Relationship of shear stress in reinforced concrete T-beams when varying the angle of placement of the stirrups.

Relación del esfuerzo cortante en vigas tipo T de hormigón armado al variar el ángulo de colocación de los estribos.

Autores:

Barreno-Sánchez, Juan Sebastián
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Posgradista de la Maestría en Ingeniería Civil con mención en Estructuras Sismorresistentes
Cuenca – Ecuador
juan.barreno.02@est.ucacue.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-1594-072X

Calle-Castro, Carlos Julio
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Docente Tutor del área
Cuenca – Ecuador
cjcallec@ucacue.edu.ec
https://orcid.org/0000-0003-0341-5466

Fechas de recepción: 21-MAR-2025 aceptación: 21-ABR-2025 publicación: 30-JUN-2025
https://orcid.org/0000-0002-8695-5005
http://mqrinvestigar.com/

Resumen

Este estudio presenta un análisis comparativo de vigas tipo T de hormigón armado, centrado en cómo el ángulo de colocación de los estribos influye en la resistencia ante esfuerzo cortante. Se analizaron 12 muestras de vigas tipo T, las cuales contaban con las siguientes dimensiones: una altura total de 22.00 cm, una altura de alma de 15 cm y una altura de ala de 7.00 cm; el ancho del ala es de 25.00 cm, y el de alma es de 11.00 cm. Todas las probetas compartían el mismo patrón de armado longitudinal y transversal, diferenciándose únicamente en el ángulo de colocación de los estribos, los cuales fueron instalados en los valores de 90.00°, 75.00°, 60.00° y 45.00° durante su fabricación. Las vigas tipo T tenían una longitud total de 1.20 m y fueron apoyadas de manera simple.

Para evaluar el comportamiento de las vigas, se les aplicaron cargas puntuales hasta que estas fallaran por corte. Esto permitió estudiar la relación entre el ángulo de colocación de los estribos y la resistencia ante esfuerzo cortante. Los resultados mostraron que, al modificar el ángulo de colocación de los estribos, aumentaba la resistencia al esfuerzo cortante en la sección de la viga tipo T. Específicamente, se observó un incremento del 16.42% en la resistencia al pasar del ángulo de 90.00° a 75.00°, del 13.86% de 75.00° a 60.00°, y del 16.30% de 60.00° a 45.00°. De estos resultados, se concluye que la reducción del ángulo de colocación de los estribos entre 90.00° a 45.00°, incrementa la resistencia al esfuerzo cortante de las vigas tipo T de hormigón armado en un total de 4.65 toneladas, lo que representa un aumento del 54.16%.

Palabras clave: Vigas tipo T; Esfuerzo Cortante; Armado Longitudinal; Armado Transversal; Estribos; Resistencia

Abstract

This study presents a comparative analysis of reinforced concrete T-beams, focusing on how the stirrup placement angle influences shear strength. Twelve T-beam samples were analyzed, with the following dimensions: a total height of 22.00 cm, a web height of 15 cm, and a flange height of 7.00 cm; the flange width is 25.00 cm, and the web width is 11.00 cm. All specimens shared the same longitudinal and transverse reinforcement pattern, differing only in the stirrup placement angles, which were installed at 90.00°, 75.00°, 60.00°, and 45.00° during fabrication. The T-beams had a total length of 1.20 m and were simply supported.

To evaluate the beams' behavior, point loads were applied to them until they failed in shear. This allowed us to study the relationship between the stirrup placement angle and shear strength. The results showed that modifying the stirrup placement angle increased the shear strength of the T-beam section. Specifically, a 16.42% increase in strength was observed from the angle of 90.00° to 75.00°, a 13.86% increase from 75.00° to 60.00°, and a 16.30% increase from 60.00° to 45.00°. From these results, it is concluded that reducing the angle of placement of the stirrups between 90.00° to 45.00° increases the shear strength of the reinforced concrete T-beams by a total of 4.65 tons, which represents an increase of 54.16%.

Keywords: T-beams; Shear stress; Longitudinal reinforcement; Transverse reinforcement; Stirrups; Resistance

Introducción

El territorio ecuatoriano se encuentra en una zona de alto riesgo sísmico debido a su compleja conformación geológica y geotécnica, y a la intensa actividad sísmica generada por el choque entre las placas de Nazca y Sudamericana. Esta actividad constante impone la necesidad de que las estructuras cuenten con mecanismos eficientes de disipación y absorción de energía sísmica para prevenir su colapso. Entre los principales daños que las estructuras pueden sufrir a causa de fuerzas sísmicas o sobrecargas, destacan aquellos originados por esfuerzos cortantes. Estos se manifiestan, por ejemplo, en la aparición de grietas inclinadas en vigas y columnas, lo que puede comprometer la estabilidad de la construcción e incluso llevar al colapso de la misma. Por tanto, es fundamental realizar un análisis detallado de este tipo de fallas y desarrollar un sistema de armado adecuado que optimice la absorción de esfuerzos cortantes, garantizando así la seguridad y resistencia de las estructuras ante eventos sísmicos (Moya, 2015), (Zalaya, 2017).

El hormigón armado es un material ampliamente utilizado en la construcción de elementos estructurales, especialmente en vigas, donde se considera que el acero y el hormigón trabajan de manera conjunta. Sin embargo, ante esfuerzos cortantes, es el acero quien absorbe la mayor parte de las solicitaciones. Este tipo de esfuerzo cortante se presenta con mayor frecuencia en vigas que están unidas a elementos altamente rígidos, como muros o columnas robustas, generando concentraciones de esfuerzo en los nudos de conexión entre estos elementos. Para mitigar este fenómeno, los estribos se colocan de manera más densa en estas zonas críticas. Además, al optar por una colocación inclinada de los estribos, se busca optimizar el espaciamiento mínimo entre ellos y mejorar el comportamiento de los nudos entre los elementos estructurales, favoreciendo así la distribución de los esfuerzos cortantes y aumentando la resistencia de la viga (A.M. Hernández-Díaz, 2017).

Los daños que una estructura puede sufrir durante la acción del sismo son variados y esto se relaciona tanto del tipo de material como del diseño de la estructura. No obstante, uno de los

tipos de daño que más preocupa a los diseñadores, son aquellos causados por esfuerzos cortantes, los cuales se manifiestan mediante grietas inclinadas en los elementos estructurales, y pueden llevar al colapso de la estructura. Por esta razón, las normativas de construcción están diseñadas para prevenir este tipo de fallas, estableciendo criterios que buscan garantizar la seguridad y estabilidad de las estructuras frente a cargas sísmicas (Al-Nasra, 2013).

El Dr. Sergio Alcocer del Instituto de Ingeniará de la UNAM en el periódico "La Jornada" publicado el 18 de septiembre del 2015 menciona: "Lo que buscamos es favorecer un comportamiento por flexión que permita el desplazamiento de la estructura sin que colapse, este es el caso de las grietas localizadas en la base de las columnas, los extremos de las vigas o en la base de los muros, lo anterior permite que la estructura se deforme y se adapte a los desplazamientos que requiere el temblor, sin que se produzca un colapso o daños graves" (Alcocer, 2015).

El diseño a corte en vigas tipo T es un aspecto fundamental en la ingeniería estructural, especialmente cuando se trata de garantizar la seguridad y estabilidad de las estructuras frente a cargas y fuerzas aplicadas. Las vigas tipo T, comúnmente utilizadas en puentes, edificios y otras construcciones, están sujetas a esfuerzos cortantes que pueden generar fallas locales si no se manejan adecuadamente. El corte, o esfuerzo cortante, es una de las principales causas de daño en las vigas, ya que puede provocar la aparición de grietas inclinadas y, en casos extremos, el colapso de la estructura. Por ello, el diseño adecuado de los estribos y la distribución del acero transversal en las vigas tipo T es esencial para controlar y resistir estos esfuerzos cortantes. Un diseño efectivo no solo considera la resistencia del material, sino también la distribución óptima de los refuerzos, el espaciamiento de los estribos y la adaptación de la estructura para resistir los esfuerzos sin comprometer su funcionalidad o seguridad (McCormac, 2016).

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento del esfuerzo cortante en vigas tipo T y explorar cómo la modificación del ángulo de colocación de los estribos puede mejorar su desempeño estructural. Este análisis busca optimizar la resistencia de las vigas tipo

T frente a esfuerzos cortantes, contribuyendo a un diseño más eficiente y seguro en estructuras de hormigón armado.

Material y métodos

La metodología utilizada en esta investigación consiste en el diseño y la construcción de vigas tipo T de 1.20 m de longitud, cuya armadura será similar en todas las probetas, con la única variación en el ángulo de colocación de los estribos, que se establecerá en 90.00°, 75.00°, 60.00° y 45.00°. Este enfoque permite evaluar cómo el cambio en el ángulo de los estribos afecta el comportamiento estructural de las vigas frente a esfuerzos cortantes.

Selección de la muestra

La selección de una muestra de 3 vigas para cada ángulo de colocación (90.00°, 75.00°, 60.00° y 45.00°) se justifica con base en un enfoque metodológico no probabilístico, el cual permite un análisis más controlado y específico en función de las variables que se desean estudiar. Muchos estudios han considerado lo establecido en la normativa Peruana E060 de Concreto Armado establece que, para cada relación agua-material o contenido de material cementante, se deben elaborar al menos tres probetas. (Vivienda, 2009).

Al optar por un número reducido de muestras, se busca evaluar de la mejor manera el comportamiento de las vigas tipo T bajo diferentes condiciones de colocación de los estribos, lo que facilita la observación y comparación de los resultados. Este enfoque no probabilístico, basado en la selección deliberada de las vigas en base a un cierto criterio técnico de diseño, permite concentrarse en una cantidad manejable de muestras y necesarias para efectuar una interpolación de resultados, asegurando la precisión en las mediciones y análisis, sin la necesidad de una representación estadística más amplia. (Pimienta, 2000) en su libro titulado "Encuestas probabilísticas vs. no probabilísticas" señala que "*el muestreo de selección experta no probabilístico, denominado también como muestreo de juicio, es una técnica utilizada por*

expertos para seleccionar especímenes que cumplan con ciertas características, representativas o típicas, según el criterio del experto".

En base a lo anterior se seleccionó un total de 12 vigas tipo T, se garantiza una cobertura adecuada de las distintas configuraciones de colocación, lo que resulta suficiente para obtener resultados confiables sobre el desempeño de las vigas tipo T frente a esfuerzos cortantes.

Propiedades de los materiales pétreos

Se llevó a cabo la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados pétreos empleados en la elaboración del hormigón utilizado para la construcción de vigas tipo T. La investigación se desarrolló en el Laboratorio de Ensayo de Materiales, donde se analizaron distintas características, entre ellas: la gravedad específica en estado seco, en condición saturada superficialmente seca y la gravedad específica aparente. Asimismo, se determinaron la capacidad de absorción, la masa unitaria en estado seco suelto y compactado, los porcentajes de vacíos correspondientes a ambos estados, el tamaño máximo nominal y la resistencia al desgaste por abrasión. Todos los ensayos fueron ejecutados conforme a los estándares establecidos por la normativa ASTM, lo que asegura la confiabilidad y exactitud de los resultados obtenidos.

Diseño de mezclas

Una vez determinadas las propiedades físicas y mecánicas de los agregados pétreos, se procedió a calcular la dosificación del hormigón con una resistencia de f'c = 210 kg/cm² a los 28 días de edad, utilizando el método de dosificación recomendado por la American Concrete Institute (ACI). Este método, ampliamente aceptado en la industria, permite ajustar la cantidad de los diferentes componentes del hormigón (cemento, agua, agregados gruesos y finos, y aditivos) para lograr las propiedades deseadas en el material final, garantizando su resistencia y durabilidad. El hormigón resultante, que cumplirá con los requisitos establecidos, será el material utilizado para la construcción de las vigas tipo T que serán sometidas a los ensayos. Este enfoque asegura que las vigas tipo Tengan las características adecuadas para evaluar su desempeño bajo condiciones controladas, proporcionando resultados fiables y representativos

del comportamiento del hormigón en las vigas tipo T frente a esfuerzos cortantes.

Dimensionamiento de viga

La relación de las dimensiones que conforman las vigas tipo T se dimensionó bajo los criterios de la normativa ACI 318S -19.

Para este estudio, se seleccionó una viga T con las siguientes dimensiones: una altura total de 22.00 cm, una altura de alma de 15.00 cm y una altura de ala de 7.00 cm. El ancho de ala es de 25.00 cm, mientras que el ancho de alma es de 11.00 cm, y la longitud total de la viga es de 1.20 m. Estas dimensiones fueron seleccionadas teniendo en cuenta las limitaciones y características de la máquina que se utilizará para realizar los ensayos, garantizando que las probetas sean adecuadas para las pruebas de esfuerzo cortante que se realizarán. Para el cálculo del refuerzo longitudinal y transversal, se asumieron condiciones de apoyo simple en ambas extremidades de la viga, lo que permite simular un comportamiento realista durante los ensayos. Además, se consideró la aplicación de cargas puntuales distribuidas de acuerdo con el procedimiento de ensayo a flexión en 4 puntos, tal como lo establece la normativa ISO 5628. Este enfoque garantiza que las vigas sean sometidas a condiciones de carga y apoyo representativas, permitiendo una evaluación precisa de su comportamiento estructural frente a los esfuerzos cortantes.

Condiciones del ensayo

El ensayo a cuatro puntos, conforme a la normativa ISO 5628, es un procedimiento experimental utilizado para evaluar el comportamiento de las vigas frente a esfuerzos cortantes. Este ensayo consiste en aplicar cargas concentradas en dos puntos intermedios de la viga, mientras que los extremos de la viga se mantienen apoyados de forma simple. La viga se somete a una carga distribuida en cuatro puntos específicos: dos puntos de carga en el centro de la viga y dos apoyos en los extremos.

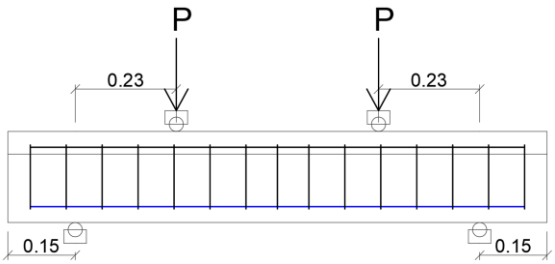
El objetivo principal de este ensayo es analizar la distribución de los esfuerzos a lo largo de la viga y cómo estos esfuerzos cortantes afectan la integridad estructural del elemento. Durante el ensayo, se observa el desarrollo de grietas inclinadas, que son indicativas de fallas por cortante,

especialmente en las zonas cercanas a los puntos de carga y en los nudos de la viga. A través de este procedimiento, se evalúan las características de resistencia al cortante del material, la eficiencia del refuerzo transversal (estribos) y el comportamiento de la viga bajo cargas específicas.

Los apoyos serán colocados a 15.00cm medidos desde cada cara extremo y la carga será colocada a ¼ de la longitud útil entre apoyos, tal como se muestra en la Figura 1.

Figura 1.

Condiciones de apoyos y cargas, según método de ensayo.



Fuente: Elaboración propia.

Consideraciones para el diseño y construcción

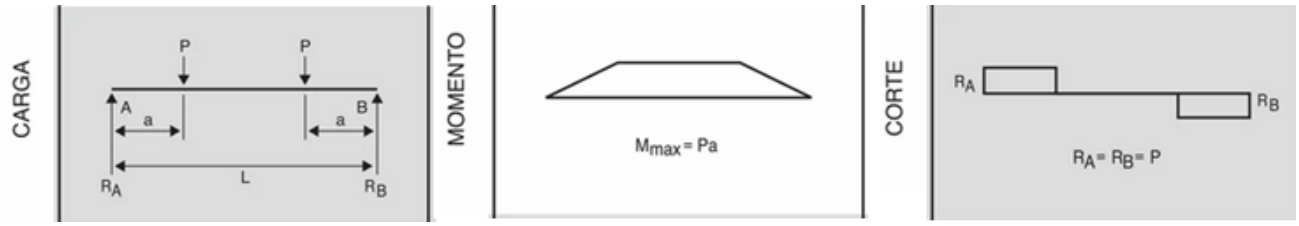
Para el diseño se consideraron los parámetros establecidos en la normativa NEC - SE – HM y ACI 318, estableciendo un recubrimiento de 3.00cm, un diámetro de dobles de varilla igual a 6 veces el diámetro de la barra, una separación entre estribos igual a un medio del peralte efectivo.

Acero de refuerzo transversal

El refuerzo transversal y longitudinal utilizado en este estudio cumple con los requisitos mínimos especificados por la norma técnica ACI 318S, empleándose acero ASTM A615 de grado 60. En el caso específico del acero dispuesto en las vigas tipo T, se tomó en consideración el momento nominal que debe resistir la sección estructural dispuesta, el cual fue determinado con base en los datos representados en la siguiente figura.

Figura 2.

Diagrama en vigas simplemente apoyadas al aplicar dos cargas puntuales



Fuente: Eurocódigo 3 “Proyecto de estructuras de acero” (UNE, 2012).

Para determinar el esfuerzo a corte que soporta la viga tipo T cuyas dimensiones son: altura total de 22.00 cm, una altura de alma de 15.00 cm y una altura de ala de 7.00 cm, ancho de ala es de 25.00 cm y ancho de alma es de 11.00 cm, se estableció el uso de estribos de 5.50mm de diámetro.

El esfuerzo cortante que soporta la sección de hormigón de la viga T está compuesto por la contribución de dos elementos: la sección del alma (Vc1) y la sección del ala (Vc2). El alma, al ser la parte vertical de la viga, resiste una parte significativa del esfuerzo cortante, mientras que el ala, ubicada en la parte superior, también contribuye a la resistencia global de la viga. La combinación de ambos esfuerzos se expresa de la siguiente manera:

Alma:

$$Vc1 = 0.53 * \sqrt{f'c} * bw * dw$$

$$Vc1 = 0.53 * \sqrt{210.00 \frac{kg}{cm^2}} * 12.00cm * 12.00cm$$

$$Vc1 = 1.11\ ton$$

Donde

Vc1 = Resistencia teórica al corte suministrada por la sección de hormigón del alma.

f´c = Resistencia a compresión del hormigón.

bw = Ancho útil de la sección del alma.

dw = Altura útil de la sección del alma.

Ala:

$$Vc2 = 0.53 * \sqrt{f´c} * bf * df$$

$$Vc2 = 0.53 * \sqrt{210.00 \frac{kg}{cm^2}} * 25.00cm * 4.00cm$$

$$Vc2 = 0.77\ ton$$

Dónde:

Vc2 = Resistencia teórica al corte suministrada por la sección de hormigón del ala.

f´c = Capacidad del hormigón para resistir esfuerzos de compresión.

bf = Ancho útil de la sección del ala.

df = Altura útil de la sección del ala.

Cortante total que soporta la sección de hormigón:

$$Vc = Vc1 + Vc2$$

$$Vc = 1.11\ ton + 0.77\ ton$$

$$Vc = 1.87\ ton$$

Dónde:

Vc = Resistencia teórica al corte suministrada por la sección de hormigón.

Vc1 = Resistencia teórica al corte suministrada por la sección de hormigón del alma.

Vc2 = Resistencia teórica a la corte suministrada por la sección de hormigón del ala.

El refuerzo transversal por corte se requiere en aquellas zonas donde la fuerza cortante actuante, representada como “Vu” , supere la resistencia nominal al corte proporcionada por la sección de hormigón, “Vc”. En estos casos, se calcula la contribución del refuerzo transversal mediante la expresión “Vs = Vn – Vc” . Posteriormente, la capacidad de corte aportada por los estribos, considerando cualquier ángulo de colocación respecto al eje longitudinal del elemento estructural, se determina con base en la siguiente expresión:

$$Vs = \frac{Aw * fyt * d}{s} * (\sin \propto + cos \propto)$$

$$Vs = \frac{Aw * fyt * d}{s} * (\sin \propto + cos \propto)$$

$$Vs = \frac{0.48cm^2 * 4200.00 \frac{kg}{cm^2} * 19.00cm}{8.00cm} * (\sin 90 + \cos 90)$$

$$Vs = 4.74\ ton$$

Dónde:

Vs = Resistencia teórica al corte proporcionada por el refuerzo de cortante.

Av = Área de acero transversal destinada a resistir esfuerzos de corte.

fyt = Límite elástico del acero en los estribos.

d = Peralte útil de la sección.

s = Espaciamiento entre refuerzo transversal.

∝= Ángulo de colocación del estribo.

La capacidad nominal de resistencia al cortante, representada como “Vu”, en una sección

determinada, se obtiene como la suma de las contribuciones del concreto y del refuerzo de acero, conforme a lo establecido en la sección 5.1 de la normativa NEC - SE – HM.

$$Vn = Vc + Vs$$
$$Vn = 1.87\ ton + 4.74\ ton$$
$$Vn = 6.61\ ton$$

Donde

Vn = Resistencia teórica al corte.

Vc = Resistencia teórica al corte suministrada por la sección de hormigón.

Vs = Resistencia teórica al corte proporcionada por el refuerzo de cortante.

La carga puntual establecida para el cálculo del momento nominal, fue determinada a partir de la resistencia nominal a la corte, proporcionada por la sección transversal de hormigón más la resistencia proporcionada por el acero de refuerzo transversal.

$$P = Vn = 6.61\ ton$$

Donde

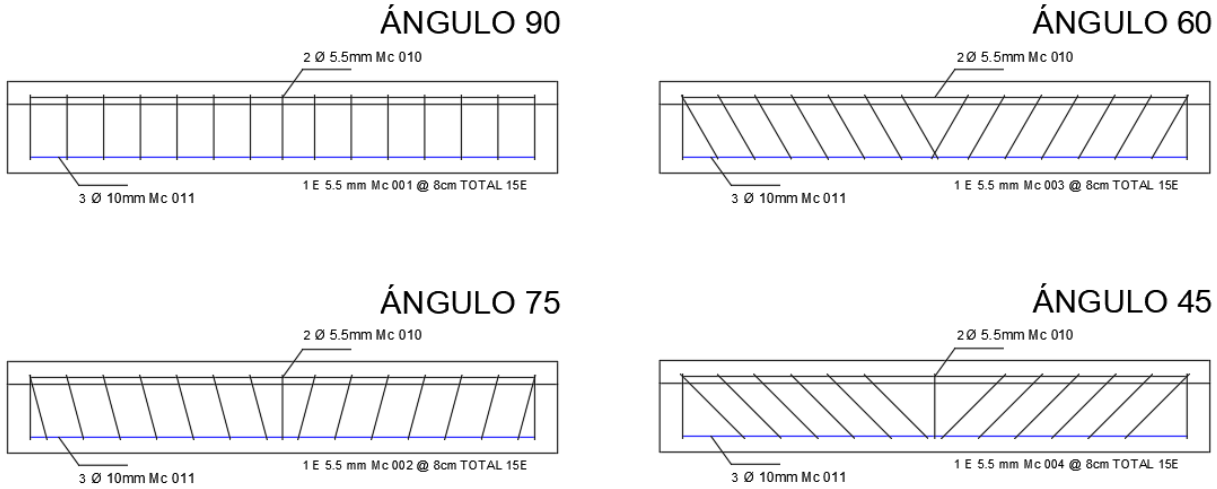
P = Carga puntual.

Vn = Resistencia nominal a cortante.

A continuación, se muestra el refuerzo trasversal correspondiente para cada viga, al variar el ángulo de colocación del estribo.

Figura 3.

Sección longitudinal de las vigas



Fuente: Elaboración propia.

Acero de refuerzo longitudinal

El momento máximo se determina a través del diagrama de vigas simplemente apoyadas con dos cargas puntuales, el cual relaciona la carga aplicada con respecto al peralte efectivo, de la siguiente forma:

$$Mu = Mn$$

$$Mn = P.dp$$

$$Mn = 6.61\ ton.* 0.38\ m$$

$$Mn = 2.51\ ton * m$$

Dónde:

Mu = Momento ultimo.

Mn = Momento nominal.

P = Carga aplicada.

dp = Distancia de aplicación de la carga.

La altura del bloque de compresión para secciones simplemente reforzadas se determina con la

siguiente formula:

$$a = d - \sqrt{d^2 - \left(\frac{2 * Mu}{0.85 * f´c * bw}\right)}$$

$$a = 19.00cm - \sqrt{(19.00cm)^2 - \left(\frac{2 * 2.51\ ton * m}{0.85 * 210.00\frac{kg}{cm^2} * 12.00cm}\right)}$$

$$a = 7.76cm$$

Dónde:

Mu = Momento ultimo.

f´c = Capacidad del hormigón para resistir esfuerzos de compresión.

bw = Ancho útil de la sección del alma.

d = Altura útil de la sección de viga.

El cálculo del área de refuerzo longitudinal se realiza a partir de la altura del bloque de compresión, así como de la relación entre los esfuerzos de compresión del hormigón y de tensión del acero. Este enfoque asegura un equilibrio adecuado entre ambos materiales, garantizando que la viga sea capaz de resistir las cargas aplicadas de manera eficiente y se determina con la siguiente formula:

$$Asw = \frac{0.85 * f'c * bw * a}{fy}$$

$$Asw = \frac{0.85 * 210.00\frac{kg}{cm^2} * 12.00cm * 7.76cm}{4200.00\frac{kg}{cm^2}}$$

$$Asw = 3.96cm^2$$

Dónde:

Asw = Área de acero longitudinal requerida.

f´c = Capacidad del hormigón para resistir esfuerzos de compresión.

bw = Ancho de la sección.

a = Altura del bloque de compresión.

fy = Resistencia a fluencia del acero.

De acuerdo con las normativas del ACI (American Concrete Institute), se establece que la cuantía proporcionada por el área de acero debe ser menor a la cuantía máxima de acero en tensión, asegurando que la viga se deforme antes de su falla, considerando una deformación unitaria máxima del hormigón de 0.003. Este valor se ha fijado para asegurar que el refuerzo longitudinal en las estructuras esté diseñado de manera que no se supere la capacidad máxima de resistencia del hormigón, permitiendo así un comportamiento dúctil durante un sismo y se determina con la siguiente formula:

$$\rho max = 0.85 * \beta * \frac{f'c}{fy} * \frac{\varepsilon c}{\varepsilon c + \varepsilon s}$$

$$\rho max = 0.85 * 0.85 * \frac{210.00 \frac{kg}{cm^2}}{4200.00 \frac{kg}{cm^2}} * \frac{0.003}{0.003 + 0.005}$$

$$\rho max = 0.023$$

Dónde:

B = Coeficiente de Whitney

f´c = Capacidad del hormigón para resistir esfuerzos de compresión.

fy = Resistencia a fluencia del acero.

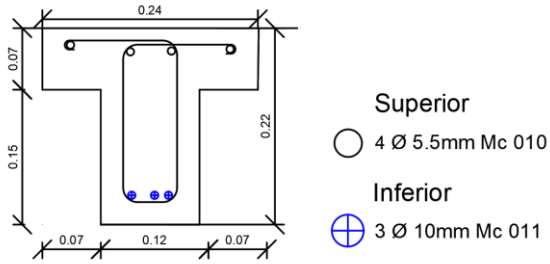
εc = Deformación unitaria del hormigón.

εs = Deformación unitaria del acero.

Para este diseño se utilizaron 3 varillas de 10.00 mm que conformaran el acero inferior longitudinal, el cual nos brinda una cuantía de 0.010, siendo este valor mayor al mínimo permisible de 0.003 y menor al máximo calculado de 0.023

Figura 4.

Sección trasversal de la viga T



Fuente: Elaboración propia.

Fabricación de las vigas

Para la fabricación de las vigas tipo T de hormigón armado, dimensionadas y diseñadas estructuralmente para soportar esfuerzos cortantes, se utilizaron cofres de triplay de 12 mm, con un diseño que facilita tanto el encofrado como el desencofrado. Para garantizar la estabilidad y evitar deformaciones durante el vaciado del hormigón, toda la sección del cofre fuere rigidizada con listones longitudinales y alambre N° 8. Esta estructura de refuerzo asegura que el triplay mantenga su forma y resistencia, evitando alabeos y asegurando una correcta geometría en las vigas durante el proceso de fraguado del hormigón.

Figura 5.

Construcción de vigas

Fuente: Elaboración propia.

Para asegurar la calidad y uniformidad de la mezcla utilizada en la fabricación de las vigas tipo T, durante el proceso de vertido del hormigón, se obtuvieron tres probetas cilíndricas de 15x30 cm. Estas probetas fueron tomadas con el fin de realizar dos controles importantes: primero, para determinar la consistencia y homogeneidad del hormigón a través del ensayo de asentamiento del “Cono de Abrams”, conforme al método establecido en la norma “ASTM C143 Método de Ensayo Normalizado para Asentamiento de Concreto de Cemento Hidráulico”; y segundo, para el control de la resistencia del hormigón, de acuerdo con la norma “ASTM C39 Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Hormigón”.

La fabricación y curado de las probetas se realizaron siguiendo las directrices de la norma “ASTM C31 Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Hormigón para Ensayo en Laboratorio”. Posteriormente, las probetas fueron sometidas a ensayo a los 28 días de edad para determinar su capacidad a la compresión.

Para garantizar que la mezcla de hormigón alcanzara la resistencia esperada, se implementó un proceso de curado en condiciones controladas, lo que favoreció una adecuada hidratación del hormigón. Las probetas fueron curadas con agua y mantenidas a una temperatura controlada, conforme a lo establecido en la norma “ASTM C192 Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Hormigón para Ensayo en Laboratorio”.

Figura 6.

Ensayo de cilindros de hormigón

Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Caracterización de los daños en la zona de estudio

A partir resultados obtenidos a través de ensayos de laboratorio, se determinaron las cargas últimas de resistencia de las vigas tipo T para los diferentes ángulos de colocación de los estribos. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla correspondientes para cada probeta.

Tabla 1.

Resultados obtenidos de los ensayos.

	Máxima Fuerza	**Máxima Tensión**	**Máximo Desplazamiento**	**Máxima Deformación**
ID	Ton	Kgf/cm2	mm	%
1 _ 90.00°	6.629	61.265	10.845	1.558
2 _90.00°	6.654	61.501	12.765	1.834
3 _90.00°	6.501	60.079	13.565	1.949

1_75.00°	7.708	71.240	14.544	2.090
2_75.00°	7.547	69.749	17.954	2.580
3_75.00°	7.776	71.871	16.454	2.365
1_60.00°	8.714	80.537	12.565	1.806
2_60.00°	8.840	81.704	13.654	1.962
3_60.00°	8.669	80.117	12.977	1.865
1_45.00°	10.077	93.128	15.977	2.296
2_45.00°	10.112	93.453	14.755	2.120
3_45.00°	10.310	95.286	17.877	2.569
Media	8.295	76.661	14.494	2.083
Desviación Estándar	1.382	12.772	2.204	0.317
Rango	3.809	35.206	7.110	1.022

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.

Ensayo de vigas tipo T

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados obtenidos en el laboratorio, se evaluó la resistencia final de la sección de viga tipo T sometida a un ensayo de cuatro puntos, conforme a lo establecido por la norma ISO 5628. Los apoyos fueron ubicados a 15.00 cm desde cada extremo de la viga, y la carga se aplicó a un cuarto de la longitud útil entre los apoyos. Los resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.

Fuerza cortante final resistida por la sección de la viga tipo T, en toneladas.

Ángulo	**90°**	**75°**	**60°**	**45°**
Primer ensayo (Ton)	6.629	7.708	8.714	10.077
Segundo ensayo (Ton)	6.654	7.547	8.840	10.112

Tercer ensayo (Ton)	6.501	7.776	8.669	10.310
Media (Ton)	6.595	7.677	8.741	10.166

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 2, se presenta un incremento en la resistencia ante esfuerzo cortante de la sección de la viga tipo T al variar el ángulo de colocasión del estribo. Este aumento es del 16.42% al pasar de 90.00° a 75.00°, del 13.86% de 75.00° a 60.00°, y del 16.30% de 60.00° a 45.00°.

Se identificaron cambios en la capacidad resistente de la sección transversal de la viga al reducir el ángulo de colocación del estribo de 90.00° a 45.00°, con un incremento total del 64.87%. De esto se deduce que al disminuir el ángulo de colocación del estribo incrementa su resistencia al esfuerzo cortante en vigas tipo T de hormigón armado. Estos resultados respaldan lo expuesto en la teoría de (Harmsen, 2017), el cual deduce que los estribos colocados en función del ángulo de falla son más eficientes.

A partir de las características mecánicas de los materiales y de la geometría de la sección, se emplearon las fórmulas previamente establecidas para calcular la resistencia teórica. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.

Fuerza cortante teórica resistida por la sección de la viga tipo T, en toneladas

Ángulo de colocación		**90°**	**75°**	**60°**	**45°**
Fuerza cortante resistente del hormigón Vc		1.874	1.874	1.874	1.874
Fuerza cortante resistente del acero	**Vs Teórico**	4.740	5.805	6.475	6.703
	Vs Laboratorio	4.721	5.803	6.867	8.292
	Vn Teórico	6.614	7.679	8.349	8.577

Fuerza cortante ultima	**Vn Laboratorio**	6.595	7.677	8.741	10.166

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó un análisis comparativo entre la resistencia última teórica y la obtenida en laboratorio, cuyos resultados se presentan en la Tabla 3. Los datos obtenidos en laboratorio evidencian un incremento en la capacidad del acero para resistir esfuerzos cortantes en la sección de las vigas tipo T, conforme disminuye el ángulo de colocación de los estribos.

Al modificar el ángulo desde 90.00° a 75.00°, la contribución del refuerzo transversal al cortante "Vs" se incrementó en un 22.93%. Una reducción posterior de 75.00° a 60.00° generó un aumento adicional del 18.33%, mientras que al variar de 60.00° a 45.00°, el crecimiento fue del 20.75%. En conjunto, la disminución del ángulo de colocación del estribo de 90.00° a 45.00° produjo un aumento acumulado del 75.65% en la resistencia a la fuerza cortante aportada por el acero.

Se analiza el aporte teórico del acero al resistir esfuerzos cortantes en la sección transversal de una viga de hormigón armado, observándose un incremento en dicha resistencia al reducir el ángulo de colocación de los estribos. Al modificar este ángulo de 90.00° a 75.00°, la contribución del refuerzo transversal (Vs) se incrementa en un 22.47%. Posteriormente, al disminuirlo de 75.00° a 60.00°, el aumento registrado es del 11.54%, y de 60.00° a 45.00°, el incremento adicional es del 0.35%. En conjunto, la reducción del ángulo de 90.00° a 45.00° genera un aumento total del 41.42% en la resistencia a la fuerza cortante proporcionada por el acero.

La Tabla 4 y la Figura 8 permiten evidenciar una discrepancia entre la resistencia al corte teórico proporcionado por el acero y la obtenida experimentalmente en laboratorio. Esta diferencia resulta más significativa cuando el ángulo de colocación del estribo es de 45.00°, alcanzando un 23.70%, mientras que se reduce en aproximadamente un 6% al emplear un ángulo de 75.00°. Para los ángulos de 60.00° y 90.00°, la diferencia se vuelve prácticamente

nula.

Estos resultados permiten inferir que el modelo teórico tiende a subestimar la capacidad real de corte registrada en laboratorio. Esta discrepancia podría estar relacionada con lo señalado por (Harmsen, 2017), quien indica que el refuerzo transversal en elementos de hormigón armado no sólo contribuye a la resistencia al corte, sino que también genera un efecto de confinamiento sobre el concreto. En consecuencia, los resultados experimentales sugieren que este confinamiento adicional puede mejorar tanto la resistencia del hormigón como la ductilidad de la sección estructural.

Tabla 4.

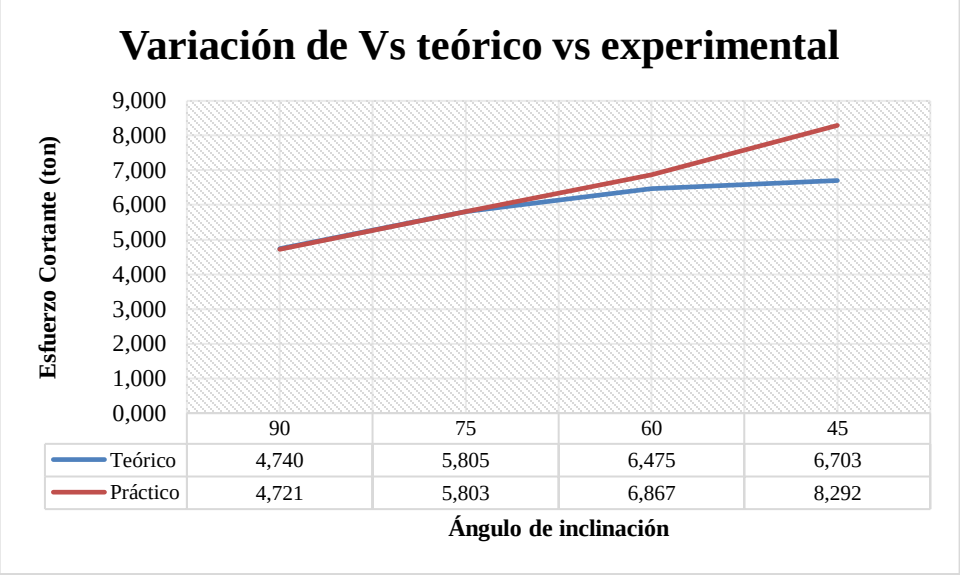
Distribución de la capacidad resistente al cortante en la sección de una viga tipo T, en toneladas.

Ángulo de colocación		**90°**	**75°**	**60°**	**45°**
HORMIGÓN	Vc	4.485	4.485	4.485	4.485
ACERO	Vs Teórico	4.865	5.958	6.645	6.880
	Vs Laboratorio	4.855	6.150	7.271	9.509

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8.

Variación de la contribución del acero “Vs” a la resistencia al corte, en función del ángulo de colocación del estribo: comparación entre valores teóricos y experimentales, expresada en toneladas.



Fuente: Elaboración propia.

Discusión

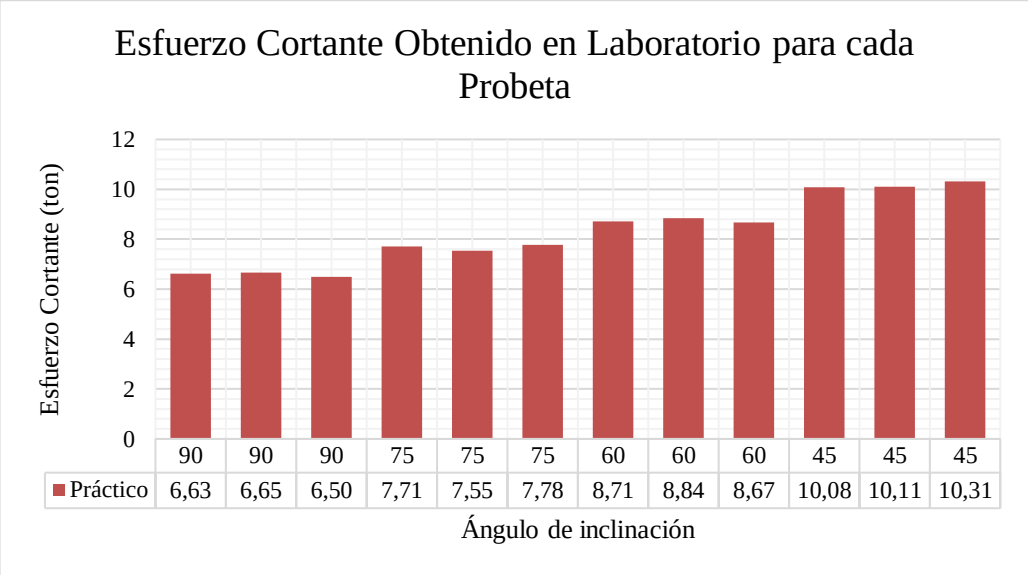
Este estudio se centró en la caracterización de la resistencia ante el esfuerzo cortante mediante la variación del ángulo de colocación de los estribos en 90.00°, 75.00°, 60.00° y 45.00° en vigas tipo T. La analogía utilizada establece que el esfuerzo cortante es principalmente absorbido por el refuerzo transversal, lo que permite suponer que la resistencia al corte proporcionada por el hormigón, Vc corresponde al corte que provoca fisuración inclinada. Por lo tanto, la armadura debe diseñarse para soportar únicamente el esfuerzo cortante excedente. Es decir, cuando el esfuerzo cortante supera el valor soportado por el hormigón, se lo denomina esfuerzo cortante adicional, el cual será absorbido por el refuerzo transversal, cuyo comportamiento depende del área de la varilla, el límite de fluencia, el peralte efectivo del elemento y la separación entre los refuerzos.

La falla por corte se caracteriza por la aparición de fisuras inclinadas, generadas por tensiones principales de tracción. Se ha establecido una relación entre la formación de estas grietas y la colocación del refuerzo para corte. Según la hipótesis, este factor se expresa como la suma del seno y el coseno del ángulo de colocación, alcanzando su valor máximo cuando el ángulo de

colocación del estribo es de 45.00°. Los resultados obtenidos en laboratorio para las vigas tipo T, al variar el ángulo de colocación de los estribos, se presentan a continuación en la Figura 9.

Figura 9.

Esfuerzo cortante máximo soportado por las probetas.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos indican que las cargas de rotura para las vigas tipo T varían según el ángulo de colocación de los estribos. Para estribos dispuestos a 90.00°, las cargas alcanzadas fueron de 6.63, 6.65 y 6.50 toneladas; a 75.00°, los valores registrados fueron 7.71, 7.55 y 7.78 toneladas; con un ángulo de 60.00°, se obtuvieron 8.71, 8.84 y 8.67 toneladas; y finalmente, con estribos colocados a 45.00°, las cargas fueron de 10.08, 10.11 y 10.31 toneladas.

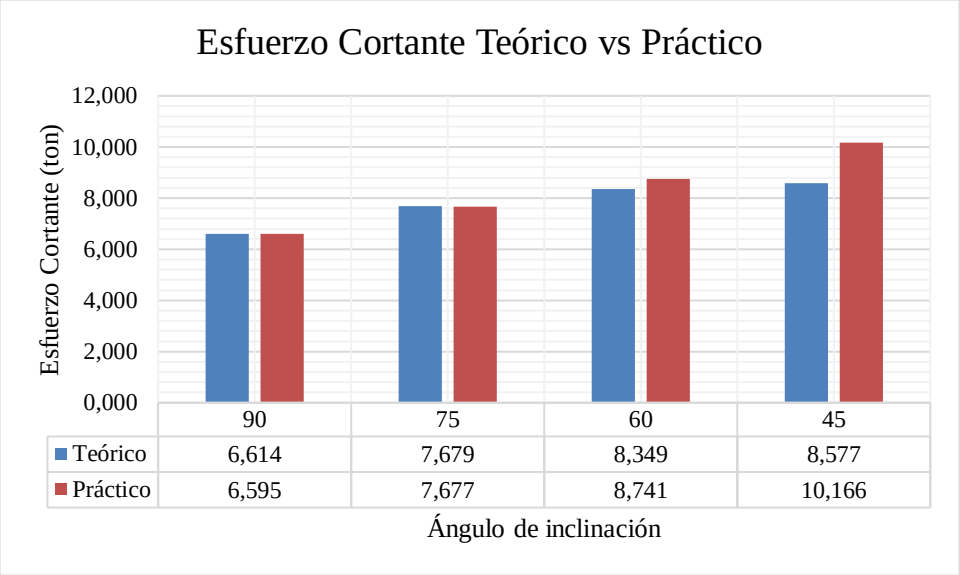
Estos resultados permiten evidenciar que a medida que se reduce el ángulo de inclinación de los estribos con respecto al eje longitudinal de la viga, la capacidad del sistema estructural para resistir esfuerzos cortantes incrementa, siendo más significativa cuando los estribos se instalan con una inclinación de 45.00°, donde se registran las mayores cargas de rotura.

Durante el análisis de resultados, se observa claramente una correlación entre los valores obtenidos de manera teórica y los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio. En el

enfoque teórico, se destaca un incremento constante de la resistencia al esfuerzo cortante en cada intervalo de variación del ángulo de colocación del estribo. Sin embargo, es interesante notar que, a pesar de este patrón, los resultados correspondientes a los ángulos de colocación de 60.00° y 45.00° presentan valores muy similares, lo que sugiere que la influencia del ángulo en esta gama de inclinaciones podría ser menos pronunciada de lo anticipado. Por otro lado, en el caso práctico, se evidencia un comportamiento diferente, ya que los resultados experimentales muestran un incremento notablemente mayor en este mismo rango de ángulos (60.00° y 45.00°), lo que indica que otros factores, posiblemente no considerados en el modelo teórico, podrían estar influyendo en la respuesta estructural de las vigas.

Figura 10.

Comparación del esfuerzo cortante teórico con el práctico obtenido en laboratorio.



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El ángulo de colocación de los estribos influye significativamente en la capacidad de las vigas tipo T para resistir esfuerzos cortantes. La disminución progresiva de dicho ángulo, desde 90.00° hasta 45.00°, permitió aumentar la resistencia total en 3.57 toneladas, lo que representa una mejora del 54.16% en el comportamiento estructural, según los resultados experimentales.

Los ensayos de laboratorio evidenciaron un comportamiento creciente en la resistencia al corte de las vigas analizadas, en función del ángulo de inclinación de los estribos. Las cargas de rotura registradas fueron de 6.60, 7.67, 8.74 y 10.17 toneladas para ángulos de 90.00°, 75.00°, 60.00° y 45.00°, respectivamente.

El análisis teórico también refleja una tendencia positiva al reducir el ángulo de colocación del refuerzo transversal. Se obtuvo un incremento acumulado del 27.56% en la resistencia al cortante al comparar los valores teóricos para cada configuración angular, aunque esta mejora fue inferior a la registrada experimentalmente.

La contribución individual del acero a la resistencia al corte fue mayor cuando los estribos se colocaron con menor inclinación. En los cálculos teóricos, los valores de resistencia fueron de 4.74, 5.81, 6.48 y 6.70 toneladas, demostrando que el efecto del ángulo incide directamente en el rendimiento del refuerzo transversal.

La diferencia entre los valores teóricos y experimentales sugiere que el comportamiento real de los estribos no solo depende de su capacidad resistente directa, sino también del efecto de confinamiento que ejercen sobre el hormigón. Este fenómeno podría explicar por qué los ensayos de laboratorio reportan incrementos del 16.42%, 13.86% y 16.30% en la resistencia al cortante al reducir progresivamente el ángulo de colocación de los estribos.

Referencias bibliográficas

A.M. Hernández-Díaz, J. C.-R. (Junio de 2017). Adjustment of shear models for structural

concrete using genetic algorithms. Obtenido de scipedia:
https://www.scipedia.com/public/Hernandez-Diaz_et_al_2015a

ACI318S-14. (2014). American Concrete Institute. American Concrete Institute. Obtenido de International Concrete Abstrac Portal.

Alcocer, S. (2015). Los sismos y su efecto en las estructuras. Protocolo .

Al-Nasra, M. (2013). Shear Reinforcements in the Reinforced Concrete Beams. American Journal of Engineering Research, 190-200.

ASTMC143/C143M-15a. (2012). Método de Ensayo Normalizado para Asentamiento de Concreto de Cemento Hidráulico. ASTM INTERNATIONAL.

ASTMC192/C192M-16a. (2008). Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayo en Laboratorio. ASTM International.

Harmsen, T. (2017). Diseño de estructuras de concreto armado (5a ed.). En T. Harmsen, Diseño de estructuras de concreto armado (5a ed.) (pág. 967). Lima: Perú.

McCormac. (2016). Estructuras de Acero. Mexico: Alfaomega.

Moya, J. (2015). Estudio sobre diseño sísmico en construcciones de adobe y su incidencia en la reducción de desastres. Quito: Universidad Central del Ecuador.

NEC-SE-HM. (2015). NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN. Quito: CAMICON.

Pimienta, R. (2000). Encuestas probabilísticas vs no probabilísticas. Distrito Federal de México: Política y Cultura.

UNE. (20 de 06 de 2012). Obtenido de UNE Normalización Española:
https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0049559

Vivienda. (2009). Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú - Norma Técnica E060 Concreto Armado. Lima: gob.pe.

Zalaya, V. (2017). Desastres, Estudio sobre Diseño Sísmico en Construcciones de Adobe y su Incidencia en la Reducción de. Lima: Universidad Nacional Fererico Villarreal.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.