

Variación de la Resistencia a Fuerza Cortante de Vigas de Concreto Armado al reducir el Ángulo de Inclinación de los Estribos

Variation of the resistance a cutting strength of reinforced concrete beams by reducing the angle of inclination of the buttresses

Juan Enrique Herrera Muñoz¹; Miguel Ángel Mosqueira Moreno^{2,*}

¹ Universidad Nacional de Cajamarca, Av. Atahualpa N° 1050, Ciudad Universitaria, Cajamarca, Perú.

² Universidad Nacional de Cajamarca, Av. Atahualpa N° 1050, Ciudad Universitaria, Cajamarca, Perú.

* Autor correspondiente: mosqueira_ma@hotmail.com (M. Mosqueira)

RESUMEN

Esta investigación tuvo como principal objetivo determinar la influencia de la reducción del ángulo de inclinación de los estribos en la resistencia al esfuerzo cortante de vigas de concreto armado. Para el desarrollo de la investigación, se ha construido 12 pórticos a escala de concreto armado, con el fin de estudiar la resistencia a fuerza cortante en la viga, en la condición de apoyos empotrados, el ángulo de inclinación de los estribos en las vigas fue reduciéndose en 15° a partir de 90°, el más usado en obras de ingeniería, se analizó la ubicación de aplicación de la carga para generar la falla por corte y así cuantificar las deformaciones. Posteriormente se determinó la resistencia al esfuerzo cortante de vigas con los estribos colocados con un ángulo de inclinación de 90°, 75°, 60° y 45°, obteniendo resistencias promedio a fuerza cortante de 7,47; 8,81; 9,66 y 9,95 toneladas respectivamente. Si se considera únicamente la resistencia a fuerza cortante del acero la resistencia varía de 6,00; 7,35; 8,19 y 8,45, respectivamente. Finalmente se concluyó que la reducción del ángulo de inclinación de los estribos incrementa la resistencia a fuerza cortante de vigas de concreto armado entre 5% a 17%.

Palabras clave: viga; estribos; esfuerzo cortante; ángulo de inclinación.

ABSTRACT

This research has as main object to determine the influence of the reduction of the angle of inclination of the buttress on the resistance to the shear stress of reinforced concrete beams. For the development of this research, 12 reinforced concrete arcade scale have been built, in order to study the resistance to shear force in the beam, in the condition of built - in supports, the angle of inclination of the buttresses in the beams has been reducing in 15° from 90°; the most used in engineering works, the location of application of the load was analyzed to generate the failure by cutting and thus quantify the deformations. Afterwards, the shear strength of beams was determined with the stirrups placed at an angle of inclination of 90°, 75°, 60° and 45°, obtaining average resistance to shear force of 7.47; 8.81; 9.66 y 9.95 tons respectively. If only the shear strength of the steel is considered, the resistance varies from 6.00; 7.35; 8.19 and 8.45, respectively. Finally, it was concluded that the reduction of the angle of inclination of the buttresses increases the resistance to shear force of reinforced concrete beams between 5% to 17%.

Keywords: beam; buttresses; shear strength; inclination angle.

1. INTRODUCCIÓN

El territorio del Perú es un escenario de múltiples peligros debido a su compleja conformación geológica y geodinámica muy activa. Los fenómenos que adquieren la categoría de peligros que ocasionan los desastres de mayor envergadura en el país son: los terremotos, las inundaciones, los huaycos, etc. Los terremotos son el peligro mayor en nuestro país. La actividad sísmica tiene un amplio desarrollo cuyo origen está relacionado con las condiciones tectónicas regionales y locales, y las condiciones locales de los suelos que determinan la aceleración y la severidad de sacudimiento, que a su vez van a tener notable influencia sobre las estructuras. Los daños en una estructura a causa de un sismo son variables y dependen del tipo de material y de estructura, sin embargo, los daños que más preocupan a los especialistas son los conocidos como cortante, que se caracterizan por grietas inclinadas en columnas y vigas y que pueden conducir al colapso de las estructuras, por ello en las normas de construcción se busca que fallas de esta naturaleza no ocurran. (Zelaya V, 2007).

En los últimos años se han intensificado las investigaciones para conseguir elementos estructurales que presenten un comportamiento dúctil ante un evento sísmico, las vigas tienen un papel fundamental en el comportamiento de la estructura al momento del sismo, la falla por corte es frágil y debe ser evitada siempre ya que ocurre sin previo aviso. El objetivo del proyectista de estructuras de concreto reforzado hoy en día es producir miembros dúctiles que den avisos a fallas incipientes. (McCormac J, 2013).

Las vigas de concreto sin refuerzo transversal tienen múltiples mecanismos de falla y dependen fundamentalmente de la esbeltez del elemento. Se define esbeltez como la relación entre la luz de cortante y el peralte de la sección. Las fallas que se presentan pueden ser por: tensión diagonal, compresión por cortante y por adherencia (Harmsen T, 2017).

Si la viga cuenta con refuerzo en el alma, la fuerza de corte será resistida por las componentes, concreto y acero. Antes de producirse la fisuración de la sección, el cortante externo es absorbido íntegramente por el concreto, cortante resistente del concreto (V_c), cuando ésta se produce el agrietamiento, el refuerzo en el alma comienza a trabajar, aportando la fuerza cortante resistente del acero (V_s). (Harmsen T, 2017). En un miembro con refuerzo para cortante, que una parte de la resistencia a cortante la proporciona el concreto y el resto el refuerzo para cortante $V_n = V_c + V_s$ (ACI 318S-14).

El refuerzo transversal en elementos de concreto armado no sólo incrementa la resistencia al corte de la viga, sino que provee confinamiento al concreto. El refuerzo transversal, estribos, restringe el crecimiento del agrietamiento inclinado, controlando la disminución del área del concreto sometido a compresión y por ende el incremento de los esfuerzos en ella. Esto le brinda una mayor capacidad de carga al elemento. (Harmsen T, 2017). Sin embargo, este aporte del acero cambia según el ángulo que forma los estribos con el eje longitudinal de la viga.

Es común en nuestro medio observar proyectos de ingeniería de concreto armado en los cuales en las vigas se coloque los estribos perpendiculares al eje longitudinal del elemento, pero existe además la posibilidad de utilizar como refuerzo de cortante, estribos que formen diferentes ángulos, siendo teóricamente más eficiente.

A pesar de que las normativas mundiales como las que propone el American Concrete Institute (de aquí en adelante ACI) en su última publicación ACI 318S -14 y las normativas peruanas Norma Técnica E060 (de aquí en adelante NTE 060) del año 2009. Nos indican fórmulas que permiten calcular teóricamente el aporte a la resistencia al corte del acero de refuerzo en función del ángulo entre los estribos inclinados y el eje longitudinal del miembro. Sin embargo, estas fórmulas no podrían considerar el aporte real del acero de refuerzo transversal.

Es por ello que esta investigación busca determinar la resistencia a fuerza cortante de vigas reforzadas al variar el ángulo de inclinación del estribo con el eje longitudinal de la viga, planteándonos la siguiente pregunta. ¿En cuánto aumentará la resistencia al esfuerzo cortante de las vigas de concreto armado al reducir el ángulo de inclinación de los estribos?

La Hipótesis que se planteó como posible solución al problema fue: “La reducción del ángulo de inclinación de los estribos aumenta en más de un 5% la resistencia al esfuerzo cortante en vigas de concreto armado”. El principal objetivo planteado para el desarrollo de la investigación fue determinar la variación de la resistencia al esfuerzo cortante de vigas de concreto armado al reducir el ángulo de inclinación de los estribos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 OBJETO DE ESTUDIO

La población de estudio estuvo constituida por todas las vigas con apoyos empotrados cuyo ángulo entre los estribos y su eje longitudinal varían entre 90° y 45° . La selección de la muestra se realizó empleando un muestreo no probabilístico de tipo intencional y está constituida por 12 vigas de concreto armado, que son parte de un pórtico para simular el efecto del empotramiento, cuyos ángulos entre los estribos y su eje longitudinal fueron de 90° , 75° , 60° , 45° . Por cada experimento se realizó tres repeticiones.

Las dimensiones de vigas, columnas y zapatas se determinó usando los criterios de las NTE 020, NTE.030 y NTE.060 (indicados en la Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú), y criterios del American Concrete Institute ACI 318S -14. Todo con el fin de simular el efecto del empotramiento en las vigas, evitar efectos de rotación en los nudos y garantizando el anclaje en la base del pórtico.

Los pórticos fueron construidos con un concreto de resistencia a compresión característica de $f'c=210 \text{ Kg/cm}^2$, se usó esta resistencia, puesto que, es la mínima permitida por el Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú NTE 060, en la construcción de obras de concreto armado en zonas sísmicas. Para el acero de refuerzo longitudinal y transversal se utilizó acero corrugado que cumple con las normas ASTM A 615 Grado 60, los diámetros usados fueron de $\frac{1}{2}$ ", 12 mm, 8 mm para acero longitudinal y $\frac{3}{8}$ " y 6 mm para acero transversal. Además, las vigas tuvieron una sección transversal 15 cm x 20 cm y las columnas una sección de 25 cm x 25 cm. Las secciones de los pórticos evaluados y la cantidad de acero que contienen se observan en las siguientes figuras.

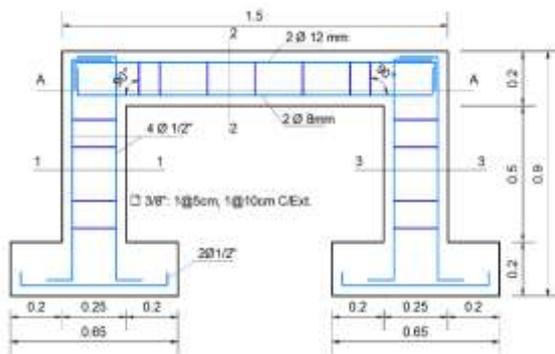


Figura 1. Pórtico con viga de estribos a 90°

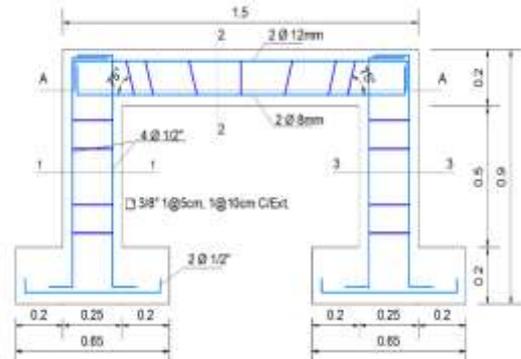


Figura 2. Pórtico con viga de estribos a 75°

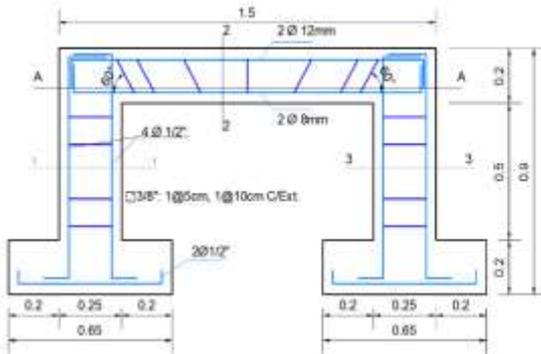


Figura 3. Pórtico con viga de estribos a 60°

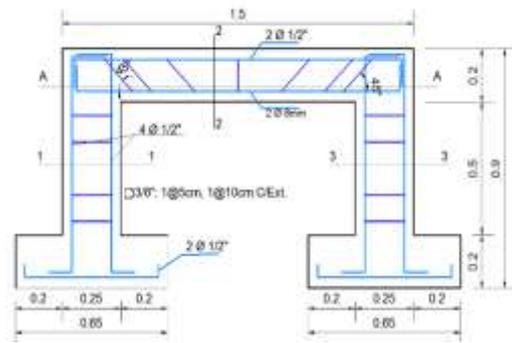


Figura 4. Pórtico con viga de estribos a 45°

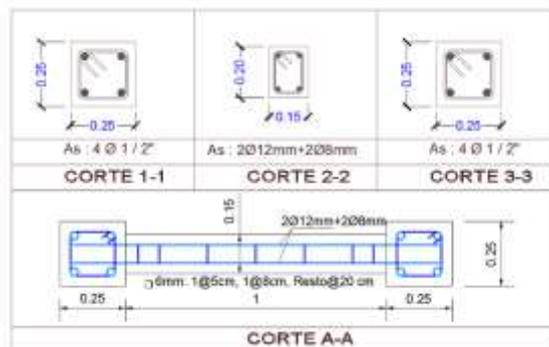


Figura 5. Esquemas con detalles del pórtico.

Es importante indicar que la elección del experimento en un pórtico, fue con el fin de reproducir el efecto de corte puro, despreciando los efectos de flexión y otros que puedan generarse. Este modelo es diferente a los

propuestos en otras investigaciones como los de: Hui Chen et al. (2018) en su artículo titulado “Cracking strut-and - tie model for shear strength evaluation of reinforced concrete deep beams” y Rajai Z. et al (2018) en su artículo titulado “Shear Repairing and Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using SIFCON”, entre otros; quienes realizan su ensayo en vigas simplemente apoyadas, con aplicaciones de dos cargas puntuales ubicadas a 1/3 y 2/3 del extremo de la viga, en las cuales adicional al efecto de fuerza cortante se genera el efecto de flexión.

2.2 Métodos y técnicas

Esta investigación es de tipo experimental, correlacional. En la cual se planteó variar el ángulo de inclinación entre los estribos y el eje longitudinal de la viga, para determinar su efecto en la resistencia mecánica a fuerza cortante de la viga. Para ello se planteó realizar tres repeticiones de cada experimento, tomando como base el ángulo de 90° para luego disminuir progresivamente en 15°, obteniendo vigas con estribos con un ángulo de inclinación de: 75°, 60°, 45.

Para garantizar que los modelos ensayados cumplan con iguales características de materiales y el ensayo sea controlado evitando cualquier alteración del resultado se realizó los siguientes procedimientos:

2.2.1 Propiedades de los agregados.

Se evaluó las propiedades físicas y mecánicas de los agregados, usados en la fabricación del concreto que sirvió para la construcción de los pórticos, este estudio se realizó en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca. Las propiedades determinadas fueron: Gravedad Específica en Estado Seco al Horno, Gravedad Específica en Estado Saturado, Superficialmente Seco, Gravedad Específica Aparente, Absorción, Masa por unidad de volumen seco suelto, Masa por unidad de volumen seco compactado, Porcentaje de vacíos en estado seco suelto, Porcentaje de vacíos en estado seco compactado, Tamaño máximo nominal, Abrasión. Estos ensayos fueron realizados usando las normativas ASTM.

2.2.2 Diseño de Mezclas.

El concreto se ha diseñado y dosificado de forma que se obtenga una resistencia característica $f'_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$, para ello se ha usado el método de diseño por combinación de agregados.

2.2.3 Dimensionamiento de vigas, columnas y zapatas.

Las secciones de los elementos que comprenden los pórticos, se dimensionaron bajo los criterios de la norma NTE.020 Cargas, NTE.030 Diseño Sismorresistente y NTE.060 Concreto Armado, y los criterios establecidos en el ACI 318S-14.

Para dimensionar las vigas se ha tenido en cuenta los recubrimientos y distancias mínimas que deben tener entre los aceros, establecidas en las normativas peruanas. Se consideró lo establecido en el ACI 318S - 14, para una viga de sección rectangular simplemente reforzada, se tiene que:

$$M_n = b d^2 \omega f'_c (1 - 0.59\omega) \quad (1)$$

$$\omega = \frac{\rho f_y}{f'_c} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad (3)$$

Donde:

M_n = Momento nominal resistente.

b = ancho de la sección del concreto.

d = peralte efectivo de la sección.

f'_c = Esfuerzo resistente a compresión del concreto.

ω = Índice de refuerzo.

ρ = Cuantía del acero.

f_y = Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo.

A_s = Área de refuerzo en tensión de la sección.

Teniendo en cuenta las formulas anteriores, se ha determinado la sección de la viga de 15 cm de base por 20 cm de peralte.

Para las dimensiones de las columnas se consideró lo establecido por la NT E.060, teniendo en cuenta que el acero longitudinal de la viga, debe tener una longitud de desarrollo con el fin de asegurar la condición de empotramiento.

$$l_d = \left(\frac{f_y \psi_t \psi_e \psi_s \lambda}{2.6 \sqrt{f'_c}} \right) d_b \tag{4}$$

Donde:

l_d = Longitud de desarrollo.

f_y = Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo.

f'_c = Esfuerzo resistente a compresión del concreto.

$\lambda, \psi_t, \psi_e, \psi_s$ = Factores de modificación de longitud de desarrollo, indicados en Tabla 1.

d_b = diámetro de la barra de acero.

Tabla 1. Factores de modificación de las longitudes de desarrollo

Factor	Condición	Valor
ψ_t	Barras superiores	1,3
	Otras Barras	1,0
ψ_e	Barras o alambres con tratamiento superficial epóxico y recubrimiento menor que 3db o espaciamiento libre menor que 6 db.	1,5
	Otras barras o alambres con tratamiento superficial epóxico.	1,2
	Barras sin tratamiento superficial	1,0
ψ_s	Barras de 3/4" y menores	0,8
	Barras mayores de 3/4"	1,0
λ	Concreto liviano.	1,3
	Concreto de peso normal.	1,0

Fuente: TABLA 12.2 Reglamento Nacional de Edificaciones, Norma Técnica E.060 Concreto Armado. Vivienda 2009

Además, se consideró lo establecido en la NT E.030 que recomienda que la rigidez de la columna debe ser 1.2 veces la rigidez de la viga. Finalmente se ha determinado que la dimensión apropiada para la columna sería de 25cm de base por 25 cm de peralte.

2.2.4 Acero de Refuerzo Longitudinal.

El acero usado como refuerzo transversal y longitudinal en la estructura cumplen con los requerimientos mínimos establecidos para la norma técnica E.060 y ACI 318S, se ha utilizado acero ASTM A615 grado 60. Para el acero en las vigas se consideró el momento nominal al cual estaría sometida la sección, que se determina teniendo en cuenta la Figura 6.

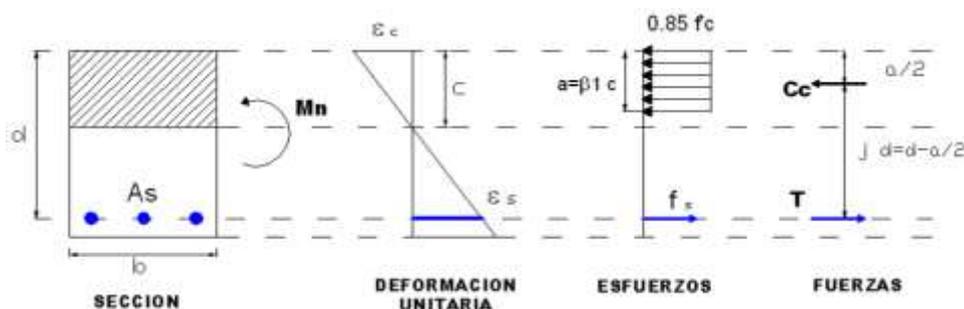


Figura 6. Sección rectangular de concreto simplemente reforzado.

Fuente: Figura 10-27. "Ottazzi G. 2018. Apuntes del Curso de Concreto Armado. 15° Edición. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima Perú

El Momento nominal resistente de esta sección se determina mediante la siguiente expresión. (Ottazzi G.; 2018)

$$M_n = 0.85 f'_c b a \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (5)$$

Donde:

- Mn = Momento nominal resistente.
- f'c = Resistencia a compresión del concreto.
- b = ancho de la sección.
- d = Peralte efectivo.
- a = altura del bloque de compresión.

La altura del bloque de compresión para secciones simplemente reforzadas se determina con la siguiente fórmula. (Ottazzi G.; 2018).

$$a = \frac{A_s f_s}{0.85 f'_c b} \quad (6)$$

Dónde:

- a = altura del bloque de compresión.
- As = Área de acero necesaria.
- fs = Esfuerzo a tracción del acero.
- f'c = Resistencia a compresión del concreto.
- b = Ancho de la sección.

Además, se consideró el acero mínimo para vigas establecido en Norma Técnica E060. (Vivienda 2009)

$$A_{s \min} = \frac{0.22 \sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d \quad (7)$$

Dónde:

- As min = Área de acero mínimo en la sección.
- f'c = Resistencia a compresión del concreto.
- fy = Esfuerzo de fluencia del acero del refuerzo.
- bw = Ancho de la sección.
- d = Peralte efectivo.

Para determinar el acero requerido por las columnas se usó la Norma Técnica E060 en lo establecido para elementos sometidos a flexo compresión, el acero requerido se determinó mediante los diagramas de iteración indicados en la ACI 318S-2014. Sin embargo, para entender el comportamiento de las columnas se muestra la figura 7.



Figura 7. Sección rectangular de concreto armado sometida a flexo compresión.

Fuente: Adaptado de Figura 16-31. “Ottazzi G. 2018. Apuntes del Curso de Concreto Armado. 15° Edición. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima Perú

La Norma Técnica E060 establece que para las columnas: “La cuantía de refuerzo longitudinal no será menor que 1% ni mayor que 6% del área total de la sección transversal. Cuando la cuantía exceda de 4%, los planos deberán incluir detalles constructivos de la armadura en la unión viga - columna”. (Vivienda 2009).

La Norma Técnica E060 establece que para las zapatas el acero mínimo es de 0,0018 si se utiliza barras corrugadas o la de alambre (liso o corrugado) de intersecciones soldadas, con fy de 420 MPa. (Vivienda 2009).

2.2.5 Acero de Refuerzo Longitudinal.

La resistencia nominal a cortante “ V_n ” en una sección cualquiera, será la suma de las resistencias aportadas por el concreto y por el refuerzo según la Norma Técnica E 060. (Vivienda 2009).

$$V_n = V_c + V_s \quad (8)$$

Donde

V_n = Resistencia nominal a cortante.

V_c = Resistencia nominal al cortante proporcionada por el concreto.

V_s = Resistencia nominal al cortante proporcionada por el refuerzo de cortante.

La Norma Técnica E 060 sugiere la siguiente expresión simplificada para la determinación de V_c en elementos sometidos únicamente a cortante y flexión (Vivienda 2009).

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (9)$$

Dónde:

V_c = Resistencia nominal al cortante proporcionada por el concreto.

f'_c = Resistencia a compresión del concreto.

b_w = Ancho de la sección.

d = Peralte efectivo.

El refuerzo transversal por cortante será necesario donde la fuerza cortante actuante “ V_u ” exceda al cortante nominal resistente “ V_c ”, para ello se determinará $V_s = V_n - V_c$. Luego la fuerza cortante resistida por los estribos para cualquier ángulo con el eje longitudinal será (Vivienda 2009):

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (10)$$

Dónde:

V_s = Resistencia nominal al cortante proporcionada por el refuerzo de cortante.

A_v = Área de refuerzo de cortante.

f_{yt} = Esfuerzo de fluencia del acero del refuerzo transversal.

d = Peralte efectivo.

s = Espaciamiento de refuerzo transversal.

2.2.6 Construcción de los pórticos

Para la construcción de los pórticos de concreto armado, dimensionados y diseñados estructuralmente, se usaron moldes de triplay de 12 mm con un diseño de fácil encofrado y desencofrado; tanto la base como los lados laterales han sido rigidizados mediante listones longitudinales y alambre N° 16 para evitar alabeos del triplay durante el vaciado del concreto.

Para garantizar la calidad y uniformidad del concreto usado en la fabricación de los pórticos, durante el vaciado del concreto, se extrajeron 03 probetas cilíndricas de 15 x 30 cm, en primer lugar para la determinar de consistencia del concreto, mediante el asentamiento en el Cono de Abrams, siguiendo el método descrito en la norma ASTM C 143 “Método de Ensayo Normalizado para Asentamiento de Concreto de Cemento Hidráulico”; y en segundo lugar para el control de resistencia del concreto, indicado en la norma ASTM C 39 “Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto”. La elaboración y curado de probetas cilíndricas se realizó como lo indica la norma ASTM C31 “Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayo en Laboratorio”. Posteriormente las probetas se ensayaron a los 28 días para determinar la resistencia a compresión del concreto.

Para conseguir que el concreto logre su resistencia de diseño se realizó el curado del concreto en ambientes adecuados para lograr la hidratación del concreto, por lo que los pórticos fueron curados con agua y a una temperatura entre 20 °C y 26 °C, según ASTM C 192 “Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayo en Laboratorio”.

A los 28 días de curado del concreto, cuando este alcanza su resistencia de diseño, se procedió a realizar los ensayos de los pórticos de concreto armado en la máquina de ensayo universal de 100 toneladas.



Figura 8. Pórticos ensayados en la máquina universal de 100 toneladas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los ensayos experimentales realizados en la máquina universal del laboratorio de ensayos de materiales de la Universidad Nacional de Cajamarca se determinaron las cargas últimas resistentes de los pórticos, para los diferentes ángulos de los estribos, los cuales se muestran en la Tabla 2 y en las figura 9.

Tabla 2. Carga última resistente del pórtico, en toneladas.

Ángulo	45°	60°	75°	90°
Primera ensayo	44,5	43,5	41	35,5
Segundo ensayo	45,5	43	41	36,0
Tercer ensayo	45,5	44	42,5	37,5
Promedio	45,2	43,5	41,5	36,3



Figura 9. Pórticos con estribos en diferentes ángulos de inclinación

Con los datos anteriores se determinó la resistencia última de la sección rectangular de la viga a la distancia “d = 15 cm” del apoyo, los resultados se muestran en la Tabla 3.

Como se puede apreciar en la Tabla 3, existe un aumento en la resistente a fuerza cortante, de la sección de la viga, para la variación del ángulo de inclinación del estribo de: 90° a 75° incrementando en 14%, de 75° a 60°

incremento en 5%, de 60° a 45° incremento en 4%. Existe una variación de la resistencia de la sección de la viga, al disminuir el ángulo de inclinación del estribo de 90° a 45°, aumenta en 24% la resistencia a fuerza cortante de la viga. Por lo que se puede concluir que la disminución del ángulo de inclinación del estribo, permite aumentar la resistencia al esfuerzo cortante en vigas de concreto armado, demostrándose en laboratorio lo que menciona Harmsen (2017) en su libro, que los estribos inclinados a 45° o más respecto al acero longitudinal son los más eficientes teóricamente. En varias investigaciones (Zamri et al., 2016; Saravanakumar et al., 2016; Suhaimi, 2015; Al-Nasra et al., 2013; Wang et al., 2005 y Abdul, 2005) concluyeron que los estribos inclinados mejoran la capacidad de resistencia al corte en vigas de concreto armado.

Tabla 3. Fuerza cortante resistente de la sección de la viga determinados en laboratorio, en toneladas.

Ángulo	45°	60°	75°	90°
Primera ensayo	9,8	9,5	9,0	7,8
Segundo ensayo	10,0	9,4	9,0	7,9
Tercer ensayo	10,0	9,7	9,3	8,2
Promedio	9,91	9,54	9,10	7,97

Con las propiedades de la sección y las propiedades mecánicas de los materiales se utilizó las ecuaciones 8, 9 y 10 para determinar la resistencia teórica de la sección, los resultados se muestran en la tabla 4.

Se observa en la Tabla 4 la resistencia a esfuerzo cortante teórico de la sección de la viga, en la cual los estribos soportan una resistencia cortante entre el 80% al 85% del total de la resistencia nominal de la sección de concreto armado. Siendo mayor la resistencia para el caso del estribo con un ángulo de inclinación de 45°.

Tabla 4. Fuerza cortante teórico resistente de la sección de la viga, en toneladas

Fuerza cortante	45°	60°	75°	90°
Fuerza cortante resistente del concreto $V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b_w d$	1,73	1,73	1,73	1,73
Fuerza cortante resistente del acero $V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} (\sin \alpha + \cos \alpha)$	9,98	9,64	8,64	7,06
Fuerza cortante nominal $V_n = V_c + V_s$	11,71	11,37	10,37	8,78
Fuerza cortante última resistente ϕV_n	9,95	9,66	8,81	7,47

Luego se evaluó y comparó la resistencia última teórica y la obtenida en laboratorio los resultados se muestran en la Tabla 5.

Como se puede apreciar en la Tabla 5, para los resultados obtenidos en el laboratorio, existe un aumento en la resistencia a fuerza cortante del acero de la sección de la viga al disminuir el ángulo de inclinación del estribo; pues al variar el ángulo de inclinación del estribo de: 90° a 75° la resistencia a fuerza cortante del estribo de la viga (V_s) incrementa en 17%, al variar de 75° a 60° incrementa en 6%, de 60° a 45° el incremento es de 5%. Existiendo un incremento total de la resistencia a fuerza cortante del acero del 30% al variar el ángulo de inclinación del estribo de 90° a 45°.

Se observa también, el aporte teórico de la resistencia a fuerza cortante del acero de la sección de la viga de concreto armado, existiendo un aumento en esta resistencia al disminuir el ángulo de inclinación del estribo, pues al variar el ángulo de inclinación del estribo de: 90° a 75° la resistencia a fuerza cortante del estribo de la viga (V_s) incrementa en 22%, de 75° a 60° incrementa en 12%, de 60° a 45° incrementa en 4%. Existiendo un incremento total de la resistencia a fuerza cortante del acero del 41% al variar el ángulo de inclinación del estribo de 90° a 45°.

En la tabla 5 y la figura 10 se aprecia que existe una diferencia entre el aporte teórico del acero a fuerza cortante y el obtenido en el laboratorio. Siendo esta diferencia mayor para el ángulo de inclinación de 90° que alcanza el 8% y disminuyendo en 4% para el ángulo de inclinación de 75°, llegando a anularse la diferencia para el ángulo de inclinación de 45°. Por lo que se puede concluir que la formula teórica es menor a la resistencia real obtenida en laboratorio, esto probablemente se debe a lo que menciona Harmsen T (2017), que el refuerzo transversal en elementos de concreto armado no sólo incrementa la resistencia al corte de la viga sino que provee confinamiento al concreto. Por lo que con los resultados obtenidos se podría concluir que este efecto

de confinamiento podría aumentar la resistencia del concreto así como la ductilidad de la sección, ver figura 11, aumentando la resistencia teórica a fuerza cortante de la sección de la viga para ángulos de inclinación de los estribos entre 90° a 75°. Zamri et al. (2016) concluye que los estribos inclinados mejoran significativamente la ductilidad de vigas de concreto armado.

Tabla 5. Aportes a la fuerza cortante resistente de la sección de la viga, en Toneladas

Aporte	45°	60°	75°	90°	
Concreto (Vc)	1,47	1,47	1,47	1,47	
Acero	Teórico (Vs)	8,48	8,19	7,35	6,00
	Laboratorio(Vs)	8,44	8,08	7,64	6,50

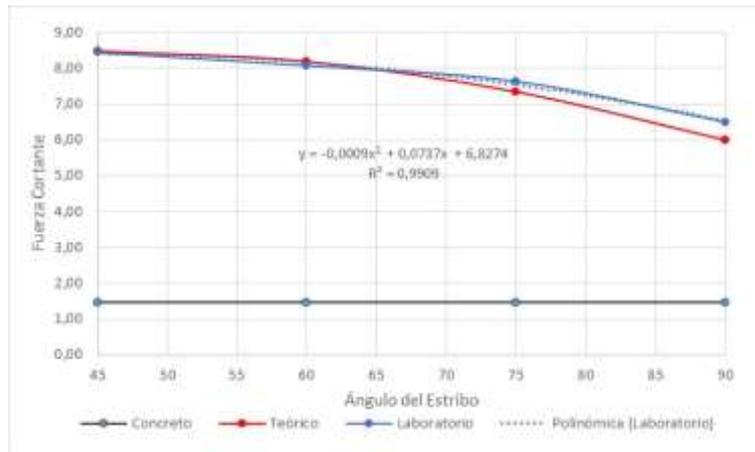


Figura 10. Variación de los aportes a la fuerza cortante resistente en función de la inclinación del estribo, en toneladas

En la figura 11 se observa la deformación última que sufrió la viga del pórtico en milímetros, antes de producirse la falla en el sistema. Así mismo se aprecia que existe mayor capacidad de deformación para la viga con estribos a 45°, si se compara su deformación de 7,26 mm con la que se produce en la viga con estribos a 90° de 3,69 mm, su deformación se incrementa hasta en un 96,9 %. Por lo que la viga con estribos a 45° tendrá mayor capacidad de deformación. Saravanakumar et al. (2016) concluye las vigas con estribos inclinados mostraron una mayor deformación que la viga con estribos verticales, además de mejorar la resistencia al esfuerzo cortante y reducir la deflexión en alrededor del 20%.

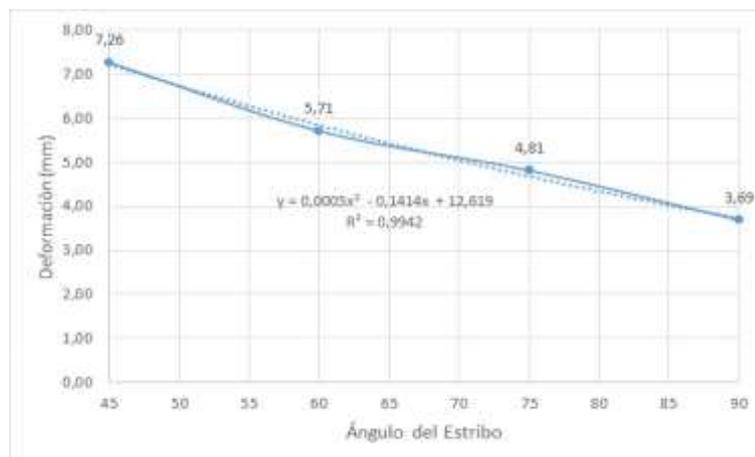


Figura 11. Variación de la deformación máxima de la viga en función de la inclinación del estribo.

4. CONCLUSIONES

La reducción del ángulo de inclinación de los estribos en 15° a partir de 90° incrementa la resistencia a fuerza cortante de vigas de concreto armado en 1,94 toneladas, representando un 24%.

Se determinó la resistencia a fuerza cortante de vigas de concreto armado con los estribos colocados con ángulo de inclinación de 90°, 75°, 60° y 45° obteniendo resistencias de 7,97; 9,10; 9,54 y 9,91 toneladas, respectivamente.

La reducción del ángulo de inclinación de los estribos en 15° a partir de 90°, es decir a ángulo de inclinación de 75°, 60° y 45° incrementa la resistencia a fuerza cortante en 14%, 6% y 4% respectivamente.

Considerando únicamente la resistencia a fuerza cortante de los estribos de las vigas de concreto armado, al variar su ángulo de inclinación de 90°, 75°, 60° y 45° se obtuvo resistencias de 6,50; 7,64; 8,08 y 8,44 toneladas, respectivamente.

La reducción del ángulo de inclinación de los estribos en 15° a partir de 90° es decir a ángulo de inclinación de 75°, 60° y 45° incrementa la resistencia a fuerza cortante en 17%, 6% y 5%, respectivamente.

La reducción del ángulo de inclinación de los estribos de 90° a 45° incrementa la capacidad de deformación en la viga hasta en 96,9%.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Nacional de Cajamarca, Facultad de Ingeniería por permitirnos la utilización del Laboratorio de ensayo de materiales “Carlos Esparza Díaz” para esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdul, N. 2005. The Use of Horizontal and Inclined Bars as Shear Reinforcement. Universiti Teknologi Malaysia. Master of Engineering (Civil-Structure). Pages 127.
- Al-Nasra, M.; Asha, N. 2013. Shear Reinforcements in the Reinforced Concrete Beams. American Journal of Engineering Research (AJER), Volume 2, Issue 10, Pages 191-199.
- ACI 318S. 2014. American Concrete Institute. Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural. 592pp.
- ASTM C143/C143M-15a. Método de Ensayo Normalizado para Asentamiento de Concreto de Cemento Hidráulico”.
- ASTM C192/C192M-16a. Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayo en Laboratorio.
- ASTM C31/C31M-18a. Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayo en Laboratorio.
- ASTM C39/C39M-18. Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto”.
- Harmsen, T. 2017. Diseño de estructuras de concreto armado. 5ta Edición. Editorial. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima Perú. 967 pp
- Hui Chen; Wei-Jian Yi; Hyeon-Jong Hwang. 2018. Cracking strut-and-tie model for shear strength evaluation of reinforced concrete deep beams. Journal of Engineering Structures Volume 163, 15 May 2018, Pages 396-408.
- McCormac, J.; Brown R. 2013. Diseño de Concreto Reforzado. 8va Edición. Editorial Alfaomega México 710pp.
- Ottazzi, G. 2018. Apuntes del Curso de Concreto Armado. 15° Edición. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima Perú. 505 pp.
- Wang, Q.; Guo, Z. 2005. Experimental Investigation on the Shear Capacity of RC Dapped end Beams and Design Recommendations. Journal of Structural engineering and Mechanics, Volume 21, Issue 2, 24 June 2005, Pages 221-235.
- Rajai, Z.; Al – Rousan; Mohammad J.; Shannag. 2018. Shear Repairing and Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using SIFCON. Journal of Structures Volume 14, June 2018, Pages 389–399.
- Saravanakumar, P.; Govindaraj, A. Influence of Vertical and Inclined Shear Reinforcement on Shear Cracking Behavior in Reinforced Concrete Beams. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). Volume 7, Issue 6, November-December 2016, Pages 602-610.
- Suhaimi, A. 2015. Inclined Link as Shear Reinforcement in Reinforced Concrete Beam. Universiti Teknologi Malaysia. Master of Engineering (Civil-Structure). Pages 78.

- Vivienda 2009. Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú - Norma Técnica E060 Concreto Armado. Lima - Perú
- Vivienda 2016. Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú - Norma Técnica E030 DISEÑO SISMORRESISTENTE. Lima- Perú
- Zamri, N.; Mohamed, R. 2016. The Effects of Inclined Shear Reinforcement in Reinforced Concrete Beam. Journal Structure and Materials. Volume 1, 14 November 2016, Pages 138-149.
- Zelaya, V. Estudio sobre el Diseño sísmico en Construcciones de Adobe y su Incidencia en la Reducción de Desastres. Lima 2007. [Fecha de consulta: 04 de abril 2017]. Disponible en: <https://docplayer.es/19356794-Estudio-sobre-diseno-sismico-en-construcciones-de-adobe-y-su-incidencia-en-la-reduccion-de-desastres.html>