



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Comportamiento a esfuerzo  
cortante de vigas de concreto  
reforzadas con fibras de acero**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Samuel Jesua Quiñonez González

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Sergio Manuel Alcocer Martínez de Castro



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

## **Agradecimientos**

*Agradezco a todas las personas que me han acompañado y apoyado a lo largo de este proyecto y durante mi formación académica.*

*A mi mamá, a mi padre y a mi hermana, por su amor incondicional, paciencia y constante apoyo. Gracias por creer en mí y por brindarme la motivación para superar mis metas en la vida. Por haberme formado como persona, mis logros se los debo a ustedes.*

*Al Dr. Sergio Manuel Alcocer Martínez de Castro, cuya guía, conocimientos y dedicación fueron esenciales para el desarrollo de este trabajo. Gracias por su tiempo, por compartir su experiencia y por sus valiosas orientaciones.*

*Al Dr. Héctor Guerrero Bobadilla, por su liderazgo en la dirección de la investigación en el laboratorio y por brindarme la oportunidad de trabajar junto a un equipo excepcional. Su tiempo y valiosas orientaciones fueron fundamentales para avanzar en cada etapa del proyecto.*

*Al Ing. Donaldo Méndez y al Ing. Víctor Hugo Torres Romero, quienes me brindaron su apoyo en momentos cruciales, ayudándome a enfrentar los retos de este trabajo con su experiencia y compromiso.*

*A mis amigos, por estar siempre a mi lado, ofreciéndome palabras de aliento y celebrando cada pequeño avance. Sus risas, apoyo y compañía hicieron que este proceso fuera más llevadero y gratificante.*

## **Dedicatoria**

*Esta tesis la dedico con todo mi amor a mi mamá, mi papá y a mi hermana.*

*A mi mamá, por su amor y apoyo incondicional, por ser mi ejemplo de fortaleza y disciplina, y por creer siempre en mí, incluso en los momentos en que yo dudaba. A mi papá, por su paciencia y su apoyo constante, que han sido el pilar de mi vida. A mi hermana, por ser mi inspiración, mi compañera y amiga incondicional, y por recordarme siempre el valor de la perseverancia y la alegría.*

*Gracias por su amor, confianza y por estar.*

**Contenido**

Contenido .....	7
Antecedentes .....	7
Objetivo.....	8
Justificación.....	9
Alcance .....	9
Organización del Documento.....	10
Nomenclaturas y Abreviaturas .....	11
Glosario.....	11
Agregados.....	12
Cemento .....	12
Concreto .....	12
Ductilidad.....	12
Elementos mecánicos.....	12
Esfuerzo cortante .....	13
Fibras.....	13
Flexión .....	13
Momento flexionante .....	13
Módulo de elasticidad .....	13
Refuerzo .....	13

	2
Vigas .....	14
CAPITULO 1 .....	15
Vigas de Concreto Reforzado Sometidas a Esfuerzo Cortante .....	16
Introducción .....	16
Antecedentes .....	16
Comportamiento de Vigas de Concreto Reforzado Trabajando a Fuerza Cortante .....	18
Tipos de falla en vigas por cortante sin refuerzo .....	21
Mecanismos de Resistencia al Cortante .....	25
Parámetros que Afectan la Capacidad a Cortante .....	29
Diseño a Cortante Según las NTC-CDMX 2023 .....	32
Conclusiones .....	37
CAPITULO 2 .....	38
Vigas de Concreto Reforzado con Fibras de Acero Sometidas a Esfuerzo Cortante .....	39
Antecedentes .....	39
Factores principales de las fibras .....	40
Clasificación de fibras de acero .....	41
Preparación de concreto reforzado con fibras de acero .....	46
Ventajas y desventajas del uso de fibras de acero .....	51
Adherencia de fibras a la mezcla .....	52
Mecanismos de falla .....	53

	3
Pull-out.....	55
Pruebas para Pull-Out .....	57
Comportamiento de Vigas de Concreto Reforzamiento con Fibras de Acero Trabajando a Cortante.....	59
Modelo de Swamy .....	59
Modelo de Sharma .....	63
Conclusiones .....	64
CAPITULO 3 .....	66
Base de Datos.....	67
Descripción de la Base de Datos .....	68
Campos de la base de datos.....	68
Análisis de Base de Datos.....	71
Metodología.....	74
Secciones de especímenes que se presentan en la base .....	74
Relación entre el contenido de fibras y la resistencia al corte normalizado de la viga .....	76
Variación del esfuerzo cortante de acuerdo con la relación $a/d$ .....	86
Resistencia al corte según la resistencia a compresión del concreto .....	90
Resistencia al cortante según el peralte efectivo .....	104
Resistencia al cortante según la relación de refuerzo longitudinal.....	109

Resistencia al cortante según la forma de la fibra .....	113
Resistencia al cortante según el tipo de falla del espécimen .....	140
Conclusiones .....	163
CAPITULO 4 .....	166
PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	167
Antecedentes .....	167
Descripción General de Especímenes .....	167
Materiales .....	176
Refuerzo .....	180
Descripción General de Ensayes .....	180
Bitácora de Ensayes .....	190
Resultados de las pruebas .....	200
Serie 1571 .....	208
Serie 1610 .....	212
Serie 1690 .....	216
Serie 1709 .....	220
Serie 1787 .....	224
Serie 1857 .....	230
Serie 1858 .....	234
Serie 1979 .....	238

Serie 1996.....	241
Serie 2102.....	245
Serie 2212.....	249
Serie 2230.....	253
Serie 2246.....	257
Serie 2247.....	261
Serie 2429.....	266
Serie 2441.....	270
Serie 2542.....	274
Serie 2543.....	278
Serie 2614.....	282
Serie 2615.....	285
Serie 2655.....	289
Serie 2656.....	292
Serie 2727.....	294
Serie 2728.....	297
Serie 2959.....	300
Serie 2960.....	302
Serie 3071.....	304
Serie 3072.....	307



Análisis de Datos Obtenidos en Laboratorio .....	309
Comparación de Datos Obtenidos en Laboratorio con modelo de Sharma .....	322
CAPITULO 5 .....	326
Conclusiones .....	327
Bibliografía .....	330

## Contenido

### Antecedentes

El uso de fibras en la construcción se remonta a tiempos antiguos, coincidiendo con el desarrollo de las civilizaciones humanas. Por ejemplo, en la Antigua Mesopotamia se utilizaron fibras naturales para mejorar el rendimiento del barro en la construcción de edificaciones. A lo largo de la historia, las fibras han experimentado una notable evolución debido a las necesidades de las poblaciones.

A principios del siglo XX, se comenzó a utilizar el amianto como fibra de refuerzo en la fabricación de fibrocemento. Sin embargo, con el tiempo se descubrieron problemas de salud asociados al amianto, lo que llevó a su progresivo abandono como material de fibra (Jacques & Aragon, 2020).

Existen diferentes tipos de fibras utilizadas en la construcción, incluyendo las metálicas, sintéticas y naturales. Estas fibras se añaden como aditivo en la mezcla de concreto para proporcionar un mejor control de las grietas. Se clasifican en microfibras y macrofibras, siendo las primeras utilizadas principalmente para mitigar las grietas por contracción plástica, mientras que las segundas se emplean para limitar el ancho de las grietas resultantes. Gracias a los avances en la innovación del refuerzo con fibras, en 1965 se creó el Comité 544 del Instituto Americano de Concreto (ACI, por sus siglas en inglés), dedicado al Concreto Reforzado con Fibras. Desde entonces, tanto el Comité 544 como otras instituciones, han publicado numerosos trabajos sobre el tema (Bonakdar & Mahoney, 2021)

En la actualidad, el uso de fibras está ampliamente establecido en la industria del concreto, especialmente en países desarrollados. Por ejemplo, la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) clasifica los tipos de concreto reforzado con fibras según el material de la fibra utilizada, como acero, vidrio, sintética o natural. Además, el glosario autorizado de tecnología del cemento y concreto del ACI (ACI CT, por sus siglas en inglés) incluye a las fibras en la definición de "refuerzo".

El uso de fibras de acero en la construcción es relativamente nuevo, dado que sólo tiene 40 años en la industria, pues a mediados de la década de 1960 estas fibras fueron investigadas por sus efectos en la mezcla de concreto.

Hasta el año 2020, se habían construido más de 50 millones de metros cuadrados en naves industriales que han utilizado las fibras de acero como refuerzo en México, el cual, es el mercado más demandante de fibras, aunque también es común su uso en pavimentos de carreteras (PSI Concreto, 2020).

### **Objetivo**

El objetivo de esta tesis es presentar evidencia sobre la resistencia a fuerza cortante de vigas de concreto reforzadas con fibras de acero, así como mostrar los resultados obtenidos en pruebas de laboratorio de concreto reforzado con dichas fibras. Los objetivos específicos de esta investigación son los siguientes:

- Recopilar y procesar los datos obtenidos por otros autores a través de artículos científicos.
- Realizar un análisis exhaustivo de los datos recopilados.
- Realizar pruebas de laboratorio en vigas reforzadas con fibras de acero.
- Procesar los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio.
- Realizar un análisis general de los datos recopilados y obtenidos en el laboratorio.

Con estos objetivos, se busca obtener una visión completa y precisa sobre el comportamiento y el desempeño de las vigas de concreto reforzadas con fibras de acero sometidas a fuerza cortante, a través de una recopilación de datos existentes y la generación de nuevos datos a partir de pruebas de laboratorio. El análisis de estos datos permitirá obtener

conclusiones y recomendaciones sobre el diseño a fuerza cortante de vigas de concreto reforzadas con fibras de acero.

### **Justificación**

Las fibras han sido ampliamente utilizadas en la construcción a lo largo de la historia de las civilizaciones. Con los avances en materiales y tecnología, se ha creado un vasto campo para el desarrollo de estas fibras.

En la actualidad, los materiales más comunes en la construcción son el acero y el concreto, debido a su gran capacidad y las ventajas que ofrecen en términos de resistencia y construcción de estructuras. Sin embargo, el uso de fibras de acero u otros materiales en la industria de la construcción aún no se ha implantado de manera masiva en nuestro país. Por esta razón, es importante generar un mayor conocimiento en este campo para contar con opciones más seguras al diseñar y construir, optimizando así costos, durabilidad y seguridad en las obras civiles.

Las fibras proporcionan numerosas ventajas al concreto, ya que ofrecen un refuerzo tridimensional a los elementos y mejoran su comportamiento dúctil. Estas se utilizan regularmente en el refuerzo de losas, pavimentos, concreto lanzado, tubos de concreto prefabricado y conexiones estructurales.

### **Alcance**

El presente documento tiene como objetivo principal analizar y evaluar el aporte de las fibras de acero en la capacidad de vigas de concreto reforzadas sometidas a fuerzas cortantes. Este estudio se centra en explorar las mejoras que estas fibras pueden ofrecer en términos de resistencia y comportamiento estructural de las vigas de concreto.

## **Organización del Documento**

El presente documento se estructura en cinco capítulos, los cuales abordan de manera detallada el tema de las vigas de concreto reforzadas con fibras de acero sometidas a fuerza cortante. A continuación, se describirá el contenido de cada capítulo, proporcionando un panorama general del alcance del estudio.

En el primer capítulo, se examinará el comportamiento del concreto en ausencia de fibras. Se analizarán los diferentes aspectos relacionados con la resistencia al esfuerzo cortante, abordando los mecanismos de falla y resistencia presentes en las vigas de concreto tradicionales. Se profundizará en los fenómenos de agrietamiento, así como en los factores que limitan la capacidad de resistir esfuerzos cortantes en este tipo de estructuras.

El segundo capítulo se centrará en el comportamiento del concreto reforzado con fibras de acero sometido a esfuerzo cortante. Se explorarán los mecanismos de falla y los mecanismos de resistencia específicos que se presentan cuando se incorporan fibras en la matriz de concreto. Además, se discutirán los beneficios y las ventajas que las fibras de acero ofrecen en términos de resistencia, ductilidad y capacidad de retención de fisuras en las vigas reforzadas.

El tercer capítulo consistirá en un análisis del estado del arte en el campo de las vigas de concreto reforzadas con fibras de acero. Se realizará una revisión de la literatura existente, examinando estudios previos y bases de datos con especímenes probados por otros autores. Esta revisión permitirá obtener una visión general de los avances, los desafíos y las tendencias actuales en el uso de fibras de acero en vigas de concreto reforzadas sometidas a esfuerzo cortante.

En el cuarto capítulo, se presentarán los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas en vigas de concreto reforzadas con fibras de acero realizadas en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Se describirán detalladamente los procedimientos experimentales, los equipos utilizados y los resultados obtenidos. Estos resultados se compararán y analizarán en relación con los modelos y enfoques teóricos presentados en los capítulos anteriores, brindando una evaluación integral del comportamiento y la resistencia de las vigas reforzadas.

Finalmente, en el quinto capítulo, se presentarán las conclusiones derivadas de este estudio. Se resumirán los principales hallazgos, se discutirán sus implicaciones y se brindarán recomendaciones para futuras investigaciones. Además, se destacarán las contribuciones y las limitaciones del estudio, proporcionando una visión general del valor y la relevancia de los resultados obtenidos.

### **Nomenclaturas y Abreviaturas**

ACI. - Instituto Americano de Concreto

ACI CT. - Terminología del Concreto del Instituto Americano de Concreto

ASTM. - Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales

NTC-CDMX. – Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México

### **Glosario**

El glosario que se presenta a continuación se basa en su mayor parte en las definiciones que dan las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México.

### ***Agregados***

“Material granular como arena, grava, piedra triturada y escoria de hierro de alto horno, empleado con un medio cementante para formar concreto o morteros hidráulicos” (Secretaría de Obras y Transportes, 2023, pág. 19).

### ***Cemento***

“El cemento es un conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse después de ponerse en contacto con el agua. El producto resultante de la molienda de estas rocas es llamado clinker y se convierte en cemento cuando se le agrega una pequeña cantidad de yeso para evitar la contracción de la mezcla al fraguar cuando se le añade agua y al endurecerse posteriormente” (Burgos, 2020).

### ***Concreto***

“Mezcla de cemento portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos” (Secretaría de Obras y Transportes, 2023, pág. 20).

### ***Ductilidad***

“Es la capacidad de un material de deformarse plásticamente sin romperse. Así un material es dúctil si es capaz de deformarse de manera permanente y apreciable en el rango inelástico antes de fallar” (Bozzo & Barbat, 2000, pág. 104).

### ***Elementos mecánicos***

Los elementos mecánicos son las fuerzas y momentos internos que desarrolla cualquier material o elemento al ser sometido a fuerzas externas.

***Esfuerzo cortante***

Fuerza desarrollada en el interior de los materiales que se opone a ser cortado debido a fuerzas externas y la cual es dependiente del momento flexionante.

***Fibras***

“Las fibras son pequeños filamentos o pedazos de acero con un aspecto o esbeltez, que es la relación entre la longitud y el diámetro de la fibra, que varía entre 20 y 100. Pueden contar con diversas secciones transversales” (Peña & Pinzón, 2021).

***Flexión***

“Se denomina flexión al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal” (Mecánica, 2011).

***Momento flexionante***

“Momento de fuerza resultante de una distribución de tensiones sobre una sección transversal de un prisma mecánico flexionado o una placa que es perpendicular al eje longitudinal a lo largo del que se produce la flexión” (ingenieriaymas.com, 2016).

***Módulo de elasticidad***

“Relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente, para esfuerzos de tensión o compresión menores que el límite de proporcionalidad del material” (Secretaría de Obras y Transportes, 2023).

***Refuerzo***

“Material que cumple con lo especificado en el capítulo 2, excluyendo el acero de presfuerzo, a menos que se incluya en forma explícita” (Secretaría de Obras y Transportes, 2023, pág. 22).



### ***Vigas***

Elementos estructurales alargados horizontales, de diferentes materiales y de relativamente pequeña sección transversal, generalmente rectangulares cuya función principal es soportar las cubiertas de los entrepisos y techos, se apoya generalmente en muros o columnas, existen de dos materiales principales, de acero y de concreto reforzado (Glosarios, 2017).

# **CAPITULO**

# **1**

**Vigas de Concreto Reforzado Sometidas a  
Esfuerzo Cortante**

## CAPITULO 1

### Vigas de Concreto Reforzado Sometidas a Esfuerzo Cortante

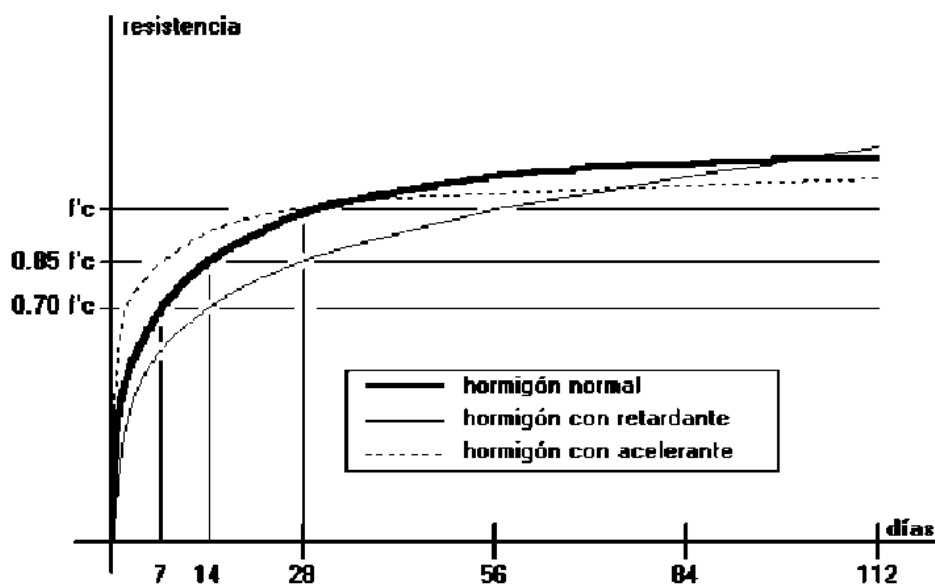
#### Introducción

Este capítulo se refiere al comportamiento de las vigas de concreto reforzado que son sometidas a esfuerzos cortantes, así como los parámetros que afectan y cómo son los mecanismos de resistencia a fuerza cortante. Asimismo, se enuncian los tipos de falla por cortante que se pueden presentar en las vigas. También se expresa cómo se diseña a cortante según las Normas Técnicas Complementarias para diseño y evaluación de estructuras de concreto de la Ciudad de México (NTC-Concreto).

#### Antecedentes

El concreto, de acuerdo con la Secretaría de Obras y Transportes (2021), es un material compuesto principalmente por cemento portland u otro tipo de cemento hidráulico, arena como agregado fino, grava como agregado grueso y agua, pudiendo incluir aditivos como humo de sílice, cenizas volantes, escorias u otros materiales puzolánicos. Al mezclar estos componentes, se produce una reacción exotérmica en la cual los hidróxidos metálicos presentes en el clinker del cemento se desecan y recristalizan debido a la reacción con el agua de amasado.

Transcurridos siete días, el concreto alcanza aproximadamente 65% de su capacidad de resistencia, y a los 28 días se acerca a su capacidad máxima de carga. Algunos estudios indican que el concreto continúa ganando resistencia con el tiempo, aunque a una tasa muy baja, como se muestra en la *Figura 1. 1*.



*Figura 1. 1.* – Curva de resistencia – tiempo en días del concreto (Castellanos, 2006).

Es importante destacar que esta curva representa la evolución de la resistencia del concreto a lo largo del tiempo, evidenciando que el mayor incremento en resistencia se produce durante los primeros días de fraguado, mientras que las ganancias posteriores son más graduales.

Cuando el concreto falla, dado su carácter frágil, lo hace de manera repentina, lo cual es altamente indeseable en cualquier estructura debido a las preocupaciones de seguridad. Esta súbita falla no brinda tiempo suficiente para que las personas evacúen los edificios una vez que se ha superado la capacidad límite de la estructura. Por esta razón, el acero se utiliza comúnmente en estructuras de concreto hidráulico, ya que el acero posee propiedades de ductilidad que contrarrestan la fragilidad inherente del concreto. Sin el refuerzo de acero, la capacidad del concreto para resistir tensiones se ve significativamente reducida.

La incorporación de refuerzo de acero en el concreto proporciona una mayor capacidad de respuesta ante cargas que exceden los límites de la estructura. Cuando se supera la capacidad de la estructura, el acero tiene la capacidad de deformarse en lugar de colapsar de forma abrupta,

lo que permite un tiempo valioso para tomar medidas en caso de una emergencia, lo que a su vez reduce las posibles pérdidas humanas.

Tradicionalmente, al trabajar con concreto hidráulico, se utilizan dispositivos de refuerzo conocidos como estribos para soportar principalmente las demandas de esfuerzo cortante en los elementos estructurales. Estos estribos suelen estar compuestos por barras o alambros de acero que siguen la forma del elemento y envuelven el acero longitudinal. Se colocan a separaciones específicas según lo especificado en el diseño del elemento para proporcionar refuerzo adicional y mejorar la resistencia a esfuerzos cortantes.



*Figura 1. 2.* – Diferentes estribos de acero almacenados para su uso posterior (*Morcillo, 2021*).

### **Comportamiento de Vigas de Concreto Reforzado Trabajando a Fuerza Cortante**

La fuerza cortante es el resultado de la combinación de la acción de fuerzas verticales que actúan en la viga en una sección y que tienden a cortar el elemento. Cuando una viga es sometida a cargas, las fuerzas verticales generadas por la carga se transmiten a lo largo del elemento. En determinadas secciones de la viga, estas fuerzas verticales pueden crear una acción de corte, lo que implica que las partes superiores e inferiores de la sección de la viga intentan deslizarse una

sobre la otra. La fuerza cortante resultante es la resistencia que se opone a este deslizamiento y es esencial para mantener la integridad estructural de la viga. El concreto y el acero de refuerzo trabajan en conjunto para resistir la fuerza cortante y evitar el colapso del elemento.

Es importante comprender y evaluar la fuerza cortante en el diseño de las vigas, ya que puede tener un impacto significativo en la seguridad y la capacidad de carga de la estructura. El análisis y el refuerzo adecuado a esfuerzos cortantes son fundamentales para garantizar una adecuada resistencia y estabilidad de las vigas en cualquier construcción.

Los esfuerzos horizontales generados se pueden demostrar, según Méndez (2017), si se toma una viga gruesa de madera y se corta en tablones más delgados, como en la **Figura 1. 3**. Los tablones se deslizan entre ellos debido a los mencionados esfuerzos horizontales, aunado a ello, su resistencia es considerablemente menos que la de la viga de donde fueron cortados.

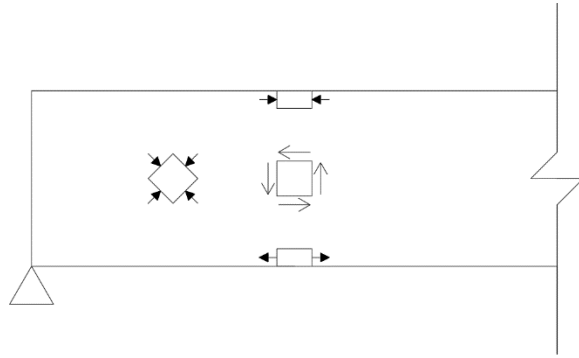


**Figura 1. 3.** - Arreglo de tablones horizontales flexionados por una fuerza central, donde esquemáticamente se muestra la fricción en la superficie de los tablones con flechas (Méndez, 2017).

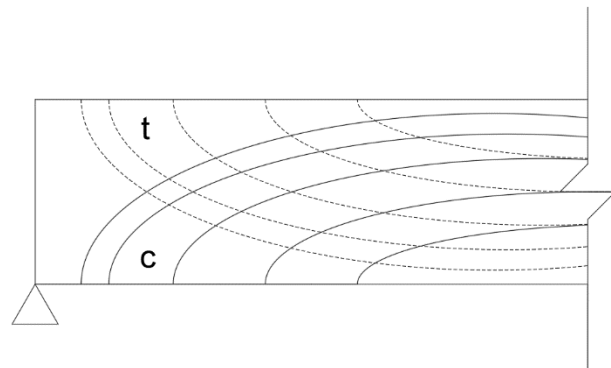
Se resalta que los esfuerzos cortantes verticales y horizontales que se generan son iguales teniendo como resultado que los momentos que se producen sean iguales y con ello se contrarresten, impidiendo que la viga rote.

La combinación de esfuerzos cortantes genera tanto esfuerzos de compresión y de tracción diagonal, como se muestra la siguiente **Figura 1. 4**:

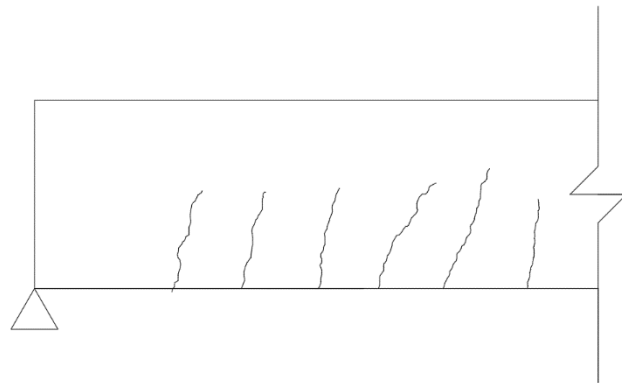
a) Elementos de esfuerzo



b) Trayectorias de esfuerzos



c) Grietas inclinadas



**Figura 1. 4.** - Efecto de la tensión diagonal en vigas de concreto; en figura b) la trayectoria de esfuerzos de tensión se expresa con  $t$  y la transmisión de esfuerzos de compresión con  $c$ . Adaptación de ilustraciones de Méndez (2017).

El esfuerzo cortante transversal en vigas es determinado de manera indirecta del cálculo del momento flexionante, siendo la variación del momento con relación al eje longitudinal de la

viga, muchas veces llamado “x” a dicho eje, en otras palabras, es la derivada de la expresión del momento:

$$V = \frac{dM}{dx}$$

Existe otro factor llamado Q, el cual es el momento del área “ $\bar{A}$ ” respecto del eje neutro, dicha área es la parte de la sección transversal que se mantiene en la viga, por encima o por debajo del espesor donde se esté haciendo el corte de análisis donde debe determinarse  $\tau$  a la superficie de la viga. El área se multiplica por la distancia entre el centroide de la viga y el centroide del área “ $\bar{A}$ ”, a esa distancia se le llama “ $\bar{y}$ ”. Se puede apreciar lo dicho en la siguiente expresión:

$$Q = \bar{y} \bar{A}$$

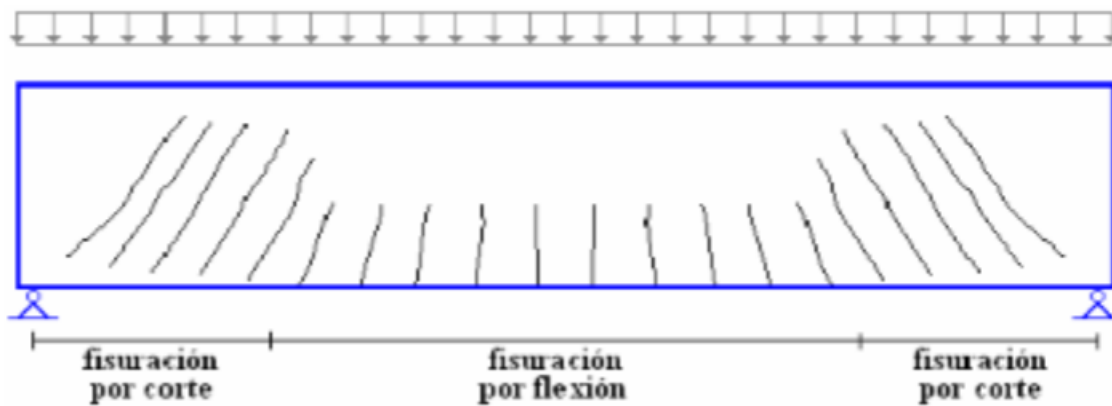
Cuando la sección de la viga tiene forma rectangular, la distribución del esfuerzo cortante es parabólica, donde el valor máximo se encuentra en el eje neutro. Existen elementos de sujeción, utilizados en la práctica para soportar el flujo cortante, llamado también “ $q$ ”, o fuerza por unidad de longitud, los cuales pueden ser clavos, tornillos, pegamento, soldaduras, o bien, en el caso de las vigas de concreto reforzado, los estribos.

### ***Tipos de falla en vigas por cortante sin refuerzo***

Como se puede observar en la **Figura 1. 4**, el flujo de cortante es opuesto en la región de tensión y en la región de compresión. Como se explicó anteriormente, el concreto no es un material adecuado para resistir la tensión, lo que conduce a la formación de grietas debido a la transmisión de esfuerzos. En la zona central de la viga, el agrietamiento por tensión ocurre



principalmente debido a la flexión, mientras que en los extremos predomina el agrietamiento por cortante, como se puede apreciar en la *Figura 1. 5*.

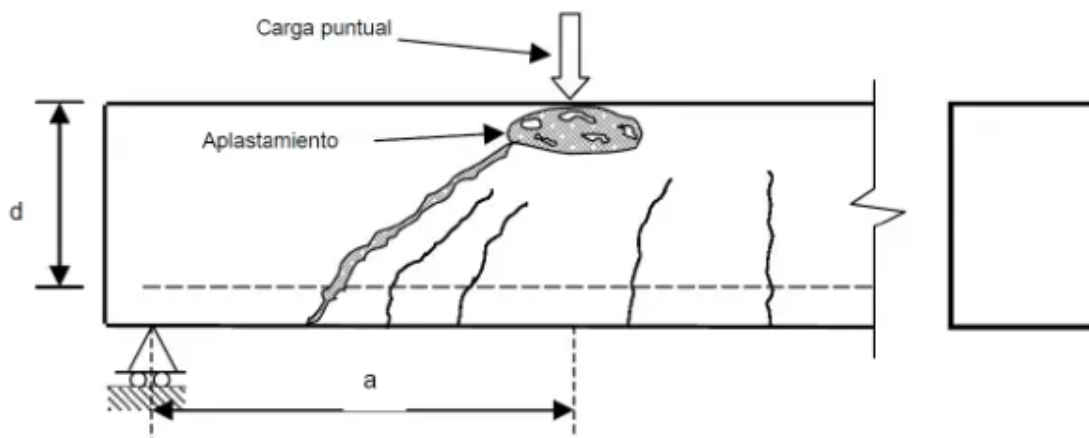


*Figura 1. 5.* - Zonas de agrietamiento (marcado como fisuración en la figura) de una viga (*Manjarrez & Gomez, 2013*).

Los tipos de falla en vigas por cortante sin refuerzo se pueden clasificar de la siguiente manera

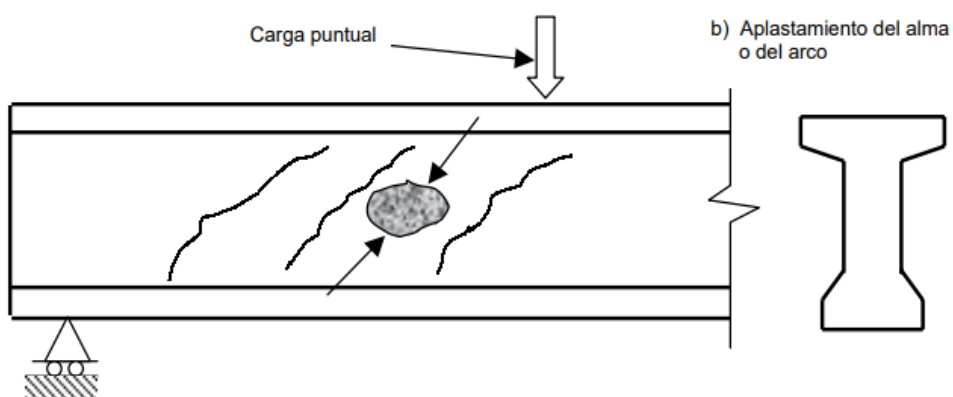
1. Cortante por compresión

Este tipo de falla ocurre cuando el agrietamiento inclinado se genera lentamente y la viga falla por aplastamiento en la zona de compresión en el extremo de la grieta inclinada, al reducirse cuantiosamente la zona con capacidad de soportar los esfuerzos de compresión y por ello se denomina falla cortante por compresión. El elemento puede soportar cargas mayores que la que produce el agrietamiento inclinado y la falla ocurre después de la aparición de una grieta inclinada significativa y, la resistencia es mayor que la carga que formó dicha grieta (Márquez & Rafael, 1994, págs. 127-128).



**Figura 1. 6.** - Esquema de falla por cortante por compresión (Méndez, 2017).

## 2. Aplastamiento del alma o del arco



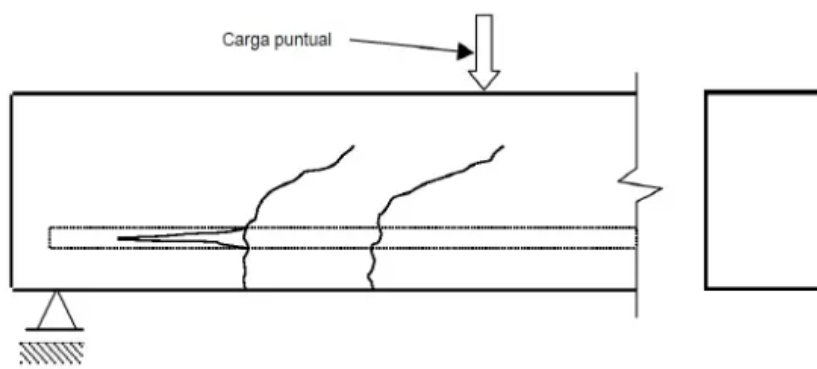
**Figura 1. 7.-** Esquema de falla por aplastamiento del alma o del arco (Méndez, 2017).

La posibilidad de una falla por aplastamiento de la pared en elementos de concreto reforzado dominados por cortante aumenta cuando las dimensiones de los elementos se hacen más largas y la matriz de concreto se vuelve más delgadas como explica Liu (2010). La falla por aplastamiento del alma se observa típicamente en vigas en I con almas estrechas. El aplastamiento del alma ocurre después de la fisuración por cortante del alma debido a tensiones compresivas excesivas en los elementos de compresión diagonal (Gürbüz, 2008). Este modo de falla suele aparecer en elementos con preesfuerzo debido a que retrasan la formación de grietas

por flexión como explican MacGregor y Hanson (1969). La falla por aplastamiento del alma es una falla no deseada en las vigas, ya que suele ocurrir repentinamente y sin previo aviso

### 3. Hendiduras, adherencia por cortante o tensión cortante

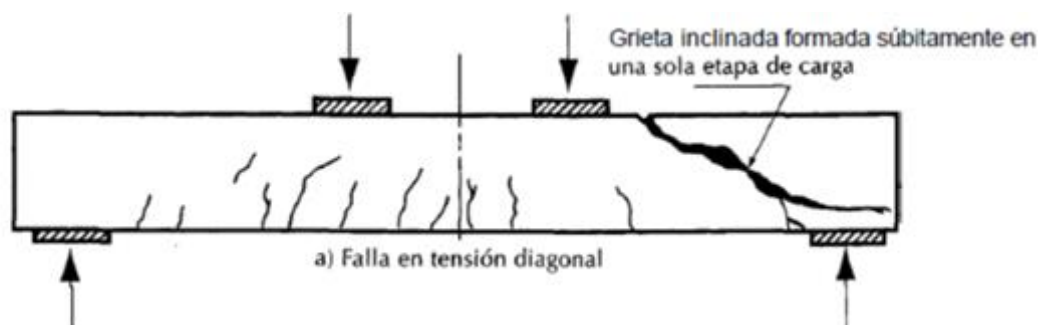
La falla de este tipo sucede cuando existen extensos agrietamientos longitudinales a nivel del acero a tensión, a la vez con un aplastamiento ligero en la zona de compresión en el extremo de la grieta inclinada.



**Figura 1. 8.** - Esquema de falla por hendiduras o adherencia por cortante (*Méndez, 2017*).

### 4. Falla en tensión diagonal

Este tipo de falla ocurre cuando el concreto no es capaz de soportar las demandas de esfuerzo de tensión máximo y, se genera una grieta inclinada perpendicular a la trayectoria del esfuerzo de tensión; cuando la falla se produce, lo hace de manera súbita al presentarse la primera grieta inclinada relevante a una altura de medio peralte causando que el elemento colapse en ausencia de estribos (Márquez & Rafael, 1994).



**Figura 1. 9.** - Esquema de falla por tensión *diagonal* (*gmoralexv2, s.f.*).

La formación de grietas se da debido a la combinación de la flexión y el cortante en un miembro de concreto reforzado que crean un estado biaxial de esfuerzos. Por ende, cuando los esfuerzos principales de tensión superan la resistencia a tensión del concreto, se crean grietas. En las zonas donde hay momentos flexionantes elevados, los esfuerzos son máximos en la fibra extrema a tensión del miembro donde se producen grietas verticales por flexión, y en las zonas donde hay esfuerzos por cortante grandes, se generan esfuerzos principales de tensión, conocidos también como tensión diagonal, los cuales son aproximadamente a  $45^\circ$  con respecto al eje longitudinal del miembro, lo que produce grietas inclinadas.

Estas fallas son el resultado de la incapacidad del concreto para resistir adecuadamente las fuerzas cortantes. Es importante tener en cuenta estos tipos de falla al diseñar y construir estructuras de concreto para garantizar la seguridad y la integridad de estas. La inclusión de refuerzo adecuado, como barras de acero, puede ayudar a prevenir o mitigar estos tipos de falla y mejorar la capacidad de las vigas para resistir esfuerzos cortantes.

### ***Mecanismos de Resistencia al Cortante***

Se sostiene la creencia de que cuando el concreto se agrieta, pierde su capacidad para soportar cargas. Sin embargo, en el caso de las vigas de concreto, existen diversos mecanismos

de resistencia al cortante una vez que la viga ha desarrollado fisuras. A continuación, se presentan dichos mecanismos:

- a) Esfuerzo Cortante en el Concreto no Agrietado de la Zona de Compresión por Flexión ( $V_{cc}$ )

Anteriormente se aceptaba la consideración de que la zona de compresión no agrietada soportaba todo el cortante resistido por el concreto. Sin embargo, investigaciones más recientes han demostrado que parte de este esfuerzo cortante es resistido por la acción de transferencia de esfuerzos a través de la acción de dovela del acero longitudinal y parte es transmitida a lo largo de la grieta de tensión diagonal. Además, la contribución de esta zona se ve significativamente afectada por la degradación del concreto debido a las cargas sísmicas.

- b) Acción de dovela de las barras de refuerzo longitudinal ( $V_d$ )

Se refiere a la capacidad del refuerzo longitudinal de la viga para resistir la fuerza cortante en una fisura entre caras. Esta acción se debe a la combinación de la flexión local en las varillas, el cortante directo y la torcedura, y suele representar aproximadamente 10% a 20% del esfuerzo cortante total. La acción depende directamente de la magnitud de los desplazamientos a lo largo del plano de cortante y de la resistencia a la tensión que el recubrimiento de concreto que soporta a la dovela tenga. Es importante destacar que la contribución de  $V_d$  puede ser significativa en vigas que cuentan con una alta cantidad de refuerzo longitudinal (Lozano, 2012, pág. 7).

c) Esfuerzos residuales de tensión transmitidos a través de las grietas ( $N_f$ )

Se refieren a la presencia de pequeñas piezas que actúan como puentes entre las superficies separadas de las grietas inclinadas, transmitiendo fuerzas de tensión entre ellas. Estas grietas, con una anchura que varía de 0.02 a 0.15 milímetros, permiten que se generen esfuerzos de tensión residuales que se mantienen a lo largo de las mismas (Lozano, 2012, pág. 7).

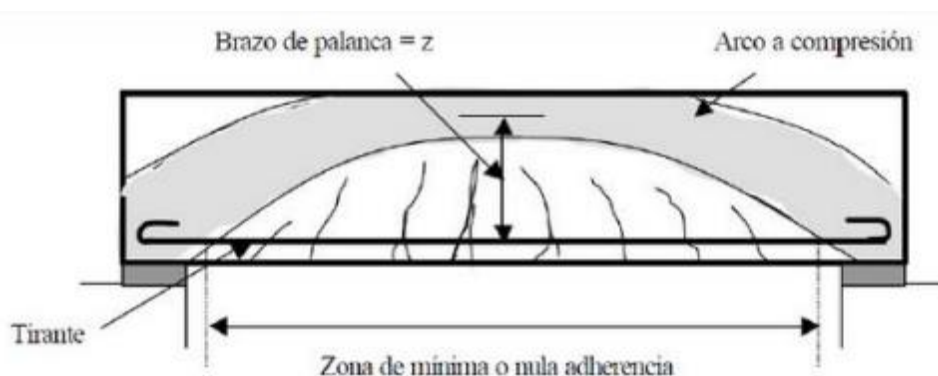
d) Transferencia de cortante en la entrecara, trabazón del agregado o fricción en la grieta ( $T_f$ )

También llamada “*transferencia de cortante en la superficie de interacción*” o aspereza superficial. Se basa en que los agregados que sobresalen en la superficie agrietada proporcionan resistencia al deslizamiento. La transmisión de fuerza cortante por fricción a través de la grieta  $V_{cf}$ , está dada por la suma de las componentes verticales de las acciones  $N_f$  y  $T_f$ . Según Méndez (2017) esta transferencia  $V_{cf}$  soporta alrededor de 45 a 60% del cortante total, mientras que la zona de compresión de 20 a 35%. Cuando las fisuras se abren debido a carga creciente  $V_{cf}$  decae y cuando la zona de compresión no es capaz de absorber el cortante que crece, además de la compresión, ocurre lo que se conoce como falla a cortante por aplastamiento del concreto en la zona de compresión.

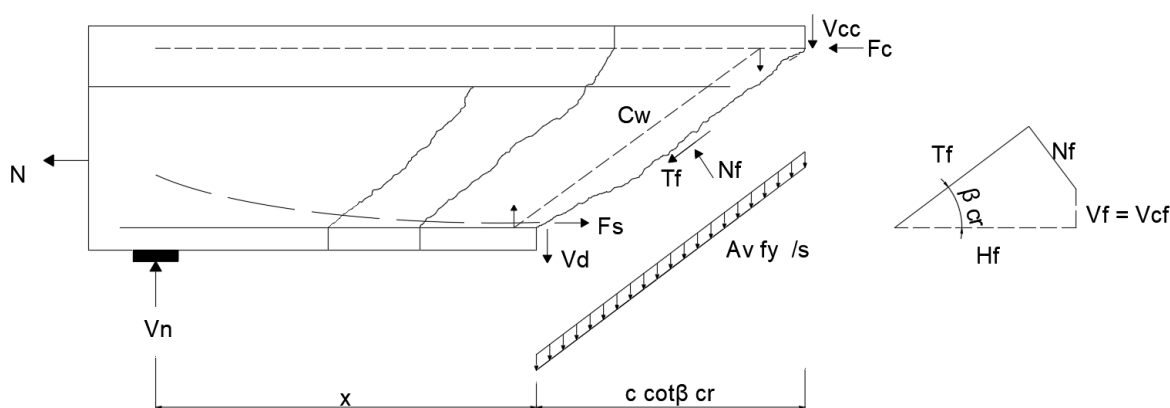
e) Acción de arco o de puntal ( $C_w$ )

Como explica Lozano (2012), esta acción consiste en la transferencia de fuerzas por medio de puntales de concreto que trabajan a compresión. La acción de arco se presenta en elementos con relación a/d (claro de cortante a peralte) menor que 2.5 y

también en columnas en las que la carga se transmite por medio de un puntal inclinado entre las zonas de compresión.



**Figura 1. 10.** - Acción de arco en una viga de concreto armado (Valentí, 2014).



**Figura 1. 11.** - Mecanismos de transferencia de cortante; adaptación de ilustraciones de Lozano (2012, pág. 7).

En la ilustración anterior, se muestra un diagrama de cuerpo libre que representa las fuerzas que actúan tanto en un lado de la viga como en la superficie de la grieta. El equilibrio vertical se puede determinar utilizando la siguiente expresión:

$$V_n = V_s + V_c + V_p$$

Donde:

$V_n$  Es la resistencia nominal a cortante

$V_s$  Fuerza cortante que soportan los estribos que son atravesados por la grieta y se calcula como  $A_v f_y d_v (\cot \beta_{cr}) / s$

$V_c$  Aporte a la resistencia cortante dada por el concreto, conformada por las componentes  $V_{cc}$ ,  $V_{cf}$  y  $C_w$ .

$V_p$  Sería el aporte de alguna fuerza de preesfuerzo si existiera, dada por su componente vertical.

### ***Parámetros que Afectan la Capacidad a Cortante***

Existen diversos factores que influyen en la capacidad a cortante de las vigas, algunos de ellos están relacionados con el diseño, mientras que otros son circunstanciales. Es crucial comprender estos factores para poder tener un adecuado conocimiento de la capacidad de las vigas a cortante.

#### a) Relaciones claro de cortante a peralte (a/d)

En el caso de las vigas con una relación claro de cortante a peralte (a/d) inferior a 2.5, se observa que el esfuerzo cortante promedio hasta el punto de falla aumenta gradualmente en comparación con las vigas que tienen una relación mayor, es decir, con peraltes más bajos y claros más grandes. Este fenómeno se debe a que se fomenta la formación de un puntal de compresión directamente entre el apoyo y el punto de aplicación de la carga (Lozano, 2012, pág. 8).

#### b) Cuantía de refuerzo transversal



Según la mayoría de los modelos y recomendaciones, se sostiene que la contribución al esfuerzo cortante del armado transversal está directamente relacionada con la cantidad de dicho armado (Valentí, 2014).

c) Resistencia del concreto

La contribución del concreto al esfuerzo cortante se incrementa significativamente a medida que aumenta su resistencia.

d) Separación entre estribos

La separación entre los estribos juega un papel crucial en la resistencia a cortante de las vigas, ya que una distancia menor entre cada estribo proporciona un mejor control de las fisuras y un mayor confinamiento. Además, al tener una mayor concentración de estribos, se facilita la transferencia de esfuerzos y el flujo de cortante aumenta significativamente.

e) Cuantía de refuerzo longitudinal

Lozano (2012) explica que, cuando la viga cuenta con una menor cantidad de refuerzo longitudinal, su capacidad para resistir esfuerzos de cortante disminuye. Esta situación puede ser explicada por el aumento en la amplitud de las fisuras generadas, lo que resulta en una reducción en la transferencia de cortante en la superficie de interacción. Además, se generan mayores fisuras por flexión, lo que conduce a una disminución en el tamaño de la zona de compresión y afecta negativamente la acción de dovela.

f) Fuerza axial

La presencia de compresión en los elementos aumenta la resistencia a cortante cuando no hay refuerzo transversal. La compresión ayuda a cerrar las fisuras y proporciona

un mayor confinamiento al concreto, lo que mejora la capacidad de la viga para resistir los esfuerzos cortantes. Por otro lado, la presencia de tensión axial en los elementos disminuye la resistencia a cortante. La tensión axial genera apertura de las fisuras, debilitando la capacidad de transferencia de cortante en la viga y reduciendo su resistencia global al esfuerzo cortante.

g) Efecto de tamaño

A medida que el tamaño de un elemento estructural aumenta, el grosor de las grietas también se incrementa, lo que resulta en una capacidad reducida de transmisión de cortante en la superficie de interacción del elemento. Según Alcocer (1998), en la teoría de la mecánica de la fractura, cuando la falla está controlada por tensión, el esfuerzo nominal a la falla disminuye a medida que el tamaño del elemento aumenta. Esto se debe a que la carga de falla incrementa a una tasa menor que la superficie de falla disponible. En resumen, a medida que el tamaño del elemento aumenta, la capacidad de resistencia al esfuerzo cortante disminuye debido a una relación desfavorable entre la carga de falla y el área de falla.

h) Condiciones de carga

Según Lozano (2012, pág. 8), en el caso de cargas biaxiales, se observa una degradación más severa en la contribución a cortante en comparación con las cargas uniaxiales. Además, en la formación de puntales de compresión, el ángulo de inclinación de estos puntales está relacionado con la rotación de la articulación plástica, ya que cambia gradualmente desde la zona de articulación hacia el exterior. Por otro lado, cuando se aplican cargas cíclicas, se generan esfuerzos alternados de tensión y compresión en el concreto. Esto acelera su degradación y afecta

negativamente su resistencia a cortante. Como resultado, la capacidad de resistencia al esfuerzo cortante del concreto se ve reducida debido a la acción repetitiva de las cargas cíclicas.

### ***Diseño a Cortante Según las NTC-CDMX 2023***

Según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño (NTC-Concreto) en México, se establece que se colocará una cantidad mínima de refuerzo transversal ( $A_{v,min}$ ) en el alma en todos los elementos de concreto, aunque no se requiera por resistencia, excepto en los elementos estructurales que el Proyectista considere por razones constructivas no sea posible la colocación de refuerzo por cortante, como es el caso de zapatas o losas de peraltes grandes, y la fuerza cortante podrá ser resistida únicamente por el concreto, así como en vigas no presforzadas, donde estas sean construidas con concreto con fibras de acero que cumplen con las características de la Tabla 1. 1. – Casos donde  $A_{v,min}$  no se requiere ..

**Tabla 1. 1.** – Casos donde  $A_{v,min}$  no se requiere (*Secretaría de Obras y Transportes, 2023*).

Tipo de viga	Condiciones	
Construida con concreto con fibras de acero que cumplen con 2.3.4 y $V_u \leq V_{cR}$ , donde $V_{cR}$ se calcula de acuerdo con 5.5.3	Para concreto de peso normal con $f_c' \leq 70$ MPa (700 kg/cm <sup>2</sup> ) y barras Grado 42 o 56: $h \leq 1.0$ m	a)
	Para concreto ligero con $f_c' \leq 40$ MPa (400 kg/cm <sup>2</sup> ) y barras Grado 42: $h \leq 600$ mm	b)
Sistema de nervaduras o viguetas que trabajan en una dirección	Para viguetas en la parte central del tablero y según 6.7.8	c)

El punto 6.7.8 de la NTC-Concreto, habla de las losas encasetonadas en dos direcciones sin presfuerzo, casos que van fuera del área de estudio de este documento. El  $A_{v,min}$  se calculará según la **Tabla 1. 2**

**Tabla 1. 2. -  $A_{v,min}$  requerida (Secretaría de Obras y Transportes, 2023)**

Tipo de viga	$A_{v,min}/S$		
No presforzada y presforzada con $A_{ps}f_{se} < 0.4 (A_{ps}f_{pu} + A_s f_y)$	El mayor de:	$0.062\sqrt{f'_c} \frac{b_w S}{f_{yt}}$ $\left( 0.2\sqrt{f'_c} \frac{b_w S}{f_{yt}} \right)$	a)
		$0.35 \frac{b_w S}{f_{yt}}$ $\left( 3.5 \frac{b_w S}{f_{yt}} \right)$	b)
Presforzada con $A_{ps}f_{se} \geq 0.4 (A_{ps}f_{pu} + A_s f_y)$	El mayor de:	$0.062\sqrt{f'_c} \frac{b_w S}{f_{yt}} \left( 0.2\sqrt{f'_c} \frac{b_w S}{f_{yt}} \right)$	c)
		$0.35 \frac{b_w S}{f_{yt}} \left( 3.5 \frac{b_w S}{f_{yt}} \right)$	d)
	El menor de:	$\frac{A_{ps}f_{pu}}{3f_{yt}d} \sqrt{\frac{d}{b_w}}$ $\left( \frac{A_{ps}f_{pu}}{30f_{yt}d} \sqrt{\frac{d}{b_w}} \right)$	e)

Donde:

$A_s$  es el área de acero de refuerzo sin presfuerzo, mm<sup>2</sup> (cm<sup>2</sup>)

$A_{ps}$  es el área de presfuerzo, mm<sup>2</sup> (cm<sup>2</sup>)

$b_w$  es el ancho promedio del alma o diámetro de la sección circular, mm (cm), o ancho del alma en secciones rectangulares, L y T, mm (cm)

$d$  es el peralte efectivo de un elemento, definido como la diferencia entre el peralte total del elemento y el recubrimiento de análisis, mm (cm)

$f_{pu}$  es el esfuerzo resistente a la tensión especificado del acero de presfuerzo, MPa (kg/cm<sup>2</sup>)

$f_{se}$  es el esfuerzo en el acero de presfuerzo en condiciones de servicio después de pérdidas, MPa (kg/cm<sup>2</sup>)

$f_y$  esfuerzo especificado de fluencia del acero de refuerzo

$f_{yt}$  esfuerzo especificado de fluencia del refuerzo transversal, MPa (kg/cm<sup>2</sup>), y  $s$  es la separación entre barras, alambres y torones de presfuerzo, mm (cm).

Si el elemento tiene esta cantidad mínima de refuerzo transversal en el alma, la fuerza cortante que resiste el concreto se debe calcular con cualquiera de las siguientes ecuaciones. La fuerza  $P_u$ , definida como carga axial última o resistencia requerida a carga axial, N (kg) en la NTC-concreto, se considera positiva si es de compresión, negativa si es de tensión y nula en el caso de vigas. Así como  $V_{CR}$  no será menor que cero. Las ecuaciones sin paréntesis son para cálculo en el sistema internacional de medidas, mientras que las que están entre paréntesis son para el cálculo en el sistema técnico.

$$V_{CR} = F_R \left( 0.17\lambda\sqrt{f_c'} + \frac{P_u}{6A_g} \right) b_w d$$

$$\left( V_{CR} = F_R \left( 0.17\lambda\sqrt{f_c'} + \frac{P_u}{6A_g} \right) b_w d \right)$$

$$V_{CR} = F_R \left[ 0.66\lambda(p)^{1/3} \sqrt{f_c'} + \frac{P_u}{6A_g} \right] b_w d$$

$$\left( V_{CR} = F_R \left[ 2\lambda(p)^{1/3} \sqrt{f_c'} + \frac{P_u}{6A_g} \right] b_w d \right)$$

donde:

$A_g$  es el área bruta de la sección transversal, mm<sup>2</sup> (cm<sup>2</sup>)

$F_R$  es el factor de resistencia con valor de 0.75 para cortante

$p$  es la cuantía del refuerzo longitudinal a tensión  $A_s / bd$

$\lambda$  es el factor de corrección por el comportamiento del concreto ligero

$p$  cuantía del refuerzo longitudinal a tensión  $A_s / b d$

El factor de reducción  $\lambda$  se debe utilizar para reducir las propiedades mecánicas del concreto ligero en comparación con la del concreto de peso normal de la misma resistencia a la compresión como lo marca la NTC-Concreto. El valor de  $\lambda$  debe determinarse según la **Tabla 1. 3** con base en el equilibrio  $W_c$  (densidad de equilibrio del concreto ligero,  $\text{kg/m}^3$ ) de la mezcla de concreto utilizada en el diseño, aunque también se aceptan los valores de la **Tabla 1. 4** con base en la composición del agregado en la mezcla de concreto empleado en el diseño.

**Tabla 1. 3.** – Valores de  $\lambda$  para concreto ligero con base en la densidad de equilibrio  $W_c$ .

$W_c$ ( $\text{kg/m}^3$ ) (ASTM C 567)	$\lambda$
$\leq 1\ 600$	0.75
$1\ 600 < W_c \leq 1\ 900$	$0.00052 W_c \leq 1$
$> 1\ 900$	1.0

**Tabla 1. 4.** - Valores de  $\lambda$  para concreto ligero con base en la composición de los agregados.

Concreto	Composición de los agregados	$\lambda$
Todos ligeros	Fino: ASTM C 330M Grueso: ASTM C330M	0.75
Ligero, mezcla fina	Fino: Combinación de ASTM C 330M y ASTM C 33M Grueso: ASTM C330M	0.75 a 0.85 [1]
Arena ligera	Fino: ASTM C 33M Grueso: ASTM C330M	0.85
Arena ligera, mezcla gruesa	Fino: ASTM C 33M Grueso: Combinación de ASTM C330M y ASTM C 33M	0.85 a 1.0 [2]

[1] Se permite la interpolación lineal de 0.75 a 0.85 con base en el volumen absoluto del agregado fino de peso normal como una fracción del volumen absoluto total de agregado fino.

[2] Se permite la interpolación lineal de 0.85 a 1.0 con base en el volumen absoluto del agregado grueso de peso normal como una fracción del volumen absoluto total de agregado.

Además, se permite considerar que el valor de  $\lambda$  sea 0.75 para concreto ligero cuando no exista información precisa sobre el tipo y composición del agregado. Mientras que el valor de  $\lambda$  debe tomarse como 1.0 para concreto de peso normal.

La fuerza cortante que resiste el acero de refuerzo se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{SR} = \frac{F_R A_v f_{yt} d (\text{sen } \alpha + \cos \alpha)}{s}$$

donde:

$A_v$  deberá ser la suma de las áreas efectivas de todas las ramas de los estribos o de los alambres separados a una distancia  $s$ .

$f_{yt}$  es

$s$  es la separación medida paralela al refuerzo longitudinal

$\alpha$  es el ángulo entre el refuerzo transversal y el eje longitudinal del elemento

En caso de que el ángulo  $\alpha$  de  $90^\circ$ , es decir, que el refuerzo transversal sea perpendicular al eje longitudinal del elemento, la expresión se puede simplificar de la siguiente manera:

$$V_{SR} = \frac{F_R A_v f_{yt} d}{s}$$

La resistencia de diseño  $v_R$ , se define como la suma de resistencias del concreto y del acero de refuerzo para cortante, en el caso de que se aplique este último.

$$v_R = v_{CR} + v_{SR}$$

Teniendo en cuenta que los esfuerzos resistentes de diseño deberán ser menores o iguales a los esfuerzos producidos por las cargas factorizadas. En el caso de que se quiera calcular la separación del refuerzo transversal, con el objetivo de satisfacer una  $V_{SR}$  deseada o que el proyecto demande, basta con hacer un despeje de  $s$ , quedando la siguiente expresión

$$s = \frac{F_R A_v f_{yt} d}{V_{SR}}$$

## Conclusiones

En este capítulo, se abordó minuciosamente el comportamiento de las vigas de concreto bajo esfuerzos cortantes, incluyendo una exploración detallada de los mecanismos de resistencia involucrados y la identificación de los factores más influyentes en su desempeño. Además, se expuso la manera de calcular la resistencia a cortante de estas vigas según las NTC-Concreto vigente.

La comprensión de estos aspectos no solo enriquece la comprensión general del tema tratado en el documento, sino que también establece una base sólida y fundamentada para abordar el diseño y análisis de vigas de concreto sometidas a esfuerzos cortantes. Al integrar esta comprensión integral, podemos tomar decisiones informadas y aplicar las mejores prácticas en la ingeniería estructural, lo que garantiza la seguridad y el rendimiento óptimo de las estructuras de concreto.



# **CAPITULO**

# **2**

**Vigas de Concreto Reforzado con Fibras de  
Acero Sometidas a Esfuerzo Cortante**

## CAPITULO 2

### **Vigas de Concreto Reforzado con Fibras de Acero Sometidas a Esfuerzo Cortante**

#### **Antecedentes**

Las fibras de acero son un tipo de refuerzo tridimensional utilizado en el concreto. Se consideran un aditivo que se mezcla en toda la masa del concreto, formando parte de su matriz. Esto proporciona un mejor control del agrietamiento, tanto durante el fraguado plástico, como en el endurecimiento del concreto. Estas fibras se utilizan principalmente en aplicaciones donde se requiere resistencia a cargas significativas, como en pisos comerciales e industriales, pero también en elementos estructurales tipo viga.

Las fibras de acero son delgadas y tienen un diámetro pequeño. Se fabrican a partir de alambre trefilado de acero bajo en carbono, y se caracterizan por su alto límite elástico, que oscila entre 800 y 1500 MPa.

El uso principal de las fibras de acero se encuentra en aplicaciones de uso rudo, como pisos industriales, pistas de aeropuertos, revestimiento de túneles y estabilización de taludes mediante concreto lanzado (ya sea en vía húmeda o seca). Estas fibras aportan ductilidad al concreto y mejoran su resistencia al cortante, la fatiga y el impacto (C3, 2020).

Es importante tener en cuenta que las fibras de acero no deben agregarse como el primer elemento en la mezcla de concreto, sino que deben incorporarse en una mezcla ya elaborada. Además, se recomienda proteger los paquetes o paletas de fibras de la lluvia y la humedad. Por último, se sugiere utilizar guantes y gafas de seguridad al manejar las fibras (C3, 2020).

## Factores principales de las fibras

Es fundamental caracterizar las fibras para establecer estándares en su aplicación, dado que existe una amplia variedad de modelos disponibles. A continuación, se presentan los principales factores a considerar:

- **Material:** Aunque este documento se centra en las fibras de acero, es importante tener en cuenta que las fibras pueden estar fabricadas con diversos materiales, como acero, carbono, vidrio, polipropileno, asbesto e incluso materiales naturales, como el adobe.
- **Forma de la fibra:** Las fibras se clasifican según su forma, y en el siguiente apartado del documento se proporcionará una explicación más detallada sobre las fibras de acero.
- **Modelo comercial:** Cada empresa puede tener particularidades en cuanto al diseño y la comercialización de sus productos, por lo que es necesario tenerlas en cuenta al seleccionar las fibras.
- **Longitud ( $l_f$ ):** Se refiere a la medida de la longitud de las fibras.
- **Diámetro ( $D_f$ ):** Hace referencia al tamaño del diámetro de las fibras.
- **Relación de aspecto ( $a_f$ ):** Es un parámetro que indica la relación entre la longitud y el diámetro de la fibra.
- **Relación de volumen ( $V_f$ ):** representa el porcentaje de fibras en la mezcla de concreto. Por lo general, se manejan relaciones de volumen que van desde el 0.25% al 2%. Es importante destacar que volúmenes superiores al 2% tienden a reducir la trabajabilidad y la dispersión de las fibras, y pueden requerir un diseño especial en las mezclas o en las técnicas de colado.

## Clasificación de fibras de acero

Las fibras de acero se pueden clasificar de diversas maneras, ya sea según su composición o procedencia. Según la norma ASTM-A-820, existen varios tipos de clasificación:

- Tipo I: Las fibras de acero de tipo I son fabricadas a partir de alambre rolado en frío. Estas son las más comunes y fácilmente disponibles en el mercado.
- Tipo II: Las fibras de acero de tipo II se obtienen a partir de láminas de acero, las cuales se cortan de chapas de acero.
- Tipo III: Las fibras de acero de tipo III son producidas mediante un proceso más complejo llamado extracción de fundición. Este proceso implica el uso de una rueda giratoria que eleva el metal fundido de una superficie metálica gracias a la acción de la capilaridad. El metal fundido extraído se congela rápidamente en forma de fibras y luego se centrifuga para separarlas de la rueda. Estas fibras tienen una sección transversal en forma de medialuna.
- Tipo IV: El tipo IV incluye otros tipos de fibras de acero que no se clasifican dentro de las categorías anteriores.

Además de la clasificación según la composición o procedencia, las fibras de acero también se pueden clasificar según su forma, siendo esta la clasificación más común.

- Rectas (Straight)



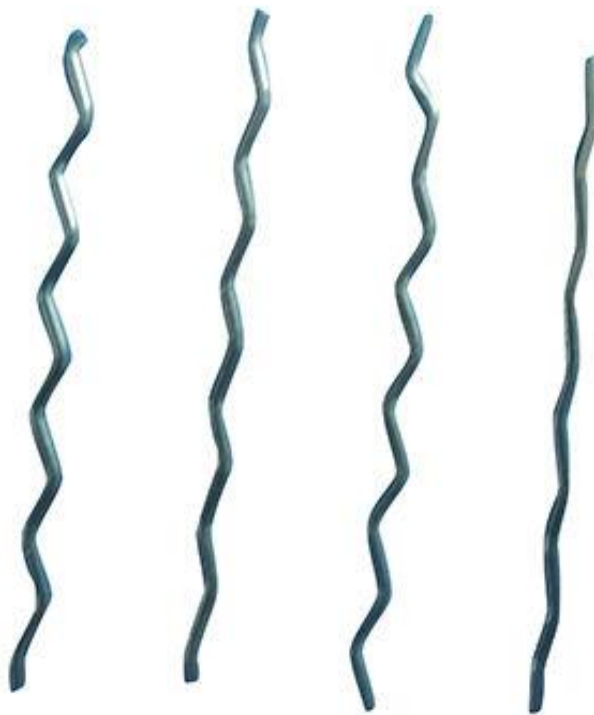
*Figura 2. 1. - Fibras de acero inoxidable rectas (Dalian HARVEST Metal Fibres Co., 2022)*

- De extremos en gancho (End hooked)



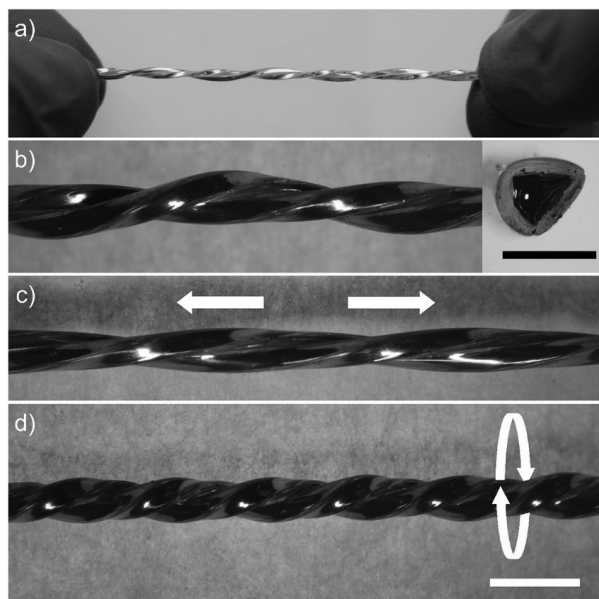
*Figura 2. 2. – Fibras de acero con extremos en gancho (Medeiros & Parente Jr., 2017)*

- Onduladas (Crimped o corrugated)



**Figura 2. 3.** – Fibras de acero con onduladas (*Yutian Zhitai Steel Fiber Manufacturing Co., Ltd, 2022*).

- Torsionadas (Twisted)



**Figura 2. 4.** - Fotografías de fibras torcidas. a) Foto de fibra sostenida en dedos. b) Par de fibras entrelazadas con un nivel de torsión de 630 radianes por metro (recuadro con barra de escala 1 mm. c)

Tensionar las fibras a 150% de tensión reduce el nivel de torsión a 420 radianes por metro. d) Una torsión adicional incrementa el nivel de torsión a 1 260 radianes por minuto con barra de escala de 2.5 mm.

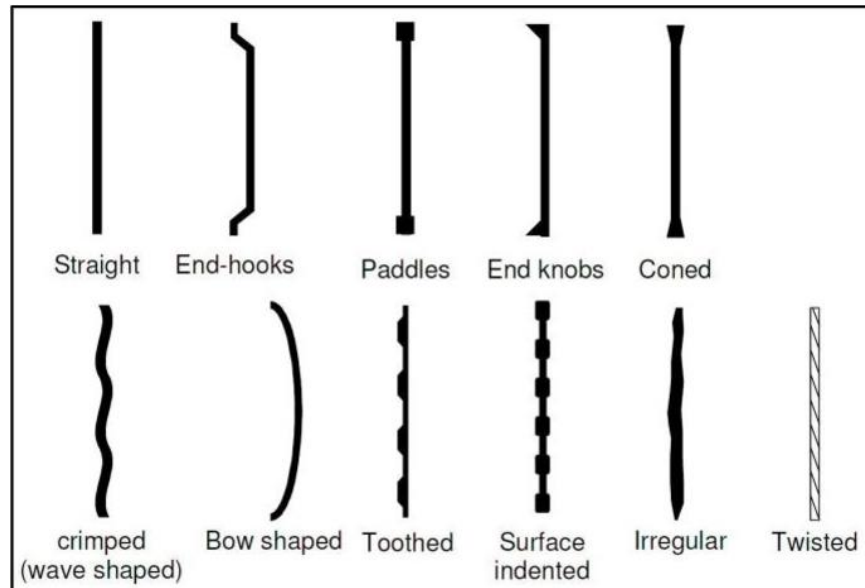
*(Cooper, Arutselvan, Liu, & al., 2017).*

- Con extremos planos o extremos en palas



*Figura 2. 5. - Fotografías de la mitad de una fibra con extremos planos (Garber, 2014).*

- Con extremos en perillas o extremos alargados (vea **Figura 2. 6.** - Ilustración con los diferentes tipos de fibra. De izquierda a derecha, de acuerdo con los nombres comerciales en español: rectas (lisas), extremos con ganchos, extremos con palas, extremos con perillas, extremos cónicos, onduladas (corrugadas), en forma de arco, dentadas (duoform), superficie indentada (doble douform), irregulares, torsionadas . )
- Con extremos en cono
- Dentadas
- Superficie indentada
- Irregulares
- En forma de arco



**Figura 2. 6.** - Ilustración con los diferentes tipos de fibra. De izquierda a derecha, de acuerdo con los nombres comerciales en español: rectas (lisas), extremos con ganchos, extremos con palas, extremos con perillas, extremos cónicos, onduladas (corrugadas), en forma de arco, dentadas (duoform), superficie indentada (doble douform), irregulares, torsionadas (*Karlovšek, Wagner, & Scheuermann, 2012*).

- Fibra de acero de fresado (Mill-cut)

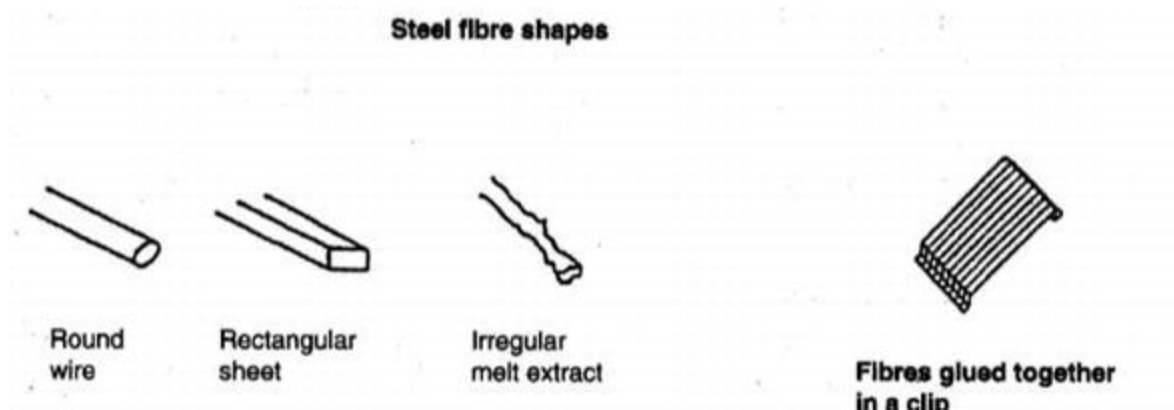


**Figura 2. 7.** – Fibras de acero de fresado (*Harex, 2014*).



Además, las fibras de acero también pueden clasificarse según su forma transversal, aunque esta clasificación se utiliza con menor frecuencia, sigue siendo válida. Algunas de las formas de clasificación incluyen:

- Redondas: Son fibras de acero con sección transversal circular.
- Hoja rectangular: Se refiere a fibras de acero con una forma transversal rectangular o de hoja.
- Extracto de fusión irregular: Estas fibras de acero tienen una forma transversal irregular que resulta del proceso de extracción de fusión descrito anteriormente.
- Paquetes de fibras pegadas: Esta clasificación se aplica a fibras de acero que se agrupan y se adhieren entre sí formando paquetes o haces.



**Figura 2. 8.** - Ilustración de perfiles fibras, de izquierda a derecha: redonda, hoja rectangular, extracto de fusión irregular y paquetes de fibras pegadas (*Abdelmajed, 2018*).

### **Preparación de concreto reforzado con fibras de acero**

Según Lozano (2012), existen diferentes métodos para el mezclado de concreto reforzado con fibras, y la elección del método depende del tipo de trabajo, el equipo disponible y los requisitos específicos de la situación. Uno de los aspectos clave en el mezclado es lograr una dispersión uniforme de las fibras y evitar la segregación o aglomeración durante el proceso. La

tendencia a la aglomeración de las fibras en la mezcla aumenta con factores como la relación de aspecto de las fibras, la relación de volumen, el tamaño máximo y la granulometría del agregado, así como el método de adición de las fibras.

Según las recomendaciones de la guía ACI 544.3R "Guía para especificación, mezclado, colocación y acabado del concreto reforzado con fibras de acero" (1998), existen tres métodos de manejo del concreto con fibras, los cuales se explican a continuación:

- Método de mezclado en planta: En este método, las fibras de acero se agregan a la mezcladora de concreto durante el proceso de mezclado en la planta de producción de concreto. Se asegura una dispersión uniforme de las fibras en toda la mezcla, lo que resulta en una distribución homogénea de las mismas en el concreto final.
- Método de mezclado en sitio: En este método, las fibras de acero se agregan a la mezcladora de concreto en el lugar de la obra, justo antes de verter el concreto. Se utiliza cuando es necesario ajustar las proporciones de mezcla o cuando se requiere una mayor flexibilidad en el proceso de construcción.
- Método de mezclado por lotes: En este método, las fibras de acero se mezclan por lotes separados antes de agregarlas al concreto. Se pueden mezclar las fibras con el agregado fino o con otros componentes de la mezcla, como el cemento o el agua. Este método permite un mayor control sobre la distribución de las fibras y se utiliza en proyectos que requieren características específicas en cuanto a la disposición de las fibras en el concreto.

Al igual que con el concreto convencional, las proporciones de mezcla para el concreto reforzado con fibras de acero (SFRC por sus siglas en inglés) varían según el uso final y deben ajustarse en función del rendimiento, la trabajabilidad y otros factores.

Debido a las propiedades únicas del SFRC, los requisitos de trabajabilidad o revenimiento difieren ligeramente del concreto convencional. La trabajabilidad del SFRC se determina utilizando métodos específicos, que deben especificarse en los documentos del contrato según lo indicado en la guía de ACI (1998).

Siguiendo los lineamientos del ACI (1998), al igual que el concreto tradicional, el concreto reforzado con fibras de acero emplea una variedad de proporciones de mezcla según el uso final. Debe estar especialmente proporcionado para un proyecto o seleccionado para que sea igual a una mezcla utilizada anteriormente. En cualquier caso, se debe ajustar a la proporción, trabajabilidad y otros factores.

Por las propiedades únicas del SFRC, las medidas de trabajabilidad o los requisitos de revenimiento serán algo diferentes a los del concreto convencional. La trabajabilidad del SFRC debe determinarse mediante uno de los siguientes métodos, y su uso debe especificarse en los documentos del contrato, como indica la guía del ACI (1998).

La guía del ACI (1998) también marca el tiempo de flujo a través del cono de revenimiento invertido, el cual indica que el procedimiento ASTM C 995 puede usarse para determinar la trabajabilidad del SFRC. Este aparato de prueba consta de un cono de revenimiento convencional invertido, centrado y sostenido rígidamente por soportes externos de modo que el extremo pequeño del cono esté a 4 pulgadas (100 mm) del fondo de la cubeta de rendimiento de 1 [ft<sup>3</sup>] (0.02832 [m<sup>3</sup>]) (ASTM C 29). El cono de asentamiento se llena sin apretar con una

muestra de concreto sin compactar. La prueba usa un vibrador conforme a ASTM C 31 o ASTM C 192 con una sonda de  $1 \pm 1/8$  [pulg.] ( $23 \pm 3$  [mm]) de diámetro. Se permite que la sonda del vibrador en funcionamiento caiga por su propio peso a través del concreto en el cono de revenimiento hasta el fondo de la cubeta y que su extremo descansa en el fondo de ésta. El tiempo transcurrido desde que el vibrador hace contacto por primera vez con la mezcla de concreto hasta que el cono de revenimiento se vacía por primera vez se registra como tiempo de cono de revenimiento invertido, el cual debe permanecer para SFRC, preferentemente, en un intervalo de 10 a 30 segundos.

Es importante tener en cuenta que estos tiempos pueden variar dependiendo de la mezcla. Los cambios en la longitud y cantidad de fibras, el contenido de cemento, arena y aire, la forma de los agregados y otros factores pueden influir en el tiempo aceptable. Esta prueba no es aplicable al concreto que fluye libremente a través del cono.

La guía mencionada también destaca que el ensayo de revenimiento puede especificarse en los documentos del contrato como una prueba para controlar la consistencia del SFRC de un lote a otro. En general, el asentamiento para el concreto reforzado con fibras de acero, según ASTM C 143, debe ser de al menos 1 pulgada, pero no superior a 4 pulgadas (25 mm a 100 mm). Sin embargo, los mismos factores que afectan el tiempo de cono de revenimiento invertido también influyen en el revenimiento. Cuando estos factores cambian, puede ser aceptable un rango diferente de revenimiento. En cualquier caso, se debe mantener la relación agua-cemento máxima especificada.

A continuación, se presentan algunas proporciones típicas utilizadas en proyectos, según se muestra en la **Tabla 2.1** extraída de ACI 544.3R (1998). En muchos casos, las fibras de acero se han agregado sin realizar cambios en las proporciones convencionales de mezcla utilizadas

por los proveedores de concreto premezclado, para cumplir con los requisitos de resistencia a la compresión del concreto. Sin embargo, cuando se utilizan cantidades elevadas de fibras por unidad de volumen, puede ser necesario realizar ajustes. Para lograr una mejor trabajabilidad del concreto, se requiere una mayor cantidad de pasta en la mezcla. Por lo tanto, la proporción de agregado fino a grueso se incrementa en consecuencia. Es importante evitar una sobre-mezcla que pueda ocasionar la formación de bolas de fibra mojadas, así como utilizar una mezcla con un exceso de agregado grueso (más de 55% del total de agregado combinado en volumen absoluto). Inicialmente, no se recomendaba utilizar agregados gruesos de más de 3/4 de [pulg] (19 [mm]) para el concreto reforzado con fibras de acero (SFRC). Sin embargo, según el trabajo de Tatro (1987) citado en la guía, se han realizado aplicaciones recientes con éxito utilizando agregados de hasta 38 [mm] (1 1/2 [pulg]) (Rettberg 1986).

	3/8-in. maximum- sized aggregate	¾-in. maximum- sized aggregate	1½-in. maximum- sized aggregate
Cement, lb/yd <sup>3</sup>	600-1000	500-900	470-700
w/c, lb/lb	0.35-0.45	0.35-0.50	0.35-0.55
Percent of fine to coarse aggregate	45-60	45-55	40-55
Entrained air content, percent	4-8	4-6	4-5
Fiber content, volume percent			
Deformed fiber	0.4-1.0	0.3-0.8	0.2-0.7
Smooth fiber	0.8-2.0	0.6-1.6	0.4-1.4
1 lb/yd <sup>3</sup> = 0.5933 kg/m <sup>3</sup> ; 1 in. = 25.4 mm; 1 steel fiber volume percent = 132.3 lb/yd <sup>3</sup> (78.5 kg/m <sup>3</sup> ).			

**Tabla 2. 1.** - Rango de proporciones para concreto reforzado con fibras de acero de peso normal (*ACI, 1998*)

Otro método para mejorar la trabajabilidad del SFRC ha sido el uso de puzolanas como cenizas volantes, escoria o humo de sílice además del cemento o como reemplazo parcial del mismo.

### **Ventajas y desventajas del uso de fibras de acero**

La incorporación de fibras en el concreto reforzado aporta diversas cualidades al material, tanto positivas como negativas. Una de las limitaciones es que, al estar distribuidas de manera aleatoria, algunas fibras pueden no estar correctamente orientadas para resistir los esfuerzos de tensión generados por las cargas aplicadas al elemento. Esto puede resultar en una orientación inadecuada de las fibras con respecto a las fisuras existentes o en una longitud embebida insuficiente para lograr una adecuada unión entre la fibra y la matriz, lo que afecta su desempeño óptimo. Según Lozano (2012), el factor de eficiencia puede ser tan bajo como 0.4 para distribuciones bidimensionales (2D) de fibras y 0.25 para distribuciones tridimensionales (3D). La distribución depende del método de aplicación, ya que el rociado resulta en una distribución 2D, mientras que los métodos de mezclado promueven una orientación 3D. Además, el factor de eficiencia también está influenciado por la longitud crítica embebida y la longitud de la fibra.

Por otro lado, las fibras presentan ventajas significativas. No requieren almacenamiento especial, mano de obra especializada, soportes o silletas, lo que reduce tanto el tiempo como los costos en una obra. Son capaces de detener el agrietamiento incipiente en cualquier punto del concreto debido a su distribución aleatoria en el material. Además, reducen el potencial de desconchamiento o astillado causado por sobrecargas, impactos o explosiones. Mejoran la dureza y la resistencia a la fatiga del concreto, lo que le permite disipar energía en situaciones sísmicas. También disminuyen la permeabilidad y evitan fugas, lo que confiere al concreto una mayor durabilidad a largo plazo. La inclusión de fibras con formas específicas también mejora la adherencia. Estas características hacen que el concreto con fibras sea adecuado para el uso en secciones muy delgadas, donde la colocación de refuerzo convencional sería complicada.

### **Adherencia de fibras a la mezcla**

Según explican Swamy y Mangat (1976), la mayoría de las fibras en los compuestos fibro-reforzados presenta una adherencia parcial a la matriz del material debido a esfuerzos internos generados por la migración de la humedad durante la construcción y los posibles cambios de volumen en la matriz. Como resultado, existe una amplia variación en la resistencia de adherencia entre las fibras y el material, la cual puede verse afectada en pruebas específicas o fenómenos como el agrietamiento. La separación de las fibras generalmente ocurre en situaciones de flexo-tensión cuando se produce una diferencia de deformación.

Cuando una fibra está parcialmente adherida, es probable que los esfuerzos límite sean críticos en los extremos de la región no adherida. Sin embargo, la presencia de discontinuidades dificulta y vuelve poco confiables las predicciones teóricas exactas. La magnitud de los esfuerzos y la ubicación de los valores máximos y mínimos de esfuerzo dependerán del grado de interacción entre la fibra y la matriz. Además, la magnitud del esfuerzo se ve influenciada por el módulo relativo de Young y las relaciones de Poisson, especialmente en las áreas de contacto. El mecanismo de ruptura de la interfaz entre las fibras y la matriz contribuye directamente y, a menudo, inicia el proceso de falla del material compuesto.

La unión entre las fibras y la matriz es el resultado de una combinación de adhesión, fricción y entrelazado mecánico, y en algunos casos pueden existir interacciones químicas a lo largo del tiempo debido a reacciones superficiales. Sin embargo, es importante tener en cuenta que un aumento en la fuerza de unión no siempre implica un aumento proporcional en las propiedades de resistencia a la tensión. Por ejemplo, las ventajas de una mayor adherencia, como las que se obtienen con fibras de formas irregulares, radican en el aumento de la resistencia del

material compuesto frente a deformaciones y cargas dinámicas, lo que resulta en una mayor rigidez.

Dado el carácter de la unión en las caras en los compuestos de fibrocemento, no existe una prueba que pueda evaluar de manera precisa la fuerza de unión. La prueba de extracción (pull-out) convencional se utiliza más como una medida de la unión de anclaje y no reproduce completamente el estado de tensión en la matriz del compuesto real.

Este documento se utilizó el modelo que desarrolló Stephen J. Foster (2023), de la Universidad de Nueva Gales del Sur, Australia obtenida por comunicación personal. El modelo plantea factores para tres tipos de fibra: lisas, onduladas y con ganchos en extremos. Los factores se multiplican por la raíz cuadrada de la resistencia a compresión obtenida de cilindros de concreto fibro-reforzado. Así, se presenta el modelo:

$$\tau = F_b \cdot \sqrt{f_{cm}'}$$

donde  $\tau$  es el esfuerzo de unión entre caras,  $F_b$  el factor que para fibras rectas es 0.4, para fibras onduladas 0.6 y para fibras con ganchos en extremos es 0.8 y, por último,  $f_{cm}'$  es la resistencia a compresión de cilindros de concreto fibro-reforzado.

### **Mecanismos de falla**

En los materiales reforzados con fibras, se pueden identificar varios mecanismos de falla que incluyen:

- **Delaminación:** Se refiere al modo de falla en el cual el material se fractura en capas.

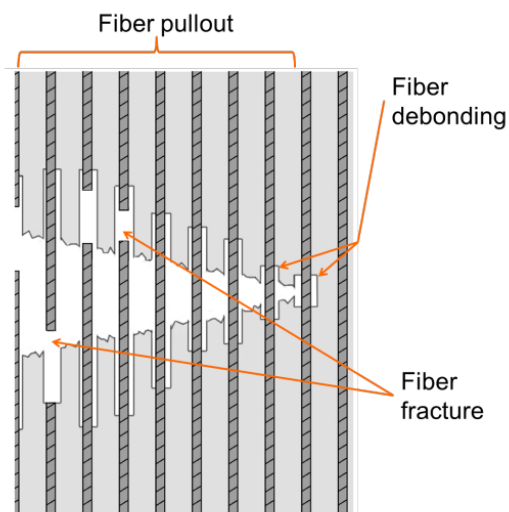




**Figura 2. 9.-** Fibro-compuesto que muestra falla por delaminación (*Wikipedia, 2022*).

- Agrietamiento de la matriz intralaminar: Ocurre cuando se forman grietas dentro de la matriz del material.
- División longitudinal de la matriz: Consiste en la separación o división longitudinal de la matriz del material.
- Despegue de la interfaz entre fibras y matriz: Se produce cuando la unión entre las fibras y la matriz se debilita, lo que puede llevar al desprendimiento de las fibras.
- Fractura de la fibra: Corresponde a la ruptura o fractura de las propias fibras utilizadas en el material reforzado
- Extracción de la fibra (Pull-out): Este mecanismo de falla se debe a una unión débil entre la fibra y la matriz, lo que resulta en la extracción o separación de la fibra del material.

Es importante tener en cuenta estos diferentes mecanismos de falla al analizar y diseñar materiales reforzados con fibras, ya que cada uno de ellos puede influir en la resistencia y durabilidad del material.



**Figura 2. 10.-** Representación gráfica de la extracción de fibra (pull-out), despegue de la interfaz fibra-matriz (debonding) y la fractura de fibra (fracture) (*Böhrk, 2017*)

### ***Pull-out***

El mecanismo de extracción de la fibra, también conocido como pull-out, es ampliamente estudiado en el concreto reforzado con fibras. Según Isla, Ruano y Luccioni (2015), en el caso de fibras rectas y lisas alineadas con la dirección de extracción, la resistencia se desarrolla a través de la adhesión y fricción en la interfaz entre las fibras y la matriz. Sin embargo, en el caso de compuestos de concreto de alto rendimiento, no se logra alcanzar la resistencia suficiente para cumplir con las demandas requeridas. En estos casos, se suelen utilizar fibras con formas irregulares que permiten un anclaje mecánico, aunque esto requiere desplazamientos más grandes y la activación de dicho mecanismo. El anclaje mecánico es crucial para mejorar la tenacidad, la capacidad de absorción de energía y el desarrollo de múltiples fisuras.

Las fibras con ganchos en los extremos también proporcionan resistencia a la extracción a través de la adhesión y la fricción, pero además ofrecen un efecto local en los extremos de la fibra que aumenta la resistencia a la extracción. La contribución del gancho depende principalmente de su deformación, la cual está relacionada con las propiedades de la fibra y la geometría del gancho, como el ángulo de inclinación, el diámetro de la fibra y la longitud del gancho.

Por otro lado, la resistencia a la extracción también depende de la inclinación de la fibra. Según Isla, Ruano y Luccioni (2015), las fibras dúctiles con bajo módulo de elasticidad pueden flexionarse fácilmente y funcionar como barras, lo que induce una fuerza de extracción adicional que compensa la reducción causada por la inclinación de la fibra. En cambio, las fibras frágiles con alto módulo de elasticidad pueden generar esfuerzos durante la flexión, que, junto con los esfuerzos de tensión, pueden provocar fallas prematuras en las fibras, reduciendo la eficiencia del compuesto. La respuesta a la extracción también depende de la capacidad de la matriz en las cercanías de las fibras para soportar la flexión local adicional sin agrietarse.

La carga posterior al pico y la capacidad de absorción de energía son características que dependen de la inclinación de la fibra. Según las pruebas de extracción realizadas por Y. Lee, S.T. Kang y J.K. Kim (2010) y V.M. Cunha (2010), las fibras con una inclinación de  $30^\circ$  y  $45^\circ$  muestran un aumento en la resistencia en comparación con las fibras alineadas con el eje de aplicación de la fuerza de extracción. Sin embargo, la fuerza de extracción disminuye para inclinaciones mayores. Además, en matrices de alta resistencia, las fibras pueden comportarse de manera frágil y pueden presentarse modos de falla en la matriz que reducen la capacidad de absorción de energía durante las pruebas de extracción.

Según Isla, Ruano y Luccioni (2015), se ha observado que, bajo ciertas condiciones, las fibras con ganchos en los extremos o en general, fibras deformadas, pueden fallar durante el proceso de extracción. Existen dos casos de falla en las fibras: total o parcial. Cuando la falla ocurre fuera del concreto o de la matriz, se considera una falla total, ya que la fuerza de extracción no puede seguir siendo transmitida a la matriz. Por otro lado, cuando la falla ocurre en la parte embebida de la fibra, se conoce como una falla parcial, ya que parte de la región embebida se pierde, pero la otra parte sigue transfiriendo cargas a la matriz.

### **Pruebas para Pull-Out**

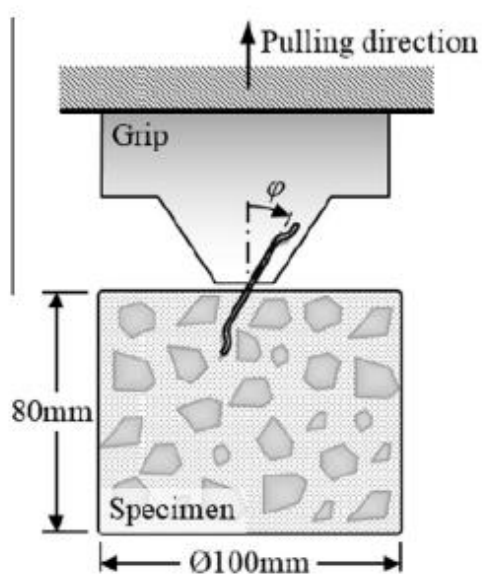
El arreglo utilizado por Isla, Ruano y Luccioni (2015) para realizar las pruebas de extracción de fibra se describe a continuación como ejemplo de un posible método, sin descartar otras configuraciones o métodos.

Los investigadores utilizaron especímenes cilíndricos para las pruebas de extracción. Las dimensiones de los especímenes se determinaron considerando el tamaño máximo del agregado grueso. En la Figura 2. 11.- Arreglo de extracción de fibra **Figura 2. 11** se muestra un esquema del caso con una fibra inclinada  $\varphi$ , donde la mitad de la longitud de la fibra está embebida. Se probaron inclinaciones de  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $60^\circ$ , que abarcan discretamente el rango de  $0^\circ \leq \varphi < 90^\circ$ , valores similares a los utilizados en otros estudios de extracción.

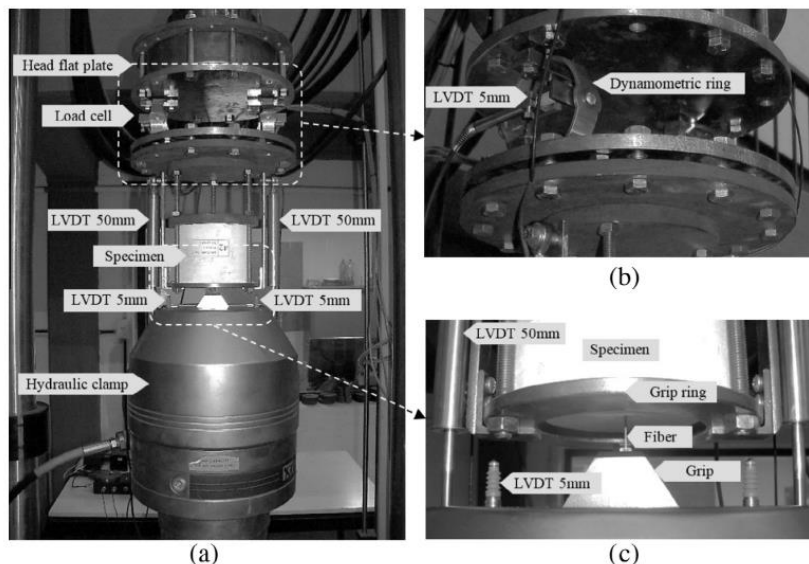
Para las pruebas, se empleó una máquina hidráulica servocontrolada y, por razones operativas, las probetas se probaron al revés. El extremo libre de la fibra se sujetó con una mordaza hidráulica inferior, mientras que en el otro extremo se utilizó una mordaza especialmente diseñada para ejercer fuerza ascendente sobre el cuerpo de la muestra.

Se empleó una celda de carga compuesta por dos anillos dinamométricos con un transformador diferencial de variable lineal (LVDT, por sus siglas en inglés) para el registro de datos. Se colocaron LVDT con un rango de 50 mm y una sensibilidad de 5  $\mu\text{m}$  en ambos lados del espécimen para medir los desplazamientos. Se calculó el promedio de los desplazamientos medidos por los dos anillos. Además, se mantuvo una separación de 1 mm entre el borde de la mordaza utilizada para sujetar las fibras y la superficie del espécimen. Se utilizó un sistema externo de adquisición de datos compuesto por tarjetas de datos USB-1616FS, una computadora portátil y un software de adquisición y monitoreo.

Durante las pruebas, se aplicó un control de desplazamiento. En los experimentos realizados por Isla, Ruano y Luccioni (2015), la tasa de desplazamiento fue de 5  $\mu\text{m}/\text{min}$  hasta alcanzar los 50  $\mu\text{m}$ . Luego, la velocidad de la prueba se incrementó a 100 [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ] hasta llegar a un desplazamiento de 1000  $\mu\text{m}$ , y finalmente, se aumentó la velocidad a 500 [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ] hasta alcanzar un desplazamiento total de 25,000  $\mu\text{m}$ .



**Figura 2. 11.-** Arreglo de extracción de fibra (Isla, Ruano, & Luccioni, 2015).

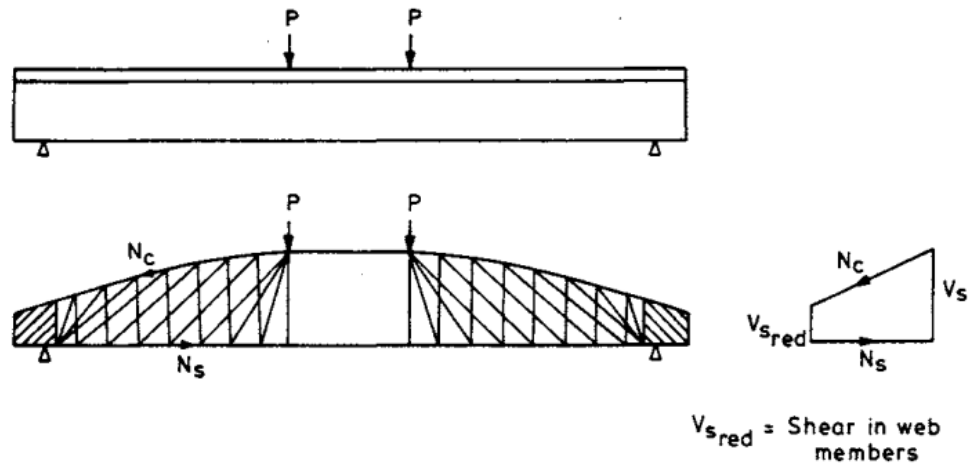


**Figura 2. 12.-** Arreglo de extracción de fibra con instrumentos de medición (Isla, Ruano, & Luccioni, 2015).

## Comportamiento de Vigas de Concreto Reforzamiento con Fibras de Acero Trabajando a Cortante

### Modelo de Swamy

Swamy et al. (1993) propusieron un modelo para el análisis de la falla por esfuerzo cortante en el concreto reforzado con fibras. Este modelo se basa en una armadura o celosía con inclinación variable de la zona de compresión y los puntales de compresión, como se ilustra en la **Figura 2. 13**. La resistencia al cortante se compone de la contribución  $V_w$ , que representa la resistencia de la matriz de refuerzo ( $w$  por “web”, alma en inglés), y del alma de compresión inclinada, que tiene en cuenta la reducción de las fuerzas de tensión en la matriz debido a que la inclinación de los puntales es menor que  $45^\circ$ . Este modelo es válido tanto para concreto simple como para concreto con fibras, ya que la adición de fibras de acero tiene poco efecto en la resistencia a compresión del concreto, lo que permite establecer esta analogía.

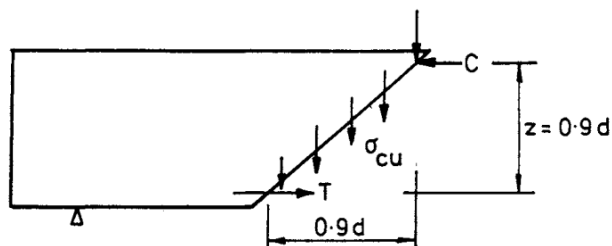


**Figura 2. 13.** - Modelo de celosía generalizado con inclinación variable de zona de compresión y de los puntales. (Swamy, Jones, & Chiam, 1993)

Swamy et al. (1993) explican que como en el caso de refuerzo transversal convencional, la contribución de las fibras de acero después de la formación de grietas por cortante es aproximada suponiendo que la inclinación de la grieta es de  $45^\circ$  en la matriz como se aprecia en la **Figura 2. 14**. Por lo tanto,  $V_w$  esta dado por:

$$V_w = 0.9\sigma_{cu} \cdot b_w \cdot d$$

donde  $\sigma_{cu}$  es la resistencia a tensión después del agrietamiento del concreto reforzado con fibras, la cual se puede aproximar con 0.8 del esfuerzo máximo alcanzado,  $b_w$  es el ancho de la viga de concreto, también llamado alma o costilla del miembro, y la  $d$  es el peralte efectivo de la viga.



**Figura 2. 14.-** Modelo de celosía generalizado con inclinación variable de zona de compresión y de los puntales (Swamy, Jones, & Chiam, 1993).

La contribución del concreto está dada por:

$$V_c = 3.75\tau_R \cdot b_w \cdot d$$

donde  $\tau_R$  es la resistencia a cortante del concreto que depende de su resistencia a compresión calculada según el reglamento del ACI 318-99, capítulo 22. Para claros de cortante cortos,  $V_c$  puede ser incrementado por el factor  $2d/a_v$ , donde  $a_v/d$  es la relación entre el claro de cortante y el peralte efectivo. Existe un límite para la fuerza de compresión en los puntales inclinados, donde el límite se calcula con la expresión  $0.3 f'_c \cdot b_w \cdot d$ , donde  $f'_c$  es la resistencia a compresión calculada de cilindros de concreto. Dicho esto, se tiene:

$$V_w + V_c = 0.9\sigma_{cu} \cdot b_w \cdot d + 3.75\tau_R \cdot b_w \cdot d$$

$$\tau_R = 0.35\sqrt{f'_c} \text{ [MPa]}$$

La resistencia a tensión después del agrietamiento del concreto reforzado con fibras está basado en la pauta de mezclas compuestas que propuso el mismo Swamy en conjunto con Mangat en 1974. La expresión de cálculo desprecia la contribución de esfuerzo de la matriz de concreto y está dada por:

$$\sigma_{cu} = \eta_0 \cdot \eta_L \cdot \sigma_{fu} \cdot V_f$$



donde,  $\eta_0$  es el factor de orientación de las fibras,  $\eta_L$  es el factor de eficiencia de longitud de las fibras,  $\sigma_{fu}$  el esfuerzo de fractura de las fibras y  $V_f$  es la relación de volumen de las fibras.

El factor de orientación para fibras orientadas de manera aleatoria se considera como 0.41. En miembros con alma delgada, este factor puede ser mayor, pero se desprecia dicho posible incremento. El factor de eficiencia de longitud está basado en el trabajo de Laws (1971). Entonces, para la longitud de fibra  $l_f \leq$  longitud crítica  $l_c$

$$\sigma_{cu} = 0.41 \tau \cdot \frac{l_f}{d_f} \cdot V_f$$

Y para  $l_f > l_c$

$$\sigma_{cu} = 0.41 \left( 1 - \frac{\sigma_{fu}}{4\tau} \cdot \frac{d_f}{l_f} \right) \cdot \sigma_{fu} \cdot V_f$$

donde  $d_f$  = diámetro de la fibra,  $\tau$  =esfuerzo de adherencia (bond stress) entre la matriz de concreto y las fibras, y  $\sigma_{fu}$  es la resistencia a la tensión o tensión ultima.

Según el estudio de Swamy, se determinó el promedio de la resistencia de unión a partir de pruebas de resistencia a la flexión, obteniéndose valores de 3.92 N/mm<sup>2</sup> para vibración externa y 4.04 N/mm<sup>2</sup> para vibración interna. La resistencia a tensión después del agrietamiento ( $\sigma_{cu}$ ) fue entonces computado como 1.61 N/mm<sup>2</sup> y 1.65 N/mm<sup>2</sup> para especímenes vibrados externa e internamente.

Para conocer la longitud crítica,  $l_c$ , es necesario resolver la ecuación planteada por Swamy y Mangat (1974):

$$l_c = \sigma_{fu} \cdot \frac{d_f}{2\tau}$$

En el caso de que el elemento cuente con acero transversal de refuerzo, se puede sumar el aporte de los estribos mediante una ecuación que calcule el aporte a la resistencia de dicho refuerzo. En el caso de México, puede ser la ecuación propuesta por las normas NTC-2023.

### ***Modelo de Sharma***

Según el informe del Comité ACI 544 (1999), Sharma (1986) realizó pruebas en siete vigas reforzadas con fibras de acero, de las cuales cuatro también incluían estribos. Estas fibras tenían extremos deformados. Basándose en estas pruebas, así como en los estudios de Batson et al. (1972) y Williamson y Knab (1975), Sharma propuso la siguiente ecuación para predecir el esfuerzo cortante promedio  $v_{cf}$  en las vigas de concreto reforzadas con fibras de acero. Es importante destacar que, como se indica en el informe del ACI 544 (1999), se corrigió un error tipográfico en el artículo de Sharma de 1986.

$$v_{cf} = \frac{2}{3} f'_t \left( \frac{d}{a} \right)^{0.25}$$

donde  $f'_t$  es la resistencia a la tensión del concreto obtenidos de pruebas de tensión indirecta de cilindros de 6 x 12 pulg. (150 x 300 mm, y  $\frac{d}{a}$  es la relación de peralte efectivo con la distancia desde el punto de aplicación de la fuerza concentrada al punto de apoyo. Además, en el análisis se tomaron en cuenta fibras rectas, onduladas y de extremos deformados, y se encontró que la relación promedio entre el esfuerzo cortante experimental y el esfuerzo cortante calculado fue de 1.03, con una desviación media de 7.6%. La influencia de diferentes tipos y cantidades de fibras se considera a través de su impacto en el parámetro  $f'_t$ . El enfoque de diseño propuesto sigue el método de ACI 318 para calcular la contribución de los estribos a la capacidad de corte.

Al igual que con el modelo de Swamy et al. (1993), Si el elemento cuenta con refuerzo de acero transversal, es posible agregar el efecto de los estribos utilizando una ecuación que permita calcular su contribución a la resistencia total del refuerzo.

## **Conclusiones**

A lo largo de todo el capítulo se ha evidenciado que las fibras aportan propiedades sumamente importantes al concreto, las cuales pueden tener un impacto significativo en su desempeño. Aunque su uso no es todavía tan común en la práctica, existe la posibilidad de que en el futuro se vuelvan más recurrentes. El manejo de las fibras no es complicado, lo que puede resultar en ahorros sustanciales de tiempo y dinero durante la construcción.

Además, a medida que el uso de fibras se generalice, es probable que su costo se vuelva más económico. Esto sería especialmente beneficioso, ya que las fibras podrían ofrecer una alternativa más viable desde el punto de vista económico.

En ciudades como la de México, donde los terremotos son frecuentes, la ductilidad que proporciona el concreto reforzado con fibras adquiere una importancia crucial. Esta característica confiere mayor seguridad a las personas que utilizan las estructuras, ya que brinda un mayor tiempo de reacción en caso de que ocurra algún fallo en la estructura, así como una mayor capacidad de deformación. Como resultado, se podrían salvar más vidas en situaciones de emergencia.

En resumen, el uso más amplio de fibras en el concreto puede tener múltiples beneficios, tanto en términos de rendimiento de las estructuras como en términos de seguridad y costos. A medida que se avanza en la investigación y se amplía la aplicación práctica de las fibras, es

probable que se desarrolle un escenario favorable para su adopción más generalizada en la construcción.

# CAPITULO

# 3

**Base de datos**

## **CAPITULO 3**

### **Base de Datos**

En este capítulo, se presenta una descripción detallada de la base de datos que se utilizó para analizar vigas reforzadas con fibras de acero. Se explica el procedimiento que se siguió para recopilar los datos, así como un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos.

La recopilación de los datos fue posible gracias a la colaboración del Dr. Julián Carrillo de la Universidad Militar Nueva Granada, el Dr. Sergio Manuel Alcocer Martínez de Castro del Instituto de Ingeniería, y la Ing. Bibian Isabel Silva y del autor. Se utilizaron artículos previamente disponibles y aquéllos encontrados en bases de datos académicas.

En este capítulo se proporcionará información detallada sobre las características de las vigas analizadas, como el tipo de fibras de acero utilizadas, las propiedades del concreto, las dimensiones de las vigas y los detalles de su refuerzo.

Posteriormente, se presentará un análisis completo de los resultados obtenidos a partir de la base de datos. Se explorarán aspectos relevantes como la resistencia a esfuerzo cortante, comparación con modelos teóricos, y otros parámetros de desempeño de las vigas reforzadas con fibras de acero.

En resumen, este capítulo brinda una visión completa de la base de datos utilizada en el análisis de vigas reforzadas con fibras metalizadas. Los datos recopilados con la colaboración de expertos en el campo y la búsqueda en bases de datos académicas proporcionan una sólida base para el análisis y la discusión de los resultados.

## Descripción de la Base de Datos

### *Campos de la base de datos*

En la base de datos se influyen los resultados obtenidos por diversos autores alrededor del mundo. Se obtuvieron de 83 diferentes artículos que hablan del refuerzo de vigas con fibras y cuenta con 755 especímenes. La base de datos cuenta con diversas divisiones y subdivisiones en donde se cuenta con datos específicos de las divisiones principales. Las divisiones con sus respectivas subdivisiones y explicaciones son las siguientes:

- Document: división dedicada al documento y sus cualidades.
  - Article: nombre del artículo.
  - Author: Autor del artículo
  - No. Specimen: número de especímenes extraídos del artículo.
- Main data: datos más relevantes de los especímenes.
  - Specimen: Nombre asignado a cada espécimen.
  - $v_{u,experimental}$ : esfuerzo cortante máximo experimental.
  - $V_{u,experimental}$ : fuerza cortante máximo experimental
- Specimen properties: división donde se expresan las propiedades de los especímenes.
  - Section: forma de la sección transversal del espécimen.
  - $a$ : distancia desde el punto de aplicación de la fuerza concentrada al punto de apoyo.
  - $b$ : ancho de la sección transversal del espécimen.
  - $h$ : peralte completo del espécimen.
  - $d$ : peralte efectivo del espécimen.

- $z$ : brazo de palanca calculado como 0.9 veces el peralte efectivo
- $a/d$ : relación entre la distancia desde el punto de aplicación de la fuerza concentrada al punto de apoyo y el peralte efectivo.
- $\rho_L$ : cuantía de acero longitudinal a tensión.
- $A_{st}$ : área de acero longitudinal a tensión en el espécimen.
- $A_{ptop}$ : área de acero longitudinal presforzado a tensión en parte superior del espécimen.
- $A_{pbot}$ : área de acero longitudinal presforzado a tensión en parte inferior del espécimen.
- $A_g$ : área transversal del espécimen.
- $A_{ct}$ : área transversal del espécimen a la mitad del peralte.
- $P_{e-bot}$ : suma de las fuerzas de presfuerzo en parte inferior del espécimen.
- $P_{e-top}$ : suma de las fuerzas de presfuerzo en parte superior del espécimen.
- $e_{bot}$ : excentricidad en parte inferior.
- $e_{top}$ : excentricidad en parte superior.
- $\sigma_{bot}$ : esfuerzo debido al presfuerzo en el espécimen.
- Long. Reinf: división que describe características del acero de refuerzo longitudinal en el espécimen.
  - $f_{sy}$ : resistencia a fluencia del acero de refuerzo longitudinal
  - Remark: anotaciones del acero longitudinal de refuerzo.
- Trans. Reinf: división donde se especifica si existió refuerzo transversal o no, y se expresan sus propiedades en caso de haber existido.



- *Yes, no*: columna auxiliar que marca si existió refuerzo transversal, *yes* para cuando había y *no* para cuando no.
- $f_{sy}$ : resistencia a fluencia del acero de refuerzo transversal.
- $\rho_t$ : cuantía de acero transversal en el espécimen.
- $S$ : distancia entre estribos.
- $S_{ext}$ : distancia entre estribos en el extremo del espécimen.
- $A_{st}$ : área de acero de refuerzo transversal en sección transversal.
- Concrete Properties: división donde se manifiestan las diferentes resistencias de los concretos de los especímenes, el módulo elástico y una columna auxiliar.
  - $f_{cu,0}$ : resistencia a compresión de cubos de concreto sin fibras.
  - $f_{c0}$ : resistencia a compresión de cilindros de concreto sin fibras.
  - $f_{cu}$ : resistencia a compresión de cubos de concreto con fibras.
  - $f_{cm}$ : resistencia a compresión de cilindros de concreto con fibras.
  - $f_{sp}$ : resistencia a tensión de cilindros de concreto con fibras
  - $f_{cf}$ : módulo de ruptura de concreto con fibras
  - $E_c$ : módulo de elasticidad del concreto.
  - $f_{c0} - f_{cm}$  *ratio*: relación entre resistencia a compresión de concreto sin fibras y con fibras de datos conocidos.
- Steel Fiber Properties: división donde se especifican las propiedades de las fibras de concreto.
  - Material: material del que están compuestas las fibras.
  - Fiber: se expresa la forma de la fibra vista de manera.
  - $l_f$ : longitud de la fibra.

- $d_f$ : diámetro de la fibra.
  - $a_f$ : relación de aspecto de la fibra, calculado como la relación entre la longitud y su diámetro.
  - $b/l_f$ : relación entre el ancho de la viga y la longitud de la viga.
  - $V_f$ : relación de volumen, la cual es el porcentaje del volumen de fibras en la mezcla de concreto.
  - $f_{yf}$ : esfuerzo de fluencia del material de la fibra.
  - $\sigma_{fu}$ : esfuerzo de tensión último de la fibra.
- Failure Mode: modo de falla

### **Análisis de Base de Datos**

El análisis de la base de datos se llevó a cabo considerando las vigas que no contenían fibras, ya que se consideraron necesarias para establecer un parámetro de comparación y evaluar el impacto del refuerzo con fibras en las vigas. Es importante tener en cuenta que algunos especímenes contaban con refuerzo transversal, lo cual influye significativamente en los resultados obtenidos en esta investigación.

Para realizar un análisis más completo, se utilizaron gráficas que permitieron observar el comportamiento general de las vigas teniendo en cuenta los siguientes factores:

$f_{cm}'$  Resistencia a compresión de cilindros de concreto con fibras [MPa].

$Df$  Dosificación de fibras [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

$V_f$  Fracción de volumen de fibras [%].

$v_u$  Esfuerzo cortante último de las vigas medida en el ensayo [MPa].

- $V_u$  Fuerza cortante última de las vigas medida en el ensayo [kN].
- $a$  Distancia desde el centro del apoyo hasta el punto de aplicación de fuerza más cercano [mm].
- $h$  Peralte efectivo de la viga [mm].
- $b$  Ancho de la viga [mm].

Estos factores fueron considerados para obtener una visión más completa y detallada del comportamiento de las vigas reforzadas con fibras y su relación con los parámetros mencionados. Las gráficas permitieron analizar y comparar el desempeño de las vigas en función de estas variables, brindando información relevante para el estudio y evaluación del mejoramiento de las vigas mediante la incorporación de fibras.

En el estudio, se realizó una estandarización de la resistencia a compresión del concreto, debido a que algunos estudios reportaban la resistencia de pruebas de cubos en lugar de cilindros. Además, algunos estudios proporcionaban la resistencia del concreto con fibras, pero no incluían la resistencia del concreto sin fibras. Para abordar esta situación, se calculó inicialmente el cociente promedio entre la resistencia a compresión de cilindros de concreto con y sin fibras. Este factor se utilizó para estimar la resistencia a compresión del concreto sin fibras en las vigas que sólo contaban con la resistencia a compresión de cilindros con fibras

En el estudio, inicialmente fue necesario estandarizar la resistencia a compresión del concreto, puesto que algunos estudios reportan la resistencia de cubos en lugar de cilindros de concreto. Se utilizaron los factores de correlación establecidos por la norma NMX-C-155-ONNCCE-2014, los cuales relacionan las resistencias a compresión de cilindros de 15 cm por 30 cm con los especímenes cúbicos de diferentes dimensiones. En este estudio, se tomaron en

cuenta únicamente los factores de correlación correspondientes a cubos de 100 por 100 mm y 150 por 150 mm.

Es importante mencionar que, en la base de datos de Foster, S. (2010) ya se habían realizado conversiones de las resistencias a compresión del concreto de cubos a cilindros, así como de las pruebas de compresión del concreto con fibras a sin fibras, utilizando los mismos factores de conversión. Dichos datos no fueron alterados en el análisis.

En el presente estudio, se consideraron exclusivamente los datos obtenidos a partir de experimentos y se descartaron los datos calculados mediante modelos teóricos que no estaban dentro del alcance de este documento.

Además, se optó por realizar un análisis diferenciado para dos conjuntos específicos de vigas. En primer lugar, se examinaron las vigas que incorporan refuerzo transversal, con el fin de comparar sus características y comportamiento con aquellas que dependen únicamente del refuerzo proporcionado por las fibras. Este enfoque permitió una evaluación más detallada de cómo influye la presencia de refuerzo transversal en la resistencia y el comportamiento estructural de las vigas de concreto.

Por otro lado, se dedicó especial atención a las vigas esbeltas que experimentaron falla por esfuerzo cortante, en específico aquellas fallas donde no haya carga axial, es decir, las fallas por cortante, tensión diagonal, tensión cortante, compresión cortante y aplastamiento del alma. Este caso resulta particularmente interesante, ya que el mecanismo resistente es distinto al de las vigas peraltadas, donde la acción de arco en estas últimas impide apreciar el aumento de la resistencia a la tensión proporcionado por las fibras de acero. Aunque las vigas esbeltas que fallan por esfuerzo cortante son menos comunes en la base de datos, se consideró fundamental

analizarlas para comprender mejor su comportamiento estructural y su respuesta ante las cargas aplicadas.

### ***Metodología***

Se considera el esfuerzo cortante promedio de la sección de la siguiente manera:

$$v_u = \frac{Vu}{b * h}$$

$b =$  ancho de la viga

$h =$  peralte efectivo de la viga

Para la normalización del cortante:

$$\frac{Vu}{b * h * \gamma * \sqrt{f_c'}}$$

$\gamma =$  factor para concreto ligero o normal

$f_{cm}' =$  resistencia a compresión del concreto de cilindros con fibras

Para el factor para el concreto ligero o normal se tomará

$\gamma = 0.75$  para concreto ligero  $\rightarrow < 20$  MPa

$\gamma = 1.00$  para concreto normal  $\rightarrow > 20$  MPa

Ya que todos son de concreto tipo normal se utilizará  $\gamma = 1.00$

### ***Secciones de especímenes que se presentan en la base***

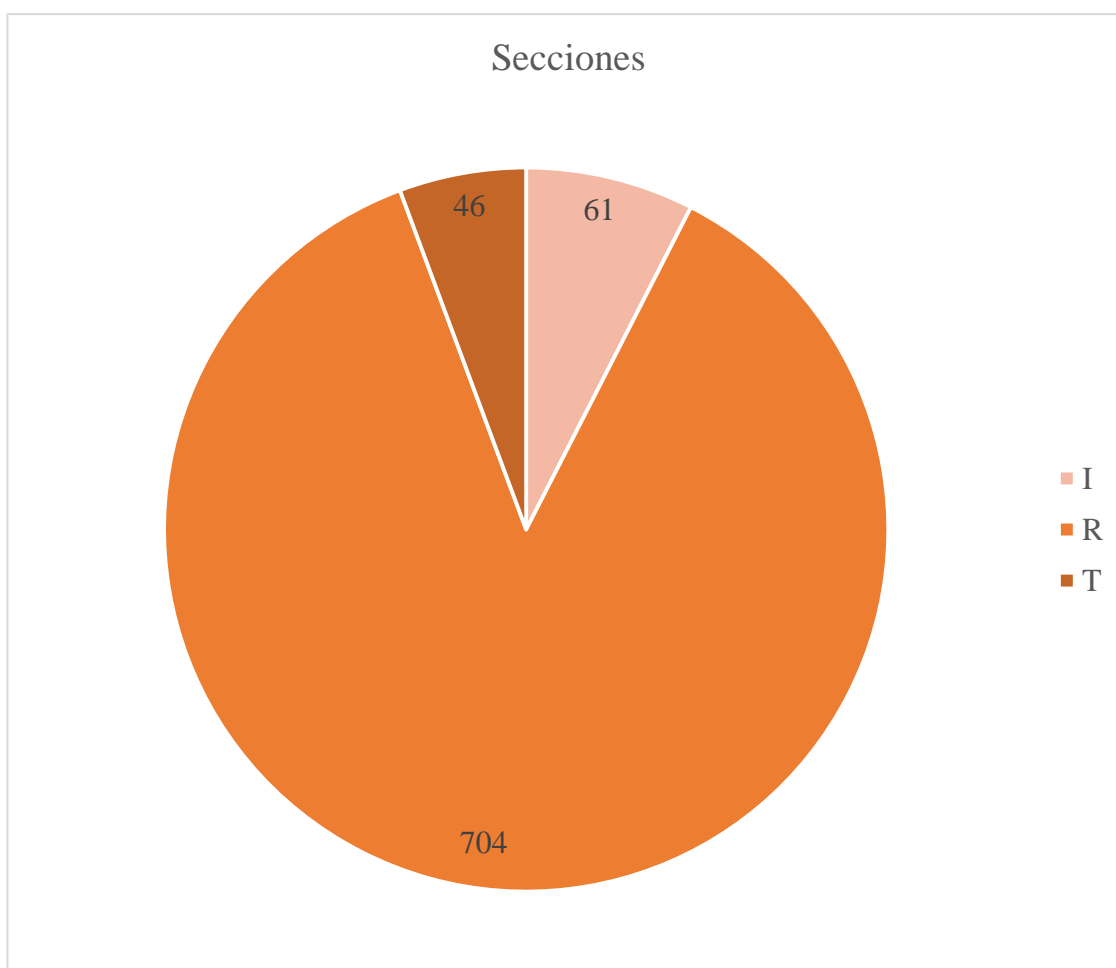
En la

Tabla 3. 1 se muestra un resumen del tipo de secciones transversales de las vigas, con las que se cuenta dentro de la base de datos. El 86.81% es de vigas con sección transversal

rectangular, 7.52% son vigas con sección tipo I y por último las vigas con sección tipo T representan 5.67%.

**Tabla 3. 1.-** Tipos de secciones transversales.

<b>Tipo de sección</b>	<b>No. de especímenes</b>	<b>%</b>
I	61	7.52%
R	704	86.81%
T	46	5.67%
<b>Total</b>	<b>811</b>	<b>100.00%</b>



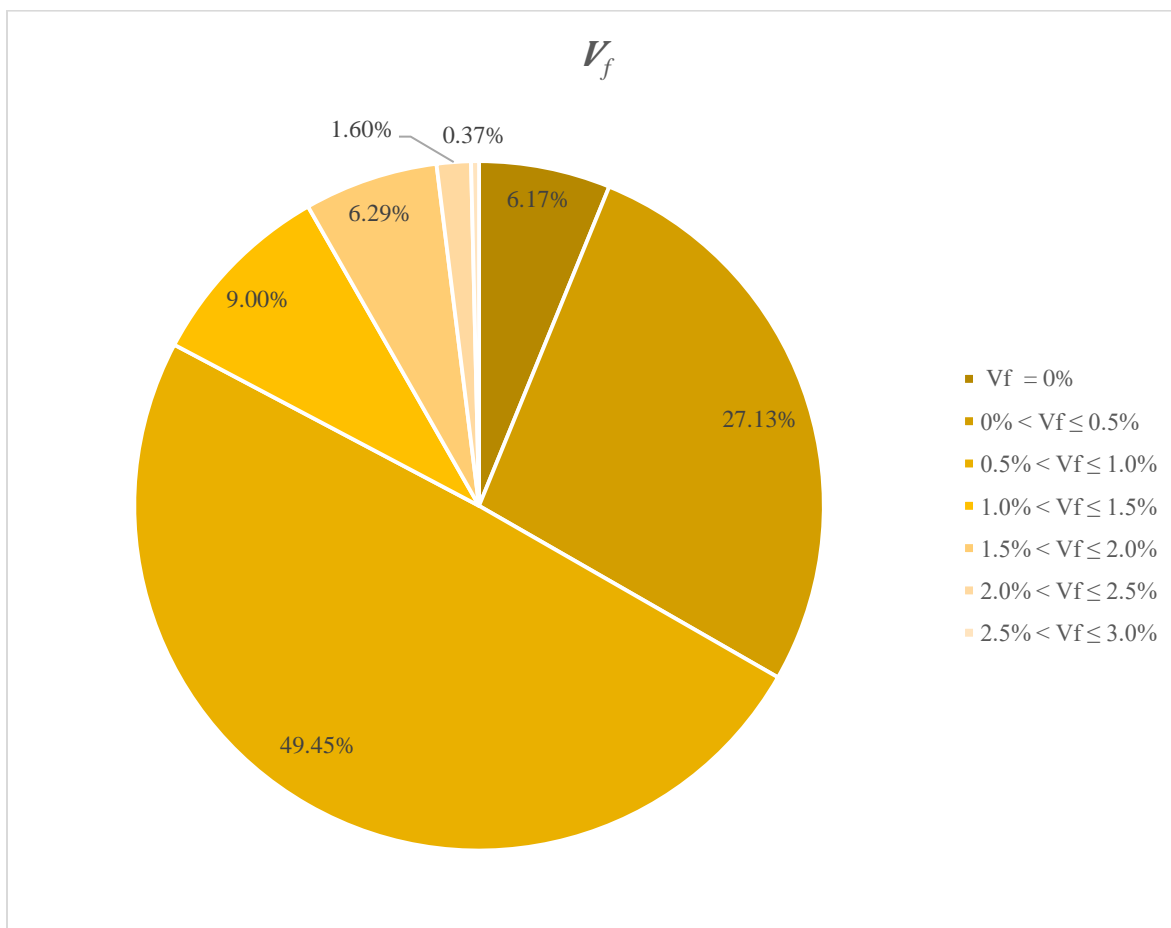
**Figura 3. 1.-** Porcentaje de tipos de secciones transversales.

**Relación entre el contenido de fibras y la resistencia al corte normalizado de la viga**

En la Error! Reference source not found. y la **Figura 3. 2**, se puede apreciar que la mayor cantidad de especímenes se encuentra en el rango de  $V_f$  mayor que 0.5% y menor o igual que 1%, representando 49.45% del total de datos. En segundo lugar, se encuentra el porcentaje de 27.13% correspondiente a  $V_f$  menor o igual que 0.5% y mayor que 0. Estos resultados destacan la prevalencia de especímenes con una concentración moderada de fibras en la base de datos analizada.

**Tabla 3. 2.-  $V_f$  de fibras en porcentaje presentes en los especímenes para todas las secciones separadas por si tienen o no refuerzo transversal.**

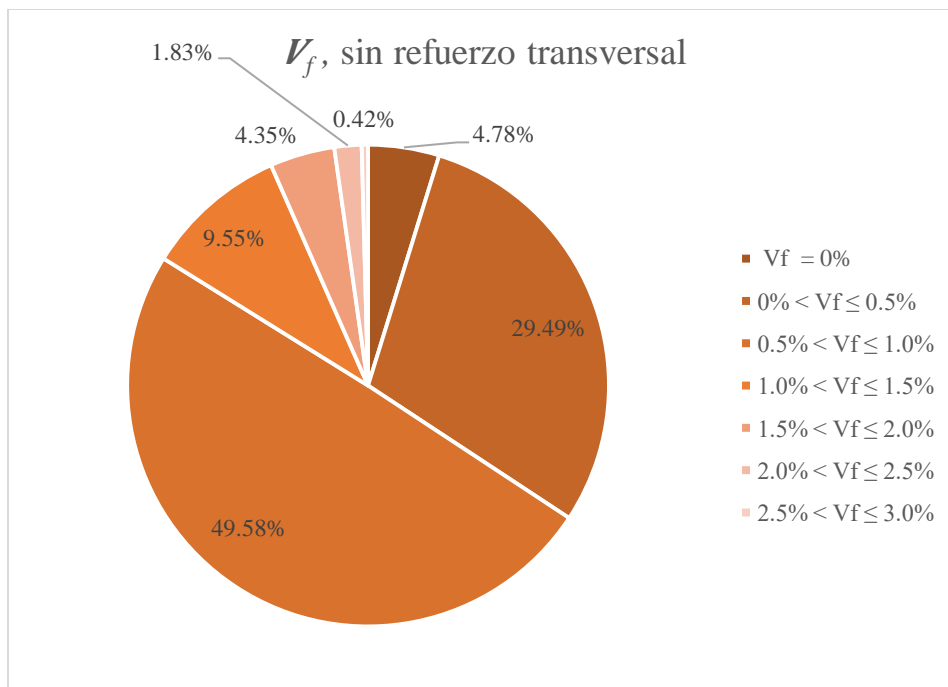
$V_f$	Refuerzo transversal				Total	
	No		Si		No.	%
	No.	%	No.	%		
$V_f = 0\%$	34	4.19%	16	1.97%	50	6.17%
$0\% < V_f \leq 0.5\%$	210	25.89%	10	1.23%	220	27.13%
$0.5\% < V_f \leq 1.0\%$	353	43.53%	48	5.92%	401	49.45%
$1.0\% < V_f \leq 1.5\%$	68	8.38%	5	0.62%	73	9.00%
$1.5\% < V_f \leq 2.0\%$	31	3.82%	20	2.47%	51	6.29%
$2.0\% < V_f \leq 2.5\%$	13	1.60%	0	0.00%	13	1.60%
$2.5\% < V_f \leq 3.0\%$	3	0.37%	0	0.00%	3	0.37%
<b>Total</b>	<b>712</b>	<b>87.79%</b>	<b>99</b>	<b>12.21%</b>	<b>811</b>	<b>100.00%</b>



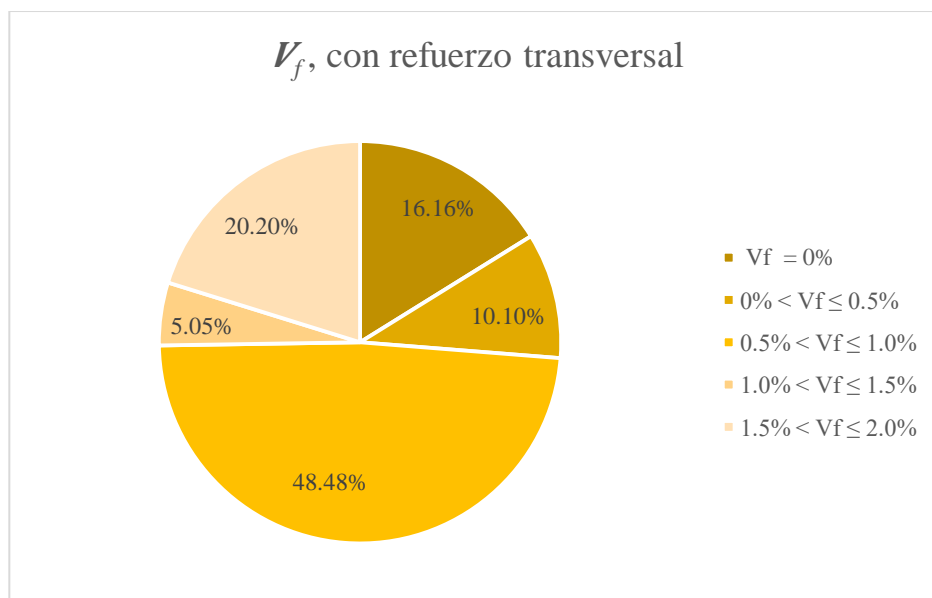
**Figura 3. 2.-  $V_f$  presentes en los especímenes.**

Por otro lado, en la **Figura 3. 3** y **Figura 3. 4** se presentan las distribuciones de  $V_f$  en los especímenes sin y con refuerzo transversal, respectivamente, donde en el caso de los especímenes sin refuerzo transversal se tiene una tendencia muy semejante a la **Figura 3. 2** que es del total de especímenes, mientras que con los especímenes con refuerzo transversal la distribución de los casos por relación de volumen es más pareja, donde varios de los porcentajes son aproximados entre ellos.





**Figura 3. 3.** -  $V_f$  presentes en los especímenes sin refuerzo transversal.



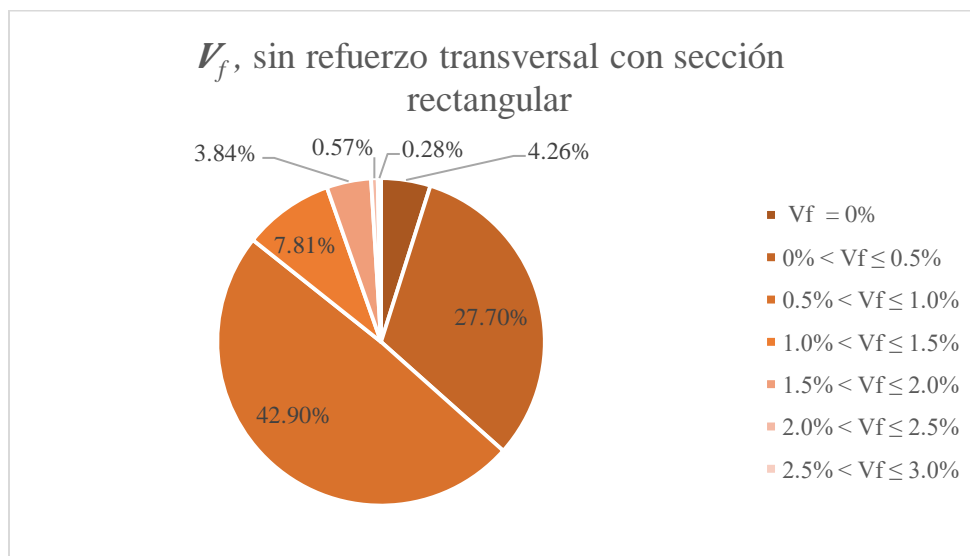
**Figura 3. 4.** -  $V_f$  presentes en los especímenes con refuerzo transversal.

Ahora, cuando se divide por secciones transversales de los especímenes, la distribución también cambia un poco. En la **Figura 3. 5** y **Figura 3. 6**, que son para secciones rectangulares, se aprecia el mismo fenómeno que en las **Figura 3. 3** y **Figura 3. 4**, pues en los casos de

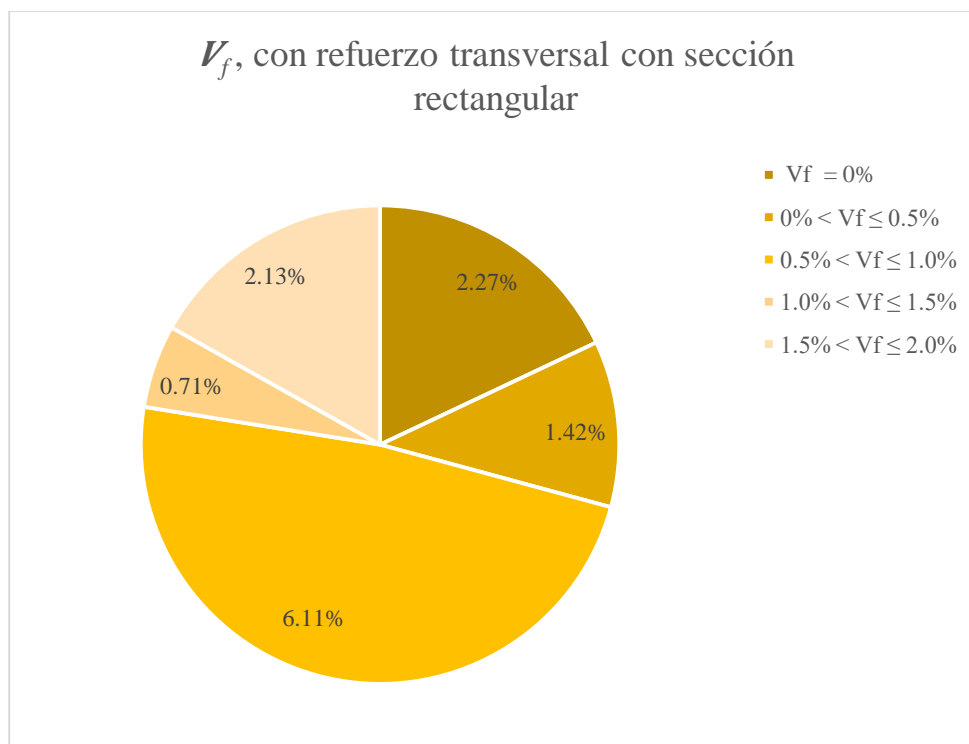
especímenes sin refuerzo transversal se presenta una distribución muy similar a la **Figura 3. 2**, mientras que, en los casos con refuerzo transversal, se tiene una distribución más uniforme. Esto es lógico considerando que la mayoría de los especímenes en la base de datos son de sección rectangular y que sus datos marcan la tendencia general en los totales.

**Tabla 3. 3.** -  $V_f$  de fibras en porcentaje presentes en los especímenes para todas las secciones separadas por si tienen o no refuerzo transversal de especímenes con sección rectangular.

$V_f$	Refuerzo transversal				Total	
	No		Si			
	No.	%	No.	%	No.	%
$V_f = 0\%$	30	4.26%	16	2.27%	46	6.53%
$0\% < V_f \leq 0.5\%$	195	27.70%	10	1.42%	205	29.12%
$0.5\% < V_f \leq 1.0\%$	302	42.90%	43	6.11%	345	49.01%
$1.0\% < V_f \leq 1.5\%$	55	7.81%	5	0.71%	60	8.52%
$1.5\% < V_f \leq 2.0\%$	27	3.84%	15	2.13%	42	5.97%
$2.0\% < V_f \leq 2.5\%$	4	0.57%	0	0.00%	4	0.57%
$2.5\% < V_f \leq 3.0\%$	2	0.28%	0	0.00%	2	0.28%
<b>Total</b>	<b>615</b>	<b>87.36%</b>	<b>89</b>	<b>12.64%</b>	<b>704</b>	<b>100.00%</b>



**Figura 3. 5.** -  $V_f$  presentes en los especímenes sin refuerzo transversal con sección rectangular.



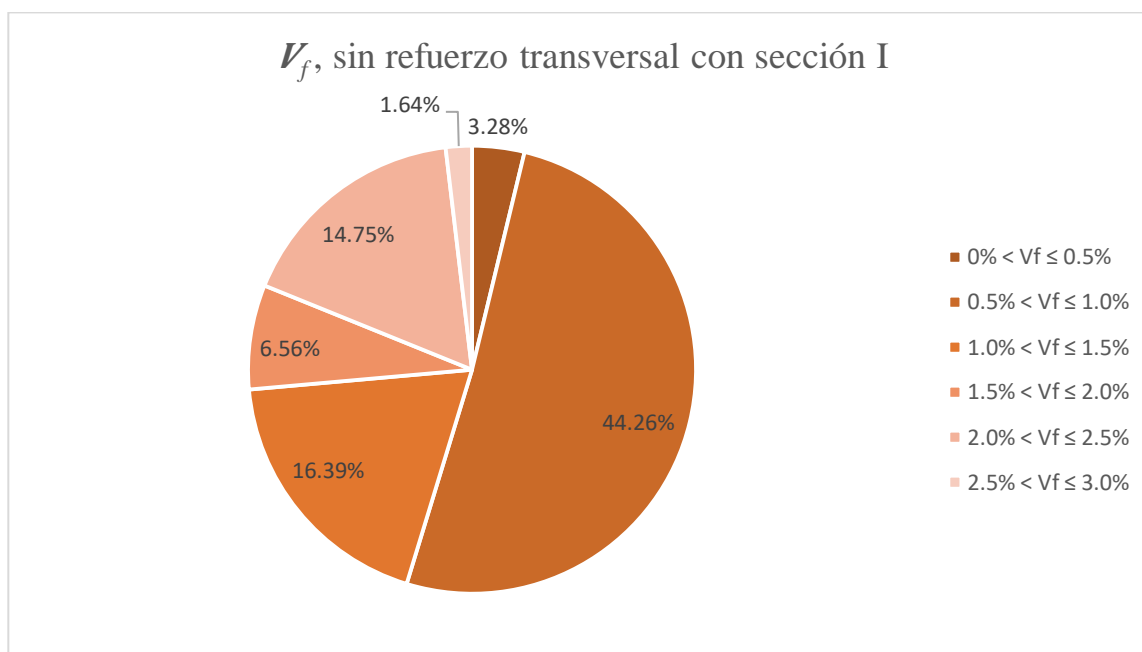
**Figura 3. 6.** --  $V_f$  presentes en los especímenes sin refuerzo transversal con sección rectangular.

Para las secciones I, no se cuenta con especímenes con  $V_f$  igual a cero, por lo que ese campo no se cubrió, y para estas secciones con refuerzo transversal solo se contó con 2 rangos con especímenes, los cuales fueron  $0.5\% < V_f \leq 1.0\%$  con tres especímenes y  $1.5\% < V_f \leq 2.0\%$ , por lo que se decidió no graficar a estos. En la **Tabla 3. 4** se puede apreciar que, para estas secciones, los especímenes sin refuerzo transversal tienen una distribución donde el segundo rango es el más frecuente, seguido del rango de entre 1.0 a 1.5% de fracción de volumen, seguido de cerca por el penúltimo rango, como se ve en **Figura 3. 7**.

**Tabla 3. 4.** -  $V_f$  de fibras en porcentaje presentes en los especímenes para todas las secciones separadas por si tienen o no refuerzo transversal de especímenes con sección I.

$V_f$	Refuerzo transversal				Total	
	No		Si		No.	%
	No.	%	No.	%		
$0\% < V_f \leq 0.5\%$	2	3.28%	0	0.00%	2	3.28%
$0.5\% < V_f \leq 1.0\%$	27	44.26%	3	4.92%	30	49.18%
$1.0\% < V_f \leq 1.5\%$	10	16.39%	0	0.00%	10	16.39%

$1.5\% < V_f \leq 2.0\%$	4	6.56%	5	8.20%	9	14.75%
$2.0\% < V_f \leq 2.5\%$	9	14.75%	0	0.00%	9	14.75%
$2.5\% < V_f \leq 3.0\%$	1	1.64%	0	0.00%	1	1.64%
<b>Total</b>	<b>53</b>	<b>86.89%</b>	<b>8</b>	<b>13.11%</b>	<b>61</b>	<b>100%</b>



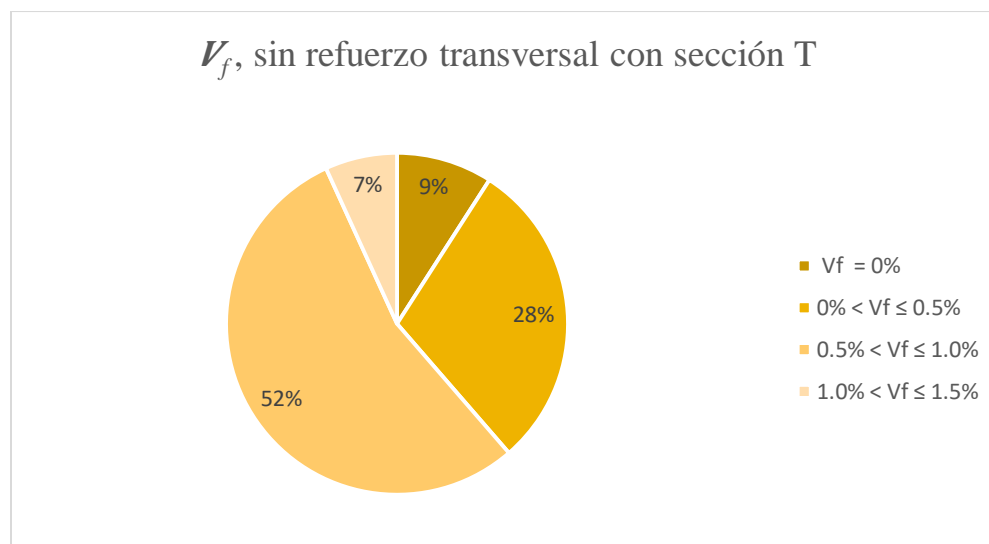
**Figura 3. 7. -  $V_f$  presentes en los especímenes sin refuerzo transversal con sección I.**

Por último, para los especímenes con sección T, se observa en **Tabla 3. 5** que solamente se cuenta con dos especímenes con refuerzo transversal, por lo que se decide no graficarlos, mientras que para los que no tienen refuerzo transversal solo se cuenta con cuatro rangos, donde el rango más común es el de  $0.5\% < V_f \leq 1.0\%$ , seguido del segundo rango. Se puede apreciar gráficamente en

**Tabla 3. 5. -  $V_f$  de fibras en porcentaje presentes en los especímenes para todas las secciones separadas por si tienen o no refuerzo transversal de especímenes con sección T.**

$V_f$	Refuerzo transversal				Total	
	No		Si			
	No.	%	No.	%	No.	%
$V_f = 0\%$	4	8.70%	0	0.00%	4	8.70%
$0\% < V_f \leq 0.5\%$	13	28.26%	0	0.00%	13	28.26%

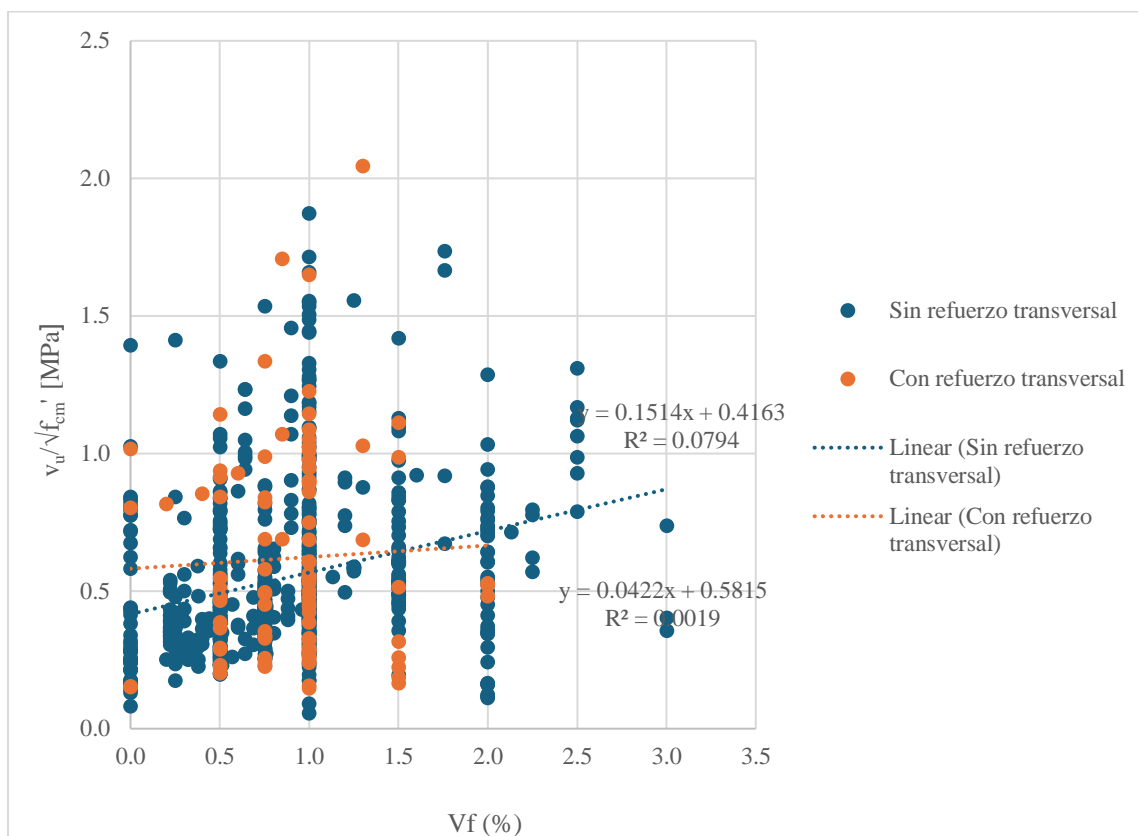
$0.5\% < V_f \leq 1.0\%$	24	52.17%	2	4.35%	26	56.52%
$1.0\% < V_f \leq 1.5\%$	3	6.52%	0	0.00%	3	6.52%
<b>Total</b>	<b>44</b>	<b>95.65%</b>	<b>2</b>	<b>4.35%</b>	<b>46</b>	<b>100.00%</b>



**Figura 3. 8.** -  $V_f$  presentes en los especímenes sin refuerzo transversal con sección T.

En la **Figura 3. 9**, se representa el porcentaje de fibras  $V_f$  en relación con el esfuerzo cortante último, normalizado por la raíz cuadrada de la resistencia a compresión de los cilindros de prueba con fibras. Esta figura se refiere exclusivamente a los especímenes con sección rectangular. Al analizar los intervalos de valores de  $V_f$  presentes en las vigas, se destaca nuevamente el grupo que se encuentra en el rango del 0.5% al 1%. Este conjunto de especímenes registró tanto el mayor como el menor esfuerzo último alcanzado en los ensayos, esta observación es debido a que es el grupo que cuenta con aproximadamente el 50% del total de probetas. En el gráfico se observa una tendencia hacia un aumento en la resistencia a medida que se incrementa la dosificación de fibras de acero en la mezcla, particularmente en los casos de especímenes sin refuerzo transversal. Sin embargo, la  $R^2$  indica una dispersión significativa en los datos, especialmente en los casos con refuerzo transversal, donde se observa una alta

dispersión y una pendiente negativa. Esto podría deberse a las diferentes dosificaciones de refuerzo transversal en los especímenes.

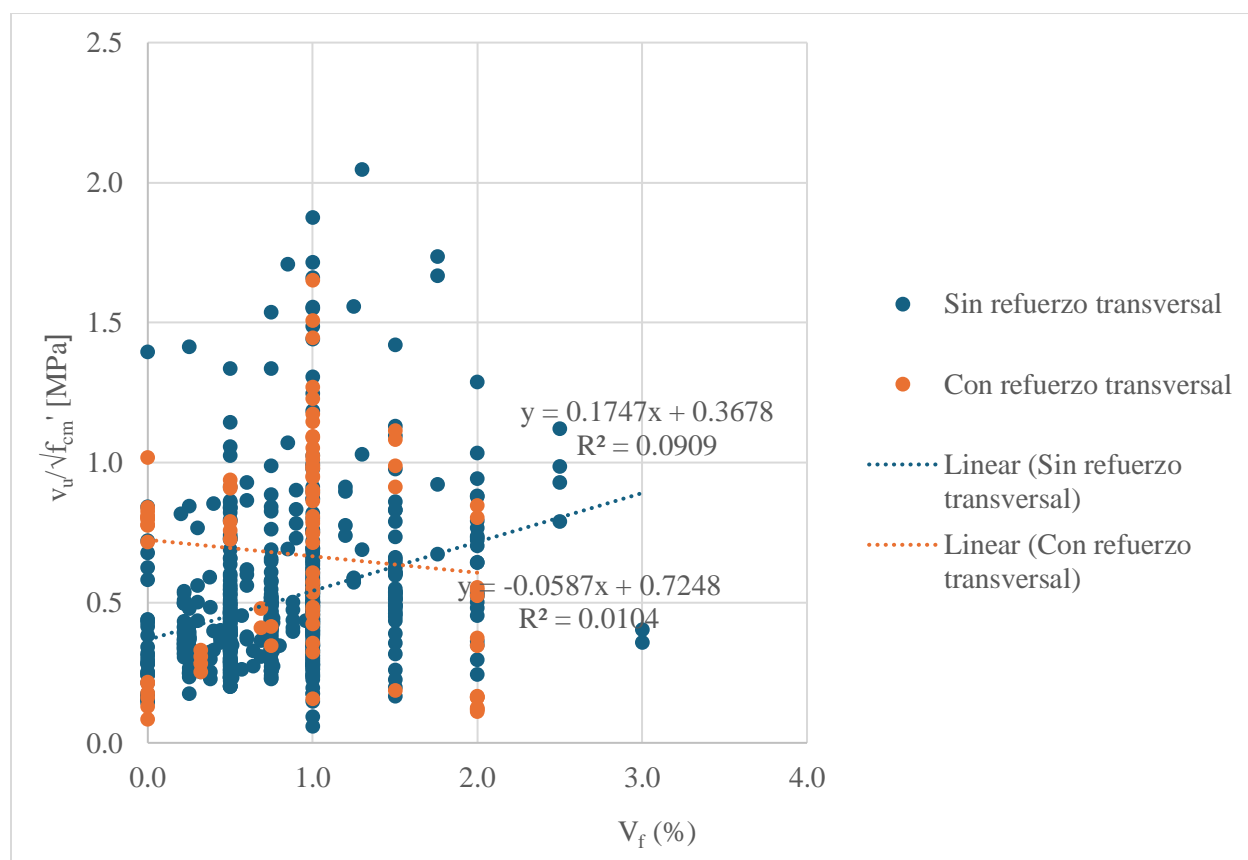


**Figura 3. 9.** - Contenido de fibras " $V_f$ " y la resistencia al corte normalizado de la viga ( $v_u/\sqrt{f_{cm}}$ ).

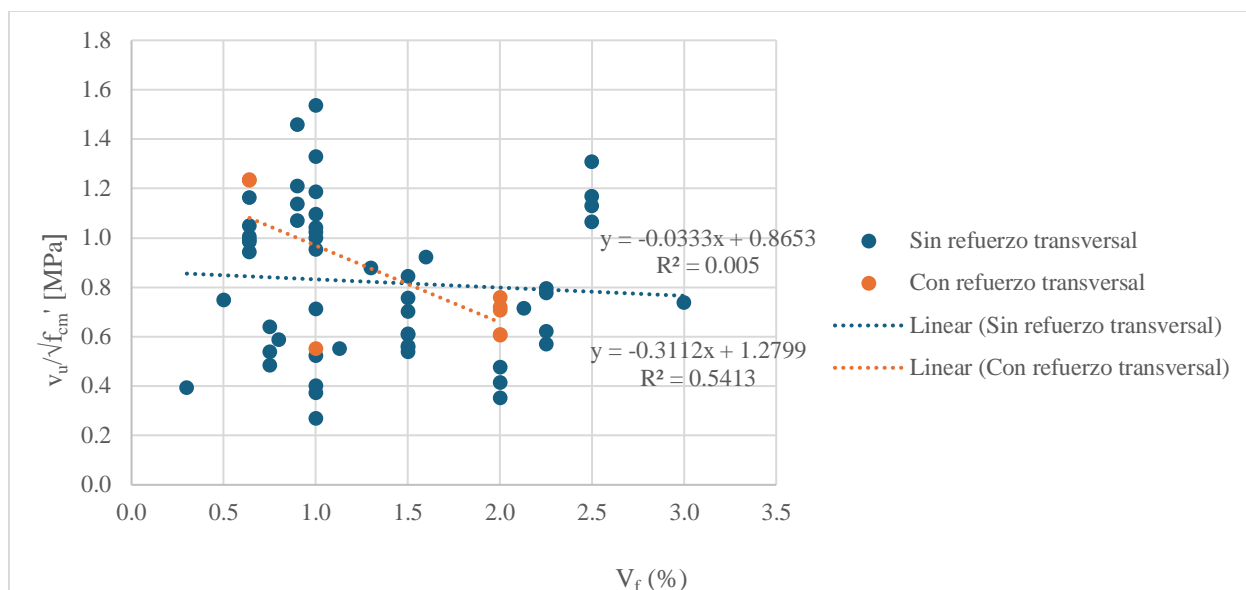
Se creyó necesario la segmentación de la gráfica anterior por su tipo de sección, por lo que las **Figura 3. 10**, **Figura 3. 11** y **Figura 3. 12**, representan a las secciones rectangulares, I y T, respectivamente. La **Figura 3. 10**, muestra un comportamiento casi idéntico que la **Figura 3. 9**, debido a que las secciones rectangulares representan la mayoría de los elementos en la base de datos, solo difieren en que la dispersión de elementos sin refuerzo es un poco menor y la pendiente de la línea de tendencia es mayor, además de que la pendiente de la línea de tendencia de los elementos con refuerzo transversal es negativa.

Por otro lado, la **Figura 3. 11**, representa a los especímenes con sección I, donde se observa una mayor dispersión de datos y una tendencia descendente tanto para elementos con refuerzo transversal como sin él, lo que sugiere que se necesitan más datos para obtener una representación más precisa.

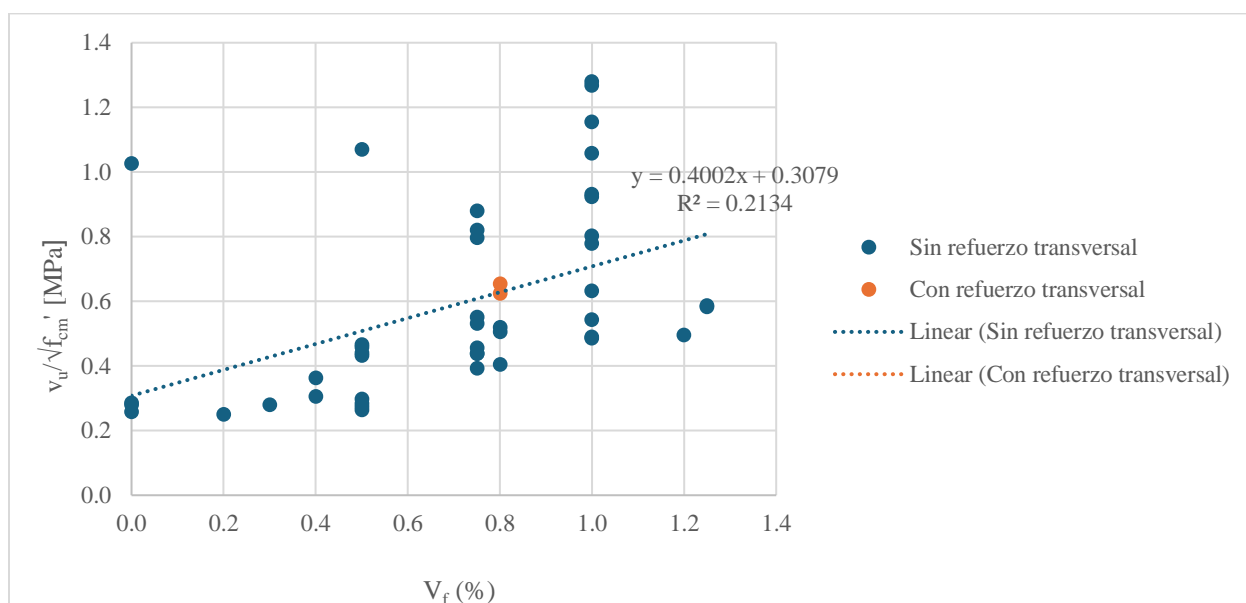
Finalmente, la **Figura 3. 12** representa a los especímenes con sección T, que exhibe la menor dispersión entre las figuras mencionadas y una pendiente mayor para los casos sin refuerzo transversal. Esto indica que una mayor cantidad de fibras en la mezcla mejora la resistencia a cortante del concreto. Sin embargo, dado que hay solo dos casos sin refuerzo transversal en esta figura, no se puede establecer una tendencia clara.



**Figura 3. 10.-** Contenido de fibras " $V_f$ " y la resistencia al corte normalizado de la viga ( $v_u/\sqrt{f_{cm}}$ ) de especímenes con sección rectangular.



**Figura 3. 11.** - Contenido de fibras " $V_f$ " y la resistencia al corte normalizado de la viga ( $v_u/\sqrt{f_{cm}}$ ) de especímenes con sección I.



**Figura 3. 12.** - Contenido de fibras " $V_f$ " y la resistencia al corte normalizado de la viga ( $v_u/\sqrt{f_{cm}}$ ) de especímenes con sección T.

Como se puede observar en las **Figura 3. 10**, **Figura 3. 11** y **Figura 3. 12**, las vigas con sección rectangular tienen una mejor relación entre la  $V_f$  y su resistencia al cortante. Esto se



debe a que las vigas con sección en I son óptimas para soportar esfuerzos de flexión, pero debido a la reducción en la sección de concreto, su aporte a la resistencia es menor. Para compensar esto, generalmente se refuerza el alma de estas vigas con suficiente acero transversal para evitar problemas, pero en este estudio, la mayoría de los especímenes con esta sección no contaban con dicho refuerzo, solo con fibras, que, al estar mezcladas en la matriz del concreto, presentan menos área y, por tanto, menos refuerzo. Lo mismo ocurre con las vigas en T, que son óptimas para cargas distribuidas, pero al tener menos área de concreto con fibras, también presentan menos refuerzo para soportar las demandas de esfuerzo cortante.

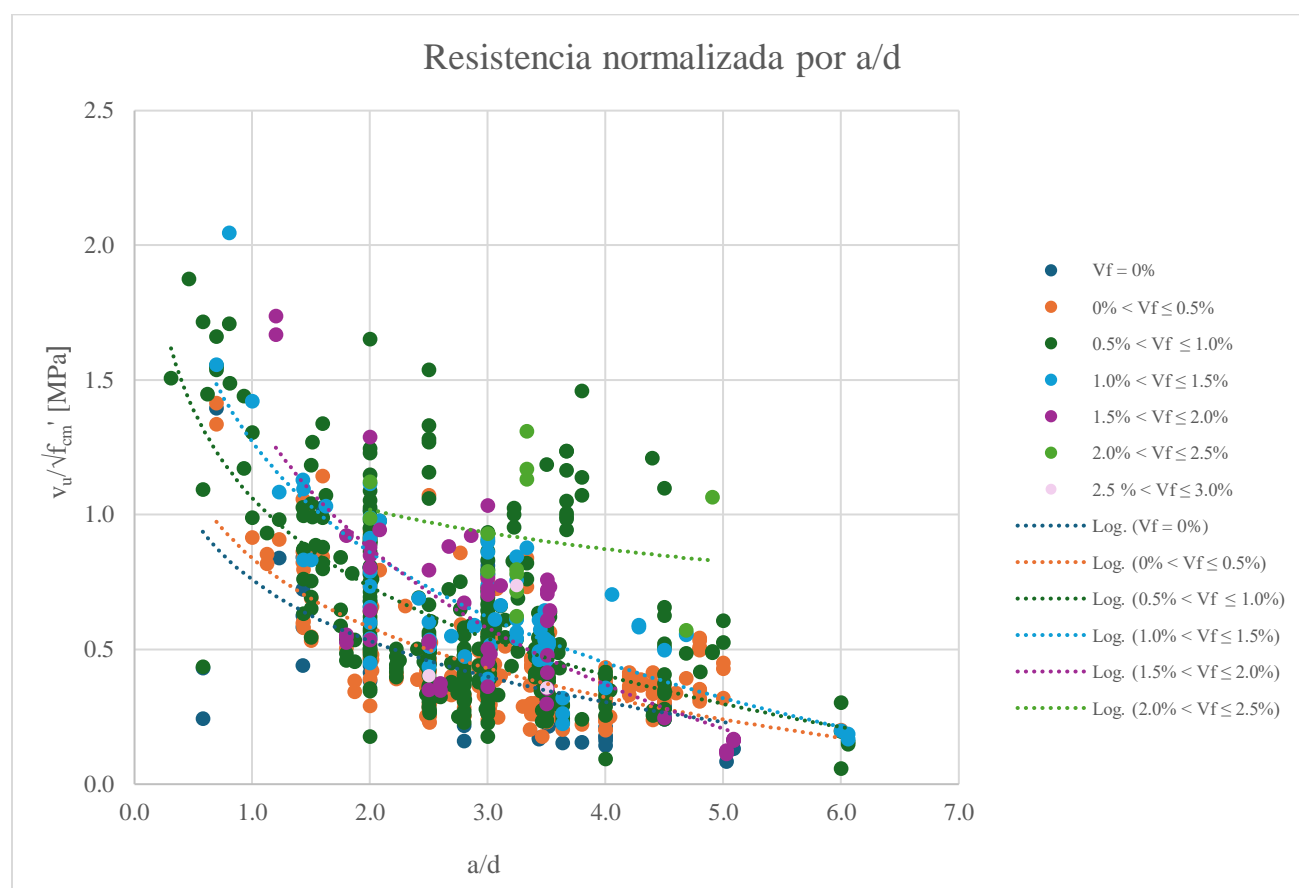
### ***Variación del esfuerzo cortante de acuerdo con la relación a/d***

En la **Figura 3. 13**, se puede observar que a medida que la relación a/d (distancia desde el punto de aplicación de la fuerza al punto de apoyo dividida por el peralte efectivo) aumenta, la capacidad de resistencia al corte de la viga disminuye. Por otro lado, se puede observar que conforme la  $V_f$  incrementa, también la resistencia a cortante normalizada, así lo indican las líneas de tendencia del gráfico. En el caso del último rango de  $V_f$  no se generó línea de tendencia, pues solo se cuenta con tres elementos para poder generar una tendencia real. Es menester mencionar que cuando la relación a/d es mayor a 2.5, se consideran vigas esbeltas, mientras que las vigas con menor o igual a/d que 2.5 se consideran peraltadas. Se destaca que la mayoría de los especímenes (73.74%) son considerados esbeltos como se puede observar en la **Tabla 3. 6**, lo que implica que la distancia desde el punto de aplicación de la fuerza al punto de apoyo es mayor en comparación con el peralte efectivo de la viga. Esta información es relevante para comprender la influencia de la esbeltez en la resistencia al corte de las vigas reforzadas con fibras.

Sin embargo, son de especial interés las vigas esbeltas para la comprensión del aporte de las fibras de acero en la resistencia a esfuerzo cortante de las vigas, puesto que en las vigas peraltadas el mecanismo de resistencia es por acción de arco (o dovela), que como se explica en el Capítulo 1, en el apartado de Mecanismos de Resistencia al Corte, la acción consiste en la transferencia de fuerzas por medio de puntales de concreto que trabajan a compresión.

**Tabla 3. 6.** - Número de especímenes de acuerdo con la relación a/d.

Vigas	Refuerzo transversal				Total	
	Sin		Con			
	No.	%	No.	%	No.	%
Peraltadas	165	20.35%	48	5.92%	213	26.26%
Esbeltas	547	67.45%	51	6.29%	598	73.74%
<b>Total</b>	<b>712</b>	<b>87.79%</b>	<b>99</b>	<b>12.21%</b>	<b>811</b>	<b>100.00%</b>



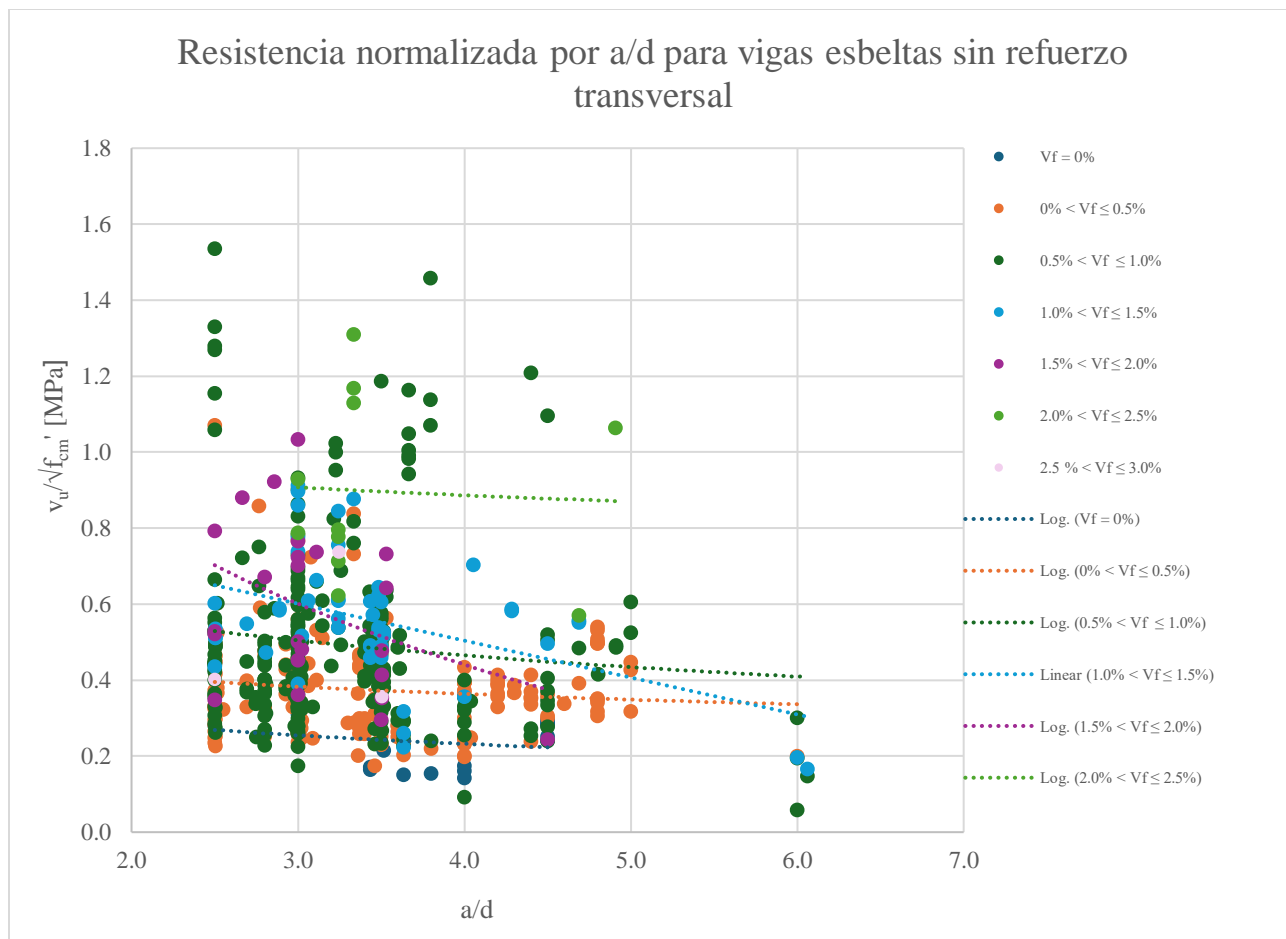
**Figura 3. 13.-** Relación a/d y la resistencia a cortante normalizada.

En la **Figura 3. 13** no se distingue si los elementos cuentan con refuerzo transversal o no, por lo que se decidió mostrar el comportamiento por separado en la **Figura 3. 14** para vigas sin refuerzo transversal y **Figura 3. 15** para los elementos con dicho refuerzo. En la *Tabla 3. 7* se puede ver la distribución de  $V_f$ , con y sin refuerzo transversal, para vigas esbeltas, donde se observa una distribución muy similar a la del total de especímenes.

*Tabla 3. 7.* - $V_f$  de fibras en porcentaje presentes en los especímenes para todas las secciones separadas por si tienen o no refuerzo transversal de vigas esbeltas.

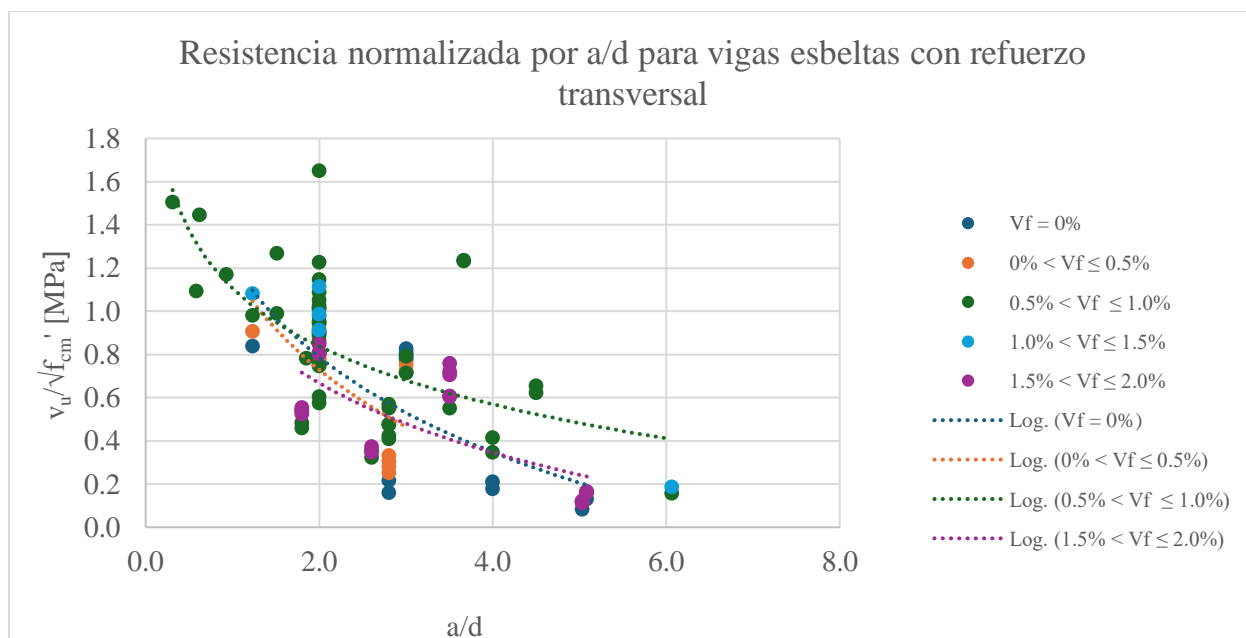
$V_f$	Refuerzo transversal				Total	
	Sin		Con		No.	%
	No.	%	No.	%		
$V_f = 0 \%$	21	4.78%	11	16.16%	32	5.35%
$0\% < V_f \leq 0.5\%$	160	29.49%	6	10.10%	166	27.76%
$0.5\% < V_f \leq 1.0\%$	277	49.58%	18	48.48%	295	49.33%
$1.0\% < V_f \leq 1.5\%$	52	9.55%	1	5.05%	53	8.86%
$1.5\% < V_f \leq 2.0\%$	23	4.35%	15	20.20%	38	6.35%
$2.0\% < V_f \leq 2.5\%$	11	1.83%	0	0.00%	11	1.84%
$2.5\% < V_f \leq 3.0\%$	3	0.42%	0	0.00%	3	0.50%
<b>Total general</b>	<b>547</b>	<b>100.00%</b>	<b>51</b>	<b>100.00%</b>	<b>598</b>	<b>100.00%</b>

Se puede apreciar con las líneas de tendencia en **Figura 3. 14** que conforme aumenta la dosificación de fibras en la mezcla de concreto, la resistencia sube. Existen casos donde ciertos rangos en dicha tendencia caen de forma más pronunciada conforme más alta es a/d, como es el caso del rango  $1.5\% < V_f \leq 2.0\%$ , aunque hay que mencionar que dicho rango es solamente el 4.35% de ese tipo de vigas y que se requerirían más datos para tener una tendencia más representativa como la es el caso del segundo y tercer rango en la tabla que tienen una pendiente muy baja para estas a/d.



**Figura 3. 14.** - Relación  $a/d$  y la resistencia a cortante normalizada para vigas esbeltas segmentadas por su  $V_f$  sin refuerzo transversal.

En contraste, en las vigas esbeltas con refuerzo transversal mostradas en la **Figura 3. 15**, observamos una discordancia respecto a la tendencia mostrada en la **Figura 3. 14**. En la **Figura 3. 15**, las  $V_f$  no exhiben una correlación clara, lo cual se debe a la falta de uniformidad en el refuerzo transversal presente en los diferentes especímenes. Esta disparidad introduce una variable adicional que influye en los resultados y dificulta la identificación de un patrón consistente.



**Figura 3. 15.** - Relación  $a/d$  y la resistencia a cortante normalizada para vigas esbeltas segmentadas por su  $V_f$  con refuerzo transversal.

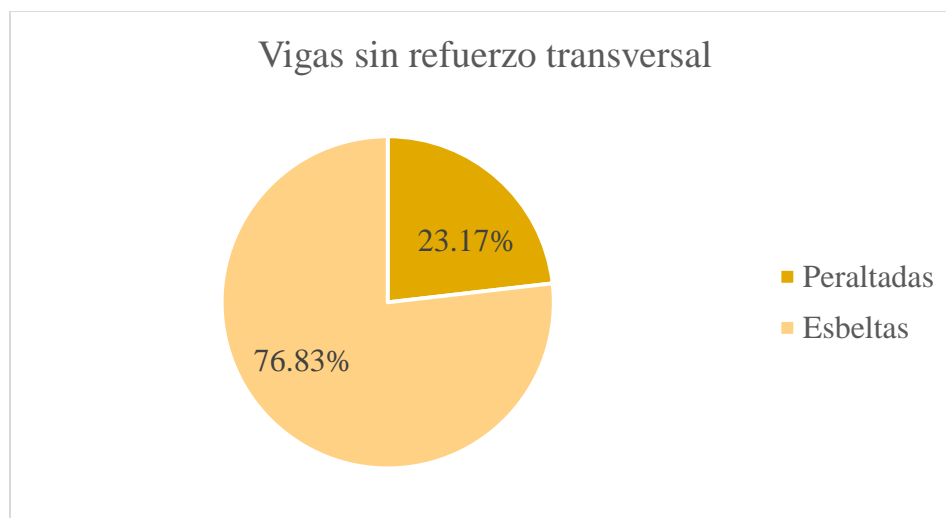
Analizando lo mostrado en las **Figura 3. 14** y **Figura 3. 15**, se puede observar que los valores que toman las líneas de tendencia, para los mismos intervalos de  $V_f$ , son superiores para los casos de vigas con refuerzo transversal, lo cual es un comportamiento esperado, pues dichos elementos cuentan con un refuerzo adicional a los esfuerzos por cortante además de las fibras de acero, el cual son los estribos.

### ***Resistencia al corte según la resistencia a compresión del concreto***

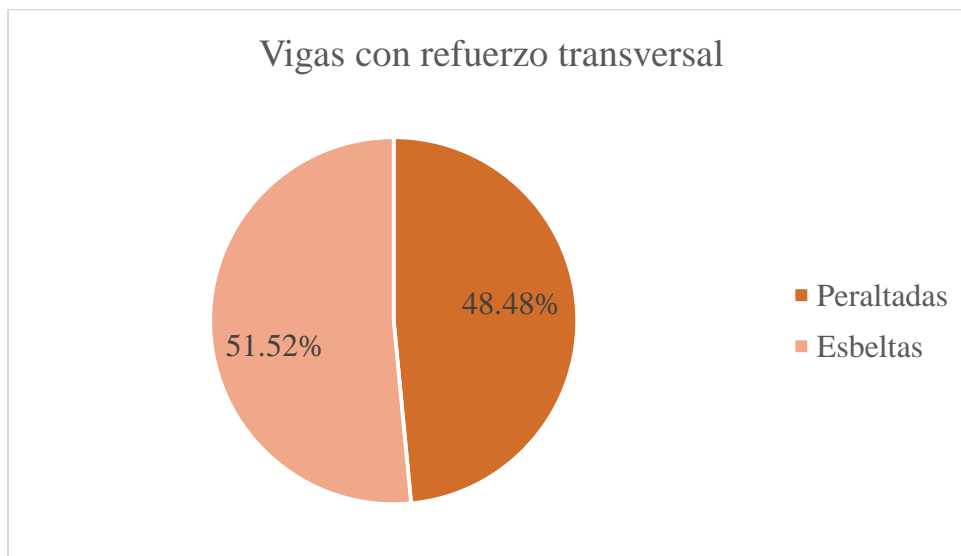
De la **Tabla 3. 8** muestra la distribución de vigas dependiendo si son esbeltas o peraltadas y si tienen refuerzo transversal o no, y de dicha tabla resultan las **Figura 3. 16** y **Figura 3. 17**, que muestran las distribuciones de vigas peraltadas y esbeltas cuando tienen y no, refuerzo transversal. Se observa que, para vigas sin refuerzo, la mayoría de los elementos son esbeltos, con un 76.83%, mientras que los elementos con refuerzo transversal cuentan con un distribución muy uniforme, con un 48.48% de especímenes peraltados y 51.52% vigas esbeltas.

**Tabla 3. 8.** - Número de especímenes de acuerdo con la relación a/d con totales por columna.

Vigas	Refuerzo transversal			
	Sin		Con	
	No.	%	No.	%
Peraltadas	165	23.17%	48	48.48%
Esbeltas	547	76.83%	51	51.52%
<b>Total</b>	<b>712</b>	<b>100.00%</b>	<b>99</b>	<b>100.00%</b>



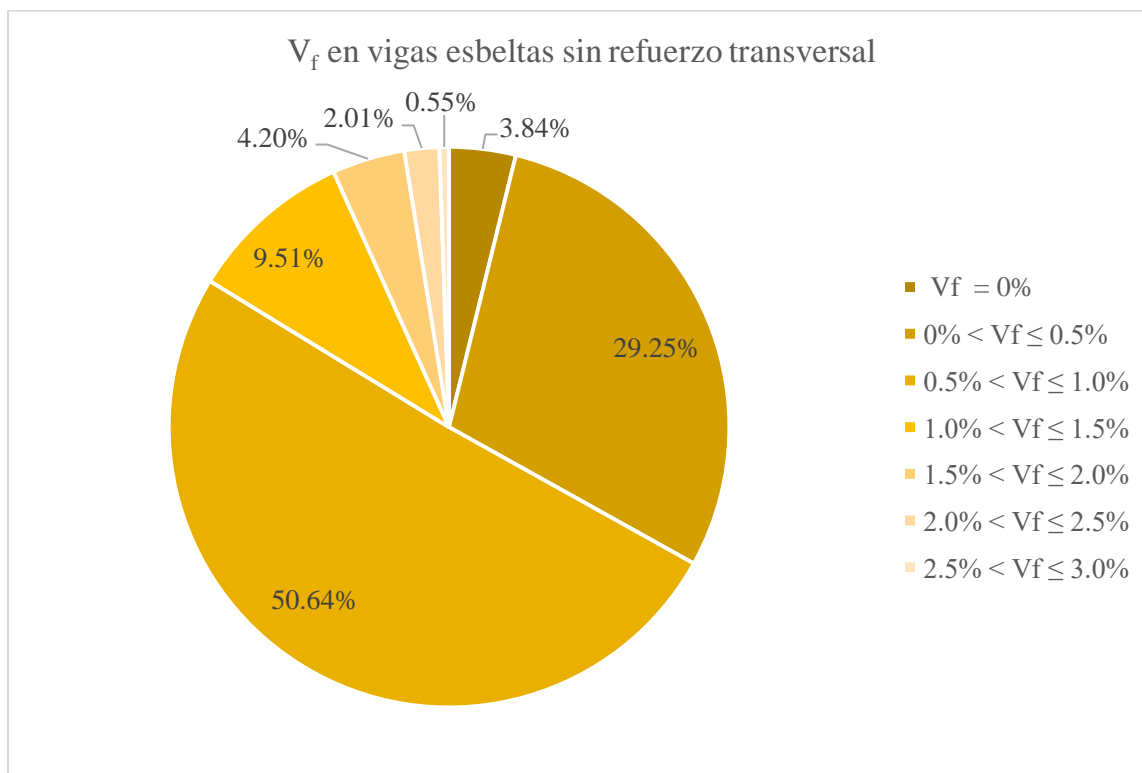
**Figura 3. 16.** – Distribución de especímenes sin refuerzo transversal por su a/d.



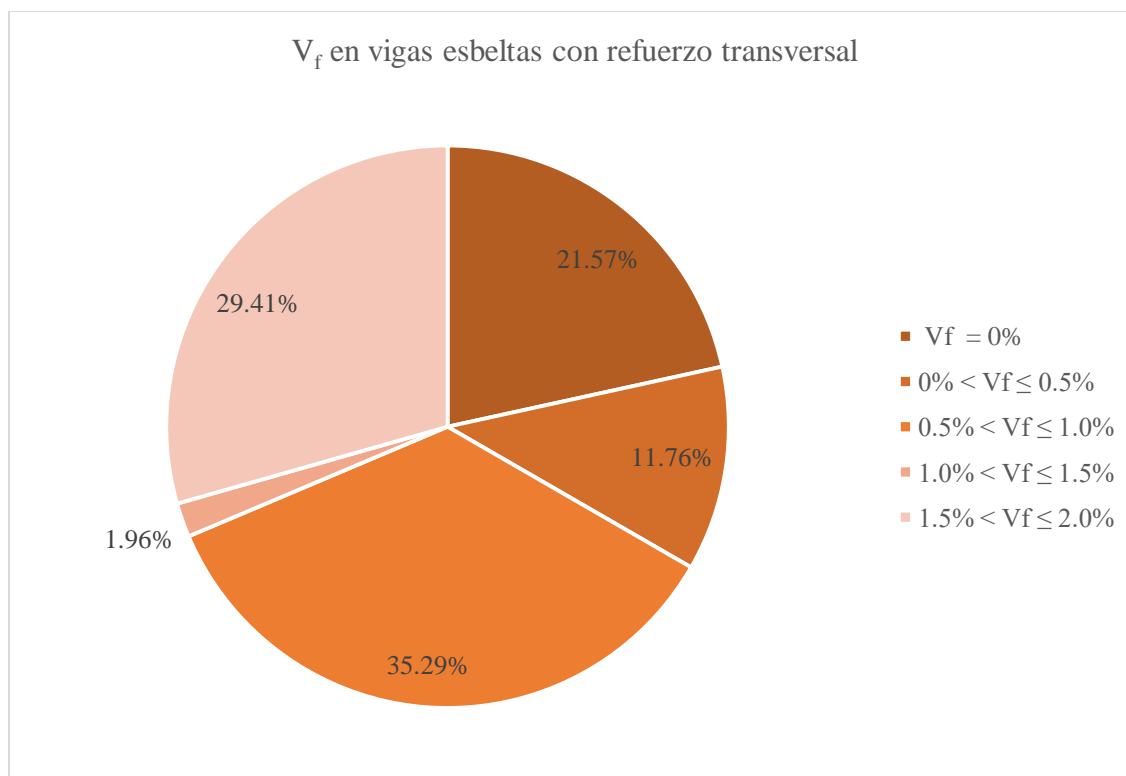
**Figura 3. 17.** - Distribución de especímenes con refuerzo transversal por su a/d.

### Para vigas esbeltas

En la **Tabla 3. 7** se presenta la distribución de especímenes según rangos de  $V_f$ , tanto con cómo sin refuerzo transversal, para vigas esbeltas. Estos datos se utilizaron para crear las **Figura 3. 18** y **Figura 3. 20**. La primera ilustra la distribución de los especímenes sin refuerzo transversal, que guarda una similitud notable con la distribución total de especímenes, como se muestra en la **Figura 3. 2**. Esto se debe a que las vigas esbeltas sin refuerzo transversal son las más frecuentes en la base de datos. Por otro lado, la **Figura 3. 19** presenta una distribución diferente, ya que no se cuenta con vigas con los rangos con  $V_f$  superiores a 2.0. Aquí, los datos están más equilibrados, destacándose solo el rango de  $1.0\% < V_f \leq 1.5\%$ , el cual es poco común y representa el 1.96% del total de estos especímenes.



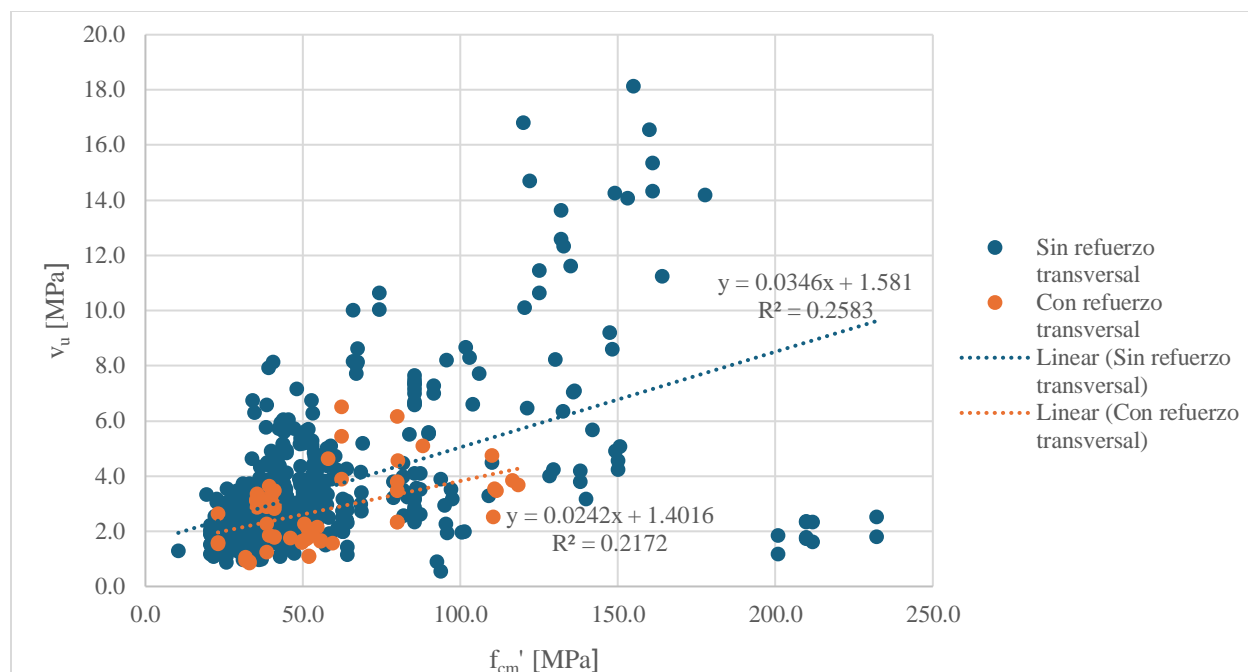
**Figura 3. 18.-** Porcentaje de especímenes de vigas esbeltas sin refuerzo transversal por  $V_f$ .



**Figura 3. 19.** - Porcentaje de especímenes de vigas esbeltas con refuerzo transversal por  $V_f$ .

En la **Figura 3. 20** se expone la relación entre la resistencia a cortante contra la resistencia a compresión del concreto con fibras, obtenida de pruebas de compresión de cilindros. Se segmenta, además, en vigas que tienen refuerzo transversal y que no cuentan con este. Esta figura permite visualizar la correlación entre estas dos variables y proporciona información relevante sobre el comportamiento de las vigas reforzadas con fibras en términos de su resistencia. En la **Figura 3. 20** se puede ver en ambos casos, una tendencia ascendente, aunque con una alta dispersión de datos, esto indica que a medida que se incrementa la resistencia a compresión del concreto, se logra alcanzar mayores esfuerzos resistentes al cortante. Esto indica una relación directa entre la resistencia a compresión del concreto y la capacidad de resistencia al corte de las vigas reforzadas con fibras.



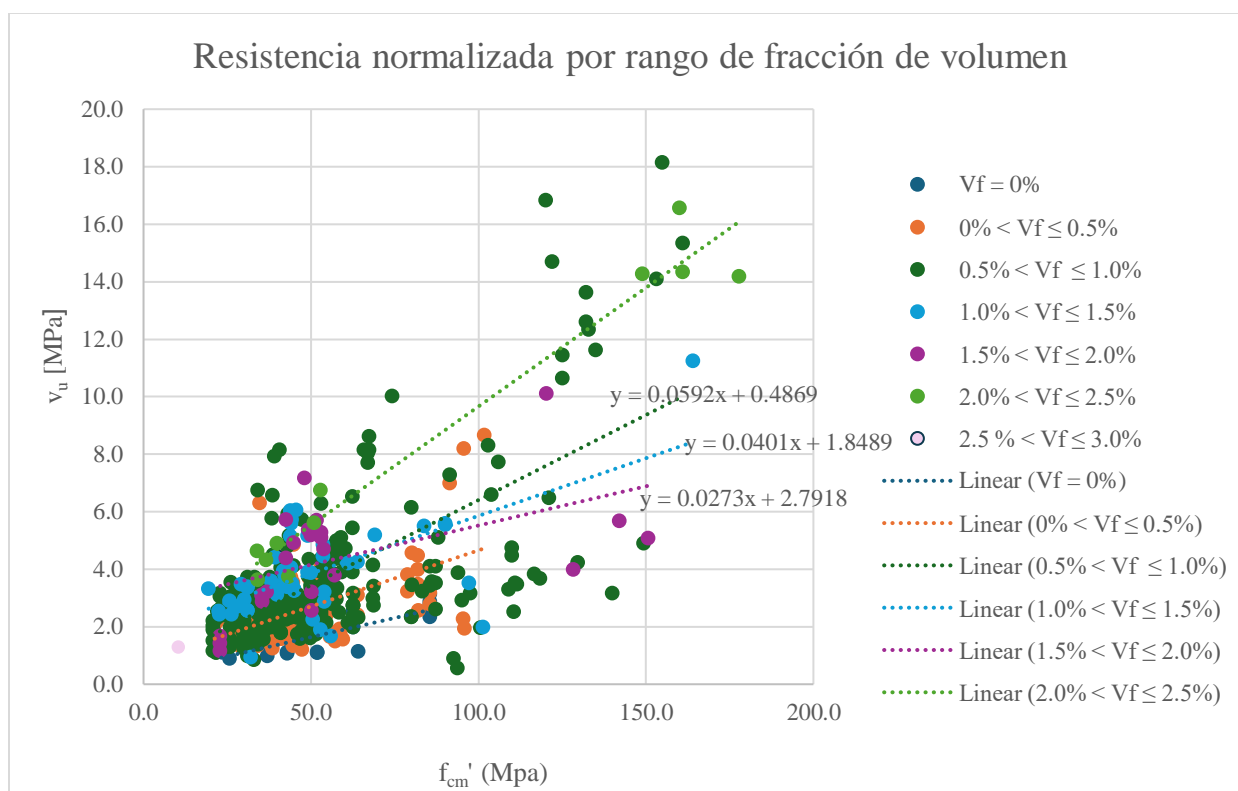


**Figura 3. 20.-** Relación entre resistencia al cortante y la resistencia a la compresión del concreto con fibras para vigas esbeltas.

A la par, se observa en la **Figura 3. 20** que la línea de tendencia de los elementos sin refuerzo transversal es superior a la de elementos con refuerzo, algo que no es esperado, pues en las **Figura 3. 14** y **Figura 3. 15** se aprecia como el refuerzo en conjunto de estribos y fibras de acero es más efectivo a la hora de resistir esfuerzos, que el refuerzo de fibras de acero en solitario pueden llegar a alcanzar. Esto último, puede ser debido a que se considera otra variable, la cual es la  $a/d$ , mientras que, en este análisis, se desprecia y puede llegar a dar estos resultados, donde el refuerzo solitario de fibras sea superior al refuerzo en conjunto. Esto no quiere decir que las fibras de acero no sean efectivas a la hora de resistir esfuerzos, sino que, son cuestiones que tomar en cuenta a la hora de hacer el análisis.

Por otro lado, para un mejor análisis de este concepto, se decidió la realización de gráficos dividiendo los elementos con refuerzo transversal y sin, pero segmentados por los rangos de  $V_f$  que se han estado utilizando a lo largo de este capítulo. Con esto se puede apreciar

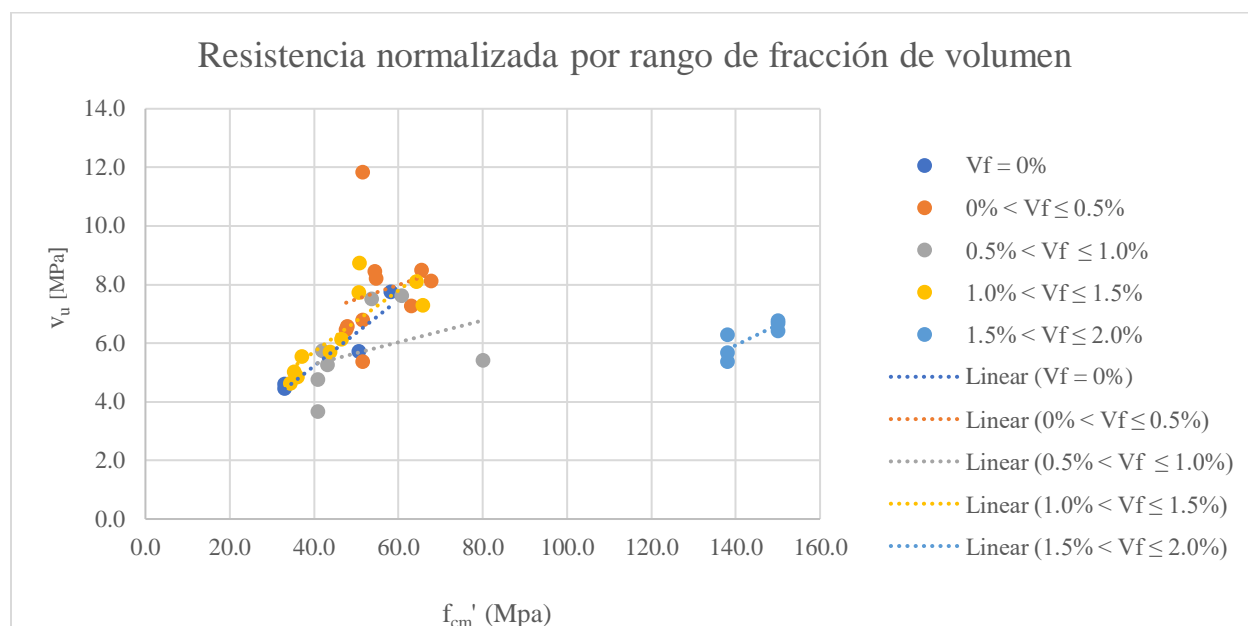
y comprobar la relación que existe entre la  $V_f$ , la  $f_c'$  (para este estudio  $f_{cm}'$ ) con la  $v_u$ . En la **Figura 3. 21** se puede observar una tendencia ascendente en todos los casos, donde en estas líneas de tendencias para todos los casos en las dosificaciones de fibras más grandes su ordenada al origen es mayor, pero en la pendiente del rango  $0.5\% < V_f \leq 1.0\%$  es mayor que los dos rangos superiores, por lo que es mayor la  $v_u$  conforme la  $f_c'$  crece, lo mismo pasa con  $1.0\% < V_f \leq 1.5\%$ , pues la pendiente de la línea de tendencia es superior a la de  $1.5\% < V_f \leq 2.0\%$ . Los elementos sin dosificación de fibras son las que menor resistencia tienen, lo que evidencia la contribución efectiva en la resistencia a cortante de éstas.



**Figura 3. 21.** - Relación entre resistencia al cortante y la resistencia a la compresión del concreto con fibras para vigas esbeltas sin refuerzo transversal.

En la **Figura 3. 22** se analizan los elementos esbeltas con refuerzo transversal, donde se dispone de menos datos, además de la variable adicional de la cuantía de acero transversal, que

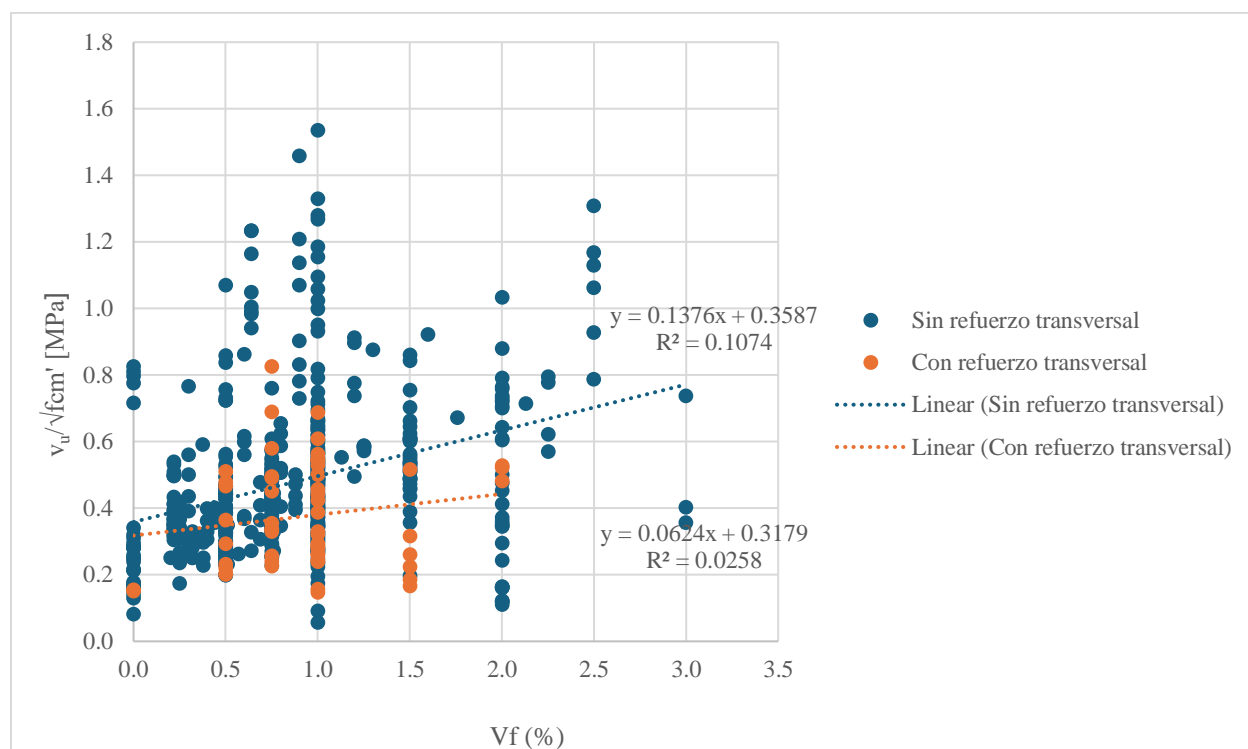
varía en cada estudio incluido en la base de datos. Se observan menos rangos de  $V_f$ , llegando hasta  $V_f$  menores o iguales a 2.0%. Solo el intervalo de  $0.5\% < V_f \leq 1.0\%$  cuenta con un número de datos de dos cifras, por lo que se puede decir que es la única línea de tendencia representativa del gráfico, la cual está marcada con color verde. Esta limitación en los datos subraya la necesidad de abordar la recopilación de información de manera más exhaustiva en futuros estudios para obtener conclusiones más sólidas y representativas.



**Figura 3. 22.** - Relación entre resistencia al cortante y la resistencia a la compresión del concreto con fibras para vigas esbeltas con refuerzo transversal.

En la **Figura 3. 23**, se presenta el porcentaje de fibras  $V_f$  en función del esfuerzo cortante normalizado para vigas esbeltas, divididas según la presencia de refuerzo transversal. Al analizar los datos por intervalos de porcentaje de volumen de fibras  $V_f$ , similar a lo observado en la **Figura 3. 10**, se destaca el rango de contenido de fibras de 0.5% a 1%. En este intervalo no solo se registraron los mayores esfuerzos últimos, sino también algunos de los esfuerzos últimos más bajos en comparación con otros intervalos. Este fenómeno podría atribuirse a la frecuencia con la

que se encuentran especímenes dentro de este rango en la base de datos. La presencia de casos con esfuerzos últimos tanto altos como bajos en este rango sugiere la influencia de otros factores adicionales en el comportamiento de las vigas, además del porcentaje de fibras. Es esencial tener en cuenta esta variabilidad al interpretar los resultados y considerar otros aspectos relacionados con el diseño y las condiciones de carga al aplicar fibras para mejorar las vigas. Las líneas de tendencia en los casos sin y con refuerzo transversal son ascendentes, lo que indica una correlación proporcional, pero la línea de tendencia para elementos sin refuerzo es superior, indicando que, para vigas esbeltas, las fibras de acero son efectivas en el refuerzo a esfuerzo cortante. Es importante notar que, para mismas dosificaciones de fibras, las vigas con estribos resistieron menos que las que no cuentan con estos, por lo que puede indicar la existencia de alguna variable extra influyendo en el fenómeno no considerada en el análisis.



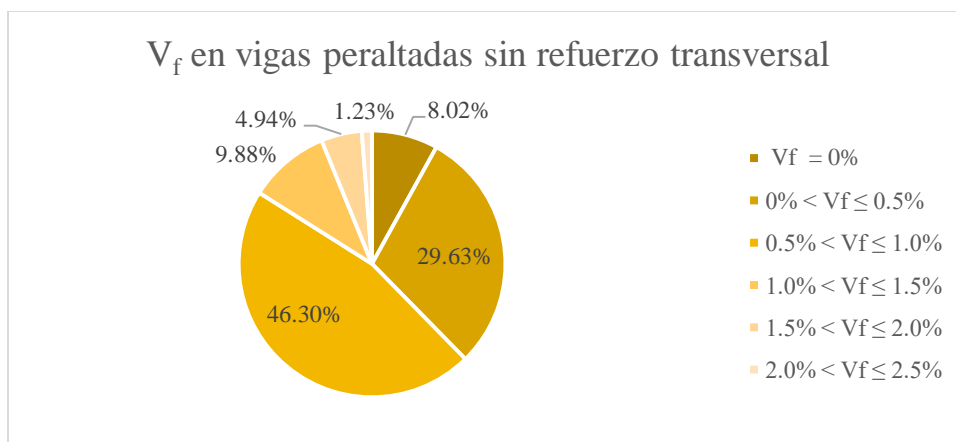
**Figura 3. 23.-** Relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de la viga para vigas esbeltas.

### Para la Relación $a/d < 2.5$

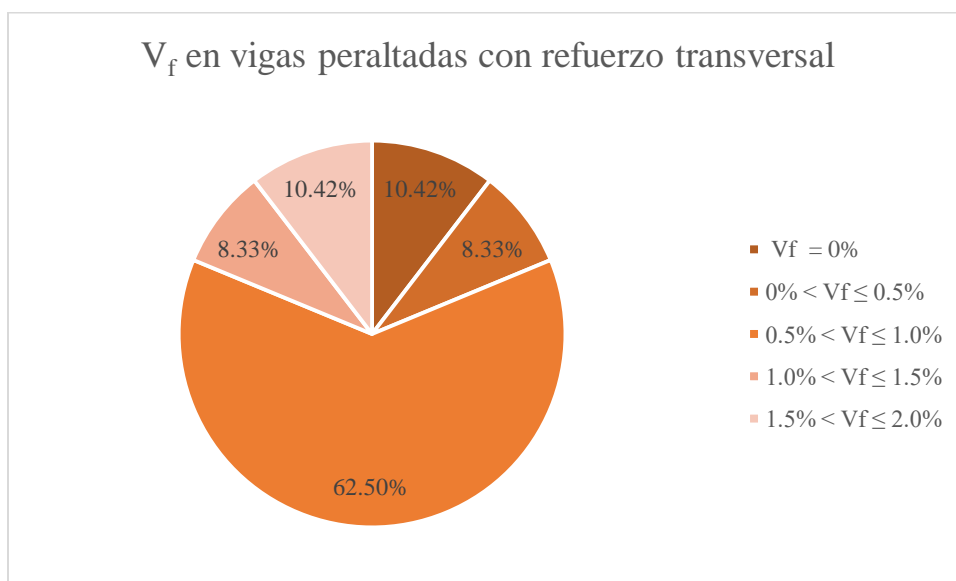
En la **Tabla 3. 7** se muestra la distribución de especímenes sin y con refuerzo transversal por rangos de  $V_f$  de especímenes esbeltos, mientras que la **Tabla 3. 9** muestra el mismo tipo de distribución, pero para vigas peraltadas, junto con la división porcentual por columna. Estos datos fueron empleados en la creación de la **Figura 3. 24** y **Figura 3. 25**. La primera ilustra la distribución de los especímenes sin refuerzo transversal, que guarda una similitud notable con la distribución total de especímenes, como se muestra en la **Figura 3. 2**, aunque para vigas robustas la  $V_f$  llega hasta 2.5%. Esto se explica por la predominancia de las vigas sin refuerzo transversal en la base de datos. Por otro lado, la **Figura 3. 25** exhibe una distribución distinta, dado que no se dispone de vigas con rangos de  $V_f$  superiores a 2.0. Para este caso, intervalo de  $0.5\% < V_f \leq 1.0\%$  cuenta con 30 elementos, mientras que los demás rangos no superan las cinco unidades, por lo que hay una alta predominancia en el intervalo mencionado.

**Tabla 3. 9.** -  $V_f$  de fibras en porcentaje presentes en los especímenes para todas las secciones separadas por si tienen o no refuerzo transversal de vigas peraltadas.

$V_f$	Refuerzo transversal				Total	
	Sin		Con			
	no.	%	no.	%	no.	%
$V_f = 0\%$	13	8.02%	5	10.42%	18	8.57%
$0\% < V_f \leq 0.5\%$	48	29.63%	4	8.33%	52	24.76%
$0.5\% < V_f \leq 1.0\%$	75	46.30%	30	62.50%	105	50.00%
$1.0\% < V_f \leq 1.5\%$	16	9.88%	4	8.33%	20	9.52%
$1.5\% < V_f \leq 2.0\%$	8	4.94%	5	10.42%	13	6.19%
$2.0\% < V_f \leq 2.5\%$	2	1.23%	0	0.00%	2	0.95%
$2.5\% < V_f \leq 3.0\%$	0	0.00%	0	0.00%		0.00%
<b>Total</b>	<b>162</b>	<b>100.00%</b>	<b>48</b>	<b>100.00%</b>	<b>210</b>	<b>100.00%</b>



**Figura 3. 24.** - Porcentaje de especímenes de vigas peraltadas sin refuerzo transversal por  $V_f$ .

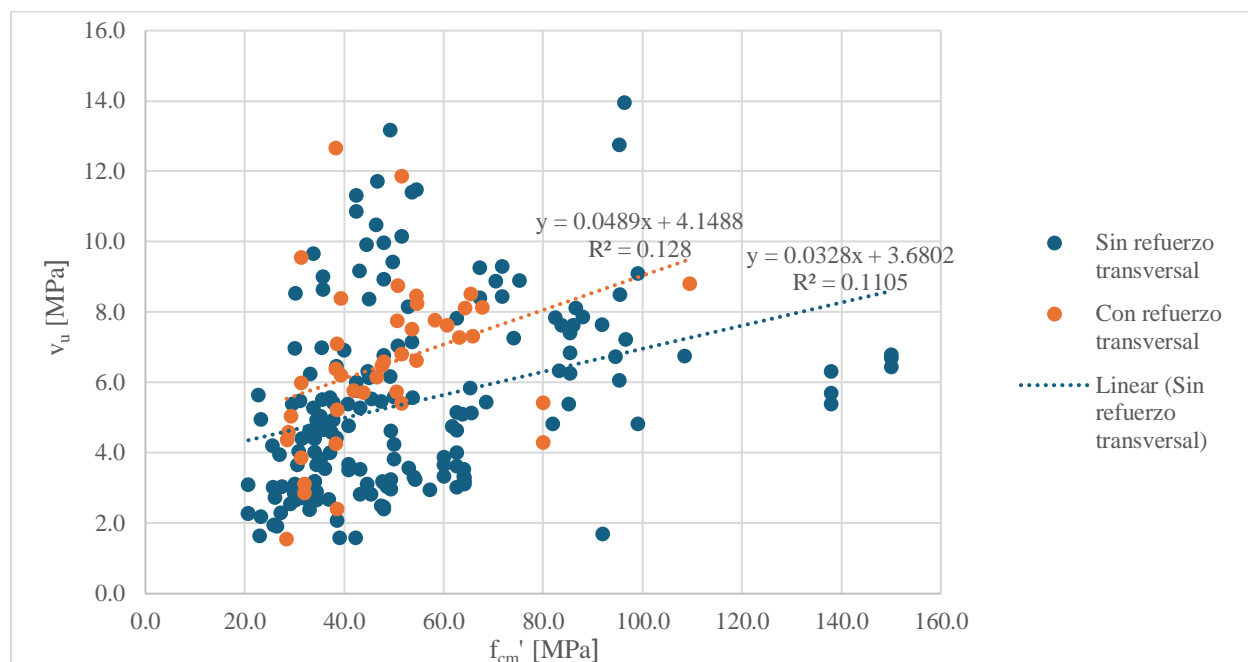


**Figura 3. 25.** - Porcentaje de especímenes de vigas peraltadas con refuerzo transversal por  $V_f$ .

En la **Figura 3. 26** se presenta la correlación entre la resistencia a cortante y la resistencia a compresión del concreto con fibras, basada en los resultados de pruebas de compresión de cilindros, específicamente para vigas peraltadas. Esta relación se analiza tanto para vigas con refuerzo transversal como para aquellas sin él. En ambos casos, se observa una tendencia ascendente con una dispersión significativa de datos, lo que sugiere que a medida que aumenta la resistencia a compresión del concreto, también aumenta la capacidad de resistencia al corte. Esto

indica una relación directa entre la resistencia a compresión del concreto y la capacidad de resistencia al corte en vigas reforzadas con fibras.

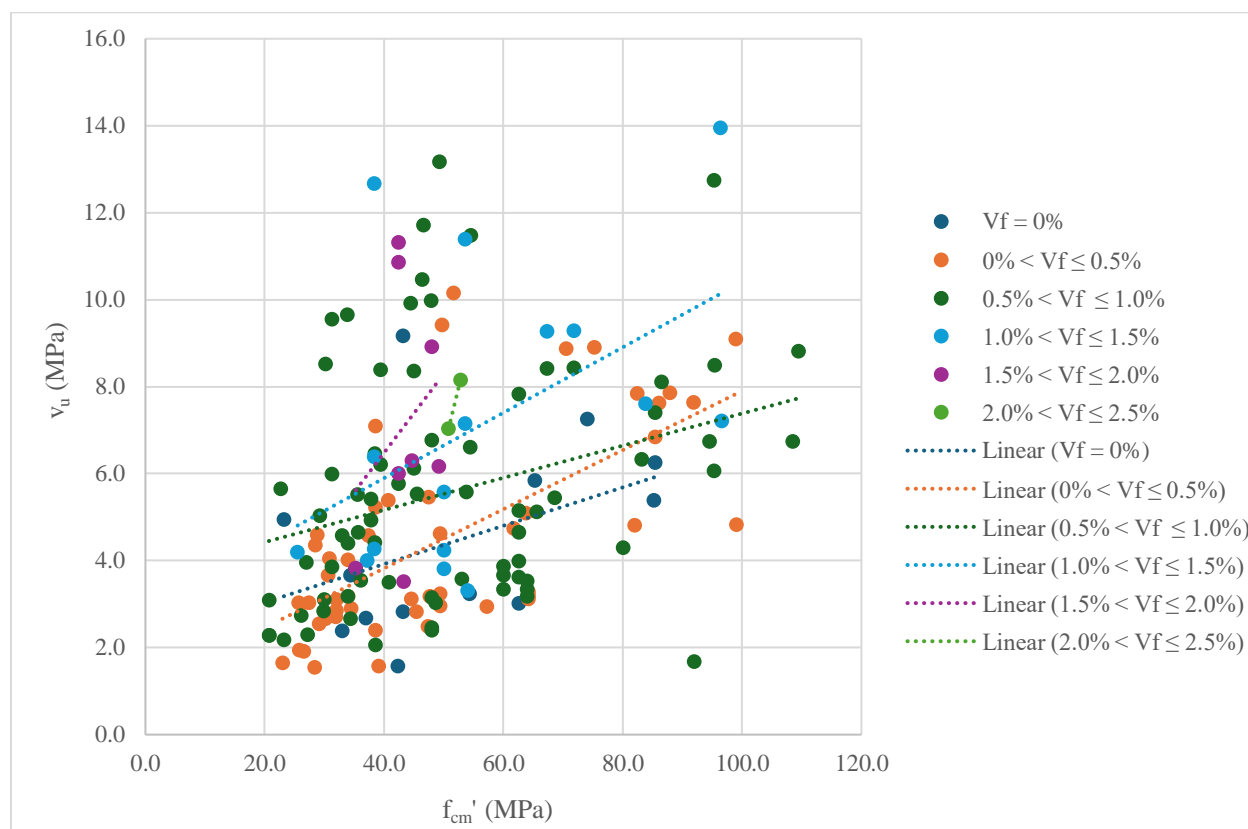
Además, en la **Figura 3. 26** se nota que la línea de tendencia para los elementos con refuerzo transversal es superior a la de los elementos sin este refuerzo. Esto concuerda con las observaciones de las **Figura 3. 14** y **Figura 3. 15**, donde se evidencia que la combinación de estribos y fibras de acero es más efectiva para resistir esfuerzos en comparación con el refuerzo exclusivamente de fibras de acero. Es importante tener en cuenta que hay otra variable no considerada en este análisis, que es la relación  $a/d$ .



**Figura 3. 26.-** Relación entre resistencia al cortante y la resistencia a la compresión del concreto con fibras de vigas peraltadas.

Los gráficos se dividieron en subconjuntos con y sin refuerzo transversal, segmentados según los rangos de  $V_f$  utilizados a lo largo de este capítulo, siguiendo el mismo enfoque que se aplicó con las vigas esbeltas. En la **Figura 3. 27** se aprecia una tendencia ascendente en la mayoría de los casos, excepto en los dos últimos intervalos, que cuentan con un número reducido

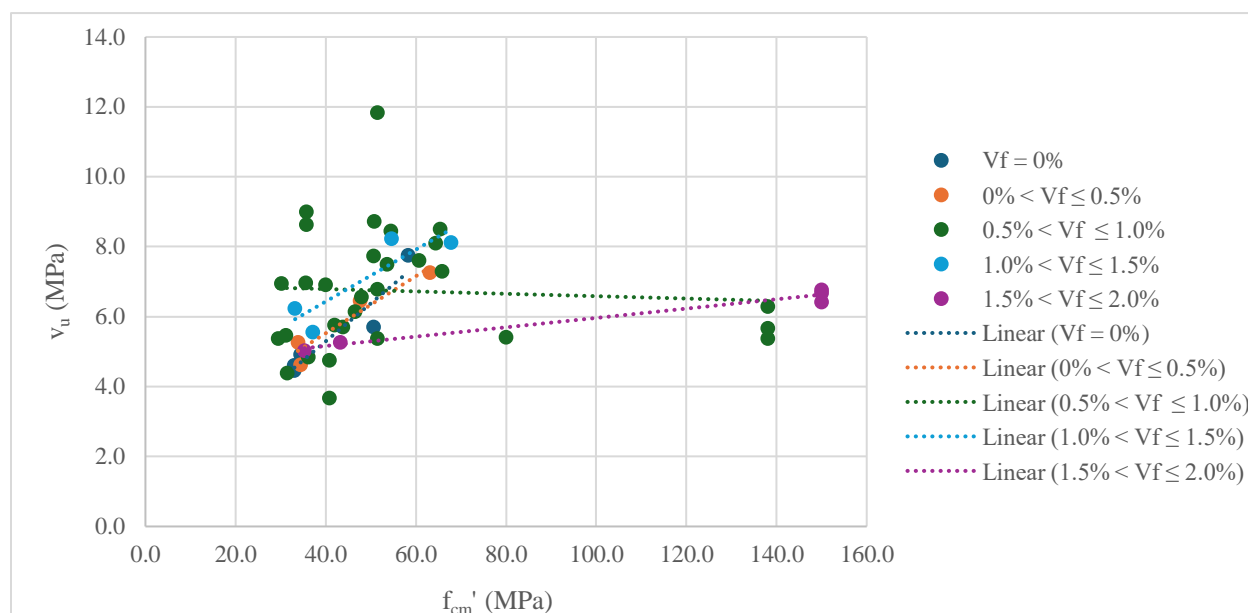
de elementos (ocho y dos, respectivamente), lo que hace que las tendencias no sean representativas. En los casos más representativos con mayores dosificaciones de fibras, la ordenada al origen de las líneas de tendencia es mayor, pero la pendiente del rango  $0.5\% < V_f \leq 1.0\%$  es menor que en el intervalo anterior, lo que sugiere un aumento en  $v_u$  a medida que  $f_{cm}'$  crece para el rango de  $0.0\% < V_f \leq 0.5\%$ . La influencia de las fibras en la resistencia al corte se hace evidente, ya que, como era de esperar, los elementos sin fibras mostraron una menor resistencia, mientras que aquellos con una mayor dosificación de fibras demostraron una mayor capacidad para resistir las fuerzas cortantes. Hay que mencionar que, para el caso de los elementos peraltados sin fibras, la influencia de éstas es menos evidente debido al mecanismo de resistencia, acción de arco.



**Figura 3. 27.** - Relación entre resistencia al cortante y la resistencia a la compresión del concreto con fibras para vigas peraltadas sin refuerzo transversal.

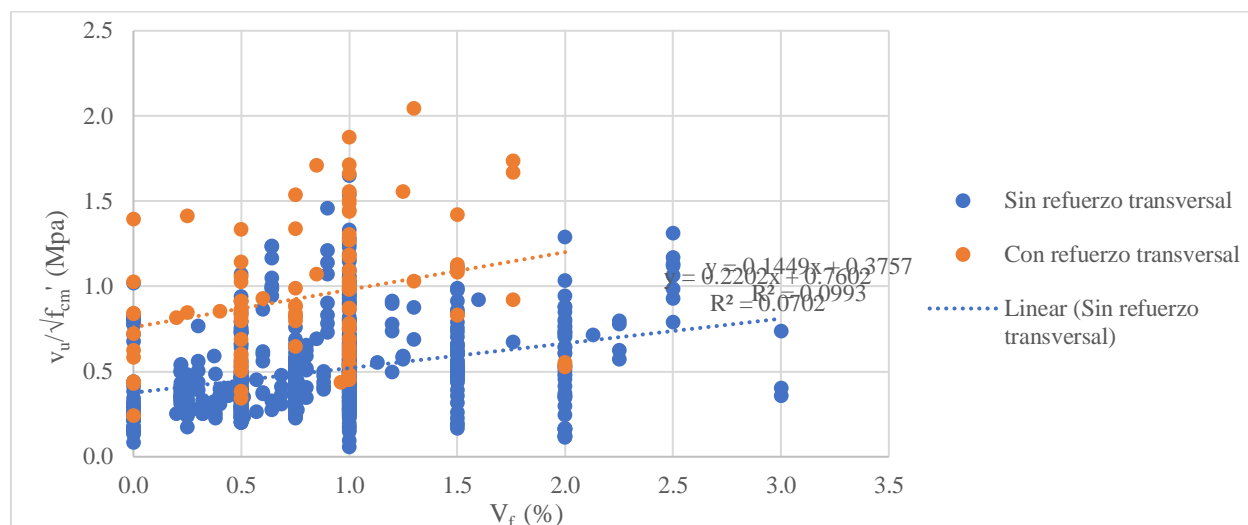


En la **Figura 3. 28** examina los elementos peraltados con refuerzo transversal, donde se cuenta con una cantidad reducida de datos y la presencia de una variable adicional: la cuantía de acero transversal, que varía en cada estudio dentro de la base de datos. Se observa una menor cantidad de intervalos  $V_f$ , llegando hasta  $V_f$  limitados a valores iguales o inferiores a 2.0%. Solo el intervalo de  $0.5\% < V_f \leq 1.0$  presenta más de cinco elementos contabilizados, con un total de 30, lo que lo convierte en la única línea de tendencia significativa del gráfico, marcada en verde. Sin embargo, esta línea muestra una pendiente negativa, lo que sugiere una posible discrepancia en cuanto a la mejora de la resistencia al esfuerzo cortante con la adición de fibras de acero. Esta discrepancia podría atribuirse a diferencias en la cantidad de estribos o en el área de refuerzo entre los especímenes. Los demás intervalos carecen de suficientes datos para realizar un análisis concluyente. Esta limitación subraya la necesidad de una recopilación más exhaustiva de información en futuros estudios para obtener conclusiones más sólidas y representativas.



**Figura 3. 28.** - Relación entre resistencia al cortante y la resistencia a la compresión del concreto con fibras para vigas peraltadas con refuerzo transversal.

En la **Figura 3. 29**, se presenta el porcentaje de fibras  $V_f$  en función del esfuerzo cortante normalizado para vigas peraltadas, divididas según la presencia de refuerzo transversal. En el intervalo de  $1.0\% < V_f \leq 1.5\%$  se presenta el caso con mayor resistencia, mientras que el más bajo lo presenta un elemento con  $V_f$  igual a  $1.0\%$ , ambos casos para elementos sin refuerzo de estribos. La línea de tendencia en los casos sin refuerzo transversal es ascendente, mientras que la de elementos con refuerzo transversal es descendente, lo que indica una correlación proporcional para la primer línea, y lo contrario para la segunda. Sin embargo, la línea de tendencia para elementos reforzados con estribos no debe considerarse representativa, pues, como se mencionó con antelación, solo el intervalo de  $0.5\% < V_f \leq 1.0$  presenta más de cinco elementos contabilizados, con un total de 30, por lo que los demás especímenes no marcan suficiente tendencia en el gráfico, lo que invita a realizar un análisis por separado y con mayor número de especímenes peraltados con refuerzo dual de fibras de acero y estribos para estudiar el fenómeno para que este sea más representativo.



**Figura 3. 29.-** Relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de la viga para  $a/d < 2.5$

Es importante destacar que en la **Figura 3. 20** y **Figura 3. 26** se presentan la misma relación entre la resistencia a compresión del concreto y la resistencia al cortante, pero para dos categorías diferentes de secciones transversales: secciones robustas y secciones esbeltas, respectivamente. Ambas figuras demuestran de manera clara que a medida que aumenta la resistencia a compresión del concreto, se logra alcanzar mayores esfuerzos resistentes al cortante. Esto confirma una relación directa entre la resistencia a compresión del concreto y la capacidad de resistencia al corte de las vigas reforzadas con fibras. Estos hallazgos respaldan la importancia de considerar la resistencia a compresión del concreto al diseñar y analizar vigas reforzadas con fibras, ya que puede influir significativamente en su capacidad para resistir fuerzas cortantes.

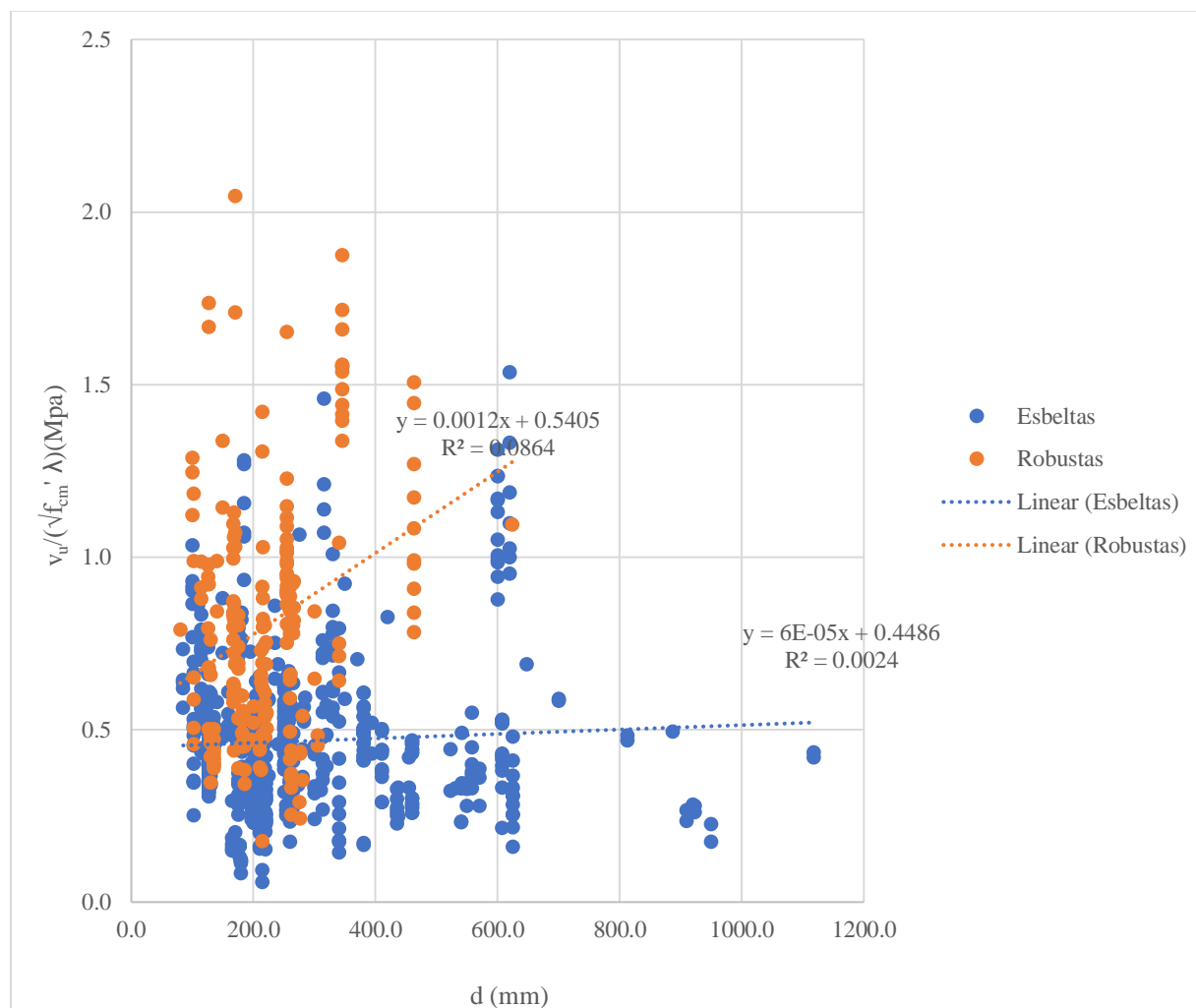
#### ***Resistencia al cortante según el peralte efectivo***

Se realizó un análisis en el cual se clasificaron los especímenes en función de la relación entre el claro de cortante y el peralte efectivo de las vigas ( $a/d$ ), y se comparó su resistencia a cortante normalizada con respecto al peralte efectivo. La normalización de la resistencia a cortante se llevó a cabo dividiendo la fuerza cortante máxima entre el área del espécimen, la raíz cuadrada de la resistencia a compresión del concreto y un factor  $\lambda$ . Este factor lambda varía dependiendo de si se trata de concreto normal ( $\lambda = 1$ ) o concreto ligero ( $\lambda = 0.75$ ). El concreto ligero se considera aquel que tiene una resistencia a la compresión menor a 20 MPa, y es debido a que posee una densidad baja y como consecuencia menos resistencia a la compresión.

Los resultados de este análisis se resumen en la **Figura 3. 30**, la cual muestra que, en general, los especímenes con una relación  $a/d$  menor que 2.5 alcanzan valores más altos de esfuerzo en comparación con su peralte efectivo, lo cual es esperable, por la acción de arco. A su vez, los elementos robustos tienen una línea de tendencia con una inclinación positiva, resaltando la relación que tiene el peralte efectivo con su resistencia a fuerzas cortantes. Por otro lado, los

especímenes esbeltos, que son la mayoría, presentan una línea de tendencia positiva y con una pendiente muy suave, resaltando la importancia que tiene a la hora de soportar esfuerzos cortantes la acción de arco.

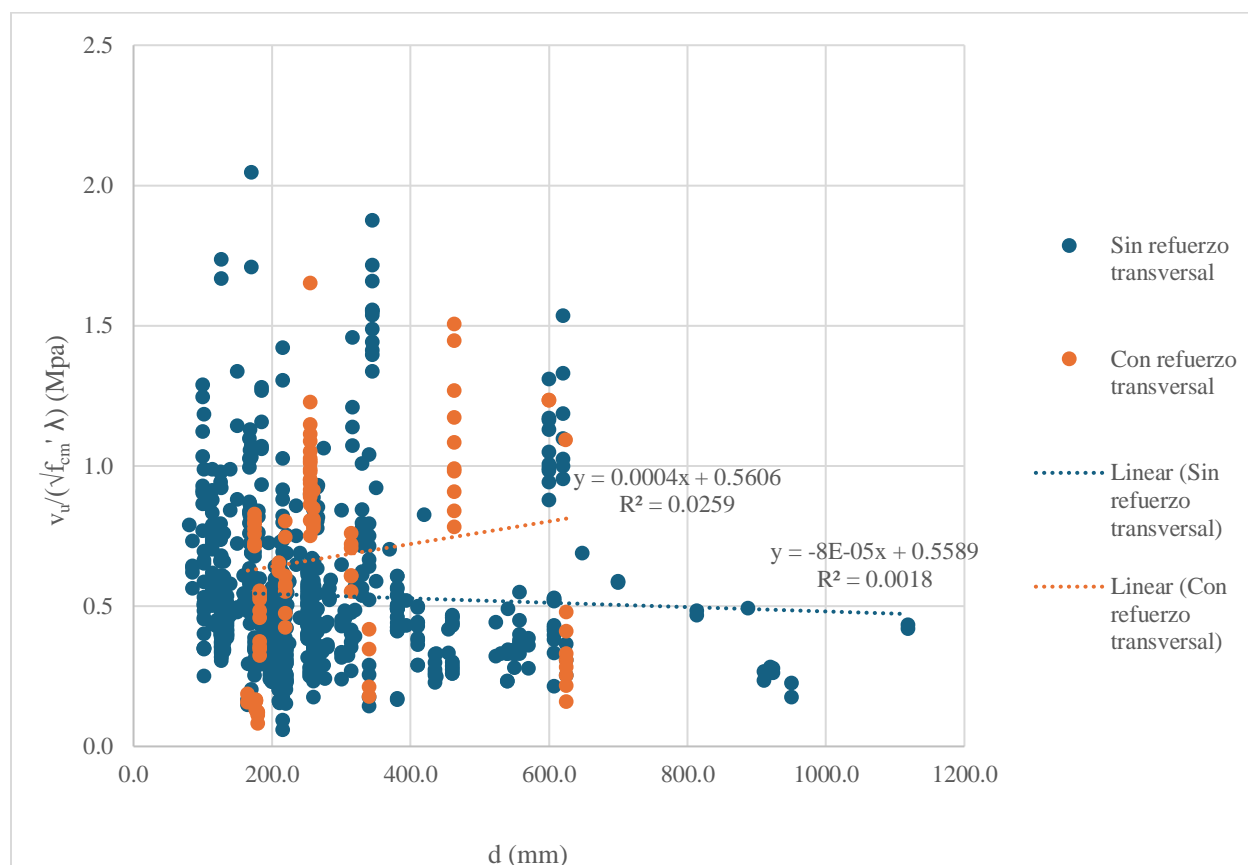
Estos resultados resaltan la importancia de considerar la relación  $a/d$  y el peralte efectivo al diseñar vigas reforzadas con fibras, ya que pueden influir en su capacidad para resistir esfuerzos cortantes y asegurar que se cumplan los requisitos de resistencia estructural. Pues para elementos esbeltos se alcanzaron resistencias a cortante menores.



**Figura 3. 30.** - Relación entre resistencia al cortante normalizado y el peralte efectivo.

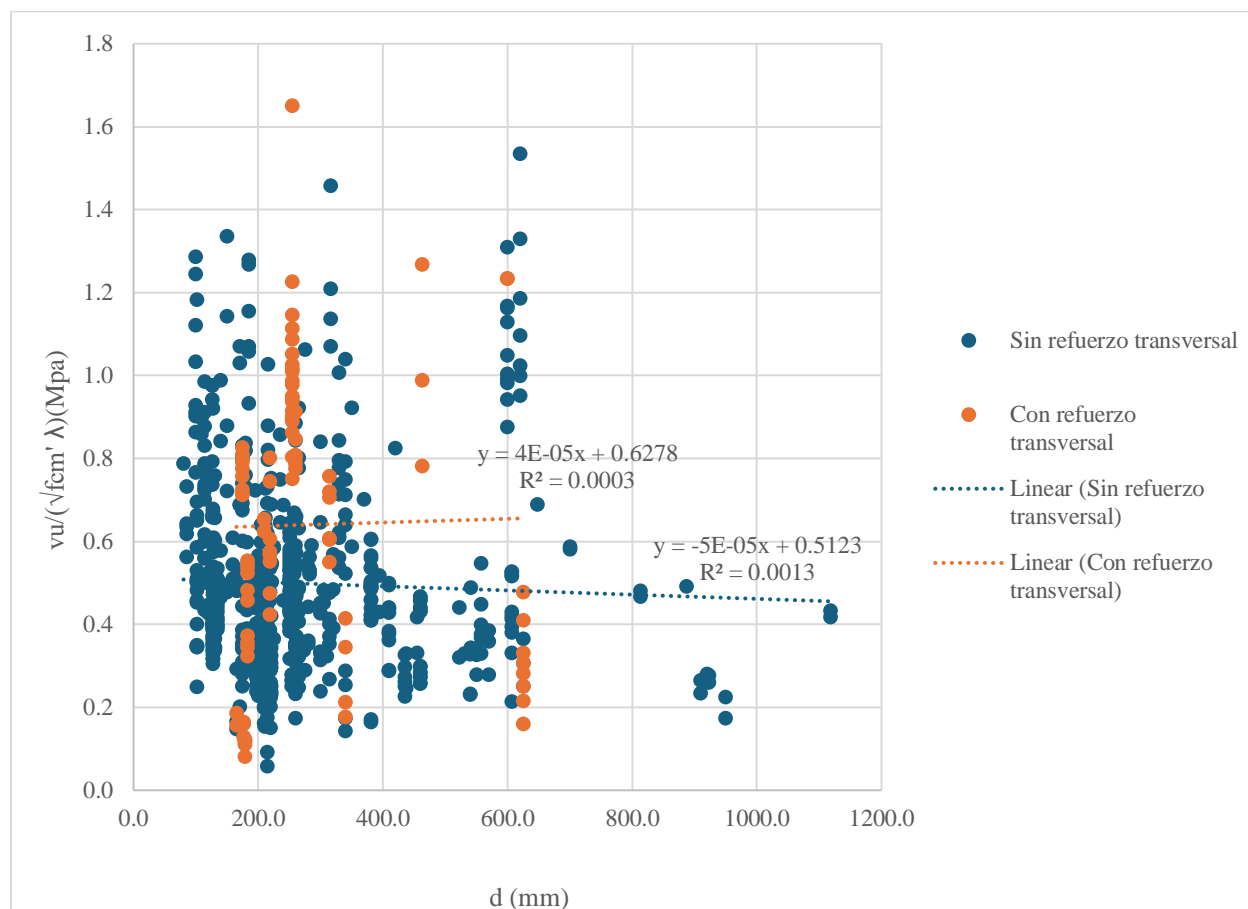
Se realizó el mismo análisis, pero clasificando los especímenes con y sin refuerzo transversal en la **Figura 3. 31**, y a la par, se decidió hacer el análisis que se hizo en la **Figura 3. 30** por separado para elementos esbeltos en la **Figura 3. 32**, y para elementos peraltados en la **Figura 3. 33**.

En la **Figura 3. 31**, se puede ver que la tendencia en elementos con refuerzo transversal es positiva, mientras en elementos sin refuerzo transversal, se ve una línea de tendencia negativa, dando a entender que, para vigas esbeltas, no existe relación entre la resistencia a cortante y el peralte a efectiva, lo cual es anti intuitivo, sobre todo, después de observar los resultados de exhibidos en la **Figura 3. 30**, y teniendo en cuenta que entre más crece el peralte efectivo, disminuye la  $a/d$ .



**Figura 3. 31.** - Relación entre resistencia al cortante normalizado y el peralte efectivo.

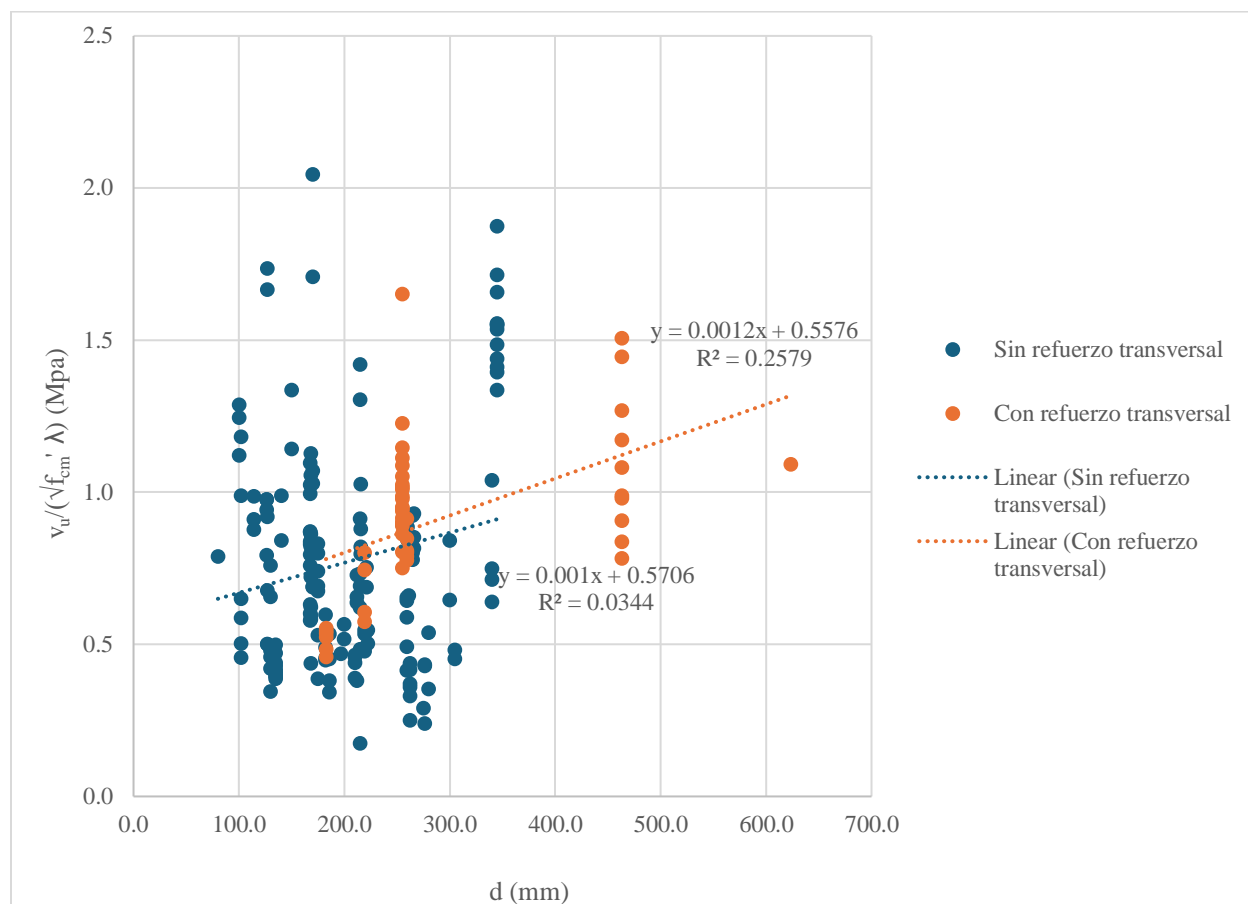
El mismo patrón que se observa en la **Figura 3. 31**, se puede ver en la **Figura 3. 32**, que es de vigas esbeltas, pues los elementos con refuerzo transversal tienen una línea de tendencia con pendiente positiva, y los que no cuentan con refuerzo, con pendiente negativa. Este fenómeno destaca la relevancia que tiene la acción de arco en las vigas, pues le brinda un mecanismo de resistencia por geometría a las vigas.



**Figura 3. 32.** - Relación entre resistencia al cortante normalizado y el peralte efectivo de vigas esbeltas.

En la **Figura 3. 33**, se presenta la relación que existe entre el peralte efectivo y la resistencia a cortante normalizada de elementos peraltados. Se observa un comportamiento más similar **Figura 3. 30**, donde tanto la línea de tendencia de las vigas con refuerzo transversal, como sin este, tienen una pendiente positiva. El mecanismo de resistencia de estas vigas es la

acción de arco por medio de la formación de puntales. Puede ser el porqué de este comportamiento en las gráficas de este apartado.



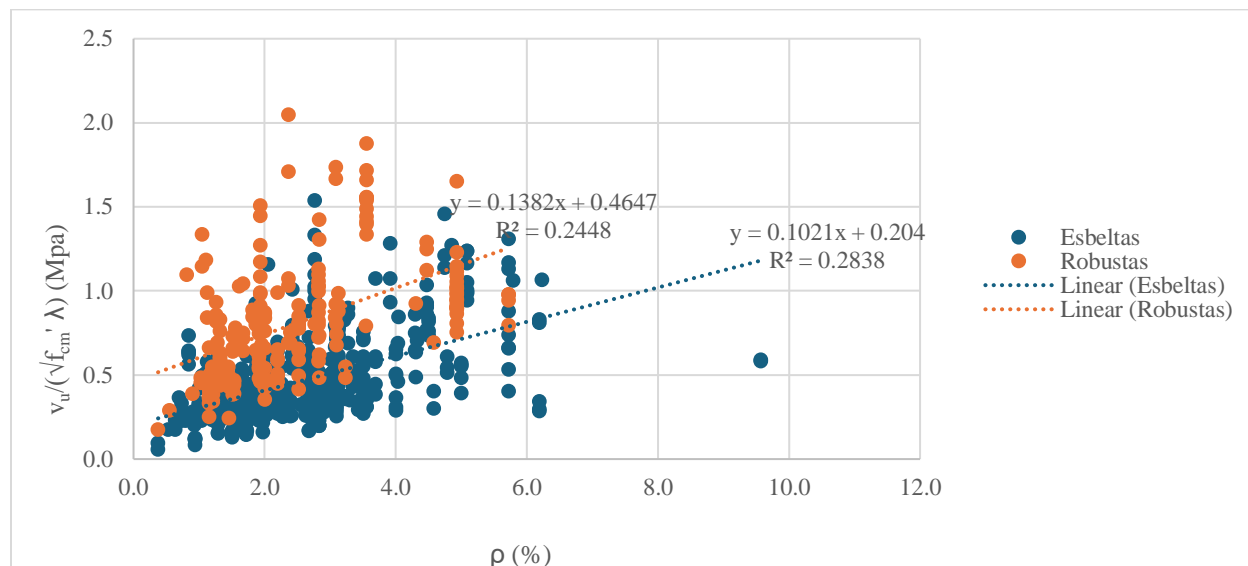
**Figura 3. 33.-** Relación entre resistencia al cortante normalizado y el peralte efectivo de vigas peraltadas.

En resumen, estos hallazgos destacan la complejidad del comportamiento estructural de las vigas reforzadas con fibras y la importancia de considerar múltiples factores, como la presencia de refuerzo transversal y la relación entre la altura y el peralte efectivo, al diseñar y analizar estas estructuras. Un enfoque integral que tome en cuenta estos aspectos permitirá desarrollar diseños más eficientes y seguros, asegurando un rendimiento óptimo en diversas condiciones de carga y mejorando la durabilidad y la resistencia global de las vigas de concreto reforzadas con fibras.

### **Resistencia al cortante según la relación de refuerzo longitudinal**

En el análisis realizado, se llevaron a cabo la comparación entre la resistencia a cortante normalizada y la cuantía de acero de refuerzo longitudinal para los especímenes, siendo esta última el área de acero de refuerzo longitudinal dividido entre el producto del espesor de la viga ( $b$ ) por el peralte efectivo de la viga ( $d$ ). Se muestran en color naranja los casos de vigas con sección robusta y de azul las esbeltas.

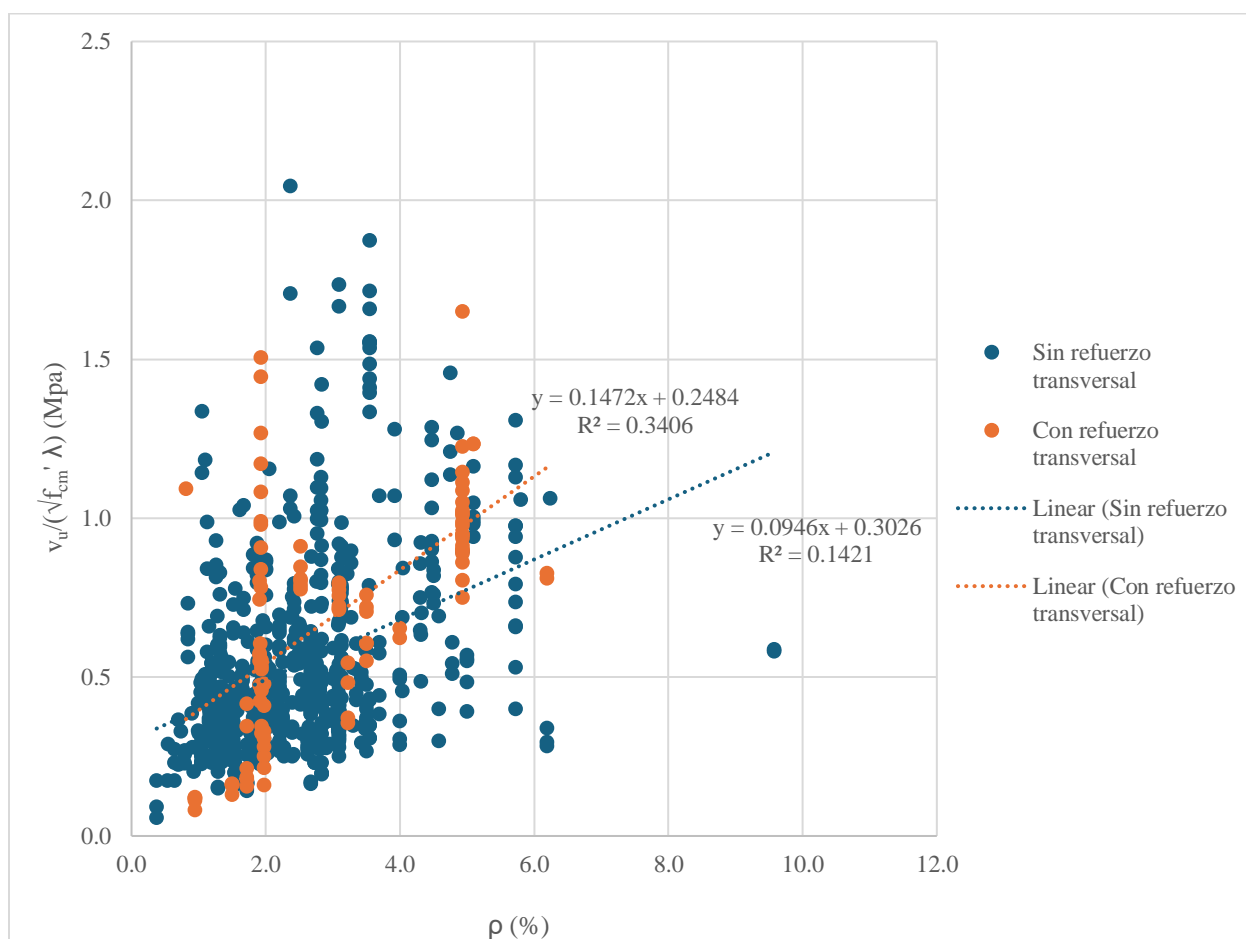
Los resultados se presentan de manera resumida en la **Figura 3. 34**, donde se puede observar que, en general, los especímenes peraltados alcanzan valores de resistencia a cortante más altos en comparación con los elementos esbeltos. Además, se observa una tendencia ascendente, lo que indica que a medida que aumenta la cuantía de acero de refuerzo longitudinal, se logra una mayor resistencia. Es importante mencionar que las cuantías más altas superan a las permitidas en los reglamentos y solo se utilizaron en los ensayos para lograr una falla por cortante.



**Figura 3. 34.** - Relación entre resistencia al cortante normalizada y la relación de refuerzo segmentadas por vigas esbeltas y peraltadas.

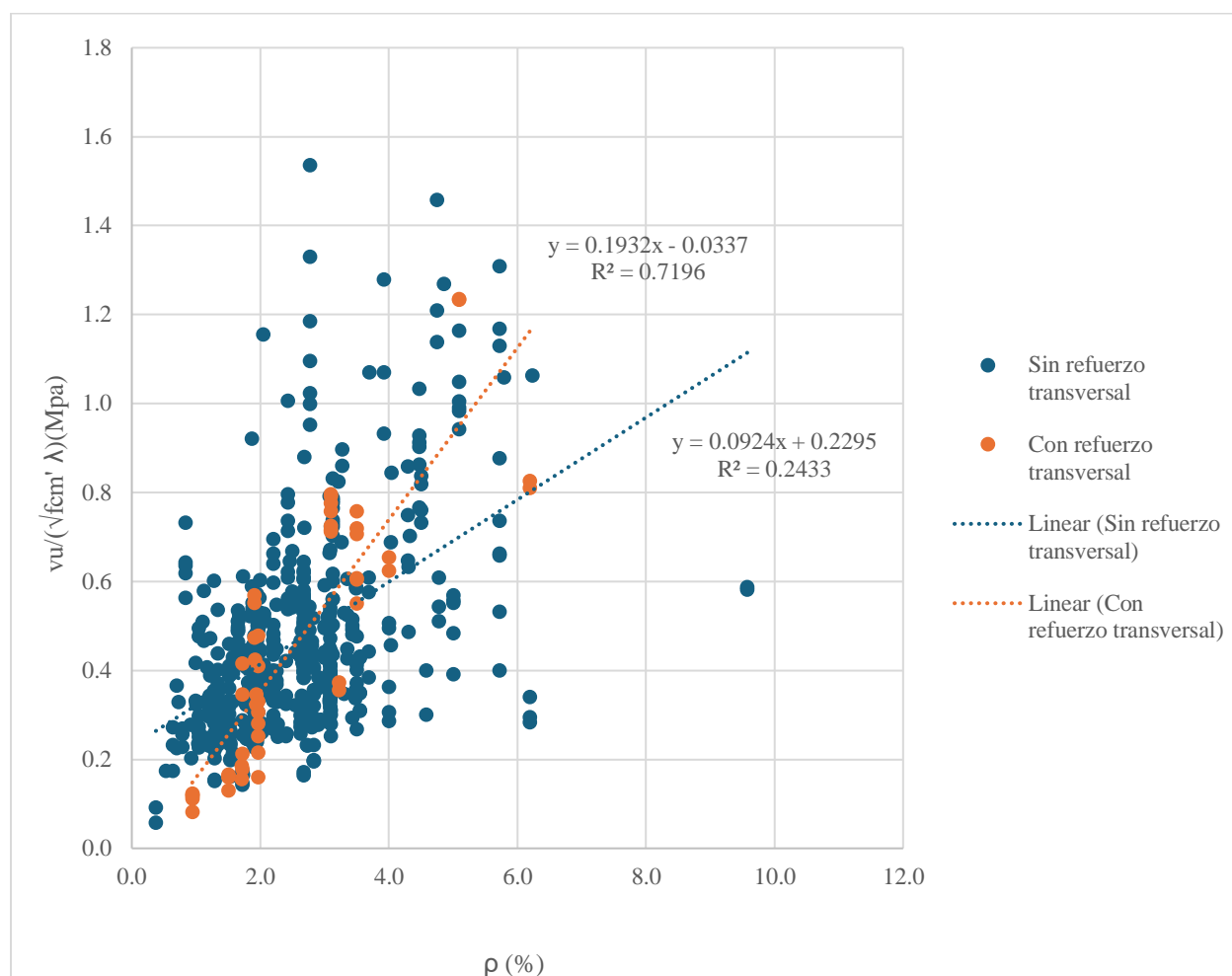


Para la **Figura 3. 35**, se realiza el análisis conforme a si los elementos poseen o no refuerzo transversal. Como se puede observar, la línea de tendencia para elementos con refuerzo transversal posee una pendiente ligeramente más pronunciada que los elementos que carecen de refuerzo. La diferencia en las tendencias no es tan marcada, como en la observada en la **Figura 3. 34**. Esto da a entender que la cuantía la relación  $a/d$  es más relevante a la hora de resistir esfuerzos cortantes, que el refuerzo de acero transversal, pues en la **Figura 3. 34**, una tendencia es marcadamente superior que en la **Figura 3. 35**.



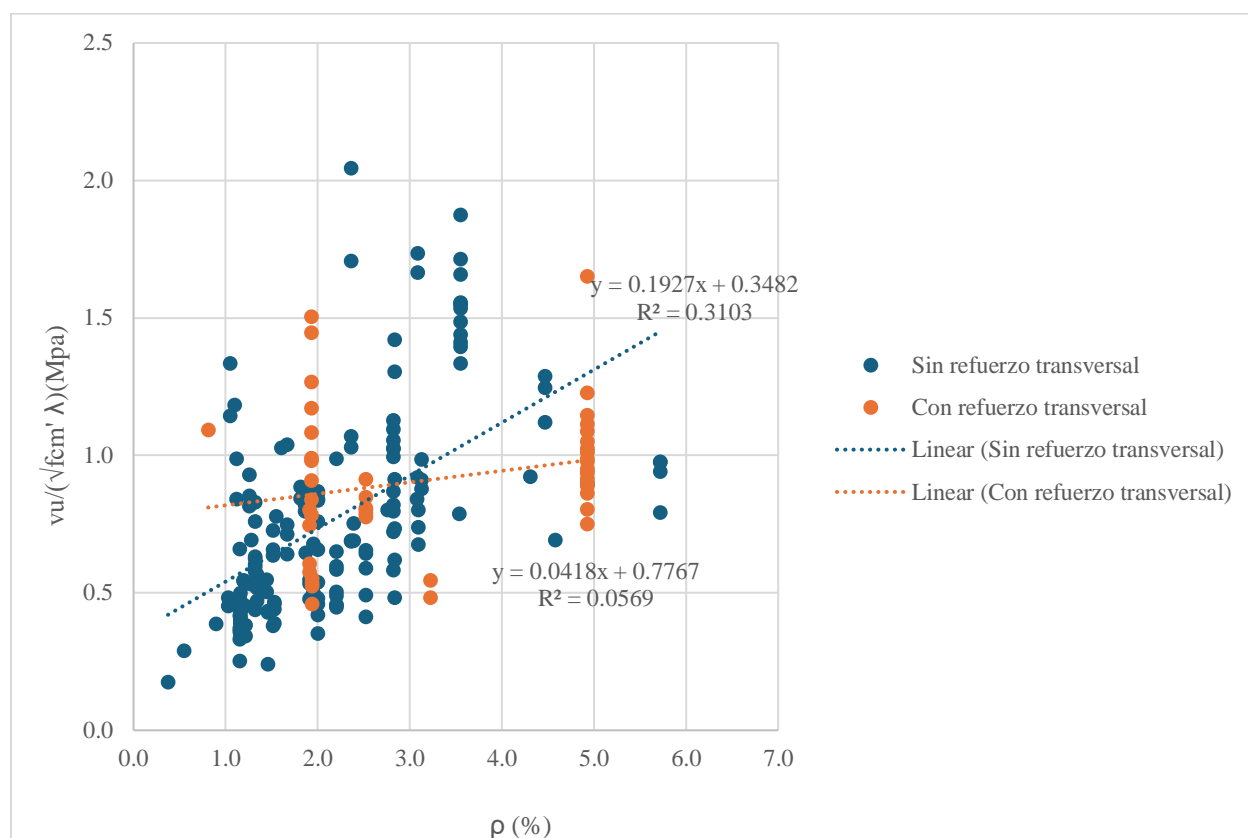
**Figura 3. 35.** - Relación entre resistencia al cortante normalizada y la relación de refuerzo de vigas esbeltas segmentadas por la presencia de refuerzo transversal.

También, se realizó el análisis separando en dos graficas la **Figura 3. 35**, en vigas esbeltas y peraltadas, resultando en las **Figura 3. 36** y **Figura 3. 37** respectivamente. La **Figura 3. 36** se observan las dos líneas de tendencia con pendiente positiva, por lo que cumplen con que esta relación entre la cuantía de acero longitudinal y la resistencia a cortante sea proporcional. la línea de tendencia de los elementos con refuerzo transversal es superior, lo que indica, que los elementos con refuerzo dual de estribos y fibras de acero resisten mejor las demandas de cortante.



**Figura 3. 36.** - Relación entre resistencia al cortante normalizada y la relación de refuerzo de vigas esbeltas.

La Figura 3. 37 muestra la relación entre la cuantía de acero longitudinal y la resistencia a esfuerzo cortante de vigas peraltadas. Se puede observar que las líneas de tendencia para ambos casos, con y sin estribos, que sus pendientes son positivas. La pendiente del caso de vigas sin refuerzo es más pronunciada que para casos con refuerzo. Esto indica, que, para vigas peraltadas, el refuerzo longitudinal es menos efectivo a la hora de resistir esfuerzos en vigas con estribos, que para aquellas que carecen y a la vez. Es bien sabido que la cuantía de acero es una variable que contribuye de manera directamente proporcional con la resistencia a cortante y que incluso se contempla en el cálculo de la contribución del concreto en el cálculo de la resistencia a cortante de vigas.



**Figura 3. 37.-** Relación entre resistencia al cortante normalizada y la relación de refuerzo para vigas peraltadas.

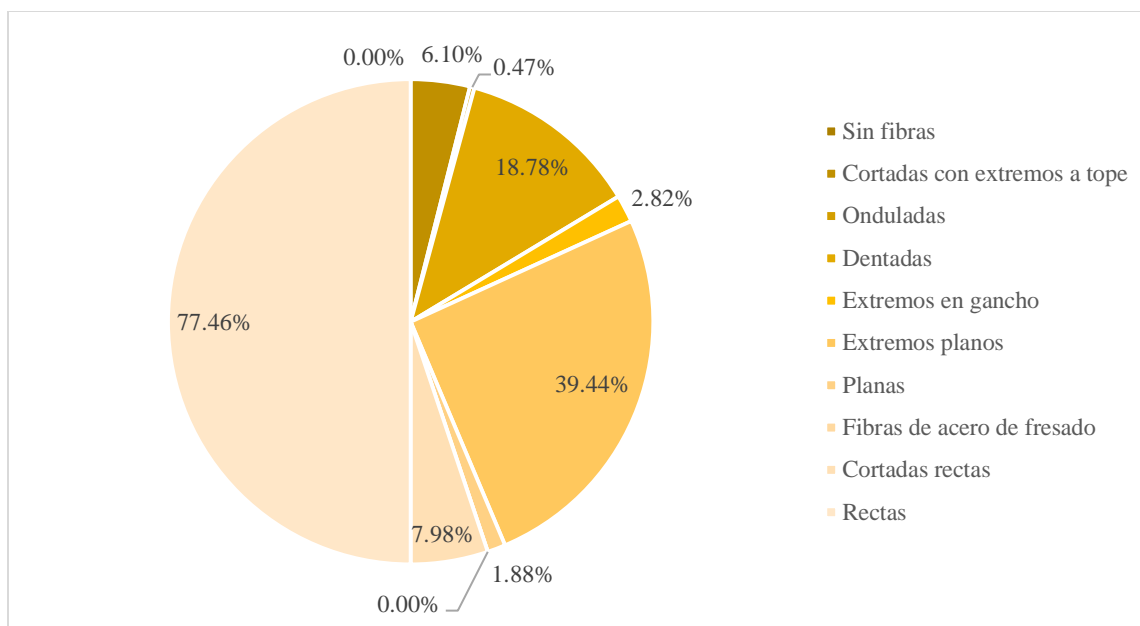
Estos resultados enfatizan la importancia de considerar tanto la relación a/d como la relación de refuerzo al diseñar vigas reforzadas con fibras. Además, sugieren que incrementar el refuerzo longitudinal puede contribuir a mejorar la resistencia a cortante de las vigas.

### ***Resistencia al cortante según la forma de la fibra***

La distribución por forma de fibra en la base de datos se resume en la **Tabla 3. 10** y se ilustran en la **Figura 3. 38**. Según los datos recopilados, se encontró que 54.09% de los casos corresponden a fibras con forma de gancho en los extremos, conocidas como "Hooked-end fibers". Posteriormente, 19.62% de los casos corresponden a fibras onduladas o rizadas, mientras que 14.72% de los casos corresponden a fibras rectas y el restante de otro tipo de fibras. Estos resultados proporcionan información valiosa sobre la distribución de diferentes formas de fibra en la base de datos. El alto porcentaje de fibras "Hooked-end" sugiere que esta forma de fibra es ampliamente utilizada a nivel comercial.

**Tabla 3. 10.-** Número de especímenes según la forma de la fibra.

<b>Tipo de fibra</b>	<b>No.</b>	<b>%</b>
Sin fibras	50	6.17%
Cortadas con extremos a tope	11	1.36%
Onduladas	166	20.47%
Dentadas	6	0.74%
Extremos en gancho	432	53.27%
Extremos planos	6	0.74%
Planas	3	0.37%
Fibras de acero de fresado	11	1.36%
Cortadas rectas	3	0.37%
Rectas	107	14.92%
Torcidas	2	0.25%
<b>Total</b>	<b>811</b>	<b>100.000%</b>

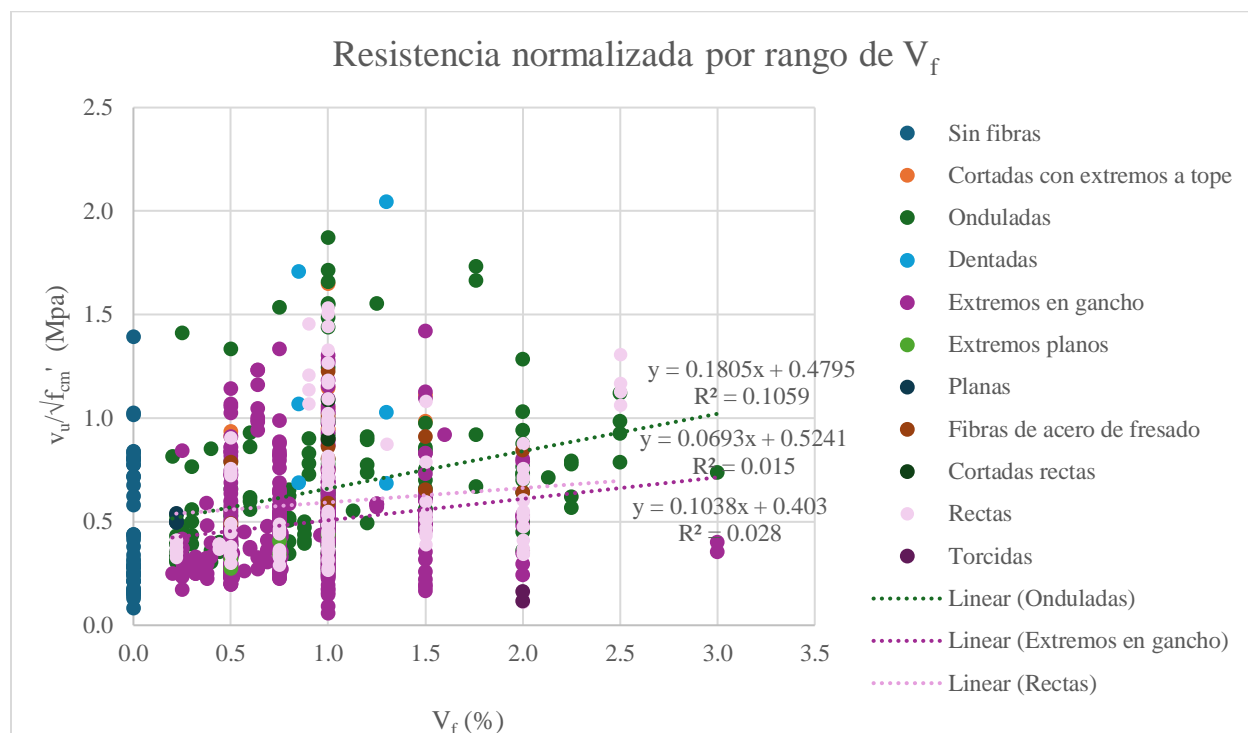


**Figura 3. 38.-** Porcentaje de especímenes según la formade la fibra.

Como se observa en la **Figura 3. 39**, la cual compara la resistencia normalizada por rango de  $V_f$  se aprecia tendencias ascendentes claramente. Aunque parece existir una ligera tendencia ascendente para todas las formas de fibras en la **Figura 3. 39**, la forma de fibra con el elemento que mayor resistencia mostró, fueron las fibras dentadas y de esta forma de fibra, solo se cuenta con seis elementos en la base de datos, por lo que se recomienda generar más investigación alrededor de esta forma por su alto desempeño. Otra forma de fibra que destaca es la fibra ondulada, pues los especímenes con este tipo lograron alcanzar esfuerzos más elevados comparado con los otros tipos de fibra, y de esta fibra se cuenta con 166 elementos, lo cual indica que los gráficos presentados son representativos. Los elementos con peor desempeño son aquellos que no poseen fibras.

Por practicidad solo se muestran las líneas de tendencia de los tipos de fibra que cuentan con 50 o más especímenes, esto asegura que lo analizado sea representativo, sin embargo, para las vigas dentadas se presenta un análisis también, debido a uno de los elementos alcanzó la

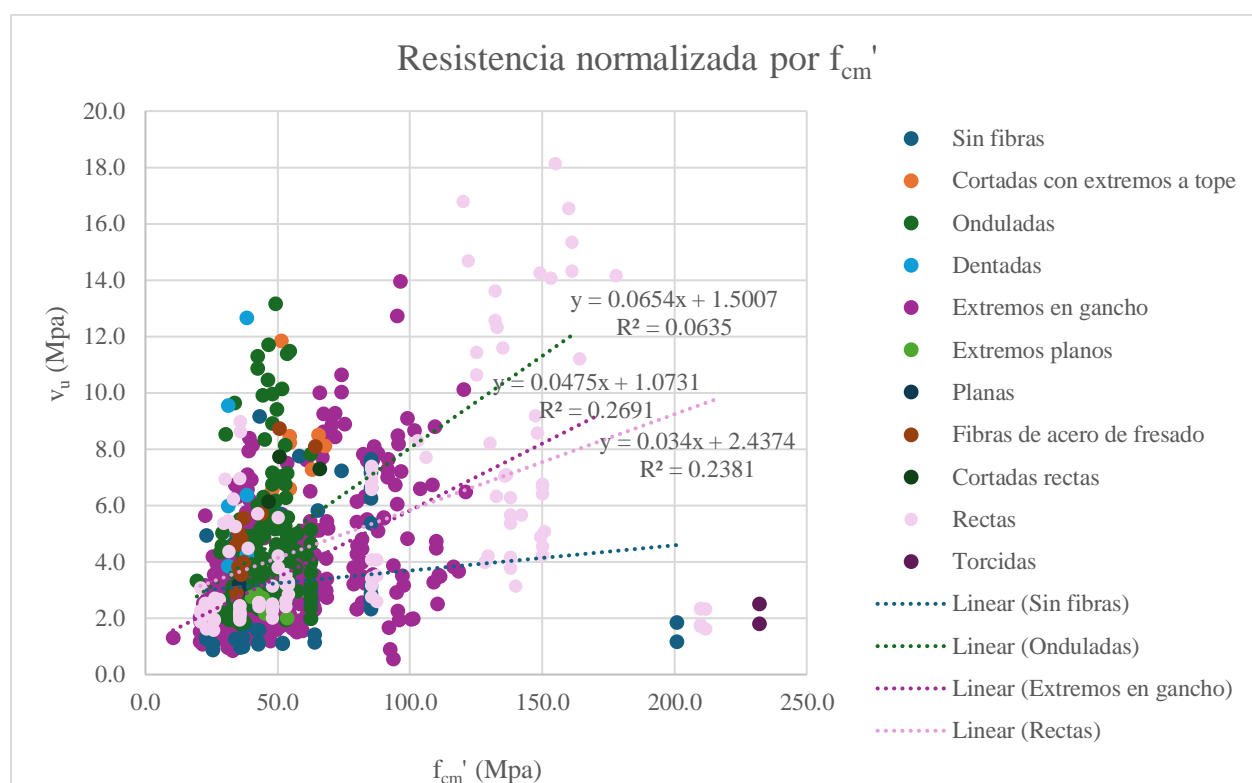
mayor resistencia. Se resalta que la línea de tendencia superior es la de los elementos reforzados con fibras onduladas, seguida por la línea de las fibras rectas y por último la de los elementos con refuerzo de fibras con extremos en gancho. Se pensaría que el anclaje que brindan los extremos en gancho resultaría en un mejor desempeño de este tipo de fibras al compararlo con las fibras rectas, pero no parece ser el caso para esta gráfica.



**Figura 3. 39.-** Relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de la viga de acuerdo con la forma de la fibra.

Por otro lado, en la **Figura 3. 40**, se puede apreciar la relación directamente proporcional para todas las formas de fibra, aunque solo se graficaron las líneas de tendencia de los elementos reforzados con fibras de las formas ondulada, extremos en gancho y las rectas, y a su vez, los elementos sin refuerzo de fibras. Esto por lo mencionado anteriormente, que solo este tipo de fibras cuenta con datos suficientes como para considerar que el análisis es representativo. Dicho esto, las fibras con mejor desempeño son las onduladas, seguidas de las fibras con extremo en

gancho, las rectas y al final, los elementos sin refuerzo de fibras. Esto nos da a entender que el anclaje que ofrecen las fibras onduladas y con extremos en gancho, es suficiente como para incrementar la resistencia a cortante de los elementos de concreto que sean reforzados con éstas, sin embargo, es bueno comentar, que las fibras rectas no tienen un desempeño pobre y recordar que en la **Figura 3. 39** las fibras rectas mostraron mejor desempeño a la hora de resistir esfuerzos. Es necesario mencionar, que las líneas de tendencia para las fibras onduladas y con extremos en gancho fueron extrapoladas, debido a que la resistencia a compresión de estos elementos no supera los 75 MPa en el caso de las onduladas y los que tienen fibras con extremos en gancho no supera los 125 MPa, y esto mismo puede ser el motivo por el cual al comparar las fibras rectas y con extremos en gancho sean distintos los juicios, esto sin mencionar que hay elementos con refuerzo transversal y que algunas de las vigas son peraltadas.



**Figura 3. 40.-** Relación entre la resistencia a la compresión del concreto y resistencia al cortante por espécimen de acuerdo con la forma de la fibra.

### Vigas esbeltas

Se debe tomar en cuenta para este análisis que algunos elementos poseen refuerzo transversal y/o son vigas peraltadas, como fue mencionado, por lo que se realizó un análisis por separado para distinguir mejor el desempeño de los tipos de fibra. En la **Tabla 3. 11.** – Distribución de elementos por su tipo de fibras para vigas esbeltas, se puede apreciar la distribución de elementos clasificados por la forma de la fibra que los refuerza para elementos esbeltos. Se observa que la forma más común para vigas esbeltas es la de extremos en gancho, seguida de la forma ondulada, la forma recta es la tercera con mayor representación y los elementos sin fibras posteriormente. Las demás formas de fibra no rebasan la decena, por lo que se considera que sean suficientes para tener un análisis representativo, como se mencionó con antelación.

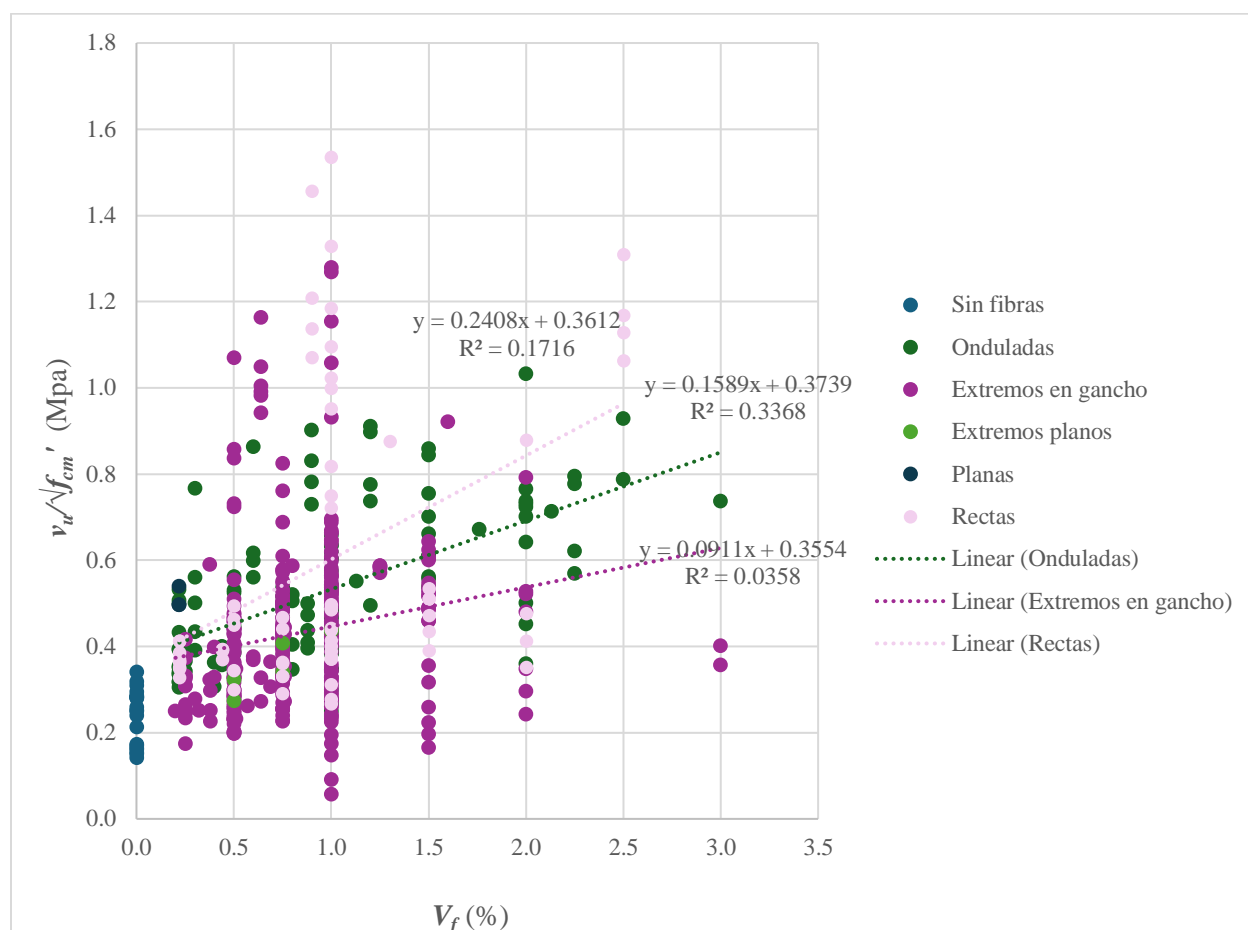
**Tabla 3. 11.** – Distribución de elementos por su tipo de fibras para vigas esbeltas

Tipo de fibra	Refuerzo transversal				Total	
	No		Si			
	No.	%	No.	%	No.	%
Sin fibras	21	3.51%	11	1.84%	32	5.35%
Onduladas	124	20.74%	2	0.33%	126	21.07%
Extremos en gancho	324	54.18%	16	2.68%	340	56.86%
Extremos planos	6	1.00%	0	0.00%	6	1.00%
Planas	3	0.50%	0	0.00%	3	0.50%
Rectas	69	11.54%	20	3.34%	89	14.88%
Torcidas	0	0.00%	2	0.33%	2	0.33%
<b>Total</b>	<b>547</b>	<b>91.47%</b>	<b>51</b>	<b>8.53%</b>	<b>598</b>	<b>100.00%</b>

En la **Figura 3. 41** se grafica relación entre  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de la viga de acuerdo con la forma de la fibra para vigas esbeltas sin refuerzo transversal. Todas las líneas de tendencia graficadas poseen pendiente positiva. Se pueden apreciar notables diferencias al compararla con la **Figura 3. 39**, pues para este caso, la línea de tendencia con mejor relación



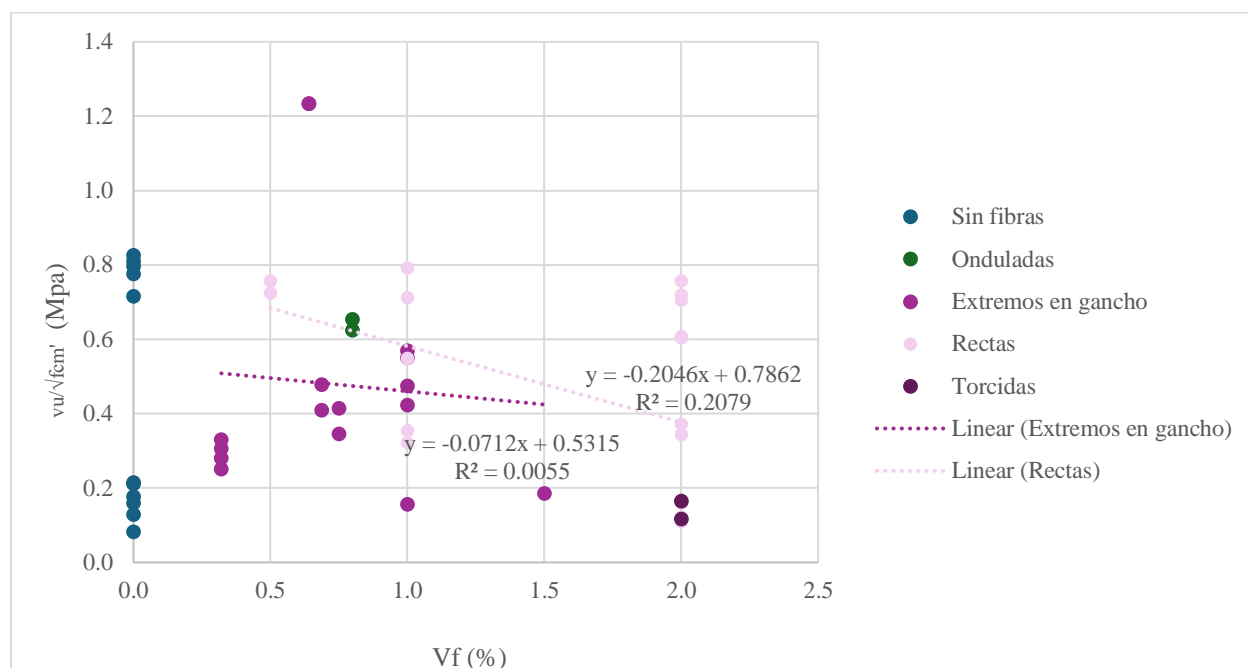
entre la  $V_f$  y la resistencia a corte normalizada, es la de elementos reforzados con fibras rectas, seguidas de las onduladas y finalmente los que tienen fibras con extremos en gancho, sin embargo, observando las  $R^2$  se puede observar que, en el último caso, la dispersión de datos es muy alta en comparación a los otros dos casos. Se recuerda que solo se realizaron líneas de tendencia para aquellos tipos de fibra que tienen más elementos en la base de datos, para que el análisis fuera representativo.



**Figura 3. 41.** - Relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de la viga de acuerdo con la forma de la fibra para vigas esbeltas sin refuerzo transversal.

En la **Figura 3. 42**, se debe tomar en cuenta que posee pocos especímenes registrados por categoría, por lo que se decidió graficar aquellas categorías que tuvieran más de 15 elementos

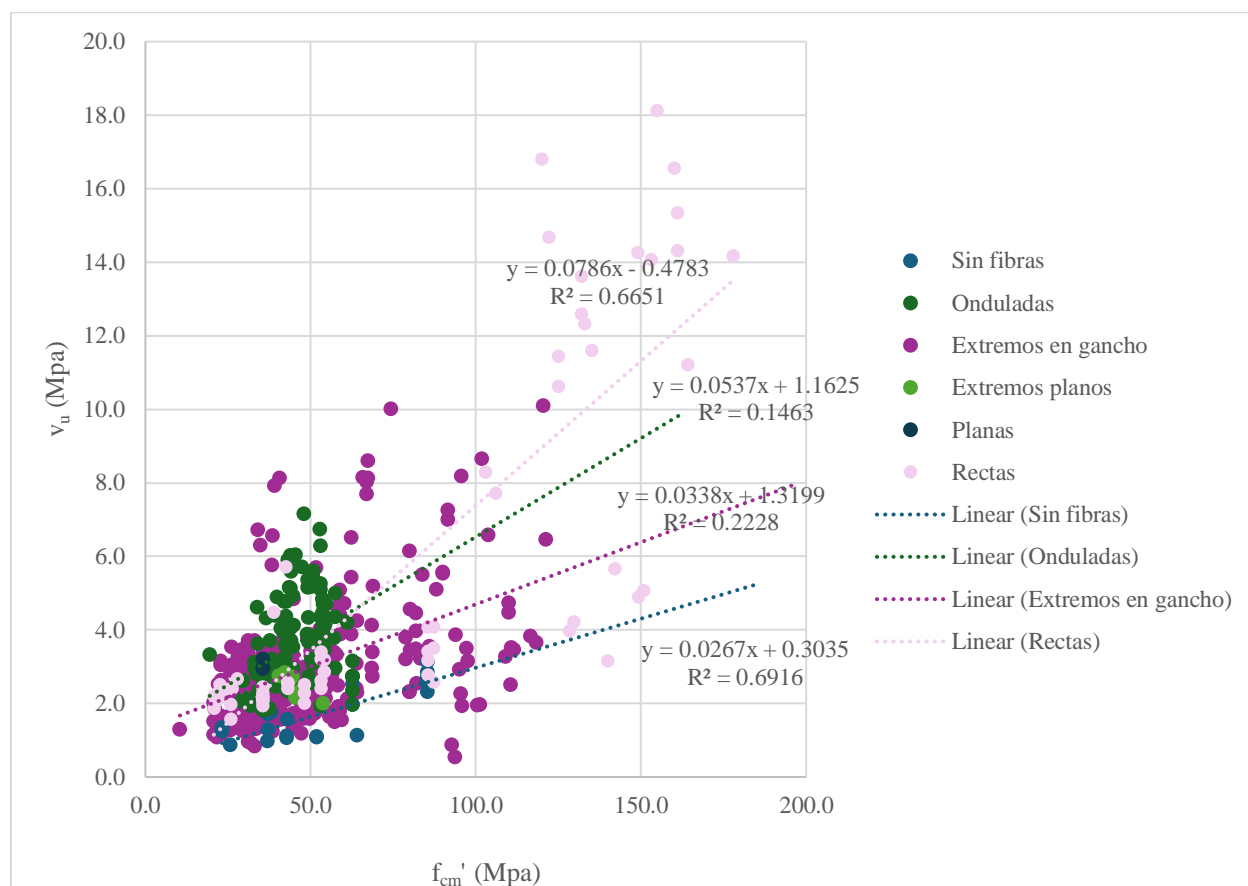
contabilizados, que son los elementos con fibras con extremos en gancho y los que poseen fibras rectas. Se observa que ambas líneas de tendencia poseen pendiente negativa, pero tomando en cuenta que las cuantías de acero de refuerzo transversal que presentan los diferentes especímenes son distintas, por lo que puede ser debido a eso que se presentan dichas pendientes. A la par, la dispersión en fibras rectas es menor que en fibras con extremos en gancho por una vasta diferencia. Aunado a lo anterior, las fibras rectas resistieron mejor los esfuerzos que las fibras con extremos en ganchos, para mismas  $V_f$  en general, por otro lado, las torcidas tuvieron un desempeño muy pobre, aunque solo se presentan dos elementos con dicho refuerzo, por lo que se recomienda realizar un estudio por separado para comprender su comportamiento mejor.



**Figura 3. 42.** - Relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de la viga de acuerdo con la forma de la fibra para vigas esbeltas con refuerzo transversal.

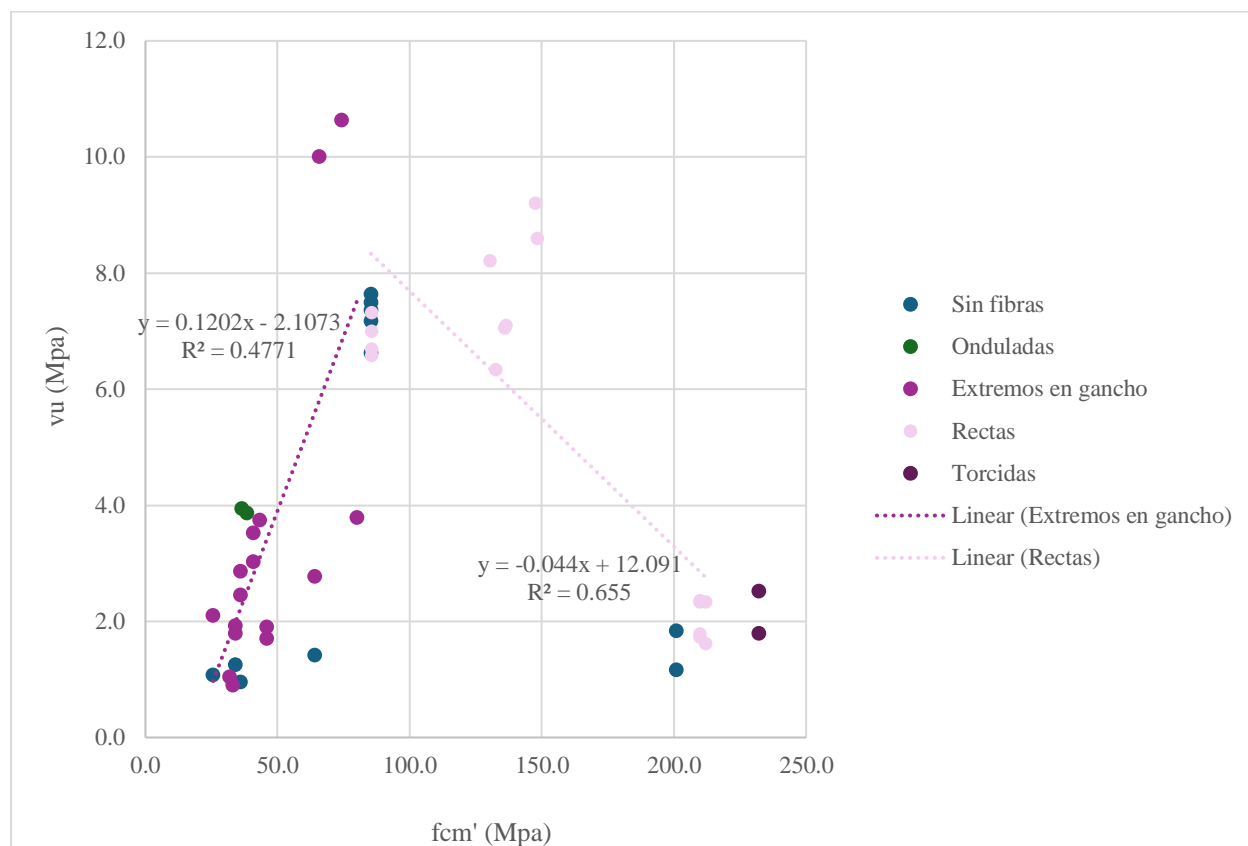
La **Figura 3. 43** presenta la relación entre la resistencia a cortante y la resistencia a compresión del concreto de cada elemento esbelto sin refuerzo transversal, donde se puede ver que en general la tendencia es ascendente para todos los tipos de fibra, sin embargo y al igual

que en la **Figura 3. 41**, solamente se graficaron las líneas de tendencia de las fibras onduladas, con extremos en gancho, rectas y la de elementos sin fibras, esto debido a que son las únicas clasificaciones con elementos suficientes para que el estudio se considere representativo. Se observa como la línea de tendencia de fibras rectas es superior a todas, siguiendo la de fibras onduladas y posteriormente la de fibras con extremos en gancho. La línea de tendencia inferior fue la de elementos sin fibras, dando a entender que los elementos reforzados con fibras de acero suelen resistir mejor los esfuerzos a cortante. Se debe hacer notar que, en todas las líneas de tendencia (menos en la de fibras rectas) se extrapolaron, pues las resistencias a compresión eran no eran tan altas como las de las fibras rectas, por lo que no hacerlo no se distinguirían en el gráfico.



**Figura 3. 43.** - Relación entre la resistencia a la compresión del concreto y resistencia al cortante por espécimen de acuerdo con la forma de la fibra para vigas esbeltas sin refuerzo transversal.

La **Figura 3. 44** presenta la relación entre la resistencia a cortante y la resistencia a compresión del concreto de cada elemento esbelto con refuerzo transversal. Al tener menos datos presentes en esta categoría, las tendencias se vuelven difíciles de detectar, como se mencionó previamente solo los especímenes con fibras con extremos en gancho y rectas cuentan con más de 15 ejemplares, por lo que solo se graficaron las líneas de tendencia para dichos casos. La línea de tendencia para las fibras con extremos en gancho es positiva y con una dispersión media, mientras que para las rectas es negativa y con una dispersión medianamente alta. Sin embargo, se recuerda que no se ha considerado la cuantía de acero transversal en el estudio, lo que puede afectar a los resultados.



**Figura 3. 44.** - Relación entre la resistencia a la compresión del concreto y resistencia al cortante por espécimen de acuerdo con la forma de la fibra para vigas esbeltas con refuerzo transversal.

### Vigas peraltadas

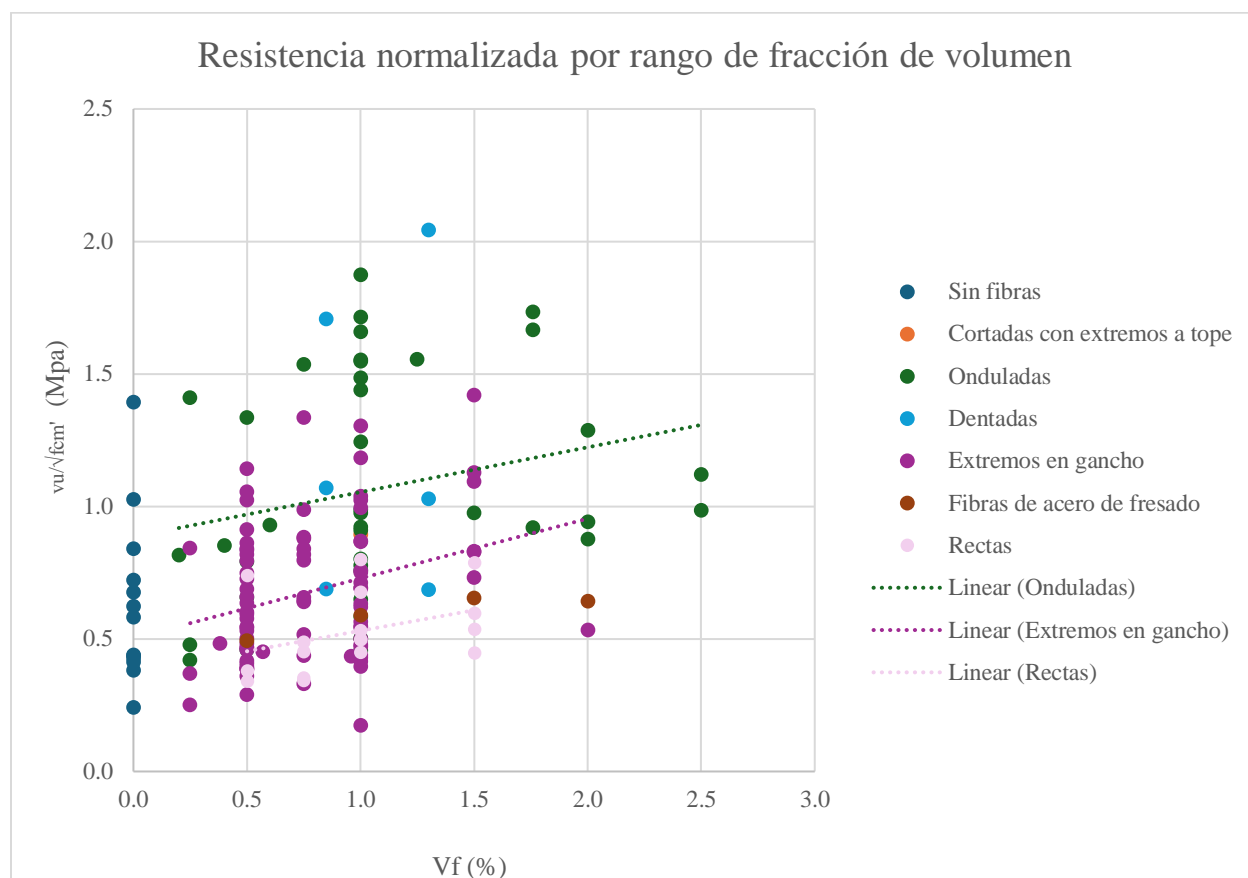
En la **Tabla 3. 12**, se puede apreciar la distribución de elementos clasificados por la forma de la fibra que los refuerza para elementos peraltados. Se observa que la forma más común para vigas esbeltas sin refuerzo es la de extremos en gancho, seguida de la forma ondulada, la forma recta es la tercera con mayor representación y los elementos sin fibras posteriormente. Para los casos con refuerzo transversal, el tipo de viga más frecuente son las fibras rectas, seguidas de las cortadas con extremos a tope. Las demás formas de fibra no rebasan la decena, por lo que se considera que sean suficientes para tener un análisis representativo, como se mencionó con antelación.

**Tabla 3. 12.** - Distribución de elementos por su tipo de fibras para vigas peraltadas

Tipo de fibra	Refuerzo transversal				Total	
	No		Si			
	No.	%	No.	%	No.	%
Sin fibras	13	6.10%	5	2.35%	18	8.45%
Cortadas con extremos a tope	1	0.47%	10	4.69%	11	5.16%
Onduladas	40	18.78%	0	0.00%	40	18.78%
Dentadas	6	2.82%	0	0.00%	6	2.82%
Extremos en gancho	84	39.44%	8	3.76%	92	43.19%
Fibras de acero de fresado	4	1.88%	7	3.29%	11	5.16%
Cortadas rectas	0	0.00%	3	1.41%	3	1.41%
Rectas	17	7.98%	15	7.04%	32	15.02%
<b>Total</b>	<b>165</b>	<b>77.46%</b>	<b>48</b>	<b>22.54%</b>	<b>213</b>	<b>100.00%</b>

En la **Figura 3. 45**, muestra la relación entre  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de la viga de acuerdo con la forma de la fibra para vigas robustas sin refuerzo transversal. Se puede observar con facilidad la tendencia de los elementos a mejorar su resistencia conforme la

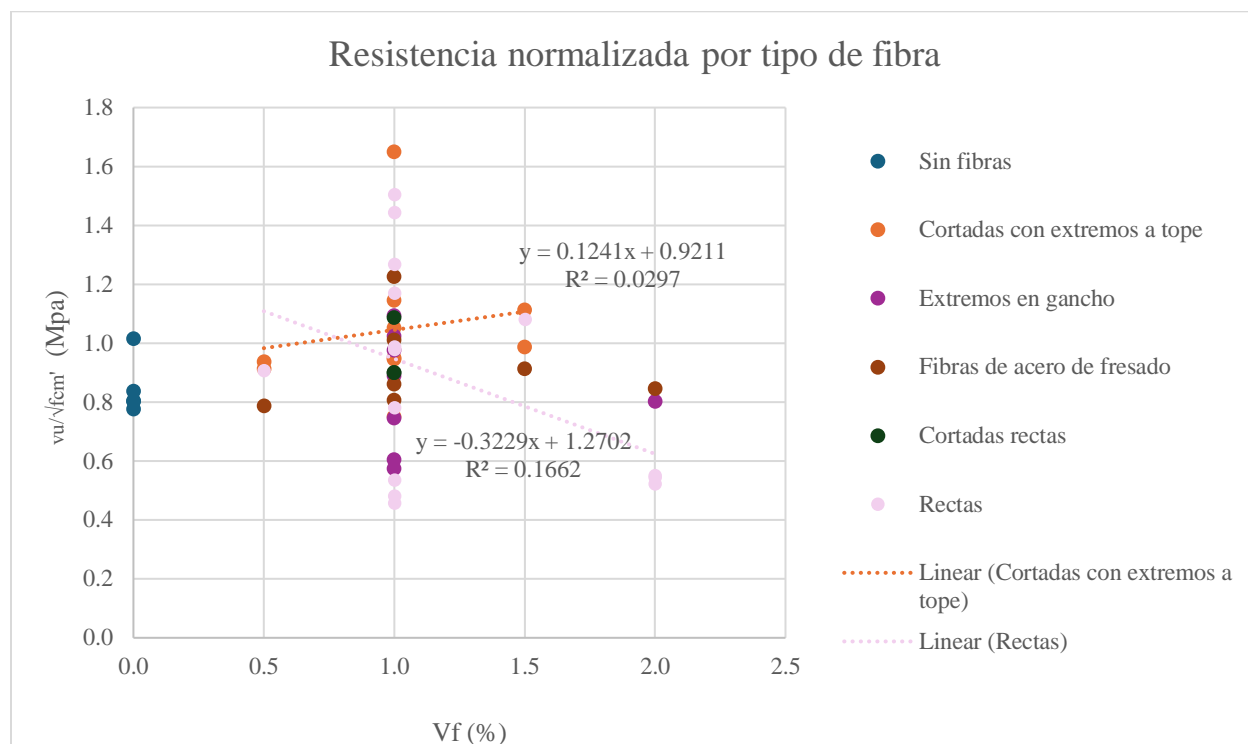
dosificación de fibras aumenta. La línea de tendencia con mejor desempeño es la de fibras onduladas, seguida de las fibras con extremos en gancho y posteriormente la de fibras rectas. Esto es un tanto diferente a lo observado en la **Figura 3. 41**, donde el tipo de fibra con mejor desempeño fueron las fibras rectas, y en este caso, lo contrario.



**Figura 3. 45.** - Relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de la viga de acuerdo con la forma de la fibra para vigas peraltadas sin refuerzo transversal.

En la **Figura 3. 46** se puede apreciar la relación  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de la viga de acuerdo con la forma de la fibra para vigas peraltadas con refuerzo transversal. El tipo de fibras más frecuente para vigas peraltadas con refuerzo transversal es de fibras rectas, seguido de las cortadas con extremos a tope, las cuales provienen de un mismo artículo científico y la cuantía de acero transversal fue uniforme para todos los elementos, por lo que su

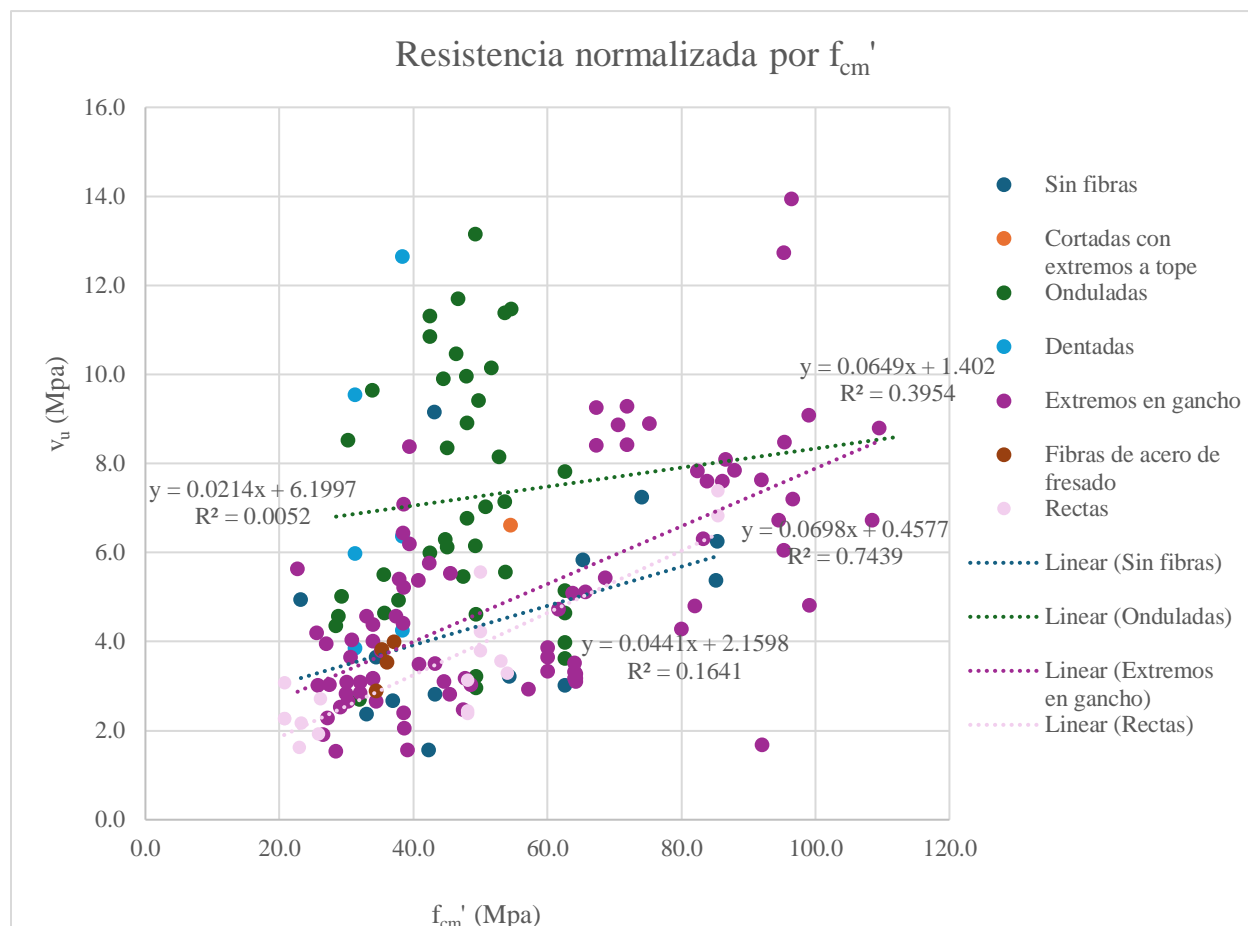
comportamiento es representativo y se ve una clara relación directamente proporcional en su  $V_f$  y la resistencia normalizada. Caso contrario, se tienen las fibras rectas, donde la cuantía de acero transversal no es uniforme para todos los elementos y da a lugar a que la línea de tendencia cuente con una pendiente negativa. Los demás tipos de fibra no cuentan con suficientes especímenes como para considerar su estudio representativo.



**Figura 3. 46.** - Relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de la viga de acuerdo con la forma de la fibra para vigas peraltadas con refuerzo transversal.

La **Figura 3. 47** muestra la relación entre la  $f_{cm}'$  y resistencia al cortante por espécimen de acuerdo con la forma de la fibra para vigas peraltadas sin refuerzo transversal. La tendencia de los elementos es clara, conforme la  $f_{cm}'$  crece, la resistencia a cortante de los especímenes crece, sin embargo, para mismas  $f_{cm}'$ , la fibra que mostró mejor desempeño, son las onduladas, pues logró esfuerzos más altos en igualdad de condiciones, comprobando lo que se puede ver en la **Figura 3. 39**. Hay que resaltar que la línea de tendencia de las fibras onduladas fue

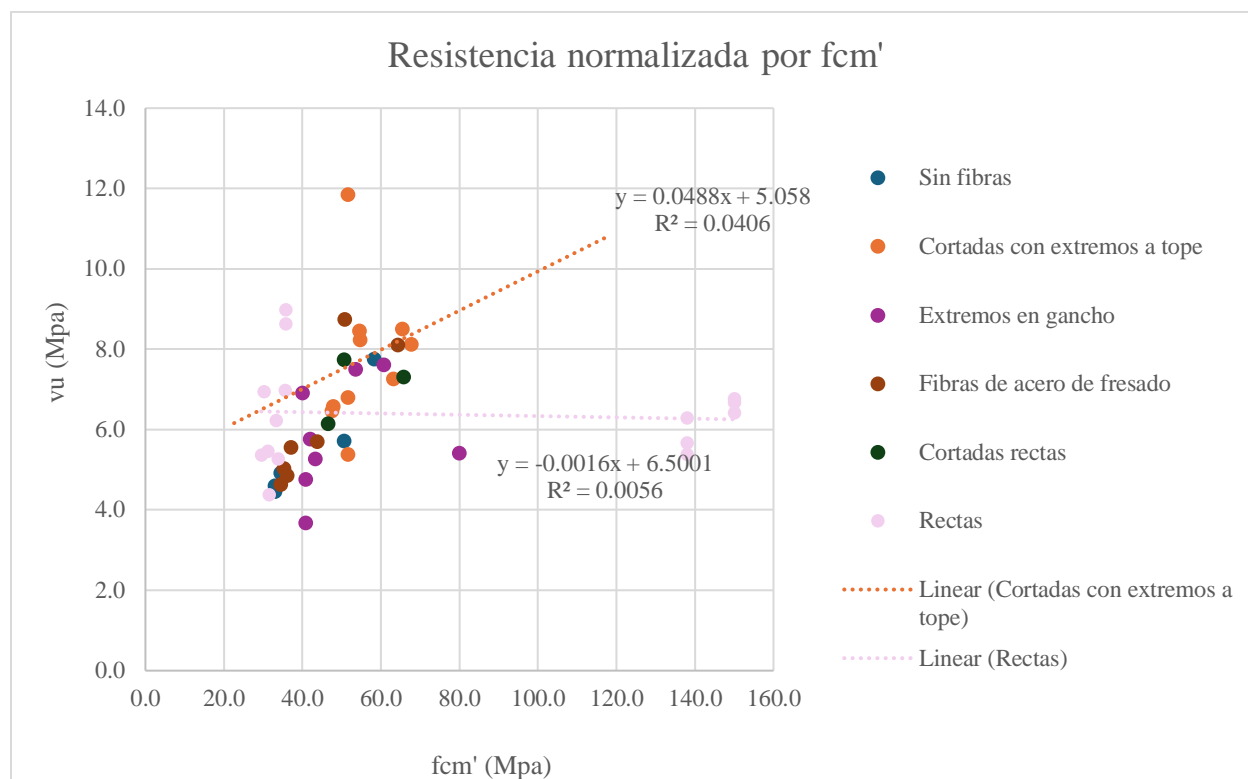
extrapolada, pues los valores de la  $f_{cm}'$  no superan los 75 MPa. Por otro lado, la segunda fibra con mejor desempeño fue la de extremos en gancho, seguida de las fibras rectas y al final los elementos sin fibras de acero. La dispersión de las líneas de tendencia es media, solamente para las fibras onduladas se tiene una dispersión alta. El elemento con esfuerzo más alto contiene fibras con ganchos en extremos, y de cerca un elemento con fibra ondulada y otro con fibra dentada. Como en otras figuras, los demás tipo de fibra que no se graficaron sus líneas de tendencia es debido a que la cantidad de especímenes con dichas fibras no son suficientes para generar una línea de tendencia que se considere representativa.



**Figura 3. 47.** - Relación entre la resistencia a la compresión del concreto y resistencia al cortante por espécimen de acuerdo con la forma de la fibra para vigas peraltadas sin refuerzo transversal.



Como se observa en la **Figura 3. 46**, para vigas peraltadas con refuerzo de estribos, en la **Figura 3. 48**, se graficaron solamente las líneas de tendencia de las clasificaciones con mayor número de ejemplares, las fibras cortadas con extremos a tope y las rectas. Se recuerda que los especímenes con fibras cortadas con extremos a tope son de un mismo artículo **Fuente especificada no válida**, y que su contenido de estribos no varía demasiado entre especímenes, lo que da a lugar a una representación más fiel a la realidad.



**Figura 3. 48.** - Relación entre la resistencia a la compresión del concreto y resistencia al cortante por espécimen de acuerdo con la forma de la fibra para vigas peraltadas con refuerzo transversal.

Dado que no se pudo identificar una tendencia clara, se tomó la decisión de generar un gráfico individual para cada uno de los tipos de fibras presentes en la base de datos. De esta manera, se busca analizar si se evidencia alguna tendencia en estos datos. Es relevante destacar que los tipos de fibras más comunes son las onduladas y las lisas, especialmente aquellas con

extremos en forma de gancho, pues son un poco más de la mitad de los datos. Por lo tanto, es en estos casos donde es más factible detectar un patrón de comportamiento.

Para una mejor comprensión de lo examinado, se decidió hacer un análisis por separado para los tipos de fibra más relevantes, los cuales fueron las fibras onduladas, con extremos en gancho y las fibras rectas, así como las fibras dentadas en vigas peraltadas sin refuerzo transversal y aquellos especímenes sin fibras; en el caso de las fibras cortadas con extremos a tope en el caso el análisis realizado se considera suficiente, pues las figuras no se encuentran saturadas de datos, lo que permite apreciar su comportamiento fácilmente.

### Fibra ondulada

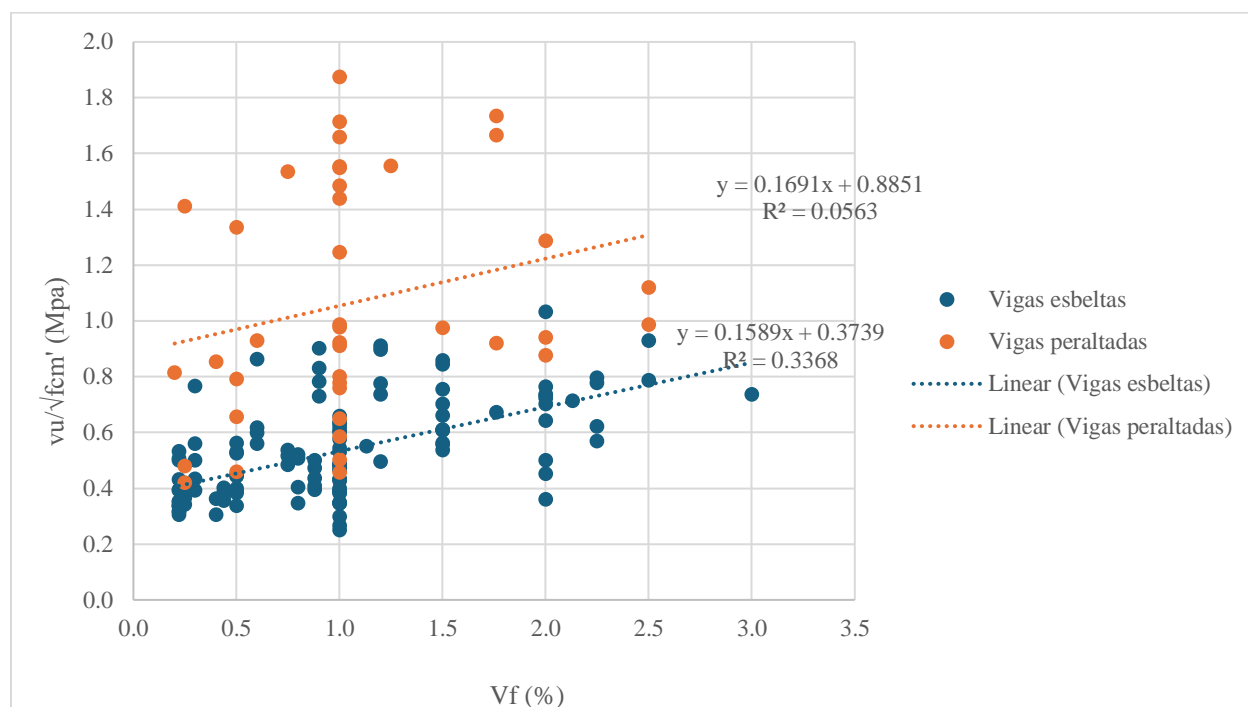
Dado que las fibras onduladas son comunes en la base de datos, es crucial realizar un análisis separado para comprender mejor su comportamiento. Sin embargo, hay una escasez de ejemplares reforzados con estribos que contienen fibras onduladas, lo que hace que un análisis específico para este caso sea poco práctico, ya que no se obtendrían conclusiones significativas. La distribución de especímenes por rango de  $V_f$  para las fibras onduladas sin refuerzo transversal se puede consultar en **Tabla 3. 13.** – Número de especímenes por rango de  $V_f$  para las fibras onduladas sin refuerzo transversal..

**Tabla 3. 13.** – Número de especímenes por rango de  $V_f$  para las fibras onduladas sin refuerzo transversal.

Intervalo	Vigas peraltadas		Vigas esbeltas		Total	
	No.	%	No.	%	No.	%
$0\% < V_f \leq 0.5\%$	9	22.50%	38	30.65%	47	28.66%
$0.5\% < V_f \leq 1.0\%$	21	52.50%	50	40.32%	71	43.29%
$1.0\% < V_f \leq 1.5\%$	2	5.00%	17	13.71%	19	11.59%
$1.5\% < V_f \leq 2.0\%$	6	15.00%	11	8.87%	17	10.37%
$2.0\% < V_f \leq 2.5\%$	2	5.00%	7	5.65%	9	5.49%
$2.5\% < V_f \leq 3.0\%$	0	0.00%	1	0.81%	1	0.61%

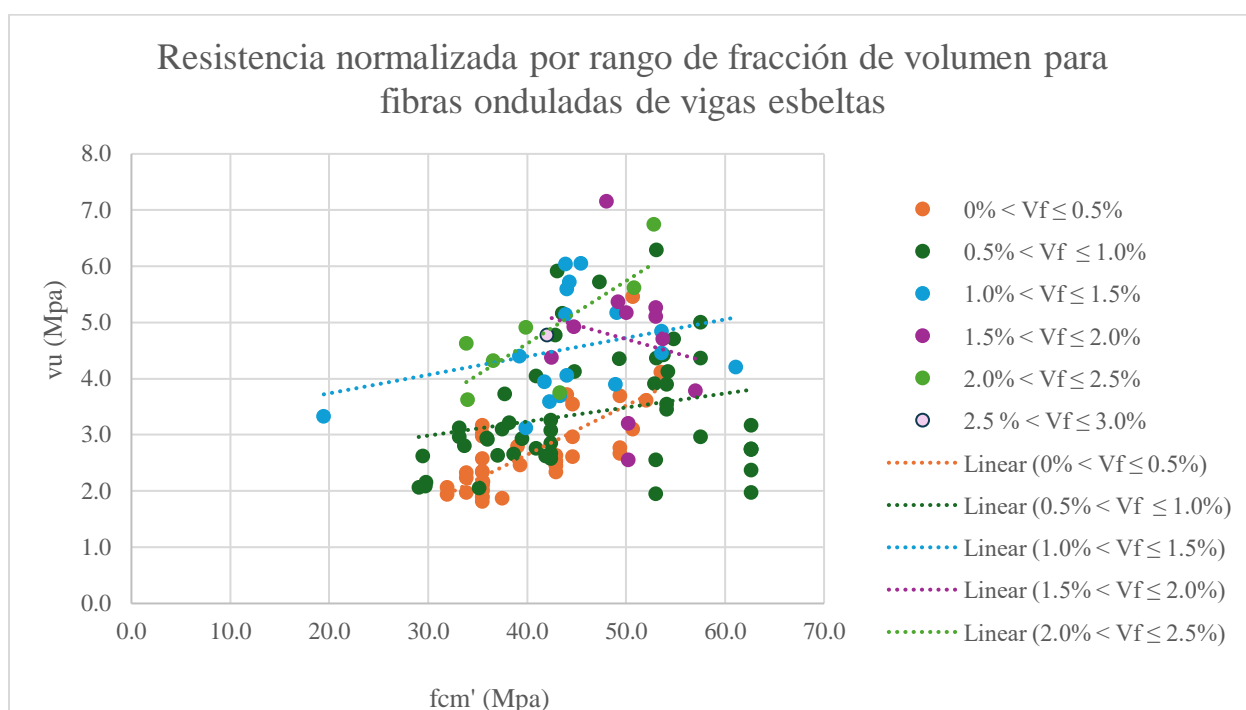
Total	40	100.00%	124	100.00%	164	100.00%
-------	----	---------	-----	---------	-----	---------

La **Figura 3. 49** presenta la relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de la viga de separando vigas esbeltas y peraltadas, sin refuerzo transversal. Las líneas de tendencia para ambos casos son positivas demostrando una relación directamente proporcional entre la  $v_u$  y la  $f_{cm}'$ . La línea de tendencia de los especímenes peraltados es superior a la de elementos esbeltos, esto se debe al mecanismo de refuerzo de acción de arco. La mitad de los especímenes peraltados se encuentran en el rango  $1.0\% < V_f \leq 1.5\%$ , que es justo el rango que presenta el espécimen con mayor resistencia, lo que puede explicar porque es este rango el que presenta el valor más alto de resistencia y no otro rango con mayor  $V_f$ .



**Figura 3. 49.** - Relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de la viga de separando vigas esbeltas y peraltadas, sin refuerzo transversal.

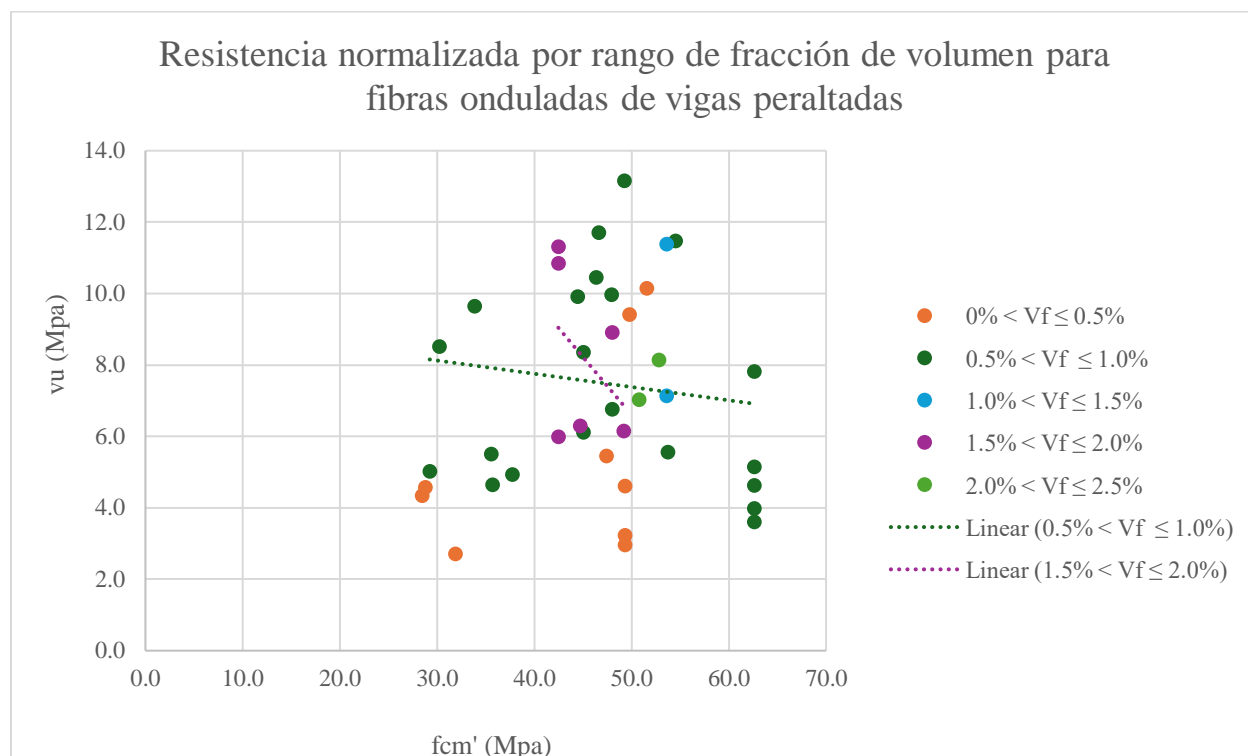
La **Figura 3. 50.** - Se puede apreciar que todas las líneas de tendencia son positivas, excepto la del rango  $1.5\% < V_f \leq 2.0\%$ , la cual no tiene tantos especímenes, como otros rangos, lo cual puede explicar el porqué de esto. El rango con la  $V_f$  más alta no se le graficó la línea de tendencia, pues al contar con solo tres elementos, la tendencia no es representativa. Algo importante a resaltar es que, conforme la  $V_f$  incrementa su valor, las líneas de tendencia incrementan su valor con respecto a  $v_u$ .



**Figura 3. 50.** - Relación entre la  $f_{cm}'$  y  $v_u$  clasificadas por  $V_f$  de vigas esbeltas reforzadas con fibras onduladas sin refuerzo transversal.

La **Figura 3. 51** presenta la relación entre la resistencia a la compresión del concreto y resistencia al cortante por espécimen de acuerdo con su  $V_f$  de elementos peraltados reforzados con fibras onduladas. Los únicos dos intervalos con más de cinco ejemplares son  $0.5\% < V_f \leq 1.0\%$ , y  $1.5\% < V_f \leq 2.0\%$ , por lo que son los únicos con líneas de tendencia graficadas. Estas líneas de tendencia poseen pendientes negativas, lo que sugiere que hacen falta más datos para

analizar el comportamiento o bien, que la acción de arco en vigas peraltadas tiene más efecto en éstas que el refuerzo de fibras puedan tener.



**Figura 3. 51.** - Relación entre la  $f_{cm}'$  y  $v_u$  clasificadas por  $V_f$  de vigas peraltadas reforzadas con fibras onduladas sin refuerzo transversal.

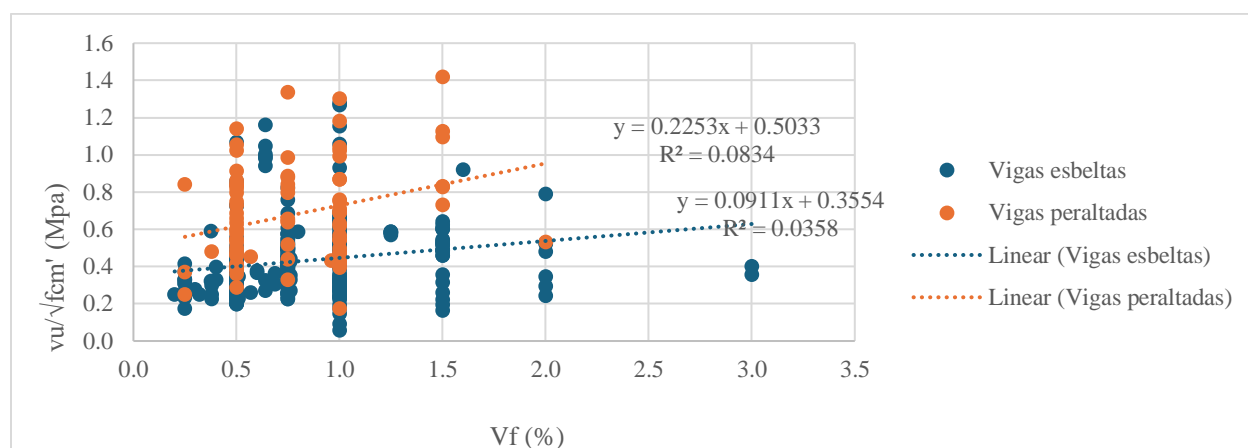
### Fibra con extremos en gancho

Dado que las fibras con extremos en gancho son abundantes en la base de datos, se realizó un análisis separado para comprender mejor su comportamiento. Sin embargo, en las **Tablas 3. 11** y **3. 12** se observa que la cantidad de especímenes con fibras con extremos en gancho con refuerzo de estribos son 8 y 16, para vigas peraltadas y esbeltas respectivamente, por lo que se desprecia su análisis, al ser muy pocos especímenes, para considerarlo representativo. La distribución de especímenes por rango de  $V_f$  para las fibras onduladas sin refuerzo transversal se puede consultar en **Tabla 3. 14**.

**Tabla 3. 14.** - Número de especímenes por rango de  $V_f$  para las fibras con extremos en gancho sin refuerzo transversal.

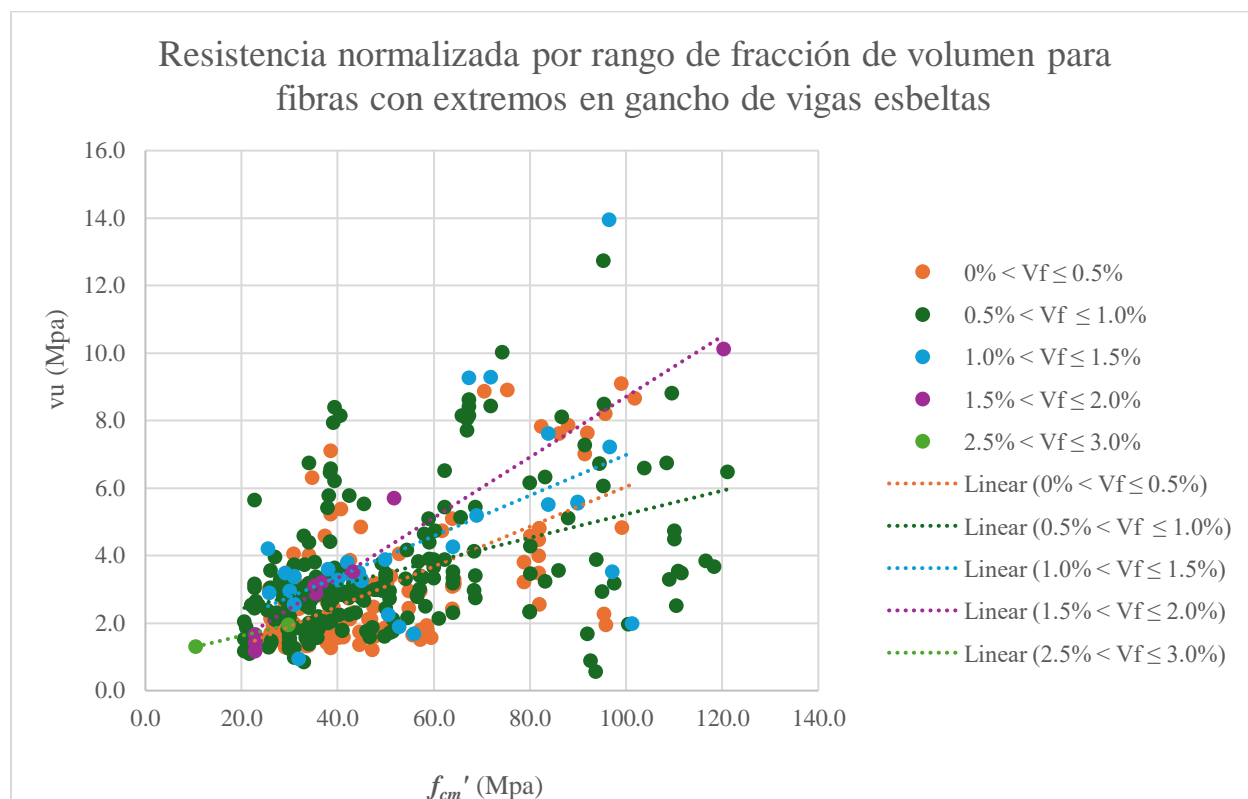
Intervalo	Vigas peraltadas		Vigas esbeltas		Total	
	No.	%	No.	%	No.	%
$0\% < V_f \leq 0.5\%$	4	4.76%	23	7.10%	27	6.62%
$0.5\% < V_f \leq 1.0\%$	48	57.14%	174	53.70%	222	54.41%
$1.0\% < V_f \leq 1.5\%$	25	29.76%	94	29.01%	119	29.17%
$1.5\% < V_f \leq 2.0\%$	6	7.14%	24	7.41%	30	7.35%
$2.0\% < V_f \leq 2.5\%$	1	1.19%	7	2.16%	8	1.96%
$2.5\% < V_f \leq 3.0\%$	0	0.00%	2	0.62%	2	0.49%
<b>Total</b>	<b>84</b>	<b>100.00%</b>	<b>324</b>	<b>100.00%</b>	<b>408</b>	<b>100.00%</b>

La **Figura 3. 52** muestra Relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de vigas sin refuerzo transversal con fibras con extremos en gancho. Los elementos se clasificaron en esbeltas y peraltadas. Las líneas de tendencia tienen pendientes positiva, indicando que la relación es directamente proporcional. Sin embargo, como en el caso de la **Figura 3. 49**, las vigas peraltadas alcanzaron esfuerzos más altos que las vigas esbeltas, además que su línea de tendencia es superior. La dispersión en ambos casos es significativa.



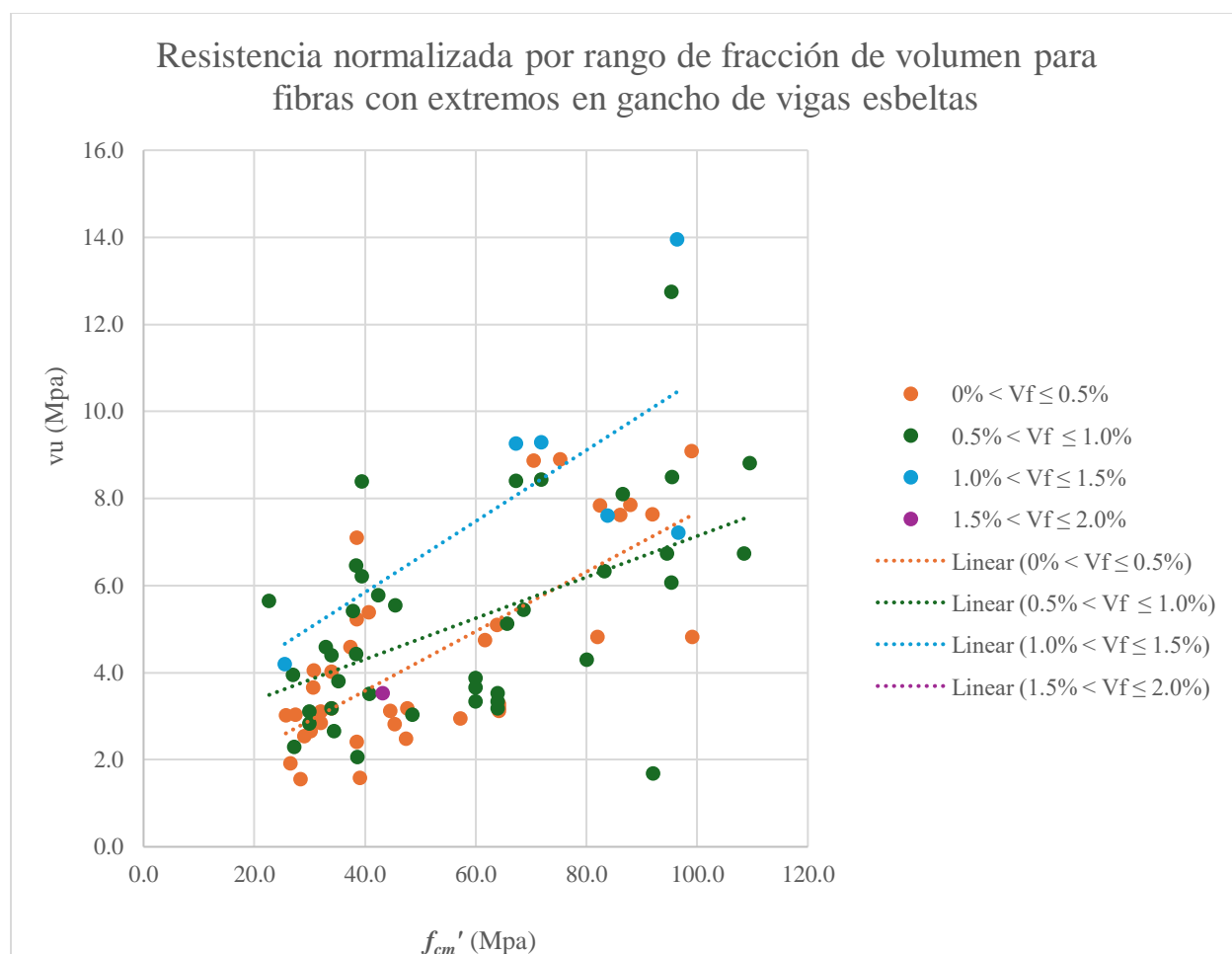
**Figura 3. 52.** - Relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de vigas sin refuerzo transversal con fibras con extremos en gancho.

En cuanto a la **Figura 3. 53**, exhibe la relación entre la  $f_{cm}'$  y  $v_u$  clasificadas por  $V_f$  de vigas esbeltas reforzadas con fibras con extremos en gancho sin refuerzo transversal. Es evidente que la tendencia general es que a medida que aumenta la resistencia a la compresión del concreto, también aumenta la resistencia al cortante. Todas las líneas de tendencia tienen pendiente positiva, además, las líneas de tendencia son superiores conforme la  $V_f$  crece, excepto en el caso del rango  $0.5\% < V_f \leq 1.0\%$ , para dicho rango, la línea comienza con esfuerzos más altos que el rango inferior, pero la pendiente es menor, por lo que conforme crecen los valores de  $f_{cm}'$ , la  $v_u$  del rango  $0.0\% < V_f \leq 0.5\%$  es superior. También, la línea de tendencia del último rango se considera irrelevante, pues dicho rango solo cuenta con dos ejemplares, por lo que no se considera representativa.



**Figura 3. 53.** - Relación entre la  $f_{cm}'$  y  $v_u$  clasificadas por  $V_f$  de vigas esbeltas reforzadas con fibras con extremos en gancho sin refuerzo transversal.

La **Figura 3. 54** muestra la relación entre la  $f_{cm}'$  y  $v_u$  clasificadas por  $V_f$  de vigas peraltadas reforzadas con fibras con extremos en gancho sin refuerzo transversal. Todas las líneas de tendencia tienen pendiente positiva, y la que muestra mejor desempeño es la del intervalo  $1.0\% < V_f \leq 1.5\%$ . Para el rango con mayor  $V_f$  no se puede generar línea de tendencia, pues es solo un espécimen. Las líneas de tendencia de los dos primeros rangos se intersecan por la diferencia de pendientes, donde es la línea del rango  $0.5\% < V_f \leq 1.0\%$  la que mayor pendiente tiene. Es importante recordar que en vigas peraltadas el mecanismo resistente de acción de arco es muy marcado.



**Figura 3. 54.** - Relación entre la  $f_{cm}'$  y  $v_u$  clasificadas por  $V_f$  de vigas peraltadas reforzadas con fibras con extremos en gancho sin refuerzo transversal.



### Fibras rectas

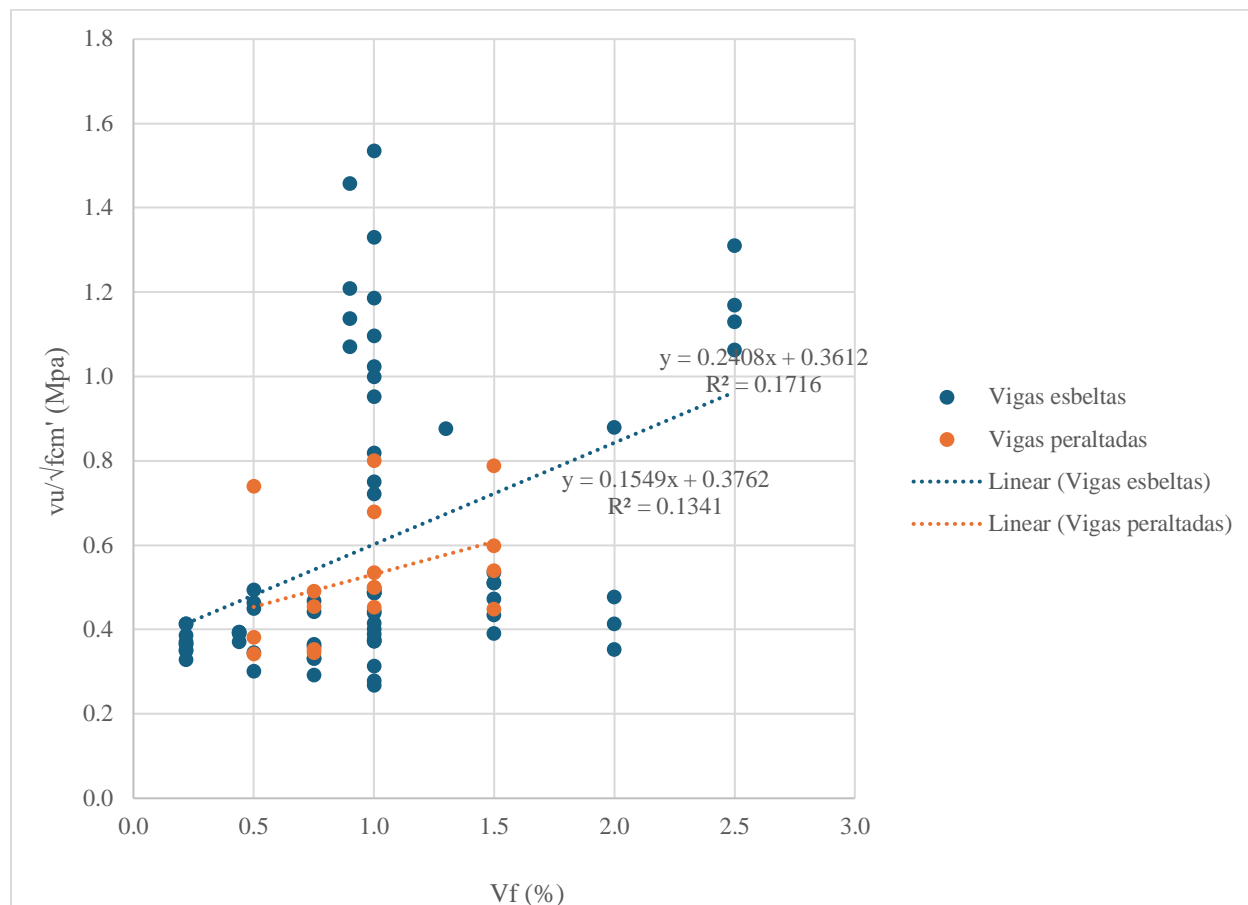
Como se observa en las **Tablas 3. 11** y **3. 12** la cantidad de especímenes con fibras rectas con refuerzo de estribos son 15 y 20, para vigas peraltadas y esbeltas respectivamente, por lo que se desprecia su análisis, al ser muy pocos especímenes, para considerarlo representativo. Esto mismo aplica para las vigas peraltadas, pues solo se cuenta con 17 especímenes peraltados reforzados con fibras rectas. Los rangos de  $V_f$  llegan hasta el 2.5%. La distribución de especímenes por rango de  $V_f$  para las fibras onduladas sin refuerzo transversal se puede consultar en **Tabla 3. 15**. - Número de especímenes por rango de  $V_f$  para las fibras rectas sin refuerzo longitudinal.

**Tabla 3. 15.** - Número de especímenes por rango de  $V_f$  para las fibras rectas sin refuerzo longitudinal.

Intervalo	Vigas peraltadas		Vigas esbeltas		Total	
	No.	%	No.	%	No.	%
$0\% < V_f \leq 0.5\%$	3	17.65%	18	26.09%	21	24.42%
$0.5\% < V_f \leq 1.0\%$	10	58.82%	36	52.17%	46	53.49%
$1.0\% < V_f \leq 1.5\%$	4	23.53%	7	10.14%	11	12.79%
$1.5\% < V_f \leq 2.0\%$	0	0.00%	4	5.80%	4	4.65%
$2.0\% < V_f \leq 2.5\%$	0	0.00%	4	5.80%	4	4.65%
<b>Total</b>	<b>17</b>	<b>100.00%</b>	<b>69</b>	<b>100.00%</b>	<b>86</b>	<b>100.00%</b>

La **Figura 3. 55** presenta la relación entre la  $f_{cm}'$  y  $v_u$  clasificadas por  $V_f$  de vigas esbeltas reforzadas con fibras rectas sin refuerzo transversal. Las líneas de tendencia para ambos casos (vigas peraltadas y esbeltas) poseen pendiente positiva, lo que indica que a medida que aumenta la  $V_f$ , también lo hace la resistencia a esfuerzo cortante. Se destaca que la línea de tendencia de elementos esbeltos es superior. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que los

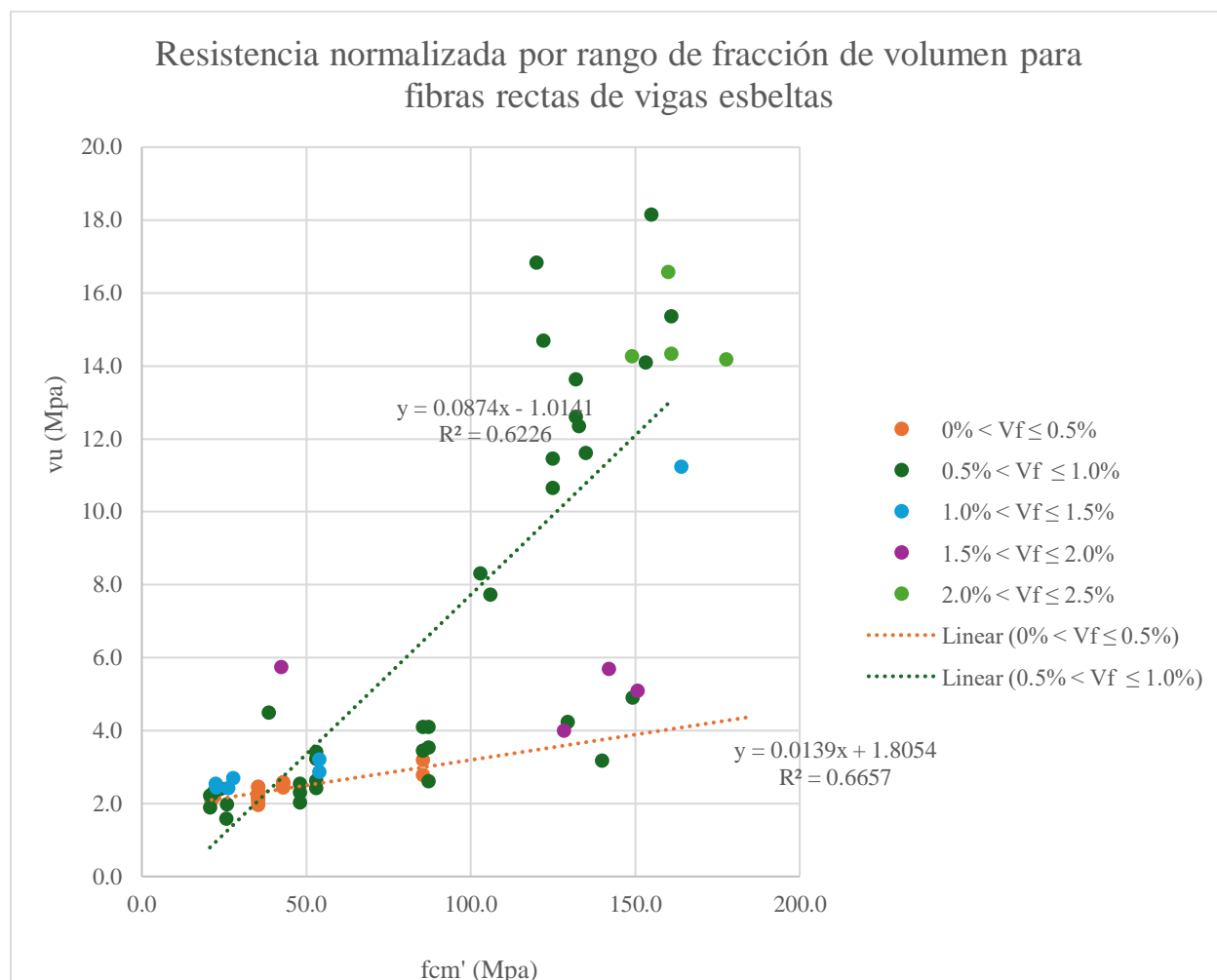
datos para las vigas peraltadas son limitados, como se mencionó anteriormente, lo que provoca que la tendencia no sea representativa para el caso de vigas peraltadas.



**Figura 3. 55.** - Relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de vigas sin refuerzo transversal con fibras rectas.

La **Figura 3. 56** la relación entre la  $f_{cm}'$  y  $v_u$ , clasificadas por  $V_f$  de vigas esbeltas reforzadas con rectas sin refuerzo transversal. El comportamiento general, es que conforme va creciendo la  $f_{cm}'$ , la  $v_u$  también lo hace, mostrando una relación directamente proporcional. Se trazaron líneas de tendencia solo para los dos primeros intervalos, ya que los últimos tres tienen pocos ejemplares y su análisis es vinculante. La línea de tendencia del rango  $0\% < V_f \leq 0.5$ ,

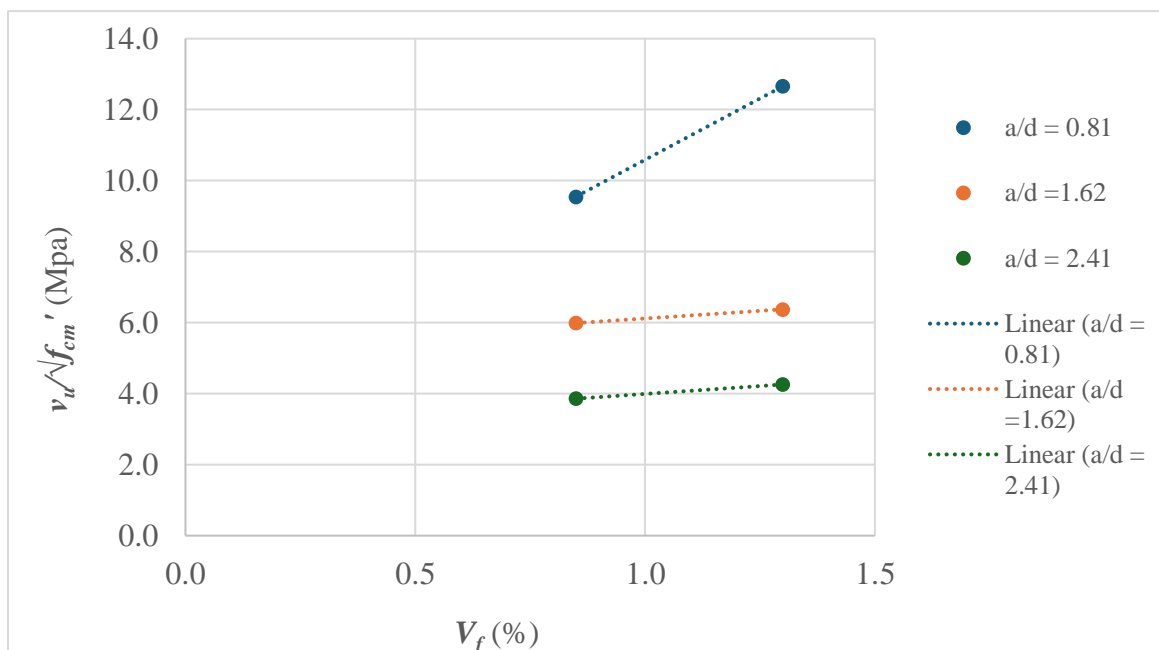
aunque positiva, tiene una pendiente suave y fue extrapolada debido a su longitud limitada, mientras que la del intervalo  $0.5\% < V_f \leq 1.0\%$  muestra una pendiente más pronunciada. Ambas líneas de tendencia muestran una  $R^2$  indicando poca dispersión en los datos. Se observa que varios puntos de otros intervalos de  $V_f$  se aproximan mucho a la línea de tendencia de  $0\% < V_f \leq 0.5\%$ . Sin embargo, los elementos con la  $V_f$  más alta son los que más altas resistencias alcanzaron, junto con algunos elementos de  $0.5\% < V_f \leq 1.0\%$ . Lo que sugiere que otros factores pueden ser más relevantes que la cantidad de fibras para el caso de fibras rectas, pues los especímenes con mayor  $V_f$  alcanzaron esfuerzos muy similares e incluso menores que los que tenían menos cantidad de fibras.



**Figura 3. 56.** - Relación entre la  $f_{cm}'$  y  $v_u$  clasificadas por  $V_f$  de vigas esbeltas reforzadas con rectas sin refuerzo transversal.

### Fibra dentada

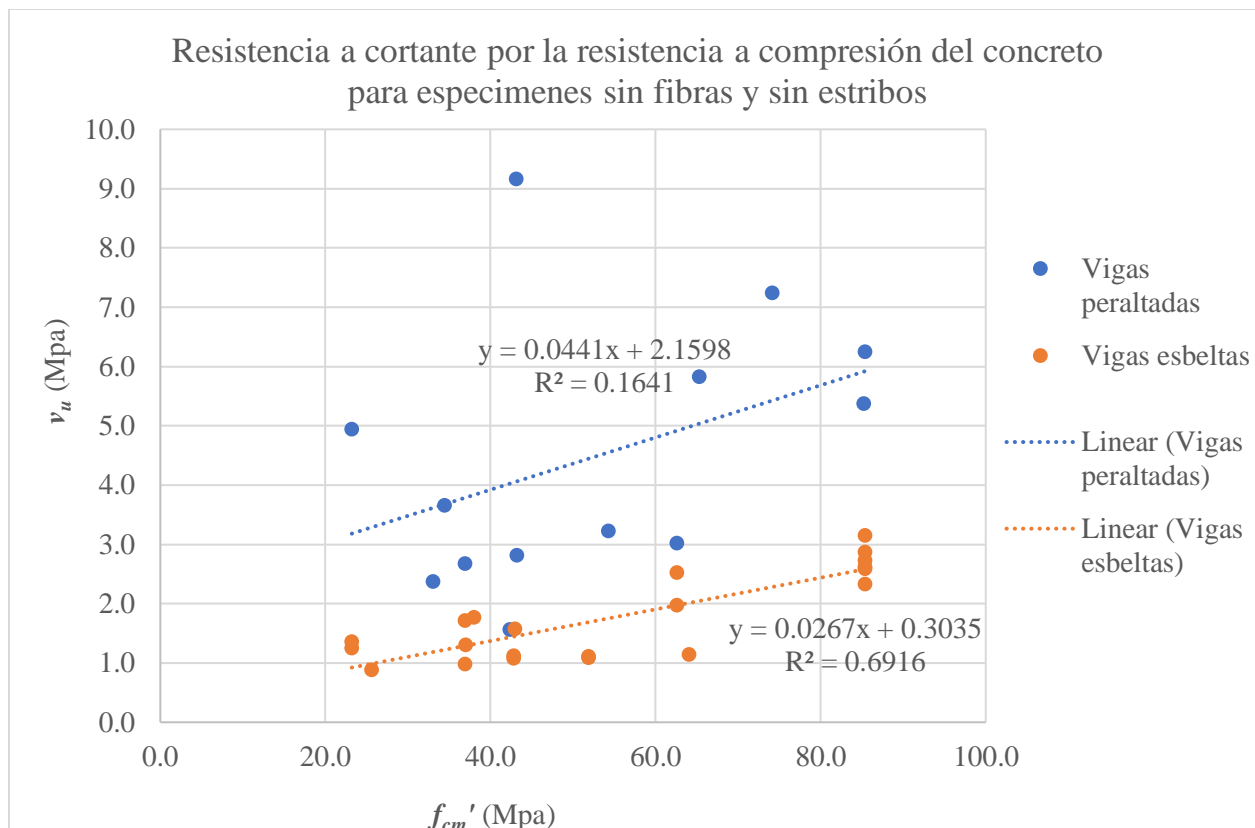
Los especímenes reforzados con fibras dentadas son todos peraltados y sin refuerzo transversal, y se extrajeron del mismo artículo **Fuente especificada no válida.**, aunque no cuentan con la misma relación  $a/d$ , y es por ello por lo que en la **Figura 3. 57** se decidió clasificar los elementos por su relación  $a/d$  específica. Se observa en dicha figura que el comportamiento es muy uniforme, y que las pendientes de las líneas de tendencia son superiores para relación de  $a/d$  más pequeñas, pues la acción de arco es más significativa, pues se logra formar un puntal resistente más vertical. Otro punto importante es que los especímenes con misma  $V_f$  poseen la misma  $f_{cm}'$ , pues se construyeron con la misma mezcla de concreto.



**Figura 3. 57.** - Relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de vigas sin refuerzo transversal con fibras dentadas.

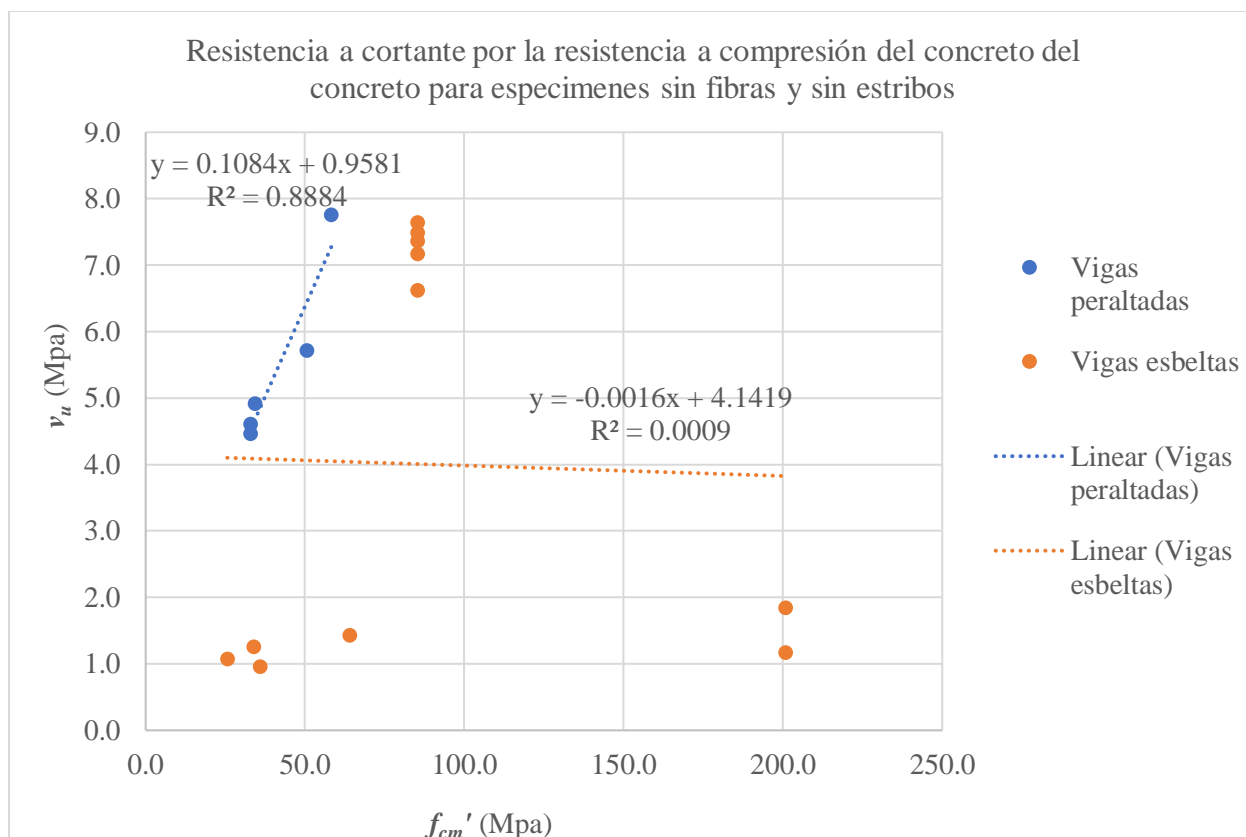
### Sin fibras

En la base de datos se encuentran un total de 50 especímenes sin refuerzo de fibras de acero, de las cuales 34 no poseen refuerzo transversal y 16 contienen refuerzo de estribos. Se decidió hacer un análisis por separado a los elementos dependiendo si contienen estribos o no. La **Figura 3. 58** presenta la relación entre la  $f_{cm}'$  y  $v_u$  clasificadas en vigas peraltadas y esbeltas sin fibra, ni estribos. Las líneas de tendencia de ambos casos tienen pendiente positiva, indicando una relación directamente proporcional entre  $f_{cm}'$  y  $v_u$ . La línea de tendencia de elementos peraltadas es superior a la línea de elementos esbeltos. Esto es consistente a lo observado en otras figuras. Y como se ha mencionado con anterioridad, este aumento en la resistencia a cortante es debido al mecanismo resistente de acción de arco. La dispersión de datos en el caso de la línea de tendencia de especímenes peraltados es medianamente alta, mientras que para los elementos esbeltos es baja.



**Figura 3. 58.** - Relación entre la  $f_{cm}'$  y  $v_u$  clasificadas en vigas peraltadas y esbeltas sin fibra, ni estribos.

En la **Figura 3. 59** muestra la relación entre la  $f_{cm}'$  y  $v_u$  clasificadas en vigas peraltadas y esbeltas sin fibra, reforzadas con estribos. Se aprecia una tendencia ascendente para vigas peraltadas, lo que indica que a medida que aumenta la resistencia a compresión del concreto, también se incrementa la capacidad del espécimen para resistir esfuerzos cortantes. Sin embargo, para especímenes esbeltos la línea de tendencia tiene una pendiente negativa suave, que puede ser debido a que el refuerzo de estribos no es uniforme entre las vigas, dando a lugar a resultados muy dispersos y sin una tendencia clara. Prueba de esto, es que la dispersión de datos en vigas esbeltas es considerablemente alta, mientras que, para elementos peraltados, la dispersión es baja.



**Figura 3. 59.** - Relación entre la  $f_{cm}'$  y  $v_u$  clasificadas en vigas peraltadas y esbeltas sin fibra, reforzadas con estribos.

### **Resistencia al cortante según el tipo de falla del espécimen**

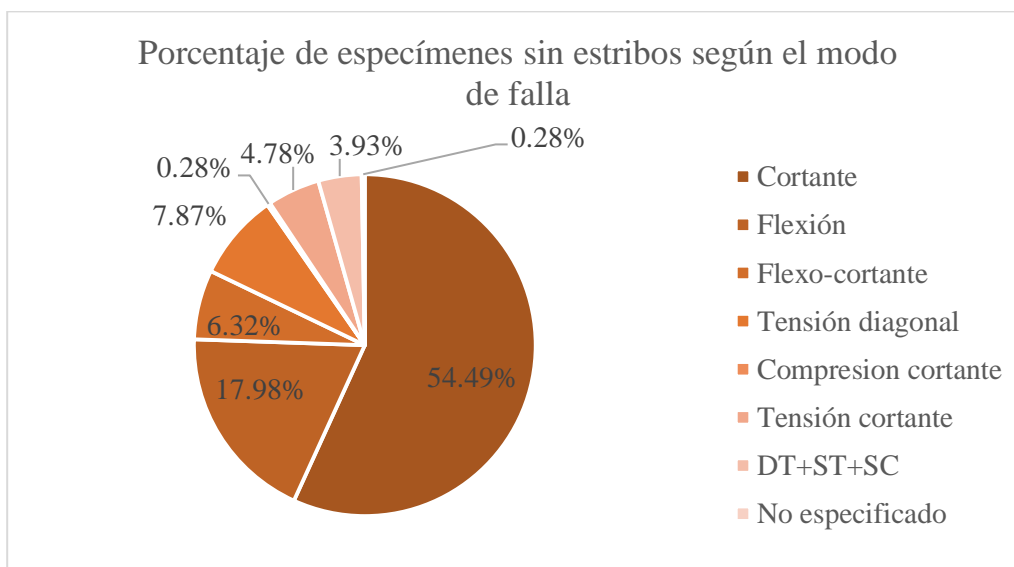
Se realizó un análisis de los tipos de falla presentes en la base de datos, y los resultados se resumen en la **Tabla 3. 16.-** Número y porcentaje de especímenes según el tipo de falla. **Error! Reference source not found.** Los modos de falla que se presentan en la base de datos son por flexión, flexo-cortante o cortante. Sin embargo, como se mencionó en el Capítulo 1, los tipos de falla por cortante son la tensión diagonal, compresión cortante, hendiduras o tensión cortante y, el aplastamiento del alma. Por esto mismo, los artículos que reportaban fallas de cortante específicas se anotaron de esta manera y no solamente como cortante. El tipo de falla más reportado es el de cortante, seguido por la falla por flexión. Los demás tipos de falla son los modos de falla específicos de cortante y la combinación de cortante y flexión. Solamente dos

especímenes no reportaron un modo de falla, los cuales son del mismo artículo **Fuente especificada no válida.** Las **Figura 3. 60.-** Porcentaje de especímenes sin estribos según el modo de falla. y **Figura 3. 61** muestran el porcentaje de especímenes según el tipo de falla de especímenes sin y con estribos respectivamente de manera gráfica.

**Tabla 3. 16.-** Número y porcentaje de especímenes según el tipo de falla.

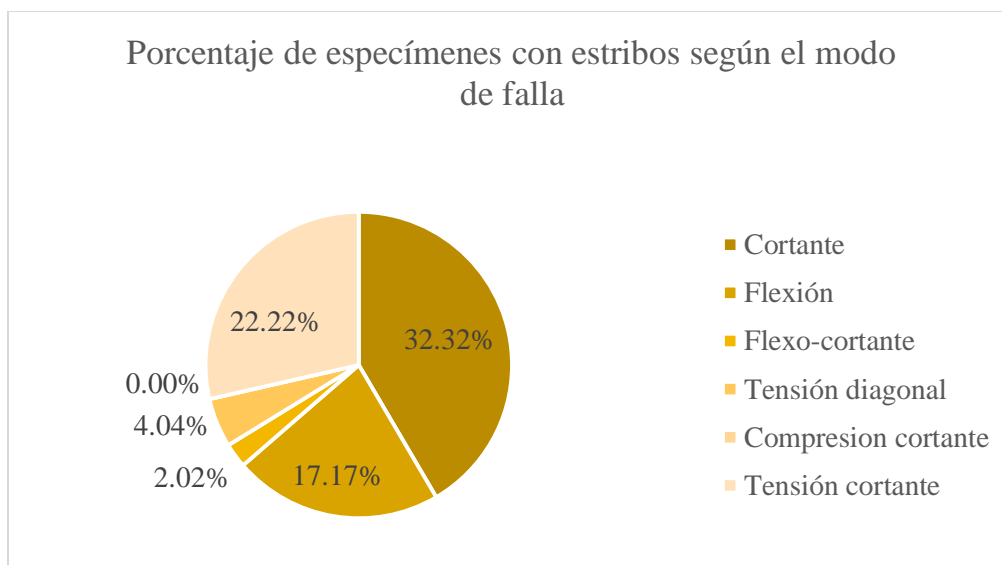
Modo de falla	Refuerzo transversal				Total	
	No		Si			
	No.	%	No.	%	No.	%
Cortante	388	54.49%	32	32.32%	420	51.79%
Flexión	128	17.98%	17	17.17%	145	17.88%
Flexo-cortante	45	6.32%	2	2.02%	47	5.80%
Tensión diagonal	69	9.69%	4	4.04%	73	9.00%
Compresión cortante	18	2.53%	22	22.22%	40	4.93%
Tensión cortante	34	4.78%	22	22.22%	56	6.91%
TD+TC+CC	28	3.93%	0	0.00%	28	3.45%
No especificado	2	0.28%	0	0.00%	2	0.25%
<b>Total</b>	712	100.00%	99	100.00%	811	100.00%

*TD = Tensión diagonal, TC = Tensión cortante, CC = Compresión cortante*



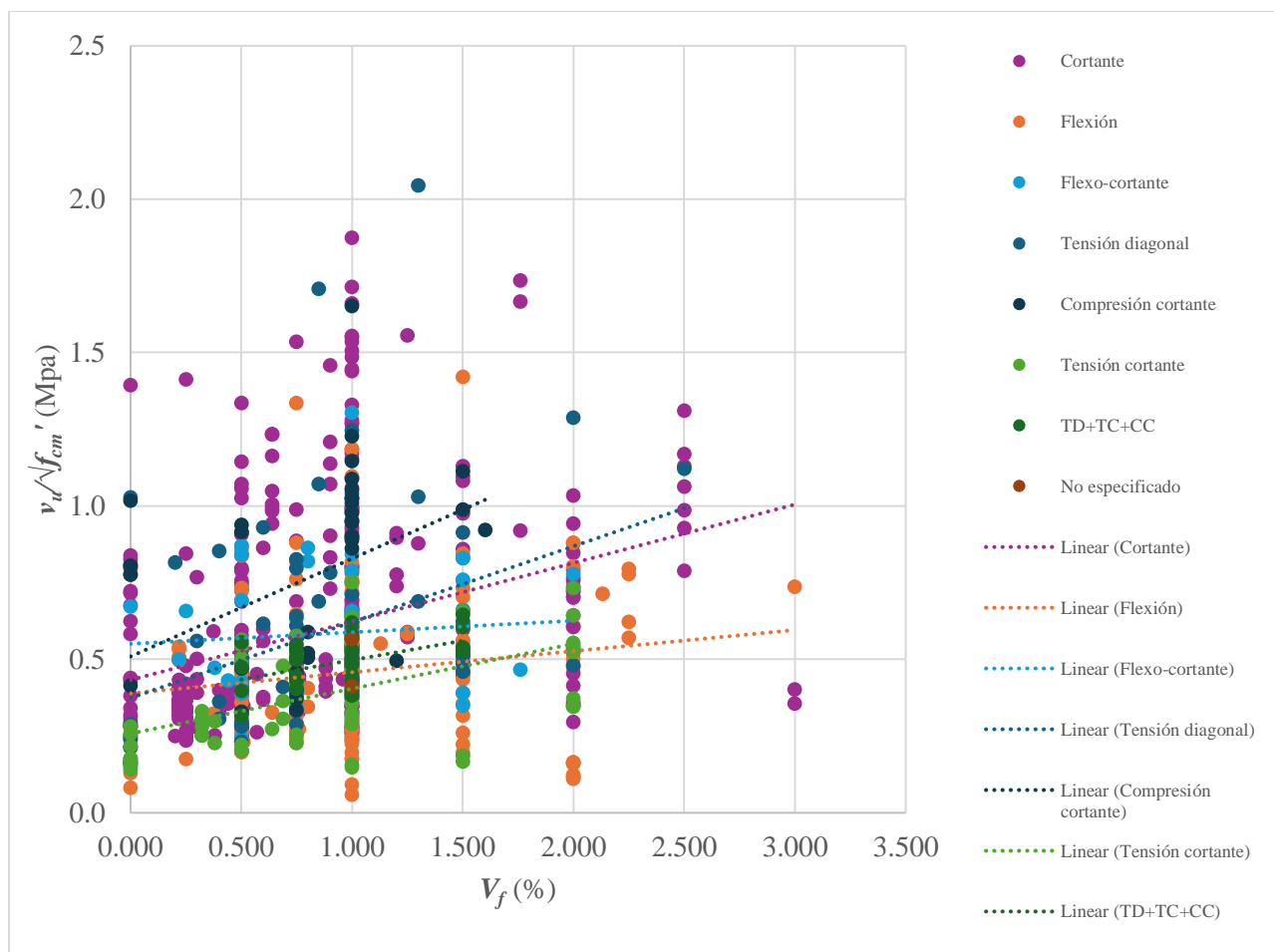
**Figura 3. 60.-** Porcentaje de especímenes sin estribos según el modo de falla.





**Figura 3. 61** - Porcentaje de especímenes con estribos según el modo de falla.

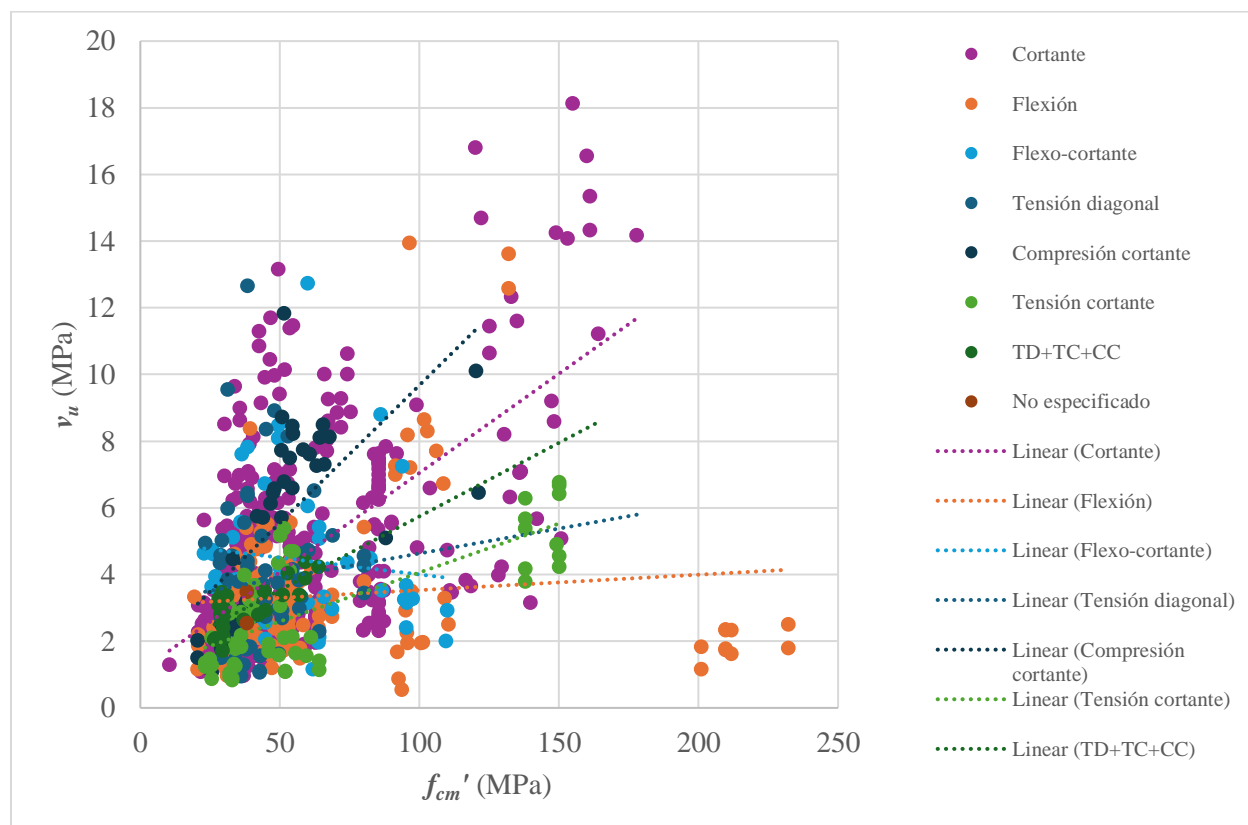
La **Figura 3. 62** muestra la relación entre la  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado clasificando a los especímenes por su modo de falla. Las líneas de tendencia en el gráfico, para todos los modos de falla, son positivas. La línea de tendencia con mejor desempeño con relación a su  $V_f$  es la de los elementos que fallaron por compresión cortante, lo que coincide con la teoría, pues se sabe que los elementos que fallan por compresión cortante tienden a soportar mejor las demandas de esfuerzos que aquellas vigas con agrietamientos inclinados (Márquez & Rafael, 1994). Los elementos que tuvieron mejor desempeño después de aquellos que fallaron por compresión cortante, son los que presentaron falla por tensión diagonal, seguidos de los elementos que reportaron fallas por cortante (Sin especificar el modo de falla de cortante), posteriormente las vigas que fallaron por flexo-cortante, la combinación de tensión y compresión diagonal, y tensión cortante, flexión y finalmente, los elementos que fallaron por tensión diagonal. Este análisis no considera si los elementos son esbeltos o peraltados, o si estos tienen o no refuerzo transversal, lo cual puede inferir en asumir conclusiones incorrectas.



**Figura 3. 62.** - Relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado clasificando a los especímenes por su modo de falla.

La **Figura 3. 63** muestra la relación entre  $f_{cm}'$  y  $v_u$  clasificando a los especímenes por su modo de falla. Las líneas de tendencia en el gráfico, para todos los modos de falla, son positivas excepto las vigas que fallaron por flexo-cortante. Al igual que en la **Figura 3. 62**, la línea de tendencia con mejor desempeño con relación a su  $V_f$  es la de los elementos que fallaron por compresión cortante, posteriormente los especímenes que reportaron falla por cortante, después la combinación de tensión y compresión diagonal, y tensión cortante, consecutivamente tensión diagonal y tensión cortante, posteriormente la falla por flexo-cortante, y por último el modo de falla por flexión. El gráfico muestra una relación entre los modos de falla positiva,

donde a una mayor resistencia en la compresión del concreto, la falla ocurre cuando el elemento está sometido a una demanda más alta de cortante.

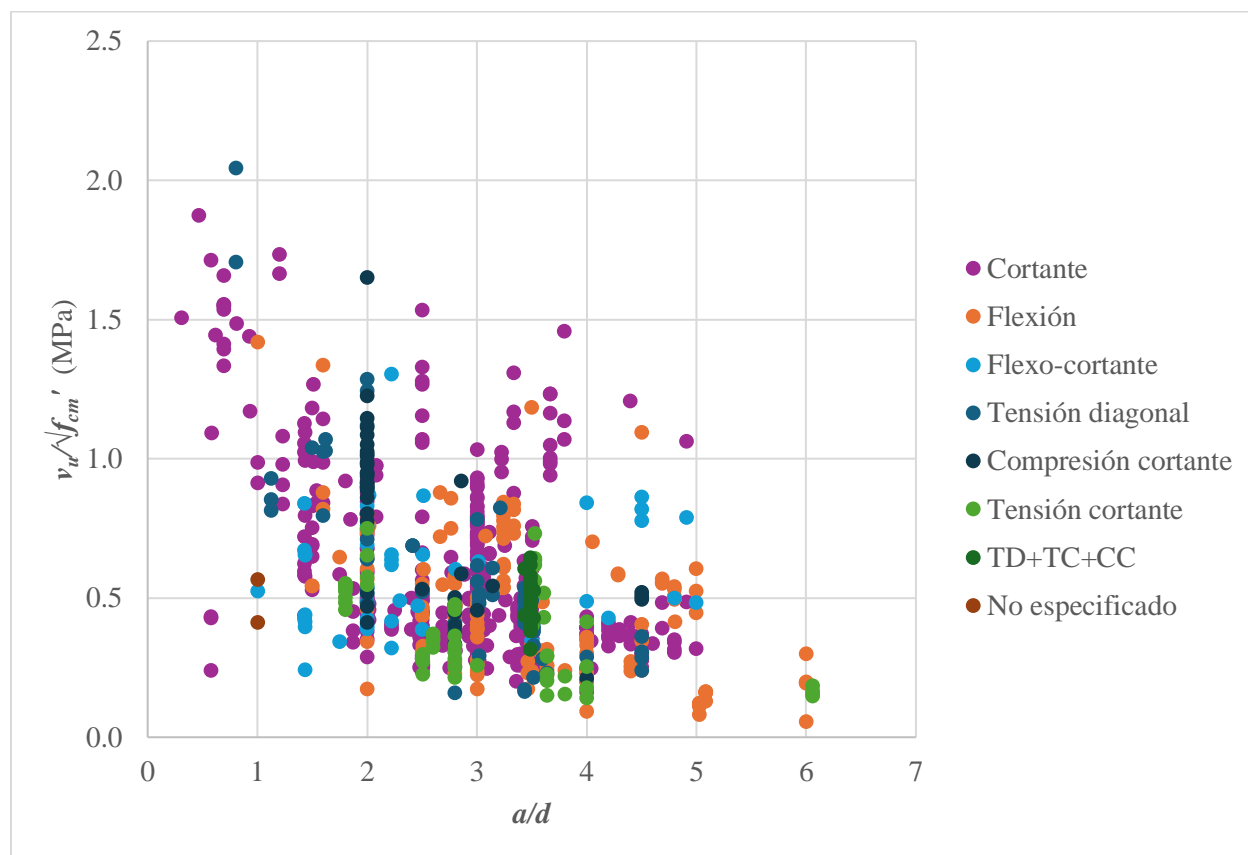


**Figura 3. 63.** - Relación entre resistencia a compresión del concreto  $f_{cm}'$  y la resistencia al corte clasificando a los especímenes por su modo de falla.

La **Figura 3. 64** muestra la relación entre  $a/d$  y la resistencia al corte clasificando a los especímenes por su modo de falla. En esta se aprecia como los elementos decretan su resistencia cortante normalizada conforme  $a/d$  incrementa su valor.

La mayoría de los elementos que fallaron por compresión cortante poseen una relación  $a/d$  igual a dos, lo que indica que estos elementos son peraltados y que por ende existe la acción de arco que incrementa la resistencia de las vigas. Dichos elementos son los que han demostrado mejor desempeño en las **Figura 3. 62** y **Figura 3. 63**, lo que manifiesta la importancia de

estudiar a los elementos esbeltos y peraltados por separados y es por ello por lo que se analizaran de esta manera posteriormente.



**Figura 3. 64.** - Relación entre  $a/d$  y la resistencia al corte clasificando a los especímenes por su modo de falla.

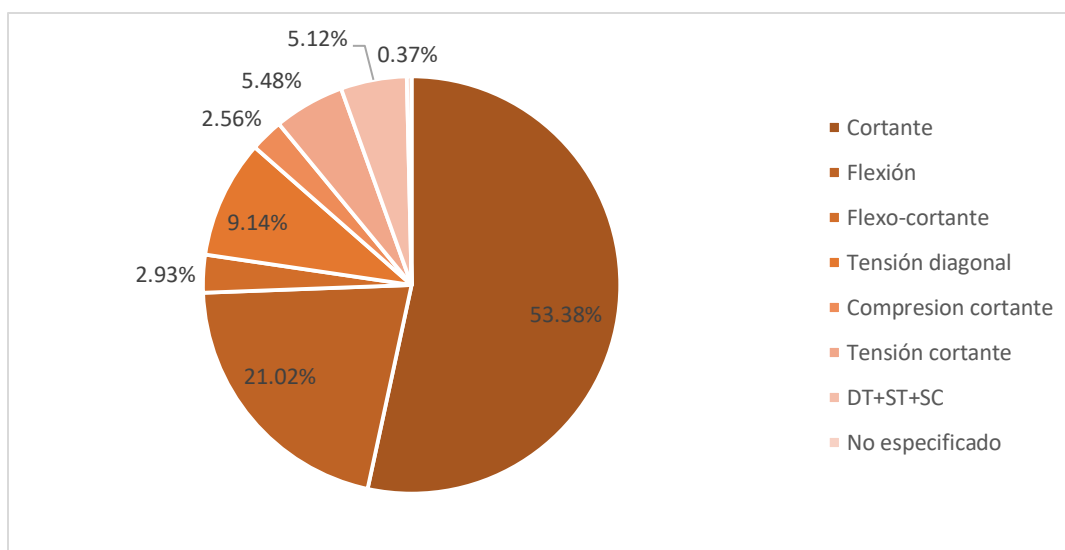
### Vigas esbeltas

Las vigas esbeltas y peraltadas han demostrado un comportamiento diferente, por lo que el análisis de la relación entre la resistencia al cortante y el tipo de falla del espécimen se realizó separando los especímenes esbeltos y peraltados, y a su vez con refuerzo transversal de acero y sin este. Se puede ver tanto en la **Tabla 3. 17.** - Número y porcentaje de vigas esbeltas según el tipo de falla., como en las **Figura 3. 65** y **Figura 3. 66**, que el tipo de falla más recurrente es el de cortante tanto para vigas sin y con estribos, lo cual es lógico pues las pruebas a las que los especímenes fueron sometidos fueron de cortante.

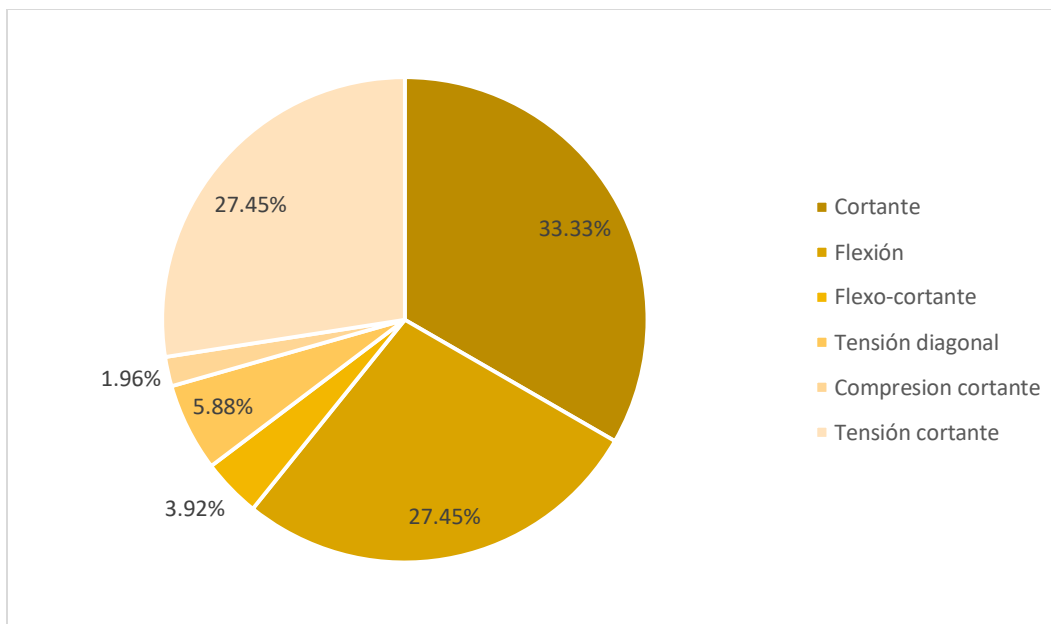
**Tabla 3. 17.** - Número y porcentaje de vigas esbeltas según el tipo de falla.

Tipo de fibra	Refuerzo transversal				Total	
	Sin refuerzo		Con refuerzo			
	no.	%	no.	%	no.	%
Cortante	292	53.38%	17	33.33%	309	51.67%
Flexión	115	21.02%	14	27.45%	129	21.57%
Flexo-cortante	16	2.93%	2	3.92%	18	3.01%
Tensión diagonal	50	9.14%	3	5.88%	53	8.86%
Compresión cortante	14	2.56%	1	1.96%	15	2.51%
Tensión cortante	30	5.48%	14	27.45%	44	7.36%
TD+TC+CC	28	5.12%	0	0.00%	28	4.68%
No especificado	2	0.37%	0	0.00%	2	0.33%
<b>Total</b>	<b>547</b>	<b>100.00%</b>	<b>51</b>	<b>100.00%</b>	<b>598</b>	<b>100.00%</b>

*TD = Tensión diagonal, TC = Tensión cortante, CC = Compresión cortante*

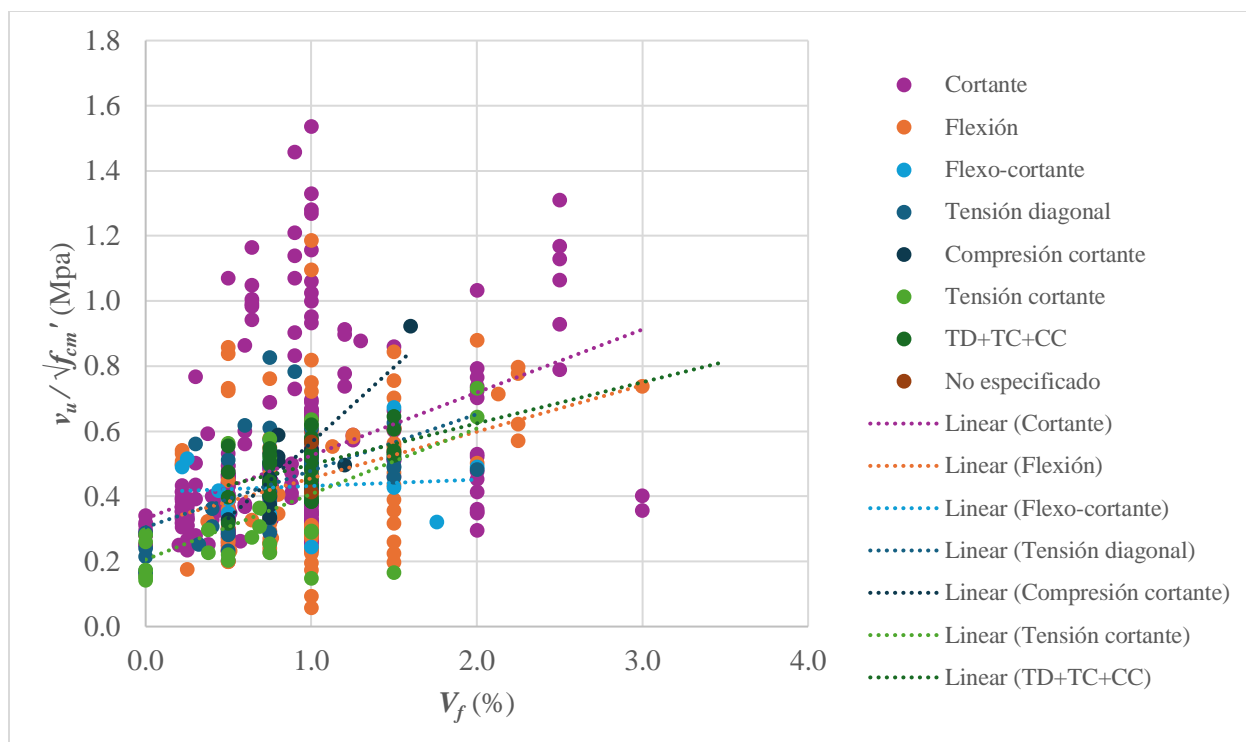


**Figura 3. 65.** - Porcentaje de vigas esbeltas sin estribos según el tipo de falla.



**Figura 3. 66.** - Porcentaje de vigas esbeltas con estribos según el modo de falla.

Primero se analizaron las vigas esbeltas sin refuerzo transversal con el apoyo de las **Figura 3. 67**, **Figura 3. 68** y **Figura 3. 69**. La primera muestra relación entre  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de vigas esbeltas sin refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla. En esta figura se observa que las vigas que fallaron por compresión cortante presentan una línea de tendencia superior a todos los otros tipos de falla, lo cual coincide con lo visto en la **Figura 3. 62**, demostrando que este fenómeno no ocurre solo en vigas peraltadas. El modo de falla que presentaron los elementos con mayor resistencia, después de la compresión cortante, fue la falla por cortante, seguido de los elementos con falla por tensión diagonal y la combinación de tensión diagonal, tensión y compresión cortantes. Las líneas de tendencia de estos modos de falla se intersecan, presentando mayor pendiente la línea de la falla por tensión diagonal. Posteriormente, se encuentran las líneas de tendencia de la falla por flexión y flexo-cortante, en ese orden.

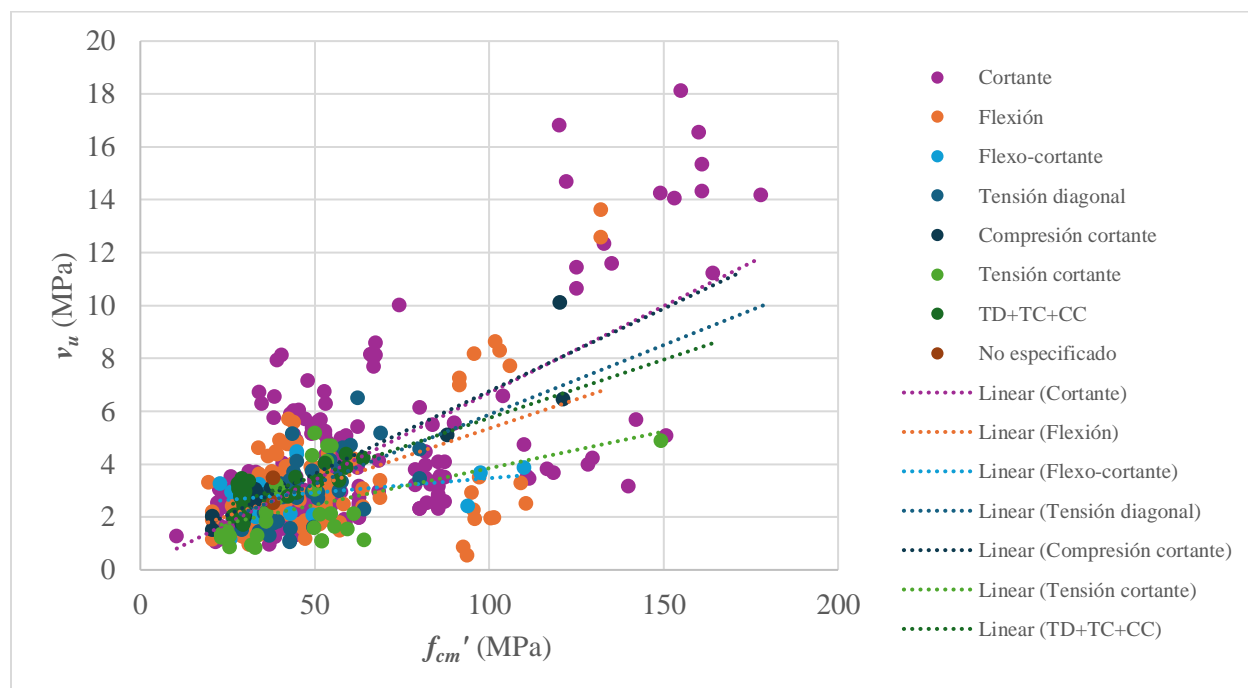


**Figura 3. 67.** - Relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de vigas esbeltas sin refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla.

La **Figura 3. 68** muestra relación entre  $f_{cm}'$  y la resistencia al corte de vigas esbeltas sin refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla. Esta figura revela un comportamiento similar al de la **Figura 3. 67**. Las vigas que fallaron por compresión cortante presentan una línea de tendencia superior a todos los otros tipos de falla. Sin embargo, esta línea tuvo que ser extrapolada, ya que los especímenes que presentaron este modo de falla no tenían una  $f_{cm}'$  superior a 100 MPa, y, además, la línea era muy semejante a la de la falla por cortante, que tenía una pendiente más pronunciada.

A continuación, se encuentran los elementos con falla por tensión diagonal y la combinación de tensión diagonal, tensión y compresión cortantes. Las líneas de tendencia de estos modos de falla se intersecan y ambas fueron extrapoladas, ya que los elementos tenían  $f_{cm}'$

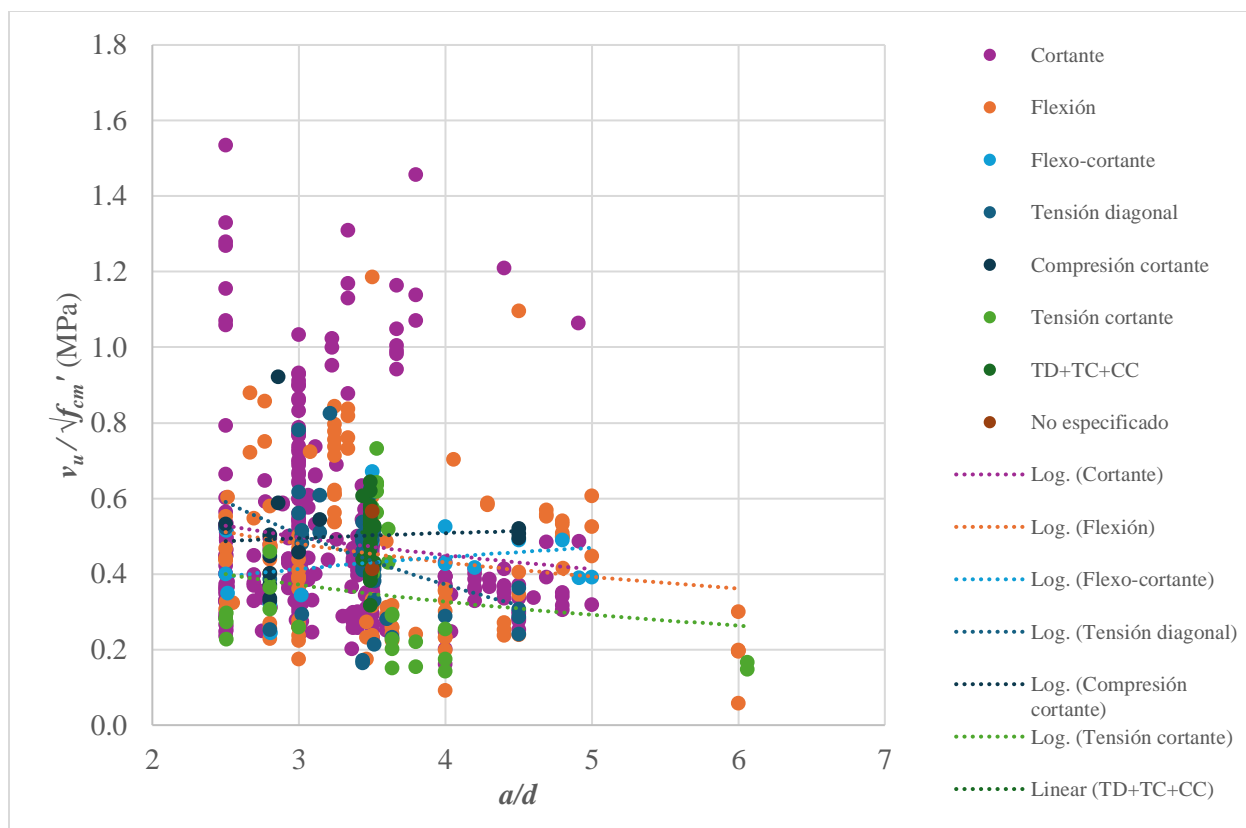
menores a 100 MPa y no se lograban distinguir claramente. Posteriormente se encuentran las líneas de tendencia de la falla por flexión, tensión cortante y flexo-cortante, en ese orden.



**Figura 3. 68.** - Relación entre  $f_{cm}'$  y la resistencia al corte de vigas esbeltas sin refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla.

La **Figura 3. 69** muestra la relación entre  $a/d$  y la resistencia al corte de vigas esbeltas sin refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla. Se observa que las líneas de tendencia más bajas corresponden a los modos de falla por tensión cortante y tensión diagonal, lo cual contrasta con lo observado en las **Figura 3. 67** y **Figura 3. 68**, En estas figuras, la línea de tensión diagonal se encontraba entre las que mejor desempeño tenían. Este comportamiento puede deberse a que, para valores más altos de  $a/d$ , este modo de falla se alcanza a resistencias más bajas.



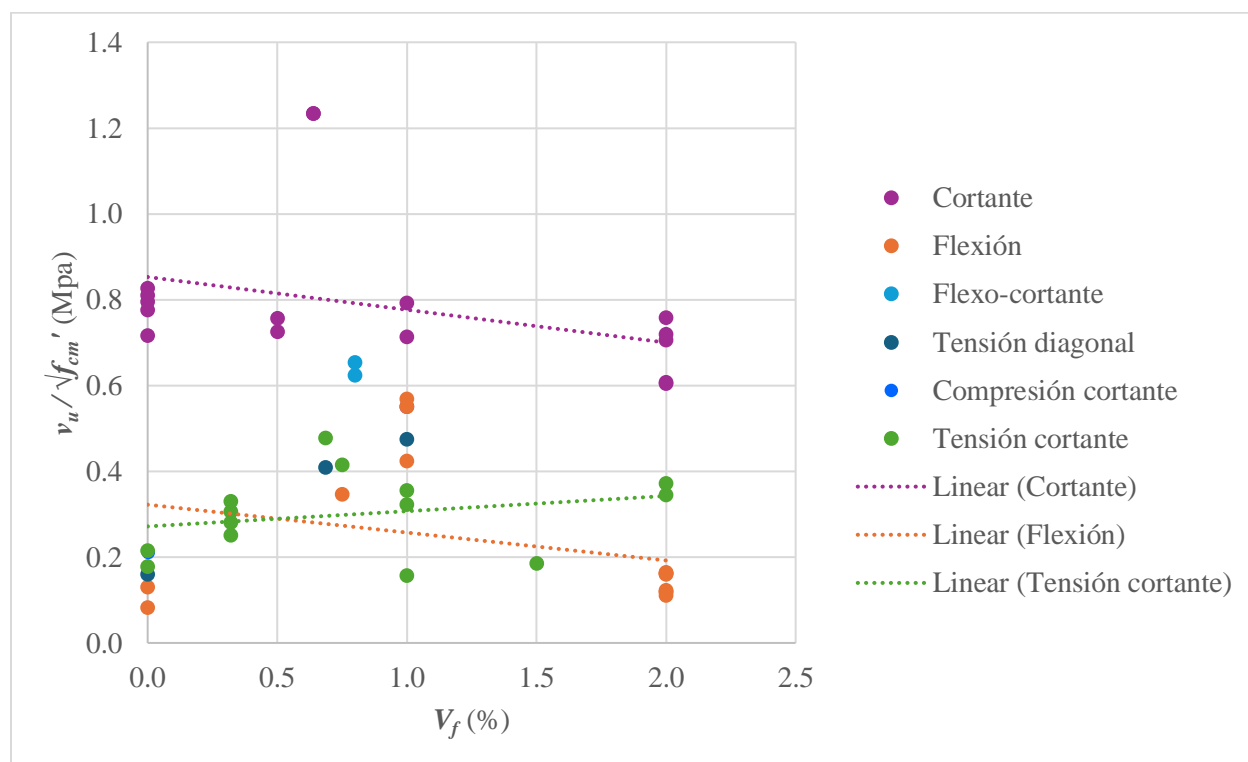


**Figura 3. 69.** - Relación entre  $a/d$  y la resistencia al corte normalizada de vigas esbeltas sin refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla.

Con esta información, se puede concluir que los elementos esbeltos sin estribos que presentan alguno de los modos de falla por cortante soportaron mayores esfuerzos que aquellas vigas que presentaron fallas por flexión o flexo-compresión. Entre los elementos que presentan modos de falla por cortante, los que resisten menos son aquellos que presentan tensión cortante, debido a la ausencia de un refuerzo adecuado para soportar los esfuerzos cortantes.

La **Figura 3. 70** expone la relación  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de vigas esbeltas con refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla. Como se vio en la **Figura 3. 67**, los elementos que reportaron fallas por cortante soportaron más que los elementos con falla por flexión, y los especímenes con falla por tensión cortante alcanzaron esfuerzos bajos. Los

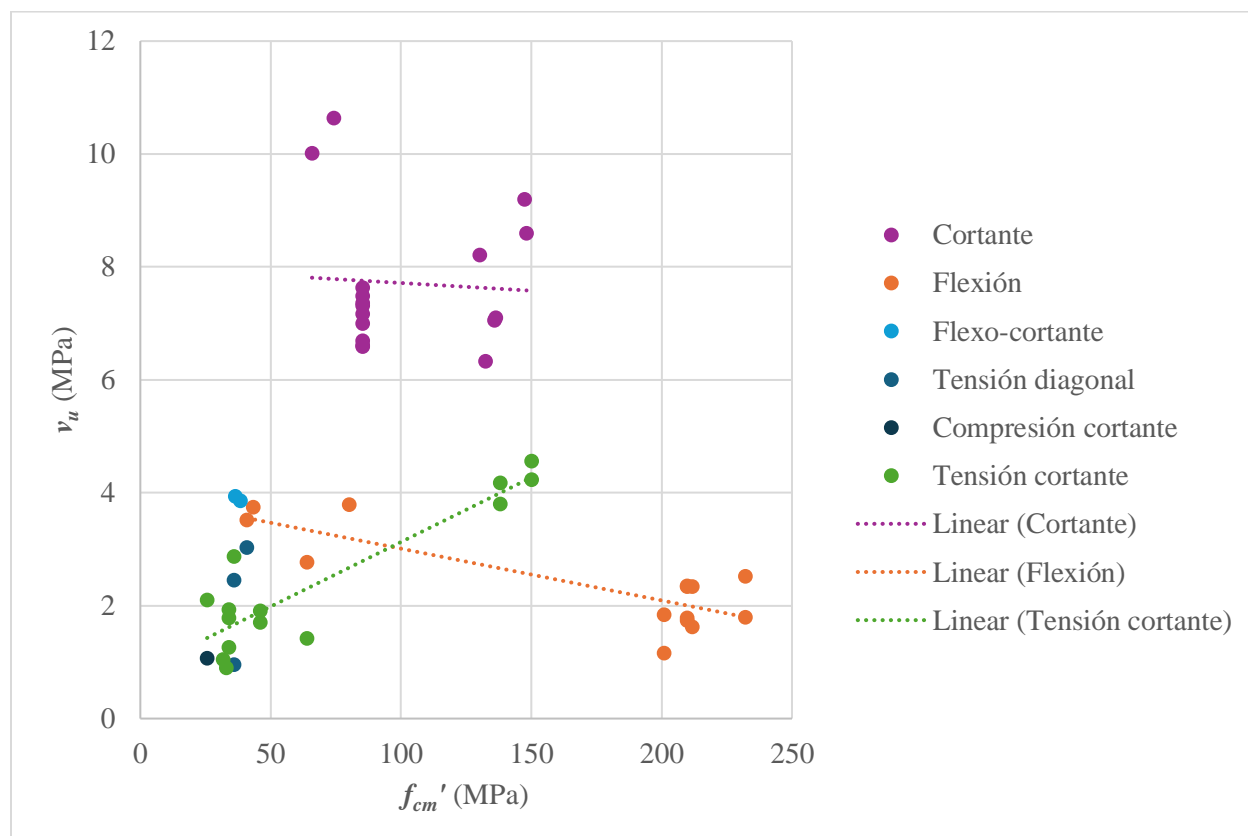
otros modos de falla tuvieron muy pocos ejemplares para que sus líneas de tendencia fueran significativas, por lo que se descartaron. Además, se destaca que la presencia de refuerzo transversal en los especímenes no es uniforme, lo que provoca que algunas líneas de tendencia tengan pendiente negativa, ya que esta variable no se considera en los gráficos.



**Figura 3. 70.** - Relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de vigas esbeltas con refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla.

La **Figura 3. 71** presenta la relación entre  $f_{cm}'$  y la resistencia al corte de vigas esbeltas con refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla. Similar a lo observado en la **Figura 3. 70**, los especímenes que reportaron fallas por cortante son los que mejor desempeño mostraron con relación a su  $f_{cm}'$  y  $v_u$ , reflejado en una línea de tendencia superior a las demás. Las líneas de tendencia correspondientes a fallas por tensión diagonal y flexión se intersecan, con la primera mostrando una pendiente positiva y la segunda una pendiente negativa. Esta pendiente negativa,

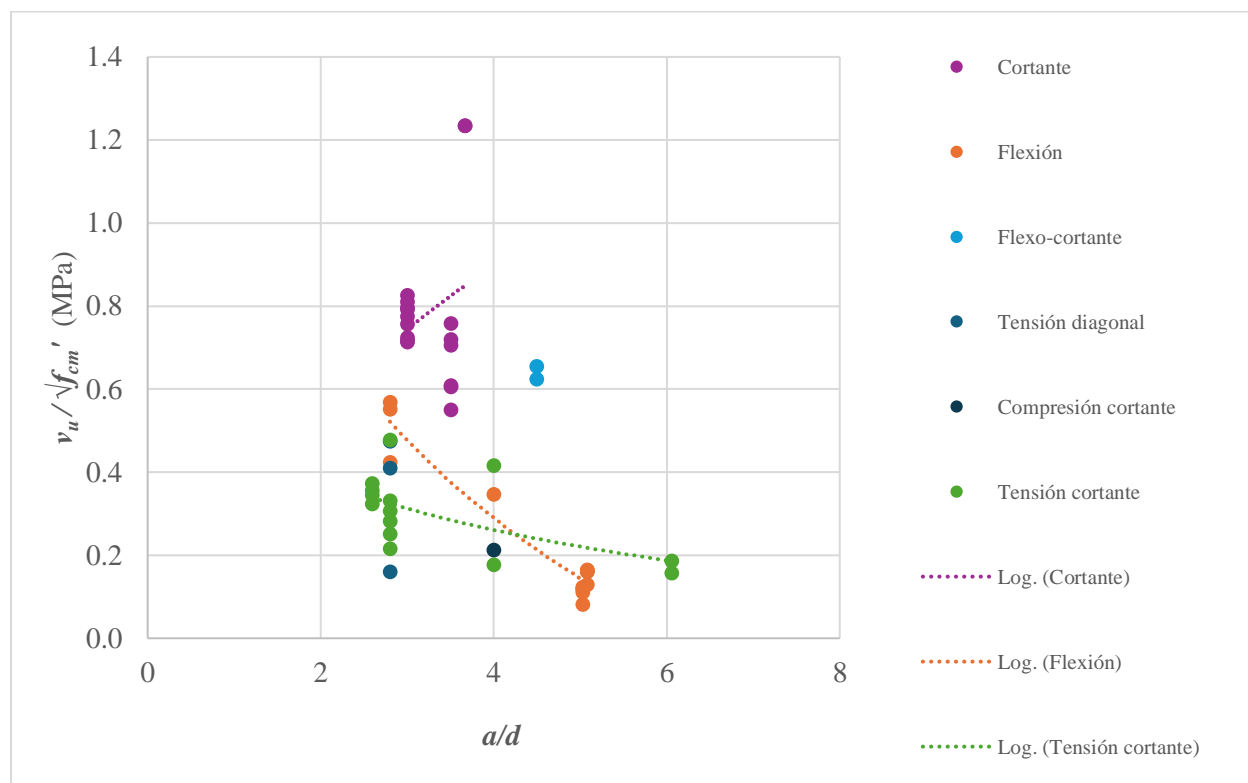
al igual que en la **Figura 3. 70**, se debe a la variabilidad en la presencia de estribos entre los especímenes estudiados.



**Figura 3. 71.** - Relación entre  $f_{cm}'$  y la resistencia al corte de vigas esbeltas con refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla.

La **Figura 3. 72** presenta la relación entre  $a/d$  y la resistencia al corte de vigas esbeltas con refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla. Es este gráfico se observar una tendencia genera en la que, a medida que aumenta la relación  $a/d$ , disminuye la resistencia al corte normalizada. La línea de tendencia de los elementos que reportaron fallas por cortante fue superior a las demás, seguida por la de fallas por flexión y, finalmente, a de elementos con falla por tensión cortante. Al igual que en los dos gráficos anteriores, no se graficaron las líneas de tendencia de otros modos de falla debido a la escasez de elementos, lo cual impide que sean representativos. Por otro lado, la línea de tendencia de los elementos con fallas por cortante es

positiva, lo cual se atribuye a la variabilidad en la dosificación del refuerzo transversal entre las vigas.



**Figura 3. 72.** - Relación entre  $a/d$  y la resistencia al corte normalizada de vigas esbeltas con refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla.

El análisis de las **Figura 3. 70**, **Figura 3. 71** **Figura 3. 72** proporciona una visión detallada del comportamiento de las vigas esbeltas con refuerzo transversal en función de la resistencia al corte y sus modos de falla. En resumen, estas figuras subrayan la importancia del refuerzo transversal en mejorar la resistencia al corte de las vigas esbeltas. Los especímenes con fallas por cortante consistentemente muestran un mejor desempeño.

### Vigas peraltadas

Se realizó un análisis similar para las vigas peraltadas, dividiendo los especímenes en aquellos con y sin refuerzo transversal. La En el caso de los especímenes con refuerzo

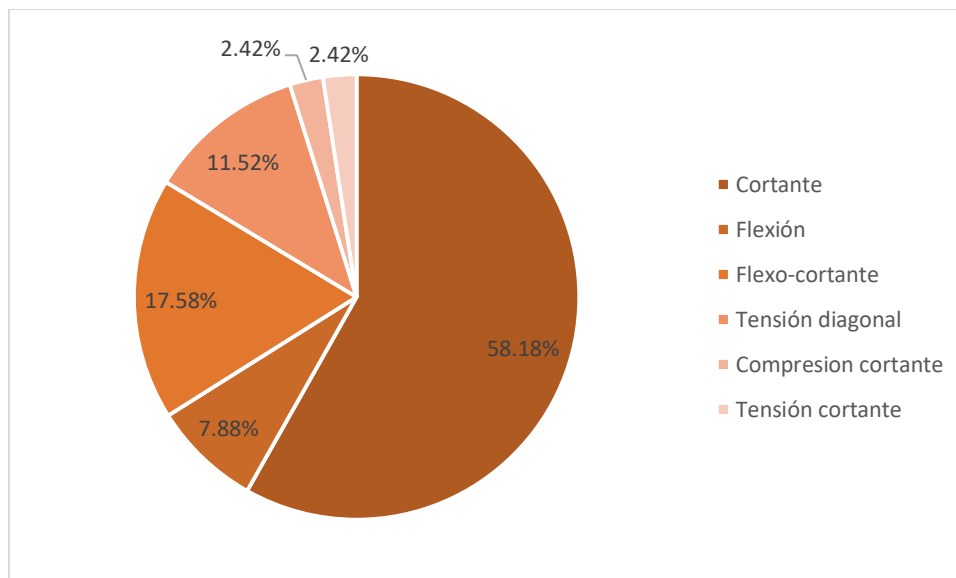
transversal, cerca de la mitad mostraron fallas por compresión cortante, aproximadamente un tercio presentó fallas por cortante, y un 16.67% por tensión cortante. Los demás tipos de falla no se presentaron en este tipo de vigas o fueron muy pocos especímenes, como es el caso de la flexión, que solo son tres especímenes.

Tabla 3. 18. - Número y porcentaje de vigas peraltadas según el tipo de falla. presenta el número y porcentaje de vigas peraltadas clasificadas según el tipo de falla. Se observa que las vigas peraltadas sin refuerzo transversal son más del triple que aquellas que cuentan con estribos. La mayoría de las vigas sin refuerzo reportaron fallas por cortante, seguidas de fallas flexo-cortantes, por tensión diagonal y por flexión. Solo se cuenta con cuatro especímenes que presentaron fallas por compresión y tensión cortante, para cada uno de los modos de falla.

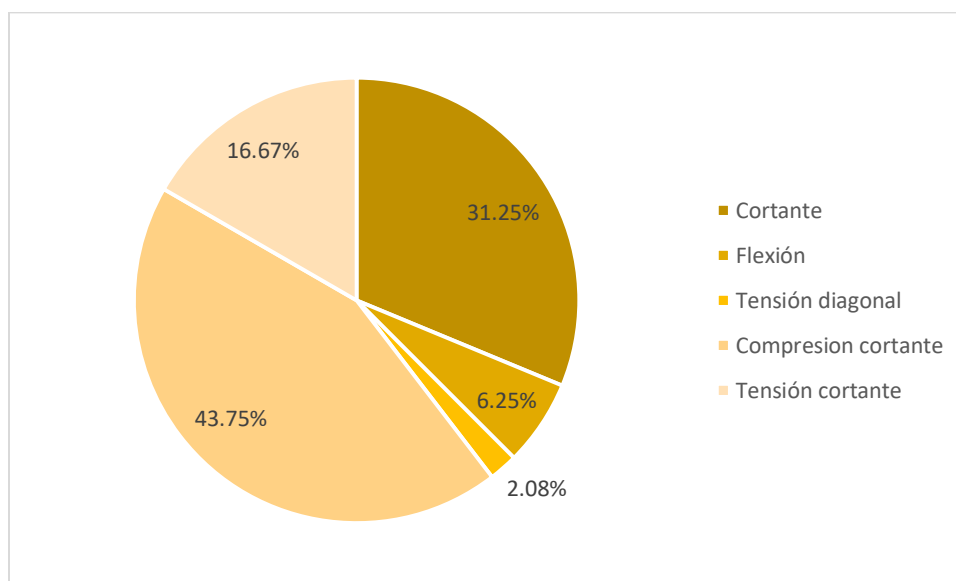
En el caso de los especímenes con refuerzo transversal, cerca de la mitad mostraron fallas por compresión cortante, aproximadamente un tercio presentó fallas por cortante, y un 16.67% por tensión cortante. Los demás tipos de falla no se presentaron en este tipo de vigas o fueron muy pocos especímenes, como es el caso de la flexión, que solo son tres especímenes.

**Tabla 3. 18.** - Número y porcentaje de vigas peraltadas según el tipo de falla.

Tipo de fibra	Refuerzo transversal				Total	
	Sin refuerzo		Con refuerzo			
	no.	%	no.	%	no.	%
Cortante	96	58.18%	15	31.25%	111	52.11%
Flexión	13	7.88%	3	6.25%	16	7.51%
Flexo-cortante	29	17.58%	0	0.00%	29	13.62%
Tensión diagonal	19	11.52%	1	2.08%	20	9.39%
Compresión cortante	4	2.42%	21	43.75%	25	11.74%
Tensión cortante	4	2.42%	8	16.67%	12	5.63%
<b>Total</b>	165	100.00%	48	100.00%	213	100.00%



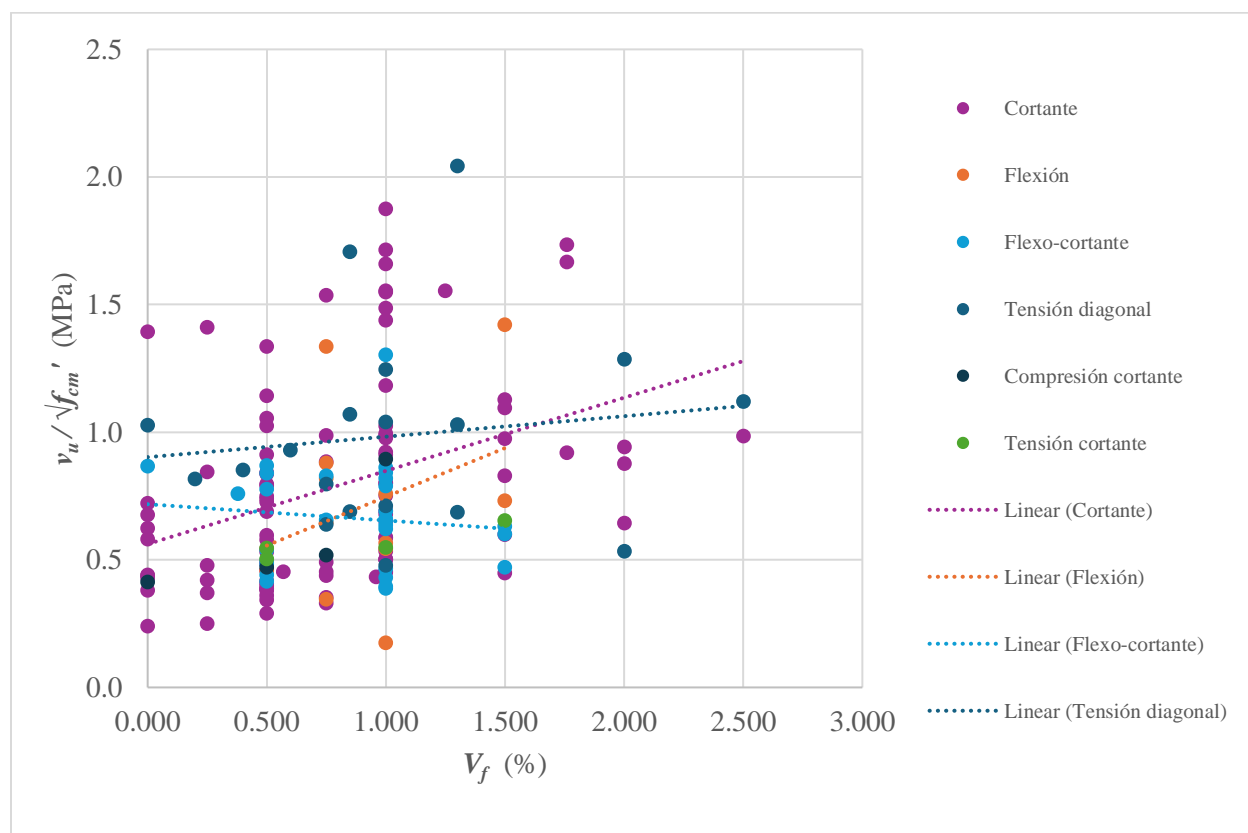
**Figura 3. 73.** - Porcentaje de vigas peraltadas sin estribos según el tipo de falla.



**Figura 3. 74.** - Porcentaje de vigas peraltadas con estribos según el tipo de falla.

La **Figura 3. 75** muestra la relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de vigas peraltadas sin refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla. Se observa en el gráfico que las líneas de tendencia superiores son las tensión diagonal y las vigas reportadas con falla por cortante, seguidas por la línea de los elementos que fallaron por flexión

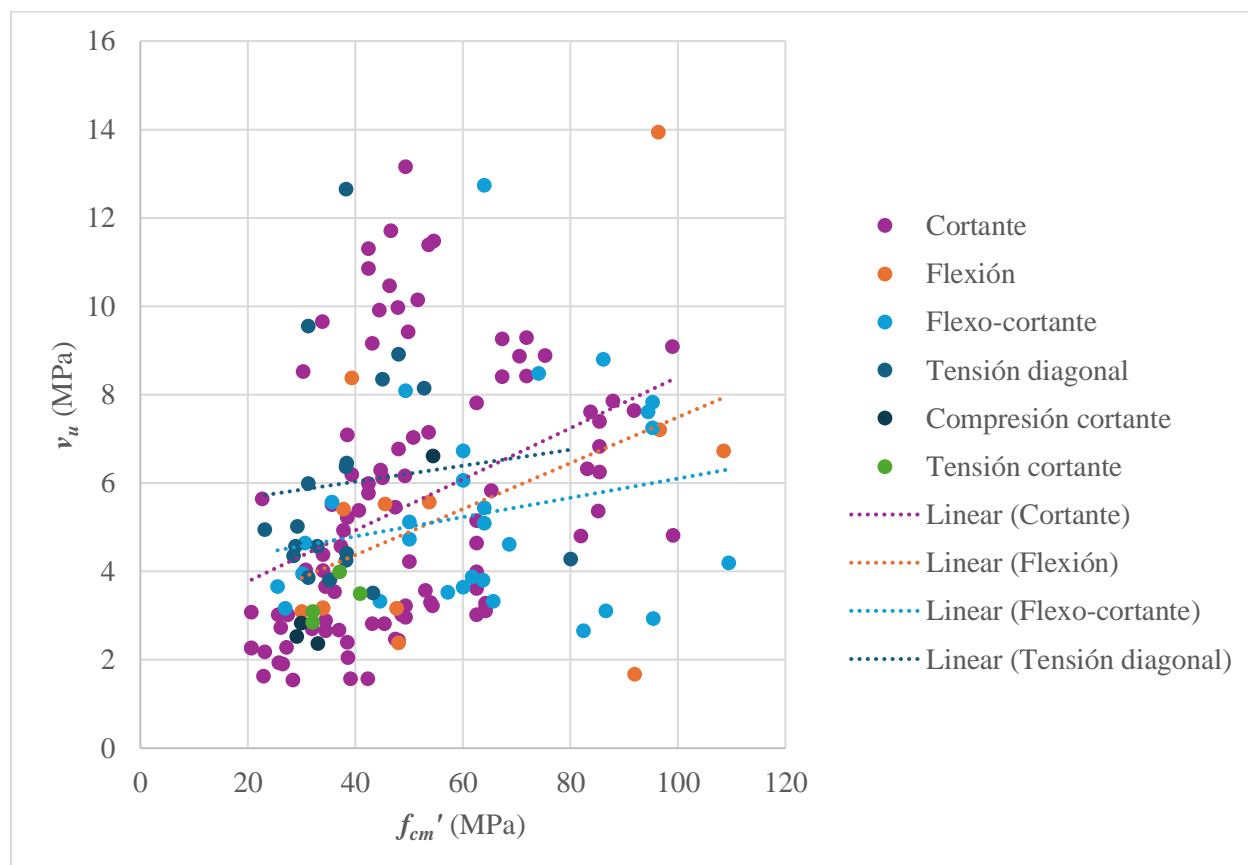
y finalmente la línea de la falla flexo-cortante, ésta última con pendiente negativa. Las líneas de tendencia para compresión y tensión cortantes no se graficaron, pues solo cuentan con cuatro ejemplares cada uno, sin embargo, se pueden apreciar claramente que los especímenes con estas fallas alcanzaron esfuerzos bajos fueron bajos.



**Figura 3. 75.** - Relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de vigas peraltadas sin refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla.

La **Figura 3. 76** expone la relación entre  $f_{cm}'$  y  $v_u$  de vigas peraltadas sin refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla, donde se observa que las líneas de tendencia de los especímenes con modos de falla de tensión diagonal y los reportados como cortante, son superiores a las líneas de las fallas por flexión y flexo-cortante. La línea de tendencia de elementos que reportaron falla por cortante tiene una pendiente más pronunciada que la de

tensión diagonal, y a su vez, la línea de falla por flexión tiene pendiente más elevada que la línea de flexo-cortante.

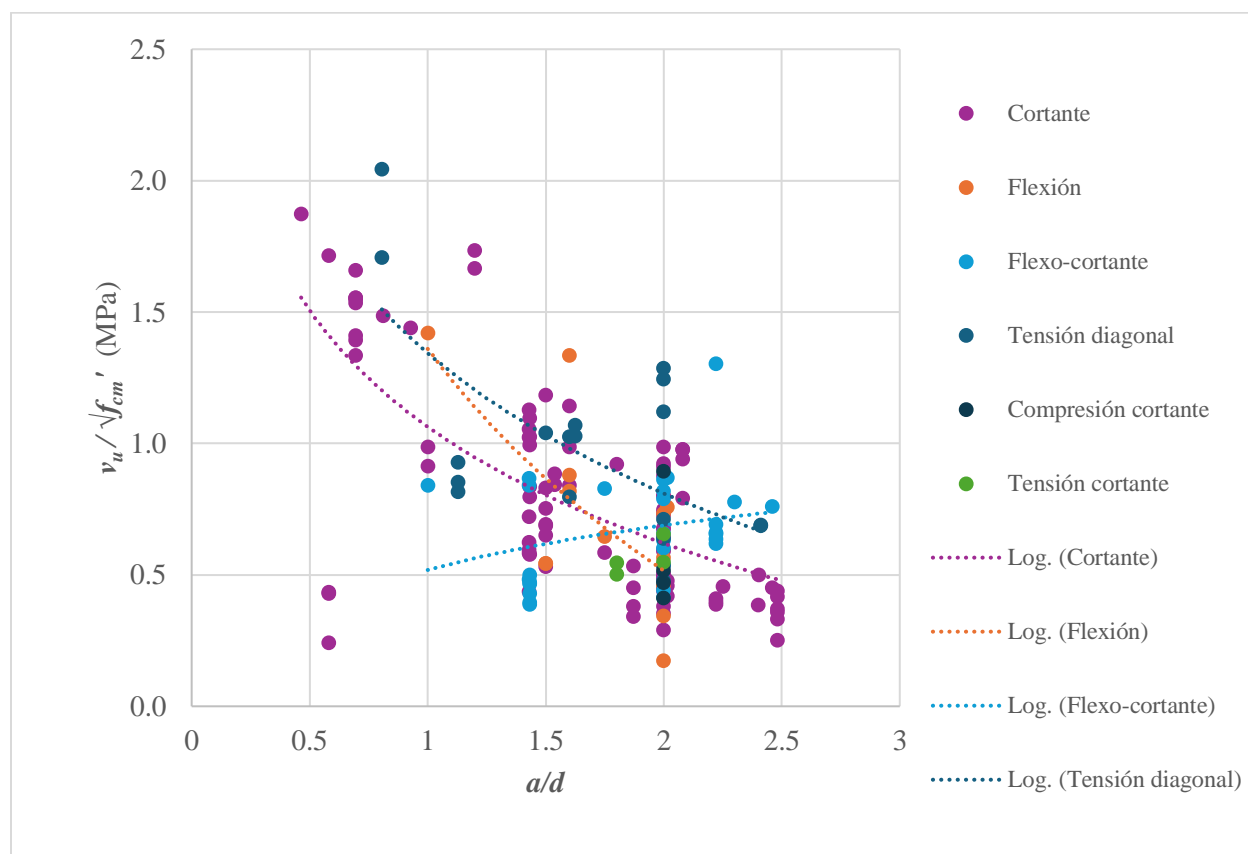


**Figura 3. 76.** - Relación entre  $f_{cm}'$  y la resistencia al corte de vigas peraltadas sin refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla.

La **Figura 3. 77** muestra relación entre  $a/d$  y la resistencia al corte normalizada de vigas peraltadas sin refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla. observa que la línea de tendencia superior corresponde a especímenes que presentaron falla por tensión diagonal. Sin embargo, las otras líneas se intersecan, lo que dificulta determinar con precisión cuál es superior, ya que la disminución de resistencia conforme crece la relación  $a/d$  es más abrupta para los especímenes que fallaron por flexión, mientras que es más suave para aquellos que reportaron falla por cortante. Por otro lado, las vigas con falla flexo-cortante muestran una curva ascendente



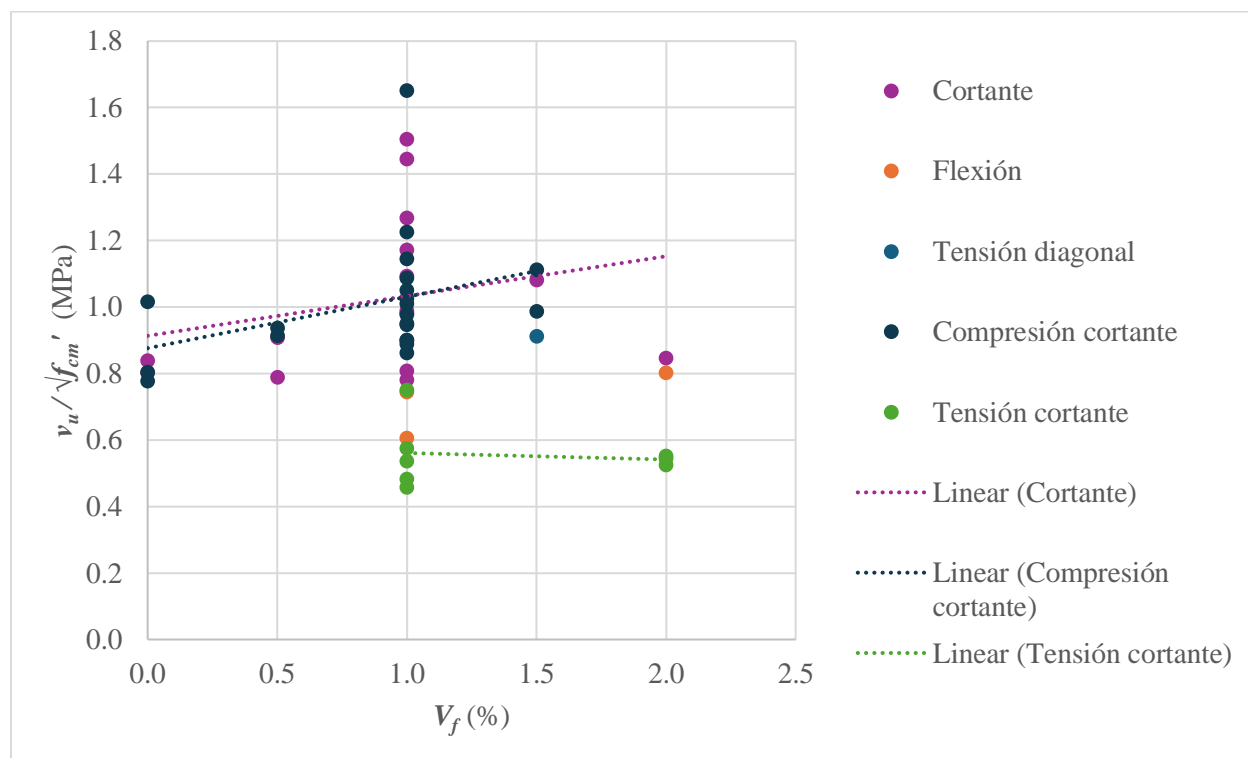
en lugar de una caída en la resistencia. Este comportamiento se debe a la división del análisis entre vigas peraltadas y esbeltas. La **Figura 3. 69**, que muestra elementos esbeltos sin refuerzo, indica que los esfuerzos alcanzados por vigas que fallaron por flexo-cortante con  $a/d$  mayores son inferiores a los mostrados en la **Figura 3. 77**.



**Figura 3. 77.** - Relación entre  $a/d$  y la resistencia al corte normalizada de vigas peraltadas sin refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla.

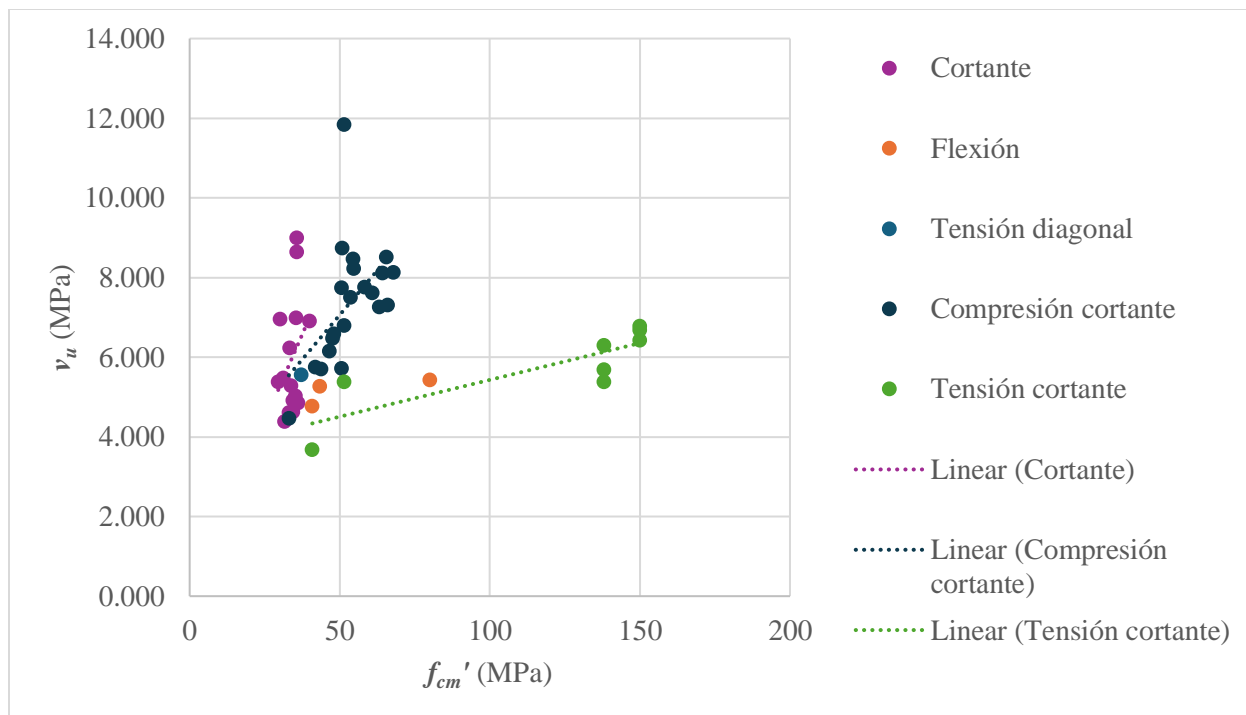
La **Figura 3. 78** muestra la relación entre la  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de vigas peraltadas con refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla. Se observa claramente que la mayoría de las vigas tienen un  $V_f$  de 1%. Las líneas de tendencia de los modos de falla por compresión cortante y por cortante son superiores con relación a  $V_f$ . En contraste, la línea de tendencia de tensión cortante es inferior a las demás. Las otras líneas de tendencia no se

graficaron debido a que los modos de falla correspondientes solo cuentan con tres y un espécimen, respectivamente, lo que los hace irrelevantes para un análisis significativo.



**Figura 3. 78.** - Relación entre el contenido de fibras  $V_f$  y la resistencia al corte normalizado de vigas robustas con refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla.

La **Figura 3. 79** representa la Relación entre  $f_{cm}'$  y  $v_u$  de vigas peraltadas con refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla. Al igual que en la **Figura 3. 78**, las líneas de tendencia para los modos de falla por compresión diagonal y cortante son superiores. La línea correspondiente a la falla por cortante no solo es superior, sino que también presenta una pendiente más pronunciada que la de compresión cortante. Sin embargo, la línea de falla por cortante es corta, ya que el  $f_{cm}'$  de estos elementos se encuentra en el rango de 30 a 40 MPa. En contraste, la línea de tendencia de la falla por tensión cortante es inferior, indicando que este tipo de falla ocurre a esfuerzos menores.

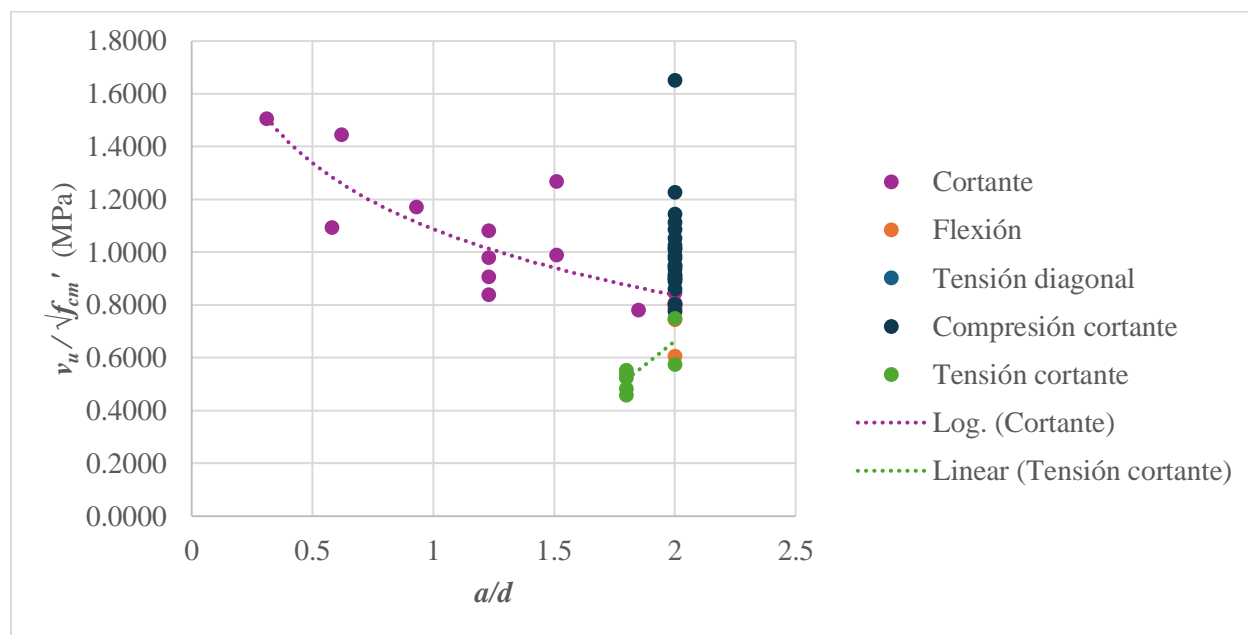


**Figura 3. 79.** - Relación entre  $f_{cm}'$  y la resistencia al corte de vigas peraltadas con refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla.

La **Figura 3. 80** exhibe la relación entre  $a/d$  y la resistencia al corte normalizada de vigas peraltadas con refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla. En este gráfico, solo se trazaron dos líneas de tendencia: una para los especímenes que reportaron falla por cortante y otra para los que presentaron falla por tensión cortante. No se incluyó una línea de tendencia para la falla por compresión cortante, ya que todos los especímenes en esta categoría tenían un  $a/d$  igual a dos, lo que resultaría en una línea vertical, lo cual no es representativo.

Para la falla por tensión cortante, la línea de tendencia es ascendente. Esto se debe a la clasificación de los especímenes en esbeltos y peraltados. En la **Figura 3. 72** se observa que los especímenes esbeltos con refuerzo transversal alcanzan menores esfuerzos comparados con los exhibidos en la **Figura 3. 80**. En el caso del modo de falla por cortante, la línea de tendencia es

decreciente, mostrando que los elementos peraltados exhiben resistencias superiores a los esbeltos.



**Figura 3. 80.** - Relación entre  $a/d$  y la resistencia al corte de vigas peraltadas con refuerzo transversal clasificadas por su modo de falla.

En general, en este análisis de la resistencia al cortante según el tipo de falla del espécimen, se puede observar que las vigas que presentan falla por compresión cortante son las que mejor desempeño tienen, seguidos por aquellos especímenes con modo de falla por tensión diagonal. Por otro lado, los especímenes que mostraron falla por tensión cortante fueron los que peor desempeño mostraron, junto con los especímenes que exhibieron fallas por flexión. Se recalca que la mayoría de la base de datos cuenta con vigas reportadas simplemente con fallas por cortante, pero éstas no especifican el modo de falla por cortante por específico. Sin embargo, estas vigas demostraron una buena resistencia en comparación con los otros modos de falla.

La misma naturaleza de los modos de falla se ve reflejado en este análisis, pues, las fallas por compresión cortante se forman por cargas altas concentradas cerca de los apoyos, y debido a los arreglos de las pruebas por cortante, esto es frecuente, pues una vez se alcanzan esfuerzos altos, se generan las condiciones para este modo de falla. Además, este modo de falla es frecuente en elementos que presentan una resistencia a compresión del concreto baja, lo cual, en

esta base de datos se presenta, pues varias de las líneas de tendencia tuvieron que ser extrapoladas debido a  $f_{cm}'$  medias y bajas.

El modo de falla por tensión cortante se presenta típicamente en ausencia de refuerzo transversal adecuado para resistir las tensiones de corte, o cuando se utiliza concreto de baja resistencia. En las **Figura 3. 68** y **Figura 3. 76** , se observa que los concretos no superan los 50 MPa, lo que indica resistencias medias o bajas. Por otro lado, en las **Figura 3. 71** y **Figura 3. 79**, hay especímenes con resistencias a compresión del concreto que se aproximan a 150 MPa. Estas figuras corresponden a elementos con refuerzo transversal, y los especímenes con alta resistencia a compresión pertenecen todos al mismo estudio (Bahij, y otros, 2017). Este comportamiento puede explicarse por una distancia excesiva entre los estribos y el uso de microfibras, ya que las fibras utilizadas tienen una longitud de solo 13 mm. Esto puede representar un refuerzo a cortante inadecuado, lo que resulta en una resistencia a cortante reducida a pesar de la alta resistencia del concreto y la presencia de estribos.

Por otro lado, la falla por tensión diagonal se produce cuando el refuerzo transversal es insuficiente para confinar y resistir las tensiones diagonales, las cuales son provocadas por altos niveles de carga y/o baja resistencia a la tracción del concreto, lo que facilita la propagación de grietas. En las figuras donde se compara la  $f_{cm}'$  con la resistencia al corte, se observa que los especímenes que presentan falla por tensión diagonal tienen valores de resistencia a compresión del concreto que varían entre bajas, medias y altas. Esto sugiere que este modo de falla puede atribuirse a los altos niveles de carga alcanzados por estos especímenes y a la incapacidad de las fibras para soportar mayores esfuerzos. Cabe destacar que los esfuerzos alcanzados en casos de falla por tensión diagonal fueron superiores a los modos de falla por tensión cortante, flexión y flexo-cortante.

En el caso de falla por flexión, se presentó con más frecuencia en especímenes esbeltos que en peraltados, esto es debido a la acción de arco en estos últimos. Alcanzaron esfuerzos menores que la mayoría de los especímenes que presentaron un modo de falla de cortante, con excepción de la falla a tensión cortante. Este modo de falla se presenta cuando la sección de concreto en la zona de compresión no puede soportar más deformación y se agrieta, incapacitando la transferencia de esfuerzos. La propagación de fisuras en la zona de tensión puede ser más rápida en vigas esbeltas debido a su menor sección transversal y a la mayor

relación de esbeltez. Este tipo de falla se previene con una adecuada dosificación de acero longitudinal y suele ser un tipo de falla más dúctil, pues los esfuerzos de tensión son principalmente soportados por el acero y no el concreto. Algunos investigadores dicen que cuando el refuerzo de fibras o estribos es suficiente, puedes convertir el modo de falla natural de una viga de cortante a flexión (Cho & Yoon –II, 2003).

Las fallas por flexo-cortante se producen cuando las vigas sufren simultáneamente los efectos de flexión y cortante. Este tipo de falla se caracteriza por la formación de grietas por flexión en la parte central de la viga y grietas diagonales cerca de los apoyos, que interactúan y se propagan rápidamente en ausencia de un refuerzo transversal adecuado. Los especímenes que mostraron este modo de falla soportaron menos esfuerzos porque la presencia de grietas de flexión reduce la capacidad de la viga para resistir los esfuerzos de cortante. En la base de datos, la mayoría de los especímenes con fallas por flexo-cortante son vigas peraltadas. Esto se debe a su geometría, ya que, al no ser elementos esbeltos que incentiven predominantemente la falla por flexión, y al enfrentar momentos flexionantes altos o tener una cuantía de acero longitudinal insuficiente, ambos modos de falla pueden ocurrir simultáneamente.

## **Conclusiones**

A lo largo de este capítulo, se ha analizado exhaustivamente una base de datos de 811 especímenes probados por diferentes autores. Este análisis detallado incluyó la catalogación de los especímenes según diversas características: la forma de la sección (rectangular, I o T), la fracción de volumen de fibras ( $V_f$ ), la relación a/d en vigas esbeltas y peraltadas, la forma de las fibras y la presencia o ausencia de refuerzo transversal. Este proceso de catalogación permitió una comprensión más profunda y estructurada de cómo estas variables afectan la resistencia al cortante y otros modos de falla

Se observó que a medida que aumenta la resistencia a la compresión del concreto, también aumentan los esfuerzos que pueden resistir los especímenes. Del mismo modo, un aumento en la fracción de volumen de fibras ( $V_f$ ) conlleva a una mayor resistencia al cortante, lo

que indica que las fibras efectivamente mejoran la resistencia del material frente a esfuerzos cortantes. La mayoría de los especímenes analizados fueron esbeltos, lo cual facilitó un estudio detallado del comportamiento de las vigas donde la acción de arco no es tan prominente.

No obstante, las vigas peraltadas exhibieron una significativa mejora en la resistencia a los esfuerzos cortantes, atribuible principalmente a la acción de arco generada por la geometría de estas vigas. Este fenómeno subraya la importancia de considerar tanto la geometría como las propiedades del material al diseñar estructuras para resistir esfuerzos cortantes de manera eficaz y segura.

Es crucial notar que la acción de arco en las vigas peraltadas representa un mecanismo efectivo de resistencia, permitiéndoles soportar mejor los esfuerzos a cortante. Sin embargo, es menos común utilizar vigas peraltadas en comparación con las esbeltas, debido a que estas últimas ofrecen mayor flexibilidad en el diseño y en la distribución de espacios interiores, además de requerir generalmente menos material, lo cual reduce los costos de construcción. Por tanto, es importante buscar diseños de vigas esbeltas que puedan manejar eficientemente las cargas aplicadas de manera dúctil y efectiva.

En cuanto a los modos de falla, se ha demostrado que la falla por flexión ocurre más frecuentemente en especímenes esbeltos debido a su menor capacidad para soportar deformaciones en la zona de compresión, mientras que las vigas peraltadas tienden a fallar por compresión cortante debido a la acción de arco y las concentraciones de carga cerca de los apoyos. La falla por tensión diagonal se asocia a insuficiente refuerzo transversal y altos niveles de carga, lo que facilita la propagación de grietas diagonales. Por otro lado, las fallas por flexo-cortante combinan los efectos de flexión y cortante, resultando en menores resistencias debido a la interacción de grietas de flexión y cortante.

Se destaca que el estudio de vigas con refuerzo de estribos no fue concluyente debido a la variabilidad en la cuantía de este refuerzo. Los diferentes autores emplearon distintas separaciones y áreas de acero transversal, introduciendo una variable adicional que dificulta la identificación de tendencias claras y que podría llevar a resultados erróneos, como los que se observaron anteriormente. Se recomienda para futuros estudios el uso de estribos con separaciones y áreas uniformes, lo cual contribuiría a obtener resultados más consistentes y comparables entre diferentes investigaciones.

Las secciones de las vigas también juegan un papel crucial en su comportamiento bajo cargas. Las vigas con secciones en I y T, aunque óptimas para resistir flexión y cargas distribuidas respectivamente, presentan desafíos en términos de resistencia al cortante debido a la menor área de concreto en el alma, lo que reduce el refuerzo efectivo proporcionado por las fibras. En contraste, las vigas con sección rectangular han mostrado una mejor relación entre la  $V_f$  la resistencia al cortante, beneficiándose de una distribución más uniforme del refuerzo de fibras en la sección transversal.

En conclusión, este análisis ha permitido establecer criterios fundamentados en resultados experimentales que pueden guiar el diseño y la selección de vigas en función de sus características geométricas, la fracción de volumen de fibras y la necesidad de refuerzo transversal. Estos criterios son esenciales para optimizar la resistencia al cortante y otros modos de falla, contribuyendo a estructuras más seguras y eficientes.



# CAPITULO

# 4

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

## CAPITULO 4

### PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### **Antecedentes**

Este programa, dirigido por el Dr. Héctor Guerrero, se enmarcó en el proyecto titulado “Desarrollo de Capacidades Para Aumentar la Resiliencia Sísmica de Edificios de Concreto y Mampostería con un Enfoque de Diseño por Desempeño (CONACyT – FORDECyT)”. En el marco de este proyecto, se desarrolló un protocolo de pruebas experimentales para evaluar especímenes de vigas y muretes de concreto reforzado con fibras metálicas.

El objetivo principal de este proyecto fue abordar la carencia de investigaciones previas sobre el comportamiento de elementos de concreto reforzado con fibras en nuestro país. Es relevante señalar que la planificación de este proyecto comenzó a principios de 2020. Sin embargo, debido a la contingencia sanitaria a nivel mundial causada por la enfermedad del coronavirus, COVID-19, las pruebas programadas se retrasaron hasta noviembre de 2021. Fue en este momento cuando se llevaron a cabo las primeras pruebas, concluyendo las pruebas en vigas en diciembre de 2021. Las pruebas en cilindros continuaron durante el año 2022.

#### **Descripción General de Especímenes**

En la fase inicial de este proyecto, la cual se abordarán en este capítulo, se llevaron a cabo pruebas en una variedad de especímenes con el objetivo de evaluar su comportamiento. En total, se ensayaron 87 vigas de dimensiones 15x30x60 cm, 39 vigas de 15x15x50 cm, 60 cilindros de 15x30 cm y 30 cubos de 15x15x15 cm. Estas pruebas se realizaron aplicando incrementos de carga monótona, siguiendo las recomendaciones establecidas en las normas ASTM C1609 y la norma europea EN14651:2005.

Adicionalmente, se llevaron a cabo pruebas específicas en 30 cilindros de concreto, siguiendo la norma NMX-C-128-ONNCCE-2019 para determinar el módulo de elasticidad, mientras que los otros 30 cilindros fueron sometidos a pruebas de compresión diametral, también conocidas como pruebas brasileñas, de acuerdo con los estándares de la norma ASTM C-496-04 y la norma NMX-163-ONNCCE-2019. Los cubos de concreto se sometieron a pruebas de compresión.

Durante el proceso de evaluación, se analizó la capacidad de carga a fuerza cortante y las deformaciones de los especímenes. Es importante destacar que la aplicación de carga en los especímenes se realizó de manera cuasi-estática, siguiendo rigurosamente las pautas establecidas en las normativas previamente mencionadas.

De particular interés para este documento son las 87 vigas de dimensiones 15x30x60 cm (vigas peraltadas), ya que fueron diseñadas específicamente para evaluar su resistencia al esfuerzo cortante. Es relevante señalar que todos los especímenes fueron fabricados por la empresa CEMEX, y que las pruebas se llevaron a cabo en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Las características específicas de las vigas y los cilindros se anexan a continuación:

**Tabla 4. 1.** - Características de cada espécimen dividido por serie.

SERIE	ESP	LARGO (cm)	ALTO (cm)	ANCHO 1 (cm)	ANCHO 2 (cm)	Peso (kg)	Dist. Entre apoyos	Cuantía de acero	Dosificación y tipo	Fecha de fabricación
1539	V1	60.0	30.2	15.5	-	68.3	50	0.0056	-	14/5/2021
	V2	59.9	30.3	15.3	-	68.2	46.5	0.0056	-	14/5/2021
	V3	59.8	30.3	15.3	-	68.3	47.5	0.0056	-	14/5/2021
	V4	50.1	15.0	15.4	-	26.3	45	0.0056	-	14/5/2021
	V5	50.0	15.0	15.1	-	26.0	45	0.0056	-	14/5/2021
	C1	30.0	-	15.0	-	12.7	-	0.0056	-	14/5/2021
	C2	29.8	-	15.0	-	12.8	-	0.0056	-	14/5/2021
	C3	30.0	-	15.0	-	12.8	-	0.0056	-	14/5/2021
1571	V1	60.0	30.2	15.5	-	68.8	47.5	0.0056	10 kg/m <sup>3</sup> 3D	17/5/2021
	V2	60.1	30.2	15.3	-	68.0	47.5	0.0056	10 kg/m <sup>3</sup> 3D	17/5/2021

	V3	59.8	30.1	15.3	-	69.0	47.5	0.0056	10 kg/m <sup>3</sup> 3D	17/5/2021
	V4	50.2	15.0	15.2	-	26.0	45.0	0.0056	10 kg/m <sup>3</sup> 3D	17/5/2021
	V5	49.8	15.3	15.0	-	26.4	45.0	0.0056	10 kg/m <sup>3</sup> 3D	17/5/2021
	C1	29.7	-	15.0	-	12.6	-	0.0056	10 kg/m <sup>3</sup> 3D	17/5/2021
	C2	29.8	-	14.9	-	12.6	-	0.0056	10 kg/m <sup>3</sup> 3D	17/5/2021
	C3	30.0	-	15.0	-	12.7	-	0.0056	10 kg/m <sup>3</sup> 3D	17/5/2021
1610	V1	60.3	30.2	15.3	-	69.5	47.5	0.0056	20 kg/m <sup>3</sup> 3D	21/5/2021
	V2	60.2	30.2	15.4	-	69.2	47.5	0.0056	20 kg/m <sup>3</sup> 3D	21/5/2021
	V3	60.3	30.5	15.2	-	68.6	47.5	0.0056	20 kg/m <sup>3</sup> 3D	21/5/2021
	V4	49.8	15.3	15.2	-	26.3	45.0	0.0056	20 kg/m <sup>3</sup> 3D	21/5/2021
	V5	50.1	15.2	15.1	-	26.5	45.0	0.0056	20 kg/m <sup>3</sup> 3D	21/5/2021
	C1	30.0	-	15.0	-	12.5	-	0.0056	20 kg/m <sup>3</sup> 3D	21/5/2021
	C2	29.9	-	15.1	-	12.5	-	0.0056	20 kg/m <sup>3</sup> 3D	21/5/2021
	C3	30.0	-	15.1	-	12.6	-	0.0056	20 kg/m <sup>3</sup> 3D	21/5/2021
1690	V1	60.0	30.7	15.2	-	69.9	47.5	0.0056	40 kg/m <sup>3</sup> 3D	28/5/2021
	V2	59.9	30.5	15.2	-	68.5	47.5	0.0056	40 kg/m <sup>3</sup> 3D	28/5/2021
	V3	60.2	30.4	15.2	-	69.7	47.5	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	28/5/2021
	V4	50.0	15.2	15.2	-	26.2	45.0	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	28/5/2021
	V5	50.1	15.2	14.9	-	25.8	45.0	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	28/5/2021
	C1	29.9	-	15.0	-	12.1	-	0.0056	40 kg/m <sup>3</sup> 3D	28/5/2021
	C2	29.9	-	15.0	-	12.2	-	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	28/5/2021
	C3	29.8	-	14.9	-	12.1	-	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	28/5/2021
1709	V1	59.9	30.2	15.1	16.00	68.3	47.5	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	31/5/2021
	V2	59.9	30.1	15.1	16.20	69.1	47.5	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	31/5/2021
	V3	60.1	30.2	15.3	16.20	68.8	47.5	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	31/5/2021
	V4	49.9	15.0	15.1	-	26.0	45.0	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	31/5/2021
	V5	49.8	15.0	15.1	-	26.4	45.0	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	31/5/2021
	C1	29.9	-	15.0	-	12.1	-	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	31/5/2021
	C2	30.0	-	15.0	-	12.1	-	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	31/5/2021
	C3	29.9	-	14.9	-	12.2	-	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	31/5/2021
1787	V1	59.9	30.0	15.2	16.00	67.8	47.5	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	4/6/2021
	V2	60.0	30.2	15.3	16.40	68.7	47.5	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	4/6/2021
	V3	60.0	30.1	15.1	16.10	68.2	47.5	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	4/6/2021
	V4	50.1	15.3	15.2	-	26.7	45.0	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	4/6/2021
	V5	50.0	15.2	15.3	-	26.6	45.0	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	4/6/2021
	C1	29.7	-	15.0	-	12.2	-	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	4/6/2021
	C2	29.9	-	14.9	-	12.2	-	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	4/6/2021
	C3	30.1	-	15.0	-	12.2	-	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	4/6/2021
1857	V1	60.6	30.0	15.2	16.30	70.4	47.5	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	11/6/2021
	V2	60.1	30.3	15.2	16.10	70.1	47.5	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	11/6/2021
	V3	60.6	30.0	15.2	16.20	70.7	47.5	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	11/6/2021
	V4	50.0	15.2	15.0	-	26.1	45.0	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	11/6/2021

	V5	50.0	15.2	15.2	-	26.3	45.0	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	11/6/2021
	C1	29.9	-	15.0	-	12.3	-	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	11/6/2021
	C2	29.9	-	15.0	-	12.3	-	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	11/6/2021
	C3	29.7	-	14.9	-	12.1	-	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	11/6/2021
1858	V1	60.4	29.9	15.2	16.00	69.8	47.5	0.0113	-	14/6/2021
	V2	60.0	30.2	15.1	16.20	69.9	47.5	0.0113	-	14/6/2021
	V3	59.8	30.2	15.2	16.20	70.1	47.5	0.0113	-	14/6/2021
	V4	50.0	15.1	15.1	-	26.4	45.0	0.0113	-	14/6/2021
	V5	50.0	15.2	15.2	-	26.5	45.0	0.0113	-	14/6/2021
	C1	29.9	-	15.0	-	12.3	-	0.0113	-	14/6/2021
	C2	29.9	-	15.0	-	12.3	-	0.0113	-	14/6/2021
	C3	29.7	-	15.0	-	12.3	-	0.0113	-	14/6/2021
1979	V1	59.8	30.1	15.2	16.20	70.1	47.5	0.0113	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/6/2021
	V2	59.7	30.1	15.0	16.30	70.0	47.5	0.0113	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/6/2021
	V3	59.8	29.9	15.1	16.40	70.3	47.5	0.0113	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/6/2021
	V4	50.0	15.5	15.1	15.20	26.3	45.0	0.0113	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/6/2021
	V5	49.9	15.2	15.1	15.20	26.3	45.0	0.0113	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/6/2021
	C1	30.0	-	15.0	-	12.3	-	0.0113	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/6/2021
	C2	30.0	-	14.9	-	12.3	-	0.0113	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/6/2021
	C3	30.1	-	15.0	-	12.3	-	0.0113	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/6/2021
1996	V1	59.9	29.9	15.1	16.30	69.8	47.5	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	25/6/2021
	V2	59.8	30.1	15.0	16.10	69.4	47.5	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	25/6/2021
	V3	59.7	30.0	15.0	16.10	69.6	47.5	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	25/6/2021
	V4	50.2	15.1	15.1	15.40	25.9	45.0	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	25/6/2021
	V5	49.9	14.9	15.1	15.30	26.4	45.0	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	25/6/2021
	C1	30.1	-	15.0	-	12.1	-	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	25/6/2021
	C2	30.0	-	15.0	-	12.1	-	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	25/6/2021
	C3	29.8	-	15.1	-	12.3	-	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	25/6/2021
2102	V1	59.7	30.0	15.1	16.20	70.3	47.5	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	9/7/2021
	V2	59.8	30.2	15.1	16.10	70.6	47.5	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	9/7/2021
	V3	59.9	29.9	15.0	16.30	70.5	47.5	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	9/7/2021
	V4	50.1	15.3	15.1	15.30	26.7	45.0	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	9/7/2021
	V5	50.1	14.9	15.1	15.20	26.3	45.0	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	9/7/2021
	C1	29.6	-	15.0	-	12.3	-	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	9/7/2021
	C2	29.8	-	15.0	-	12.3	-	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	9/7/2021
	C3	30.0	-	15.0	-	12.3	-	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	9/7/2021
2212	V1	59.8	30.1	15.2	16.40	70.6	47.5	0.0113	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/7/2021
	V2	59.9	30.0	15.0	16.50	70.5	47.5	0.0113	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/7/2021
	V3	60.0	30.4	15.2	16.40	70.5	47.5	0.0113	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/7/2021
	V4	50.0	15.3	15.2	15.00	26.6	45.0	0.0113	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/7/2021
	V5	49.9	15.1	15.1	15.20	26.6	45.0	0.0113	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/7/2021
	C1	30.1	-	15.0	-	12.4	-	0.0113	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/7/2021

	C2	30.1	-	15.0	-	12.4	-	0.0113	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/7/2021
	C3	30.2	-	15.0	-	12.3	-	0.0113	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/7/2021
2230	V1	59.8	30.0	15.3	16.40	71.0	47.5	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 3D	16/7/2021
	V2	59.8	30.0	15.3	16.60	71.3	47.5	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 3D	16/7/2021
	V3	59.9	30.6	15.1	16.40	70.0	47.5	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 3D	16/7/2021
	V4	50.0	15.4	15.1	15.30	26.5	45.0	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 3D	16/7/2021
	V5	50.0	15.8	15.1	14.60	26.3	45.0	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 3D	16/7/2021
	C1	29.6	-	14.9	-	12.4	-	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 3D	16/7/2021
	C2	29.6	-	15.0	-	12.3	-	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 3D	16/7/2021
	C3	30.0	-	15.0	-	12.2	-	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 3D	16/7/2021
2246	V1	59.8	30.0	15.0	16.30	64.8	47.5	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	19/7/2021
	V2	59.8	30.0	15.3	16.20	64.7	47.5	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	19/7/2021
	V3	59.9	30.6	15.2	16.50	65.3	47.5	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	19/7/2021
	V4	49.9	15.5	15.1	15.30	26.7	45.0	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	19/7/2021
	V5	50.0	15.2	14.8	15.20	26.7	45.0	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	19/7/2021
	C1	30.0	-	15.2	-	12.2	-	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	19/7/2021
	C2	29.8	-	15.0	-	12.3	-	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	19/7/2021
	C3	30.0	-	15.0	-	12.3	-	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 4D	19/7/2021
2247	V1	59.7	30.1	15.1	16.10	64.8	47.5	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 3D	20/7/2021
	V2	60.0	30.0	15.2	16.00	64.7	47.5	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 3D	20/7/2021
	V3	60.1	30.3	15.1	15.90	64.6	47.5	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 3D	20/7/2021
	V4	50.0	15.0	15.0	15.10	26.2	45.0	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 3D	20/7/2021
	V5	49.9	15.3	15.1	15.10	26.6	45.0	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 3D	20/7/2021
	C1	29.9	-	15.0	-	12.3	-	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 3D	20/7/2021
	C2	29.6	-	15.0	-	12.3	-	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 3D	20/7/2021
	C3	29.6	-	15.0	-	12.1	-	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 3D	20/7/2021
2429	V1	60.1	30.2	15.3	16.3	65.8	47.5	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	4/8/2021
	V2	59.9	30	15.3	16.1	65.1	47.5	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	4/8/2021
	V3	59.9	29.9	15.2	16.3	64.8	47.5	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	4/8/2021
	V4	50	14.9	15	15.1	26.2	45.0	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	4/8/2021
	V5	50	15.1	15.1	15.4	26.9	45.0	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	4/8/2021
	C1	30	-	15	-	12.4	-	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	4/8/2021
	C2	29.9	-	14.9	-	12.3	-	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	4/8/2021
	C3	30	-	15	-	12.4	-	-	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	4/8/2021
2441	V1	59.8	30.5	15.3	16.1	68.9	47.5	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	10/8/2021
	V2	59.8	30	15	16.4	69.1	47.5	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	10/8/2021
	V3	60	29.8	15.2	16.1	69.1	47.5	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	10/8/2021
	V4	50	15.2	15	15.1	26.3	45.0	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	10/8/2021
	V5	50	15.2	15.2	15.4	26.6	45.0	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	10/8/2021
	V6	50.1	14.9	15.1	15	26.6	45.0	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	10/8/2021
	V7	50.1	15	15.1	15	26.2	45.0	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	10/8/2021
	C1	30	-	15	-	12.2	-	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	10/8/2021

	C2	30	-	15	-	12.3	-	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	10/8/2021
	C3	30	-	15	-	12.3	-	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	10/8/2021
2542	V1	59.9	30.1	15.2	16.2	68.5	47.5	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	V2	59.8	30.2	15.1	16.3	68.6	47.5	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	V3	60	30.3	16	15.2	68.3	47.5	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	V4	50	15	15	15.2	26.2	45.0	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	V5	50	15	15	15	26.1	45.0	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	V6	50.2	15.1	15.1	15	26.0	45.0	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	V7	50.2	15.1	15	15.1	26.1	45.0	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	C1	30	-	15	-	12.1	-	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	C2	30.2	-	15	-	12.3	-	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	C3	29.7	-	15.1	-	12.2	-	0.0056	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
2543	V1	59.8	30.3	15.2	16.2	69.5	47.5	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	V2	59.9	30.4	16	15.1	69.6	47.5	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	V3	59.9	30.3	15.2	16.1	69.1	47.5	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	V4	49.9	15.3	14.8	15.3	26.3	45.0	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	V5	50.2	15	15.1	15.1	26.0	45.0	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	V6	49.9	15	15	15.1	25.9	45.0	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	V7	50.1	15.1	14.8	15.3	25.8	45.0	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	C1	30	-	15	-	12.2	-	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	C2	29.8	-	15	-	12.1	-	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
	C3	29.6	-	15	-	12.2	-	0.0113	20 kg/ m <sup>3</sup> 5D	27/8/2021
2614	V1	60	30.2	16.2	15.2	70.3	47.5	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	3/9/2021
	V2	59.8	30.3	16.1	15.1	71.5	47.5	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	3/9/2021
	V3	60	30	16.4	15.1	65.2	47.5	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	3/9/2021
	V4	49.9	15	15.2	15.1	26.9	45.0	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	3/9/2021
	V5	50.1	15.1	15.3	14.9	26.2	45.0	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	3/9/2021
	V6	50	15	15.1	15.2	26.6	45.0	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	3/9/2021
	V7	50.1	15.1	15.2	15.3	26.5	45.0	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	3/9/2021
	C1	29.9	-	15.1	-	12.4	-	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	3/9/2021
	C2	30.2	-	14.9	-	12.4	-	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	3/9/2021
	C3	30.2	-	15	-	12.4	-	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	3/9/2021
2615	V1	60	30.3	15.3	16	64.8	47.5	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	3/9/2021
	V2	60.2	29.9	15.1	16	65.0	47.5	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	3/9/2021
	V3	60	30.5	16.3	15.1	70.5	47.5	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	3/9/2021
	V4	50.1	15.2	15.1	15	26.4	45.0	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	3/9/2021
	V5	50.1	15.3	15.1	14.9	26.8	45.0	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	3/9/2021
	V6	50.1	14.9	15.1	15.4	26.7	45.0	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	3/9/2021
	V7	49.9	15.1	15.3	15.4	26.5	45.0	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	3/9/2021
	C1	29.9	-	15	-	12.3	-	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	3/9/2021
	C2	30	-	14.9	-	12.2	-	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	3/9/2021
	C3	30.1	-	15	-	12.5	-	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 4D	3/9/2021

2655	V1	59.9	30.2	15.1	16.1	69.3	47.5	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	V2	59.9	30.2	15	16.2	69.5	47.5	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	V3	60	29.9	15.1	16.3	69.6	47.5	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	V4	50	15	15.2	15.3	26.7	45.0	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	V5	50.1	15	15.1	15.0	26.5	45.0	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	V6	50	15.2	15	15.1	26.7	45.0	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	V7	50.1	15	15.1	15.2	26.5	45.0	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	C1	30.2	-	15	-	12.3	-	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	C2	30	-	15	-	12.4	-	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	C3	30	-	15	-	12.3	-	0.0056	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
2656	V1	59.9	30	15.2	16.3	65.4	47.5	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	V2	60	30	15.2	16.1	65.1	47.5	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	V3	59.8	29.9	15	16.1	64.9	47.5	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	V4	50.1	15	15.1	15.2	26.6	45.0	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	V5	50	15.1	15.1	14.9	26.5	45.0	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	V6	50	15.2	15	15.2	26.4	45.0	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	V7	50.1	15	15	15.1	26.6	45.0	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	C1	30	-	15	-	12.4	-	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	C2	30.1	-	15	-	12.6	-	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
	C3	30	-	15	-	12.4	-	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	8/9/2021
2727	V1	60	30.8	15.2	16.2	71.3	47.5	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	14/9/2021
	V2	60	30.6	15.2	16.2	71.3	47.5	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	14/9/2021
	V3	59.8	30.5	15.2	16.4	71.1	47.5	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	14/9/2021
	V4	50	15.2	15.2	15.1	26.8	45.0	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	14/9/2021
	V5	49.9	15.1	15.1	15.2	26.9	45.0	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	14/9/2021
	V6	50.1	15	15.3	15.3	26.7	45.0	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	14/9/2021
	V7	50.2	14.9	15.3	15.4	26.9	45.0	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	14/9/2021
	C1	30	-	15.1	-	12.6	-	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	14/9/2021
	C2	30	-	15	-	12.6	-	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	14/9/2021
	C3	30	-	15	-	12.6	-	0.0113	40 kg/ m <sup>3</sup> 5D	14/9/2021
2728	V1	59.9	29.8	15.1	16.4	65.1	47.5	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/9/2021
	V2	59.9	30.1	15.2	16.3	65.3	47.5	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/9/2021
	V3	60	30.4	15.2	16.4	65.3	47.5	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/9/2021
	V4	50.1	15	15.1	15.6	26.4	45.0	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/9/2021
	V5	50.1	15.1	15	15.2	26.4	45.0	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/9/2021
	V6	49.9	15	15.3	15.2	26.1	45.0	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/9/2021
	V7	50	15.5	15.1	15.1	26.2	45.0	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/9/2021
	C1	30.1	-	15	-	12.5	-	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/9/2021
	C2	30	-	15	-	12.4	-	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/9/2021
	C3	30.2	-	15	-	12.6	-	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 3D	14/9/2021
2959	V1	60.1	30.2	15.2	16.5	69.5	47.5	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
	V2	60	30.3	15.1	16.1	65.6	47.5	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021



	V3	59.9	30.2	15.2	16.3	65.4	47.5	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
	V4	50.1	15.1	15.0	15.4	26.1	45.0	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
	V5	49.9	15.1	15.1	15.4	27.0	45.0	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
	V6	49.8	14.8	15.3	15.2	26.3	45.0	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
	V7	49.9	15	15	15.1	26.5	45.0	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
	C1	30.2	-	15	-	12.3	-	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
	C2	30.2	-	15	-	12.3	-	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
	C3	30	-	15.1	-	12.3	-	0.0056	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
2960	V1	59.9	30.3	15.3	16.1	68.8	47.5	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
	V2	59.9	30.7	15.2	16.2	65.3	47.5	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
	V3	59.9	30.4	15	16.4	65.3	47.5	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
	V4	50.1	15.1	15.1	15.5	26.7	45.0	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
	V5	49.9	15.1	15.1	15.2	26.5	45.0	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
	V6	50	15.1	15	15.3	26.4	45.0	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
	V7	50	15	15.1	15.3	26.6	45.0	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
	C1	29.6	-	15	-	12.4	-	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
	C2	30.2	-	15	-	12.5	-	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
	C3	30.2	-	15	-	12.4	-	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 5D	15/10/2021
3071	V1	59.9	30.7	15.2	16.2	64.6	47.5	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/10/2021
	V2	59.9	30.1	15.3	16.2	64.6	47.5	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/10/2021
	V3	59.8	29.8	15	16.5	65.2	47.5	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/10/2021
	V4	50.1	15.1	15.1	15.1	26.3	45.0	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/10/2021
	V5	10.1	15.2	15.1	15.3	26.6	45.0	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/10/2021
	V6	50	15.1	15	15	26.1	45.0	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/10/2021
	V7	49.9	15.1	15	15.1	26.3	45.0	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/10/2021
	C1	30.1	-	15	-	12.4	-	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/10/2021
	C2	30	-	15	-	12.3	-	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/10/2021
	C3	30	-	15	-	12.5	-	-	10 kg/ m <sup>3</sup> 4D	18/10/2021
3072	V1	60.1	30.2	15.2	16.4	66.2	47.5	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	18/10/2021
	V2	59.8	30.9	15.3	16.1	65.6	47.5	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	18/10/2021
	V3	60	30.9	15.2	16.3	65.4	47.5	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	18/10/2021
	V4	49.9	15.2	15.2	15.3	26.9	45.0	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	18/10/2021
	V5	49.9	15.1	15.1	15.3	27.0	45.0	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	18/10/2021
	V6	50.2	14.8	15.1	15.3	26.5	45.0	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	18/10/2021
	V7	50	15.2	15.1	15.2	26.8	45.0	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	18/10/2021
	C1	30.2	-	15	-	12.5	-	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	18/10/2021
	C2	30.2	-	15	-	12.4	-	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	18/10/2021
	C3	30.2	-	15	-	12.3	-	-	40 kg/ m <sup>3</sup> 3D	18/10/2021

En la **Tabla 4. 1** se observa que se emplearon tres distintas proporciones y tres diferentes cantidades de acero de refuerzo longitudinal para cada tipo de fibra. Es relevante destacar que, no se generó ninguna serie con fibras de tipo 5D, con una cuantía de acero longitudinal de 0.0113 y una  $V_f$  de fibras de 10 kg/m<sup>3</sup>. En contraste, se crearon dos series de fibras 3D, con una cuantía de acero longitudinal de 0.0113 y una  $V_f$  de fibras de 10 kg/m<sup>3</sup>.

Para facilitar la identificación, se ha asignado un código de colores en la tabla: las celdas grises corresponden a las fibras 3D, las amarillas a las 4D, las verdes a las 5D, y las anaranjadas se reservan para los especímenes que carecen de fibras, de igual modo, las vigas V6 y V7 en sus respectivas series.

Es importante subrayar que los cubos de concreto no fueron sometidos a pruebas en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, sino que fueron ensayados por CEMEX. Las fechas de fabricación, de entrega a la UNAM de los especímenes y las fechas de las pruebas, así como los resultados obtenidos por CEMEX para los cubos de concreto, que incluyen la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, se presentan en la **Tabla 4. 2**.

**Tabla 4. 2.** - Características de cada mezcla divididas por serie.

CTCC	Fecha de fabricación	Entrega IIUNAM	Fecha de ensaye	f'c kg/cm <sup>2</sup>	Ec kg/cm <sup>2</sup>
CTCC-21-1539	14/05/2021	08/11/2021	09/11/2021	638	342534
CTCC-21-1571	17/05/2021	08/11/2021	10/11/2021	635	318153
CTCC-21-1610	21/05/2021	08/11/2021	11/11/2021	655	312921
CTCC-21-1690	28/05/2021	08/11/2021	12/11/2021	575	296236
CTCC-21-1709	31/05/2021	08/11/2021	16/11/2021	628	297138
CTCC-21-1787	04/06/2021	08/11/2021	17/11/2021	619	305239
CTCC-21-1857	11/06/2021	12/11/2021	18/11/2021	652	294967
CTCC-21-1858	14/06/2021	12/11/2021	19/11/2021	640	314955
CTCC-21-1979	18/06/2021	12/11/2021	22/11/2021	637	319471

CTCC-21-1996	25/06/2021	12/11/2021	23/11/2021	642	308447
CTCC-21-2102	09/07/2021	12/11/2021	24/11/2021	615	296979
CTCC-21-2212	14/07/2021	12/11/2021	25/11/2021	641	317275
CTCC-21-2230	16/07/2021	19/11/2021	30/11/2021	644	322844
CTCC-21-2246	19/07/2021	19/11/2021	30/11/2021	620	308437
CTCC-21-2247	20/07/2021	19/11/2021	30/11/2021	612	284445
CTCC-21-2429	04/08/2021	19/11/2021	01/12/2021	612	306672
CTCC-21-2441	10/08/2021	19/11/2021	02/12/2021	653	302156
CTCC-21-2542	27/08/2021	19/11/2021	03/12/2021	557	288599
CTCC-21-2543	27/08/2021	06/12/2021	06/12/2021	550	283960
CTCC-21-2614	03/09/2021	06/12/2021	06/12/2021	594	293779
CTCC-21-2615	03/09/2021	06/12/2021	06/12/2021	552	272921
CTCC-21-2655	08/09/2021	06/12/2021	14/12/2021	624	275619
CTCC-21-2656	08/09/2021	09/12/2021	14/12/2021	611	304846
CTCC-21-2727	14/09/2021	09/12/2021	15/12/2021	616	299065
CTCC-21-2728	14/09/2021	09/12/2021	15/12/2021	515	303649
CTCC-21-2959	15/10/2021	09/12/2021	16/12/2021	510	285827
CTCC-21-2960	15/10/2021	09/12/2021	16/12/2021	537	274953
CTCC-21-3071	18/10/2021	09/12/2021	17/12/2021	539	306362
CTCC-21-3072	18/10/2021	09/12/2021	17/12/2021	496	294946

El diseño de los especímenes se hizo con una resistencia a la compresión de 400 kg/cm<sup>2</sup>. Sin embargo, como se evidencia en la tabla, este valor fue excedido. Es esencial tener en cuenta este parámetro para realizar cálculos posteriores deseados después de las pruebas.

### ***Materiales***

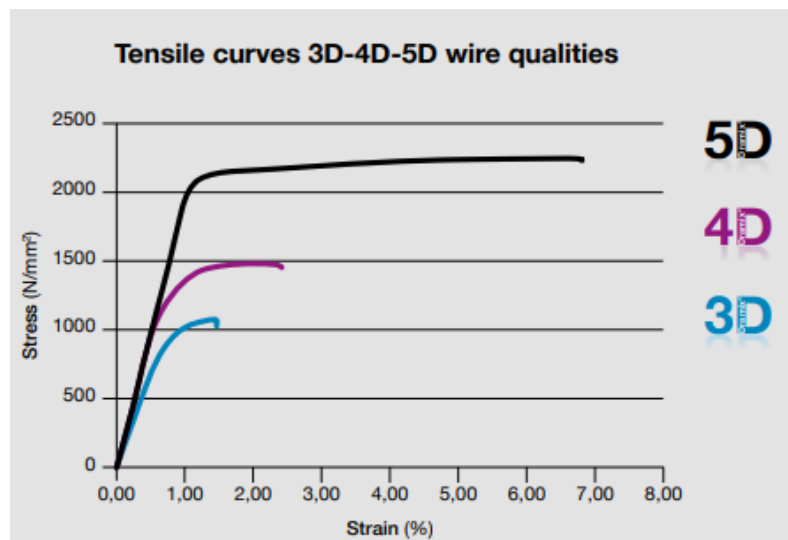
Se emplearon fibras suministradas por la empresa Bekaert, de la marca Dramix, que se clasificaron en tres tipos distintos: 3D (con 1 gancho), 4D (con 1.5 ganchos) y 5D (con 2 ganchos), todas con una relación de aspecto de 65 y una longitud de 60 mm. De acuerdo con la información proporcionada por el fabricante, NV Bekaert SA (2012), las fibras 5D exhiben un comportamiento superior, lo que las hace aptas para cargas más pesadas y espacios más extensos,

siendo adecuadas para condiciones de alta exigencia. En teoría, los ganchos de las fibras 5D no son deformables, lo que garantiza un anclaje óptimo.

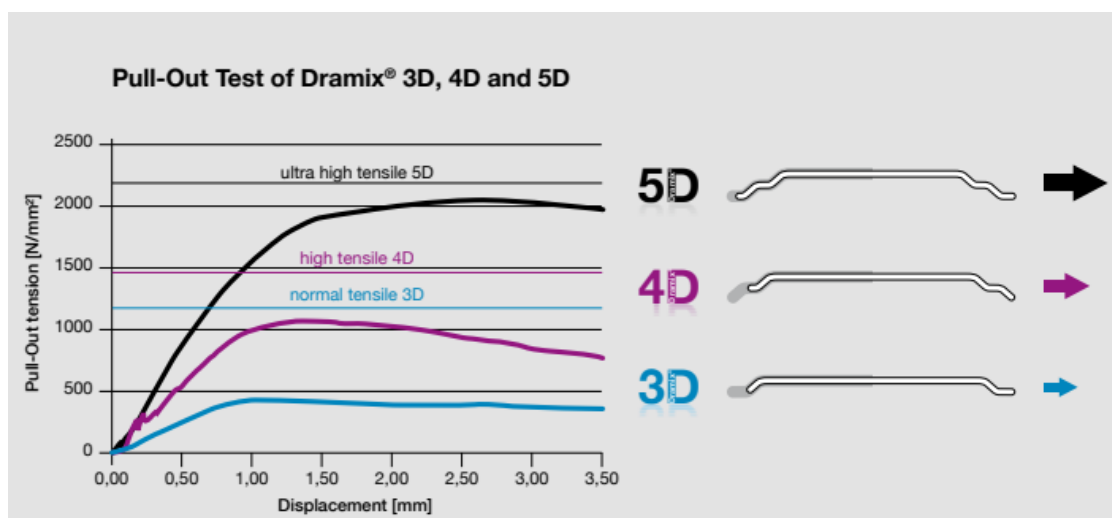
Por otro lado, las fibras 4D han sido diseñadas para ofrecer resistencia a la tensión y anclaje específicos para controlar grietas de entre 0.1 y 0.3 milímetros, lo que contribuye a la durabilidad y estanqueidad de las estructuras. En contraste, las fibras 3D, ampliamente conocidas y utilizadas en la industria, se destacan por su capacidad para optimizar el tiempo y reducir los costos en comparación con los refuerzos tradicionales, gracias a su proceso de instalación más sencillo y la reducción del tiempo empleado en la colocación de refuerzos convencionales.

Los datos del fabricante indican que la capacidad de carga a tensión de las fibras 5D es de 100 kilogramos. En una comparativa, se aprecia que las fibras 5D ofrecen un anclaje considerablemente superior a las 4D, mientras que las 4D superan ligeramente a las 3D en este aspecto. Lo mismo ocurre con la resistencia a la tensión y la mejora en la resistencia del concreto con fibras, donde las fibras 5D superan significativamente a las 4D, y las 4D sólo tienen una ventaja ligeramente superior en relación con las 3D. Esta información se presenta gráficamente en la **Figura 4. 1**, que se ha tomado de un folleto del fabricante y visualiza claramente estas diferencias.

En cuanto a la ductilidad, las fibras 3D y 4D exhiben un comportamiento similar, mientras que las fibras 5D destacan notablemente en este aspecto. Este último punto se ilustra en la **Figura 4. 1**, donde se aprecia cómo las fibras 5D se deforman cerca del 7% antes de romperse, en contraste con las fibras 4D y 3D, que alcanzan alrededor de 2% de deformación unitaria antes de su ruptura.



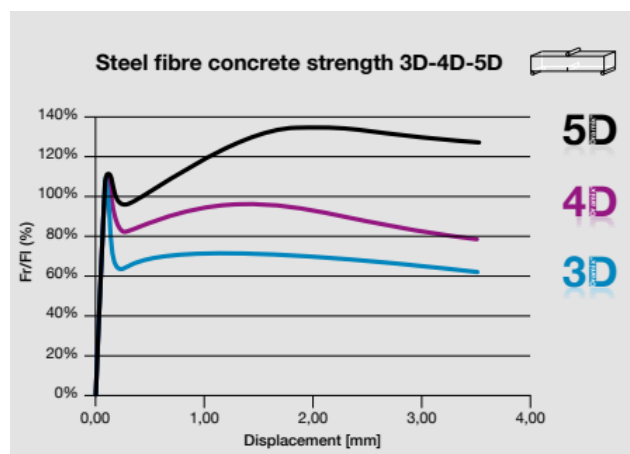
**Figura 4. 1.** - Gráfica esfuerzo de tensión deformación unitaria (NV Bekaert SA, 2012).



**Figura 4. 2.** – Esfuerzo de extracción-desplazamiento (NV Bekaert SA, 2012).

En la **Figura 4. 2** se puede observar el resultado de las pruebas de esfuerzo de extracción-desplazamiento realizadas con cada tipo de fibra, destacando notoriamente que la fibra 5D muestra una resistencia significativamente mayor para el mismo desplazamiento, seguida por las fibras 4D, y finalmente, las fibras 3D. Asimismo, se aprecia que las fibras 3D y 4D experimentan una deformación gradual durante el proceso de extracción, mientras que las fibras 5D se

mantienen firmemente ancladas, incluso cuando se estiran, lo que les confiere la capacidad de generar un concreto con mayor ductilidad (NV Bekaert SA, 2012).



**Figura 4. 3.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento en vigas con fibras 3D, 4D y 5D (NV Bekaert SA, 2012).

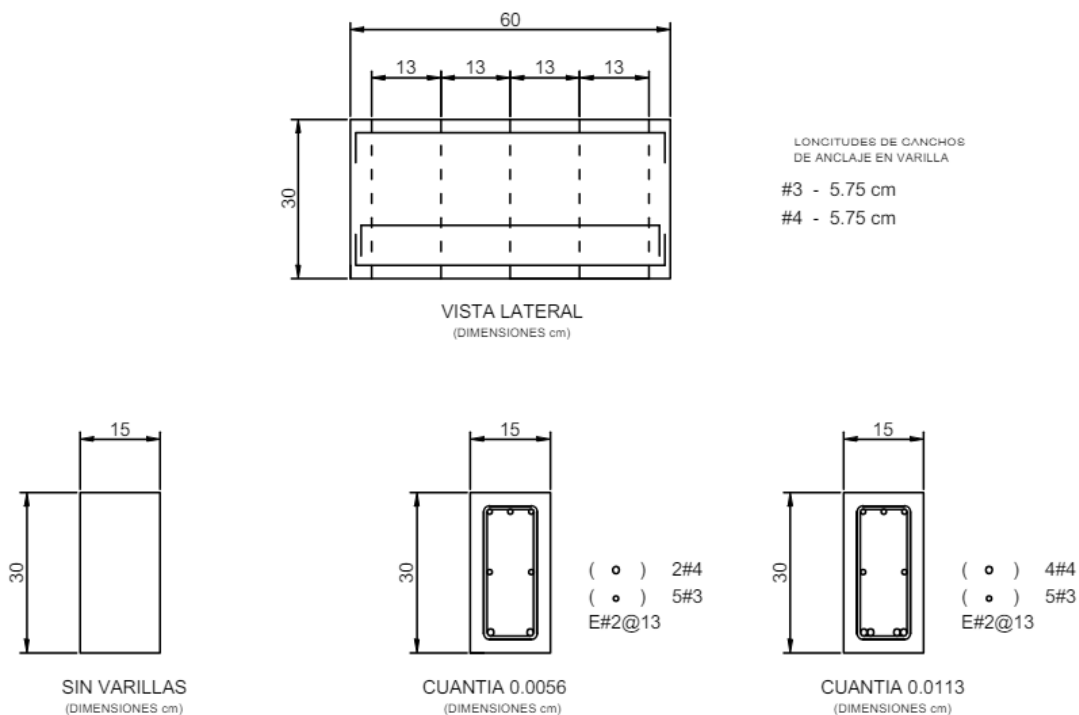
En la **Figura 4. 3**, se presenta el comportamiento del concreto reforzado utilizando cada uno de los tipos de fibras ofrecidas por la empresa Bekaert, la resistencia a la tensión de las series 5D, 4D y 3D ofrece diferentes niveles de rendimiento para diversas aplicaciones. La serie 5D combina una resistencia a la tracción extrema con una capacidad de alargamiento muy específica, dando un mayor comportamiento dúctil que las fibras 4D y 3D. Esto significa que estas fibras tienen la capacidad de estirarse antes de romperse, lo que las hace ideales para aplicaciones que requieren flexibilidad y resistencia en el concreto reforzado.

En lo que respecta al tipo de cemento empleado, como se mencionó previamente, los especímenes fueron elaborados por la empresa cementera CEMEX, por lo tanto, el cemento utilizado corresponde a su propia marca.

Es importante destacar que el uso de un cemento específico puede influir significativamente en las propiedades del concreto reforzado y, en última instancia, en los resultados de las pruebas.

## Refuerzo

Las vigas contaron con diferentes tipos de refuerzo, donde algunas no se reforzaron ni con acero de refuerzo, ni con fibras, otras solo con fibras y otras con el refuerzo longitudinal y de fibras. Las vigas contaban con estribos del número tres a cada 13 cm y con un anclaje de 12 cm.



**Figura 4. 4.** – Plano de vigas para prueba de cortante.

## Descripción General de Ensayes

Los ensayos se hicieron en una maquina Universal SATEC, la cual tiene las siguientes especificaciones:

**Tabla 4. 3.** - Especificaciones de la maquina Universal SATEC (brindada por el Ing. Víctor H. Torres Romero).

### 3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

En la Tabla 1 se presentan las principales características técnicas de la SATEC.

**Tabla 1. Características de la Máquina Universal SATEC (SATEC, 1990)**

<b>Modelo</b>	500WHVL
<b>Número de serial</b>	500WHVL-1006
<b>Capacidad</b>	500,000 lbs (250 t)
<b>Velocidad de prueba</b>	0-3 pulgadas/minuto máxima
<b>Rangos</b>	Alto 500,000 lbs (250 t)
	Alto medio 250,000 lbs (125 t)
	Medio bajo 100,000 lbs (50 t)
	Bajo 20,000 lbs (10 t)
<b>Apertura de tensión</b>	60" max, 3" min 12" de carrera
<b>Apertura compresión</b>	72" max, 0" min
<b>Velocidad de prueba</b>	0 – 3 pulgadas/min
<b>Peso estimado</b>	22,000 lbs
<b>Requerimientos de energía</b>	230 Volts
	3 Fases
	60 Hertz
<b>Fusible principal</b>	10A
<b>Peso estimado</b>	22,000 lbs (11 t)

Para las vigas V1 a V3 de cada una de las series, el comité del proyecto de investigación, integrado por académicos del Instituto de Ingeniería de la UNAM y técnicos de la empresa cementera CEMEX, propuso la metodología llevada a cabo para la prueba de dichos especímenes.



Como se aprecia en la **Figura 4. 5**, se colocan dos apoyos cercanos a las orillas inferiores, en el caso de la figura se encuentran a 50 cm de distancia entre sí dichos apoyos, aunque en la inmensa mayoría se colocaron a 47.5 cm para promover la falla a cortante en el elemento, mientras que la carga se aplica en el centro de la viga. Al ser una viga peraltada se promueve la falla por cortante al existir un gran peralte para resistir la flexión. El arreglo pensado se puede apreciar con gran detalle en la **Figura 4. 5**.



*Figura 4. 5.* - Espécimen 1539-1 con arreglo para falla a cortante.

Para las mediciones se usaron transductores, donde sus puntas se apoyaron en placas de acero inoxidable adheridas a la base inferior de los especímenes con silicón, como se muestra en la **Figura 4. 6**.



*Figura 4. 6.* - Espécimen 1539-3 con arreglo para falla a cortante instrumentado con transductores.

Los incrementos de carga utilizados en las pruebas para todas las vigas (1-5, o 1-7 en ciertos casos) fueron de 2 mm/min. Las pruebas se detenían cuando la parte inferior de los especímenes estaba a punto de tocar alguna de las bases de los apoyos, con el fin de evitar lecturas incorrectas de la fuerza que la probeta estaba resistiendo.

En el caso de las vigas V4 a V5 (V7 en algunas series) de cada conjunto, se diseñó un arreglo específico para que las vigas fallaran debido a la flexión. Estas vigas presentaban un menor peralte, se aplicaba la carga en dos puntos en lugar de uno, y la distancia entre los apoyos se mantuvo en 45 cm en todos los especímenes, tal como se muestra en la **Figura 4. 7.**



**Figura 4. 7.** - Especimen 2246-5 con arreglo para falla a flexión.

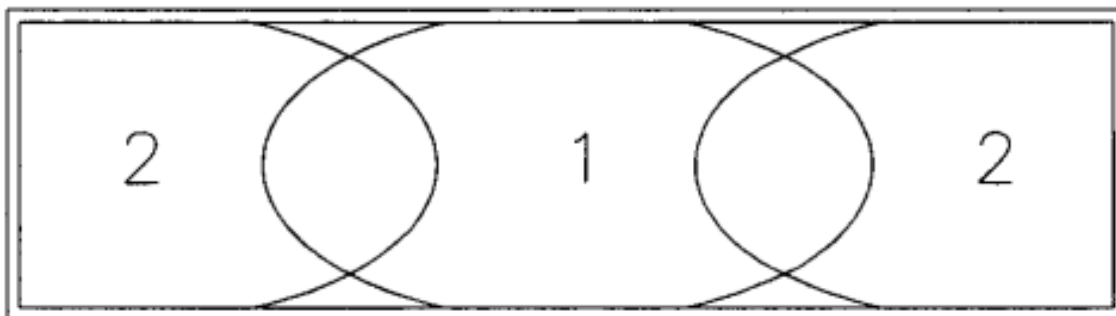
Se siguió el estándar ASTM C-1609/C1609M-12, un método establecido para evaluar el comportamiento de vigas reforzadas con fibras. Este estándar establece ciertas pautas importantes. En primer lugar, especifica que el tamaño máximo del agregado y la sección transversal de los especímenes deben cumplir con las normativas ASTM C31/C31M o ASTM C192/C192M para especímenes moldeados, que es precisamente nuestro caso. Además, se requiere que los especímenes sean al menos 50 mm más grandes que tres veces el peralte, que en nuestro caso es de 150 mm, y en ningún caso deben ser menores de 350 mm. Las tolerancias permitidas en las medidas de la sección transversal son de  $\pm 2\%$ . También se establece que la altura y el ancho de las vigas deben ser al menos tres veces la longitud de las fibras, aunque esta indicación puede obviarse cuando se utilizan fibras de 50 a 75 mm de largo, considerando simplemente una medida de 150 mm, como es el caso aquí.

La diferencia clave entre las pruebas realizadas en las vigas V4 y V5, en comparación con las V6 y V7 (presentes en todas las series a partir de los especímenes 2441), es que estas últimas se llevaron a cabo de acuerdo con la norma europea EN-14651-2005-A1. Como se

muestra en la **Figura 4. 8**, las vigas conformadas bajo esta norma presentan una ranura en el centro de su longitud.

La norma europea establece que las vigas deben tener una sección transversal de 150 x 150 mm y una longitud mínima de 550 mm, mientras que nuestros especímenes tuvieron una longitud de 500 mm. Además, la prueba estándar no se diseñó pensando en vigas de concreto reforzado con fibras de acero con longitudes mayores que 60 mm, ni con agregados mayores que 32 mm.

El proceso de colado y llenado de los moldes con concreto se ilustra en la **Figura 4. 8**, donde se recomienda que la porción 1 sea el doble de la porción 2. El molde debe llenarse hasta aproximadamente 90% de su capacidad y luego completarse y nivelarse mientras se compacta mediante vibración externa. Se desmolda después de 24 a 48 h. Los especímenes deben almacenarse a una temperatura mínima de 20°C y con una humedad relativa igual o superior a 95%, hasta que se preparen para las pruebas.



**Figura 4. 8.** - Procedimiento de vaciado especificado por norma europea EN-14651-2005-A1, (**RILEM**, 2002, pág. 579)



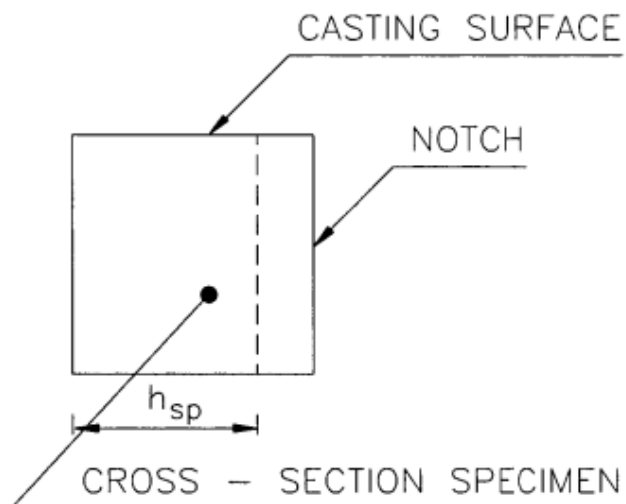
**Figura 4. 9.** - Detalle del montaje de equipo de medición en viga con ranura especificada por norma europea EN-14651-2005-A1.

Conforme a la normativa aplicable, se requiere que los especímenes sean ranurados mediante un proceso de aserrado húmedo. Cada viga debe ser dispuesta a  $90^\circ$  con respecto a su eje longitudinal, y luego se procede a efectuar un corte a través del ancho del espécimen en su punto medio, como se muestra en la **Figura 4. 10**. Es fundamental que, tras el aserrado de la muesca, se mantengan las mismas condiciones de curado que se aplicaron al espécimen antes del proceso, durante al menos 3 d. La anchura de la muesca no debe exceder los 5 mm, y la altura de la viga sin muesca ( $h_{sp}$ ) debe mantenerse dentro de los parámetros de  $125 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ .

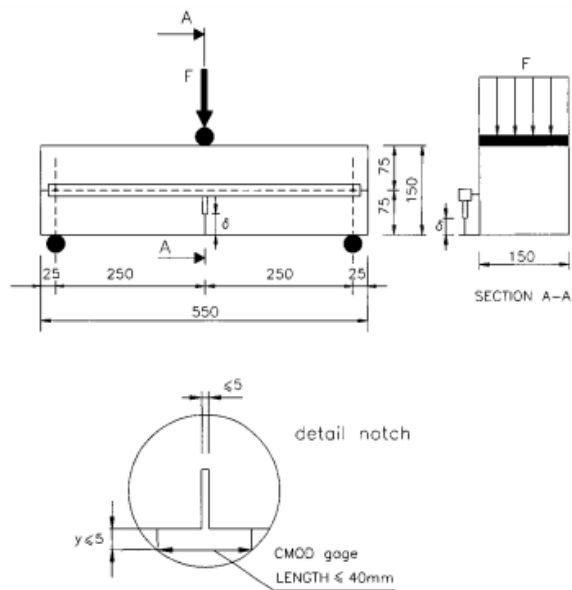
Asimismo, es crucial que el dispositivo empleado para medir las dimensiones de los especímenes cuente con una precisión de 0.1 mm, es decir, que pueda realizar mediciones con una exactitud de hasta 1 mm.

Es importante mencionar que, en el caso de las pruebas realizadas, muchos de estos requisitos no pudieron ser verificados, ya que la construcción de los especímenes fue

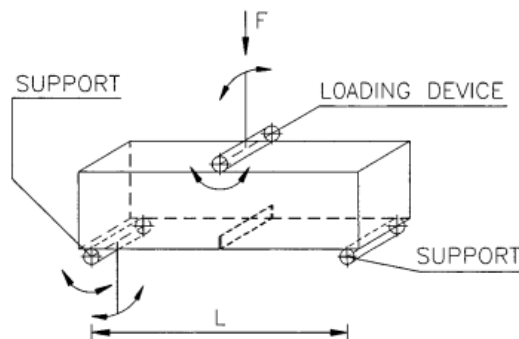
responsabilidad de la empresa CEMEX, y el equipo involucrado en las pruebas no tuvo injerencia en dicho proceso.



**Figura 4. 10.** - Posición de corte de la muesca (notch en inglés) en el espécimen especificada por norma europea EN-14651-2005-A1.



**Figura 4. 11.** - Arreglo de monitoreo de desplazamiento especificado por norma europea EN-14651-2005-A1.



**Figura 4. 12.** - Posición de la carga y soportes del espécimen especificados por norma europea EN-14651-2005-A1.

La normativa también establece un parámetro conocido como CMOD (Crack Mouth Opening Displacement, por sus siglas en inglés), que se refiere al desplazamiento de la apertura de la boca de la fisura. Este parámetro puede medirse directamente en el laboratorio, aunque existe una relación de equivalencia entre los valores de CMOD y la deflexión, la cual puede aproximarse mediante la siguiente expresión:

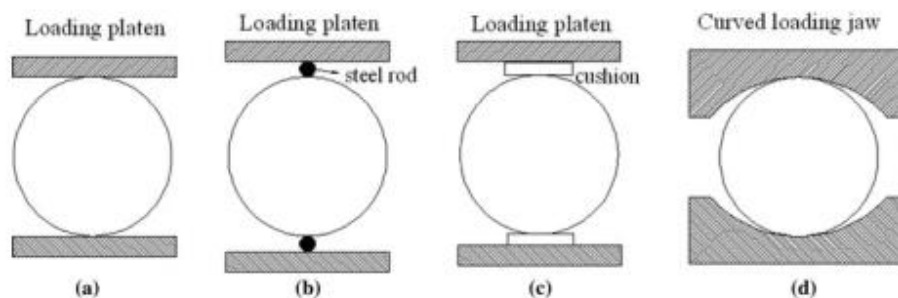
$$\delta = 0.85 \text{ CMOD} + 0.04$$

Donde

$\delta$  es la deflexión, en milímetros;

*CMOD* es el valor CMOD, en milímetros.

Los cilindros fueron sometidos al método de la prueba brasileña, un enfoque indirecto empleado para determinar la resistencia a la tensión de materiales frágiles, como es el caso del concreto. En esta evaluación, un cilindro es sometido a compresión hasta que finalmente falla. Diversos arreglos pueden ser utilizados para llevar a cabo este procedimiento, tal como se ilustra en la **Figura 4. 13** . Sin embargo, en este conjunto de pruebas, solamente se empleó el arreglo (c).



**Figura 4. 13.** - Configuraciones de carga típicas para la prueba brasileña a) placas de carga planas, b) platos de carga planos con 2 barras de acero, c) placas de carga planas con almohadillas, y d) mordazas de carga curvas. (Miarka, Hevia Villanueva, & Seitl, 2017).

Miarka, Hevia y Seitl (2017) explican que, para obtener la resistencia a la tensión en los cilindros, se someten a una fuerza de compresión aplicada en una franja delgada que se extiende a lo largo de toda la longitud del elemento. Esta fuerza de compresión genera una fuerza de tensión resultante que provoca la ruptura del espécimen. Además, los autores recomiendan utilizar la fórmula para calcular la fuerza de tensión  $\sigma_t$  [MPa] basada en el ensayo brasileño (ASTM 2008; ISRM 1978), la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt} = 0.636 \frac{P}{Dt}$$

donde  $P$  es la carga de rotura en N,  $D$  es el diámetro del cilindro (probeta) en milímetros, y  $t$  es el espesor de la medida en el centro en milímetros.

En el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se llevó a cabo el montaje de la siguiente manera: primero, se situó el cilindro sobre una tablilla de madera que fungió como almohadilla. El eje central de esta tablilla se alineó cuidadosamente con el centro del cilindro. Luego, se añadió un par de barras de neopreno al cilindro para evitar cualquier desplazamiento durante la instrumentación y la continuación del montaje.



A continuación, se fijó una barra de acero de sección rectangular con la parte superior de la tablilla unida, y se incorporaron un par de barras de acero para servir de soporte a los transductores. Posteriormente, se aplicó una precarga para permitir la retirada de los neoprenos y la instalación de los transductores. El montaje de los cilindros se configuró según se muestra en la **Figura 4. 14.**



**Figura 4. 14.** - Arreglo de cilindros para prueba brasileña.

### **Bitácora de Ensayes**

Para asegurar un registro organizado de los datos obtenidos durante las pruebas, se llevó a cabo la creación de una bitácora de ensayos. En esta bitácora se registraron todos los datos geométricos de cada espécimen, incluyendo su peso, la carga máxima que soportó, la fecha en la que se realizó la prueba de cada espécimen, así como la distancia entre los apoyos. Además, se incluyeron notas adicionales que se consideraron pertinentes para futuros análisis.

**Tabla 4. 4.** - Bitácora de ensayos.

SERIE	ESP	LARGO	ALTO	ANCHO 1	ANCHO 2	Cuantía de acero	Fibra tipo	PESO kg	Pmax (t)	Dist entre apoyos	Fecha de ensaye	NOTAS
1539	V1	60.0	30.2	15.5	-	0.0056	-	68.3	34.49	50	9/11/2021	
	V2	59.9	30.3	15.3	-	0.0056	-	68.2	41.70	46.5	9/11/2021	Se inició con este espécimen, la prueba se detuvo en 27.83 t+- por límite. Se repite la prueba para poner límite mayor. Los apoyos penetraban el concreto. Se cambian los apoyos para mejorar el comportamiento
	V3	59.8	30.3	15.3	-	0.0056	-	68.3	36.99	47.5	9/11/2021	
	V4	50.1	15.0	15.4	-	0.0056	-	26.3	4.74	45	9/11/2021	
	V5	50.0	15.0	15.1	-	0.0056	-	26.0	5.07	45	9/11/2021	
	C1	30.0	-	15.0	-	0.0056	-	12.7	17.36	-	10/11/2021	
	C2	29.8	-	15.0	-	0.0056	-	12.8	25.53	-	10/11/2021	
	C3	30.0	-	15.0	-	0.0056	-	12.8	32.37	-	10/11/2021	
1571	V1	60.0	30.2	15.5	-	0.0056	10 kg/m3 3D	68.8	43.03	47.5	10/11/2021	
	V2	60.1	30.2	15.3	-	0.0056	10 kg/m3 3D	68.0	37.50	47.5	10/11/2021	
	V3	59.8	30.1	15.3	-	0.0056	10 kg/m3 3D	69.0	38.79	47.5	10/11/2021	
	V4	50.2	15.0	15.2	-	0.0056	10 kg/m3 3D	26.0	5.18	45	10/11/2021	
	V5	49.8	15.3	15.0	-	0.0056	10 kg/m3 3D	26.4	5.20	45	10/11/2021	
	C1	29.7	-	15.0	-	0.0056	10 kg/m3 3D	12.6	35.08	-	11/11/2021	es necesario multiplicar los datos de desplazamiento de los transductores 110294 por la constante 5.0092 y los del transductor 531879 por 4.9932
	C2	29.8	-	14.9	-	0.0056	10 kg/m3 3D	12.6	36.83	-	11/11/2021	es necesario multiplicar los datos de desplazamiento de los transductores 110294 por la constante 5.0092 y los del transductor 531879 por

												4.9932
	C3	30.0	-	15.0	-	0.0056	10 kg/m3 3D	12.7	33.83	-	11/11/2021	es necesario multiplicar los datos de desplazamiento de los transductores 110294 por la constante 5.0092 y los del transductor 531879 por 4.9932
1610	V1	60.3	30.2	15.3	-	0.0056	20 kg/m3 3D	69.5	40.10	47.5	11/11/2021	es necesario multiplicar los datos de desplazamiento de los transductores 110294 por la constante 5.0092 y los del transductor 531879 por 4.9932
	V2	60.2	30.2	15.4	-	0.0056	20 kg/m3 3D	69.2	32.37	47.5	11/11/2021	es necesario multiplicar los datos de desplazamiento de los transductores 110294 por la constante 5.0092 y los del transductor 531879 por 4.9932
	V3	60.3	30.5	15.2	-	0.0056	20 kg/m3 3D	68.6	35.54	47.5	11/11/2021	es necesario multiplicar los datos de desplazamiento de los transductores 110294 por la constante 5.0092 y los del transductor 531879 por 4.9932
	V4	49.8	15.3	15.2	-	0.0056	20 kg/m3 3D	26.3	4.91	45	11/11/2021	es necesario multiplicar los datos de desplazamiento de los transductores 110294 por la constante 5.0092 y los del

												transductor 531879 por 4.9932
	V5	50.1	15.2	15.1	-	0.0056	20 kg/m3 3D	26.5		45	11/11/2021	es necesario multiplicar los datos de desplazamiento de los transductores 110294 por la constante 5.0092 y los del transductor 531879 por 4.9932
	C1	30.0	-	15.0	-	0.0113	20 kg/m3 3D	12.5	35.20	-	11/11/2021	es necesario multiplicar los datos de desplazamiento de los transductores 110294 por la constante 5.0092 y los del transductor 531879 por 4.9932
	C2	29.9	-	15.1	-	0.0113	20 kg/m3 3D	12.5	34.59	-	11/11/2021	es necesario multiplicar los datos de desplazamiento de los transductores 110294 por la constante 5.0092 y los del transductor 531879 por 4.9932
	C3	30.0	-	15.1	-	0.0113	20 kg/m3 3D	12.6	39.30	-	11/11/2021	es necesario multiplicar los datos de desplazamiento de los transductores 110294 por la constante 5.0092 y los del transductor 531879 por 4.9932
1690	V1	60.0	30.7	15.2	-	0.0113	40 kg/m3 3D	69.9	42.39	47.5	12/11/2021	
	V2	59.9	30.5	15.2	-	0.0113	40 kg/m3 3D	68.5	41.57	47.5	12/11/2021	
	V3	60.2	30.4	15.2	-	0.0113	40 kg/m3 3D	69.7	37.67	47.5	12/11/2021	
	V4	50.0	15.2	15.2	-	0.0113	40 kg/m3 3D	26.2	3.75	45	12/11/2021	
	V5	50.1	15.2	14.9	-	0.0113	40 kg/m3 3D	25.8	3.97	45	12/11/2021	

	C1	29.9	-	15.0	-	0.0113	40 kg/m3 3D	12.1	42.70	-	12/11/2021	
	C2	29.9	-	15.0	-	0.0113	40 kg/m3 3D	12.2	40.18	-	12/11/2021	No se retiran los neoprenos
	C3	29.8	-	14.9	-	0.0113	40 kg/m3 3D	12.1	35.98	-	12/11/2021	
1709	V1	59.9	30.2	15.1	16.00	0.0113	10 kg/m3 4D	68.3	39.99	47.5	16/11/2021	falla por desconchamiento del concreto del apoyo
	V2	59.9	30.1	15.1	16.20	0.0113	10 kg/m3 4D	69.1	35.96	47.5	16/11/2021	
	V3	60.1	30.2	15.3	16.20	0.0113	10 kg/m3 4D	68.8	38.72	47.5	16/11/2021	
	V4	49.9	15.0	15.1	-	0.0113	10 kg/m3 4D	26.0	2.40	45	17/11/2021	
	V5	49.8	15.0	15.1	-	0.0113	10 kg/m3 4D	26.4	2.47	45	17/11/2021	
	C1	29.9	-	15.0	-	0.0113	10 kg/m3 4D	12.1	30.77	-	17/11/2021	Se despega una placa, solo hay medidas de un transductor
	C2	30.0	-	15.0	-	0.0113	10 kg/m3 4D	12.1	32.16	-	17/11/2021	
	C3	29.9	-	14.9	-	0.0000	10 kg/m3 4D	12.2	24.69	-	17/11/2021	
1787	V1	59.9	30.0	15.2	16.00	0.0000	20 kg/m3 4D	67.8	35.41	47.5	16/11/2021	
	V2	60.0	30.2	15.3	16.40	0.0000	20 kg/m3 4D	68.7	43.62	47.5	16/11/2021	
	V3	60.0	30.1	15.1	16.10	0.0000	20 kg/m3 4D	68.2	34.74	47.5	16/11/2021	
	V4	50.1	15.3	15.2	-	0.0000	20 kg/m3 4D	26.7	3.97	45	17/11/2021	
	V5	50.0	15.2	15.3	-	0.0000	20 kg/m3 4D	26.6	4.48	45	17/11/2021	
	C1	29.7	-	15.0	-	0.0000	20 kg/m3 4D	12.1	32.42	-	17/11/2021	
	C2	29.9	-	14.9	-	0.0000	20 kg/m3 4D	12.2	36.50	-	17/11/2021	
	C3	30.1	-	15.0	-	0.0000	20 kg/m3 4D	12.2	31.97	-	17/11/2021	
1857	V1	60.6	30.0	15.2	16.30	0.0056	40 kg/m3 4D	70.4	53.48	47.5	18/11/2021	
	V2	60.1	30.3	15.2	16.10	0.0056	40 kg/m3 4D	70.1	48.57	47.5	18/11/2021	
	V3	60.6	30.0	15.2	16.20	0.0056	40 kg/m3 4D	70.7	56.28	47.5	18/11/2021	
	V4	50.0	15.2	15.0	-	0.0056	40 kg/m3 4D	26.1	4.29	45	18/11/2021	
	V5	50.0	15.2	15.2	-	0.0056	40 kg/m3 4D	26.3	3.15	45	18/11/2021	
	C1	29.9	-	15.0	-	0.0056	40 kg/m3 4D	12.3	37.39	-	6/12/2021	Se despega una placa, solo hay medidas de un transductor
	C2	29.9	-	15.0	-	0.0113	40 kg/m3 4D	12.3	43.34	-	6/12/2021	Se despega una placa, solo hay medidas de un transductor
	C3	29.7	-	14.9	-	0.0113	40 kg/m3 4D	12.1	47.92	-	6/12/2021	
1858	V1	60.4	29.9	15.2	16.00	0.0113	-	69.8	44.50	47.5	18/11/2021	
	V2	60.0	30.2	15.1	16.20	0.0113	-	69.9	42.62	47.5	18/11/2021	falla por desconchamiento del concreto del apoyo
	V3	59.8	30.2	15.2	16.20	0.0113	-	70.1	31.93	47.5	18/11/2021	
	V4	50.0	15.1	15.1	-	0.0113	-	26.4	3.49	45	18/11/2021	

	V5	50.0	15.2	15.2	-	0.0000	-	26.5	4.34	45	18/11/2021	Se despega una placa, solo hay medidas de un transductor
	C1	29.9	-	15.0	-	0.0000	-	12.3	20.06	-	6/12/2021	
	C2	29.9	-	15.0	-	0.0000	-	12.3	20.26	-	6/12/2021	
	C3	29.7	-	15.0	-	0.0056	-	12.3	26.37	-	6/12/2021	
1979	V1	59.8	30.1	15.2	16.20	0.0056	10 kg/m3 4D	70.1	41.47	47.5	22/11/2021	
	V2	59.7	30.1	15.0	16.30	0.0056	10 kg/m3 4D	70.0	42.75	47.5	22/11/2021	
	V3	59.8	29.9	15.1	16.40	0.0000	10 kg/m3 4D	70.3	49.22	47.5	22/11/2021	
	V4	50.0	15.5	15.1	15.20	0.0000	10 kg/m3 4D	26.3	2.81	45	23/11/2021	
	V5	49.9	15.2	15.1	15.20	0.0000	10 kg/m3 4D	26.3	4.88	45	23/11/2021	
	C1	30.0	-	15.0	-	0.0113	10 kg/m3 4D	12.3	30.84	-	7/12/2021	
	C2	30.0	-	14.9	-	0.0113	10 kg/m3 4D	12.3	34.53	-	7/12/2021	
	C3	30.1	-	15.0	-	0.0113	10 kg/m3 4D	12.3	24.28	-	7/12/2021	
1996	V1	59.9	29.9	15.1	16.30	0.0000	20 kg/m3 4D	69.8	42.30	47.5	22/11/2021	
	V2	59.8	30.1	15.0	16.10	0.0000	20 kg/m3 4D	69.4	37.56	47.5	22/11/2021	
	V3	59.7	30.0	15.0	16.10	0.0000	20 kg/m3 4D	69.6	41.08	47.5	22/11/2021	
	V4	50.2	15.1	15.1	15.40	0.0056	20 kg/m3 4D	25.9	3.27	45	23/11/2021	
	V5	49.9	14.9	15.1	15.30	0.0056	20 kg/m3 4D	26.4	4.17	45	23/11/2021	
	C1	30.1	-	15.0	-	0.0056	20 kg/m3 4D	12.1	39.26	-	7/12/2021	
	C2	30.0	-	15.0	-	0.0000	20 kg/m3 4D	12.1	32.73	-	7/12/2021	
	C3	29.8	-	15.1	-	0.0000	20 kg/m3 4D	12.3	34.29	-	7/12/2021	
2102	V1	59.7	30.0	15.1	16.20	0.0000	40 kg/m3 4D	70.3	58.83	47.5	22/11/2021	
	V2	59.8	30.2	15.1	16.10	0.0000	40 kg/m3 4D	70.6	52.20	47.5	22/11/2021	
	V3	59.9	29.9	15.0	16.30	0.0000	40 kg/m3 4D	70.5	52.55	47.5	22/11/2021	
	V4	50.1	15.3	15.1	15.30	0.0000	40 kg/m3 4D	26.7	8.99	45	23/11/2021	
	V5	50.1	14.9	15.1	15.20	0.0000	40 kg/m3 4D	26.3	7.45	45	23/11/2021	
	C1	29.6	-	15.0	-	0.0000	40 kg/m3 4D	12.3	47.03	-	7/12/2021	
	C2	29.8	-	15.0	-	0.0000	40 kg/m3 4D	12.3	44.98	-	7/12/2021	
	C3	30.0	-	15.0	-	0.0056	40 kg/m3 4D	12.3	44.55	-	7/12/2021	
2212	V1	59.8	30.1	15.2	16.40	0.0056	10 kg/m3 3D	70.6	44.31	47.5	24/11/2021	
	V2	59.9	30.0	15.0	16.50	0.0056	10 kg/m3 3D	70.5	46.58	47.5	24/11/2021	
	V3	60.0	30.4	15.2	16.40	0.0056	10 kg/m3 3D	70.5	49.80	47.5	24/11/2021	
	V4	50.0	15.3	15.2	15.00	0.0056	10 kg/m3 3D	26.6	3.10	45	23/11/2021	
	V5	49.9	15.1	15.1	15.20	0.0056	10 kg/m3 3D	26.6	3.10	45	23/11/2021	
	C1	30.1	-	15.0	-	0.0056	10 kg/m3 3D	12.4	34.94	-	7/12/2021	
	C2	30.1	-	15.0	-	0.0056	10 kg/m3 3D	12.4	28.22	-	7/12/2021	
	C3	30.2	-	15.0	-	0.0056	10 kg/m3 3D	12.3	23.73	-	7/12/2021	
2230	V1	59.8	30.0	15.3	16.40	0.0056	20 kg/m3 3D	71.0	41.05	47.5	24/11/2021	
	V2	59.8	30.0	15.3	16.60	0.0056	20 kg/m3 3D	71.3	45.83	47.5	24/11/2021	
	V3	59.9	30.6	15.1	16.40	0.0056	20 kg/m3 3D	70.0	31.81	47.4	24/11/2021	

	V4	50.0	15.4	15.1	15.30	0.0056	20 kg/m3 3D	26.5	3.75	45	23/11/2021	
	V5	50.0	15.8	15.1	14.60	0.0056	20 kg/m3 3D	26.3	3.56	45	23/11/2021	
	C1	29.6	-	14.9	-	0.0056	20 kg/m3 3D	12.4	36.24	-	8/12/2021	
	C2	29.6	-	15.0	-	0.0056	20 kg/m3 3D	12.3	36.19	-	8/12/2021	
	C3	30.0	-	15.0	-	0.0056	20 kg/m3 3D	12.2	26.31	-	8/12/2021	
2246	V1	59.8	30.0	15.0	16.30	0.0056	20 kg/m3 4D	64.8	10.66	47.5	24/11/2021	
	V2	59.8	30.0	15.3	16.20	0.0056	20 kg/m3 4D	64.7	10.47	47.5	24/11/2021	
	V3	59.9	30.6	15.2	16.50	0.0056	20 kg/m3 4D	65.3	11.72	47.5	24/11/2021	
	V4	49.9	15.5	15.1	15.30	0.0056	20 kg/m3 4D	26.7	3.36	45	25/11/2021	
	V5	50.0	15.2	14.8	15.20	0.0113	20 kg/m3 4D	26.7	3.87	45	25/11/2021	
	C1	30.0	-	15.2	-	0.0113	20 kg/m3 4D	12.2	40.21	-	8/12/2021	
	C2	29.8	-	15.0	-	0.0113	20 kg/m3 4D	12.3	27.54	-	8/12/2021	
	C3	30.0	-	15.0	-	0.0113	20 kg/m3 4D	12.3	36.61	-	8/12/2021	
2247	V1	59.7	30.1	15.1	16.10	0.0113	20 kg/m3 3D	64.8	11.60	47.5	25/11/2021	
	V2	60.0	30.0	15.2	16.00	0.0113	20 kg/m3 3D	64.7	11.25	47.5	25/11/2021	
	V3	60.1	30.3	15.1	15.90	0.0113	20 kg/m3 3D	64.6		47.5	25/11/2021	
	V4	50.0	15.0	15.0	15.10	0.0113	20 kg/m3 3D	26.2	2.99	45	25/11/2021	
	V5	49.9	15.3	15.1	15.10	0.0113	20 kg/m3 3D	26.6	3.40	45	25/11/2021	
	C1	29.9	-	15.0	-	0.0113	20 kg/m3 3D	12.3	33.77	-	8/12/2021	
	C2	29.6	-	15.0	-	0.0113	20 kg/m3 3D	12.3	32.14	-	8/12/2021	
	C3	29.6	-	15.0	-	0.0113	20 kg/m3 3D	12.1	30.61	-	8/12/2021	
2429	V1	60.1	30.2	15.3	16.3	0.0113	20 kg/m3 5D	65.8	13.0127	47.5	29/11/2021	
	V2	59.9	30	15.3	16.1	0.0113	20 kg/m3 5D	65.1	17.617	47.5	29/11/2021	
	V3	59.9	29.9	15.2	16.3	0.0113	20 kg/m3 5D	64.8	15.4433	47.5	29/11/2021	
	V4	50	14.9	15	15.1	0.0113	20 kg/m3 5D	26.2	4.4743	45	30/11/2021	
	V5	50	15.1	15.1	15.4	0.0113	20 kg/m3 5D	26.9	5.0244	45	30/11/2021	
	C1	30	-	15	-	0.0113	20 kg/m3 5D	12.4	41.784	-	8/12/2021	
	C2	29.9	-	14.9	-	0.0000	20 kg/m3 5D	12.3	31.3415	-	8/12/2021	
	C3	30	-	15	-	0.0000	20 kg/m3 5D	12.4	34.3789	-	8/12/2021	
2441	V1	59.8	30.5	15.3	16.1	0.0000	10 kg/m3 3D	68.9	37.1931	47.5	29/11/2021	
	V2	59.8	30	15	16.4	0.0000	10 kg/m3 3D	69.1	39.9856	47.5	29/11/2021	
	V3	60	29.8	15.2	16.1	0.0000	10 kg/m3 3D	69.1	40.543	47.5	29/11/2021	
	V4	50	15.2	15	15.1	0.0000	10 kg/m3 3D	26.3	4.6718	45	30/11/2021	
	V5	50	15.2	15.2	15.4	0.0000	10 kg/m3 3D	26.6	4.8694	45	30/11/2021	
	V6	50.1	14.9	15.1	15	0.0000	10 kg/m3 3D	26.6	1.6453	45	3/12/2021	
	V7	50.1	15	15.1	15	0.0000	10 kg/m3 3D	26.2	1.5358	45	3/12/2021	
	C1	30	-	15	-	0.0056	10 kg/m3 3D	12.2	29.982	-	8/12/2021	
	C2	30	-	15	-	0.0056	10 kg/m3 3D	12.3	33.0481	-	8/12/2021	
	C3	30	-	15	-	0.0056	10 kg/m3 3D	12.3	34.2273	-	8/12/2021	Se despega una placa, solo hay medidas de un transductor
2542	V1	59.9	30.1	15.2	16.2	0.0056	20 kg/m3 5D	68.5	43.1828	47.5	29/11/2021	

	V2	59.8	30.2	15.1	16.3	0.0056	20 kg/m3 5D	68.6	36.1994	47.5	29/11/2021	
	V3	60	30.3	16	15.2	0.0056	20 kg/m3 5D	68.3	34.001	47.5	29/11/2021	
	V4	50	15	15	15.2	0.0113	20 kg/m3 5D	26.2	6.2985	45	30/11/2021	
	V5	50	15	15	15	0.0113	20 kg/m3 5D	26.1	4.3054	45	30/11/2021	
	V6	50.2	15.1	15.1	15	0.0113	20 kg/m3 5D	26	2.1089	45	3/12/2021	
	V7	50.2	15.1	15	15.1	0.0113	20 kg/m3 5D	26.1	2.6946	45	3/12/2021	
	C1	30	-	15	-	0.0113	20 kg/m3 5D	12.1	32.2174	-	9/12/2021	
	C2	30.2	-	15	-	0.0113	20 kg/m3 5D	2.3	36.1429	-	9/12/2021	Se despega una placa, solo hay medidas de un transductor
	C3	29.7	-	15.1	-	0.0000	20 kg/m3 5D	12.2	34.6661		9/12/2021	
2543	V1	59.8	30.3	15.2	16.2	0.0000	20 kg/m3 5D	69.5	49.8146	47.5	1/12/2021	
	V2	59.9	30.4	16	15.1	0.0000	20 kg/m3 5D	69.6	42.63	47.5	1/12/2021	
	V3	59.9	30.3	15.2	16.1	0.0056	20 kg/m3 5D	69.1	49.0363	47.5	1/12/2021	
	V4	49.9	15.3	14.8	15.3	0.0056	20 kg/m3 5D	26.3	4.9962	45	3/12/2021	
	V5	50.2	15	15.1	15.1	0.0056	20 kg/m3 5D	26	4.2862	45	3/12/2021	
	V6	49.9	15	15	15.1	0.0000	20 kg/m3 5D	25.9	1.415	45	13/12/2021	Se repitió el ensaye por perdida de carga de la maquina
	V7	50.1	15.1	14.8	15.3	0.0000	20 kg/m3 5D	25.8	3.2526	45	13/12/2021	Se despega una placa, solo hay medidas de un transductor
	C1	30	-	15	-	0.0000	20 kg/m3 5D	12.2	33.2755	-	9/12/2021	Se despega una placa, solo hay medidas de un transductor
	C2	29.8	-	15	-	0.0113	20 kg/m3 5D	12.1	36.2149	-	9/12/2021	
C3	29.6	-	15	-	0.0113	20 kg/m3 5D	12.2	35.2296	-	9/12/2021	Se despega una placa, solo hay medidas de un transductor	
2614	V1	60	30.2	16.2	15.2	0.0113	40 kg/m3 3D	70.3	51.583	47.5	1/12/2021	
	V2	59.8	30.3	16.1	15.1	0.0000	40 kg/m3 3D	71.5	59.6624	47.5	1/12/2021	
	V3	60	30	16.4	15.1	0.0000	40 kg/m3 3D	65.2	54.026	47.5	1/12/2021	
	V4	49.9	15	15.2	15.1	0.0000	40 kg/m3 3D	26.9	4.688	45	3/12/2021	
	V5	50.1	15.1	15.3	14.9	0.0056	40 kg/m3 3D	26.2	5.3432	45	3/12/2021	
	V6	50	15	15.1	15.2	0.0056	40 kg/m3 3D	26.6	1.703	45	13/12/2021	
	V7	50.1	15.1	15.2	15.3	0.0056	40 kg/m3 3D	26.5	2.2849	45	13/12/2021	
	C1	29.9	-	15.1	-	0.0000	40 kg/m3 3D	12.4	38.417	-	9/12/2021	
	C2	30.2	-	14.9	-	0.0000	40 kg/m3 3D	12.4	37.9847	-	9/12/2021	
C3	30.2	-	15	-	0.0000	40 kg/m3 3D	12.4	32.4225	-	9/12/2021		
2615	V1	60	30.3	15.3	16	0.0000	40 kg/m3 4D	64.8	13.8118	47.5	1/12/2021	
	V2	60.2	29.9	15.1	16	0.0000	40 kg/m3 4D	65	14.2562	47.5	1/12/2021	
	V3	60	30.5	16.3	15.1	0.0000	40 kg/m3 4D	70.5	12.1589	47.5	1/12/2021	



	V4	50.1	15.2	15.1	15	0.0000	40 kg/m3 4D	26.4	4.8733	45	3/12/2021	
	V5	50.1	15.3	15.1	14.9	0.0000	40 kg/m3 4D	26.8	5.725	45	3/12/2021	
	V6	50.1	14.9	15.1	15.4	0.0000	40 kg/m3 4D	26.7	2.7896	45	13/12/2021	
	V7	49.9	15.1	15.3	15.4	0.0056	40 kg/m3 4D	26.5	2.1031	45	13/12/2021	
	C1	29.9	-	15	-	0.0056	40 kg/m3 4D	12.3	43.6301	-	10/12/2021	
	C2	30	-	14.9	-	0.0056	40 kg/m3 4D	12.2	38.6821	-	10/12/2021	
	C3	30.1	-	15	-	0.0056	40 kg/m3 4D	12.5	40.134	-	10/12/2021	
2655	V1	59.9	30.2	15.1	16.1	0.0056	40 kg/m3 5D	69.3	40.467	47.5	14/12/2021	
	V2	59.9	30.2	15	16.2	0.0056	40 kg/m3 5D	69.5	41.055	47.5	14/12/2021	
	V3	60	29.9	15.1	16.3	0.0056	40 kg/m3 5D	69.6	40.749	47.5	14/12/2021	
	V4	50	15	15.2	15.3	0.0056	40 kg/m3 5D	26.7	4.6768	45	11/1/2022	
	V5	50.1	15	15.1	15.0	0.0056	40 kg/m3 5D	26.5	5.9079	45	11/1/2022	
	V6	50	15.2	15	15.1	0.0056	40 kg/m3 5D	26.7	2.7217	45	13/12/2021	
	V7	50.1	15	15.1	15.2	0.0056	40 kg/m3 5D	26.5	3.6868	45	13/12/2021	
	C1	30.2	-	15	-	0.0056	40 kg/m3 5D	12.3	31.9853	-	10/12/2021	
	C2	30	-	15	-	0.0056	40 kg/m3 5D	12.4	36.532	-	10/12/2021	
	C3	30	-	15	-	0.0056	40 kg/m3 5D	12.3	38.875	-	10/12/2021	
2656	V1	59.9	30	15.2	16.3	0.0056	40 kg/m3 5D	65.4	13.491	47.5	14/12/2021	
	V2	60	30	15.2	16.1	0.0056	40 kg/m3 5D	65.1	15.042	47.5	14/12/2021	
	V3	59.8	29.9	15	16.1	0.0056	40 kg/m3 5D	64.9	18.701	47.5	15/12/2021	
	V4	50.1	15	15.1	15.2	0.0056	40 kg/m3 5D	26.6	6.9582	45	11/1/2022	
	V5	50	15.1	15.1	14.9	0.0056	40 kg/m3 5D	26.5	7.4869	45	11/1/2022	
	V6	50	15.2	15	15.2	0.0056	40 kg/m3 5D	26.4	4.242	45	17/12/2021	
	V7	50.1	15	15	15.1	0.0056	40 kg/m3 5D	26.6	4.383	45	17/12/2021	
	C1	30	-	15	-	0.0113	40 kg/m3 5D	12.4	25.5241	-	10/12/2021	
	C2	30.1	-	15	-	0.0113	40 kg/m3 5D	12.6	37.5719	-	10/12/2021	
	C3	30	-	15	-	0.0113	40 kg/m3 5D	12.4	38.5749	-	10/12/2021	
2727	V1	60	30.8	15.2	16.2	0.0113	40 kg/m3 5D	71.3	51.281	47.5	15/12/2021	
	V2	60	30.6	15.2	16.2	0.0113	40 kg/m3 5D	71.3	54.107	47.5	15/12/2021	
	V3	59.8	30.5	15.2	16.4	0.0113	40 kg/m3 5D	71.1	51.797	47.5	15/12/2021	
	V4	50	15.2	15.2	15.1	0.0113	40 kg/m3 5D	26.8	5.2831	45	11/1/2022	
	V5	49.9	15.1	15.1	15.2	0.0113	40 kg/m3 5D	26.9	7.5475	45	11/1/2022	
	V6	50.1	15	15.3	15.3	0.0113	40 kg/m3 5D	26.7	2.716	45	17/12/2021	
	V7	50.2	14.9	15.3	15.4	0.0113	40 kg/m3 5D	26.9	3.066	45	17/12/2021	
	C1	30	-	15.1	-	0.0113	40 kg/m3 5D	12.6	40.7449	-	10/12/2021	
	C2	30	-	15	-	0.0113	40 kg/m3 5D	12.6	36.4808	-	10/12/2021	
	C3	30	-	15	-	0.0113	40 kg/m3 5D	12.6	42.642	-	10/12/2021	
2728	V1	59.9	29.8	15.1	16.4	0.0113	10 kg/m3 3D	65.1	8.274	47.5	15/12/2021	
	V2	59.9	30.1	15.2	16.3	0.0113	10 kg/m3 3D	65.3	9.05	47.5	15/12/2021	
	V3	60	30.4	15.2	16.4	0.0113	10 kg/m3 3D	65.3	9.356	47.5	15/12/2021	
	V4	50.1	15	15.1	15.6	0.0113	10 kg/m3 3D	26.4	5.1910	45	11/1/2022	

	V5	50.1	15.1	15	15.2	0.0113	10 kg/m3 3D	26.4	5.0762	45	11/1/2022	
	V6	49.9	15	15.3	15.2	0.0000	10 kg/m3 3D	26.1	1.635	45	17/12/2021	
	V7	50	15.5	15.1	15.1	0.0000	10 kg/m3 3D	26.2	1.654	45	17/12/2021	
	C1	30.1	-	15	-	0.0000	10 kg/m3 3D	12.5	34.7381	-	10/12/2021	
	C2	30	-	15	-	0.0000	10 kg/m3 3D	12.4	30.6804	-	10/12/2021	
	C3	30.2	-	15	-	0.0000	10 kg/m3 3D	12.6	25.6105	-	10/12/2021	
2959	V1	60.1	30.2	15.2	16.5	0.0000	10 kg/m3 5D	69.5	33.257	47.5	15/12/2021	falla por desconchamiento del concreto
	V2	60	30.3	15.1	16.1	0.0000	10 kg/m3 5D	65.6	8.509	47.5	15/12/2021	sin refuerzo, es viga 2960-V1
	V3	59.9	30.2	15.2	16.3	0.0000	10 kg/m3 5D	65.4	36.481	47.5	15/12/2021	
	V4	50.1	15.1	15.0	15.4	0.0000	10 kg/m3 5D	26.1	4.1854	45	11/1/2022	
	V5	49.9	15.1	15.1	15.4	0.0056	10 kg/m3 5D	27	4.3287	45	11/1/2022	
	V6	49.8	14.8	15.3	15.2	0.0056	10 kg/m3 5D	26.3	1.326	45	17/12/2021	
	V7	49.9	15	15	15.1	0.0056	10 kg/m3 5D	26.5	1.299	45	17/12/2021	
	C1	30.2	-	15	-	0.0056	10 kg/m3 5D	12.3	33.2355	-	13/12/2021	
	C2	30.2	-	15	-	0.0056	10 kg/m3 5D	12.3	35.5008	-	13/12/2021	
C3	30	-	15.1	-	0.0056	10 kg/m3 5D	12.3	39.5088	-	13/12/2021		
2960	V1	59.9	30.3	15.3	16.1	0.0113	10 kg/m3 5D	68.8	40.221	47.5	15/12/2021	con refuerzo, es viga 2959-V2
	V2	59.9	30.7	15.2	16.2	0.0113	10 kg/m3 5D	65.3	8.406	47.5	15/12/2021	
	V3	59.9	30.4	15	16.4	0.0113	10 kg/m3 5D	65.3	9.392	47.5	16/12/2021	
	V4	50.1	15.1	15.1	15.5	0.0113	10 kg/m3 5D	26.7	3.7295	45	11/1/2022	
	V5	49.9	15.1	15.1	15.2	0.0113	10 kg/m3 5D	26.5	3.7950	45	11/1/2022	
	V6	50	15.1	15	15.3	0.0113	10 kg/m3 5D	26.4	1.424	45	17/12/2021	
	V7	50	15	15.1	15.3	0.0000	10 kg/m3 5D	26.6	1.734	45	17/12/2021	
	C1	29.6	-	15	-	0.0000	10 kg/m3 5D	12.4	32.7929	-	13/12/2021	
	C2	30.2	-	15	-	0.0000	10 kg/m3 5D	12.5	31.248	-	13/12/2021	
C3	30.2	-	15	-	0.0056	10 kg/m3 5D	12.4	26.874	-	13/12/2021		
3071	V1	59.9	30.7	15.2	16.2	0.0056	10 kg/m3 4D	64.6	7.673	47.5	16/12/2021	
	V2	59.9	30.1	15.3	16.2	0.0056	10 kg/m3 4D	64.6	7.982	47.5	16/12/2021	
	V3	59.8	29.8	15	16.5	0.0000	10 kg/m3 4D	65.2	10.705	47.5	16/12/2021	
	V4	50.1	15.1	15.1	15.1	0.0000	10 kg/m3 4D	26.3	2.8358	45	11/1/2022	
	V5	10.1	15.2	15.1	15.3	0.0000	10 kg/m3 4D	26.6	3.9580	45	11/1/2022	
	V6	50	15.1	15	15	0.0113	10 kg/m3 4D	26.1	1.7071	45	10/1/2022	
	V7	49.9	15.1	15	15.1	0.0113	10 kg/m3 4D	26.3	1.5966	45	10/1/2022	
	C1	30.1	-	15	-	0.0113	10 kg/m3 4D	12.4	31.1124	-	12/1/2022	
	C2	30	-	15	-	0.0000	10 kg/m3 4D	12.3	30.9711	-	12/1/2022	
C3	30	-	15	-	0.0000	10 kg/m3 4D	12.5	31.5782	-	12/1/2022		
3072	V1	60.1	30.2	15.2	16.4	0.0000	40 kg/m3 3D	66.2	9.852	47.5	16/12/2021	
	V2	59.8	30.9	15.3	16.1	0.0056	40 kg/m3 3D	656	13.48	47.5	16/12/2021	
	V3	60	30.9	15.2	16.3	0.0056	40 kg/m3 3D	65.4	12.69	47.5	16/12/2021	

V4	49.9	15.2	15.2	15.3	0.0056	40 kg/m3 3D	26.9	4.2482	45	11/12/2022
V5	49.9	15.1	15.1	15.3	0.0000	40 kg/m3 3D	27	4.4634	45	11/12/2022
V6	50.2	14.8	15.1	15.3	0.0000	40 kg/m3 3D	26.5	2.1176	45	10/1/2022
V7	50	15.2	15.1	15.2	0.0000	40 kg/m3 3D	26.8	1.8249	45	10/1/2022
C1	30.2	-	15	-	0.0000	40 kg/m3 3D	12.5	35.9022	-	12/1/2022
C2	30.2	-	15	-	0.0000	40 kg/m3 3D	12.4	41.3150	-	12/1/2022
C3	30.2	-	15	-	0.0000	40 kg/m3 3D	12.3	40.3569	-	12/1/2022

En la bitácora de ensayos, se puede observar que existen casos en los que una de las placas utilizadas como soporte para uno de los dos transductores que se emplearon en las mediciones se desprendió. Esto resultó en que sólo se obtuviera una medida para ese transductor a partir de cierto punto en la prueba. Estas son las anotaciones más frecuentes en la bitácora.

Además, se identificó un error en la etiqueta de las vigas V2-2959 y V1-2960, ya que estaban invertidas. En otras palabras, la viga V1-2960, que no tenía refuerzo, estaba etiquetada como "V2-2959", mientras que la verdadera viga V2-2959 estaba marcada como "V1-2960".

También se registraron notas en las que se documentaron situaciones imprevistas que llevaron a la interrupción de una prueba, así como ocasiones en las que se olvidó retirar los neoprenos durante las pruebas de los cilindros.

### **Resultados de las pruebas**

Para el procesamiento de datos, fue necesario transferir los archivos de texto generados por la máquina SATEC a una hoja de cálculo de Excel. Los datos recolectados en el laboratorio incluyeron la fuerza en kN y las mediciones de desplazamiento realizadas por los dos transductores (T.3236 y T.3237) en mm. Se calculó el promedio de los desplazamientos de los transductores para poder compararlos con el esfuerzo. El esfuerzo se determinó dividiendo la fuerza proporcionada por la máquina universal entre el área de la sección transversal del espécimen.

Se desarrolló un programa en macros de Excel para el manejo de la información, ya que la máquina SATEC registra los datos en intervalos de tiempo, y se buscaba una distribución más uniforme de los datos en función del desplazamiento. En primer lugar, se obtuvo el esfuerzo máximo medido por la máquina SATEC utilizando la función "MAX(F7:FXXX)", considerando que los datos comienzan en la fila 7 y se extienden hasta la fila correspondiente al punto final establecido en el laboratorio. Luego, se calcularon el 20% y 40% de dicho esfuerzo. Estos últimos valores se utilizaron para corregir los datos obtenidos de la máquina, ya que los datos no comenzaban en el origen de la gráfica.

```

Sub Botón1_Haga_clic_en()
Range("J3").Select
i = ActiveCell.Row
j = ActiveCell.Column

xmin = Cells(i + 4, j - 1)
xmax = Cells(i + 5, j - 1)
dx = Cells(i + 6, j - 1)

m = Cells(i, j - 1)
b = 0

o = i

For k = xmin To xmax Step dx

    Do While Cells(o + 4, j - 3) <= xmax
        If Cells(o + 4, j - 3) > k Then
            x1 = Val(Cells(i - 1, j + 1))
            x2 = Cells(o + 4, j - 3)
            y1 = Val(Cells(i - 1, j))
            y2 = Cells(o + 4, j - 4)
            m = (y2 - y1) / (x2 - x1)
            b = y1 - m * x1
            xi = k
            yi = m * xi + b
            Cells(i, j + 1) = xi
            Cells(i, j) = yi

            'Cells(i, j + 1) = k
            'Cells(i, j) = Cells(o + 4, j - 4)
        Exit Do
    End If
    o = o + 1
Loop
i = i + 1
Next k
End Sub

```

```

Sub Macro1()

v1 = Cells(3, 5)
v2 = Cells(4, 5)

bandera = True

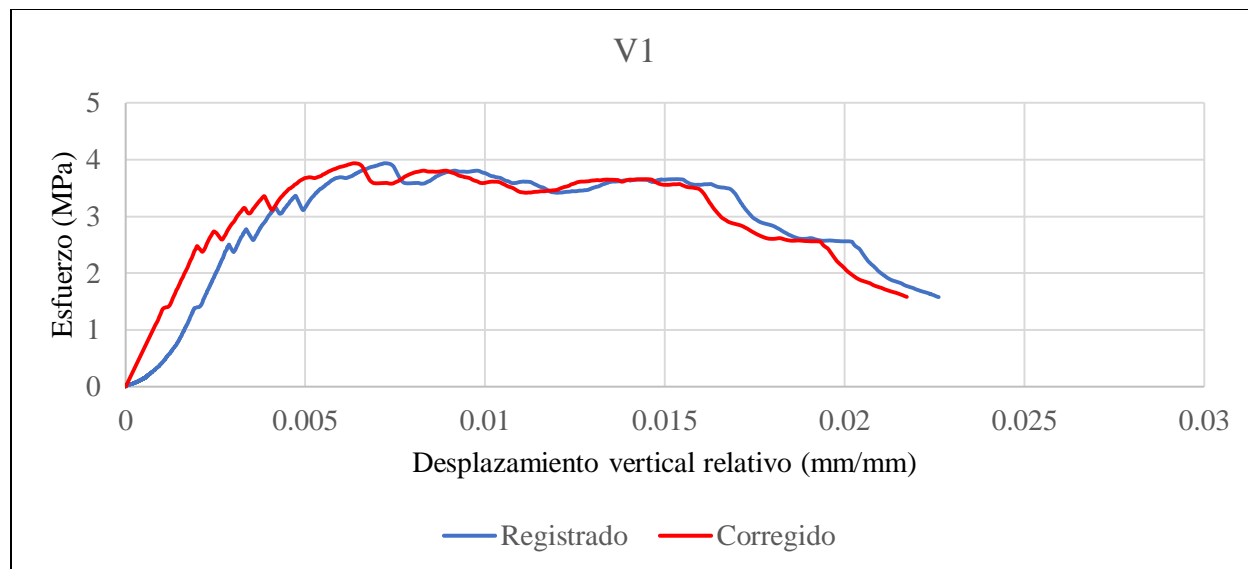
i = 7
Do While Cells(i, 6) <> ""
    If Cells(i, 6) >= v1 And bandera = True Then
        Cells(3, 6) = Cells(i, 5)
        bandera = False
    End If
    If Cells(i, 6) >= v2 Then
        Cells(4, 6) = Cells(i, 5)
        Exit Do
    End If
    i = i + 1
Loop

End Sub

```

**Figura 4. 15.** - Código de programación de macros utilizadas en el análisis de datos hechas por el Dr. Héctor Guerrero.

Se inicia el proceso presionando el "Botón 3" para calcular la pendiente y la ordenada al origen, y luego se procede a activar el "Botón 1" para calcular los esfuerzos correspondientes a cada uno de los intervalos de desplazamientos predefinidos y deseados. Para cada espécimen, se generaron tres gráficos. En la primer curva se representa el promedio de los desplazamientos medidos por los transductores divididos entre el peralte efectivo del elemento en función del esfuerzo calculado. El segundo gráfico muestra el desplazamiento de corrección de los puntos de la primera gráfica, ajustando la ordenada al origen a un valor de 0.



**Figura 4. 16.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-1539.

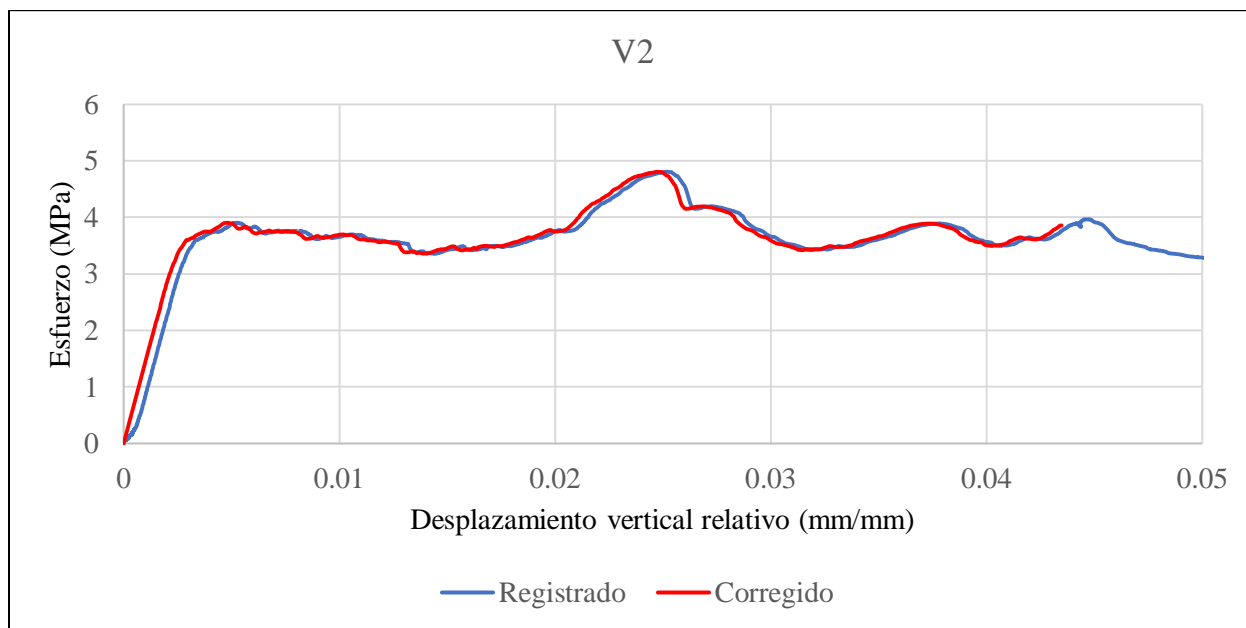
A continuación, se consolidaron los gráficos de esfuerzos para intervalos uniformes de desplazamientos correspondientes a cada viga de cada serie. Esto se realizó con el propósito de visualizar de manera gráfica el comportamiento de vigas que teóricamente eran idénticas. Además, se calculó el promedio de los esfuerzos obtenidos a partir de los tres especímenes de cada serie con el fin de determinar el valor promedio de la serie.



**Figura 4. 17.** - Detalle de falla en apoyo en la viga V1-1539 después de llevarla a la falla.



**Figura 4. 18.** - Detalle de la falla en apoyo de frente en la viga V1-1539 después de llevarla a la falla.



**Figura 4. 19.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-1539.

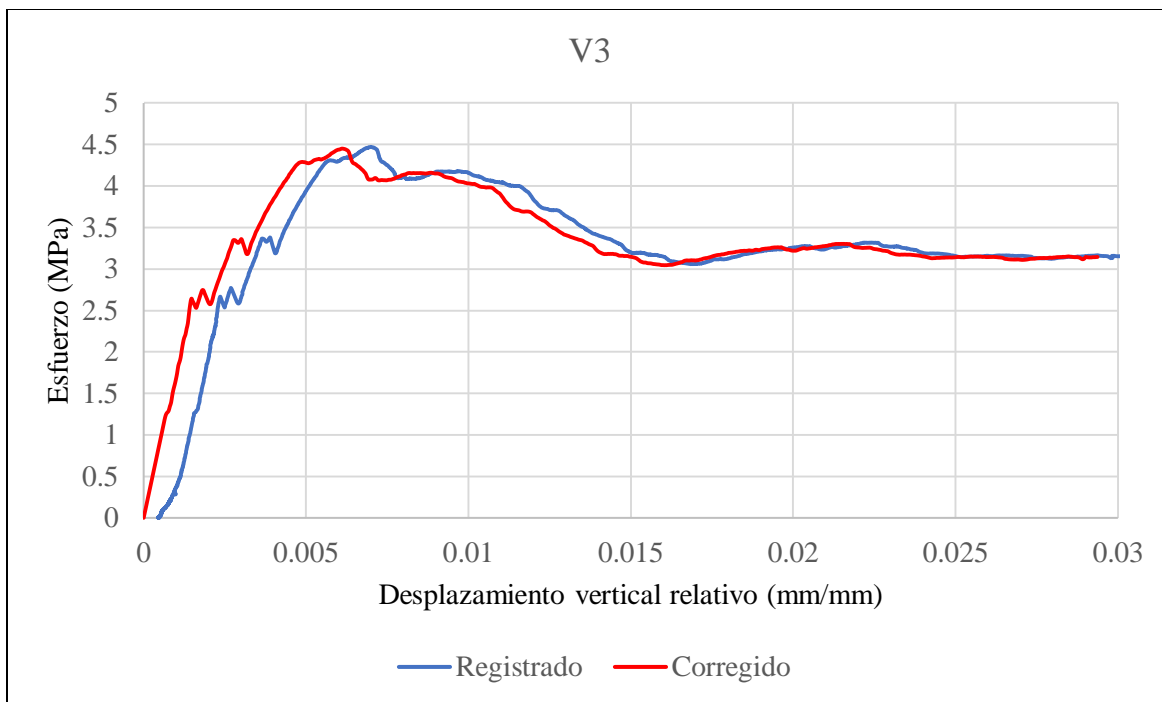


*Figura 4. 20.* - Viga V2-1539 después de llevarla a la falla (vista de frente).



*Figura 4. 21.* - Detalle de la falla en apoyo de frente en la viga V2-1539 después de llevarla a la falla donde se puede ver a la viga apoyándose en la base del rodillo. Foto tomada por Bibian I. Silva.

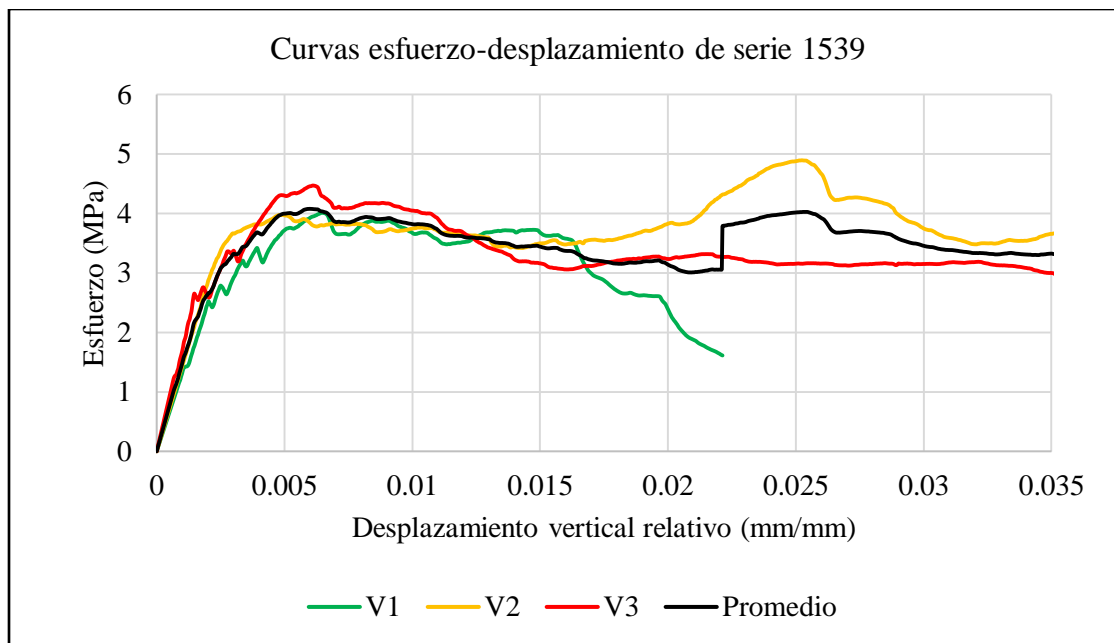




**Figura 4. 22.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-1539.



**Figura 4. 23.** - Viga V3-1539 después de llevarla a la falla (vista posterior).



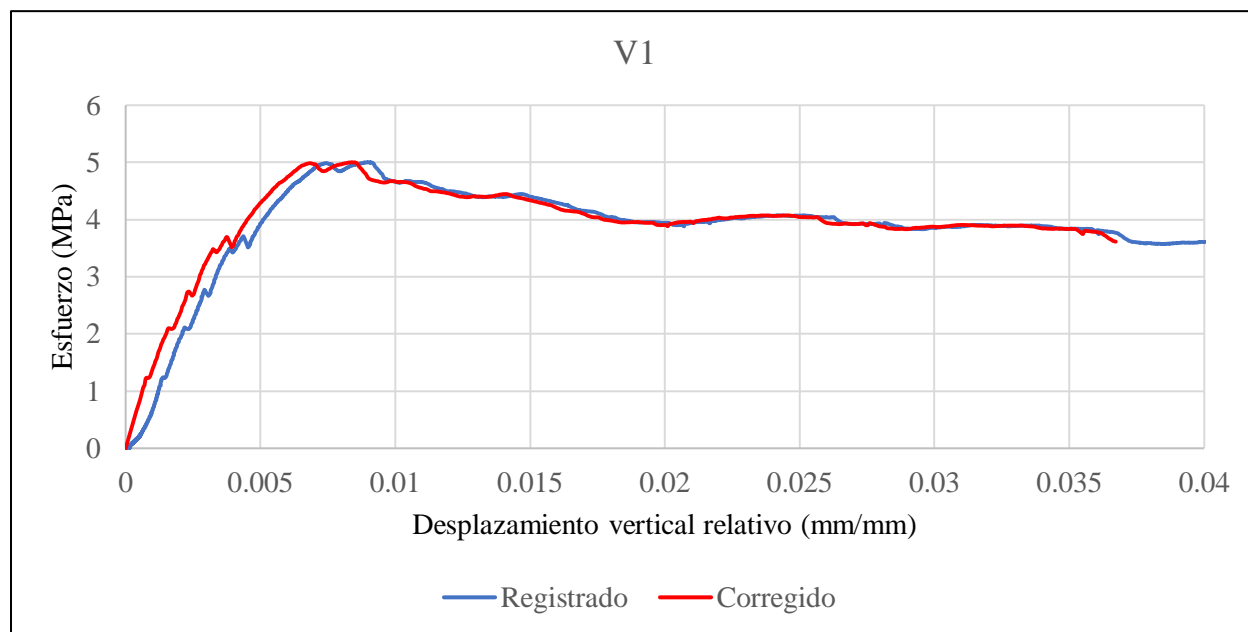
**Figura 4. 24.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio de las tres vigas de la serie 1539.

Esta serie no contaba con refuerzo de fibras de acero, únicamente tenía refuerzo longitudinal con una cuantía del 0.0056. Se observa que el comportamiento de las tres vigas es similar, aunque es importante destacar que la viga V2 alcanza esfuerzos máximos después de que se ha producido el agrietamiento, y estos esfuerzos son más altos que los registrados en los otros dos especímenes de la misma serie. Por este motivo, la curva de los promedios finaliza cuando comienza el incremento en el valor del gráfico de esta viga en particular.

Este fenómeno puede explicarse por el hecho de que, al ser el segundo elemento probado en el laboratorio, no se tomó la precaución de verificar que una parte de la viga agrietada comenzó a apoyarse en la base del soporte, como se ilustra en la **Figura 4. 21**. Esto proporcionó un soporte adicional al elemento y, como resultado, la viga V2 pudo resistir esfuerzos más elevados. La ductilidad de estos elementos se debe al acero de refuerzo y es menor que la de los especímenes que sí incorporan refuerzo de fibras de acero, como se explicará más adelante.

## Serie 1571

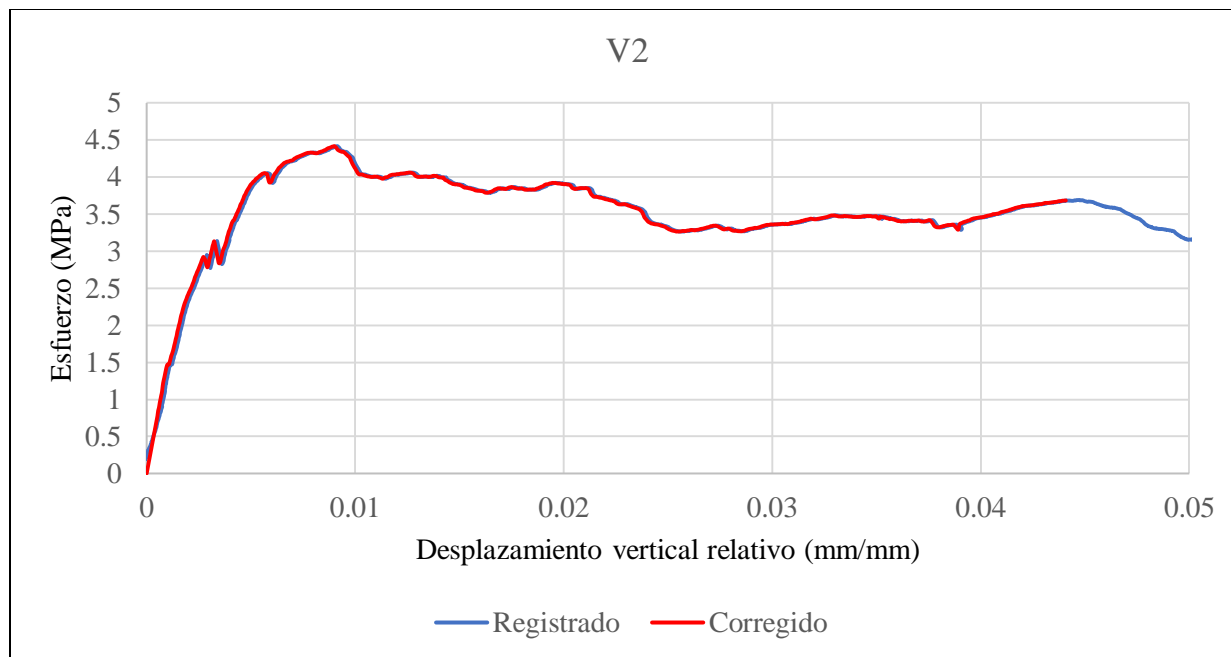
Fibras 3D;  $\rho = 0.0056$ ; dosificación =  $10 \frac{kg}{m^3}$ ;  $V_f = 0.12658$ ;  $f'_c = 49.819 MPa$



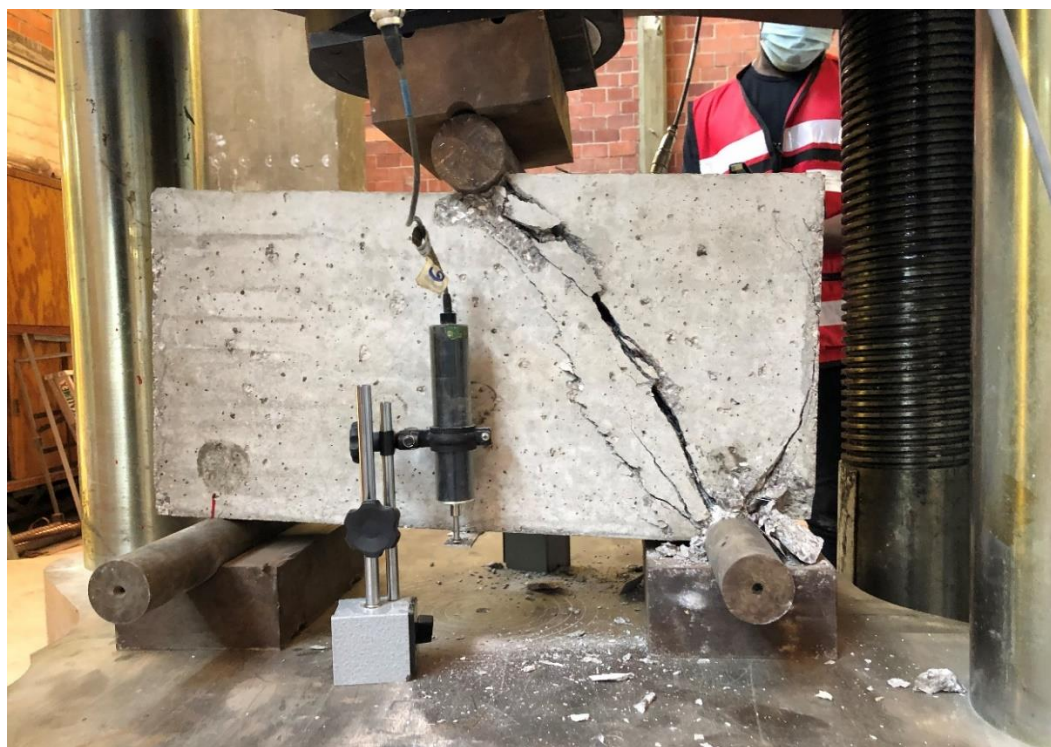
**Figura 4. 25.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-1571.



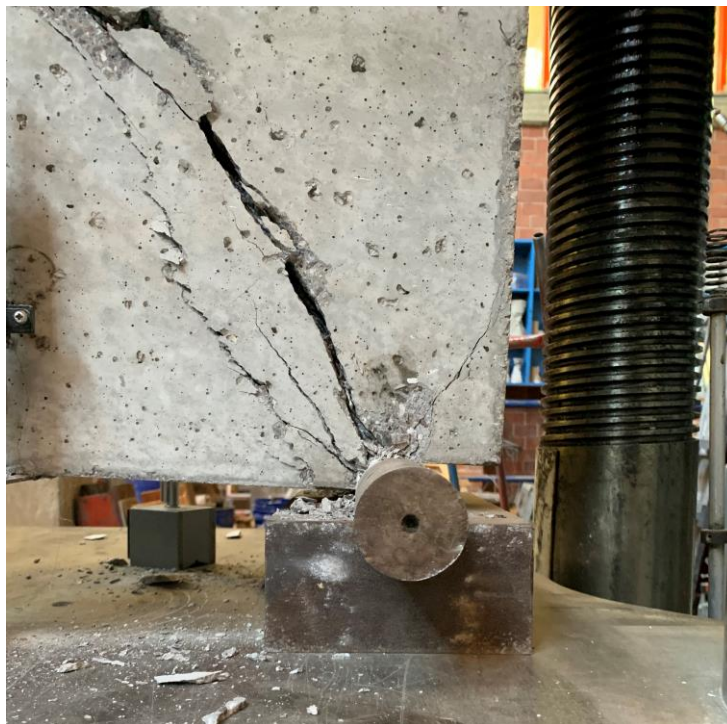
**Figura 4. 26.** - Viga V1-1571 después de llevarla a la falla en vista frontal. Foto tomada por Bibian I. Silva.



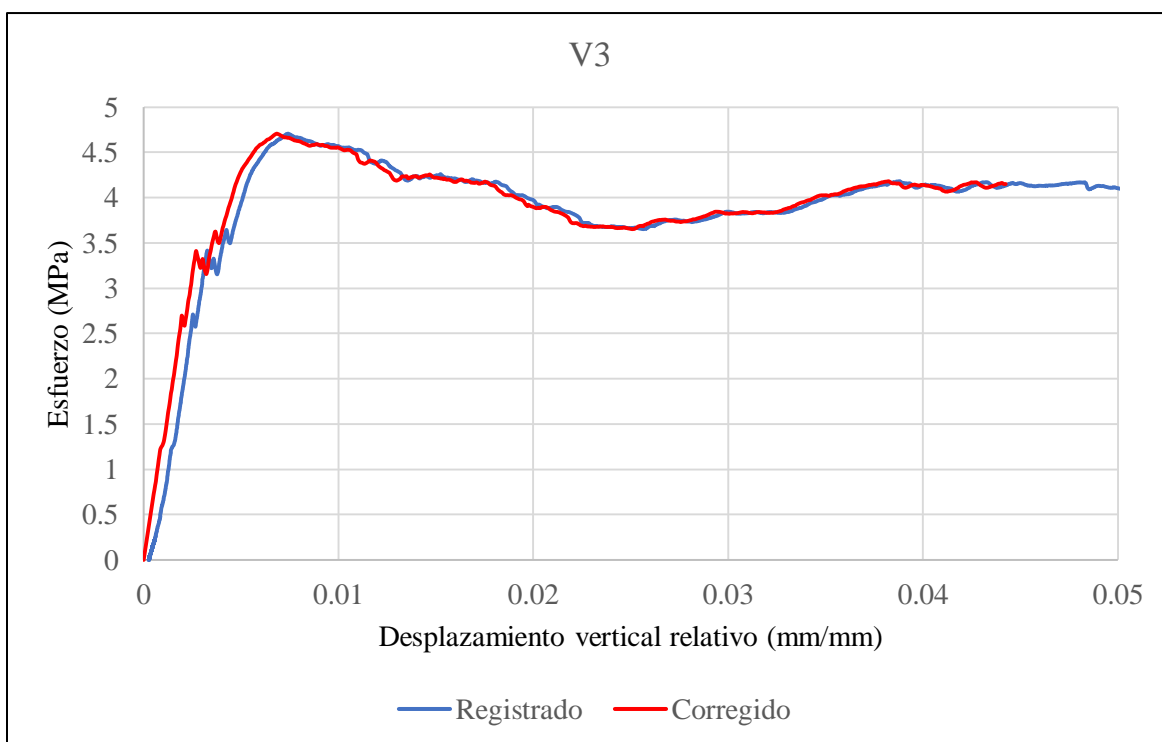
**Figura 4. 27.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-1571.



**Figura 4. 28.** - Viga V2-1571 después de llevarla a la falla en vista frontal. Foto tomada por Bibian I. Silva.



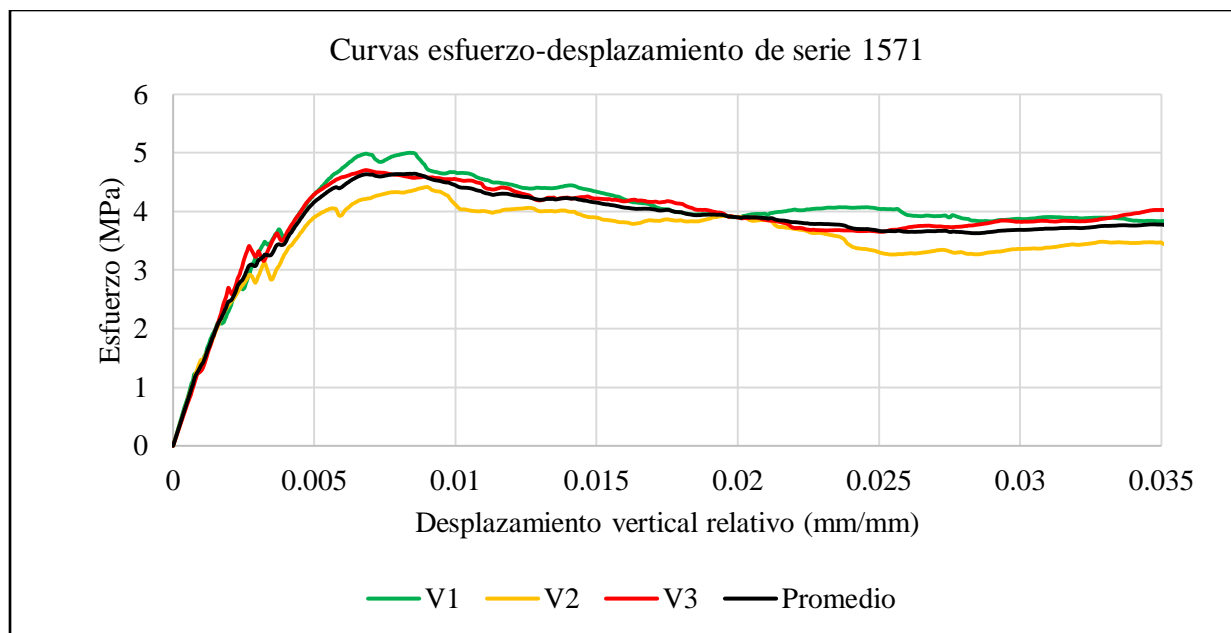
**Figura 4. 29.** - Detalle de falla en apoyo en la viga V2-1571 después de llevarla a la falla.



**Figura 4. 30.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-1571.



**Figura 4. 31.** - Viga V3-1571 después de llevarla a la falla en vista frontal. Foto tomada por Bibian I. Silva.



**Figura 4. 32.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio de las tres vigas de la serie 1571.

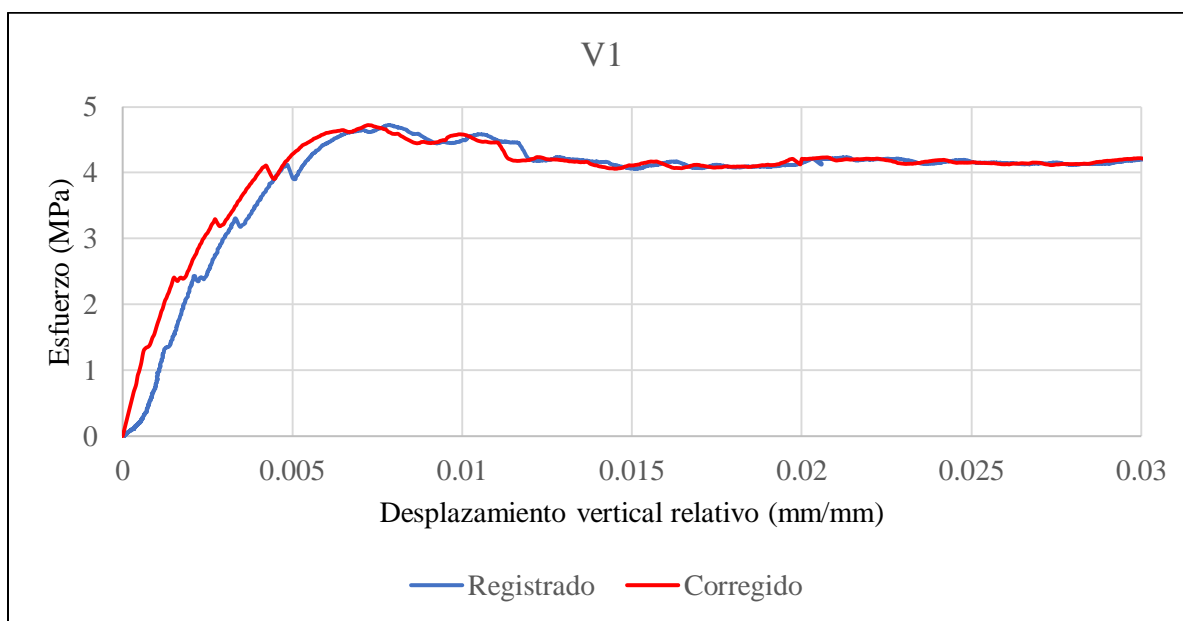
En el caso de esta serie, se observa un patrón de comportamiento consistente, con fallas por cortante en todos los especímenes, seguidas de una disminución gradual en los esfuerzos

después del agrietamiento. Este comportamiento indica la ductilidad proporcionada por el refuerzo de fibras de acero. Esta serie estaba compuesta por especímenes que contaban con refuerzo longitudinal con cuantía de 0.0056 y refuerzo de fibras de acero 3D, con una dosificación de 10 kg/m<sup>3</sup>. Se puede notar que se alcanzaron esfuerzos más elevados en comparación con los especímenes que solo tenían refuerzo longitudinal.

Luego del incidente con el espécimen 2 de la serie 1539, se tomó mayor precaución cuando los especímenes comenzaban a desplazarse hacia abajo, y se detuvo la prueba tan pronto como la probeta estuvo cerca de tocar la base del soporte para evitar posibles errores. En **la Figura 4. 29**, se puede observar que la prueba en el espécimen V2 de esta serie fue detenida antes de que se produjera el contacto.

#### *Serie 1610*

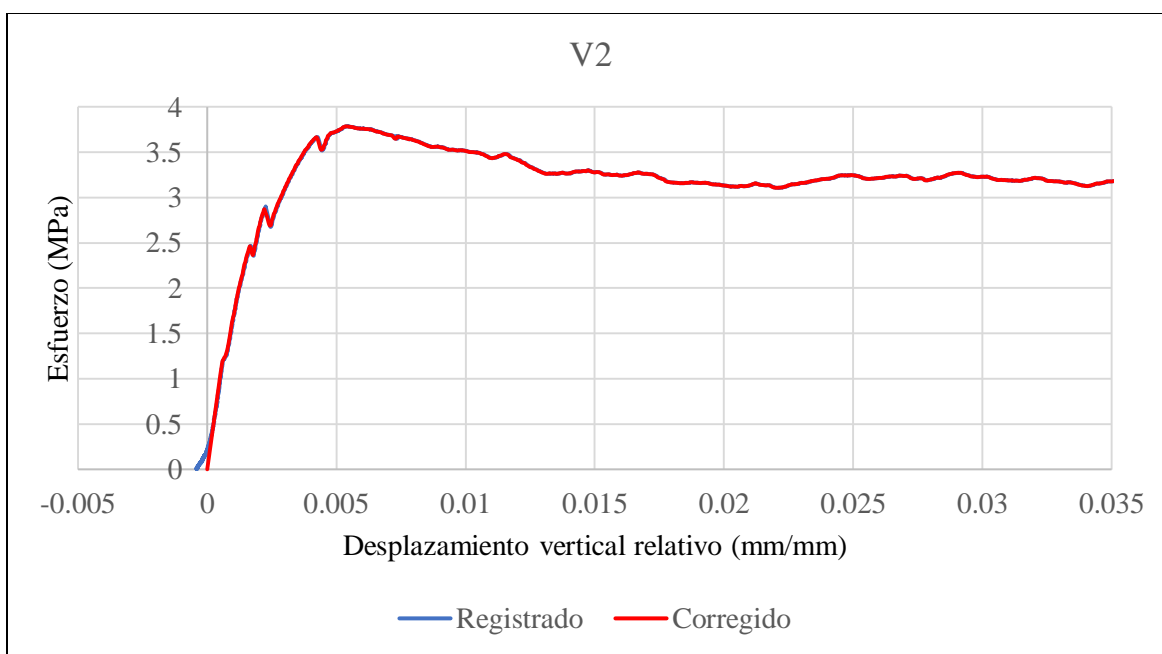
*Fibras 3D;  $\rho = 0.0056$ ; dosificación =  $20 \frac{kg}{m^3}$ ;  $V_f = 0.25316$ ;  $f'_c = 51.388 MPa$*



**Figura 4. 33.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-1610.

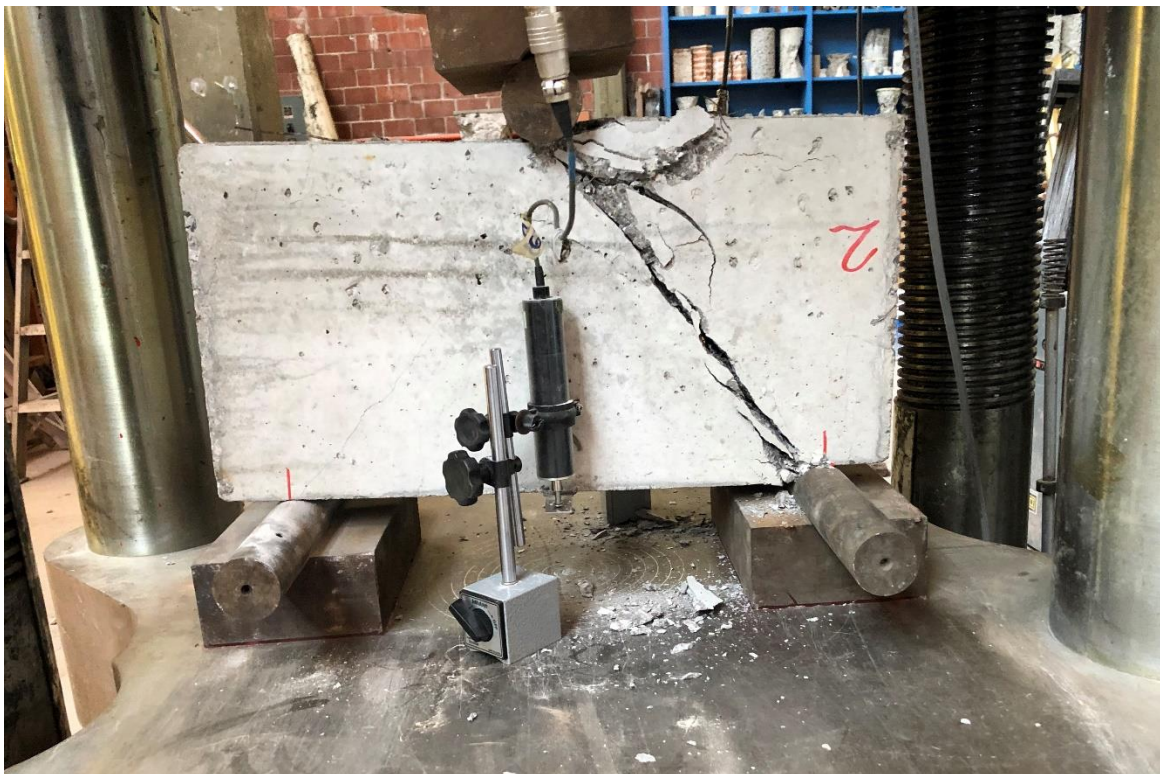


**Figura 4. 34.** - Viga V1-1610 después de llevarla a la falla (vista frontal). Foto tomada por Bibian I. Silva.

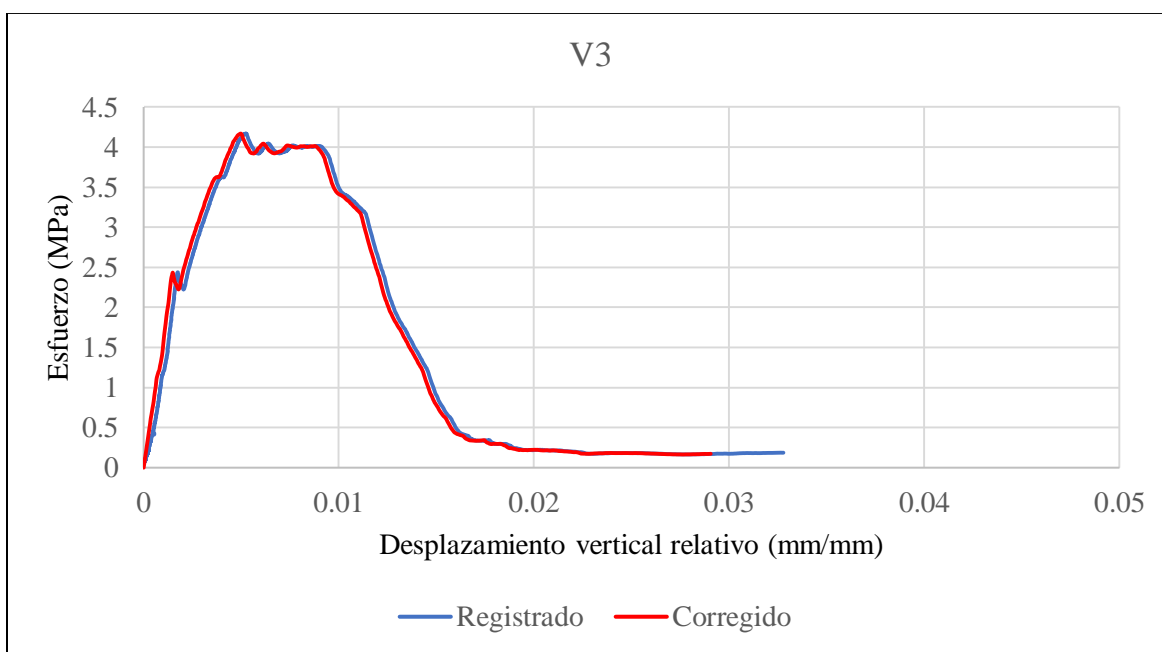


**Figura 4. 35.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-1610.





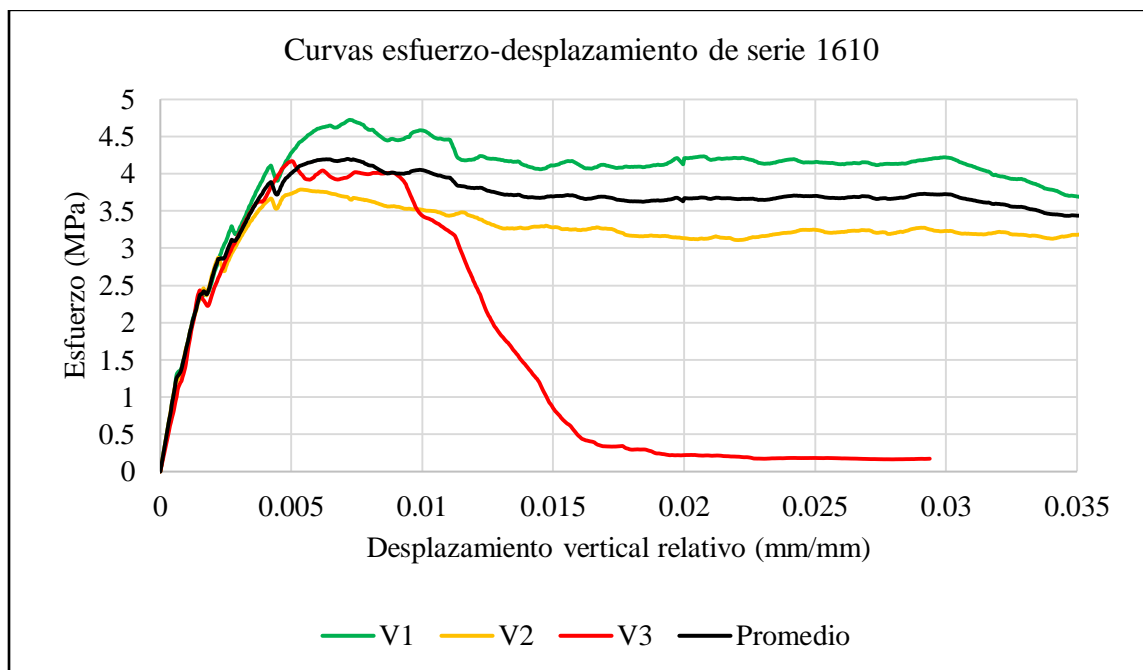
**Figura 4. 36.** - Viga V2-1610 después de llevarla a la falla en vista frontal. Foto tomada por Bibian I. Silva.



**Figura 4. 37.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-1610.



**Figura 4. 38.** - Viga V3-1610 después de llevarla a la falla en vista frontal. Foto tomada por Bibian I. Silva.



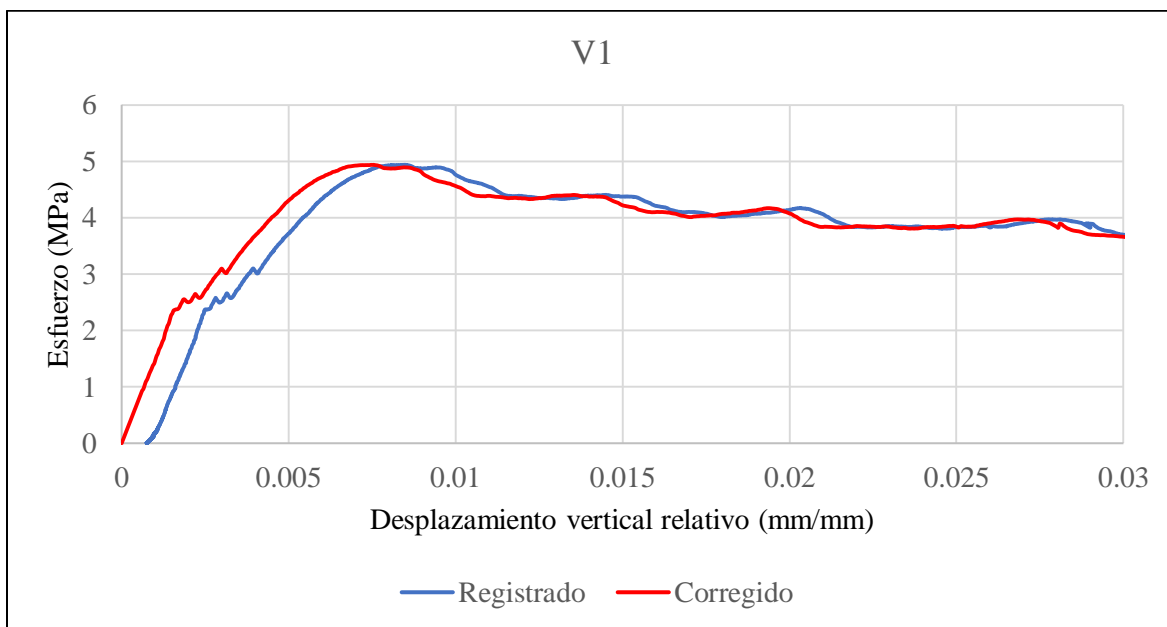
**Figura 4. 39.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio de las vigas V1 y V2 de la serie 1610.

Se puede notar que el comportamiento de las vigas 1 y 2 es muy similar, ya que ambas fallan por cortante. Sin embargo, el comportamiento de la viga 3 es notablemente diferente, por lo que no se considera en el cálculo del promedio en el gráfico de comparación. La viga 3 falla en el apoyo, y la razón detrás de este comportamiento es desconocida, lo que sugiere la posibilidad de alguna falla en la construcción.

Esta serie de especímenes contaba con refuerzo longitudinal con una cuantía del 0.0056 y fibras de acero 3D con una dosificación de 20 kg/m<sup>3</sup>. Es interesante observar que, a pesar de tener una mayor cantidad de fibras por unidad de volumen en comparación con otras series, los esfuerzos alcanzados en esta serie son menores. Posteriormente, se llevará a cabo un análisis más detallado para comprender mejor este fenómeno.

### **Serie 1690**

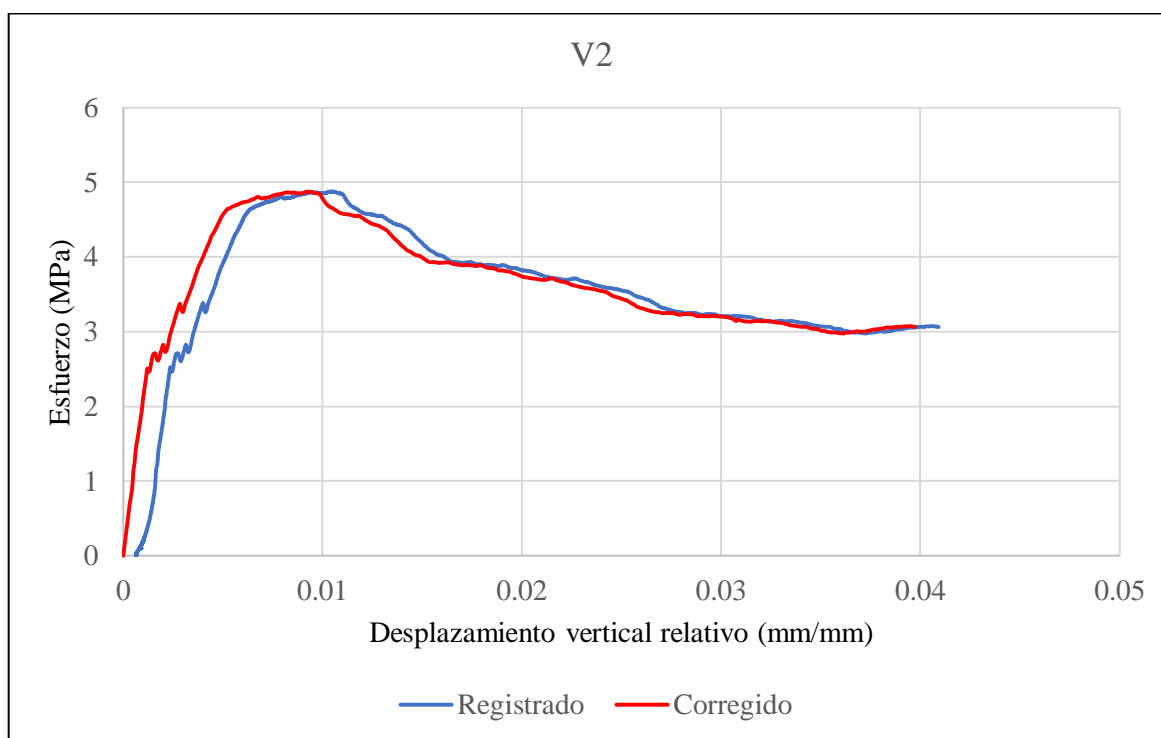
$$\text{Fibras 3D; } \rho = 0.0056; \text{ dosificación} = 40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; V_f = 0.50633; f'_c = 45.111 \text{ MPa}$$



**Figura 4. 40.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio para mediciones (verdes) y correcciones (azules) para viga V1-1690.



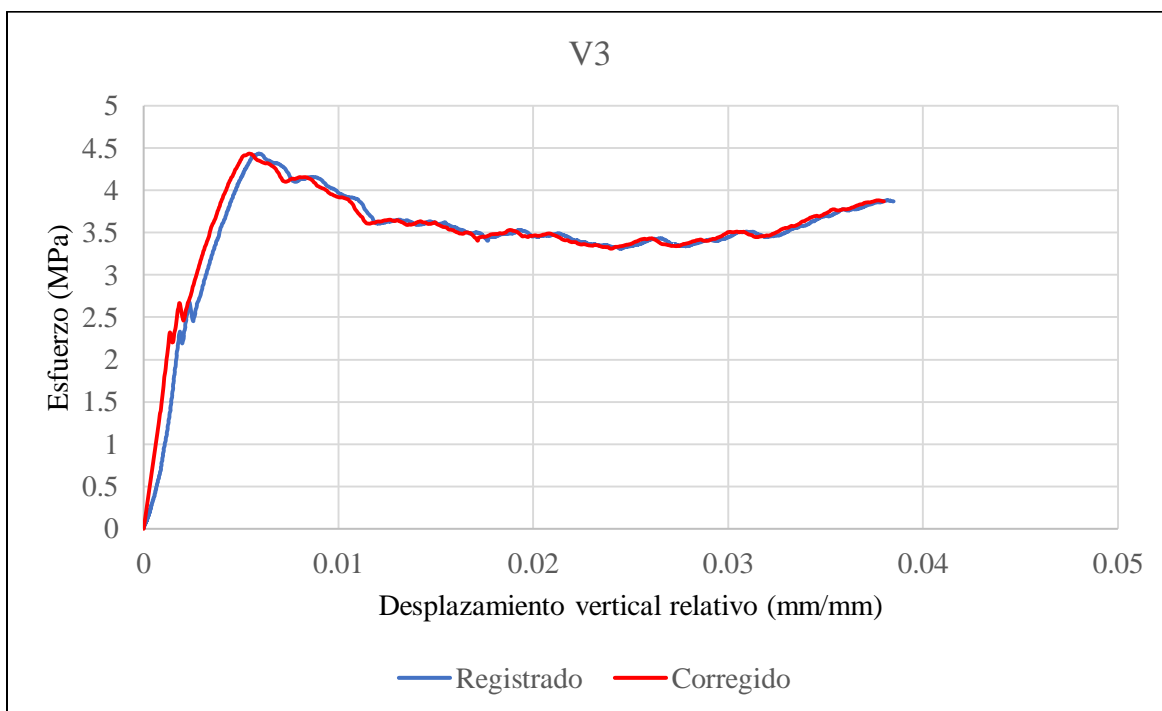
**Figura 4. 41.** - Viga V1-1690 después de llevarla a la falla vista de frente.



**Figura 4. 42.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio para mediciones (verdes) y correcciones (azules) para viga V2-1690.



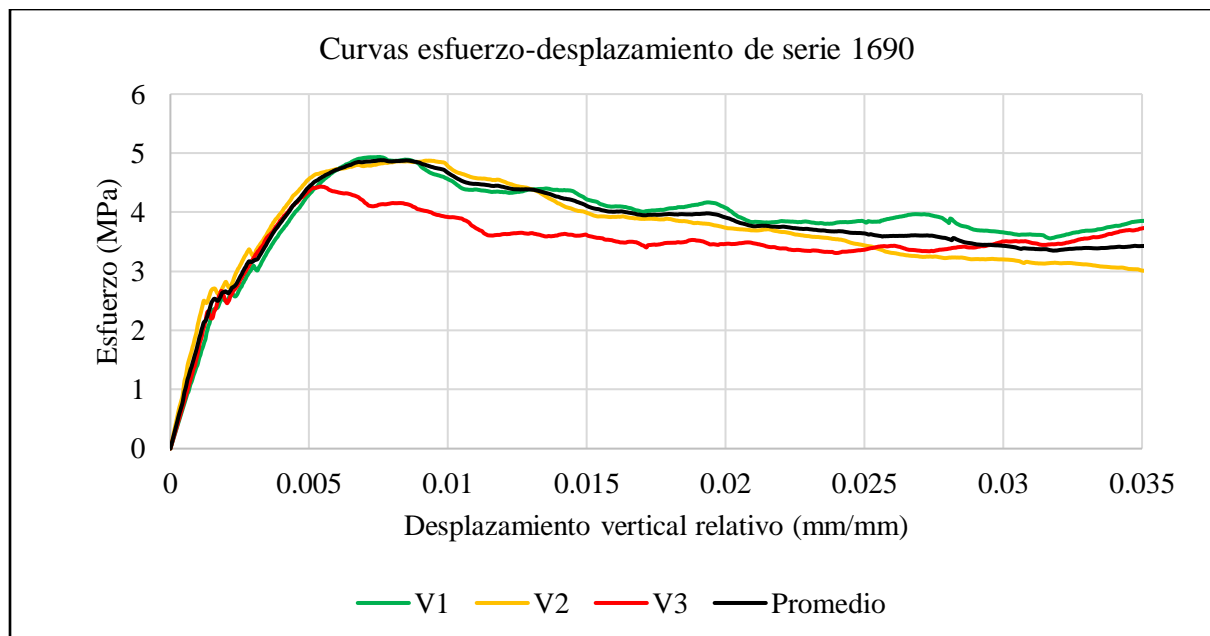
**Figura 4. 43.** - Viga V2-1690 después de llevarla a la falla vista de frente.



**Figura 4. 44.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio para mediciones (verdes) y correcciones (azules) para viga V3-1690.



**Figura 4. 45.** - Viga V3-1690 después de llevarla a la falla vista de frente.



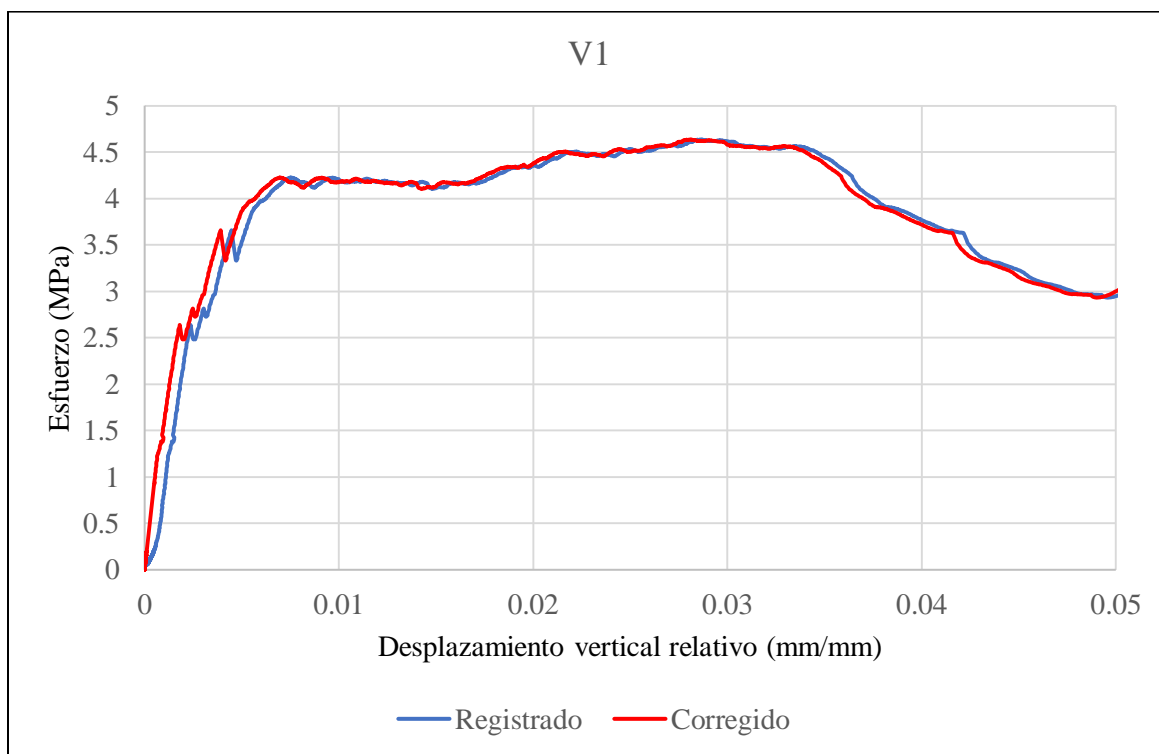
**Figura 4. 46.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas del serie 1690.

El comportamiento de las tres vigas es notablemente similar, tal como se evidencia en las imágenes, donde todos los especímenes experimentaron fallas debido a esfuerzos cortantes. Por esta razón, se han incluido todas ellas en el gráfico de comparación. Cabe destacar que esta serie de vigas contaba con refuerzo longitudinal con una cuantía del 0.0056 y fibras de acero 3D con una dosificación de  $40 \text{ kg/m}^3$ .

Es interesante observar que, en la gráfica que representa los valores promedio, el esfuerzo máximo es muy parecido al obtenido en la serie 1571, a pesar de que esta última solo disponía de una dosificación de  $10 \text{ kg/m}^3$ .

### *Serie 1709*

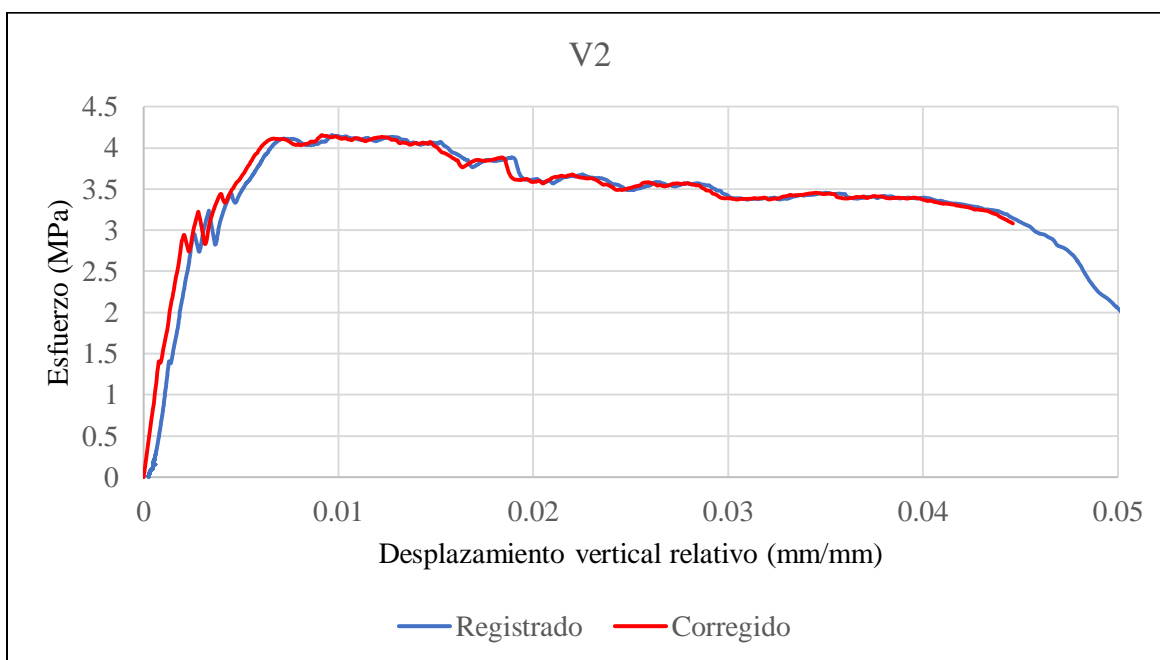
$$\text{Fibras 4D}; \rho = 0.0056; \text{dosificación} = 10 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; V_f = 0.12658; f'_c = 49.269 \text{ MPa}$$



**Figura 4. 47.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-1709.



**Figura 4. 48.** - Viga V1-1709 después de llevarla a la falla vista en el suelo con falla por desconchamiento. Foto tomada por Bibian I. Silva.

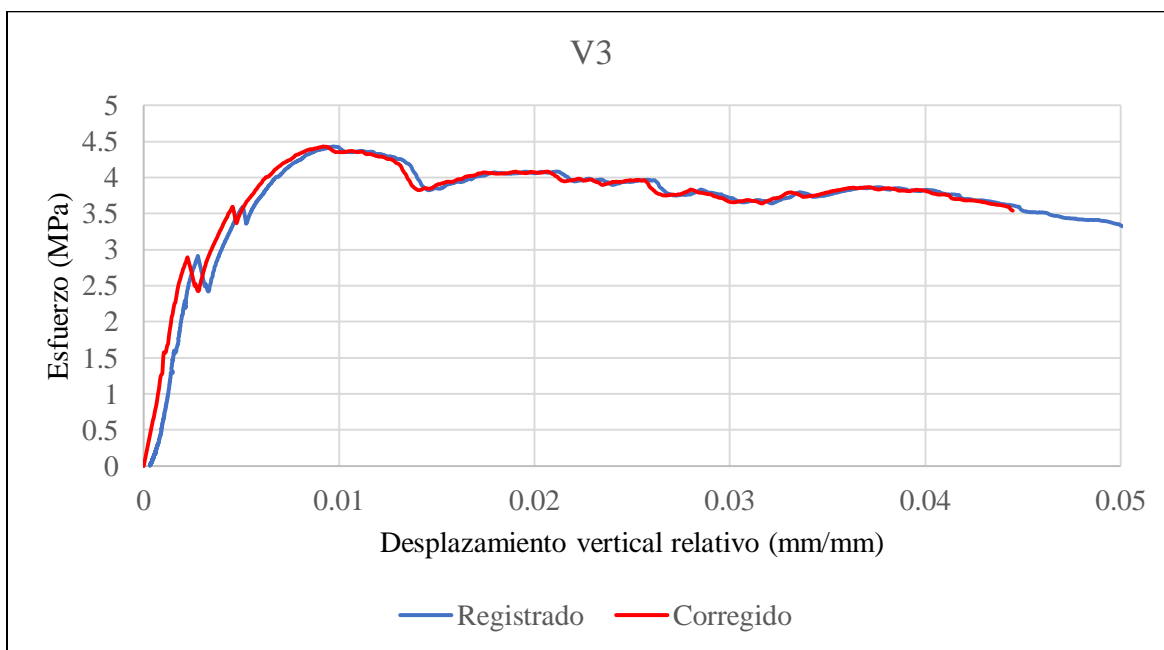


**Figura 4. 49.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-1709.





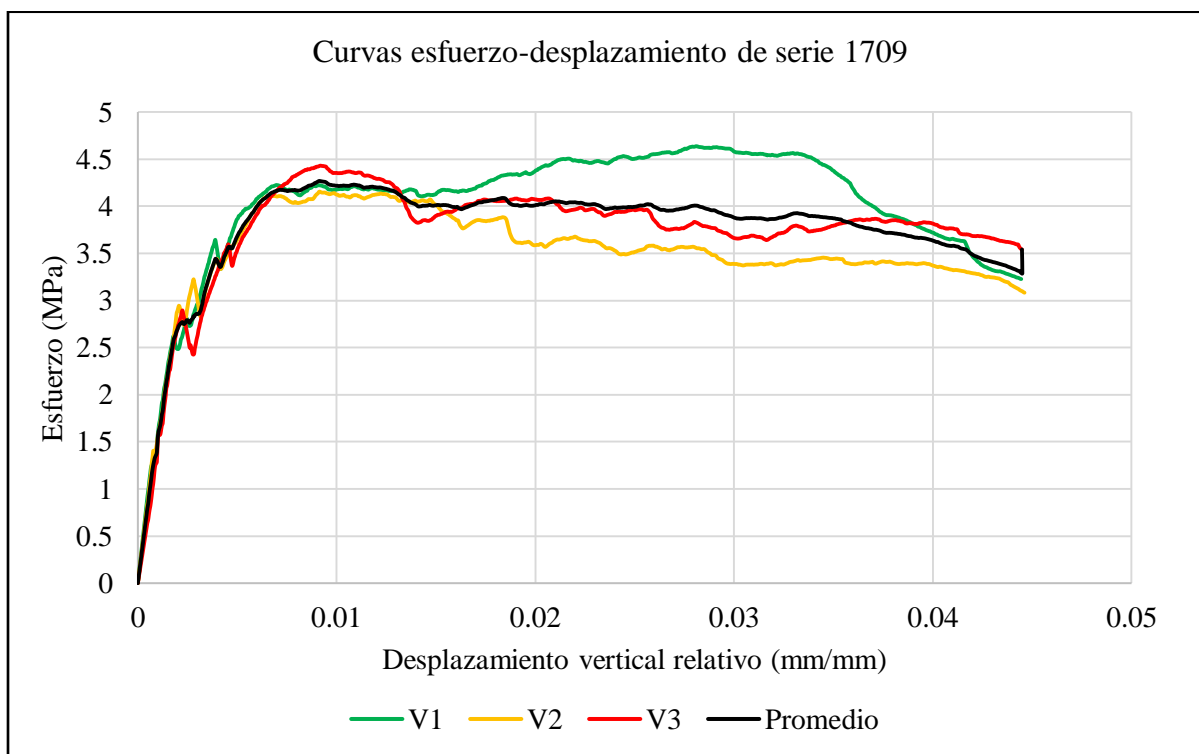
**Figura 4. 50.** - Viga V2-1709 después de llevarla a la falla vista de frente.



**Figura 4. 51.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-1709.



**Figura 4. 52.** - Viga V3-1709 después de llevarla a la falla vista de frente.



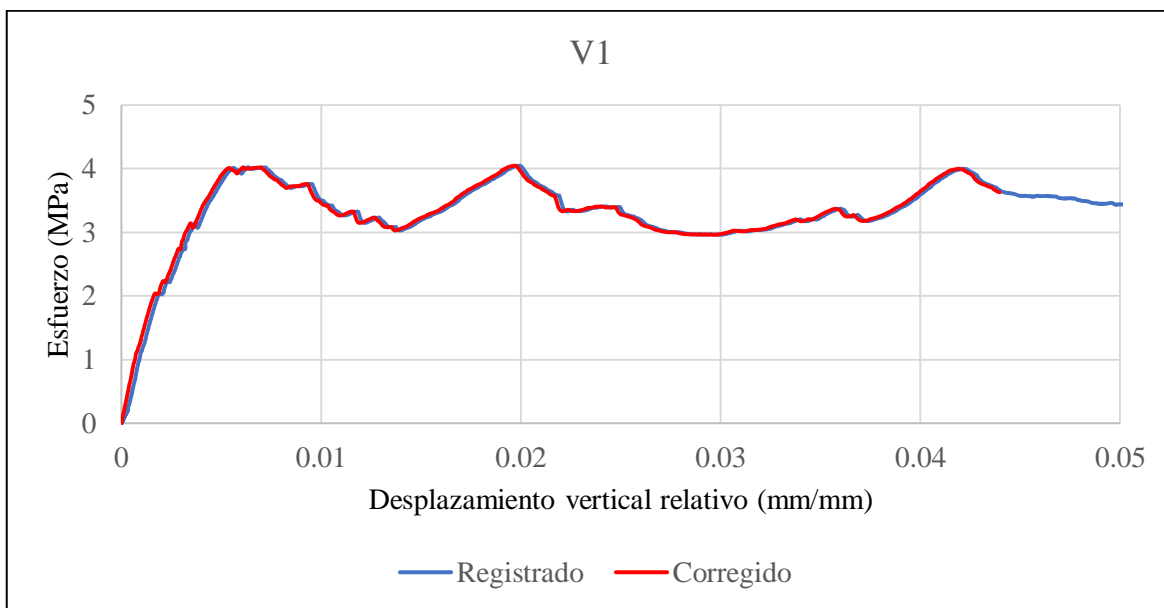
**Figura 4. 53.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 1709.

La conducta de las tres vigas exhibe una notable similitud, como se aprecia en las imágenes. Todas las muestras experimentaron una falla por cortante, razón por la cual se las incluye a todas en el gráfico de comparación. Estos ensayos se llevaron a cabo con refuerzo longitudinal a una cuantía del 0.0056 y la adición de fibras de acero 4D a una dosificación de 10 kg/m<sup>3</sup>.

Es evidente que la viga V1 alcanzó niveles máximos de esfuerzo después de la formación de grietas, lo que sugiere un desempeño efectivo de las fibras en conferirle ductilidad y resistencia al elemento. Además, es importante notar que las demás muestras también conservaron sus esfuerzos una vez se presentaron las grietas. Los valores de los esfuerzos obtenidos son comparables a los observados en las series de ensayos con fibras 3D.

#### *Serie 1787*

*Fibras 4D;  $\rho = 0.0056$ ; dosificación =  $20 \frac{kg}{m^3}$ ;  $V_f = 0.25316$ ;  $f'_c = 48.563 MPa$*



**Figura 4. 54.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-1787.



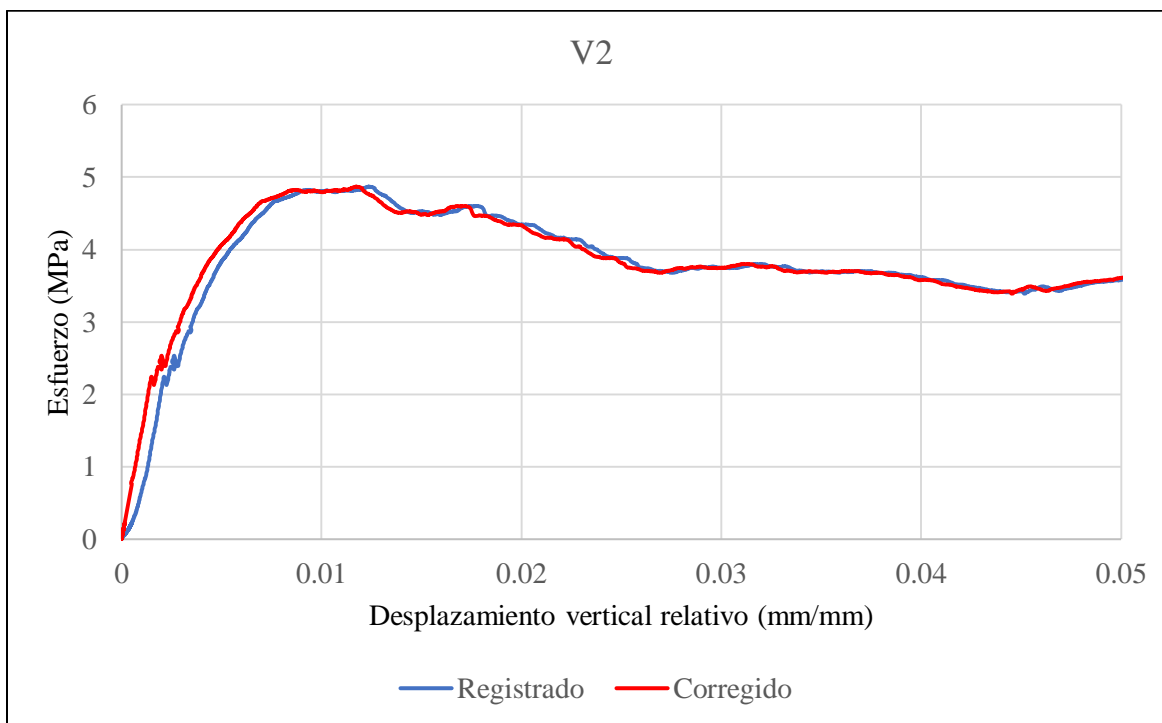
*Figura 4. 55. - Primer agrietamiento de viga V1-1787.*



*Figura 4. 56. - Detalle de primer agrietamiento de viga V1-1787.*



*Figura 4. 57.* - Viga V1-1787 después de llevarla a la falla vista de frente.



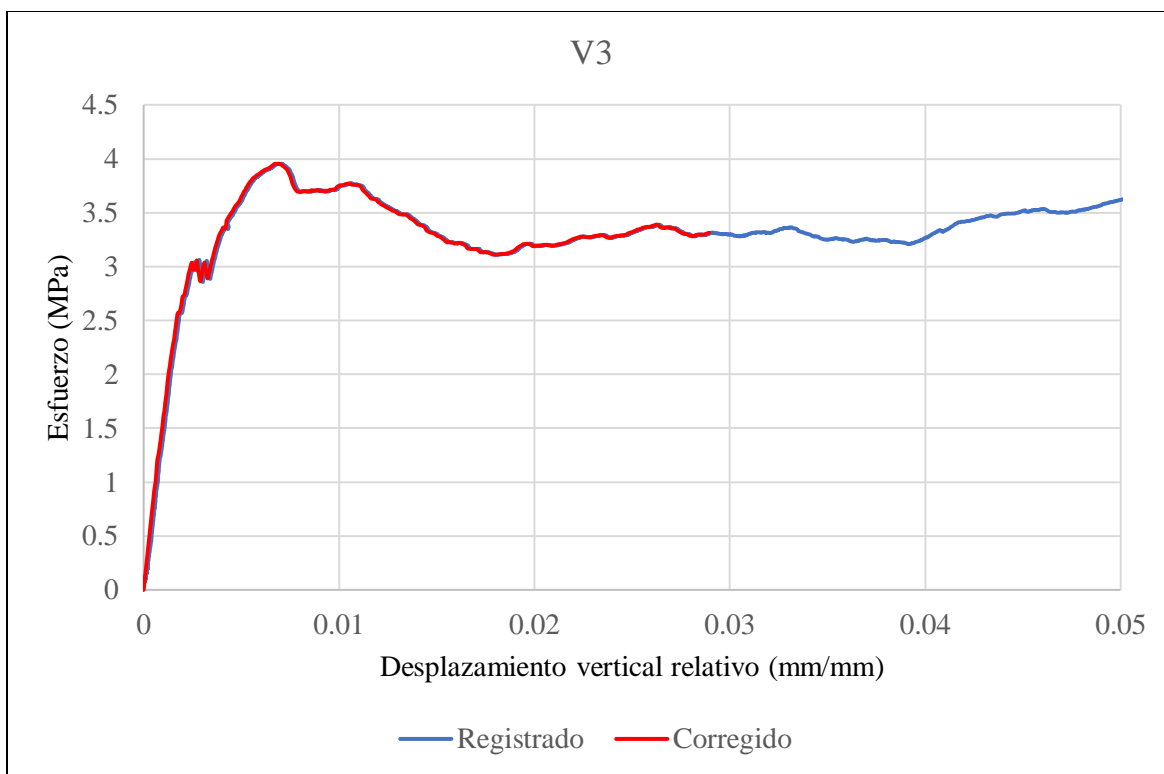
*Figura 4. 58.* - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-1787.



*Figura 4. 59.* - Viga V2-1787 después de llevarla a la falla con vista posterior.



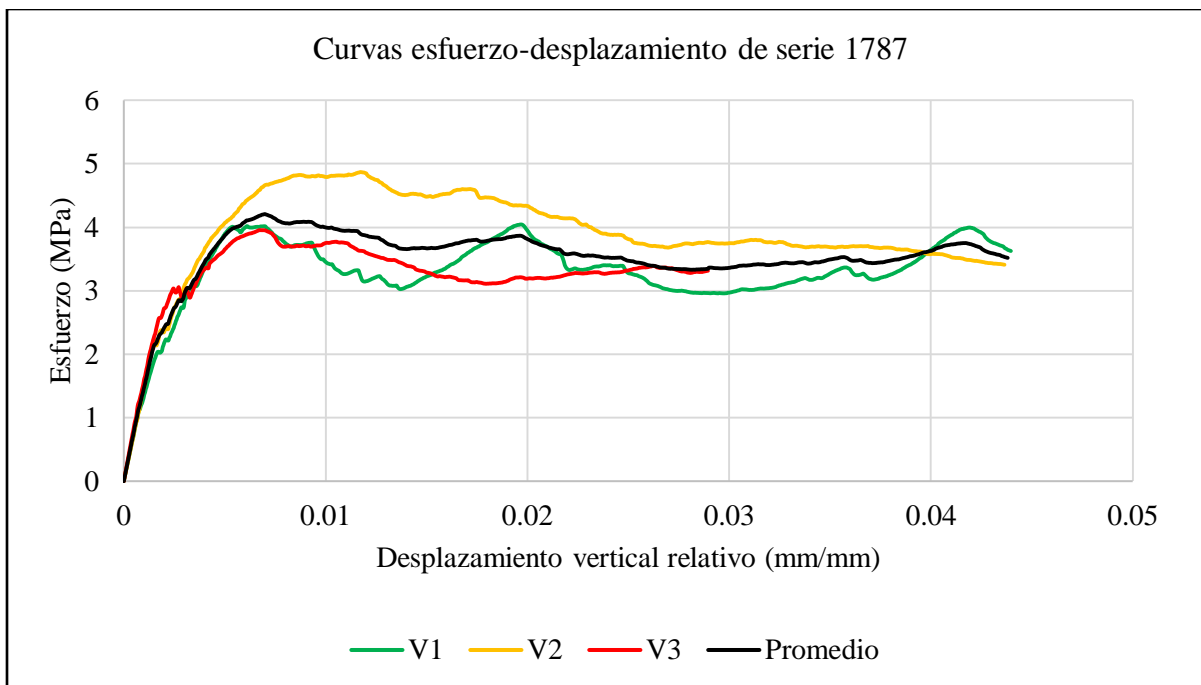
*Figura 4. 60.* - Viga V2-1787 después de llevarla a la falla vista de frente.



**Figura 4. 61.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-1787.



**Figura 4. 62.** - Viga V3-1787 después de llevarla a la falla vista de frente.



**Figura 4. 63.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 1787.

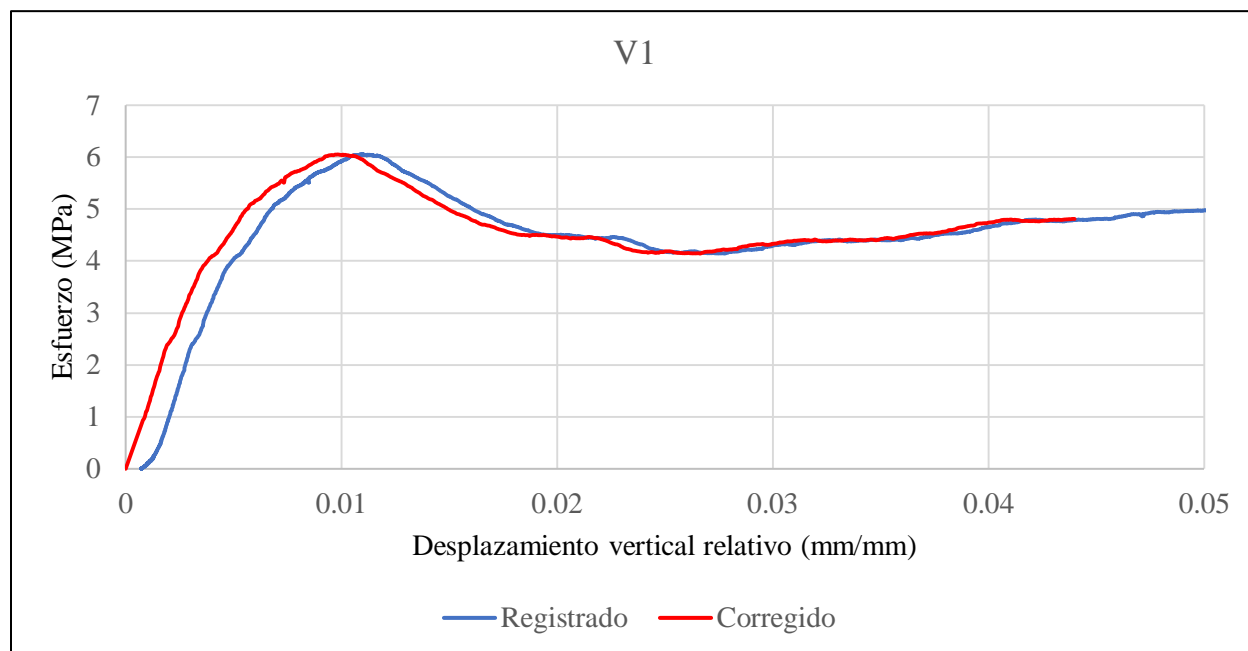
Es evidente que la viga V1 presenta un comportamiento particular en el que los niveles de esfuerzo fluctúan, lo cual podría atribuirse al modo de falla sobre el soporte. Es importante destacar que esta viga alcanza sus esfuerzos máximos después de la aparición de las grietas. Lo más probable es que la formación inicial de grietas en el punto de apoyo haya causado una disminución abrupta en la carga, lo que está muy cerca del punto de falla por cortante, y que el reajuste de la viga en el apoyo sea responsable de esta variación.

A pesar de estas particularidades, los valores de los esfuerzos son muy similares a los observados en las series de ensayos con fibras 3D, aunque son ligeramente superiores. En general, el comportamiento de las tres vigas se considera adecuado, incluso si la primera presenta estas características peculiares. Por esta razón, se han incluido todas las vigas en el gráfico de comparación. Cabe señalar que esta serie de ensayos contaba tanto con refuerzo longitudinal a una cuantía del 0.0056 como con fibras de acero 4D a una dosificación de  $20 \text{ kg/m}^3$ .



*Serie 1857*

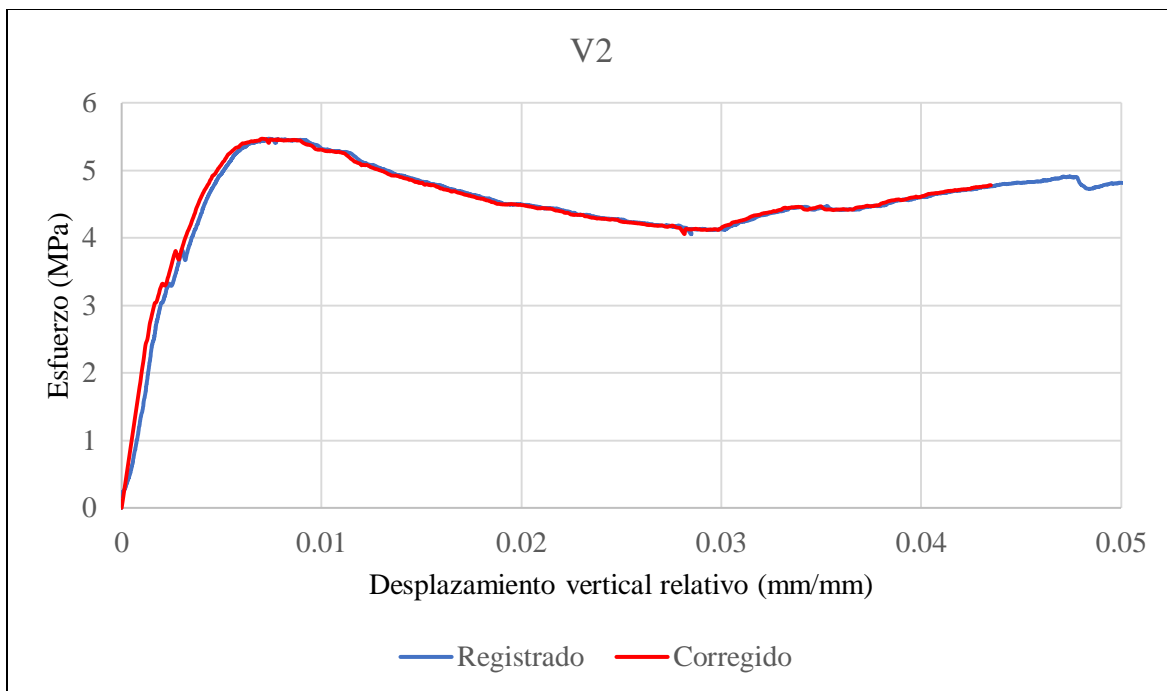
*Fibras 4D;  $\rho = 0.0056$ ; dosificación =  $40 \frac{kg}{m^3}$ ;  $V_f = 0.50633$ ;  $f'_c = 51.152 MPa$*



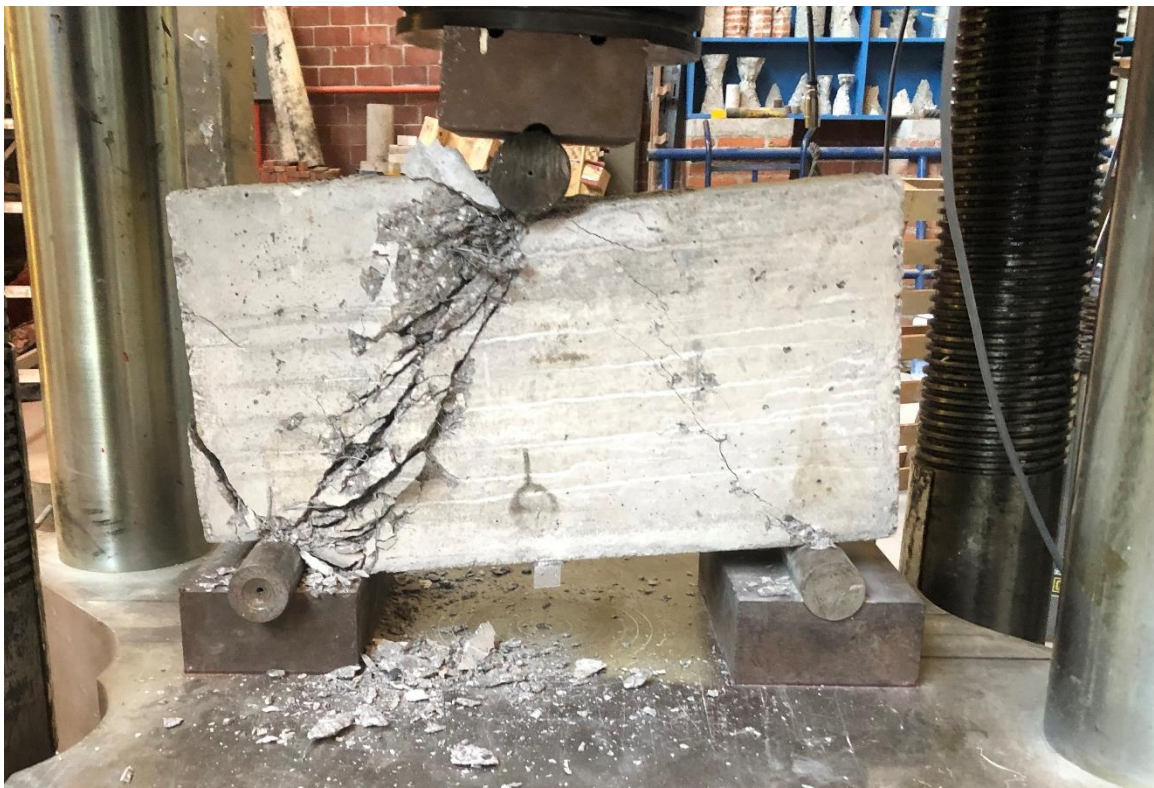
**Figura 4. 64.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-1857.



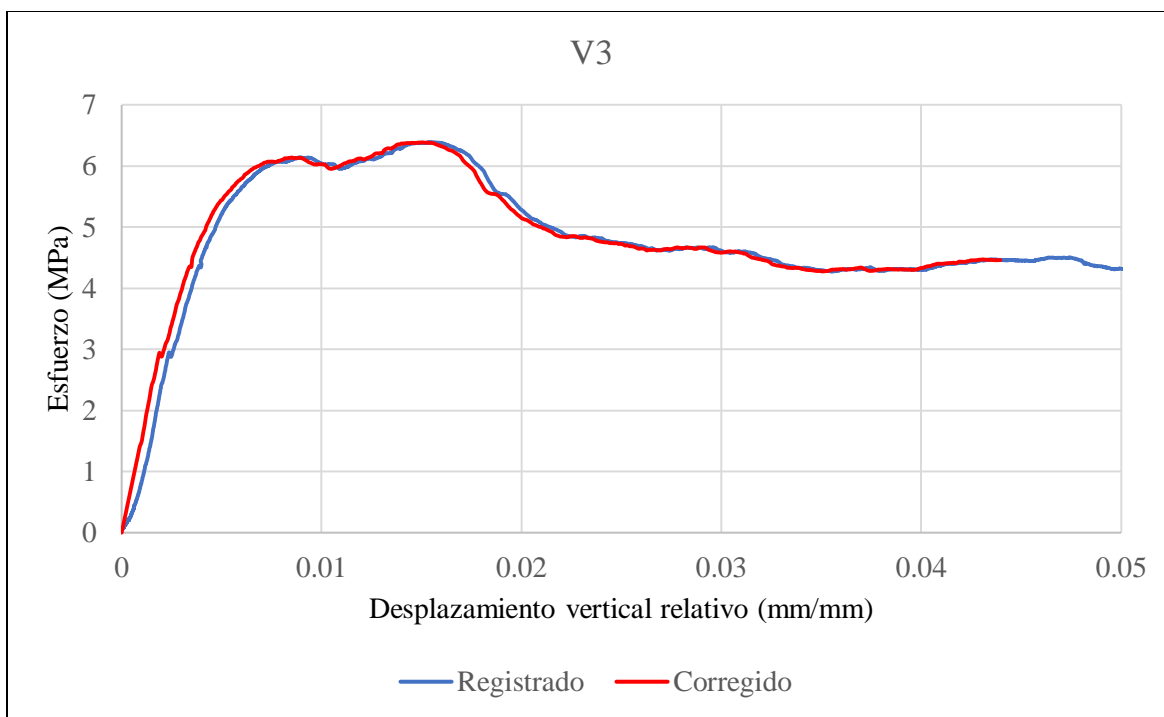
**Figura 4. 65.** - Viga V1-1857 después de llevarla a la falla con vista posterior.



**Figura 4. 66.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-1857.



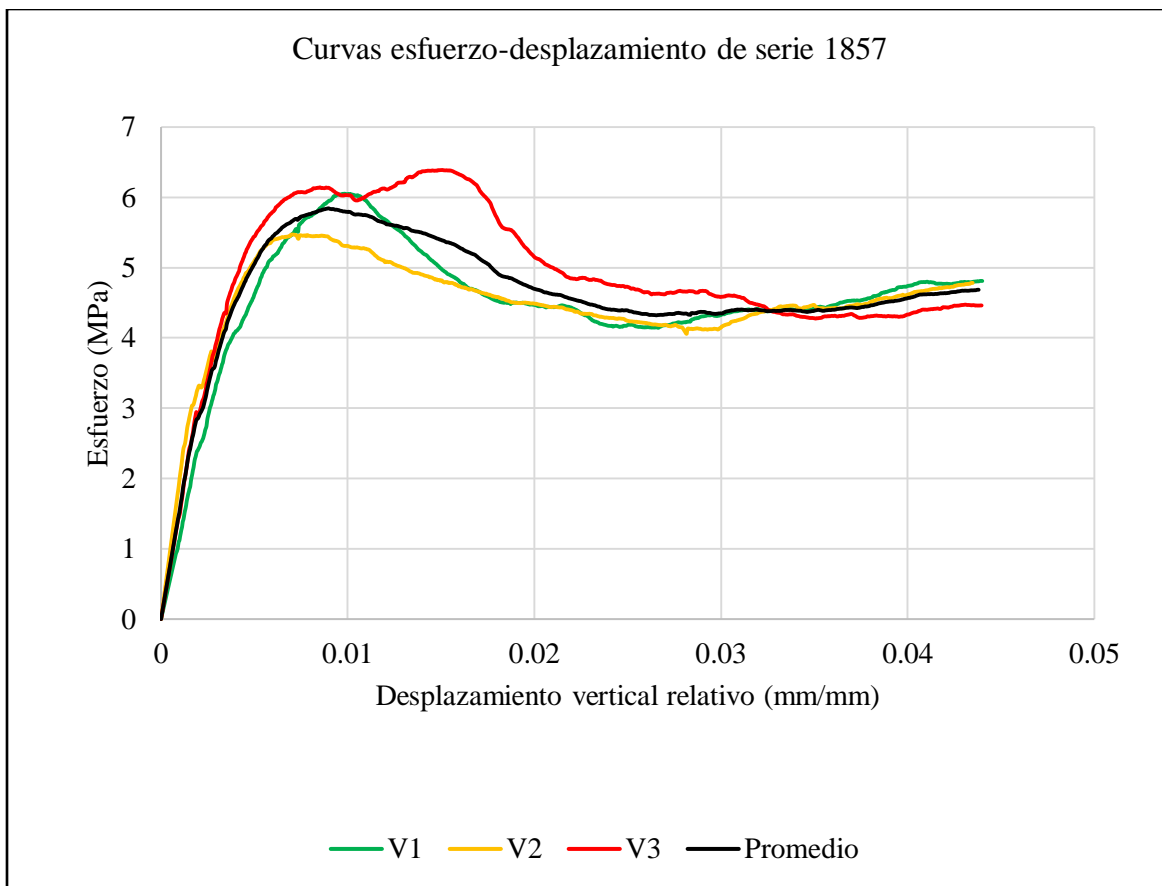
**Figura 4. 67.** - Viga V2-1857 después de llevarla a la falla vista de frente.



**Figura 4. 68.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-1857.



**Figura 4. 69.** - Viga V3-1857 después de llevarla a la falla vista de frente.



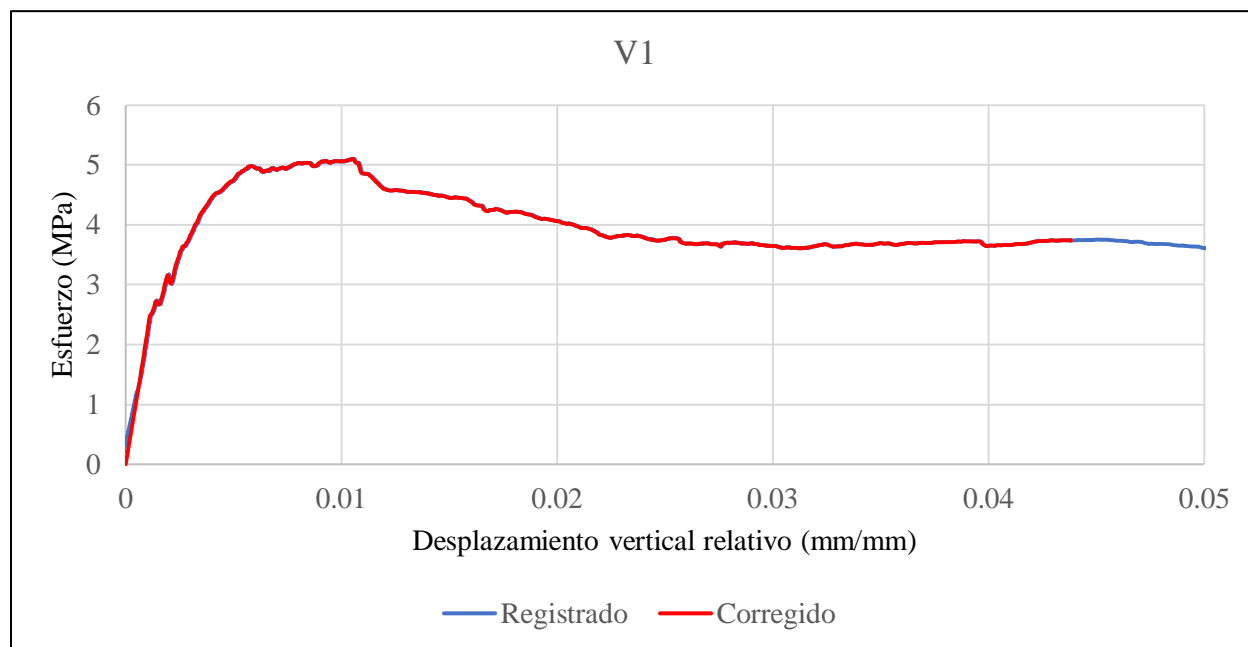
**Figura 4. 70.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 1857.

El comportamiento de las tres vigas es muy parecido. Todas ellas experimentaron una falla por cortante, tal como se observa en las imágenes de los ensayos, por lo que todas se consideran en la representación gráfica comparativa. Cabe destacar que esta serie de pruebas incluyó tanto refuerzo longitudinal con una cuantía del 0.0056 como fibras de acero 4D con una dosificación de  $40 \text{ kg/m}^3$ .

Los niveles de esfuerzo alcanzados por estas muestras son significativamente superiores a los obtenidos en los especímenes con fibras 3D, así como en los especímenes con fibras 4D que presentaban una menor relación de volumen, a pesar de mantener la misma cuantía de acero. Esto sugiere que la configuración 4D posee propiedades mecánicas notablemente mejoradas.

*Serie 1858*

*Sin Fibras;  $\rho = 0.0113$ ; dosificación =  $0 \frac{kg}{m^3}$ ;  $V_f = 0$ ;  $f'_c = 50.211 MPa$*



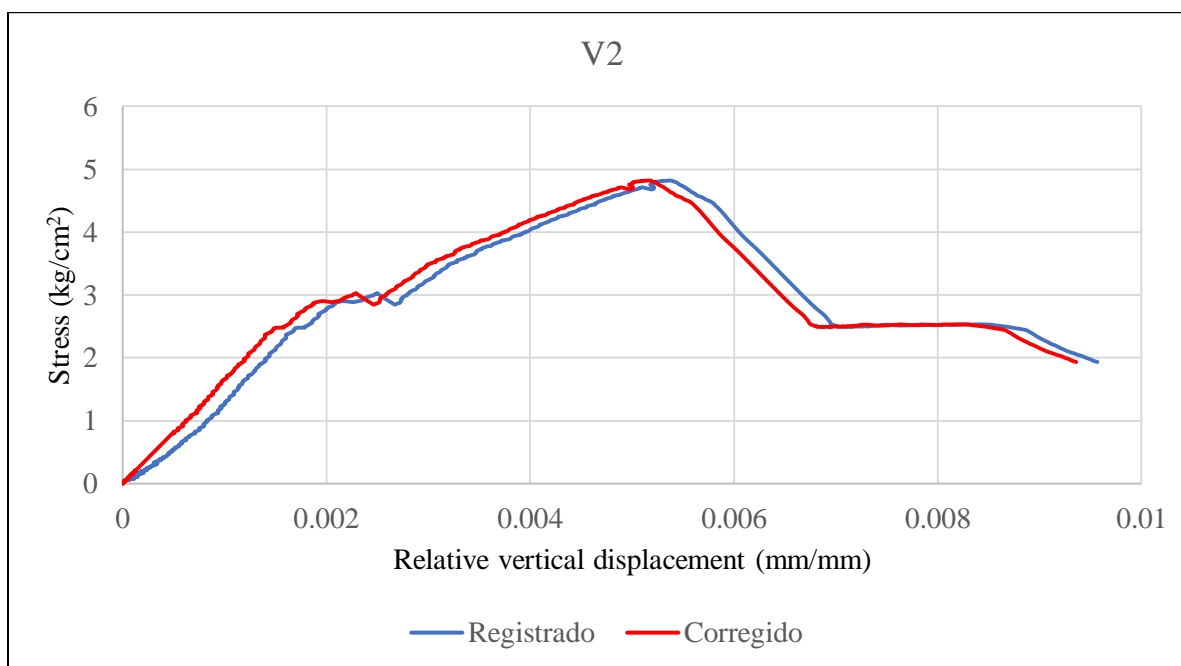
**Figura 4. 71.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-1857.



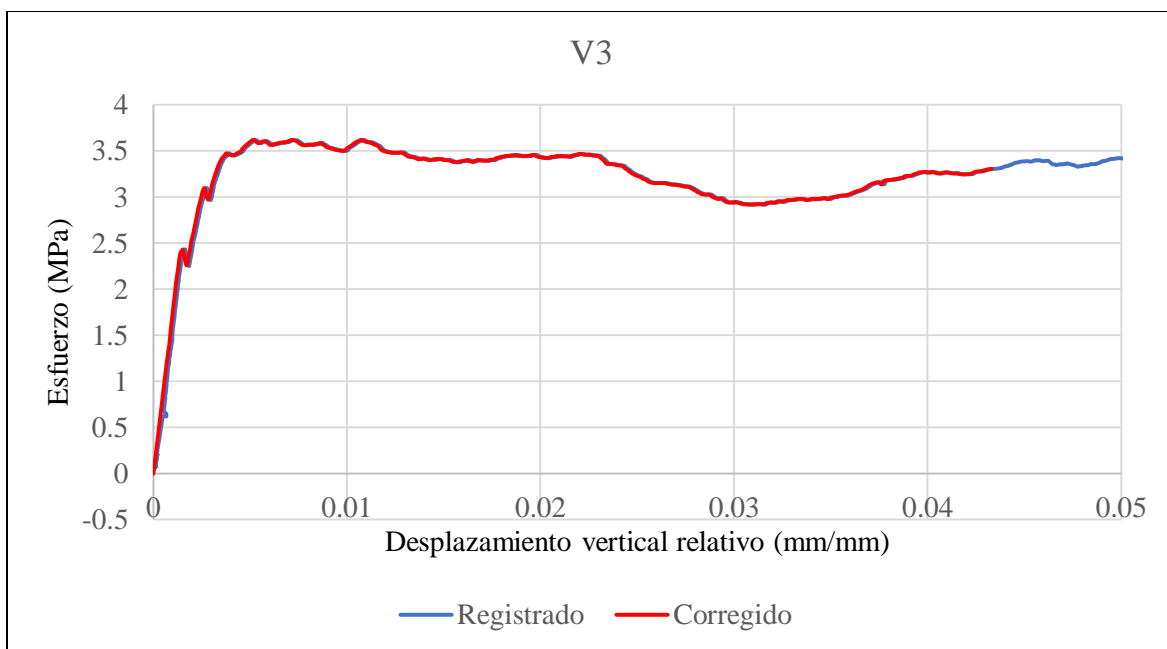
**Figura 4. 72.** - Viga V1-1858 después de llevarla a la falla vista de frente.



**Figura 4. 73.** - Viga V1-1858 después de llevarla a la falla con vista posterior. Foto de Bibian I. Silva.



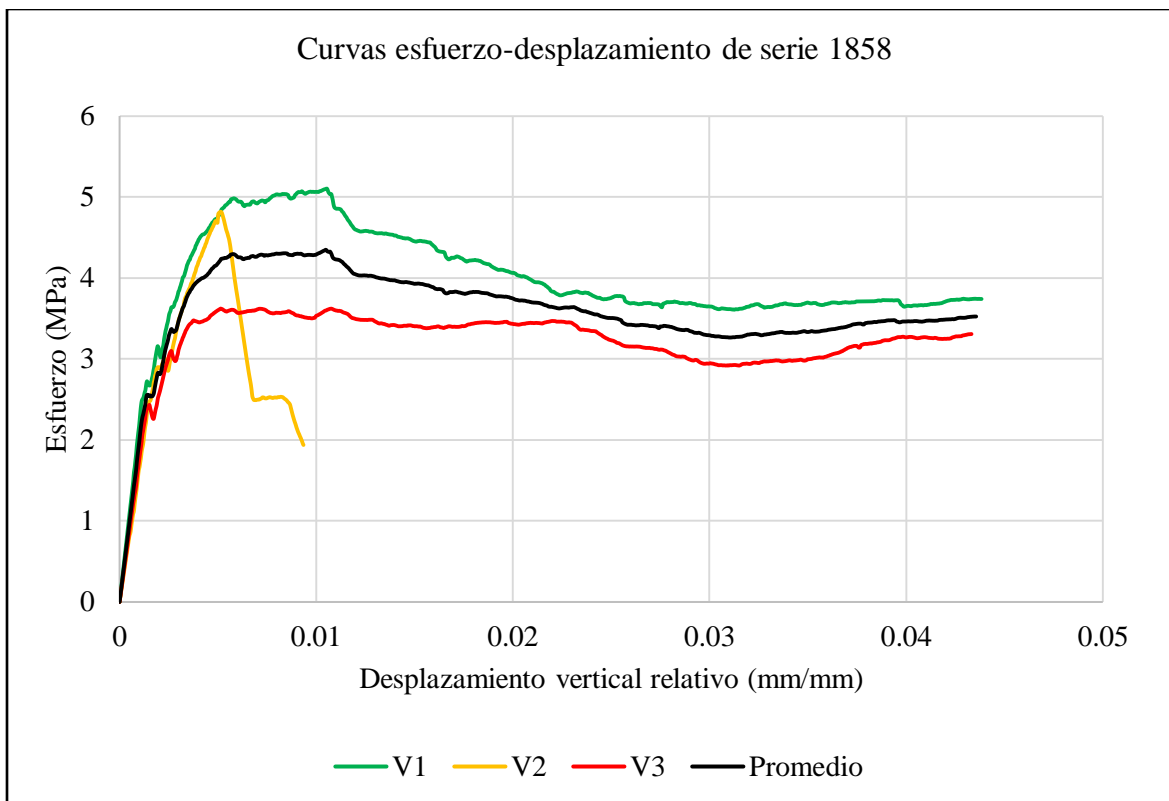
**Figura 4. 74.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-1857.



**Figura 4. 75.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-1857.



**Figura 4. 76.** - Viga V3-1858 después de llevarla a la falla vista de frente.



**Figura 4. 77.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las vigas V1 y V3 de la serie 1858.

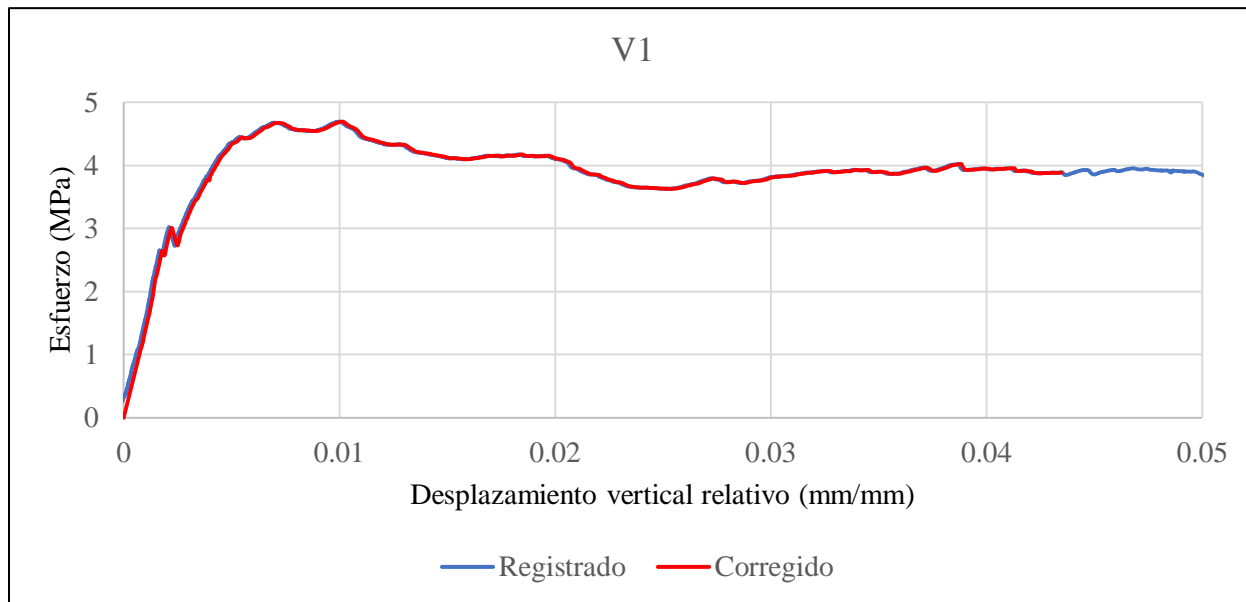
El comportamiento de las vigas V1 y V3 exhibe una notable similitud, ambas experimentaron una falla por cortante, tal como se evidencia en las fotografías de los ensayos. Sin embargo, la viga V2 se comportó de manera diferente, mostrando una fragilidad en lugar de ductilidad, ya que se produjo una falla en uno de los puntos de apoyo. Por consiguiente, la viga V2 no se incluye en el cálculo del promedio en el gráfico comparativo. No se cuenta con registro fotográfico de este espécimen.

Es importante señalar que esta serie de pruebas sólo incorporó refuerzo longitudinal con una cuantía de 0.0113. Los niveles de esfuerzo alcanzados por estas muestras son superiores a los obtenidos en los especímenes que carecían de fibras y presentaban una cuantía de 0.0056. Esto se debe al aporte adicional que proporcionan las barras de acero al esfuerzo cortante.



## Serie 1979

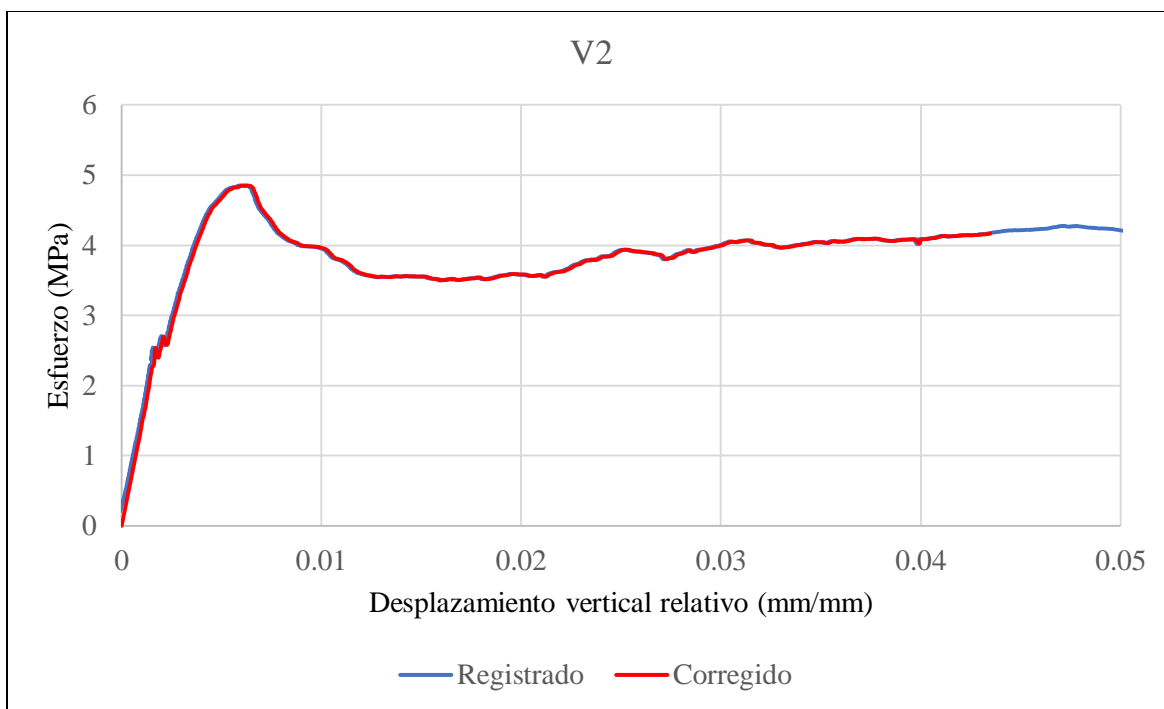
Fibras 4D;  $\rho = 0.0113$ ; dosificación =  $10 \frac{kg}{m^3}$ ;  $V_f = 0.12658$ ;  $f'_c = 49.975 MPa$



**Figura 4. 78.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-1979.



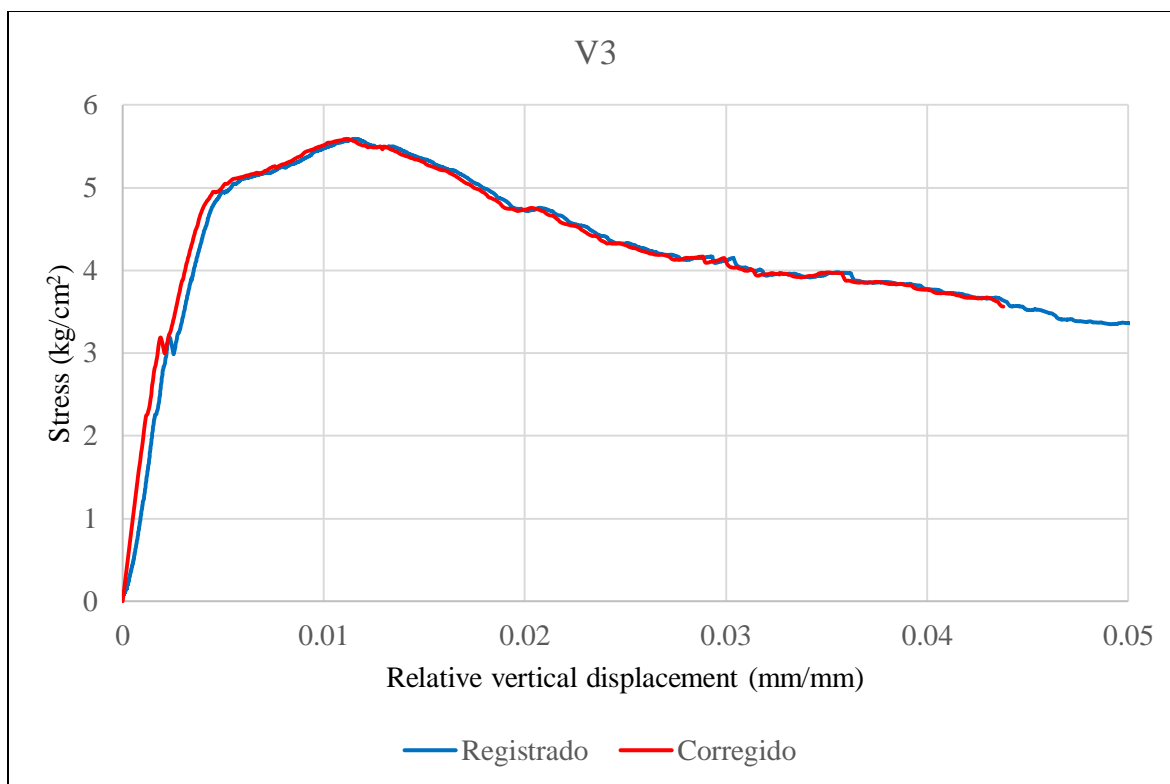
**Figura 4. 79.** - Viga V1-1979 después de llevarla a la falla vista de frente.



**Figura 4. 80.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-1979.



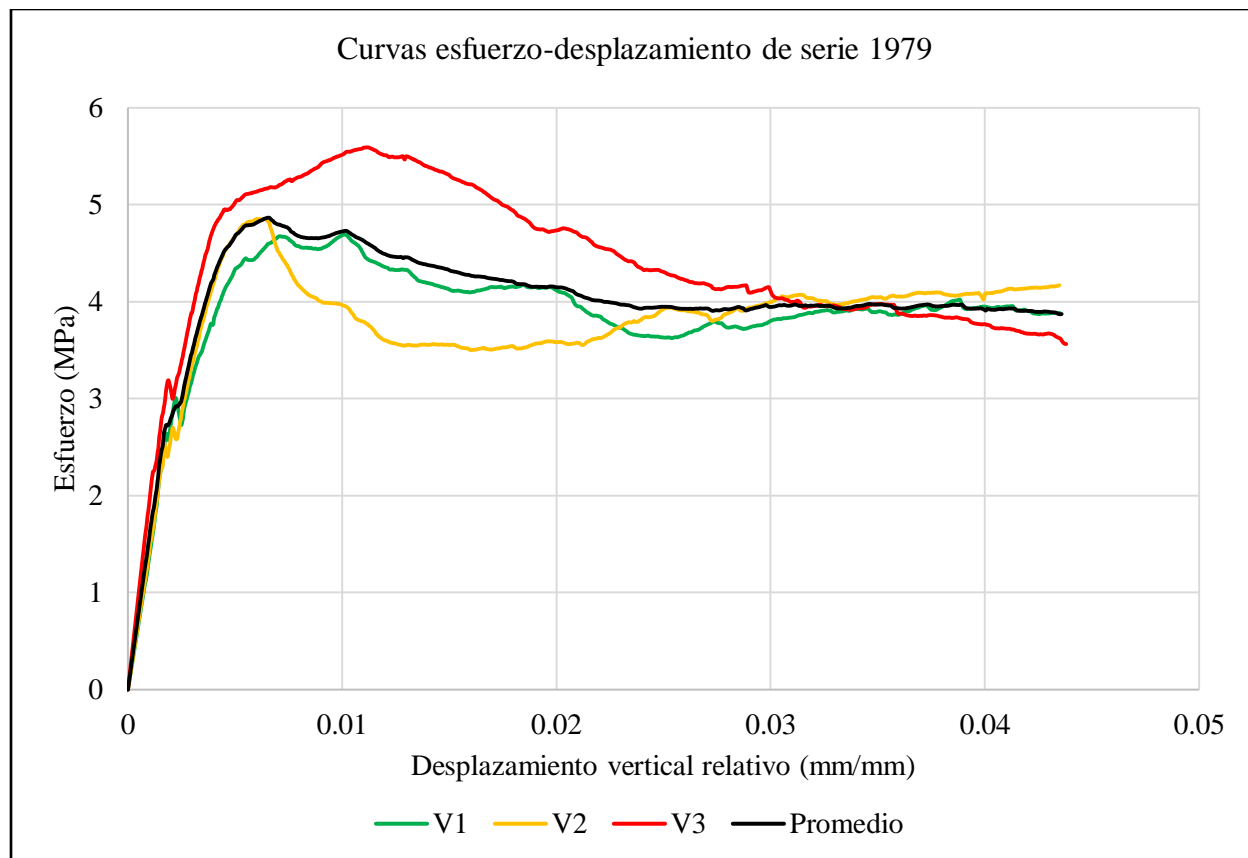
**Figura 4. 81.** - Viga V2-1979 después de llevarla a la falla vista de frente.



**Figura 4. 82.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-1979.



**Figura 4. 83.** - Viga V3-1979 después de llevarla a la falla vista de frente.

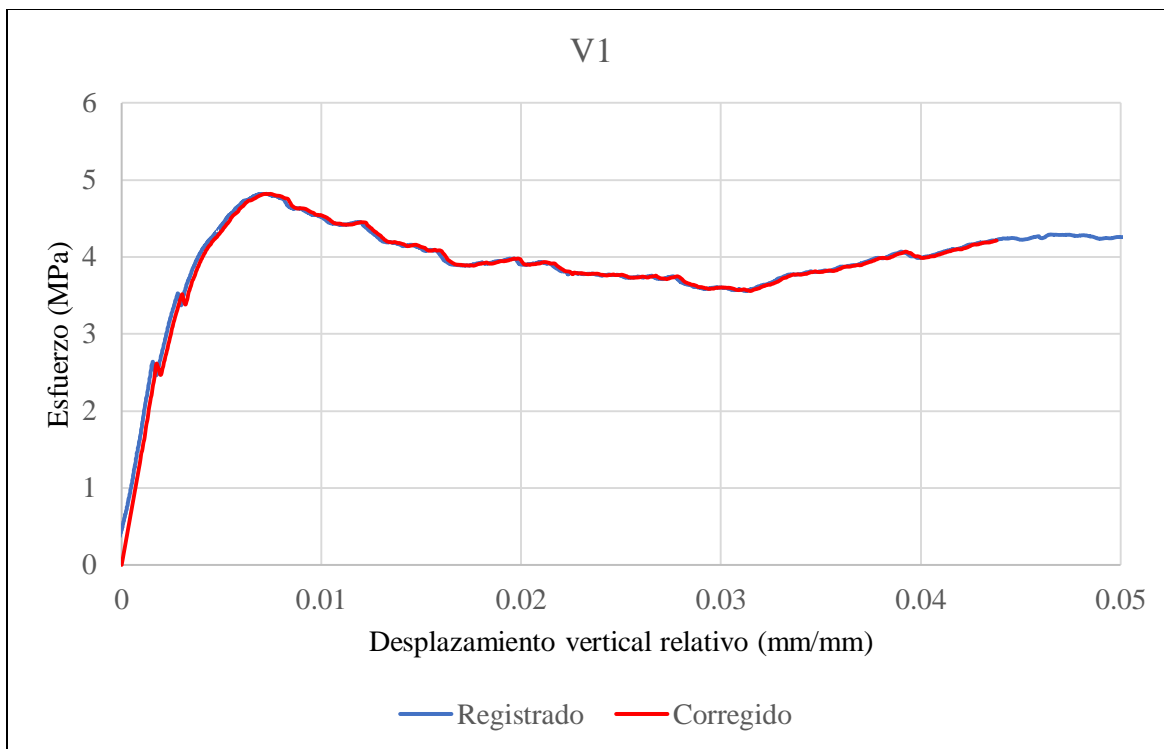


**Figura 4. 84.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 1979.

Las tres vigas exhibieron un comportamiento muy similar y experimentaron una falla por cortante, como se puede apreciar en las fotografías de los ensayos. Esta serie de pruebas incluyó refuerzo longitudinal con una cuantía del 0.0113 y refuerzo de fibras de acero 4D con una dosificación de  $10 \text{ kg/m}^3$ . Los niveles de esfuerzo alcanzados por estas muestras son superiores a los observados en los especímenes que contaban con fibras 4D y presentaban la misma relación de volumen, junto con una cuantía del 0.0056. Este incremento en los esfuerzos se debe al aporte adicional que proporcionan las barras de acero al esfuerzo cortante.

### **Serie 1996**

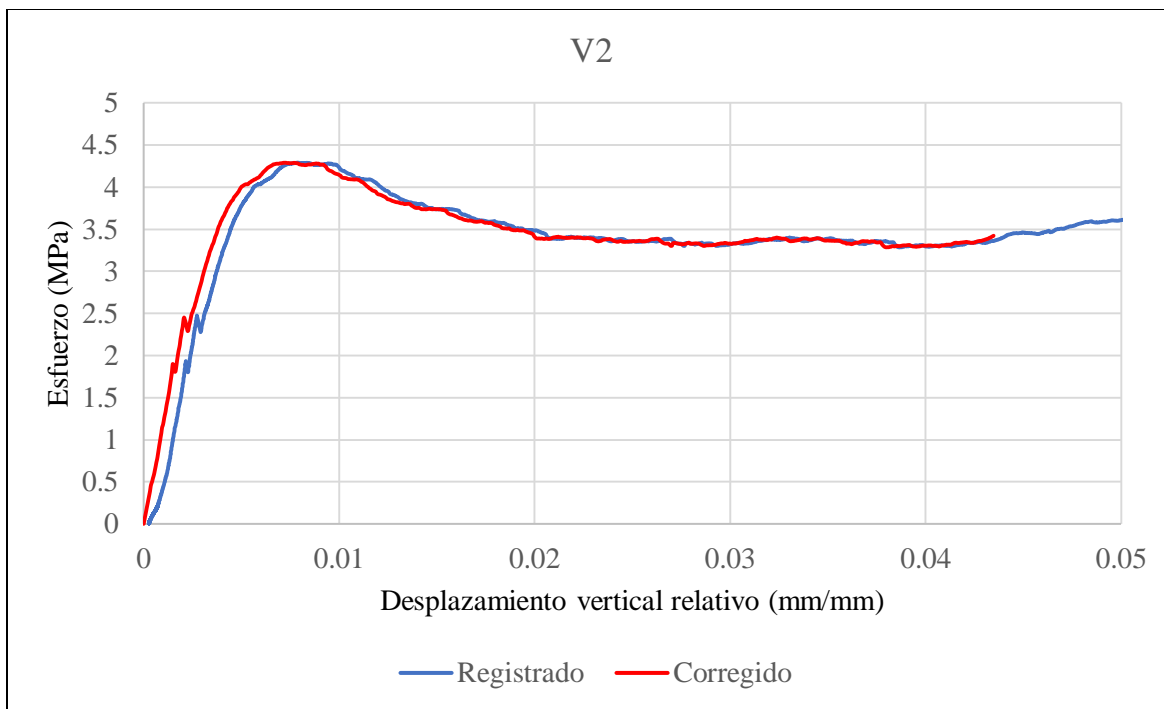
$$\text{Fibras 4D; } \rho = 0.0113; \text{ dosificación} = 20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; V_f = 0.25316; f'_c = 50.368 \text{ MPa}$$



**Figura 4. 85.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-1996.



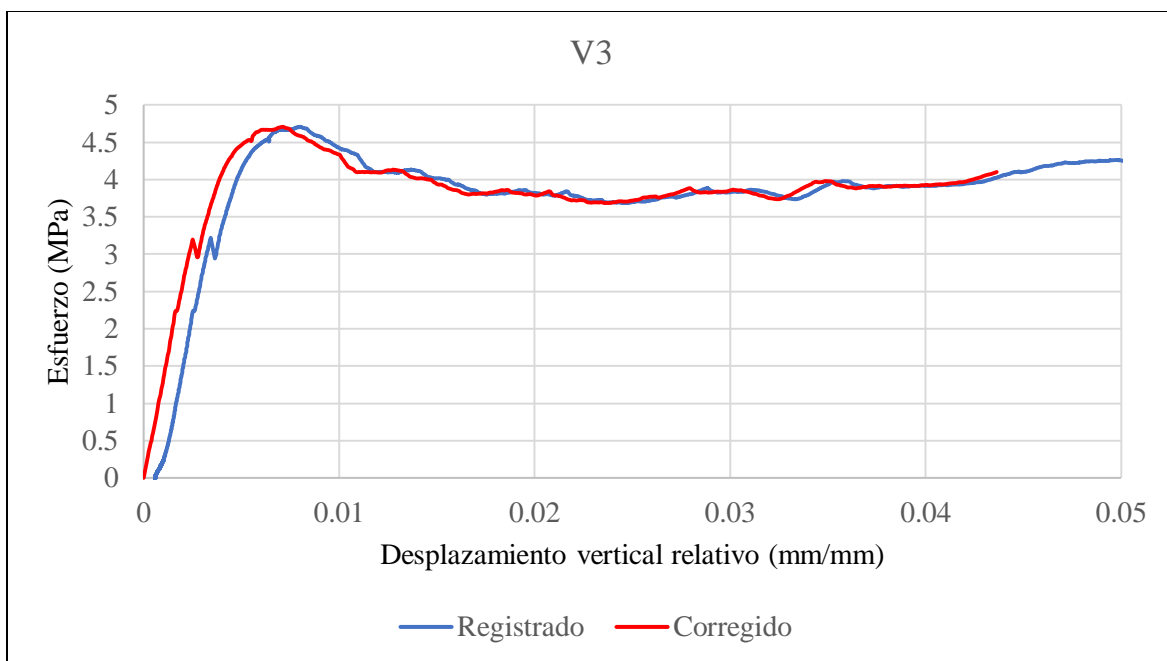
**Figura 4. 86.** - Viga V1-1996 después de llevarla a la falla con vista posterior. Foto tomada por Bibian I. Silva.



**Figura 4. 87.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-1996.



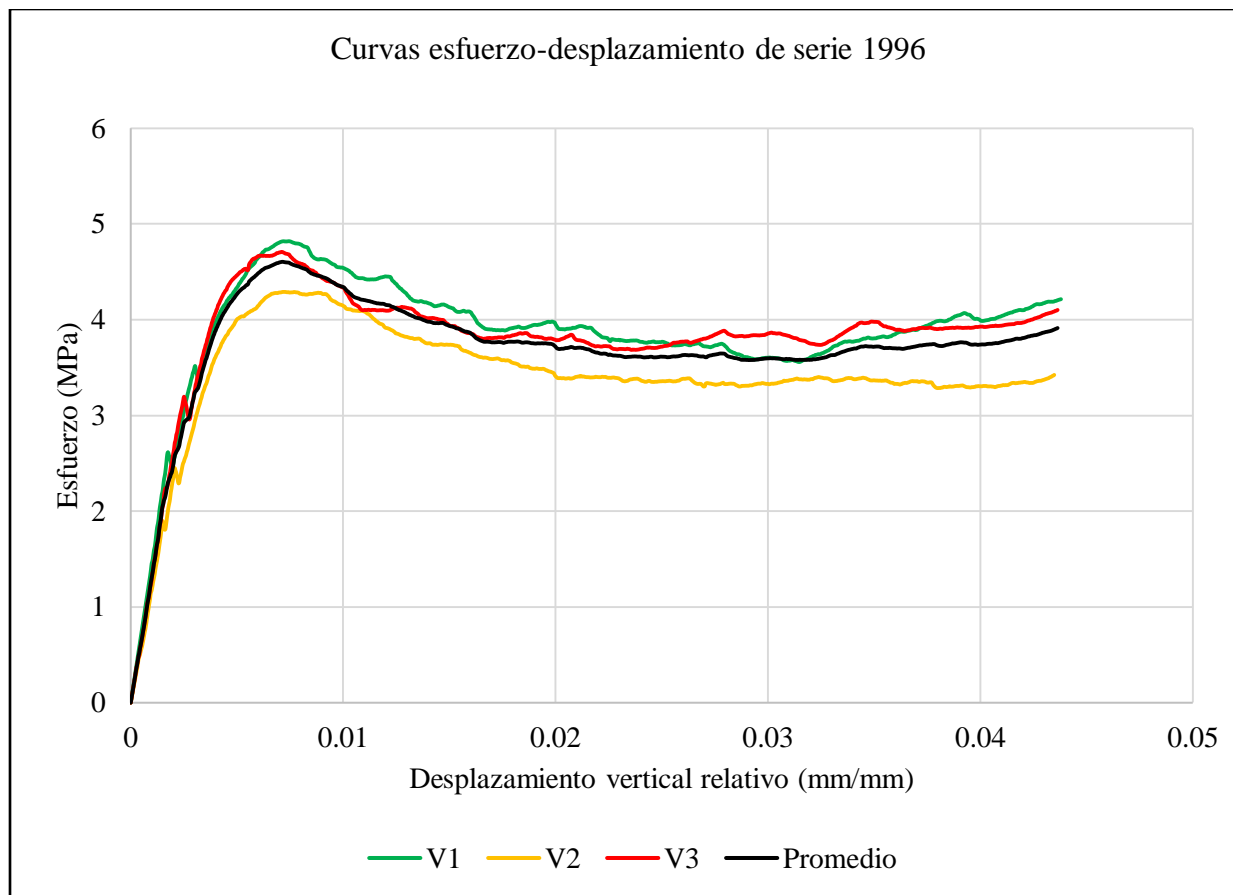
**Figura 4. 88.** - Viga V2-1996 después de llevarla a la falla con vista posterior. Foto tomada por Bibian I. Silva.



**Figura 4. 89.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-1996.



**Figura 4. 90.** - Viga V3-1996 después de llevarla a la falla vista de frente. Foto tomada por Bibian I. Silva.



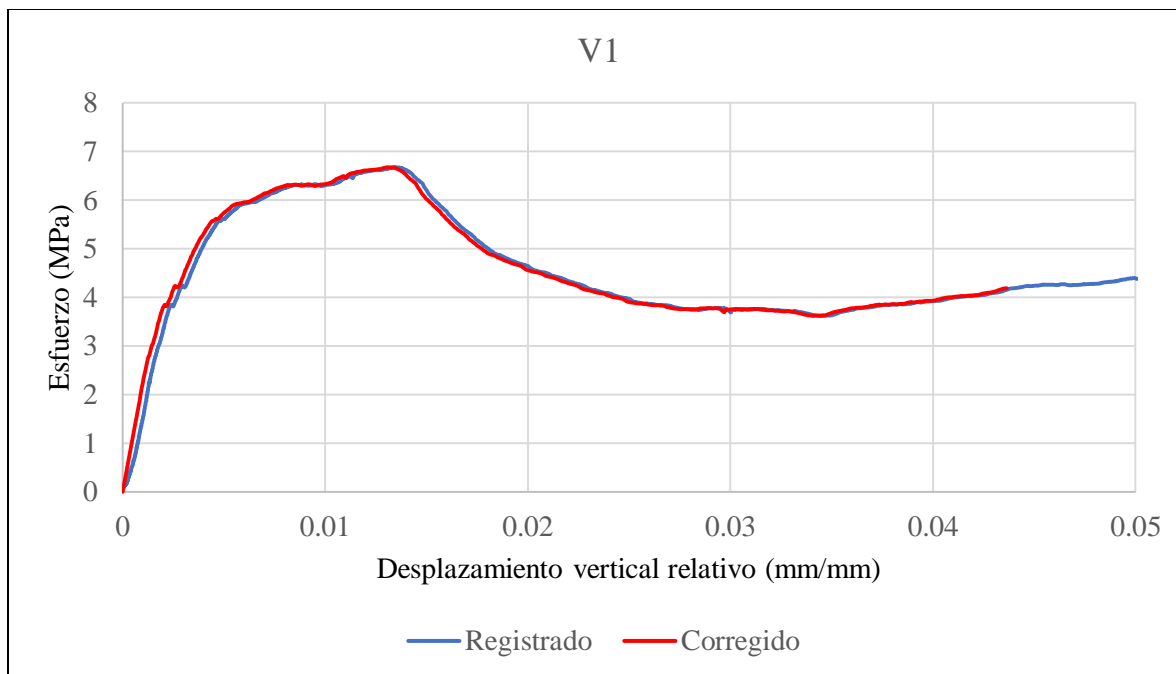
**Figura 4. 91.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 1996.

Las tres vigas mostraron un comportamiento muy parecido, y todas experimentaron una falla por cortante, tal como se evidencia en las fotografías de los ensayos. En esta serie de pruebas, se colocó un refuerzo longitudinal con una cuantía de 0.0113 y se añadieron fibras de acero 4D con una dosificación de  $20 \text{ kg/m}^3$ . Los esfuerzos promedio alcanzados por estas muestras son ligeramente superiores a los obtenidos en los especímenes que contaban con fibras 4D con la misma relación de volumen, pero con una menor cuantía de acero.

### Serie 2102

$$\text{Fibras 4D; } \rho = 0.0113; \text{ dosificación} = 40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; V_f = 0.50633; f'_c = 48.249 \text{ MPa}$$

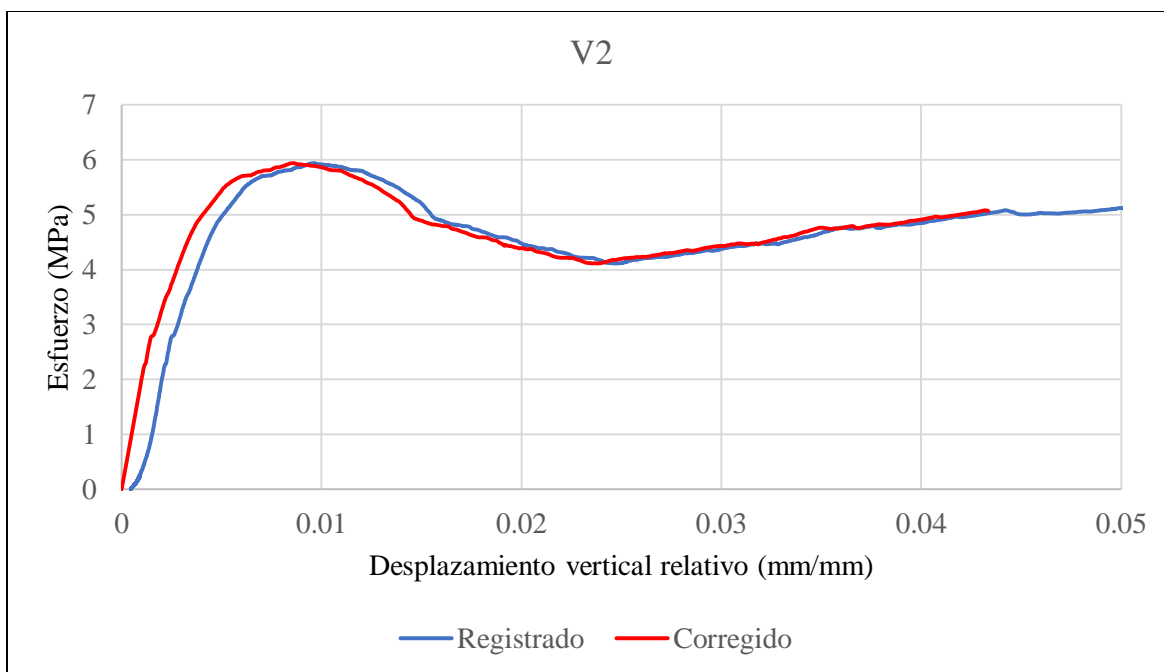




**Figura 4. 92.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-2102.



**Figura 4. 93.** - Viga V1-2102 después de llevarla a la falla vista de frente. Foto tomada por Bibian I. Silva.

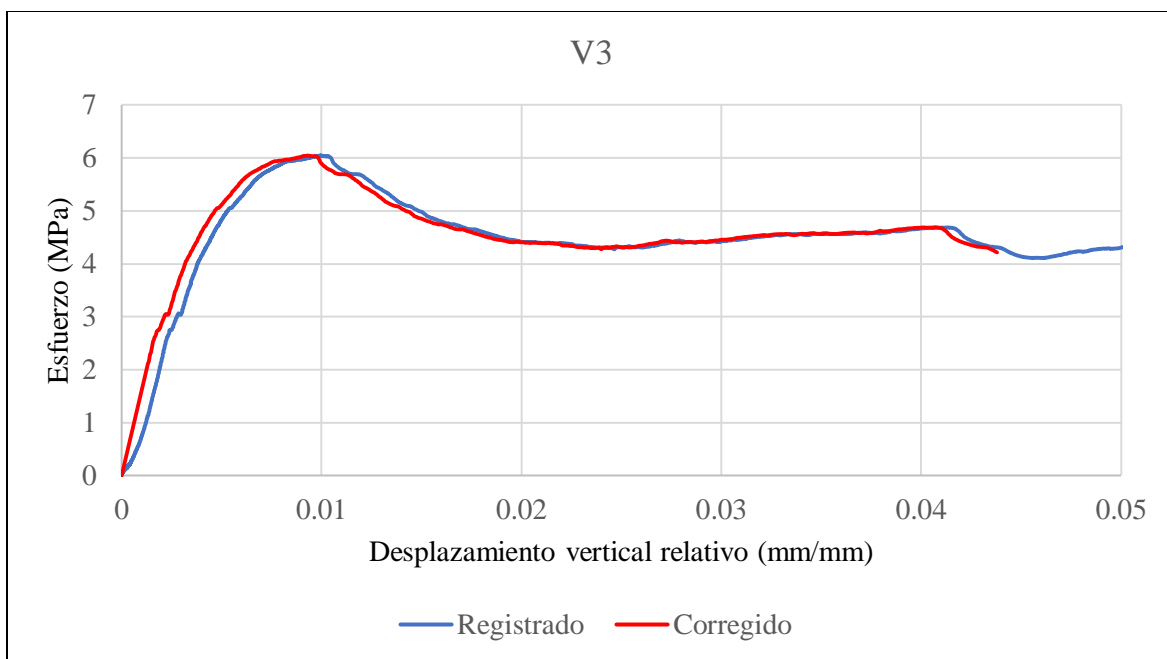


**Figura 4. 94.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-2102.



**Figura 4. 95.** - Viga V2-2102 después de llevarla a la falla vista de frente. Foto tomada por Bibian I.

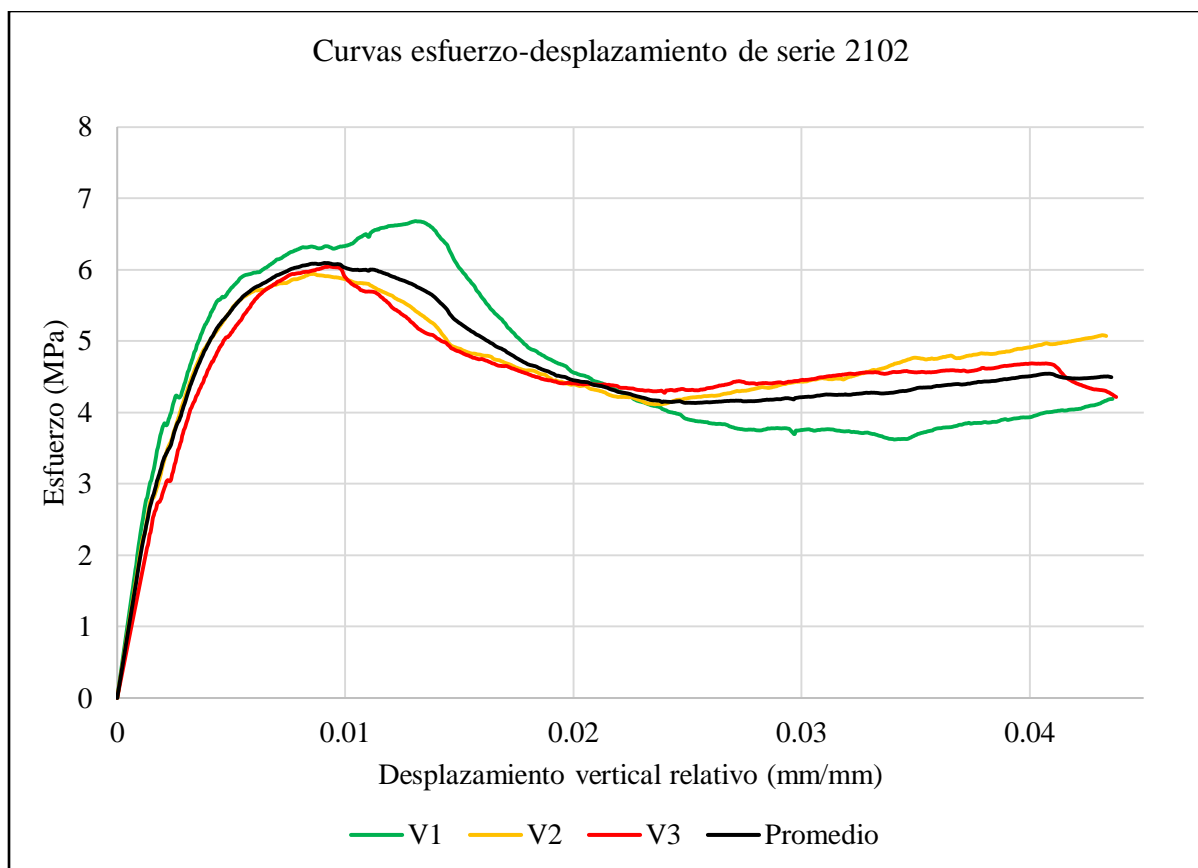
Silva.



**Figura 4. 96.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-2102.



**Figura 4. 97.** - Viga V2-2102 después de llevarla a la falla vista de frente. Foto tomada por Bibian I. Silva.

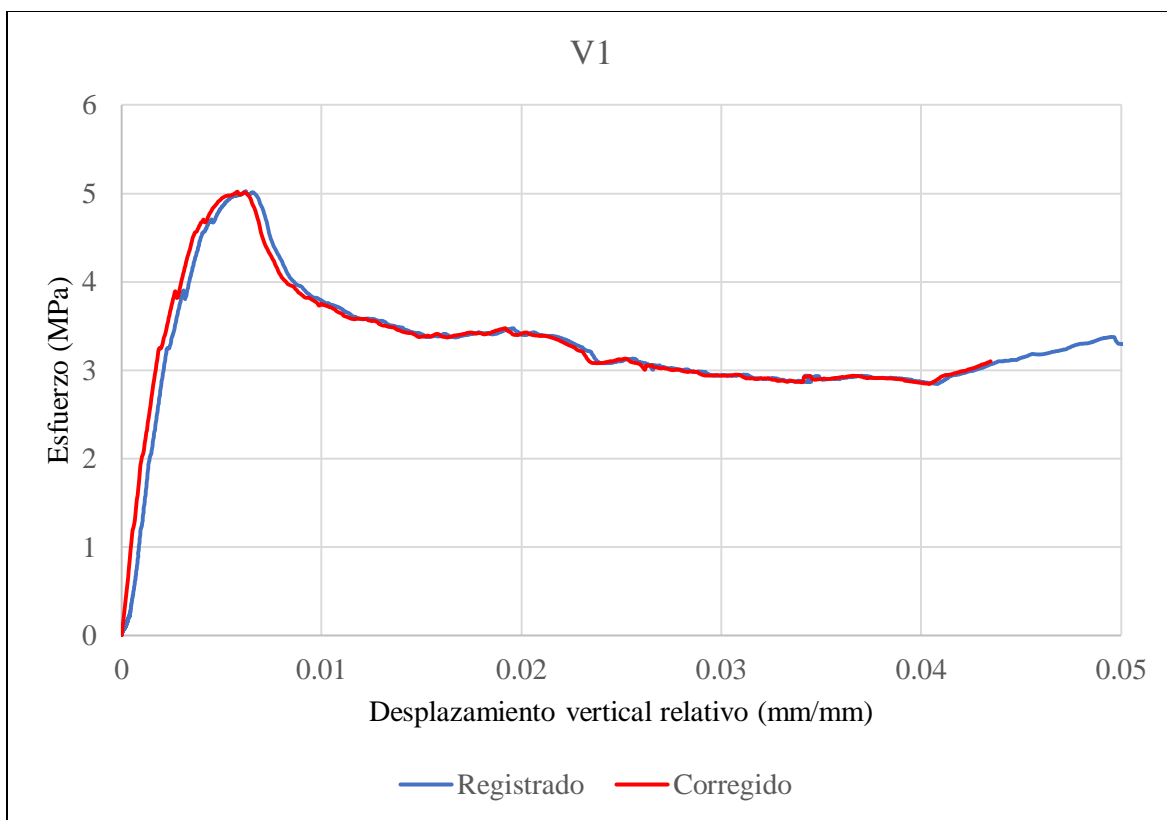


**Figura 4. 98.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas del serie 2102.

Las tres vigas exhibieron un comportamiento muy similar y experimentaron una falla por cortante, como se puede observar en las fotografías de los ensayos. En esta serie de pruebas, se colocó un refuerzo longitudinal con una cuantía de 0.0113 y se añadieron fibras de acero 4D con una dosificación de  $40 \text{ kg/m}^3$ . Los esfuerzos promedio alcanzados por estas muestras superaron a los obtenidos en los especímenes que contaban con fibras 4D y la misma relación de volumen, pero con una cuantía de acero inferior, así como a todas las demás series presentadas anteriormente.

### **Serie 2212**

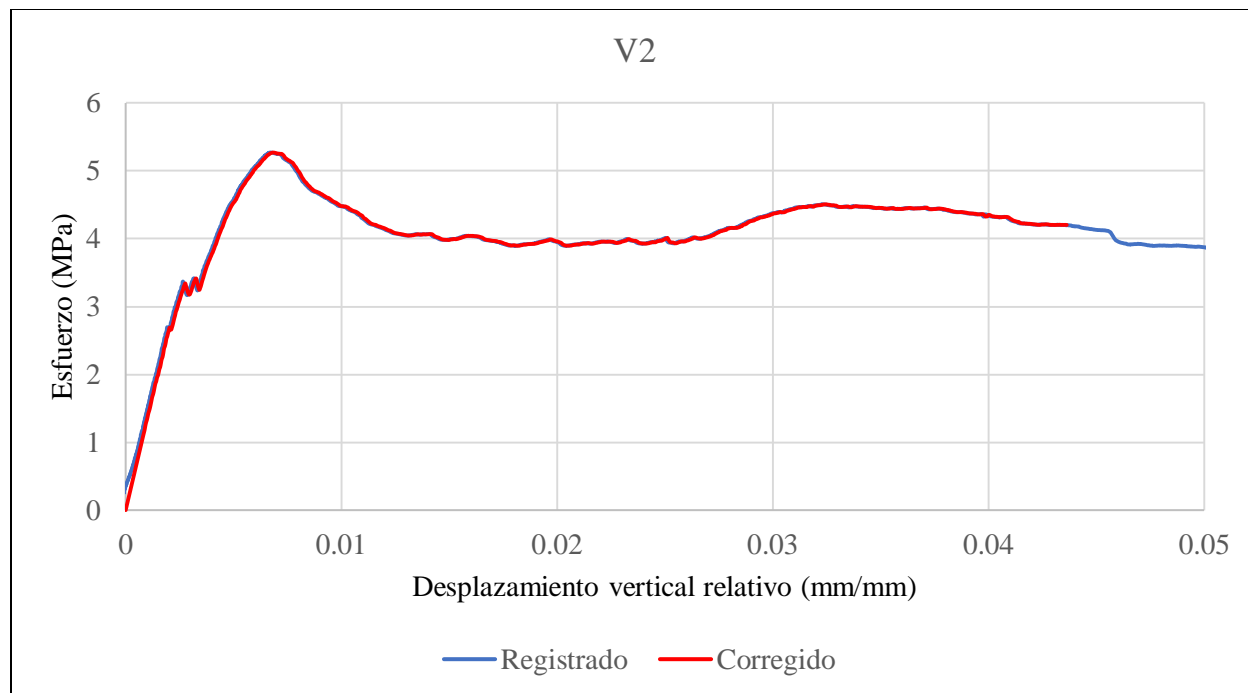
$$\text{Fibras 3D}; \rho = 0.0113; \text{dosificación} = 10 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; V_f = 0.12658; f'_c = 50.289 \text{ MPa}$$



**Figura 4. 99.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-2212.



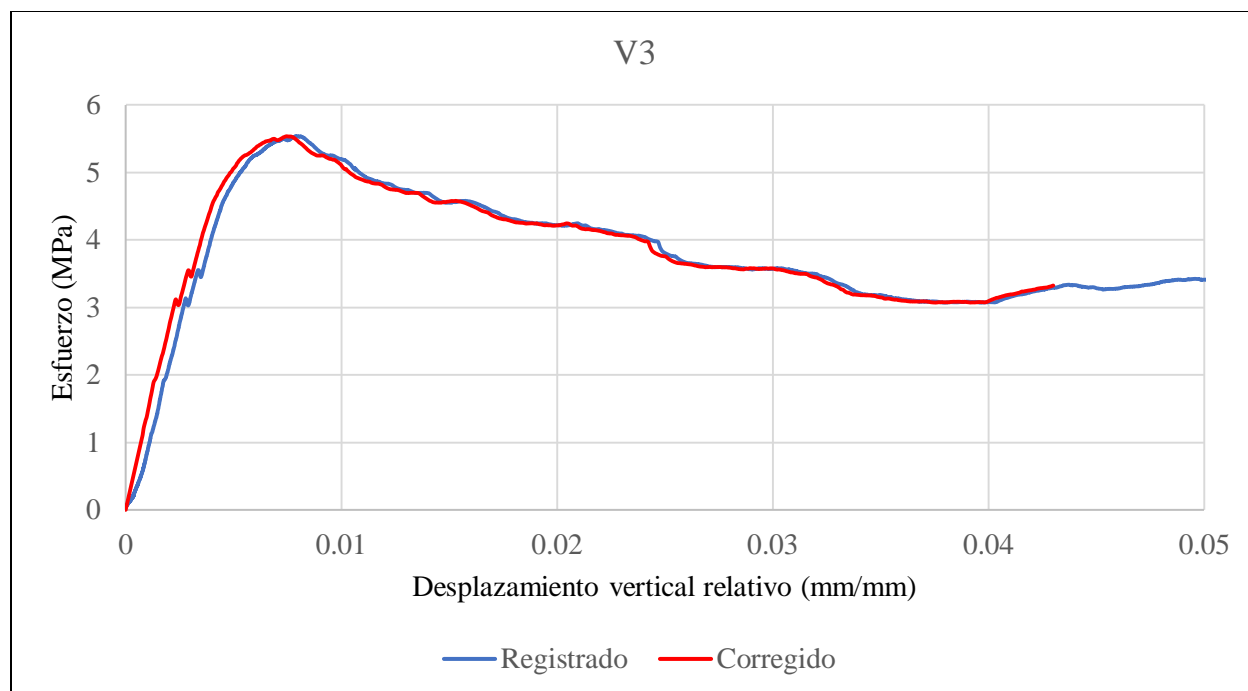
**Figura 4. 100.** – Viga V1-2212 después de llevarla a la falla vista de frente. Foto tomada por Bibian I.



**Figura 4. 101.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-2212.



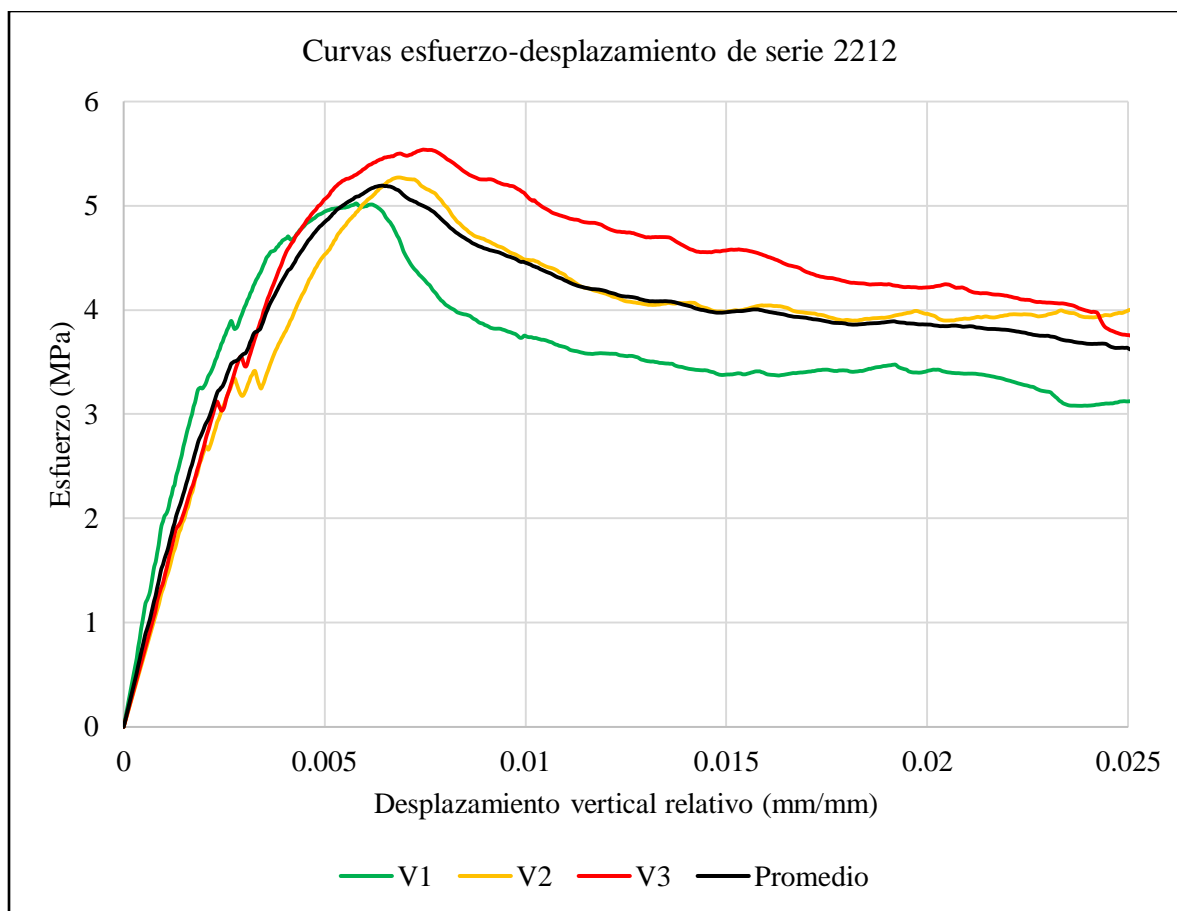
**Figura 4. 102.** - Viga V2-2212 después de llevarla a la falla vista de frente. Foto tomada por Bibian I.



**Figura 4. 103.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-2212.



**Figura 4. 104.** - Viga V3-2212 después de llevarla a la falla vista de frente.



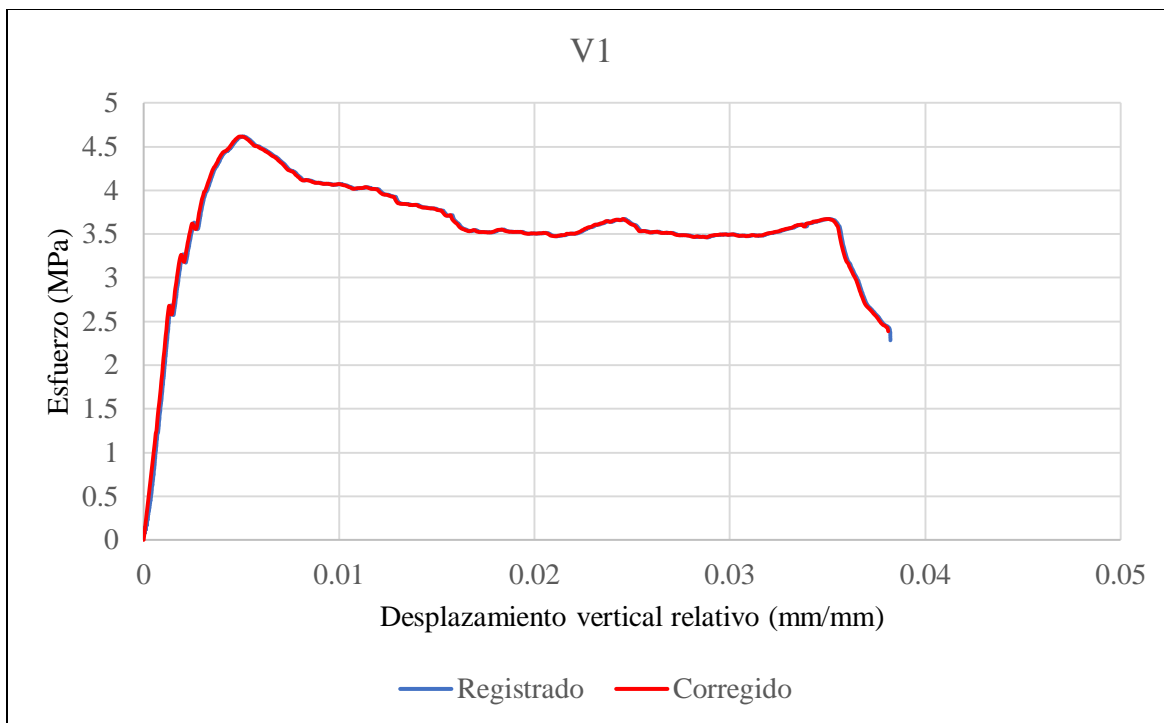
**Figura 4. 105.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 2212.

Las tres vigas exhibieron un comportamiento notablemente consistente y experimentaron una falla por cortante, como se puede apreciar en las fotografías de los ensayos. En esta serie de pruebas, se colocó un refuerzo longitudinal con una cuantía de 0.0113 y se incorporaron fibras de acero en una configuración 3D con una dosificación de  $10 \text{ kg/m}^3$ . Los esfuerzos promedio alcanzados por estas probetas resultaron ser superiores a los obtenidos en los especímenes que contaban con fibras 3D y la misma relación de volumen, pero con una cuantía de acero menor.

### **Serie 2230**

$$\text{Fibras 3D; } \rho = 0.0113; \text{ dosificación} = 20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; V_f = 0.25316; f'_c = 50.525 \text{ MPa}$$

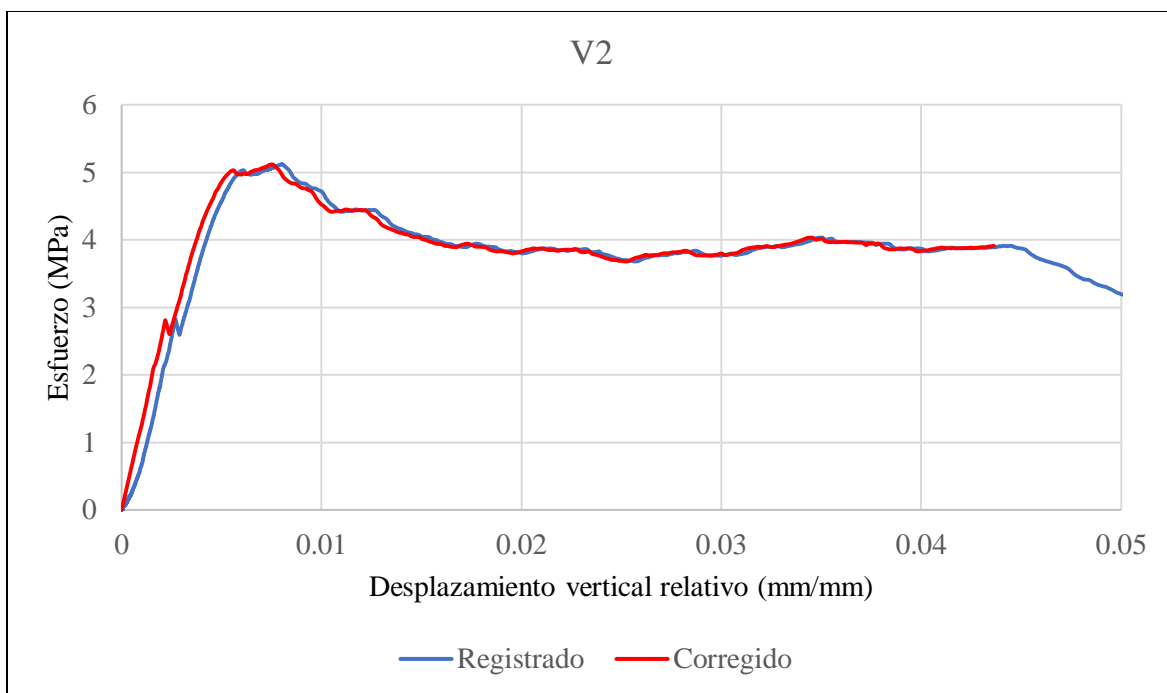




**Figura 4. 106.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-2230.



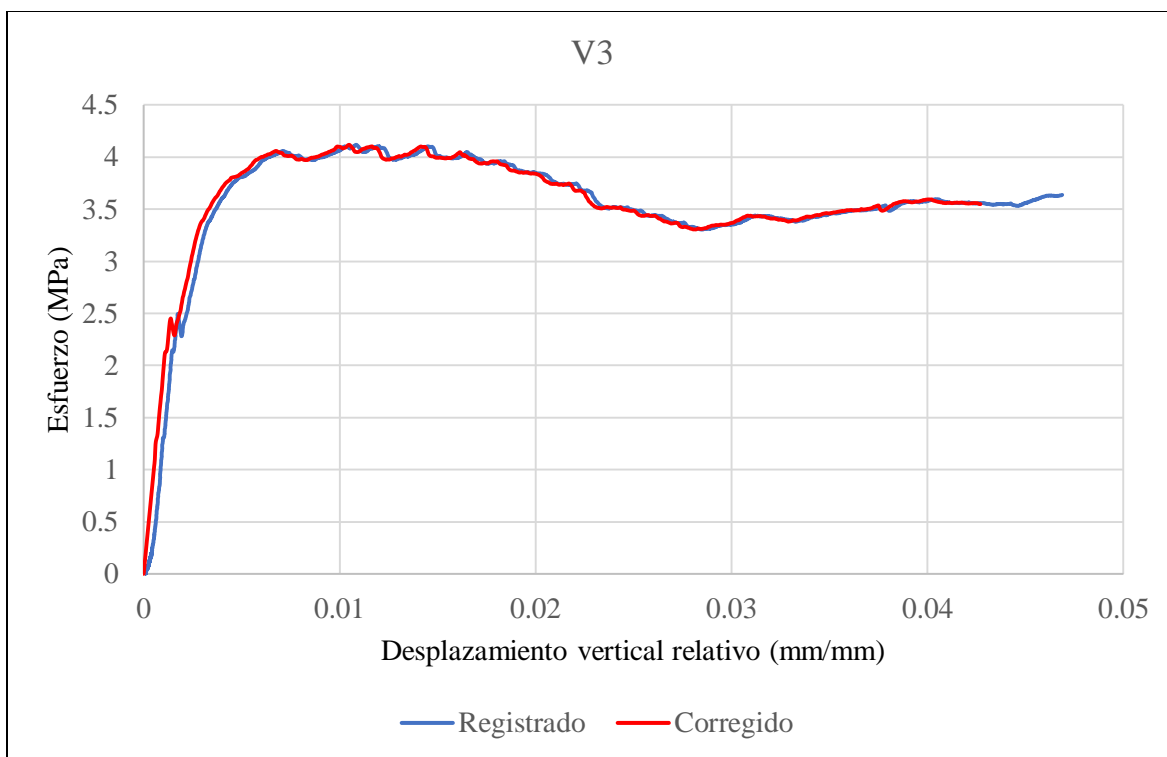
**Figura 4. 107.** - Viga V1-2230 después de llevarla a la falla con vista posterior. Foto tomada por Bibian I. Silva.



**Figura 4. 108.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-2230.



**Figura 4. 109.** - Viga V2-2230 después de llevarla a la falla con vista posterior. Foto tomada por Bibian I. Silva.

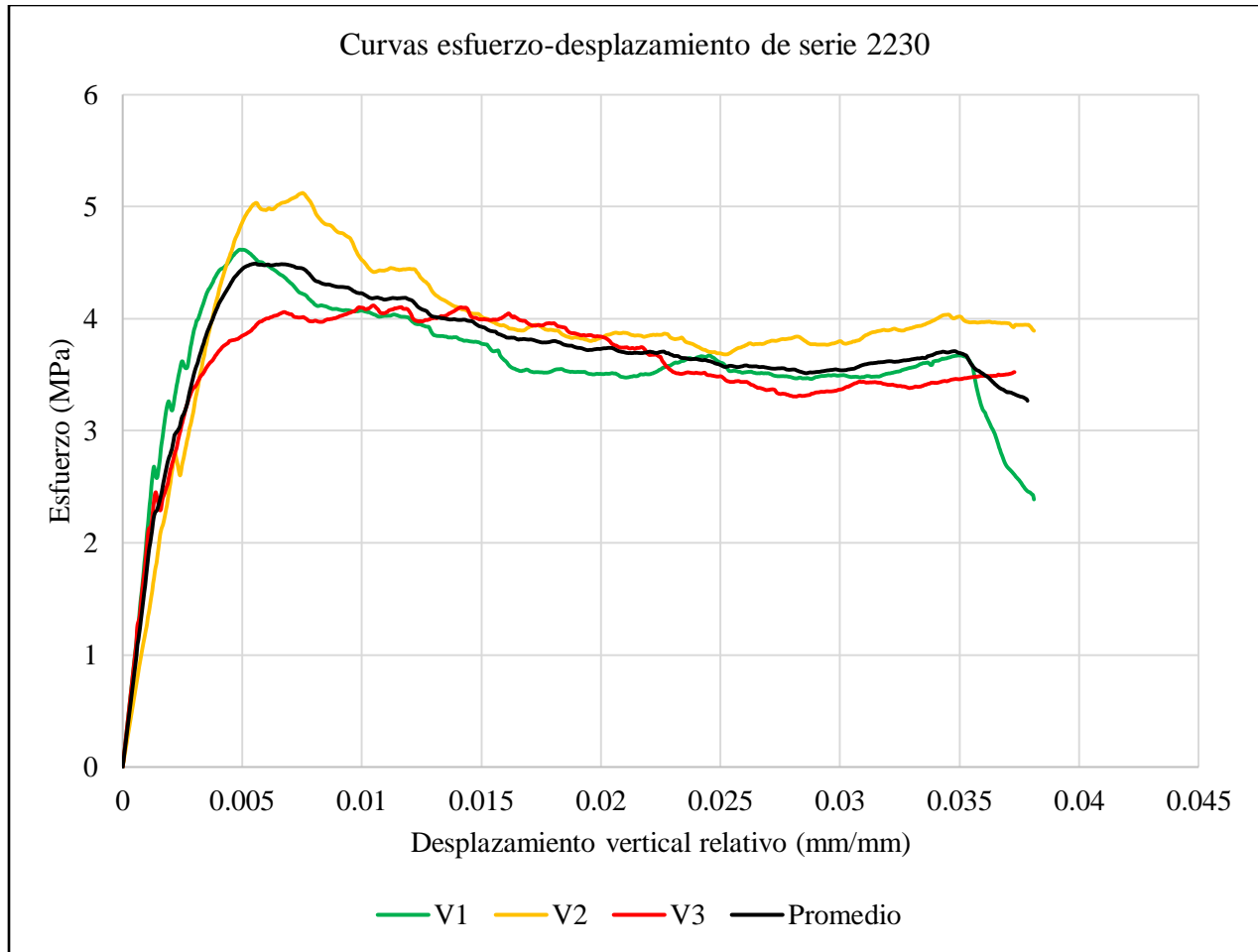


**Figura 4. 110.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-2230.



**Figura 4. 111.** - Viga V1-2230 después de llevarla a la falla con vista frontal. Foto tomada por Bibian I.

Silva.

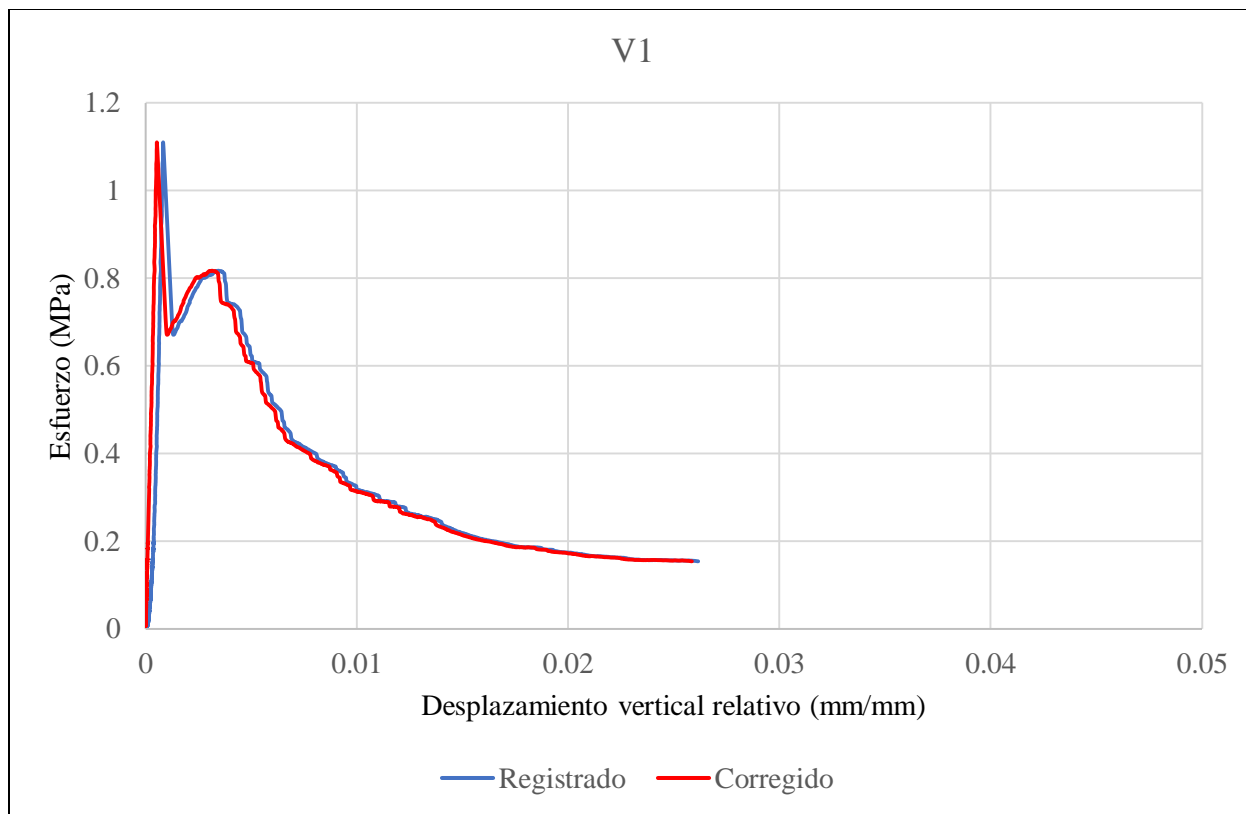


**Figura 4. 112.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 2230.

Las tres vigas mostraron un comportamiento altamente homogéneo y experimentaron una falla por cortante, como se puede apreciar en las imágenes de los ensayos. En esta serie en particular, se empleó un refuerzo longitudinal con una cuantía del 0.0113 y se incluyeron fibras de acero en una configuración 3D con una dosificación de  $20 \text{ kg/m}^3$ . Los esfuerzos promedio obtenidos por estas muestras resultaron ser superiores a los observados en los especímenes que contaban con fibras 3D y la misma relación de volumen, aunque con una cuantía de acero menor.

#### **Serie 2246**

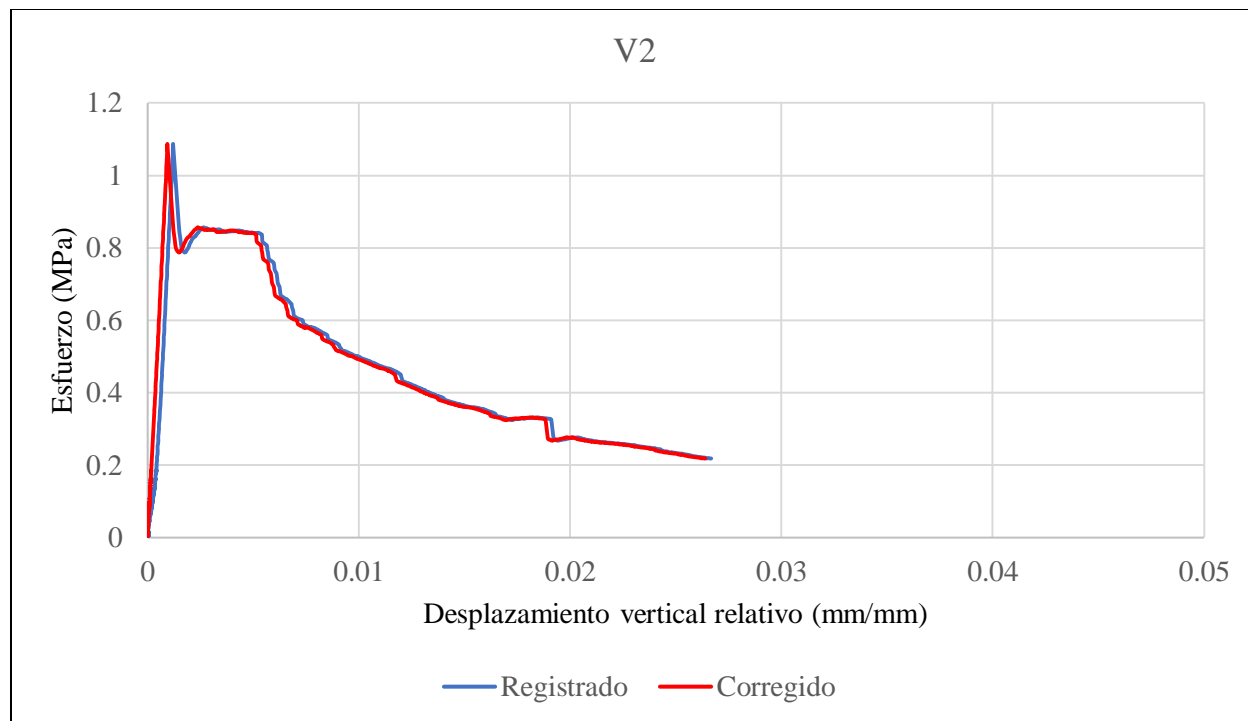
$$\text{Fibras 4D; } \rho = 0.0; \text{ dosificación} = 20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; V_f = 0.25316; f'_c = 48.642 \text{ MPa}$$



**Figura 4. 113.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-2246.



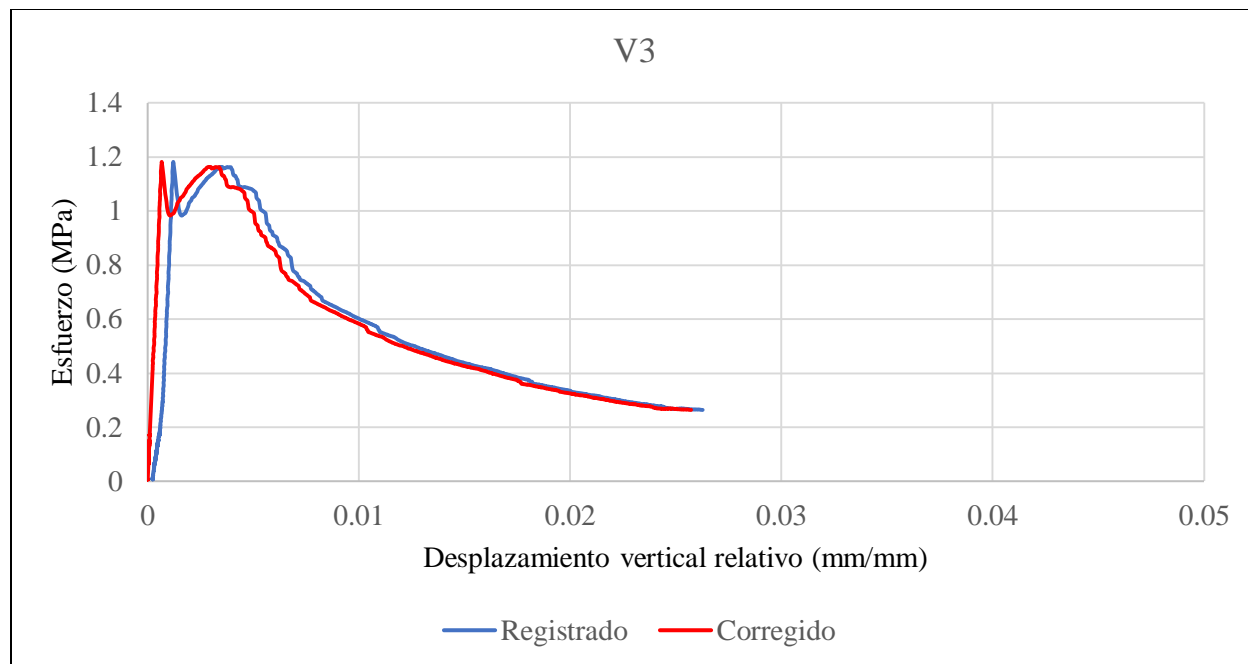
**Figura 4. 114.** - Viga V1-2246 después de llevarla a la falla con vista frontal. Foto tomada por Bibian I. Silva.



**Figura 4. 115.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-2246.



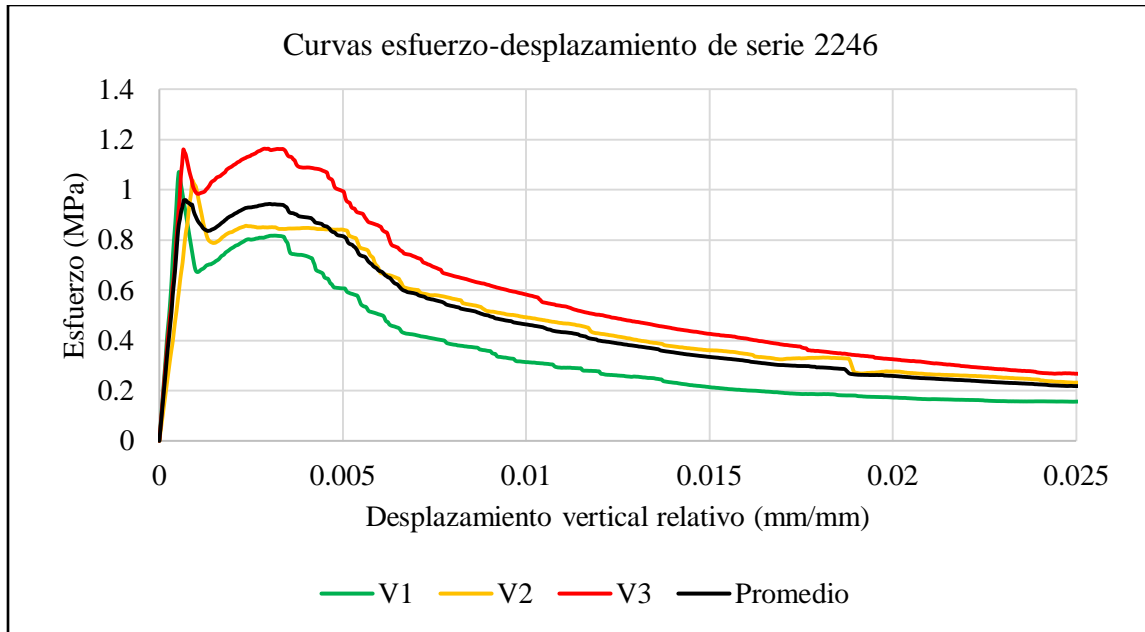
**Figura 4. 116.** - Viga V2-2246 después de llevarla a la falla con vista posterior. Foto tomada por Bibian I. Silva.



**Figura 4. 117.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-2246.



**Figura 4. 118.** - Viga V3-2246 después de llevarla a la falla con vista frontal. Foto tomada por Bibian I. Silva.



**Figura 4. 119.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 2246.

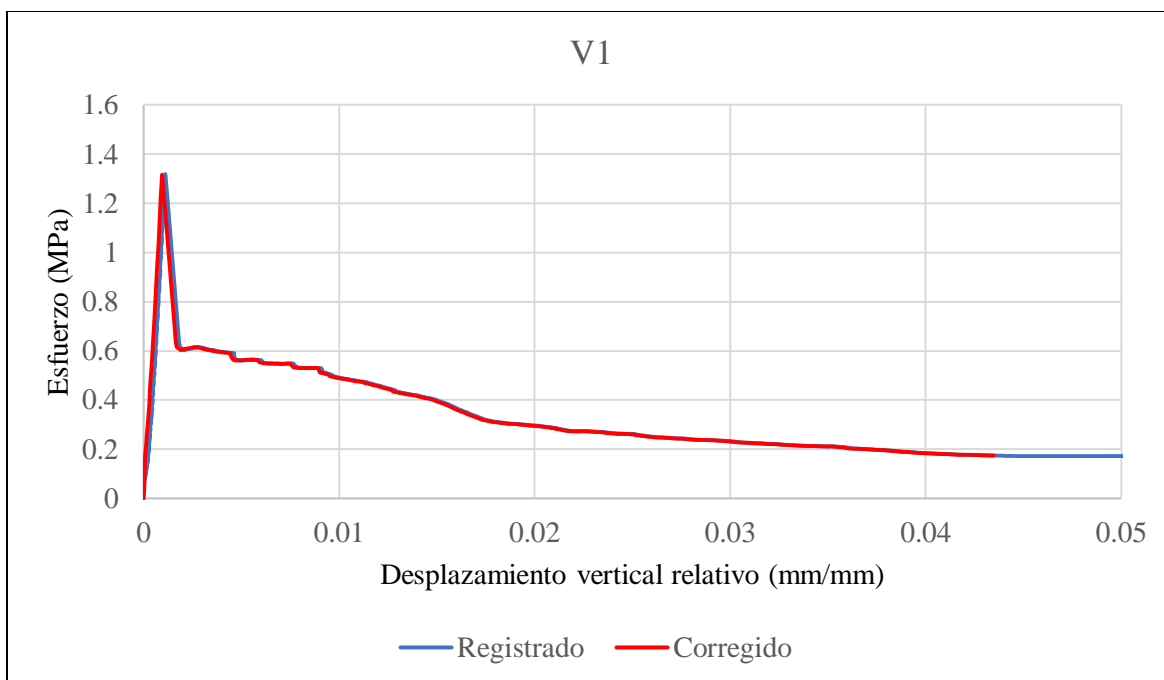
El comportamiento de las tres vigas fue notablemente uniforme. Todas experimentaron una falla por flexión, como se aprecia tanto en las imágenes de los ensayos como en las curvas, donde se evidencia que el esfuerzo disminuye abruptamente tras la falla. En esta serie en particular, no se utilizó refuerzo longitudinal, pero se incorporaron fibras de acero 4D con una dosificación de  $20 \text{ kg/m}^3$ .

La ausencia de refuerzo longitudinal resultó en una falta de capacidad para resistir los esfuerzos de tensión en la parte central del elemento, a pesar de que se trataba de una viga con peraltada. Como consecuencia, la viga cedió a la flexión, revelando que el refuerzo de fibras de acero y el peralte de concreto no fueron suficientes para mantener la integridad estructural bajo las cargas aplicadas.

### **Serie 2247**

Descripción: *Fibras 3D*;  $\rho = 0.0$ ; *dosificación* =  $20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;  $V_f = 0.25316$ ;  $f'_c = 48.014 \text{ MPa}$



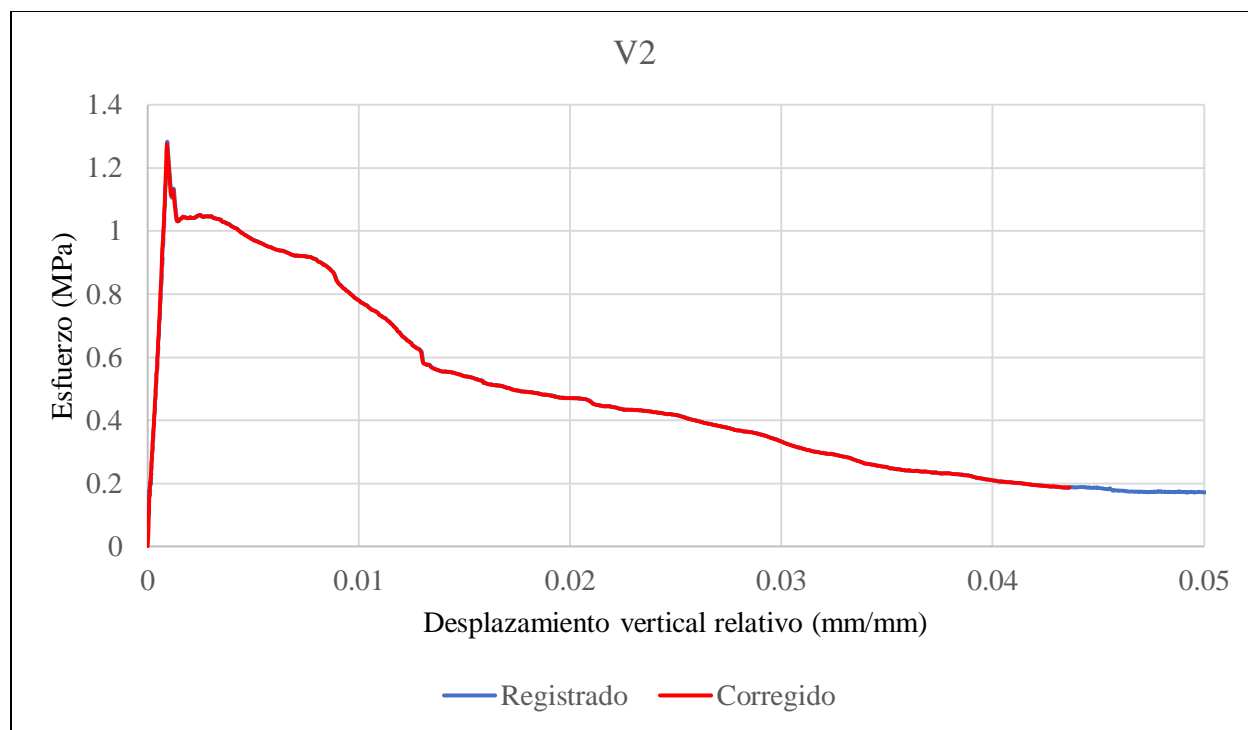


**Figura 4. 120.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-2247.



**Figura 4. 121.** - Viga V1-2247 después de llevarla a la falla con vista frontal. Foto tomada por Bibian I.

Silva.



**Figura 4. 122.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-2247.

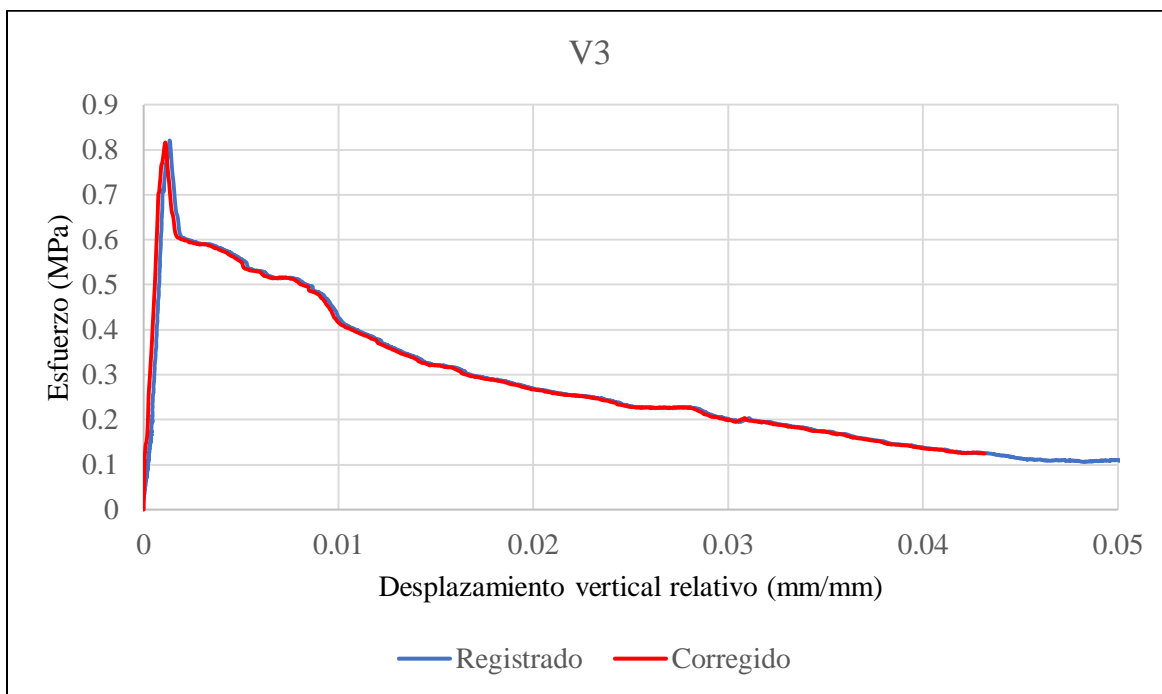


**Figura 4. 123.** - Viga V1-2247 después de llevarla a la falla con vista posterior. Foto tomada por Bibian

I. Silva.



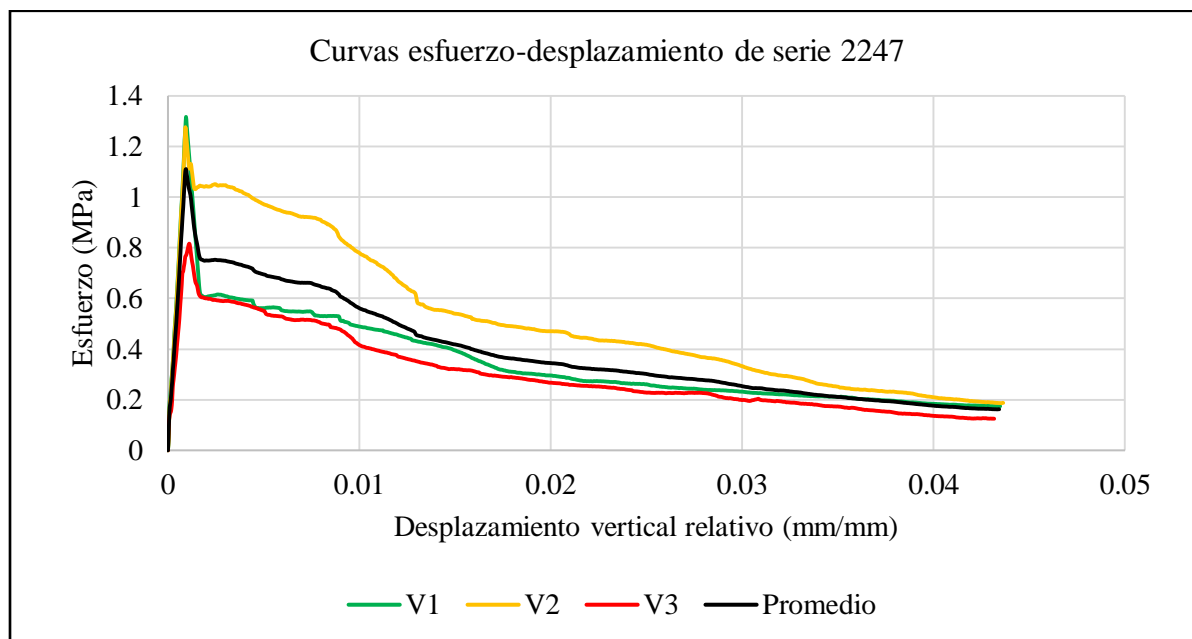
**Figura 4. 124.**– Detalle de falla de viga V2-2247 después de llevarla a la falla. Foto tomada por Bibian I. Silva.



**Figura 4. 125.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-2247.



**Figura 4. 126.** – Viga V3-2247 después de llevarla a la falla con vista frontal. Foto tomada por Bibian I. Silva.



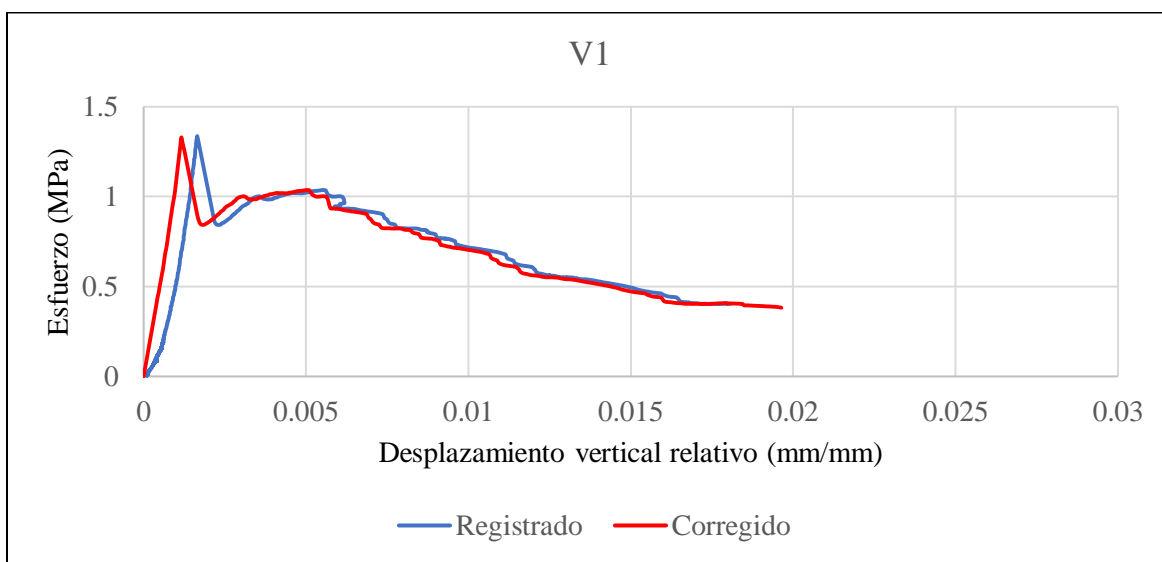
**Figura 4. 127.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 2247.

El comportamiento de las tres vigas fue altamente uniforme. Todas experimentaron una falla por flexión, como se evidencia tanto en las imágenes de los ensayos como en los gráficos, donde se aprecia una brusca disminución del esfuerzo después de la falla. En este caso, las vigas carecían de refuerzo longitudinal, pero estaban provistas de fibras de acero en una configuración 3D con una dosificación de  $20 \text{ kg/m}^3$ .

Es notorio que las diferencias en los esfuerzos desarrollados en estas vigas no son significativamente distintas de los registrados en las vigas de la serie 2246. Por lo tanto, se puede concluir que la variación en la forma no tuvo un impacto sustancial en el comportamiento de las vigas ante la flexión. No obstante, es relevante destacar que en la serie 2246 se alcanzaron esfuerzos mayores después de la falla, lo que indica una mayor ductilidad de los elementos en comparación con los ensayados en esta serie.

#### **Serie 2429**

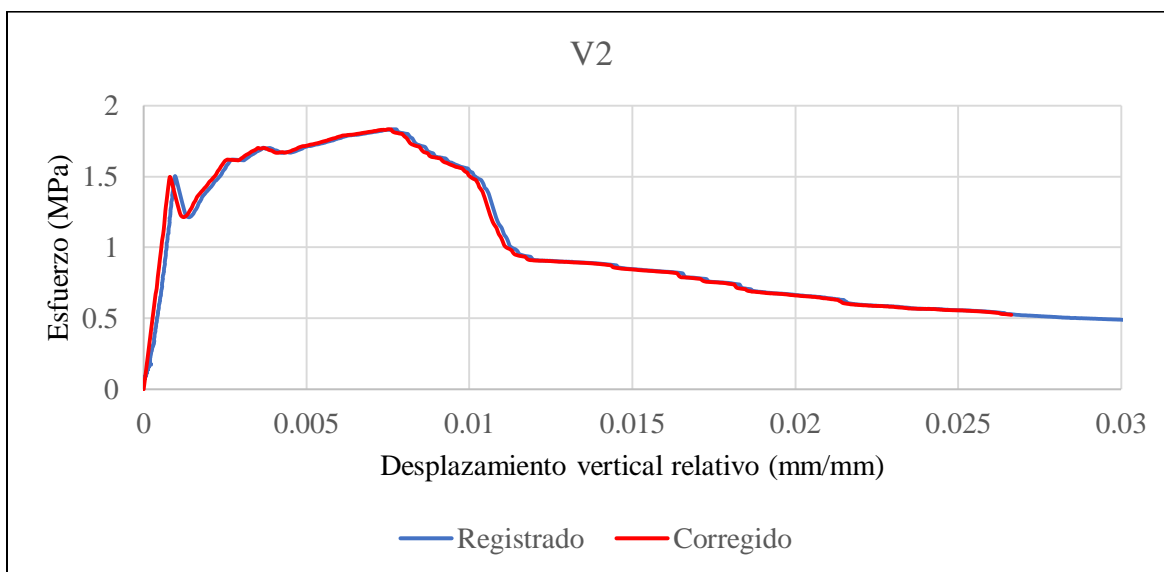
Descripción: *Fibras 5D*;  $\rho = 0.0$ ; dosificación =  $20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;  $V_f = 0.25316$ ;  $f'_c = 48.014 \text{ MPa}$



**Figura 4. 128.**– Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-2429.



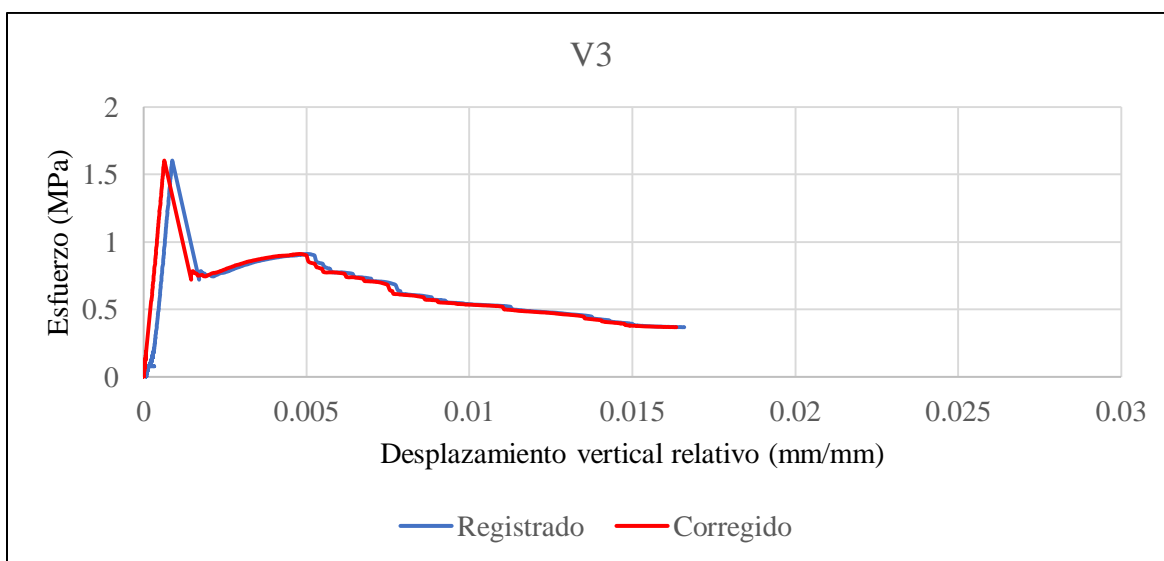
**Figura 4. 129.**– Viga V1-2429 después de llevarla a la falla con vista frontal.



**Figura 4. 130.**– Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-2429.



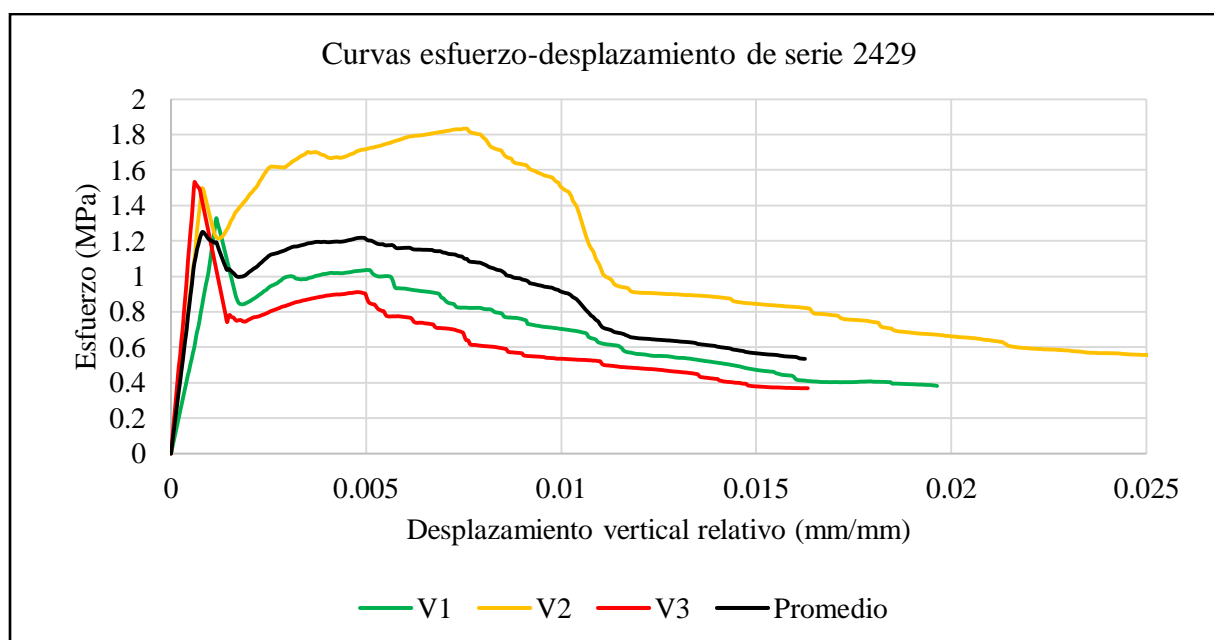
**Figura 4. 131.**– Viga V2-2429 después de llevarla a la falla con vista frontal.



**Figura 4. 132.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-2429.



**Figura 4. 133.** – Viga V2-2429 después de llevarla a la falla con vista frontal.



**Figura 4. 134.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 2429.

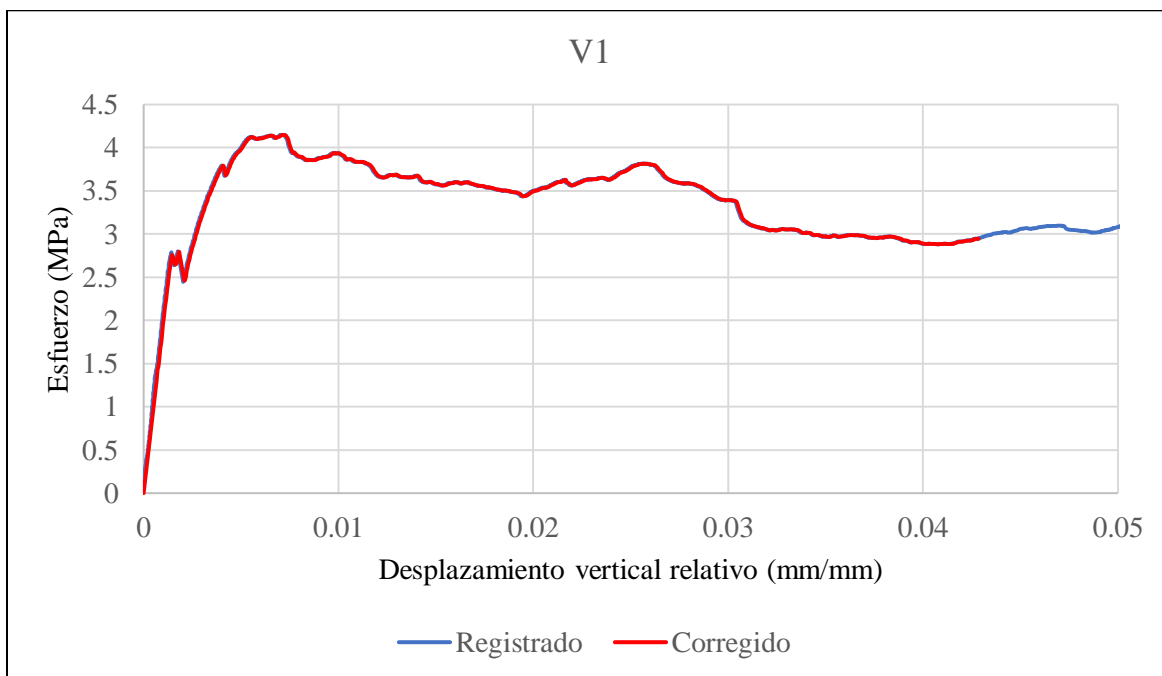


El comportamiento de las tres vigas resultó muy parecido. Todas ellas experimentaron una falla por flexión, como se puede apreciar tanto en las imágenes de los ensayos como en las curvas, donde se observa una abrupta disminución del esfuerzo después de la falla. En este serie en particular, no se incluyó refuerzo longitudinal, y se incorporaron fibras de acero en una configuración 5D con una dosificación de  $20 \text{ kg/m}^3$ .

Es evidente que los esfuerzos registrados en esta serie son ligeramente superiores a los observados en las series 2247 y 2246. Esto resalta la mayor ductilidad de los elementos, ya que los esfuerzos alcanzados después de la falla son mayores en este caso en particular, lo cual sugiere una mejor capacidad para absorber la deformación y mantener la integridad estructural.

#### **Serie 2441**

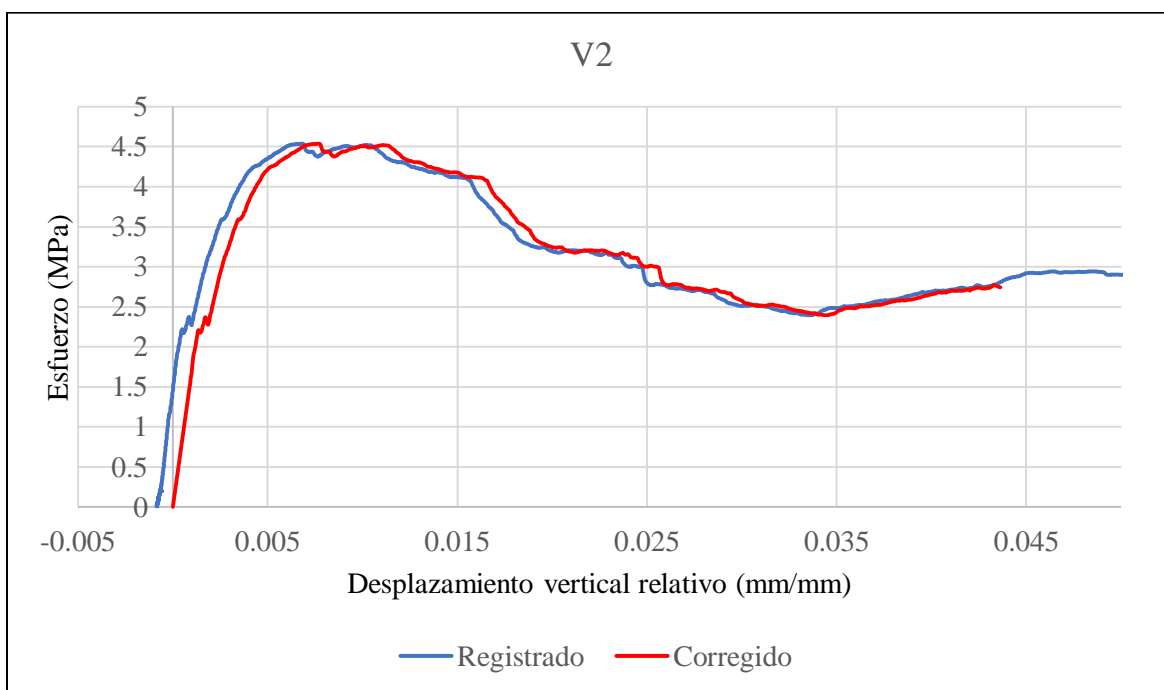
Descripción: *Fibras 3D*;  $\rho = 0.0056$ ; dosificación =  $10 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;  $V_f = 0.126$ ;  $f'_c = 51.23 \text{ MPa}$



**Figura 4. 135.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-2441.



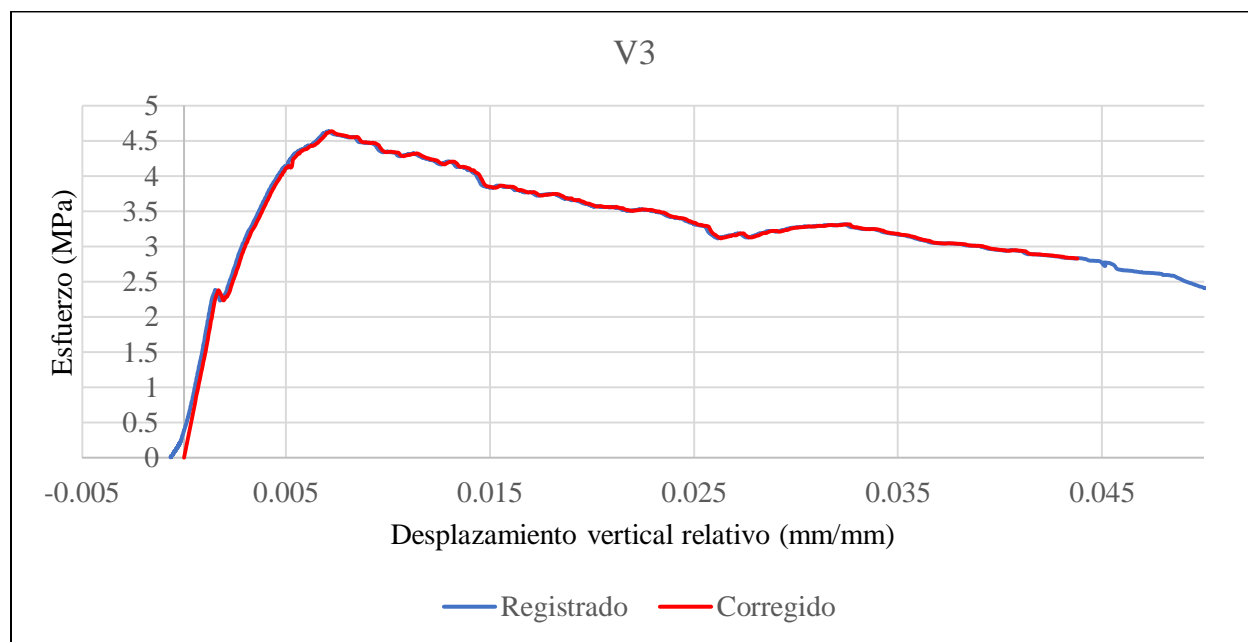
**Figura 4. 136.** – Viga V1-2441 después de llevarla a la falla (vista frontal).



**Figura 4. 137.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-2441.



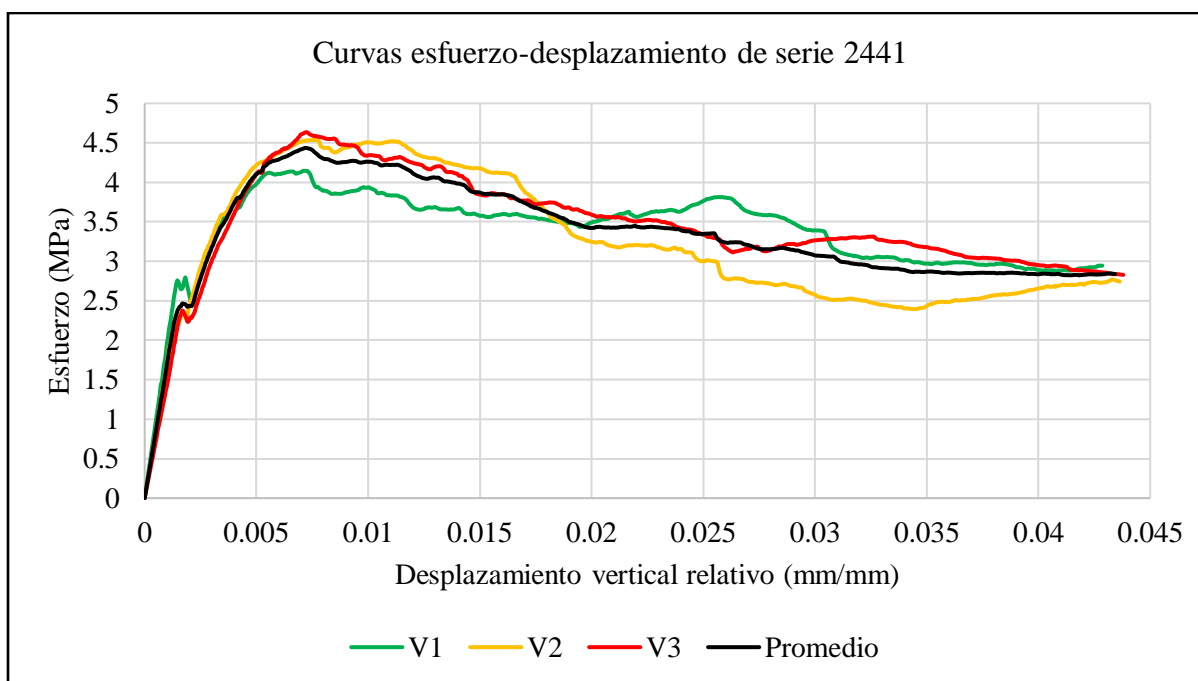
**Figura 4. 138.** – Viga V2-2441 después de llevarla a la falla con vista posterior.



**Figura 4. 139.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-2441.



**Figura 4. 140.** – Viga V3-2441 después de llevarla a la falla con vista posterior.



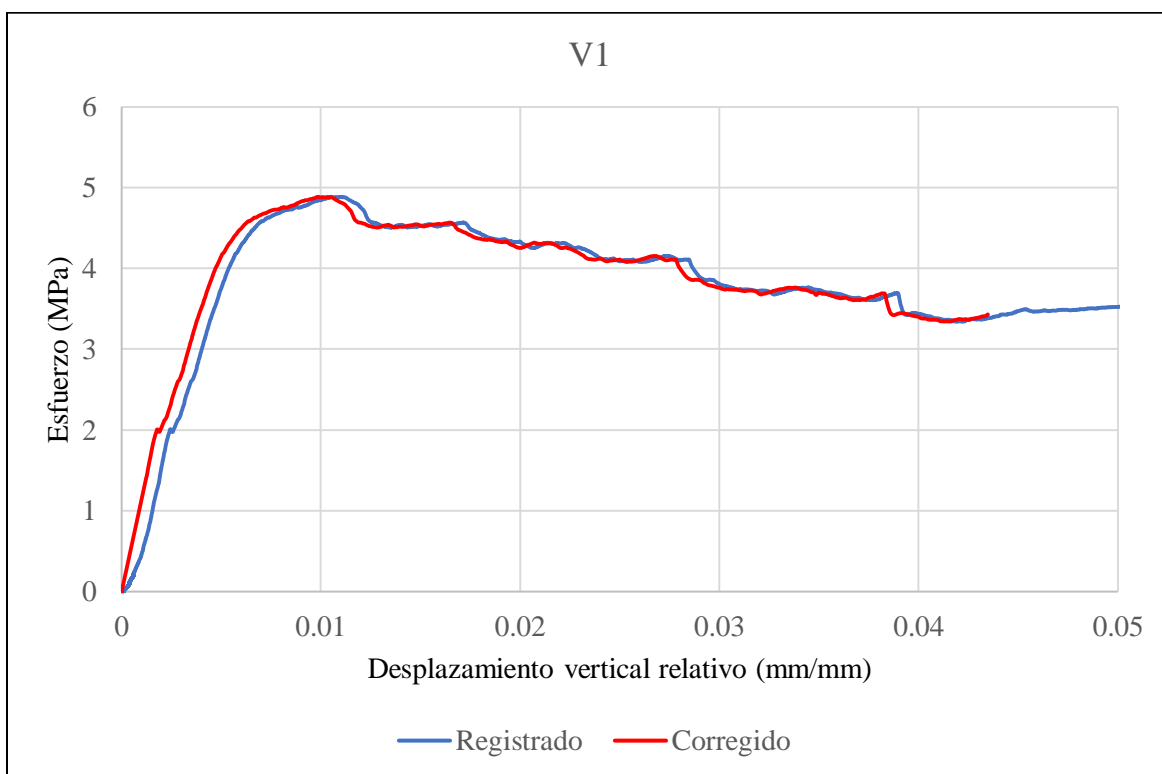
**Figura 4. 141.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 2441.

El comportamiento de las tres vigas fue notablemente consistente. Todas experimentaron una falla por cortante, como se puede observar en las fotografías de los ensayos. En esta serie en particular, se colocó refuerzo longitudinal con una cuantía de 0.0056 y se incorporaron fibras de acero en una configuración 3D con una dosificación de  $10 \text{ kg/m}^3$ .

Es importante destacar que, después de la falla, se evidencia un comportamiento dúctil en las vigas, ya que los esfuerzos disminuyen de manera gradual. Sin embargo, los valores máximos de esfuerzo alcanzados en esta serie no son tan elevados como los registrados en series con una mayor cuantía de acero, un contenido más alto de fibras o fibras de otro tipo.

#### *Serie 2542*

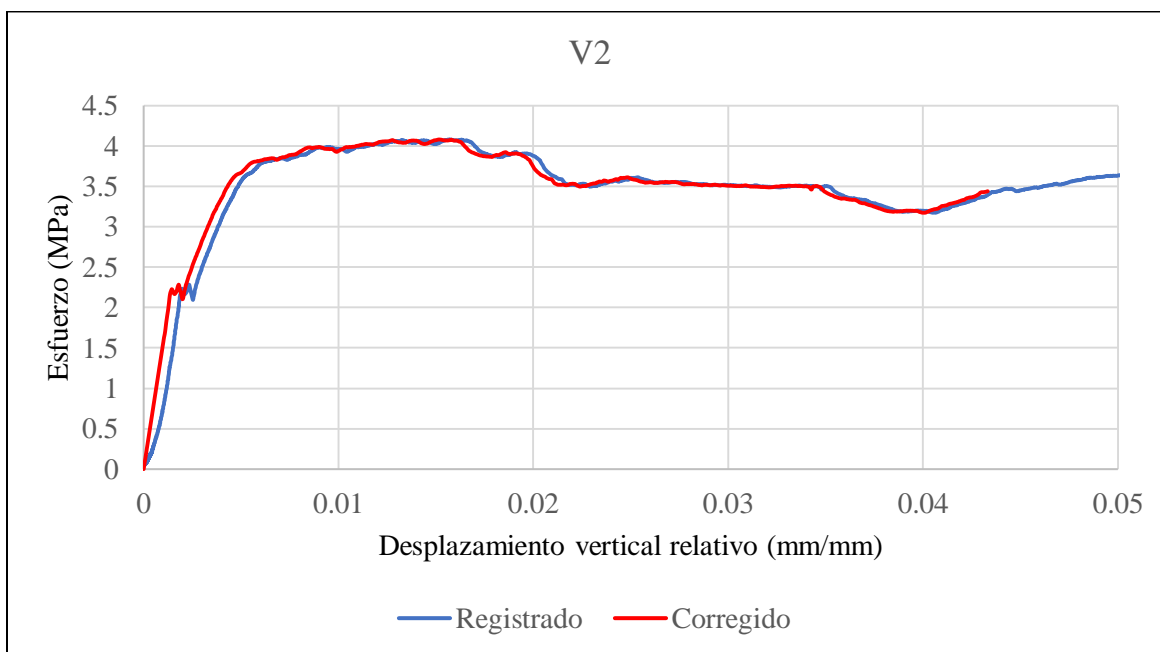
Descripción: *Fibras 5D*;  $\rho = 0.0056$ ; *dosificación* =  $20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;  $V_f = 0.253$ ;  $f'_c = 43.7 \text{ MPa}$



**Figura 4. 142.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-2542.



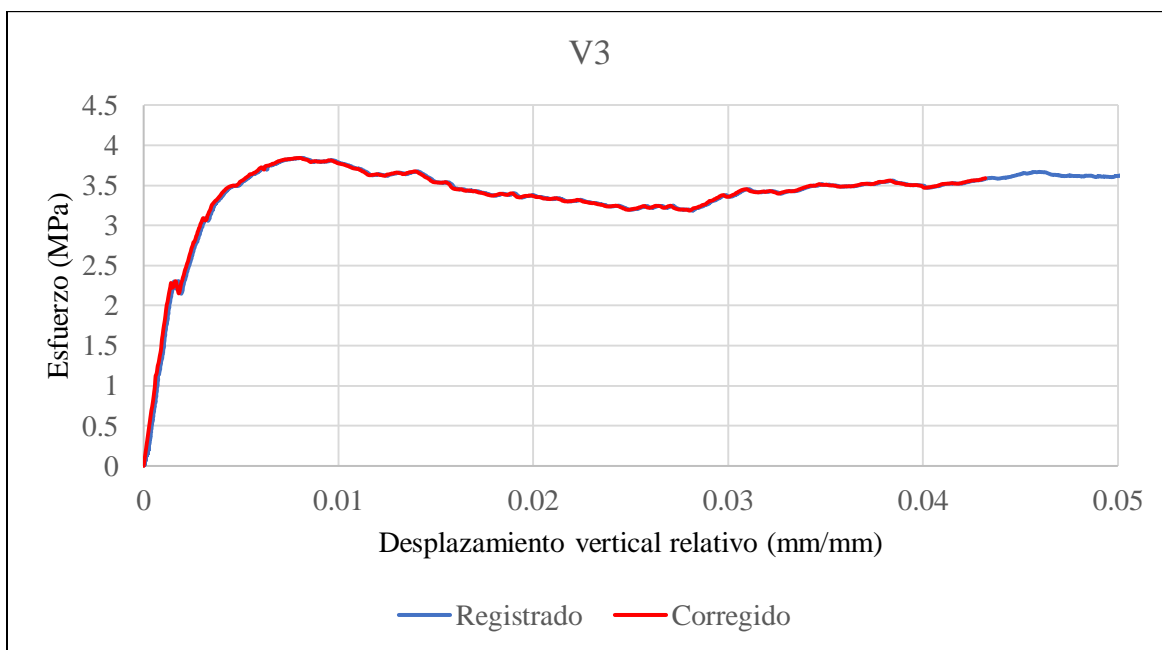
**Figura 4. 143.-** Viga V1-2542 después de llevarla a la falla con vista frontal.



**Figura 4. 144. –** Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-2542.



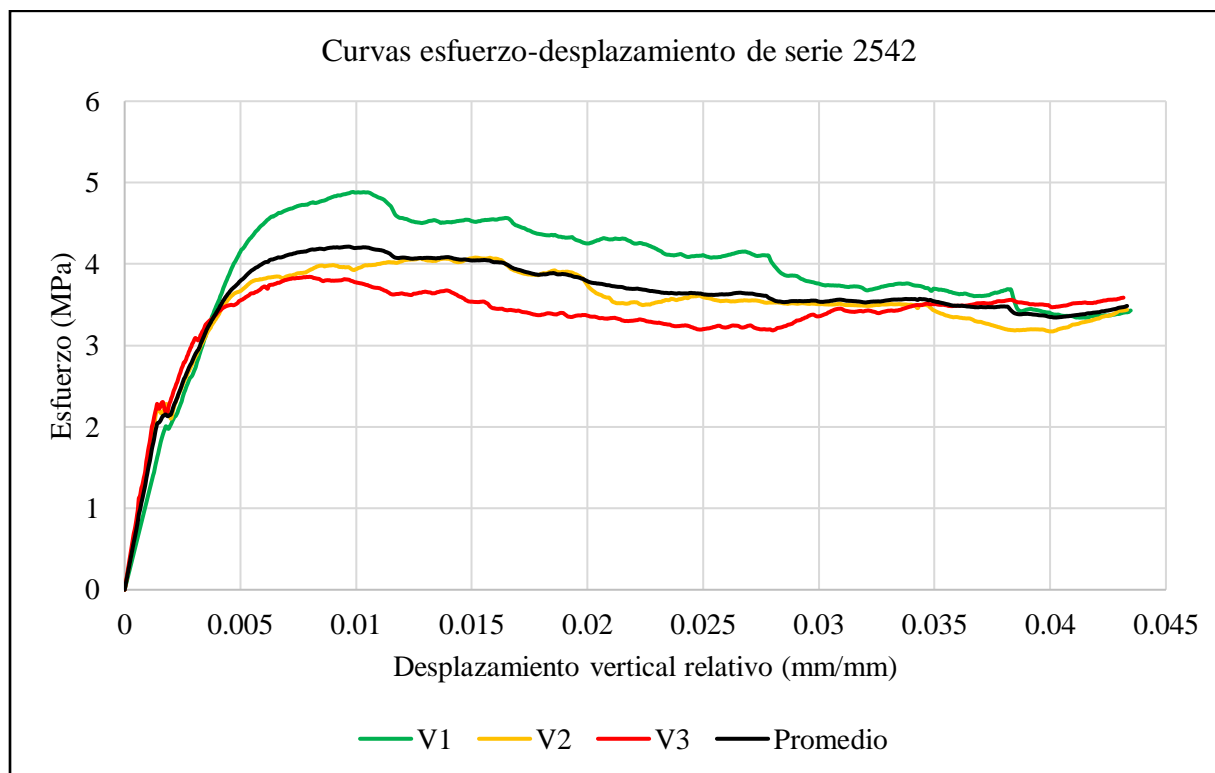
**Figura 4. 145.-** Viga V2-2542 después de llevarla a la falla con vista posterior.



**Figura 4. 146. –** Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-2542.



**Figura 4. 147.** – Viga V3-2542 después de llevarla a la falla con vista posterior.



**Figura 4. 148.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 2542.

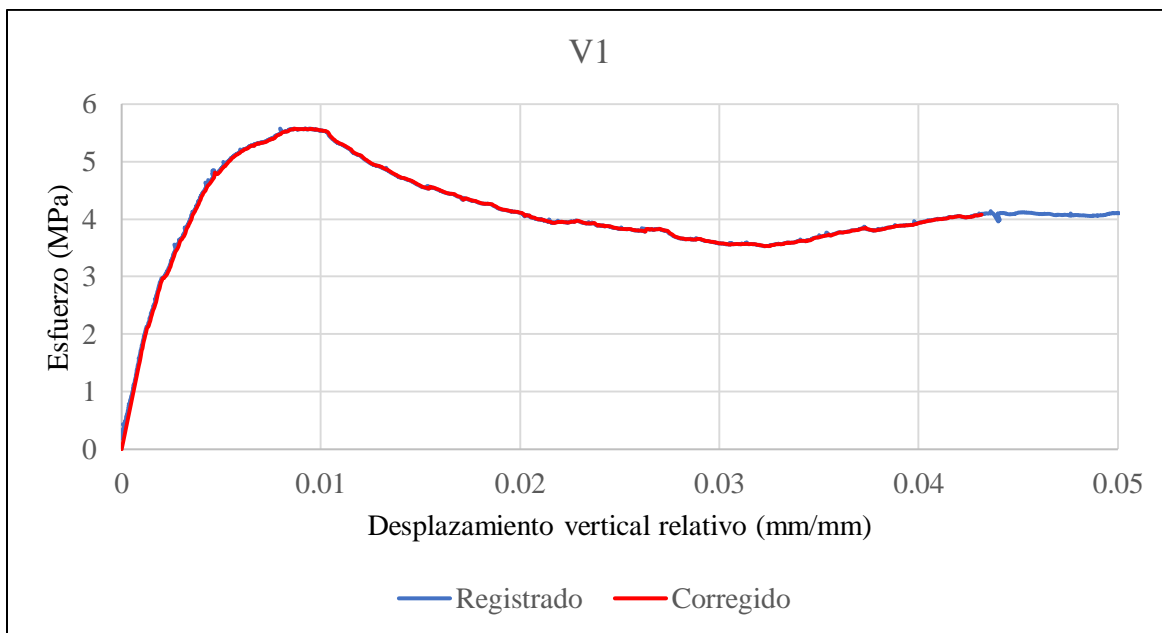


El comportamiento de las tres vigas mostró una gran similitud. Todas experimentaron una falla por cortante, tal como se puede observar en las fotografías de los ensayos. En esta serie en particular, se colocó refuerzo longitudinal con una cuantía de 0.0056 y se incluyeron fibras de acero en una configuración 5D con una dosificación de  $20 \text{ kg/m}^3$ .

Es notable que después de la falla, se evidencia un comportamiento adecuado en las vigas, ya que los esfuerzos se mantienen de manera bastante estable, como lo muestran los gráficos. Aunque los valores máximos de esfuerzo no son tan elevados como podría esperarse dada la relación de volumen y el tipo de fibra utilizada, es importante resaltar que se logró un comportamiento más dúctil en estas vigas, lo que indica una mayor capacidad para absorber la deformación antes de la falla.

#### Serie 2543

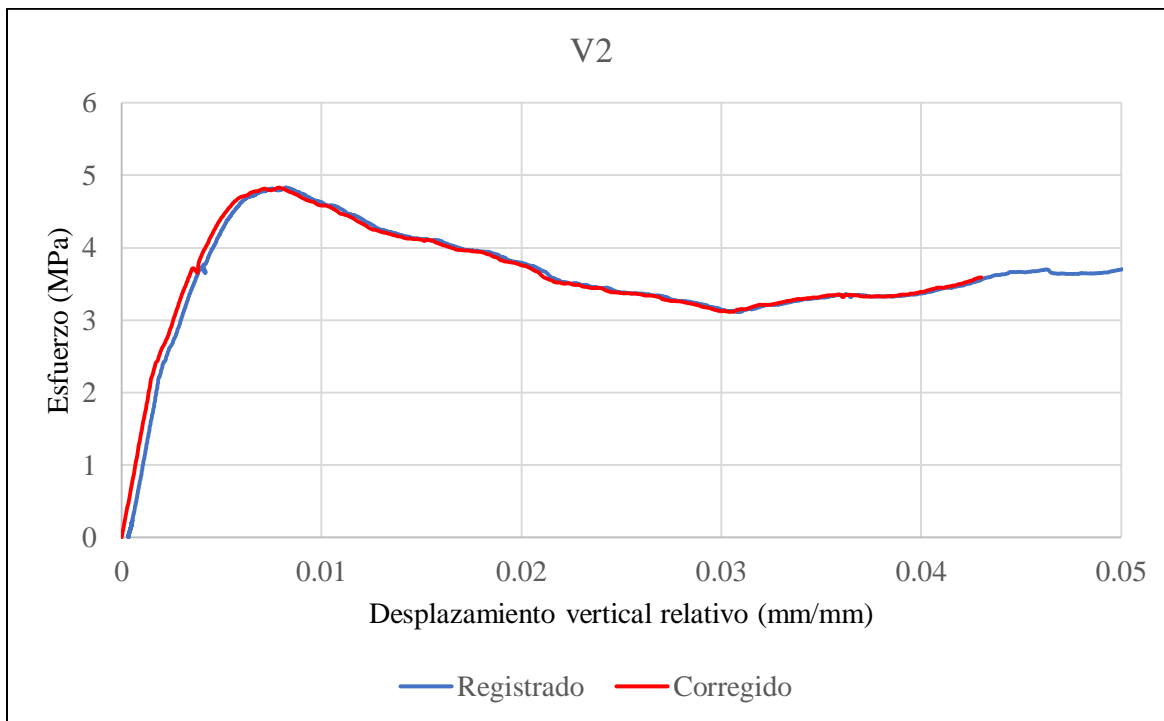
Descripción: *Fibras 5D*;  $\rho = 0.0113$ ; *dosificación* =  $20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;  $V_f = 0.253$ ;  $f'_c = 43.15 \text{ MPa}$



**Figura 4. 149.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-2543.



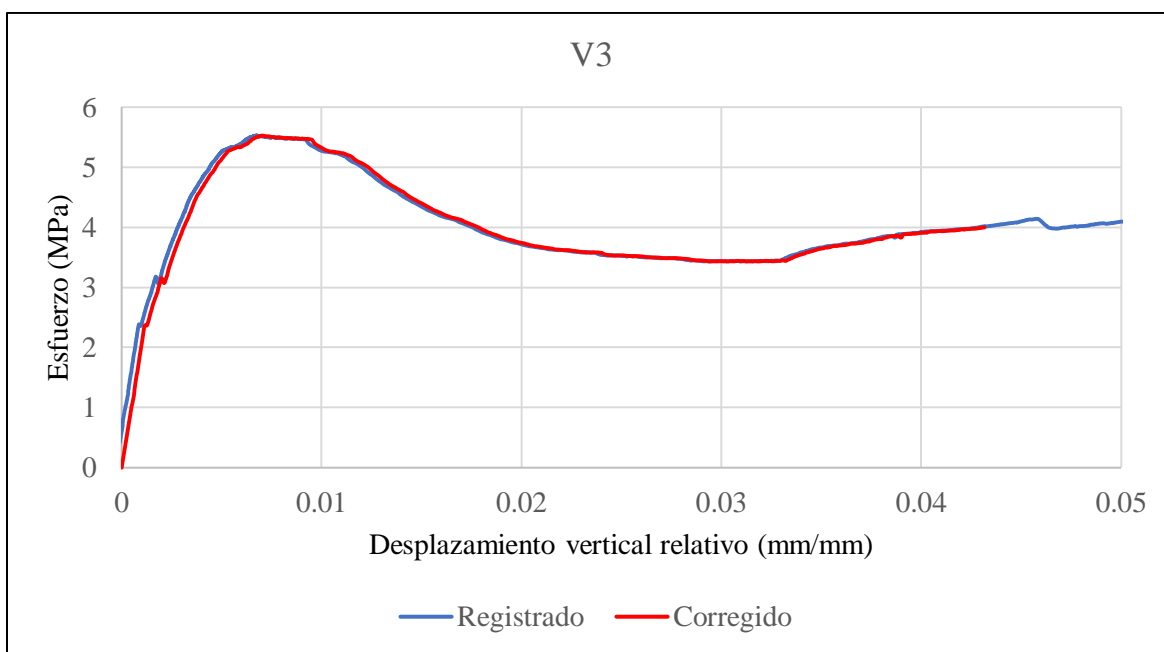
**Figura 4. 150.** – Viga V1-2543 después de llevarla a la falla con vista frontal.



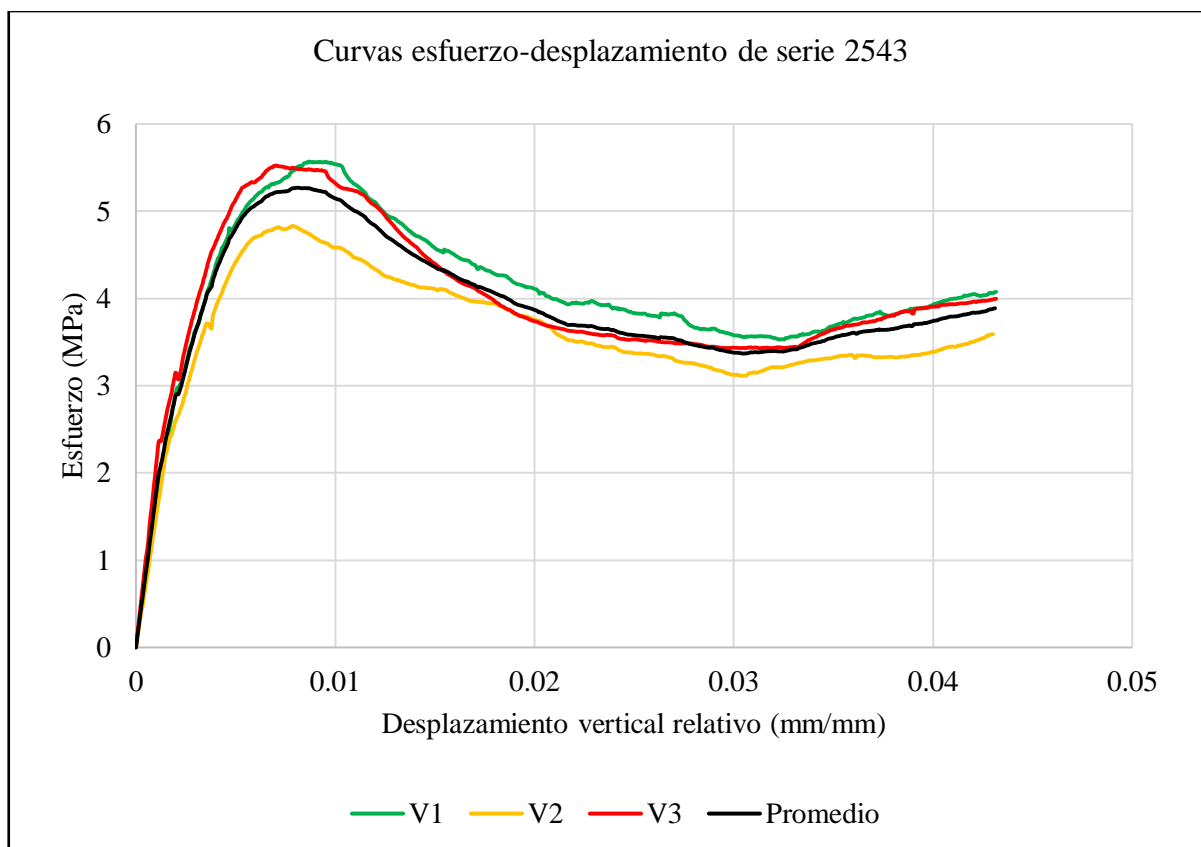
**Figura 4. 151.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-2543.



**Figura 4. 152.** – Viga V2-2543 después de llevarla a la falla con vista posterior.



**Figura 4. 153.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-2543.



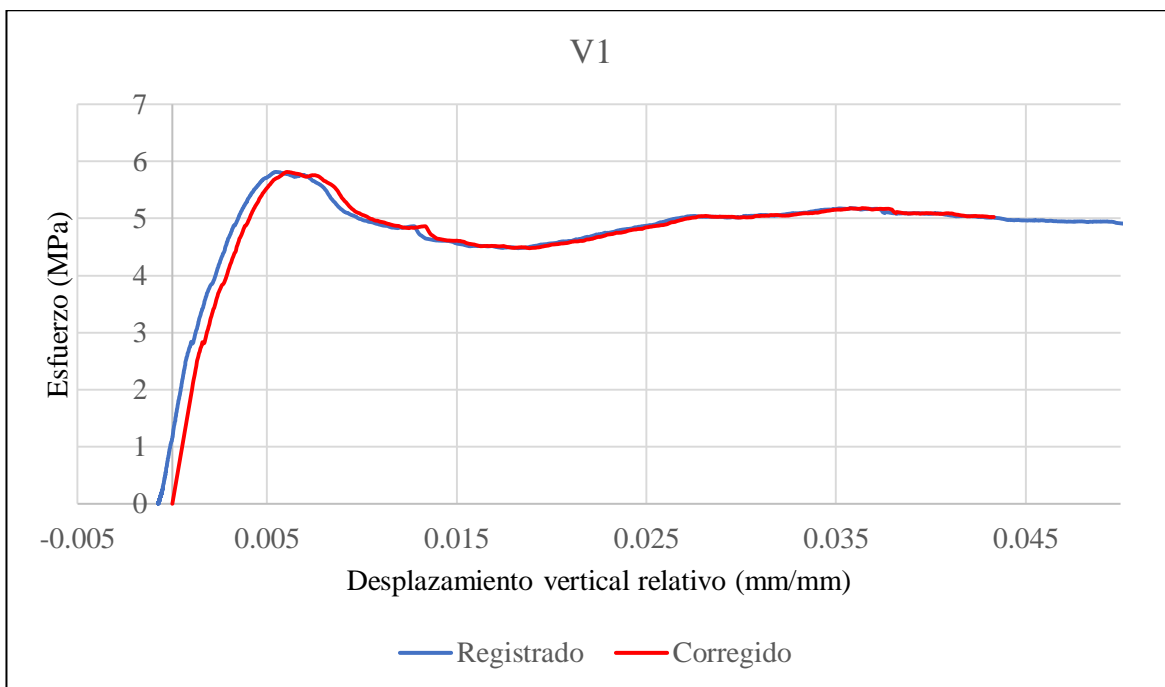
**Figura 4. 154.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 2543.

El comportamiento de las tres vigas mostró una notoria similitud. Todas experimentaron una falla por cortante, tal como se puede observar en las fotografías de los ensayos. En este serie en particular, se colocó refuerzo longitudinal con una cuantía de 0.0113 y se incluyeron fibras de acero en una configuración 5D con una dosificación de  $20 \text{ kg/m}^3$ .

Es relevante destacar que en este serie se lograron alcanzar esfuerzos superiores en comparación con la serie 2542. Esta mejora se atribuye directamente a la mayor cuantía de refuerzo longitudinal utilizado. De hecho, la cuantía de acero de refuerzo longitudinal es la única diferencia entre estas series, lo que subraya aún más su impacto significativo en el desempeño de las vigas.

**Serie 2614**

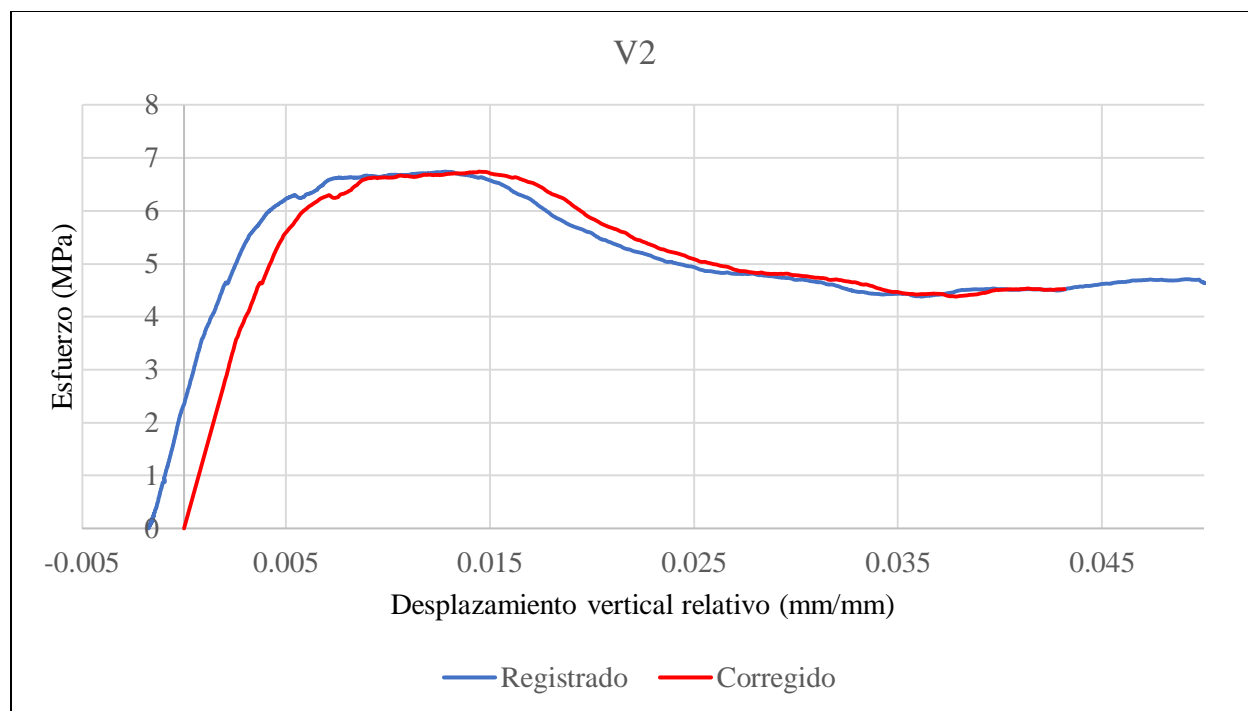
Descripción: *Fibras 3D*;  $\rho = 0.0113$ ; *dosificación* =  $40 \frac{kg}{m^3}$ ;  $V_f = 0.506$ ;  $f'_c = 46.6 MPa$



**Figura 4. 155.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-2614.



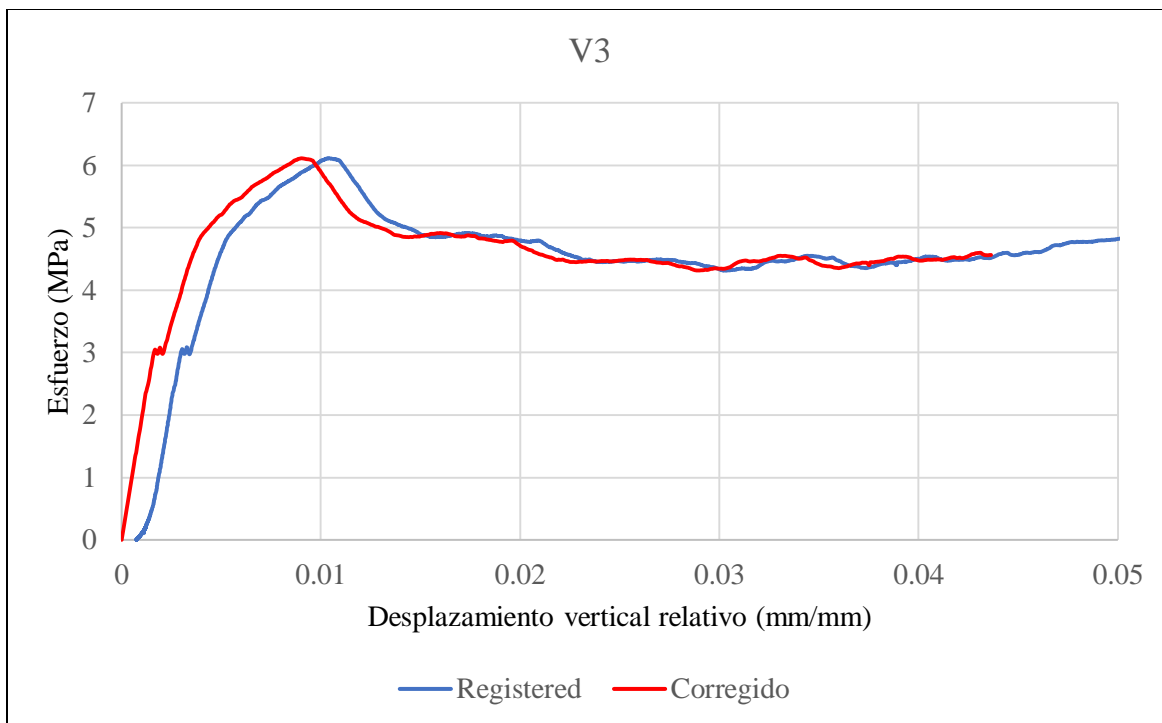
**Figura 4. 156.** – Viga V1-2614 después de llevarla a la falla con vista posterior.



**Figura 4. 157.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-2614.



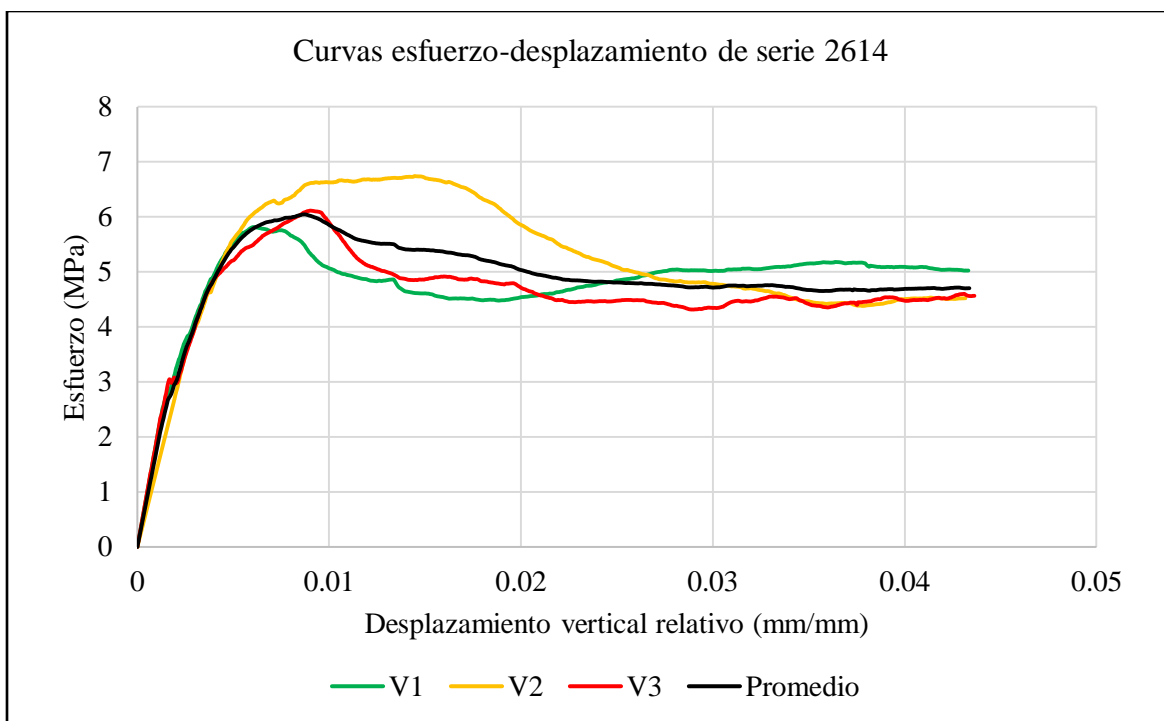
**Figura 4. 158.** – Viga V2-2614 después de llevarla a la falla con vista posterior.



**Figura 4. 159.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-2614.



**Figura 4. 160.** – Viga V3-2614 después de llevarla a la falla con vista frontal.



**Figura 4. 161.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 2614.

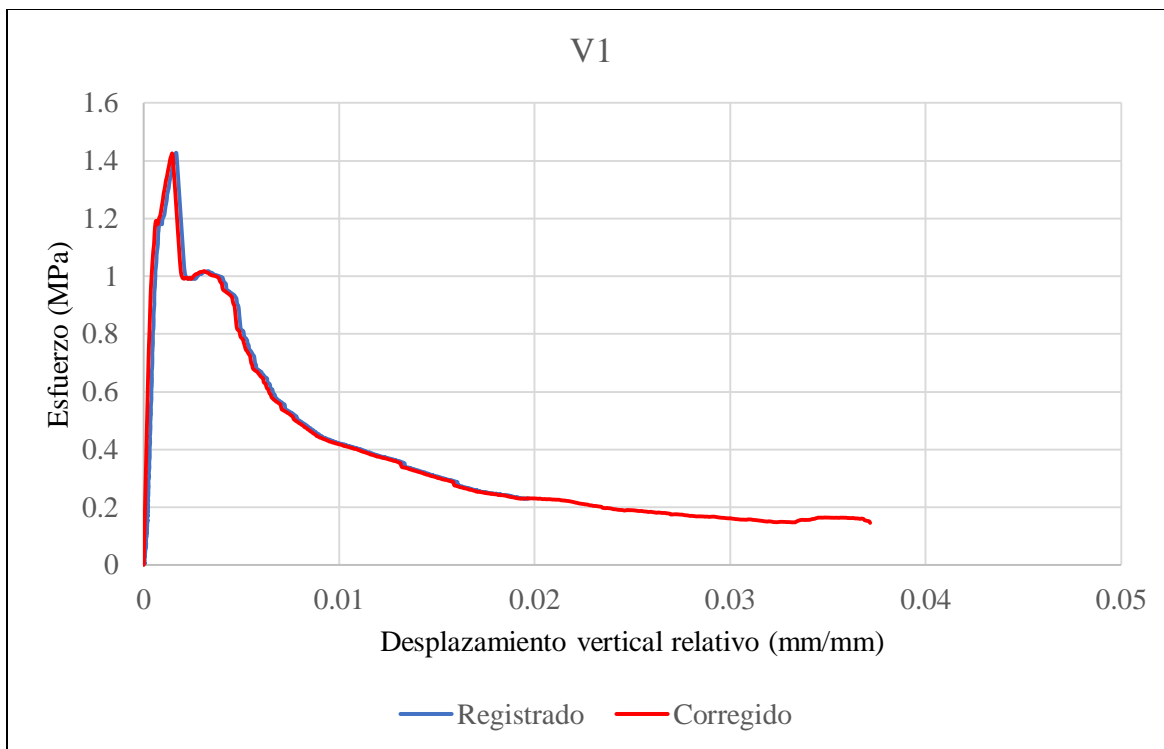
El comportamiento de las tres vigas mostró una notable similitud. Todas experimentaron una falla por cortante, como se puede apreciar en las fotografías de los ensayos. En esta serie específico, se aplicó un refuerzo longitudinal con una cuantía de 0.0113 y se incorporaron fibras de acero en una configuración 3D con una dosificación de  $40 \text{ kg/m}^3$ .

A pesar de que en esta serie se utilizaron fibras 3D, mientras que en la serie 2542 se emplearon fibras 5D, se lograron alcanzar esfuerzos mayores. Esta mejora se atribuye principalmente a la presencia de mayor cuantía refuerzo longitudinal. Este resultado resalta la importancia del refuerzo longitudinal en la mejora del desempeño estructural, independientemente del tipo de fibras utilizadas en la mezcla de concreto.

### **Serie 2615**

Descripción: Fibras 4D;  $\rho = 0.0$ ; dosificación =  $40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;  $V_f = 0.506$ ;  $f'_c = 43.307 \text{ MPa}$

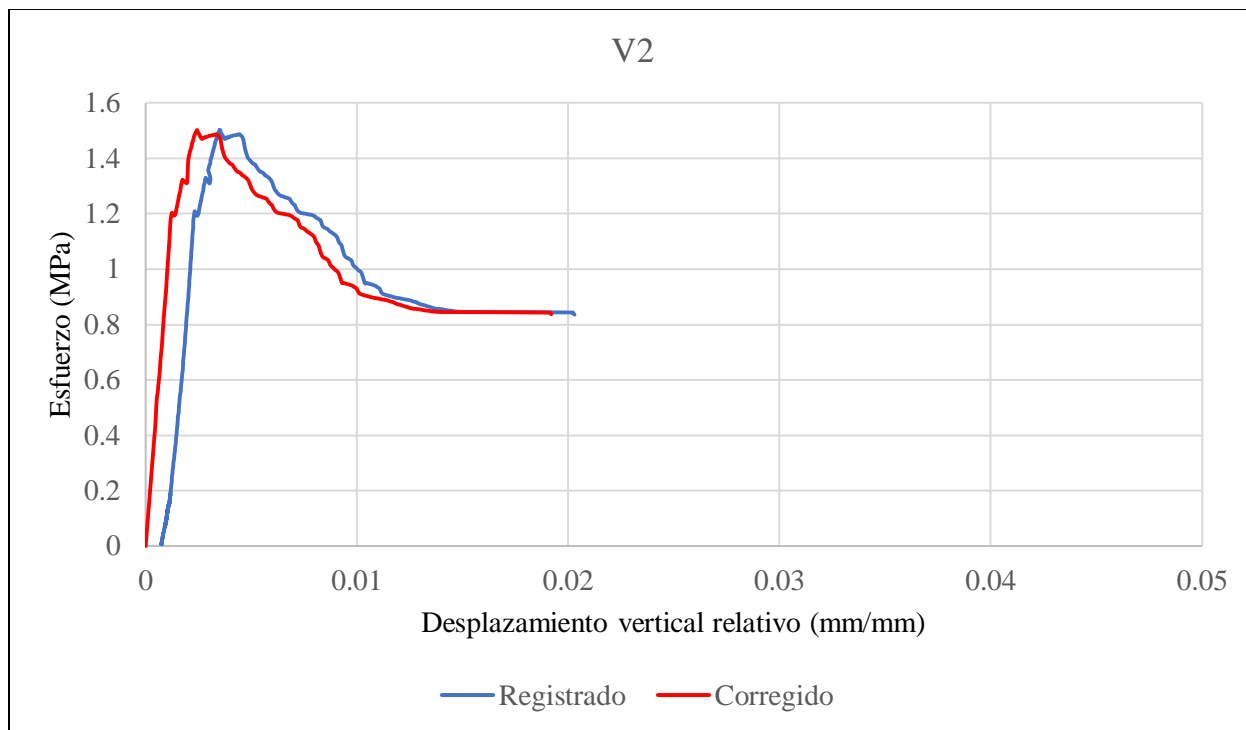




**Figura 4. 162.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-2615.



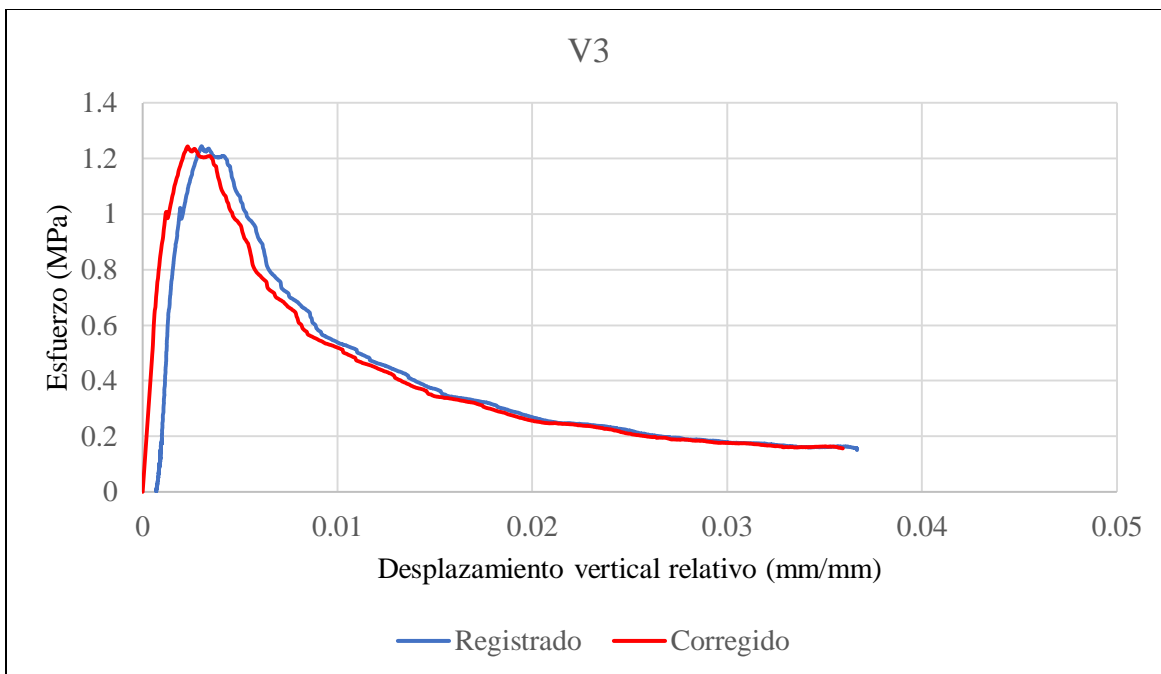
**Figura 4. 163.** – Viga V1-2615 después de llevarla a la falla con vista frontal.



**Figura 4. 164.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-2615.



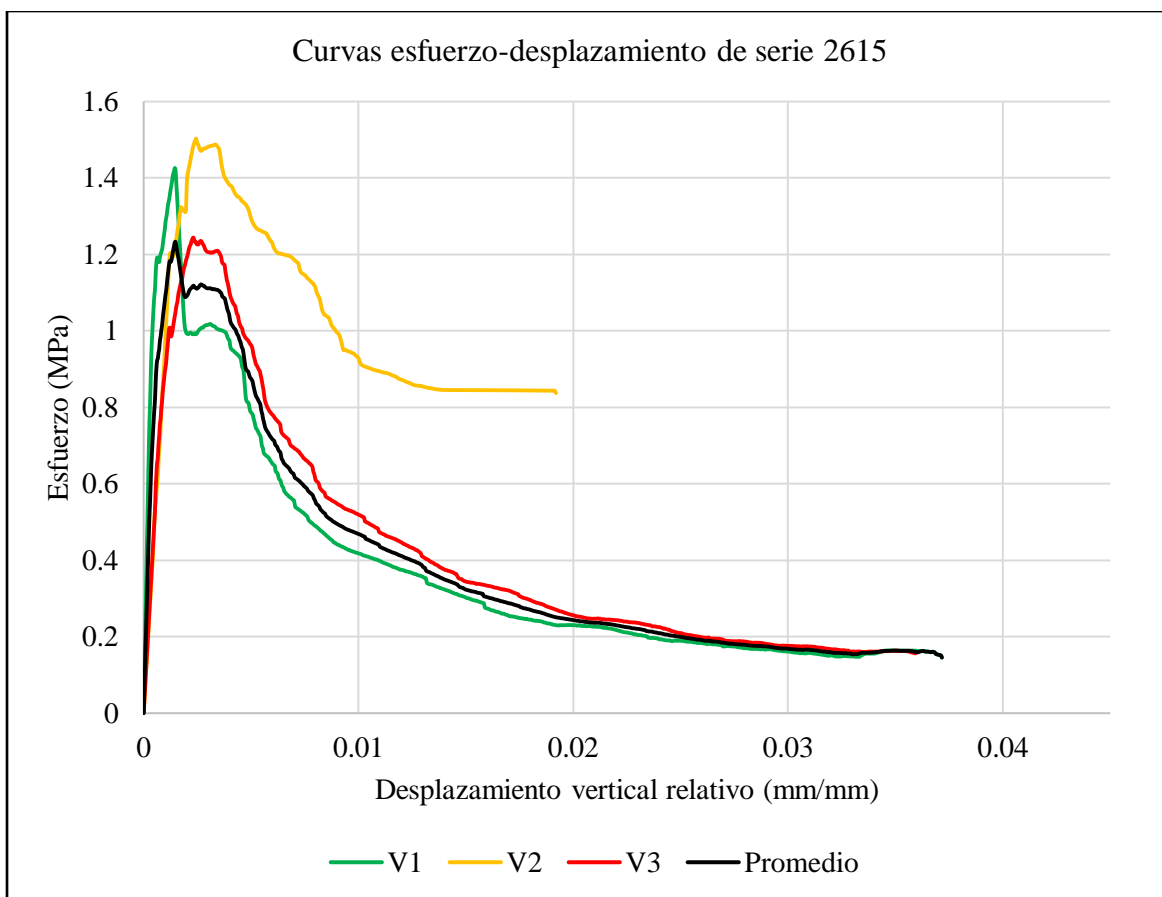
**Figura 4. 165.** – Detalle de falla de viga V2-2615 donde el transductor se deja de apoyar en la barra de donde se mide el desplazamiento, motivo por el que se paró la prueba.



**Figura 4. 166.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-2615.



**Figura 4. 167.** – Vigas de la serie 2615 apiladas donde se ve la falla en el centro.

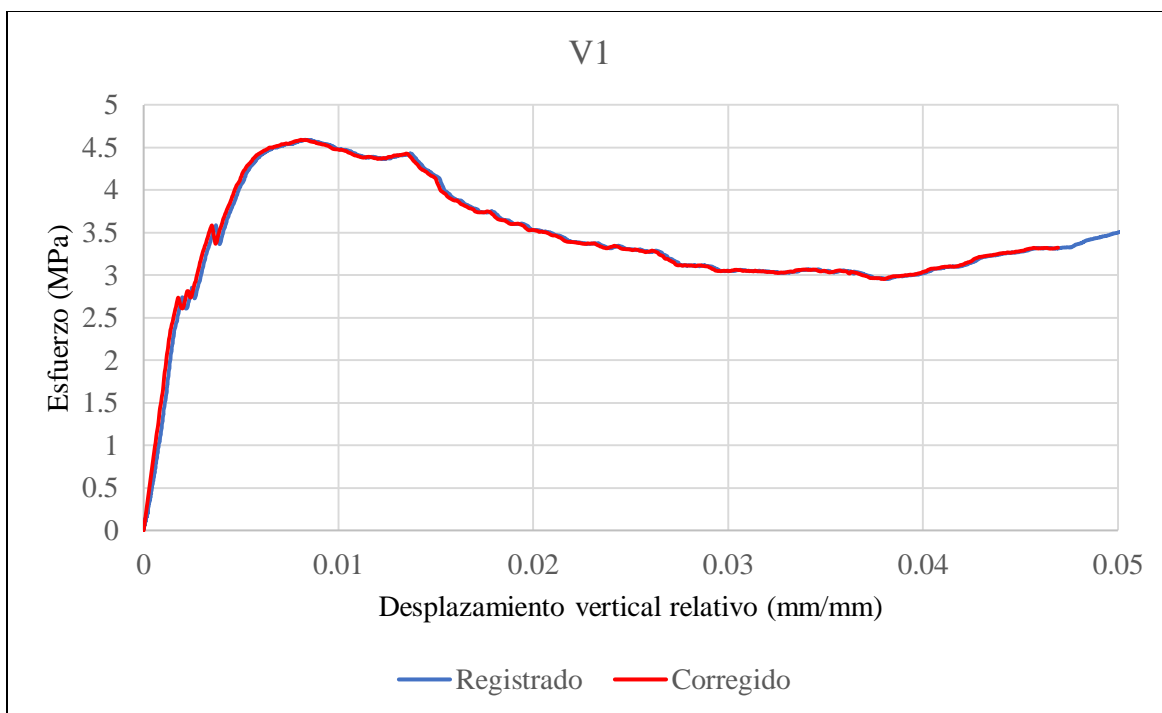


**Figura 4. 168.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2y V3, y el promedio entre las vigas V1 y V3 de la serie 2615.

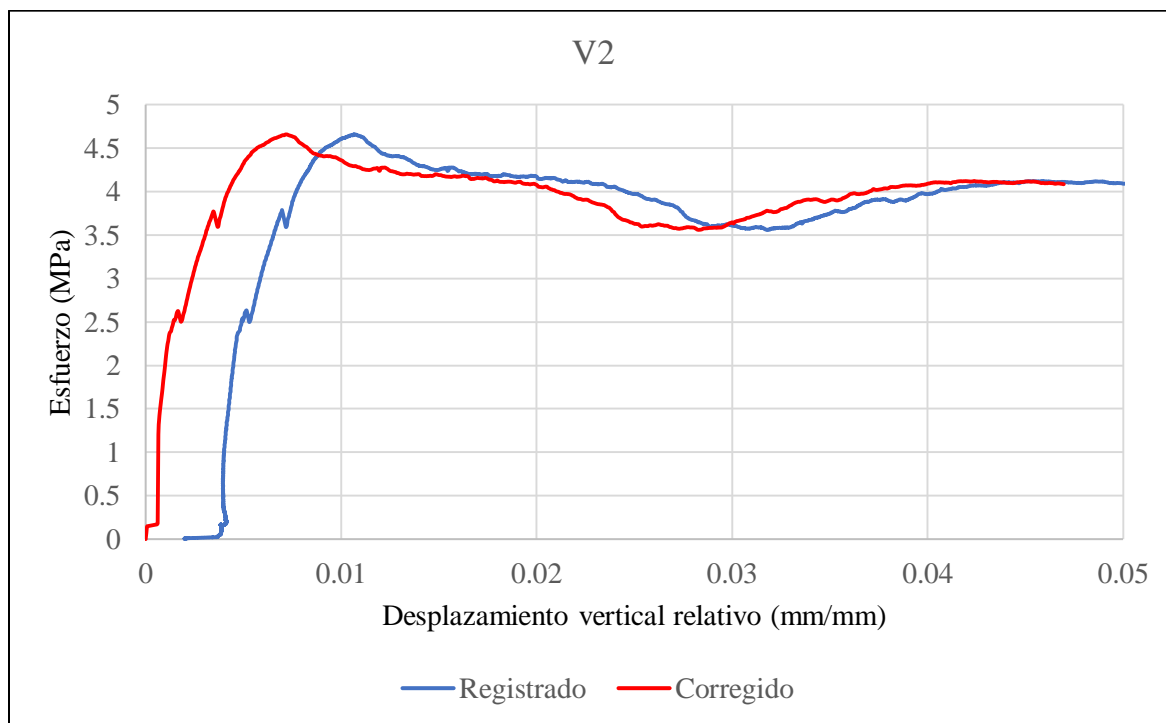
El comportamiento de las tres vigas resultó altamente uniforme. Todas experimentaron una falla por flexión, como se puede observar en las imágenes de los ensayos. En esta serie en particular, no se utilizó refuerzo longitudinal, pero se incorporaron fibras de acero en una configuración 4D con una dosificación de  $40 \text{ kg/m}^3$ . Esta respuesta era previsible dada la ausencia de refuerzo longitudinal, lo que condujo a la falla por flexión. Se decidió solo promediar los resultados de las vigas V1 y V3, pues el esfuerzo tras el fallo de la viga V2 resultó muy elevado comparado con el de las otras dos vigas.

#### **Serie 2655**

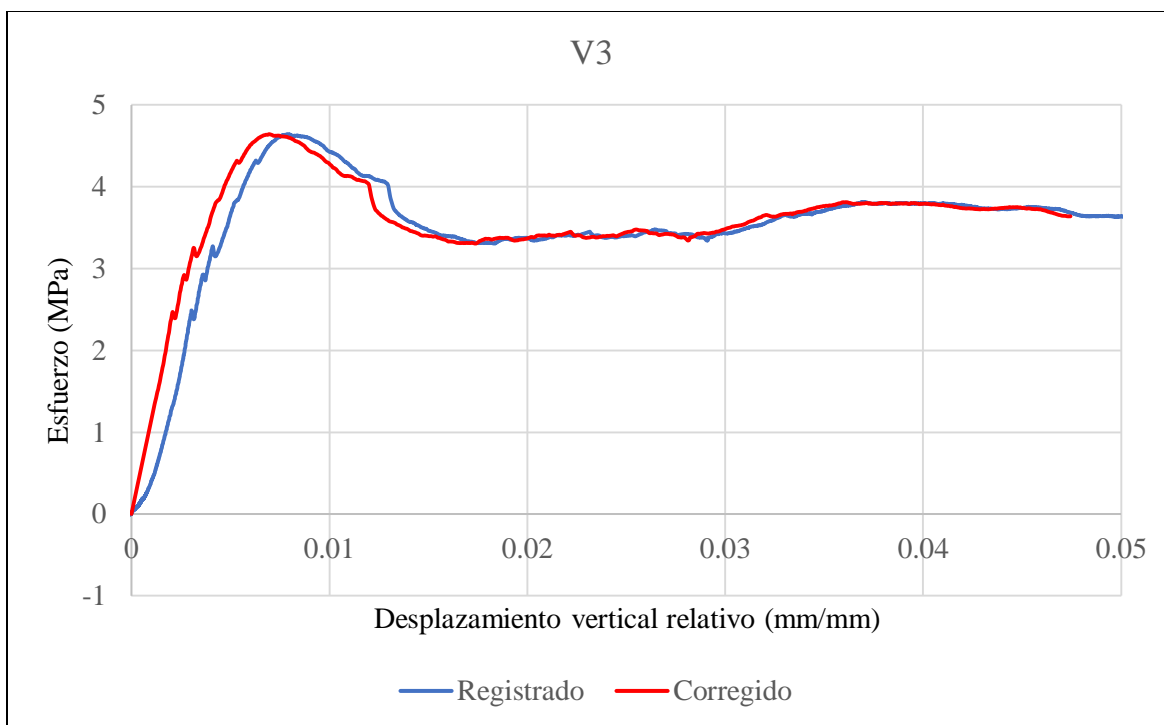
Descripción: *Fibras 5D*;  $\rho = 0.0056$ ; dosificación =  $40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;  $V_f = 0.506$ ;  $f'_c = 48.96 \text{ MPa}$



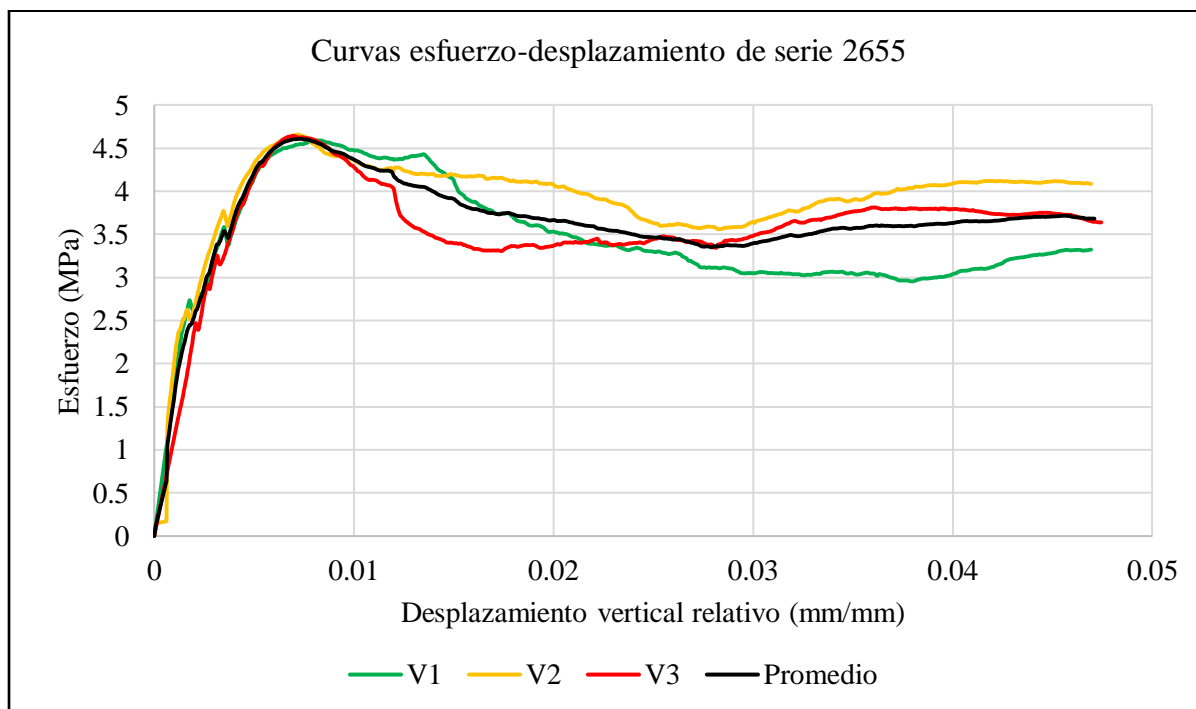
**Figura 4. 169.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-2655.



**Figura 4. 170.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-2655.



**Figura 4. 171.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-2655.

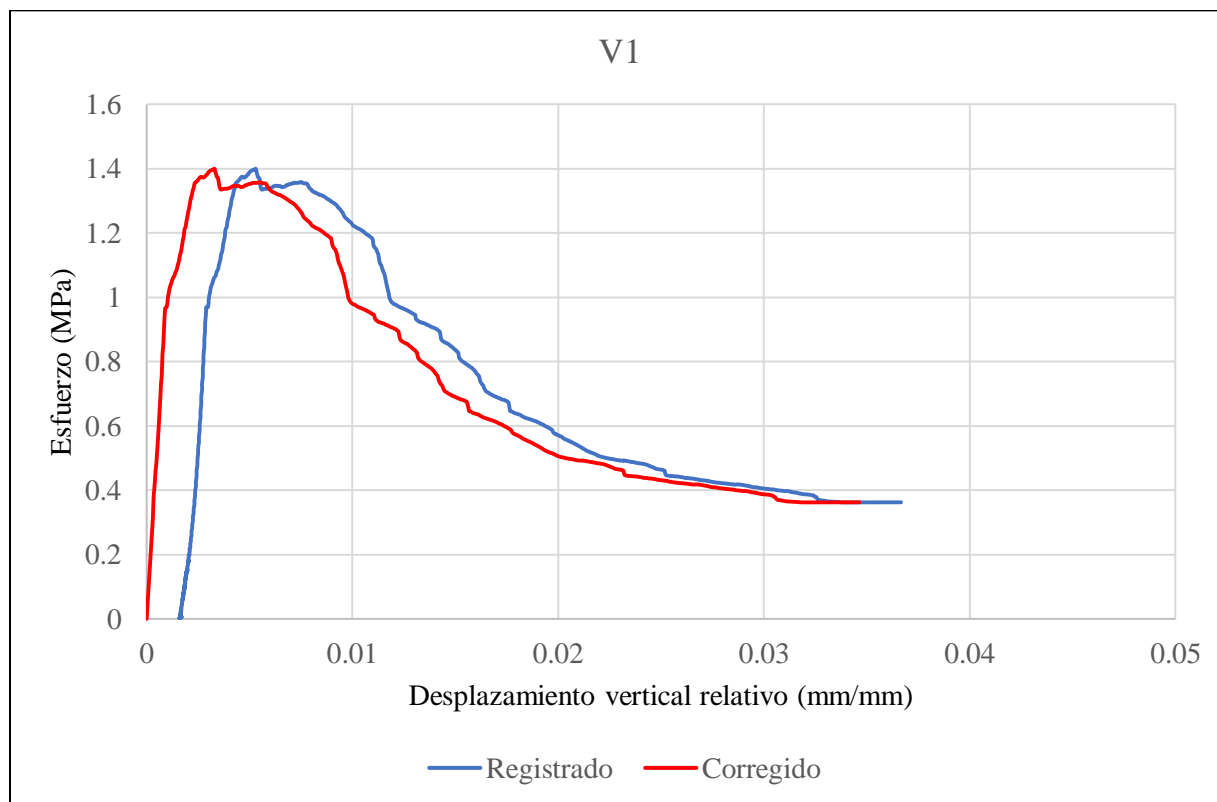


**Figura 4. 172.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 2655.

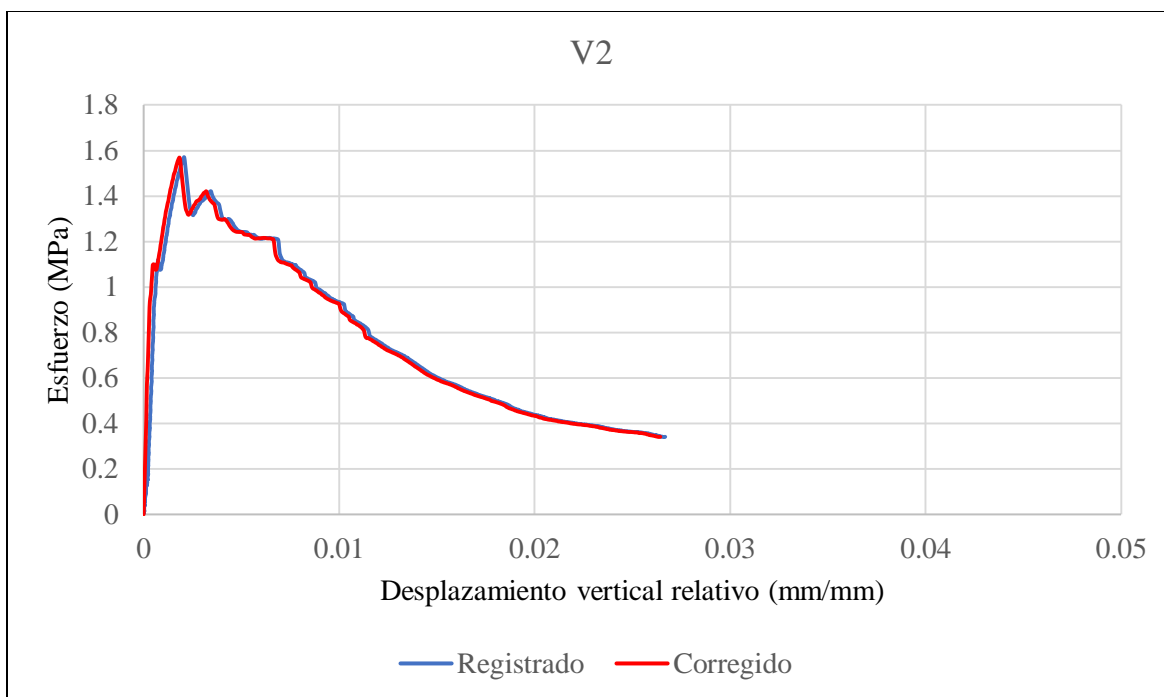
El comportamiento de las tres vigas mostró una gran uniformidad, experimentando todas una falla por cortante. Los esfuerzos alcanzados fueron significativamente mayores que los de las vigas que fallaron por flexión, y que en su gran mayoría carecían de refuerzo longitudinal. En esta serie en particular, se empleó un refuerzo longitudinal con una cuantía de 0.0056 y se añadieron fibras de acero en una configuración 5D con una dosificación de  $40 \text{ kg/m}^3$ . Las vigas demostraron una adecuada ductilidad al mantener los esfuerzos después de la falla, gracias al refuerzo proporcionado por las fibras de acero en conjunto con el acero de refuerzo. Lamentablemente, no se dispone de fotografías de laboratorio a partir de esta serie.

### Serie 2656

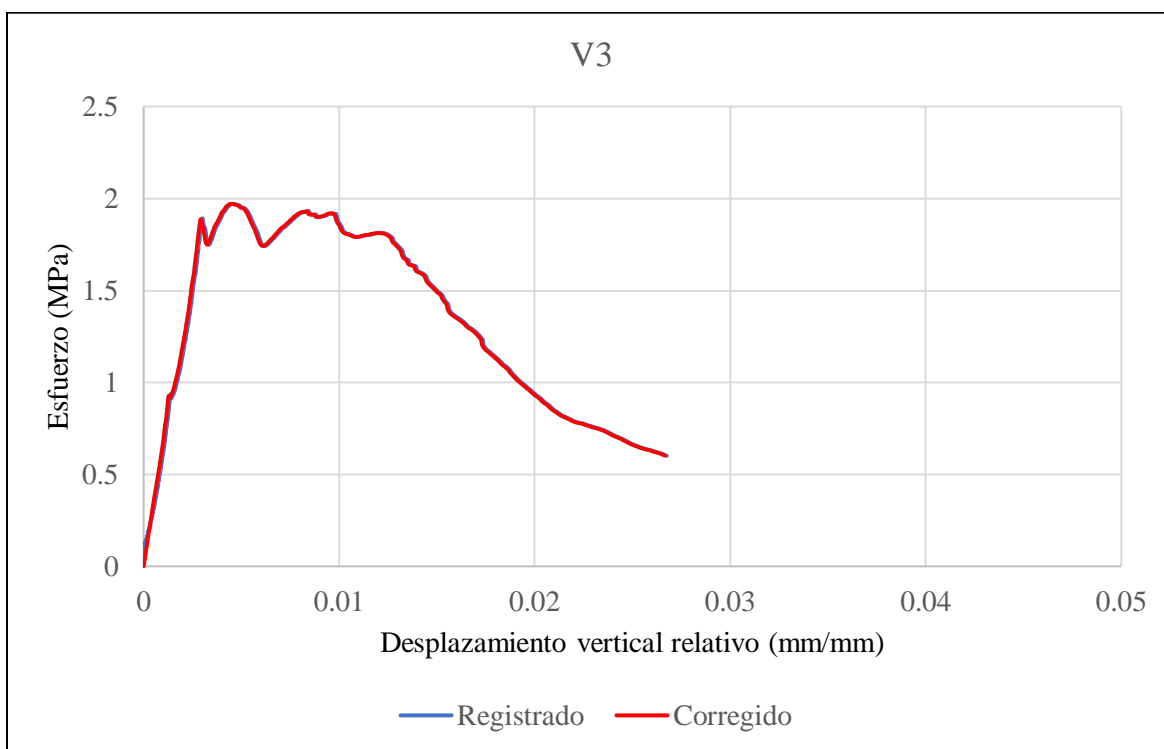
Descripción: *Fibras 5D*;  $\rho = 0.0$ ; dosificación =  $40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;  $V_f = 0.506$ ;  $f'_c = 47.936 \text{ MPa}$



**Figura 4. 173.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-2656.

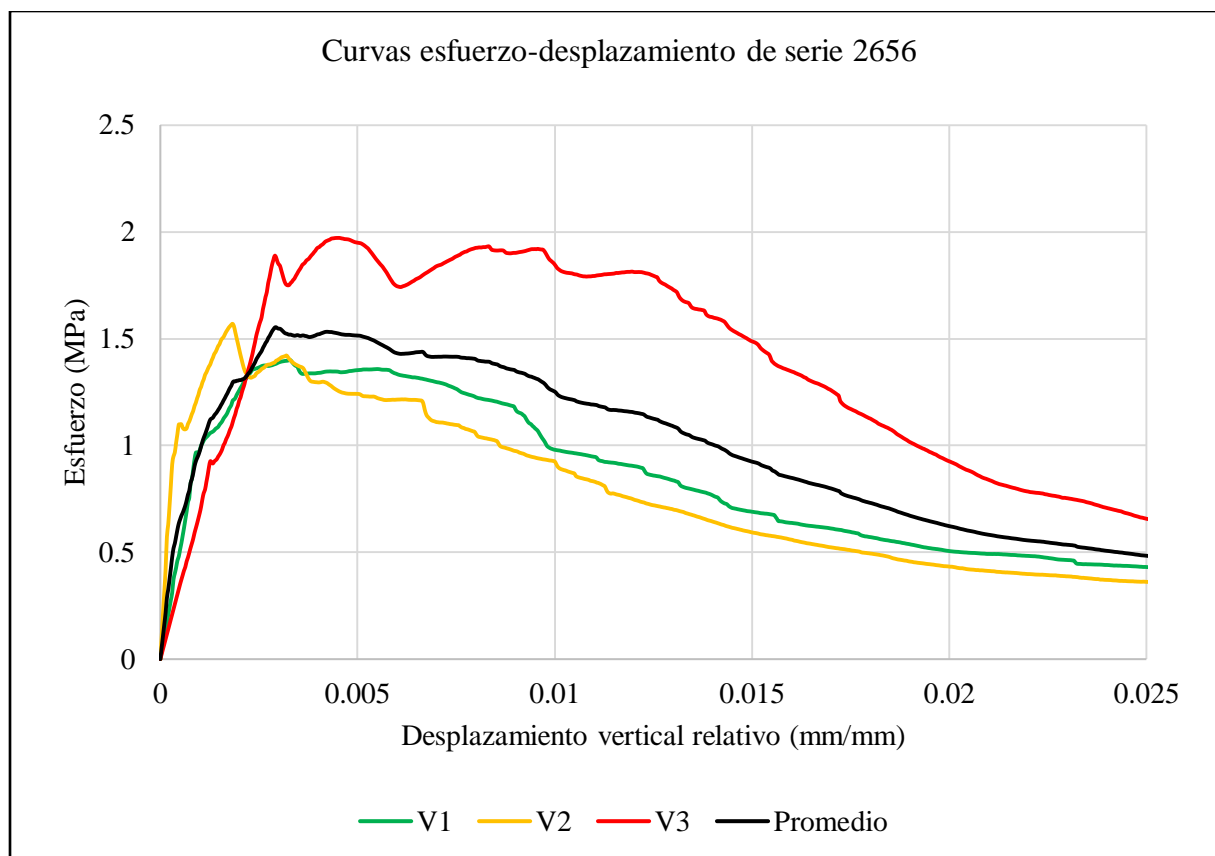


**Figura 4. 174.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-2656.



**Figura 4. 175.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-2656.



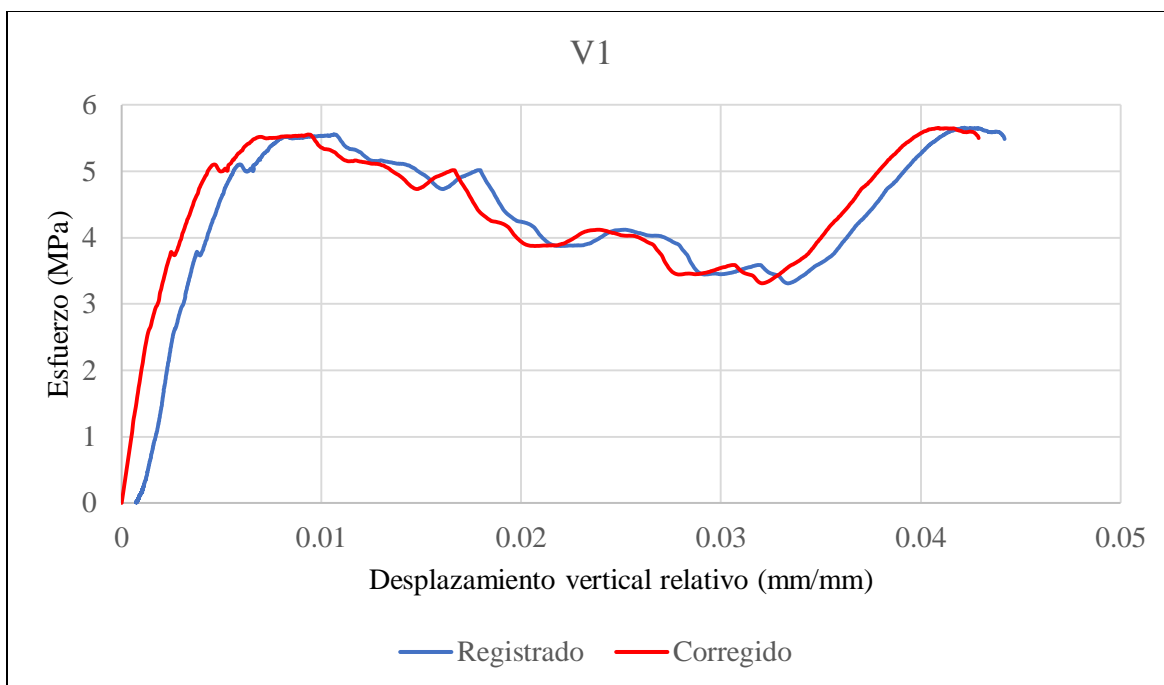


**Figura 4. 176.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 2656.

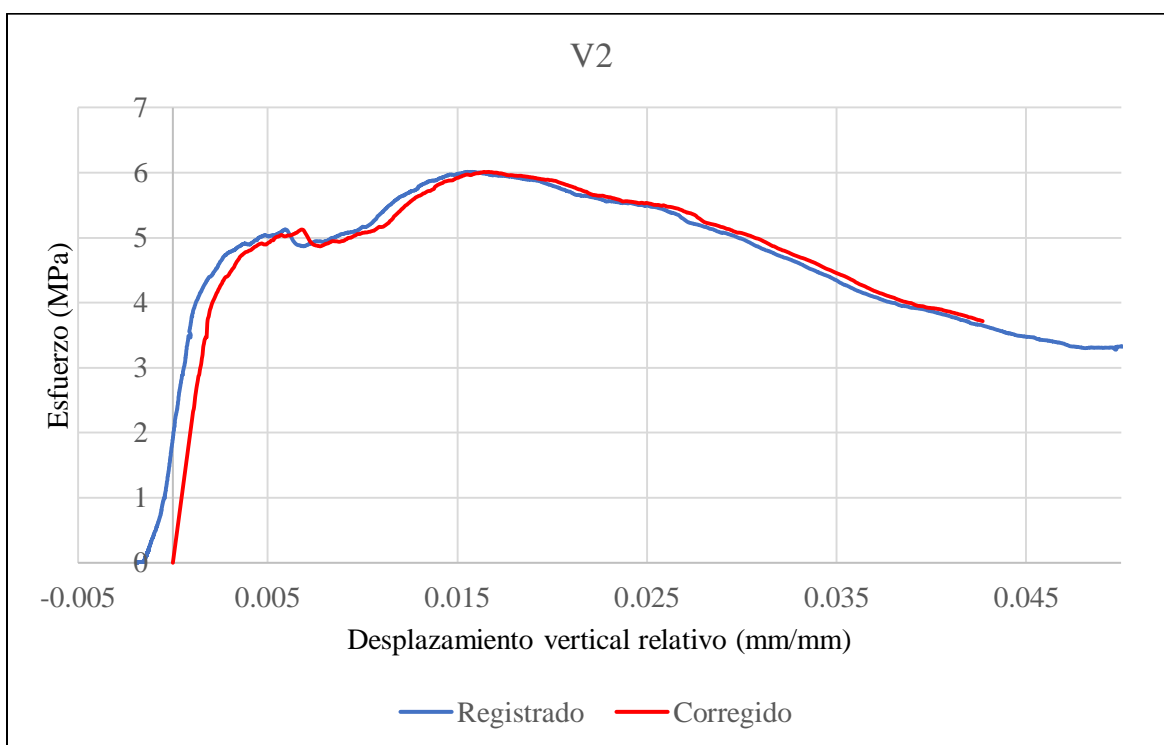
El comportamiento de las tres vigas resultó muy homogéneo, ya que todas fallaron por flexión. Se alcanzaron bajos niveles de esfuerzo, al igual que en otras series que carecían de refuerzo longitudinal y que también fallaron por flexión. En esta serie en particular, no se colocó refuerzo longitudinal, pero se incorporaron fibras de acero en una configuración 5D con una dosificación de  $40 \text{ kg/m}^3$ . Las vigas presentaron una baja resistencia a la flexión debido a la falta de acero de refuerzo longitudinal, aunque, gracias a la presencia de las fibras de acero, exhibieron una mejor ductilidad.

### **Serie 2727**

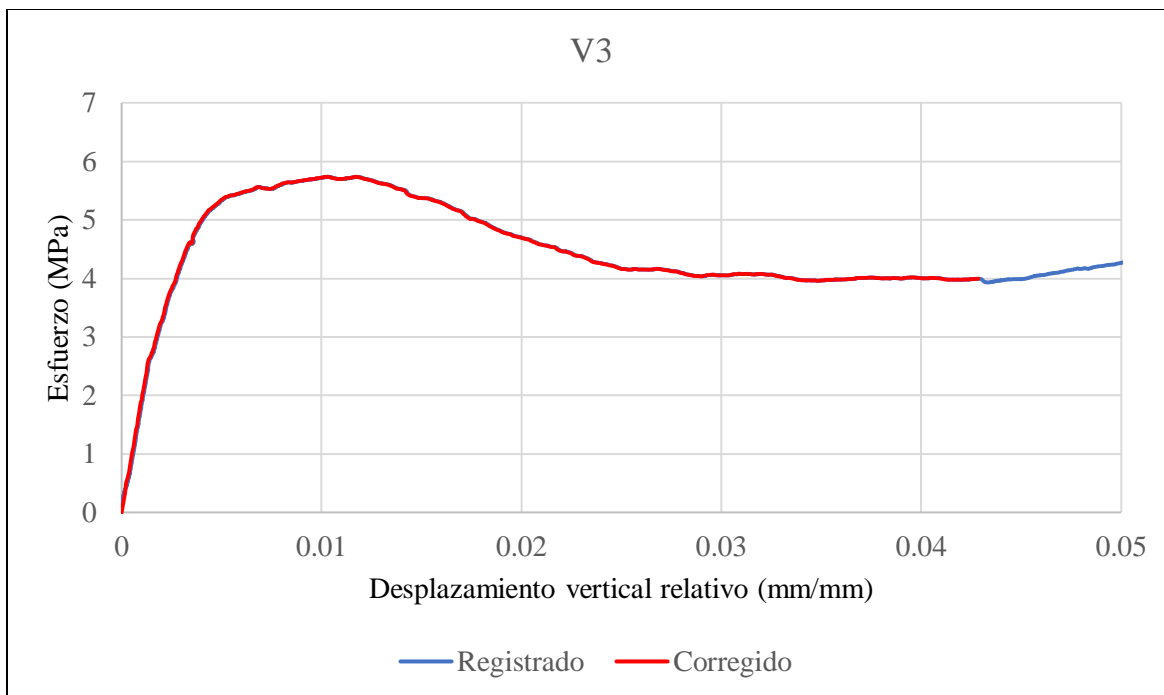
Descripción: *Fibras 5D*;  $\rho = 0.0113$ ; *dosificación* =  $40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;  $V_f = 0.506$ ;  $f'_c = 48.33 \text{ MPa}$



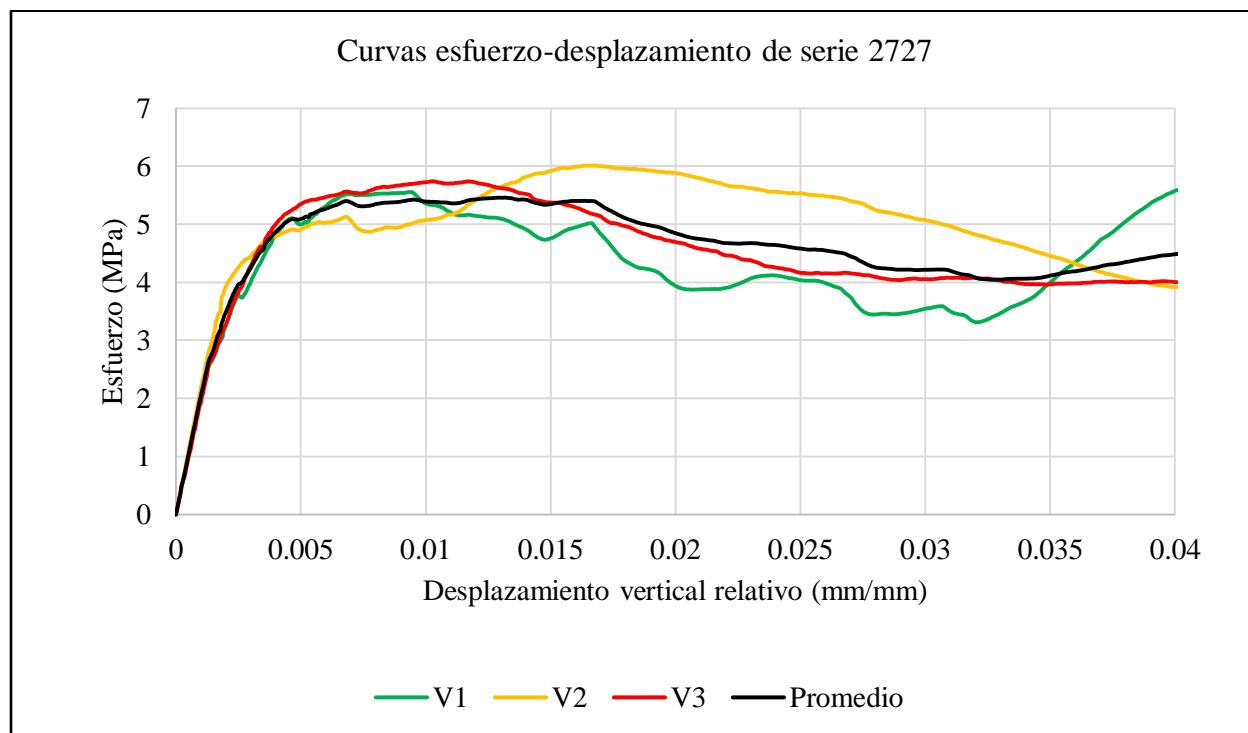
**Figura 4. 177.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-2727.



**Figura 4. 178.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-2727.



**Figura 4. 179.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-2727.

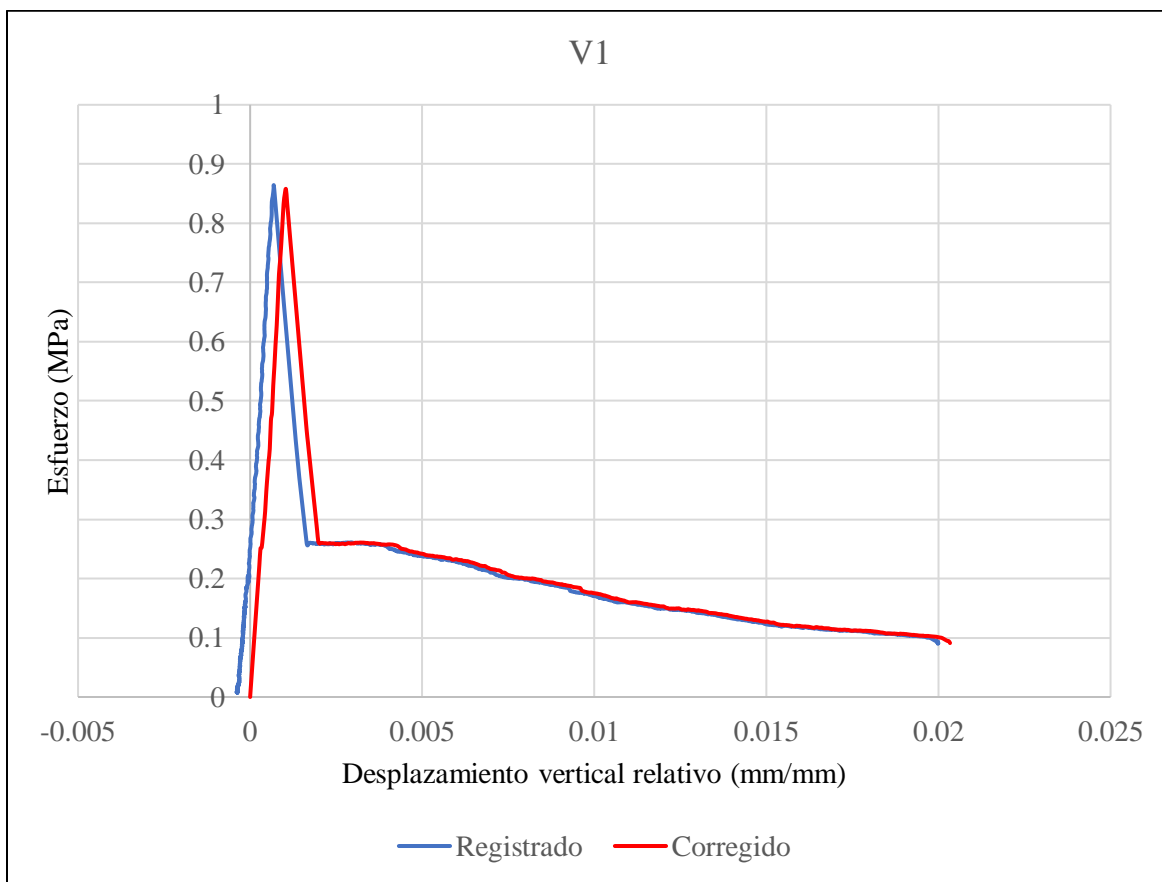


**Figura 4. 180.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 2727.

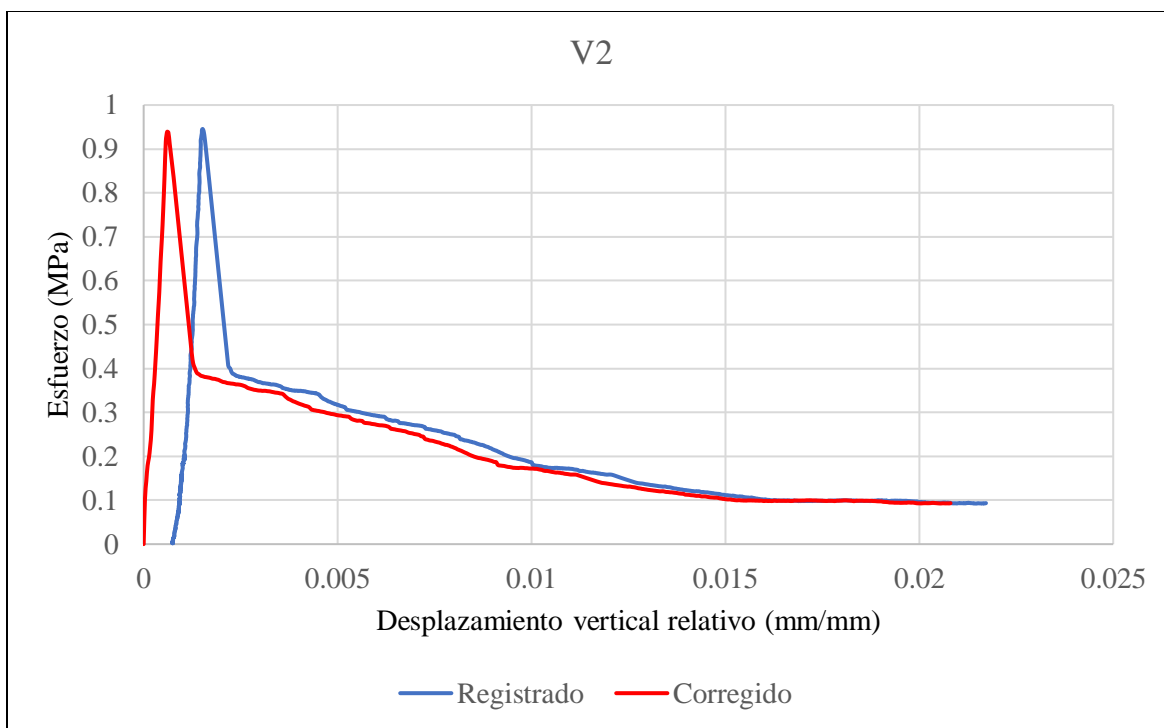
El comportamiento de las tres vigas fue notoriamente similar. Todas experimentaron una falla por cortante, lo cual es evidente al observar los esfuerzos alcanzados, que resultaron significativamente elevados en comparación con las series de vigas sin refuerzo longitudinal, las cuales fallaron por flexión. En esta serie específicamente, se empleó un refuerzo longitudinal con una cuantía de 0.0113 y se incorporaron fibras de acero en una configuración 5D con una dosificación de  $40 \text{ kg/m}^3$ . Las vigas demostraron una resistencia considerablemente alta, como se puede apreciar en las curvas.

### Serie 2728

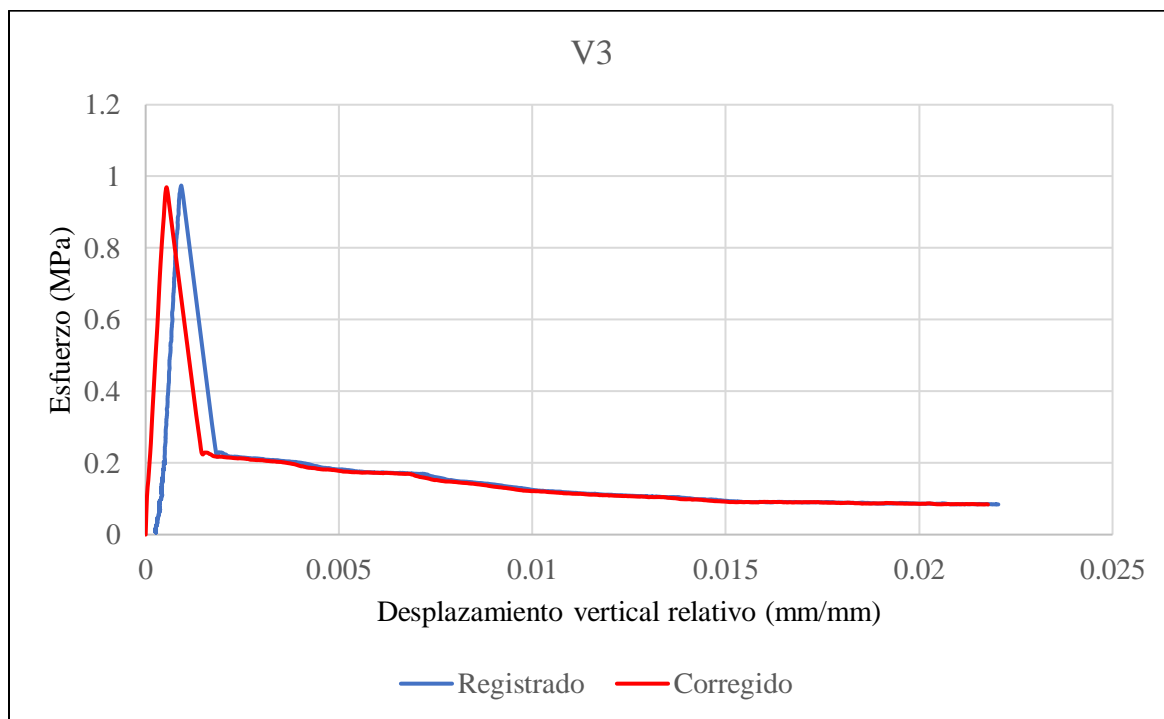
Descripción: *Fibras 3D*;  $\rho = 0.0$ ; dosificación =  $10 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;  $V_f = 0.12658$ ;  $f'_c = 40.404 \text{ MPa}$



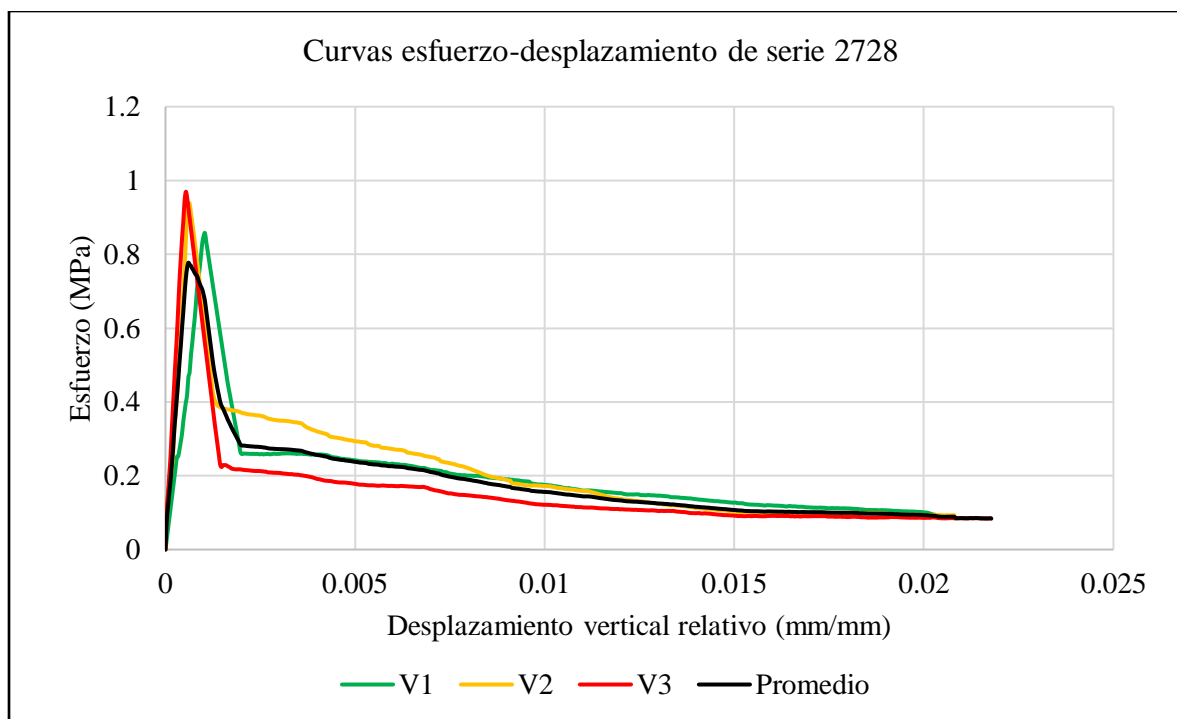
**Figura 4. 181.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-2728.



**Figura 4. 182.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-2728.



**Figura 4. 183.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-2728.

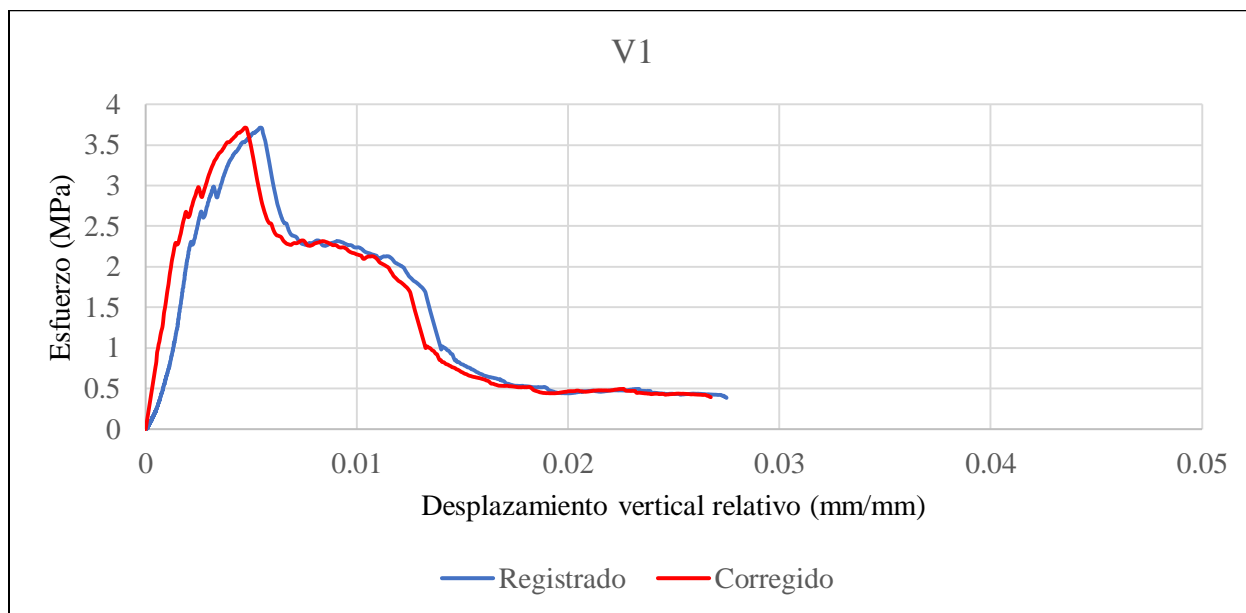


**Figura 4. 184.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 2728.

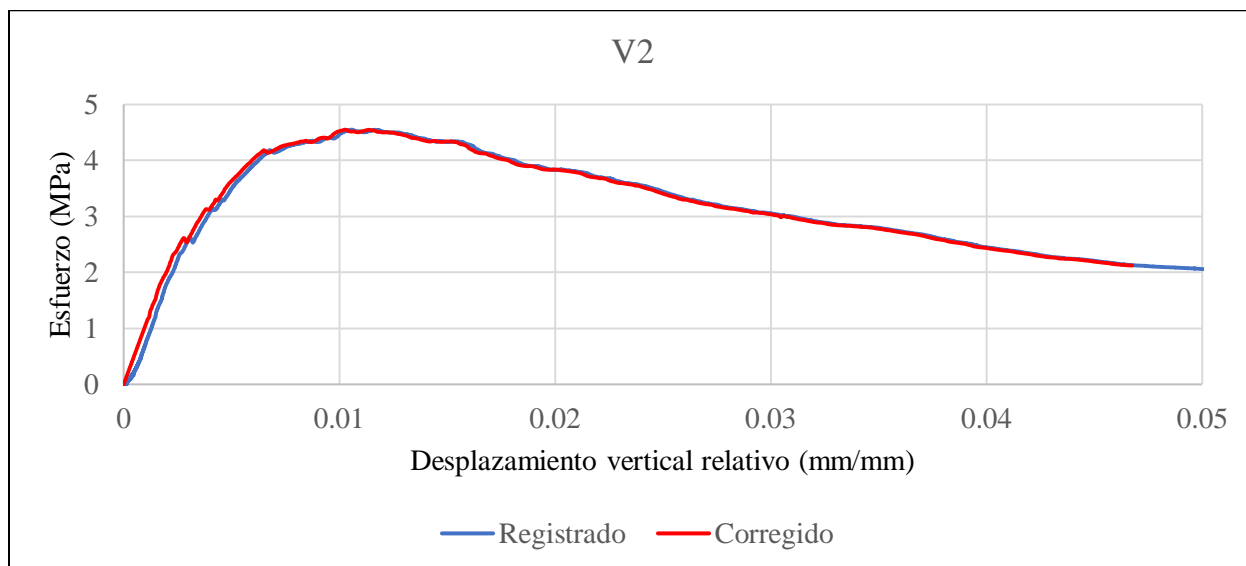
El comportamiento de las tres vigas resultó altamente homogéneo. Todas experimentaron una falla por flexión, lo cual se puede constatar visualmente debido a los esfuerzos alcanzados que fueron relativamente bajos, similar a lo que ocurrió en otras series que carecían de refuerzo longitudinal y que también experimentaron una falla por flexión. En este serie en particular, no se incluyó refuerzo longitudinal, pero se incorporaron fibras de acero en una configuración 3D con una dosificación de  $10 \text{ kg/m}^3$ . Las vigas presentaron una baja resistencia a la flexión, como se puede apreciar en los gráficos, donde se observa una considerable disminución de la resistencia. Esto se atribuye a la ausencia de refuerzo longitudinal y a la baja dosificación en esta serie. Desafortunadamente no se contó con evidencia fotográfica para esta serie ni las siguientes en este documento. Por otro lado, en la **Figura 4. 184** se observa que la curva de promedio presenta un comportamiento extraño y es debido a los dramáticos cambios de esfuerzo que presentan las vigas.

## Serie 2959

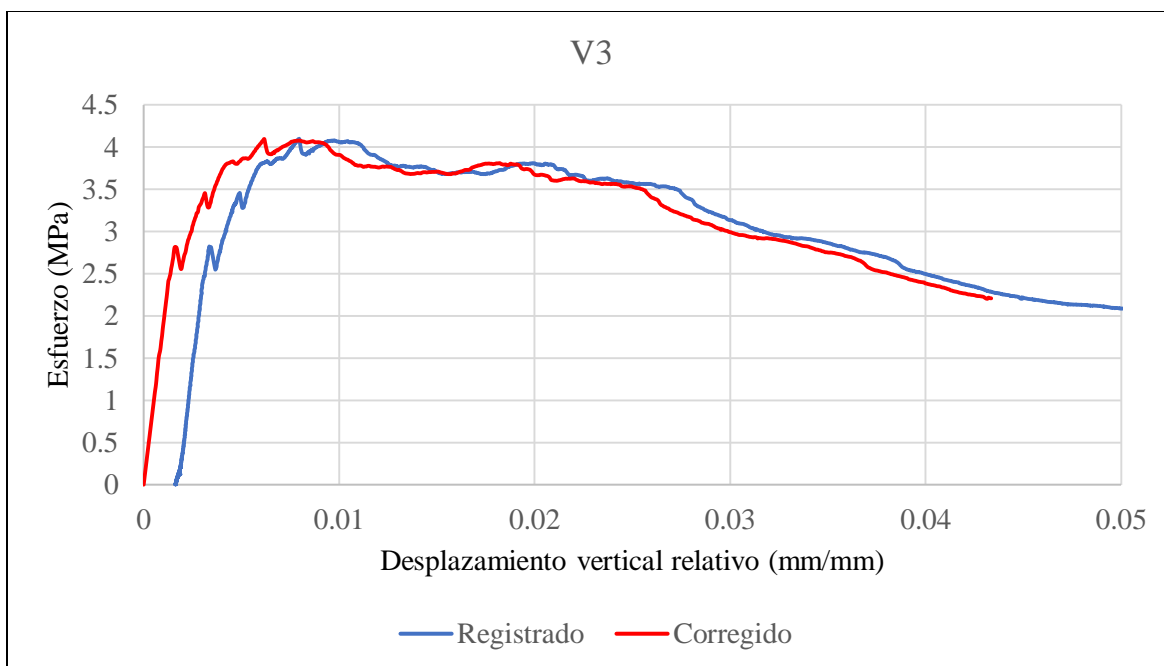
Descripción: *Fibras 5D*;  $\rho = 0.0056$ ; *dosificación* =  $10 \frac{kg}{m^3}$ ;  $V_f = 0.127$ ;  $f'_c = 40.01 MPa$



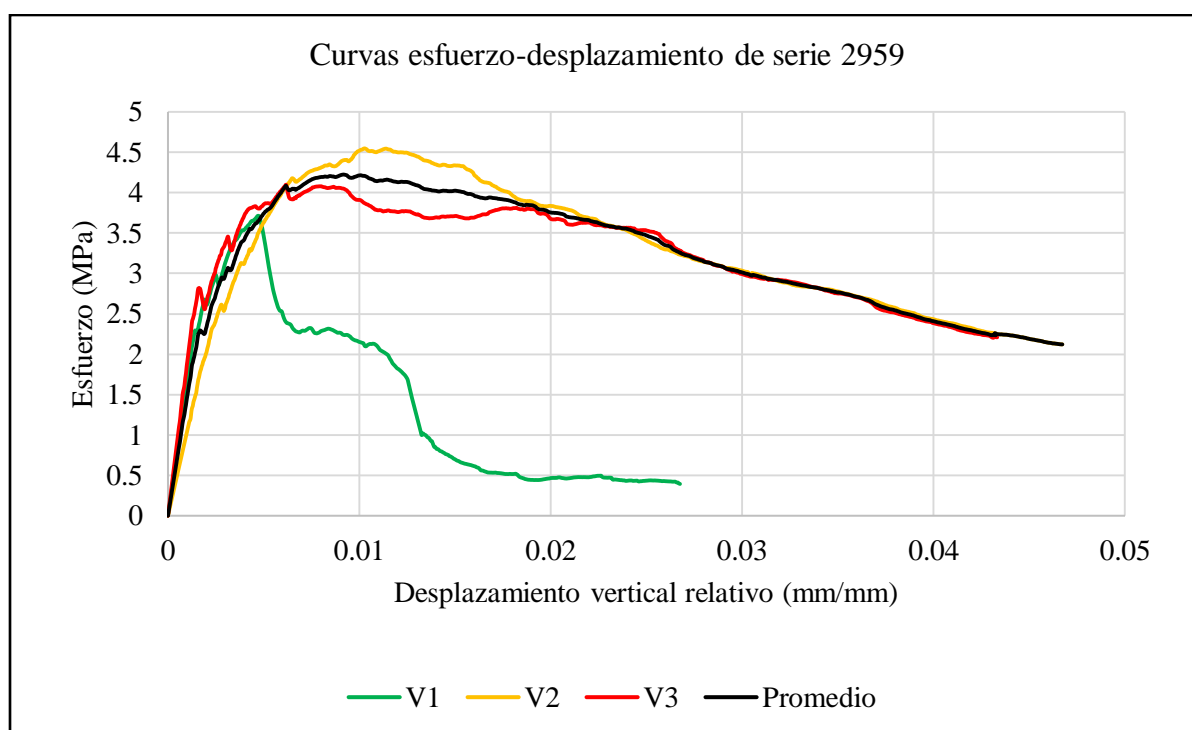
**Figura 4. 185.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-2959.



**Figura 4. 186.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-2959.



**Figura 4. 187.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-2959.



**Figura 4. 188.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las vigas V2 y V3 de la serie 2959.

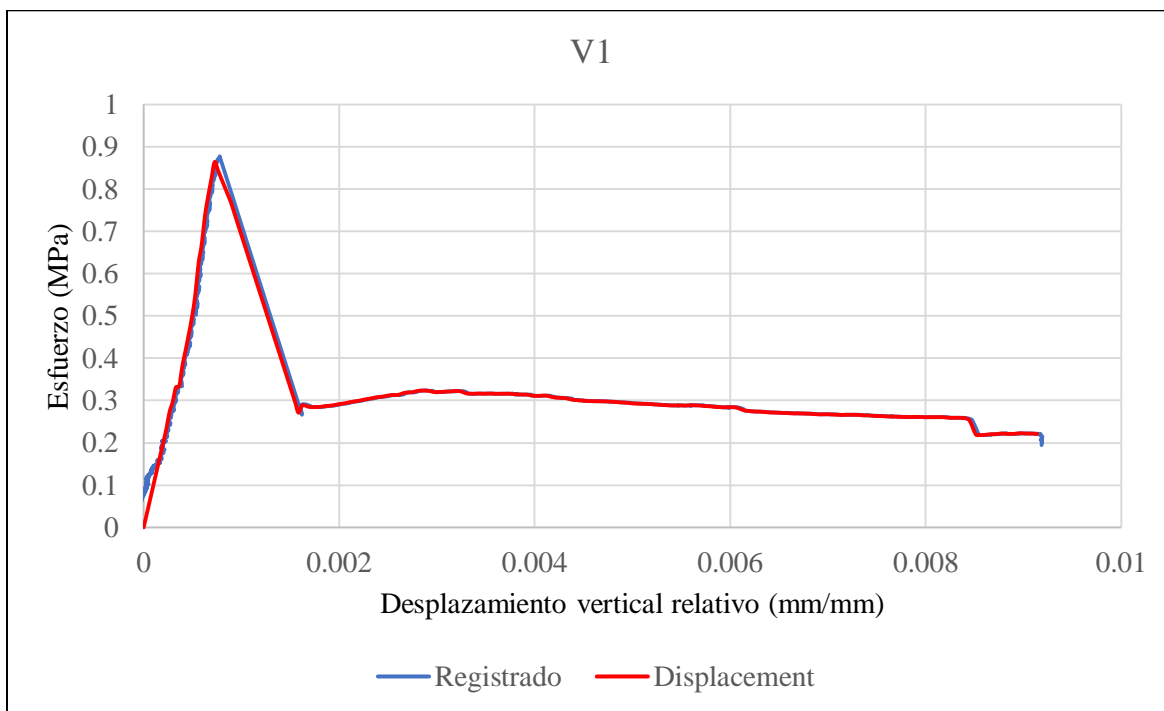


El comportamiento de las vigas V2 y V3 mostró una gran similitud. Ambas experimentaron una falla por cortante, lo cual es evidente al observar los esfuerzos alcanzados, que fueron más elevados que los registrados en las vigas de las series sin refuerzo longitudinal. Por otro lado, la viga V1 sufrió una falla por desconchamiento del concreto, lo que resultó en una caída de carga muy brusca y, por lo tanto, no se consideró en el cálculo del promedio.

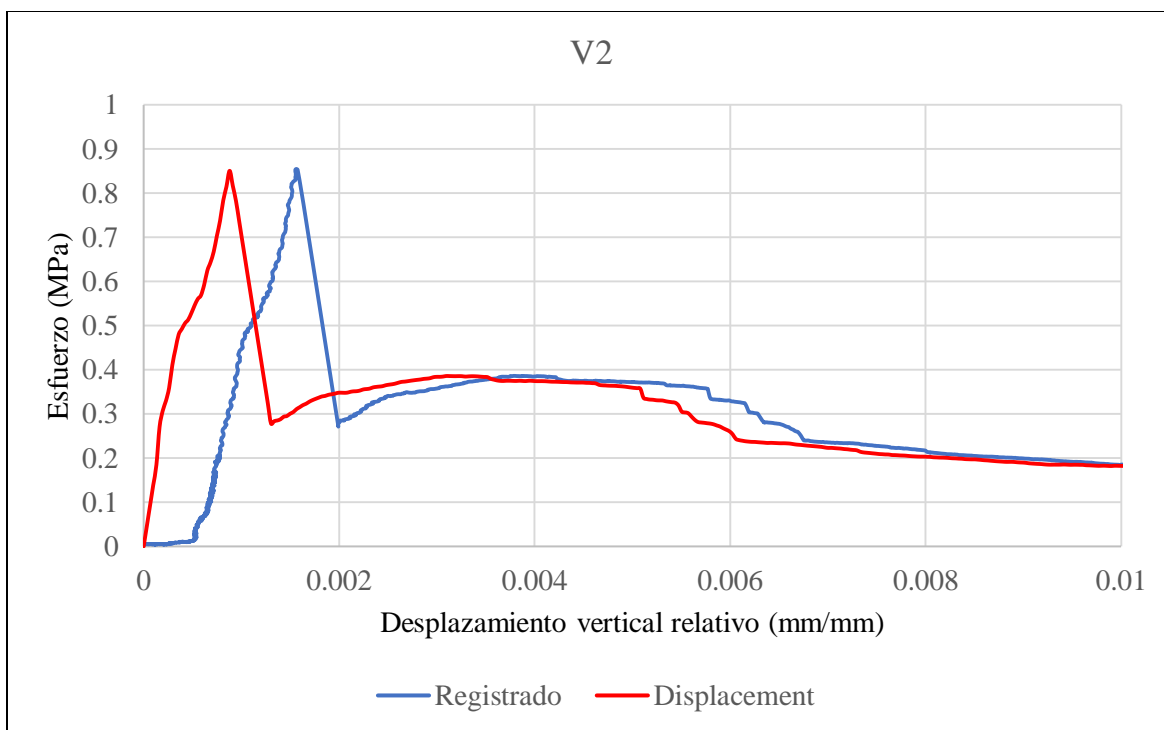
En esta serie, se añadió refuerzo longitudinal con una cuantía de 0.0056 y se añadieron fibras de acero en una configuración 5D con una dosificación de  $10 \text{ kg/m}^3$ . Las vigas V2 y V3, que exhibieron un comportamiento dúctil, ya que la disminución de la carga se produjo de manera gradual y con incrementos bajos.

#### **Serie 2960**

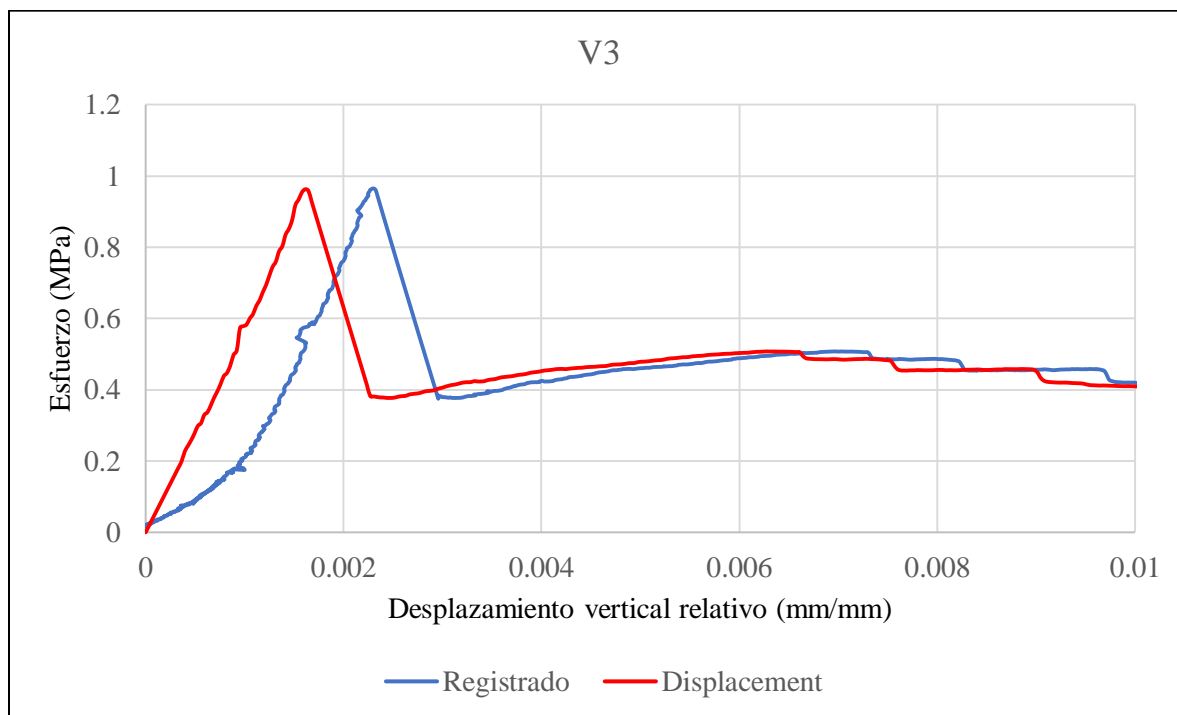
Descripción: *Fibras 5D*;  $\rho = 0.0$ ; *dosificación* =  $10 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;  $V_f = 0.12658$ ;  $f'_c = 42.13 \text{ MPa}$



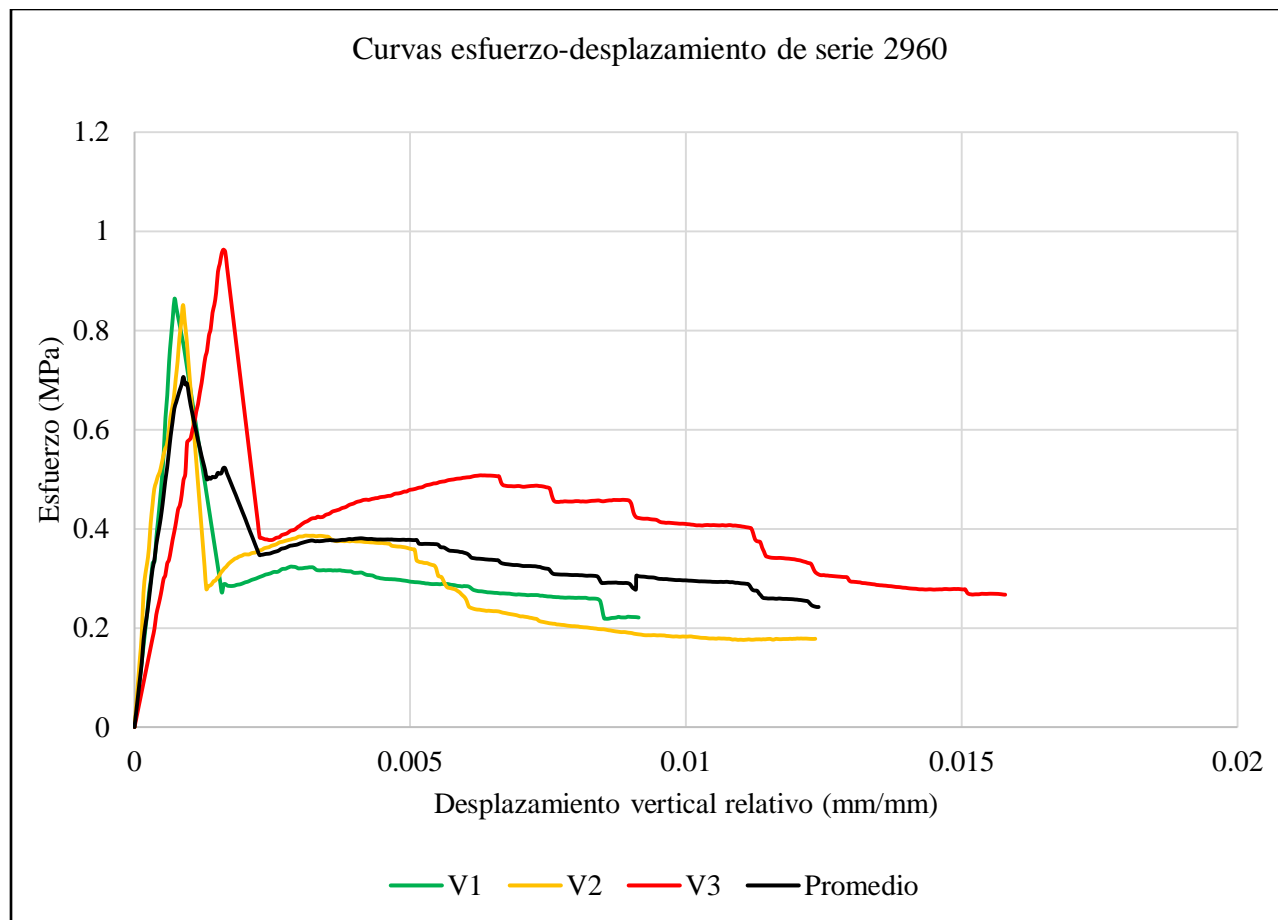
**Figura 4. 189.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-2960.



**Figura 4. 190.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-2960.



**Figura 4. 191.-** Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-2960.



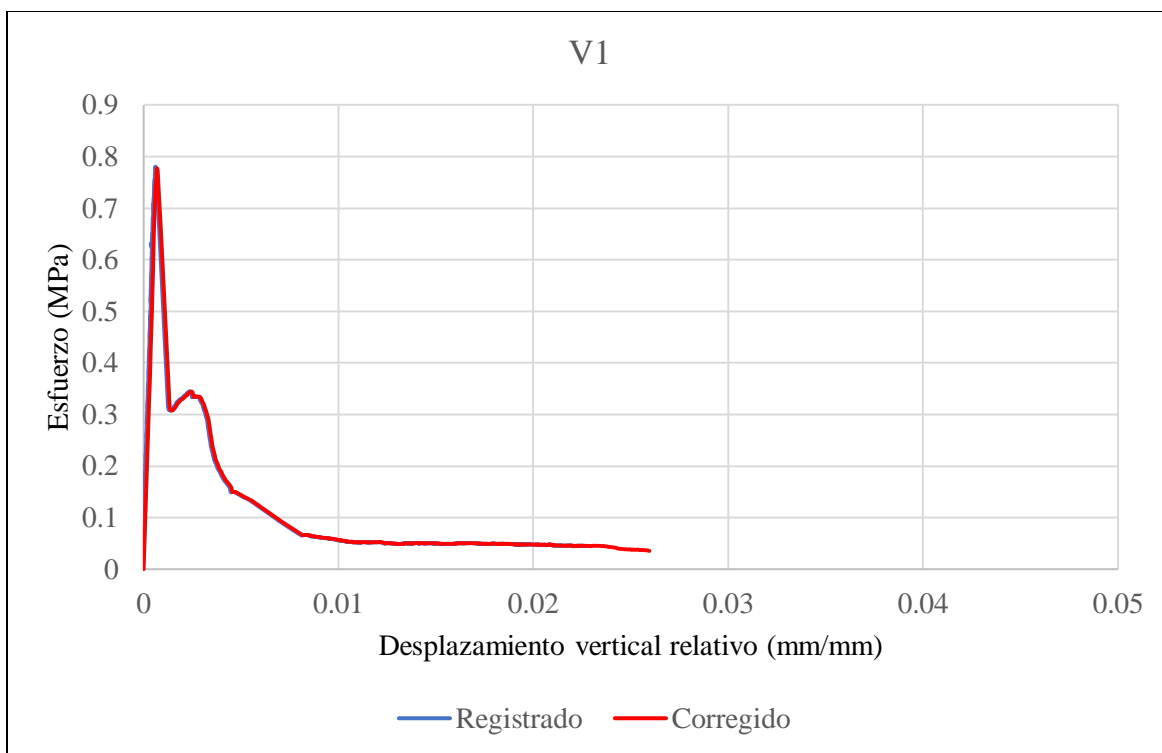
**Figura 4. 192.** – Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 2960.

El comportamiento de las tres vigas es muy similar y fallaron por flexión que se puede saber visualmente debido a que los esfuerzos alcanzados son similares que las vigas de las series sin refuerzo longitudinal, como lo es este.

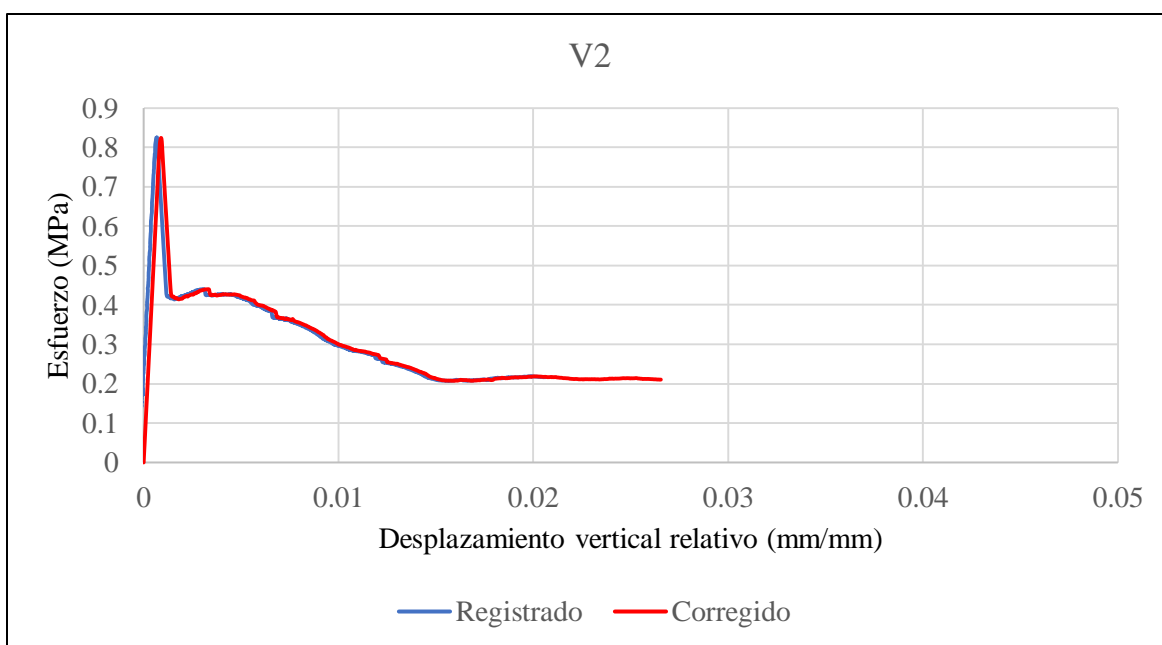
En esta serie, no se utilizó refuerzo longitudinal, pero se incorporaron fibras de acero en una configuración 5D con una dosificación de  $10 \text{ kg/m}^3$ . La caída de carga fue muy abrupta y los esfuerzos alcanzados resultaron bajos.

### Serie 3071

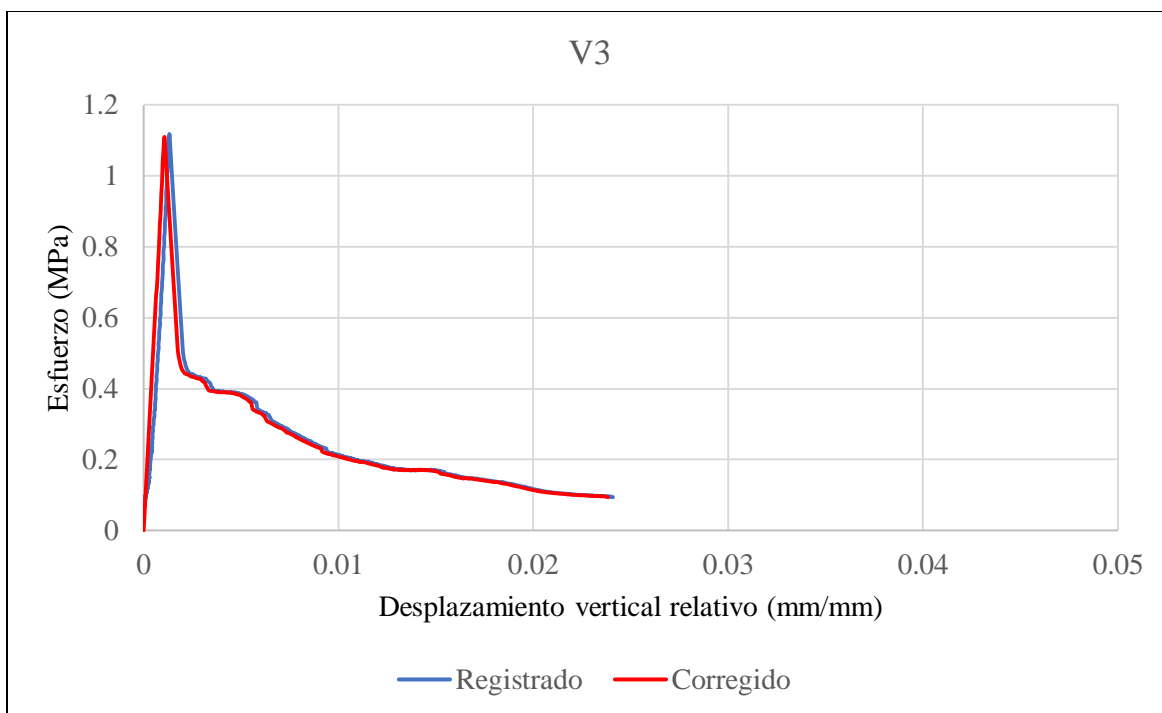
Descripción: *Fibras 4D*;  $\rho = 0.0$ ; dosificación =  $10 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;  $V_f = 0.12658$ ;  $f'_c = 42.29 \text{ MPa}$



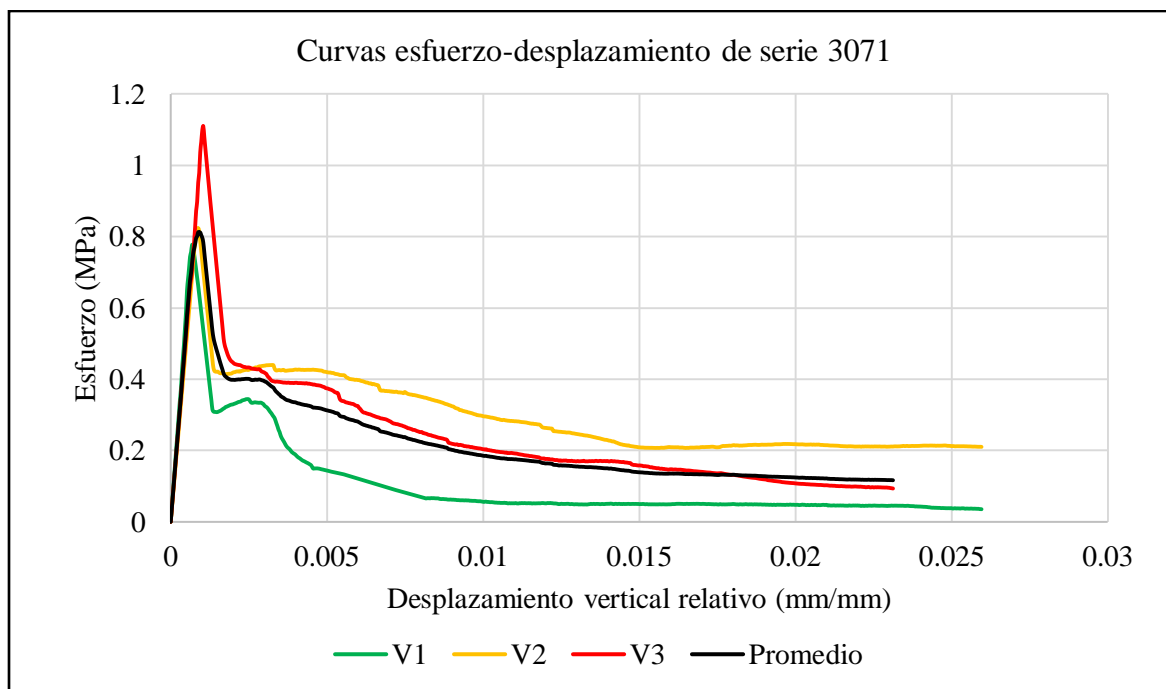
**Figura 4. 193.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-3071.



**Figura 4. 194.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-3071.



**Figura 4. 195.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-3071.



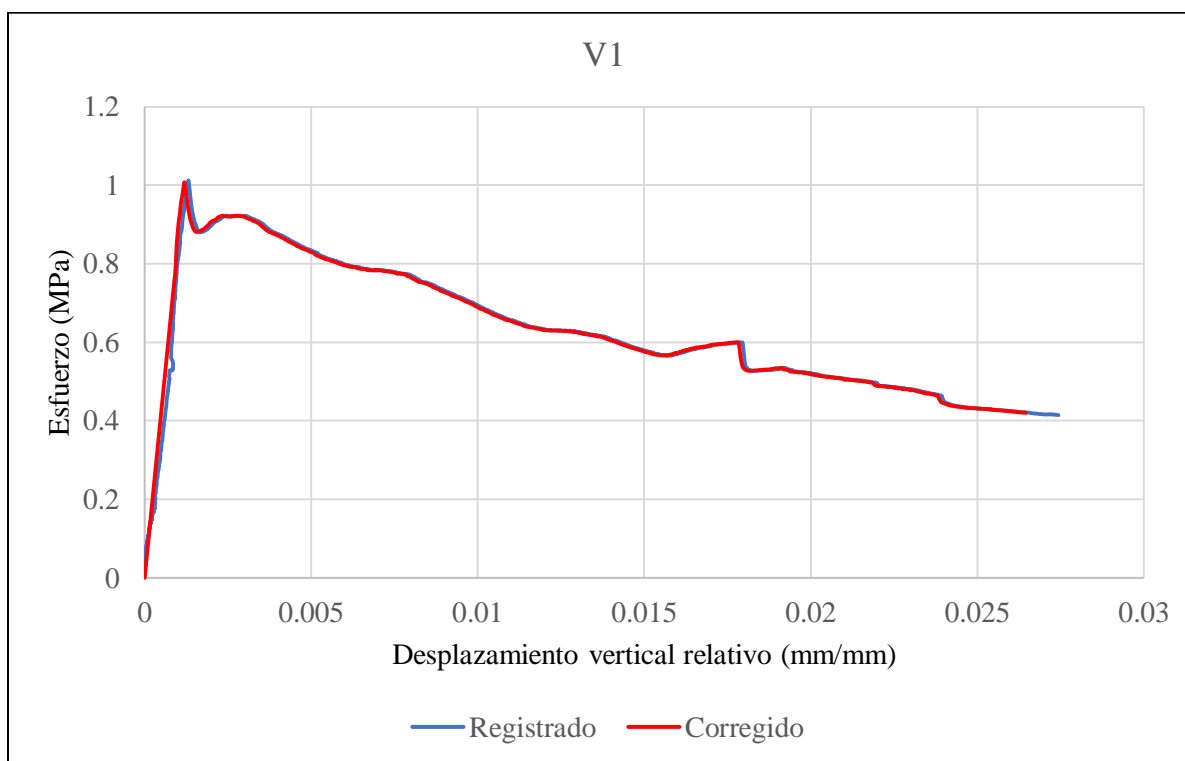
**Figura 4. 196.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 3071.

El comportamiento de las tres vigas resultó altamente consistente, ya que todas presentaron falla por flexión. Esto se evidencia en las curvas de esta serie, donde la forma de las curvas y los esfuerzos alcanzados fueron similares a los registrados en las vigas de las series sin refuerzo longitudinal.

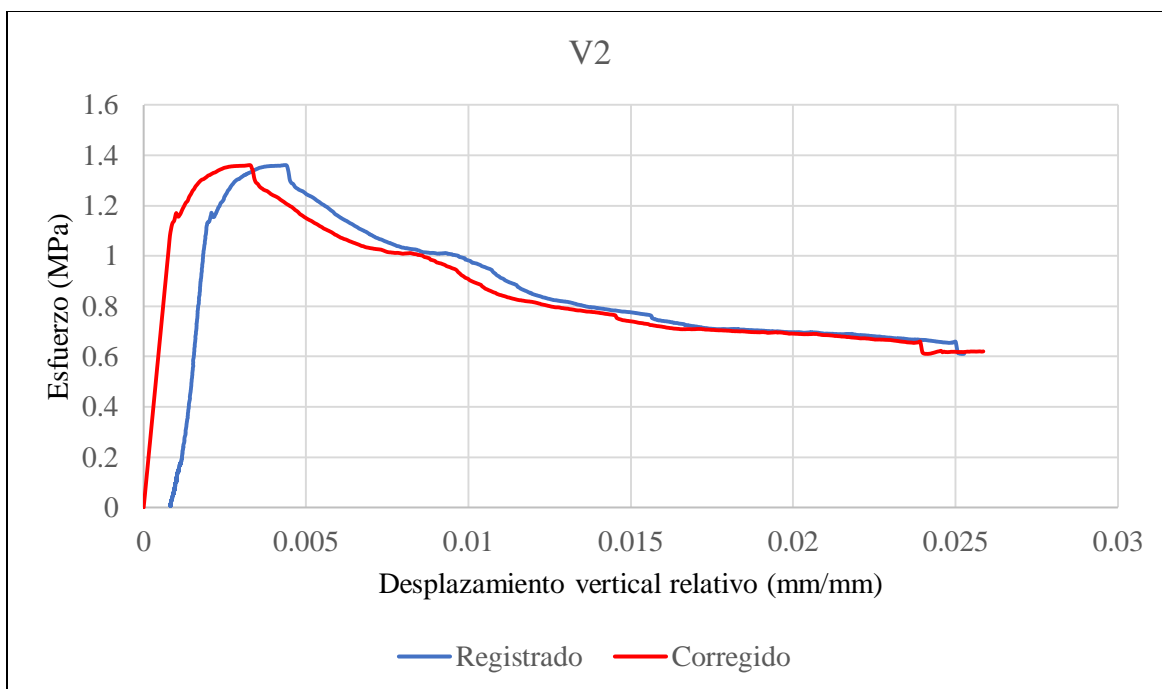
En esta serie, no se incluyó refuerzo longitudinal, pero se incorporaron fibras de acero en una configuración 4D con una dosificación de  $10 \text{ kg/m}^3$ . La caída abrupta de la carga y los esfuerzos bajos alcanzados resaltan la importancia del refuerzo longitudinal en la resistencia estructural.

### *Serie 3072*

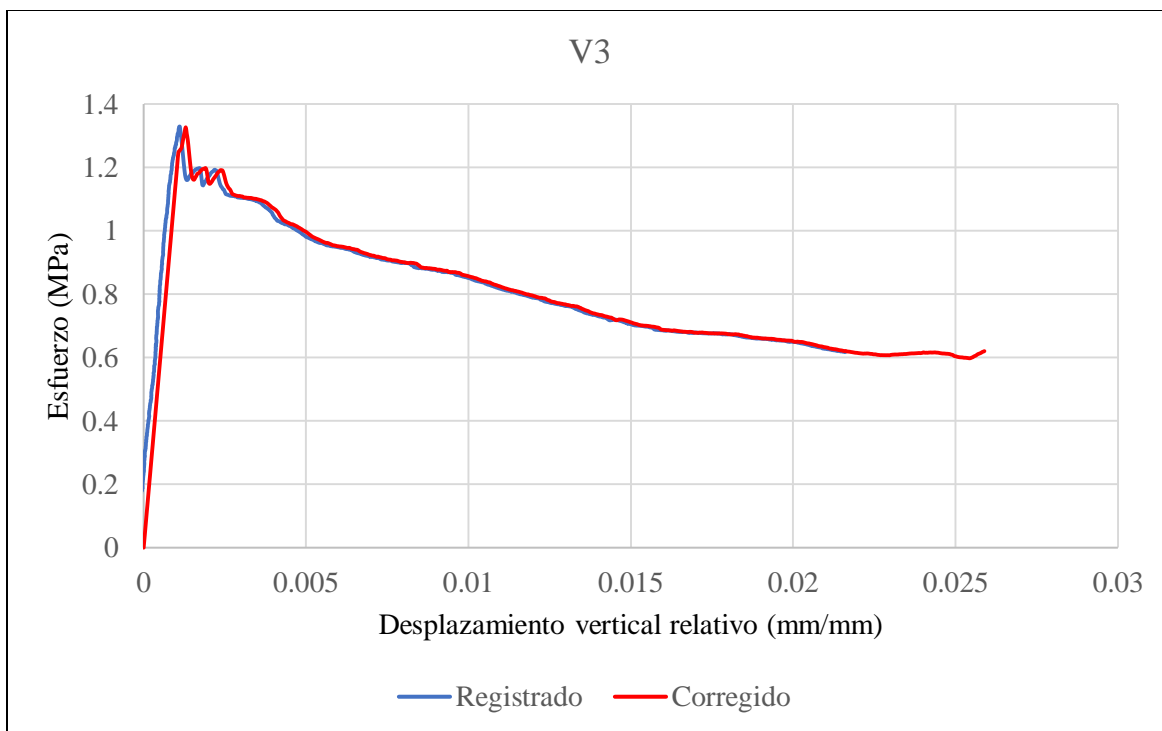
Descripción: *Fibras 3D*;  $\rho = 0.0$ ; dosificación =  $40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;  $V_f = 0.506$ ;  $f'_c = 38.91 \text{ MPa}$



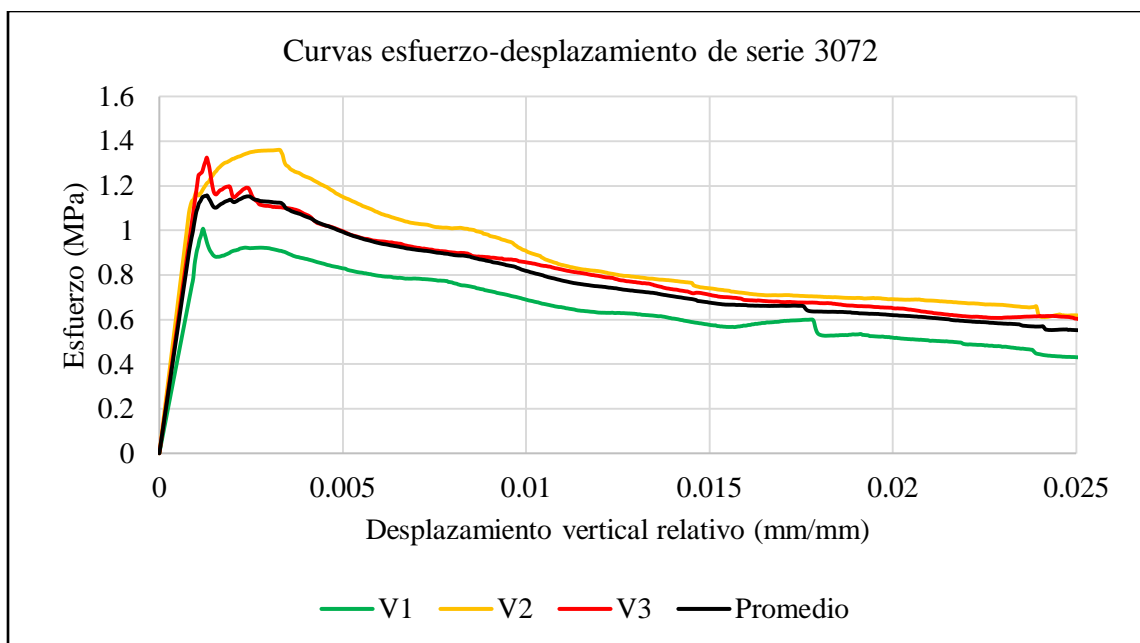
**Figura 4. 197.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V1-3072.



**Figura 4. 198.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V2-3072.



**Figura 4. 199.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical relativo para mediciones (azul) y correcciones (rojo) para viga V3-3072.



**Figura 4. 200.** - Curvas esfuerzo-desplazamiento promedio de vigas V1, V2 y V3, y el promedio entre las tres vigas de la serie 3072.

El comportamiento de las tres vigas mostró una notable uniformidad, todas presentaron falla por flexión, lo cual se puede determinar visualmente en las curvas por su forma y que los esfuerzos alcanzados fueron similares a los registrados en las vigas de las series sin refuerzo longitudinal, como es el caso de esta serie.

En esta serie, no se añadió refuerzo longitudinal, pero se incluyeron fibras de acero en una configuración 3D con una dosificación de  $40 \text{ kg/m}^3$ . La caída de la carga no fue abrupta, aunque los esfuerzos alcanzados fueron bajos, lo cual se debe a la alta dosificación de las fibras de acero en la mezcla.

### **Análisis de Datos Obtenidos en Laboratorio**

Después de procesar los datos y generar las curvas esfuerzo-desplazamiento para cada una de las viga, se compararon las diferentes series que compartían el mismo tipo de fibra y la misma cuantía de acero de refuerzo longitudinal. Este análisis permitió contrastar el



comportamiento promedio de estas series y, a partir de los resultados experimentales, evaluar la influencia de la dosificación de fibras en el comportamiento estructural. En las

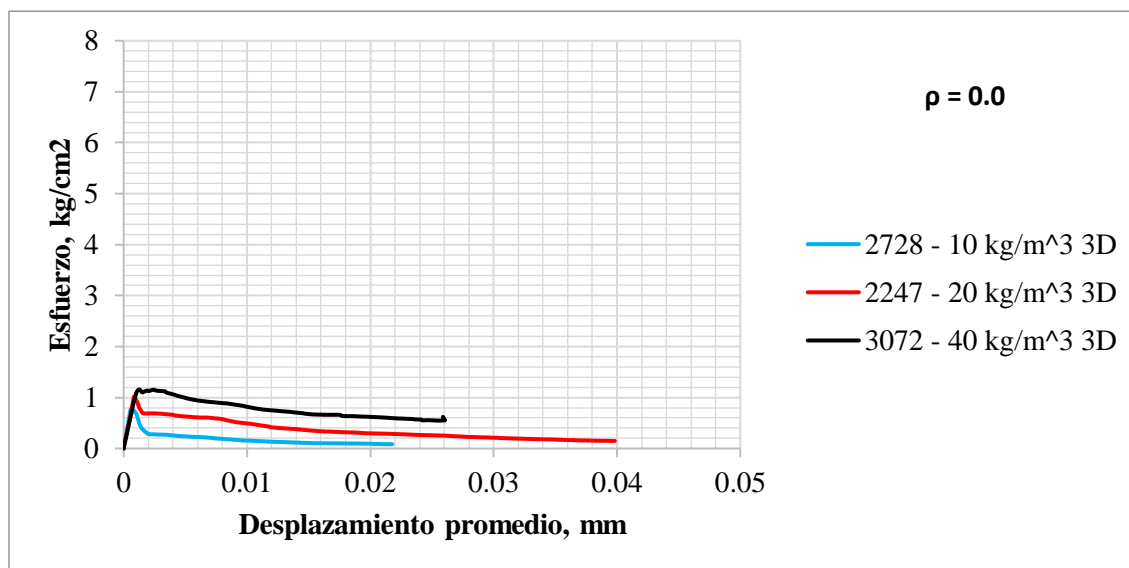


Figura 4. 201 a Figura 4. 209 se presentan estas la comparación entre vigas con misma cuantía de acero longitudinal y mismo tipo de fibra. Dichas figuras se presentan a la misma escala para su fácil comparación.

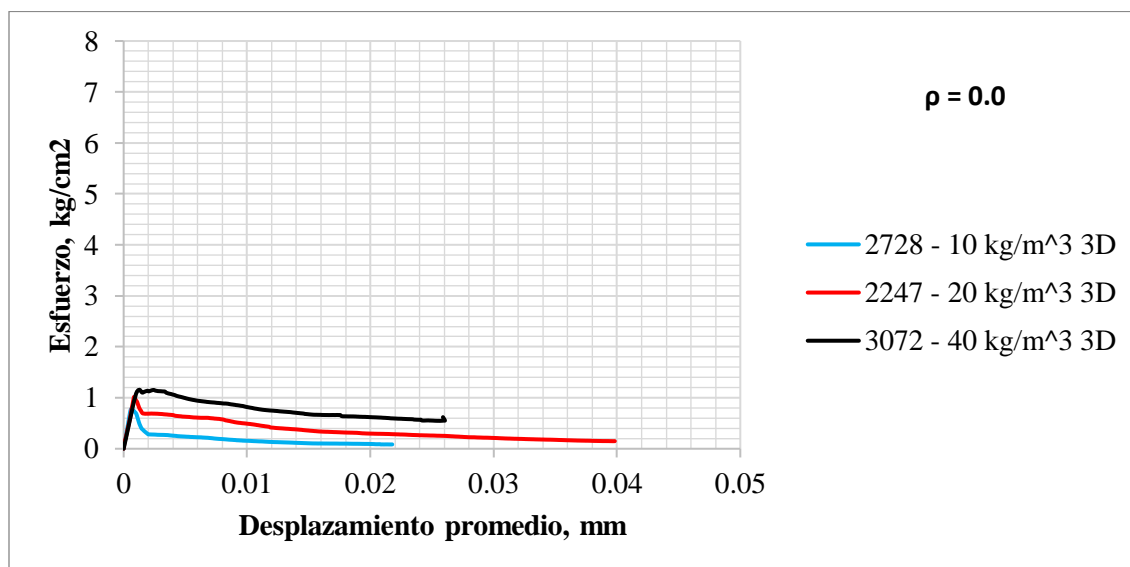


Figura 4. 201. – Curvas promedio esfuerzo-desplazamiento de las series con fibras 3D y cuantía de acero 0.

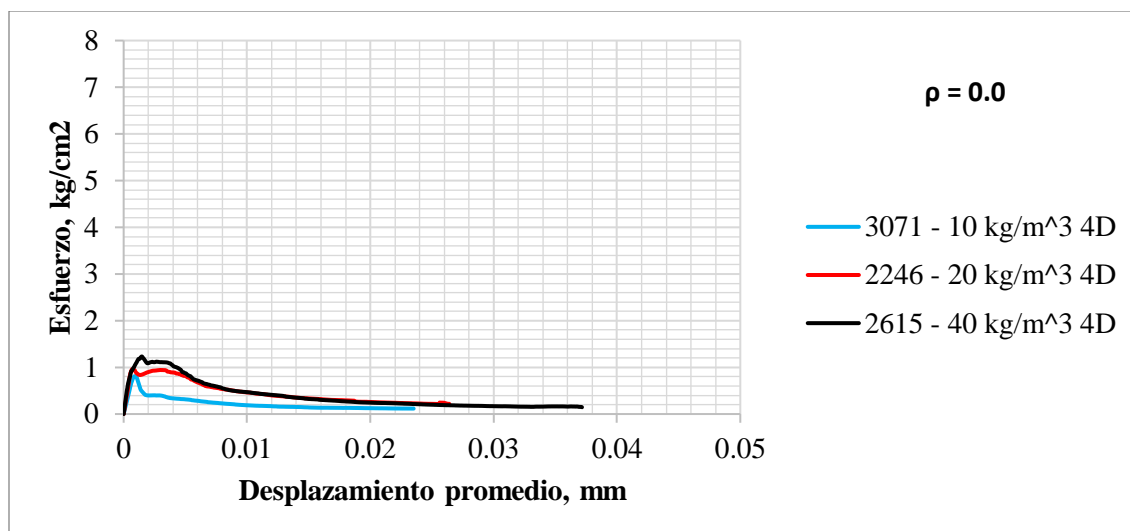


Figura 4. 202. - Curvas promedio esfuerzo-desplazamiento de las series con fibras 4D y cuantía de acero 0.

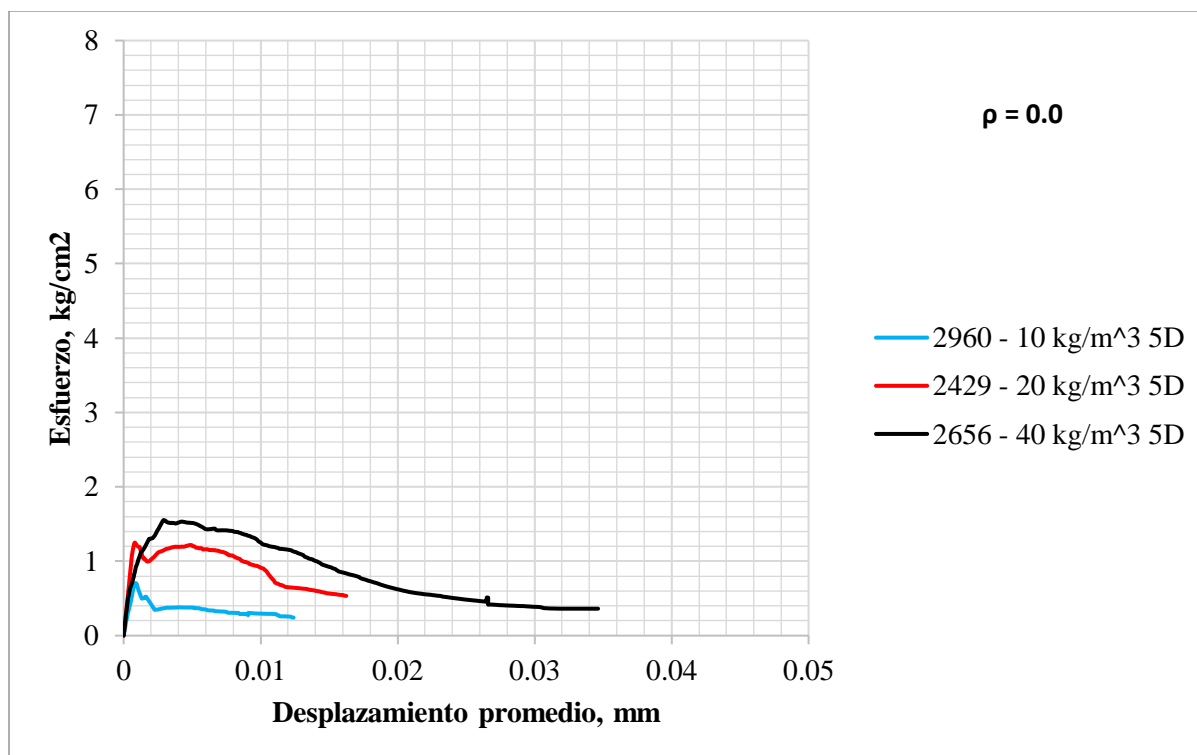
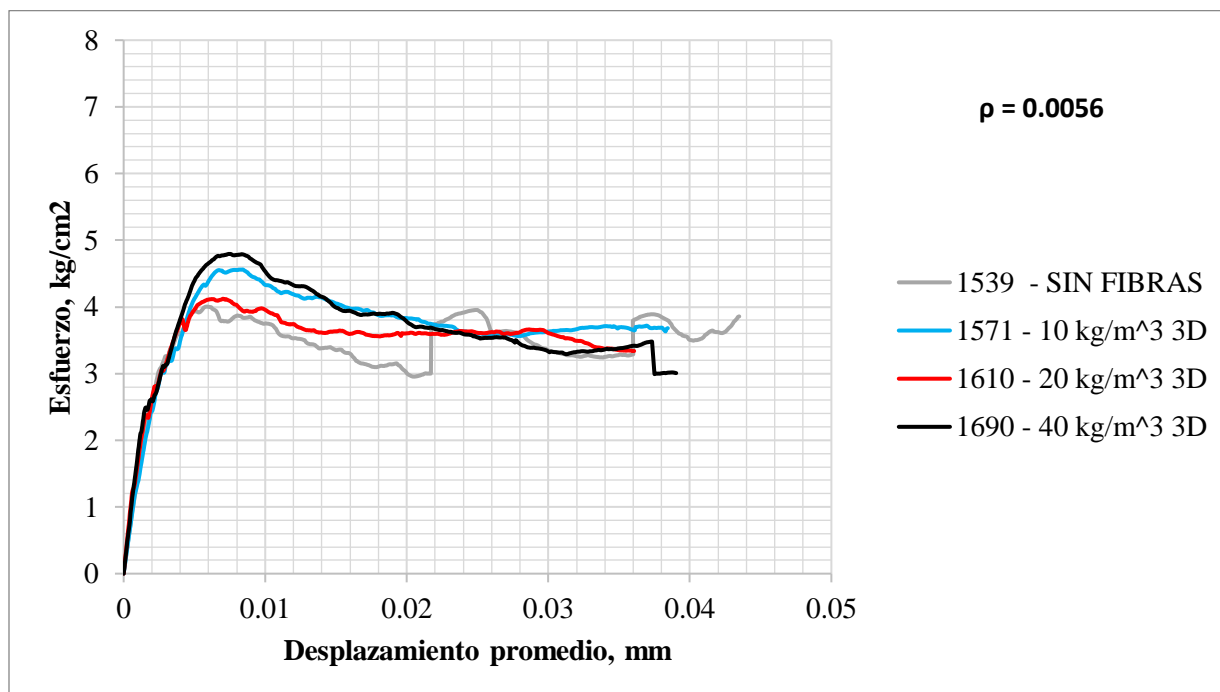


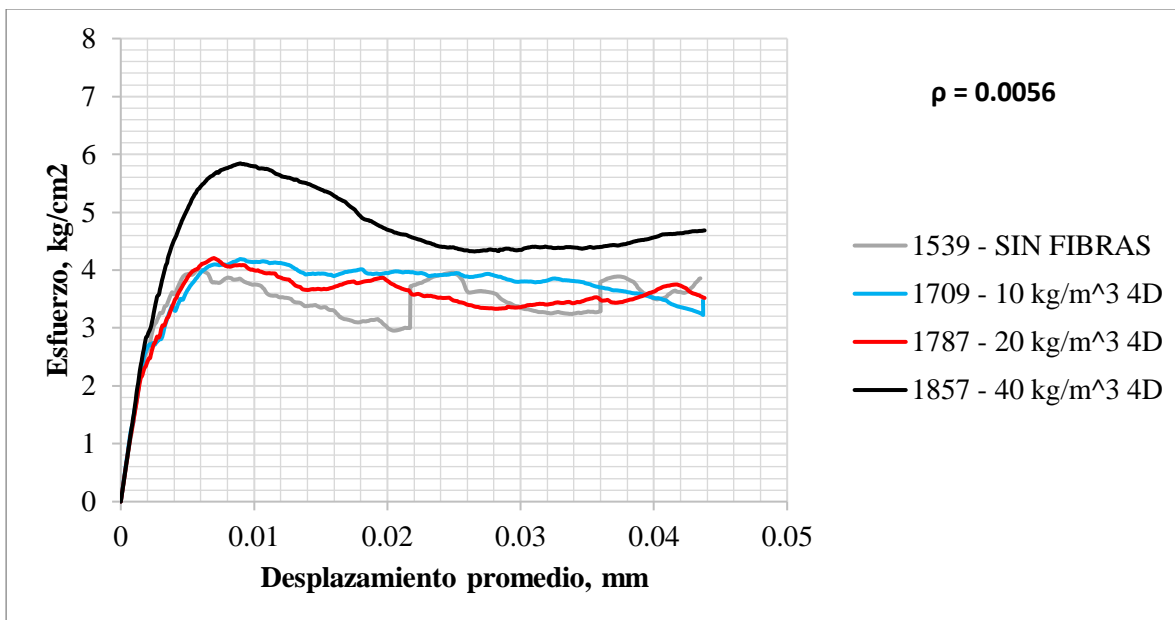
Figura 4. 203. - Curvas promedio esfuerzo-desplazamiento de las series con fibras 5D y cuantía de acero 0.

Al examinar las figuras, se observa que las series que carecen de acero de refuerzo longitudinal alcanzaron una resistencia muy baja y experimentaron falla por flexión. Además, se nota que las líneas negras, que representan a las vigas con dosificación más alta ( $40 \text{ kg/m}^3$ ), son las que exhibieron una mayor resistencia y ductilidad.

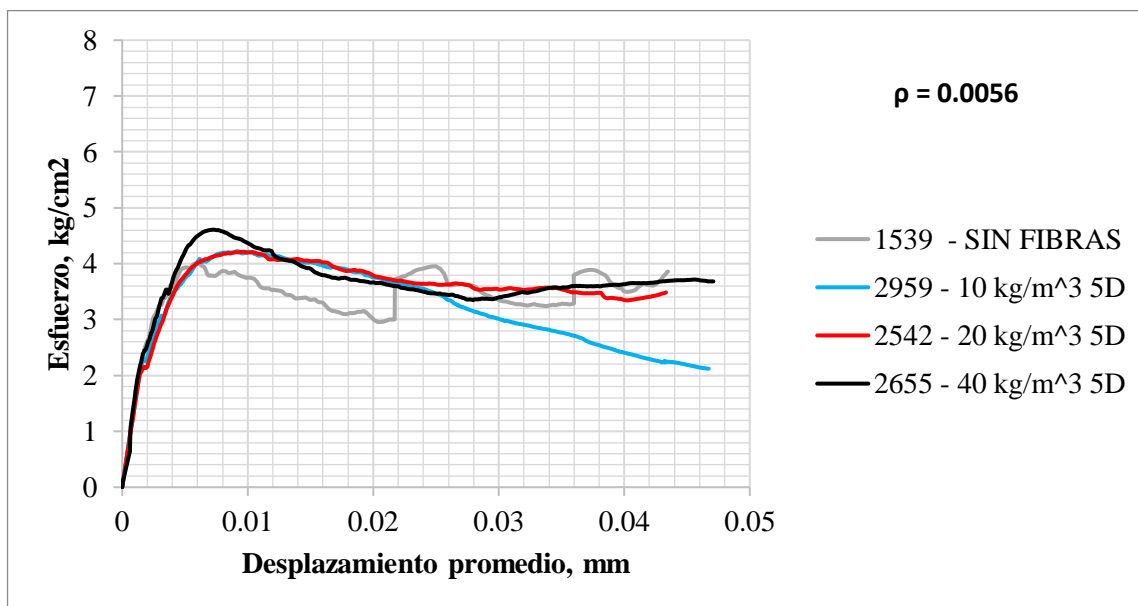
Por otro lado, es importante destacar que las diferencias en el tipo de fibra no son tan significativas, aunque se observa un mejor comportamiento en las fibras 5D en comparación con las 4D, y a su vez, un mejor desempeño en las fibras 4D en comparación con las 3D. Las fibras 5D tienen mejor desempeño sobre las 4D y 3D, especialmente en dosificaciones altas. Esto significa que a medida que aumenta la cantidad de fibras 5D en la mezcla de concreto, su desempeño tiende a ser más efectivo en términos de resistencia y durabilidad.



**Figura 4. 204.** - Curvas promedio esfuerzo-desplazamiento de las series con cuantía de acero 0.0056, con fibras 3D y sin fibras



**Figura 4. 205.** - Curvas promedio esfuerzo-desplazamiento de las series con cuantía de acero 0.0056, con fibras 4D y sin fibras.

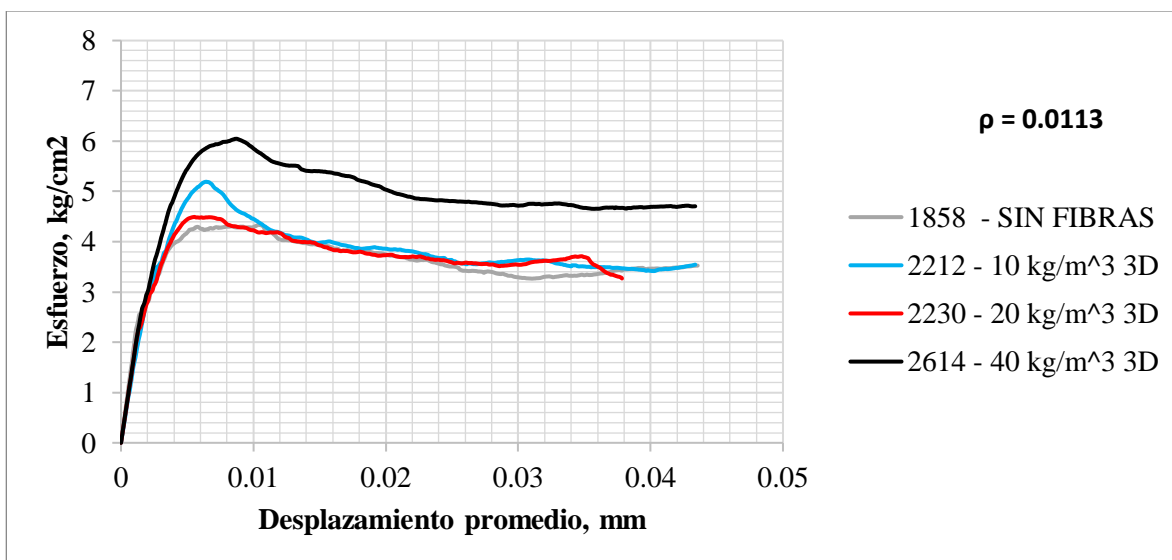


**Figura 4. 206.** - Curvas promedio esfuerzo-desplazamiento de las series con cuantía de acero 0.0056, con fibras 5D y sin fibras.

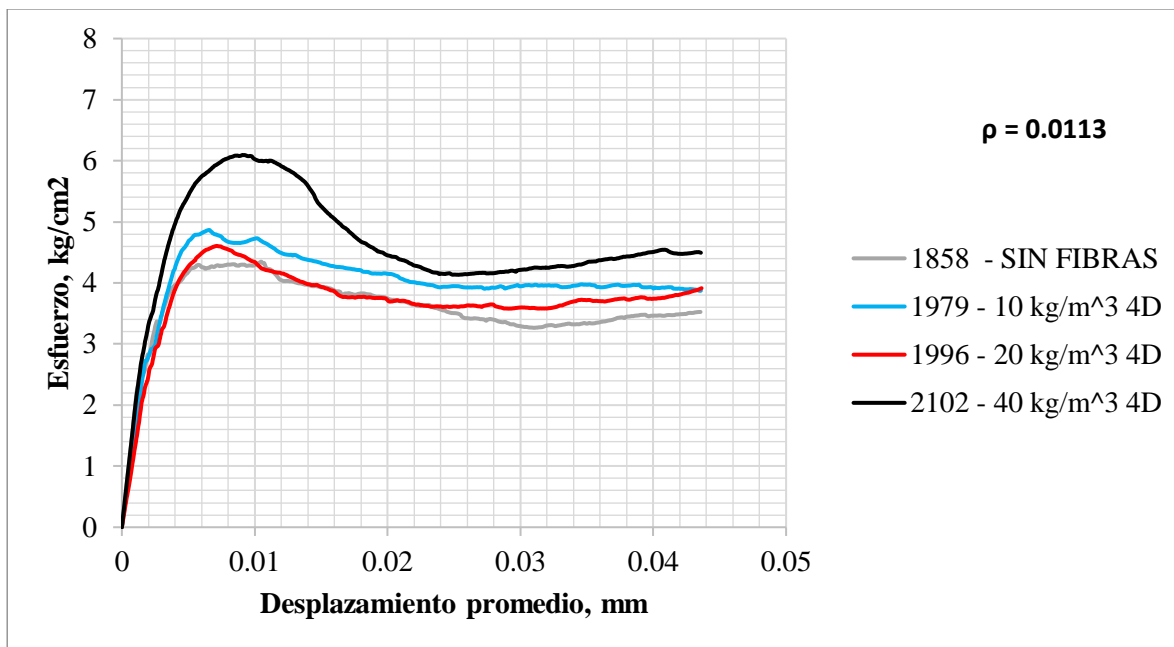
Las series que contaban con cuantía de refuerzo longitudinal de 0.0056 mostraron una capacidad mayor para resistir esfuerzos que las vigas sin refuerzo longitudinal. Además,

experimentaron una falla por esfuerzo cortante. Es interesante destacar que todas las series con fibras demostraron una mayor resistencia en comparación con aquellas que sólo contaban con refuerzo longitudinal.

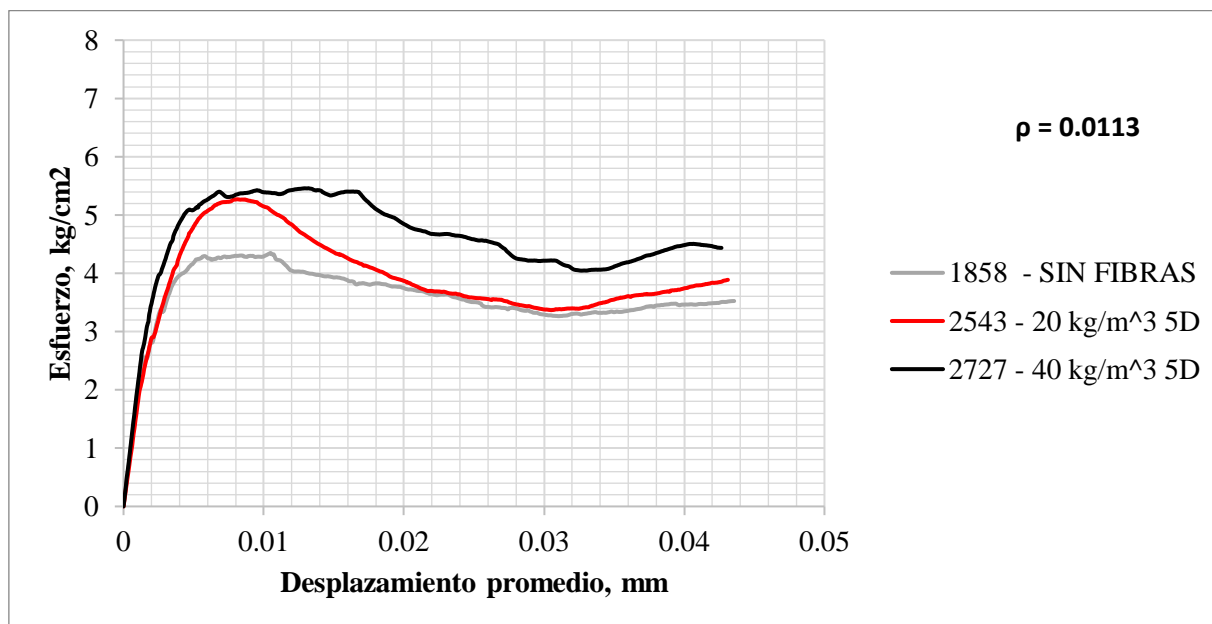
En la **Figura 4. 204**, correspondiente a las fibras 3D, se puede apreciar que la dosificación no tuvo un impacto tan pronunciado. Por ejemplo, los especímenes del serie 1571 con una dosificación de  $10 \text{ kg/m}^3$  alcanzaron esfuerzos muy similares a los del serie 1690 con una dosificación de  $40 \text{ kg/m}^3$ . Sin embargo, en las **Figura 4. 205** y **Figura 4. 206**, que corresponden a las fibras 4D y 5D, respectivamente, los especímenes con una dosificación de  $40 \text{ kg/m}^3$  lograron los esfuerzos más altos. Cabe señalar que la serie 2542 con dosificación de  $20 \text{ kg/m}^3$  y la serie 2959 con dosificación de  $10 \text{ kg/m}^3$  mostraron un comportamiento muy similar, siendo la serie 2542 ligeramente más dúctil. Para las fibras 5D no hay efecto apreciable para distintas dosificaciones como se observa en la **Figura 4. 206**, mientras que para las fibras 3D hay un efecto poco apreciable, para las fibras 4D si lo hay, siendo que las dosificaciones más altas fueron las más capaces de resistir esfuerzos.



**Figura 4. 207.** - Gráficos promedio de cuantía de acero 0.013, con fibras 3D y sin fibras.



*Figura 4. 208.* - Gráficos promedio de cuantía de acero 0.0113, con fibras 4D y sin fibras.



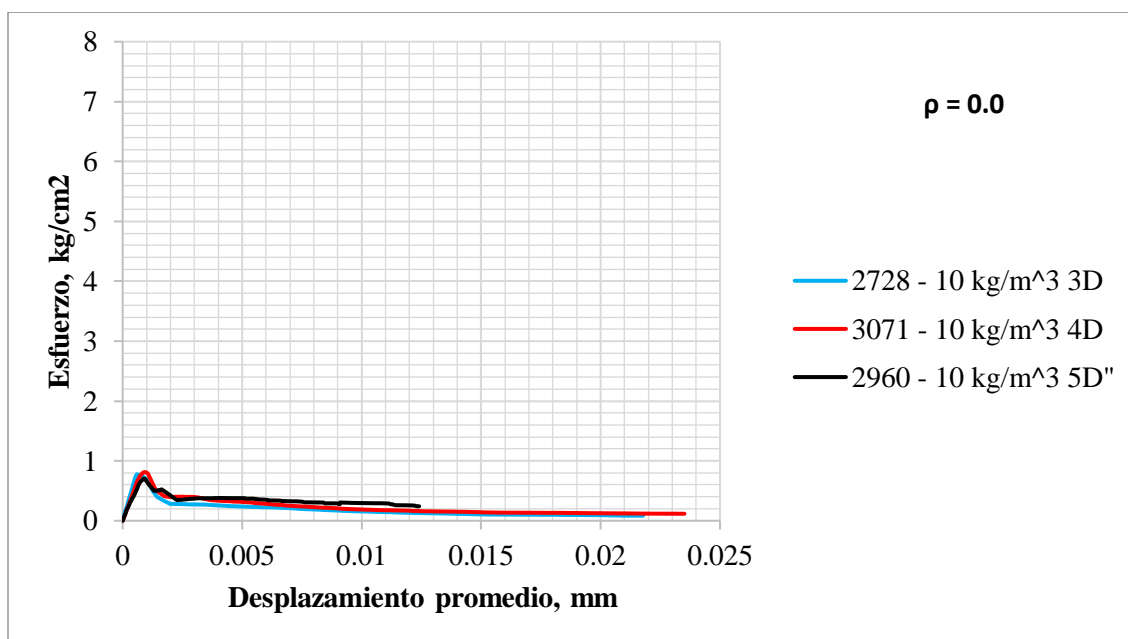
*Figura 4. 209.* - Gráficos promedio de cuantía de acero 0.0113, con fibras 5D y sin fibras.

En las **Figura 4. 207** **Figura 4. 209** se presentan los resultados de los ensayos de las vigas con cuantía de refuerzo longitudinal de 0.0113, los cuales mostraron una notable capacidad para resistir esfuerzos, mucho más elevados en comparación con las demás. Como se tenía previsto,

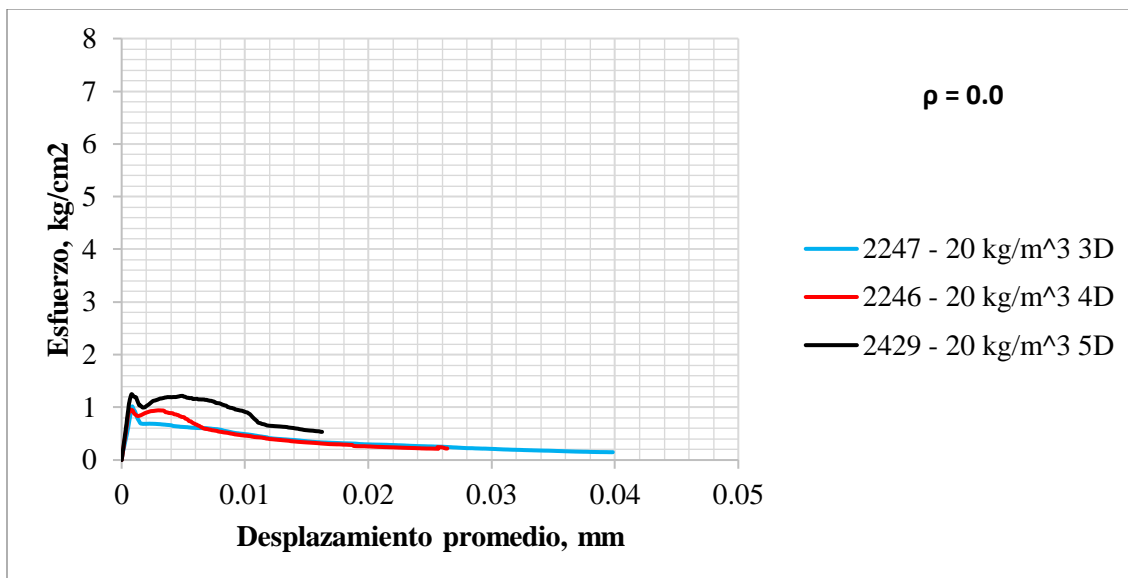
experimentaron una falla por esfuerzo cortante. Sin embargo, lamentablemente, debido a un error en la fabricación de los especímenes, no se dispuso de una serie con dosificación de  $10 \text{ kg/m}^3$  y fibras 5D.

En todas las figuras, se aprecia que las series con una dosificación de  $40 \text{ kg/m}^3$  lograron los esfuerzos más altos, mientras que las series con dosificaciones de  $20 \text{ kg/m}^3$  y  $10 \text{ kg/m}^3$  exhibieron un comportamiento muy similar. Aunque los primeros alcanzaron esfuerzos máximos ligeramente superiores, las curvas se superponen al mantener la carga. A partir de esto, se puede concluir que la dosificación tuvo un impacto significativo en este tipo de especímenes.

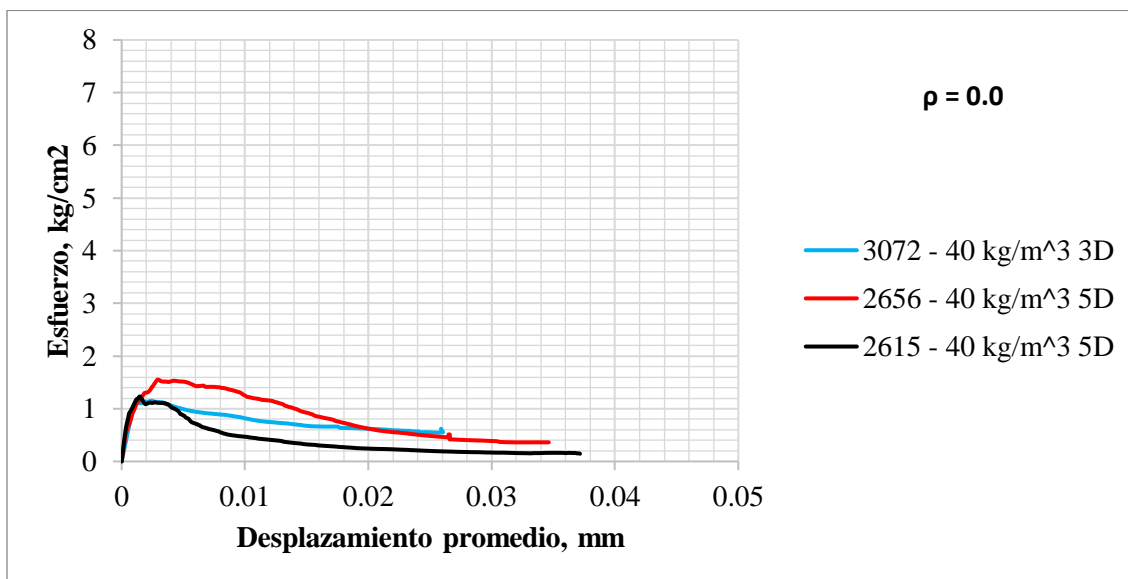
Por otro lado, es importante hacer este mismo análisis, pero para vigas que compartan la misma cuantía de acero longitudinal y misma dosificación, para así, apreciar el posible efecto en los esfuerzos alcanzados variando los tipos de fibra. En las **Figura 4. 210** **Figura 4. 218** se presenta dicha comparación.



**Figura 4. 210.** - Gráficos promedio de cuantía de acero 0, con dosificación de  $10 \text{ kg/m}^3$ .



*Figura 4. 211.* - Gráficos promedio de cuantía de acero 0, con dosificación de 20 kg/m<sup>3</sup>.



*Figura 4. 212.* - Gráficos promedio de cuantía de acero 0, con dosificación de 40 kg/m<sup>3</sup>.

Al examinar las figuras, se observa que los series que carecen de acero de refuerzo longitudinal alcanzaron una resistencia muy baja y experimentaron falla por flexión. Por otro lado, se resalta que la diferencia entre la resistencia a cortante no se ve muy afectada por el tipo de fibra, pues en todas las figuras, se puede ver que alcanzaron esfuerzos muy similares.



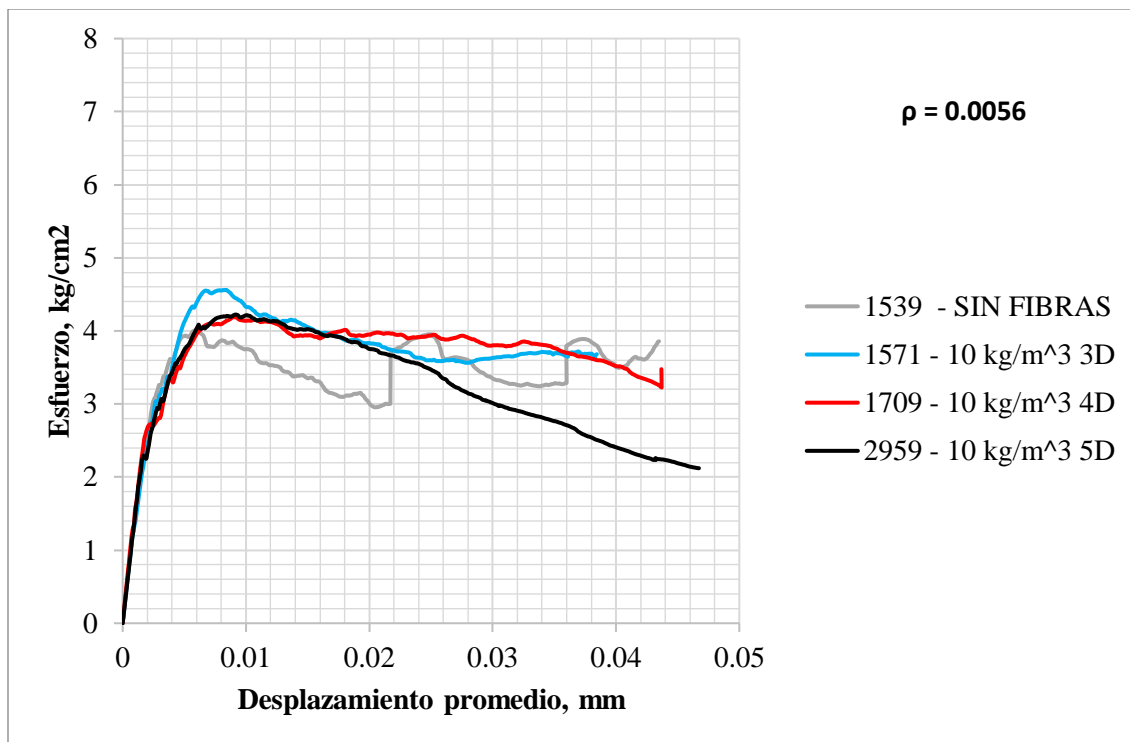


Figura 4. 213. - Gráficos promedio de cuantía de acero 0.0056, con dosificación de 10 kg/m<sup>3</sup> y sin fibras.

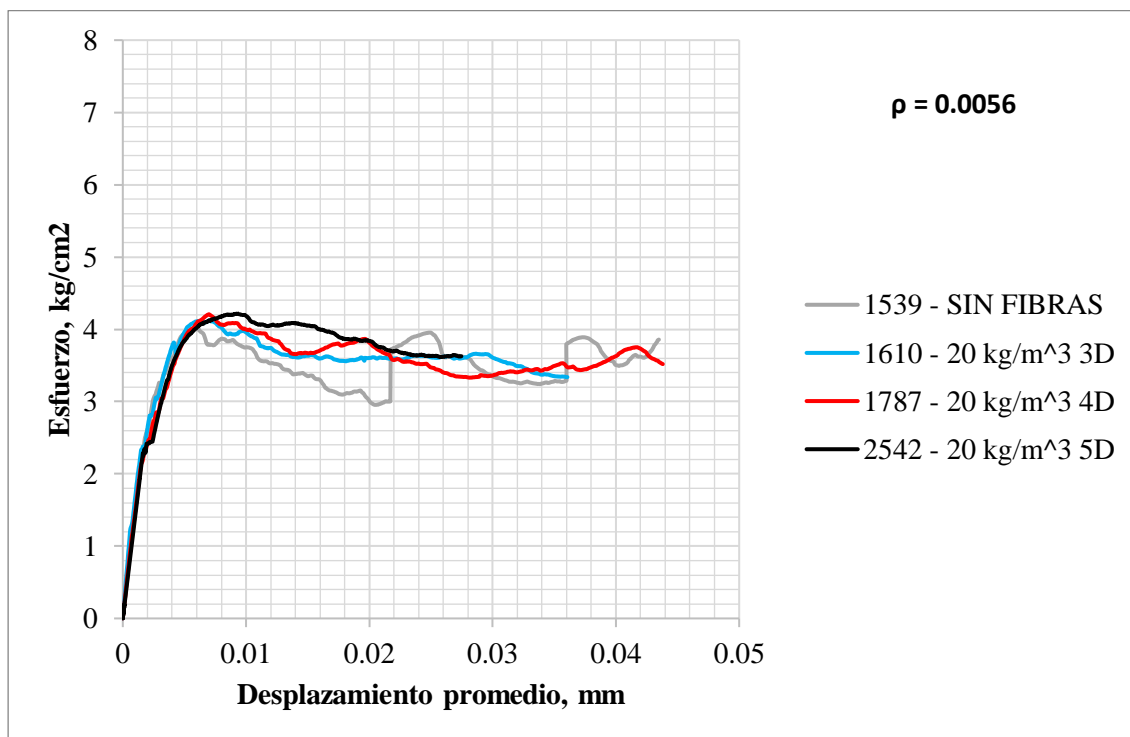
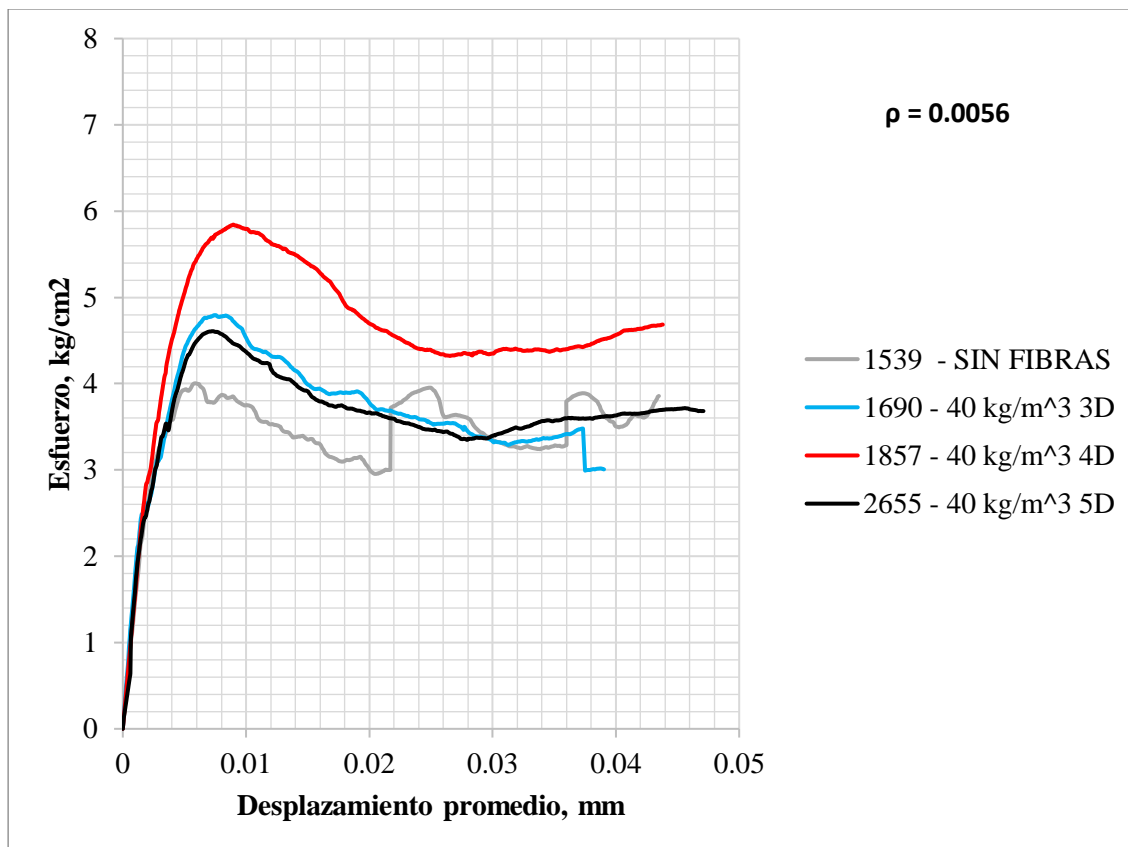


Figura 4. 214. - Gráficos promedio de cuantía de acero 0.0056, con dosificación de 20 kg/m<sup>3</sup> y sin fibras.



**Figura 4. 215.** - Gráficos promedio de cuantía de acero 0.0056, con dosificación de  $40 \text{ kg/m}^3$  y sin fibras.

En las **Figura 4. 213** a **Figura 4. 215** se presentan los resultados de los ensayos de las vigas con cuantía de refuerzo longitudinal de 0.0056, los cuales mostraron más capacidad para resistir esfuerzos cortantes que los elementos sin refuerzo longitudinal. Como se tenía previsto, experimentaron una falla por esfuerzo cortante. El tipo de fibra que mostro mejor comportamiento para resistir esfuerzos fue la fibra 4D, por lo menos en las **Figura 4. 214** **Figura 4. 215**, pues en la **Figura 4. 213**, todas las formas de fibra mostraron un comportamiento muy similar. Es de resaltar que, en todos los casos, las vigas con fibras de acero mostraron mayor resistencia a cortante que los casos sin fibras.

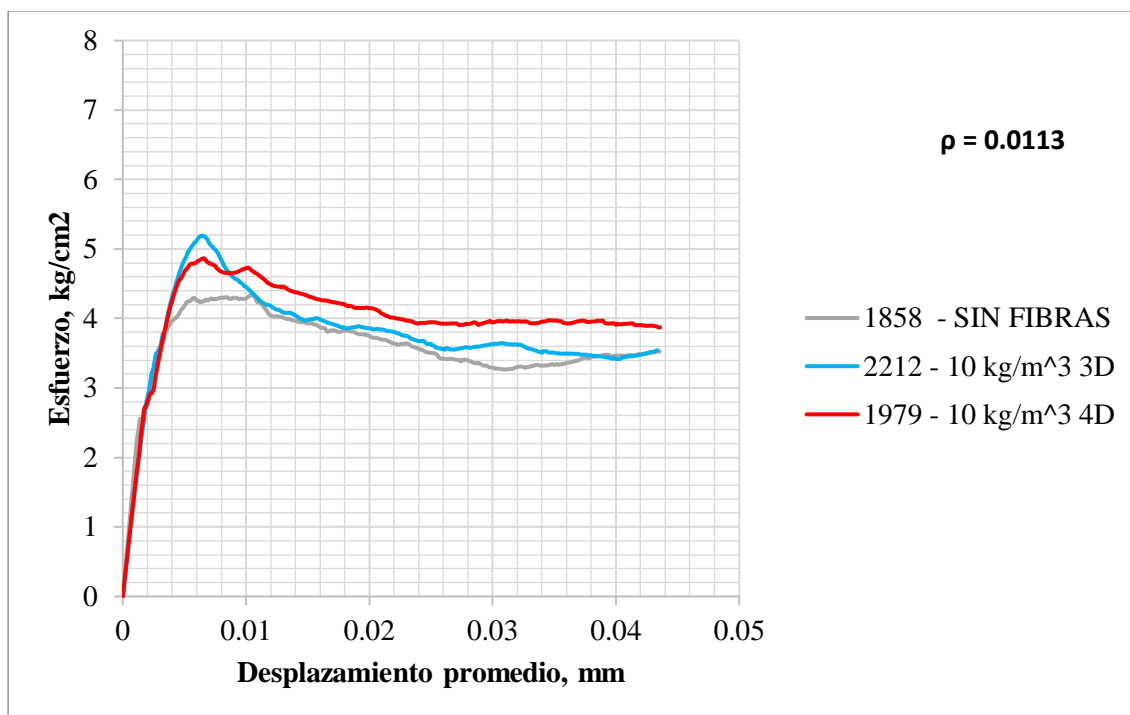


Figura 4. 216. - Gráficos promedio de cuantía de acero 0.0113, con dosificación de 10 kg/m<sup>3</sup> y sin fibras.

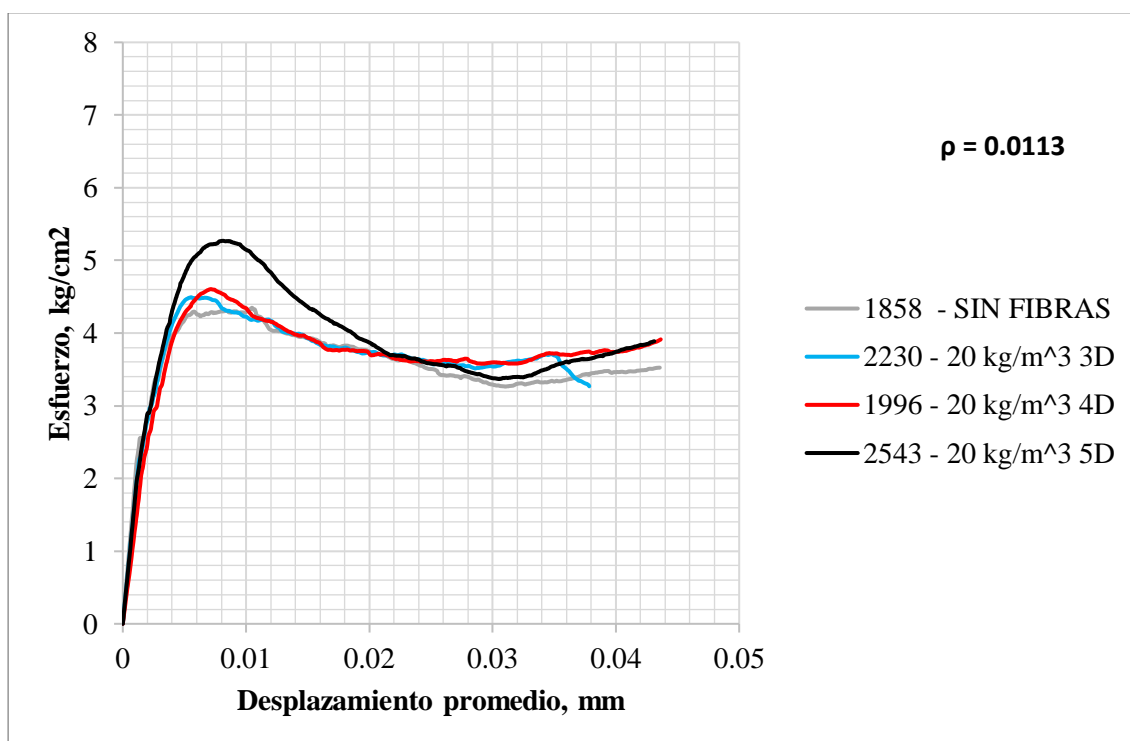
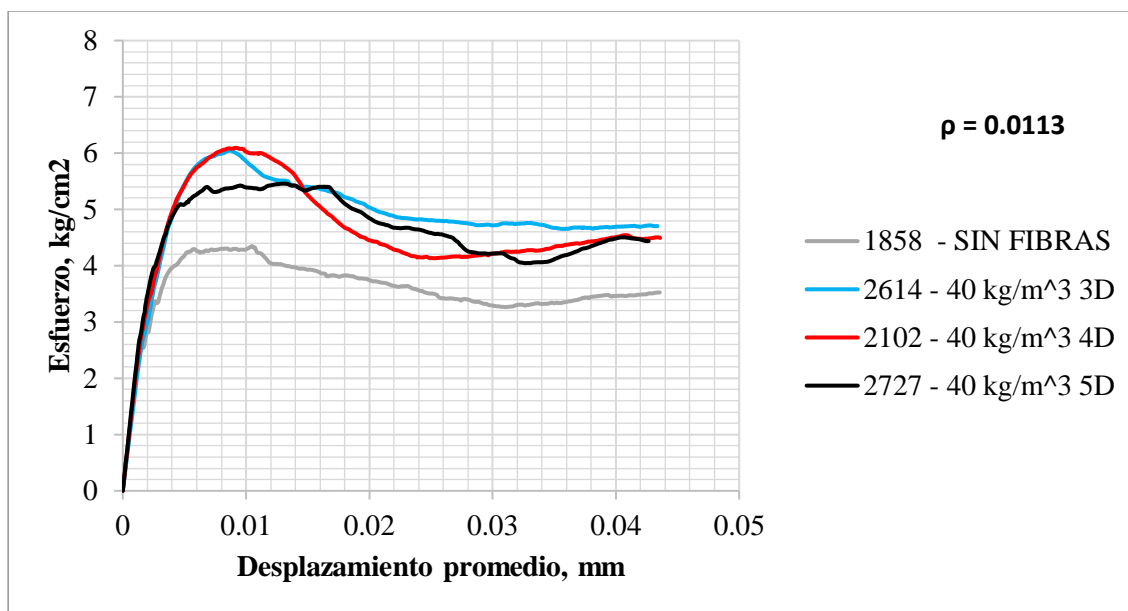


Figura 4. 217. - Gráficos promedio de cuantía de acero 0.0113, con dosificación de 20 kg/m<sup>3</sup> y sin fibras.



**Figura 4. 218.** – Gráficos promedio de cuantía de acero 0.0113, con dosificación de 40 kg/m³ y sin fibras.

En las **Figura 4. 216** **Figura 4. 218** se presentan los resultados de los ensayos de las vigas con cuantía de refuerzo longitudinal de 0.0113, los cuales mostraron una notable capacidad para resistir esfuerzos, un poco más elevados que los elementos con cuantía de acero longitudinal de 0.056 y mucho más que aquellos que no tenían acero longitudinal. Como se tenía previsto, experimentaron una falla por esfuerzo cortante. Como se mencionó con antelación, en el caso de la **Figura 4. 209**, no se fabricó una viga con fibras 5D y dosificación de 10 kg/m³, por lo que en la **Figura 4. 216** no se puede hacer la comparativa con los elementos que poseen la misma dosificación de fibras y cuantía de acero.

No se logra apreciar en las figuras que los diferentes tipos de fibra mejoren sustancialmente la resistencia a cortante, solo en la **Figura 4. 217** se aprecia como la fibra 5D mejora el esfuerzo de dicha serie de fibras, pero en **Figura 4. 218** la serie con fibras 5D soportó menos esfuerzos que los elementos de las series con misma dosificación y fibras 3D o 4d. En todas las figuras, se aprecia que las series que los elementos con fibras soportan mayores cargas

que las vigas que no las poseen. A partir de esto, se puede concluir que la dosificación tuvo un impacto más significativo que el tipo de fibra.

En conclusión, las series que incorporaron refuerzo del 0.0113 demostraron una resistencia superior ante las demandas de carga, lo que resalta la importancia de este refuerzo en la capacidad estructural. En cuanto a la influencia de la dosificación, se observó que las series con una dosificación de fibras  $40 \text{ kg/m}^3$  alcanzaron los esfuerzos máximos más altos. Las series con  $20 \text{ kg/m}^3$  y  $10 \text{ kg/m}^3$  de dosificación de fibras exhibieron comportamientos similares, con esfuerzos máximos ligeramente superiores en las primeras, mientras que el cambio en el tipo de fibra no representó un cambio significativo en los esfuerzos alcanzados por las vigas. Estos resultados sugieren que la dosificación desempeñó un papel importante en el comportamiento estructural de los especímenes, lo que puede ser de relevancia en el diseño y la evaluación de elementos similares en aplicaciones prácticas.

### **Comparación de Datos Obtenidos en Laboratorio con modelo de Sharma**

En el Capítulo II se analizaron los modelos propuestos por Swamy (1993) y Sharma (1986), utilizados para estimar los esfuerzos cortantes que las vigas pueden soportar bajo diferentes condiciones. El modelo de Swamy, presentó limitaciones, ya que en estas pruebas se presentan fracciones de volumen muy bajas. Por ende, al aplicarlo a este conjunto de datos, se obtuvieron predicciones de esfuerzos cortantes considerablemente bajas, con errores con respecto a lo medido de 99%. Este alto nivel de error lo hizo inapropiado para su consideración en este estudio, por lo que se decidió omitir su inclusión en el análisis final.

Por otro lado, el modelo de Sharma demostró un comportamiento mucho más preciso. Al aplicarlo a los especímenes reforzados con acero, tanto longitudinal como transversal, los valores predichos se acercaron considerablemente a los datos experimentales. Este modelo fue capaz de

captar mejor la influencia del refuerzo en la capacidad de las vigas para soportar esfuerzos cortantes, lo que lo convierte en una herramienta más adecuada para este tipo de análisis. La precisión de sus estimaciones refuerza su aplicabilidad en escenarios donde el refuerzo de acero es un factor clave, consolidándose como un modelo fiable en comparación con el de Swamy.

Es importante señalar que en los especímenes que no contaban con refuerzo de acero, el modelo de Sharma presentó errores elevados debido a una sobreestimación de los esfuerzos cortantes. Esto se debe a que el modelo en sí mismo supone que hay acero de refuerzo longitudinal, por lo menos. Por lo tanto, su aplicabilidad es limitada en casos donde no se emplea refuerzo, destacando la importancia de considerar las condiciones específicas de los elementos estructurales al seleccionar el modelo adecuado para la estimación de esfuerzos.

Cabe resaltar que los especímenes que no fueron reforzados con acero presentaron errores muy altos debido a sobreestimaciones, y esto se debe a que el modelo en sí mismo supone que hay acero de refuerzo longitudinal, por lo menos.

**Tabla 4. 5.** - Comparación de los resultados de las pruebas de laboratorio junto con los resultados usando el modelo teórico de Sharma (1986).

FOLIO	ESP	Peralte efectivo, d (mm)	Ancho promedio, b (mm)	a (mm)	f'c cubos (MPa)	f'c cilindros conv. (MPa)	Cuántia de acero (%)	Relación de volumen (%)	Fibra tipo	long. Fibra (mm)	Relación de aspecto	Resistencia tensión fibras (MPa)	vmax (MPa)	Sharma (MPa)	Error (%)	Tipo de falla	
1539	V1	277.0	155.00	250.00	62.5878	50.07024	0.0056	0	-	0	-	-	3.94	-	-	Cortante	
	V2	278.0	153.00	232.50			0.0056	0	-	0	-	-	-	4.81	-	-	Cortante
	V3	278.0	153.00	237.50			0.0056	0	-	0	-	-	-	4.39	-	-	Cortante
1571	V1	277.0	155.00	237.50	62.2935	508	0.0056	0.0013	3D	60	65	1160	4.91	4.18	15.02	Cortante	
	V2	277.0	153.00	237.50			0.0056	0.0013	3D	60	65	1160	4.34	4.19	3.52	Cortante	
	V3	276.0	153.00	237.50			0.0056	0.0013	3D	60	65	1160	4.62	4.23	8.55	Cortante	
1610	V1	277.0	153.00	237.50	64.2555	524	0.0056	0.0025	3D	60	65	1160	4.64	4.29	7.46	Cortante	
	V2	277.0	154.00	237.50			0.0056	0.0025	3D	60	65	1160	3.72	4.29	-15.26	Cortante	
	V3	280.0	152.00	237.50			0.0056	0.0025	3D	60	65	1160	4.09	4.31	-5.23	Falla en apoyo	
1690	V1	282.0	152.00	237.50	56.4075	460	0.0056	0.0051	3D	60	65	1160	4.85	4.63	4.54	Cortante	
	V2	280.0	152.00	237.50			0.0056	0.0051	3D	60	65	1160	4.79	4.62	3.49	Cortante	
	V3	279.0	152.00	237.50			0.0056	0.0051	3D	60	65	1160	4.36	4.62	-6.03	Cortante	
1709	V1	277.0	155.50	237.50	61.6068	502.4	0.0056	0.0013	4D	60	65	1500	4.55	3.59	21.12	Cortante	
	V2	276.0	156.50	237.50			0.0056	0.0013	4D	60	65	1500	4.08	3.58	12.17	Cortante	
	V3	277.0	157.50	237.50			0.0056	0.0013	4D	60	65	1500	4.35	3.58	17.67	Cortante	
1787	V1	275.0	156.00	237.50	60.7239	495.2	0.0056	0.0025	4D	60	65	1500	4.05	4.01	0.92	Falla en apoyo	
	V2	277.0	158.50	237.50			0.0056	0.0025	4D	60	65	1500	4.87	4.00	17.83	Cortante	
	V3	276.0	156.00	237.50			0.0056	0.0025	4D	60	65	1500	3.96	4.01	-1.42	Cortante	
1857	V1	275.0	157.50	237.50	63.9612	521.6	0.0056	0.0051	4D	60	65	1500	6.05	4.89	19.24	Cortante	
	V2	278.0	156.50	237.50			0.0056	0.0051	4D	60	65	1500	5.47	4.91	10.37	Cortante	
	V3	275.0	157.00	237.50			0.0056	0.0051	4D	60	65	1500	6.39	4.89	23.46	Cortante	
1858	V1	274.0	156.00	237.50	62.784	512	0.0113	0.0000	-	-	-	0	5.10	-	-	Cortante	
	V2	277.0	156.50	237.50			0.0113	0.0000	-	-	-	-	-	4.82	-	-	Falla en apoyos
	V3	277.0	157.00	237.50			0.0113	0.0000	-	-	-	-	-	3.62	-	-	Cortante
1979	V1	276.0	157.00	237.50	62.4897	509.6	0.0113	0.0013	4D	60	65	1500	4.69	3.81	18.88	Cortante	
	V2	276.0	156.50	237.50			0.0113	0.0013	4D	60	65	1500	4.85	3.81	21.50	Cortante	
	V3	274.0	157.50	237.50			0.0113	0.0013	4D	60	65	1500	5.59	3.80	32.06	Cortante	
1996	V1	274.0	157.00	237.50	62.9802	513.6	0.0113	0.0025	4D	60	65	1500	4.82	4.18	13.38	Cortante	
	V2	276.0	155.50	237.50			0.0113	0.0025	4D	60	65	1500	4.29	4.19	2.36	Cortante	
	V3	275.0	155.50	237.50			0.0113	0.0025	4D	60	65	1500	4.71	4.19	11.08	Cortante	

2102	V1	275.0	156.50	237.50	60.3315	492	0.012	0.0051	4D	60	65	1500	6.68	5.16	22.75	Cortante
	V2	277.0	156.00	237.50			0.012	0.0051	4D	60	65	1500	5.94	5.14	13.43	Cortante
	V3	274.0	156.50	237.50			0.012	0.0051	4D	60	65	1500	6.05	5.11	15.41	Cortante
2212	V1	276.0	158.00	237.50	62.8821	512.8	0.012	0.0013	3D	60	65	1160	5.03	3.56	29.24	Cortante
	V2	275.0	157.50	237.50			0.012	0.0013	3D	60	65	1160	5.27	3.56	32.55	Cortante
	V3	279.0	158.00	237.50			0.012	0.0013	3D	60	65	1160	5.54	3.56	35.66	Cortante
2230	V1	275.0	158.50	237.50	63.1764	515.2	0.012	0.0025	3D	60	65	1160	4.62	3.93	14.93	Cortante
	V2	275.0	159.50	237.50			0.012	0.0025	3D	60	65	1160	5.12	3.92	23.43	Cortante
	V3	281.0	157.50	237.00			0.012	0.0025	3D	60	65	1160	4.12	3.95	4.11	Cortante
2246	V1	300.0	156.50	237.50	60.822	496	0	0.0025	4D	60	65	1500	1.11	3.41	-207.13	Flexión
	V2	300.0	157.50	237.50			0	0.0025	4D	60	65	1500	1.09	3.41	-213.67	Flexión
	V3	306.0	158.50	237.50			0	0.0025	4D	60	65	1500	1.18	3.43	-189.87	Flexión
2247	V1	301.0	156.00	237.50	60.0372	489.6	0	0.0025	3D	60	65	1160	1.21	3.16	-160.95	Flexión
	V2	300.0	156.00	237.50			0	0.0025	3D	60	65	1160	1.18	3.15	-167.99	Flexión
	V3	303.0	155.00	237.50			0	0.0025	3D	60	65	1160	0.75	3.16	-319.96	Flexión
2429	V1	302.0	158.00	237.50	60.0372	489.6	0	0.0025	5D	60	65	2300	1.34	3.52	-163.49	Flexión
	V2	300.0	157.00	237.50			0	0.0025	5D	60	65	2300	1.83	3.51	-91.63	Flexión
	V3	299.0	157.50	237.50			0	0.0025	5D	60	65	2300	1.60	3.51	-118.94	Flexión
2441	V1	280.0	157.00	237.50	64.0593	522.4	0.006	0.0013	3D	60	65	1160	4.15	3.90	5.92	Cortante
	V2	275.0	157.00	237.50			0.006	0.0013	3D	60	65	1160	4.54	3.89	14.37	Cortante
	V3	274.0	156.50	237.50			0.006	0.0013	3D	60	65	1160	4.64	3.89	16.15	Cortante
2542	V1	276.0	157.00	237.50	54.6417	445.6	0.006	0.0025	5D	60	65	2300	4.89	4.08	16.59	Cortante
	V2	277.0	157.00	237.50			0.006	0.0025	5D	60	65	2300	4.08	4.08	0.06	Cortante
	V3	278.0	156.00	237.50			0.006	0.0025	5D	60	65	2300	3.84	4.09	-6.30	Cortante
2543	V1	278.0	157.00	237.50	53.955	440	0.012	0.0025	5D	60	65	2300	5.58	4.14	25.83	Cortante
	V2	279.0	155.50	237.50			0.012	0.0025	5D	60	65	2300	4.83	4.15	14.20	Cortante
	V3	278.0	156.50	237.50			0.012	0.0025	5D	60	65	2300	5.53	4.14	25.12	Cortante
2614	V1	277.0	157.00	237.50	58.2714	475.2	0.012	0.0051	3D	60	65	1160	5.82	4.26	26.68	Cortante
	V2	278.0	156.00	237.50			0.012	0.0051	3D	60	65	1160	6.74	4.27	36.65	Cortante
	V3	275.0	157.50	237.50			0.012	0.0051	3D	60	65	1160	6.12	4.26	30.42	Cortante
2615	V1	303.0	156.50	237.50	54.1512	441.6	0	0.0051	4D	60	65	1500	1.43	4.79	-235.41	Flexión
	V2	299.0	155.50	237.50			0	0.0051	4D	60	65	1500	1.50	4.78	-218.05	Flexión
	V3	305.0	157.00	237.50			0	0.0051	4D	60	65	1500	1.24	4.79	-285.14	Flexión
2655	V1	277.0	156.00	237.50	61.2144	499.2	0.006	0.0051	5D	60	65	2300	4.59	4.60	-0.10	Cortante
	V2	277.0	156.00	237.50			0.006	0.0051	5D	60	65	2300	4.66	4.60	1.33	Cortante
	V3	274.0	157.00	237.50			0.006	0.0051	5D	60	65	2300	4.64	4.58	1.36	Cortante
2656	V1	300.0	157.50	237.50	59.9391	488.8	0	0.0051	5D	60	65	2300	1.40	3.53	-152.39	Flexión
	V2	300.0	156.50	237.50			0	0.0051	5D	60	65	2300	1.57	3.53	-124.92	Flexión
	V3	299.0	155.50	237.50			0	0.0051	5D	60	65	2300	1.97	3.53	-79.01	Flexión
2727	V1	283.0	157.00	237.50	60.4296	492.8	0.012	0.0051	5D	60	65	2300	5.66	4.62	18.38	Cortante
	V2	281.0	157.00	237.50			0.012	0.0051	5D	60	65	2300	6.01	4.61	23.30	Cortante
	V3	280.0	158.00	237.50			0.012	0.0051	5D	60	65	2300	5.74	4.60	19.80	Cortante
2728	V1	298.0	157.50	237.50	50.5215	412	0	0.0013	3D	60	65	1160	0.86	2.97	-243.56	Flexión
	V2	301.0	157.50	237.50			0	0.0013	3D	60	65	1160	0.95	2.94	-210.97	Flexión
	V3	304.0	158.00	237.50			0	0.0013	3D	60	65	1160	0.97	2.91	-198.77	Flexión
2959	V1	277.0	158.50	237.50	50.031	408	0.006	0.0013	5D	60	65	2300	3.71	3.92	-5.48	Desconchamiento
	V2	278.0	156.00	237.50			0.006	0.0013	5D	60	65	2300	4.55	3.93	13.52	Cortante
	V3	277.0	157.50	237.50			0.006	0.0013	5D	60	65	2300	4.10	3.92	4.33	Cortante
2960	V1	303.0	157.00	237.50	52.6797	429.6	0	0.0013	5D	60	65	2300	0.88	2.98	-239.30	Flexión
	V2	307.0	157.00	237.50			0	0.0013	5D	60	65	2300	0.86	2.99	-249.14	Flexión
	V3	304.0	157.00	237.50			0	0.0013	5D	60	65	2300	0.96	2.98	-208.67	Flexión
3071	V1	307.0	157.00	237.50	52.8759	431.2	0	0.0013	4D	60	65	1500	0.78	3.08	-294.33	Flexión
	V2	301.0	157.50	237.50			0	0.0013	4D	60	65	1500	0.83	3.06	-271.01	Flexión
	V3	298.0	157.50	237.50			0	0.0013	4D	60	65	1500	1.12	3.06	-173.19	Flexión
3072	V1	302.0	158.00	237.50	48.6576	396.8	0	0.0051	3D	60	65	1160	1.01	3.85	-280.15	Flexión
	V2	309.0	157.00	237.50			0	0.0051	3D	60	65	1160	1.36	3.87	-184.35	Flexión
	V3	309.0	157.50	237.50			0	0.0051	3D	60	65	1160	1.33	3.87	-191.26	Flexión

El modelo de Sharma generó estimaciones cercanas o muy precisas en numerosos casos en comparación con los valores obtenidos en pruebas de laboratorio. Es notable que, en los especímenes sin acero de refuerzo, el modelo de Sharma presentó un margen de error elevado, subrayando la importancia de evaluar cuidadosamente la precisión y aplicabilidad de estos modelos en situaciones de diseño estructural específicas. La diferencia en la precisión de las estimaciones destaca la necesidad de seleccionar modelos que consideren los refuerzos específicos y los modos de falla esperados.

Es relevante también considerar que el modelo de Sharma no es aplicable a vigas que fallan por modos diferentes al cortante. En los especímenes que fallaron por flexión, los errores

fueron mucho más pronunciados. Sin embargo, se realizaron cálculos en estos especímenes con fallas por flexión y en los apoyos para demostrar los resultados y enfatizar la importancia de aplicar modelos estructurales que correspondan al modo de falla predominante.

En cuanto a la precisión de los modelos teóricos, el modelo de Sharma se distinguió por sus estimaciones conservadoras, proyectando resistencias inferiores en la mayoría de los casos, lo cual puede considerarse positivo desde una perspectiva de diseño seguro. No obstante, en especímenes sin refuerzo longitudinal, sus proyecciones no lograron una precisión adecuada, lo que plantea la necesidad de explorar modelos alternativos que ofrezcan mejores estimaciones en estos casos. Por su parte, el modelo de Swamy presentó una discrepancia significativa entre sus proyecciones y los resultados experimentales, lo que lo descarta como una opción práctica para este tipo de análisis.

Es crucial destacar que la mayoría de las probetas no fallaron en los apoyos, lo cual no era el objetivo del estudio, ya que se pretendía inducir fallas completas por esfuerzo cortante. No obstante, el estudio brinda resultados consistentes y útiles para comprender el comportamiento de compuestos de cemento fibro-reforzado bajo condiciones de carga realistas, sentando una base valiosa para investigaciones futuras y aplicaciones en diseño estructural optimizado.

El análisis de este capítulo permite concluir que la adición de fibras en el concreto mejoró considerablemente su rendimiento, especialmente en casos con una alta relación de volumen de fibras. Al mantener constante la cuantía de acero y el tipo de fibra, se observó un incremento en los esfuerzos soportados a medida que aumentaba el contenido de fibras en la mezcla. Sin embargo, las diferencias no fueron significativas entre los contenidos de 10 y 20 kg/cm<sup>3</sup>, lo que sugiere un punto de optimización en la dosificación de fibras.



# CAPITULO

# 5

## Conclusiones

## CAPITULO 5

### Conclusiones

A lo largo de este documento, se ha destacado la importancia de considerar los esfuerzos cortantes en el diseño estructural para prevenir fallas de este tipo. Asimismo, se ha detallado la forma en que las vigas responden a las demandas de fuerza bajo esfuerzos cortantes, explicando tanto los mecanismos de resistencia como los modos de falla característicos en estas condiciones. Además, se analizó el diseño a cortante de acuerdo con las disposiciones del NTC-Concreto (2023).

Por un lado, se estudió el comportamiento de vigas de concreto sometidas a pruebas de cortante de diversos autores con una base de datos de 811 especímenes se clasificaron y estudiaron las vigas según estas variables, lo que permitió identificar tendencias y modos de falla predominantes, tales como la falla por flexión, cortante, flexo-cortante, compresión y tensión diagonal. Los resultados revelaron que un incremento en la resistencia a la compresión del concreto y en la fracción de volumen de fibras mejora significativamente la capacidad de los especímenes para resistir esfuerzos cortantes. En particular, las vigas peraltadas mostraron una mayor resistencia a esfuerzos cortantes gracias a la acción de arco generada por esta geometría, en comparación con las vigas esbeltas, donde esta acción es menos prominente. Sin embargo, las vigas esbeltas son más comunes en la construcción por su eficiencia en el uso de material y su flexibilidad en el diseño.

Uno de los hallazgos críticos fue la variabilidad en el refuerzo mediante estribos, lo cual limitó la obtención de tendencias consistentes, ya que las diferencias en la cuantía y separación de los estribos entre los estudios afectan los resultados de resistencia al corte. Para estudios

futuros, se recomienda estandarizar las especificaciones de refuerzo en estribos para reducir variaciones y mejorar la precisión de los datos obtenidos.

Este análisis destaca la importancia de considerar tanto la geometría de las vigas como la inclusión de fibras y acero de refuerzo para optimizar la resistencia a esfuerzos cortantes. Las vigas peraltadas, aunque menos comunes, presentan ventajas bajo cargas de corte debido a la acción de arco, mientras que las vigas esbeltas, por su eficiencia en el uso de materiales y espacio, siguen siendo una opción versátil en la construcción. Para maximizar la seguridad y durabilidad estructural en futuras investigaciones y aplicaciones prácticas, es esencial estandarizar las condiciones de prueba, particularmente en lo que se refiere al refuerzo de estribos, y profundizar en el estudio del rol de las fibras para mejorar la resistencia a cortante en diversas configuraciones estructurales.

Por otro lado, se realizaron pruebas de laboratorio de vigas peraltadas, reforzadas en su mayoría por fibras de acero y acero de refuerzo, tanto longitudinal como transversal, siendo este último constante para todos los casos, excepto para las dos series que no contaban con acero de refuerzo. Los resultados permitieron concluir que la incorporación de fibras en el concreto mejoró notablemente su desempeño, especialmente en aquellos casos con una alta relación de volumen de fibras, independientemente de la forma de la fibra utilizada (3D, 4D o 5D). Al mantener constante la cuantía de acero y el tipo de fibra, se observó un incremento en los esfuerzos soportados a medida que aumentaba el contenido de fibras en la mezcla. Cabe destacar que las dosificaciones de fibras en las mezclas de concreto fueron relativamente bajas, por lo que se espera una resistencia aún mayor en vigas con mayores cantidades de fibras de acero, recomendándose así su inclusión en dosificaciones más elevadas. En la base de datos, se observó

que diversos autores emplearon fracciones de volumen más altas, lo que refuerza esta recomendación.

Se concluye que la incorporación de fibras de acero en las vigas de concreto contribuye significativamente a mejorar su resistencia a esfuerzos cortantes. Sin embargo, para lograr un diseño efectivo, es esencial considerar una variedad de factores que influyen de manera notable en el comportamiento de estas vigas. Entre los factores más determinantes se encuentran la geometría de la viga, la resistencia a compresión del concreto y el refuerzo de acero longitudinal. Cada uno de estos elementos impacta sustancialmente la capacidad de la viga para soportar cargas de corte, destacando la importancia de optimizar su selección y diseño en función de las demandas estructurales. En términos de influencia adicional, la dosificación de fibras de acero también mejora el desempeño estructural de las vigas, aunque de manera secundaria en comparación con la geometría y el refuerzo longitudinal. Asimismo, el refuerzo transversal, representado principalmente por los estribos, y la forma específica de las fibras (3D, 4D o 5D) también juegan un papel, aunque en menor grado, en la capacidad de la viga para resistir esfuerzos cortantes. Aun así, el uso de una dosificación adecuada y el tipo de fibra pueden ofrecer ventajas adicionales, contribuyendo a la resistencia total de la estructura bajo condiciones de carga específicas.

### Bibliografía

- Glosarios (2017). *Ingeniería Civil*. Recuperado de Glosarios Alicante el 14 de Julio de 2021 de: <https://glosarios.servidor-alicante.com/ingenieria-civil>.
- Abdelmajed, W. (2018). Fibre Reinforced Cement Composites. En H. M. Saleh, & R. O. Abdel (Edits.), *Cement Based Materials*. Egipto : IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.71134
- Abdul-Zaher, A. S., L. M.-H., Tawfic, Y. R., & Hammed, O. (2016). SHEAR BEHAVIOR OF FIBER REINFORCED CONCRETE BEAMS. *Journal of Engineering Sciences, Vol. 44*(No. 2), pp. 132-144. doi:10.21608/jesaun.2016.117592
- ACI. (1998). Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete. *ACI 544.3R-93*.
- ACI. (1999). Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete. *ACI 544.4R-88*.
- Adebar, P., Mindess, S., St.-Pierre, D., & Olund, B. (Enero-Febrero de 1997). Shear Tests of Fiber Concrete Beams without Stirrups. *ACI Structural Journal, Vol. 94*(No. 1), pp. 68-76.
- Ahmadi, M., Kheyroddin, A., Dalvand, A., & Kioumars, M. (2020). New empirical approach for determining nominal shear capacity of steel fiber reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials, Vol. 234*, pp. 1-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117293>.
- Alcocer, S. M. (1998). Algunas Tendencias del Concreto Estructural. *XI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*.

- Arslan, G. (2013). Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) Slender Beams. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 18(No. 2), pp. 587-594. doi:10.1007/s12205-014-0320-x
- Arslan, G., Keskin, R. S., & Ulusoy, S. (Octubre de 2017). AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE SHEAR STRENGTH OF SFRC BEAMS WITHOUT STIRRUPS. *JOURNAL OF THEORETICAL*, Vol. 55, pp. 1205-1217. doi:10.15632/jtam-pl.55.4.1205
- Ashour, S. A., Hasanain, G. S., & Wafa, F. (Marzo-Abril de 1992). Shear Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams. *ACI STRUCTURAL JOURNAL*, Vol. 89(No. 2), pp. 176-184.
- ASTM. (2012). *Designación: C143/C143M-10a, MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARAREVENIMIENTO DEL CONCRETO DE CEMENTO HIDRAULICO*. Obtenido de uDocs: <https://www.udocz.com/apuntes/61063/metodo-de-ensayo-normalizado-para-asetamiento-de-concreto-de-cemento-hidraulico-astm-c143-c143m>
- ASTM. (2020). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. doi:10.1520/C0192\_C0192M-18
- Bahij, S., Adekunle, S. K., Al-Osta, M., Ahmad, S., Al-Dulaijan, S. U., & Rahman, M. K. (2017). Numerical investigation of the shear behavior of reinforced ultra-high-performance concrete beams. *Structural Concrete Journal of the fib*, Vol. 19(No. 1), pp. 305-317. doi:10.1002/suco.201700062
- Balazs, G. L., Kovács, I., & Erdélyi, L. (1999). FLEXURAL BEHAVIOR OF RC AND PC BEAMS WITH STEEL FIBERS. En H. W. Naaman (Ed.), *Proceedings pro006* :

*International RILEM Conference on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC 3)* (pág. 686). Maguncia, Alemania: RILEM.

Barragán, B. E. (2002). *Failure and Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete*. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya. doi:10.5821/dissertation-2117-93220

BATSON, G., JENKINS, E., & SPATNEY, R. (Octubre de 1972). Steel Fibers as Shear Reinforcement Beams. *ACI JOURNAL*, pp. 640-644.

BEKAERT. (2013). *Data Sheet, 4D 65/60 BG*.

BEKAERT. (octubre de 2019). *3D Dramix 65/60 BG, FICHA TÉCNICA*.

BEKAERT. (2023). *5D 65/60 BG, FICHA TÉCNICA*.

Böhrk, H. (2017). 10 Heat Flux Reduction by Transpiration-Cooling of CMCs for Space Applications. *Advanced Composite Materials: Properties and Applications*, pp. 468-496. doi:10.1515/9783110574432-010

Bonakdar, A., & Mahoney, M. A. (noviembre de 2021). Fiber-Reinforced Concrete. *Concrete International*. Recuperado el 4 de agosto de 2022

Bozzo, L. M., & Barbat, A. H. (2000). *Diseño sismorresistente de edificios*. Barcelona, España: REVERTÉ, S. A. Obtenido de [https://books.google.com.mx/books?id=TKwTAKb4e00C&pg=PA104&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=TKwTAKb4e00C&pg=PA104&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Burgos, A. P. (26 de febrero de 2020). *Formado A Partir de Una Mezcla de Caliza y Arcilla Calcinadas y Posteriormente Molidas*. Recuperado el 23 de 07 de 2022, de SCRIBD:

<https://es.scribd.com/document/448843605/El-cemento-es-un-conglomerante-formado-a-partir-de-una-mezcla-de-caliza-y-arcilla-calcinadas-y-posteriormente-molidas-docx>

C.H.HENAGER, & al., e. (1977). Paper 18. Ultimate strength of reinforced steel fibrous concrete beams. *Institution of Civil Engineers*, pp. 165-173.

C3. (2020). *Usos de la Fibra de Acero / Metálica*. Recuperado el 4 de septiembre de 2022, de C3 Soluciones en Concreto: <https://www.ctres.mx/blog/usos-de-la-fibra-de-acero-slash-metalica/#:~:text=Las%20fibras%20met%C3%A1licas%20%2F%20de%20acero,e1%20concreto%20se%20ha%20endurecido.>

Castellanos, R. (2006). *GUIA DE CLASES No. 6 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN*. Recuperado el 2022 de septiembre de 27 , de UNIVERSIDAD CENTRO AMERICANA: <https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasClase/GUIA%20DE%20CLASES%20No%206.pdf>

Chalioris, C. E., & Sfiri, E. F. (2011). Shear Performance of Steel Fibrous Concrete Beams. *Procedia Engineering*, Vol. 14, pp. 2064-2068. doi:10.1016/j.proeng.2011.07.259

Cho, S.-H., & Yoon –II, K. (2003). Effect of steel fibres on short beams loaded in shear. *ACI Structural Journal*, Vol. 100, pp. 765-774.

Cohen, H. A. (Enero de 2014). Shear Response of SFRC Beams Constructed with SCC and Steel Fibers. *Electronic Journal of Structural Engineering*, Vol. 14, pp. 71-83. doi:10.56748/ejse.14182



- Cohen, M., & Aoude, H. (2012). Shear behavior of SFRC and SCFRC beams. *3rd International Structural Specialty Conference. Vol. 3*, págs. pp. STR-1118-1-10. Edmonton, Alberta: Canadian Society for Civil Engineering.
- Cooper, C. B., Arutselvan, K., Liu, Y., & al., e. (2017). Stretchable Capacitive Sensors of Torsion, Strain, and Toch Using Double Helix Liquid Metal Fibers. *Advanced Functional Materials*, 2.
- Cruz, F. P., & Rojas, J. P. (2021). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECANICO DEL CONCRETO ADICIONADO CON FIBRA DE HOJA DE LA PLANTA DE PIÑA (ORO MIEL)*. Bogotá.
- Cunha, V. (2010). *Steel fibre reinforced self-compacting concrete (Ph.D. thesis)*. University of Minho.
- Cunha, V. M. (2010). *Steel fibre reinforced self-compacting concrete (Ph. D. thesis)*. Obtenido de University of Minho.
- Dalian HARVEST Metal Fibres Co. (2022). *Recta de fibra de acero inoxidable para el sector energético*. Recuperado el 29 de septiembre de 2022, de Made-in-China: [https://es.made-in-china.com/co\\_dlharvest/product\\_Stainless-Straight-Steel-Fiber-for-Power-Sector\\_euhhnrrry.html](https://es.made-in-china.com/co_dlharvest/product_Stainless-Straight-Steel-Fiber-for-Power-Sector_euhhnrrry.html)
- de Lima Araújo, D., Tibúrcio Nunes, F. G., & al., e. (Julio-Septiembre de 2014). Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams. *Acta Scientiarum. Technology*, Vol. 36(No. 3), pp. 389-397. doi:10.4025/actascitechnol.v36i3.19005

Dinh, H. H., Parra-Montesinos, G. J., & Wight, J. K. (Septiembre-Octubre de 2010). Shear Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrup Reinforcement. *ACI STRUCTURAL JOURNAL*, Vol. 107(No. 5), pp. 597-606.

EUROPEAN STANDARDS. (2008). BS EN-14651-2005-A1, Test method for metallic fibre concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).

Foster, S. J., Agarwal, A., & Amin, A. (Septiembre de 2017). Design of steel fiber reinforced concrete beams for shear using inverse analysis for determination of residual tensile strength. *Structural Concrete*, Vol. 19(No. 1), pp. 129-140. doi:10.1002/suco.201700100

Furlan Jr., S., & Hanai, J. B. (1997). Shear Behaviour of Fiber Reinforced Concrete Beams. *Cement and Concrete Composites*, 19, pp. 359-366.

Gali, S., & Kolluru.V.L.Subramaniam. (2017). Shear behavior of steel fiber reinforced concrete using full-field displacements from digital image correlation. *International Conference on Advances in Sustainable Construction Materials & Civil Engineering Systems*. Vol.120, págs. pp. 1-13. MATEC Web of Conferences. doi:<https://doi.org/10.1051/mateconf/201712004003>

Garber, G. (29 de abril de 2014). *Specifying steel fibers for concrete floors*. Recuperado el 30 de septiembre de 2022, de the construction specifier CSI: <https://www.constructionspecifier.com/specifying-steel-fibers-for-concrete-floors/>

Gerhard Vitt, B. (2011). *Understanding Steel Fibre Reinforced Concrete: Dramix®*. Zwevegem, Bélgica: NV Bekaert SA.

Glosarios. (03 de diciembre de 2017). *Trabes o vigas*. Recuperado el 20 de julio de 2022, de Glosario Ingeniería Civil: <https://glosarios.servidor-alicante.com/ingenieria-civil/trabes-o-vigas>

gmoralexv2. (s.f.). *Comportamiento Y Diseño de Estructuras de Concreto Reforzado Solicitadas a Corte , Según Norma ACI 318-19*. Recuperado el 29 de octubre de 2022, de weebly: <https://gmoralexv2.weebly.com/iii-esfuerzo-cortante-y-tensioacuten-diagonal.html>

Gürbüz, M. I. (2008). *SHEAR STRENGTH OF END REGIONS OF PRESTRESSED SELF-CONSOLIDATING CONCRETE BEAMS*. Auburn, Alabama, EE.UU.: Auburn University. Recuperado el 11 de mayo de 2024, de [https://etd.auburn.edu/bitstream/handle/10415/1039/Gurbuz\\_Mustafa\\_18.pdf?isAllowed=y&sequence=1](https://etd.auburn.edu/bitstream/handle/10415/1039/Gurbuz_Mustafa_18.pdf?isAllowed=y&sequence=1)

Harex. (2014). *Milling Steel Fiber*. Recuperado el marzo de 2023, de 哈瑞克斯: <http://www.shharex.com/en/list/32/15.htm>

Hevia Villanueva, M. (2017). *Análisis de la tensión de una grieta en un disco brasileño*. EPI Gijón/Brno Faculty of Civil Engineering. Obtenido de <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/43588>

Imam, M., Vandewalle, L., & Mortelmans, F. (Junio de 1995). Shear - moment analysis of reinforced high strength concrete beams containing steel fibres. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 22(No. 3), pp. 462-470. doi:<https://doi.org/10.1139/195-054>

ingenieriaymas.com. (11 de julio de 2016). *Fuerza Cortante y Momento Flexionante en Vigas*. Recuperado el 22 de agosto de 2022, de INGENIERIAYMAS.COM: <http://ingenieriaymas.com/2016/07/fuerza-cortante-y-momento-flexionante.html>

- Isla, F., Ruano, G., & Luccioni, B. (2015). Analysis of steel fibers pull-out. Experimental study. *Construction and Building Materials 100*, pp. 183–193.
- Jacques, R., & Aragon, F. d. (2020 de junio de 2020). *#fibrocemento(S)com, 120 años de la historia de una industria*. España: Books on Demand.
- Jindal, R. L. (1984). Shear and Moment Capacities of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams. *Symposium Paper, Vol. 81*, pp. 1-16. doi:10.14359/6443
- Karlovišek, J., Wagner, N., & Scheuermann, A. (2012). Frequency-dependant dielectric parameters of steel fiber reinforced concrete. *14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. doi:10.1109/ICGPR.2012.6254918
- Kim, C.-G., Lee, H., Park, H.-G., Hong, G.-H., & Kang, S.-M. (Septiembre-Octubre de 2017). Effect of Steel Fibers on Minimum Shear Reinforcement of High-Strength Concrete Beams. *ACI STRUCTURAL JOURNAL, Vol. 114*(No. 5), pp. 1109-1119. doi:10.14359/51689782
- Lantsoght, E. O. (Marzo de 2019). Database of Shear Experiments on Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups. *Materials, Vol. 12*(No. 6), 1-36. doi:https://doi.org/10.3390/ma12060917
- Laws, V. (1971). Efficiency of Fibrous Reinforcement of Brittle Matrices. *Journal of Applied Physics, Vol. 4*, pp. 1737-1746.
- Laws, V. (1971). The efficiency of fibrous reinforcement of brittle matrices. *Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 4*(No. 11), pp. 1737-1746. doi:10.1088/0022-3727/4/11/318

- Lee, D. H., Han, S.-J., Kim, K. S., & LaFave, J. M. (2016). Shear capacity of steel fiber-reinforced concrete beams. *Structural Concrete*, Vol. 18(No. 2), pp. 1-14. doi:10.1002/suco.201600104
- Lee, Y., Kang, S.-T., & Kim, J.-K. (2010). Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix. *Construction and Building Materials*, Vol. 24(No. 10), pp. 2030-2041. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.009.
- Li, V. C., Ward, R., & Hamza, A. M. (Julio-Agosto de 1993). Steel and Synthetic Fiber as Shear Reinforcement. *ACI MATERIALS JOURNAL*, Vol. 89(No. 5), pp. 499-508.
- Lim, T. Y., Paramasivam, P., & Lee, S. L. (Septiembre de 1987). Shear and moment capacity of reinforced steel-fibre-concrete beams. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 39(No. 140), pp. 148-160.
- Lim, T. Y., Paramasivam, P., & Lee, S. L. (Julio-Agosto de 1988). Analytical Model for Tensile Behavior of Steel-Fiber Concrete. *ACI MATERIALS JOURNAL*, Vol. 84(No. 4), pp. 286-298. doi:10.14359/1454
- Lim, T., Paramasivam, P., & Lee, S. (1987). Analytical Model for Tensile Behavior of Steel-Fiber Concrete. *ACI MATERIALS JOURNAL*, 286-298.
- Liu, X. (2010). *INELASTIC WEB CRUSHING PERFORMANCE LIMITS OF HIGH-STRENGTH-CONCRETE STRUCTURAL WALLS*. (R. Burgueno, Ed.) EE.UU.: Michigan State University. doi:https://doi.org/doi:10.25335/zxbg-0r20
- Lozano, C. A. (2012). *USO DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO EN VIGAS*. Distrito Federal, México.

- MacGregor, J. G., & Hanson, J. M. (1969). *Proposed Changes in Shear Provisions for Reinforced and Prestressed Concrete Beams\** (Vol. 66). Journal Proceedings. doi:10.14359/7360
- Manjarrez, R., & Gomez, M. (2013). *ENSAYO DE UNA VIGA RECTANGULAR PARA FALLA POR CORTANTE CON ESTRIBOS VERTICALES E INCLINADOS*. (O. Otero, Editor, & Universidad de Sucre) Recuperado el 15 de octubre de 2022, de DOC PLAYER: <https://docplayer.es/12005894-Ensayo-de-una-viga-rectangular-para-falla-por-cortante-con-estribos-verticales-e-inclinados-rafael-manjarrez-herrera-manuel-gomez-perez-octavio-otero.html>
- Mansur, M. A., ASCE, M., Ong, K. C., & Paramasivam, P. (Septiembre de 1986). SHEAR STRENGTH OF FIBROUS CONCRETE BEAMS WITHOUT STIRRUPS. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 112(No. 9), pp. 2066-2079. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1986\)112:9\(2066\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1986)112:9(2066))
- Mansur, M. A., Paramasivam, P., M. ASCE, & K. C. G. ONG. (Septiembre de 1986). SHEAR STRENGTH OF FIBROUS CONCRETE BEAMS WITHOUT STIRRUPS. *Journal of Structural Engineering*, V. 112(No. 9), pp. 2066-2079. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1986\)112:9\(2066\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1986)112:9(2066))
- Márquez, J., & Rafael, O. (1994). *Temas de apoyo para los cursos de concreto*. Hermosillo, México: Universidad de Sonora .Departamento de Ingeniería Civil y Minas. Obtenido de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/3527/Capitulo5.pdf>
- Mecánica. (30 de julio de 2011). *Blogger*. Recuperado el septiembre de 2022, de Flexión-Mecánica: <https://flexion-mecanica.blogspot.com/2011/07/flexion-mecanica.html>

- Medeiros, M., & Parente Jr., E. (2017). EVALUATION OF ELASTIC PROPERTIES OF ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE REINFORCED WITH STEEL FIBER: MEAN-FIELD HOMOGENIZATION VERSUS FE HOMOGENIZATION. En L. M. Lopez, W. Gomes, & M. Noronha (Ed.), *Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering P.O. Faria*. Florianópolis, SC, Brasil.
- Méndez, E. B. (2017). *Capítulo 4, DEFINICIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ENSAYOS PARA ELEMENTOS REFORZADOS A CORTANTE*. Recuperado el 13 de septiembre de 2022, de DOCPLAYER: <https://docplayer.es/29706626-Definicion-de-la-metodologia-de-ensayos-para-elementos-reforzados-a-cortante.html>
- Miarka, P., Hevia Villanueva, M., & Seitzl, S. (2017). Stress analysis of crack Brazilian disc: Pilot. *19th Conference Applied Mechanics 2017 – conference proceedings, 2017*, (págs. 73-77).
- Mihaylov, B., Liu, J., & Tvrznikova, K. (2019). Two-parameter kinematic approach for complete shear behavior of deep FRC beams. *Structural Concrete, Vol. 21*(No. 1), pp. 362-375. doi:10.1002/suco.201800199
- Minelli, F. (2005). *PLAIN AND FIBER REINFORCED CONCRETE BEAMS UNDER SHEAR LOADING: STRUCTURAL BEHAVIOR AND DESIGN ASPECTS*. Brescia, Italia: Starrylink Editrice Brescia.
- Montaignac, R. d., Massicotte, B., & Charron, J.-P. (Octubre de 2011). Design of SFRC structural elements: flexural behaviour prediction. *Materials and Structures, Vol. 45*(No. 4). doi:10.1617/s11527-011-9785-y

- Morcillo, M. (16 de noviembre de 2021). *¿Qué son estribos con Alambción de 1/4?* Recuperado el 29 de agosto de 2022, de LÁMINAS Y ACEROS: <https://blog.laminasyaceros.com/blog/estribos-con-alambr%C3%B3n-fr-1/4>
- Narayanan, R., & Darwish, I. Y. (Mayo de 1987). Shear in prestressed concrete beams Shear in prestressed concrete beams. *The international Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 9(No. 2), pp. 81-90. doi:[https://doi.org/10.1016/0262-5075\(87\)90023-6](https://doi.org/10.1016/0262-5075(87)90023-6)
- Narayanan, R., & Darwish, I. Y. (1987). Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement. *ACI STRUCTURAL JOURNAL*, Vol. 84(No. 3), pp. 216-227.
- Narayanan, R., & Darwish, I. Y. (Marzo-Abril de 1988). Fiber Concrete Deep Beams in Shear. *ACI STRUCTURAL JOURNAL*, Vol. 85(No. 2), pp. 141-149. doi:[10.14359/2698](https://doi.org/10.14359/2698)
- Noghabai, K. (Febrero de 2000). BEAMS OF FIBROUS CONCRETE IN SHEAR AND BENDING: EXPERIMENT AND MODEL. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126(No.2). doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:2\(243\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:2(243))
- NV Bekaert SA. (2012). Dramix, Reinforcing the future.
- Parra-Montesinos, G. J. (Noviembre de 2006). Shear Strength of Beams with Deformed Steel Fibers. *Concrete international*, Vol. 28(No. 11), pp. 57-66.
- PSI Concreto. (16 de junio de 2020). *Fibra de acero: guía de usos, tipos, características y recomendaciones*. Recuperado el 5 de agosto de 2022, de PSI: <https://psiconcreto.com/fibra-de-acero/>



- PSI Concreto. (16 de junio de 2020). *Fibra de acero: guía de usos, tipos, características y recomendaciones*. Recuperado el 20 de febrero de 2023, de PSI: <https://psiconcreto.com/fibra-de-acero/>
- Rettburg, W. A. (1986). Steel-Reinforced Concrete Makes Older Dam Safer, More Reliable. *Hydro Review*, pp. 18-22.
- RILEM. (2002). RILEM TC 162-TDF : TEST AND DESIGN METHODS FOR STEEL FIBRE, Bending test. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, 35, págs. 579-582.
- Secretaría de Obras y Transportes. (6 de noviembre de 2023). *Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. Recuperado el 11 de enero de 2024, de Consejería CDMX: [https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal\\_old/uploads/gacetas/b3c4f4ff37241d0a93cc6742a8b0bf2f.pdf](https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/b3c4f4ff37241d0a93cc6742a8b0bf2f.pdf)
- Sharma, A. K. (1986). Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams. *ACI JOURNAL*, Vol. 83(No. 4), pp. 624-628.
- Shin, S.-W., Oh, J.-G., & Ghosh, S. K. (s.f.). Shear Behavior of Laboratory-Sized High-Strength Concrete Beams Reinforced With Bars and Steel Fibers. *Symposium Paper, Vol. 142*, pp. 181-200. doi:10.14359/3917
- Shoaib, A., Lubell, A. S., & Bindiganavile, V. S. (2014). Shear response of lightweight steel fiber reinforced concrete members without stirrups. *RILEM, Materials and Structures*, pp. 3142-3157. doi:10.1617/s11527-014-0387-3

- Shoaib, A., Lubell, A. S., & Bindiganavile, V. S. (Septiembre-octubre de 2014). Size Effect in Shear for Steel Fiber-Reinforced Concrete Members without Stirrups. *ACI STRUCTURAL JOURNAL*, Vol. 111(No. 5), pp. 1081-1090.
- Sika . (2014). CONCRETO - CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS. doi:DCT-VO-194-08/2014
- Swamy, N., Jones, R., & Chiam, A. T. (Enero-Febrero de 1993). Influence of Steel Fibers on the Shear Resistance of Lightweight Concrete I- Beams. *ACI STRUCTURAL JOURNAL*, Vol.90(No. 1 ), pp. 103-114.
- Swamy, R. N., & Bahia, H. M. (Marzo de 1985). The effectiveness of steel fibers as shear reinforcement. *Concrete International*, Vol. 7(No. 3), pp. 35-40.
- Swamy, R. N., & Mangat, P. S. (1974). A Theory for the Flexural Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 4(No. 2), 313-325.
- Swamy, R. N., & Mangat, P. S. (1976). THE INTERFACIAL BOND STRESS IN STEEL FIBER CEMENT COMPOSITES. *CEMENT and CONCRETE RESEARCH*, Vol. 6, pp. 641-650.
- Swamy, R. N., Jones, R., & Chiam, A. T. (Enero-Febrero de 1993). Influence of Steel Fibers on the Shear Resistance of Lightweight Concrete I- Beams. *ACI STRUCTURAL JOURNAL*, Vol. 90 (No. 1), pp. 103-114.
- Tan, K. H., Murugappan, K., & Paramasivam, P. (Noviembre-Diciembre de 1992). Shear Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams. *ACI STRUCTURAL JOURNAL*, Vol. 89(No. 6), pp. 3-11.

- Tarawneh, A., Almasabha, G., Alawadi, R., & Tarawneh, M. (2021). Innovative and reliable model for shear strength of steel fibers reinforced concrete beams. *Structures, Vol. 32*, pp. 1015-1025. doi:<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.081>
- Tatro, S. B. (1987). Performance of Steel Fiber Reinforced. *Transportation Research Board*(Transportation Research Record 1110), pp. 127-129.
- Valentí, M. (2014). *COMPORTAMIENTO A CORTANTE DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADAS LONGITUDINAL Y TRANSVERSALMENTE CON BARRAS FRP*. Barcelona , España. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/24412/Tesina.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Voo, J. Y., & Foster, S. J. (2003). Variable Engagement Model for the Design of Fibre Reinforced Concrete Structures. En *Advanced Materials for Construction of Bridges, Buildings, and Other Structures III*. Univ. of New South Wales.
- Voo, J. Y., & Foster, S. J. (Septiembre de 2004). TENSILE-FRACTURE OF FIBRE-REINFORCED CONCRETE: VARIABLE ENGAGEMENT MODEL. En R. P. SARL, & R. F. M. di Prisco (Ed.), *6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes* (págs. 875-884).
- Wikipedia. (2022). *Delamination*. Recuperado el 14 de mayo de 2023, de <https://en.wikipedia.org/wiki/Delamination>
- Williamson, G. R., & Knab, L. I. (1975). Full Scale Fibre Concrete Beam Tests. *Fibre Reinforced Cement and Concrete, RILEM Symposium 1975*, pp. 209-214.

Yoo, D.-Y., & Yoon, Y.-S. (2015). Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers. *Engineering Structures*, Vol. 102, pp. 409-423. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.08.029>.

Yutian Zhitai Steel Fiber Manufacturing Co., Ltd. (2022). *Crimped round steel fiber with high tensile strength, >1100MPa*. Recuperado el 30 de septiembre de 2022, de globl sources: <https://www.globalsources.com/Steel-fiber/Crimped-round-1132127196p.htm>