

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO REFORZADAS CON BANDAS DE CFRP BAJO
ACCIONES CÍCLICAS EN REVERSA “CUASI-ESTÁTICA”**

Tesis presentada para obtener el grado académico de Magíster en
INGENIERÍA CIVIL

Autor

Juan Diego Ricardo Samaniego Palomino

Asesor

Dr. Víctor Ivan Fernández Dávila Gonzales

Mayo, 2021

AGRADECIMIENTO

Agradecer en primer lugar a mis padres Lina y Ricardo por el constante apoyo, ánimos y confianza depositadas en mí. Estaré eternamente agradecidos con ustedes.

Agradecer al Dr. Víctor I. Fernandez-Davila, asesor de este proyecto de investigación, por su continuo apoyo y paciencia en el desarrollo del presente trabajo.

Agradecer al Mg. Jorge Bazán y al Ing, Willian Baca quienes a través de la empresa Top Consult Ingeniería y Constructora RF facilitaron la construcción de los especímenes y la donación y colocación de bandas de fibra de carbono. Este apoyo me es infinitamente agradecido por la confianza de su parte.

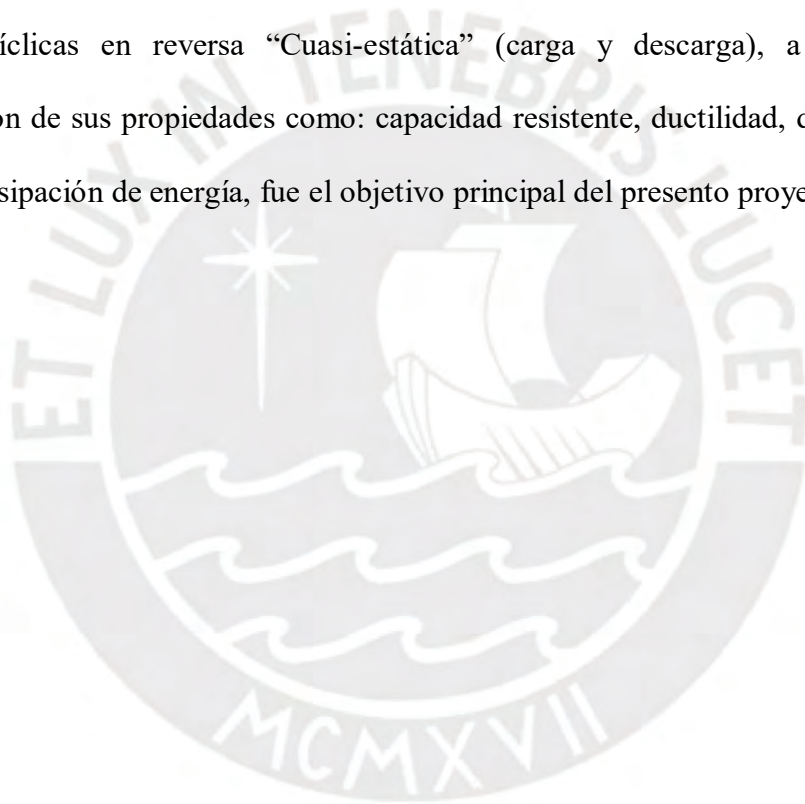
Agradecer a la Maestría de ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú y al Laboratorio de estructuras antisísmicas PUCP por el esfuerzo conjunto para la ejecución de los ensayos experimentales y el financiamiento otorgado para la construcción de los especímenes de ensayo del presente documento.

RESUMEN

El uso de fibra de carbono CFRP (Carbon Fiber Reinforced polymer) para la reparación, rehabilitación y reforzamiento de estructuras de concreto armado, ha generado interés en su estudio, debido a su versatilidad en la restitución de la capacidad de elementos estructurales principalmente en zonas de alto riesgo sísmico. El presente trabajo de tesis muestra los resultados experimentales de cuatro especímenes de vigas de concreto armado dispuestas en voladizo, reforzadas externamente con CFRP, y sometidas a cargas cíclicas controladas por desplazamientos laterales.

Los especímenes se construyeron a escala natural y con las siguientes características: sección rectangular: 25 x 40 cm, longitud total: 215 cm; refuerzo interno: barras de acero longitudinal (ASTM A615 grado 60), resistencia cilíndrica del concreto: 210 kg/cm²; refuerzo externo: láminas de CFRP de 200 x 20 x 0.1 cm (longitud x ancho x espesor) colocadas en las zonas sometidas a tracción. El ensayo consistió en la aplicación de carga cíclica en el extremo del voladizo, representado por 10 pares de amplitudes crecientes en 10% del desplazamiento lateral máximo de cada viga. Se dispuso de una serie de sensores para medir los desplazamientos laterales en ambas caras del elemento (zona de tensión y zona compresión), medición incremento de carga inducida cuando la carga somete a una cara lateral a tensión y a compresión cuando la carga impuesta ejerce el empuje en el sentido contrario, con la finalidad de evaluar la degradación de rigidez, la ductilidad, y la cantidad de energía absorbida por el elemento en cada amplitud creciente. Se observó en ambas caras sometidas a tensión y compresión (de acuerdo a la imposición de carga positiva o negativa) que la adición de CFRP redujo el daño en la sección para incrementos de cargas en amplitudes menores debido al incremento de rigidez aportada por el sistema

FRP, controlando el proceso de agrietamiento, e incrementando la resistencia a carga máxima en 35 %. Los resultados preliminares señalan un mejor desempeño de los especímenes reforzados con CFRP, reduciendo el desplazamiento lateral máximo en 64%, y comprobándose una reducción en el agrietamiento; además, con el incremento de desplazamiento lateral y la adición de una (01) y tres (03) capas de CFRP la degradación de rigidez disminuyó para los elementos ensayados. El análisis del comportamiento de vigas de concreto armado reforzadas a flexión con bandas de fibra de carbono CFRP, bajo acciones cíclicas en reversa “Cuasi-estática” (carga y descarga), a través de la conservación de sus propiedades como: capacidad resistente, ductilidad, degradación de rigidez y disipación de energía, fue el objetivo principal del presente proyecto.



ÍNDICE

AGRADECIMIENTO	II
RESUMEN.....	III
ÍNDICE	V
INDICE DE FIGURAS	IX
INDICE DE TABLAS	XV
1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Justificación.....	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos específicos	6
1.5 Hipótesis.....	6
1.6 Alcances	6
1.6.1 Metodología.....	7
2. CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE VIGAS REFORZADAS CON EL SISTEMA CFRP	9
2.1 Reforzamiento a flexión con láminas de fibra de carbono	9
2.1.1 Filosofía de diseño de vigas reforzadas con bandas de CFRP	10

2.1.2	Metodología de aplicación de CFRP en vigas de concreto armado.....	11
2.2	Material compuesto CFRP	13
2.2.1	Fabricación del CFRP	14
2.2.2	Características y aplicaciones	15
2.3	Falla de elementos de concreto armado reforzadas con bandas de CFRP	18
2.3.1	Fallas comunes en vigas de concreto armado con refuerzo CFRP.....	19
2.3.2	Consideraciones de la norma ACI – 440 2R 2008 para evitar fallas por pérdida de adherencia	21
3.	CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	25
3.1	Introducción.....	25
3.2	Diseño de elementos con comportamiento flexural.....	26
3.3	Ductilidad de vigas de concreto armado.	29
3.4	Diseño de refuerzo a flexión	32
3.4.1	Resistencia Nominal	33
3.4.2	Deformación ultima del compuesto FRP	33
3.4.3	Resistencia de elementos rectangular en estado ultimo	34
3.4.4	Factor de reducción Φ	35
3.4.5	Condición de servicio	35
3.5	Comportamiento de estructuras ante cargas cíclicas.....	36
3.5.1	Comportamiento del acero bajo cargas cíclicas	41
3.5.2	Efecto Bauschinger	42

3.5.3	Histéresis y disipación de energía.....	43
4.	CAPÍTULO IV: DISEÑO EXPERIMENTAL.....	45
4.1	Introducción.....	45
4.2	Descripción de los especímenes	45
4.3	Materiales	47
4.3.1	Ensayo de materiales	48
4.4	Construcción:.....	50
4.4.1	Colocación de refuerzo externo de fibra de carbono FRP	53
4.5	Descripción de los ensayos realizados	59
5.	CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	66
5.1	Introducción.....	66
5.2	Resultados de ensayos.....	66
5.2.1	Viga de control (VC)	75
5.2.2	Viga de Ensayo 01 (VE-01)	79
5.2.3	Viga de Ensayo 02 (VE-02)	84
5.2.4	Viga de Ensayo 03 (VE-03)	89
5.2.5	Degradación de rigidez	95
5.2.6	Disipación de energía.....	98
5.3	Momento- Curvatura.....	101
5.3.1	Momento resistente a flexión y ductilidad de desplazamiento parcial.....	101

5.3.2	Calculo analítico del momento curvatura experimental.....	103
5.3.3	Evaluación de la longitud de la rótula plástica.	107
5.3.4	Momento - curvatura experimental.....	109
6.	CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	127
6.1	Conclusiones.....	127
6.1.1	Acerca del programa experimental.....	127
6.1.2	Acerca del comportamiento experimental obtenido.	129
6.1.3	Acerca de la modificación de comportamiento ante carga cíclica por la inclusión de un sistema de refuerzo externo FRP	130
6.2	Recomendaciones	130
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	132
	ANEXOS.....	i
	Anexo A: Cálculo de deflexiones	ii
	Viga de Control.....	ii
	VE-01	v
	VE-02	viii
	VE-03	xi
	Anexo B: Plano de especificaciones y detalles de especímenes.....	xiv

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Curvas Esfuerzo-Deformación sistemas FRP comparadas con el acero, adaptada

de Bazán (2015).....	16
Figura 2.2.. Reforzamiento de viguetas con bandas de CFRP, Sunat Arequipa, adaptada de Sika (2014)	18
Figura 2.3 Viga de concreto armado reforzada con sistema CFRP, ejecutado por Top Consult Ingeniería (2016).....	18
Figura 2.4. Falla por rotura del concreto (izquierda), Ruptura de la platina de FRP (derecha). Proaño (2011)	20
Figura 2.5. Fallas en extremos (1,2) y falla por cortante en extremo de la banda (3), (Proaño ,2011).....	20
Figura 2.6. Refuerzos U en los extremos verticales y diagonales. (Dong, 2012).....	21
Figura 2.7. Esquema general para hallar la resistencia a flexión ACI 440-2R.....	22
Figura 3.1. Sección de concreto doblemente reforzada cuando se alcanza la resistencia a flexión.	26
Figura 3.2. Viga de concreto armado externamente reforzada en el límite elástico por flexión.	31
Figura 3.3. Viga de concreto armado reforzada con FRP, estado último.....	32
Figura 3.4. Efecto de la carga cíclica con deterioro de la rigidez y resistencia (Ramírez ,2012)	38
Figura 3.5. Relaciones esfuerzo –deformación de vigas con sección transversal y distribución del refuerzo simétrico (ACI Committee 318).....	39
Figura 3.6. Ciclo de carga y descarga del material inelástico. (Moncayo, 2017).....	41
Figura 3.7. Efecto de carga y descarga, con inversión del sentido de carga. (Moncayo, 2017)	42
Figura 3.8. Esquema de parámetros de energía	44

Figura 4.1. Características de los especímenes de ensayo: dimensiones y cuantía de acero de reforzamiento. (Fuente: Propia).....	47
Figura 4.2. Curva Esfuerzo- Deformación acero de 5/8”.....	49
Figura 4.3. Curva esfuerzo- deformación de muestra CFRP.....	50
Figura 4.4. Comparación del ensayo tracción del acero y CFRP	50
Figura 4.5. Esquema grafico de los topes de carga impuestas para fijar el Espécimen a la losa de ensayos, (a) carga positiva y (b) carga negativa.....	51
Figura 4.6. Características de la base de sostenimiento. (Fuente: Propia)	52
Figura 4.7. Construcción de zapata: (a) Armado de acero de refuerzo, (b) Colocado de concreto	52
Figura 4.8. Culminación de trabajos de vaciado de concreto f_c 210 kg/cm ² . (a) Armado de acero de viga, (b) Vibrado de concreto, (c) Finalización de trabajos. (Fuente: Propia).....	53
Figura 4.9. Preparación de superficies a reforzar. (Fuente: Propia).....	55
Figura 4.10. Bandas de fibra de carbono FRP y tiras de FRP para el anclaje en la zapata (Fuente: Propia)	55
Figura 4.11. Detallado de colocación de fibra de carbono y orientación del anclaje. (Fuente: Propia).....	56
Figura 4.12. Colocación de resina epóxica. (Fuente: Propia).....	56
Figura 4.13. Colocación de bandas de fibra de carbono FRP. (Fuente: Propia).....	57
Figura 4.14. Colocación de última capa de epóxico en los especímenes reforzados. (Fuente: Propia).....	57
Figura 4.15. Pintado y traslado a laboratorio de estructuras PUCP. (Fuente: Propia).....	58
Figura 4.16. Montaje mecánico viga VE-03 para el inicio del ensayo. (Fuente: Propia) ...	59
Figura 4.17. Esquema de las vigas ensayadas en laboratorio de estructuras PUCP	60

Figura 4.18. Esquema de los Ciclos de carga por desplazamiento laterales controlados para en ensayo cíclico (pseudo estático).....	61
Figura 4.19. Disposición final para inicio de ensayo de carga cíclica. (Fuente: Propia)	61
Figura 4.20. Monitoreo de mediciones (Fuente: Propia).....	62
Figura 4.211. Diagrama de desplazamiento lateral de elemento en voladizo.....	64
Figura 5.1. Curvas de histéresis del 1° ciclo: (a) Viga de Control, (b) VE-01, (c) VE-02, (d) VE-03. (Fuente: propia)	72
Figura 5.2. Grafica Fuerza-Desplazamiento lateral en 5 mm de amplitud.....	73
Figura 5.3. Curvas de capacidad. V. Control Vs VE-01	74
Figura 5.4. Curvas de capacidad. VE-02 Vs VE-03	75
Figura 5.5. Diagrama de histéresis V. Control	76
Figura 5.6. Curva de capacidad V. Control.(Fuente: propia)	77
Figura 5.7. Energía disipada V. Control.....	77
Figura 5.8. Degradación de la rigidez Normalizada	78
Figura 5.9. Diagrama de histéresis VE-01.....	79
Figura 5.10. Envoltente de ciclos de histéresis VE-01.....	80
Figura 5.11. Energía acumulada disipada VE-01.	81
Figura 5.12. Comparación de disipación de energía V. Control vs VE-01	82
Figura 5.13. Degradación de la rigidez Normalizada VE-01.	83
Figura 5.14. Degradación de la rigidez V. control Vs VE-01	83
Figura 5.15. Agrietamiento Viga de control y VE-01 (Fuente: Propia).....	84
Figura 5.16. Ruptura de la base de empotramiento de VE-02 (Fuente: Propia).....	85
Figura 5.17. Diagrama de histéresis VE-02.....	86
Figura 5.18. Envoltente de ciclos de histéresis VE-02.....	87

Figura 5.19. Energía disipada VE-02.....	87
Figura 5.20. Degradación de la rigidez Normalizada VE-02	89
Figura 5.21. Diagrama de histéresis VE-03.....	90
Figura 5.22. Envolvente de ciclos de histéresis VE-03.....	90
Figura 5.23. Energía disipada VE-03.....	91
Figura 5.24. Comparación de disipación de energía en cada ciclo par de carga impuesta VE-02 vs VE-03	92
Figura 5.25. Degradación de la rigidez Normalizada VE-03.	93
Figura 5.26. Degradación de la rigidez comparativa entre VE-02 y VE-03	94
Figura 5.27. Agrietamiento VE-02 y VE-03 (Fuente: Propia)	95
Figura 5.28. Degradación de Rigidez comparativa de los especímenes	96
Figura 5.29. Diagrama comparativo de la disipación de energía de los especímenes	99
Figura 5.30. Curvas de capacidad de los especímenes en el total de la amplitud.....	100
Figura 5.31. Curvas de histéresis V. Control vs VE-01	101
Figura 5.32. Forma teórica de una viga en voladizo, simplemente deformada con carga en el extremo libre.....	104
Figura 5.33. Deflexión de viga en voladizo.....	104
Figura 5.34. Esquema de colocación de dispositivos de medición.	106
Figura 5.35. Diagrama comparativo momento curvatura de los especímenes	107
Figura 5.36. Definición de la rótula plástica (Shao, 2013).....	108
Figura 5.37. Deformada de las vigas de ensayo. De izquierda a derecha: V. Control, VE-01, VE-02 y VE-03	110
Figura 5.38. Diagrama Momento – Curvatura Experimental vs. Teórica, Viga de Control (Lado Positivo)	112

Figura 5.39. Diagrama Momento – Curvatura Experimental vs. Teórica, Viga de Control (Lado Negativo).....	113
Figura 5.40. Deterioro progresivo de Viga De Control: (a) Agrietamiento acumulado hasta 3er ciclo. (b) Falla de empotramiento 7 ^{mo} ciclo. (c) Vista posterior de agrietamiento. (d) Daño final de zona de empotramiento. (Fuente: Propia).....	114
Figura 5.41. Diagrama Momento – Curvatura Experimental vs. Teórica, Viga VE-01 (Lado Positivo)	116
Figura 5.42. Diagrama Momento – Curvatura Experimental vs. Teórica, Viga VE-01 (Lado Negativo).....	117
Figura 5.43. Deterioro progresivo de VE-01: (a) Agrietamiento acumulado hasta 3er ciclo. (b) Falla de empotramiento y acumulación de daño, 8 ^{vo} ciclo. (c) Vista posterior de agrietamiento, 9 ^{no} ciclo. (d) Daño final de zona de empotramiento (Fuente: Propia).....	118
Figura 5.44. Diagrama Momento – Curvatura Experimental vs. Teórica, Viga VE-02 (Lado Positivo)	120
Figura 5.45. Diagrama Momento – Curvatura Experimental vs. Teórica, Viga VE-02 (Lado Negativo).....	121
Figura 5.46. Deterioro progresivo de VE-02: (a) Agrietamiento acumulado hasta 2er ciclo. (b) Vista posterior de agrietamiento, 3 ^{to} ciclo. Inicio de la falla de empotramiento en el lado positivo del elemento(c) Agrietamiento y verificación de falla de empotramiento del elemento, 7 ^{mo} ciclo. (d) Daño final de zona de empotramiento. (Fuente: Propia).....	122
Figura 5.47. Diagrama Momento – Curvatura Experimental vs. Teórica, Viga VE-03 (Lado Positivo)	124
Figura 5.48. Diagrama Momento – Curvatura Experimental vs. Teórica, Viga VE-03 (Lado Negativo).....	125

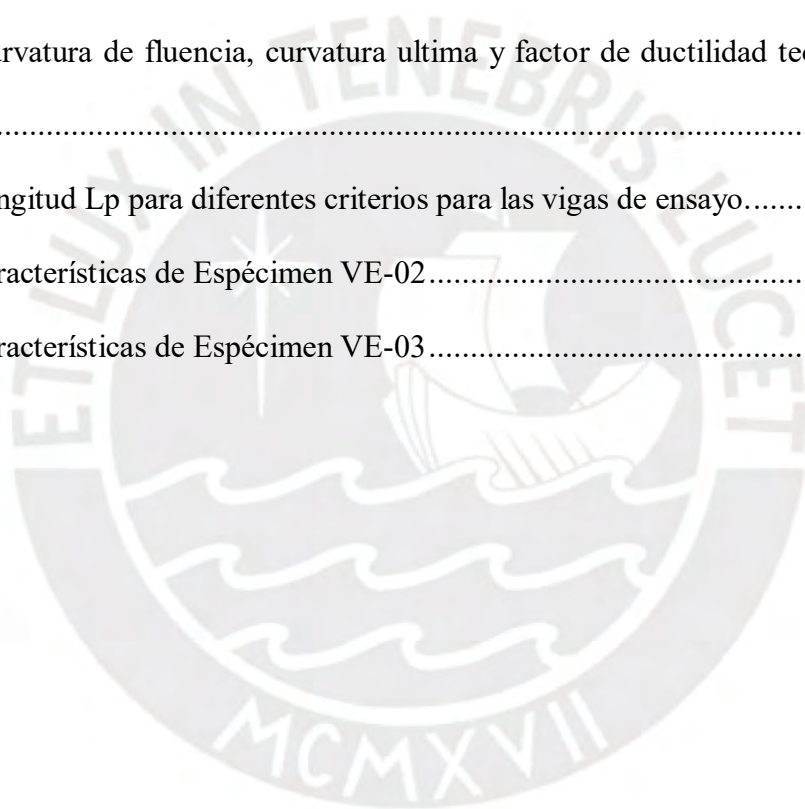
Figura 5.49. Deterioro progresivo de VE-03: (a) Agrietamiento acumulado hasta ciclo final. (b) Vista posterior de agrietamiento final. (c) Falla de empotramiento. (d) Vista posterior de año final de zona de empotramiento. (Fuente: Propia) 126



INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Esfuerzos limites por servicio en el sistema FRP bajo carga estática y carga cíclica.	36
Tabla 4.1 Características de los Especímenes de ensayo.	45
Tabla 4.2 Características refuerzo externo CFRP.....	47
Tabla 4.3 Resultados de ensayos a compresión de los especímenes	48
Tabla 4.4 Probetas ensayadas a compresión a los 45 días.....	48
Tabla 4.5 Desplazamientos laterales objetivo	62
Tabla 5.1 Resumen de cargas máximas por amplitud objetivo V. Control.....	67
Tabla 5.2 Resumen de cargas máximas por amplitud objetivo VE-01.....	68
Tabla 5.3 Resumen de cargas máximas por amplitud objetivo VE-02.....	68
Tabla 5.4 Resumen de cargas máximas por amplitud objetivo VE-03.....	69
Tabla 5.5 Cargas de fluencia y ultimas experimentales, desplazamientos laterales y ductilidad de desplazamiento parcial de zona en tracción.....	69
Tabla 5.6 Cargas de fluencia y ultimas experimentales, desplazamientos laterales y ductilidad de desplazamiento parcial de zona en compresión.	70
Tabla 5.7 Resumen de cargas de diseño y experimentales.....	75
Tabla 5.8 Resumen Cantidad de energía en V. Control.....	78
Tabla 5.9 Cantidad de energía VE-01	80
Tabla 5.10 Resumen desplazamientos laterales y rigideces de diseño y experimentales.....	81
Tabla 5.11 Cantidad de energía VE-02.....	88
Tabla 5.12 Energía total VE-03	92
Tabla 5.13 Resumen de amplitudes, derivas, rigideces por ciclo y KE/Ki- V-Control	96

Tabla 5.14 Resumen de amplitudes, derivas, rigideces por ciclo y KE/Ki- VE-01.....	97
Tabla 5.15 Resumen de amplitudes, derivas, rigideces por ciclo y KE/Ki- VE-02.....	97
Tabla 5.16 Resumen de amplitudes, derivas, rigideces por ciclo y KE/Ki- VE-03.....	98
Tabla 5.17 Resumen energía recuperable y energía disipada de los especímenes	98
Tabla 5.18 Resumen de resultados de ensayo con carga cíclica (Pseudo-Estática).....	102
Tabla 5.19 Curvatura de fluencia, curvatura ultima y factor de ductilidad teórico, zona en tracción.	102
Tabla 5.20 Curvatura de fluencia, curvatura ultima y factor de ductilidad teórico, zona en compresión.	103
Tabla 5.21 Longitud Lp para diferentes criterios para las vigas de ensayo.....	109
Tabla 5.22 Características de Espécimen VE-02.....	119
Tabla 5.23 Características de Espécimen VE-03.....	123



1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 Introducción.

En la última década se han desarrollado varias investigaciones orientadas de manera teórica y experimental, al estudio del comportamiento de láminas de fibra de carbono (CFRP, Carbon Fiber Reinforced Polymer) externamente adheridas a vigas de concreto armado para el reforzamiento a flexión llevadas a cabo por diferentes investigadores (Baca y Espinoza, 2005; Proaño, 2011, Bazán 2015). Se ha demostrado que este sistema de reforzamiento proporciona un significativo incremento en la capacidad de los elementos de concreto armado. Numerosas edificaciones de concreto armado que se han construido en los últimos años, sufren deterioro de sus elementos estructurales debido a factores como cambios de uso estructural, degradación del concreto, mayores deflexiones y cargas dinámicas debido a los movimientos sísmicos propios de la naturaleza del territorio, el sistema CFRP ofrece una alternativa de refuerzo de elementos estructurales ampliamente estudiada en sistemas estáticos.

La demanda de proyectos de rehabilitación, reparación y reforzamiento estructural ha incentivado el desarrollo de estudios e implementación de técnicas para el tratamiento de estructuras en zonas sísmicas; el uso de materiales compuestos sistema CFRP en vigas; resulta en una metodología versátil, ideal para su fácil aplicación, que permite incrementar las propiedades de resistencia a flexión y a cortante, no obstante, se tiene una desventaja en la reducción de ductilidad en sección, lo que genera una sección de mayor rigidez y lo que esto supone al momento que las estructuras se enfrenten ante fuerzas dinámicas propias de un sismo. Los estudios enfocan el uso del sistema de reforzamiento al desempeño que otorga ante fuerzas estática lo cual puede ser complementado con un análisis de secciones de concreto armado reforzadas con fibra de carbono a flexiones ante acciones de naturaleza cíclica.

La presente investigación tiene como objetivo principal el estudio a partir del análisis experimental el comportamiento de vigas de concreto armado reforzadas a flexión con el uso del sistema CFRP sometidas a acciones cíclicas en reversa “Cuasi-estática” (carga y descarga) con propósitos sismo resistentes, debido a la escasa información acerca de la investigación de elementos de concreto armado reforzados externamente con el sistema CFRP sometidos a acciones de naturaleza cíclica y/o pseudo estática, para ello se tuvo en consideración, los rangos de carga, la frecuencia, el número de ciclos y la composición del concreto, para generar criterios de diseño e implementación en cuanto a la conservación de propiedades de ductilidad, rigidez, control de agrietamiento y continuidad de vida útil.

1.2 Antecedentes

La creciente utilidad del sistema de fibra de carbono CFRP (Carbon Fiber Reinforced polimer) para el reforzamiento, reparación y rehabilitación de estructuras, ha generado diversos estudios numéricos y experimentales, de elementos estructurales reforzados con láminas de CFRP, tales como vigas, columnas, muros y losas de edificaciones, así como también vigas y pilares de puentes. El uso del sistema CFRP resulta en una metodología versátil, ideal por su fácil aplicación, su bajo peso y principalmente el incremento de resistencia a flexión y cortante.

Para el diseño y aplicación de sistemas de reforzamiento externo CFRP se toman en cuenta los criterios de los fabricantes y también lo que se establece en comité 440 del ACI, que proporciona recomendaciones de diseño y técnicas de construcción para reforzamiento FRP sin limitar la cuantía de refuerzo ni el comportamiento frágil al que puede someterse el elemento. Los sistemas CFRP pueden ser una parte integral del diseño moderno de estructuras debido a sus propiedades superiores y su potencial en

desarrollar sistemas estructurales que superen los construidos por materiales tradicionales.

Diversos estudios de elementos de concreto armado externamente reforzados con CFRP, se han realizado para evaluar la resistencia a flexión (Mukeherjee & Joshi, 2005; M. Ekenel et al, 2005, Papakonstantinou et al; 2001). Se demostró que el sistema CFRP presenta una considerable mejora en cargas de fluencia, incremento de la rigidez inicial, e incremento de resistencia a cargas continuas (cíclicas), además de reducir la propagación del agrietamiento debido a las sobrecargas en el elemento estructural. Del mismo modo (Bazán, 2015) a través de ensayos estáticos, mostró incrementos de resistencia de acuerdo a la cuantía de reforzamiento utilizada en secciones con adición de anclajes U en los extremos, modificando los modos de falla y permitiendo obtener diseños con adecuada disipación de energía.

La eficacia del sistema de reforzamiento externo ante cargas provocadas por efectos externos (sismos, cargas vehiculares, explosiones, etc.) reduce los esfuerzos que se generan en el acero y los desplazamientos que someten al elemento. El fortalecimiento del elemento depende primordialmente de la unión de interface del sustrato de concreto y las bandas de CFRP y la ductilidad del elemento, que al verse reducida puede provocar una falla frágil (M. Mahal et al., 2013).

Basado en el comportamiento debido a la degradación de rigidez de elementos de concreto armado reforzado con sistemas FRP, así como daños observados en la interface, la resistencia del elemento ante cargas cíclicas puede dividirse en 3 etapas: Incremento rápido de agrietamiento, cambio estable y propagación incontrolable de agrietamiento. (Deng et al., 2014). El módulo de Young del FRP tiene incidencia en la deflexión de las vigas durante las cargas de fatiga incrementándola hasta en un 16 %.

M. Mahal et al. (2015), también se comparó el comportamiento refuerzo con bandas y barras de FRP, para mostrar la alta efectividad al resistir cargas cíclicas después de la falla por tracción del refuerzo de acero, siendo la falla dominante el desprendimiento del FRP en zonas de falla del acero.

Las interacciones ambientales de los elementos estructurales han sido también objeto de estudio (Hadigheh et al., 2017; Aydin et al., 2016; Peng et al., 2018; Ferrier et al., 2010; Meneghetti et al., 2013) y se han desarrollado para verificar el comportamiento del refuerzo externo expuesto a ambientes ácidos, ciclos de hielo-deshielo y cargas de fatiga, durante periodos largos en el caso de puentes. En el caso de la interacción del sistema CFRP ante la presencia de fuego, este puede verse severamente afectado por la descomposición y su efecto de confinamiento quedar anulado provocando el colapso del elemento (Lau et al., 2016). El mayor porcentaje de estas investigaciones concluye que la pérdida de las propiedades físico- mecánicas del reforzamiento son mínimas a excepción de la interacción con el fuego, es decir, que los elementos reforzados con compuesto mantienen sus propiedades físico-mecánicas generalmente inalteradas en tiempos prolongados de servicio. La norma AC-440.2R (ACI, 2008) considera las pérdidas existentes mediante un coeficiente de reducción por degradación o exposición al ambiente C_E .

Las investigaciones de elementos estructurales con reforzamientos externos de CFRP ante cargas cíclicas son aun escasas, la mayor cantidad de casos realizan los estudios con imposición de cargas monotónicas hasta la falla del elemento con resultados favorables de incremento de la resistencia y durabilidad del reforzamiento de CFRP, teniéndose la exposición al fuego como el más grave problema de deterioro del refuerzo externo. Actualmente se dispone de una limitada cantidad de protocolos y resultados. Es importante remarcar que, frente a cargas de naturaleza cíclica como los

sismos, la capacidad de disipación de energía de los componentes dañados es primordial, particularmente cuando el elemento es nuevamente cargado. En base a las pocas investigaciones realizadas de vigas de concreto armado ante cargas cíclicas, programas experimentales y modelos constitutivos fue posible implementar un protocolo de ensayo experimental bajo carga cíclica en este trabajo de tesis con la finalidad de estudiar el comportamiento de un elemento estructural de vigas con extremo empotrado, reforzadas a flexión con el sistema CFRP.

1.3 Justificación

La importancia del presente proyecto de investigación radica en analizar el comportamiento de vigas con un extremo empotrado reforzadas con el sistema CFRP bajo acciones cíclicas, para ampliar el conocimiento respecto a los elementos estructurales reforzados y su comportamiento ante cargas cíclicas. Es en ese sentido que se propuso generar criterios de diseño, evaluar protocolos para los procedimientos de experimentación y obtener los resultados esperados en los cuales el comportamiento de la sección sea aceptable en términos de disipación de energía, rigidez y pérdidas de ductilidad. Obteniéndose un sustento apropiado para la implementación y diseño bien documentado del refuerzo de sistema CFRP en territorios sísmicos.

Debe darse importancia a los efectos que generan las cargas de naturaleza cíclica sobre un elemento, incluso si estas cargas no ocasionan fallas por fatiga. La carga cíclica puede conducir a un agrietamiento interno y generar fallas no previstas ante la eventualidad de acciones sísmicas en nuestro medio. A diferencia del desempeño estático de vigas de concreto armado reforzadas con CFRP, el desempeño ante cargas cíclicas aún no es completamente abordado, la durabilidad de vigas reforzadas a flexión puede verse comprometida por cargas cíclicas externas lo que puede generar debilitamientos de uno o más elementos en el sistema estructural.

1.4 Objetivos:

1.4.1 Objetivo general:

Estudiar a partir del análisis experimental, el comportamiento de vigas de concreto armado con un extremo empotrado reforzadas a flexión con bandas de fibra de carbono (CFRP), bajo acciones cíclicas en reversa “Cuasi-estática” (carga y descarga), a través de la conservación de sus propiedades como: la capacidad resistente, la ductilidad, la degradación de la rigidez y la disipación de energía.

1.4.2 Objetivos específicos

- 1) Realizar estudios experimentales bajo carga cíclica en reversa “Cuasi-estática” para evaluar resultados de las cuatro (04) prototipos de viga con un extremo empotrado, tomando distintas configuraciones de reforzamiento FRP.
- 2) Analizar la conservación de ductilidad, la pérdida de resistencia, la degradación de rigidez y la capacidad de disipación de energía.
- 3) Caracterizar los modos de falla en las secciones reforzadas con FRP y determinar efectos en detalles de distribución, refuerzo, número de capas y anclajes.

1.5 Hipótesis

Es posible obtener incrementos de capacidad resistente a flexión con la adición de capas de CFRP en vigas de concreto armado, manteniendo una adecuada capacidad de disipación de energía y una degradación de rigidez menor que los elementos no reforzados, manteniendo la ductilidad del elemento en valores aceptables para la resistencia última.

1.6 Alcances

La presente investigación se limita a estudiar específicamente vigas de concreto armado con un extremo empotrado, reforzadas con acero estructural grado 60

reforzadas externamente a flexión con bandas de fibra de carbono CFRP sometidas a acciones cíclicas con propósitos sismo resistentes. La finalidad es demostrar el buen desempeño del sistema CFRP en vigas de concreto armado con un extremo empotrado que sean sometidas a acciones cíclicas y puedan conservar sus propiedades de ductilidad, rigidez, y continuidad de vida útil.

1.6.1 Metodología

El proyecto de investigación se desarrolló con la siguiente metodología para la evaluación de los resultados:

- 1) Revisión de investigaciones previas para la recopilación de antecedentes.
- 2) Elección de programa experimental para vigas de concreto armado sometidas a carga cíclica (Cuasi-estática).
- 3) Diseño y disposición del elemento estructural a utilizarse. El sistema elegido es de viga con un extremo empotrado dispuesto verticalmente por condiciones de ensayo, debido a una simplificación del montaje para generar la carga cíclica en esta configuración.
- 4) Predicción de las cargas de agrietamiento, fluencia y carga última, diagramas de momento curvatura y desplazamientos laterales máximos.
- 5) Construcción de cuatro (04) vigas en voladizo, tres (03) vigas con reforzamiento de bandas de fibra de carbono FRP.
- 6) Ensayo de probetas y barras de acero corrugado utilizadas en la construcción de los especímenes.
- 7) Instrumentación con el uso de LDVT para la medición de las deflexiones positivas y negativas.
- 8) Ensayo de carga cíclica (Cuasi-estática) incremental en reversa controlada por desplazamientos laterales de los 04 especímenes de vigas de concreto armado con un extremo empotrado.

9) Recopilación, procesamiento y análisis de los resultados medidos e interpretación.

Es posible implementar el reforzamiento externo con el sistema FRP en vigas que sean sometidas a acciones cíclicas de manera óptima y que aún puedan conservar sus propiedades de resistencia, ductilidad, rigidez, y continuidad de vida útil.



2. CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE VIGAS REFORZADAS CON EL SISTEMA CFRP

En este capítulo se estudia la filosofía de diseño para vigas de concreto armado externamente reforzadas mediante compuesto CFRP. Se observa los modos de falla, las características físicas y mecánicas del sistema CFRP y se describe las generalidades, así como las consideraciones y metodología establecida la guía ACI -440-2R-08: “*Guide for the Design and Construction of externally Bonded FRP systems for Strengthening Concrete Structures*” (ACI, 2008) para la construcción, diseño y cálculo de la resistencia nominal a flexión de vigas de concreto armado externamente reforzadas con CFRP.

2.1 Reforzamiento a flexión con láminas de fibra de carbono

La adherencia del sistema de láminas de fibra de carbono ha contribuido en gran medida a la reparación y reforzamiento de elementos estructurales desde su implementación cerca de las últimas décadas en nuestro país, debido principalmente a su fácil colocación y limpieza, sin tener que dañar los elementos a ser intervenidos; sumado al incremento de capacidad a flexión de vigas de concreto armado, siempre cuenta como una opción viable para la inmediata ejecución del reforzamiento.

El aspecto más importante del comportamiento de una viga de concreto con una banda unida externamente es que la acción mixta debe conservarse en todas las etapas de carga hasta la rotura. Los materiales compuestos como los polímeros de carbono reforzados con fibra (CFRP) se fabrican utilizando fibras quebradizas (vidrio, aramida, carbono) y una resina termoendurecible (epoxi, poliéster, viniléster). Mientras que las resinas poliméricas tienen una deformación relativamente grande hasta la rotura (efu 5%), también son materiales quebradizos como las fibras (efu <1,5%). Como resultado, los materiales compuestos no se deforman plásticamente bajo el régimen de

tensión de tracción, por lo que disipan la energía de deformación interna, al contrario de lo que ocurre con la mayoría de los materiales metálicos. (Spadea, 2015)

2.1.1 Filosofía de diseño de vigas reforzadas con bandas de CFRP

El diseño con el refuerzo externo de fibra de carbono se ha realizado siguiendo las recomendaciones estipuladas en la norma ACI 440, las cuales se basan en diseño de concreto armado que especifica el ACI 318 y las propiedades mecánicas del refuerzo de fibra de carbono. Es importante mencionar que existen guías de diseño como la de CNR-DT 200 R1/ 2014 “Guía para el diseño y construcción de sistemas FRP pegados Externamente para el reforzamiento de Estructuras Existentes, o el reporte técnico de FIB (Federation internationale du béton.) Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures.

La cuantía a utilizar en el reforzamiento externo debe ser diseñada para soportar las fuerzas de tracción manteniendo la compatibilidad de deformaciones entre la banda de FRP y el concreto del elemento estructural. El diseño para estados límites es ideal, pues supone niveles adecuados de seguridad para la serviciabilidad (deflexiones y agrietamiento) y estados límites últimos (fatiga por carga cíclica, rotura y fractura). Es imprescindible tener en cuenta los requerimientos de resistencia y serviciabilidad utilizando los factores de la norma.

Se consideran cuatro hipótesis de diseño de secciones de concreto armado para determinar la flexión para elementos esbeltos. (Ottazi, 2004).

- Las secciones planas, permanecen planas (Hipótesis de Navier)
- Puede no considerarse la resistencia a tracción del concreto en los cálculos de resistencia de una sección.

- Las deformaciones en el acero de refuerzo son iguales a las deformaciones del concreto que lo envuelve.
- Los esfuerzos del concreto y del acero de refuerzo pueden calcularse a partir de las deformaciones, usando las curvas de esfuerzo-deformación para cada material.

Adicionalmente, se tiene las siguientes suposiciones para el cálculo simplificado y confiable de la resistencia a flexión de vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono.

- La rotura del concreto armado sucede cuando la deformación unitaria en compresión ε_c alcanza la capacidad límite de deformación ε_{cu} .
- La fluencia del acero de refuerzo indica el final del comportamiento elástico del material, cuando la deformación del acero en tracción es igual a la deformación de fluencia ε_y .
- Cuando se alcanza el límite de fluencia del acero, el refuerzo se mantiene constante con el valor de ε_y y las deformaciones pueden incrementarse.

En la presente investigación se considera la sección de una viga de concreto armado realizada con un diseño inicial y la adición de una capa de fibra de carbono teniendo en consideración las hipótesis antes mencionadas.

2.1.2 Metodología de aplicación de CFRP en vigas de concreto armado.

El sistema de reforzamiento externo con fibra de carbono funciona de manera óptima cuando se logra una adecuada adherencia de las bandas con la cara expuesta de concreto. Es también puntual mencionar que en condiciones ambientales severas el concreto puede no generar una correcta adherencia del sistema de refuerzo y se debe tener un tratamiento adecuado en estos casos.

La mano de obra calificada para el uso del reforzamiento externo y en control de calidad de la superficie a reforzar son vitales en el proceso de adición de fibra de carbono

La adición de bandas de fibra de carbono en vigas de concreto armado sigue la siguiente secuencia:

- 1) Preparación del elemento de concreto armado: La superficie de concreto debe limpiarse y ubicar la existencia de grietas y/o cangrejas e imperfecciones, para tener un tratamiento previo y realizar las correcciones del elemento.
- 2) Se verifica que la superficie se encuentre libre de humedad y se mide que la temperatura se mantenga entre 8 °C y 35°.
- 3) Aplicación del refuerzo externo sobre la viga de concreto: Los fabricantes y distribuidores recomiendan seguir lo detallado a continuación:
- 4) Preparación se superficie de adherencia del concreto, se aplica una capa de imprimante epóxico. La función de esta primera capa es de facilitar una adecuada adherencia al sustrato de concreto.
- 5) Aplicación de pasta epóxica para rellenar cualquier defecto que pueda quedar en la cara del sustrato.
- 6) Se cubre la superficie con un saturante epóxico para las fibras. Este saturante mantiene las fibras en la dirección que se requiere. Gracias a su viscosidad permite un buen manejo de la fibra y su fácil aplicación.
- 7) Se corta la lámina de fibra de carbono de acuerdo al diseño y se procede a colocarlo permitiendo la absorción del saturante.
- 8) Después de 3 a 5 minutos de absorción de la primera capa de saturante, se aplica la segunda capa.

- 9) Finalmente se coloca una última capa de epóxico que cubre todo el sistema y se corrigen las imperfecciones que subsistan. Esta última capa de epóxico protege la fibra del intemperismo, rayos del sol, ataques químicos, diversas condiciones climáticas, etc.

2.2 Material compuesto CFRP

El sistema CFRP es un compuesto de matriz polimérica, el cual es un material que consiste en un polímero incorporado a una fase de refuerzo como fibras o polvos. Consiste en una fase primaria de polímero en la cual es embebida una fase secundaria a base de fibras, partículas u hojuelas. Estos materiales son de buenas propiedades mecánicas, resistentes a la corrosión y a los agentes químicos y debido a sus características pueden moldearse en diversas formas, las cuales ofrecen una resistencia predominante en una dirección del elemento de concreto armado, siendo típica su colocación en la dirección donde las propiedades mecánicas sean desfavorables o críticas.

El sistema CFRP se basa en dos principales materiales: las fibras de refuerzo y la matriz polimérica (resinas termoestables y termoplásticas; sirven como material que engloba el refuerzo).

Las resinas pueden distinguirse en dos grupos:

- 1) Resinas termoplásticas: pasan de ser blandas y flexibles al calentarse y de preferencia debe moldearse cuando se calientan.
- 2) Resinas termoestables: suelen ser líquidas o sólidas. Estas resinas se pueden combinar con un reactivo, sometidas a calor. Una vez curadas, estas resinas se endurecen y no recuperan su forma original líquida.

Las resinas más utilizadas en la industria son poliésteres insaturados, resinas epóxicas, resinas vinilester y fenólicas.

La resina de base epóxica es la resina más utilizada actualmente en la reparación y reforzamiento externo con bandas y platinas de CFRP para elementos de concreto armado. Como principales cualidades se tiene que: permite alcanzar el mayor desempeño del sistema CFRP, buen desempeño en elevadas temperaturas, excelente adhesión al sustrato de concreto, etc.

Las resinas están presentes durante la aplicación del compuesto CFRP, tanto para el tratamiento de la superficie como en el saturado de las fibras de refuerzo. Las proporciones de volumen de resina a fibra están debidamente indicadas en los manuales de cada proveedor.

2.2.1 Fabricación del CFRP

El componente más importante de la fibra de carbono es el PAN (poliacrilonitrilo). El poliacrilonitrilo es un polímero de vinilo, un derivado de la familia de los acrilatos polimerizados. Está hecho de monómero de acrilonitrilo mediante polimerización de vinilo por radicales libres. Los hilos de PAN entrelazados conforman la fibra de carbono. El hidrocarburo está constituido principalmente de carbono, el cual procede de una fuente de fósiles orgánicos, por lo que, la mayoría de los componentes de la fibra de carbono provienen de los hidrocarburos.

El procedimiento más utilizado para producir la fibra de carbono es que se describe a continuación: cuando se tiene el material a temperatura de 300 °C, la fibra de carbono es estirada en un horno especial, provocando el alineamiento de las moléculas para su estabilización. Después de 1000 °C se queman los rastros de nitrógeno o hidrógeno y las moléculas de carbono se orientan de forma hexagonal a lo largo de la fibra.

Adicionando un nuevo periodo de calentamiento a 2000 °C, se le aplica finalmente un catalizador que provee de adherencia a la fibra. El resultado obtenido son filamentos de carbono con una pureza del 95 al 99 %. Este material es trefilado a diámetros microscópicos (5 veces más fino que un cabello humano). Los hilos trefilados de carbono se les conocen como “mechas de carbono”, estas mechas se trenzan en ambas direcciones de manera que se forme una tela. (Bazán, 2015)

2.2.2 Características y aplicaciones.

2.2.2.1 Características físicas:

La aplicación de bandas con espesores reducidos (entre 0.17-1.5 mm) mantiene la estética y no genera un impacto visual, la baja densidad de las bandas que varían entre 300 a 600 g/m² tampoco adiciona mayor peso al elemento. La eficiencia de la adición del reforzamiento de vigas de concreto armado con el sistema CFRP, pueden aumentar la primera carga de fisura y la resistencia final en gran medida, detienen la expansión del agrietamiento progresivo y mejorar la rigidez del elemento (Dong, 2012).

En contraposición a los beneficios mencionados se tiene que; las bandas de CFRP tienen una pobre resistencia al fuego por su naturaleza inflamable. Los coeficientes de expansión térmica de las resinas son mayores a los del concreto, pero influye en la adherencia para pequeños cambios de temperatura $\pm 28^{\circ}\text{C}$.

2.2.2.2 Características mecánicas:

Elevada resistencia a la tracción, con esfuerzos últimos en el orden de 800 a 3000 MPa. Pobre resistencia a compresión. Sus propiedades varían en cada dirección que se coloque longitudinalmente.

Los sistemas FRP como el carbono y aramida no presentan flujo plástico bajo cargas sostenidas, a diferencia de las fibras de vidrio que pueden ceder en deformación bajo carga de tracción sostenida.

Las características mecánicas de los compuestos de fibra de carbono se diferencian por su conformación, material y método de construcción. El sistema FRP presenta un comportamiento lineal elástico hasta la falla, los sistemas híbridos que son hechas con combinación de 02 materiales como los de carbono y vidrio o carbono y aramida, presentan un comportamiento lineal similar al acero hasta la falla, el mismo que se muestra en la Fig. 2.1. Donde también se muestra el comportamiento lineal elástico del sistema GFRP (Glass-Fiber Reinforced Plastic, por sus siglas en inglés) que es el sistema de plástico reforzado con fibra de vidrio el cual es un material compuesto, Reforzado con matriz de plástico o fibra de vidrio No es raro que este material se denomine informalmente "fibra de vidrio".

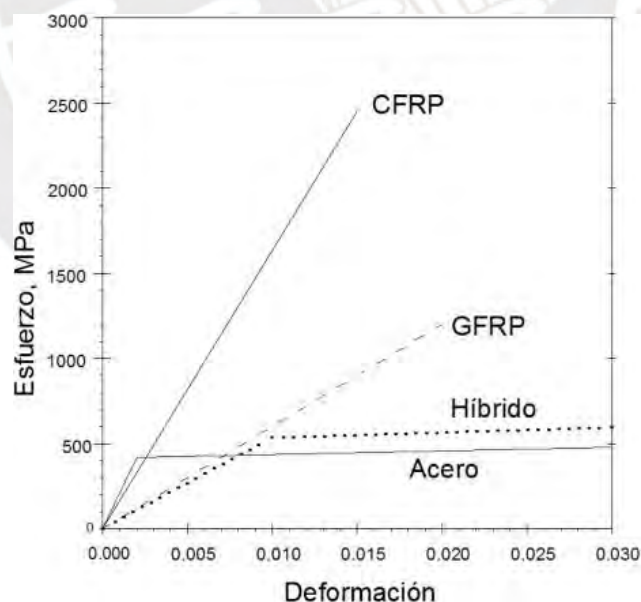


Figura 2.1. Curvas Esfuerzo-Deformación sistemas FRP comparadas con el acero, adaptada de Bazán (2015)

El comportamiento del sistema CFRP en compresión no está determinado. El modo de falla prominente es el pandeo de la banda, variando desde el pandeo total del elemento estructural hasta el pandeo local de las microfibras.

2.2.2.3 Durabilidad:

Los estudios han demostrado que el sistema FRP de fibra de carbono (CFRP) tiene buena resistencia a ambientes ácidos o alcalinos. La guía ACI 440.2R (ACI, 2008) recomienda la selección de sistemas de recubrimiento protector de acuerdo a las condiciones del ambiente al que se verá expuesto el elemento reforzado

Un sistema de recubrimiento protector es altamente recomendable para incrementar la resistencia del compuesto frente a efectos producidos por la humedad, agua de mar, temperaturas elevadas, exposición al fuego, rayos, ultravioleta (UV), etc.

2.2.2.4 Aplicaciones:

Como bandas de CFRP en refuerzos externos para elementos estructurales a flexión y corte como se muestra en la Fig. 2.2 (vigas, columnas, losas y muros). Brindan un confinamiento extra para mejorar la capacidad de compresión

Como platinas de CFRP, puede ser un refuerzo interno o externo (cercano a la superficie) para mejorar las propiedades a flexión y corte de elementos estructurales Fig. 2.3 (vigas, columnas, losas y muros).



Figura 2.2.. Reforzamiento de viguetas con bandas de CFRP, Sunat Arequipa, adaptada de Sika (2014)-
 (a) Colocación de resina epóxica, (b) colocado final de bandas de CFRP



Figura 2.3 Viga de concreto armado reforzada con sistema CFRP, ejecutado por Top Consult Ingeniería (2016)

2.3 Falla de elementos de concreto armado reforzadas con bandas de CFRP

El material CFRP puede ser una alternativa perfecta a los materiales convencionales para la rehabilitación, refuerzo y reparación de estructuras concreto armado existentes, así como en nuevas construcciones como alternativa al refuerzo de acero (Zaman, Gutub et al., 2013; Zhong, Wang et al., 2013; Kalavagunta, Naganathan et al.; 2014, Danraka, Mahmud et al., 2017; Dushimimana, Ziada et al., 2018) Debido al empleo generalizado de CFRP en aplicaciones de refuerzo, muchos estudios teóricos y experimentales se han centrado en estudiar el comportamiento de vigas de concreto armado reforzadas externamente. La mayoría de estos estudios han informado que el CFRP bien adherido ha mejorado la resistencia a la flexión de los elementos estructurales y mejorado su rigidez y durabilidad (Toutanji, Zhao et al.,2006; Li, Xie

et al., 2009; Lavorato, Bergami et al., 2018). Sin embargo, algunos otros estudios han informado que el CFRP aplicado en forma insuficiente puede desprenderse fácilmente de la superficie del concreto en algún punto de carga, ya que la superficie de contacto plana entre las láminas de CFRP y el concreto no puede resistir las fuerzas de tracción aplicadas por completo (Smith y Teng, 2002; Teng y Chen, 2007; Mostofinejad y Shameli; 2011; Fareed (2014), Sattarifar, Sharbatdar et al., 2015).

Para superar el problema del desprendimiento de CFRP, se han desarrollado algunas técnicas alternativas para "tratar" la superficie del hormigón antes de instalar el CFRP como la adición de ranuras rectangulares para una adición de mayor eficacia en elementos reforzados (Mashrei, 2019) y la colocación de bandas U transversales en los extremos de los elementos rectangulares de concreto armado (Baca, 2010; Proaño, 2011 y Bazán, 2015). para evitar el desprendimiento prematuro del reforzamiento externo de CFRP. Tener conocimiento sobre los tipos de falla que se pueden presentar en el refuerzo externo de vigas de concreto armado es fundamental.

2.3.1 Fallas comunes en vigas de concreto armado con refuerzo CFRP

- a) Falla por acción compuesta entre el concreto y el refuerzo externo.

Este tipo de falla se debe predominantemente por la rotura del concreto en compresión antes de alcanzar la fluencia del acero de refuerzo. La naturaleza frágil de esta falla es la menos favorable debido a que no se aprovecha la capacidad máxima del acero. Esta falla puede originarse por falta de ancho del bloque de compresión, baja resistencia en el concreto, cuantía de acero y FRP elevada frente a la capacidad del concreto. También se observó la ruptura de la banda de FRP después de la fluencia del acero, siendo este tipo de falla deseable en zonas de elevado riesgo sísmico, pues se tiene una mayor capacidad de deformación y liberación de energía. Ambas situaciones se muestran en la Fig. 2.4.

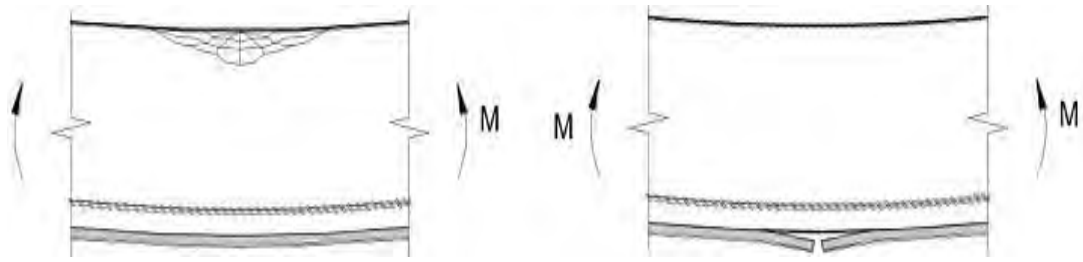


Figura 2.4. Falla por rotura del concreto (izquierda), Ruptura de la platina de FRP (derecha). Proaño (2011)

b) Falla por pérdida de acción compuesta entre el concreto y la banda de FRP.

La falla por despegue prematuro de la banda de FRP del sustrato de concreto se produce por la utilización de adhesivos inadecuados, de baja resistencia, o no se tiene preparada la cara del sustrato de concreto (Agrietado, carbonatado, deficiente nivelación, sucios, etc.). También puede presentarse una de laminación extrema en los extremos reforzados de los elementos debido a que en los extremos de la banda de refuerzo se concentran las mayores fuerzas de cortante en la interface de ambos materiales, de esta manera es que el adhesivo inicia una etapa de desprendimiento, la Fig. 2.5 muestra los 3 casos de falla del sustrato con él sistema CFRP.

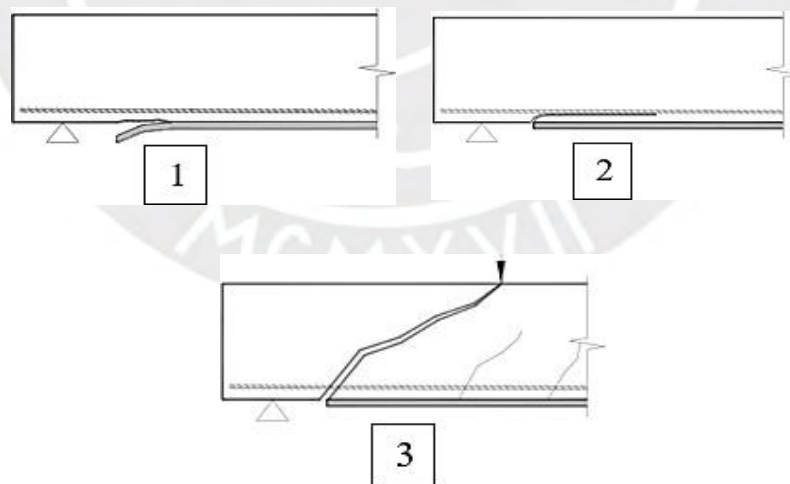


Figura 2.5. Fallas en extremos (1,2) y falla por cortante en extremo de la banda (3), (Proaño ,2011)

Es común utilizar bandas en U en los extremos, como se muestra en Fig. 2.6, lo que permite evitar las fallas por delaminación o desprendimiento, sea la falla por corte o por tracción, otorgando un efecto confinante en el elemento estructural.

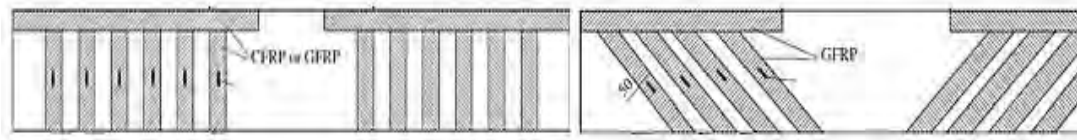


Figura 2.6. Refuerzos U en los extremos verticales y diagonales. (Dong, 2012).

También pueden ocurrirse fallas por fatiga debido a la imposición de cargas repetidas, en la mayoría de casos este tipo de falla está asociada principalmente con una fractura inicial de las barras de refuerzo en elementos de concreto armado, en estos casos las magnitudes de estrés creciente en las barras de refuerzo de acero determinan la resistencia a la fatiga del elemento, no obstante, los ensayos experimentales sugieren que el uso de reforzamiento con CFRP puede modificar el límite de resistencia de las barras de refuerzo haciéndolas ligeramente superiores, una de las principales razones podría ser que la presencia del refuerzo externo CFRP controla el ancho de la grieta como su crecimiento lo cual es beneficioso respecto a la resistencia a fatiga del elemento reforzado porque reduce la concentración de esfuerzos en el acero y en mayor medida en los puntos de fisura (Meneghetti, 2011)

2.3.2 Consideraciones de la norma ACI – 440 2R 2008 para evitar fallas por pérdida de adherencia.

La norma ACI fue seleccionada para el diseño de los especímenes en este trabajo de investigación por basar la filosofía de diseño a la norma de diseño de concreto estructural ACI-318 que a su vez sirve de base de diseño para la norma de diseño peruana, además de ser la guía de diseño utilizada por fabricantes y empresas de nuestro territorio. Esta normativa introduce un valor límite para las deformaciones en fibras de tracción ϵ_{fd} , la Fig. 2.7 ilustra las fuerzas internas y la distribución de tensiones para una sección rectangular bajo flexión en el estado límite final.

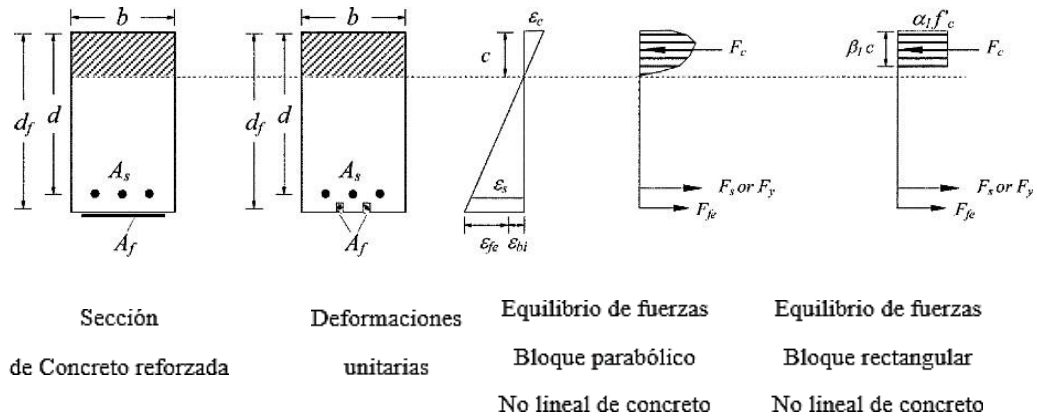


Figura 2.7. Esquema general para hallar la resistencia a flexión ACI 440-2R.

La norma ACI pone limite a la deformación efectiva (ϵ_{fe}) hasta un valor de (ϵ_{fd}) que depende de la calidad de concreto, rigidez y cantidad de capas de fibra de carbono. Otro valor de deformación inicial (ϵ_{bi}) de las capas en tracción durante la instalación del refuerzo de fibra de carbono, también debe ser tomada en cuenta. En este esquema para calcular la resistencia a flexión se deduce el momento nominal M_n , que se aprecia en la Ecuación (2-1).

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (2-1)$$

Donde: M_n = Momento resistente nominal por flexión.

A_s = Area del acero de refuerzo en tracción.

A_f = Area del refuerzo externo FRP.

f_s =

Esfuerzo efectivo en el acero de refuerzo por tensión.

f_{fe} = Esfuerzo efectivo en la fibra del sistema FRP.

ψ_f = Factor de reducción de resistencia a la flexión

aplicado a la contribucion del compuesto FRP.

d = Peralte efectivo de la seccion de concreto armado.

h = Peralte de la seccion de cocnreto armado.

c = Peralte de la zona comprimida.

β_1 = Parámetro del bloque de compresión de Whitney.

Las deformaciones y esfuerzos del elemento con el refuerzo externo, se calculan con las teorías usuales de la norma de diseño mostradas en las Ecuaciones. (2-2) a (2-4).

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (2-2)$$

Donde: ε_{fe} = Deformación unitaria efectiva del concreto

ε_{cu} = Deformación unitaria del concreto durante la falla en compresión

d_f = Distancia desde la fibra mas comprimida al centroide de acero en compresión.

ε_{bi} = Deformacion unitaria en el sustrato de concreto durante la colocación del FRP.

ε_{fd} = Deformacion unitaria de despegue.

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (2-3)$$

Donde: f_{fe} = Esfuerzo efectivo en la fibra del sistema FRP.

E_f = Modulo de elasticidad del refuerzo externo FRP en tensión.

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'c}{nE_f t_f}} \quad (2-4)$$

Donde: ε_{fd} = Deformación unitaria de despegue.

$f'c$ = Resistencia a compesión del concreto.

n = Relación entre módulo elástico del sistema FRP
y el del concreto.

t_f

= Carga de tensión trnasmitida por el refuerzo FRP en
el equilibrio de fuerzas por flexión.

La norma pone limite a los esfuerzos por cargas permanentes o cargas en etapa de servicio, los esfuerzos del concreto, acero y fibra de carbono no deben exceder:

- $f_c < 0.45f'_c$ Concreto en compresión
- $f_s < 0.8f_y$ Acero en tensión
- $f_f < 0.55f_{fu}$ Fibra de carbono

Es importante tener una longitud adecuada de adherencia entre el elemento de concreto armado y el refuerzo y que los extremos se encuentren anclados y/o adheridos en zonas sin agrietamientos importantes.

3. CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1 Introducción

Las estructuras de concreto armado y albañilería que se encuentran ubicadas en zonas sísmicas como la costa del territorio peruano, la cual se encuentra en parte del cinturón de fuego del pacífico, están expuestas a eventos sísmicos, los cuales, al generar desplazamientos y deformaciones en el sistema estructural, debilitan sus componentes. A través de las deformaciones que los elementos estructurales reciben, también se genera disipación de energía por parte de la resistencia y rigidez de los elementos estructurales, lo que permite a la estructura mantener sus propiedades mecánicas y un correcto desempeño. Esta disipación se obtiene de los daños causados al sistema estructural, los cuales pueden ser irreparables que pueden perjudicar la estabilidad estructural. La rigidez es un aspecto fundamental en el comportamiento estructural, este a su vez depende de los módulos de elasticidad, la geometría del elemento y el sistema completo. Los esfuerzos generados por el desplazamiento y las deformaciones, en el caso del concreto que se ve afectado por fuerzas de compresión y el acero a fuerzas de tracción generan un trabajo conjunto, mediante la limitación del refuerzo a la expansión lateral por medio del confinamiento del elemento estructural, lo que permite un mayor control de deformaciones y mantiene la resistencia a compresión del concreto.

En el presente capítulo se revisa el aspecto normativo de diseño de los especímenes de ensayo y las variables que se consideran para la correcta evaluación de los resultados y también las características de los elementos ante cargas cíclicas.

3.2 Diseño de elementos con comportamiento flexural

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga, estos elementos estructurales transmiten cargas externas transversales que provocan fuerzas de corte y momentos flectores en toda su longitud.

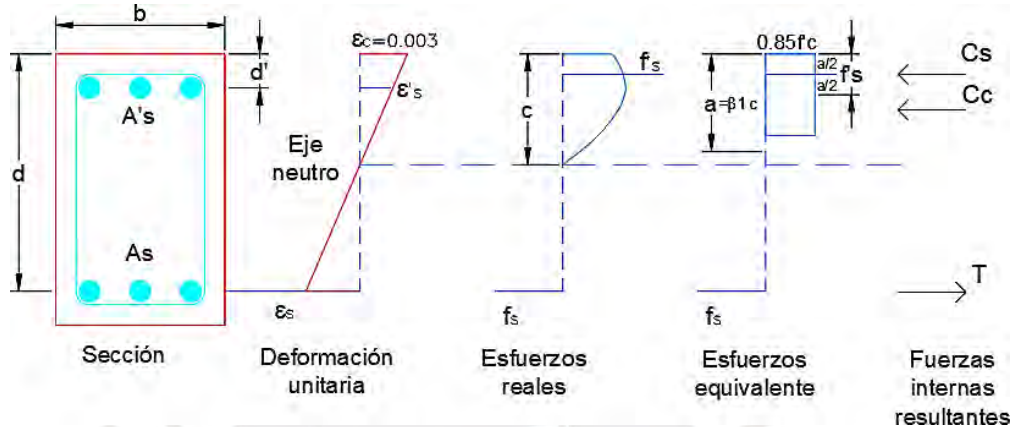


Figura 3.1. Sección de concreto doblemente reforzada cuando se alcanza la resistencia a flexión.

Se aprecia en la Fig. 3.1 una sección doblemente reforzada, en el límite de la resistencia a flexión. En el momento de alcanzar el momento máximo, la sección puede encontrarse en la resistencia de fluencia, dependiendo de las áreas de acero y su posición.

Suponiendo que el acero cede, $f_s = f'_s = f_y$, donde f_s es el esfuerzo en el acero a tensión, f'_s es el esfuerzo en el acero a compresión, y f_y es la resistencia de fluencia del acero. Siendo las resultantes:

Ecuación (3-1) Compresión en el concreto:

$$C_c = 0.85 f'_c a b \quad (3-1)$$

Donde: $C_c =$ Carga de compresion del concreto.

$a =$ *peralte comprimido del bloque de compresión equivalente.*

$b =$ *Ancho de la zona de compresión.*

Ecuación (3-2) Compresión en el acero:

$$C_s = A's f_y \quad (3-2)$$

Donde: $C_s =$ *Carga en compresión del acero.*

$A's =$ *Área del acero a compresión.*

Ecuación (3-3) Tensión en el acero:

$$T = A_s f_y \quad (3-3)$$

Donde: T

= Carga de tensión transmitida por el acero de refuerzo

Por equilibrio, se puede deducir que el peralte comprimido se puede expresar mediante las siguientes Ecuaciones (3-4) a (3-6):

$$C = C_c + C_s = T \quad (3-4)$$

$$0.85 f'_c a b + A's f_y = A_s f_y \quad (3-5)$$

$$a = \frac{(A_s - A's)f_y}{0.85(f'_c)b} \quad (3-6)$$

C

= Suma de cargas en compresión en el equilibrio de fuerzas por flexión.

El acero se encuentra en fluencia cuando la deformada excede : f_y/E_s . y de la semejanza de triángulos en el diagrama de deformaciones tenemos las deformaciones en compresión y tracción de las Ecuaciones (3-7) y (3-8), y las fuerzas de compresión y tracción ejercidas en los aceros de refuerzo Ecuaciones (3-9) y (3-10).

$$\varepsilon'_s = 0.003 \frac{c - d'}{c} = 0.003 \frac{a - \beta_1 d'}{a} \quad (3-7)$$

$$\varepsilon_s = 0.003 \frac{d - c}{c} = 0.003 \frac{\beta_1 d - a}{a} \quad (3-8)$$

$$f'_s = f_y \quad \text{Si } 0.003 \frac{a - \beta_1 d'}{a} \geq f_y/E_s \quad (3-9)$$

$$f_s = f_y \quad \text{Si } 0.003 \frac{\beta_1 d - a}{a} \geq f_y/E_s \quad (3-10)$$

Donde: $\varepsilon'_s =$ Deformación unitaria del acero en compresión

$d' =$ Distancia del extremo a compresión al centroide del acero en compresión.

$\varepsilon_s =$ Deformación unitaria del acero en tracción.

$f'_s =$ Esfuerzo efectivo en el acero por compresión

$f_s =$ Esfuerzo efectivo en el acero por tensión.

$E_s =$ Módulo elástico del acero de refuerzo.

Al mantenerse estas condiciones, es correcta la suposición de que todo el acero está en fluencia y tomando momentos alrededor del acero a tensión, la resistencia última a flexión M_u se considera en la Ecuación (3-11):

$$M_u = 0.85 f'_c ab \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d') \quad (3-11)$$

Cuando las comprobaciones mediante las ecuaciones 3.7 y 3.8, muestran que el acero no cede, el valor de “a” calculado es incorrecto, debe calcularse el esfuerzo real a partir de la ecuación de equilibrio y del diagrama de deformación, en tal sentido se expresa el valor de “a” en la Ecuación (3-12):

$$a = \frac{A_s f_s - A'_s f'_s}{0.85 (f'_c) b} \quad (3-12)$$

En el que del diagrama de deformaciones se deduce las Ecuaciones (3-13) y (3-14) para las fuerzas tensionantes en los aceros y donde el M_u se expresa en la Ecuación (3-15)

$$f'_s = \varepsilon'_s E_s = 0.003 \frac{u - \rho_1 u}{a} E_s \quad (3-13)$$

$$f_s = \varepsilon_s E_s = 0.003 \frac{\beta_1 d - a}{a} E_s \quad (3-14)$$

$$M_u = 0.85 f'_c ab \left(d - \frac{a}{2}\right) + A'_s f'_y (d - d') \quad (3-15)$$

En vigas doblemente reforzadas pueden ocurrir fallas a tensión y compresión iguales a vigas simplemente reforzadas. En vigas reales el acero de refuerzo a tensión siempre está cediendo y frecuentemente la deformación en el nivel del acero de compresión es suficiente grande para que de igual manera ese acero este en esfuerzo de fluencia. El acero en compresión cede mientras mayores sean los valores de a , d' y f_y .

3.3 Ductilidad de vigas de concreto armado.

El uso del sistema de refuerzo externo FRP reduce considerablemente la ductilidad de los elementos estructurales, cuando la ductilidad de la sección reforzada es muy baja debe ser compensada con una alta resistencia la cual debe someterse a un factor de reducción de resistencia a flexión ϕ .

Los factores de ductilidad y deformabilidad son parámetros que para evaluar la sobre resistencia inelástica que poseen los elementos estructurales de concreto armado

Conocida como la capacidad de un elemento estructural para sufrir deformaciones plásticas sin tener degradación de su resistencia. Esta representa variables asociadas a la disipación de energía dentro de la etapa plástica que posee el material, secciones y la estructura total.

Además, la ductilidad puede entenderse como la habilidad de la estructura, elementos o materiales usados para ofrecer resistencia en el rango inelástico, habilidad para sostener grandes deformaciones y capacidad de absorber energía dentro del comportamiento histerético.

La ductilidad de curvatura μ , es el cociente de la curvatura o rotación en la máxima capacidad de soporte en la falla última ϕ_u , entre la curvatura para la primera fluencia del acero en tensión ϕ_y . Mostrada en la Ecuación (3-16)

$$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (3-16)$$

La ductilidad es un importante atributo de los materiales con capacidad de deformación, sin la pérdida de capacidad bajo grandes solicitaciones. El concepto de ductilidad tiene significación importante debido a su comportamiento “carga – deformación” en miembros estructurales de concreto armado (losas, vigas, y muros). Estos elementos pueden ser afectados por deformaciones visibles, dando advertencia de fallas estructurales.

La ductilidad es definida como una respuesta positiva cuanto a la capacidad de una estructura o elemento para deformarse inelásticamente durante varios ciclos de carga y descarga sin presentar degradación de rigidez (Priestley, 1996).

Existen factores que afectan la ductilidad en flexión: disminución de cuantía de refuerzo en tracción, incremento de cuantía d refuerzo en compresión, disminución en refuerzo de fluencia del acero, incremento de resistencia en el concreto y debido al confinamiento adicional que incrementa la deformación unitaria del concreto. (Park y Paulay, 1975)

La ductilidad teórica en un sistema reforzado con FRP, puede hallarse del desarrollo de las relaciones constitutivas de los materiales, así como del mecanismo interno existente. De la Fig. 3.2 donde se muestra el diagrama de fuerzas y deformaciones del elemento reforzado, se deduce que la curvatura en la fluencia se expresa como en las Ecuaciones (3-17) y (3.18):

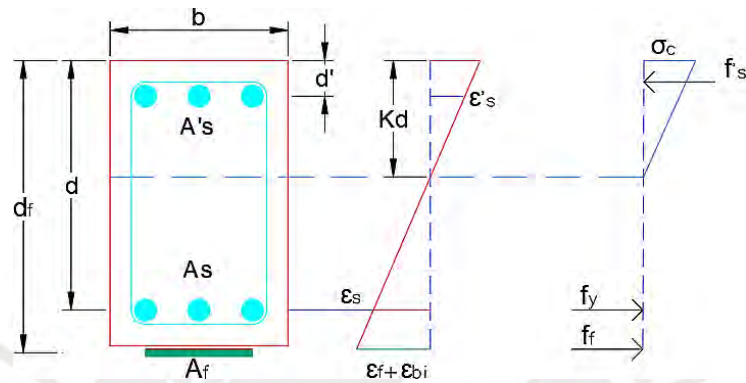


Figura 3.2. Viga de concreto armado externamente reforzada en el límite elástico por flexión.

$$\Phi_y = \frac{\epsilon_y}{d - Kd} \quad (3-17)$$

$$\Phi_y = \frac{f_y/E_s}{d(1 - K)} \quad (3-18)$$

Donde el factor "K" se obtiene de las relaciones en estado elástico para la sección agrietada. Mostrada en la Ecuación (3-19)

$$K = \sqrt{(n\rho + n\rho' + n_{frp}\rho_f)^2 + 2n(\rho + \rho')\frac{d'}{d} + 2n_{frp}\rho_f\frac{d_f}{d} - n(\rho' + \rho) - n_{frp}\rho_f} \quad (3-19)$$

Donde: n = Relación de módulos entre acero y concreto.

ρ = cuantía de refuerzo por tracción.

ρ' = cuantía de refuerzo por compresión.

n_{frp} = Relación de modulo entre FRP y concreto.

ρ_f = Cuantía de refuerzo FRP.

La curvatura última (Φ_u) de la viga puede obtenerse de la Fig. 3.3, ya sea por falla del sistema FRP (desprendimiento, ruptura o delaminación) o por aplastamiento, donde el sistema FRP alcanza la deformación límite $\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd}$ antes que el concreto llegue a su estado último. Φ_u se expresa en las Ecuaciones (3-20) y (3-21).

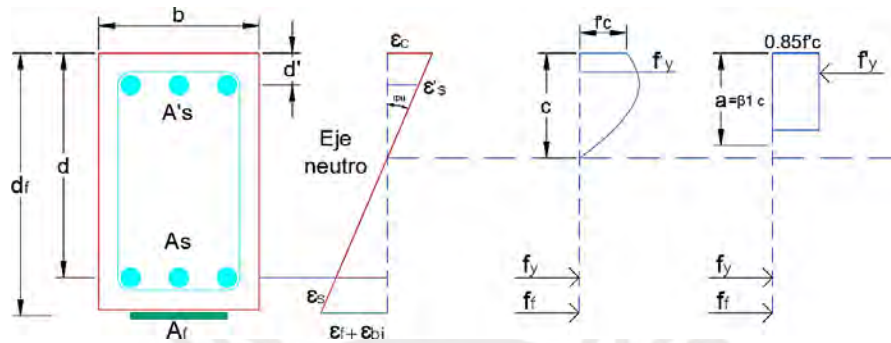


Figura 3.3. Viga de concreto armado reforzada con FRP, estado último.

$$\Phi_u = \frac{\varepsilon_c}{c} = \frac{\varepsilon_{fd} + \varepsilon_{bi}}{d - c} \quad (3-20)$$

$$\Phi_u = \frac{\varepsilon_{fd} + \varepsilon_{bi}}{d_f - \frac{a}{\beta_1}} \quad (3-21)$$

Donde:
$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_i * (h - c)}{E_c * I}$$

ε_{bi} = deformación inicial en la zona de concreto en la zona donde se colocará la fibra de carbono.

La variable "a" se determina con la siguiente Ecuación (3-22):

$$a = \frac{A_s f_y + A_f f_{fd} - A'_s f'_s}{0.85(f'c)b} \quad (3-22)$$

3.4 Diseño de refuerzo a flexión

El diseño del refuerzo externo de vigas de concreto armado con bandas de fibra de carbono se ha venido realizando siguiendo las recomendaciones estipuladas en la guía ACI 440, debido a que estas consideraciones se basan en el diseño tradicional de concreto

armado según el ACI-318, el cual es utilizado ampliamente en el territorio conjuntamente con la norma peruana de diseño.

El reforzamiento externo con fibras de carbono CFRP debe ser diseñado para resistir fuerzas de tensión mientras se mantiene la compatibilidad de deformaciones entre la banda de refuerzo y el sustrato de concreto, en consecuencia, el diseño está relacionado con la compatibilidad de deformaciones y el equilibrio interno de fuerzas en el elemento.

Según la filosofía de diseño, es aplicable el diseño para estados límites, estableciéndose niveles aceptables de seguridad para estados límites de servicio (excesiva deflexión o agrietamiento) y estados límites último (fractura del concreto, esfuerzos de rotura y fatiga). El diseño debe estar establecido en concordancia con los requerimientos de resistencia y serviciabilidad, usando factores de carga indicados en la normativa.

3.4.1 Resistencia Nominal

La guía ACI 440.2R, indica que la resistencia de diseño debe ser mayor al momento último, mostrado en la Ecuación (3-23), el cual debe calcularse usando los factores de carga del reglamento ACI 318-08 (ACI,2008)

$$\Phi M_n \geq M_u \quad (3-23)$$

3.4.2 Deformación última del compuesto FRP

Como se mencionó en el capítulo II, para evitar una falla por delaminación, la guía limita el nivel máximo de deformación del FRP a un nivel óptimo en relación al desprendimiento del sistema, ε_{fd} . Ecuación (3-24).

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{n_f E_f t_f}} < 0.9 \varepsilon_{fu} \quad (3-24)$$

3.4.3 Resistencia de elementos rectangular en estado ultimo

Los cálculos de la guía se basan en el cumplimiento de la compatibilidad de deformaciones y el equilibrio de cargas. Se inicia el procedimiento con la selección del parámetro c (altura del eje neutro), obtenido de la deformación del sistema FRP, en el punto de falla por aplastamiento de concreto.

Luego, se verifica que el material controla la falla. Si $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$, Ecuaciones (3-25) y (3-26), donde el sistema FRP controla la falla; caso contrario, el concreto controla la falla.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (3-25)$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{c}{d_f - c} \right) \quad (3-26)$$

Se obtiene de igual manera la deformación del acero de refuerzo existente, mostrados en las Ecuaciones (3-27) a (3-29):

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) \quad (3-27)$$

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (3-28)$$

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (3-29)$$

Puede aplicarse el bloque de Whitney para el concreto, donde se obtienen resultados razonables, Ecuaciones (3-30) a (3-32):

$$\varepsilon'_c = \frac{.7f'_c}{E_c} \quad (3-30)$$

$$\beta_1 = \frac{.4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - \varepsilon_c} \quad (3-31)$$

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c'^2} \quad (3-32)$$

Se verifica el equilibrio de fuerzas para el valor estimado de “c”, Ecuación (3-33):

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b} \quad (3-33)$$

Iterar los valores de c hasta q el equilibrio se cumpla.

Finalmente, se calculan las fuerzas resistentes a flexión de cada material, mostradas en las Ecuaciones (3-34) y (3-35):

$$M_{ns} = A_s * f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (3-34)$$

$$M_{nf} = A_f * f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (3-35)$$

La resistencia de diseño a flexión ΦM_n será la mostrada en la Ecuación (3-36):

$$\Phi M_n = \Phi (M_{ns} + \Psi_f * M_{nf}) \quad (3-36)$$

Donde: $\Psi_f = \text{factor de reduccion de 0.85}$

3.4.4 Factor de reducción Φ

Al diseñar con el sistema de reforzamiento FRP a flexión, se reduce la ductilidad del elemento, dependiendo de la cuantía elegida para el reforzamiento. Para tener garantizado una ductilidad aceptable en el elemento, las deformaciones unitarias en el acero de tensión deben ser ≤ 0.005 al presentarse la falla de concreto o el sistema FRP. Se debe considerar lo indicado en la Ecuación (3-37).

$$\Phi = \begin{cases} 0.9 & \text{para } \varepsilon_t \geq 0.005 \\ 0.65 + \frac{0.25(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0.005 \\ 0.65 & \text{para } \varepsilon_t \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (3-37)$$

3.4.5 Condición de servicio

Debe cumplirse los requerimientos de servicio de acuerdo a deflexiones y ancho de agrietamiento, que se indican en la norma ACI-318. El efecto del sistema de refuerzo

de fibra en el estado de servicio puede estimarse por un análisis elástico agrietado de sección transformada.

Respecto al nivel de servicio del sistema FRP, la norma diferencia 2 tipos de cargas: Cargas estáticas (las cargas cuasi-estáticas, o cíclicas de baja frecuencia, son consideradas también como cargas estáticas) y bajo cargas cíclicas; ambos tipos presentan diferente comportamiento, sujeto a la acción del creep y la fatiga que pueda presentar el material FRP. Se muestra en la Tabla 3.1 los esfuerzos límites en el sistema FRP. Donde se compara el sistema GFRP que es un sistema de plástico reforzado con fibra de vidrio o el plástico reforzado con fibra de vidrio y el AFRP (Aramid Fiber reinforced polymer) que es un compuesto reforzado con fibras de aramida que son una clase de fibras de alta resistencia térmica y altas prestaciones mecánicas. Se trata de fibras de alto módulo, pero que presentan una rotura dúctil, en lugar de la rotura frágil que caracteriza a las fibras de carbono.

Tabla 3.1 Esfuerzos límites por servicio en el sistema FRP bajo carga estática y carga cíclica.

Tipo de carga	Tipo de Fibra		
	GFRP	AFRP	CFRP
Carga estática	$0.30 \cdot f_{fu}$	$0.50 \cdot f_{fu}$	$0.90 \cdot f_{fu}$
Carga estática más carga cíclica	$0.20 \cdot f_{fu}$	$0.30 \cdot f_{fu}$	$0.55 \cdot f_{fu}$

El diseño debe cumplir los requerimientos de deflexiones y ancho de grietas, indicados en la norma ACI – 318. El efecto del sistema FRP se estima mediante análisis elástico agrietado de sección transformada.

3.5 Comportamiento de estructuras ante cargas cíclicas

La rigidez, definida la medida cualitativa de la resistencia a la deformación elástica de un material y tiene en cuenta la capacidad de los elementos estructurales para soportar esfuerzos sin deformaciones importantes, la cual se ve afectada negativamente en los

elementos estructurales debido al agrietamiento producto de los esfuerzos de cargas en el sistema estructural.

Cuando un sistema estructural se ve afectado por un sismo, genera desplazamientos, el movimiento oscilatorio de la estructura provoca que las fuerzas inerciales cambien su dirección y generen las curvas de histéresis. El área de un ciclo de histéresis está relacionada directamente con la cantidad de energía que disipa un elemento estructural, es decir que a mayor desplazamiento y carga también incrementara la disipación de energía.

La naturaleza repetitiva de las cargas que afectan un sistema estructural, son principal causa del deterioro en los nudos que conforman el sistema estructural, primordialmente porque con cada ciclo de carga y descarga tanto positiva como negativa, la capacidad de carga disminuye, del mismo modo que la rigidez, debido a que la pérdida de resistencia implica incremento en la deflexión generando inestabilidad de la estructura. La envolvente de los ciclos de histéresis se reduce y disminuye la capacidad de disipar energía, en caso de presentarse un sismo que alcance un número necesario de ciclos que pueda llegar a agotar esta capacidad de disipación puede significar un motivo de colapso.

Durante el evento sísmico, el sistema estructural que oscila puede presentar efectos degradantes acumulativos con los sismos futuros, estos efectos influyen los elementos que forman parte de sistemas duales y porticados. Las cargas inerciales desarrolladas por las masas que varían su dirección, generando fenómenos locales de deterioro de la adherencia entre el refuerzo y el concreto, además de la ampliación de grietas a medida que se imponen los ciclos. Todo el movimiento del sistema genera momentos de

flexión y cortantes cuyos esfuerzos fisuran las fibras en tensión y compresión del elemento.

La Fig. 3.4 muestra una viga en voladizo sometida a una carga P en el extremo libre, P puede variar su magnitud y dirección, a medida que se alcanza los desplazamientos predefinidos se mide la carga asociada a cada posición de desplazamiento. Puede verse el deterioro del elemento por el agrietamiento producto de las cargas bi direccionales.

La imagen (a) muestra que una carga P que va de un punto de inicio hacia la derecha en el extremo en voladizo genera esfuerzos de tracción en la zona izquierda cercana al empotramiento, apareciendo agrietamientos sombreados en color negro, del mismo modo en la imagen (b) la carga P se muestra en sentido contrario (negativo) y genera esfuerzos de tracción en el lado derecho del elemento, los agrietamientos se ven sombreados de color negro. Finalmente, la imagen (c) se observa los agrietamientos sombreado en color negro, generados debido a un ciclo de carga positiva y carga negativa.

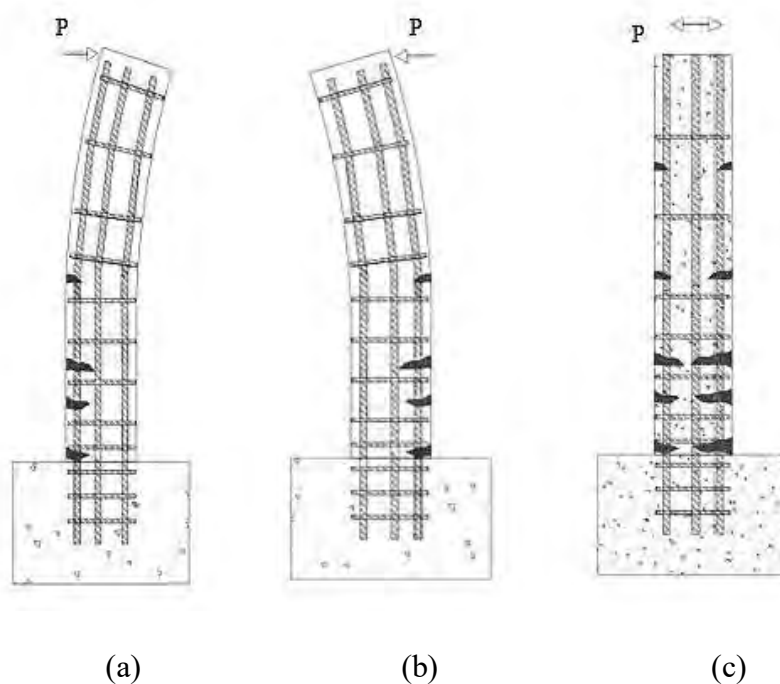


Figura 3.4. Efecto de la carga cíclica con deterioro de la rigidez y resistencia (Ramírez ,2012)

La Fig. 3.5 muestra gráficos de histéresis de esfuerzo vs deformación para vigas con reforzamiento simétrico, al momento de graficar la fuerza aplicada, contra el desplazamiento que se impone se conforman los ciclos histeréticos, los cuales continúan variando según la carga que se aplica a medida que los ciclos se desarrollan y la estructura disminuye su capacidad de disipar energía y los ciclos caen lo que implica una reducción de rigidez, sumadas a los efectos físicos en la longitud del elemento: propagación de grietas a lo largo de la longitud del elemento, ablandamiento debido a la tracción del concreto e inicio de la plasticidad del concreto en compresión (deformaciones cercanas a 0.002). El acero en compresión también puede ceder, esto depende de la magnitud de deformación impuesta y las deformaciones propias del elemento y dejar de contribuir a la rigidez tangente del elemento. Estos efectos negativos se ven compensados con el incremento en resistencia y rigidez del núcleo de hormigón, debido al inicio gradual del estado de esfuerzos triaxial en la zona comprimida.

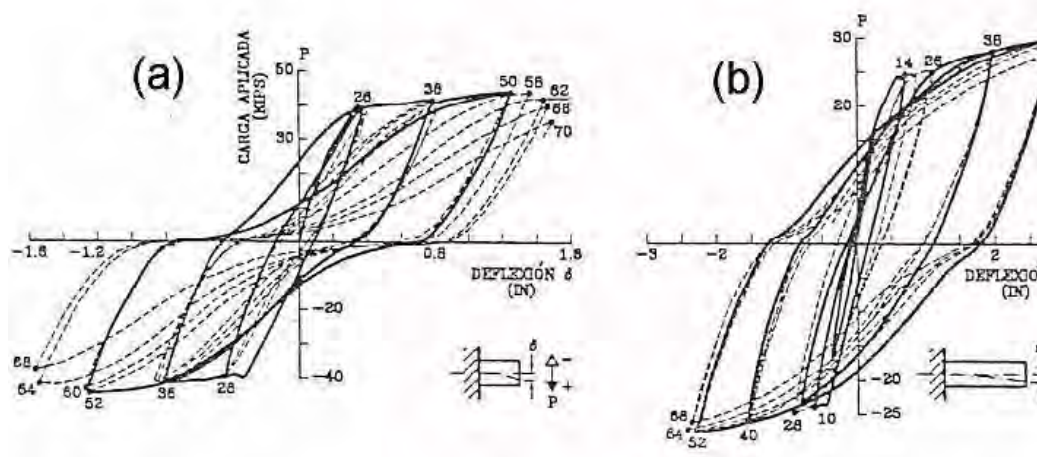


Figura 3.5. Relaciones esfuerzo –deformación de vigas con sección transversal y distribución del refuerzo simétrico (ACI Committee 318)

El refuerzo se concentra cerca de la parte superior e inferior de la sección transversal, la fluencia del acero de tracción en la sección de máximo momento se aprecia por el

ablandamiento abrupto de la respuesta esfuerzo- deformación. La resistencia del elemento incrementa aun después de la fluencia, debido a la reducción de profundidad del eje neutro, producto de la deformación posterior a la fluencia del acero de tracción.

El debilitamiento del concreto tiene un efecto negativo en la resistencia

Al realizar la descarga, la rigidez es alta, sin embargo, la rama de descarga se suaviza gradualmente hasta llegar a cero. La rigidez tangente decrece al incrementarse la deformación al inicio de la descarga. Esto es llamado “degradación de rigidez” que es típico del comportamiento de elementos de concreto armado. Al finalizar la descarga, existe una deflexión permanente que es el principal resultado de las deformaciones inelásticas permanentes producidas en el acero de tracción y del deslizamiento residual entre barras de refuerzo y concreto.

La curva de recarga de inversión de desplazamiento aplicada, es débil en un inicio, más que la parte final de la curva de descarga anterior. Esto se debe a que la inversión de carga produce agrietamiento en la otra cara del elemento a tracción, antes de que las grietas cierren. Las grietas en la zona de compresión se cierran gradualmente durante la recarga, esto produce una reactivación del concreto, manifestándose con un endurecimiento en la curva de recarga. Como el ablandamiento inicial del comportamiento de recarga y el endurecimiento posterior aparecen en la curva de recarga en dirección opuesta, los lazos de histéresis son apretados y tienden al origen.

A continuación, la curva de recarga se suaviza por la fluencia del acero, bajo el lado de tracción. El suavizado es más gradual que en la dirección previa, debido a que las barras de acero, que ahora ceden a tracción, podrían haber cedido a compresión durante la mitad del ciclo de carga anterior y exhibir una forma redondeada en la curva esfuerzo - deformación.

Las desplazamientos positivos y negativos en ciclos posteriores siguen esta misma interacción, pero con un comportamiento más débil, de manera que las curvas parecen dirigirse al punto más extremo de deformación previa.

3.5.1 Comportamiento del acero bajo cargas cíclicas

El comportamiento elástico de un material permite que el mismo regrese a su estado inicial después de aplicar un desplazamiento que no supere el rango elástico ϵ_y , sin tener alguna deformación permanente producto del desplazamiento.

Sin embargo cuando la deformación del acero supera a ϵ_y , este ingresa en la zona inelástica, pues al retirar el desplazamiento impuesto sobre el material, la trayectoria de la curva de descarga no ocurre siguiendo la misma trayectoria de carga sino que es paralela a la curva de ascenso, presentándose una deformación permanente. Fig. (3.6)

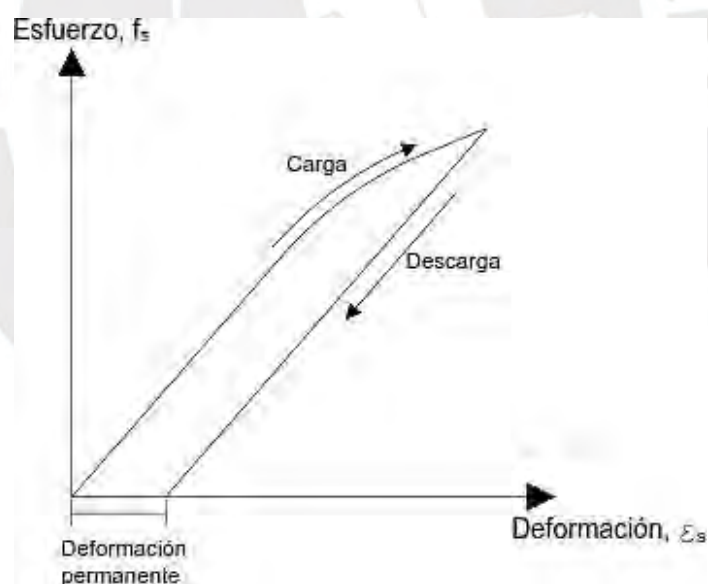


Figura 3.6. Ciclo de carga y descarga del material inelástico. (Moncayo, 2017)

La Fig. 3.7 muestra el material que es cargado desde el origen de coordenada cero (0) hasta el punto A; es descargado y toma una dirección AB. En ambas partes del proceso de carga y descarga, el material se comporta elásticamente. La deformación permanente se presenta cuando el material incursiona en el rango inelástico antes de

llegar al punto A, una parte de la energía de deformación que se necesita para llegar al punto A se acumula como energía potencial y es liberada en la descarga. Se aprecia en la Fig. 3.7 que, al reanudar la carga, a partir del punto B, el material comienza a comportarse como elásticamente, hasta que se encuentra en el punto C. Seguidamente en el punto D se retira la carga y el material llega al punto E de esfuerzo nulo. Cargando nuevamente en el sentido contrario a partir del punto E. A partir del punto F el material se comporta inelásticamente.

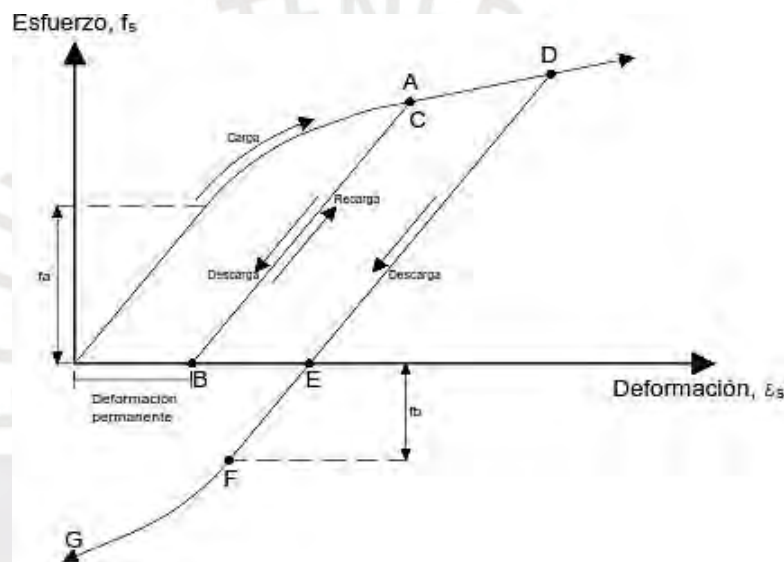


Figura 3.7. Efecto de carga y descarga, con inversión del sentido de carga. (Moncayo, 2017)

Al someter un material a una serie de ciclos de carga, descarga y carga en el sentido opuesto y los esfuerzos están por encima del límite elástico del material, se observa este tipo de comportamiento conocido como respuesta histerética.

3.5.2 Efecto Bauschinger

El efecto Bauschinger se conoce como el resultado experimental que, después de aplicar deformación plástica en una dirección, el material cederá a esfuerzos menores cuando la dirección de deformación es invertida. Se determina que la tensión de fluencia en compresión después de someter a una carga de tracción, es menor respecto

al ensayo de tracción. Se establece que la teoría de isotropía del material establece que ambas tensiones deben ser las mismas.

Las magnitudes del esfuerzo f_s (f_a^+ y f_b^-), mostradas en la Fig. 3.7, para las cuales el material pasa a tener un comportamiento plástico, tanto en el incremento de desplazamiento en ambas zonas, positiva y negativa de desplazamiento, en la carga inicial y la carga en sentido contrario. Se aprecia que f_a^+ es menor que f_b^- , lo que implica que el comportamiento no lineal del material inicia con una magnitud de esfuerzo menor al someter la carga opuesta. Esto se conoce como efecto Bauschinger.

Cuando un Acero de reforzamiento es sometido a cargas cíclicas dentro del rango inelástico. Desaparece la plataforma de fluencia y la curva esfuerzo-deformación exhibe el efecto “Bauschinger”, según el cual, el comportamiento no lineal comienza para un nivel de esfuerzo mucho más bajo que la resistencia inicial de fluencia. En consecuencia, las curvas esfuerzo vs. Deformación exhiben una forma redondeada durante la fluencia.

3.5.3 Histéresis y disipación de energía

Una vez superado el rango elástico de un elemento estructural, se inicia la disipación de energía mediante el agrietamiento o daño del elemento. La capacidad de disipación de energía, es la más objetiva identificación del comportamiento sísmico de miembros estructurales. La energía total que entra en un sistema se caracteriza por tener dos formas: Energía disipada y energía renovable. El área que se encuentra bajo la curva en 1 ciclo de carga-desplazamiento indica la capacidad de afrontar un movimiento sísmico a través de un comportamiento inelástico.

La capacidad de un material de responder inelásticamente está asociada con la ausencia de fallas frágiles, se evita reducir al máximo el riesgo de estas fallas, ya que si se

presentan una estructura no está en capacidad de resistir o de responder ante una carga dinámica. Para que esto no suceda, los materiales deben poseer ductilidad y resistencia la flexión que permitan soportar a los elementos en el rango inelástico sin provocar la falla.

Las relaciones Carga - Desplazamiento ($P - \Delta$) de elementos bajo cargas cíclicas (pseudo - estática) se muestran como curvas de histéresis, las cuales, además, otorgan un correcto entendimiento para un análisis sísmico elasto-plástico perfecto (Xue, 2008)

El área encerrada por los lazos de histéresis en cada ciclo de carga (positiva y negativa) es la respuesta de desplazamiento que indica la capacidad de energía disipada. (Tavakoli, 2016). La Fig. 3.8 muestra el esquema del diagrama de histéresis esperado de cada espécimen de ensayo en la presente investigación, el área bajo la curva del elemento será calculada por la fórmula de área de Gauss, donde se utilizan los valores de las envolventes de cada ciclo de carga para obtener la cantidad de energía disipada en el elemento y la cantidad de energía recuperable.

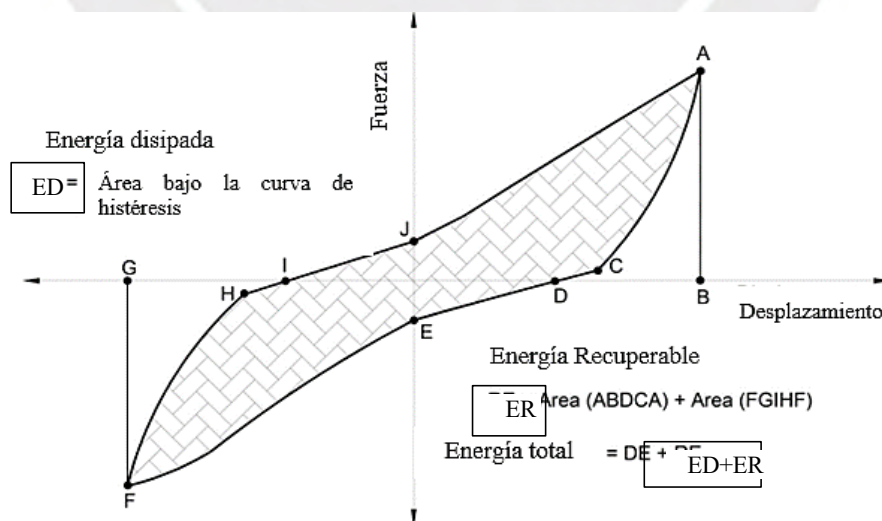


Figura 3.8. Esquema de parámetros de energía.

4. CAPÍTULO IV: DISEÑO EXPERIMENTAL

4.1 Introducción

En el presente capítulo se describen los procesos experimentales, detallado de especímenes de ensayo, materiales utilizados, la composición del ensayo y la adquisición de datos. El presente capítulo se conforma por:

- Descripción de los especímenes, geometría, cuantía de acero y CFRP.
- Materiales utilizados y los ensayos para cada uno: compresión del concreto, tracción del acero y tracción de una lámina de CFRP. Proceso constructivo de los cuatro (04) especímenes y la colocación del sistema CFRP.
- Descripción del procedimiento de ensayo, ciclos de carga y ubicación de los especímenes de ensayo.

4.2 Descripción de los especímenes.

Se tratan de ensayos de carga cíclica cuasi-estática controlada por desplazamientos laterales de cuatro (04) vigas de concreto armado con refuerzo externo de FRP, en la Tabla 4.1 se describen las características de los especímenes:

Tabla 4.1 Características de los Especímenes de ensayo.

Viga	f'_c (nominal)	A_s^+	A_s^-	n_f Flexión	n_f Compresión	Ø de anclaje FRP
VC	210 kg/cm ²	3 Ø 5/8"	3 Ø 5/8"	-	-	-
VE-01	210 kg/cm ²	3 Ø 5/8"	3 Ø 5/8"	1	1	3/4"
VE-02	210 kg/cm ²	4 Ø 5/8"+1Ø1/2"	3 Ø 5/8"	3	3	1"
VE-03	210 kg/cm ²	4 Ø 5/8"+1Ø1/2"	3 Ø 5/8"	1	1	3/4"

A_s = Área de acero en tensión y compresión (+/-)

n_f = # Capas FPR

(-) No hay dato.

Todos los especímenes son elementos de sección transversal de 250 mm de ancho x 400 mm de altura x 2150 mm de longitud (2000 mm de longitud de ensayo + 150 mm para colocación de dispositivo de imposición de carga). El acero corrugado utilizado es producido en el Perú.

Para la colocación de las armaduras se tuvo en cuenta lo siguiente:

- Limpieza de armadura (en el caso de este ensayo se utilizaron barras nuevas)
- Diámetro especificado
- Colocación de Armadura
- Verificación de estribos (Cantidad y espaciamiento)
- Verificación de anclajes en el empotramiento.
- Colocación de separadores metálicos
- Verificación de doblado (Gancho estándar)

Para todos los especímenes se utilizaron 13 estribos distribuidos de la siguiente manera: 01 a 05 cm de la base, 07 a 10 cm y 05 a 20 cm respectivamente. Se muestra en la Fig. 4.1 todas las características descritas previamente.

Los ensayos se desarrollaron en el laboratorio de estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú, en la ciudad de Lima, teniendo en consideración lo indicado en FEMA 461 “*Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components*”. Los experimentos fueron servo-controlados de manera automática (programada según un patrón de desplazamientos pre definidos) aplicando desplazamientos predefinidos por un sistema de adquisición de datos capaz de registrar las cargas impuestas y las deflexiones, LDVT (Transformador diferencial de variación lineal) colocadas a lo largo de la longitud de las vigas para controlar los desplazamientos laterales en la parte superior, media e inferior de las probetas. Con el registro de la información del sistema se pueden obtener gráficos preliminares de carga deflexión para el posterior tratamiento de la información.

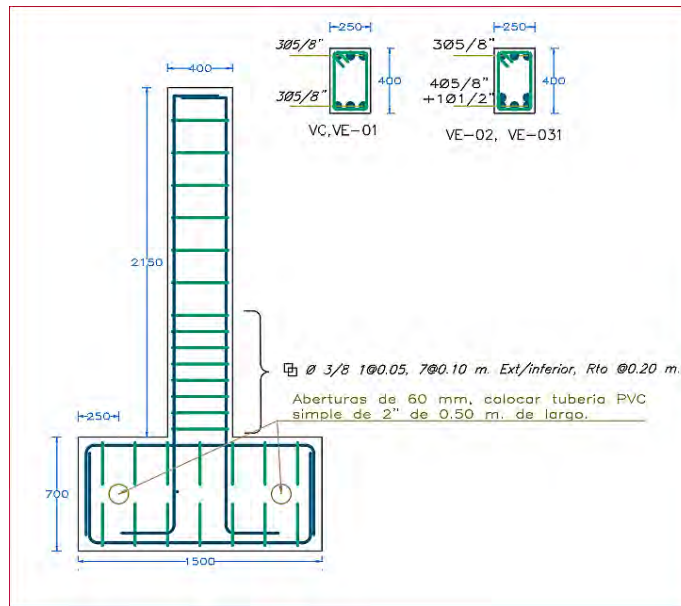


Figura 4.1. Características de los especímenes de ensayo: dimensiones y cuantía de acero de reforzamiento. (Fuente: Propia)

4.3 Materiales

Los materiales utilizados para el presente estudio son:

- Acero de refuerzo grado 60 –ASTM A615
 - $F_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$
 - $F_u = 6320 \text{ kg/cm}^2$
- Concreto:
 - $F'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días.
 - Tamaño máximo de agregado $3/4''$
- Refuerzo externo con CFRP de BASF: Tyfo SCH-41 de fyfe, En la Tabla 4.2 se muestran sus características.

Tabla 4.2 Características refuerzo externo CFRP

Sistema	Tipo de fibra	Peso (g/m ²)	Espesor de diseño (mm)	Resistencia a la tracción (MPa)	Modulo elástico (GPa)
Tyfo SCH-41	Carbono	644	1	985	95.8

- Resina BASF: Mbrace – Saturan (base 100% epóxica)
 - Modulo elástico de tensión de resina : 3034 MPa
 - Resistencia máxima en tensión ($\epsilon = 3.5\%$) : 55.20 MPa

4.3.1 Ensayo de materiales

Las Probetas de concreto premezclado, barras de acero corrugado y láminas de fibra de carbono que se utilizaron, fueron ensayadas en laboratorio para la obtención de sus valores reales. A continuación, se muestra los resultados obtenidos.

4.3.1.1 Ensayo de compresión de probetas de concreto

Para cada espécimen se ensayaron 3 probetas cilíndricas de concreto, realizando pruebas a los 28 días. La Tabla 4.3 resume la resistencia obtenida de cada probeta por cada espécimen, la resistencia característica de resistencia del concreto de 210 kg/cm².

Tabla 4.3 Resultados de ensayos a compresión de los especímenes.

Identificación	# Probeta	Sección (cm ²)	Resistencia (kg/cm ²)
Viga de Control	01	177	206
	02	177	211
	03	177	215
VE-01	04	177	218
	05	177	222
	06	177	201
VE-02	07	177	205
	08	177	219
	09	177	215
VE-03	10	177	212
	11	177	226
	12	177	214

Adicionalmente realizaron ensayos de 3 probetas a 45 días, para evaluar el incremento de resistencia, la Tabla 4.4 muestra los resultados, el promedio de resistencia es 242 kg/cm² que representa solo un 13% de incremento.

Tabla 4.4 Probetas ensayadas a compresión a los 45 días.

Descripción	# Probeta	Sección (cm ²)	Resistencia (kg/cm ²)
-------------	-----------	----------------------------	-----------------------------------

Probetas ensayadas a los 45 días	01	177	235
	02	177	254
	03	177	237

Para los cuatro especímenes de ensayo, cuyas probetas fueron curadas durante 28 días en condiciones distintas a los especímenes y ensayadas a compresión, se obtiene la resistencia de diseño esperada de la experiencia.

4.3.1.2 Ensayo de tracción de barras de acero corrugado Ø 3/8"

Para la obtención de las propiedades mecánicas del acero grado 60 utilizado en el experimento, como: esfuerzo de fluencia f_y y esfuerzo máximo f_u , se realizaron 3 ensayos de tracción simple a las barras utilizadas.

La Fig. 4.2 muestra la curva de esfuerzo deformación de las muestras de acero corrugado. Se tiene un esfuerzo de fluencia promedio de 4440.8 kg/cm^2 , un esfuerzo máximo de 7263.2 kg/cm^2 .

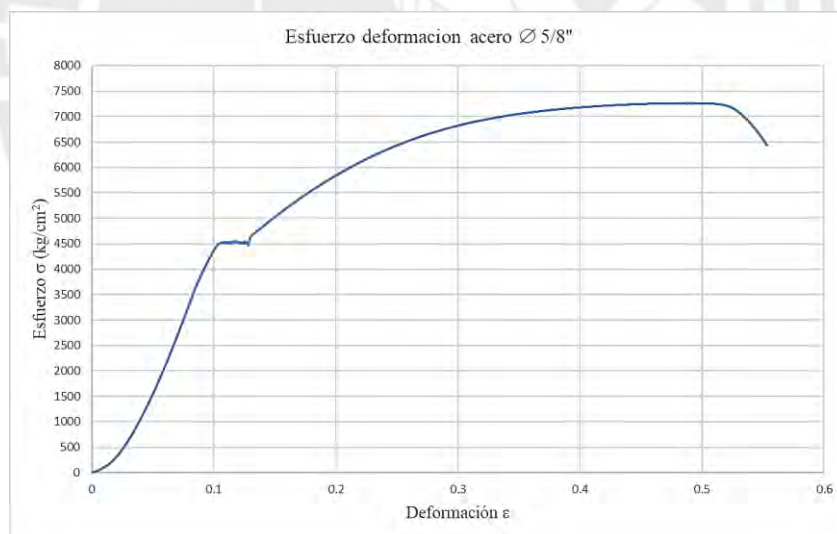


Figura 4.2. Curva Esfuerzo- Deformación acero de 5/8"

4.3.1.3 Ensayo de tracción de platinas de fibra de carbono.

Se realizó un ensayo de tracción para 03 muestras de fibra de carbono, la Fig. 4.3 muestra el comportamiento lineal elástico hasta la destrucción del espécimen ensayado, obteniéndose un esfuerzo máximo ultimo promedio de 9696.8 kg/cm^2 .

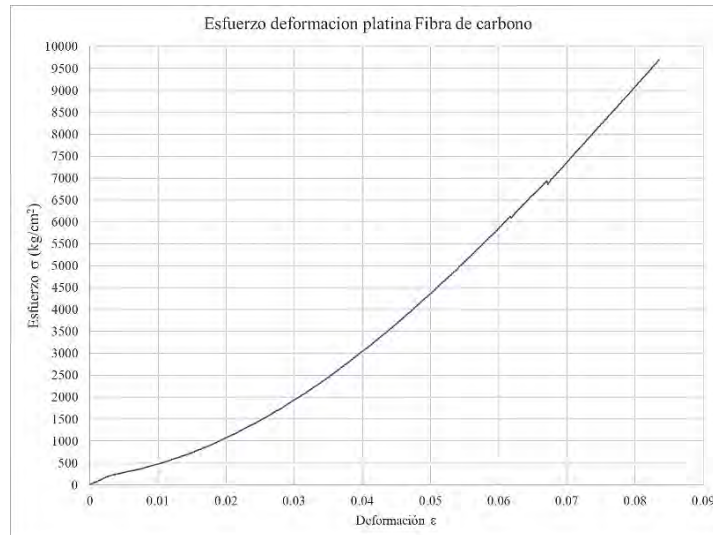


Figura 4.3. Curva esfuerzo- deformación de muestra CFRP.

Finalmente se muestra la curva comparativa de esfuerzo deformación de ambos elementos en la Fig. 4.4.

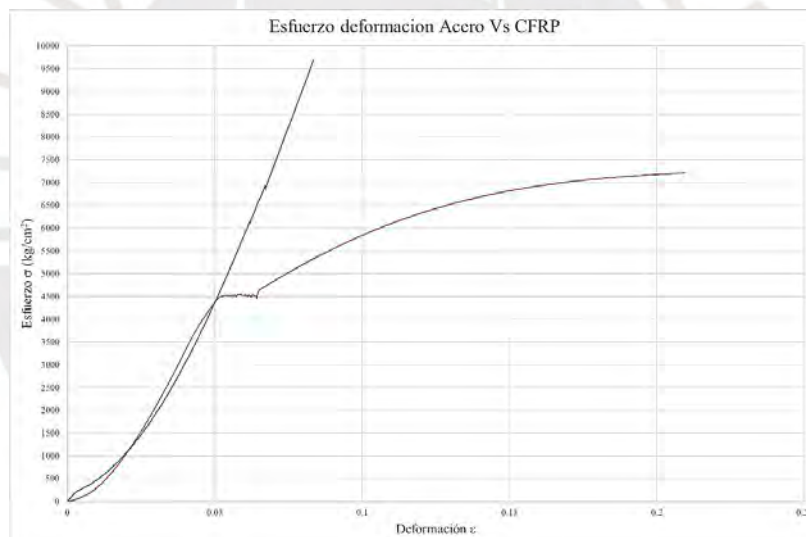


Figura 4.4. Comparación del ensayo tracción del acero y CFRP

4.4 Construcción:

La construcción de las 04 vigas fue realizada en el proyecto “Edificio Multifamiliar Azucenas” de la Constructora RF, ubicada en el Jr. Jacarandá En el distrito de las casuarinas, durante los meses de abril y mayo del 2019.

Todas las vigas están unidas a una base empotrada de sostenimiento, de dimensiones: 500 mm de ancho x 700 mm de altura x 1500 mm de largo por y, la cual fue diseñada

para fijar a la losa de ensayo en ambos extremos libres para el sostenimiento del actuador principal, además de tener un peralte adecuado para lograr una longitud de anclaje recto., dicho mecanismos se dispone primordialmente para prevenir algún desplazamiento vertical de toda la geometría del elemento.

La Fig. 4.5 muestra el esquema de ensayo de la viga en voladizo, en (a) la carga positiva provoca que el acero en la zona de tracción (A_s^+) trabaje, en (b) después de la descarga se aplica la carga en reversa la cual activa el trabajo del acero en la zona negativa (A_s^-)

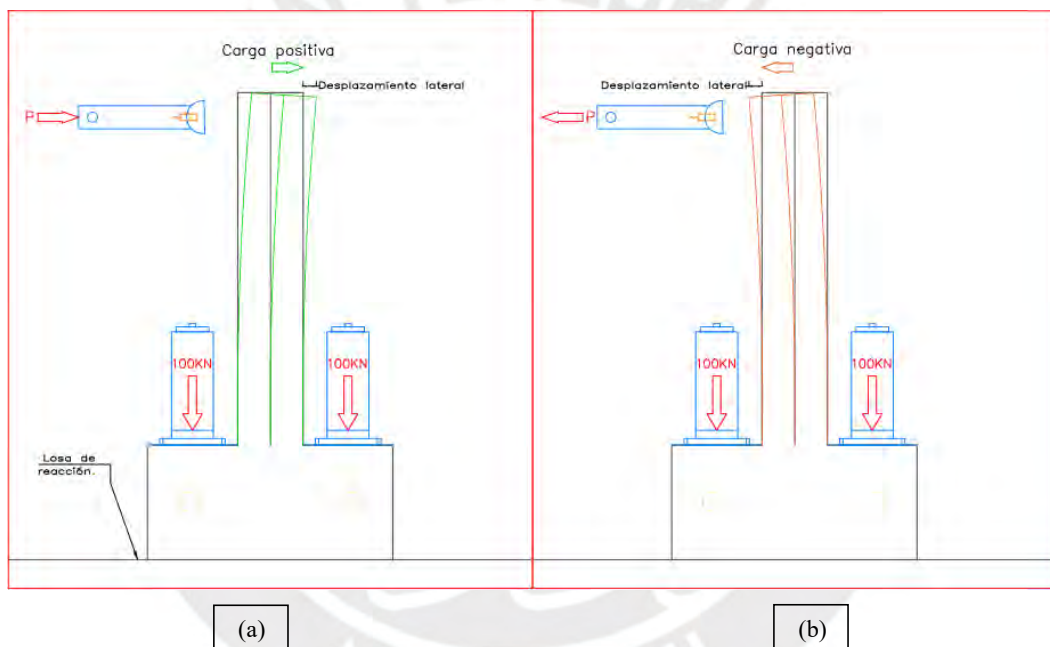


Figura 4.5. Esquema grafico de los topes de carga impuestas para fijar el Espécimen a la losa de ensayos, (a) carga positiva y (b) carga negativa.

Las zapatas contaron con 2 orificios para poder realizar el izaje por la grúa de laboratorio de estructuras antisísmicas en PUCP. La Fig. 4.6 y Fig. 4.7 muestran la geometría y el detallado de acero que se utilizó para la construcción de los especímenes y el armado de acero, encofrado y vaciado de concreto respectivamente.

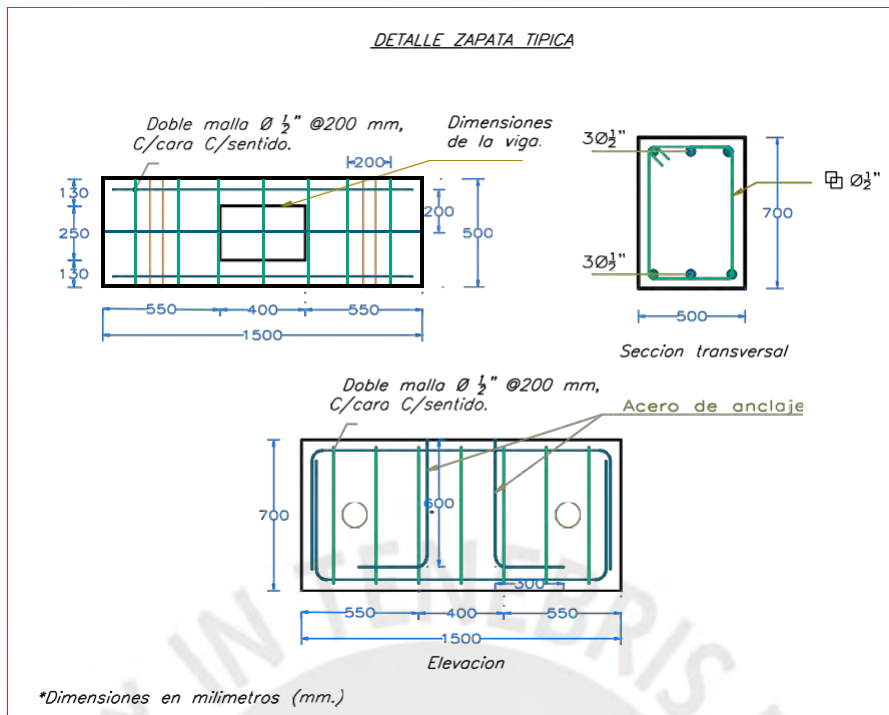


Figura 4.6. Características de la base de sostenimiento. (Fuente: Propia)

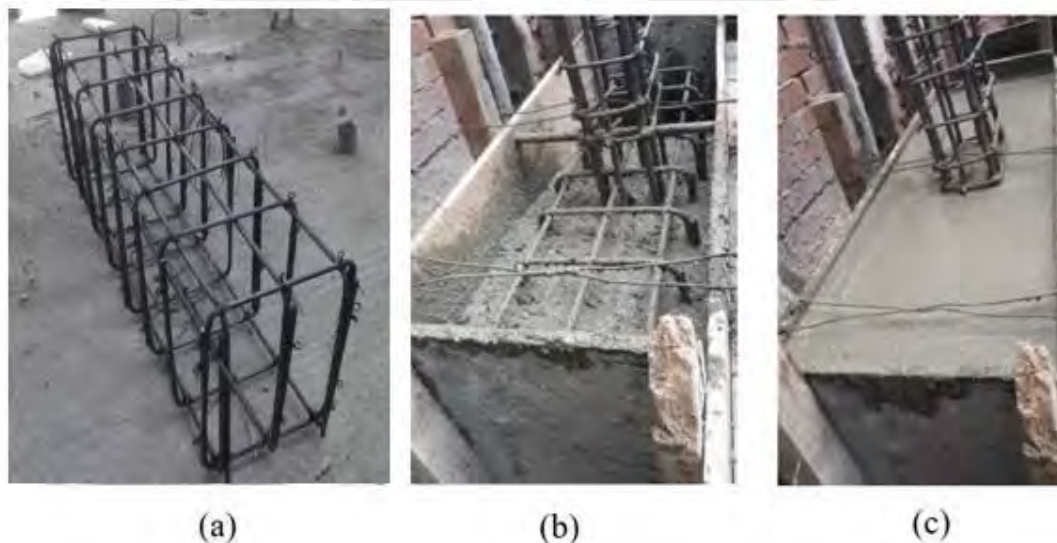


Figura 4.7. Construcción de zapata: (a) Armado de acero de refuerzo, (b) Colocado de concreto $F'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, (c) acabado final de zapata. (Fuente: Propia)

Las investigaciones realizadas en el ámbito nacional (Baca, 2005; Proaño, 2011; Bazar, 2015) se realizaron con imposición incremental de desplazamientos horizontal es en la región media de la longitud hasta la falla, a diferencia de este estudio que busca

identificar el comportamiento del reforzamiento externo en términos de rigidez, ductilidad, serviciabilidad y control de agrietamiento.

Una vez concluida la construcción de las zapatas se procedió al armado de acero de los especímenes, encofrado y vaciado de concreto $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, (Fig. 4.8) teniéndose un cuidadoso control del colocado de concreto fresco, vibrado y curado de los especímenes.



Figura 4.8. Culminación de trabajos de vaciado de concreto $f'_c 210 \text{ kg/cm}^2$. (a) Armado de acero de viga, (b) Vibrado de concreto, (c) Finalización de trabajos. (Fuente: Propia)

4.4.1 Colocación de refuerzo externo de fibra de carbono FRP

Una vez culminados los trabajos de colocación de concreto se esperó 28 días para proceder a preparar los especímenes VE-01, 02, 03 para la colocación del refuerzo externo, los primeros trabajos comprendieron el amolado de las superficies para nivelar cualquier imperfección de las caras a flexión (Fig. 4.9). Seguidamente se prepararon las bandas de fibra de carbono a utilizar (Fig. 4.10).

Como particularidad el reforzamiento externo de FRP conto con un anclaje de fibra de carbono. Este anclaje se colocó una longitud de 300 mm en un ángulo de 75° (recomendado en Design Manual for TYFO Fribwrap Systems) en la unión viga-

zapata de las caras reforzadas a flexión, se utilizó esta debido a la distribución de acero previamente colocado que permitiría el desarrollo de la abertura sin afectar el reforzamiento de acero y verificar el estado del anclaje al final de la imposición total de ciclos de carga, en el caso de vigas existentes en estructuras se realiza el colocado con la adición de bandas de refuerzo a cortante en los extremos. En este estudio experimental se colocó un dos (02) de bandas de refuerzo a cortante en ambos extremos del espécimen separadas a una longitud de 150 mm, (Fig. 4.11) en los tres especímenes con reforzamiento externo CFRP.

Se procede con los siguientes pasos para la colocación del refuerzo externo:

- 1) Amolado de estructuras de Concreto
- 2) Verificación de dimensiones de la fibra para el corte del elemento.
- 3) Verificación de bordes y ángulos de viga.
- 4) Verificación de la planitud o eliminación de defectos.
- 5) Preparación de resina epóxica TYFO® S (Verificar Homogeneidad de Mezcla Según Hoja Técnica)
- 6) Aplicación de resina epóxica TYFO® S (Verificar Limpieza de Estructura Previa a la Aplicación)
- 7) Masillado con Pasta Epóxica (preparación según ficha técnica)
- 8) Aplicación de Resina para saturación de la Fibra
- 9) Colocación de Fibra de Carbono (La Fibra Debe Estar Totalmente Saturada cuando es colocada)
- 10) Verificar que no existan burbujas de aire atrapadas



Figura 4.9. Preparación de superficies a reforzar. (Fuente: Propia)



Figura 4.10. Bandas de fibra de carbono FRP y tiras de FRP para el anclaje en la zapata (Fuente: Propia)

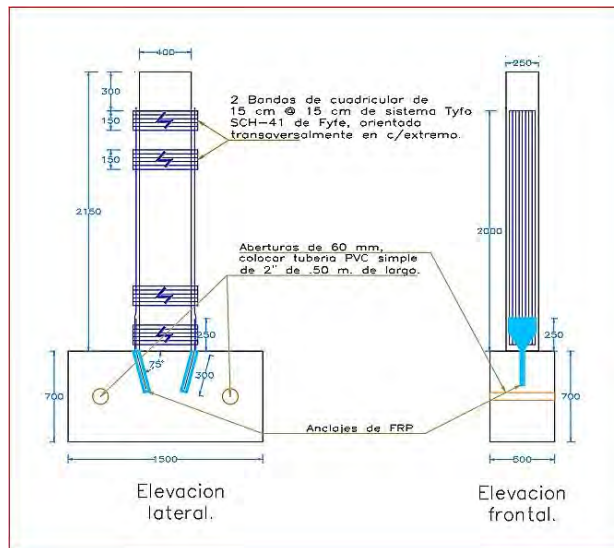


Figura 4.11. Detallado de colocación de fibra de carbono y orientación del anclaje. (Fuente: Propia)

Culminados los trabajos previos, se procede a la colocación del epóxico a los especímenes (Fig. 4.12) y la colocación de las bandas de FRP (Fig. 4.13). Una vez instalada la fibra de carbono en los especímenes de ensayo (Fig. 4.14) se procede al pintado y cuadrículado de las mismas para su traslado al laboratorio de estructuras (Fig. 4.15)



Figura 4.12. Colocación de resina epóxica. (Fuente: Propia)



Figura 4.13. Colocación de bandas de fibra de carbono FRP. (Fuente: Propia)



Figura 4.14. Colocación de última capa de epóxico en los especímenes reforzados. (Fuente: Propia)



Figura 4.15. Pintado y traslado a laboratorio de estructuras PUCP. (Fuente: Propia)

Una vez reforzadas externamente las vigas fueron trasladadas al laboratorio de estructuras PUCP para los ensayos de carga cíclica (pseudo-estática).

Se tiene las siguientes consideraciones:

- 1) Traslado a laboratorio (Fig. 4.15)
- 2) Disposición en laboratorio
- 3) Colocación de instrumentos para grúa
- 4) Armado de actuador hidráulico.
- 5) Verificación de apoyos y nivelación.
- 6) Colocación de instrumentación (LVDT)
- 7) Verificación de datos y programas de medición.
- 8) Ubicación final para inicio de ensayo cíclico (pseudo-estático) controlado por desplazamientos laterales. (Fig. 4.16)



Figura 4.16. Montaje mecánico viga VE-03 para el inicio del ensayo. (Fuente: Propia)

4.5 Descripción de los ensayos realizados

Los cuatro especímenes fueron ensayados entre el 25 al 28 de junio del 2019, en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú, a los 30 días de edad, después de fabricados. En la Fig. 4.17 se detalla la ubicación de los dispositivos LDVT para la medición de los desplazamientos laterales, el punto de interés para el análisis del comportamiento histerético de los especímenes se ubica en el LDVT -00, mientras que el resto de instrumentos de medición se colocan en la parte superior, media y baja del espécimen a fin de correlacionar los desplazamientos laterales a lo largo de la longitud total del elemento.

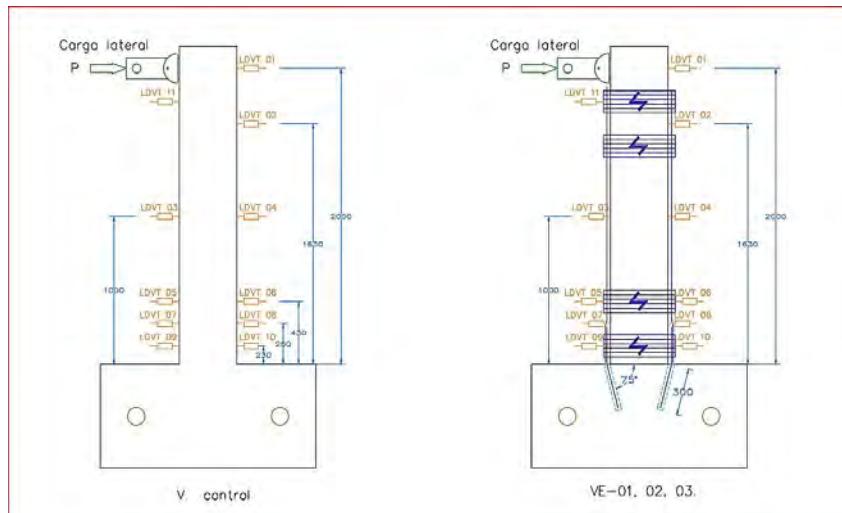


Figura 4.17. Esquema de las vigas ensayadas en laboratorio de estructuras PUCP.

Para imponer la carga cíclica, se siguieron los lineamientos descritos en el Capítulo 02 del FEMA 461, titulado “Interim Protocol I, Quasi – Static Cyclic Testing”, además de los distintos criterios encontrados en la literatura referente a los ensayos de carga cíclica en vigas de concreto armado (Hameed, 2011; Giau, 2012; Crambuer, 2013; Scotta 2013, Caratelli, 2016). Es necesario mencionar que se quiso llevar cada uno de los especímenes a la falla, es por ese motivo que se desarrollaron 10 desplazamientos objetivos basándose el desplazamiento máximo de diseño de los mismos, el actuador fue programado para alcanzar 10 desplazamientos laterales objetivo, estos desplazamientos laterales inician como primer objetivo con el 10 % del desplazamiento máximo del espécimen y se añade este valor de desplazamiento al siguiente desplazamiento objetivo, desarrollándose dos (02) ciclos de carga y descarga por cada fase. Finalmente, se obtuvo 20 ciclos de carga y descarga para 10 desplazamientos laterales objetivo de los especímenes (Fig. 4.18)

Debido a la larga duración de carga de los especímenes se utilizó la máxima velocidad de carga obtenida por el actuador dinámico, la cual tiene un valor de 12.5 mm /min.

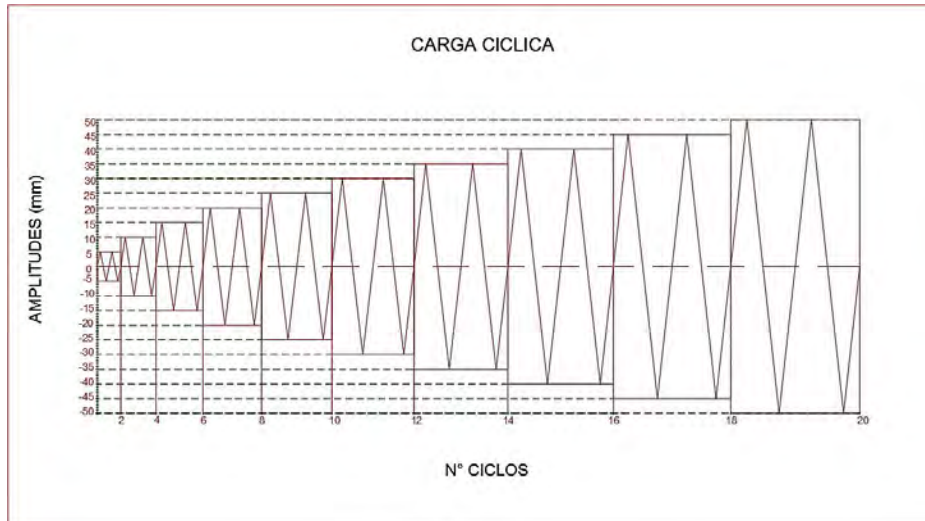


Figura 4.18. Esquema de los Ciclos de carga por desplazamiento laterales controlados para en ensayo cíclico (pseudo estático).



Figura 4.19. Disposición final para inicio de ensayo de carga cíclica. (Fuente: Propia)



Figura 4.20. Monitoreo de mediciones (Fuente: Propia)

El ensayo de cada Especimen, duró en promedio 5 h 30 min, sumados el tiempo de traslado del elemento y colocación de instrumentos. El extenso tiempo de ensayo cuasi estático en el cual no aparecen fuerzas inerciales ni de amortiguamiento, se debe a la baja frecuencia de aplicación de carga programado en el Actuador Hidráulico del Laboratorio PUCP el cual permite un máximo valor de velocidad de carga 12.5 mm/min para ambas direcciones de carga.

La Tabla 4.5 muestra los desplazamientos laterales elásticos e inelásticos máximos de diseño.

Tabla 4.5 Desplazamientos laterales objetivo

Código	Rango Elástico	Rango Inelástico	Δ_u (mm)
	Δ_y (mm)	Δ'_y (mm)	
V. Control	11.43	26.49	37.91
VE-01	10.60	12.69	22.75
VE-02	11.45	5.86	17.31
VE-03	10.47	13.17	23.64

Donde el desplazamiento elástico Δ_y se calcula con la siguiente Ecuación (4-1):

$$\Delta_y = \frac{PL^3}{3EI} \quad (4-1)$$

Donde: $P =$ Cargas maximas de diseño elastica
e inelastica respectivamente.

$L =$ longitud del especimen = 2000 mm

$E =$ Modulo de elasticidad del concreto.

$I =$ Inercia de la seccion agrietada e inercia
de la seccion en fluencia.

y el desplazamiento inelástico Δ'_y con la siguiente Ecuación (4-2):

$$\Delta'_y \approx \theta_p \left(\frac{L - L_p}{2} \right) \quad (4-2)$$

$\theta_p =$ angulo de rotacion plástica; $\theta_p = L_p(\phi_u - \phi_y)$

$L_p =$ Longitud plastica.

ϕ_u y $\phi_y =$ Curvatura ultima y curvatura de fluencia.

Se tiene una zona en el extremo empotrada del elemento de máximo momento M_u , donde las secciones de la viga sobrepasan el momento de fluencia y se permite la formación de una rótula plástica de longitud L_p que se calcula con la Ecuación (4-3).

$$L_p = L - \sqrt{L^2 - A} \quad (4-3)$$

Donde: $A = \left(\frac{\Delta_u - \Delta_y}{\phi_u - \phi_y} \right)$

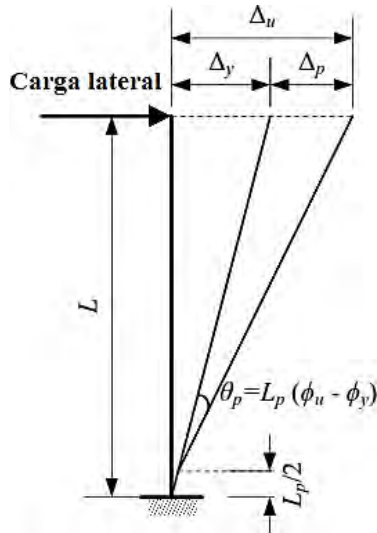


Figura 4.211. Diagrama de desplazamiento lateral de elemento en voladizo.

La fuerza P de fluencia es el cociente del momento nominal total de fluencia M_{ny} y la longitud L del elemento, donde:

$$M_{ny} = M_{nc} + M_{ns} + M_{nf} \quad (4-4)$$

M_{nc} = Momento nominal de aporte del concreto

Donde: M_{ns} = Momento nominal de aporte del acero

M_{nf} = Momento nominal de aporte de FRP (V. control = 0)

Entonces la fuerza P de diseño estático del elemento se obtiene de la Ecuación (4-5):

$$P = \frac{\phi M_{ny}}{L} \quad (4-5)$$

ϕ = Factor de reduccion.

Código	Momento de fluencia. (KN-m)	Factor de reducción.	Carga P nominal de fluencia (KN)
	M_{ny} (Anexo 01, diseño de vigas)	$\phi = \begin{cases} 0.9 & \text{para } \varepsilon_t \geq 0.005 \\ 0.65 + \frac{0.25(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0.005 \\ 0.65 & \text{para } \varepsilon_t \leq \varepsilon_{sy} < 0.005 \end{cases}$	$\frac{\phi M_{ny}}{L}$
V. Control	77.91	0.9	35.06
VE-01	93.48	0.9	42.07
VE-02	147.56	0.65	47.96
VE-03	113.93	0.9	51.27



5. CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

5.1 Introducción

En este capítulo se estudia el comportamiento a flexión de las vigas de concreto armado en voladizo, bajo acción de cargas cíclicas (pseudo-estáticas), para verificar el comportamiento de los especímenes con reforzamiento externo de fibra de carbono FRP, en términos de resistencia, ductilidad, rigidez y disipación de energía.

5.2 Resultados de ensayos

Finalizada la configuración del ensayo, se verifican los instrumentos de medición de desplazamientos laterales, se inició el ensayo mediante la transmisión de desplazamiento horizontal del actuador.

Los especímenes alcanzaron y sobrepasaron las deflexiones previstas, se registraron incrementos de 35% promedio en la resistencia, la degradación de la rigidez por cada ciclo de desplazamiento disminuyó en los especímenes reforzados y la ductilidad de los especímenes mantuvo la resistencia total del elemento evitando la falla de los especímenes. Los especímenes VE-01 y VE-03, fueron los elementos que mejor desempeño tuvieron en el ensayo respecto del espécimen de control (V. Control) que presentó el deterioro y decaimiento de resistencia propios de los elementos de concreto armado. VE-01 tuvo un incremento inicial de 40% en resistencia de acuerdo al desplazamiento comparativo y el cual disminuye con los ciclos de carga impuesto en intervalos decrecientes de 14%, 11% y 9%.

El Especimen VE-03, debido a la mayor cuantía de acero de tensión en el diseño, presentó mejoras de resistencia promedio de 9% en todos los ciclos de carga respecto a VE-02. La viga de ensayo VE-02 presentó fallas importantes en los primeros ciclos de carga que influyeron negativamente en la respuesta resistente del elemento, el

decaimiento de resistencia debido al desplazamiento cíclico afecto directamente la zona negativa en compresión del elemento y el daño acumulado de este elemento no permitió que alcance los valores teóricos esperados.

En la Tabla 5.1 se detalla las fuerzas máximas alcanzadas en cada amplitud de desplazamiento objetivo, es oportuno mencionar que la amplitud objetivo n° 10 para la viga de control no fue considerada debido a que la tendencia de la curva de histéresis se mantuvo asíntota e implicaba un tiempo muy prolongando tanto para la carga positiva y negativa. Es verificable que debido a la carga lateral positivas y negativas y el debilitamiento creciente por agrietamiento de concreto en la zona de formación de rotula plástica que el Especimen desarrollo el momento ultimo de diseño de cálculo teórico de 87.75 KN-m entre los ciclos 5,6 y 7 e incluso presento un ligero incremento hasta llegar al valor de 94.80 KN-m que representa el 7 % de incremento en el penúltimo ciclo de carga, la carga de desarrollo del actuador hidráulico se mantuvo por encima de los 40 KN para el desplazamiento lateral en todos los ciclos de amplitud posteriores al segundo ciclo.

Tabla 5.1 Resumen de cargas máximas por amplitud objetivo V. Control.

# Amplitud	V. Control		
	P max (KN)	D max (mm)	M (KN*m)
1	22.47	8.59	44.94
2	35.13	16.28	70.27
3	41.46	23.58	82.93
4	42.87	30.67	85.74
5	43.57	37.61	87.14
6	43.67	44.57	87.34
7	44.36	51.49	88.72
8	47.40	58.42	94.80
9	44.26	65.53	88.53

En la Tabla 5.2 se detalla las fuerzas máximas alcanzadas y la amplitud objetivo del Especimen VE-01, se observa que entre el 3er y 4to ciclo de experimentación se desarrolla la carga de fluencia P, el cual a partir del 4to ciclo de carga lateral positiva y negativa se

mantiene 8.3% mayor con una carga promedio de 45.59 KN a la carga de fluencia de diseño $P_{teórico}$ 42.07 KN.

Tabla 5.2 Resumen de cargas máximas por amplitud objetivo VE-01.

# Amplitud	VE-01		
	P (KN) max	D max (mm)	M (KN*m)
1	22.10	5.56	44.20
2	31.54	10.16	63.07
3	38.69	14.59	77.37
4	44.10	18.93	88.21
5	47.46	23.25	94.92
6	47.37	27.51	94.74
7	45.18	31.72	90.35
8	44.86	36.00	89.72
9	45.11	40.30	90.21
10	45.06	44.83	90.11

En la Tabla 5.3 se detalla las fuerzas máximas alcanzadas y la amplitud objetivo del Espécimen VE-02 el cual posee mayor cantidad de acero en flexión y 03 capas de CFRP la cual tiene un incremento de rigidez considerable, se observa que a partir del 7mo ciclo de experimentación se desarrolla la carga de fluencia P de valor promedio 48.77 KN que se mantiene cercano al valor teórico de diseño de 47.96 KN.

Tabla 5.3 Resumen de cargas máximas por amplitud objetivo VE-02.

# Amplitud	VE-02		
	P (KN) max	D max (mm)	M (KN*m)
1	20.18	4.87	40.37
2	29.15	9.19	58.31
3	35.49	13.24	70.97
4	38.34	16.75	76.67
5	42.24	20.55	84.47
6	45.31	24.23	90.61
7	47.52	27.80	95.03
8	48.72	31.50	97.43
9	49.22	35.03	98.43
10	49.62	38.43	99.24

En la Tabla 5.4 se detalla las fuerzas máximas alcanzadas y la amplitud objetivo del Especimen VE-03 el cual posee mayor cantidad de acero en flexión y 01 capas de CFRP,

se observa que similar a la viga VE-01, la carga de fluencia P se desarrolla entre el 4to y 5to ciclo de desplazamiento lateral, manteniendo un valor de 60.23 KN en promedio con amplitudes de desplazamiento mayores a los desplazamientos máximos de diseño.

Tabla 5.4 Resumen de cargas máximas por amplitud objetivo VE-03.

# Amplitud	VE-03		
	P (KN) max	D max (mm)	M (KN*m)
1	24.87	5.41	49.73
2	35.22	10.21	70.44
3	40.94	14.98	81.88
4	47.18	19.67	94.36
5	52.43	24.28	104.87
6	57.51	28.89	115.03
7	61.20	33.41	122.41
8	63.37	37.97	126.73
9	63.73	42.33	127.46
10	63.16	46.80	126.32

Las tablas 5.5 y 5.6 muestran los valores de desplazamientos laterales, registrados en el extremo libre. Se aprecia que pese a la simetría de refuerzo de acero y FRP, las vigas V.Control y VE-01 exhiben diferentes ductilidades de desplazamiento. Siendo el lado donde inicia la tracción positiva el que exhibe mayor valor de ductilidad parcial.

Tabla 5.5 Cargas de fluencia y últimas experimentales, desplazamientos laterales y ductilidad de desplazamiento parcial de zona en tracción

CUADRANTE POSITIVO						
Código	Py	Dy (mm)	Pmax	Pu (KN)	Du (mm)	$\mu \Delta^+$
V.Control	38.94	19.53	45.89	48.75	72.12	3.69
VE-01	39.43	17.01	47.46	65.49	50.11	2.95
VE-02	47.76	29.88	49.62	58.98	60.11	2.01
VE-03	55.25	27.31	63.73	74.18	60.14	2.20

Tabla 5.6 Cargas de fluencia y ultimas experimentales, desplazamientos laterales y ductilidad de desplazamiento parcial de zona en compresión.

CUADRANTE NEGATIVO						
Codigo	Py	Dy (mm)	Pmax	Pu (KN)	Du (mm)	$\mu \Delta'$
V.Control	-43.45	-23.39	45.89	48.75	-72.25	3.09
VE-01	-45.46	-20.13	47.46	65.49	-50.20	2.49
VE-02	-38.13	-21.18	49.62	52.55	-60.23	2.84
VE-03	-46.26	-22.56	63.73	63.42	-60.20	2.67

Al evaluar los valores de desplazamiento lateral durante la fluencia, no se observa una clara tendencia en los valores registrados para los especímenes. Sin embargo para las secciones de viga con refuerzo de CFRP los valores de desplazamiento lateral (cuando se alcanza la fluencia) son mayores en el lado donde se inicia la compresión, es decir en el cuadrante negativo.

En el diseño para la viga de control (V. Control) mostrada en los anexos de diseño, se obtuvo una carga P de fluencia de 35.06 KN y un desplazamiento de fluencia de 11.43 mm. en el primer punto de amplitud objetivo de 8.59 mm del lazo histerético, se registra una fuerza de 22.47 (KN), el acero de reforzamiento se encuentra en el rango elástico y mantiene la resistencia del elemento y su capacidad de resiliencia. La energía total que se tiene en este ciclo de desplazamientos laterales es 354.08 (KN-mm), la energía disipada cálculo del área bajo la curva de la envolvente es 206.08 (KN-mm) representando un 58% del total.

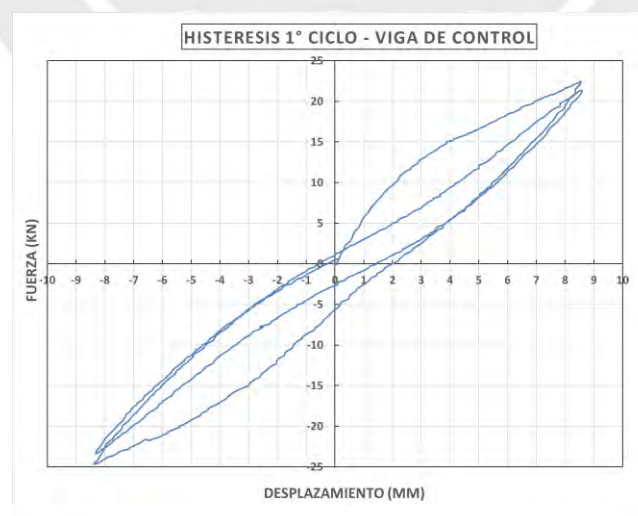
En el diseño del Especimen VE-01, mostrado en los anexos de diseño, se obtuvo una carga P de fluencia de 46.74 KN a un desplazamiento de fluencia de 10.06 mm. El lazo de histéresis del espécimen VE-01 registra en el punto objetivo de 5.56 mm, una fuerza de 22.10 KN manteniendo el Especimen en el rango elástico de desplazamientos, se registra una energía total de 273.11(KN-mm), la energía disipada es 188.25 (KN-mm)

que representa el 69 % de la energía total impuesta en el Especimen para el primer ciclo de desplazamientos impuestos.

Para el espécimen VE-02 el diseño mostrado en los anexos de diseño, muestras que se obtuvo una carga de fluencia P de 47.96 KN y un desplazamiento de fluencia de 11.45 mm, se registró en el 1° ciclo de desplazamiento lateral para una fuerza máxima de 20.18 KN a un desplazamiento lateral de 4.87 mm, La energía total que se tiene en el primer ciclo es 147.63 (KN-mm) y la energía disipada es 73.15 (KN-mm) la que representa el 50% del total.

Por otro lado, la viga VE-03 que, en el diseño mostrado en los anexos, se obtuvo una carga P de fluencia de 51.27 KN y un desplazamiento de fluencia de 10.47 mm. Tuvo una fuerza de 24.87 (KN) a un desplazamiento de 5.41 mm en el primer ciclo de carga.

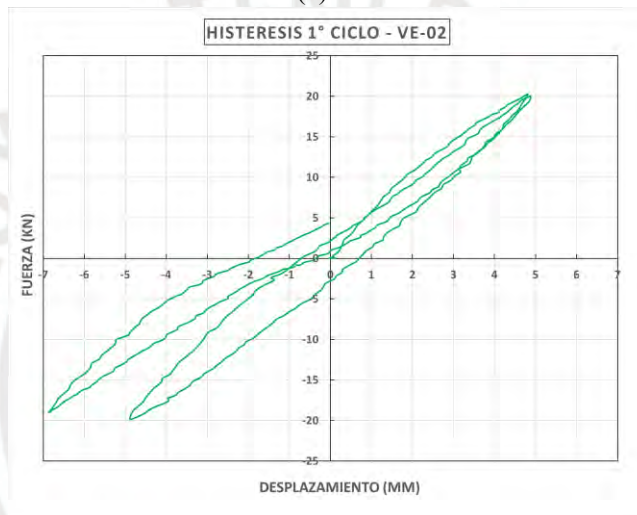
La Fig. 5.1 muestra los ciclos de histéresis para la primera fase de amplitud de carga en cada uno de los especímenes, se aprecia notoriamente la reducción de área bajo la curva en los especímenes con refuerzo externo FRP y el incremento de fuerza para un menor desplazamiento objetivo.



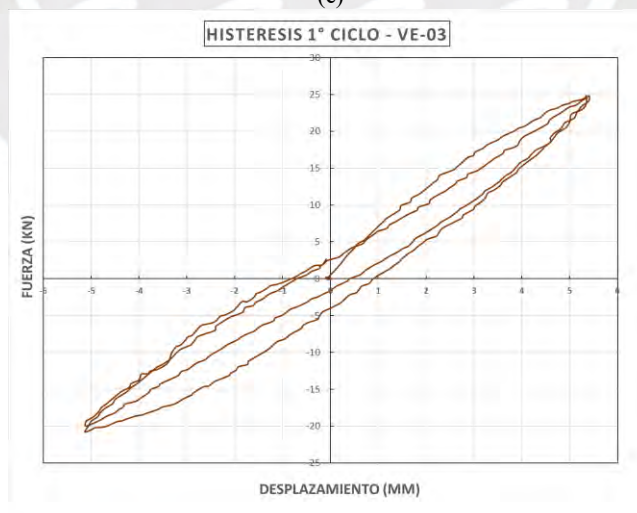
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.1. Curvas de histéresis del 1º ciclo: (a) Viga de Control, (b) VE-01, (c) VE-02, (d) VE-03. (Fuente: propia)

Con los valores obtenidos y el resultado que muestran las gráficas es claramente notorio el incremento de la resistencia en los elementos reforzados con el sistema CFRP, la medición hecha en los primeros 5 mm mostrada en los diagramas de fuerza-desplazamiento de la Fig. 5.2 muestran que, la cantidad de fuerza empleada se incrementa en 25 %.

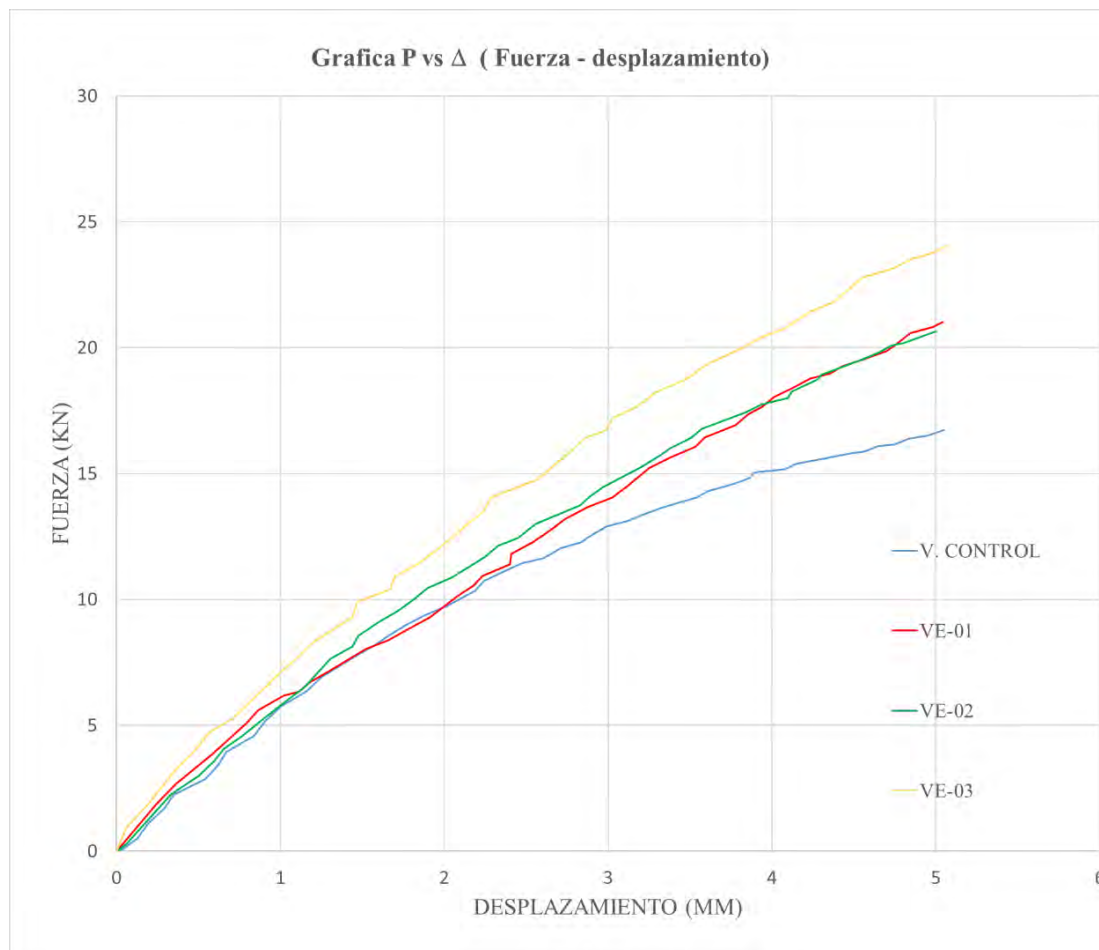


Figura 5.2. Gráfica Fuerza-Desplazamiento lateral en 5 mm de amplitud.

Del mismo modo puede verse en los gráficos de curvas de capacidad V. Control vs VE-01 y VE-02 vs VE-03 (Fig. 5.3 y 5.4) el incremento de resistencia por el aporte del sistema de reforzamiento CFRP. Para el espécimen VE-01 se observó una reducción de la resistencia debido a la ruptura del concreto en los cuatro (04) últimos ciclos de carga y descarga. A diferencia de los especímenes VE-02-Y VE-03 los

cuales, a pesar del notorio fallo de la zona de empotramiento, lograron alcanzar los desplazamientos laterales esperados y la resistencia de diseño.

El factor de reducción ϕ que se muestra en la Ecuación. (3-40) se utilizó en el diseño de los especímenes, siendo el valor de $\phi=0.9$ para los especímenes : V. Control, VE-01 Y VE-03, para la viga VE-02 una valor de $\phi=0.65$ debido a que las deformaciones unitarias en el acero son menores a la deformación ultima del acero ($\epsilon_t \leq \epsilon_{sy}$).

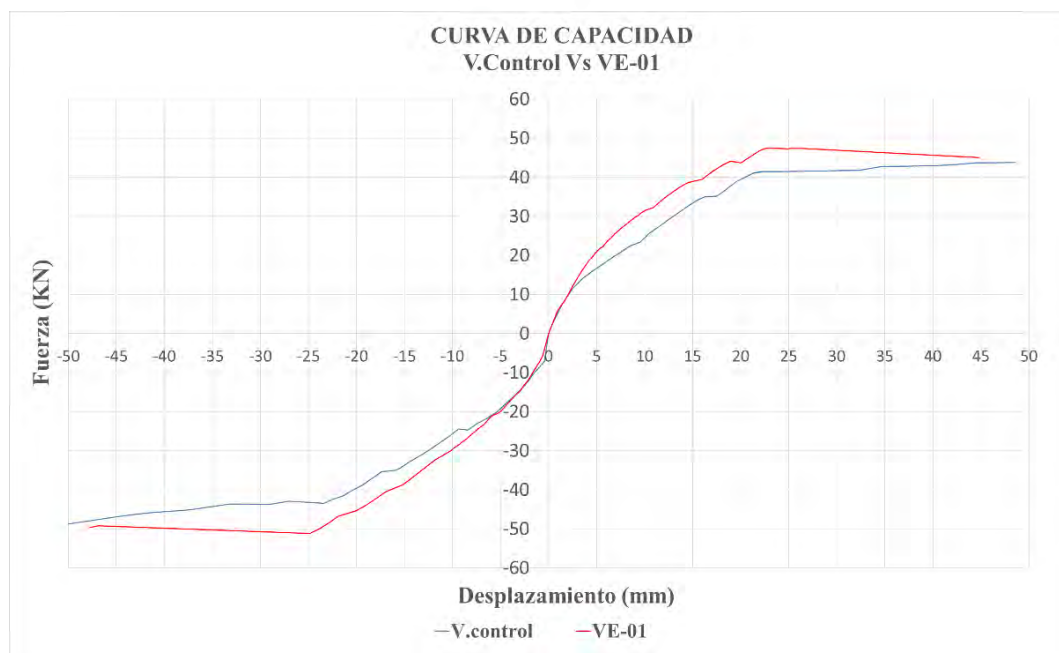


Figura 5.3. Curvas de capacidad. V. Control Vs VE-01

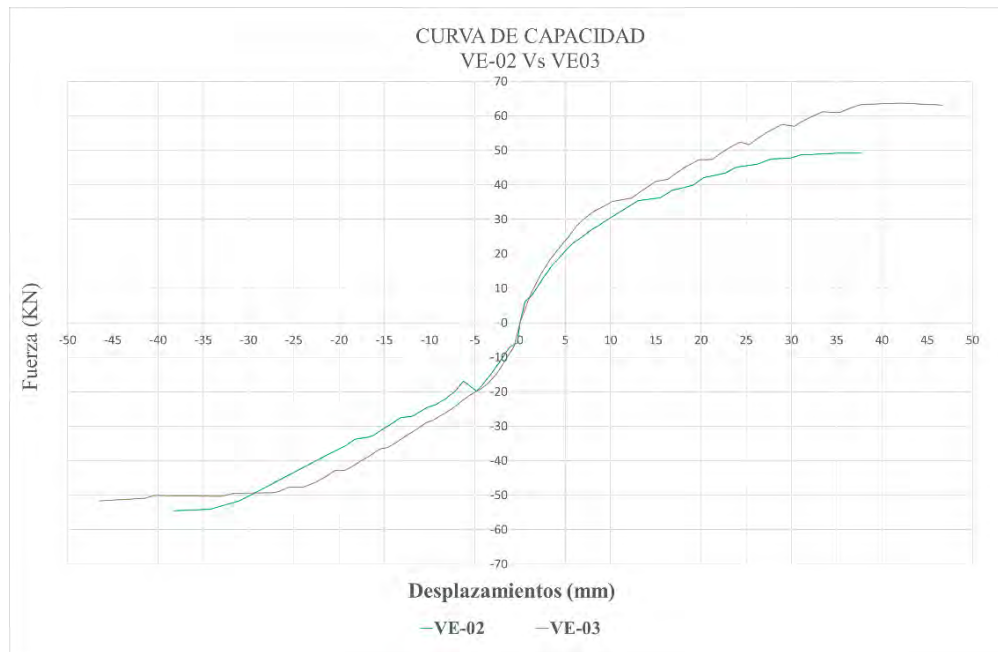


Figura 5.4. Curvas de capacidad. VE-02 Vs VE-03

Tabla 5.7 Resumen de cargas de diseño y experimentales.

Especimen	Cargas de diseño (KN)		Carga Experimental (KN)		
	Carga de fluencia (ϕP_y)	Carga ultima (ϕP_u)	Carga 05 mm (P_{5mm})	Carga Max. Positiva (P_{max+})	Carga Max. Negativa (P_{max-})
V. Control (+)	35.13	43.87	16.73	47.40	-52.60
VE-01 (+)	42.07	58.94	21.03	48.30	-51.0
VE-02 (+)	47.96	58.98	20.65	63.20	-54.48
VE-03 (+)	51.27	66.76	24.03	64.50	-53.60

5.2.1 Viga de control (VC)

La falla producida en el espécimen se debe a la fluencia del refuerzo, las grietas por flexión en ambas caras de la viga en voladizo fallaron en la zona cercana al empotramiento, teniéndose grietas entre 0.30 a 0.60 mm en la zona de formación de la rótula plástica. La carga de fluencia fue de 40.7 KN. Se continuo la imposición de carga hasta registrar la fuerza máxima de 47.4 KN en el octavo punto de amplitud de 60 mm (58.42 mm).

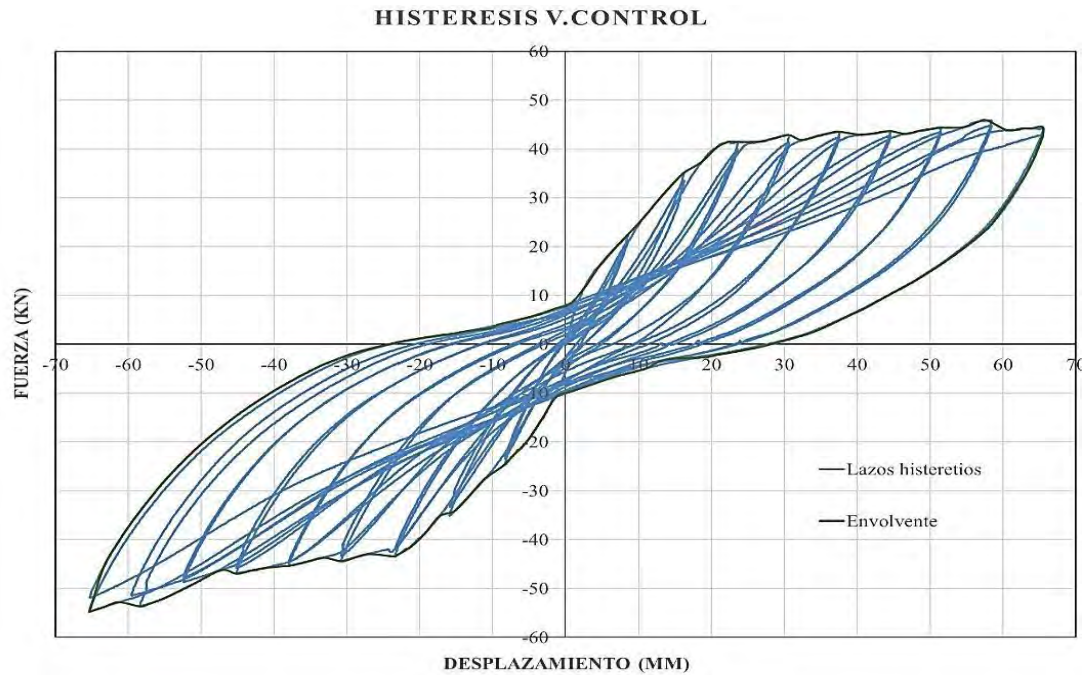


Figura 5.5. Diagrama de histéresis V. Control.

La Fig. 5.5 muestra el comportamiento histéretico total de la viga de control, se aprecia el comportamiento lineal elástico de la envolvente hasta el punto de fluencia registrado en un máximo de 16.28 mm y la tendencia a mantener la resistencia con el incremento de las amplitudes, lo que indica el comportamiento dúctil del elemento. La curva de capacidad de la Fig. 5.6 se obtiene de la envolvente total de los ciclos de histéresis totales de la experiencia y la Tabla 5.2 muestra las cargas de fluencia y ultimas de diseño para cada espécimen y las cargas máximas positivas y negativas obtenidas en el ensayo de carga cíclica.

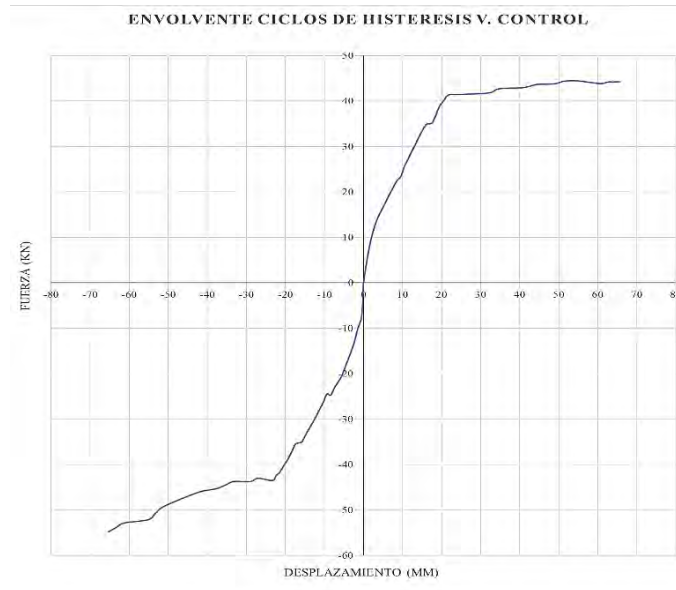


Figura 5.6. Curva de capacidad V. Control. (Fuente: propia)

La disipación de energía se mantiene en un rango mayor al 50 % de la energía total a la que se somete el elemento, el valor máximo alcanzado de 18621.21 KN*mm lo que representa el 72.04% de la energía total. Puede verificarse la tendencia creciente de la curva de disipación para todos los ciclos en la Fig. 5.7.

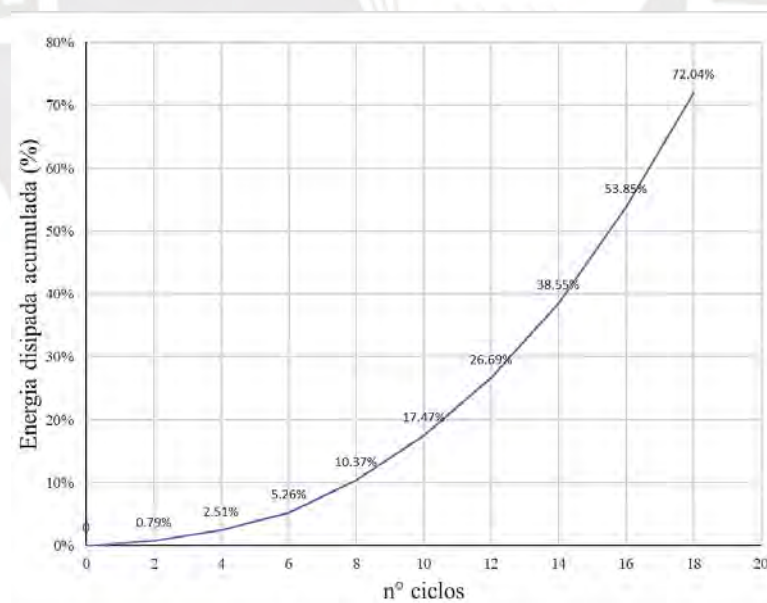


Figura 5.7. Energía disipada V. Control.

La Tabla 5.8 muestra el resumen de la cantidad de energía que ingresa en el sistema debido a la carga pseudo estática, la ductilidad del elemento permite que la carga en

los últimos ciclos se mantenga en el rango de 43 KN y 45 KN con amplitudes mayores a 40 mm.

Tabla 5.8 Resumen Cantidad de energía en V. Control

	Amplitud	Energía Disipada (KN *mm)	Energía recuperable (KN *mm)	Energía total (KN *mm)
V. Control	1	206.08	148.00	354.08
	2	652.10	526.33	1178.43
	3	1364.80	1151.35	2516.14
	4	2689.59	1893.73	4583.32
	5	4530.85	2769.66	7300.51
	6	6922.64	3735.99	10658.63
	7	9998.50	4815.02	14813.52
	8	13966.37	5943.25	19909.62
	9	18681.27	7252.07	25933.33

La rigidez elástica del primer agrietamiento del elemento ensayado alcanzó el valor de $KE = 3.97 \text{ KN/mm}$ siendo un valor cercano al de diseño que fue $Ki = 3.91 \text{ KN/mm}$. La degradación de rigidez normalizada mostrada en la Fig. 5.9 por ciclo tiende a decaer parabólicamente provocando una rápida disminución de la rigidez del sistema que se ve debilitado por el desgaste de la carga.

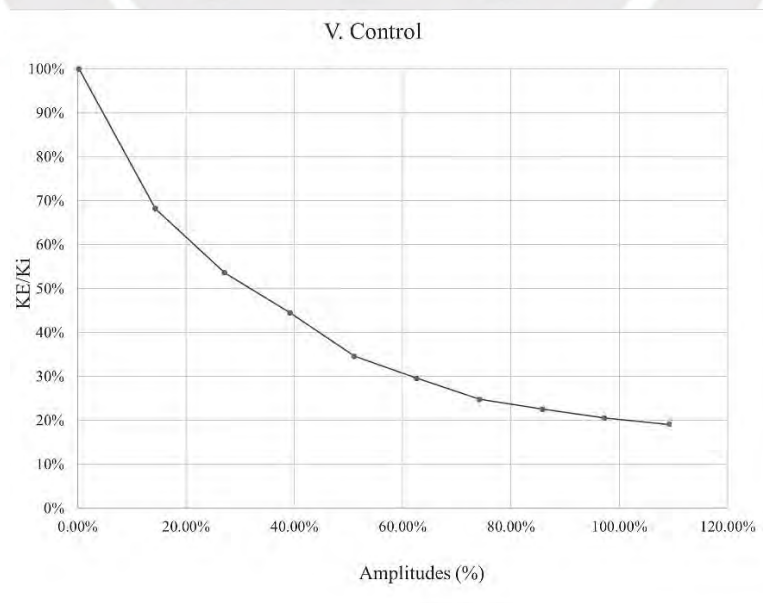


Figura 5.8. Degradación de la rigidez Normalizada.

5.2.2 Viga de Ensayo 01 (VE-01)

La falla que se produce en el elemento es por la fluencia de la carga, las bandas de FRP perpendiculares generan un estado de confinamiento adicional y la zona rígida desplaza la formación de la rótula plástica a una longitud entre 80 cm y 110 cm de altura. Se verifica la falla del empotramiento por desprendimiento del concreto y el debilitamiento producto de la carga cíclica (pseudo-estática). Las bandas transversales de FRP aseguraron que la banda longitudinal no se vea afectada por la delaminación soportando como carga máxima en promedio 48.30 (KN) a una amplitud de 25 mm en la quinta amplitud objetivo, reduciendo 42% la amplitud para un 8% de incremento en la carga máxima de la viga de control. El comportamiento que se muestra en la histéresis de la Fig. 5.9 muestra una reducción en el área de desplazamientos laterales e incremento de las cargas por el incremento de rigidez del elemento por el sistema CFRP.

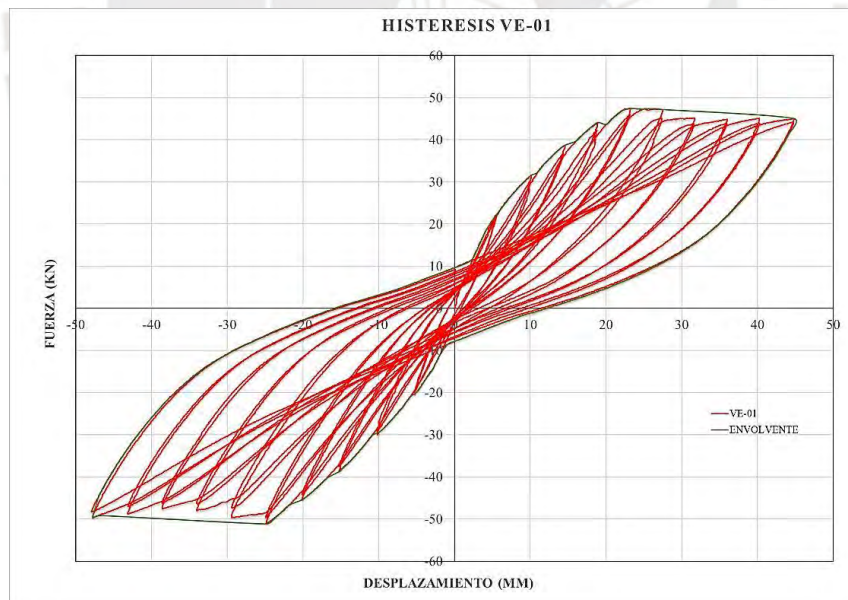


Figura 5.9. Diagrama de histéresis VE-01

La Fig. 5.10 muestra el comportamiento lineal elástico esperado por el elemento, sin embargo, debido a la falla del empotramiento en los ciclos medios de carga la resistencia disminuye en entre 1%-3% por cada ciclo de carga restante lo cual se

produce por la reducción de la ductilidad del elemento y el incremento de rigidez. La falla del empotramiento es más severa que la falla de la viga de control, pero la degradación de la rigidez se queda por encima de la de la viga de control.

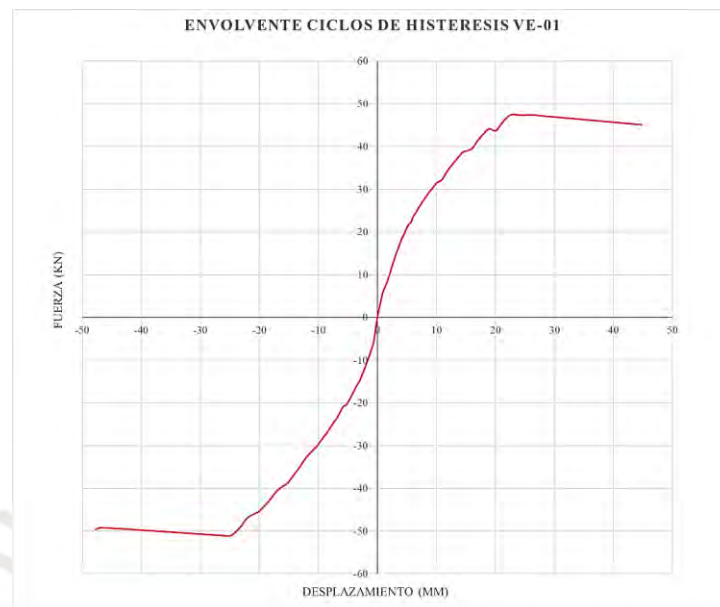


Figura 5.10. Envolvente de ciclos de histéresis VE-01.

En el caso de la VE-01 debido a la rigidez otorgada por la banda de fibra, además de los anclajes U en la zona de rotula plástica se verifica una menor cantidad de energía que ingresa en el sistema (Tabla 5.9). La Fig. 5.11 muestra que la disipación de energía se mantiene mayor al 50% de la energía total en amplitudes mayores a 25 mm.

La ductilidad que mantiene el sistema, permite soportar al elemento un incremento de cargas mayores a 44 KN en amplitudes crecientes mayores a 20 mm,

Tabla 5.9 Cantidad de energía VE-01

	Amplitud	Energía Disipada (KN *mm)	Energía recuperable (KN *mm)	Energía total (KN *mm)
VE-01	1	188.25	84.86	273.11
	2	488.25	291.77	780.03
	3	905.56	688.57	1594.13
	4	1516.32	1244.04	2760.36
	5	2282.52	2030.58	4313.10
	6	3604.69	2784.14	6388.83
	7	5179.48	3615.45	8794.92

	8	7146.52	4493.17	11639.69
	9	9543.62	5403.48	14947.10
	10	12458.57	6368.84	18827.40

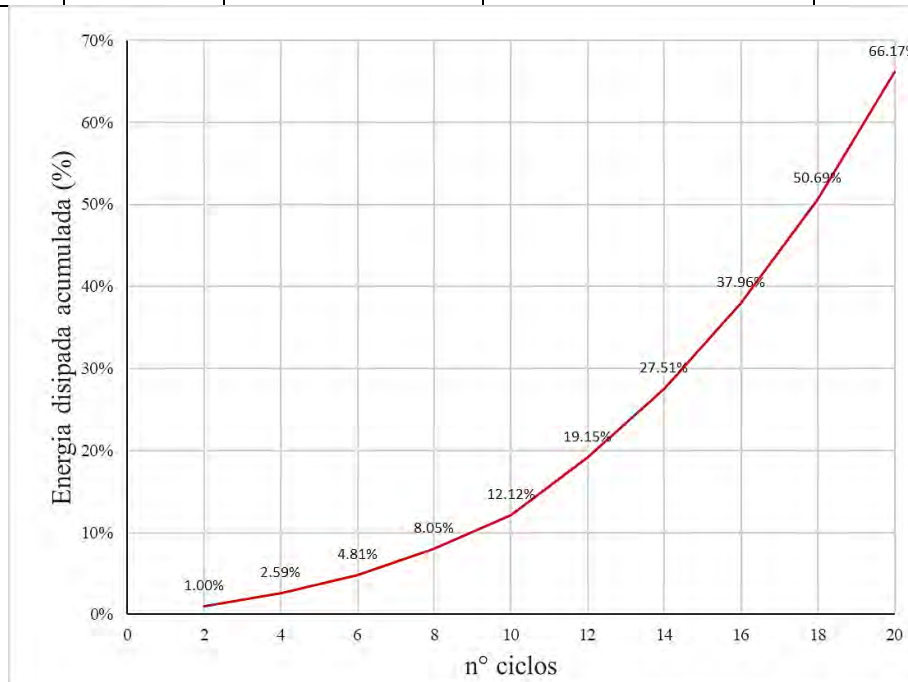


Figura 5.11. Energía acumulada disipada VE-01.

La reducción en la cantidad de energía total que se impone al espécimen se debe principalmente a la rigidez que aportan las bandas de CFRP. Se puede ver en la Tabla 5.10 el incremento de rigidez de la VE-01 con un valor de K_E 4.6 KN-mm, que supone un incremento de rigidez del 17 % respecto a la rigidez de V Control con un valor K_E de 3.91 KN-mm.

Tabla 5.10 Resumen desplazamientos laterales y rigideces de diseño y experimentales.

Código	D_{MAX} (mm) Diseño	D_{MAX} (mm) Ensayo	d_y (mm)	K_E (KN-mm)	K_i (KN-mm)
V. Control	38	65.53	0.13	3.91	3.97
VE-01	23	44.83	0.09	4.60	4.52

La cantidad de energía acumulada disipada en términos porcentuales se mantiene equivalente en la viga V. Control y la VE-01 para los 4 pares iniciales de imposición

de carga; el crecimiento parabólico a partir del 5to ciclo decae para la viga con mayor rigidez (Fig. 5.12).

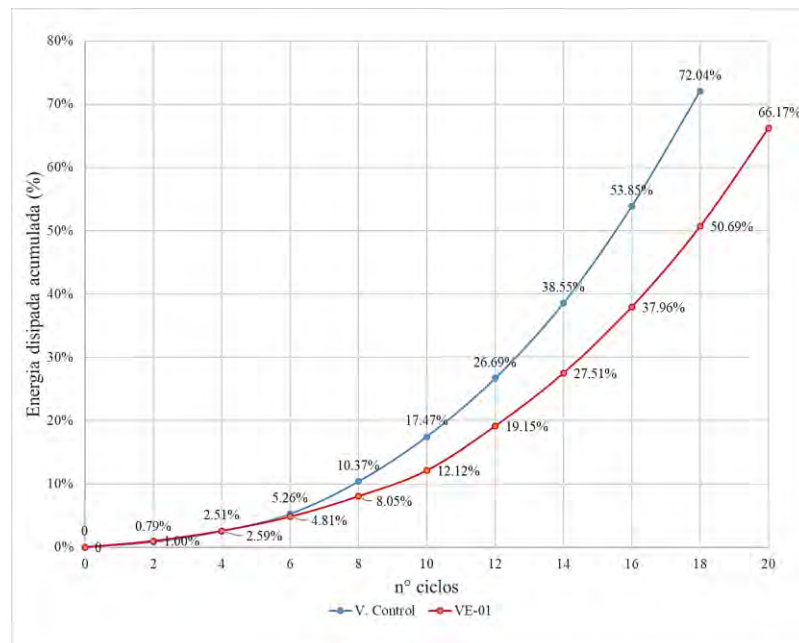


Figura 5.12. Comparación de disipación de energía V. Control vs VE-01

La rigidez registrada en el primer agrietamiento del elemento ensayado fue de $KE = 4.47 \text{ KN/mm}$, la rigidez teórica fue $Ki = 4.52 \text{ KN/mm}$; el aporte de la bande de CFRP permite que la degradación por ciclo disminuya parabólicamente (Fig. 5.13). La degradación de rigidez mantiene una tendencia parabólica con el total de ciclos que se imponen en la experiencia. En la Fig. 5.14 se evidencia que la rigidez del sistema con reforzamiento CFRP mantiene un nivel elevado respecto a la V. control en todos los ciclos de carga impuesta. A pesar del daño ocasionado en la zona de empotramiento, la rigidez del sistema se mantiene por encima de los resultados en espécimen de control

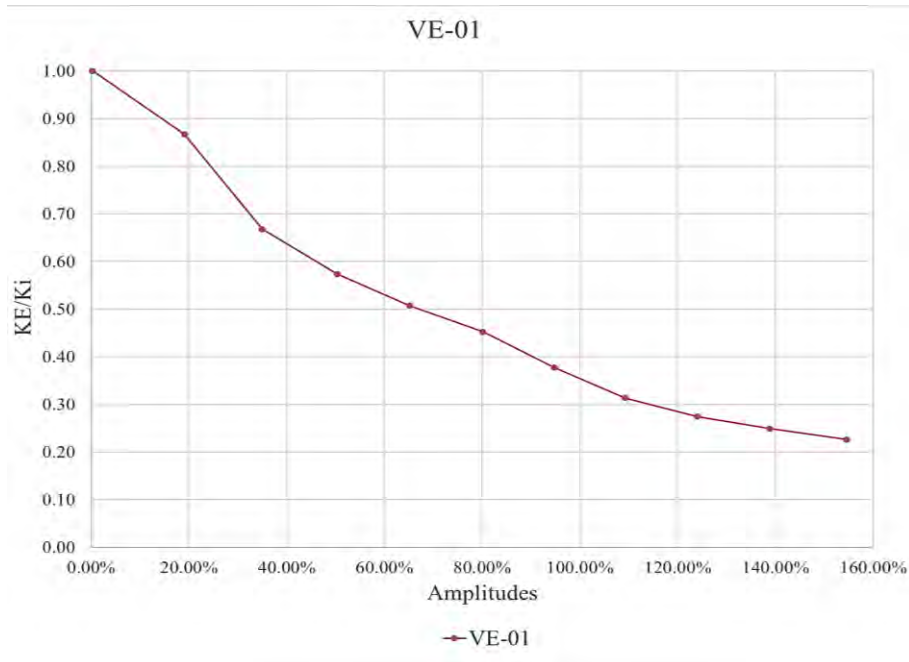


Figura 5.13. Degradación de la rigidez Normalizada VE-01.

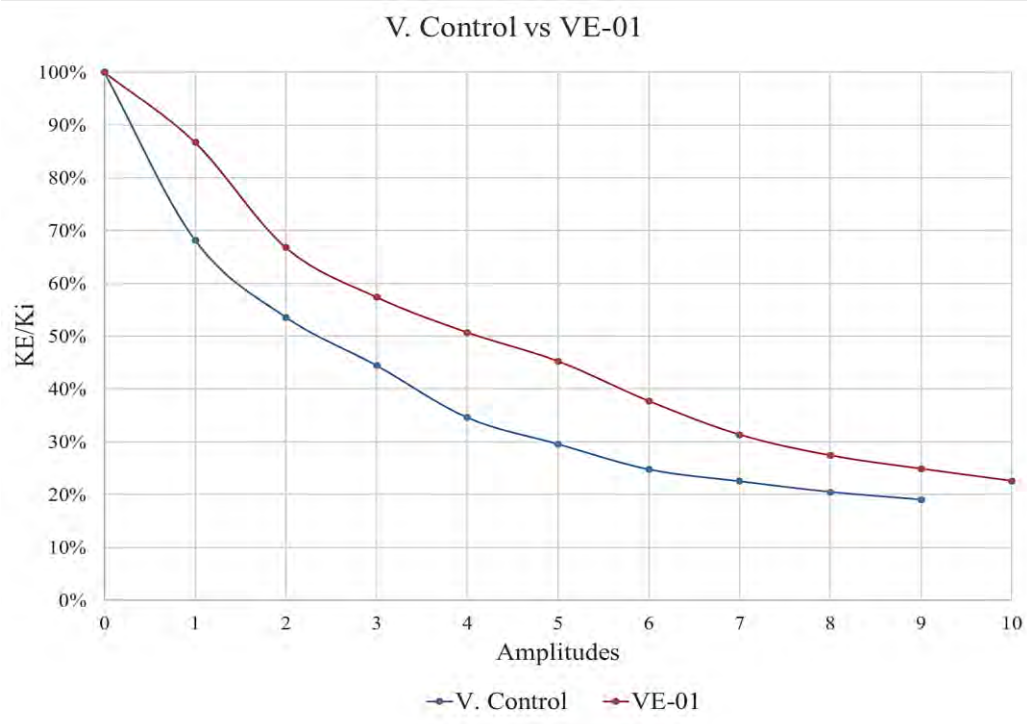


Figura 5.14. Degradación de la rigidez V. control Vs VE-01

Puede observarse los agrietamientos de los especímenes V. Control y VE-01 en ambas caras en la Fig. 5.15, el comportamiento de la viga de control es el esperado con un alto nivel de ductilidad y una capacidad de disipación de energía mayor al 65 %. Por otra parte, el desempeño de la VE-01 es notorio por el incremento de resistencia y la

reducción del desplazamiento que mantuvieron una disipación de energía por encima del 60 % y una degradación de la rigidez mayor en cada ciclo a la degradación de rigidez por el aporte del sistema CFRP.

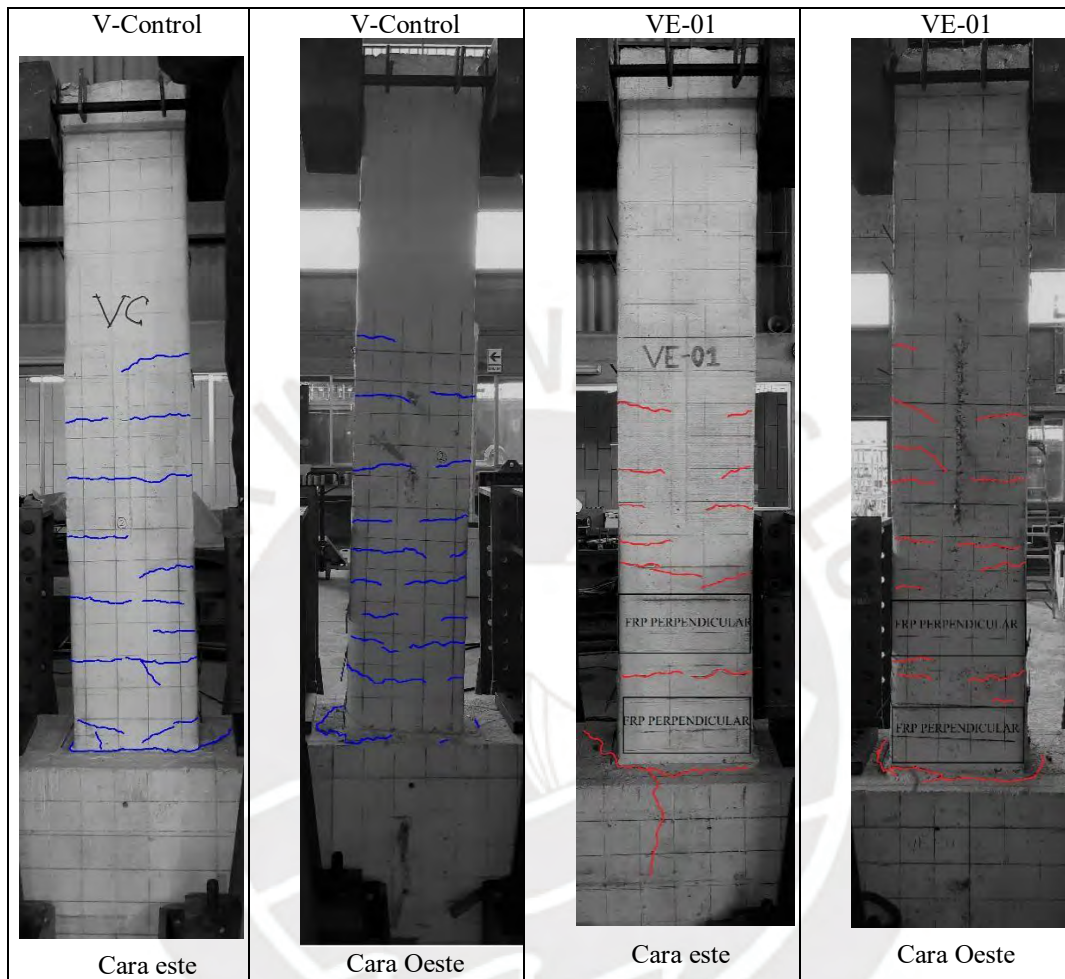


Figura 5.15. Agrietamiento Viga de control y VE-01 (Fuente: Propia)

5.2.3 Viga de Ensayo 02 (VE-02)

Debido al incremento de rigidez de este espécimen ($K_E = 6.34 \text{ KN-mm}$) 40% mayor que el valor de diseño sin reforzamiento con CFRP (K_E (Diseño sin CFRP) 4.41 KN-mm) se produce una reducción drástica de la ductilidad del elemento estructural y de los desplazamientos laterales máximos, ocasionando una falla frágil en la zona de empotramiento (Fig. 5.16)

La falla frágil producida en la zona de empotramiento, (que libera rotaciones con cada ciclo de amplitud), supuso una considerable reducción en la resistencia, sin embargo,

en el último ciclo de amplitud, a 40 mm se alcanzó la fuerza máxima de 63.20 (KN). Es notorio que para cada amplitud nueva dentro de los ciclos de carga impuesto la fuerza impuesta incrementa, pero por la naturaleza rígida de la cuantía de refuerzo el acero longitudinal no desarrollo la fluencia.



Figura 5.16. Ruptura de la base de empotramiento de VE-02 (Fuente: Propia)

La Fig. 5.17 muestra la histéresis después del ensayo donde se ve la considerable reducción del área de disipación de energía por el incremento de la rigidez, el debilitamiento debido a las transmisiones de carga debido a la pérdida de capacidad de flexión en ambos desplazamientos laterales, condiciono el desarrollo de la falla del Especimen por la asimetría generada por la fractura del empotramiento, modificando los puntos de rotación respecto a su centro de gravedad generando un efecto de balanceo asimétrico (asymmetric rocking effect). La zona en flexión presenta una mayor estabilidad por la ductilidad del reforzamiento, siendo la más afectada el área en compresión que tiene una pérdida mucho mayor en su resistencia por el alto incremento de rigidez que ocasiona la falla del concreto, previo a la fluencia del acero.

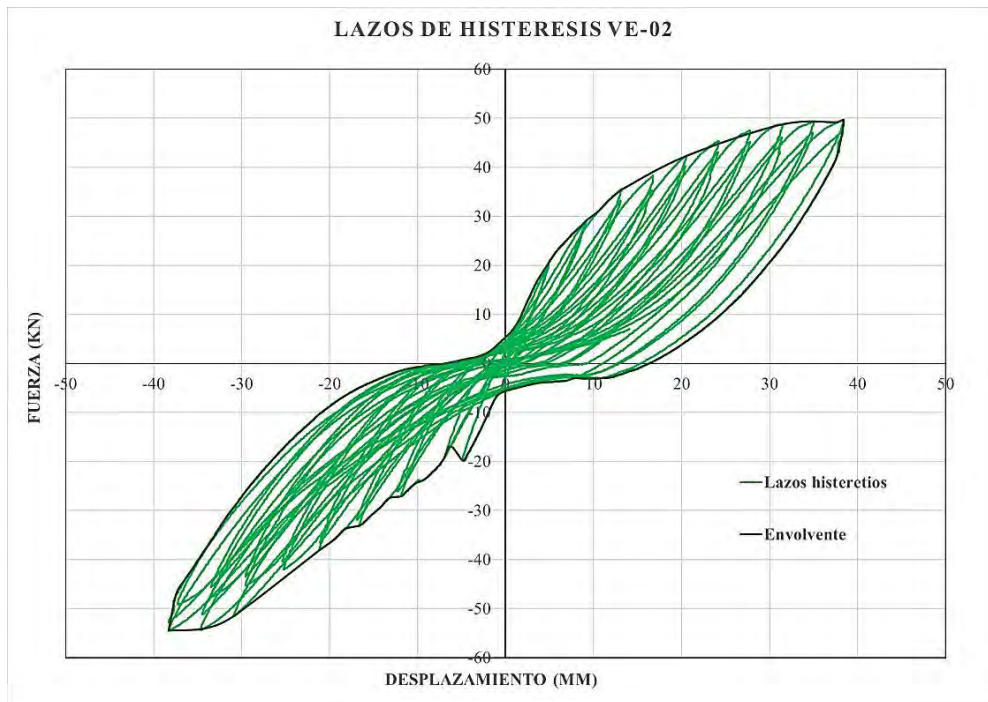


Figura 5.17. Diagrama de histéresis VE-02

Debido a la elevada rigidez del sistema y el momento flector elevado sin la fluencia del acero de refuerzo que provocaron la falla del empotramiento y un agrietamiento mayor en la base apoyada, la energía registrada en el sistema fue mucho menor que los demás especímenes, notándose la deficiencia estructural debido a la falla en amplitudes menores a 8 mm. Aun en estas condiciones el elemento en el punto de desplazamiento máximo de diseño (18.39 mm) resistió 42.14 KN, 12 % menor que la resistencia de diseño en fluencia. La Fig. 5.18 muestra el comportamiento de la sección debido al alto incremento de rigidez por el sistema en la zona positiva de flexión y la reducción de resistencia de la zona en compresión por la gran cantidad de pérdida de ductilidad que se tiene por el sistema CFRP.

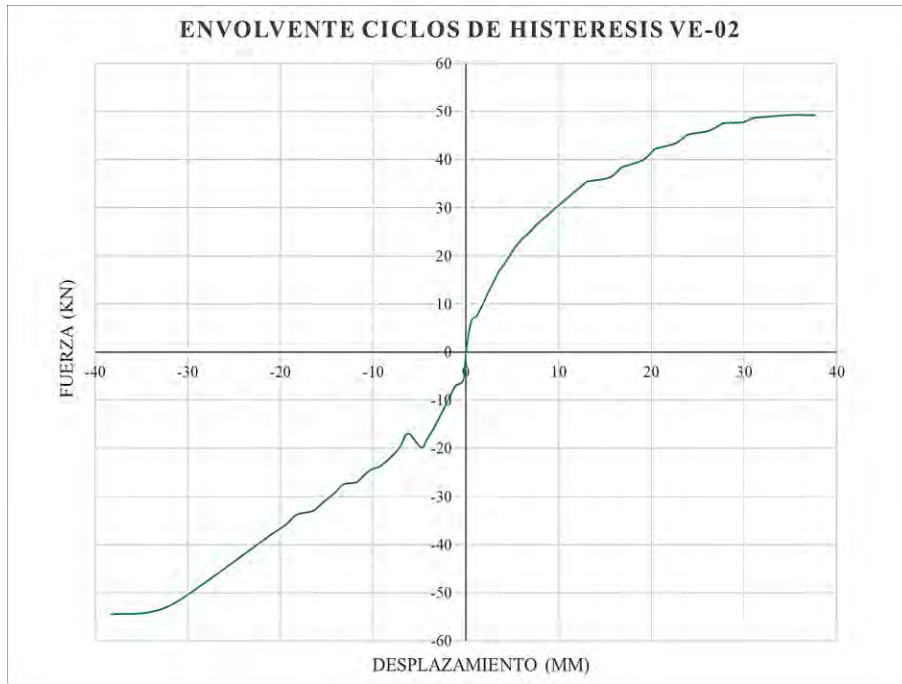


Figura 5.18. Envolvente de ciclos de histéresis VE-02

La disipación de energía del elemento se mantiene por encima del 50% (Fig. 5.19) en el último ciclo de carga, el incremento de la carga impuesta provoca un agrietamiento mayor y la ruptura de concreto en la zona del empotramiento.

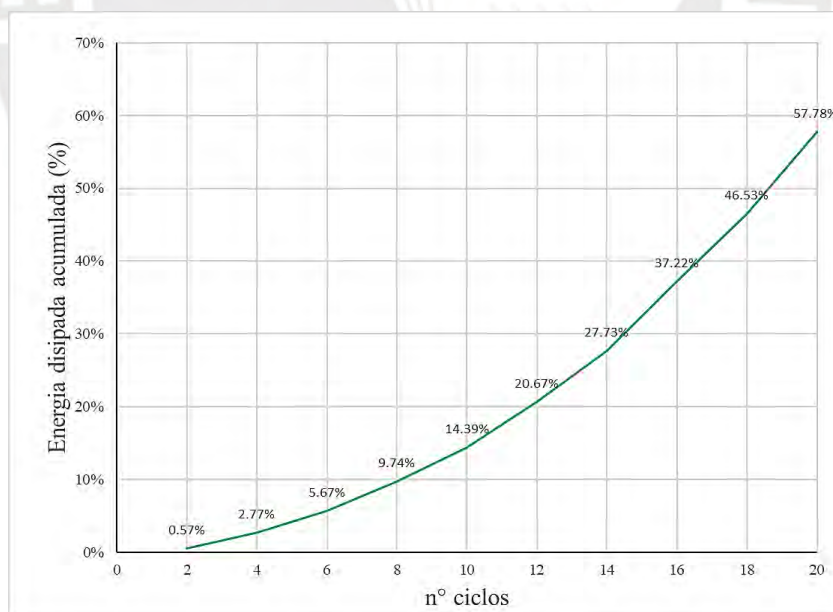


Figura 5.19. Energía disipada VE-02

La Tabla 5.11 muestra el valor total de la energía que entra en el sistema, el aporte de rigidez reduce la cantidad de energía incluso por debajo de la registrada en la VE-01, lo que indica un pobre desempeño del elemento con riesgo de colapso de la sección.

Tabla 5.11 Cantidad de energía VE-02

	Amplitud	Energía Disipada (KN *mm)	Energía recuperable (KN *mm)	Energía total (KN *mm)
VE-02	1	73.15	74.48	147.63
	2	357.46	256.80	614.25
	3	733.06	374.88	1107.93
	4	1258.72	784.32	2043.05
	5	1859.89	1327.26	3187.15
	6	2671.91	1968.38	4640.29
	7	3584.52	2730.87	6315.40
	8	4812.24	3560.43	8372.67
	9	6014.58	4506.22	10520.80
	10	7469.19	5458.42	12927.61

La degradación de rigidez mostrada en la Fig. 5.20 evidencia una caída abrupta por la falla frágil de la carga que ocasiona la ruptura de la unión del elemento con la base de empotramiento, debilitando completamente la sección, sin embargo, esta degradación se mantiene por encima de la presentada por la V. Control, mostrando que la rigidez del sistema se mantiene en desarrollo con los ciclos que se le imponen al elemento.

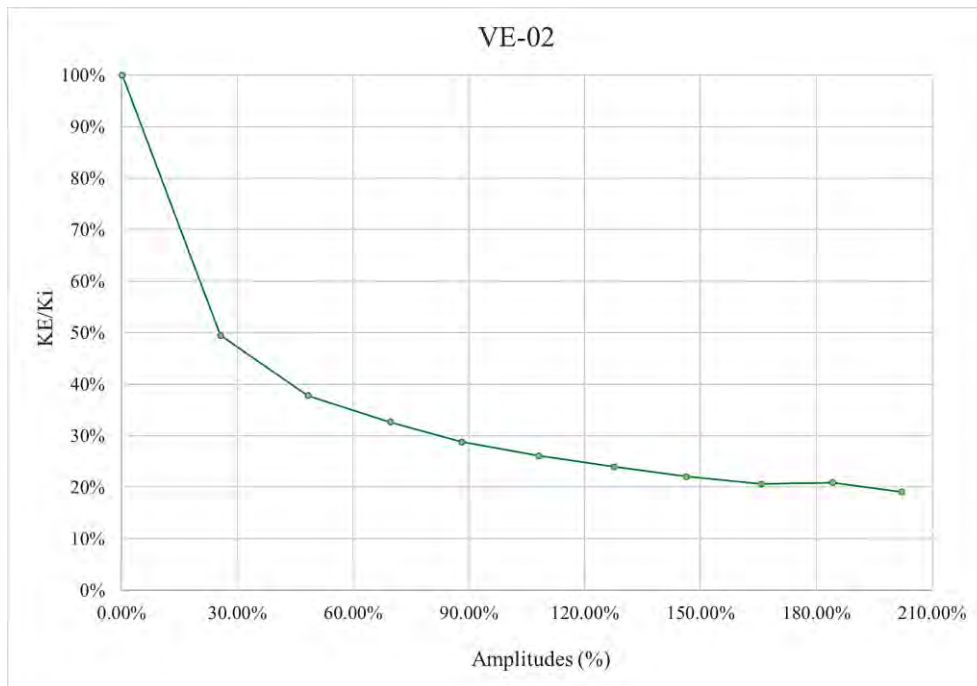


Figura 5.20. Degradación de la rigidez Normalizada VE-02

5.2.4 Viga de Ensayo 03 (VE-03)

Además de tener la misma cuantía de acero en flexión que la viga VE-02 y una banda de refuerzo FRP, este espécimen también presentó falla del empotramiento posterior a la fluencia del acero, al presentarse las grietas por flexión la rótula plástica se genera entre una altura de 70 y 100 cm. La carga de fluencia fue 58.9 (KN) y se alcanzó una fuerza máxima de 64.5 (KN) en la novena amplitud objetivo de 45 mm.

La Fig. 5.21 muestra la tendencia incremental de resistencia del elemento incluso en el punto más alejado en la zona de tracción y la zona de compresión, y además se observa la considerable reducción del área del envolvente producto de la disminución de desplazamiento del espécimen.

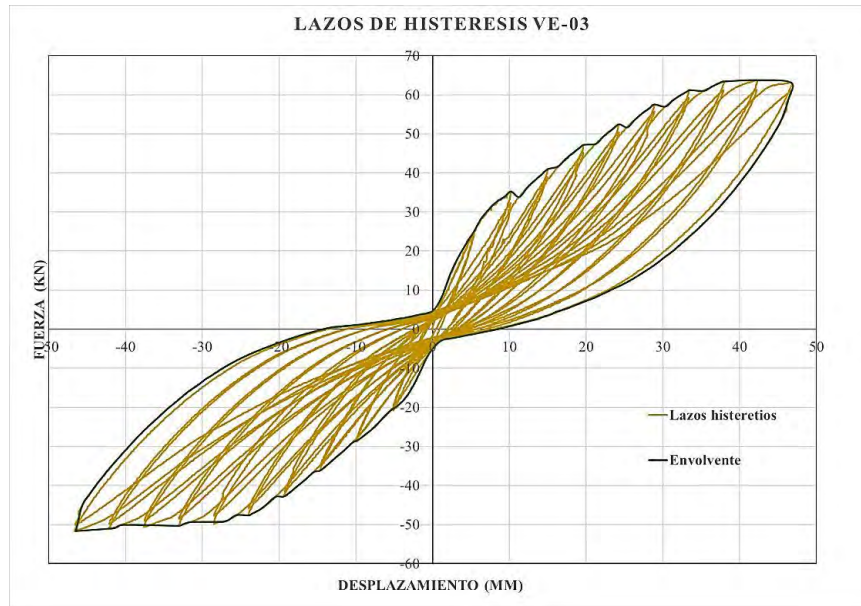


Figura 5.21. Diagrama de histéresis VE-03

La Fig. 5.22 muestra el incremento gradual de resistencia en el elemento para ambas zonas de ensayo de los elementos (Tracción y compresión).

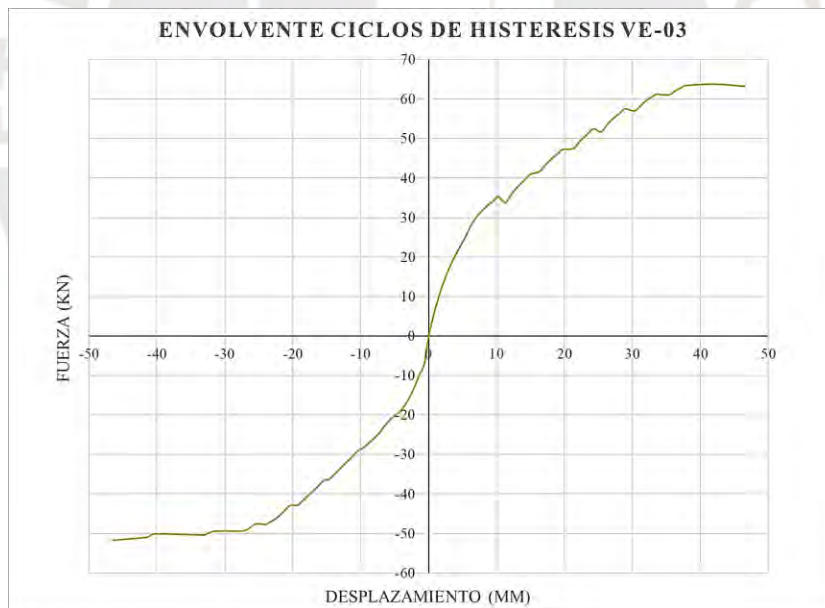


Figura 5.22. Envoltente de ciclos de histéresis VE-03.

La energía disipada total del elemento es de 58.95% en el último ciclo de carga, después de la ruptura de concreto en la base de empotramiento, Fig. (5.23)

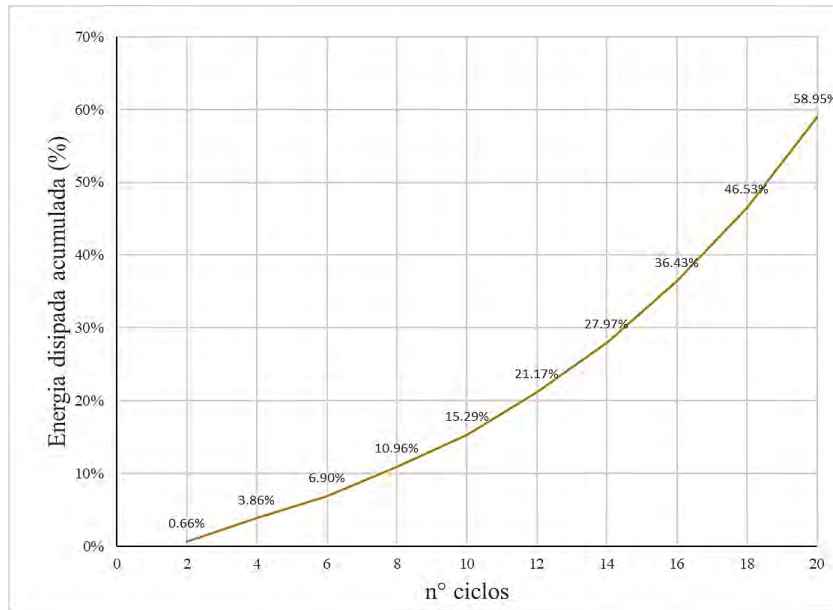


Figura 5.23. Energía disipada VE-03.

Al igual que la VE-01, el aporte de una 01 banda del refuerzo externo CFRP en una cuantía mayor de acero, muestra un aporte de la rigidez importante. La energía que ingresa al sistema se reduce y se registra que el aporte para la disipación de energía por cada ciclo también se ve reducido, debido principalmente la falla del empotramiento provocada por el momento flector, sin embargo, el acero fluye y contribuye en la resistencia del elemento hasta los máximos niveles de desplazamiento. En la Tabla 5.12 se colocan los valores de energía disipada, recuperable y total del elemento, por cada ciclo de carga.

Tabla 5.12 Energía total VE-03

	Amplitud	Energía Disipada (KN *mm)	Energía recuperable (KN *mm)	Energía total (KN *mm)
VE-03	1	115.38	85.68	201.06
	2	672.62	329.81	1002.43
	3	1201.85	678.55	1880.40
	4	1908.14	1208.76	3116.90
	5	2663.66	2009.77	4673.43
	6	3686.84	2242.11	5928.95
	7	4870.63	3360.95	8231.58
	8	6344.77	4561.23	10906.00
	9	8102.74	5831.33	13934.06
	10	10266.84	7148.97	17415.81

La cantidad de energía acumulada disipada en porcentaje (%) se mantiene equivalente en ambas vigas VE-02 y VE-03 para todos los pares imposición de carga, manteniéndose ambas superiores al 50 %, siendo los valores 58.95% y 57.78% respectivamente como se muestra en la Fig. 5.24.

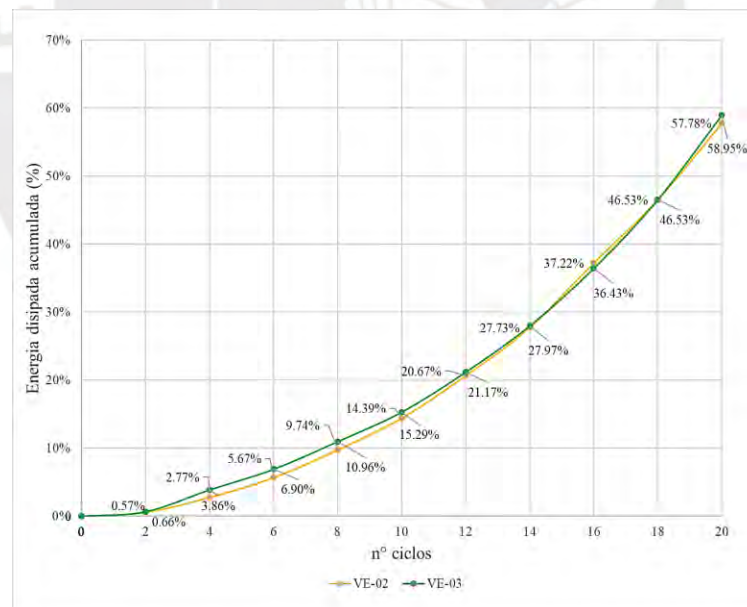


Figura 5.24. Comparación de disipación de energía en cada ciclo par de carga impuesta VE-02 vs VE-03

Debido a la falla del empotramiento en ciclos intermedios de la imposición de carga se verifica que la capacidad de disipación de energía tiene a un valor porcentual constante en ambos especímenes. Sin embargo, el incremento de la resistencia por

cargas en ambos especímenes es notorio para la viga VE-03 (con una 01 banda de CFRP), así como la degradación de su rigidez respecto a la mayor cuantía de fibra.

El momento de fluencia experimental fue de $117.80KN * mm$, el sistema diseñado tuvo un comportamiento adecuado al diseño y presento un desempeño optimo en cuanto a la disipación de energía y degradación de rigidez respecto de VE-02 (Fig. 5.25).

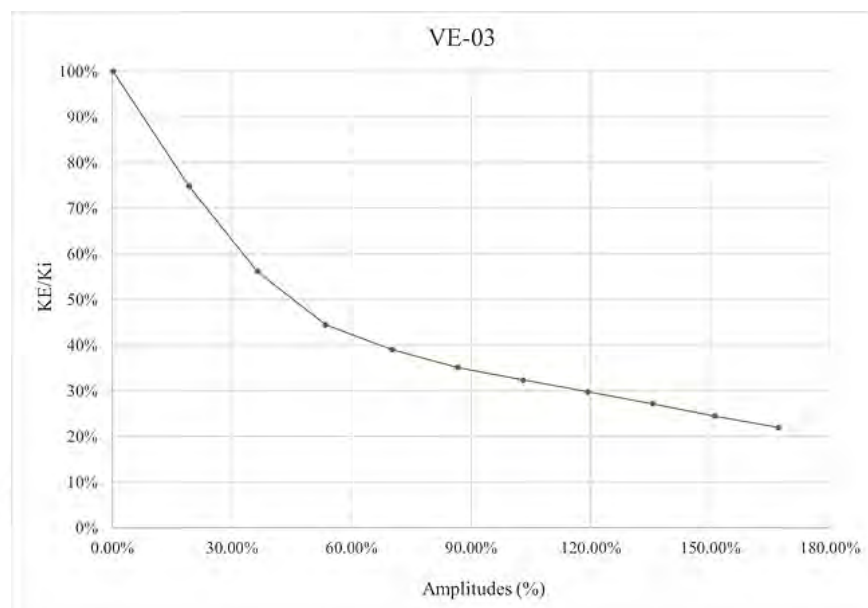


Figura 5.25. Degradación de la rigidez Normalizada VE-03.

La caída de la curva de degradación de rigidez se mantiene por valores mayores al de la viga de control y VE-02, Pero menor a VE-01 principalmente por las grietas de la falla del empotramiento incrementando la curvatura y reduciendo la resistencia por cada ciclo incremental de carga.

La Fig. 5.26 muestra un deterioro similar entre ambos especímenes con igual cuantía de acero, VE-03 presento un mejor desempeño con solo 01 capa de CFRP en términos de ductilidad, resistencia, degradación de rigidez y disipación de energía.

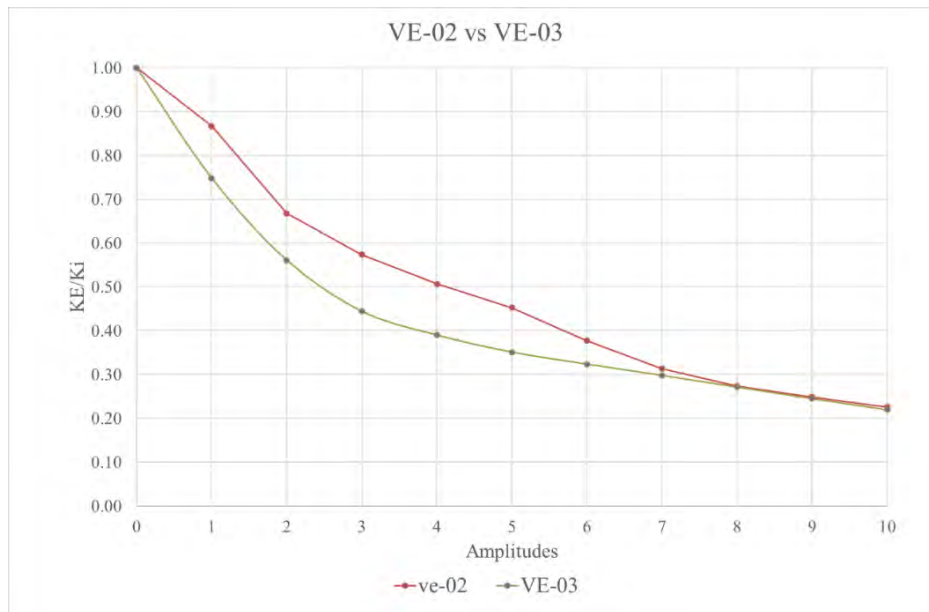


Figura 5.26. Degradación de la rigidez comparativa entre VE-02 y VE-03

La Fig. 5.27 muestra el deterioro final de los especímenes VE-02 y VE-03, para ambas caras de estudio, el agrietamiento de la sección se produce mayormente en la zona media del espécimen, mientras que ambos especímenes, debido al incremento de carga impuesta en cada amplitud creciente provocaron la ruptura de la base de empotramiento, reduciendo la resistencia en los desplazamientos laterales finales de la experiencia. Los elementos reforzados no tuvieron falla por arrancamiento, delaminación y/o ruptura del sistema CFRP, incluso cuando se realizó una última carga con una amplitud máxima de 60 mm (mayor que el desplazamiento ultimo de diseño) para los especímenes, la acción de las bandas U y el anclaje perforado en la base de los especímenes evitaron las comunes fallas del sistema y permitieron alcanzar los valores de diseño propuestos.

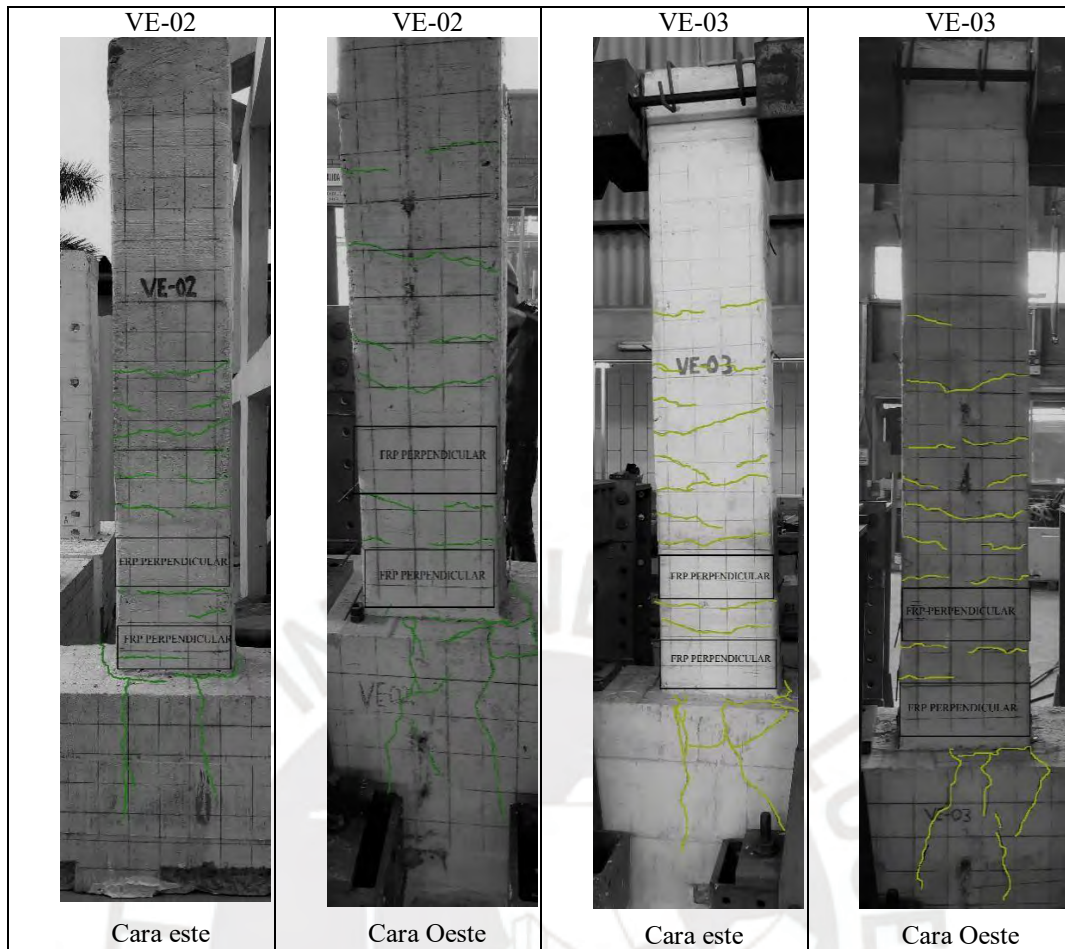


Figura 5.27. Agrietamiento VE-02 y VE-03 (Fuente: Propia)

5.2.5 Degradación de rigidez.

Los especímenes ensayados alcanzaron los valores de resistencia óptimos en el desarrollo de la experiencia, y la degradación de rigidez de los especímenes reforzados con CFRP, mostrada en la Fig. 5.28, se situó por encima del espécimen de control a excepción del espécimen VE-02 que sufrió una fractura de la zona de empotramiento provocando de esa manera una abrupta caída en la degradación de rigidez, sin embargo para amplitudes mayores en la experiencia, el aporte de rigidez del CFRP mantuvo por encima del espécimen de control la degradación parcial. El aporte de rigidez de CFRP con ayuda de el anclaje en la base y las bandas U del elemento, mantuvieron la tendencia de la curva normalizada por encima de la viga de control.

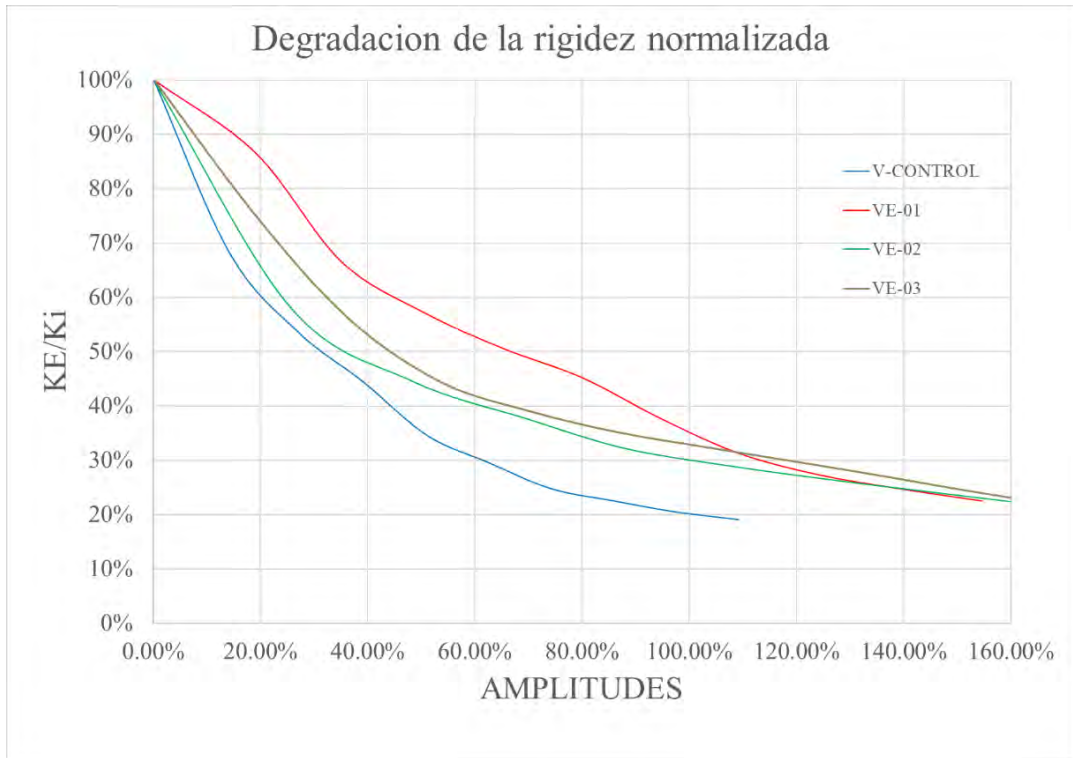


Figura 5.28. Degradación de Rigidez comparativa de los especímenes.

De la Tabla 5.13 a la Tabla 5.16 se resume los resultados numéricos de los datos obtenidos por los instrumentos de medición, se consideran las amplitudes, las derivas y la rigidez por ciclo de cada Espécimen:

Tabla 5.13 Resumen de amplitudes, derivas, rigideces por ciclo y KE/Ki- V-Control.

V-Control				
# Ciclos	Amplitudes (mm)	%Deriva total	Rigidez de ciclo (KN/mm)	KE/ki
1	8.59	14%	2.71	68%
2	16.28	27%	2.13	54%
3	23.58	39%	1.77	44%
4	30.67	51%	1.37	35%
5	37.61	63%	1.17	30%
6	44.57	74%	0.98	25%
7	51.49	86%	0.89	23%
8	58.42	97%	0.81	20%
9	65.53	109%	0.76	19%

Tabla 5.14 Resumen de amplitudes, derivas, rigideces por ciclo y KE/Ki- VE-01.

VE-01				
# Ciclos	Amplitudes (mm)	%Deriva total	Rigidez de ciclo (KN/mm)	KE/ki
1	5.56	19%	3.92	87%
2	10.16	35%	3.02	67%
3	14.59	50%	2.59	57%
4	18.93	65%	2.29	51%
5	23.25	80%	2.05	45%
6	27.51	95%	1.70	38%
7	31.72	109%	1.42	31%
8	36.00	124%	1.24	27%
9	40.30	139%	1.13	25%
10	44.83	155%	1.02	23%

Tabla 5.15 Resumen de amplitudes, derivas, rigideces por ciclo y KE/Ki- VE-02.

VE-02				
# Ciclos	Amplitudes (mm)	%Deriva total	Rigidez de ciclo (KN/mm)	KE/ki
1	4.87	26%	3.52	49%
2	9.19	48%	2.69	38%
3	13.24	70%	2.32	33%
4	16.75	88%	2.04	29%
5	20.55	108%	1.86	26%
6	24.23	128%	1.70	24%
7	27.80	146%	1.57	22%
8	31.50	166%	1.46	21%
9	35.03	184%	1.49	21%
10	38.43	202%	1.36	19%

Tabla 5.16 Resumen de amplitudes, derivas, rigideces por ciclo y KE/Ki- VE-03.

VE-03				
# Ciclos	Amplitudes (mm)	%Deriva total	Rigidez de ciclo (KN/mm)	KE/ki
1	5.41	19.31%	4.60	75%
2	10.21	36.47%	3.45	56%
3	14.98	53.51%	2.73	44%
4	19.67	70.26%	2.40	39%
5	24.28	86.73%	2.16	35%
6	28.89	103.19%	1.99	32%
7	33.41	119.33%	1.83	30%
8	37.97	135.62%	1.67	27%
9	42.33	151.19%	1.51	24%
10	46.80	167.15%	1.35	22%

5.2.6 Disipación de energía.

Debido al mayor desplazamiento de la viga de control, es evidente que la cantidad de energía que ingresa en el elemento, verificada por el área bajo la curva envolvente es mayor para todos los ciclos de carga incremental en la experiencia. Los especímenes reforzados no alcanzaron los valores de energía dentro del sistema debido al aporte de rigidez del sistema CFRP que redujo los desplazamientos laterales, sin embargo, los valores de disipación de energía mostrados porcentualmente en la Tabla 5.17 evidencian que los especímenes tuvieron una disipación de energía no menor que el 55 % de la energía disipada, además de tener porcentualmente mayor cantidad de energía recuperable mayor a 30 %.

Tabla 5.17 Resumen energía recuperable y energía disipada de los especímenes.

Código	Energía total (KN *mm)	Energía recuperable (%)	Energía Disipada (%)
V. Control	25933.33	28%	72%
VE-01	18827.40	34%	66%
VE-02	12927.61	42%	58%
VE-03	17415.81	41%	59%

La Fig.5.29 muestra el diagrama comparativo de la cantidad de energía disipada por ciclo, los elemento reforzados con CFRP mantienen una tendencia creciente en la

disipación de energía a pesar de la reducción de desplazamiento que otorga la rigidez del sistema de reforzamiento

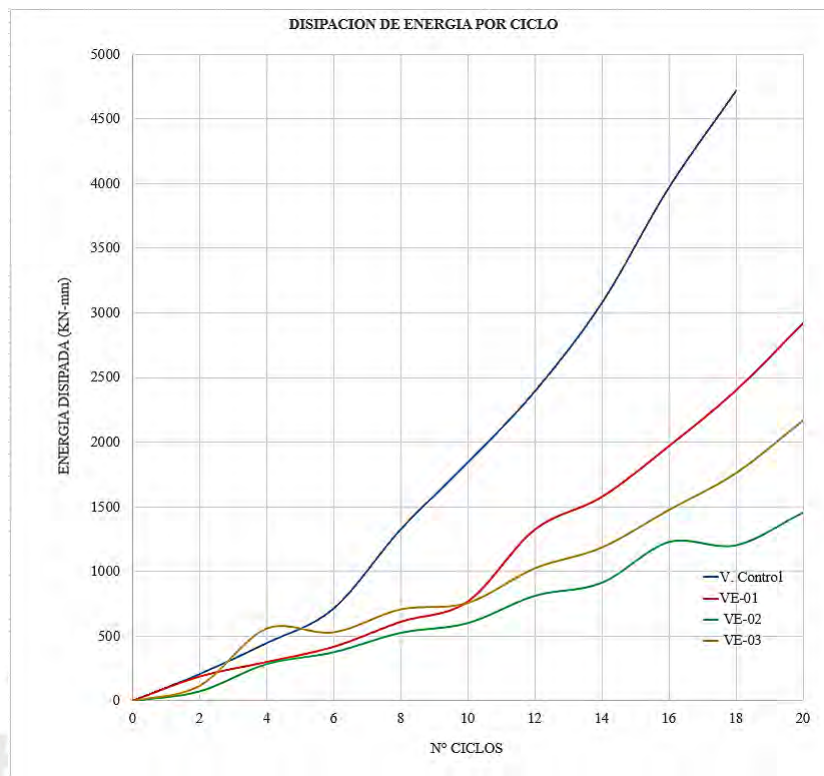


Figura 5.29. Diagrama comparativo de la disipación de energía de los especímenes.

Las vigas redujeron su comportamiento dúctil, hasta el desgaste de la zona de empotramiento y no se presentaron fallas del sistema FRP que también proporcione un confinamiento extra en la zona inferior para el control de agrietamiento. La resistencia mostrada en la Fig. 5.30 muestra que el incremento de resistencia después de la imposición de los desplazamientos laterales es mayor al espécimen de control reduciendo las amplitudes máximas en cada ciclo de carga.

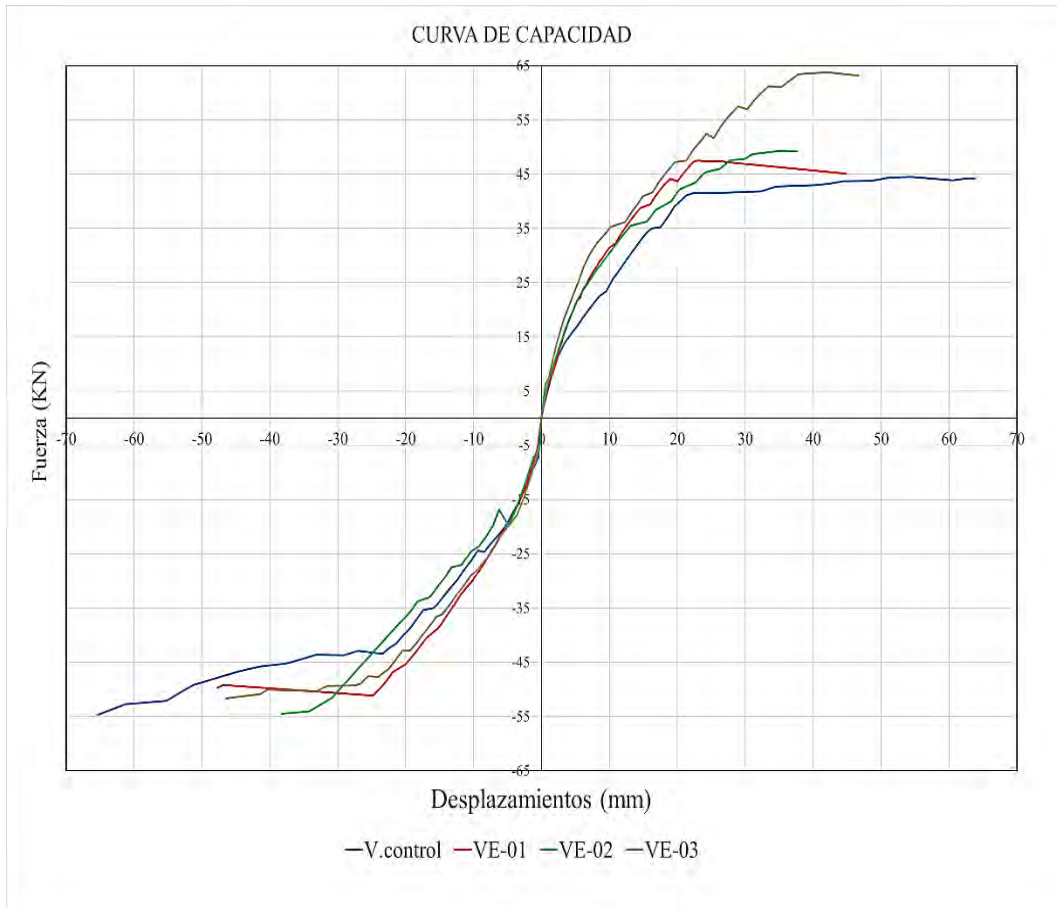


Figura 5.30. Curvas de capacidad de los especímenes en el total de la amplitud

Finalmente, la Fig. 5.31, donde se muestran las envolventes finales de todos los ciclos de carga impuesto muestran la reducción de energía que ingresa a cada espécimen, en el caso de VE-02 la cantidad de energía se ve disminuida por la rigidez que aportan las 3 capas de CFRP y reducción en el desplazamiento.

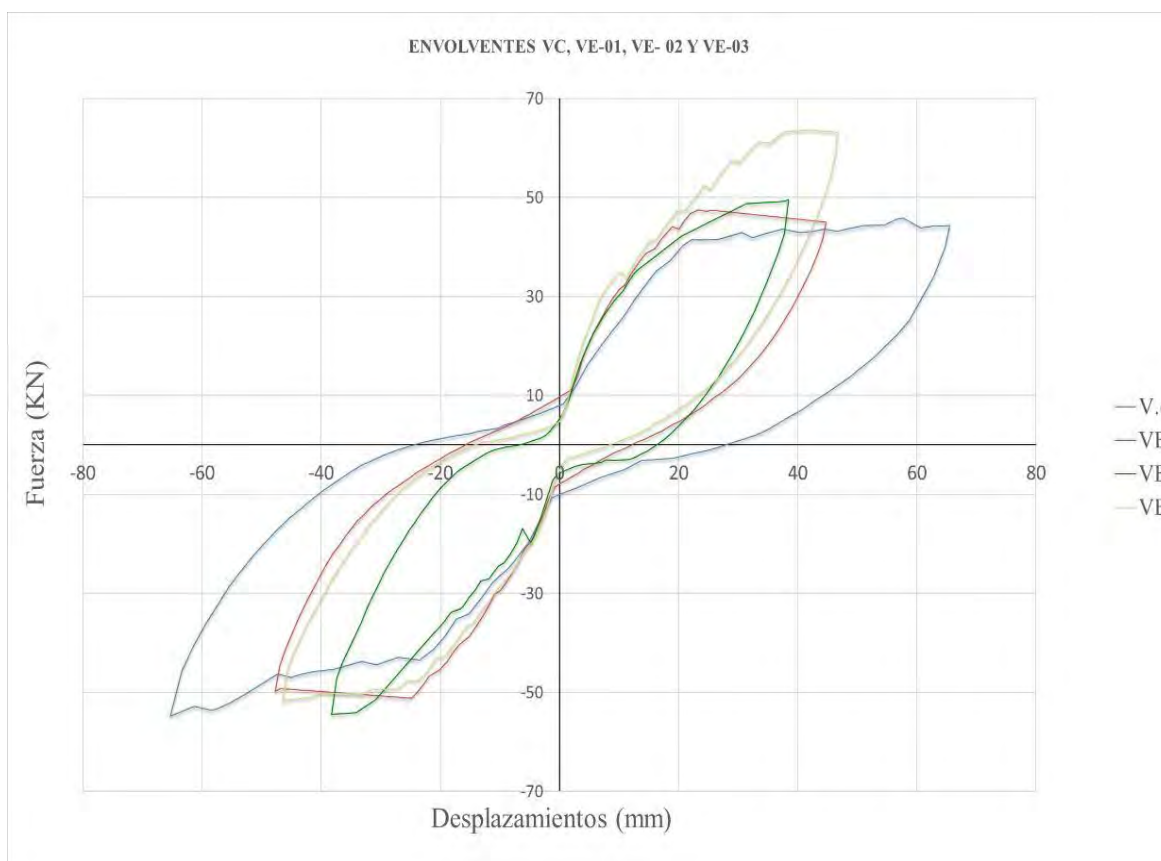


Figura 5.31. Curvas de histéresis V. Control vs VE-01

5.3 **Momento- Curvatura**

5.3.1 **Momento resistente a flexión y ductilidad de desplazamiento parcial.**

En la Tabla 5.18 se presenta los valores registrados para la carga lateral de fluencia (P_y), y carga lateral máxima de ensayo (P_{max}). Cabe indicar que no se alcanzó los valores de falla últimos esperados, debido a que los ensayos se detuvieron por precaución y cuidado de los instrumentos de medición antes de la falla total del elemento, por lo cual los valores de P_{max} indicados no representan los valores finales. La fluencia ocurre para valores de M_y de 10% a 20% mayores que los correspondientes valores de M_y del espécimen de control.

Tabla 5.18 Resumen de resultados de ensayo con carga cíclica (Pseudo-Estática)

Viga	Anclaje Ext. U	Py. ensayo (KN)	Pmax. (ensayo) (KN)	My (Ensayo) (KN- m)	Mmax (Ensayo) (KN- m)	My/φMn	Falla FRP	Descripción de falla observada durante el ensayo
V.Control (Positivo)	No	40.7	47.4	81.4	94.8	1.17	No	Deterioro por agrietamiento e incremento de cargas en cada amplitud, fluencia del refuerzo y formación de rotula plástica en zona cercana al empotramiento.
V.Control (Negativo)	No	43.4	52.6	86.8	105.2	1.25	No	
VE-01 (Positivo)	Si	42	48.3	86.6	96.6	1.25	No	Fluencia del acero seguida por agrietamiento de concreto, se produce una importante grieta en la unión transversal del empotramiento, permitiéndose el giro en la sección y el inicio del debilitamiento.
VE-01 (negativo)	Si	42	51	91.4	102	1.32	No	
VE-02 (Positivo)	Si	48	63.2	111.0	126.4	1.09	No	Falla frágil de la viga en el empotramiento. No sucede la fluencia del acero y la resistencia no incrementa para los desplazamientos objetivos.
VE-02 (Negativo)	Si	41	51.9	88.4	103.8	1.27	No	
VE-03 (Positivo)	Si	51	64.5	117.8	129	1.15	No	Falla por fluencia del acero, seguida por el debilitamiento del empotramiento por la carga cíclica, además se verifica un desgarro en la banda perpendicular de FRP a corte
VE-03 (Negativo)	Si	41	53.6	96.2	107	1.39	No	

La Tabla 5.19 muestra las curvaturas de la zona en tracción y el factor de ductilidad de curvatura para cada espécimen, obtenidos en el diseño de los especímenes

Tabla 5.19 Curvatura de fluencia, curvatura ultima y factor de ductilidad teórico, zona en tracción.

Código	Curvatura de fluencia ϕ_y^+	Curvatura última ϕ_u^+	Factor de ductilidad μ^+
V. Control	8.57504E-06	4.11334E-05	4.80
VE-01	7.54518E-06	2.65566E-05	3.52
VE-02	8.58563E-06	1.73686E-05	2.02
VE-03	7.85568E-06	2.75885E-05	2.76

La Tabla 5.20 muestra las curvaturas de la zona en compresión y el factor de ductilidad de curvatura de cada espécimen obtenidos en el diseño de los especímenes.

Tabla 5.20 Curvatura de fluencia, curvatura ultima y factor de ductilidad teórico, zona en compresión.

Código	Curvatura de fluencia ϕ_y^-	Curvatura última ϕ_u^-	Factor de ductilidad μ^-
V. Control	-8.57504E-06	-4.11334E-05	4.80
VE-01	-7.54518E-06	-2.65566E-05	3.52
VE-02	-8.54495E-06	-1.64957E-05	1.93
VE-03	-9.4341E-06	-2.63638E-05	2.79

5.3.2 Calculo analítico del momento curvatura experimental

Para realizar el cálculo adecuado de las mediciones de la curvatura en cada instante de tiempo para el análisis del comportamiento de vigas reforzadas y obtener graficas de Momento – Curvatura (M- Φ), además de los gráficos de Carga- Deflexión (P- Δ). Se ha planteado un método analítico para obtener los valores de curvatura a partir de la lectura de datos obtenida por los transductores (específicamente: lado positivo LDVT's 04, 05,06, y lado negativo LDVT's 10, 11, 12) y con el uso de las simplificaciones de la mecánica de materiales (Figs. 5.32 y 5.33)

El método analítico planteado toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- La forma de la deformada comprendida en la longitud L3, se puede representar por una curva de tercer grado, de acuerdo a las suposiciones elásticas de resistencia de materiales.
- No se registra desplazamiento horizontal en ninguno de los 3 puntos de medición.
- El registro de desplazamiento del dispositivo de medición corresponde a la coordenada “y”.

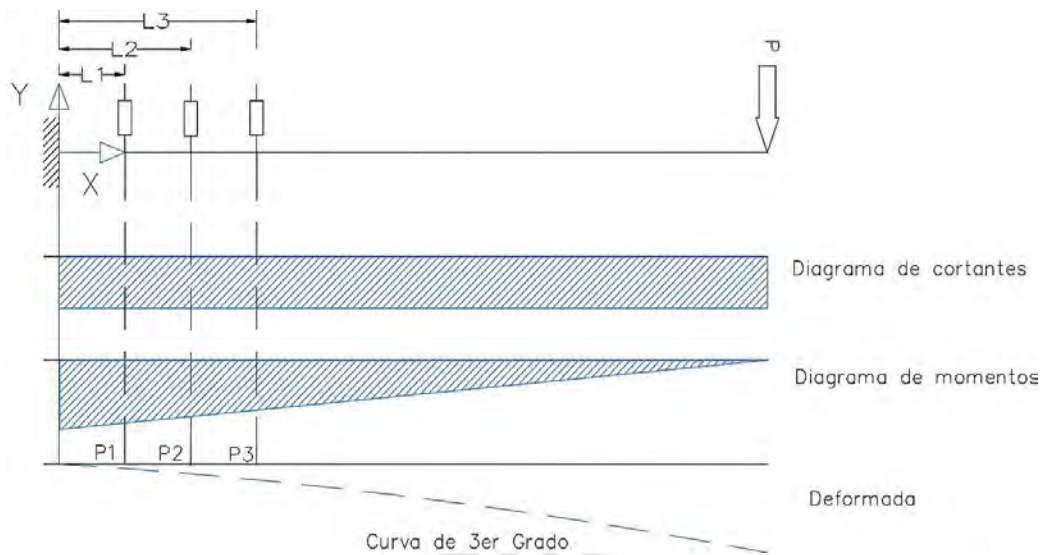


Figura 5.32. Forma teórica de una viga en voladizo, simplemente deformada con carga en el extremo libre.

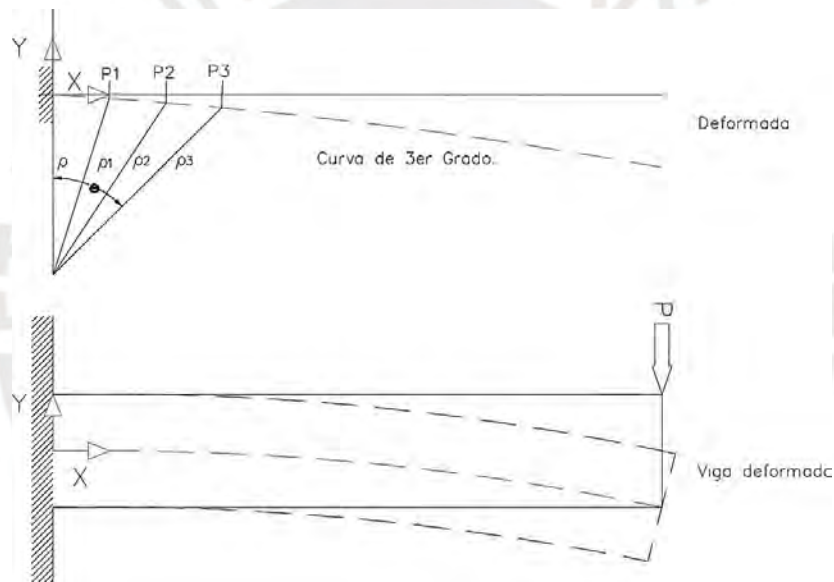


Figura 5.33. Deflexión de viga en voladizo

Siendo la curva de la viga deformada en el tramo medido una función cubica (Fig. 5.32), se define la función que representa su forma por la Ecuación (5-1):

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (5-1)$$

O en forma paramétrica en la Ecuación (5-2):

$$f(x, y) = (x, ax^3 + bx^2 + cx + d) \quad (5-2)$$

Gracias a que a que se tienen tres puntos P1, P2 y P3 con coordenadas de la curva (x_i , y_i) conocidos todos los instantes de deformación, es posible determinar los coeficientes a, b, c y d de cada instante, necesarios para determinar la función $f(x, y)$, además de la curvatura.

Considerando el borde en el extremo empotrado $(x, y) = (0, 0)$

Reemplazando en la Ecuación (5-3):

$$y = a(0)^3 + b(0)^2 + c(0) + d$$

$$0 = d$$
(5-3)

Entonces la función $f(x, y)$ queda de la siguiente manera en la Ecuación (5-4):

$$f(x, y) = (x, ax^3 + bx^2 + cx)$$
(5-4)

Para la medición de las deformaciones se determinó que: (Ecuación (5-5))

$$P_1 = x_1$$

$$P_2 = x_2$$

$$P_3 = x_3$$
(5-5)

Para resolver el sistema de ecuaciones, los transductores se colocan en la zona cercana a la formación de la rótula plástica. Los sistemas de ecuaciones lineales mostradas a continuación en la Ecuación (5-6), derivan del reemplazo de los valores de x para cada transductor, y su correspondiente deflexión. La solución de este sistema de ecuaciones permite obtener los coeficientes (a_i, b_i, c_i)

$$x_1^3 a_i + x_2^2 b_i + x_3 c_i = y_i$$

$$x_1^3 a_i + x_2^2 b_i + x_3 c_i = y_i$$

$$x_1^3 a_i + x_2^2 b_i + x_3 c_i = y_i$$
(5-6)

Como se muestra en la Fig.5.34, se considera dos lados para los valores de x:

- Lado positivo: Donde se ubican los LDVT'S: 04-05-06 a 350 mm, 200 mm y 50mm respectivamente.

- Lado Negativo: Donde se ubican los LDVT'S: 10-11-12 a 350 mm, 200 mm y 50mm respectivamente.

Entonces para cada lado medido se obtiene su respectivo grafico Momento Curvatura (M- Φ). La curva cúbica $f(x_i, y_i)$ para cada instante de carga "i" puede ser derivada usando los coeficientes a_i, b_i y c_i . la curvatura (Φ) en el punto de formación de la rótula plástica en cada instante de desplazamiento fue obtenida por las Ecuaciones (5-7) y (5-8):

$$T(x, y) = \frac{f'(x, y)}{\|f'(x, y)\|} \quad (5-7)$$

$$\Phi = \frac{1}{\rho} = \frac{\|T'(x, y)\|}{\|f'(x, y)\|} \quad (5-8)$$

$\rho =$ Radio de curvatura

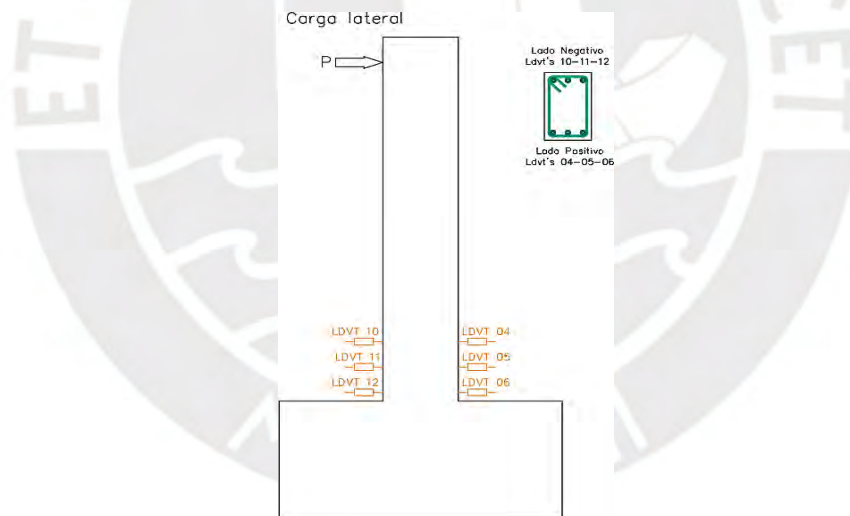


Figura 5.34. Esquema de colocación de dispositivos de medición.

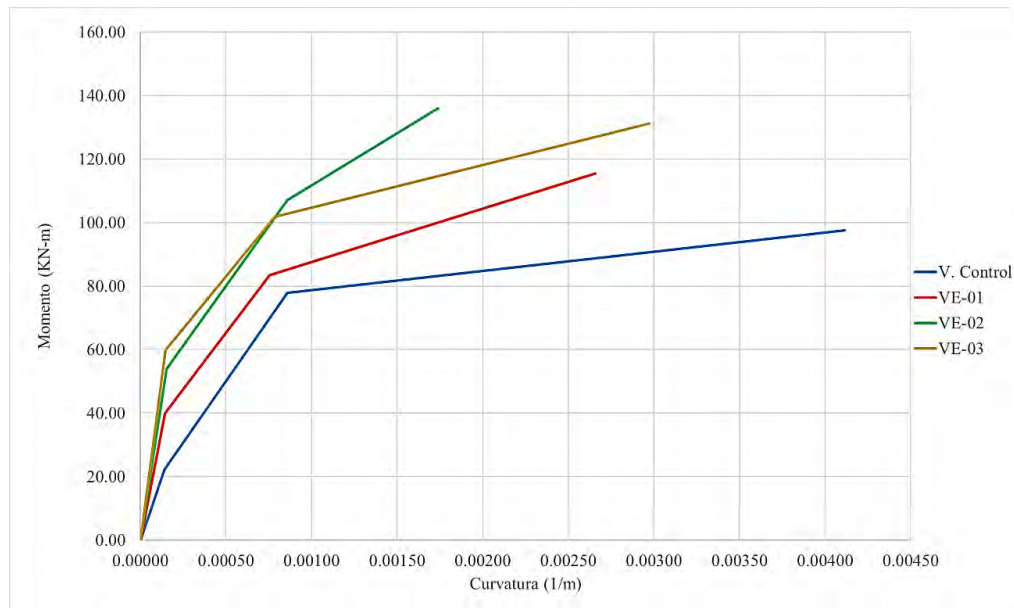


Figura 5.35. Diagrama comparativo momento curvatura de los especímenes.

La Fig. 5.35 muestra los diagramas teóricos de momento curvatura, se aprecia una ligera tendencia en el incremento del momento de fluencia y un gran incremento en el momento último de los elementos reforzados con CFRP. Se observa que la viga menos dúctil fue la VE-02 y los especímenes VE-01 Y VE-03 que tuvieron una menor cuantía de CFRP.

5.3.3 Evaluación de la longitud de la rótula plástica.

Se determina que la longitud de la rótula plástica es el parámetro que influye en mayor medida en la obtención de la respuesta, la curvatura y el momento alcanzado mantienen un incremento mínimo por cada ciclo de carga. La longitud del elemento inelástico de la viga tendrá vital importancia para estimar el nivel de ductilidad que el elemento pueda alcanzar.

La distribución de curvatura en la longitud de una sección en voladizo es compleja. Para establecer una relación entre el desplazamiento final y la curvatura en la zona plástica Priestley y Park asumieron que las curvaturas de una sección son lineares en toda su longitud hasta que el reforzamiento en tensión alcanza la fluencia en la rótula

plástica (Priestley, 1987). Después de la fluencia, la curvatura incrementa en región de longitud plástica. El desplazamiento ultimo Δ_u en la parte superior del elemento puede expresarse por la Ecuación (5-9):

$$\Delta_u = \Delta_y + \Delta_p = \frac{1}{3} \phi_y L^2 + (\phi_u - \phi_y) L_p (L - 0.5L_p) \quad (5-9)$$

Donde Δ_y es el desplazamiento de fluencia en el extremo superior; Δ_p es el desplazamiento plástico; L es la longitud del elemento, ϕ_y , ϕ_u son las curvaturas de fluencia y curvatura ultima, respectivamente; θ_p is la rotación plastica y L_p es la longitud de la rótula plástica (Fig. 5.36)

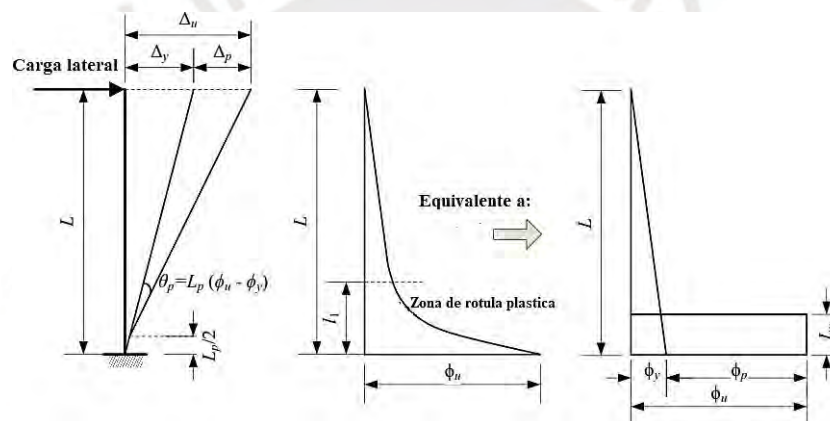


Figura 5.36. Definición de la rótula plástica (Shao, 2013) .

Distintas investigaciones se llevaron a cabo en razón de determinar la capacidad inelástica de deformación. Caltrans adoptó la ecuación : $L_p = 0.08L + 0.022 f_s * d_s$. Las guías de diseño de puentes y autopistas de chiha (JTG/T B02-01) (MOT 2008) y el Eurocodigo 8 (EN-1998 2005) Realizaron ligeras modificaciones. Las especificaciones de diseño sísmico de puentes en autopistas de Japón (JRO 2002) y la norma neozelandesa NZS-3101:2006 (SNZ 2006) toman en cuenta el efecto de la longitud de la sección transversal en la dirección de carga sobre L_p . En la Tabla 5.23 se obtiene las longitudes plásticas para cada criterio mencionado anteriormente.

Tabla 5.21 Longitud L_p para diferentes criterios para las vigas de ensayo.

Criterio	V. Control	VE-01	VE-02	VE-03
Caltrans 2010	307.84 mm	307.84 mm	307.84 mm	307.84 mm
JRA 2002	355.00 mm	355.00 mm	355.00 mm	355.00 mm
JTG/t b02-01	295.68 mm	295.68 mm	295.68 mm	295.68 mm
Priestley	377.35 mm	367.45 mm	353.50 mm	367.13 mm
NZS-3101:2006	360.00 mm	352.62 mm	299.85 mm	353.77 mm

5.3.4 **Momento - curvatura experimental.**

Como se me menciona en el capítulo IV, se colocaron dispositivos de medición de desplazamiento en ambas caras de longitud libre del elemento (zonas de reforzamiento de CFRP). Tras haber finalizado la imposición de ciclos de carga, los transductores de medición de desplazamientos laterales, trazaron la trayectoria que deseaba obtenerse de acuerdo a la curva elástica obtenida teóricamente en el diseño de los elementos. La Fig. 5.39 muestra los desplazamientos laterales medidos por los LDVT, para los cuatro (04) especímenes, esta representación gráfica combina la lectura de desplazamientos en el lado positivo y negativo de cada espécimen.

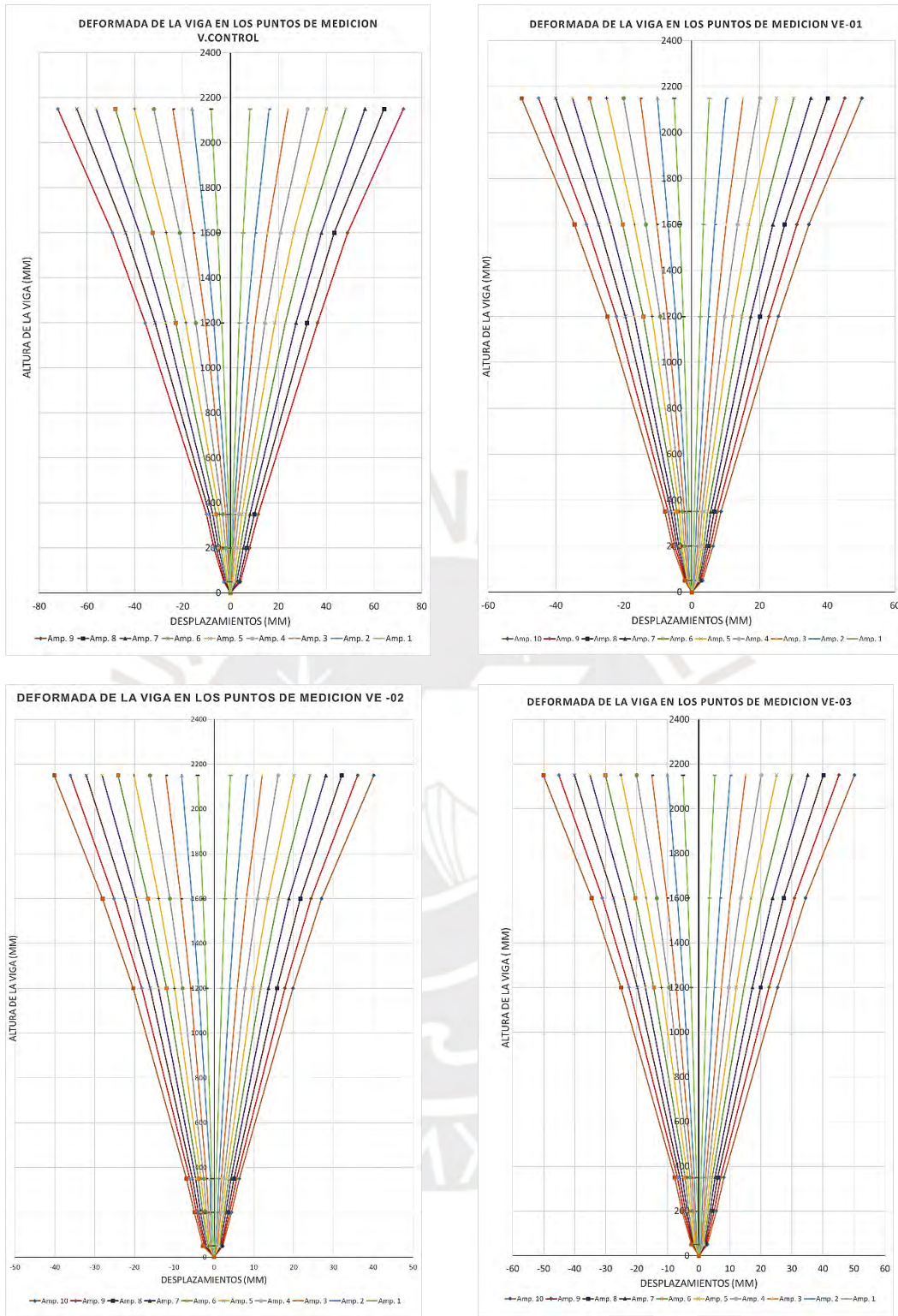


Figura 5.37. Deformada de las vigas de ensayo. De izquierda a derecha: V. Control, VE-01, VE-02 y VE-03

5.3.4.1 Viga de Control

Una vez desarrollado el procedimiento numérico de obtención de curvaturas se obtienen los diagramas de momento curvatura experimentales. De acuerdo a los

mencionado en el acápite 3.5 sobre el comportamiento de estructuras de concreto armado ante cargas cíclicas, se obtienen dos (2) diagramas de medición:

Lado Positivo: Zona de medición de la flexión en el diseño teórico, zona donde se ubica el acero de tracción. En esta zona se utilizaron los LDVT'S 04, 05 y 06, que se ubicaron a 350 mm, 200 mm y 50 mm, respectivamente.

Al estar el impulso de la carga del actuador ubicada en lado negativo de la parte superior del elemento, el desplazamiento inicial de lado positivo es por compresión, y el de lado negativo por tracción, luego de alcanzar el desplazamiento objetivo, la carga retorna a cero, para continuar con la carga en sentido inverso. En este punto el desplazamiento de lado positivo es por tracción y el de lado negativo por compresión, al alcanzar el desplazamiento objetivo negativo, la carga nuevamente retorna cero. Este procedimiento se realiza repetidamente con los incrementos de amplitud definidos para cumplir con todos los ciclos de carga solicitados.

En la Fig. 5.38 se observa la histéresis originada en todos los ciclos de desplazamiento del elemento para el lado positivo. Los lazos ubicados en el primer (I) cuadrante corresponden a la compresión y los lazos que se ubican en el tercer (III) cuadrante corresponden a la tracción. Es evidente observar que los lazos de histéresis muestran el llamado “Efecto Bauschinger” (Acápite 3.5.2) propio de los aceros al ser sometidos a incursiones en el rango plástico y compresión.

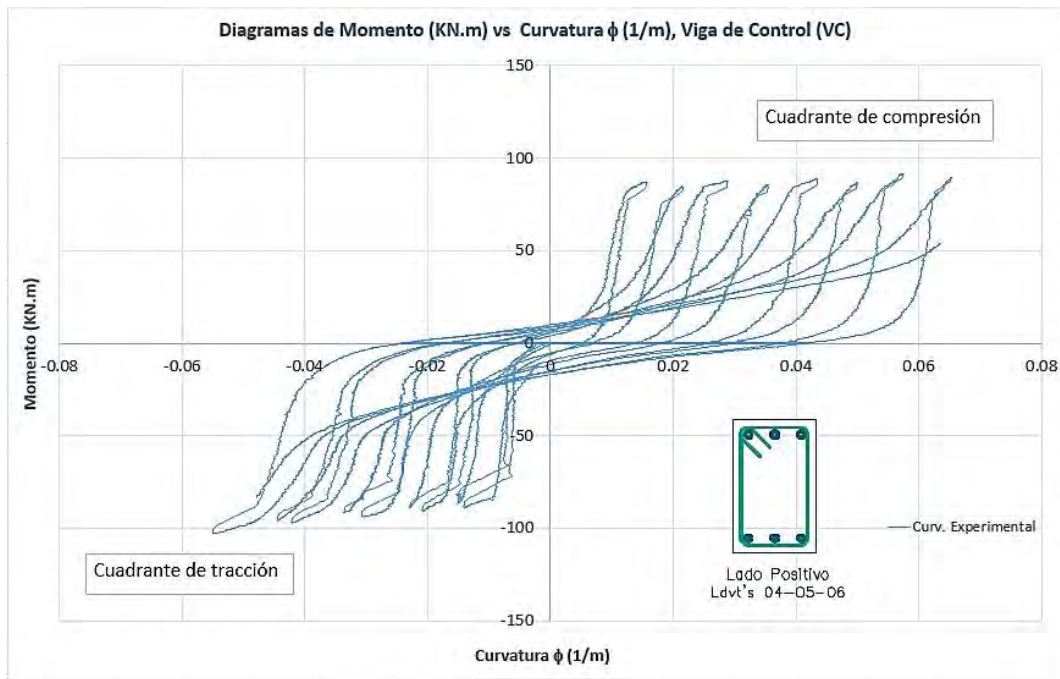


Figura 5.38. Diagrama Momento – Curvatura Experimental vs. Teórica, Viga de Control (Lado Positivo)

Lado Negativo: Zona de medición de la flexión en el diseño teórico, zona donde se ubica el acero de tracción. En esta zona se utilizaron los LDVT'S 10, 11 y 12, que se ubicaron a 350 mm, 200 mm y 50 mm, respectivamente.

Al estar el impulso de la carga del actuador ubicada en lado negativo de la parte superior del elemento, el desplazamiento inicial de lado negativo es por tracción, luego de alcanzar el desplazamiento objetivo, la carga retorna a cero, para continuar con la carga en sentido inverso.

En la Fig. 5.39 se observa la histéresis originada en todos los ciclos de desplazamiento del elemento para el lado positivo. Los lazos ubicados en el primer (I) cuadrante corresponden a la tracción y los lazos que se ubican en el tercer (III) cuadrante corresponden a compresión.

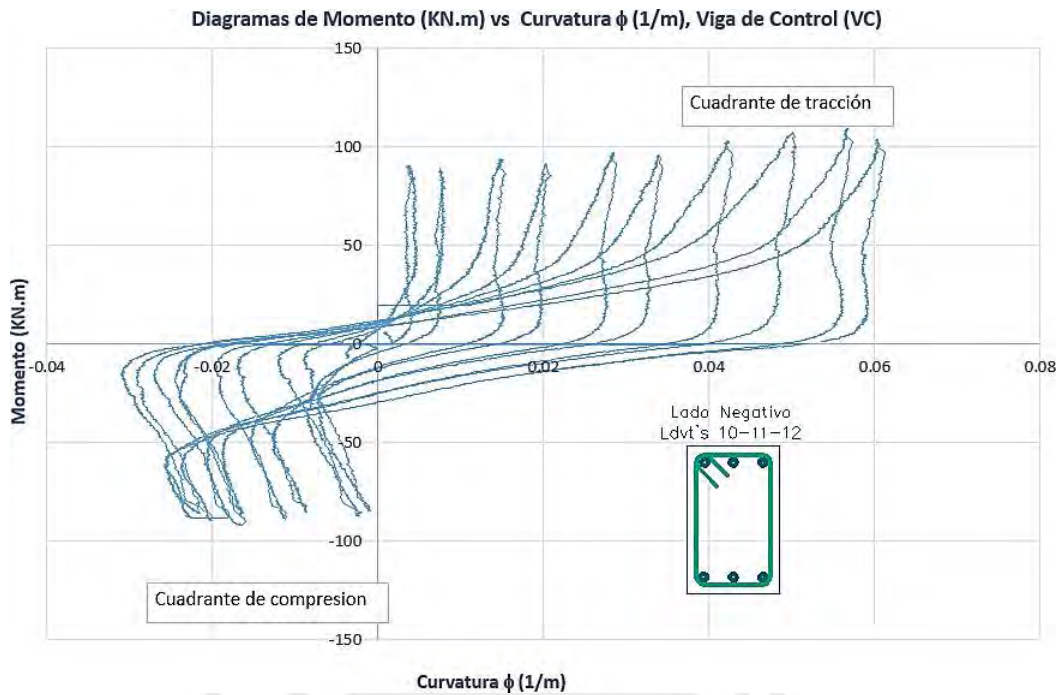


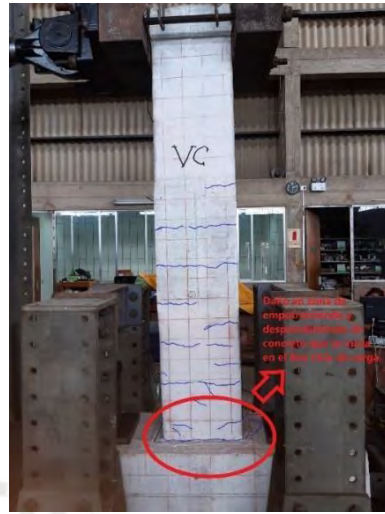
Figura 5.39. Diagrama Momento – Curvatura Experimental vs. Teórica, Viga de Control (Lado Negativo)

En ambos gráficos se nota el comportamiento descrito por el efecto Bauschinger, la diferencia de estas estas interacciones entre ciclos histeréticos, se debe al debilitamiento, acumulación de daño, agrietamiento sucedidos en cada ciclo de carga incremental (Fig. 5.40).

El deterioro progresivo evidenciado en los lazos histeréticos muestra un claro distanciamiento entre cada uno de los lazos, esto se debe a la acumulación de daño por cada longitud objetivo alcanzado, al ser la viga con mayor ductilidad del grupo, se determinó longitudes mayores por cada ciclo de carga, lo que provoca el aplastamiento por compresión de la cara lateral donde se aplica la carga y la ruptura de concreto por tensión en el sentido contrario de la carga, acumulando mayor cantidad de energía en la zona de formación de rotula plástica.



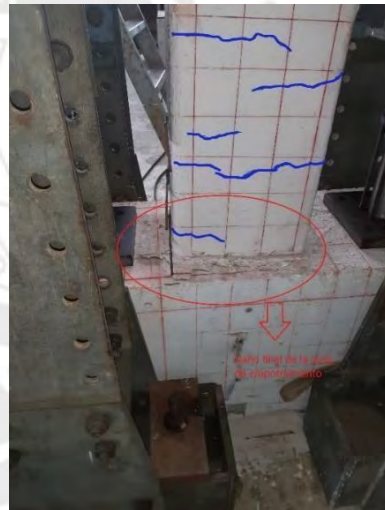
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.40. Deterioro progresivo de Viga De Control: (a) Agrietamiento acumulado hasta 3er ciclo. (b) Falla de empotramiento 7^{mo} ciclo. (c) Vista posterior de agrietamiento. (d) Daño final de zona de empotramiento. (Fuente: Propia)

5.3.4.2 VE-01

De igual manera que en V. Control, desarrollado el procedimiento numérico de obtención de las curvaturas, se obtienen los diagramas de momento curvatura experimentales, en dos (2) diagramas de medición:

Lado Positivo: Zona de medición de la flexión en el diseño teórico, zona donde se ubica el acero de tracción. En esta zona se utilizaron los LDVT'S 04, 05 y 06, que se ubicaron a 350 mm, 200 mm y 50 mm, respectivamente.

El desplazamiento inicial de lado positivo es por compresión, y el de lado negativo por tracción, luego de alcanzar el desplazamiento objetivo, la carga retorna a cero, para continuar con la carga en sentido inverso. En este punto el desplazamiento de lado positivo es por tracción y el de lado negativo por compresión, al alcanzar el desplazamiento objetivo negativo, la carga nuevamente retorna a cero. Este procedimiento se realiza repetidamente con los incrementos de amplitud definidos para cumplir con todos los ciclos de carga solicitados.

En la Fig. 5.41 se observa la histéresis originada en todos los ciclos de desplazamiento del elemento para el lado positivo. Los lazos ubicados en el primer (I) cuadrante corresponden a la compresión y los lazos que se ubican en el tercer (III) cuadrante corresponden a la tracción.

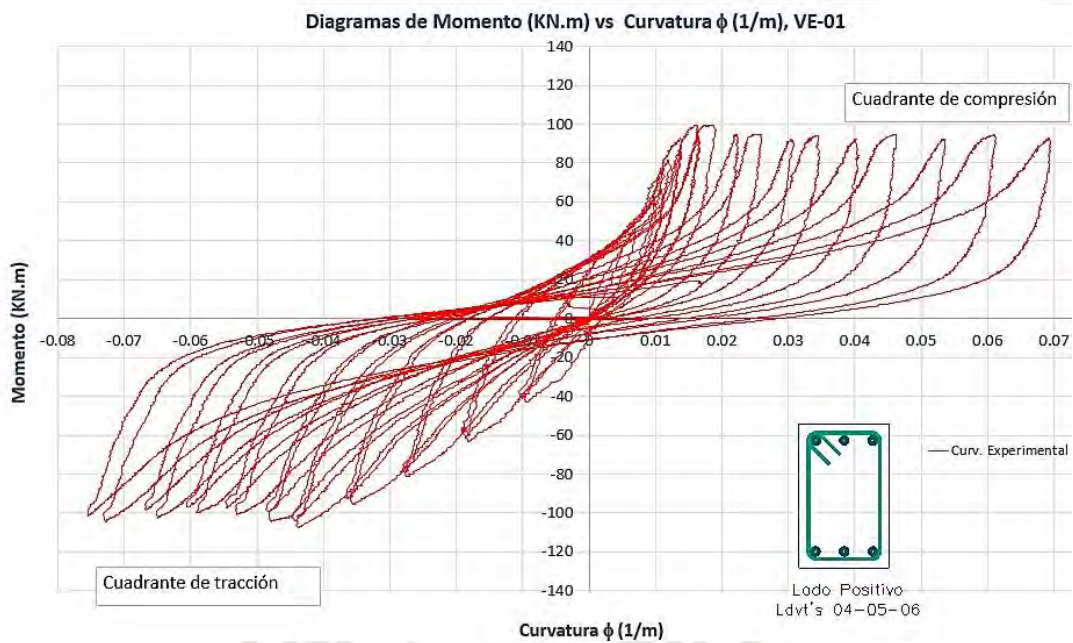


Figura 5.41. Diagrama Momento – Curvatura Experimental vs. Teórica, Viga VE-01 (Lado Positivo)

Lado Negativo: Zona de medición de la flexión en el diseño teórico, zona donde se ubica el acero de tracción. En esta zona se utilizaron los LDVT'S 10, 11 y 12, que se ubicaron a 350 mm, 200 mm y 50 mm, respectivamente.

El desplazamiento inicial de lado negativo es por tracción, luego de alcanzar el desplazamiento objetivo, la carga retorna a cero, para continuar con la carga en sentido inverso.

En la Fig. 5.42 se observa la histéresis originada en todos los ciclos de desplazamiento del elemento para el lado positivo. Los lazos ubicados en el primer (I) cuadrante corresponden a la tracción y los lazos que se ubican en el tercer (III) cuadrante corresponden a compresión.

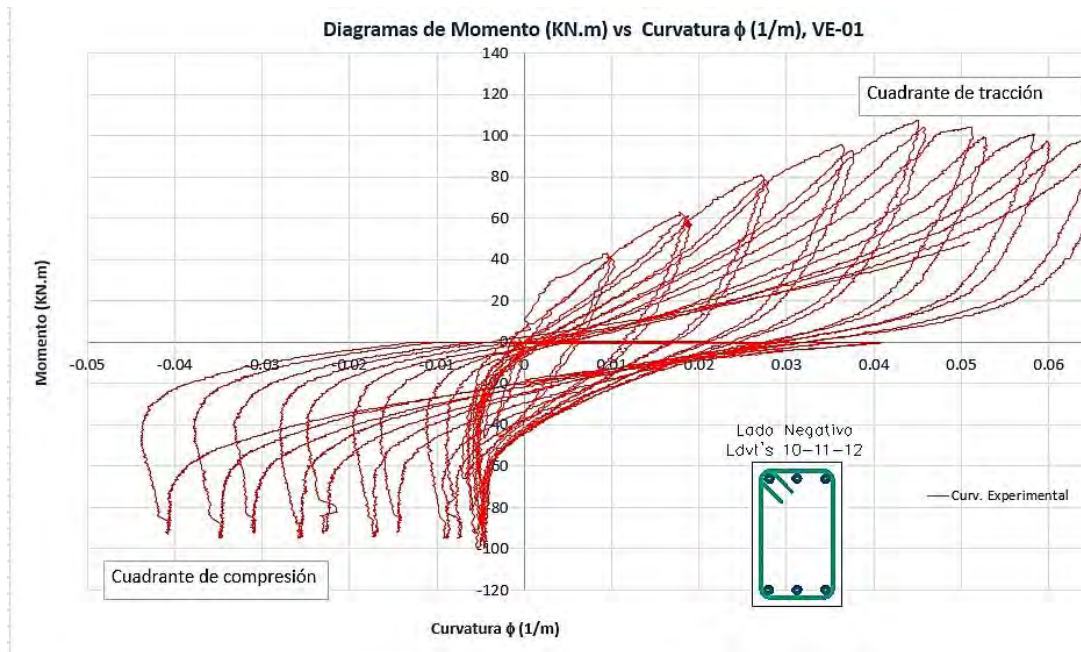


Figura 5.42. Diagrama Momento – Curvatura Experimental vs. Teórica, Viga VE-01 (Lado Negativo)

Para cada incursión de carga para ambas caras de estudio del Especimen VE-01, se evidencia el debilitamiento gradual para cada impulso de carga del ciclo impuesto. La Fig. 5.43 muestra el debilitamiento acumulado de la imposición de carga y el progresivo agrietamiento.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.43. Deterioro progresivo de VE-01: (a) Agrietamiento acumulado hasta 3er ciclo. (b) Falla de empotramiento y acumulación de daño, 8^{vo} ciclo. (c) Vista posterior de agrietamiento, 9^{no} ciclo. (d) Daño final de zona de empotramiento (Fuente: Propia).

5.3.4.3 VE-02

Para el caso de la VE-02, la cual poseía un incremento de área de acero en tracción, además de la adición de 03 capas (n_f) de CFRP y un anclaje de 1" para la fibra de protección, como se muestra en la Tabla 5.20. Realizado el procedimiento numérico de obtención de las curvaturas, se obtienen los diagramas de momento curvatura experimentales, en dos (2) diagramas de medición, los cuales se diferencian notoriamente de los otros 03 especímenes, tanto para las incursiones en tracción y compresión de las caras positivas y negativas de cada elemento.

Tabla 5.22 Características de Espécimen VE-02

Viga	f_c	A_s^+	A_s^-	n_f Flexión	n_f Compresión	\varnothing de anclaje FRP
VE-02	210 kg/cm ²	4 \varnothing 5/8"+1 \varnothing 1/2"	3 \varnothing 5/8"	3	3	1"

Lado Positivo: Zona de medición de la flexión en el diseño teórico, zona donde se ubica el acero de tracción. En esta zona se utilizaron los LDVT'S 04, 05 y 06, que se ubicaron a 350 mm, 200 mm y 50 mm, respectivamente.

El desplazamiento inicial de lado positivo es por compresión, y el de lado negativo por tracción, luego de alcanzar el desplazamiento objetivo, la carga retorna a cero, para continuar con la carga en sentido inverso. En este punto el desplazamiento de lado positivo es por tracción y el de lado negativo por compresión, al alcanzar el desplazamiento objetivo negativo, la carga nuevamente retorna cero. Este procedimiento se realiza repetidamente con los incrementos de amplitud definidos para cumplir con todos los ciclos de carga solicitados.

En la Fig. 5.44 se observa la histéresis originada en todos los ciclos de desplazamiento del elemento para el lado positivo. Los lazos ubicados en el primer (I) cuadrante

corresponden a la compresión y los lazos que se ubican en el tercer (III) cuadrante corresponden a la tracción.

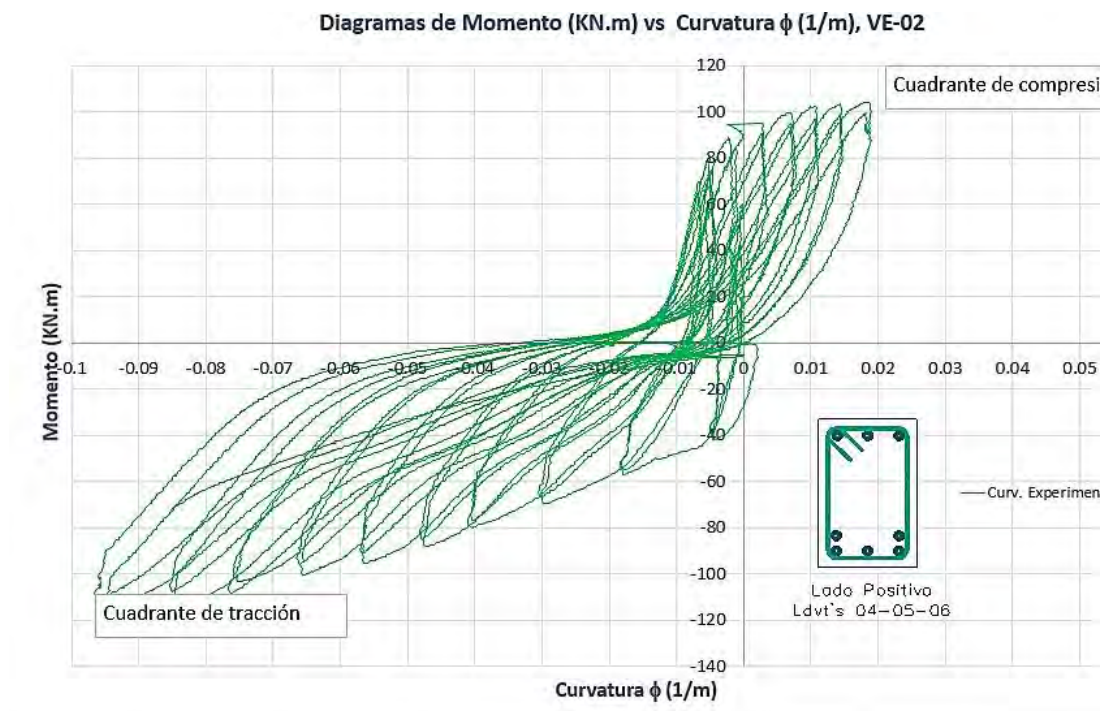


Figura 5.44. Diagrama Momento – Curvatura Experimental vs. Teórica, Viga VE-02 (Lado Positivo)

Lado Negativo: Zona de medición de la flexión en el diseño teórico, zona donde se ubica el acero de tracción. En esta zona se utilizaron los LDVT'S 10, 11 y 12, que se ubicaron a 350 mm, 200 mm y 50 mm, respectivamente.

El desplazamiento inicial de lado negativo es por tracción, luego de alcanzar el desplazamiento objetivo, la carga retorna a cero, para continuar con la carga en sentido inverso.

En la Fig. 5.47 se observa la histéresis originada en todos los ciclos de desplazamiento del elemento para el lado positivo. Los lazos ubicados en el primer (I) cuadrante corresponden a la tracción y los lazos que se ubican en el tercer (III) cuadrante corresponden a compresión.

En ambos gráficos se nota el comportamiento descrito por el efecto Bauschinger, la diferencia de estas estas interacciones entre ciclos histeréticos, se debe al debilitamiento, acumulación de daño, agrietamiento sucedidos en cada ciclo de carga incremental (Fig. 5.45)

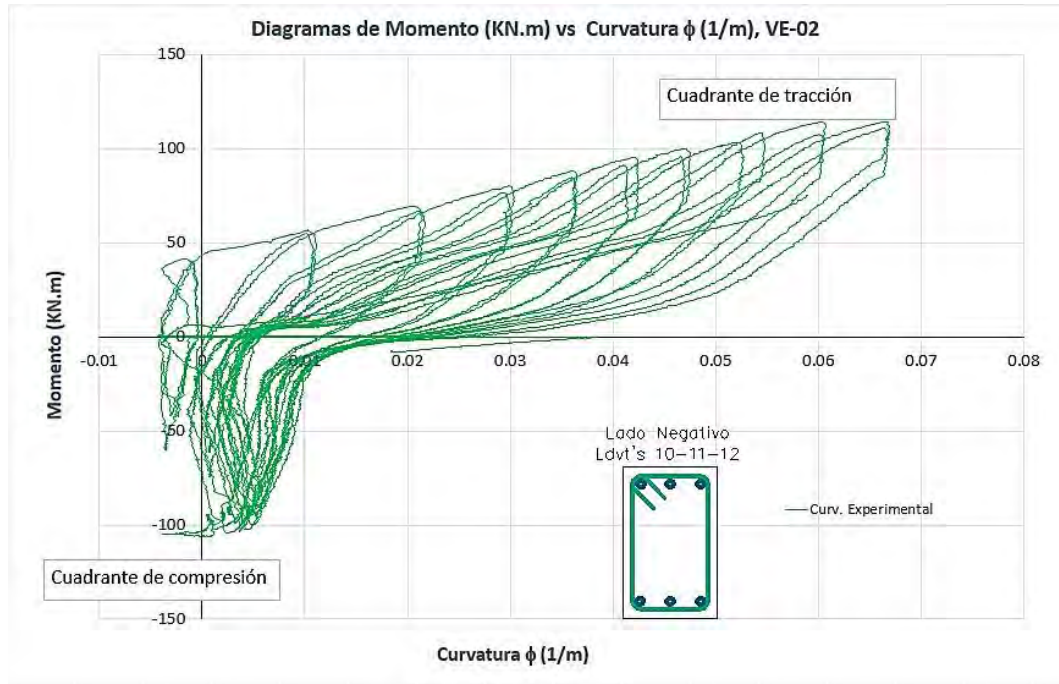


Figura 5.45. Diagrama Momento – Curvatura Experimental vs. Teórica, Viga VE-02 (Lado Negativo)

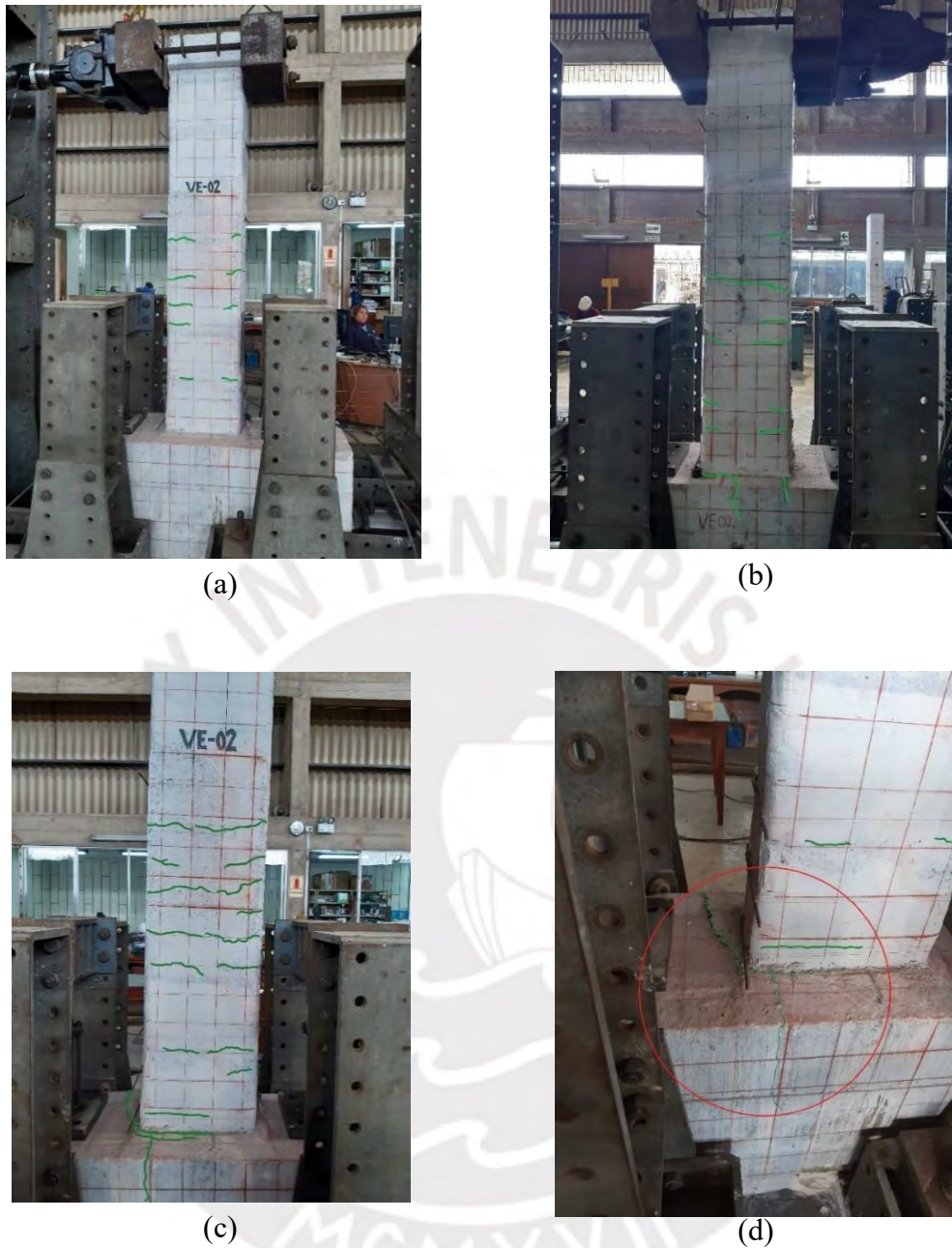


Figura 5.46. Deterioro progresivo de VE-02: (a) Agrietamiento acumulado hasta 2er ciclo. (b) Vista posterior de agrietamiento, 3^{to} ciclo. Inicio de la falla de empotramiento en el lado positivo del elemento (c) Agrietamiento y verificación de falla de empotramiento del elemento, 7^{mo} ciclo. (d) Daño final de zona de empotramiento. (Fuente: Propia)

5.3.4.4 VE-03

Al igual que el Espécimen VE-02, el Espécimen VE-03 posee un incremento de área de acero en tracción, adición de 01 capa (n_f) de CFRP y un anclaje de 3/4" para la fibra de protección, como se muestra en la Tabla 5.21. Realizado el procedimiento numérico

de obtención de las curvaturas, se obtienen los diagramas de momento curvatura experimentales, en dos (2) diagramas de medición:

Tabla 5.23 Características de Espécimen VE-03

Viga	f_c	A_s^+	A_s^-	nr Flexión	nr Compresión	Ø de anclaje FRP
VE-03	210 kg/cm ²	$4 \varnothing_{5/8''} + 1 \varnothing_{1/2''}$	$3 \varnothing_{5/8''}$	1	1	$3/4''$

Lado Positivo: Zona de medición de la flexión en el diseño teórico, zona donde se ubica el acero de tracción. En esta zona se utilizaron los LDVT'S 04, 05 y 06, que se ubicaron a 350 mm, 200 mm y 50 mm, respectivamente.

El desplazamiento inicial de lado positivo es por compresión, y el de lado negativo por tracción, luego de alcanzar el desplazamiento objetivo, la carga retorna a cero, para continuar con la carga en sentido inverso. En este punto el desplazamiento de lado positivo es por tracción y el de lado negativo por compresión, al alcanzar el desplazamiento objetivo negativo, la carga nuevamente retorna cero. Este procedimiento se realiza repetidamente con los incrementos de amplitud definidos para cumplir con todos los ciclos de carga solicitados.

En la Fig. 5.47 se observa la histéresis originada en todos los ciclos de desplazamiento del elemento para el lado positivo. Los lazos ubicados en el primer (I) cuadrante corresponden a la compresión y los lazos que se ubican en el tercer (III) cuadrante corresponden a la tracción.

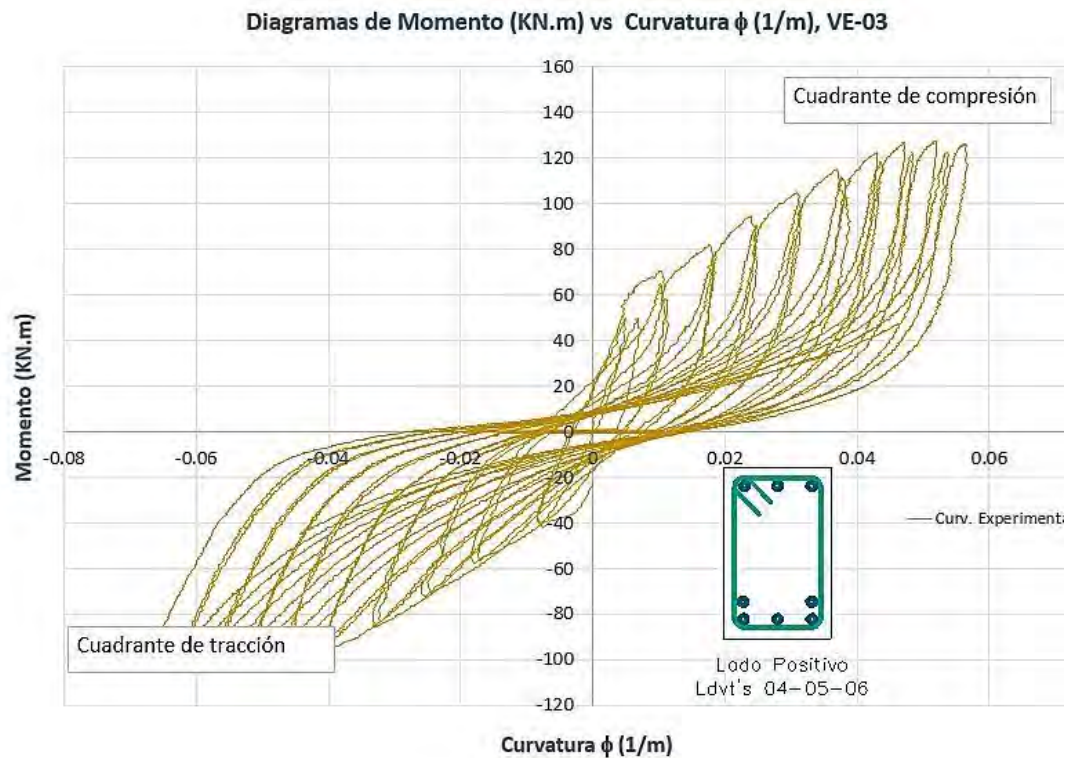


Figura 5.47. Diagrama Momento – Curvatura Experimental vs. Teórica, Viga VE-03 (Lado Positivo)

Lado Negativo: Zona de medición de la flexión en el diseño teórico, zona donde se ubica el acero de tracción. En esta zona se utilizaron los LDVT'S 10, 11 y 12, que se ubicaron a 350 mm, 200 mm y 50 mm, respectivamente.

El desplazamiento inicial de lado negativo es por tracción, luego de alcanzar el desplazamiento objetivo, la carga retorna a cero, para continuar con la carga en sentido inverso.

En la Fig. 5.48 se observa la histéresis originada en todos los ciclos de desplazamiento lateral del elemento para el lado positivo. Los lazos ubicados en el primer (I) cuadrante corresponden a la tracción y los lazos que se ubican en el tercer (III) cuadrante corresponden a compresión.

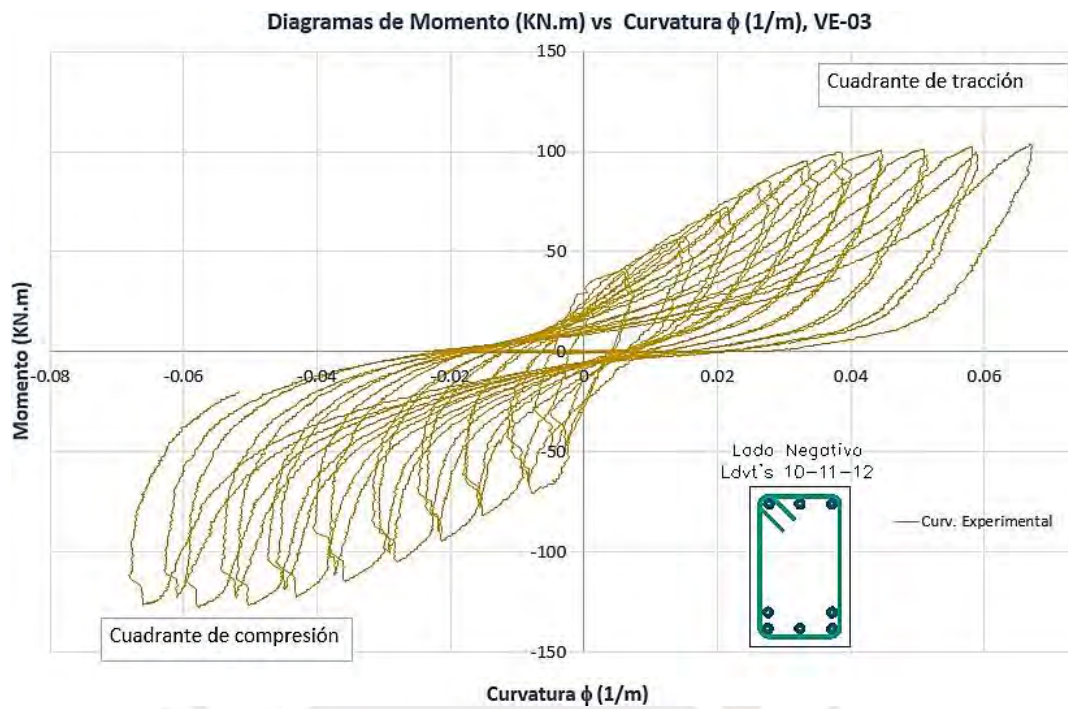


Figura 5.48. Diagrama Momento – Curvatura Experimental vs. Teórica, Viga VE-03 (Lado Negativo)

En ambos gráficos se nota el comportamiento descrito por el efecto Bauschinger, la diferencia de estas estas interacciones entre ciclos histeréticos, se debe al debilitamiento, acumulación de daño, agrietamiento sucedidos en cada ciclo de carga incremental (Fig. 5.51)



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.49. Deterioro progresivo de VE-03: (a) Agrietamiento acumulado hasta ciclo final. (b) Vista posterior de agrietamiento final. (c) Falla de empotramiento. (d) Vista posterior de año final de zona de empotramiento. (Fuente: Propia)

6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El objetivo principal del presente trabajo de investigación fue estudiar el comportamiento de vigas de concreto armado reforzadas externamente con el sistema CFRP, bajo cargas de naturaleza cíclica en reversa (“Cuasi-estática”) para evaluar la conservación de sus propiedades en términos de capacidad resistente, ductilidad, degradación de rigidez y disipación de energía. A través de los ensayos experimentales realizados, la medición de desplazamientos laterales y cargas impuestas en los elementos se pudo cuantificar los valores numéricos que muestran el deterioro progresivo de los elementos de ensayo. Es así que se desprenden las siguientes conclusiones:

6.1 Conclusiones.

6.1.1 Acerca del programa experimental.

- a) El incremento de la resistencia final de los elementos reforzados externamente con el sistema CFRP es notable, los valores estuvieron por encima de la resistencia calculada, acorde a la filosofía de diseño de la guía ACI 440.2R-08, con un promedio de 35 % mayor a la resistencia diseñada.
- b) Los especímenes ensayados bajo influencia de la carga cíclica controlada por desplazamientos laterales no presentaron fallas respecto al refuerzo externo con FRP, el agrietamiento producido por las cargas laterales en los especímenes reforzados se desarrolló en el área cercana a la zona de empotramiento por debajo de $L/2$ de la longitud total a comparación de la Viga de Control que tubo agrietamientos de hasta 0.60 mm a $3/4$ de la longitud total, registrándose daños en la zapata para los tres (03) especímenes reforzados.
- c) El incremento de rigidez del espécimen VE-01 respecto a la viga de control por cada ciclo de carga fue del promedio del 40 % Así mismo, los incrementos de rigidez de los

especímenes VE-02 Y VE-03 (ambos con mayor cuantía de acero en la zona de tracción) fueron del 5 % para los y 3% respectivamente para los cuatro (04) primeros ciclos de carga respecto al espécimen VE-01. Lo que gráficamente demuestra el incremento de rigidez aportado por el refuerzo externo CFRP.

- d) Los gráficos de degradación de rigidez normalizada mostrados en este trabajo de investigación muestran una disminución parabólica en todos los especímenes ensayados, la pérdida de rigidez gradual de la viga de control es el esperado para una sección doblemente reforzada, así mismo en los especímenes VE-01 Y VE-03 reforzados con 01 capa de CFRP muestran una menor pérdida de rigidez por cada ciclo de imposición de carga hasta el final de los ensayos por acción de refuerzo externo y su incremento de inercia de la sección, en el espécimen VE-02 el cual tuvo 03 capas de CFRP presento una caída de resistencia y mayor pérdida de rigidez mayor que los otros 02 especímenes reforzados debido a la ruptura de concreto en la zapata que sostenía a la viga vertical, sin embargo los especímenes reforzados tuvieron una menor pérdida de rigidez por cada ciclo de carga frente a la viga de control.
- e) La imposición de carga lateral bidireccional creciente en los elementos reforzados con el sistema CFRP , el incremento de rigidez producido por la cuantía de capas de reforzamiento, sumado al incremento de la resistencia, la reducción de los desplazamientos laterales y el giro de la sección sometida a cargas crecientes positivas y negativas provoco la ruptura y agrietamiento de concreto de la zona de empotramiento de los elementos reforzados, los cuales se aprecian gráficamente en los descensos de resistencia e incremento de longitud en los gráficos de histéresis de los elementos reforzados.

6.1.2 Acerca del comportamiento experimental obtenido.

- a) Para los especímenes VE-01 y VE-03 que alcanzaron valores favorables de desempeño del espécimen, el incremento de 25 % de resistencia para el primer agrietamiento y un factor de ductilidad final de $\mu\Delta$ de 2.95 y 2.200 respectivamente, frente a 3.69 de V. Control. La viga que tuvo la mayor reducción de ductilidad parcial de desplazamiento fue VE-02 teniendo un valor $\mu\Delta$ 2.01, siendo 9 % menor que el Especimen VE-03. La mayor cuantía de CFRP en el Especimen VE-02 tuvo un efecto negativo en el desarrollo de la ductilidad de desplazamiento que se esperaba en desarrollo de la experimentación.
- b) La cantidad total de energía disipada de los elementos se mantiene mayor al 50 % de la energía total en los especímenes reforzados: VE-01 con 66.17 %, VE-02 con 57.78 % y VE-03 con 58.95%, respecto a al 72.04% de energía disipada de la viga de control. Para un valor de 40 mm donde V. Control alcanzo un valor de disipación de energía de 4.53 KN.m, para VE-01 un valor de 7.15 KN.m (58% mayor a V. Control), para VE-02 un valor de 7.47 KN.m (65% Mayor a V. Control) y para VE-03 un valor de 6.34 KN.m (40% mayor a V. Control)
- c) El número de bandas de CFRP tiene un efecto contrario en cuanto al factor de ductilidad de los especímenes, producto de la rigidez incrementada y la reducción de las deflexiones que puede soportar el elemento.
- d) Las bandas de CFRP conservaron sus propiedades a lo largo de todo el programa experimental, lo que indica una correcta adherencia de la matriz polimérica y el elemento reforzado aportando al incremento de resistencia.
- e) Las cargas máximas de fluencia experimental fueron 17% mayores que las cargas teóricas de diseño para los especímenes reforzados con bandas CFRP.

6.1.3 Acerca de la modificación de comportamiento ante carga cíclica por la inclusión de un sistema de refuerzo externo FRP.

- a) La inclusión del sistema FRP en una viga de concreto armado modifica su comportamiento estructural, específicamente en: incremento a la resistencia a flexión, rigidez, reducción del desplazamiento, reducción de grietas, pero en contraposición se tendrá una significativa reducción del factor de ductilidad de los elementos de concreto armado, lo que supondrá tener en consideración la correcta distribución del sistema de reforzamiento externo CFRP respecto a la cuantía adecuada de acuerdo a las dimensiones de los elementos estructurales y la distribución de acero longitudinal que presenten. El comportamiento final que se obtendrá al reforzar una viga de concreto armado, se verá vinculado a la cantidad de acero de la sección, la cuantía de refuerzo externo, la rigidez axial, así como la calidad constructiva del elemento.
- b) El uso de los anclajes U en los extremos de los especímenes reforzados, funcionaron efectivamente en el procedimiento de ensayo, donde no se presentaron fallas por delaminación, arrancamiento y desprendimiento del refuerzo externo.

6.2 Recomendaciones.

- a) La aplicación de sistemas CFRP con una banda mejoraron notoriamente la resistencia de los elementos reforzados, los sistemas rígidos permitieron el normal desarrollo de la fluencia, adicionalmente las bandas perpendiculares U otorgaron un confinamiento adicional al sistema evitando la delaminación, posteriores investigaciones pueden considerar el desempeño sin la adición de bandas U para verificar las limitaciones de las cargas resistentes en distintas amplitudes y compararlas.
- b) Estudiar mayores cantidades de vigas, de diferentes configuraciones ante cargas cíclicas de mayor amplitud (± 150 mm) con variadas cuantías de acero en flexión, incrementando los ciclos de primer agrietamiento, entre 1 mm y 5 mm al menos en 4

ciclos respectivamente y continuar con las amplitudes posteriores hasta la falla del elemento.

- c) Los resultados obtenidos en las histéresis de los gráficos de Momento vs Curvatura experimentales tuvieron una gran diferencia grafica con los gráficos teóricos, siendo los valores experimentales iguales hasta la primera rotura e incursionando en el rango elástico con una pérdida de resistencia notable, para los elementos reforzados con el sistema CFRP. Es importante revisar este notable desbalance de los resultados y es preciso verificar y reajustar los métodos de obtención de resultados para los gráficos de momento curvatura con la medición de deformaciones axiales en las caras extremas de los elementos para posteriores investigaciones con variaciones en los ciclos de carga, amplitudes de desplazamiento y diferentes configuraciones de geometría del elemento y cuantías de reforzamiento de acero y CFRP.
- d) Configurar sistemas mecánicos para realizar ensayos de carga cíclica de manera horizontal, permitiendo considerar valores como: creep del concreto, peso propio en vigas longitudinales con apoyos en ambos extremos. También puede adicionarse la imposición de cargas sinusoidales con velocidades controladas, evaluando la fatiga de la carga cíclica.
- e) Para ensayos futuros con la misma configuración vertical del elemento sometido a desplazamientos, es necesario revisar y mejorar el reforzamiento a tracción del empotramiento, debido a la cantidad de agrietamiento y ruptura de los especímenes reforzados con CFRP los cuales fueron transmitidos gradualmente el incremento de amplitud de los desplazamientos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. American Concrete Institute (ACI Committee 318). (2014). Building code requirements for structural concrete (ACI-318-14) and commentary (ACI 318R-14). Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute
2. ACI 440-2R-17. Guide for the design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, 2017.
3. Aydin H., Gravina R.J. y Visintin P. (2016) Durability of adhesively Bonded FRP-to-Concrete Joints. *Journal of Composites for Construction*, 20 (5), 04016016.
4. Baca E. y Espinoza C. (2005) Reforzamiento de Estructuras con Fibras de Carbono. Tesis de Grado. Universidad Ricardo Palma. Facultad de Ingeniería. Lima.
5. Badawy, M. (2007) Monotonic and fatigue flexural Behavior of RC beams Strengthened with Prestressed NSM CFRP Rods. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering. Ontario: University of Waterloo.
6. Bazan, J. (2015) Estudio Experimental y Numérico del comportamiento de Flexión de Vigas de Concreto Armado Reforzadas con Bandas de FRP. Tesis de maestría en ingeniería estructural. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Unidad de Posgrado.
7. Bazan, J. L. y Fernandez-Davila G., V. I. (2019). Evaluación de la sobrerresistencia a la flexión de vigas de concreto armado reforzadas con bandas FRP. *XII Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica. Chile.*
8. Federal Emergency Management Agency, FEMA 461 (2007). Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of structural and Nonstructural Components. *Federal Emergency Management Agency, USA.*

9. Danraka, M. N., Mahmud, H. M., Oluwatosin O.k.J & Student PG. (2017). Strengthening of Reinforced Concrete Beams using FRP technique: A review. *International Journal of Engineering Science* 7(6): 13199.
10. Deng J, Liu A., Ma Z. J., Huang P. y Zhou R. (2015) Interfacial Behavior of RC Beams Strengthened with FRP under Fatigue Loading. *Advances in Structural Engineering*, 18(2), 283-293.
11. Dong J.F., Wang, Q.Y. & Guan, Z.W. (2012) Structural behavior of RC beams externally strengthened with FRP sheets under fatigue and monotonic loading. *Engineering Structures*, 41, 23-33.
12. Dushimimana, A., Ziada, M., & Tuhta S. (2018) Effect of carbon Fiber reinforced polymer (CFRP) composites applied to walls and slabs of masonry buildings. *Development* 5 (04): 2343-2442.
13. Ekenel, M., Rizzo, A. J.J. Myers & Nanni , A. (2005) Effect of fatigue Loading on Flexural Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP fabric and Pre-Cured Laminate Systems. *Journal Composites for Construction*. 10 (5). 433-442.
14. Fareed, S. (2014) Behavior of reinforced concrete beams strengthened by CFRP wraps with and without end anchorages. *Procedia Engineering* 77: 123-130.
15. Ferrier, E., Bigaud, D., Clement, J.C. y Hamelin P. (2011) Fatigue-loading effect on RC beams strengthened with externally bonded FRP. *Construction and Building Materials*, 25, 539-546.
16. Ganesan, N., Indira, P.V., Sabeena, M.V. (2013) Behaviour of hybrid fibre reinforced concrete beam-columns joints under reverse cyclic loads. *Materials and Design (1980-2015)*, 54, 686-693.

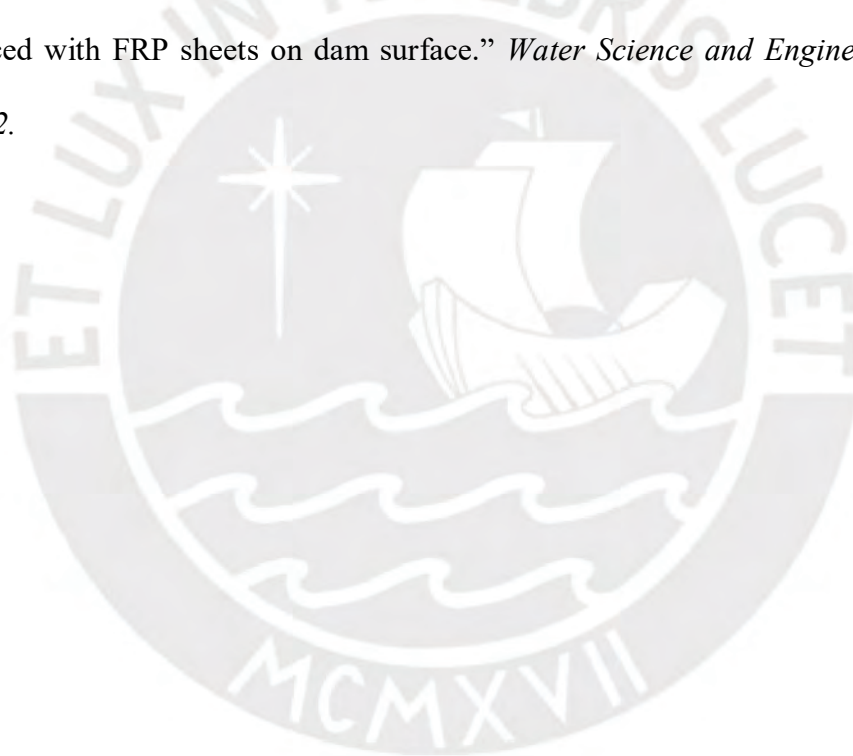
17. Hadigheh, S.A., Gravina, R.J., Smith, S.T. (2017) Effect of acid attack of FRP-to – concrete bonded interfaces. *Construction and Building Materials*, 152, 285-303.
18. Kalavagunta, S., Naganathan, S., & Mustapha, K, N, B (2014). “Axially loaded steel columns strengthened with CFRP”. *Jordan Journal of Civil Engineering* 8 (1): 58-69.
19. Kim N, Kim Y, Kim H. (2013) Experimental study for evaluating structural behavior of RC beams strengthened by different width of FRP layers. *IACSIT Int. J. Eng. Technol.*;5(6).
20. Lavorato, D., Bergami, A. V., Fiorentino, G., Fiore, A, Santini, S. & Nuti S. (2018) Experimental tests on existing RC beams strengthened in flexure and retrofitted for shear by C-FRP in presence of negative moments. *International Journal of Advanced Structural Engineering*: 1-22.
21. Landesmann, A., Seruti, C. A. y Batista, E.d.M. (2015). Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymers Members for Structural Applications. *Materials Research*. 18(6), 1372-1383.
22. Li, Y.-f., Xie Y.-m & Tsai M.-j. (2009) Enhancement of the flexural performance of retrofitted wood beams using CFRP composite sheets. *Construction and Building Materials* 23 (1): 411-422.
23. Mahal, M., Taljsten, B., & Blanksvard, T. (2013) Examination at a Material and Structural Level of the Fatigue Life of beams Strengthened with Mineral or Epoxy Bonded FRPs: The state of the Art. *Advances in Structural Engineering*, 16(7), 1311-1327.
24. Mahal, M. Taljsten, B. & Blanksvard, T. (2016) Experimental performance of RC beams strengthened with FRP materials under monotonic and fatigue loads. *Construction and Buildings Materials*, 122, 126-139.

25. Mashrei, M. A., Makki, J. S., & Sultan, A. A. (2019). Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets with Grooves. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 16(4).
26. Meneghetti, L. C., Garcaez, M. R., Silva Filho, L. C. P. DE & Gastal, F. de P. S. L. (2011). Fatigue life regression modelo f reinforced concrete beams strengthened with FRP. *Magazine of Concrete Research* 63(7), 539-549.
27. Moncayo, T. & Vallejo, M., (2017) Estudio del comportamiento e inestabilidad del refuerzo longitudinal en estructuras de concreto reforzado sometidas a cargas cíclicas. Tesis de titulación de ingeniería civil. Ecuador: Universidad de Cuenca.
28. Mostofinejad, D. & Shameli, M., (2011) Performance of EBROG method under multilayer FRP sheets for flexural strengthening of concrete beams. *Procedia Engineering* 14: 3176-3182.
29. Mukherjee A, Joshi M. (2005) FRPC reinforced concrete beam-column joints under cyclic excitation. *Composite Structures*, 70(2), 185-199.
30. Ottazi, G. (2004) Material de Apoyo para la Enseñanza de los Cursos de Diseño y Comportamiento del Concreto Armado. Tesis para optar el Grado Académico de Magister en Ingeniero Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería, Departamento de Ingeniería, Sección de Ingeniería Civil.
31. Oudah F. & El-Hacha, R. (2013) Research progress on the fatigue performance of RC beams strengthened in flexure using Fiber Reinforced Polymer. *Composites Part B: Engineering*, 47, 82-95
32. Proaño, R. (2011) Comportamiento de Vigas de Concreto Armado Reforzadas Externamente con Platinas de Fibras de Carbono. Tesis de maestría en ingeniería estructural. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Unidad de Posgrado.

33. Papakonstantinou, C. G., Petrou, M. f., & Harries, K.A (2001) Fatigue Behavior of RC Beams Strengthened with GFRP Sheets. *Journal of Composites for Construction*. 5(4), 246-253.
34. Park. R., Paulay T. (1975) Reinforced Concrete Structures. 1ra Edición. *Jhon Wiley & Sons inc. New York*.
35. Peng, H., Liu, Y., Cai, C.S., Yu, J., & Zhang, J. (2019) Experimental Investigation of Bond between Near – Surface Mounted CFRP Strips and Concrete under Freeze-Thawing Cycling, *Journal of Aerospace Engineering*, 32 (1), 04018125.
36. Priestley M. J. N., Selbie F. y Calvi G. M. (1996) Seismic Design and Retrofit of Bridges. *ACI Structural Journal*. Tittle 84-S1.
37. Ramirez, A. (2017) Evaluación del comportamiento ante cargas laterales cíclicas de conexiones viga-columna en concreto reforzado y reforzadas con tejidos CFRP. Tesis de maestría en ingeniería civil. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
38. Realfonzo R., Napoli A. y Pinilla J. G. R. (2014) Cyclic behavior of RC vean-column joints strengthened with FRP systems. *Construction and Building Materials*, 54, 282-297.
39. Rodriguez A, Malik I. (2014). Behavior of RC beams strengthened by partial Jacketing under cyclic loading. *Material Structures*, 47, 383-396
40. Ruiz D., Ramirez C., Logreira L., y Leon M. (2015) Evaluación del comportamiento de vigas en voladizo de concreto reforzado con fibras ante la aplicación de cargas cíclicas. *Reviste Ingeniería de Construcción*, 30 (1), 17-31.
41. Salama A.S.D, Hawileh R.A., & Abdalla J.A. (2018) Performance of externally strengthened RC beams with side bonded CFRP sheets. *Composite Structures*, 212, 281-290.

42. Sattarifar, A., Sharbatdar, M., & Dalvand, A. (2015) RC connections strengthened with FRP sheets using grooves on the surface. *“International Journal of Civil Engineering 13(4): 432-443.*
43. Smith, S. T. & Teng, J. (2022) FRP strengthened RC beam. II: assessment of debonding strength models. *Engineering structures 24(4): 397-417.*
44. Spadea, G., Bencardino, F., Sorrenti, F., & Swamy, R. N. (2015). Structural effectiveness of FRP materials in strengthening RC beams. *Engineering Structures, 99, 631–641.*
45. Tavakoli, H.R., Mahmoudi, S., Goltabar, A.R. y Jaladi P. (2017) Experimental evaluation of the effects pf reverse cyclic loading rate on the mechanical behavior of reinforced SCC beams. *Construction and Building Materials, 131, 254-266.*
46. Tan KH, Mathivoli M. Behavior of preloaded reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber sheets. *Fourth International Symposium on fiber reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures, Baltimore, Maryland. 1998. p. 159–70.*
47. Toutanji, H., Zhao M., & Zhang Y. (2006) Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix. *Engineering Structures 28(4): 557-566.*
48. Tzoura E, Triantafillou C. (2016) Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets. *Materials and Structures, 49, 17-28.*
49. Wang, Y., Cai, G., Li, Y., Waldmann, D., Si Larbi, A., & Tsavdaridis, K. D. (2019) Behavior of circular Fiber-Reinforced Polymer-Steel Confined Concrete Columns Subjected to Reversed Cyclic Loads: Experimental Studies and Finite-Element Analysis. *Journal of Structural Engineering, 145(9), 04019085.*

50. Zhou, Y., Fan, Z., Du, J., Sui, L., & Xing, F. (2015) Bond behavior of FRP-to-Concrete interface under sulfate attack: An experimental study and modeling of bond degradation. *Construction and Building Materials*, 85, 9-21.
51. Xue, W., Li, L., Cheng, B., & Li, J. (2008) The reversed cycles load tests of normal and pre-stressed concrete beams. *Engineering Structures*, 30(4), 1014 - 1023.
52. Zaman, A., S. A. Gutub and M. A. Wafa (2013). "A review on FRP composites applications and durability concerns in the construction sector." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 32(24): 1966-1988.
53. Zhong, H., N.-l. Wang and G. Lin (2013). "Seismic response of concrete gravity dam reinforced with FRP sheets on dam surface." *Water Science and Engineering* 6(4): 409-422.



ANEXOS



Anexo A: Cálculo de deflexiones

Viga de Control

ANÁLISIS DE VIGAS DE ENSAYO FRP TYFO

Calculo de deflexiones Viga de Control

Datos de la sección transversal

b:	250	mm	Ancho de la sección transversal
h:	400	mm	Altura de la sección transversal
sh:	150	mm	Espaciamiento centro a centro del refuerzo transversal.
ϕ_s :	15.9	mm	Diámetro del refuerzo longitudinal
ϕ_{sc} :	15.9	mm	Diámetro del refuerzo longitudinal en compresión
ϕ_v :	9.5	mm	Diámetro del refuerzo transversal
A_s :	593.8	mm ²	Área de refuerzo longitudinal.
A_s' :	593.8	mm ²	Área de refuerzo longitudinal en compresión.
A_v :	142.5	mm ²	Área de refuerzo transversal.
r:	40	mm	Recubrimiento
L:	2000	mm	Longitud de viga (Distancia entre apoyo y punto de aplicación de carga)

Datos fibra de carbono FRP

n_c :	1		Número de capas de refuerzo.
b_f :	0	mm	Ancho de la capa de refuerzo en contacto con el concreto.
d_f :	400	mm	Distancia al centroide del refuerzo FRP.
t_f :	0.00	mm	Espesor
ϵ_{fu} :	0.025		Deformación última
k:	2		Incremento de la deformación última (0.90-1.30) (Uso de U)
T_{fu} :	3790	MPa	38647 kg/cm ² Tensión Última
E_f :	230000	MPa	2345310 kg/cm ² Módulo Elástico
	0.0225		

Concreto Armado

f_c :	21	MPa	210 kg/cm ²
---------	----	-----	------------------------

fy:	450	MPa		
Ec:	21538	MPa	218820	kg/cm ²
Es:	200000	MPa	2039400	kg/cm ²
Esp:	5000	MPa	50985	kg/cm ²

Calculos previos

Ec:	21538	MPa	Módulo elástico del concreto. $E_c = 4700 f'c$ $\wedge 0.5$
n:	9.29		Relación de Módulos. $n = E_s/E_c$
n _p :	0.23		Relación de Módulos. $n = E_{sp}/E_c$
n _f :	10.68		Relación de Módulos. $n_{fp} = E_f/E_c$
A _f :	0.00	mm ²	Área de Fibra $A_f = n_f \cdot b_f \cdot t_f$
n(As):	5513.93	mm ²	Sección Equivalente para cálculo de inercia y eje neutro (n)As
n(As'):	5513.93	mm ²	Sección Equivalente para cálculo de inercia y eje neutro (n)As'
n _f (A _f):	0.00	mm ²	Sección Equivalente para cálculo de inercia y eje neutro (n _f)A _f
n _p (A _f):	137.85	mm ²	Sección Equivalente para cálculo de inercia y eje neutro (n_p)A_s

Seccion Elastica Agrietada

d:	343	mm	Peralte efectivo de la sección.
d':	65.4	mm	Distancia al centroide del acero en compresión.
ρ:	0.0069		Cuantía de refuerzo por tracción
ρ':	0.0069		Cuantía de refuerzo por compresión
ρ _f :	0		Cuantía de refuerzo de carbono FRP
k:	0.29		Factor para el cálculo de la inercia y eje neutro
c:	98	mm	Altura del bloque en compresión. y_o'
y _t :	302	mm	Distancia del eje neutro hasta la fibra más traccionada.
I _g :	471562142	mm ⁴	Inercia de la sección transformada

Seccion Inelastica Agrietada (Fluencia del acero)

k:	0.11		Factor para el cálculo de la inercia y eje neutro
y _o = c:	38	mm	Altura del bloque en compresión.
y _t :	362	mm	Distancia del eje neutro hasta la fibra más traccionada.
I _g :	24410867	mm ⁴	Inercia de la sección transformada

Carga de Fluencia

ε _y =	0.0023	Deformación del acero en la fluencia $\epsilon_y = f_y / E_s$
------------------	--------	---

$M_{ns} =$	1.11	$M_{ns} = F_{sc} (B_1 c / 2 - d')$		
$M_{ns} =$	82.28	$M_{ns} = A_s f_y (d - B_1 c / 2)$		
$M_{nf} =$	0.00	$M_{nf} = A_f f_f (d_f - B_1 c / 2)$		
$M_{ny} =$	83.39	kN-m	$\phi M_{ny} =$	75.05 kN-m
$P_y =$	41.69	kN	$\phi P_y =$	37.52 kN

Carga Ultima

$$\epsilon_{fd} = \mathbf{0.0225}$$

$M_{nsc} =$	0.41	$M_{ns} = F_{sc} (B_1 c / 2 - d')$		
$M_{ns} =$	83.21	$M_{ns} = A_s f_y (d - B_1 c / 2)$		
$M_{nf} =$	-	$M_{nf} = A_f f_f (d_f - B_1 c / 2)$		
$M_{nu} =$	83.62	kN-m	$\phi M_{nu} =$	75.26 kN-m
$P_y =$	41.81	kN	$\phi P_u =$	37.63 kN

Desplazamientos máximos

$$\phi_y: 0.0091875 \quad 1/m \quad \phi_y = \frac{\epsilon_y}{d(1-K)}$$

$$\phi_u: 0.0443224 \quad 1/m \quad \phi_u = \frac{\epsilon_c}{c} = \frac{\epsilon_{fd} + \epsilon_{bi}}{d_f - c}$$

$$\Delta_Y: \mathbf{12.25 \text{ mm}} \quad \Delta_y = \frac{1}{3} \phi_y L^2$$

$$L_p: 377.35 \text{ mm}$$

$$\theta_p: 0.01326 \quad \theta_p = (\phi_u - \phi_y) l_p$$

$$\Delta_U: \mathbf{36.27 \text{ mm}} \quad \Delta_U = \Delta_y + \theta_p \left(l - \frac{L_p}{2} \right)$$

VE-01

ANÁLISIS DE VIGAS DE ENSAYO FRP TYFO

VE-01 Calculo de deflexiones

Datos de la sección transversal

b:	250	mm	Ancho de la sección transversal
h:	400	mm	Altura de la sección transversal
sh:	150	mm	Espaciamiento centro a centro del refuerzo transversal.
ϕ_s :	15.9	mm	Diámetro del refuerzo longitudinal
ϕ_{sc} :	15.9	mm	Diámetro del refuerzo longitudinal en compresión
ϕ_v :	9.5	mm	Diámetro del refuerzo transversal
As:	593.8	mm ²	Área de refuerzo longitudinal.
As':	593.8	mm ²	Área de refuerzo longitudinal en compresión.
Av:	142.5	mm ²	Área de refuerzo transversal.
r:	40	mm	Recubrimiento
L :	2000	mm	Longitud de viga (Distancia entre apoyo y punto de aplicación de carga)

Datos fibra de carbono FRP

n_c :	1		Número de capas de refuerzo.
bf:	200	mm	Ancho de la capa de refuerzo en contacto con el concreto.
df:	400	mm	Distancia al centroide del refuerzo FRP.
t_f :	0.37	mm	Espesor
ϵ_{fu} :	0.017		Deformación última
k :	1.3		Incremento de deformación última (0.90-1.30) (Uso de U)
T_{fu} :	3790	MPa	38647 kg/cm ² Tensión Última
E_f :	230000	MPa	2345310 kg/cm ² Módulo Elástico
ϵ_{fd} :	0.0084		Deformación efectiva de desprendimiento.
	0.009		$\epsilon_{fd} = 0.41 (f'_c / n E_f t_f)^{0.5} \leq 0.9 \epsilon_{fu}$

Concreto Armado

f_c :	21	MPa	210 kg/cm ²
f_y :	420	MPa	
E_c :	21538	MPa	218820 kg/cm ²

Es:	200000	MPa	2039400	kg/cm ²
Esp:	5000	MPa		

Cálculos previos

Ec:	21538	MPa	Módulo elástico del concreto. $E_c = 4700 f'_c \wedge 0.5$
n:	9.29		Relación de Módulos. $n = E_s/E_c$
n _p :	0.23		Relación de Módulos. $n = E_{sp}/E_c$
n _{fip} :	10.68		Relación de Módulos. $n_{fip} = E_f/E_c$
A _f :	74.02	mm ²	Área de Fibra $A_f = n_f \cdot b_f \cdot t_f$
n(As):	5513.93	mm ²	Sección Equivalente para cálculo de inercia y eje neutro (n)As
n(As'):	5513.93	mm ²	Sección Equivalente para cálculo de inercia y eje neutro (n)As'
n _f (A _f):	790.47	mm ²	Sección Equivalente para cálculo de inercia y eje neutro (n _f)A _f

Sección Elástica Agrietada

d:	343	mm	Peralte efectivo de la sección.
d':	65.4	mm	Distancia al centroide del acero en compresión.
ρ:	0.0069		Cuantía de refuerzo por tracción
ρ':	0.0069		Cuantía de refuerzo por compresión
ρ _f :	0.00086		Cuantía de refuerzo de carbono FRP
k:	0.30		Factor para el cálculo de la inercia y eje neutro
c:	104	mm	Altura del bloque en compresión. y_o'
y _t :	296	mm	Distancia del eje neutro hasta la fibra más traccionada.
I _g :	55477381 8	mm ⁴	Inercia de la sección transformada

Sección Inelástica Agrietada (Fluencia del acero)

k:	0.16		Factor para el cálculo de la inercia y eje neutro
y _o = c:	54	mm	Altura del bloque en compresión.
y _t :	346	mm	Distancia del eje neutro hasta la fibra más traccionada.
I _g :	12984830 3	mm ⁴	Inercia de la sección transformada

Carga de Fluencia

$\epsilon_y = 0.0021$ Deformación del acero en la fluencia $\epsilon_y = f_y / E_s$

M _{ns} =	1.18	M _{ns} = F _{sc} (B1 c / 2 - d')
M _{ns} =	76.18	M _{ns} = A _s f _y (d - B1 c / 2)
M _{nf} =	16.12	M _{nf} = A _f f _f (d _f - B1 c / 2)

M_{ny} = 93.48 kN-m ϕ M_{ny} = 83.45 kN-m

$$P_y = 46.74 \quad \text{kN} \quad \varnothing P_y = 42.07 \quad \text{kN}$$

Carga Última

$$\varepsilon_{fd} = 0.0090$$

$$M_{nsc} = 2.03 \quad M_{ns} = F_{sc} (B_1 c / 2 - d')$$

$$M_{ns} = 76.64 \quad M_{ns} = A_s f_y (d - B_1 c / 2)$$

$$M_{nfl} = 55.89 \quad M_{nfl} = A_f f_f (d_f - B_1 c / 2)$$

$$M_{ny} = 134.57 \quad \text{kN-m} \quad \varnothing M_{nu} = 118.52 \quad \text{kN-m}$$

$$P_y = 67.28 \quad \text{kN} \quad \varnothing P_u = 60.56 \quad \text{kN}$$

Desplazamientos máximos

$$\varphi_y: 0.007545 \quad 1/m \quad \varphi_y = \frac{\varepsilon_y}{d(1 - K)}$$

$$\varphi_u: 0.028590 \quad 1/m \quad \varphi_u = \frac{\varepsilon_c}{c} = \frac{\varepsilon_{fd} + \varepsilon_{bi}}{d_f - c}$$

$$\Delta_Y: 10.06 \text{ mm} \quad \Delta_y = \frac{1}{3} \varphi_y L$$

$$L_p: 367.45 \text{ mm}$$

$$\theta_p: 0.00773 \quad \theta_p = (\varphi_u - \varphi_y) l_p$$

$$\Delta_U: 24.11 \text{ mm} \quad \Delta_U = \Delta_y + \theta_p \left(l - \frac{L_p}{2} \right)$$

VE-02

ANÁLISIS DE VIGAS DE ENSAYO FRP TYFO

VE-02 Calculo de deflexiones

Datos de la sección transversal

b:	250	mm	Ancho de la sección transversal
h:	400	mm	Altura de la sección transversal
sh:	150	mm	Espaciamiento centro a centro del refuerzo transversal.
ϕ_s :	56.8	mm	Diámetro del refuerzo longitudinal
ϕ_{sc} :	15.9	mm	Diámetro del refuerzo longitudinal en compresión
ϕ_v :	9.5	mm	Diámetro del refuerzo transversal
As:	918.4	mm ²	Área de refuerzo longitudinal.
As':	593.8	mm ²	Área de refuerzo longitudinal en compresión.
Av:	142.5	mm ²	Área de refuerzo transversal.
r:	40	mm	Recubrimiento
L :	2000	mm	Longitud de viga (Distancia entre apoyo y punto de aplicación de carga)

Datos fibra de carbono FRP

n_c :	3		Número de capas de refuerzo.
bf:	200	mm	Ancho de la capa de refuerzo en contacto con el concreto.
df:	400	mm	Distancia al centroide del refuerzo FRP.
t_f :	0.37	mm	Espesor
ϵ_{fu} :	0.017		Deformación última
k :	1.3		Incremento de la deformación última (0.90-1.30) (Uso de U)
T_{fu} :	3790	MPa	38647 kg/cm ² Tensión Última
E_f :	230000	MPa	2345310 kg/cm ² Módulo Elástico
ϵ_{fd} :	0.0048		Deformación efectiva de desprendimiento. $\epsilon_{fd} = 0.41 (f'_c / n E_f t_f)^{0.5} \leq 0.9 \epsilon_{fu}$

Concreto Armado

f_c :	21	MPa	210 kg/cm ²
f_y :	420	MPa	
E_c :	21538	MPa	218820 kg/cm ²

Es:	200000	MPa	2039400	kg/cm ²
Esp:	5000	MPa		

Cálculos previos

Ec:	21538	MPa	Módulo elástico del concreto. $E_c = 4700 f'_c \wedge 0.5$
n:	9.29		Relación de Módulos. $n = E_s/E_c$
n _p :	0.23		Relación de Módulos. $n = E_{sp}/E_c$
n _{fip} :	10.68		Relación de Módulos. $n_{fip} = E_f/E_c$
A _f :	222.07	mm ²	Área de Fibra $A_f = n_f \cdot b_f \cdot t_f$
n(As):	8528.21	mm ²	Sección Equivalente para cálculo de inercia y eje neutro (n)As
n(As'):	5513.93	mm ²	Sección Equivalente para cálculo de inercia y eje neutro (n)As'
n _f (Af):	2371.42	mm ²	Sección Equivalente para cálculo de inercia y eje neutro (n _f)A _f

Sección Elástica Agrietada

d:	322	mm	Peralte efectivo de la sección.
d':	65.4	mm	Distancia al centroide del acero en compresión.
ρ:	0.0114		Cuantía de refuerzo por tracción
ρ':	0.0074		Cuantía de refuerzo por compresión
ρ _f :	0.0028		Cuantía de refuerzo de carbono FRP
k:	0.39		Factor para el cálculo de la inercia y eje neutro
c:	127	mm	Altura del bloque en compresión. y_o'
y _t :	273	mm	Distancia del eje neutro hasta la fibra más traccionada.
I _g :	818242951	mm ⁴	Inercia de la sección transformada

Sección Inelástica Agrietada (Fluencia del acero)

k:	0.24		Factor para el cálculo de la inercia y eje neutro
y _o = c:	78	mm	Altura del bloque en compresión.
y _t :	322	mm	Distancia del eje neutro hasta la fibra más traccionada.
I _g :	328277918	mm ⁴	Inercia de la sección transformada

Carga de Fluencia

ε _y =	0.0021		Deformación del acero en la fluencia $\epsilon_y = f_y / E_s$	
M _{nsc} =	1.44	M _{ns} = F _{sc} (B1 c / 2 - d')		
M _{ns} =	105.11	M _{ns} = A _s f _y (d - B1 c / 2)		
M _{nf} =	53.17	M _{nf1} = A _f f _f (d _f - B1 c / 2)		
M _{ny} =	159.72	kN-m	ØM _{ny} =	103.82 kN-m
P _y =	79.86	kN	ØP _y =	51.91 kN

Carga Ultima

$$\varepsilon_{fd} = 0.0048$$

$$M_{nsc} = 1.81 \quad M_{ns} = F_{sc} (B_1 c / 2 - d')$$

$$M_{ns} = 104.31 \quad M_{ns} = A_s f_y (d - B_1 c / 2)$$

$$M_{nf} = 85.99 \quad M_{nf1} = A_f f_f (d_f - B_1 c / 2)$$

$$M_{ny} = 192.12 \quad \text{kN-m} \quad \varnothing M_{nu} = 124.88 \quad \text{kN-m}$$

$$P_u = 96.06 \quad \text{kN} \quad \varnothing P_u = 62.44 \quad \text{kN}$$

Desplazamientos máximos

$$\varphi_y = \frac{0.0085940}{86} \quad 1/m$$

$$\varphi_u = \frac{0.0177703}{02} \quad 1/m$$

$$\Delta_Y = 11.46 \text{ mm}$$

$$L_p = 367.45 \text{ mm}$$

$$\theta_p = 0.00337$$

$$\Delta_U = 17.58 \text{ mm}$$

$$\varphi_y = \frac{\varepsilon_y}{d(1-K)}$$

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_c}{c} = \frac{\varepsilon_{fd} + \varepsilon_{bi}}{d_f - c}$$

$$\Delta_y = \frac{1}{3} \varphi_y L^2$$

$$\theta_p = (\varphi_u - \varphi_y) l_p$$

$$\Delta_U = \Delta_Y + \theta_p \left(l - \frac{L_p}{2} \right)$$

VE-03

ANÁLISIS DE VIGAS DE ENSAYO FRP TYFO

VE-03 Calculo de deflexiones

Datos de la sección transversal

b:	250	mm	Ancho de la sección transversal
h:	400	mm	Altura de la sección transversal
sh:	150	mm	Espaciamiento centro a centro del refuerzo transversal.
ϕ_s :	56.8	mm	Diámetro del refuerzo longitudinal
ϕ_{sc} :	15.9	mm	Diámetro del refuerzo longitudinal en compresión
ϕ_v :	9.5	mm	Diámetro del refuerzo transversal
As:	918.4	mm ²	Área de refuerzo longitudinal.
As':	593.8	mm ²	Área de refuerzo longitudinal en compresión.
Av:	142.5	mm ²	Área de refuerzo transversal.
r:	40	mm	Recubrimiento
L :	2000	mm	Longitud de viga (Distancia entre apoyo y punto de aplicación de carga)

Datos fibra de carbono FRP

n_c :	1		Número de capas de refuerzo.
bf:	200	mm	Ancho de la capa de refuerzo en contacto con el concreto.
df:	400	mm	Distancia al centroide del refuerzo FRP.
t_f :	0.37	mm	Espesor
ϵ_{fu} :	0.017		Deformación última
k :	1.3		Incremento de la deformación última (0.90-1.30) (Uso de U)
T_{fu} :	3790	MPa	38647 kg/cm ² Tensión Última
E_f :	230000	MPa	2345310 kg/cm ² Módulo Elástico
ϵ_{fd} :	0.0084		Deformación efectiva de desprendimiento. $\epsilon_{fd} = 0.41 (f'c / n E_f t_f)^{0.5} \leq 0.9 \epsilon_{fu}$

Concreto Armado

f_c :	21	MPa	210 kg/cm ²
f_y :	420	MPa	
E_c :	21538	MPa	218820 kg/cm ²
E_s :	200000	MPa	2039400 kg/cm ²
Esp:	5000	MPa	

Cálculos previos

E_c :	21538	MPa	Módulo elástico del concreto. $E_c = 4700 f'c ^{0.5}$
n :	9.29		Relación de Módulos. $n = E_s/E_c$
n_p :	0.23		Relación de Módulos. $n = E_{sp}/E_c$
n_{frp} :	10.68		Relación de Módulos. $n_{frp} = E_f/E_c$
A_f	74.02	mm ²	Área de Fibra $A_f = n_f \cdot b_f \cdot t_f$
$n(A_s)$:	8528.21	mm ²	Sección Equivalente para cálculo de inercia y eje neutro (n)A _s
$n(A_s')$:	5513.93	mm ²	Sección Equivalente para cálculo de inercia y eje neutro (n)A _s '
$n_f(A_f)$:	790.47	mm ²	Sección Equivalente para cálculo de inercia y eje neutro (n _f)A _f

Sección Elástica Agrietada

d :	322	mm	Peralte efectivo de la sección.
d' :	65.4	mm	Distancia al centroide del acero en compresión.
ρ :	0.0114		Cuantía de refuerzo por tracción
ρ' :	0.0074		Cuantía de refuerzo por compresión
ρ_f :	0.0009		Cuantía de refuerzo de carbono FRP
k :	0.36		Factor para el cálculo de la inercia y eje neutro
c :	117	mm	Altura del bloque en compresión. y_o'
y_t :	283	mm	Distancia del eje neutro hasta la fibra más traccionada.
I_g :	669186116	mm ⁴	Inercia de la sección transformada

Sección Inelástica Agrietada (Fluencia del acero)

k :	0.17		Factor para el cálculo de la inercia y eje neutro
$y_o = c$:	55	mm	Altura del bloque en compresión.
y_t :	345	mm	Distancia del eje neutro hasta la fibra más traccionada.
I_g :	134169512	mm ⁴	Inercia de la sección transformada

Carga de Fluencia

ϵ_y	=	0.0021		Deformación del acero en la fluencia $\epsilon_y = f_y / E_s$
M_{nsc}	=	1.49	$M_{ns} = F_{sc} (B_1 c / 2 - d')$	
M_{ns}	=	107.25	$M_{ns} = A_s f_y (d - B_1 c / 2)$	
M_{nf}	=	17.67	$M_{nf} = A_f f_f (d_f - B_1 c / 2)$	
M_{ny}	=	126.42	kN-m	$\phi M_{ny} = 113.78$ kN-m
P_y	=	63.21	kN	$\phi P_y = 56.89$ kN

Carga Ultima

$\varepsilon_{fd} =$	0.0084		
$M_{nsc} =$	2.33	$M_{ns} = F_{sc} (B1 \ c / 2 - d')$	
$M_{ns} =$	105.85	$M_{ns} = A_s \ f_y (d - B1 \ c / 2)$	
$M_{nf} =$	50.22	$M_{nf1} = A_f \ f_f (d_f - B1 \ c / 2)$	
$M_{ny} =$	158.40	kN-m	$\varnothing M_{nu} =$ style="color: red;">142.56 kN-m
$P_u =$	79.20	kN	$\varnothing P_u =$ style="color: red;">71.28 kN

Desplazamientos máximos

$\varphi_y:$	0.0078662	1/m	$\varphi_y = \frac{\varepsilon_y}{d(1 - K)}$
$\varphi_u:$	0.0283337	1/m	$\varphi_u = \frac{\varepsilon_c}{c} = \frac{\varepsilon_{fd} + \varepsilon_{bi}}{d - c}$
$\Delta_Y:$	10.49 mm		$\Delta_y = \frac{1}{3} \varphi_y L^2$
$L_p:$	367.45 mm		
$\theta_p:$	0.00752		$\theta_p = (\varphi_u - \varphi_y) l_p$
$\Delta_U:$	24.15 mm		$\Delta_U = \Delta_Y + \theta_p \left(l - \frac{L_p}{2} \right)$

Anexo B: Plano de especificaciones y detalles de especímenes

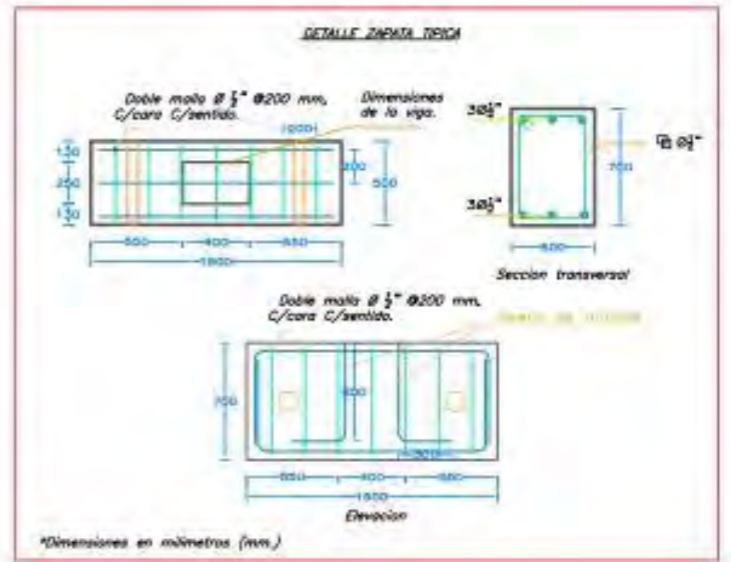
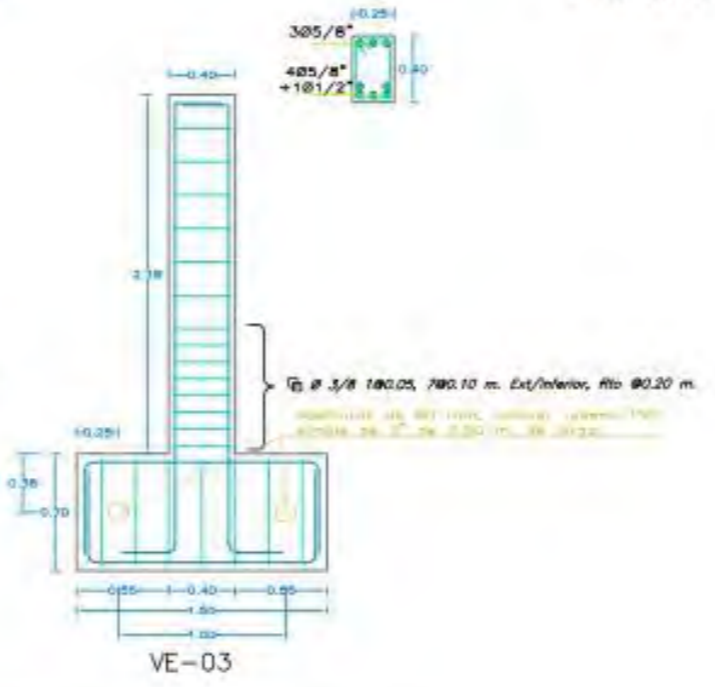
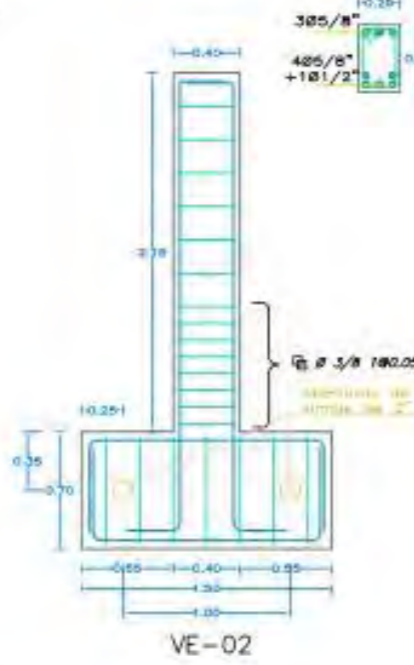
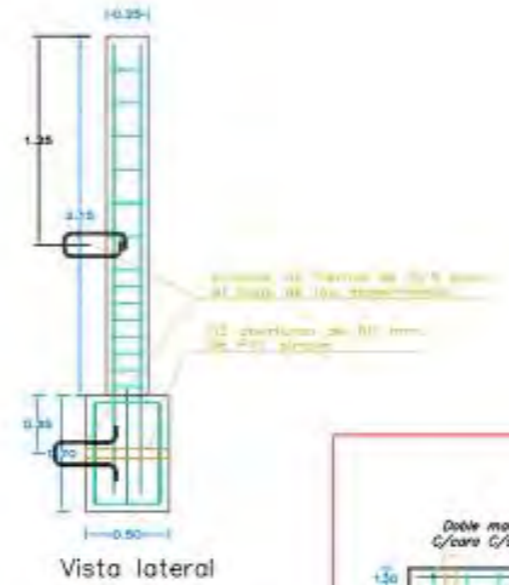
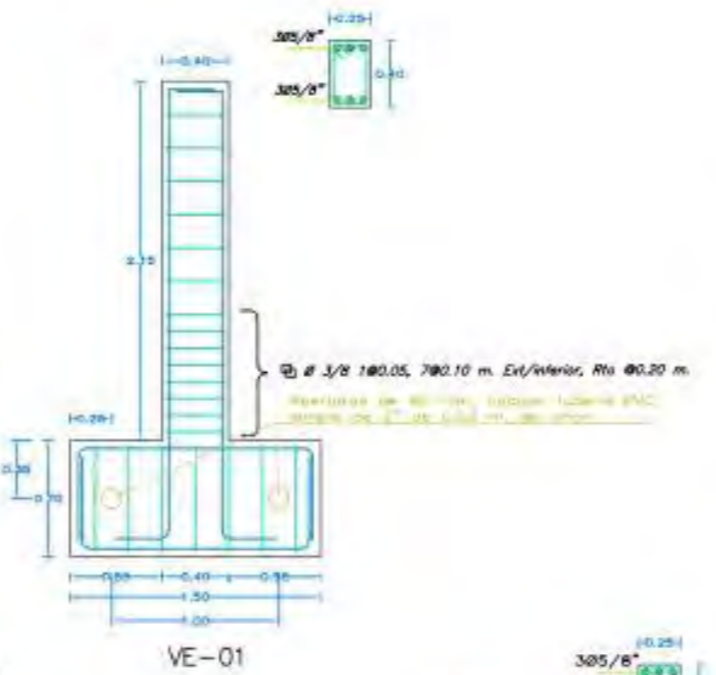
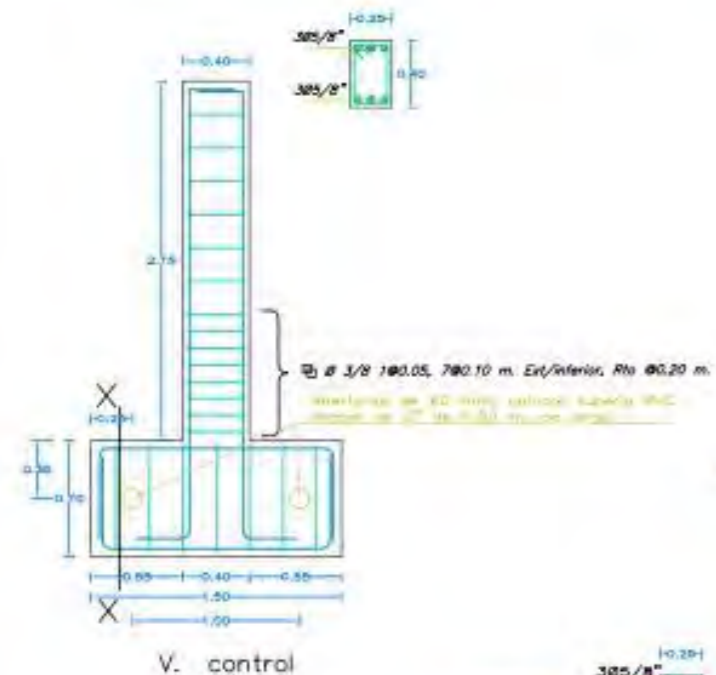
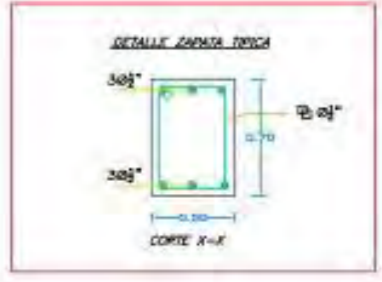
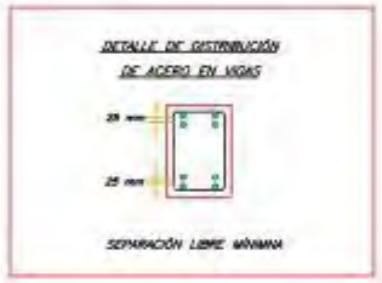
Especificaciones concreto armado

1.- CEMENTO :
 - Cemento Portland tipo I

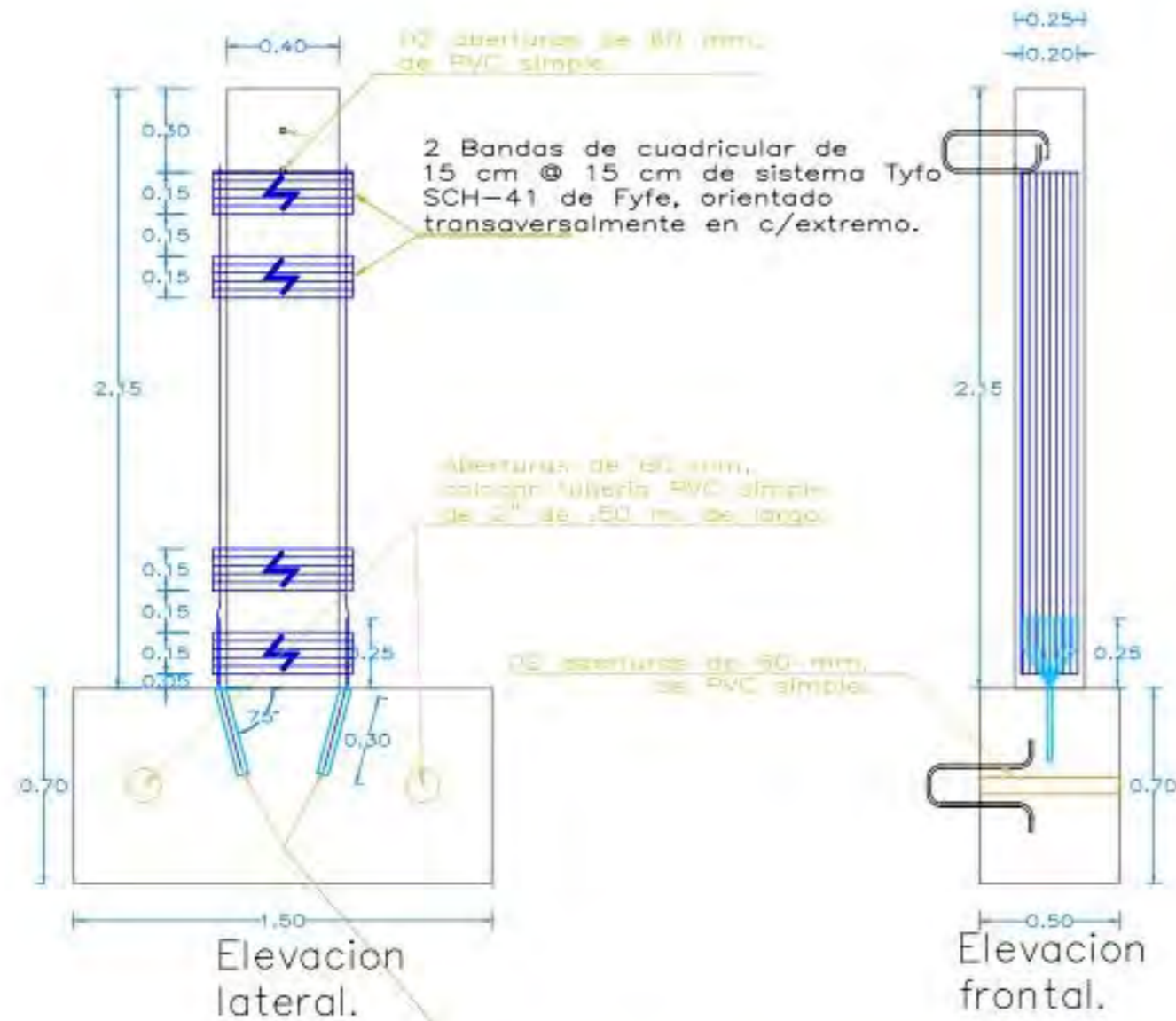
2.- CONCRETO :
 - Resistencia del Concreto (f_c) 210 kg/cm²
 - Relación a/c 0.45

3.- ACERO DE REFUERZO :
 - Barras corrugadas: ASTM A-615 (Grado 60) $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2 (428 \text{ MPa})$

4.- RECUBRIMENTOS :
 - Vigas 4.0 cm
 - Zapatas 5.0 cm

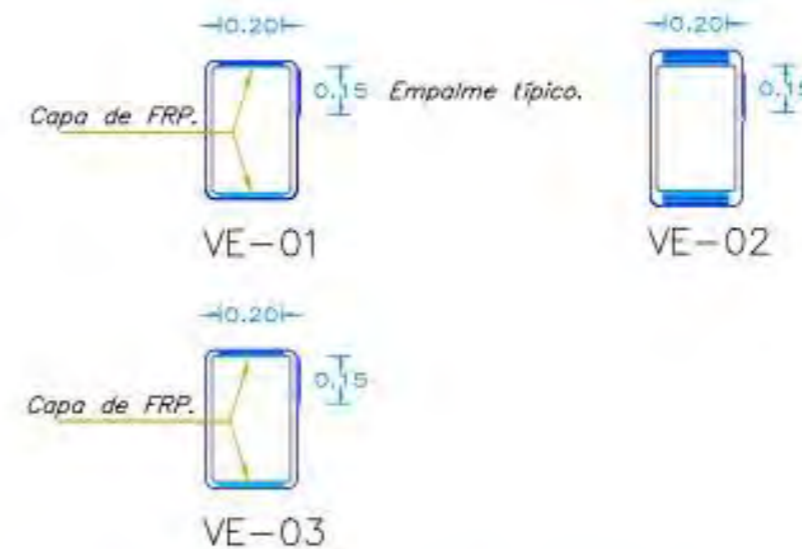


Vigas de ensayo	
Nombre: Juan Diego R. Samaniego Palomino	01
Fecha: 10/03/2019	



Para 1 coque de 20 cm, usar 1 ancla de 3/4" empotrada 30 cm
 Para 3 coques de 20 cm, usar 1 ancla de 1" empotrada 30 cm

Código	Forma	Long.	Alto	Diámetro	Nº de capas	Nº de cables	Diámetro de cables	Diámetro de anclaje	Diámetro de empalme	Diámetro de empalme	Diámetro de empalme	Diámetro de empalme	Diámetro de empalme	Diámetro de empalme	Diámetro de empalme
VE-01	1	2.15	0.40	0.05	1	3	10	10	10	10	10	10	10	10	10
VE-02	1	2.15	0.40	0.05	3	3	10	10	10	10	10	10	10	10	10
VE-03	1	2.15	0.50	0.05	1	3	10	10	10	10	10	10	10	10	10



Código	Nº capas de FRP	Diámetro de anclaje
V. Control	0	—
VE-01	01	3/4"
VE-02	03	1"
VE-03	01	3/4"

Vigas de ensayo, detalles de Refuerzo FRP.

Nombre: Juan Diego R. Samaniego Palomino

Fecha: 10/03/2019

02