se efectuó con las reacciones del análisis. Para el apoyo A del caso fijo se obtuvo Fx = 2 582.50 kg y Fz = 3 555.14 kg; al factorizar la fuerza horizontal se consideró Vu = 3 099.00 kg. La solución calculada emplea seis pernos de 5/8 de pulgada y una placa de acero A36 de 3/8 de pulgada, debiendo complementarse con el control de soldaduras, distancias al borde, aplastamiento y transferencia hacia la columna.
5. La comparación entre el modelo y los detalles construidos mostró que las excentricidades en los nudos y la disposición horizontal de los apoyos introducen momentos secundarios y favorecen un comportamiento de viga curva. Para que la armadura se aproxime al comportamiento axial previsto, los ejes de las barras deben converger en los nudos y los apoyos deben orientarse conforme a la tangente del arco. Los resultados son válidos para la geometría, secciones, cargas y condiciones analizadas y no deben generalizarse sin una nueva verificación estructural.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


ASTM International. (2019). *Standard specification for carbon structural steel (ASTM A36/A36M-*

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006a). *Norma E.020 Cargas*. Reglamento Nacional de Edificaciones. https://web.municarabayllo.gob.pe/storage/archivos/modernizacion/Gesti%C3%B3n%20de%20Riesgo%20de%20Desastres/RNE2006_E_020.pdf

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006a). *Norma técnica E.020: Cargas.* Reglamento Nacional de Edificaciones.



Escuela Profesional de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Tesista[1] Asesor[2]

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006b). *Norma E.090 Estructuras Metálicas.* Reglamento Nacional de Edificaciones. Decreto Supremo N.º 011-2006-VIVIENDA.

Norris, C. H., & Wilbur, J. B. (1973). *Análisis elemental de estructuras* (2.ª ed.). McGraw-Hill.

Ruiz Alva, E. P. (2024). *Uso de perfiles de acero como sistema constructivo del centro de formación y exposición de artes mixtas en Ayacucho 2023* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. https://hdl.handle.net/20.500.12692/143768

Siancas Huallpa, K. K. (2025). *Análisis y diseño estructural de una nave industrial de 24 m de luz* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio de Tesis PUCP.

Uribe Escamilla, J. (2004). *Análisis de estructuras* (2.ª ed., reimp.). Escuela Colombiana de Ingeniería.