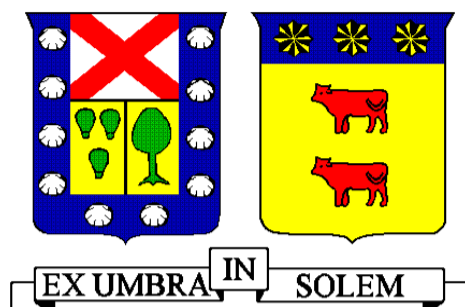


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE



**CARACTERIZACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE DE
HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS HÍBRIDAS**

Memoria de titulación presentada por

JAVIER IGNACIO SOTO HINOJOSA

Como requisito parcial para optar al título de
CONSTRUCTOR CIVIL

Profesor Guía:

SERGIO CARMONA MALATESTA

2023

AGRADECIMIENTOS

Para mi núcleo familiar: papá, mamá, hermana y hermanito; como fruto de esfuerzo por todo el apoyo hacia mi persona en este arduo proceso de formación universitaria, siendo este un nuevo logro e hito profesional en el trayecto de la vida. Este logro va dirigido de forma especial para mi abuelo Nelson y tía-abuela Mary, quienes descansan desde lo alto del cielo.

Para familiares y amistades en general; cuyos ánimos y palabras de alientos se hizo partícipe durante el proceso.

Mención especial a profesores y ayudantes, quienes aportaron con su grano y cuota de conocimiento para poder ser el profesional en el día de hoy.

RESUMEN

Debido al avance tecnológico en las ciencias de materiales y de la modernización de equipos hoy en día, es que es importante crear y actualizar un marco regulatorio técnico de carácter global en cuanto a la tecnología de hormigones reforzados con fibras para su uso en la actualidad. A raíz de lo anterior, se han desarrollado dos talleres internacionales que han permitido avanzar en muchos aspectos deficientes dada la escasa información en cuanto al asunto, siendo desde un principio exponer estos estudios – vista y aprobada en conjunto por los investigadores participantes de ambos talleres - ante la Escuela de Ingeniería Civil y Construcción Civil de la Unión Europea para ser analizada, discutida, reconocida y utilizada.

A diferencia del hormigón normal, la incorporación de fibra beneficia enormemente el control de falla del material, evitando una ruptura violenta. Además, absorbe grandes energías para seguir deformando aún más el material favoreciendo la tenacidad del elemento a causa de la ductilidad que esta presenta en presencia de cargas residuales.

La presente investigación tiene por finalidad analizar el comportamiento de hormigones reforzados en cuantías híbridas de fibras – plásticos y aceros – frente a esfuerzos de corte con referencia en la norma japonesa JSCE – SF6 y algunas modificaciones. De lo anterior, se estudiará y analizará el comportamiento junto con la tenacidad del elemento a partir del máximo de carga.

Algunas aplicaciones de hormigón reforzado con fibras la podemos hallar en elementos prefabricados, revestimiento de túneles – hormigón proyectado – y losas industriales, entre otros.

ABSTRACT

Due to the technological advance in the materials sciences and the modernization of equipment today, it is important to create and update a global technical regulatory framework for fiber-reinforced concrete technology for use today. As a result, two international workshops have been held which have made it possible to make progress in many poor respects given the limited information on the subject, and these studies have been presented from the outset - viewed and jointly approved by the researchers participating in both workshops - before the School of Civil Engineering and Civil Construction of the European Union for analysis, discussion, recognition and use.

Unlike normal concrete, fiber incorporation greatly benefits the control of material failure, avoiding a violent rupture. In addition, it absorbs great energies to continue further deforming the material favoring the tenacity of the element because of the ductility that it presents in the presence of residual loads.

The aim of this research is to analyze the behavior of reinforced concrete in hybrid fiber amounts – plastics and steels – against cutting efforts with reference in the Japanese standard JSCE – SF6 and some modifications. From the above, the behavior will be studied and analyzed along with the element's toughness from the maximum load.

Some applications of fiber-reinforced concrete can be found in prefabricated elements, tunnel lining – shotcrete – and industrial slabs, among others.

GLOSARIO

- **RESISTENCIA RESIDUAL:** Resistencia al corte de los hormigones reforzados con fibras para deformaciones muy superiores del alcanzado en esfuerzo máximo.
- **HRF:** Hormigón reforzado con fibras. Los refuerzos se caracterizan por ser cortas, de pequeña sección, discretas y aleatoriamente distribuidas en la masa.
- **DUCTILIDAD:** Propiedad del material referente a la experimentación de grandes deformaciones, bajo la acción de una fuerza, antes de alcanzar la rotura.
- **TENACIDAD:** Energía de la deformación total absorbida o acumulada en el material, comprendida como el área bajo la curva de esfuerzo-deformación.
- **TRANSDUCTOR:** Dispositivo utilizado en detectar ínfimos desplazamientos para convertirlas de salida en información legible por un sistema electrónico – ordenador-.
- **ESBELTEZ:** Concepto asociado a la relación entre largo y diámetro de la fibra.
- **SHOTCRETE:** Traducción al inglés de “hormigón proyectado”.
- **ENTALLE:** Hendidura. Abertura estrecha, alargada y poco profunda en una superficie.
- **ANILLO DE CARGA:** Elemento concéntrico de material acero cuya función transmite cargas a las probetas ensayadas con un alcance de 500 kN.
- **ENSAYO A LA FLEXO-TRACCIÓN:** Ensayo cuya configuración de apoyos y aplicación de carga permiten obtener valores de tensión por tracción – indirectamente en zona inferior – y, esfuerzos de compresión en sector superior.
- **MONOLITISMO:** Característica asociada a prefabricados en cuanto a nula presencia de fisura interna, de posición firme que no cede ni adapta a cambios con facilidades.
- **INOCUO:** Que no causa daño.
- **DESSPORTILLAR:** Romper o deteriorar un objeto haciendo en él o en algunos de sus bordes una desportilladura.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
GLOSARIO	5
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 Antecedentes	9
1.2 Objetivos Generales	10
1.3 Objetivos Específicos	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1 Hormigones Reforzado Con Fibras (HRF)	11
2.2 Clasificación General de las Fibras	12
2.4 Ensayo de corte	14
2.5 Tenacidad y absorción de energía	16
3 MATERIALES ESTUDIADOS	17
3.1 Cemento	17
3.2 Agregados Pétreos	18
3.3 Aditivo Viscocrete 5100 CL	19
3.4 Fibras Híbridas	19
3.4.1 Fibra Sintética EPC Barchip R50	19
3.4.2 Fibra de Acero DRAMIX 3D 60/65 BG	20
3.5 Dosificación General de Materiales	21
4 CAMPAÑA EXPERIMENTAL	22
4.1 Cuantificación de fibras por amasadas	24
4.2 Asentamiento de cono de Abrams	24
4.3 Procedimiento para ensayo de corte en HRF	25
4.4 Parámetros y Calibración	26
4.4.1 Calibración	26
4.4.2 Parámetros	26
5 RESULTADOS	28
6 ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
6.1 Serie A	32
6.2 Serie B	39
7 CONCLUSIONES	46
8 REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	49
ANEXOS	51
Serie “A” Baja cuantía	52
Amasada A1	52
Amasada A2	53
Amasada A3	54
Amasada A4	55
Amasada A5	56
Serie “B” Media cuantía	57

Amasada B1	57
Amasada B2	58
Amasada B3	59
Amasada B4	60
Amasada B5	61

Tabla 1. Características del cemento empleado en comparación de las clases registradas en la NCh 148 Of.68.	17
Tabla 2. Granulometría fina del agregado en mezcla de HRF.	18
Tabla 3. Propiedades características de fibra sintética Barchip R50.	20
Tabla 4. Propiedades características fibras de acero Dramix 3D 60/65 BG.	20
Tabla 5. Dosificación de los materiales usados en mezcla, por unidad de m3.	21
Tabla 6. Dosificación de materiales usados por 100 L de agua.	21
Tabla 7. Cantidades de fibras usadas en las amasadas para baja cuantía de sustitución.	24
Tabla 8. Cantidades de fibras usadas en las amasadas para media cuantía de sustitución.	24
Tabla 9. Resultados de asentamiento Cono de Abrams por serie obtenidas con referencia en las memorias “Caracterización de la resistencia residual de hormigones reforzado con cuantías bajas y medias de fibras híbridas”, escritas por Nicolás Godoy y Carlo Stuardo, 2020.	24
Tabla 10. Parámetros del ensayo.	26
Tabla 11. Resultados promedios de resistencia a carga para los desplazamientos de interés en todas las amasadas.	28
Tabla 12. Resultados promedios de esfuerzo de corte a sus respectivos desplazamientos según configuración de fabricación.	28
Tabla 13. Resultados promedios de energía necesaria, Tenacidad, para deformar en los desplazamientos solicitados.	28
Tabla 14. Incrementos y disminuciones porcentuales de la resistencia a carga – ergo corte – debido a la transición de la configuración en el contenido de fibras para baja cuantía de sustitución.	32
Tabla 15. Incrementos y disminuciones porcentuales de las tenacidades en amasadas de baja cuantía, medidos desde el máximo de carga como punto de referencia.	33
Tabla 16. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas A1.	34
Tabla 17. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada A1.	34
Tabla 18. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas A2.	35
Tabla 19. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada A2.	35
Tabla 20. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas A3.	36
Tabla 21. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada A3.	36
Tabla 22. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas A4.	37
Tabla 23. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada A4.	37
Tabla 24. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas A5.	38
Tabla 23. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada A5.	38
Tabla 26. Incrementos y disminuciones porcentuales de la resistencia a carga – ergo corte – a causa de la transición en la configuración del contenido de fibra, con los valores respectivos para media cuantía de sustitución.	39
Tabla 27. Incrementos y disminuciones porcentuales de las tenacidades en amasadas de baja cuantía, medidos desde el máximo de carga como punto de referencia.	40
Tabla 28. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas B1.	41
Tabla 29. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada B1.	41
Tabla 30. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas B2.	42
Tabla 31. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada B2.	42
Tabla 32. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas B3.	43
Tabla 33. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada B3.	43
Tabla 34. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas B4.	44
Tabla 35. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada B4.	44
Tabla 36. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas B5. No existe información para las deformaciones de 2,5 y 3 mm debido al descargue en los desplazamientos de estudios.	45
Tabla 37. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada B5.	45
Gráfico 1. Curva Granulometría usada	18
Gráfico 2. Curvas de carga-desplazamiento para la amasadas en baja cuantía de sustitución.....	29
Gráfico 3. Curvas de corte-desplazamiento de cada amasada analizada desde el máximo de carga para serie A.....	29

Gráfico 4. Curvas de gráfica tenacidad-deformación obtenidas desde máximo de carga de cada amasada en baja cuantía.	29
Gráfico 5. Curvas de carga-desplazamiento para la amasadas en media cuantía de sustitución.	30
Gráfico 6. Curvas de corte-desplazamiento de cada amasada analizada desde el máximo de carga para serie B.	30
Gráfico 7. Curva de gráfica tenacidad-deformación obtenidas desde máximo de carga de cada amasada en media cuantía.....	30
Gráfico 8. Curvas de esfuerzos de corte en amasada A1, medido desde peak de carga como origen. Configuración 100% fibras plásticas – 0% fibras aceros. 0,33% Volumen de sustitución.	52
Gráfico 9. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada A1 medido desde máximo de carga.	52
Gráfico 10. Curvas de esfuerzos de corte en amasada A2, medido desde peak de carga como origen. Configuración 75% fibras plásticas – 25% fibras aceros. 0,33% Volumen de sustitución.	53
Gráfico 11. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada A2 medido desde máximo de carga de cada.	53
Gráfico 12. Curvas de esfuerzos de corte en amasada A3, medido desde peak de carga como origen. Configuración 50% fibras plásticas – 50% fibras aceros. 0,33% Volumen de sustitución.	54
Gráfico 13. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada A3 medido desde máximo de carga.	54
Gráfico 14. Curvas de esfuerzos de corte en amasada A4, medido desde peak de carga como origen. Configuración 25% fibras plásticas – 75% fibras aceros. 0,33% Volumen de sustitución.	55
Gráfico 15. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada A4 medido desde máximo de carga.	55
Gráfico 16. Curvas de esfuerzos de corte en amasada A5, medido desde peak de carga como origen. Configuración 0% fibras plásticas – 100% fibras aceros. 0,33% Volumen de sustitución.	56
Gráfico 17. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada A5 medido desde máximo de carga.	56
Gráfico 18. Curvas de esfuerzos de corte en amasada B1, medido desde peak de carga como origen. Configuración 100% fibras plásticas – 0% fibras aceros. 0,51% Volumen de sustitución.	57
Gráfico 19. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada B1 medido desde máximo de carga.	57
Gráfico 20. Curvas de esfuerzos de corte en amasada B2, medido desde peak de carga como origen. Configuración 75% fibras plásticas – 25% fibras aceros. 0,51% Volumen de sustitución.	58
Gráfico 21. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada B2 medido desde máximo de carga.	58
Gráfico 22. Curvas de esfuerzos de corte en amasada B3, medido desde máximo de carga como origen. Configuración 50% fibras plásticas – 50% fibras aceros. 0,51% Volumen de sustitución.	59
Gráfico 23. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada B3 medido desde máximo de carga.	59
Gráfico 24. Curvas de esfuerzos de corte en amasada B4, medido desde peak de carga como origen. Configuración 25% fibras plásticas – 75% fibras aceros. 0,51% Volumen de sustitución.	60
Gráfico 25. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada B4 medido desde máximo de carga.	60
Gráfico 26. Curvas de esfuerzos de corte en amasada B5, medido desde peak de carga como origen. Configuración 0% fibras plásticas – 100% fibras aceros. 0,51% Volumen de sustitución.	61
Gráfico 27. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada B5 medido desde máximo de carga.	61

Imagen 1. Fuente: Concrete, Hormigón Reforzado con Fibras, Sika®, pág.11. Gráfico carga-deflexión de hormigones con distinta cuantía de fibra incorporada – hormigón simple en rojo –. Representación de las tenacidades acumuladas residuales post máximo de carga – área gris bajo la curva - en comparación a hormigones sin refuerzos - naranja.....	12
Imagen 2. Vista en macro de fibra sintética estriada.	19
Imagen 3. Fibras sintéticas distribuidas al azar.	19
Imagen 4. Formato comercial de fibras de acero Dramix 3D 60/65. Tramos de fibras encoladas.	21
Imagen 5. Configuración lista para ensayo a corte.	25
Imagen 6. Cuadro de ajuste y propiedades previo a ensayo utilizando el programa LabVIEW.	27
Imagen 7. Gráficos obtenidos del esfuerzo-deformación del software usado en laboratorio LEMCO de la USM "Ensayo Entalle".....	27
Imagen 8. Representación de la configuración usada para efectuar desplazamiento relativo por corte.....	31
Imagen 9. (a) Detalle en corte de sección transversal en prisma HRF, incluida el área del plano de falla – en rojo - para efectuar el deslizamiento relativo del tramo central por corte. (b) Detalle frontal del tramo central por deslizar, separadas mediante entalles de 8 mm de abertura en cada cara del prisma.	32

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Uno de los materiales más usados en la construcción ha sido el hormigón gracias a su gran resistencia, su fácil uso y gran versatilidad; éste está constituido por una matriz cementicia que envuelve y une el material mineral inerte conformado por los agregados pétreos. Pero, el hormigón por sí solo tiene defectos en su estado endurecido como son las fisuraciones que se presentan apenas comienza el fraguado. Es por esto que al hormigón se le suele agregar un material que limite estos defectos como lo es el acero, en barras, y/o las fibras sintéticas o de acero.

El hormigón armado complementa propiedades mecánicas del hormigón y el acero, obteniéndose un hormigón armado tenaz y que además puede disipar una mayor cantidad de energía. Esto se debe a que la propagación de las fisuraciones del hormigón es detenida por las fibras y/o acero lo cual genera una trabazón e impide que la fisura siga avanzando.

En este caso se investigará el hormigón con fibras híbridas y como estas influyen en las propiedades mecánicas del hormigón para resistir esfuerzos en los cuales carece de resistencia, ya que el hormigón de por sí tiene un buen comportamiento a esfuerzos de compresión, mas no de flexión, tracción y corte, siendo esta última el objetivo a analizar. Hay que tener en cuenta que el esfuerzo de corte en el hormigón es soportado por la trabazón de los agregados pétreos y el material ligante como lo es el cemento, pero aparte de esto no tiene otro soporte, razón por lo cual la integración de las fibras hará un gran papel para tomar estos esfuerzos de corte y agregar resistencia a dichas sollicitaciones en las muestras, con el objetivo de mantener la estructura de hormigón unidas entre sí a través del resultado de la combinación de los agregados juntos con los refuerzos, logrando mayores resistencias a pesar de que siga generando nuevas fisuras internamente.

1.2 Objetivos Generales

- Caracterizar el comportamiento de hormigones reforzados con fibras híbridas sometidas a esfuerzo de corte directo.

1.3 Objetivos Específicos

- Determinar la respuesta carga-desplazamiento de hormigones reforzados con fibras híbridas sometido a esfuerzos de corte.
- Determinar las resistencias residuales y la tenacidad de hormigones reforzados con fibras híbridas sometido a esfuerzos de corte.
- Determinar el incremento de la tenacidad al corte directo.
- Evaluar la efectividad de los diferentes tipos de fibras híbridas en el incremento de las resistencias residuales y tenacidad al corte del hormigón.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Hormigones Reforzado Con Fibras (HRF)

Es conocido que el comportamiento del hormigón depende del tipo de sollicitación al que sea sometido, si estos esfuerzos son a compresión el hormigón se desempeña mejor que ante esfuerzo de corte, tracción o flexión (Hormigón con fibra. Rodolfo Jeria H, s/f). Debido a lo anterior, al momento de diseñar los elementos de hormigones deben considerar los refuerzos para suplir las carencias que estas presentan ante las sollicitaciones que no guarden relación con la compresión. Para el caso de la resistencia a la flexión se debe emplear refuerzos longitudinales mientras que, para resistencia a corte se utiliza refuerzos transversales.

Todo lo indicado respecto a los refuerzos que se deben añadir al hormigón tiene como objetivo evitar una falla frágil, abrupta, violenta e impredecible, resultado característico del hormigón cuando no se tiene contenido de refuerzo en su interior. Además, la combinación de hormigón más refuerzo mejora sustancialmente la ductilidad del elemento, obteniendo fallas de forma gradual y así poder evaluar o tener un plan de acción ante la presencia de deformaciones. Bajo la premisa que estamos revisando el uso de fibras esta se está implementando con el fin de poder tener una nueva posibilidad para el diseño de estructuras resistentes a esfuerzos de corte o como complemento a los refuerzos clásicos y en aquellos lugares o estructuras con formas poco comunes que puedes tener problemas para poder implementar soluciones clásicas de refuerzo de estructura.

Investigaciones previas han demostrado los beneficios otorgados por la incorporación de fibras en el hormigón, mejorando la capacidad estructural frente a esfuerzos de corte. La incorporación de fibras en el hormigón incrementan muchas de las propiedades de estos, debido a que constituyen una micro armadura que aporta una mayor eficacia para contrarrestar el fenómeno de la fisuración por retracción, además de conferir una mayor ductilidad, la cual, termina aportando un aumento de la tenacidad, también se generan beneficios en la resistencia a la fractura, impacto y fatiga (Tesis Hormigones con fibra de acero, Características mecánicas, Patricia Mármol, UPM, Madrid, 2010).

La gran ventaja de emplear fibras en el hormigón es que permite deformar aún más la muestra luego de alcanzar el máximo de carga, obteniéndose con ello las resistencias residuales proporcionadas por las fibras quienes actúan y transmiten las cargas directamente a sus pares en la zona de ablandamiento del material – ante una disminución de carga post máximo-, favoreciendo el desplazamiento relativo en presencia de una fisura controlada.

Se clasifica como HRF estructural cuando el material es sollicitado a estados últimos, servicio o límite; la cantidad de fibra añadida sustituye al refuerzo estructural de forma parcial o completa mientras que, se denomina como HRF no estructural cuando el fin es mejorar las propiedades mecánicas internas como retracción interna, resistencia al fuego, entre otras.

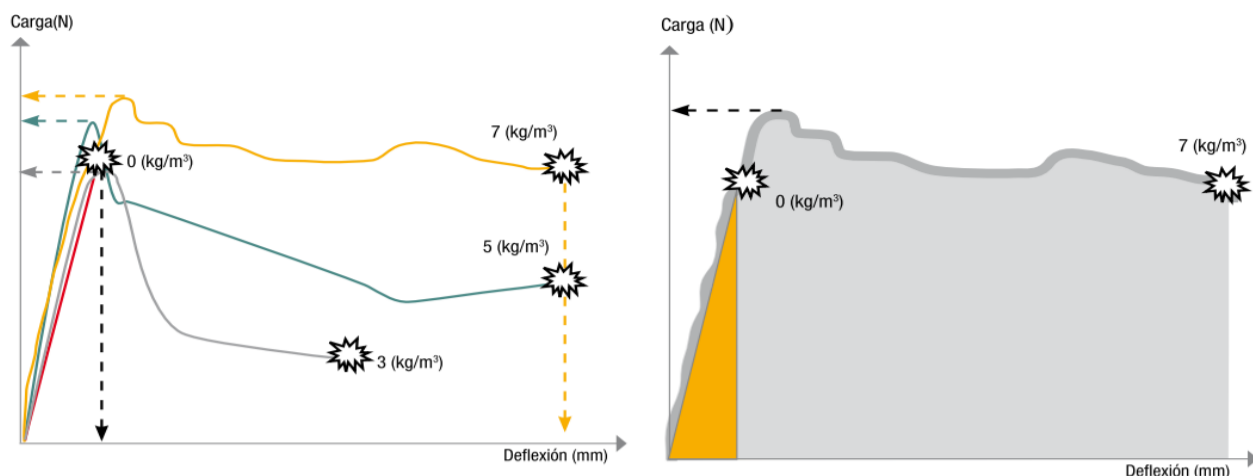


Imagen 1. Fuente: Concrete, Hormigón Reforzado con Fibras, Sika ®, pág.11. Gráfico carga-deflexión de hormigones con distinta cuantía de fibra incorporada – hormigón simple en rojo –. Representación de las tenacidades acumuladas residuales post máximo de carga – área gris bajo la curva - en comparación a hormigones sin refuerzos - naranja-.

2.2 Clasificación General de las Fibras

Las fibras se clasifican de acuerdo con el material y estas son:

- Acero
- Vidrio
- Sintéticas

Esta clasificación separa las fibras de acuerdo por su materialidad, si bien también, existen otras clasificaciones más populares como la siguiente clasificación que separa las fibras según su función:

Microfibras: Se denominan a las fibras de refuerzo que pretenden reducir el agrietamiento durante el fraguado, cuyo uso está abocado a pavimentos, donde la relación entre superficie y volumen de hormigones es bastante alta. También es utilizada para reducir el rebote en shotcrete y para disminuir el efecto de la figuración del hormigón en el fraguado.

Macro fibras: Se denominan a las fibras de refuerzo cuya principal función es mejorar las propiedades mecánicas del hormigón una vez se encuentre endurecido, proporcionando mejor resistencia a la flexión, ductilidad, entre otras. La geometría de las fibras es diversa, debido a que se puede tener sección circular, cuadrada, rectangular, entre otras. En general las dimensiones de las fibras oscilan entre 0.25 y 0.80 [mm] de diámetro y entre 10 y 75 [mm] de longitud.

La ductilidad de las fibras es otro factor crucial, es de vital importancia que las fibras se mantengan firmemente adheridas al hormigón donde aparezca alguna fisura, si se tratase de un material mucho menos dúctil que el hormigón esto sería imposible, ya que a medida que las grietas se incrementen todos los esfuerzos recaerían en el anclaje, forzando así el desprendimiento en el punto en que la fibra está anclada, evitando además la posibilidad de un trabajo conjunto entre fibras.

Al incorporar más de una variedad de tipo de fibras, mejora sustancialmente la efectividad en prevenir la propagación de grietas de un sector sometidos a tracción; si las fibras utilizadas son

cortas – microfibras-, ayudan a controlar micro agrietamientos generados a temprana edad del hormigón dada las retracciones térmicas y plástica que sufre mientras que, fibras más largas evitan el avance de macro grietas y mejora estructuralmente al elemento post fragüe. En resumen, emplear distintos tipos de fibras como refuerzo en el hormigón produce una ganancia en la capacidad de absorción de energía antes de alcanzar la falla.

Es recomendable utilizar refuerzos de fibras que presenten una relación de esbeltez inferior a 100, dado que al emplear refuerzos con valores superiores al indicado se genera apilotonamiento de las fibras, formándose “erizos” de fibras afectando negativamente en la trabajabilidad y docilidad de la mezcla; en consecuencia, usar fibras con relación menor a 100 permite el elemento falle por el arranque del refuerzo.

Una ventaja de la falla por arranque de las fibras es que se producen en forma gradual, incrementando la ductilidad del material, las que contrastan con las fallas más rápidas y posiblemente catastróficas que podrían ocurrir si las fibras fallaran en tensión. Generalmente, mientras más dúctiles sean las fibras, más dúctil y gradual es la falla de elemento de hormigón. Por lo tanto, las características mecánicas de los hormigones reforzados con fibras dependen no sólo de las propiedades mecánicas de la fibra, sino también del grado en que una carga aplicada se transmite a la fibra por medio de la matriz cementicea. En este aspecto, la interfase fibra/ matriz y, por consiguiente, la adherencia entre la pasta y la fibra, juega un rol importante en la disipación de energía, por ende, en la ductilidad, durante el arranque de la fibra. Además, la disposición u orientación relativa de las fibras y su concentración y distribución influyen radicalmente en la resistencia y en otras propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibras (Carmona y Maripangui, 2007).

Esta investigación empleará dos tipos de fibras para el HRF, acero - Dramix 3D - y poliméricas - BarChip R50-, ambas en calidad de macro fibras.

2.3 Ensayo de compresión

La Norma NCh. 1037 of 2009 establece el método de ensayo a la rotura por compresión de probetas cilíndricas, siendo sus dimensiones diámetro y altura 15 y 30 cm respectivamente. Las caras de cada cilindro a ensayar deben estar rectificadas, de tal forma que al someter a compresión a la probeta. Por medio del ensayo de compresión es posible obtener la carga máxima aplicada por la máquina de ensayo y, junto al dato de la sección de ensayo, la resistencia a compresión como la tensión de rotura.

2.4 Ensayo de corte

Uno de los ensayos más populares para la determinación de la resistencia al corte de los hormigones ha sido el ensayo de la probeta tipo “Z” (Barr, 1987), mostrada en la Figura 1. La probeta es básicamente un prisma cortado formando dos bloques tipo L, unidos a través de un plano sobre el que se producen las tensiones de corte debido a una carga de compresión externa. Sin embargo, estos ensayos son muy sensibles a excentricidad en la aplicación de la carga de compresión, lo que se traduce en roturas por flexión y no por corte. Frente a este problema experimental, se han propuesto otras alternativas de ensayo, como las vigas o paneles en flexión sobre cuatro puntos con cargas excéntricas o vigas con carga central con entalla excéntrica, que se puede ver en la Figura 2 (Barr, 1987; Shah et al., 1995).

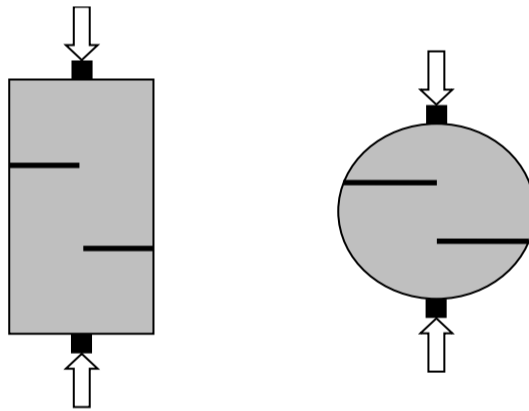


Figura 1: Probetas tipo Z para ensayos de corte (Barr, 1987)

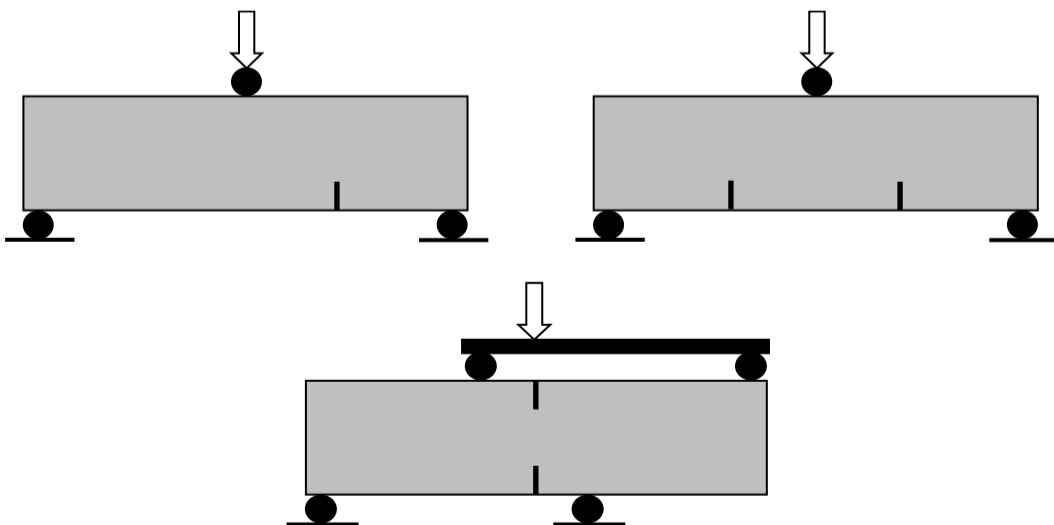


Figura 2: Otras probetas para realizar ensayo de corte (Shah, et al., 1995)

Debido a que las roturas por corte son consideradas frágiles y frente al incremento en la ductilidad del hormigón que producen las fibras (ACI 2008a), actualmente existe un gran interés en determinar la respuesta del hormigón reforzado con fibras frente a esas condiciones de carga. Por este motivo se han propuesto diferentes tipos de probetas y ensayos que tienen por objetivo producir esfuerzos de corte en un plano de falla predefinido (normalmente cortando entallas en las probetas), empleando barras y cargas de compresión (Barragán et al., 2006).

El ensayo de corte JSCE-SF6 es una recomendación hecha por la sociedad japonesa de ingenieros civiles en la que establece la configuración propuesta en la Figura 3. Como se observa en ella, la carga de corte se aplica sobre una probeta prismática de 150 mm de ancho. El propósito del ensayo es medir el descenso relativo del tramo central producto del corte. Durante el ensayo, la tensión de corte se produce por medio de una carga de compresión transmitida al prisma mediante un platillo de acero provisto de dos cuñas en la parte inferior, cuyos bordes exteriores deben coincidir con el borde interno de las entallas, distantes 150 mm entre sí. La probeta se apoya en otras dos cuñas fijadas a otro bloque rígido, separadas a 155 mm. Entonces, es a través de una zona angosta, de 2,5 mm de ancho, donde se produce un campo de tensiones de corte concentradas (Mirsayah y Bantia, 2002).

Sin embargo, los primeros ensayos realizados por Mirsayah y Bantia demostraron que el plano de rotura frecuentemente no se producía en la zona angosta sometida al esfuerzo de corte, obteniendo resultados no válidos. Estos autores debieron introducir dos entallas en las probetas, en la zona de concentración de los esfuerzos, con el fin de definir dos planos de rotura, permitiendo alcanzar resultados válidos y con poca variabilidad.

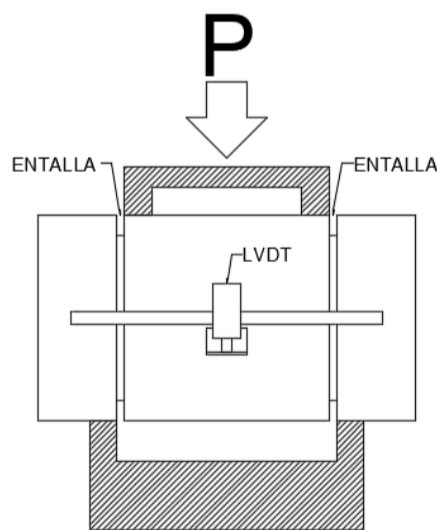


Figura 3: Configuración general ensayo JSCE-SF6 Modificado

2.5 Tenacidad y absorción de energía

La tenacidad puede evaluarse en términos de capacidad de absorción de energía, normalmente entre el inicio de la carga y una deflexión especificada en un ensayo de viga y se determina como el área bajo la curva carga/deflexión para una probeta. Esta propiedad se puede ver afectada por el contenido y tipo de fibra.

Un parámetro que influye en la capacidad de absorción de los HRF son las características de la fibra, ya que la fibra es la encargada de resistir las fisuraciones, por lo que dependerá de las propiedades de la fibra el resistir los esfuerzos requeridos, ya sea su resistencia a la tracción, largo, aspecto, forma. Todos estos aspectos influyen en la capacidad que tiene la fibra en adherirse a la matriz cementicia.

3 MATERIALES ESTUDIADOS

3.1 Cemento

El cemento que se utilizó para la confección de testigos fue Polpaico 400; de alta resistencia. Este cemento es clasificado como Portland puzolánico según la norma chilena NCh148.Of 68. A continuación, se presentará en la siguiente tabla las características y diferencias existentes entre los distintos cementos puzolánicos existentes en el mercado.

REQUISITOS NCh 148.Of68			CEMENTO POLPAICO 400
Clase	Portland Puzolánico	Puzolánico	
Grado	Alta Resistencia	Alta Resistencia	
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y FÍSICAS			
Expansión en autoclave, % máx.	1,00	1,00	0,24
Pérdida por calcinación, % máx.	4,0	5,0	3,1
Residuo insoluble, % máx.	30,0	50,0	19,8
Contenido de SO ₃ , % máx.	4,0	4,0	2,84
Tiempos de fraguado (Vicat)			
Inicial, h:min, mín.	0:45	0:45	1:40
Final h:min, máx.	10:00	10:00	4:30
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS			
Resistencia a la Compresión			
7 días. kgf/cm ² mín.	250	250	323
28 días. kgf/cm ² mín.	350	350	449
Resistencia a la flexión			
7 días. kgf/cm ² mín.	45	45	48
28 días. kgf/cm ² mín.	55	55	63

Tabla 1. Características del cemento empleado en comparación de las clases registradas en la NCh 148 Of.68.

3.2 Agregados Pétreos

El hormigón se compone en gran medida de agregados pétreos constituyendo un 70% a 80% del volumen final en mezcla gracias a las propiedades inertes que estas presentan, permitiendo desplazar y ocupar en menor medida el volumen de pasta en mezcla, ergo costo.

Los áridos se clasifican en grueso y fino, dividiéndose entre sí por la circulación de este a través de una serie de tamices con diferentes aberturas las cuales permiten tanto el paso como la retención de los agregados. Una correcta granulometría se constituye en mayor parte de árido grueso las que disminuye de forma gradual tanto el tamaño del grano como cantidad a utilizar, habiendo en mezcla de todo tipo de tamaño.

Las características físicas de los agregados en cuanto a forma geométrica, textura y graduación influyen en los resultados como trabajabilidad, acabado, exudación, además de la segregación que puedan generar en estado fresco del hormigón las que puede afectar a la resistencia, rigidez, retracción, densidad, permeabilidad, y, durabilidad del concreto en estado sólido.

Los áridos utilizados de esta investigación fueron proporcionados por LEMCO y la dosificación de los HRF – regidas por norma NCh. 165 of77- son las siguientes:

	Tamiz	% Acum que pasa
Grava	3/4"	100
	1/2"	87
	3/8"	74
Arena	N°4	62
	N°8	54
	N°16	40
	N°30	25
	N°50	17
	N°100	10

Tabla 2. Granulometría final de los áridos incorporados al HRF.

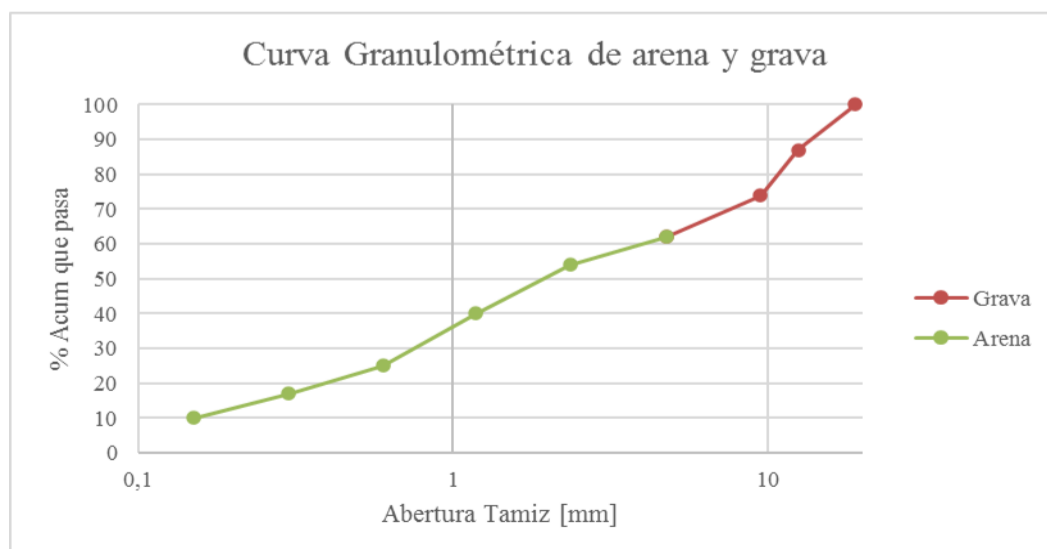


Gráfico 1. Curva Granulometría usada

3.3 Aditivo Viscocrete 5100 CL

Es un aditivo super plastificante o reductor de agua marca Sika, capaz de retener el volumen de agua usado en la confección de las probetas de hormigón sin afectar la consistencia de la mezcla, otorgando con ello una mejora en cuanto a la trabajabilidad y cohesión.

Este tipo de aditivo es utilizado frecuentemente en hormigones auto compactados, de alta resistencia y bombeables debido a la fluidez entregada por el producto.

La dosificación utilizada de este producto para el presente estudio fue a razón de 0,976 [kg/m³].

3.4 Fibras Híbridas

Las fibras empleadas para los HRF ensayados a tracción por flexión y corte son sintéticas y de acero. Para el caso de las sintéticas, se usó fibras EPC Barchip R50, mientras que las de acero se utilizó Dramix 3D 60/65; con la finalidad de analizar el comportamiento y determinar la respuesta carga-desplazamiento frente a corte de las combinaciones híbridas definidas.

3.4.1 Fibra Sintética EPC Barchip R50

Es una fibra sintética perteneciente al rango estructural de la compañía Elasto Plastic Concrete, como resultado de su Programa de investigación y desarrollo “Fibra Futura”. Barchip R50 ha sido optimizada para estructuras de hormigón con una resistencia de 30 MPa o mayor.



Imagen 2. Vista en macro de fibra sintética estriada.



Imagen 3. Fibras sintéticas distribuidas al azar.

Las propiedades de esta fibra son las siguientes:

Características	Propiedades
Resina	Olefina modificada
Largo	50 [mm]
Resistencia a la tracción	640 [MPa]
Superficie	Relieve continuo
Densidad Relativa	0,90 - 0,92
Módulo de Elasticidad	10 [GPa]
Punto de Fusión	150°C - 170°C
Punto de Ignición	Mayor a 450°C

Tabla 3. Propiedades características de fibra sintética Barchip R50.

BENEFICIOS

Los beneficios al emplear estos tipos de refuerzos apuntan desde una disminución en el costo por kg de fibra/ Joule – con una resistencia a la flexión equivalente al acero -, durabilidad a largo plazo libre de oxidación, reducción de exfoliación durante incendios y, menos desgaste en bombas y mangueras. Además, presentan una buena resistencia frente al fuego y pruebas de alcalinidad.

3.4.2 Fibra de Acero DRAMIX 3D 60/65 BG

3D Dramix es el nombre que recibe la gama existente de fibras de acero que a lo largo de los años se ha convertido como referencia de refuerzo en HRF. Debido a su alto desempeño, durabilidad y facilidad de uso, estas fibras ofrecen una alternativa rápida y rentable a las soluciones tradicionales en cuanto a refuerzo. Hoy en día es considerada como la fibra con mejor desempeño en el mercado.

El formato de presentación de este tipo de fibra es a través de grupos encolados sin revestir con extremos conformados.

Propiedades	3D Dramix 60/65 BG
Forma de Fibra	Extremos conformados
Formato de Distribución	Encoladas
Longitud	60 [mm]
Diámetro	0,90 [mm]
Esbeltez	67
Resistencia a Tracción	1160 [MPa]
Módulo de Elasticidad	200 [GPa]
Durabilidad	No presenta Durabilidad

Tabla 4. Propiedades características fibras de acero Dramix 3D 60/65 BG.



Imagen 4. Formato comercial de fibras de acero Dramix 3D 60/65. Tramos de fibras encoladas.

3.5 Dosificación General de Materiales

La dosificación propuesta para la confección de probetas reforzadas contempla un mismo volumen de árido, cemento, aditivo y agua; a excepción de las fibras en que el volumen de esta se ve condicionada según la cuantía a usar - baja o media - y de la combinación de refuerzo de la amasada por analizar.

A continuación, se detallará las cantidades usadas para la preparación de mezclas a través de un trompo mezcladora horizontal de 100 [L] de capacidad:

Dosificación en mezcla por [m3]	
Material	Cantidad
Cemento Polpaico 400	279 [kg]
Arena	937 [kg]
Grava	945 [kg]
Viscocrete 5100	0,90 [L]
Agua	145 [L]

Tabla 5. Dosificación de los materiales usados en mezcla, por unidad de m3.

Dosificación en mezcla por 100 [L]	
Material	Cantidad
Cemento Polpaico 400	27,9 [kg]
Arena	93,7 [kg]
Grava	94,5 [kg]
Viscocrete 5100	0,090 [L]
Agua	14,5 [L]

Tabla 6. Dosificación de materiales usados por 100 L de agua.

4 CAMPAÑA EXPERIMENTAL

El presente estudio ha utilizado las probetas provenientes de la investigación previa, “Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia residual a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual).”, de la norma UNE-EN 14651.

De lo anterior, se confeccionó y ensayó cincuenta probetas prismáticas de dimensiones 600x150x150 mm agrupadas en dos series de cuantía de sustitución volumétrica, los que a su vez se subdividen en cinco amasadas caracterizadas según su porcentaje de refuerzo híbrido contenido en mezcla.

En cuanto a la fabricación de vigas, estas fueron realizadas durante el año 2019 en el laboratorio de hormigón de LEMCO, utilizándose para cada una de ellas mismo tipo de cemento, agregados pétreos, fibras (sintéticas y aceros; en distintas proporciones) y aditivo plastificante; bajo supervisión de operarios certificados durante el periodo de curado y maduración del hormigón reforzado con fibras. Además, se tiene acceso a los equipos para ensayos tanto a la flexión-tracción como corte, entre otros.

Para las confecciones de probetas reforzadas con fibras se necesitaron 5 moldes de dimensiones 150x150x600 [mm] – acotadas según norma europea EN-14651:2005 + A1:2007 y, de manera adicional, 3 probetas cilíndricas de 150 [mm] de diámetro por 300 [mm] de longitud para la obtención de resistencia a compresión. Los materiales, herramientas y equipos fueron proporcionados por LEMCO; la dosificación propuesta de cada amasada se hizo a partir de 100 [lt], variando sólo la cantidad de gramos de refuerzos según volumen de cuantía y tipo de fibras; las cantidades de materiales usados por amasadas fueron los siguientes: 27.9 [kg] de cemento, 93.7 [kg] de gravilla, 94.5 de arena, 14.5 [lt] de agua y 0.9 [lt] de aditivo.

Con la ayuda de tinetas se preparan los materiales a mezclar para fabricar las probetas en una betonera de eje vertical de acuerdo con los procedimientos emanados en la norma chilena NCh. 1018 (2009) “Hormigón – Preparación de mezclas para ensayos en laboratorio”.

Al momento de incorporar los materiales en betonera se tiene el orden de llenado:

- 50% de la cantidad de grava y arena.
- 20% de la cantidad de agua.
- 50% de la cantidad de cemento.
- 60% de la cantidad de agua
- 50% restante de cemento.
- 50% restante de grava y arena.
- 20% restante de agua.
- 100% de la cantidad de fibra a usar según amasada
- Aditivo Viscocrete. El aditivo fue incorporado en agua previo mezclado.

El procedimiento de llenado en betonera requiere de cuidado para evitar pérdidas. Además, se debe verificar la homogeneidad de la mezcla sin que pierda la consistencia de esta a medida que se agregan los materiales paulatinamente. Una vez incorporados los agregados se debe tener en cuenta el tiempo de mezcla y así rectificar una distribución homogénea de las fibras en el hormigón.

Al momento de vaciar la betonera se cuenta con carretillas para transportar el material resultando para depositarlos directamente a los moldes preparados – armados, nivelados y con desmoldante en caras interiores: El llenado y compactación del hormigón se rige bajo procedimiento de la NCh 1017 (of. 75) “Hormigón- Preparación de mezclas para ensayos en laboratorio”. El llenado de probetas se realiza por capas; primero se vierte el centro para luego llenar en los extremos – con ayuda de poruñas -. Para las probetas cilíndricas se vierte en 2 capas de espesores similares.

La compactación de las probetas se realizó utilizando sonda vibradora de inmersión el cual se inserta lo más vertical posible en el centro de estas con el cuidado de no tocar las paredes del molde en un breve periodo de tiempo para retirar lo más lento posible, siguiendo el mismo procedimiento de llenado, pero para la compactación – centro primero para terminar en los extremos -. En el caso de probetas cilíndricas, se compacta – nuevamente sin tocar las paredes del molde – la primera capa de llenado para luego compactar la segunda capa con una penetración de 2 [cm] de la capa inferior.

Una vez llenados y compactadas las probetas se enrasa la parte superior con varilla pisón para finalizar con platacho y llana, a modo de generar una cara expuesta lo más nivelado posible evitando la aparición de fibras en superficie.

LEMCO – Laboratorio de Ensayes de Materiales y Control de Obras – es una unidad íntegra del departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María donde cuentan con diversas áreas de investigación como hormigón, vialidad, hidráulica, mecánica de suelos, entre otros. Cada módulo cuenta con sus respectivos espacios de trabajo, equipos electrónicos y máquinas especiales certificadas, personal calificado y, computadores con software específicos que permitan canalizar y registrar los valores obtenidos de los ensayos para su oportuno análisis.

Una vez finalizado el ensayo de tracción por flexión de las vigas prismáticas, se acomodan los testigos para separarlas en dos partes iguales con un chuzo. Sólo se utilizará media parte de la probeta para enmarcar guías auxiliares perimetralmente a tercios centrales del nuevo largo de probeta. Luego, se procede a entallar las marcas con un disco de corte a una profundidad de 15 mm, correspondiente a la décima parte de la altura en sección transversal. Las hendiduras generadas, además de disminuir el área de la sección transversal en la zona marcada, servirán como planos de falla para inducir y recibir toda transmisión de carga de corte sobre la muestra, mientras que la parte central de esta sufrirá del descenso en forma paulatina. Antes de comenzar el ensayo, se debe montar la probeta de forma tal que las caras de llenado del molde estén en contacto con el plato de carga con cuñas a ras del borde interno del tramo central por la parte superior, mientras que, en la parte inferior, las cuñas estén en contacto con los bordes externos del tramo.

4.1 Cuantificación de fibras por amasadas

A continuación, se detalla la composición en mezcla de HRF para cada una de las amasadas a ensayar.

Serie	% Vol. Sustitución	Fibra Sintética utilizada en [gr]	Fibra de Acero utilizada en [gr]	% Fibra Sintética	% Fibra Metálica
A1	0,33%	300	0	100%	0%
A2		225	625	75%	25%
A3		150	1250	50%	50%
A4		75	1875	25%	75%
A5		0	2500	0%	100%

Tabla 7. Cantidades de fibras usadas en las amasadas para baja cuantía de sustitución.

Serie	% Vol. Sustitución	Fibra Sintética utilizada en [gr]	Fibra de Acero utilizada en [gr]	% Fibra Sintética	% Fibra Metálica
B1	0,51%	455	0	100%	0%
B2		341	1250	75%	25%
B3		228	2500	50%	50%
B4		114	3750	25%	75%
B5		0	5000	0%	100%

Tabla 8. Cantidades de fibras usadas en las amasadas para media cuantía de sustitución.

4.2 Asentamiento de cono de Abrams

Los descensos obtenidos bajo norma NCh 1019 of 2009 “Hormigón- Determinación de la docilidad- Método del asentamiento del cono de Abrams” para los HRF son los siguientes:

Serie	Amasada	Asentamiento de Cono [cm]
A	A1	Fluida
	A2	Fluida
	A3	8
	A4	10
	A5	8
B	B1	8
	B2	10
	B3	8
	B4	7
	B5	8

Tabla 9. Resultados de asentamiento Cono de Abrams por serie obtenidas con referencia en las memorias “Caracterización de la resistencia residual de hormigones reforzado con cuantías bajas y medias de fibras híbridas”, escritas por Nicolás Godoy y Carlo Suardo, 2020.

Se puede apreciar que el aditivo Viscocrete 5100 otorga al HRF una consistencia y trabajabilidad entre blanda y fluida, producto de los asentamientos obtenidos.

4.3 Procedimiento para ensayo de corte en HRF

Una vez montada la muestra sobre los platos inferiores de soportes con cuñas en la prensa TONI TECHNIK, se posiciona para el tramo central pequeños perfiles “L” a ambos lados del testigo con el objetivo de crear un apoyo que permita medir el descenso mediante los transductores LDVT de 20 mm de rango durante el ensayo. Para montar estos aparatos, se debe fijar previamente los marcos de celdas en los extremos exteriores del tramo central, para luego, montar las abrazaderas quienes cuentan con soporte para fijar estos dispositivos a media distancia, coincidiendo los transductores con estos perfiles “L”. Finalmente, se nivela todo el conjunto y se ajusta manualmente los transductores de manera tal que las lecturas registradas en la computadora previo al inicio del ensayo sean cercanas a cero.

Por otra parte, se coloca por la parte superior del bloque un plato de carga con cuñas el cual se monta sobre esta una celda de carga cilíndrica con capacidad de 500 kN de resistencia. Como alternativa al cilindro de carga, se utiliza platos de acero cuando se alcanza resistencia sobre los 500 kN.



Imagen 5. Configuración lista para ensayo a corte.

La prensa hidráulica utilizada, TONI TECHNIK, cuenta con dos rangos de carga, uno de 600 kN y otra de 3.000 kN las cuales tienen una precisión de 0,1 kN y 1 kN respectivamente; esta investigación emplea el rango de carga para 3.000 kN. Además, la prensa está provisto de un equipo electrónico con interfaz capaz de monitorear los parámetros de velocidad de carga, carga, tiempo de ensayo, entre otros. El movimiento de la prensa va en ascenso, es decir, sube desde la parte inferior (tambor) hacia la parte superior (disco amortiguador).

A medida que transcurre el ensayo, el equipo electrónico registra las lecturas de cargas conforme se deforma el testigo y, con la ayuda del transductor, se obtiene el gráfico de la curva carga-desplazamiento de la probeta. Además, el comportamiento de la probeta previo alcance de

resistencia máxima se comporta de forma similar a la compresión, por lo que las fibras no contribuyen a la resistencia en compresión, pero sí trae beneficio para el rango post máximo.

Toda información referente a carga-deformación de las muestras son registradas a través de un sistema de adquisición de datos, la cual recopila a razón de 3 datos por segundo, la que se conecta a la computadora por medio del software específico “LabVIEW/ Ensayo Entalle”, que a su vez dicho software permite modificar variables y parámetros de control. Se da por terminado el ensayo cuando la probeta alcanza una deformación sobre los 3 mm de desplazamiento desde peak de carga; una vez finalizado, el programa LabVIEW genera un archivo de texto automáticamente con los datos recopilados para proceder cálculos a cortes y obtener gráficos de comportamiento en Microsoft Excel.

4.4 Parámetros y Calibración

4.4.1 Calibración

Los equipos de LEMCO se calibran anualmente por agentes externos certificados de acuerdo con la norma ISO 17025:2017

4.4.2 Parámetros

Los parámetros utilizados para el ensayo a corte de HRF, de acuerdo con el procedimiento emanado de la recomendación japonesa JSCE-SF6 son los siguientes:

Parámetro	Ensayo en Estudio
Dimensiones	150x150x300 [mm]
Carga Máx en Prensa	3000 [kN]
Aplicación de carga	Tercio central
Término de ensayo	3 [mm] desde peak máx. de carga
Velocidad de carga del ensayo	0,14 [MPa/s]
Entalles	2. Alrededor del perímetro transversal del testigo
Dimensiones Planos de cortes	120x120 [mm]

Tabla 10. Parámetros del ensayo.

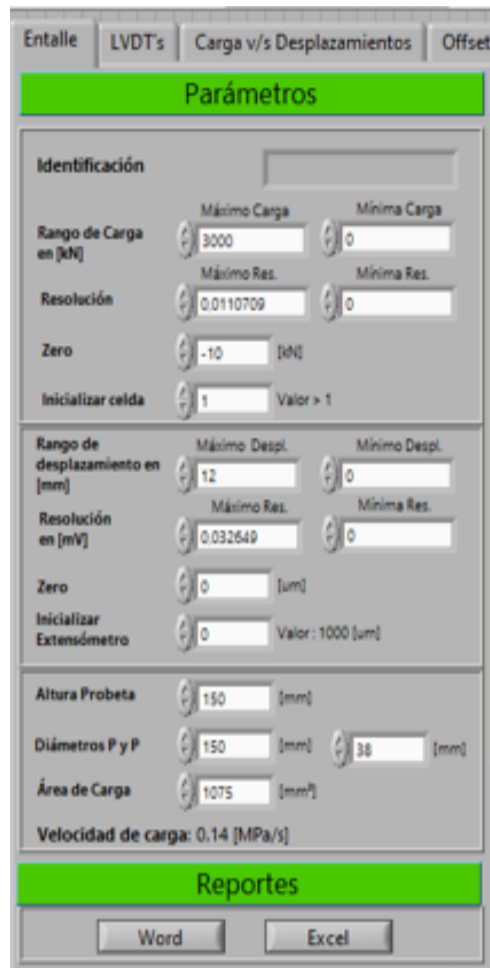


Imagen 6. Cuadro de ajuste y propiedades previo a ensayo utilizando el programa LabVIEW.

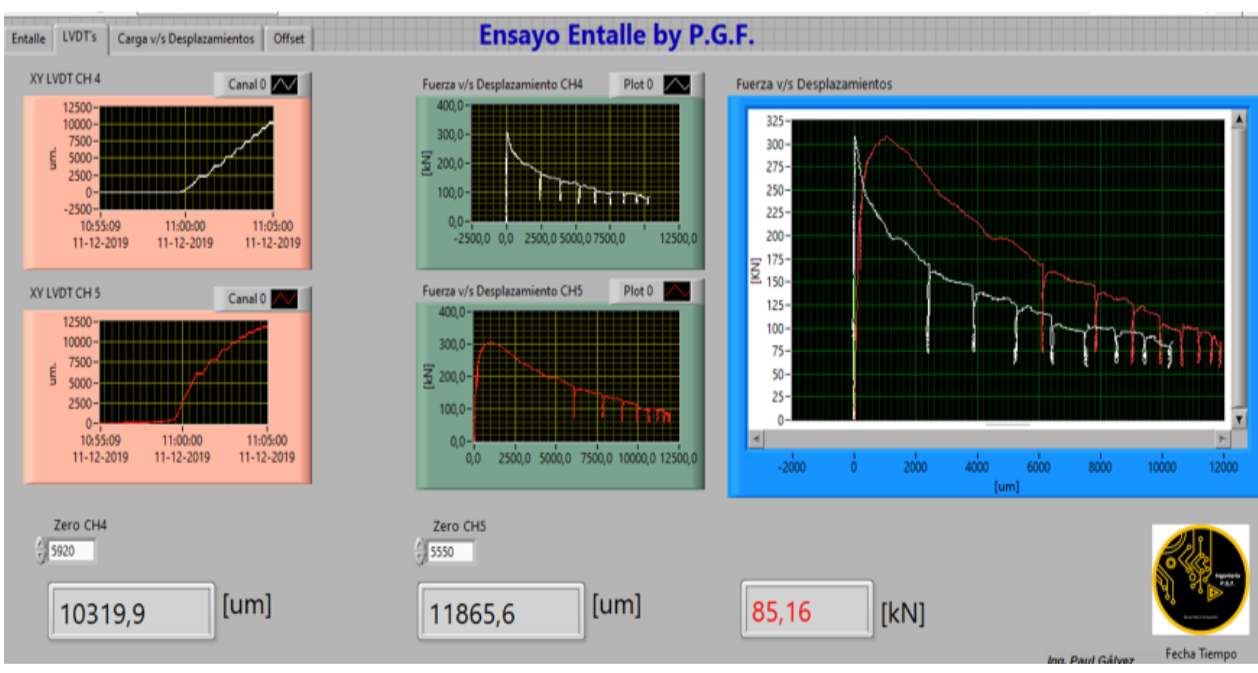


Imagen 7. Gráficos obtenidos del esfuerzo-deformación del software usado en laboratorio LEMCO de la USM "Ensayo Entalle".

5 RESULTADOS

A continuación, se presenta los resultados promedios obtenidos del ensayo a corte de HRF, en base a la recomendación del ensayo JSCE – SF6, con modificaciones propuesta por Mirsayah y Banthia. Los valores representan la carga en el punto de deformación estudio -ergo corte- y, la tenacidad acumulada del material. En esta investigación se analiza desde el máximo de carga de cada testigo, definiéndose como punto de partida para registrar las cargas resultantes cuando se logra deformar 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 mm en el testigo. Respecto a los valores de las tablas 11, 12 y 13, estas se obtuvieron del promedio aritmético de la amasada con 3 vigas mínima que cumplan los criterios para ser considerado.

Cargas [kN]							
Desplazamiento [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Amasada							
A1	319	273	221	180	154	128	117
A2	351	299	245	209	185	163	140
A3	378	336	278	235	198	168	142
A4	390	339	269	222	188	154	135
A5	391	348	303	261	232	202	179
B1	379	318	244	190	160	132	104
B2	389	345	271	220	192	172	149
B3	398	360	318	275	242	217	187
B4	483	432	366	315	272	237	203
B5	517	464	402	351	311		

Tabla 11. Resultados promedios de resistencia a carga para los desplazamientos de interés en todas las amasadas.

Esfuerzo de Corte [MPa]							
Desplazamiento [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Amasada							
A1	11,08	9,48	7,67	6,25	5,35	4,44	4,06
A2	12,19	10,38	8,51	7,26	6,42	5,66	4,86
A3	13,13	11,67	9,65	8,16	6,88	5,83	4,93
A4	13,54	11,77	9,34	7,71	6,53	5,35	4,69
A5	13,58	12,08	10,52	9,06	8,06	7,01	6,22
B1	13,16	11,04	8,47	6,60	5,56	4,58	3,61
B2	13,51	11,98	9,41	7,64	6,67	5,97	5,17
B3	13,82	12,50	11,04	9,55	8,40	7,53	6,49
B4	16,77	15,00	12,71	10,94	9,44	8,23	7,05
B5	17,95	16,11	13,96	12,19	10,80		

Tabla 12. Resultados promedios de esfuerzo de corte a sus respectivos desplazamientos según configuración de fabricación.

Tenacidad [J]							
Desplazamiento [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Amasada							
A1	0	150	273	372	455	527	569
A2	0	165	300	412	511	597	672
A3	0	180	333	461	569	661	737
A4	0	184	336	458	561	647	719
A5	0	186	349	489	612	720	816
B1	0	177	317	426	512	586	643
B2	0	184	339	460	562	653	734
B3	0	190	359	508	637	752	853
B4	0	231	430	599	745	872	981
B5	0	246	461	649	814		

Tabla 13. Resultados promedios de energía necesaria, Tenacidad, para deformar en los desplazamientos solicitados.

Serie A

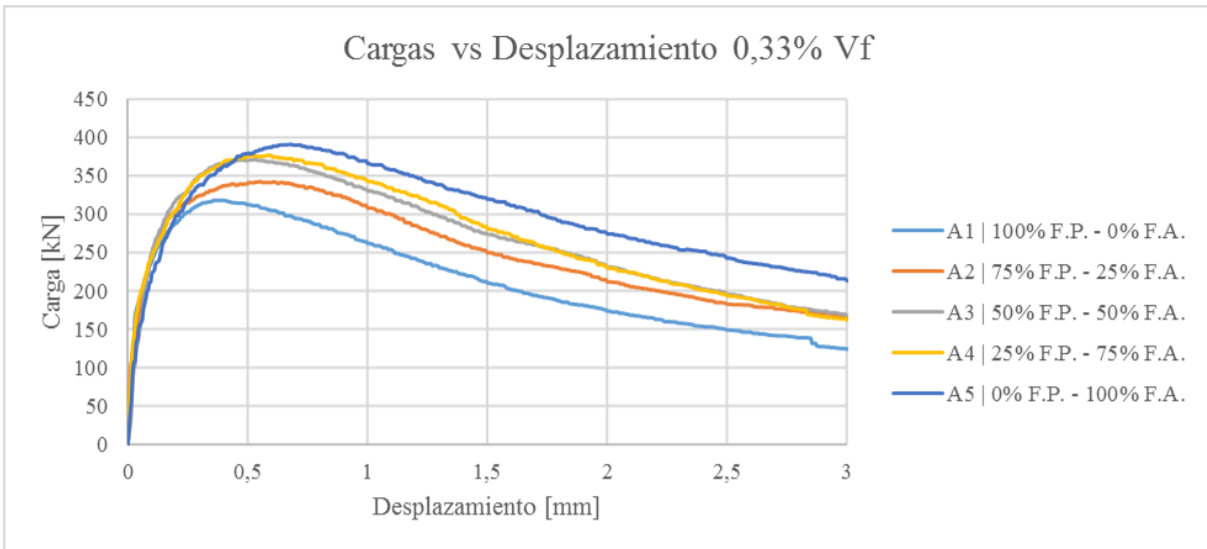


Gráfico 2. Curvas de carga-desplazamiento para la amasadas en baja cuantía de sustitución.

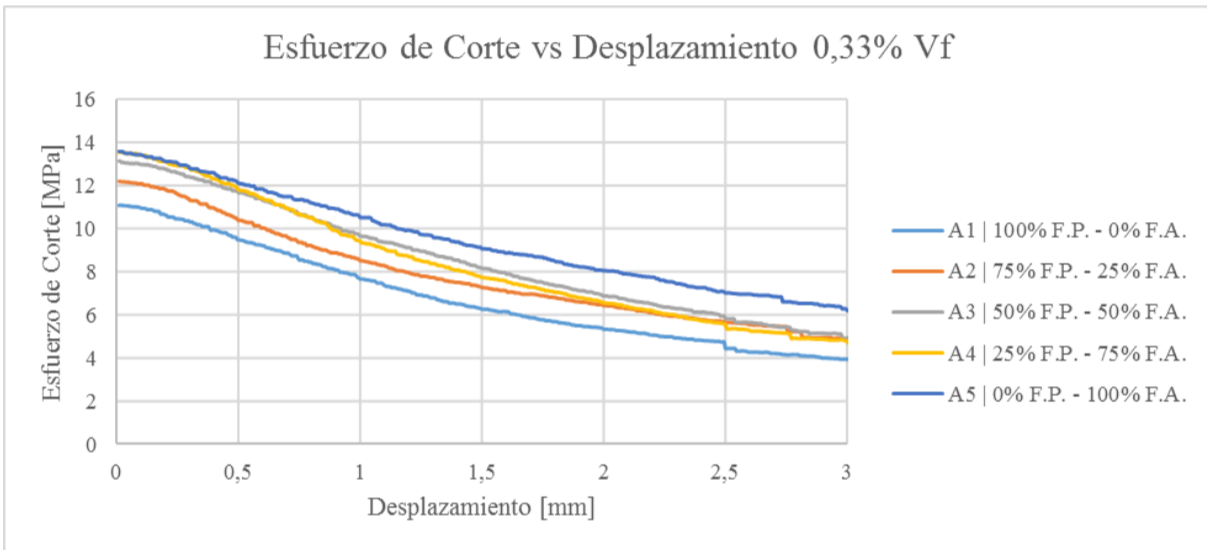


Gráfico 3. Curvas de corte-desplazamiento de cada amasada analizada desde el máximo de carga para serie A.

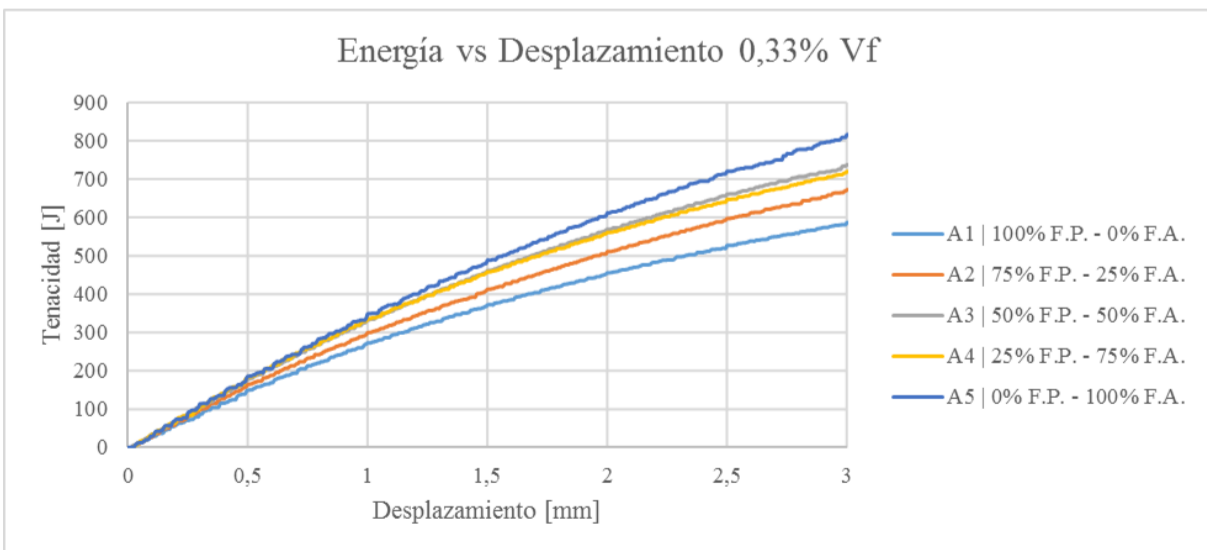


Gráfico 4. Curvas de gráfica tenacidad-deformación obtenidas desde máximo de carga de cada amasada en baja cuantía.

Serie B

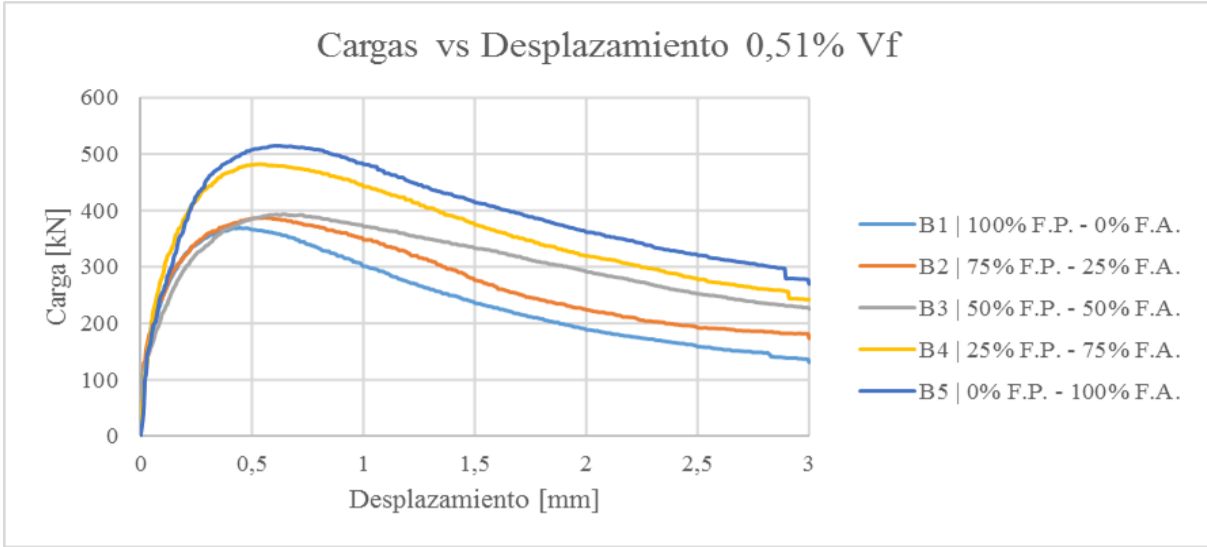


Gráfico 5. Curvas de carga-desplazamiento para la amasadas en media cuantía de sustitución.

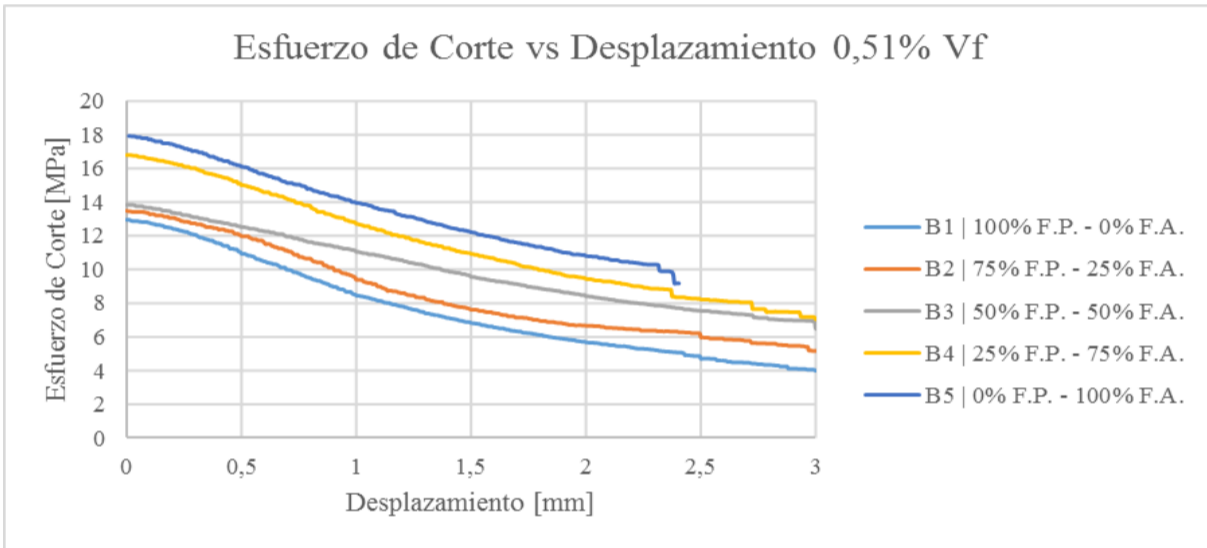


Gráfico 6. Curvas de corte-desplazamiento de cada amasada analizada desde el máximo de carga para serie B.

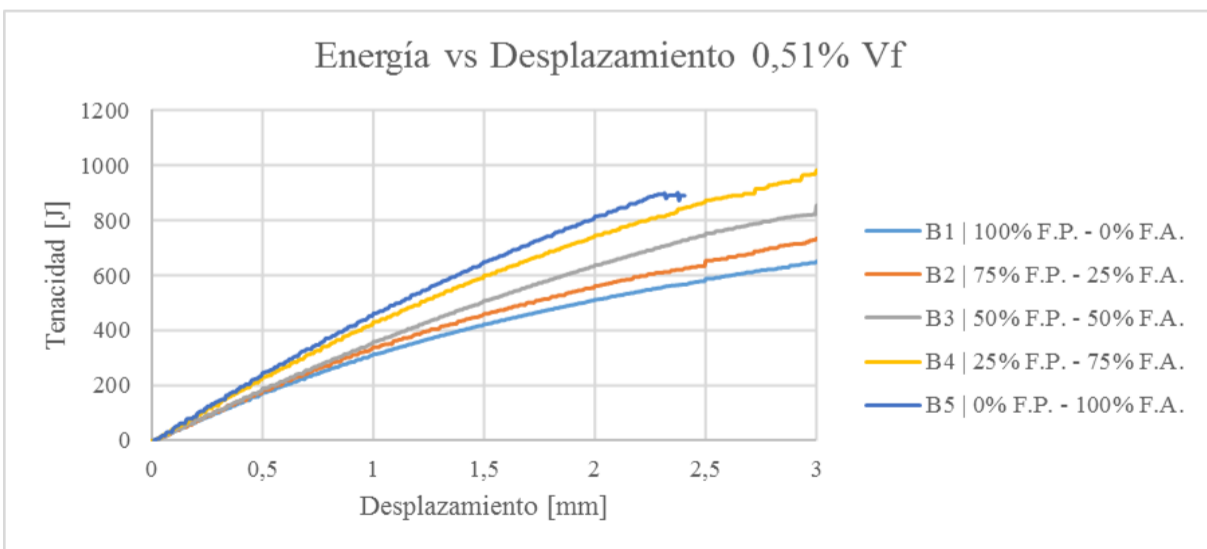


Gráfico 7. Curva de gráfica tenacidad-deformación obtenidas desde máximo de carga de cada amasada en media cuantía.

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A modo de cálculo, se define esfuerzo de corte como el cociente entre la carga “P” del punto de deformación y, 2 veces el área del plano de falla “b” x “h”, generado por los entalles regulares de forma perimetral en las aristas de la sección transversal, disminuyendo originalmente 15 mm desde los bordes provocando un plano de falla propenso a sufrir esfuerzos de corte.

El resultado de esta operación, de acuerdo con lo anterior, sólo varía en función de carga “P”, mientras que la expresión en divisor permanece constante.

$$V(x) = \frac{P(x)}{2*b*h} \Rightarrow V(x) = \frac{P(x)}{2*120*120} \Rightarrow V(x) = \frac{P(x)}{28.800} \frac{[kN]}{[mm^2]} \Rightarrow [MPa]$$

Ecuación 1. Esfuerzo de corte, medido en [MPa].

V: Esfuerzo de Corte P: Carga b: Base h: Altura

Por otro lado, para obtener el valor de tenacidad o energía necesaria para alcanzar los desplazamientos solicitados, se calcula como el producto de las diferencias consecutivas de las deformaciones por, el promedio de las respectivas cargas, sumado del resultado anterior de la energía calculada.

$$E(x) = \left((d_i - d_{i-1}) * \frac{(P_i + P_{i-1})}{2} \right) + E_{i-2} \quad [J]$$

Ecuación 2. Tenacidad para esfuerzo de corte, medid en [J]

E: Energía d: Desplazamiento P: Carga

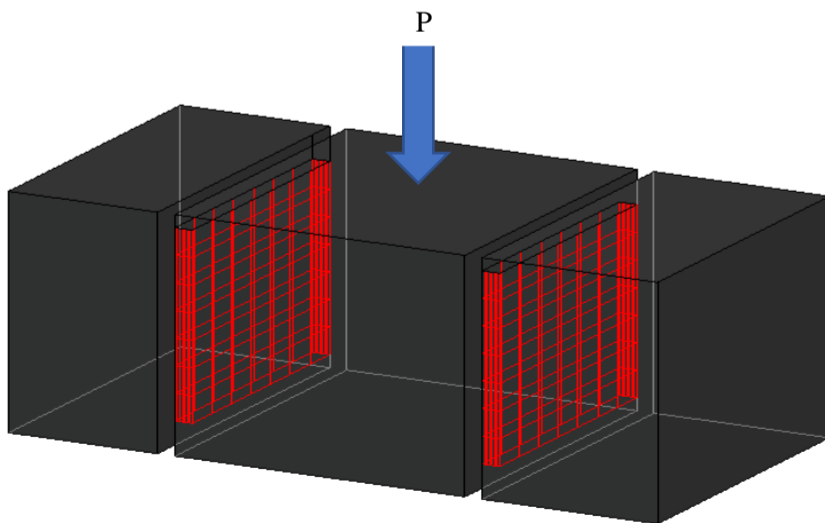


Imagen 8. Representación de la probeta con planos de falla (en rojo) para efectuar desplazamiento relativo por corte.



Imagen 9. (a) Detalle en corte de sección transversal en prisma HRF, incluida el área del plano de falla – en rojo - para efectuar el deslizamiento relativo del tramo central por corte. (b) Detalle frontal del tramo central por deslizar, separadas mediante entalles de 8 mm de abertura en cada cara del prisma.

6.1 Serie A

Las variaciones porcentuales entre amasadas para la serie “A” - de bajo volumen de sustitución - son las siguientes:

Variación Porcentual Carga/ Esfuerzo de Corte							
Amasada	0 [mm]	0,5 [mm]	1 [mm]	1,5 [mm]	2 [mm]	2,5 [mm]	3 [mm]
A1 -> A2	10,11%	9,53%	11,11%	15,98%	20,56%	27,23%	19,53%
A2 -> A3	7,77%	12,38%	13,46%	12,29%	6,97%	3,13%	1,10%
A3 -> A4	3,00%	0,93%	-3,31%	-5,42%	-4,88%	-8,14%	-4,88%
A4 -> A5	0,38%	2,75%	12,64%	17,49%	22,98%	31,07%	32,32%

Tabla 14. Incrementos y disminuciones porcentuales de la resistencia a carga – ergo corte – debido a la transición de la configuración en el contenido de fibras para baja cuantía de sustitución.

A1 -> A2: Al adicionar gradualmente el contenido de fibras de acero - de 0% a 25% – estas incrementan en la resistencia como grupo en las distintas deformaciones solicitadas. A menores desplazamientos – incluyendo 1 mm - se observa un incremento promedio del 10,25% para el rango mencionado mientras que, se obtiene un incremento del 16% en el rango central - 1,5 mm - y de un 20,83% en la media para mayores deformaciones.

A2 -> A3: La amasada A3 se caracteriza por contener el mismo porcentaje de fibras plásticas como aceros. Esta configuración refleja un leve incremento gradual en las resistencias hasta medio desplazamiento – incluyendo en 1,5 mm -. A partir de los 2 mm del desplazamiento, los valores de incrementos son bastantes bajos en comparación a los obtenidos en menores deformaciones.

A3 -> A4: Esta transición no registra un comportamiento deseado debido a los resultados negativos de esta; un incremento de hasta un 3% para menores deformaciones, mientras que para el resto de los desplazamientos sufren de variaciones negativas a partir de 1 mm; (-5,42%) para medio tramo de deformación y un (-5,96%) de promedio a mayores deformaciones – desde 2 mm- .

A4 -> A5: La transición trae consigo un bajo incremento de la resistencia para menores desplazamientos excepto cuando se alcanza la deformación de 1 mm, donde registra un 12,64% de incremento. Posteriormente, el incremento de contenido de fibra evidencia un aumento

considerable respecto de las variaciones anteriores. El uso de 100% de fibras de acero aporta considerablemente en la resistencia a corte para mayores deformaciones desde el máximo de carga, así como también favorece en la tenacidad del material reforzado.

A continuación, se analizará las variaciones porcentuales de las tenacidades generadas por las transiciones en las configuraciones de contenidos de fibras a una misma cuantía de sustitución, tomando como punto de partida el máximo de carga.

Variación Porcentual Tenacidad							
Amasada	0 [mm]	0,5 [mm]	1 [mm]	1,5 [mm]	2 [mm]	2,5 [mm]	3 [mm]
A1 -> A2	0,00%	10,21%	9,80%	10,77%	12,19%	13,35%	18,06%
A2 -> A3	0,00%	9,08%	11,10%	11,86%	11,39%	10,64%	9,69%
A3 -> A4	0,00%	2,37%	0,95%	-0,67%	-1,45%	-2,07%	-2,44%
A4 -> A5	0,00%	1,05%	3,68%	6,64%	9,10%	11,32%	13,37%

Tabla 15. Incrementos y disminuciones porcentuales de las tenacidades en amasadas de baja cuantía, medidos desde el máximo de carga como punto de referencia.

A1 -> A2: Esta configuración sufre de un incremento promedio de aproximadamente 10,26% para cada deformación en rango medio. Luego, incrementa gradualmente su tenacidad hasta alcanzar el máximo aumento a los 3 mm de desplazamiento con un 18,06% respecto a A1.

A2 -> A3: Las variaciones incrementan paulatinamente junto con las deformaciones hasta alcanzar medio desplazamiento, donde registra un 11,86% como incremento máximo dentro de las tenacidades para luego, disminuir a una tasa gradual de 0,85% en las deformaciones restantes.

A3 -> A4: Al igual que en la resistencia residual, esta transición presenta un bajo incremento en las tenacidades, obteniendo el máximo incremento de energía acumulada con 2,37% a bajas deformaciones. A partir de los 1,5 mm de deformación, las variaciones registran cifras negativas para las siguientes tenacidades obteniendo el máximo decrecimiento a los 3 mm con (-2,44%) respecto a A3.

A4 -> A5: La transición favorece gradualmente a una razón de 2,46% aproximadamente para las siguientes deformaciones alcanzando el máximo incremento en la tenacidad de 13,37% cuando alcanza los 3 mm de desplazamiento.

Amasada A1

Desplazamiento [mm]		Corte [MPa]						
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Viga								
V1		10,88	9,47	7,25	5,83	5,04	4,37	3,72
V2		11,24	9,60	7,90	6,68	5,61	4,48	4,00
V3								
V4		12,36	10,49	8,85	7,43	6,32	5,60	5,55
V5		9,81	8,36	6,64	5,10	4,35	3,31	3,05
Promedio		11,07	9,48	7,66	6,26	5,33	4,44	4,08
Desviación		1,05	0,87	0,95	1,01	0,84	0,94	1,06
C.V.		9,5%	9,2%	12,4%	16,1%	15,7%	21,1%	25,9%

Tabla 16. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas A1.

Dado los valores obtenidos de tabla 16, se puede observar que para menores desplazamientos presenta un bajo porcentaje en el coeficiente de variación, por lo que su precisión es aceptable al ser menores de 14%. En medio rango de deformación, sufre de un aumento que no supera el 20%, siendo regular en cuanto a precisión. Ya adentrado las últimas deformaciones – desde 2,5 mm–, los valores sobrepasan del 20% alterando su precisión a poca precisa, por lo que los resultados obtenidos solo pueden ser utilizadas con fines descriptivos.

Desplazamiento [mm]		Energía [J]						
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Viga								
V1		0	148	268	361	439	507	564
V2		0	151	277	381	468	543	602
V3		0						
V4		0	167	307	424	522	608	615
V5		0	133	240	324	392	450	496
Promedio		0	150	273	372	455	527	569
Desviación		0	14,1	27,3	41,6	54,3	66,4	53,7
C.V.		0,0%	9,4%	10,0%	11,2%	11,9%	12,6%	9,4%

Tabla 17. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada A1.

De la tabla 17, los valores de coeficiente de variación no superan los 14% por lo que su precisión en cuanto a tenacidad es aceptable.

Amasada A2

		Corte [MPa]						
Desplazamiento [mm]	Viga	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
		V1	12,43	10,86	9,51	8,11	7,65	6,81
V2								
V3	9,80	8,99	8,42	7,64	6,86	6,07	5,58	
V4	12,40	10,09	7,54	6,16	5,12	4,41	3,40	
V5	14,15	11,58	8,57	7,14	6,08	5,30	4,24	
Promedio	12,19	10,38	8,51	7,26	6,43	5,65	4,88	
Desviación	1,79	1,11	0,81	0,83	1,09	1,03	1,30	
C.V.	14,7%	10,7%	9,5%	11,5%	16,9%	18,2%	26,7%	

Tabla 18. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas A2.

Los coeficientes de variaciones del grupo para bajos y medios desplazamientos– hasta los 1,5 mm incluido – son aceptables al registrar valores menores del 15%, evidenciando la mínima variación al milímetro de deformación - 9,5% -. A partir de los 2 mm, esta experimenta una variación sobre el 14%, afectando con ello su precisión a regular y, culminar con un máximo de 26,7% de coeficiente exponiendo datos poco precisos para la información a 3 mm de deformación.

		Energía [J]						
Desplazamiento [mm]	Viga	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
		V1	0	169	315	439	553	656
V2								
V3	0	135	261	376	481	572	656	
V4	0	166	292	390	471	540	595	
V5	0	188	331	444	539	621	688	
Promedio	0	165	300	412	511	597	672	
Desviación	0	21,9	30,5	34,5	41,0	51,5	65,1	
C.V.	0	13,3%	10,2%	8,4%	8,0%	8,6%	9,7%	

Tabla 19. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada A2.

A bajo desplazamiento, se obtiene el máximo coeficiente de variación con un 13,3%. Luego, disminuye su valor gradualmente en los siguientes tramos de deformaciones, rondando entre un 8% a 10% del coeficiente, logrando tener una precisión aceptable en cuanto a análisis para las tenacidades.

Amasada A3

		Corte [MPa]						
Desplazamiento [mm]	Viga	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
		V1	14,67	12,70	10,16	8,28	6,34	5,23
V2	12,80	11,35	9,50	8,24	7,06	6,05	4,71	
V3	15,23	13,21	10,89	9,37	8,42	6,98	6,27	
V4								
V5	9,86	9,41	8,07	6,74	5,68	5,03	4,50	
Promedio	13,14	11,67	9,66	8,15	6,88	5,82	4,93	
Desviación	2,42	1,70	1,20	1,08	1,17	0,89	0,91	
C.V.	18,4%	14,6%	12,5%	13,3%	17,1%	15,3%	18,5%	

Tabla 20. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas A3.

Del cuadro anterior, se registra un alto valor inicial de variación a bajas deformaciones - con precisión regular -, posteriormente prosigue en bajada con un cambio a aceptación, registrando el mínimo porcentaje de variación grupal - 12,5% - al milímetro de deformación. Luego, aumenta el porcentaje en misma calidad de aceptación de precisión hasta 1,5 mm; finalizando con el máximo valor a 3 mm de desplazamiento residual con una precisión regular desde los 2 mm de deformación.

		Energía [J]						
Desplazamiento [mm]	Viga	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
		V1	0	199	364	497	601	684
V2	0	174	325	451	561	656	734	
V3	0	206	379	526	654	768	860	
V4								
V5	0	139	265	372	461	535	604	
Promedio	0	180	333	461	569	661	737	
Desviación	0	30,1	50,8	67,3	81,7	96,2	105,1	
C.V.		16,7%	15,3%	14,6%	14,4%	14,6%	14,3%	

Tabla 21. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada A3.

Se observa el máximo porcentaje de variación de tenacidad a los 0,5 mm de deformación residual con un 16,7%, presentando datos con precisión regular hasta el milímetro de desplazamiento; posteriormente disminuye en las siguientes deformaciones promediando un 14,4% de coeficiente de variación desde 1,5 mm con precisión aceptable.

Amasada A4

		Corte [MPa]						
Desplazamiento [mm]	Viga	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
		V1						
V2		12,09	10,08	8,22	6,84	5,71	4,15	3,97
V3		14,80	13,76	10,97	9,45	8,13	7,24	6,40
V4		12,93	11,72	9,29	7,39	6,12	5,07	4,47
V5		14,32	11,53	8,87	7,16	6,20	4,94	3,91
Promedio		13,54	11,77	9,34	7,71	6,54	5,35	4,69
Desviación		1,25	1,51	1,18	1,18	1,08	1,32	1,17
C.V.		9,2%	12,9%	12,6%	15,3%	16,5%	24,8%	25,0%

Tabla 22. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas A4.

El valor del porcentaje de variación va en incremento conforme el avance de las deformaciones con un rango de precisión aceptable hasta lograr el milímetro de desplazamiento residual. Luego, modifica su condición en cuanto a precisión de aceptable a regular desde los 1,5 mm, registrando el máximo porcentaje de 25% a mayores deformaciones, logrando poca precisión como grupo a partir de los 2,5 milímetro de deformación residual.

		Energía [J]						
Desplazamiento [mm]	Viga	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
		V1						
V2		0	162	292	400	490	564	625
V3		0	208	389	536	662	772	871
V4		0	180	332	451	548	630	698
V5		0	186	332	446	543	623	684
Promedio		0	184	336	458	561	647	719
Desviación			18,8	39,7	56,7	72,1	88,3	105,5
C.V.			10,2%	11,8%	12,4%	12,9%	13,6%	14,7%

Tabla 23. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada A4.

El coeficiente de variación no supera del 15% para las deformaciones residuales por lo que los resultados se encuentran con una precisión aceptable, registrando la máxima para mayores desplazamientos - a 3mm -.

Amasada A5

		Corte [MPa]						
Desplazamiento [mm]	Viga	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
		V1						
V2		16,20	13,44	10,83	8,88	7,85	6,53	5,40
V3		13,00	11,83	10,42	9,19	8,18	7,21	6,85
V4		11,06	10,09	9,37	8,40	7,66	6,64	5,68
V5		14,09	13,03	11,44	9,77	8,48	7,66	6,88
Promedio		13,59	12,10	10,52	9,06	8,04	7,01	6,20
Desviación		2,15	1,51	0,87	0,57	0,36	0,53	0,78
C.V.		15,8%	12,4%	8,3%	6,3%	4,5%	7,5%	12,5%

Tabla 24. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas A5.

A bajas deformaciones se registra el máximo coeficiente de variación de corte - 15,8% - con un rango de precisión regular; luego disminuye hasta obtener resultados en rango aceptables hasta el milímetro de desplazamiento residual; precisa desde los 1,5 mm residual hasta los 2 mm - obteniendo la mínima del 4,5% a 2 mm -. A partir de allí, el valor de coeficiente aumenta afectando en la calidad a aceptable para mayores deformaciones residuales.

		Energía [J]						
Desplazamiento [mm]	Viga	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
		V1	0					
V2		0	214	388	527	648	752	836
V3		0	179	339	481	606	718	820
V4		0	153	293	421	536	640	729
V5		0	198	374	526	657	772	878
Promedio		0	186	349	489	612	720	816
Desviación			26,5	42,2	49,9	55,2	58,1	62,5
C.V.			14,3%	12,1%	10,2%	9,0%	8,1%	7,7%

Tabla 25. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada A5.

Se registra la máxima variación de coeficiente en la tenacidad para bajas deformaciones con precisión aceptable para luego, disminuir gradualmente en 1,11% en promedio a medida que transcurre las deformaciones, obteniendo la mínima del 7,7% a mayores deformaciones con calidad de precisa en cuanto a la variación del grupo.

6.2 Serie B

Variación Porcentual Carga/ Esfuerzo de Corte							
Serie	0 [mm]	0,5 [mm]	1 [mm]	1,5 [mm]	2 [mm]	2,5 [mm]	3 [mm]
B1 -> B2	4,17%	9,47%	11,13%	11,81%	17,43%	26,82%	29,42%
B2 -> B3	2,48%	4,42%	17,58%	25,35%	26,29%	26,32%	25,65%
B3 -> B4	21,37%	19,93%	15,03%	14,27%	12,17%	9,00%	8,55%
B4 -> B5	6,84%	7,32%	9,73%	11,71%	14,40%		

Tabla 26. Incrementos y disminuciones porcentuales de la resistencia a carga – ergo corte – a causa de la transición en la configuración del contenido de fibra, con los valores respectivos para media cuantía de sustitución.

B1 -> B2: La transición en el contenido de fibra aporta un leve incremento del 4,17% para bajas deformaciones - 0 mm -, posteriormente incrementa su valor de forma gradual a partir de los 1,5 mm, en donde aumenta 5,62 puntos; 9,39 y 2,6 para las siguientes deformaciones alcanzando su máximo valor de 29,42% a 3 mm residual.

B2 -> B3: Al aumentar el contenido de fibras de acero a un 50% - y bajar el sintético a misma cantidad- se tiene como resultado un incremento del 2,48% en la resistencia máxima a corte, luego aumenta en 1,94 punto para 0,5 mm; incrementa 13,16 unidades al milímetro de deformación residual para finalizar desde los 1,5 mm en adelante con un aumento promedio en dicha zona del 25,90% respecto a B2.

B3 -> B4: La transición a 25% F.P. y 75% F.A. trae consigo el máximo incremento de resistencia a bajas deformaciones en toda la serie B – 21,37% a 0 mm -. Posterior dicho valor decrece en los siguientes desplazamientos alcanzando el mínimo incremento de 8,55% a mayores deformaciones residuales.

B4 -> B5: A diferencia de la transición anterior, al usar 100% fibras de acero en la amasada aporta para el inicio el mínimo incremento de 6,84%, posteriormente aumenta el porcentaje de forma gradual para las siguientes deformaciones residuales. No se cuenta con información disponible para resultados mayores a 2,5 milímetros.

Variación Porcentual Tenacidad							
Serie	0 [mm]	0,5 [mm]	1 [mm]	1,5 [mm]	2 [mm]	2,5 [mm]	3 [mm]
B1 -> B2	0,00%	5,91%	8,13%	8,80%	9,70%	11,18%	12,87%
B2 -> B3	0,00%	2,94%	6,01%	10,41%	13,41%	15,07%	16,31%
B3 -> B4	0,00%	21,51%	19,72%	17,97%	16,93%	16,00%	14,91%
B4 -> B5	0,00%	6,71%	7,26%	8,32%	9,23%		

Tabla 27. Incrementos y disminuciones porcentuales de las tenacidades en amasadas de baja cuantía, medidos desde el máximo de carga como punto de referencia.

B1 -> B2: Al incorporar un 25% de fibras de acero – y disminuir misma cifra en plásticas–, se observa un aumento de las energías necesarias para deformar a menores desplazamientos - 5,91% mínimo -, mientras que las tenacidades intermedias y mayores -desde 1,5 mm- bordean en promedio un aumento del 10,14% respecto a las energías alcanzadas en B1.

B2 -> B3: La transición en el contenido de fibra a 50% F.P. y 50% F.A, trae consigo un leve aumento en las energías necesarias para desplazar 0,5 mm con un incremento de 2,94%, mientras que en los desplazamientos restantes las tenacidades aumentan progresivamente alcanzando 16,31% de incremento respecto a B2 a mayores deformaciones.

B3 -> B4: La configuración 25% F.P. y 75% F.A. refleja el máximo incremento de las energías necesarias para deformar a bajos desplazamientos con un 21,51%. Luego, este valor desciende alcanzando el mínimo de 14,91% a mayores deformaciones.

B4 -> B5: Se registra el mínimo incremento de la energía necesaria para deformar a bajo desplazamiento de un 6,71% para luego, incrementar en bajas cantidades las energías a mayores deformaciones, finalizando a 2 mm residual sin la opción de tener registros para últimos tramos.

Amasada B1

Desplazamiento [mm]		Corte [MPa]						
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Viga								
V1		13,17	11,05	8,48	6,59	5,56	4,60	3,62
V2		12,00	10,24	8,26	7,04	6,13	5,62	5,03
V3		13,33	10,86	8,62	6,80	5,56	4,45	3,70
V4		12,80	10,79	7,91	6,62	5,53	4,47	3,54
V5		13,47	11,77	9,00	7,06	5,58	4,42	4,09
Promedio		12,96	10,94	8,45	6,82	5,67	4,71	3,99
Desviación		0,59	0,55	0,41	0,23	0,26	0,51	0,61
C.V.		4,6%	5,1%	4,8%	3,3%	4,5%	10,8%	15,4%

Tabla 28. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas B1.

Hasta 2 mm de desplazamiento residual se registra un coeficiente de variación grupal a corte del orden de 4,5% en promedio, categorizándose esta información como precisa, pero en las deformaciones posteriores se obtienen porcentaje aceptable y regular a 2,5 y 3 mm respectivamente.

Desplazamiento [mm]		Energía [J]						
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Viga								
V1		0	177	317	426	512	586	643
V2		0	161	295	403	498	583	661
V3		0	176	316	427	515	587	645
V4		0	173	306	410	498	570	628
V5		0	184	334	449	539	611	673
Promedio		0	174	314	423	512	588	650
Desviación			8,1	14,4	17,6	16,8	14,9	17,5
C.V.			4,6%	4,6%	4,2%	3,3%	2,5%	2,7%

Tabla 29. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada B1.

Los coeficientes de variación para las tenacidades de la amasada B1 no superan del 5%, por lo que los datos proporcionados por parte de la amasada son precisos en este estudio. Coeficiente de variación promedio a lo largo de la deformación: $3,7\% \pm 0,9\%$.

Amasada B2

Desplazamiento [mm]		Corte [MPa]						
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Viga								
V1		14,26	12,30	8,85	6,65	5,74	4,83	3,61
V2								
V3		11,59	11,32	9,58	8,04	7,03	6,40	5,78
V4								
V5		14,63	12,31	9,76	8,19	7,22	6,69	6,13
Promedio		13,50	11,98	9,40	7,63	6,66	5,98	5,17
Desviación		1,66	0,57	0,48	0,85	0,80	1,00	1,37
C.V.		12,3%	4,7%	5,1%	11,2%	12,0%	16,8%	26,4%

Tabla 30. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas B2.

Hasta desplazamientos intermedios - 2 mm incluido – se registra una transición en la precisión de resultados debido a los coeficientes obtenidos para dichos tramos entre aceptable, precisa y aceptable nuevamente. A partir de 2,5 mm, esta cambia a regular para finalizar con poca precisión de acuerdo con los datos entregados a mayores deformaciones, registrando una variación en el grupo del 26,4% a 3 mm residual.

Desplazamiento [mm]		Energía [J]						
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Viga								
V1		0	193	346	454	543	619	681
V2								
V3		0	164	316	443	550	647	735
V4								
V5		0	196	355	483	593	693	785
Promedio		0	184	339	460	562	653	734
Desviación			17,6	20,1	21,0	27,2	37,4	52,0
C.V.			9,5%	5,9%	4,6%	4,8%	5,7%	7,1%

Tabla 31. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada B2.

A menores desplazamiento se registra el máximo coeficiente de variación del grupo en cuanto a tenacidades con rango aceptable. Posteriormente, las cifras rondan en un margen inferior del 8%, obteniéndose datos precisos para el análisis.

Amasada B3

Desplazamiento [mm]		Corte [MPa]						
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Viga								
V1		15,13	13,59	12,12	10,28	9,00	8,01	7,07
V2		14,07	11,46	9,71	8,53	7,67	6,99	6,21
V3		14,58	13,75	12,17	10,42	9,40	8,37	6,99
V4		11,65	10,95	9,96	8,97	7,87	7,12	5,77
V5		13,72	12,78	11,27	9,59	8,14	7,24	6,45
Promedio		13,83	12,51	11,05	9,56	8,41	7,55	6,50
Desviación		1,33	1,26	1,16	0,81	0,75	0,61	0,54
C.V.		9,6%	10,0%	10,5%	8,5%	8,9%	8,0%	8,4%

Tabla 32. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas B3.

Los coeficientes de variación en esfuerzo de corte para los desplazamientos de estudio se encuentran en un rango de valores entre 8% a 10%, por lo que estos datos son aceptables en cuanto a análisis.

Desplazamiento [mm]		Energía [J]						
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Viga								
V1		0	208	393	555	693	815	925
V2		0	183	335	466	582	686	782
V3		0	204	391	554	697	825	939
V4		0	163	314	450	572	679	771
V5		0	191	364	516	643	752	850
Promedio		0	190	359	508	637	752	853
Desviación		0	17,9	34,6	48,6	59,2	68,9	78,3
C.V.		0%	9,5%	9,6%	9,6%	9,3%	9,2%	9,2%

Tabla 33. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada B3.

Los coeficientes de variación en la tenacidad para los desplazamientos estudios son de aproximadamente 9,4% en promedio para la configuración de contenido 50% fibras sintéticas y 50% fibras de acero, obteniendo datos aceptables del análisis.

Amasada B4

		Corte [MPa]						
Desplazamiento [mm]	Viga	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
		V1	18,13	16,31	14,21	11,69	10,10	9,48
V2								
V3	17,45	15,43	13,35	11,80	9,84	8,23	6,91	
V4	15,12	13,92	12,31	11,34	9,90	9,18	8,27	
V5	16,44	14,33	10,97	8,87	7,91	6,02	5,05	
Promedio	16,79	15,00	12,71	10,92	9,44	8,23	7,05	
Desviación	1,31	1,09	1,40	1,39	1,02	1,56	1,46	
C.V.	7,8%	7,2%	11,0%	12,7%	10,8%	19,0%	20,7%	

Tabla 34. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas B4.

A bajas deformaciones, el coeficiente de variación para esfuerzo de corte se mantiene parejo en cuanto a valor y precisa en su información– al ser menor de 8% -. Luego, el grupo oscila en un 11,5% en promedio para los desplazamientos residuales intermedios, con datos aceptables. A partir de los 2,5 mm, el coeficiente aumenta alterando su calidad a regular y finalmente poca precisa a mayores deformaciones.

		Energía [J]						
Desplazamiento [mm]	Viga	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
		V1	0	248	469	653	810	948
V2								
V3	0	239	445	623	778	909	1017	
V4	0	211	399	570	722	859	985	
V5	0	224	408	551	671	771	852	
Promedio	0	231	430	599	745	872	981	
Desviación	0	16,3	32,5	47,2	61,4	76,4	92,6	
C.V.	0%	7,1%	7,6%	7,9%	8,2%	8,8%	9,4%	

Tabla 35. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada B4.

Hasta 1,5 mm de deformación residual se tiene que el coeficiente de variación para las tenacidades de la amasada registra en promedio un 7,5%, siendo precisa la información. Luego, este valor incrementa en menor medida alterando su precisión a aceptable, no sobrepasando los 10% como grupo.

Amasada B5

		Corte [MPa]						
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Desplazamiento [mm]	Viga							
	V1	18,02	17,22	14,70	12,72	11,47		
	V2							
	V3	18,30	16,81	14,48	12,54	10,88		
	V4	16,85	14,22	12,08	10,42	8,93		
	V5	18,57	16,14	14,52	13,13	11,90		
	Promedio	17,93	16,10	13,95	12,20	10,80		
	Desviación	0,76	1,33	1,25	1,21	1,31		
	C.V.	4,2%	8,3%	8,9%	9,9%	12,1%		

Tabla 36. Resultados de la ecuación 1. para determinar los esfuerzos a corte provenientes de las vigas B5. No existe información para las deformaciones de 2,5 y 3 mm debido al descargue en los desplazamientos de estudios.

A bajas deformaciones – 0 mm – se obtiene el mínimo coeficiente de variación de esfuerzo de corte con resultados precisos para su estudio. En los siguientes tramos, el valor de porcentaje aumenta en bajas cantidades alterando su precisión a aceptable – desde 0,5 mm-, obteniendo la máxima variación a 2 mm con un 12,14%.

		Tenacidad [J]						
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Desplazamiento [mm]	Viga							
	V1	0,000	255	484	680	853		
	V2							
	V3	0,000	255	479	673	840		
	V4	0,000	225	413	575	714		
	V5	0,000	250	470	669	848		
	Promedio	0,000	246	461	649	814		
	Desviación		14,3	32,8	49,8	66,6		
	C.V.		5,8%	7,1%	7,7%	8,2%		

Tabla 37. Tenacidades alcanzadas en las deformaciones para vigas de la amasada B5.

A bajas deformaciones se registra la máxima variación de un 14,27% en la tenacidad como grupo. Luego, disminuye gradualmente de forma aceptable en cuanto a análisis para finalizar con un 7,67% a mayores desplazamientos; precisa en su información.

7 CONCLUSIONES

La amasada A1 registra una resistencia máxima de 319 kN - 11,07 MPa en esfuerzo de corte- y de 117 kN- 4,08 MPa - a 3 mm de desplazamiento residual. Al incorporar el porcentaje de contenido de fibra de acero paulatinamente – a una razón de 25% y reducir el mismo para fibras sintéticas entre cada amasada – trae consigo un incremento de las resistencias residuales, ergo esfuerzo de corte, hasta alcanzar los 2 mm de deformación para las amasadas A2 y A3 – 351 kN; 12,2 MPa, 378 kN; 13,1 MPa respectivamente en máximo esfuerzo y, 185 kN; 6,43 MPa, 198 kN; 6,88 MPa a 2 mm-, mientras que a mayores deformaciones se obtienen valores similares en cuanto a resistencia – sobre 140 kN; 4,88 MPa– superando a A1. Por otro lado, la amasada A4 - 75% de F.A en su composición – si bien otorga un leve aumento a bajas deformaciones - 0 y 0.5 mm alcanzadas; 390 kN en la máxima con un esfuerzo de corte de 13,5 MPa - no contribuye de forma favorable en los siguientes desplazamientos, pues los valores obtenidos son inferiores respecto a las amasadas anteriores perjudicando la tenacidad promedio como amasada en general. Finalmente, al utilizar la configuración de 100% de fibra de acero en baja cuantía de sustitución, existe un leve incremento a bajos desplazamientos – hasta 0.5 mm -, para luego aumentar considerablemente su tenacidad; pues esta configuración resiste sobre 200 kN a los 2,5 mm de deformación residual siendo superado por amasadas B3 y B4 de todo análisis de estudio. La máxima carga en A5 a menores desplazamiento es de 391 kN – 13,6 MPa - y de 179 kN - 6,21 MPa- a mayores deformaciones, aumentando un 25,86% en la resistencia a carga y esfuerzo de corte respecto a A3. En cambio, los resultados promedios en las resistencias residuales de amasadas con media cuantía de sustitución indica un incremento máximo de un 17% aproximado de la amasada B1 – 373 kN; 13,2 MPa – a bajas deformaciones respecto a la amasada A1 - 319 kN y 11,1 MPa-, superando incluso a la resistencia máxima de la amasada A2 – 351 kN; 12,2 MPa - para posteriormente disminuir de forma paulatina y acercarse a los valores obtenidos de resistencia residual en la amasada A1 a mayores deformaciones – 115 kN y 3,62 MPa -, mientras que el aumento de sustitución volumétrica de fibra favorece hasta antes de alcanzar el milímetro residual respecto a la amasada A2. En amasada B2, la resistencia residual incrementa gradualmente para cada tramo de desplazamiento comparado con B1, obteniendo un aumento promedio de 24,56% desde los 2 mm de desplazamiento y registrando el máximo incremento a los 3 mm de deformación con un 29,42% - 149 kN; 5,17 MPa -. A partir de la amasada B3, los valores obtenidos de ella indica un leve incremento del 2,48% en la máxima resistencia - 398 kN; 13,8 MPa - para luego, aumentar en promedio 24,24% kN en cada desplazamiento residual desde el milímetro de deformación, aumentando considerablemente la tenacidad de la amasada del grupo respecto a B2. En B4, se observa el máximo incremento en la resistencia máxima con un 21,37% a bajas deformaciones - 483 kN; 16,8 MPa - para luego, disminuir de forma gradual y alcanzar un 8,55% de incremento a mayores desplazamientos con respecto a B3 - 203 kN y 7,05 MPa. Finalmente, la amasada B5 registra un leve incremento de resistencia del 6,84% a bajas deformaciones – 517 kN; 17,4 MPa -; posteriormente aumenta de forma gradual hasta finalizar previo los 2,5 mm de deformación, donde el incremento es de un 14,40% en comparación a B4 – 311 kN; 10,8 MPa -. No fue posible obtener resultados residuales a mayores desplazamientos en B5 debido por el escaso registro - 1 caso -

cuando debieron ser 3 testigos mínimos para el ensayo según criterios emanados de la recomendación japonesa JSEC -SF6, con el fin de conocer el comportamiento en dichos resultados.

Por otra parte, en el área de las tenacidades, al incorporar un 25% de fibras de acero - y reducir en misma cantidad las fibras sintéticas-, se tiene un aumento promedio del 11,26% respecto a los resultados obtenidos en A1 hasta los 2,5 mm de deformación residual, mientras que a 3 mm de desplazamientos se produce el máximo incremento como grupo del 18,1% - 672 J en A2; 569 J en A1-. Al aumentar a 50% el contenido de fibra de acero para la amasada A3, se incrementan en promedio un 10,63% respecto a las energías necesarias para alcanzar los desplazamientos solicitados en A2. Tal como el caso del aporte de las fibras en el incremento/reducción de las resistencias a corte en la amasada A4, la tenacidad de esta no presenta una curva esperada, pues tiende a la disminución de energía necesaria para la deformación a partir de los 1,5 mm comparado con a A3; la energía máxima acumulada en A4 fue de 719 J, mientras que en A3 es de 737 J. En la amasada A5 se tiene un aumento paulatino en los porcentajes de tenacidades acumuladas, alcanzando el máximo aumento de un 13,4% - 816 J - respecto a la energía necesaria para deformar 3 mm residual en la amasada A4. Ya en media cuantía de sustitución, se aprecia en B1 un aumento cuantitativo de la tenacidad respecto a su homólogo con baja cuantía volumétrica - A1 -, esto por la adición de refuerzos sintéticos de un 0,33% a 0,51% en el volumen final de agregado, mejorando con ello el aumento de la energía necesaria para alcanzar los desplazamientos residuales por corte de aproximadamente un 13,85%; sin embargo las tenacidades de las amasadas con 100% de fibras sintéticas en su composición no supera a las que ya cuentan con un porcentaje mínimo de refuerzo de acero, pues la adición de refuerzo mejora sustancialmente los primeros tramos hasta los 1,5 mm de desplazamientos a corte residual. Respecto a la amasada B2, el incremento de la energía en relación con B1 va en aumento de forma gradual, logrando el máximo de 12,9% - 734 J - a mayores deformaciones, superando incluso a las energías en A2 y A4. La amasada B3 presenta un aumento de las tenacidades de manera similar a la amasada B2, pues estas registran un incremento promedio del 13,8% para cada desplazamiento a partir de 1,5 mm, obteniendo el máximo incremento de 16,3% -853 [J] - a mayores deformaciones. En la amasada B4 se registra el máximo incremento de tenacidades - 21,5%; 231 J - de toda amasada estudio para bajas deformaciones - 0,5 mm -; luego este valor desciende hasta lograr un incremento de 14,9% - 981 J - respecto a las energías acumuladas a mayores deformaciones de la amasada B3. Finalmente, la amasada B5 registra un aumento promedio del 7,9% respecto a las tenacidades residuales de la amasada B4, obteniéndose la máxima de 9,2% a los 2 mm de desplazamiento con una energía acumulada de 814 J, superando con creces a las distintas amasadas para ese punto de deslizamiento; sin embargo, no fue posible obtener la curva de comportamiento para el último tramo de deslizamiento en esfuerzo de corte, ende tenacidad, con el fin de comparar con las deformaciones registradas en B4.

Por lo general, los coeficientes de variaciones en la resistencia a carga, ergo corte, de las amasadas no superan del 20%, salvo en casos puntuales como en A1 y A4 desde los 2,5 mm y en A2, B2 y B4 a partir de 3 mm. Con respecto a variaciones en las tenacidades de las amasadas, los coeficientes del presente estudio no superan del 20%.

Si bien el uso de fibras sintéticas trae consigo un aporte en lo que refiere a las resistencias al fuego que provee al material, las configuraciones con 100% de fibras sintéticas en su interior no son capaces de soportar mayores cargas a altos desplazamientos residuales; pues la adición de refuerzo mejora solamente para los bajos desplazamientos.

8 REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- ACI (2008a), Report on Fiber Reinforced Concrete, Reported by ACI Committee 544, ACI 544.2R – 96 (Reapproved 2002), ACI Manual of Concrete Practice, Part 6, 66 pp.
- ACI (2008b), Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete, Reported by ACI Committee 544, ACI 544.2R89 (Reapproved 1999), ACI Manual of Concrete Practice, Part 6, 11 pp.
- Barragán B., Gettu R., Agullo L. y Zerbino R. (2006), Shear Failure of Steel Fiber-Reinforced Concrete Based on Push-Off Tests. ACI Materials Journal Vol. 103, pp 251 – 257.
- Carmona S. y Maripangui F. (2007), Comportamiento del Hormigón Reforzado con Fibras Sometido a Esfuerzo de Corte. Anales de las XVI Jornadas Chilenas del Hormigón. Talca, Chile. 10 pp.
- Mirsayah A. y Banthia N. (2002), Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete. ACI Material Journal, Vol. 99, pp 473 – 479.
- JSCE (1990), SF - 6, Método de ensayo de resistencia al corte de hormigones reforzados con fibras de acero (HRF), Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles, Tokyo, pp 67 - 69.
- Malatesta, S. C., & Contreras, M. C. (2011). Comportamiento al corte de hormigones reforzados con fibras de acero. Revista de Ingeniería de Construcción, 24(1), 79–94. <https://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/view/43>
- Barr B. (1987), The Fracture Characteristics of FRC Materials in Shear, Fiber Reinforced Concrete: Properties and Applications, SP – 105, Editado por S. P. Shah y B. Batson, American Concrete Institute, pp 27 – 53.
- Shah S., Swartz S. y Ouyang C. (1995), Fracture Mechanics of concrete: Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock, and Other Quasi-Brittle Materials. John Wiley & Sons, New York, 552 pp.
- Stuardo C. (2020), Caracterización de la resistencia residual de hormigones reforzados con cuantías medias de fibras híbridas. Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, pp 13.
- UNE EN – 14651:2007+A12008. “Método de ensayo para hormigones con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)”.
- Mármol P. (2010), Hormigones con Fibras de acero, Características Mecánicas. UPM, Madrid.
- De clínquer, Q. se F. B. la N. C. N. 148 O. M. la M. C., & El cemento Polpaico, Y. y. M. P. (s/f). 25Sacos dekgs.Big Bags de Ton. Granel en camión. Polpaico.cl. Recuperado el 16 de enero de 2023, de http://www.polpaico.cl/wp-content/uploads/Ficha_Cemento_Alta_Resistencia-P400.pdf
- Hormigón con fibra. Rodolfo Jeria H. (s/f). Docplayer.Es. Recuperado el 16 de enero de 2023, de <https://docplayer.es/32330992-Hormigon-con-fibra-rodolfo-jeria-h.html>

- ICH. (2019, abril 18). BarChip R50 para hormigón ecológico. Hormigón al Día. <http://hormigonaldia.ich.cl/tecdirreportaje/barchip-r50-para-hormigon-ecologico/>
- Fibras de acero Dramix® 3D para refuerzo de hormigón. (s/f). Bekaert. Recuperado el 16 de enero de 2023, de <https://www.bekaert.com/es-MX/productos/construccion/refuerzo-de-hormigon/fibras-de-acero-dramix-3d-para-refuerzo-de-hormigon>
- Sika (s/f). Concrete, Hormigón Reforzado con Fibras (Ficha Técnica PDF) <https://chl.sika.com/dms/getdocument.get/0e5ae4b6-1a99-3cdc-90b8-5d4826b18df6/Hormig%C3%B3n%20reforzado%20con%20Fibras.pdf> , pp 11.
- NCh-ISO IEC 17025:2017 Laboratorios de ensayo y calibración. Análisis.
- INN – Instituto Nacional de Normalización (1968), NCh 148 Of. 68. Cemento – Terminología, Clasificación y Especificaciones Generales, 8 pp.
- INN – Instituto Nacional de Normalización (2009), NCh 165 Of. 09. Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría.
- INN – Instituto Nacional de Normalización (1975), NCh 1017 Of. 75. Hormigón- Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción.
- INN – Instituto Nacional de Normalización (2009), NCh 1018 Of. 09. Hormigón- Preparación de mezclas para ensayos en laboratorio.
- INN – Instituto Nacional de Normalización (2009), NCh 1019 Of. 09. Hormigón- Determinación de la docilidad – Método del asentamiento del cono de Abrams.
- INN – Instituto Nacional de Normalización (2009), NCh 1037 Of. 09. Hormigón- Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas.

ANEXOS

Serie "A" Baja cuantía

A continuación, se ilustrarán los gráficos obtenidos de los ensayos a corte en base a la recomendación JSCE – SF6 de las amasadas con baja cuantía sustitución, "A", con 0,33% V_f .

Amasada A1

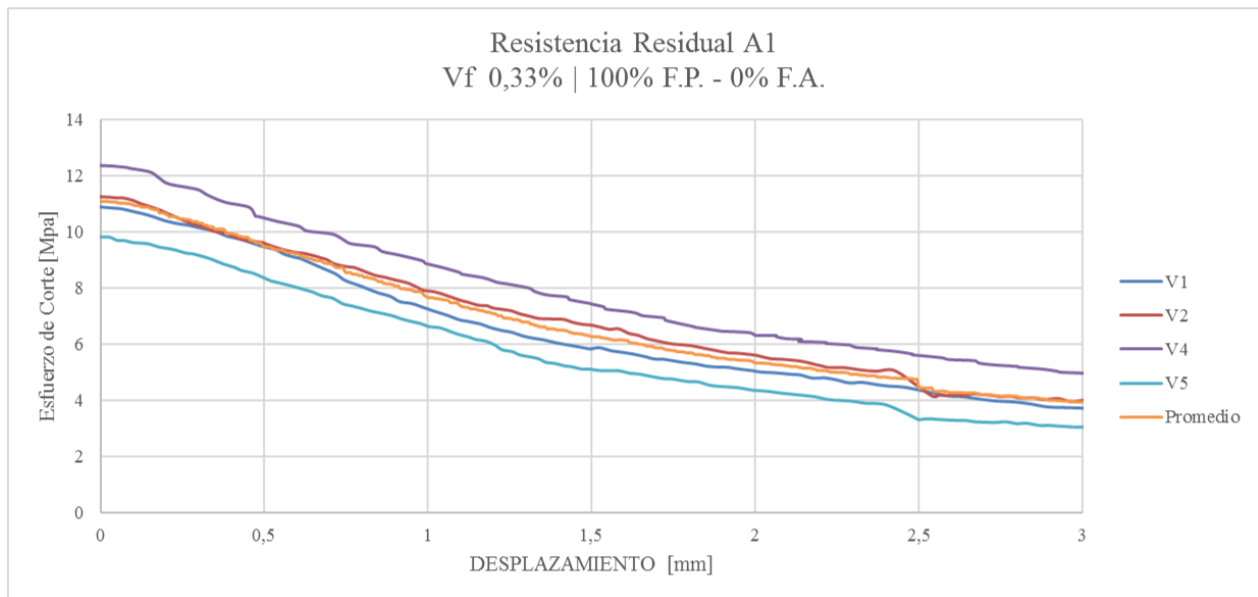


Gráfico 8. Curvas de esfuerzos de corte en amasada A1, medido desde peak de carga como origen. Configuración 100% fibras plásticas – 0% fibras aceros. 0,33% Volumen de sustitución.

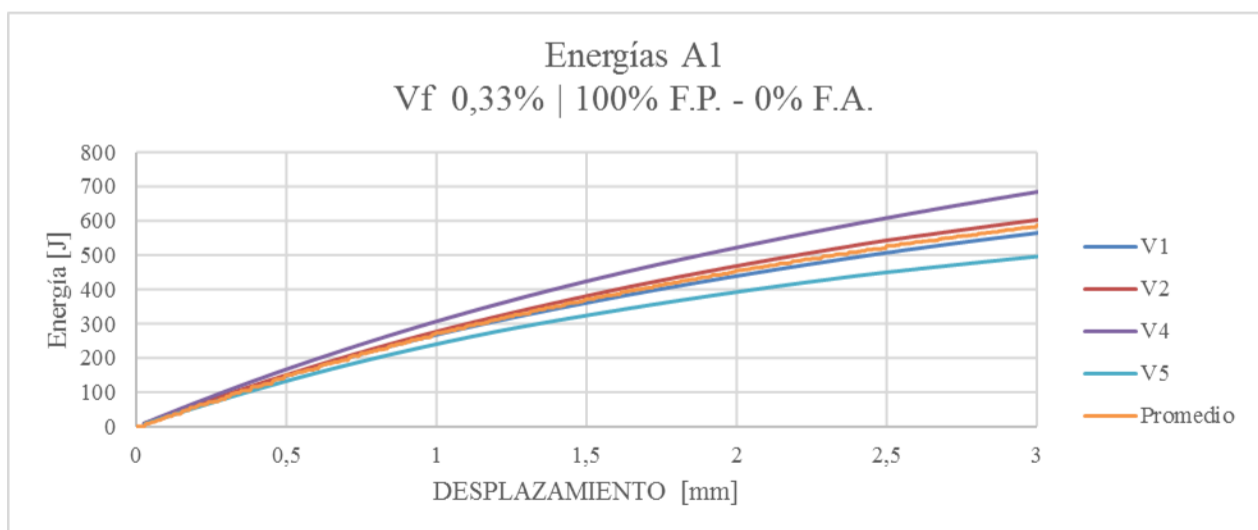


Gráfico 9. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada A1 medido desde máximo de carga.

Amasada A2

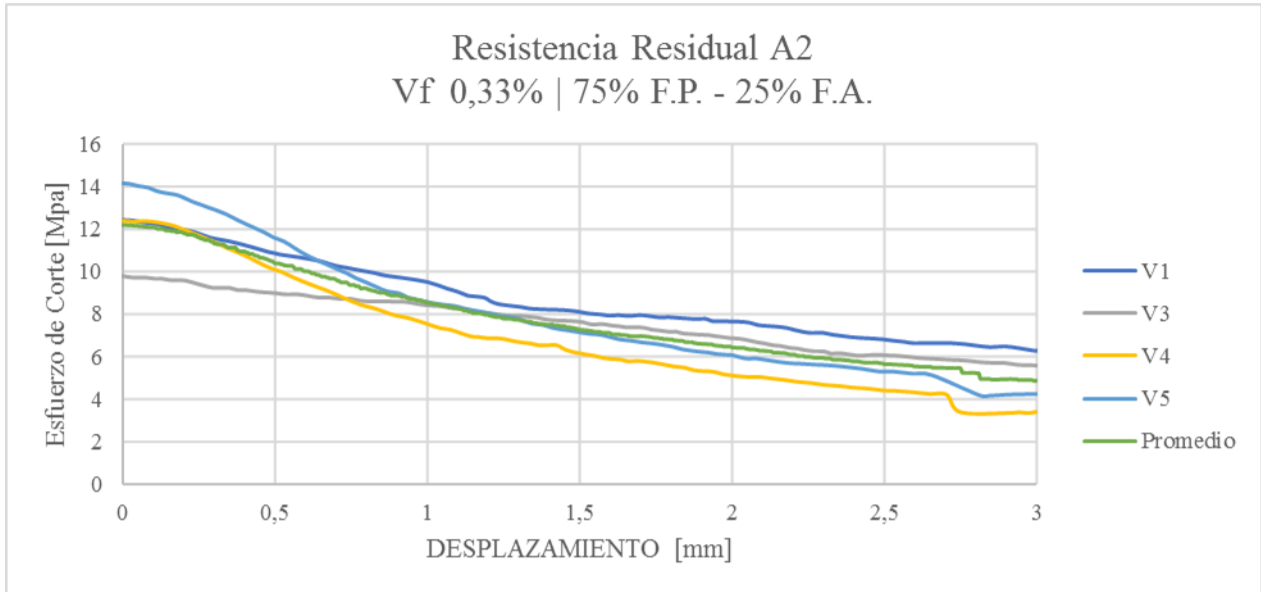


Gráfico 10. Curvas de esfuerzos de corte en amasada A2, medido desde peak de carga como origen. Configuración 75% fibras plásticas – 25% fibras aceros. 0,33% Volumen de sustitución.

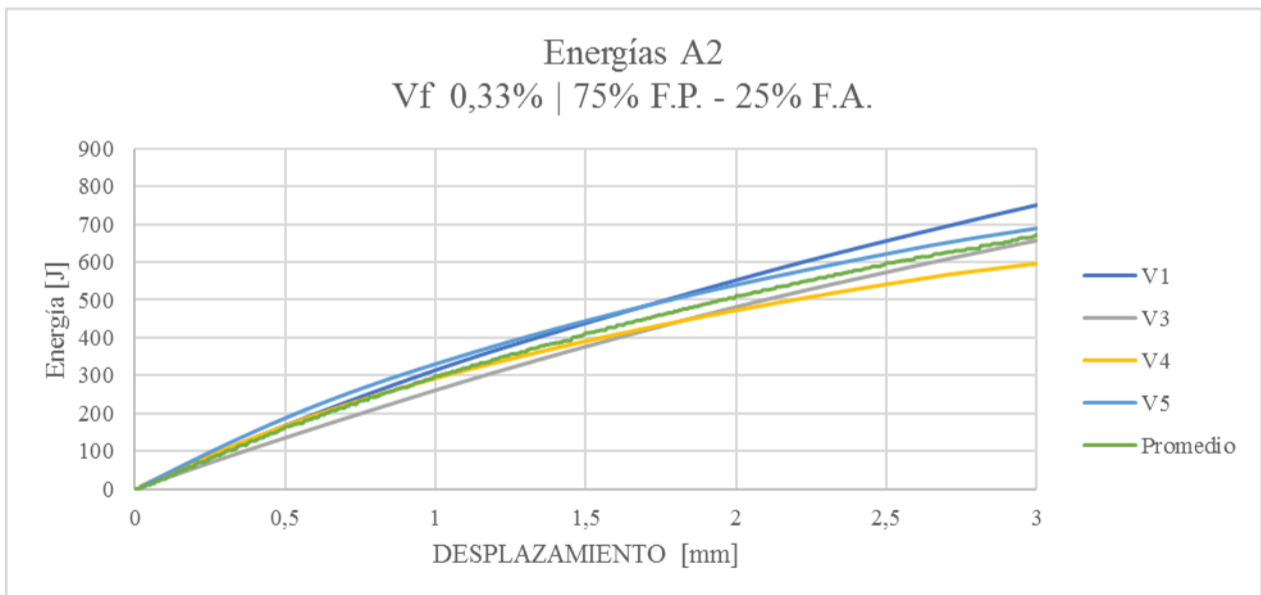


Gráfico 11. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada A2 medido desde máximo de carga de cada.

Amasada A3

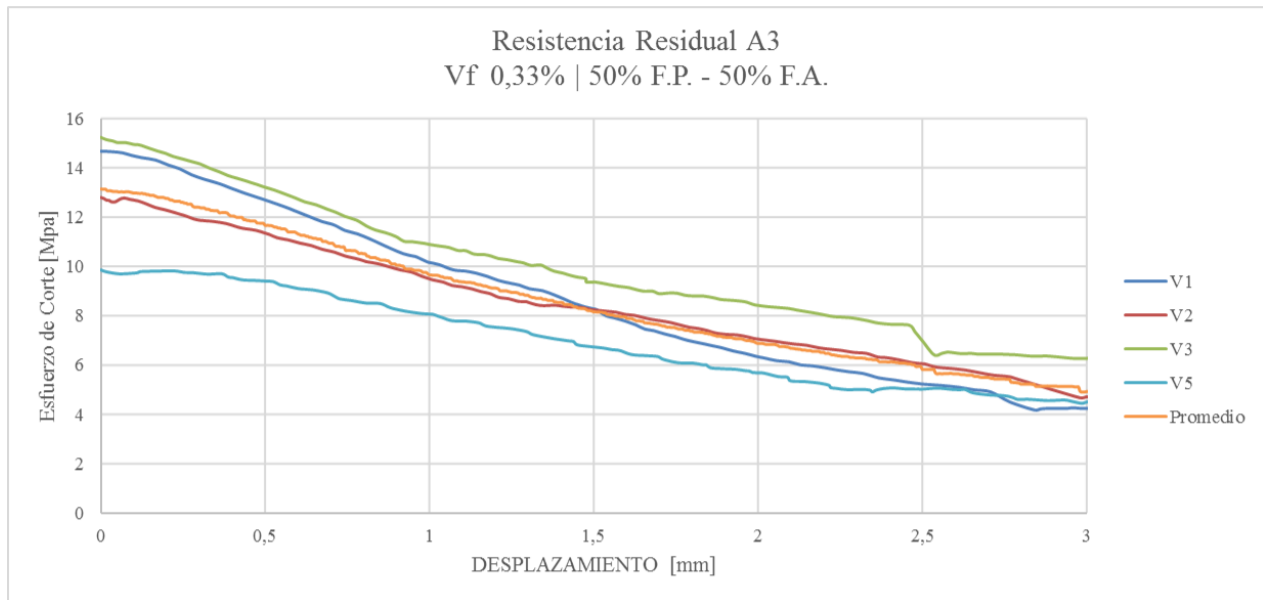


Gráfico 12. Curvas de esfuerzos de corte en amasada A3, medido desde peak de carga como origen. Configuración 50% fibras plásticas – 50% fibras aceros. 0,33% Volumen de sustitución.

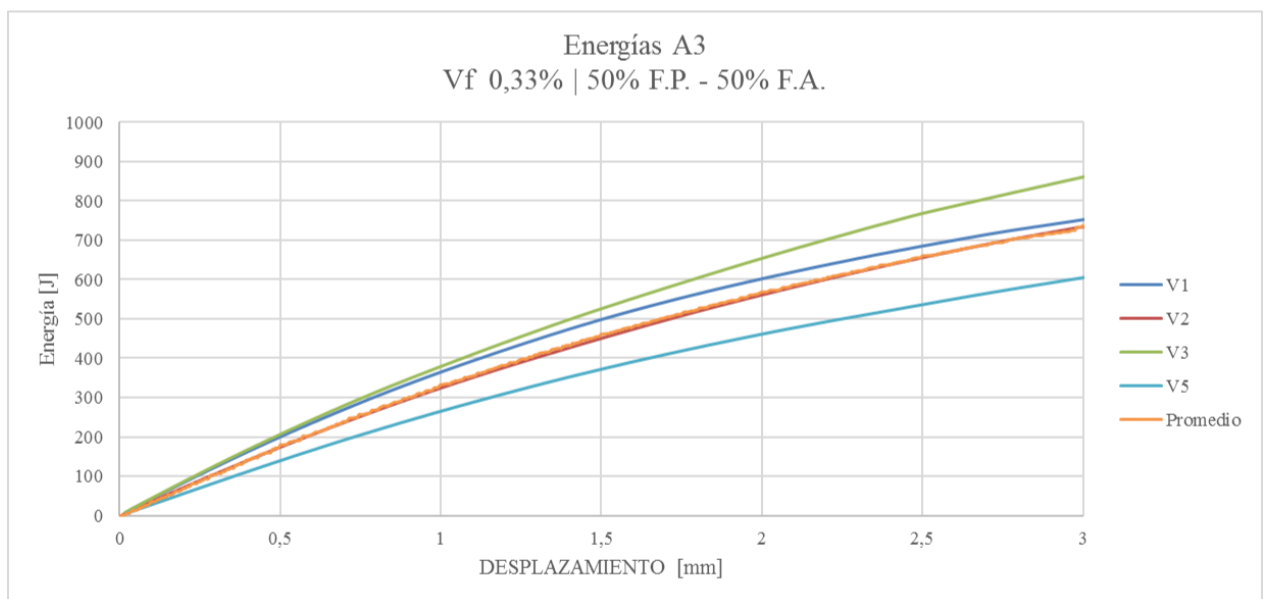


Gráfico 13. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada A3 medido desde máximo de carga.

Amasada A4

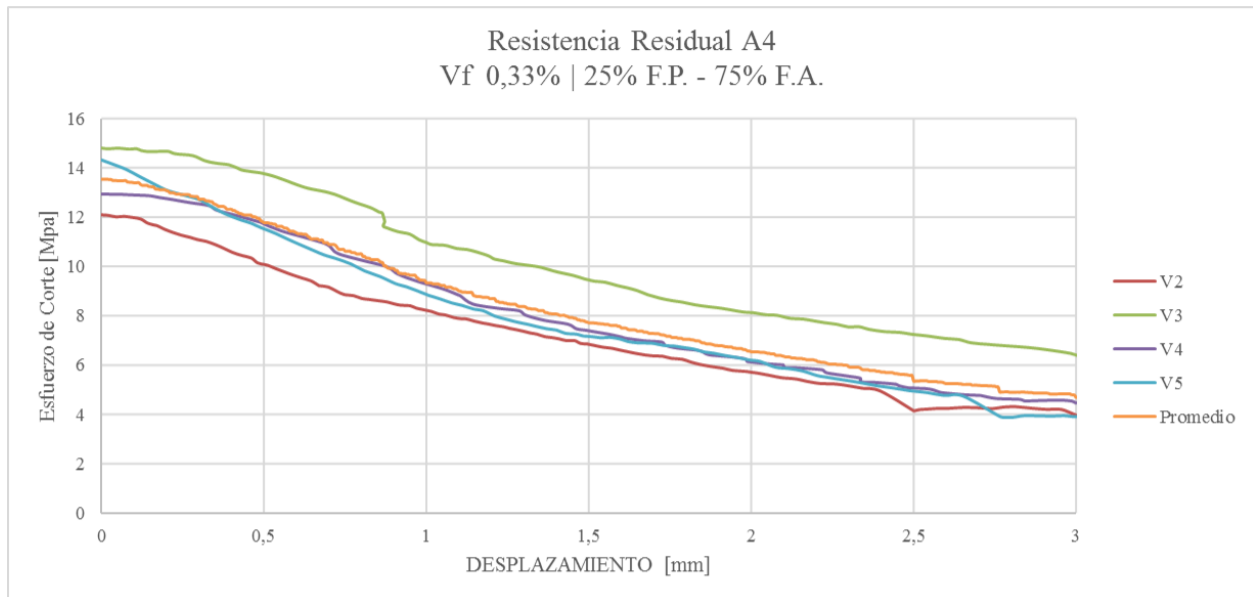


Gráfico 14. Curvas de esfuerzos de corte en amasada A4, medido desde peak de carga como origen. Configuración 25% fibras plásticas – 75% fibras aceros. 0,33% Volumen de sustitución.

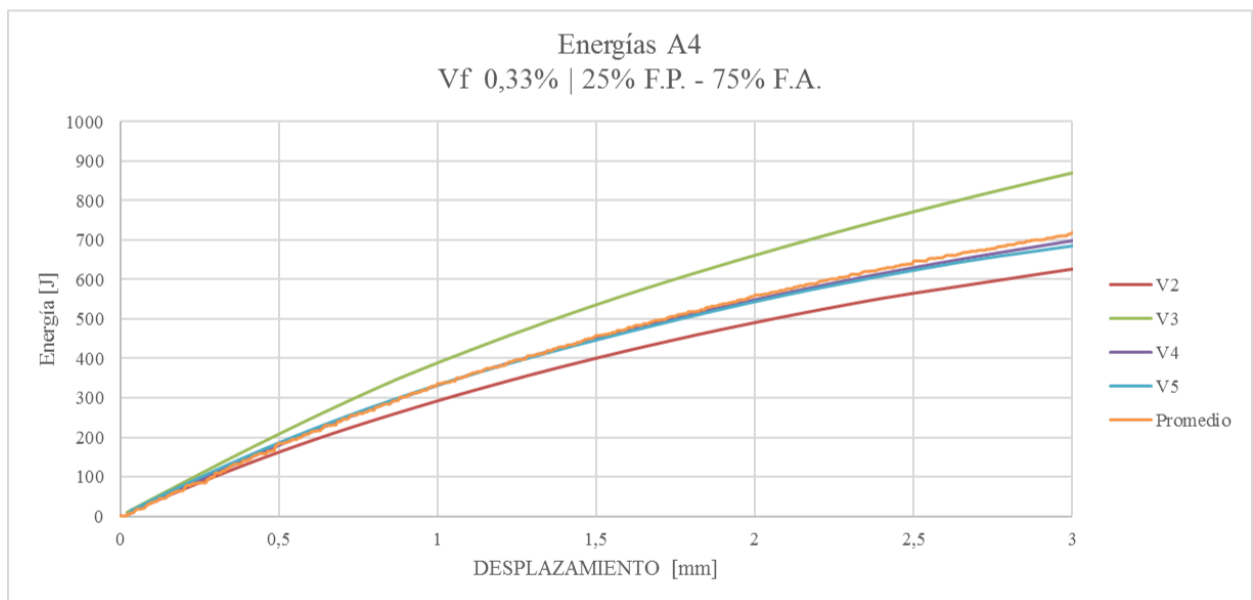


Gráfico 15. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada A4 medido desde máximo de carga.

Amasada A5

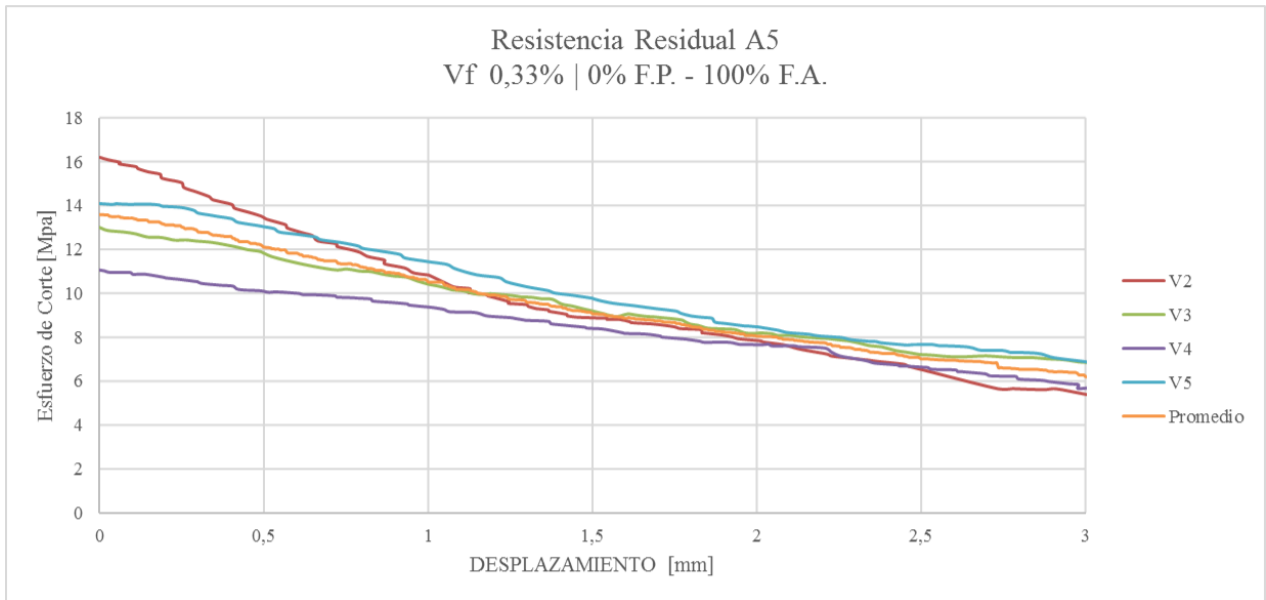


Gráfico 16. Curvas de esfuerzos de corte en amasada A5, medido desde peak de carga como origen. Configuración 0% fibras plásticas – 100% fibras aceros. 0,33% Volumen de sustitución.

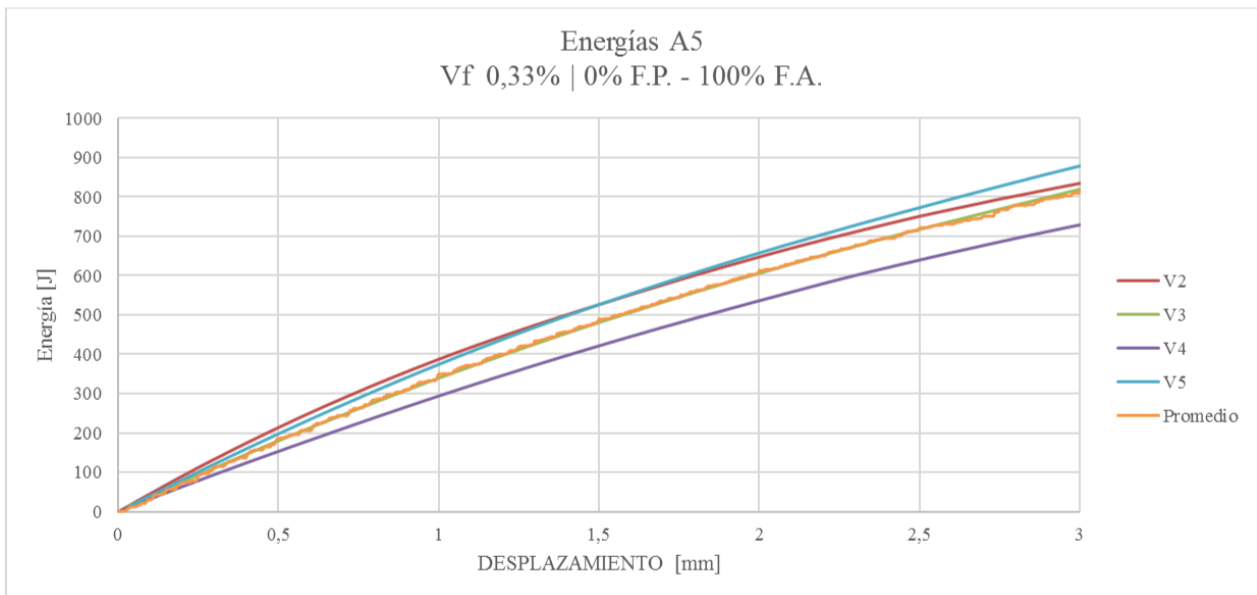


Gráfico 17. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada A5 medido desde máximo de carga.

Serie “B” Media cuantía

A continuación, se ilustran los gráficos promedios de los ensayos a corte para la serie de media cuantía de sustitución - “B”; 0,51% V_f -, siguiendo las instrucciones de la JSCE – SF6.

Amasada B1

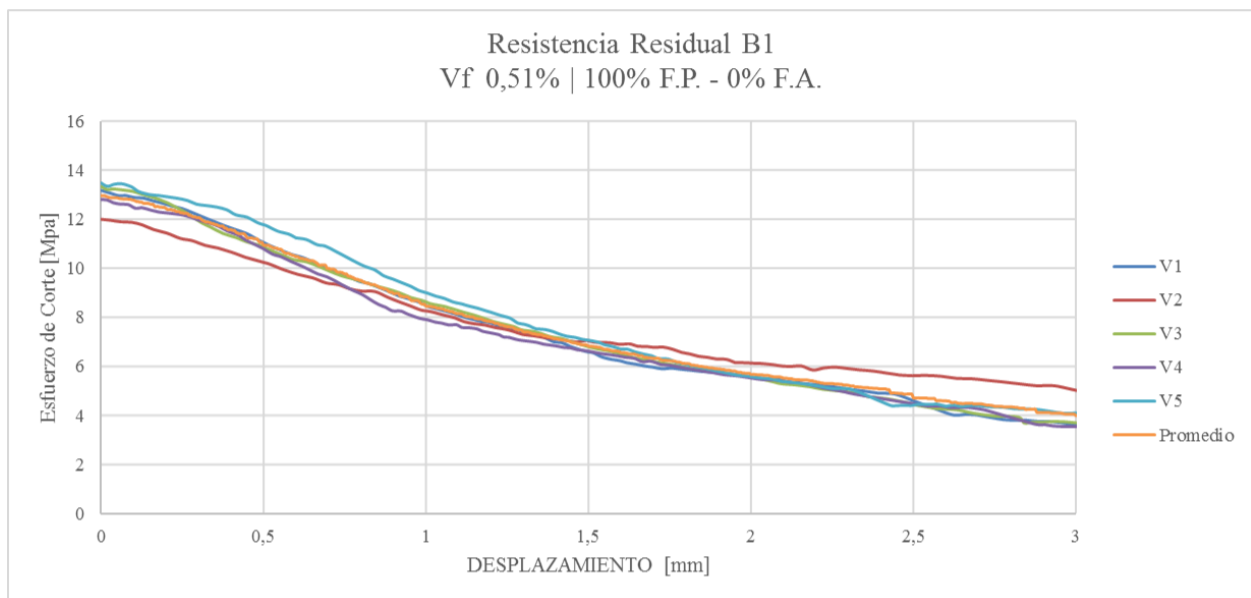


Gráfico 18. Curvas de esfuerzos de corte en amasada B1, medido desde peak de carga como origen. Configuración 100% fibras plásticas – 0% fibras aceros. 0,51% Volumen de sustitución.

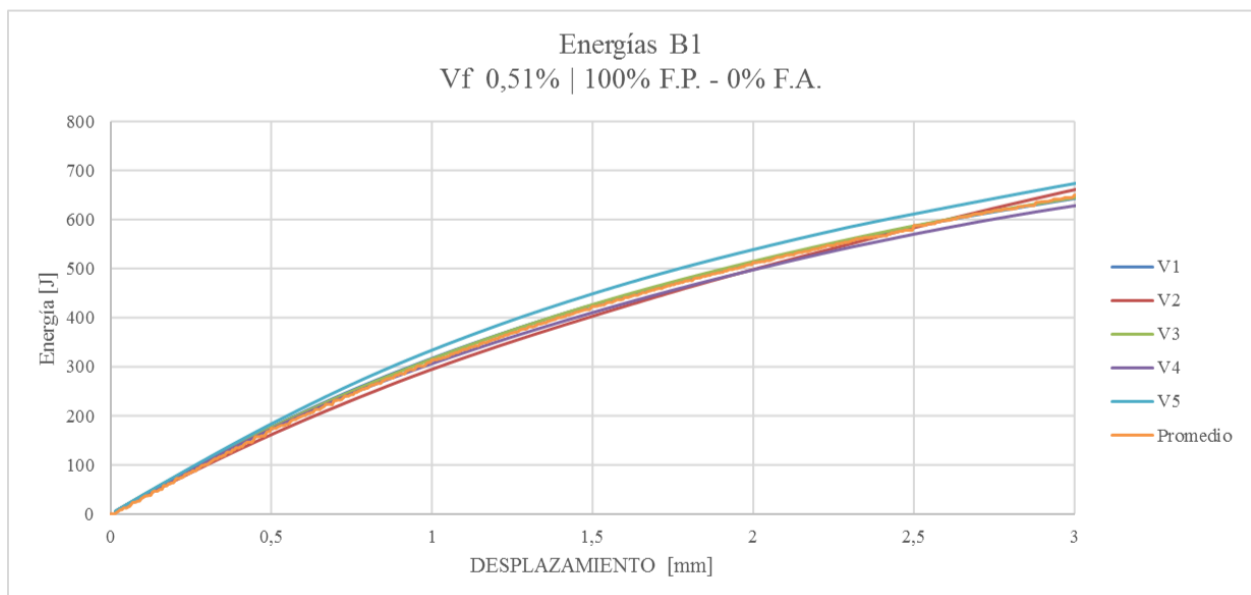


Gráfico 19. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada B1 medido desde máximo de carga.

Amasada B2

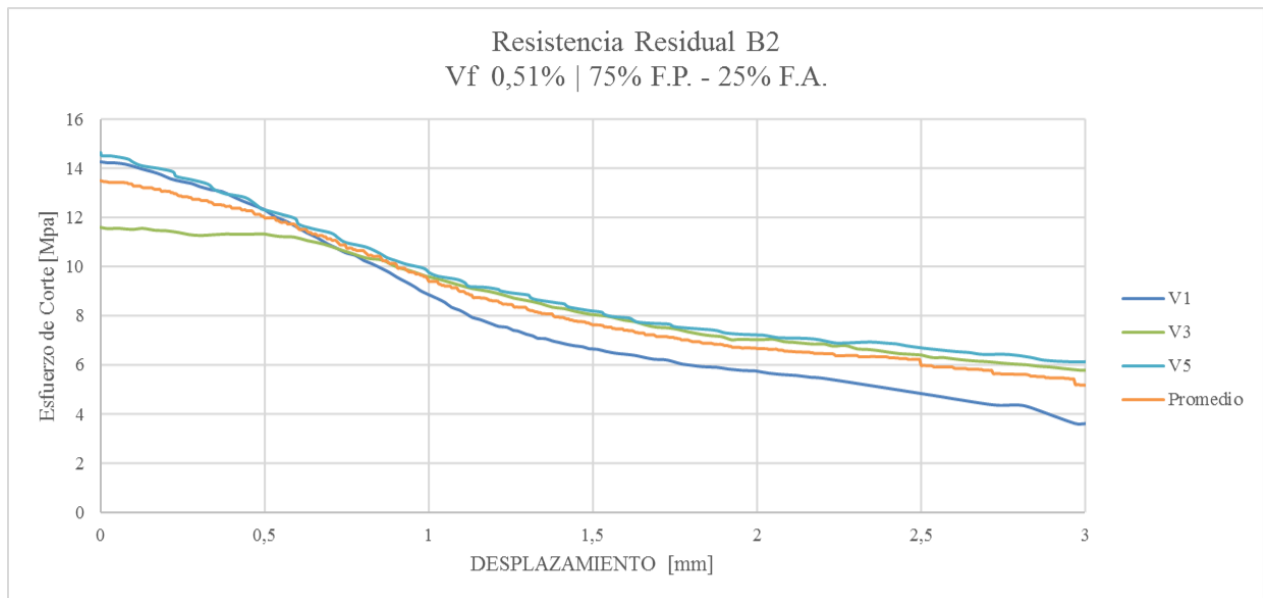


Gráfico 20. Curvas de esfuerzos de corte en amasada B2, medido desde peak de carga como origen. Configuración 75% fibras plásticas - 25% fibras aceros. 0,51% Volumen de sustitución.

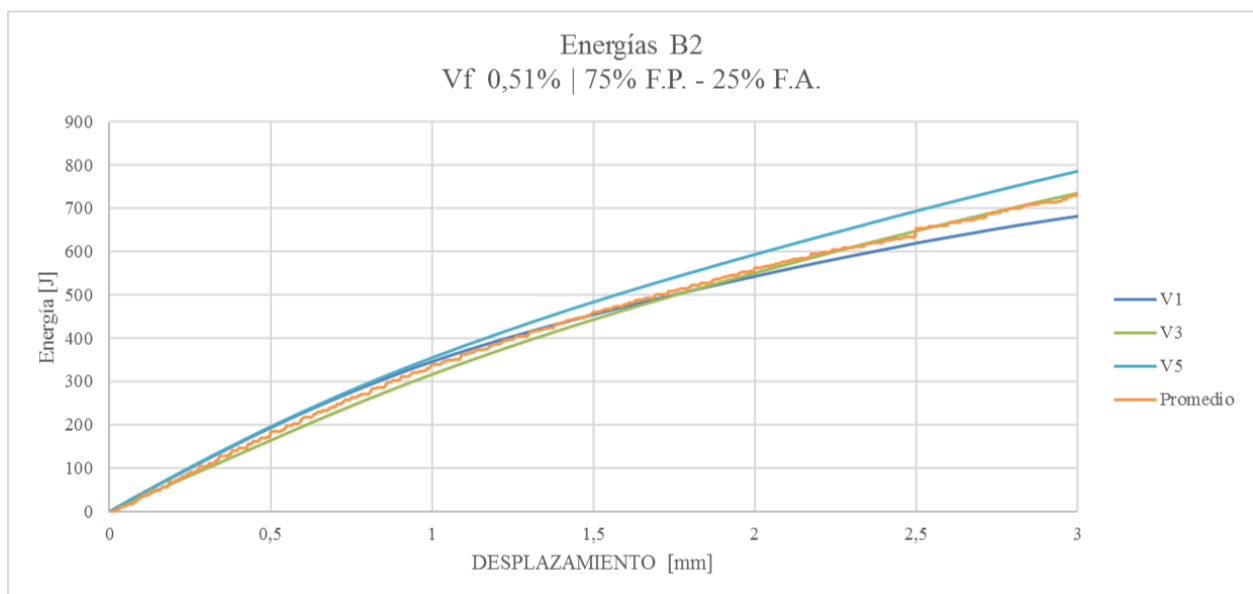


Gráfico 21. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada B2 medido desde máximo de carga.

Amasada B3

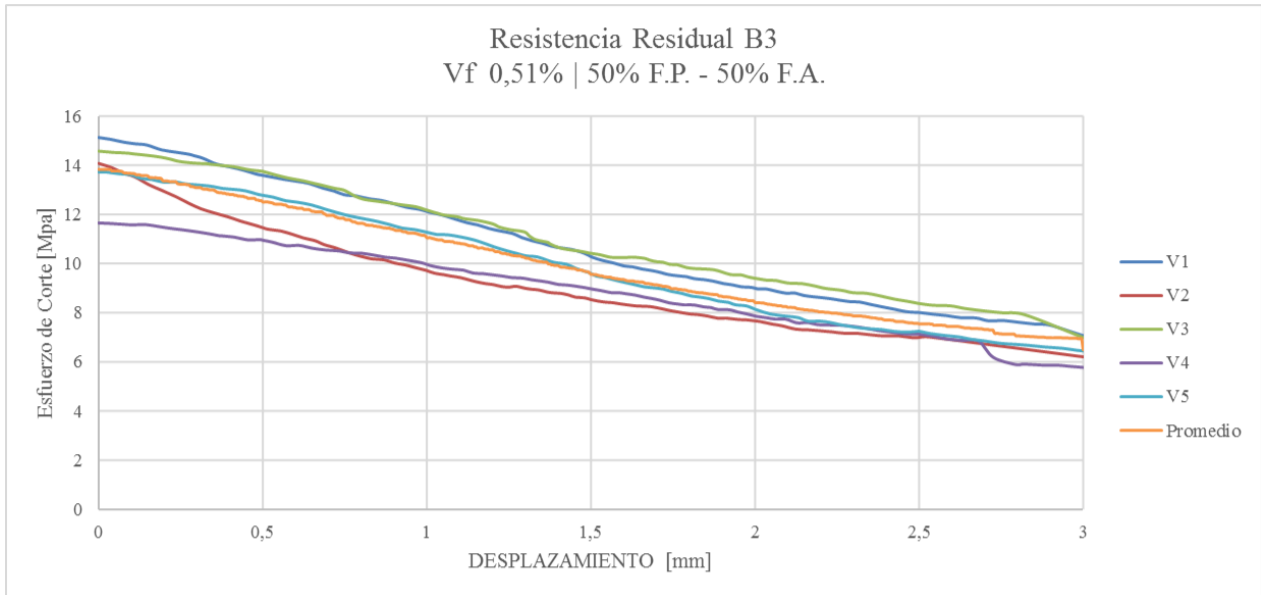


Gráfico 22. Curvas de esfuerzos de corte en amasada B3, medido desde máximo de carga como origen. Configuración 50% fibras plásticas – 50% fibras aceros. 0,51% Volumen de sustitución.

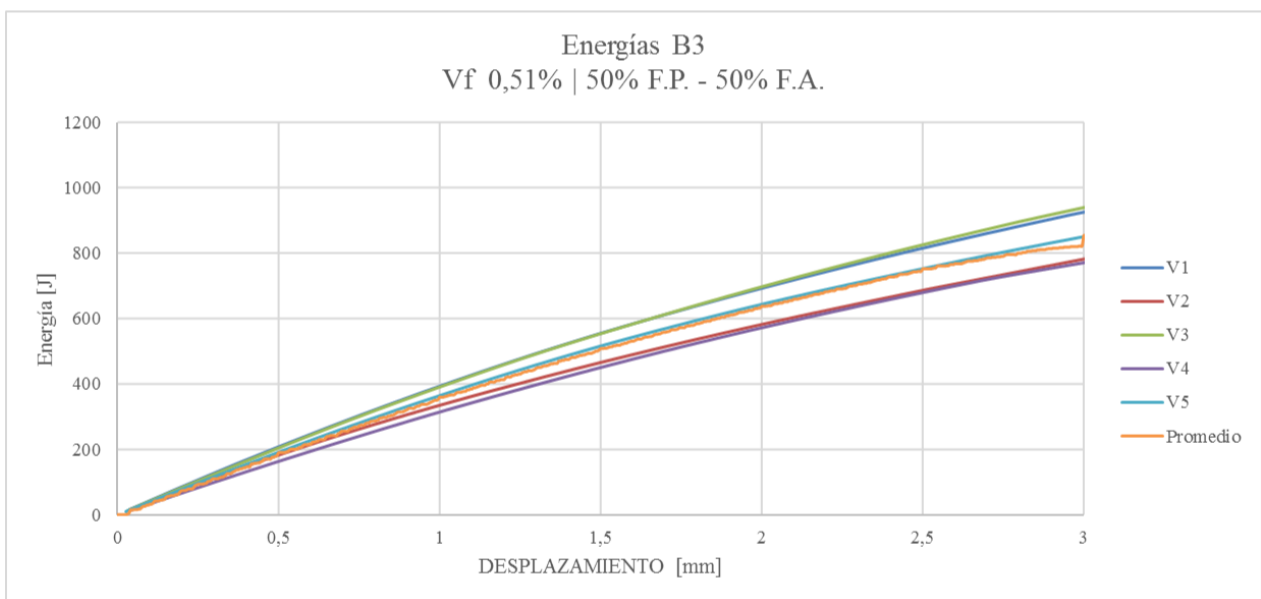


Gráfico 23. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada B3 medido desde máximo de carga.

Amasada B4

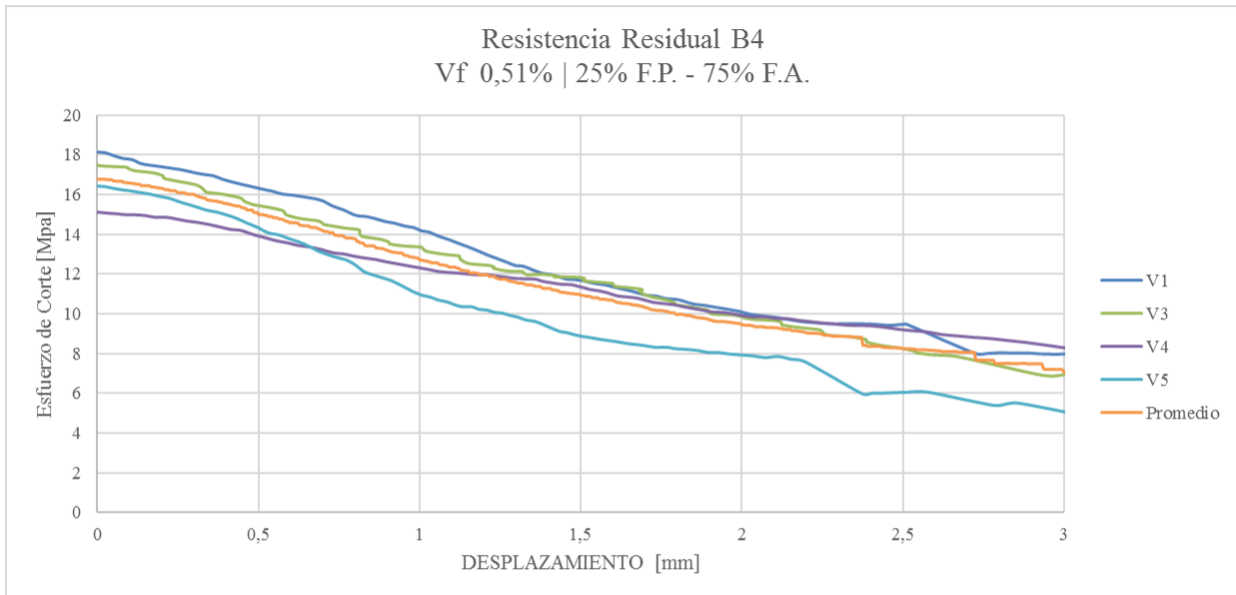


Gráfico 24. Curvas de esfuerzos de corte en amasada B4, medido desde peak de carga como origen. Configuración 25% fibras plásticas – 75% fibras aceros. 0,51% Volumen de sustitución.

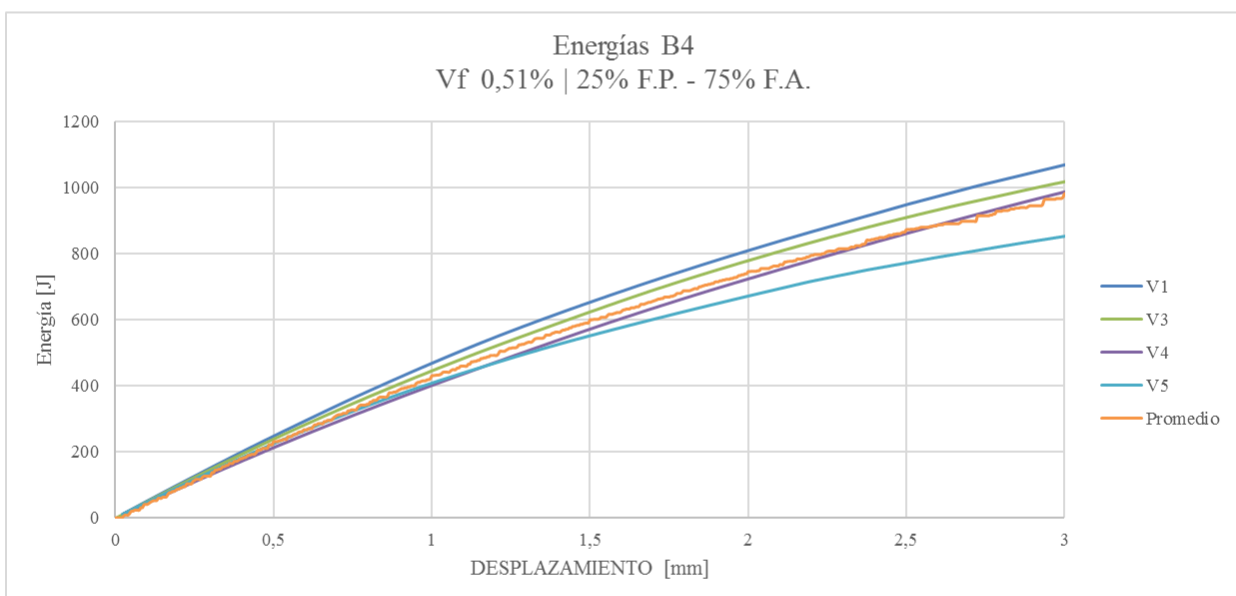


Gráfico 25. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada B4 medido desde máximo de carga.

Amasada B5

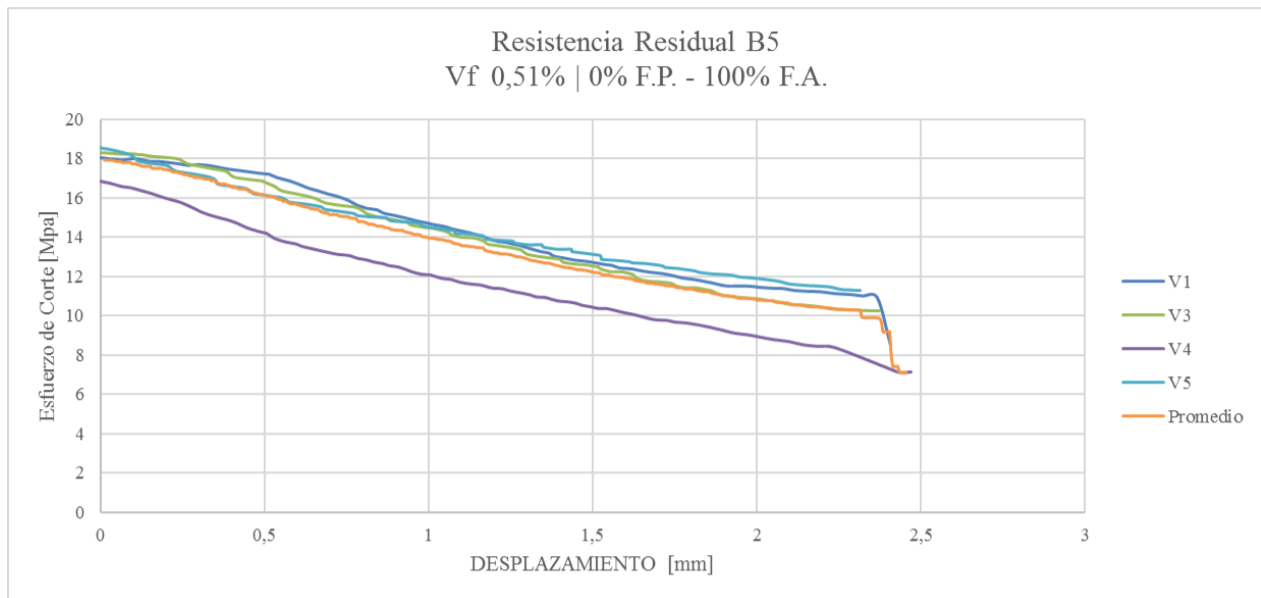


Gráfico 26. Curvas de esfuerzos de corte en amasada B5, medido desde peak de carga como origen. Configuración 0% fibras plásticas – 100% fibras aceros. 0,51% Volumen de sustitución.

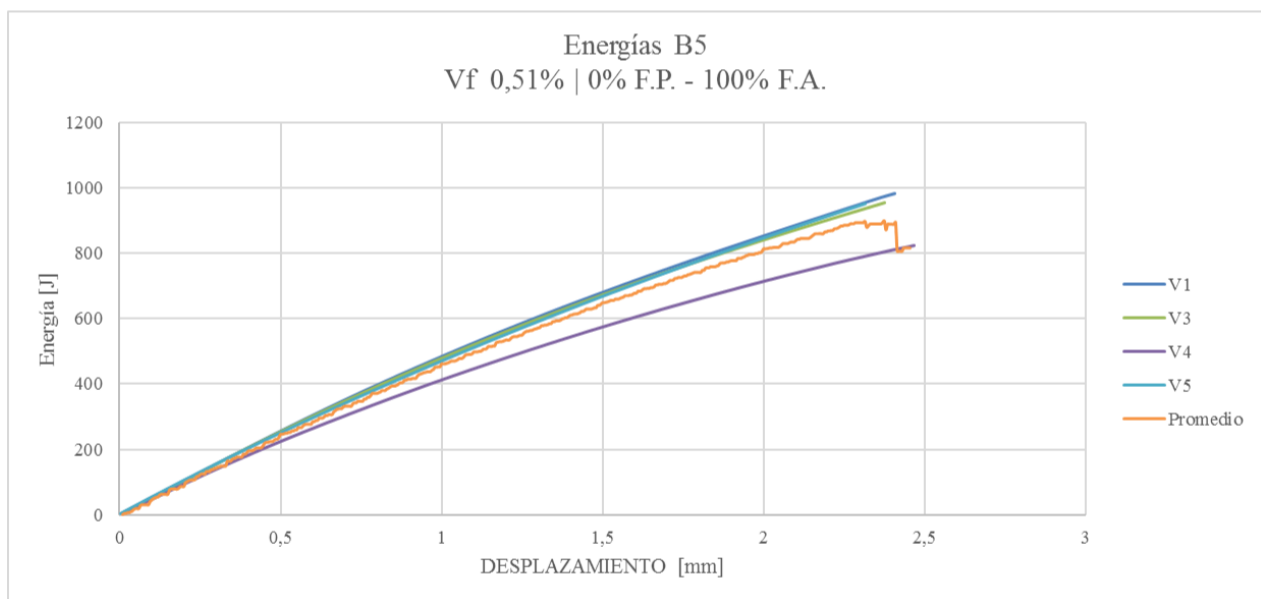


Gráfico 27. Curvas de tenacidades para las vigas de la amasada B5 medido desde máximo de carga.