



Casa abierta al tiempo

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
METROPOLITANA**

UNIDAD AZCAPOTZALCO

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

**REFORZAMIENTO DE TRABES DE CONCRETO
PRETENSADAS CON BARRAS DE PRFC
EXTERNAS POSTENSADAS DESVIADAS**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**

P R E S E N T A :

LUÍS MIGUEL PINTO CARVALHO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. OSCAR MANUEL GONZÁLEZ CUEVAS

CIUDAD DE MÉXICO,

SEPTIEMBRE, 2017

Agradecimientos

Agradezco principalmente a mi familia, la cual creció en el transcurso de este trabajo.

Primeramente, agradezco a mi madre Maria Fernanda por el esfuerzo en su vida para facilitarme todo lo que necesitaba para desarrollarme e impulsarme y a Harald por darnos un hogar. A mi padre por su apoyo en su vida.

Le agradezco a mi esposa Irazú por su apoyo para este trabajo, pero principalmente por iniciar conmigo el proyecto más ambicioso y gratificante en mi vida; él de crear una familia con dos hijos hermosos, Iago e Iberia.

A la Universidad Autónoma Metropolitana, por ser la casa de estudios que me abrió sus puertas para desarrollarme en mi profesión. Especialmente al Dr Oscar Manuel González Cuevas y a su enorme paciencia conmigo. Considero un gran honor y privilegio haber hecho este trabajo bajo su dirección.

Agradezco al personal del laboratorio de estructuras, el cual permitió llevar a cabo este trabajo, en especial agradezco a la Sra Silvia por su apoyo, igualmente a Gilberto Rangel y sus consejos valiosos. Agradezco a todos los alumnos que en el transcurso de este tiempo ayudaron a realizar este proyecto en el laboratorio, especialmente a Tomás, Zabdiel, Erick, Ignacio y Fernando.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado la beca que me permitió realizar mis estudios de doctorado.

Agradezco a la empresa MEXPRESA por su apoyo en el trabajo experimental de la tesis, especialmente a Arturo Pérez Aguilar, por darme espacio y tiempo para este trabajo, y a Guadalupe Montes Galindo.

Agradezco a las empresas FYFE CO. y GAIREC por el suministro de material de plásticos reforzados con fibras de carbono, particularmente a Tommy Jiménez y Mariano Noricumbo.

Agradezco a la empresa Tecnispann por la fabricación de la mayoría de los elementos metálicos que fueron necesarios para poder llevar a cabo los ensayos, en especial a Mauro Cuatecontzi y a Gilberto.

Tabla de contenido

Tabla de contenido	2
1 Introducción	1-1
1.1 Introducción general.....	1-1
1.2 Objetivo General.....	1-2
1.3 Objetivos específicos	1-2
1.4 Metodología.....	1-2
1.5 Recursos	1-3
2 Antecedentes.....	2-4
2.1 Refuerzo de estructuras de concreto con PRF postensado – una revisión	2-4
2.2 Diseño general de presfuerzo con PRF	2-6
2.3 Ruptura por flujo plástico	2-7
2.4 Relajación.....	2-8
2.5 Fatiga.....	2-10
2.6 Diseño por resistencia.....	2-10
2.7 Diseño por servicio.....	2-14
2.8 Consideraciones de seguridad	2-17
2.9 Desviación de tendones.....	2-19
2.10 Anclajes para PRF	2-22
3 Anclajes con grout expansivo	3-28
3.1 Revisión y diseño de anclajes.....	3-28
3.2 Comprobación experimental	3-31
3.3 Ensayes a tensión.....	3-34
3.3.1 Clasificación de barras de PRFC.....	3-34
3.3.2 Diseño de ensaye a tensión	3-36
3.3.3 Resultados de ensayos.....	3-41
4 Efectos de desviación	4-46
4.1 Revisión del efecto de desviación.....	4-46

4.2	Análisis analítico de efectos de desviación.....	4-48
4.3	Análisis numérico de desviación.....	4-51
5	Diseño de anclajes con base en cuñas	5-56
5.1	Revisión de anclajes de cuñas.....	5-56
5.2	Diseño numérico de anclaje.....	5-59
5.3	Fabricación de anclajes.....	5-62
5.4	Ensayes con cuñas	5-71
6	Ensayes de trabes reforzadas	6-84
6.1	Objetivo de ensayos a trabes.....	6-84
6.2	Diseño de trabes	6-84
6.3	Construcción de trabes.....	6-88
6.4	Sistema de Presfuerzo y Desviación	6-95
6.5	Ensayes de trabes	6-100
6.6	Resultados de ensayos a vigas reforzadas	6-105
6.6.1	Viga 1 – Reforzamiento de PRFC	6-105
6.6.2	Viga 2 – Reforzamiento de PRFC	6-116
6.6.3	Viga 3 – Reforzamiento con torón de acero.....	6-127
7	Conclusiones.....	7-135
7.1.1	Anclajes tubulares	7-135
7.1.2	Efectos de desviación	7-136
7.1.3	Anclajes de cuñas	7-137
7.1.4	Vigas reforzadas.....	7-138
7.1.5	Trabajos futuros.....	7-140
8	REFERENCIAS	8-141
9	Apéndice A – Modelo numérico de viga pretensada	9-147
10	Apéndice B – Agrietamiento.....	10-154
10.1	Viga 1 – Desarrollo de agrietamiento	10-154
10.2	Viga 2 – Desarrollo de agrietamiento	10-156

10.3	Viga 3 – Desarrollo de agrietamiento	10-158
11	Apéndice C – Gráficas adicionales de ensayos	11-160
11.1	Gráficas adicionales - Viga 1.....	11-160
11.1.1	Pre-agrietamiento:	11-160
11.1.2	Ensaye con presfuerzo externo de PRFC.....	11-162
11.2	Gráficas adicionales – Viga 2.....	11-163
11.2.1	Pre-agrietamiento	11-163
11.2.2	Ensaye con presfuerzo externo de PRFC.....	11-164
11.2.3	Prueba a falla última sin reforzamiento	11-165
11.3	Gráficas adicionales – Viga 3.....	11-166
11.3.1	Pre-agrietamiento	11-166
11.3.2	Ensaye con presfuerzo externo de acero de presfuerzo.....	11-168
11.3.3	Prueba a falla última sin reforzamiento externo	11-169

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1 SISTEMA TIPO DE REFORZAMIENTO CON PRESFUERZO EXTERNO	1-1
FIGURA 2-1 VARIACIÓN EN PROPIEDADES MECÁNICAS DE FIBRAS	2-5
FIGURA 2-2 CONFINAMIENTO DE COLUMNAS PARA AUMENTAR SU DUCTILIDAD	2-6
FIGURA 2-2 LAS TRES ETAPAS DE DEFORMACIÓN INELÁSTICA POR CARGAS SOSTENIDAS	2-7
FIGURA 2-3 MODELO GENERALIZADO DE RELAJACIÓN (GILSTRAP ET AL., 2001)	2-9
FIGURA 2-4 RELACIÓN DE FRAGILIDAD – CONDICIONES DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN (DOLAN ET AL, 2001)	2-11
FIGURA 2-5 SECCIÓN AGRIETADA CON TENDONES DISTRIBUIDOS VERTICALMENTE (DOLAN ET AL, 2001)	2-13
FIGURA 2-6 BASE GEOMÉTRICA PARA EL CÁLCULO DE ESPESOR DE GRIETAS (GILSTRAP ET AL, 2001).....	2-17
FIGURA 2-7 ILUSTRACIÓN DE DEFINICIONES DE CURVATURA (GILSTRAP, 2001)	2-18
FIGURA 2-8 INFLUENCIA DE RADIO DE DESVIACIÓN SOBRE RESISTENCIA Y ESFUERZOS	2-21
FIGURA 2-9 ANCLAJE TIPO ABRAZADERA	2-23
FIGURA 2-10 ANCLAJE TIPO ABRAZADERA CERTIFICADO POR ETAG 013 (KNIPPERS, 2008)	2-23
FIGURA 2-11 ANCLAJE TIPO TAPÓN Y CONO	2-23
FIGURA 2-12 ANCLAJE TIPO MANGA RECTA CON RESINA EXPANSIVA	2-24
FIGURA 2-13 ANCLAJE TIPO MANGA DEFORMADA	2-24
FIGURA 2-14 ANCLAJE TIPO MANGA DEFORMADA MODIFICADO (HORVATIS, 2004)	2-25
FIGURA 2-15 ANCLAJE CON REVESTIMIENTO METÁLICO	2-25
FIGURA 2-16 ANCLAJE CON CUÑAS DIVIDIDAS.....	2-26
FIGURA 2-17 ANCLAJE CON CABEZA DE FIBRAS EN EXTREMOS - EL-HACHA (2003)	2-26
FIGURA 2-18 ANCLAJE CON ENVOLTURA DE LÁMINA EN CILINDRO DE ACERO (MONTI 2006)	2-27
FIGURA 3-1 ESQUEMA DE FUERZAS ACTUANTES EN ANCLAJE	3-29
FIGURA 3-2 VARIACIÓN DE ESFUERZOS CIRCUNFERENCIALES EN PAREDES DE TUBO	3-30
FIGURA 3-3 ESFUERZOS EN TUBO TIPO DE DOLAN ET AL (2000).	3-31
FIGURA 3-4 ANCLAJES PARA TORONES DE 3/8" Y 1/2" (DETALLES EN DIBUJOS ANEXOS)	3-33
FIGURA 3-5 TUBOS DE ANCLAJE FABRICADOS	3-33
FIGURA 3-6 EXTREMOS DE TUBOS CON ROSCAS Y ENTRADA PARA INYECCIÓN.....	3-34
FIGURA 3-7 ARREGLO DE ENSAYE EN MÁQUINA UNIVERSAL	3-37
FIGURA 3-8 PLACAS DE APOYO PARA ENSAYES A TENSIÓN DE PRFC.....	3-38
FIGURA 3-9 ENSAMBLE DE ANCLAJES CON BARRAS E INSTRUMENTACIÓN	3-39
FIGURA 3-10 INYECCIÓN DE MORTERO POR EL EXTREMO INFERIOR.....	3-40
FIGURA 3-11 CONTROL DE GEOMETRÍA E INSTRUMENTACIÓN DE BARRAS	3-40
FIGURA 3-12 POSICIÓN DE STRAIN GAGES EN ANCLAJE TIPO	3-41
FIGURA 3-13 FALLA TÍPICA DE BARRAS PRF TIPO "ESCOBA" OBSERVADA CON TUBOS.....	3-42
FIGURA 3-14 ESFUERZOS COMBINADOS DE EXPANSIÓN DE GROUT Y APLICACIÓN DE CARGA	3-42
FIGURA 3-15 ESFUERZOS EN ANCLAJES CON MEDICIÓN DE 5 DÍAS	3-43
FIGURA 3-16 ESFUERZOS TANGENCIALES EN ANCLAJES Y SU EVOLUCIÓN EN LAS PRIMERAS 12 HORAS	3-44
FIGURA 3-17 DIAGRAMA ESFUERZOS (BARRA) - DEFORMACIÓN CIRCUNFERENCIAL (TUBO) TRANSFORMADO PARA SINCRONIZAR TIEMPOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA BARRA DE 1/2" (IZQ.) Y 3/8" (DER.).....	3-45
FIGURA 4-1 INFLUENCIA DE RADIO DE DESVIACIÓN SOBRE RESISTENCIA Y ESFUERZOS	4-48
FIG. 4-2: DIMENSIONES DEL ELEMENTO POSTENSADO ANTES Y DESPUÉS DE DESVIARLO	4-49
FIGURA 4-3 INFLUENCIA DE ÁNGULO Θ SOBRE EL ESFUERZO; SE FIJAN EL RADIO R Y EL ESPESOR T	4-50
FIGURA 4-4 INFLUENCIA DE RADIO R_v SOBRE EL ESFUERZO; SE FIJAN EL ÁNGULO Θ Y EL ESPESOR T	4-50
FIGURA 4-5 INFLUENCIA DE ESPESOR T_v SOBRE EL ESFUERZO; SE FIJAN EL ÁNGULO Θ Y EL RADIO R	4-51

FIGURA 4-6 ESFUERZOS DEBIDOS A DESVIACIÓN CON $R = 30$ CM	4-51
FIGURA 4-7 ESFUERZOS MÁXIMOS UTILIZANDO ANÁLISIS ESTÁTICO; $R = 30$ CM	4-52
FIGURA 4-8 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS CON DESVIADORES CIRCULARES.....	4-52
FIGURA 4-9 ESTADO INICIAL DEL ANÁLISIS	4-53
FIGURA 4-10 ESTADO FINAL DESPUÉS DE UN DESPLAZAMIENTO DE $Z = -20$ CM DE LOS DESVIADORES	4-53
FIGURA 4-11 DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN SECCIÓN SOBRE DESVIACIÓN DORES	4-53
FIGURA 5-1 SISTEMA DE CUÑAS DE ACERO TRADICIONALES PARA TORONES DE ACERO (COTAS EN MM)	5-57
FIGURA 5-2 FALLA EN LA ZONA DE ANCLAJE	5-57
FIGURA 5-3 CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS CON CUÑAS TRADICIONALES SOBRE PRFC - HORVATIS (2004)	5-58
FIGURA 5-4 CUÑAS COMPUESTAS PARA DISMINUIR CONCENTRACIONES DE ESFUERZOS -HORVATIS (2004).....	5-58
FIGURA 5-5 VISTAS GENERALES DEL ANCLAJE MODELADO Y CORTE DE ANCLAJE BASE	5-60
FIGURA 5-6 CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS DE CORTANTE Y TRANSVERSALES DEL ANCLAJE	5-60
FIGURA 5-7 MODELO CON MAYOR ESPESOR DE EPOXI Y MENOR MÓDULO DE ELASTICIDAD DE EPOXI	5-61
FIGURA 5-8 INFLUENCIA DE INCLINACIÓN DE INTERFAZ Y DE LONGITUD DE ANCLAJE	5-61
FIGURA 5-9 DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS CON ANCLAJE ESCALONADO	5-62
FIGURA 5-10 CONJUNTO DE ANCLAJE: BARRILETE, CUÑAS DE ACERO, EPOXI	5-63
FIGURA 5-11 INYECCIÓN DE EPOXI LIQUIDO EN MOLDE	5-64
FIGURA 5-12 TUBO DE ALUMINIO FINAL CON CORRUGACIONES	5-69
FIGURA 5-13 FABRICACIÓN DE TUBO EN TORNO	5-69
FIGURA 5-14 PROTOCOLO DE CARGA SEGÚN ETAG 013	5-72
FIGURA 5-15 INSTRUMENTACIÓN DE ANCLAJE	5-72
FIGURA 5-16 INSTRUMENTACIÓN DE ANCLAJE FÍSICO	5-73
FIGURA 5-17 COMPORTAMIENTO TÍPICO LINEAL DE BARRAS PRFC HASTA LA FALLA	5-74
FIGURA 5-18 FALLA TIPO ESCOBA DE ESPÉCIMEN EN LONGITUD LIBRE	5-78
FIGURA 5-19 FALLA TIPO ESCOBA DE ESPÉCIMEN EN LONGITUD LIBRE	5-79
FIGURA 5-20 SUPERFICIES DE CUÑAS Y DE BARRAS SIN SEÑAL DE DAÑO	5-79
FIGURA 5-21 ANCLAJE JUEGO 5 (SUPERIOR) SIN DAÑO VISIBLE.....	5-80
FIGURA 5-22 ANCLAJE JUEGO 4 (INFERIOR) SIN DAÑO VISIBLE	5-80
FIGURA 5-23 BARRA CON MARCAS DE DIENTES DE CUÑAS, SIN DAÑO EN ZONA DE ANCLAJE.....	5-81
FIGURA 5-24 RESULTADO DE ENSAYE A TENSIÓN CON EL ÚLTIMO DISEÑO DE ANCLAJE	5-82
FIGURA 5-25 DIAGRAMA ESFUERZO – DEFORMACIÓN DIRECTA SOBRE LA BARRA PRFC.....	5-82
FIGURA 5-26 PRE-ACUÑAMIENTO DE ANCLAJES EN SU BARRILETE	5-83
FIGURA 5-27 ACUÑAMIENTO DEBIDO A TENSIÓN APLICADA	5-83
FIGURA 6-1 RECREACIÓN DE PROYECTO DE CAMA DE PRETENSADO DE LA UAM-A	6-85
FIGURA 6-2 SECCIÓN TIPO DE TRABE PRETENSADA DE 6 METROS DE LARGO	6-86
FIGURA 6-3 MODELO MATEMÁTICO INCLUYENDO COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE CONCRETO	6-87
FIGURA 6-4 DEFORMACIÓN ESPERADA AL APLICAR PRESFUERZO EN MM.....	6-87
FIGURA 6-5 DEFORMACIÓN A LOS 1500 DÍAS DEBIDA A PRESFUERZO EN MM.....	6-87
FIGURA 6-6 DISEÑO DE CIMBRA PARA VIGAS.....	6-89
FIGURA 6-7 MONTAJE DE CIMBRAS SOBRE CAMA DE PRETENSADO	6-89
FIGURA 6-8 ARMADO DE VIGA – SECCIÓN	6-90
FIGURA 6-9 ARMADO DE VIGA – MITAD DE CORTE LONGITUDINAL	6-90
FIGURA 6-10 POSICIÓN DE STRAIN GAGES EN EL ARMADO	6-90
FIGURA 6-11 ARMADO DE VIGA FÍSICO CON STRAIN GAGES COLOCADOS Y PROTEGIDOS.....	6-91
FIGURA 6-12 DISEÑO DE VIGA DE REACCIÓN EXISTENTE CON REFORZAMIENTOS	6-91
FIGURA 6-13 DISEÑO DE VIGA DE REACCIÓN NUEVA.....	6-92

FIGURA 6-14 FABRICACIÓN Y PREPARACIÓN DE VIGAS DE REACCIÓN PARA PRESFUERZO.....	6-92
FIGURA 6-15 APLICACIÓN DE PRESFUERZO A TORONES	6-93
FIGURA 6-16 COLADO DE VIGAS Y DESCIMBRADO	6-94
FIGURA 6-17 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DE CONCRETO DE VIGAS EN LABORATORIO	6-95
FIGURA 6-18 CORTE DE TORONES DE PRESFUERZO.....	6-95
FIGURA 6-19 SISTEMA GENERAL DEL REFORZAMIENTO	6-96
FIGURA 6-20 VISTA LATERAL DE LA VIGA DE REACCIÓN	6-96
FIGURA 6-21 VISTA FRONTAL DE LA VIGA DE REACCIÓN.....	6-97
FIGURA 6-22 VIGA DE REACCIÓN CON ANCLAJES Y CELDAS DE CARGA.....	6-97
FIGURA 6-23 VIGA DE REACCIÓN CON ANCLAJES Y GATOS HIDRÁULICOS	6-98
FIGURA 6-24 VISTA LATERAL DEL SISTEMA DE DESVIACIÓN	6-99
FIGURA 6-25 VISTA FRONTAL DEL SISTEMA DE DESVIACIÓN EN DOS POSICIONES DIFERENTES	6-99
FIGURA 6-26 DESVIADOR INSTALADO SOBRE UNA VIGA EN POSICIÓN DE DESVIACIÓN MÁXIMA.....	6-100
FIGURA 6-27 VIGA SOBRE MESA DE PRETENSADO	6-101
FIGURA 6-28 VIGA EN EL MARCO DE REACCIÓN CON 2 PUNTOS DE CARGA	6-101
FIGURA 6-29 VIGA EN EL MARCO DE REACCIÓN CON 2 PUNTOS DE CARGA CON ARREGLO FINAL TIPO	6-102
FIGURA 6-30 VIGA EN EL MARCO DE REACCIÓN CON 2 PUNTOS DE CARGA CON ARREGLO FINAL TIPO	6-102
FIGURA 6-31 ESQUEMA DE POSICIONAMIENTO DE TRANSDUCTORES LVDT 1 AL 7 Y CELDAS DE CARGA P-I Y P-D.....	6-103
FIGURA 6-32 INSTRUMENTACIÓN ADICIONAL PARA REFORZAMIENTO — CELDAS DE CARGA Y STRAIN GAGES SG	6-103
FIGURA 6-33 CICLOS DE CARGA PARA AGRIETAMIENTO	6-104
FIGURA 6-34 CICLOS DE CARGA CON VIGA REFORZADA CON PRF (O HASTA FALLA).....	6-104
FIGURA 6-35 CICLOS DE CARGA CON VIGA A LÍMITE ÚLTIMO	6-105
FIGURA 6-36 PRE-AGRIETAMIENTO A 0.3 MM DE ESPESOR — VISTA FRONTAL.....	6-106
FIGURA 6-37 PRE-AGRIETAMIENTO A 0.3 MM DE ESPESOR — VISTA TRASERA	6-106
FIGURA 6-38 VIGA 1 AL FINAL DE CICLO DE CARGA DE AGRIETAMIENTO — $\Delta_{\text{CENTRO}} = 32.5 \text{ MM}$	6-106
FIGURA 6-39 COMPORTAMIENTO CARGA-DESPLAZAMIENTO CON SECCIÓN AGRIETADA	6-107
FIGURA 6-40 COMPORTAMIENTO CARGA-DESPLAZAMIENTO CON SECCIÓN AGRIETADA	6-107
FIGURA 6-41 DESPLAZAMIENTO DEBIDOS A APLICACIÓN DE PRETENSADO HASTA 1.5 TON Y POSTERIOR DESVIACIÓN.....	6-108
FIGURA 6-42 VIGA 1 CON PRESFUERZO EXTERNO APLICADO Y DESVIADO	6-108
FIGURA 6-43 GRÁFICA CARGA — DESPLAZAMIENTO CORRESPONDIENTE A CICLO DE CARGA.....	6-109
FIGURA 6-44 PRESFUERZO EN BARRA CONTRA MOMENTO DEBIDO A CARGA.....	6-110
FIGURA 6-45 ÚLTIMO CICLO AISLADO DE PRESFUERZO EN BARRA CONTRA MOMENTO DEBIDO A CARGA.....	6-110
FIGURA 6-46 DESARROLLO DE ESFUERZOS EN TRAMO LIBRE Y PUNTO DE DESVIACIÓN DE LA BARRA PT-F	6-111
FIGURA 6-47 DESARROLLO DE ESFUERZOS EN TRAMO LIBRE Y PUNTO DE DESVIACIÓN DE LA BARRA PT-T	6-112
FIGURA 6-48 INCREMENTO DE ESFUERZOS EN FIBRA EXTERIOR DE BARRAS DEBIDO A CAMBIO DE CARGA	6-113
FIGURA 6-49 FALLA POR CIZALLAMIENTO DE LAS BARRAS DE PRFC EN LA RÓTULA DE APOYO DE LOS ANCLAJES	6-113
FIGURA 6-50 GRÁFICA CARGA VS. DESPLAZAMIENTO HASTA EL LÍMITE ÚLTIMO DE LA VIGA 1	6-114
FIGURA 6-51 DEFORMACIÓN VISIBLE DE LA VIGA 1 ALCANZANDO SU FALLA ÚLTIMA	6-115
FIGURA 6-52 VISTA GENERAL DE VIGA AGRIETADA	6-115
FIGURA 6-53 VISTA FRONTAL DE VIGA AGRIETADA	6-115
FIGURA 6-54 VISTA TRASERA DE VIGA AGRIETADA	6-116
FIGURA 6-55 PRE-AGRIETAMIENTO A 0.3 MM DE ESPESOR — VISTA FRONTAL.....	6-116
FIGURA 6-56 PRE-AGRIETAMIENTO A 0.3 MM DE ESPESOR — VISTA FRONTAL.....	6-117
FIGURA 6-57 PRE-AGRIETAMIENTO A 0.3 MM DE ESPESOR — VISTA TRASERA	6-117
FIGURA 6-58 COMPORTAMIENTO CARGA-DESPLAZAMIENTO DEBIDO A CARGA DE PRE-AGRIETAMIENTO	6-118
FIGURA 6-59 DEFORMACIÓN DE VARILLA LONGITUDINAL EN EL CICLO DE CARGA DE PRE-AGRIETAMIENTO.....	6-118

FIGURA 6-60 DESVIACIÓN MÁXIMA A LA CUAL SE LLEGÓ CON EL PRIMER REFUERZO DE LA VIGA 2	6-119
FIGURA 6-61 PUNTO DE SALIDA DE BARRA DE ROTULA DE APOYO	6-119
FIGURA 6-62 INSTALACIÓN DE CUÑAS ADHERIDAS CON EPOXI A LA BARRA PRFC	6-120
FIGURA 6-63 DEFORMACIÓN DE VIGA DEBIDA A LA APLICACIÓN DE PRESFUERZO	6-120
FIGURA 6-64 VIGA 2 CON PRESFUERZO EXTERNO APLICADO Y DESVIADO	6-121
FIGURA 6-65 GRÁFICA CARGA – DESPLAZAMIENTO CORRESPONDIENTE A CICLOS DE CARGA	6-121
FIGURA 6-66 GRÁFICA CARGA – DESPLAZAMIENTO CORRESPONDIENTE A ÚLTIMO CICLO DE CARGA.....	6-122
FIGURA 6-67 CARGA EN BARRA CONTRA MOMENTO APLICADO	6-122
FIGURA 6-68 ÚLTIMO CICLO AISLADO DE CARGA EN BARRA CONTRA MOMENTO APLICADO	6-123
FIGURA 6-69 DESARROLLO DE ESFUERZOS EN TRAMO LIBRE Y PUNTO DE DESVIACIÓN DE LA BARRA PT-F	6-123
FIGURA 6-70 DESARROLLO DE ESFUERZOS EN TRAMO LIBRE Y PUNTO DE DESVIACIÓN DE LA BARRA PT-T	6-124
FIGURA 6-71 INCREMENTO DE ESFUERZOS EN FIBRA EXTERIOR DE BARRAS DEBIDO A CAMBIO DE CARGA	6-124
FIGURA 6-72 FALLA DE BARRA PRFC SOBRE EL DESVIADOR DERECHO	6-125
FIGURA 6-73 FALLA DE BARRA PRFC SOBRE EL DESVIADOR DERECHO A DETALLE.....	6-125
FIGURA 6-74 INICIO DE FALLA EN LA SUPERFICIE SOBRE EL DESVIADOR IZQUIERDO	6-125
FIGURA 6-75 GRÁFICA CARGA VS. DESPLAZAMIENTO HASTA EL LÍMITE ÚLTIMO DE LA VIGA 2	6-126
FIGURA 6-76 DEFORMACIÓN VISIBLE DE LA VIGA 2 ALCANZANDO SU FALLA ÚLTIMA	6-126
FIGURA 6-77 VISTA FRONTAL DE VIGA AGRIETADA	6-126
FIGURA 6-78 VISTA TRASERA DE VIGA AGRIETADA	6-127
FIGURA 6-79 PRE-AGRIETAMIENTO A 0.3 MM DE ESPESOR – VISTA FRONTAL.....	6-127
FIGURA 6-80 PRE-AGRIETAMIENTO A 0.3 MM DE ESPESOR – VISTA FRONTAL.....	6-128
FIGURA 6-81 PRE-AGRIETAMIENTO A 0.3 MM DE ESPESOR – VISTA FRONTAL.....	6-128
FIGURA 6-82 PRE-AGRIETAMIENTO A 0.3 MM DE ESPESOR – VISTA TRASERA	6-128
FIGURA 6-83 COMPORTAMIENTO CARGA-DESPLAZAMIENTO DEBIDO A CARGA DE PRE-AGRIETAMIENTO	6-129
FIGURA 6-84 DESVIACIÓN CON EL REFUERZO DE TORONES DE ACERO DE LA VIGA 3	6-129
FIGURA 6-85 DEFORMACIÓN DE VIGA 3 DEBIDA A LA APLICACIÓN DE PRESFUERZO.....	6-130
FIGURA 6-86 ANCLAJES PARA TORONES DE ACERO DE ½” TIPO SURELOCK.....	6-130
FIGURA 6-87 GRÁFICA CARGA – DESPLAZAMIENTO CORRESPONDIENTE A CICLOS DE CARGA	6-131
FIGURA 6-88 GRÁFICA CARGA – DESPLAZAMIENTO CORRESPONDIENTE A ÚLTIMO CICLO DE CARGA.....	6-131
FIGURA 6-89 ROTACIÓN EN APOYOS DE VIGA 3	6-132
FIGURA 6-90 CARGA EN TORÓN VERSUS MOMENTO APLICAD.....	6-132
FIGURA 6-91 ÚLTIMO CICLO AISLADO DE CARGA EN BARRA CONTRA MOMENTO APLICADO	6-133
FIGURA 6-92 DEFORMACIÓN VISIBLE DE LA VIGA 3 ALCANZANDO SU FALLA ÚLTIMA	6-133
FIGURA 6-93 GRÁFICA CARGA VS. DESPLAZAMIENTO HASTA EL LÍMITE ÚLTIMO DE LA VIGA 3	6-134
FIGURA 6-94 VISTA FRONTAL DE VIGA AGRIETADA	6-134
FIGURA 6-95 VISTA TRASERA DE VIGA AGRIETADA	6-134
FIGURA 9-1 GEOMETRÍA GENERAL DE MODELO	9-147
FIGURA 9-2 DESARROLLO DEL FACTOR DE FLUJO PLÁSTICO EN EL TIEMPO.....	9-148
FIGURA 9-3 DESARROLLO DEL FACTOR DE CONTRACCIÓN EN EL TIEMPO	9-148
FIGURA 9-4 DEFINICIÓN DE ARMADO LONGITUDINAL	9-149
FIGURA 9-5 DEFINICIÓN DE PRESFUERZO DE TORONES DE 0.5”	9-149
FIGURA 9-6 DEFINICIÓN DE REFORZAMIENTO DE BARRAS EXTERNAS DESVIADAS DE PRFC.....	9-149
FIGURA 9-7 CARGA DE ENSAYE 4,000 KG A LOS TERCIOS DEL CLARO.....	9-150
FIGURA 9-8 PRESFUERZO EN TORONES INTERNOS CON PÉRDIDAS INSTANTÁNEAS DEL PRESFUERZO	9-150
FIGURA 9-9 PRESFUERZO EN TORONES DESPUÉS DE PÉRDIDAS POR ACORTAMIENTO DE CONCRETO Y RELAJACIÓN DEL ACERO A LOS 4 AÑOS.....	9-151

FIGURA 9-10 TENSIÓN EN 1 TORÓN APLICANDO 4000 KG DE CARGA CON SECCIÓN AGRIETADA	9-151
FIGURA 9-11 PRESFUERZO EN TORÓN INTERNO DESPUÉS DE APLICACIÓN DE PRESFUERZO EXTERNO SIN CARGA	9-151
FIGURA 9-12 PRESFUERZO EN TORÓN INTERNO DESPUÉS DE APLICACIÓN DE PRESFUERZO EXTERNO Y CON 4000 KG DE CARGA....	9-152
FIGURA 9-13 DEFORMACIÓN DEBIDA A PRESFUERZO A LA HORA DE APLICAR PRETENSADO	9-152
FIGURA 9-14 DEFORMACIÓN DESPUÉS DEL TRANSCURSO DE 4 AÑOS	9-152
FIGURA 9-15 DEFORMACIÓN DEBIDA A APLICACIÓN DE CARGA DE 4,000KG CON SECCIÓN AGRIETADA.....	9-153
FIGURA 9-16 DEFORMACIÓN DE SECCIÓN AGRIETADA SIN CARGA NI PRESFUERZO EXTERNO.....	9-153
FIGURA 9-17 DEFORMACIÓN CON PRESFUERZO EXTERNO APLICADO.....	9-153
FIGURA 9-18 DEFORMACIÓN DE VIGA CON CARGA DE 4,000 KG, INCLUYENDO PRESFUERZO EXTERNO	9-153
FIGURA 10-1 PRE-AGRIETAMIENTO A 0.3 MM DE GROSOR A 1,000 KG.....	10-154
FIGURA 10-2 GROSOR MÁX. 0.5 MM A 3,500 KG.....	10-154
FIGURA 10-3 GROSOR MÁX. 0.8 MM A 4,000 KG.....	10-154
FIGURA 10-4 GROSOR MÁX. 1.5 MM A 5000 KG.....	10-154
FIGURA 10-5 PRE-AGRIETAMIENTO A 0.3 MM DE GROSOR A 1,000 KG.....	10-155
FIGURA 10-6 GROSOR MÁX. 0.5 MM A 3,500 KG.....	10-155
FIGURA 10-7 GROSOR MÁX. 0.8 MM A 4,000 KG.....	10-155
FIGURA 10-8 GROSOR MÁX. 1.5 MM A 5000 KG.....	10-155
FIGURA 10-9 PRE-AGRIETAMIENTO - GROSOR MÁX. 0.2 MM A 1,000 KG	10-156
FIGURA 10-10 PRE-AGRIETAMIENTO - GROSOR MÁX. 0.35 MM A 2,000 KG	10-156
FIGURA 10-11 PRE-AGRIETAMIENTO - GROSOR MÁX. 0.5 MM A 3,000 KG	10-156
FIGURA 10-12 GROSOR MÁX. 1.5 MM A 4,000 KG.....	10-156
FIGURA 10-13 PRE-AGRIETAMIENTO - GROSOR MÁX. 0.2 MM A 1,000 KG	10-157
FIGURA 10-14 PRE-AGRIETAMIENTO - GROSOR MÁX. 0.35 MM A 2,000 KG	10-157
FIGURA 10-15 PRE-AGRIETAMIENTO - GROSOR MÁX. 0.5 MM A 3,000 KG	10-157
FIGURA 10-16 GROSOR MÁX. 1.5 MM A 3,000 KG.....	10-157
FIGURA 10-17 PRE-AGRIETAMIENTO - GROSOR MÁX. 0.2 MM A 1,000 KG	10-158
FIGURA 10-18 PRE-AGRIETAMIENTO - GROSOR MÁX. 0.35 MM A 2,000 KG	10-158
FIGURA 10-19 PRE-AGRIETAMIENTO - GROSOR MÁX. 0.5 MM A 3,000 KG	10-158
FIGURA 10-20 GROSOR MÁX. 0.8 MM A 4,000 KG.....	10-158
FIGURA 10-21 GROSOR MÁX. 1.5 MM A 5,000 KG.....	10-158
FIGURA 10-22 PRE-AGRIETAMIENTO - GROSOR MÁX. 0.2 MM A 1,000 KG	10-159
FIGURA 10-23 PRE-AGRIETAMIENTO - GROSOR MÁX. 0.35 MM A 2,000 KG	10-159
FIGURA 10-24 PRE-AGRIETAMIENTO - GROSOR MÁX. 0.5 MM A 3,000 KG	10-159
FIGURA 10-25 GROSOR MÁX. 0.8 MM A 4,000 KG.....	10-159
FIGURA 10-26 GROSOR MÁX. 1.5 MM A 5,000 KG.....	10-159
FIGURA 11-1 PRE-AGRIETAMIENTO - MOMENTO ROTACIÓN EN AMBOS APOYOS DE LA VIGA	11-160
FIGURA 11-2 PRE-AGRIETAMIENTO - DEFORMACIONES EN VARILLA LONGITUDINAL	11-161
FIGURA 11-3 PRE-AGRIETAMIENTO – DEFORMACIÓN EN ESTRIBOS.....	11-161
FIGURA 11-4 ENSAYE CON REFORZAMIENTO DE PRFC – MOMENTO – ROTACIÓN EN LOS APOYOS DE LA VIGA	11-162
FIGURA 11-5 ENSAYE CON REFORZAMIENTO DE PRFC – DEFORMACIÓN DE VARILLAS LONGITUDINALES	11-162
FIGURA 11-6 ENSAYE CON REFORZAMIENTO DE PRFC – DEFORMACIÓN DE ESTRIBOS	11-163
FIGURA 11-7 MOMENTO – ROTACIÓN EN AMBOS APOYOS DE LAS VIGAS	11-163
FIGURA 11-8 DEFORMACIÓN EN ESTRIBOS DEBIDO A PRE-AGRIETAMIENTO.....	11-164
FIGURA 11-9 ENSAYE CON REFORZAMIENTO DE PRFC – DEFORMACIÓN DE VARILLAS LONGITUDINALES	11-164
FIGURA 11-10 ENSAYE CON REFORZAMIENTO DE PRFC – DEFORMACIÓN DE VARILLAS LONGITUDINALES	11-165

FIGURA 11-11 ENSAYE A FALLA FINAL DE VIGA 2 – DEFORMACIÓN DE VARILLA LONGITUDINAL.....	11-165
FIGURA 11-12 ENSAYE A FALLA FINAL DE VIGA 2 – DEFORMACIÓN DE ESTRIBOS	11-166
FIGURA 11-13 MOMENTO – ROTACIÓN EN APOYO DE VIGA 3.....	11-166
FIGURA 11-14 DEFORMACIÓN EN VARILLAS LONGITUDINALES DEBIDO A PRE-AGRIETAMIENTO DE VIGA 3.....	11-167
FIGURA 11-15 DEFORMACIÓN EN ESTRIBOS DEBIDO A PRE-AGRIETAMIENTO DE VIGA 3	11-167
FIGURA 11-16 HISTORIAL DE CARGA APLICADA A LA VIGA 3	11-168
FIGURA 11-17 ENSAYE CON REFORZAMIENTO DE ACERO DE REFUERZO A VIGA 3 – DEFORMACIÓN DE VARILLAS LONGITUDINALES	11-168
FIGURA 11-18 ENSAYE CON REFORZAMIENTO DE ACERO DE REFUERZO A VIGA 3 – DEFORMACIÓN DE ESTRIBOS	11-169
FIGURA 11-19 ENSAYE A FALLA FINAL DE VIGA 3 – DEFORMACIÓN DE VARILLA LONGITUDINAL.....	11-169
FIGURA 11-20 ENSAYE A FALLA FINAL DE VIGA 3 – DEFORMACIÓN DE ESTRIBOS	11-170

1 Introducción

1.1 Introducción general

El uso de plásticos reforzados con fibras (PRF) se ha popularizado en las últimas décadas para el reforzamiento externo de estructuras de concreto. No obstante, los límites de la adherencia entre el PRF y el concreto no permiten el uso eficiente de la capacidad del PRF. La aplicación de presfuerzo externo hace más eficiente el uso del PRF, pero requiere cuidado especial en los anclajes y en los puntos de desviación de las barras de presfuerzo. En esta investigación se revisa analíticamente y con ensayos el diseño de un sistema de anclajes comúnmente utilizado en laboratorios con base en tubos de acero rellenos con un mortero altamente expansivo. También se diseña un sistema nuevo de anclajes basándose en cuñas recubiertas con un epóxico, desarrolladas con modelos matemáticos. El efecto de la desviación en las barras de PRF ha sido poco estudiado, por lo cual se desarrolló un modelo analítico para predecir su efecto en la zona de desviación. Con el sistema de anclajes desarrollado y con una predicción adecuada de los efectos de la desviación, se pueden diseñar reforzamientos eficientes y confiables con PRF postensados exteriores para vigas de concreto.

El sistema típico de reforzamiento se ilustra en la Figura 1-1 y se ha usado desde hace varios años con tendones de acero. La práctica más generalizada consiste en aplicar el presfuerzo mediante la desviación de los tendones en el centro del claro de las vigas a reforzar o en algunos puntos intermedios.

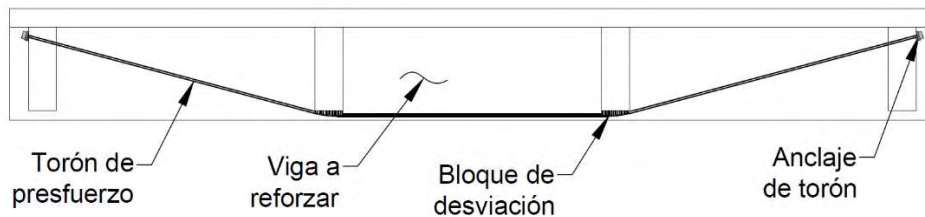


Figura 1-1 Sistema tipo de reforzamiento con presfuerzo externo

En la investigación se trata de estudiar el uso de tendones de PRF, en vez de tendones de acero, ya que presentan ciertas ventajas según se comenta más adelante. Se requiere investigación adicional ya que en ciertos aspectos hay diferencias entre el comportamiento de los tendones de ambos materiales.

1.2 Objetivo General

El objetivo de este estudio fue determinar y cuantificar los factores que influyen en el diseño de un refuerzo con PRF conformado por tendones externos desviados. La aplicación del presfuerzo debe efectuarse con un sistema de postensado eficaz y sencillo en su utilización para el uso práctico en reforzamiento de estructuras existentes.

1.3 Objetivos específicos

El primer objetivo específico fue diseñar el sistema de anclaje para los tendones de presfuerzo. Esto se hizo primeramente siguiendo las guías existentes para sistemas aprobados basados en grout expansivo. La caracterización correcta de las propiedades de los materiales utilizados se efectuó antes de la implementación.

Se efectuaron ensayos a tensión simple de los especímenes de tendones, verificando paralelamente la eficiencia de los anclajes.

Se determinaron los factores que influyen en el diseño de vigas con tendones de presfuerzo desviados. Con base en resultados de estudios paramétricos, se cuantificó su influencia. El resultado fue una expresión que describe adecuadamente el comportamiento observado.

Se diseñó un sistema de tensado con base en desviadores extensibles.

Se hicieron ensayos a especímenes a escala grande con el fin de verificar el funcionamiento del sistema completo y permitir la calibración de ecuaciones que predigan correctamente el comportamiento de los elementos de reforzamiento.

1.4 Metodología

El enfoque metodológico fue experimental. La investigación se realizó manipulando deliberadamente las variables. Esta investigación se considera exploratoria dado que fue un problema nuevo o más bien poco conocido. Se utilizaron modelos matemáticos y mediciones para evaluar el fenómeno de estudio, por lo cual se considera su naturaleza de tipo cuantitativo.

El marco teórico se basa principalmente en las previsiones para sistemas de postensados clásicos de acero. Se tomaron en cuenta las adecuaciones presentadas en los reglamentos americanos y canadienses para el uso de plásticos reforzados con fibras de carbono (PRFC). Las investigaciones recientes, que todavía no se reflejan en estos reglamentos, también se tomaron en cuenta.

El estudio se basó en el uso de un solo sistema de fibras de carbono con características en cuanto a su resistencia y módulo de elasticidad. Estas variables no se considerarán en el

estudio paramétrico, debido a su dependencia del material proporcionado por el proveedor. Quedaron fuera del alcance del estudio las fibras de otras características y de otro material como aramida o vidrio. Se estudió una aplicación de fibras de carbono en estructuras existentes con el objetivo de reforzarlas; la aplicación en estructuras nuevas no se contempló.

1.5 Recursos

El estudio se efectuó en colaboración con dos empresas. Fyfe Co. ha proveído las primeras barras precuradas de fibras de carbono para los ensayos de tensión directa, y la empresa GAIREC suministró las barras tipo V-ROD para los ensayos a las vigas en escala grande, quedando a cargo del autor el envío de los elementos desde EUA y Canadá respectivamente.

Se utilizaron las instalaciones del laboratorio de estructuras de la UAM para efectuar los ensayos y la cama de pretensado para la fabricación de las trabes de concreto. Para los ensayos directos de tensión se ha utilizado la máquina universal del laboratorio de estructuras de la UAM Azcapotzalco y para los ensayos de las trabes se utilizaron los marcos de reacción del mismo laboratorio. Los sistemas de adquisición de datos como deformaciones formaron parte del equipo de la UAM. El concreto y la instrumentación también se utilizó del material existente de la UAM.

Para los ensayos y la preparación de los especímenes han participado alumnos del taller de estructuras de la UAM Azcapotzalco, alumnos con su proyecto terminal de la carrera de ingeniería civil y técnicos del laboratorio de estructuras de la UAM Azcapotzalco.

2 Antecedentes

2.1 Refuerzo de estructuras de concreto con PRF postensado – una revisión

Las primeras investigaciones en el área de Plásticos Reforzados con Fibras (PRF) postensados empezaron en los años 50s y sus primeras aplicaciones se llevaron a cabo a finales de los años 70 en Alemania por Strabag-Bau y Bayer (1978). Esta etapa resultó ser de poca duración, en parte eventualmente por el uso de fibras de vidrio en este caso, lo cual no resultó ser idóneo. Posteriormente, el uso de PRF en aplicaciones postensadas ha sido limitado a la fecha. Según estudios del IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering) y la mayoría ha sido en el ámbito de puentes.

Debido a un mayor interés en su propiedad de resistencia a la corrosión y su fácil aplicación para el refuerzo de estructuras de concreto, recientemente se empezó a investigar de nuevo este tipo de material. Principalmente Japón ha generado un esfuerzo considerable a partir de finales de los años 80 para el avance de estas tecnologías, desarrollando los primeros sistemas postensados de PRF. Después, el primer puente con un sistema de PRF postensado se ha construido en los EEUU a principios de los años 90 (Bank 2005). Estos esfuerzos han conducido a un número considerable de desarrollos de sistemas de postensado de PRF en los últimos años y los sistemas más comunes utilizan aramida o fibras de carbono. Análogamente al uso de acero de presfuerzo, el uso de presfuerzo de PRF resulta en un incremento de la resistencia al agrietamiento y fluencia del acero de refuerzo existente. Aparte, la aplicación de presfuerzo representa un mejoramiento en durabilidad y servicio y se limita también la propagación de fisuras en el concreto. El uso de PRF presforzado en comparación con fibras no-pretensadas, resulta en una disminución de la cantidad de material necesario para alcanzar la misma resistencia. El uso de anclajes además previene fallas frágiles como las debidas por desgarre o delaminación, las cuales ocurren frecuentemente en vigas con PRF simplemente adheridos. En comparación con el uso de tendones de acero, existe la gran ventaja que el PRF es inerte a químicos y tampoco presenta corrosión. Especialmente la corrosión es problemática en el caso de refuerzos postensados, debido a que estos se quedan generalmente expuestos a la intemperie y la estructura puede degradarse prematuramente. Puede ser necesaria la protección a fuego, para lo cual se debe aplicar un recubrimiento aislante, el cual permite obtener clasificaciones de resistencia al fuego de hasta 4 horas con un sistema adecuado (Benichou 2010).

Las ventajas principales son su relación alta de resistencia a peso, flexibilidad, aplicación fácil, inercia a químicos y oxígeno, la reducción de mano de obra, una rigidez diseñable y la

alta capacidad de deformación. Por supuesto existen desventajas entre las cuales destacan su comportamiento lineal-elástico hasta la ruptura sin meseta de fluencia y por lo tanto una falla frágil. Aparte, el compuesto es susceptible a calor, el costo del material es elevado, la deformación por temperatura es diferente a la del concreto y el compuesto es susceptible a daños por abrasión.

El uso principal de PRF se ha establecido en el área de refuerzo y rehabilitación de estructuras de concreto. En esta especialidad de la construcción los PRF han establecido rápidamente una participación fuerte por las ventajas anteriormente mencionadas. Actualmente se puede observar un gran esfuerzo para el desarrollo de sistemas postensados utilizando PRF.

Existen tres principales tipos de fibras que se están utilizando para un uso postensado :

1. Fibras de aramida - PRFA
2. Fibras de vidrio - PRFV
3. Fibras de carbono- PRFC

Por falta de una estandarización de métodos de producción las características de las fibras pueden variar substancialmente. Las características mecánicas, tanto la resistencia como el módulo de elasticidad, son diferentes de proveedor a proveedor como se puede en la Figura 2-1.

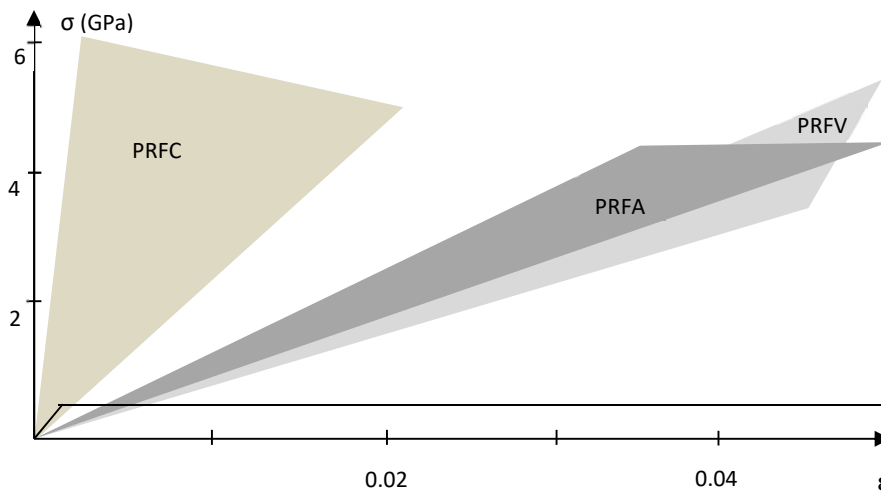


Figura 2-1 Variación en propiedades mecánicas de fibras

La selección del tipo de fibra depende principalmente de consideraciones de costo, resistencia, rigidez y estabilidad a largo plazo. Las fibras de aramida pueden tener rigideces en un rango amplio de bajo a alto módulo de elasticidad, las fibras de carbono con rangos de módulos de elasticidad por debajo de acero hasta rangos que llegan a ser múltiples de

acero. El tipo de fibra más económico es la fibra de vidrio y contiene varios subtipos como el vidrio tipo E y tipo S. El vidrio tipo E es utilizado cuando se requiere mayor resistencia, baja conductividad y resistencia a ácidos. El vidrio tipo S es más caro que el tipo E. Ambos tipos son susceptibles a degradación en ambientes alcalinos.

Igualmente existe una gran variedad de polímeros que se utilizan como matriz para los compuestos PRF. Éstos pueden ser viniléster, epoxi, fenólico, poliuretano etc. e igualmente se deben escoger según su uso final. La infinidad de posibles combinaciones de materiales resulta en una infinidad de características posibles del material y en su caso debe ser consultado con el proveedor.

2.2 Diseño general de presfuerzo con PRF

El desafío más grande en el diseño de elementos presforzados con PRF es la poca ductilidad que genera este sistema. Ambos materiales, el concreto y los PRF son materiales frágiles, y el único método para generar un comportamiento dúctil con estos materiales es un encamisado del concreto con un PRF creando un confinamiento del mismo (Figura 2-2).

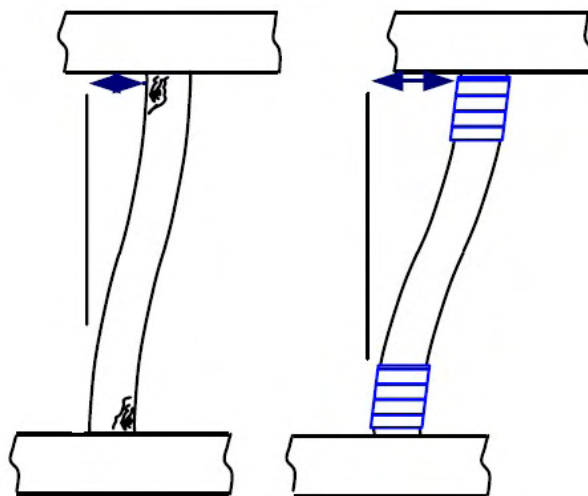


Figura 2-2 Confinamiento de Columnas para aumentar su ductilidad

Los estados límite de diseño incluyen esfuerzos a nivel de servicio y requisitos de resistencia a flexión. La determinación de esfuerzos a nivel de servicio se calcula análogamente al procedimiento para presfuerzo con acero. Las pérdidas se calculan también de manera similar, con la diferencia que para el caso de PRF las pérdidas son típicamente menores. Los reglamentos existentes incluyen la determinación de los siguientes puntos clave para los estados límite:

- Resistencia del PRF y su módulo de elasticidad
- Ruptura por flujo plástico en el PRF

- Esfuerzo resistente de tensión en el concreto
- Resistencia a flexión
- Esfuerzos por flexión en condiciones de servicio
- Resistencia a carga axial y flexión combinadas
- Deflexiones
- Agrietamiento
- Fatiga
- Ductilidad y deformabilidad
- Resistencia a cortante y
- Adherencia, desarrollo y longitud de transferencia para presfuerzo adherido

2.3 Ruptura por flujo plástico

La ruptura por carga sostenida en PRF resulta de deformaciones inelásticas bajo cargas sostenidas, las cuales con el transcurso de tiempo rebasan el límite de deformación del material. Existen 3 etapas de fluencia por carga sostenida: primaria, secundaria y terciaria (Figura 2-3). La primaria se caracteriza por una disminución continua de la tasa de deformación en un tiempo relativamente corto después de la aplicación de la carga. En la etapa secundaria la tasa de deformación se mantiene constante con esfuerzos constantes. En esta etapa las fibras más débiles pueden romperse, pero la carga se redistribuye entre las fibras adyacentes por la fricción y adhesión con el epoxi. Si el nivel de esfuerzos es suficientemente bajo el daño en las fibras no es progresivo y el tendón tiene una vida útil ilimitada. La etapa terciaria presenta un aumento rápido de la tasa de deformación y el daño es progresivo hasta la falla completa del tendón.

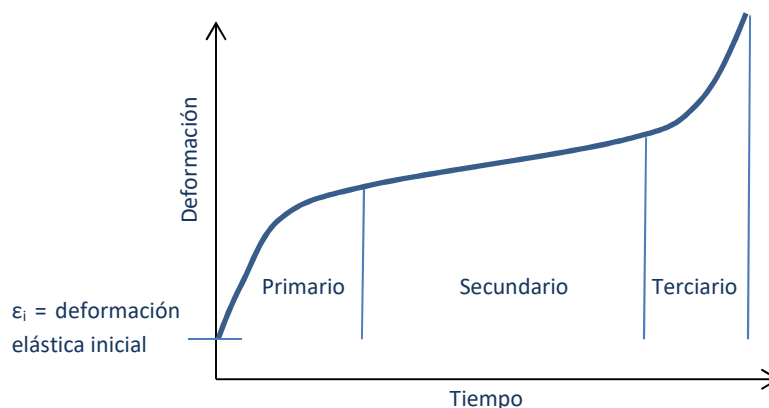


Figura 2-3 Las tres etapas de deformación inelástica por cargas sostenidas

Por lo tanto, se utiliza un nivel relativamente bajo de pretensado en fibras debido a las características de ruptura por carga sostenida, así previniendo que el material alcance la

tercera etapa de fluencia que lleva a ruptura del mismo. La falla final es instantánea, por lo cual es importante mantener el nivel de presfuerzo relativamente bajo

En pruebas que simulan el efecto de deterioro por influencias ambientales se ha observado una reducción de hasta 10-15% de la resistencia residual en PRF de vidrio. En los elementos de PRF de carbono expuestos a ambiente de aire se ha determinado una reducción de 6-7%. Las fallas se originaron típicamente adyacentes a los anclajes, lo cuales en este estudio fueron epóxicos. Se determinó una vida útil de 100 años a 70% del límite último de la capacidad a tensión del torón (f_{pu}) en PRF de carbono con una resistencia residual de 90% f_{pu} , pero se recomendaron 40 a 50% de reserva para efectos de flexión. (Dolan et al., 2001). El ACI limita los esfuerzos a 60% de f_{pu} a largo plazo en estas fibras.

Fibras de vidrio tienen un comportamiento muy desfavorable bajo cargas sostenidas. Su tasa de deformación es continua con esfuerzos relativamente bajos y existe corrosión bajo tensión cuando las fibras están en contacto con concreto, lo cual no ocurre con fibras de carbono. Esto resulta en que el ACI limita el esfuerzo en estas fibras al 48% para su aplicación presforzada, y además no recomienda el uso de fibras de vidrio en aplicaciones presforzadas. El manual de diseño de PRF postensado canadiense incluso prohíbe su uso para aplicaciones de presfuerzo.

La falla adyacente a los anclajes indica que la concentración de esfuerzos transversales afecta negativamente el comportamiento de flujo plástico del PRF, lo cual resalta la necesidad de investigación para anclajes adecuados.

Cabe mencionar que este comportamiento es particular de los PRF y no se presenta en acero de presfuerzo. Debe categorizarse como una desventaja teórica, la cual se puede evitar con un diseño adecuado. La exigencia de una deformabilidad adecuada requiere los mismos límites de tensado que el flujo plástico. Debe destacarse que este material requiere algunas adecuaciones en las consideraciones de diseño en comparación con acero. No obstante, este tipo de adecuación se requiere siempre para materiales relativamente nuevos, por lo menos nuevos en la industria de la construcción. El acero de presfuerzo sufrió igualmente de efectos desconocidos al inicio, como por ejemplo relajación excesiva, lo cual con avances en ciencias de materiales se logró minimizar.

2.4 Relajación

La relajación en tendones de PRF resulta de tres efectos. Primero, al tensar el tendón inicialmente, parte de la carga es sostenida por el plástico. El plástico se relaja y pierde su contribución a la transferencia de carga causando el efecto R_1 . Segundo, las fibras de la sección son casi, pero no perfectamente paralelas. Las fibras se enderezan fluyendo por la

matriz causando así la pérdida aparente por relajación R_2 . Tercero, las fibras se relajan por si misma (R_3). La relajación total es la suma de estos efectos $R = R_1 + R_2 + R_3$.

La relajación inicial de la matriz ocurre en las primeras 24 a 96 horas y puede ser acelerada por calor. El grado de relajación depende de la relación de módulos de elasticidad entre plástico y fibras, el cual es típicamente 1.5% para tendones de fibras de carbono, y de la fracción volumétrica de fibras en el PRF, la cual se encuentra típicamente entre 35 y 40%. El resultado es una relajación R_1 de aproximadamente 0.6%.

La relajación por enderezamiento de las fibras en la matriz es de aproximadamente $R_2 = 2\%$ y depende más del control de calidad en la fabricación del tendón.

Para el caso de PRF de carbono la relajación por fibras R_3 puede asumirse como 0, debido a que estas fibras no sufren de este efecto.

La relajación del material compuesto por relajación del epoxi ocurre primero y se termina en las primeras 200 horas después de aplicación de la carga. El enderezamiento de las fibras es más lento, debido a que las fibras tienen que fluir por la matriz, lo cual se tarda hasta 600 horas. En las primeras 12 horas también puede ocurrir adicionalmente un deslizamiento en los anclajes, lo cual depende del anclaje utilizado (Figura 2-4).

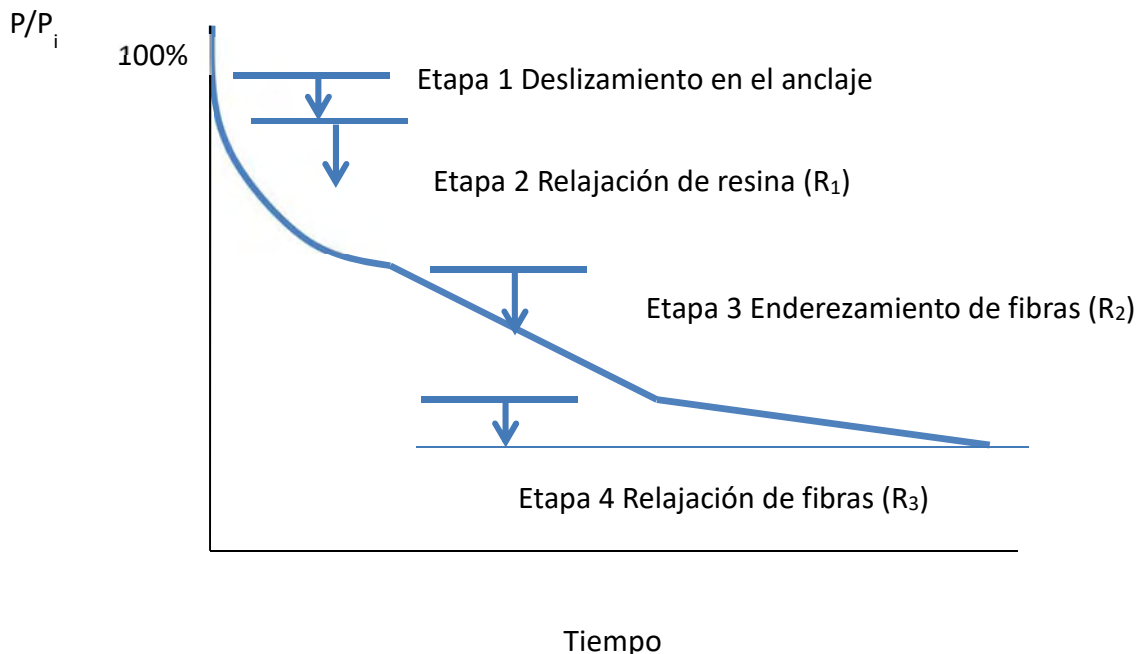


Figura 2-4 Modelo generalizado de relajación (Gilstrap et al., 2001)

No se recomienda sobretensar las fibras para compensar para los efectos de relajación. Sobretensar resulta en un incremento de la deformación de las fibras, lo cual disminuye la vida útil por incrementar el efecto de deformación plástica por cargas sostenidas (Dolan et al., 2001)

Otras pérdidas como las debidas al acortamiento elástico inicial del concreto y al flujo plástico y la contracción se determinan de la misma manera como para el caso de concreto postensado con sistemas comunes de acero. No obstante, la magnitud de pérdidas es normalmente menor debido al módulo de elasticidad menor del PRF.

2.5 Fatiga

Fatiga es una de las causas prevalentes en estructuras como puentes. No obstante, para el caso de PRF de carbono, éste ha demostrado calidades excelentes de fatiga y se mantiene relativamente inafectado por ésta; también bajo influencia ambiental. Sólo debe tomarse en cuenta que anclajes o desviadores pueden inducir fallas por fatiga dependiente de su diseño. Una reducción por fatiga no es necesaria en el caso de PRF de carbono.

2.6 Diseño por resistencia

En el caso de diseño a flexión de elementos de concreto reforzados con acero, se utiliza el concepto de refuerzo balanceado, donde la relación de refuerzo ρ_b (relación de fragilidad) representa el límite entre una falla dúctil y una falla frágil. En el caso de vigas presforzadas con PRF también se introduce una relación de fragilidad, no obstante esta relación divide dos fallas frágiles. Un tipo de falla es por aplastamiento de concreto y el otro se genera por ruptura de las fibras. Debido a que las fibras se comportan elásticamente hasta la ruptura, todas las fallas resultan ser frágiles.

Hasta la fecha no se ha llegado a un acuerdo, cuál de estas fallas es más deseable, o mejor, la menos indeseable. La mayoría de los investigadores aboga por sobrerreforzar la sección, debido a que los elementos sobrerreforzados demuestran una gran deformabilidad, lo cual genera una buena advertencia antes de un colapso. Sin embargo, lograr este sobrerreforzamiento no es siempre factible, debido a que se rebasaría en muchos casos el límite de esfuerzo en el concreto.

Para el caso de una sección rectangular o una sección T con el bloque de compresión en el patín y con un solo lecho de refuerzo de fibras, se obtiene las siguientes relaciones:

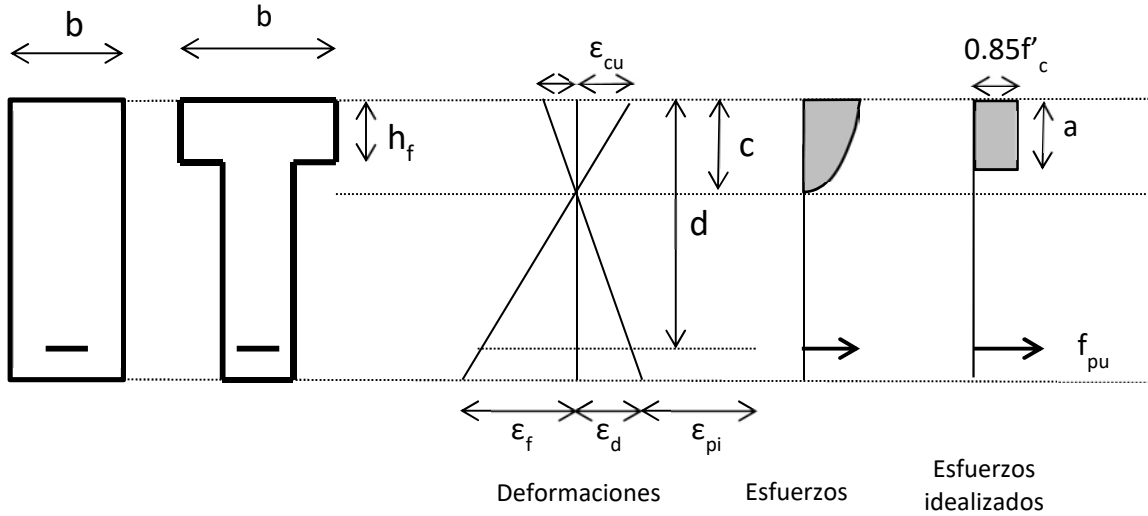


Figura 2-5 Relación de fragilidad – Condiciones de esfuerzo y deformación (Dolan et al, 2001)

Asumiendo que ϵ_{pu} es la deformación última del tendón, que ϵ_{pi} es la deformación debida al pretensado inicial, que ϵ_d es la deformación debida a la descompresión del concreto y ϵ_{pr} es la pérdida de capacidad de deformación por flujo plástico del tendón, se puede obtener la capacidad de deformación restante para la deformación por flexión con la siguiente relación:

$$\epsilon_f = \epsilon_{pu} - \epsilon_{pi} - \epsilon_d - \epsilon_{pr} \quad (1)$$

La relación de c/d puede encontrarse ahora con:

$$\frac{c}{d} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{pu} - \epsilon_{pi} - \epsilon_d - \epsilon_{pr}} \quad (2)$$

El equilibrio de fuerzas en la sección permite expresar la relación de fragilidad de la siguiente manera:

$$0.85f'_c \beta_1 c b = \rho_{br} b d f_{pu} \rightarrow$$

$$\rho_{br} = 0.85 \beta_1 \frac{f'_c}{f_{pu}} \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{pu} - \epsilon_{pi} - \epsilon_d - \epsilon_{pr}} \quad (3)$$

Para simplificar la ecuación puede asumirse que la tensión sostenida es menor a 50% de f_{pu} , por lo cual ϵ_{pr} es 0, y que la deformación debida a la decompresión es típicamente por una

magnitud menor que la deformación por flexión, lo cual significa que ε_d también es 0. La ecuación simplificada es:

$$\rho_{br} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{pu}} \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{pu} - \varepsilon_{pi}} \quad (4)$$

Debido a que los PRF tienen una capacidad de deformación de hasta 6%, existe una reserva considerable para permitir una deflexión muy notable antes de la falla de una viga.

La resistencia a flexión se determina según el nivel de reforzamiento. Una viga normalmente reforzada contiene un nivel de reforzamiento de $0.5\rho_{br}$ a $1.0\rho_{br}$ y resulta en una resistencia nominal a flexión como en la siguiente expresión:

$$M_n = \rho b d^2 f_{pu} \left(1 - \frac{\rho}{1.7} \frac{f_{pu}}{f'_c}\right) \quad (5)$$

Para vigas subreforzadas con un nivel de reforzamiento menor a $0.5\rho_{br}$ se asume que el bloque de concreto no alcanza la no-linealidad, si no que la distribución de esfuerzos se mantiene lineal. En base de esta consideración se obtiene:

$$M_n = \rho b d^2 f_{pu} \left(1 - \frac{k}{3}\right) \quad (6)$$

Donde $k = \sqrt{(\rho n)^2 + 2\rho n} - \rho n$ y n es la relación de los módulos de elasticidad del PRF al concreto.

Un elemento sobrerreforzado falla primero por aplastamiento de concreto antes de la falla del tendón. En este caso el valor de deformación del tendón es desconocido. Se puede utilizar un proceso iterativo para encontrar la profundidad del eje neutro por el equilibrio de fuerzas, y conocida la profundidad, se obtiene finalmente la siguiente expresión para la resistencia a flexión:

$$M_n = 0.85 f'_c b \beta_1 k_u d^2 \left(1 - \frac{\beta_1 k_u}{2}\right) \quad (7)$$

Las expresiones anteriores funcionan con la premisa que se trata de un solo lecho de refuerzo de PRF. Si se utilizan varios lechos de refuerzo debe considerarse el nivel de alargamiento en cada uno de los tendones. El uso de acero permite utilizar el centroide del presfuerzo para el análisis, debido a que todos los tendones alcanzan a fluir en el estado último. En el caso de PRF no se puede asumir fluencia del material, por lo cual el tendón inferior llega a su límite antes que los otros. Se puede analizar la sección con la consideración que la distribución de deformación en los tendones es lineal.

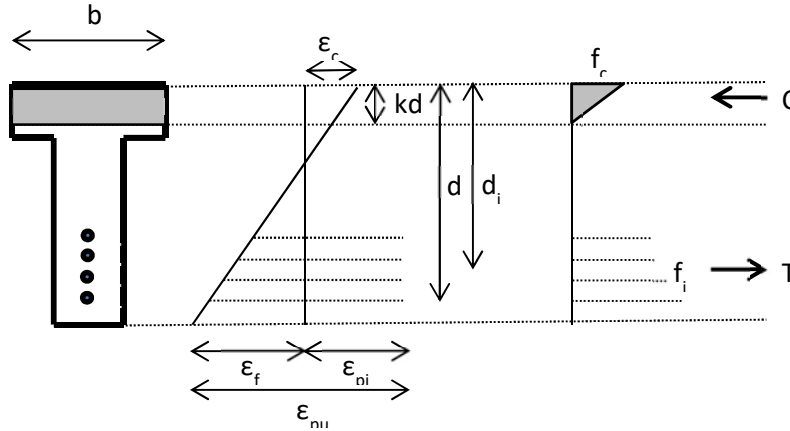


Figura 2-6 Sección agrietada con tendones distribuidos verticalmente (Dolan et al, 2001)

El esfuerzo en cada tendón puede expresarse según la relación de deformación en cada nivel al nivel de deformación en el tendón inferior.

$$f_i = f_{pi} + (f_{pu} - f_{pi}) \frac{d_i - kd}{d - kd} \quad (8)$$

Definiendo $\xi = f_{pi}/f_{pu}$ y $\psi_i = d_i/d$ se obtiene para un presfuerzo uniforme en los tendones las siguientes expresiones:

$$k = \frac{\sqrt{(n \sum_{i=1}^m \rho_i)^2 + 2(1 - \xi)n \sum_{i=1}^m \rho_i (\xi + \frac{d_i}{d}(1 - \xi)) - n \sum_{i=1}^m \rho_i}}{1 - \xi} \quad (9)$$

con lo cual se puede formular la resistencia a flexión de siguiente manera:

$$M_n = bd^2 \sum_{i=1}^m \rho_i f_i (\psi_i - \frac{k}{3}) \quad (10)$$

En caso que se aplique el presfuerzo de manera individual a los tendones debe adecuarse esta expresión debidamente.

Para obtener una distribución uniforme de esfuerzos en los tendones cuando se llega a la curvatura máxima de la viga, se puede variar el nivel de presfuerzo en los diferentes lechos. Alternativamente también se puede variar la cantidad de refuerzo en cada nivel para obtener el mismo efecto.

2.7 Diseño por servicio

Generalmente se tensan los cables de presfuerzo de acero al 85% de su límite de fluencia con una deformación unitaria de 0.005. Debido a limitaciones por ruptura prematura bajo cargas sostenidas por deformación plástica, el límite para tensión en PRF es mucho más bajo y se encuentra típicamente entre 40% y 60%. No obstante, cabe mencionar que este esfuerzo corresponde a una deformación mayor a la de acero; entre 0.008 y 0.012.

Para el concreto se utiliza el mismo límite de esfuerzo para el caso de presfuerzo con acero como con fibras de carbono. El comité 440 del ACI utilizó especialmente criterios de fatiga bajo carga repetitiva para determinar los siguientes límites en el ACI Committee 440 (2008):

Tabla 2-1 Límites de esfuerzos en concreto según ACI 440 (2008)

Esfuerzos permisibles en transferencia de presfuerzo (antes de pérdidas)	
(a) Esfuerzo en fibra extrema a compresión	$0.6 f_{ci}'$
(b) Esfuerzo en fibra extrema a tensión (excepto (c))	$3 \sqrt{f_{ci}'}$
(c) Esfuerzo en fibra extrema a tensión en extremos	$6 \sqrt{f_{ci}'}$
Esfuerzos permisibles bajo cargas de servicio (después de pérdidas)	
(a) Esfuerzo en fibra extrema a compresión debido a presfuerzo más cargas sostenidas	$0.45 f_c'$
(b) Esfuerzo en fibra extrema a compresión debido a presfuerzo más cargas completas	$0.6 f_c'$
(c) Esfuerzo en fibra extrema en zona a tensión precomprimida	$6 \sqrt{f_c'}$

También para las fibras se presentan límites de esfuerzo de tensión en éstas. El límite de tensión está principalmente determinado por la capacidad de la fibra de resistir cargas sostenidas. El ACI presenta los siguientes límites:

Tabla 2-2 Límites de esfuerzos en PRF según ACI 440

Esfuerzos permisibles al tensar	Pretensado	Postensado
Carbono	$0.65 f_{pu}$	$0.65 f_{pu}$
Aramida	$0.65 f_{pu}$	$0.65 f_{pu}$
Vidrio	No recomendado	$0.55 f_{pu}$
Esfuerzos permisibles a la transferencia de presfuerzo		
Carbono	$0.60 f_{pu}$	$0.60 f_{pu}$
Aramida	$0.38 f_{pu}$	$0.35 f_{pu}$
Vidrio	No recomendado	$0.48 f_{pu}$

La deflexión que se puede presentar en una viga presforzada con PRF puede ser categorizada en dos tipos, deflexiones de corto plazo y deformaciones de largo plazo. La deflexión antes de agrietamiento puede calcularse con la inercia de la sección gruesa I_{cr} , mientras que para la sección agrietada puede usarse la siguiente expresión, también utilizada para concreto reforzado y con validez para este caso, para obtener la inercia efectiva I_{eff} :

$$I_{eff} = \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3 I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\right) I_{cr} \quad (11)$$

donde

$$I_{cr} = \frac{b(kd)^3}{3} + nA_{ps}(d - kd)^2 \quad (12)$$

$$n = \frac{E_f}{E_c} \quad (13)$$

Las deflexiones a largo plazo se calculan multiplicando las inmediatas por factores de tiempo, distinguiendo entre deflexiones por contraflecha y por cargas verticales. Para cada una se utiliza un factor diferente y se superponen para obtener la deflexión final. Gilstrap et al. (2001) sugieren los factores de la Tabla 2-3 para el uso de PRF presforzadas. La tabla compara valores para diferentes PRF con los valores del PCI para acero presforzado.

Tabla 2-3 Factores de modificación para deflexión (Gilstrap et al., 2001)

		Acero	Carbono	Aramida	Vidrio E
En construcción	Deflexión debida a carga muerta	1.85	1.85	1.85	1.85
	Contraflecha debida a pretensado	1.80	1.80	2.00	1.70
Final	Deflexión debida a carga muerta	2.70	2.70	2.70	2.70
	Contraflecha debida a pretensado	2.45	0.00	0.00	0.75
	Deflexión debida a carga aplicada	3.00	4.10	4.00	3.00

El manual de diseño para presfuerzo de PRF canadiense (2008) omite valores para fibras de vidrio, prohibiendo su uso para fines de presfuerzo y sustituye los valores para contraflecha debida a pretensado para fibras de carbono y aramida por 1.0.

Cabe mencionar que algunos estudios han demostrado que el uso de tendones de PRFC sin adhesión y sólo anclados en sus extremos demuestran una mayor capacidad de deformación que el uso de PRFC adheridos a la superficie del concreto. El uso de PRF adheridos resulta en un comportamiento compuesto del concreto con las fibras hasta la carga última. PRF no-adheridos presentan un comportamiento inicial parecido con un poco menos de rigidez, no obstante una vez llegando a cargas de desprendimiento del sistema adherido y la formación de grietas en el concreto, los dos sistemas se comportan igual y obtienen el mismo nivel de carga última.

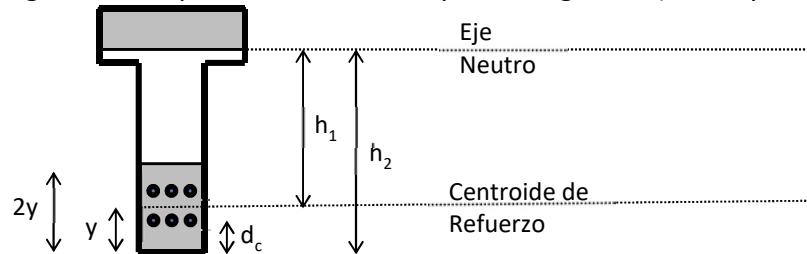
La formación de grietas depende del módulo de elasticidad del refuerzo. El tendón de PRF de carbono típico tiene un módulo de elasticidad menor al de acero y tiene mayor capacidad de deformación, por lo cual el ancho de grieta resultante es mayor en el caso de PRF. Las expresiones existentes para la predicción de ancho de grietas para presfuerzo con acero w_{acero} deben ajustarse por lo tanto por la relación de módulos de elasticidad entre acero y PRF. La expresión desarrollada por Gergely y Lutz (1968) para presfuerzo con acero sigue siendo válida:

$$w_{acero} = K_g \Delta_f \frac{h_2}{h_1} \sqrt[3]{d_c A} \quad (14)$$

Espesor de grieta modificado para PRF w_{prf} :

$$w_{prf} = w_{acero} \frac{E_a}{E_f} \quad (15)$$

Figura 2-7 Base geométrica para el cálculo de espesor de grietas (Gilstrap et al, 2001)



El factor K_g también debe ser ajustado para el uso con PRF: Éste depende del módulo de elasticidad y de la adherencia del refuerzo. En el caso de PRF ocurre más deslizamiento, y por lo tanto mayor espesor de grietas. El menor módulo de elasticidad también provoca que se genere más deformación para mantener el mismo nivel de esfuerzos, y por lo tanto también genera mayores espesores de grietas. Los valores de K_g para acero y para vidrio son conocidos y se puede obtener el valor para fibras de carbono mediante interpolación.

Tabla 2-4 Factores K_g para acero, carbono y vidrio (Gilstrap et al., 2001)

Material	Módulo de elasticidad	Factor K_g
Acero	200 GPa	$11 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$
Carbono	145 GPa	$21 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$
Vidrio	37.6 GPa	$40.9 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$

Igualmente, aquí aplica la restricción para refuerzos en un solo lecho. Para el caso de presfuerzo en varios lechos la expresión Gergely y Lutz subestima el ancho de grietas y debe adecuarse.

2.8 Consideraciones de seguridad

La naturaleza frágil de los PRF crea la necesidad de utilizar un concepto de seguridad un poco diferente al concepto clásico de acero. Los PRF no poseen ductilidad, por lo tanto se requiere que una falla se anuncie claramente antes de ocurrir. Se introducen el concepto de deformabilidad y un índice para medir el desempeño para asegurar que una falla se

anuncie debidamente. Su cuantificación se logra con una relación entre las deflexiones o curvaturas bajo carga última y las correspondientes a carga de servicio.

La estimación de deflexiones se complica por el cálculo más elaborado especialmente en estructuras continuas, y por la incertidumbre en la definición de la rigidez de una viga cerca de la falla por el efecto de suavización de la viga por agrietamiento. Se recomienda el uso de la relación de curvaturas de carga última a carga de servicio. Dolan (1996) introdujo la siguiente expresión para el índice de deformabilidad:

$$\text{Índice} = \frac{(d - kd)\varepsilon_{PRF-ultimo}}{(d - \frac{a}{\beta_1})\varepsilon_{PRF-servicio}} \quad (16)$$

Este índice se desarrolló asumiendo que la deformación de la viga puede ser aproximada satisfactoriamente con una parábola y que secciones planas permanecen planas. La parábola se puede describir con $y = \frac{L^2\phi}{8}$, tomando en cuenta que la curvatura ϕ es la inversa del radio R . Utilizando las curvaturas para cargas de servicio y para cargas últimas se obtiene la expresión anterior por la relación entre estas curvaturas; Dolan (1996):

$$\phi_{servicio} = \frac{\varepsilon_{PRF-servicio}}{d - kd} \quad (17)$$

$$\phi_{ultimo} = \frac{\varepsilon_{PRF-ultimo}}{d - \frac{a}{\beta_1}} \quad (18)$$

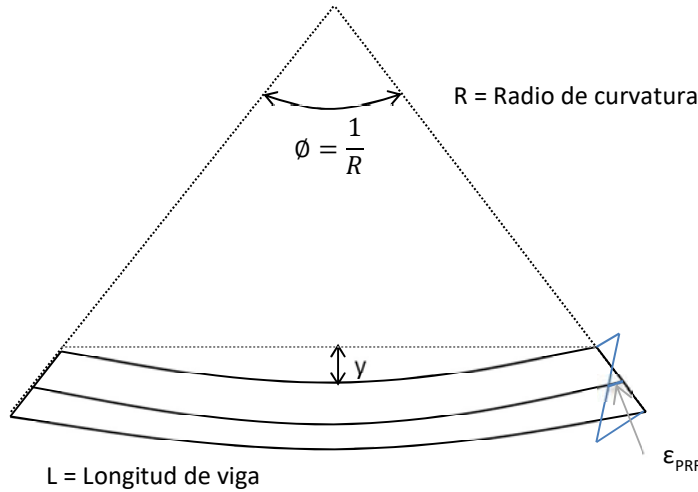


Figura 2-8 Ilustración de definiciones de curvatura (Gilstrap, 2001)

No obstante, el nivel de seguridad obtenido con este concepto es limitado. El uso de niveles de presfuerzo bajos ha sido el método más eficiente para maximizar la deformabilidad de una viga. La reducción de deformación por presfuerzo deja más reservas de deformación en los tendones, lo cual permite mayor curvatura y mayor deflexión. Dolan et al. (2001)

sugieren que la relación de deformación última a deformación por pretensado inicial debe ser mayor a 1.67 para cumplir con el criterio de deformabilidad satisfactoriamente. Esta relación equivale a un nivel máximo de presfuerzo de $0.6f_{pu}$, el cual coincide también con el límite para evitar fallas por flujo plástico.

Por fin, debe prevenirse una falla del elemento inmediatamente después de la formación de grietas. Para evitar esta falla Dolan et al. (2001) introduce la exigencia que la resistencia factorizada a flexión M_r debe ser por lo menos 50% mayor que el momento de agrietamiento M_{cr} . Puede omitirse esta exigencia si el momento resistente M_r ya es 50% mayor al momento debido a cargas factorizadas M_f . Por otro lado, que M_r sea 50% mayor a M_f se vuelve exigencia si la falla está controlada por falla de los tendones sin que el concreto llegue a su límite de deformación.

El manual de diseño canadiense exige también un mínimo de refuerzo pasivo aparte del presfuerzo de PRF. Debido a la falla frágil que presentan los elementos con tendones de PRF, se requiere que el refuerzo pasivo genere por lo menos suficiente capacidad para resistir a las cargas muertas no-factorizadas.

Debe mencionarse que el último requisito se cumple para la mayoría de los casos de refuerzo para puentes con refuerzo postensado. La estructura se encuentra generalmente en un estado satisfactorio para cargas muertas, mas con necesidad de refuerzo para cargas vivas.

2.9 Desviación de tendones

Por otro lado, los torones de PRF requieren un análisis donde el efecto de la desviación se tome en cuenta, debido a su inhabilidad de acomodar deformaciones plásticas. La desviación correcta de los tendones de presfuerzo aumenta notablemente su eficiencia cuando se aplican como reforzamiento para elementos estructurales a flexión. Generalmente, no se tiene que tomar en cuenta el efecto local de desviación sobre un tendón de presfuerzo de acero, debido a la ductilidad del material y la subsecuente capacidad de deformarse de forma plástica en los puntos de desviación. No obstante, para el caso de PRF, la desviación de los tendones puede disminuir su resistencia notablemente.

El número de estudios sobre la desviación de torones de PRF ha sido muy limitado y hasta la fecha se tienen pocas especificaciones al respecto. El denominador común de todos es que se limita la elección de fibras a fibras de carbono o de aramida por sus mejores prestaciones con respecto a capacidad a tensión, resistencia al ambiente y flujo plástico. En este estudio se presenta una forma más precisa de predecir la falla prematura de un elemento PRF desviado que en las referencias existentes.

La desviación de tendones presforzados incrementa los esfuerzos en el tendón en el punto de desviación. Esto también afecta el comportamiento por flujo plástico de PRF, debido al nivel elevado de esfuerzos sostenido. El incremento depende de la distancia del centroide del tendón a su cara a tensión y y del radio de curvatura de la silla desviadora R , lo cual resulta en la expresión:

$$\sigma_h = \frac{E_f y}{R} \quad (19)$$

Esta expresión es válida para tendones sólidos y es conservadora para tendones formados por hilos. El esfuerzo resultante en el tendón se expresa por lo tanto de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{P_j}{A_f} + \frac{E_f y}{R} \quad (20)$$

No obstante, se ha observado que los efectos por desviación no son tan grandes como esta expresión lo predice. Según ésta los esfuerzos adicionales por desviación para el caso de radios relativamente pequeños serían tan grandes que deberían fallar sin poder tomar cualquier esfuerzo axial. Sin embargo, se ha observado que la desviación de tendones pudo efectuarse con radios pequeños sin generar la ruptura inmediata de los mismos. Lo anterior se ha comprobado con cargas menores a la carga de ruptura de los tendones y se atribuyó la mayor capacidad a una redistribución de esfuerzos entre las fibras, debido a la flexibilidad de la matriz. (Gilstrap et al., 2001)

Varios estudios han arrojado que existen otros parámetros importantes que afectan la resistencia del tendón. No obstante, su influencia no ha sido cuantificada adecuadamente. Una recomendación en el manual canadiense para el uso de fibras de carbono para postensado incluye algunos parámetros obviamente importantes, pero con resultados dudosos.

El manual de diseño de diseño canadiense indica para el uso de PRF presforzados (2008) una primera expresión para el radio de curvatura del desviadora elaborada por Quayle (2005), la cual incluye una dependencia del nivel de carga en el tendón y del ángulo de desviación, lo cual confirma también el estudio de Knippers (2008). Este radio denominado el “radio natural” sustituye el radio R en la ecuación 20 en caso de ser menor que el radio del desviador. La siguiente expresión es la formulación determinada por Quayle para el “radio natural” del elemento de presfuerzo:

$$R_n = \frac{r^2}{2} \sqrt{\frac{E_{prf} \pi}{P(1 - \cos \phi)}} \quad (21)$$

donde r es el radio del tendón de PRF, P es la fuerza en el tendón, y ϕ es el ángulo de desviación del tendón en el desviador.

Esta expresión es la más completa a primera vista en la actualidad, debida a la inclusión de algunos parámetros obviamente importantes. No obstante, en las siguientes gráficas que ilustran el comportamiento de esta expresión se notan algunas deficiencias.

Las diferentes curvas representan diferentes niveles de presfuerzo; de 10% de f_{pu} a 50% de f_{pu} , lo cual es el límite para la aplicación de presfuerzo en PRFC. La primera gráfica de la Figura 2-9 muestra las diferentes curvas de radio natural R_n dependiente del ángulo de desviación del tendón. Se observa que a partir de menos de 0.05 radianes ($\approx 2.9^\circ$) la expresión converge contra un valor fijo. La línea punteada es un radio de desviación de 4500 mm que se tomará como referencia, debido a que este radio es conocido como el radio adecuado para una desviación de 7.5° (Hanshan 2007).

La gráfica del lado derecho de la Figura 2-9 muestra el nivel de esfuerzo en el tendón según Quayle (2005) dependiente del ángulo de desviación. Se observa que el cambio de ángulo de desviación sólo tiene efecto mientras que el radio natural sea mayor al radio existente (4500 mm). Esto ocurre hasta un ángulo de desviación menor a 0.05 radianes, y a ángulos mayores el nivel de esfuerzo se mantiene constante.

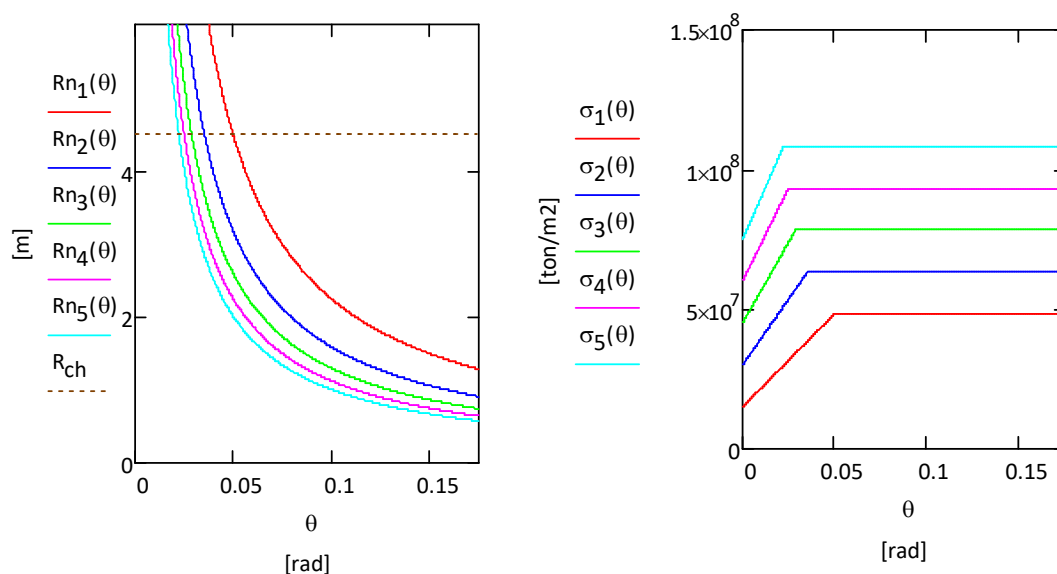


Figura 2-9 Influencia de radio de desviación sobre resistencia y esfuerzos

Sin embargo, Hanshan (2007), Tokyo Rope en su manual de 1993, Hwash et al. (2008) y Matta et al. (2009) confirman que el ángulo de desviación es uno de los parámetros importantes, que influye sobre el desarrollo de esfuerzos en los tendones. La expresión de Quayle parece ser inadecuada y debe ser revisada.

Cabe mencionar que el efecto de desviación depende de muchos factores, como es el tipo y las dimensiones de tendón utilizado, las dimensiones y la superficie del desviador, las propiedades de los materiales, el tipo de carga y el ángulo de desviación. Los resultados pueden variar, aún con los mismos materiales y la misma configuración.

2.10 Anclajes para PRF

Se han desarrollado algunos sistemas de anclajes tomando en cuenta las características únicas de las fibras, especialmente tomando en cuenta la susceptibilidad a daños por cargas laterales y cortantes resultantes, que pueden terminar en la ruptura súbita de las fibras. Una relación de resistencia axial a transversal de aproximadamente 20 a 1 requiere una atención especial en el desarrollo de anclajes para PEF. Los tipos de anclaje que se han desarrollado son los siguientes:

1. Abrazaderas
2. Tapón y cono
3. Anclaje de manga recta
4. Anclaje de manga deformada
5. Revestimiento metálico
6. Cuñas divididas
7. Cabeza de fibras
8. Envoltura de un cilindro de acero con el extremo de una lámina

Las abrazaderas representan el tipo de anclaje más común para la aplicación de PRF postensados en el reforzamiento de estructuras de concreto. Éstas consisten en placas con ranuras que abrazan de ambos lados al elemento de PRF. Mediante tornillos se unen las placas y las fuerzas son transmitidas por fricción (Figura 2-10). Los factores que influyen en la efectividad de este tipo de anclaje son la rugosidad de las superficies, la carga aplicada por los tornillos, en su caso el recubrimiento de las placas de acero y la longitud del anclaje.

Incluso, el único anclaje que cumple actualmente con la ETAG 013 (“Guidelines for European Technical Approvals of Post-Tensioning Kits”) de EOTA (2003), permitiendo una falla en el centro del elemento de postensado y no en el anclaje, es del tipo abrazadera (Figura 2-11). El sistema Leoba CarboDur LC-II ya fue instalado exitosamente en el puente Körschtal cerca de Stuttgart, Alemania.

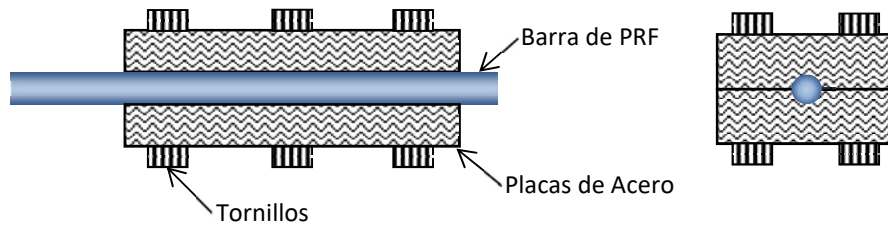


Figura 2-10 Anclaje tipo abrazadera

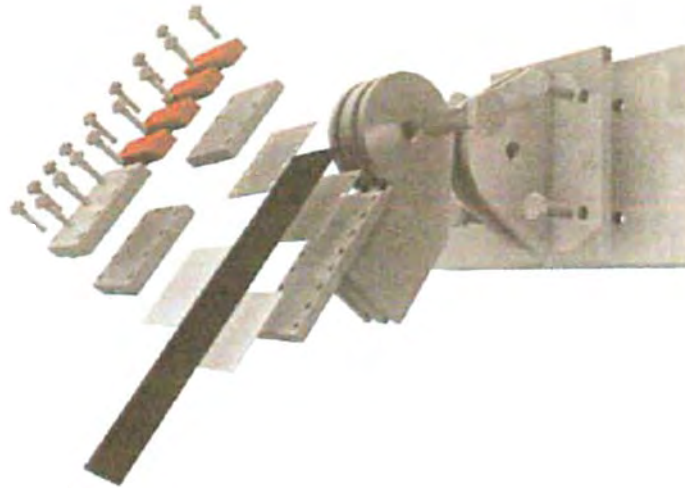


Figura 2-11 Anclaje tipo abrazadera certificado por ETAG 013 (Knippers, 2008)

El tipo de tapón y cono consiste en un mecanismo semejante al sistema de cuñas (Figura 2-12). Un clavo cónico sujeta las fibras contra la pared de un cono y la compresión que se aplica genera fricción que resiste el deslizamiento de las fibras. La instalación requiere remover el recubrimiento plástico de las fibras y una colocación uniforme de las fibras alrededor del tapón.

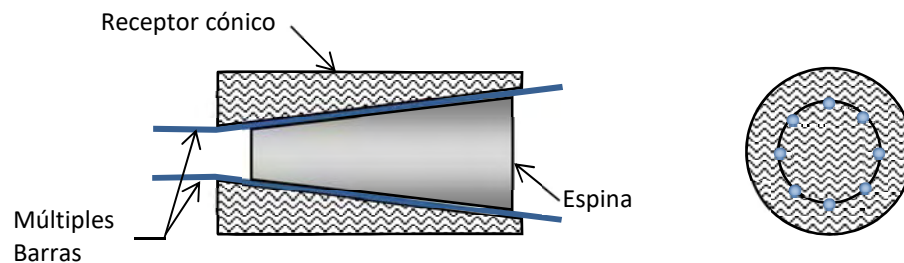


Figura 2-12 Anclaje tipo tapón y cono

En el caso del anclaje de manga recta, las cargas son transferidas por una matriz que envuelve la barra y que se adhiere a la superficie de un tubo metálico (Figura 2-13). Esta superficie se puede perfilar para aumentar la eficiencia del sistema. En el caso que se use una matriz expansiva, las fuerzas de expansión generan una resistencia adicional. El sistema ha sido comprobado extensamente y la única desventaja aparente es el largo plazo de curado de la matriz expansiva (2-3 días).

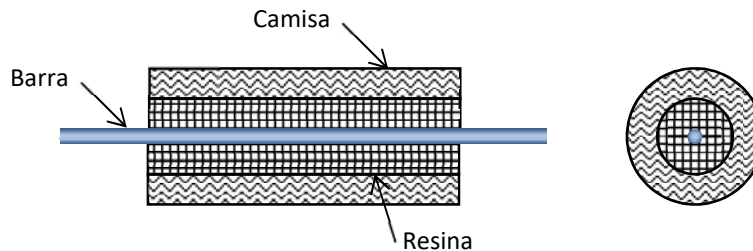


Figura 2-13 Anclaje tipo manga recta con resina expansiva

Los anclajes de manga deformada son parecidos a los anclajes de manga recta con la diferencia que la superficie interior puede tener una forma linealmente o parabólicamente variable (Figura 2-14). Aparte de la capacidad de transferir cargas por adhesión genera una fuerza radial, aumentando así la fricción. La superficie interior puede estar conformada por un material de rigidez variable para optimizar la transferencia de fuerzas a la barra con el objetivo de eliminar concentraciones de esfuerzo en ésta.

Recientemente este tipo de anclaje ha sido modificado con éxito por Horvatis (2004) y Burtcher (2008). La modificación consiste en una adaptación de la forma interna de la manga con preparaciones cónicas segmentales. Esto con el efecto que los esfuerzos transversales se distribuyan mucho mejor a lo largo de las fibras en el anclaje, y evitando así concentraciones de esfuerzos en el extremo del anclaje sobre las fibras. Este sistema se ha instalado con éxito en el PIV Golling en Austria.

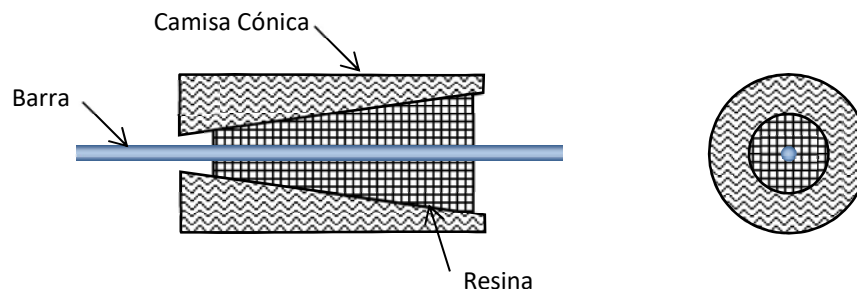


Figura 2-14 Anclaje tipo manga deformada

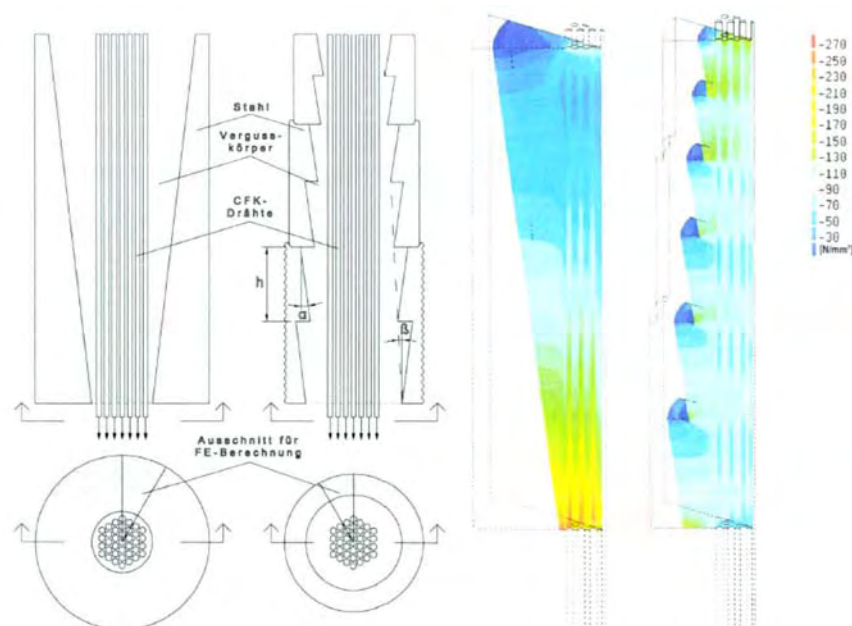


Figura 2-15 Anclaje tipo manga deformada modificado (Horvatis, 2004)

El método de revestir fibras de carbono con un metal en su extremo se efectúa mediante acero fundido sobre las fibras, Figura 2-16. Este método requiere la adecuación perfecta de las fibras y deja poca flexibilidad para ajustes en campo.

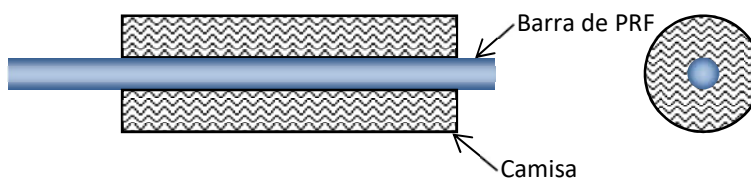


Figura 2-16 Anclaje con revestimiento metálico

Las cuñas divididas son un método conocido del uso de tendones de acero de presfuerzo clásicos, Figura 2-17. En este caso las cuñas pueden ser de plástico o se puede agregar una manga interior a las cuñas, por ejemplo de plomo. En comparación al uso con tendones de acero, la longitud de las cuñas debe ser aumentada y se debe cuidar que no se concentren

esfuerzos en algún punto sobre las fibras. Las ventajas principales de este método es la facilidad de su montaje, re-utilización y confiabilidad.

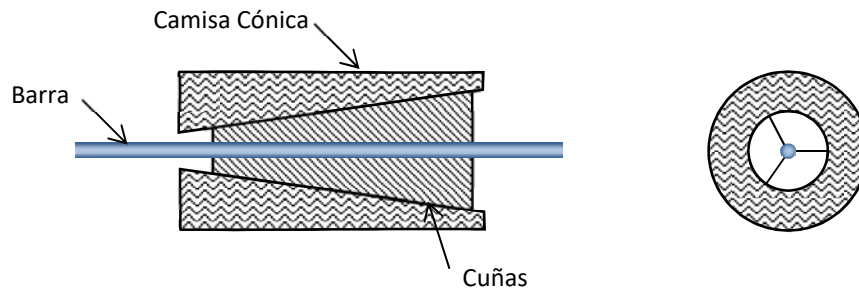


Figura 2-17 Anclaje con cuñas divididas

Para obtener una cabeza de reacción en el extremo del torón, éste se ha envuelto con fibras. La cabeza que se forma puede reaccionar contra bloques de transferencia fijos, Figura 2-18. Este método no deja libertad de ajustes en campo y requiere de tiempo de preparación del anclaje.



Figura 2-18 Anclaje con cabeza de fibras en extremos - El-Hacha (2003)

Un método eficiente para anclar láminas es envolver una barra de acero con el extremo de la lámina impregnándola con una resina y al final se tensa contra la barra de acero, Figura 2-19. La lámina puede ser adherida posteriormente a la superficie de la viga para obtener un comportamiento compuesto de los dos elementos. Este método es el más sencillo para el uso en láminas presforzadas, debido a que el uso de anclajes tipo abrazadera no es aplicable para láminas delgadas; éstos causarían ruptura de las fibras debido a que se trata de elementos muy finos en el caso de láminas.

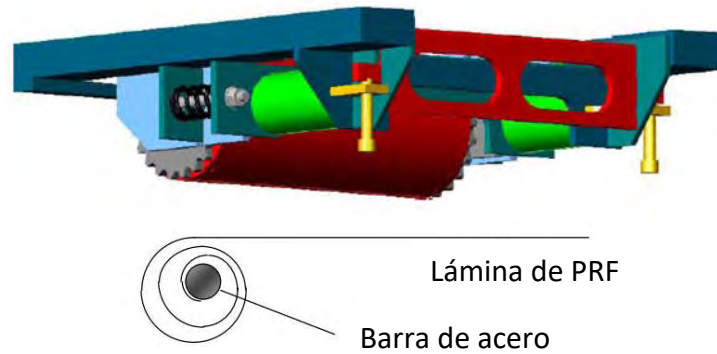


Figura 2-19 Anclaje con envoltura de lámina en cilindro de acero (Monti 2006)

Los tipos de fallas que se pueden presentar en los anclajes son:

- Movimiento o deslizamiento de las barras en el anclaje por un confinamiento insuficiente entre el PRF y el anclaje
- Deslizamiento del tendón en conjunto con la manga interior con respecto al anclaje exterior por exceder la capacidad a cortante en esta interfaz
- Ruptura del PRF en el anclaje por concentraciones de esfuerzo altas en el anclaje causando daño en las fibras, por lo cual se requiere un diseño que distribuya las cargas uniformemente. La ruptura de las fibras no debe ocurrir a una distancia menor a 3 veces el diámetro o espesor de las fibras medida desde el anclaje para poder considerar la falla ajena al sistema de anclaje.

3 Anclajes con grout expansivo

3.1 Revisión y diseño de anclajes

Para hacer ensayos a tensión a una sección circular de PRF, se utilizan frecuentemente anclajes de sección circular rellenos con un grout expansivo entre el tendón y un tubo de acero. Este sistema es eficiente para el uso con PRFC tanto bajo cargas estáticas como dinámicas, por lo cual se optó por una solución de este tipo para las pruebas a tensión de las barras.

La transferencia de carga ocurre por adherencia, entrelazado mecánico y fricción, dependiendo de la etapa de carga. La adherencia representa el mecanismo principal al inicio de la transferencia de carga desarrollándose localmente en el extremo cargado del anclaje y moviéndose con el incremento de carga hacia el extremo opuesto del anclaje. El deslizamiento resulta de deformaciones locales adyacentes a la superficie del tendón y la relación de carga-deslizamiento se incrementa abruptamente y de forma lineal hasta que la adhesión se rompe por corte del material más débil. En las zonas donde la adhesión se ha interrumpido, los mecanismos de fricción y entrelazado mecánico se vuelven predominantes después de un deslizamiento importante.

Para el caso de barras relativamente lisas el acabado y la composición de su superficie determinan de manera importante la resistencia del anclaje, y se ha comprobado la importancia de remover la capa de epoxi exterior mediante chorro de arena para mejorar la adherencia de las barras (Matta 2009).

El diámetro interior de la manga depende de la resistencia a cortante del grout, de la adherencia entre el grout y la manga, y del tamaño y el tipo del tendón de PRF. Una disminución del espesor del grout incrementa la rigidez radial, lo cual resulta en un mejoramiento de la eficiencia del anclaje. No obstante, debe proveerse siempre un recubrimiento mínimo de grout de 5 mm (Zhang, 2004).

El grout puede consistir en una resina o un mortero de base cemento. Las propiedades del grout son importantes para el desempeño del anclaje. La ventaja principal de un mortero sobre una resina de epoxi consiste en que el epoxi sufre deformaciones por flujo plástico, especialmente en ambientes húmedos, mientras que morteros en base de cemento indican un desempeño más constante con mucho menos flujo plástico. Aparte el mortero representa el material más económico y con mayor disponibilidad.

Sus características deseables incluyen una fluidez adecuada para bombearlo a su posición, que se pueda garantizar un recubrimiento completo de los tendones, que tenga un tiempo de fraguado suficiente para poder maniobrar con el material, que tenga un mínimo de

sangrado y consistencia, una resistencia adecuada para asegurar una buena transferencia de carga del tendón al anclaje y resistencia a cambios de temperatura. Factores que afectan el desempeño del mortero son: el grado de confinamiento, la humedad de fraguado y las propiedades de rigidez del mortero.

Para el diseño de anclajes tubulares Dolan et al. (2000) utilizan expresiones para la obtención de la presión interna, en las que se incorpora un factor k para caracterizar el comportamiento expansivo. Para la obtención de un valor para k se requieren datos de ensayos del grout, por lo cual se utilizan inicialmente datos aproximados del proveedor del grout. Estos datos se verifican posteriormente con las mediciones de deformación de los tubos.

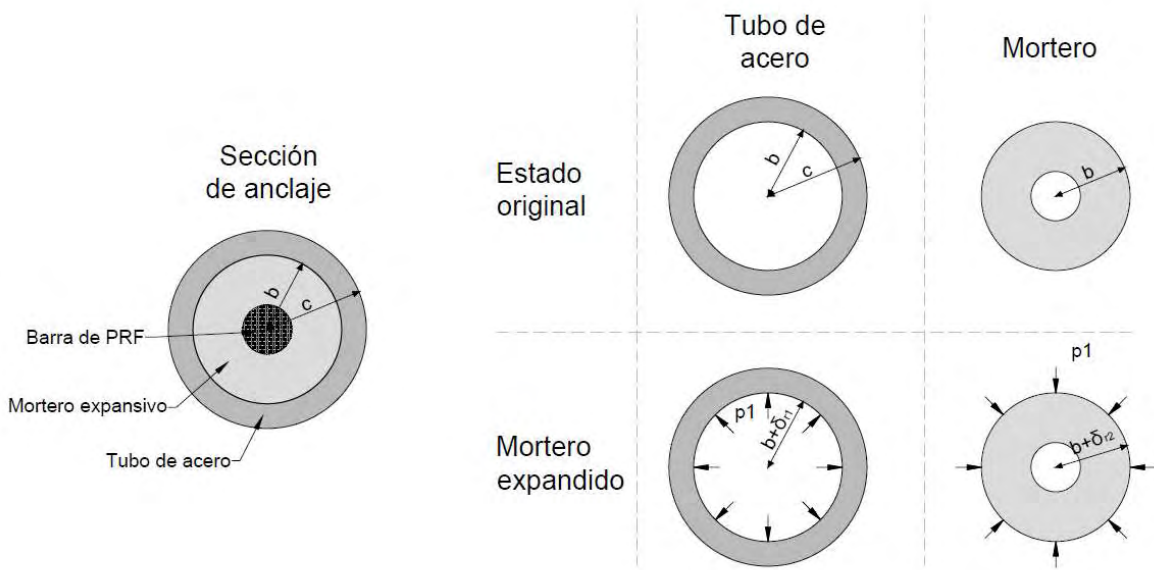


Figura 3-1 Esquema de fuerzas actuantes en anclaje

$$p_1 = \frac{k b}{\frac{b}{E_1} \left[\frac{b^2 + (b+t)^2}{(b+t)^2 - b^2} + v_1 \right] + \frac{b}{E_2} (1 - v_2)} \quad (22)$$

donde v_1 y v_2 representan la relación Poisson de acero y mortero respectivamente y en la Figura 3-1 δ_{r1} y δ_{r2} representan desplazamientos debidos a la presión que ejerce el mortero expansivo en el interior del tubo.

No obstante, en el estudio de Dolan se han observado algunas fallas en los tubos de acero al efectuar las pruebas, por lo cual para este trabajo se modificó el análisis propuesto por Dolan, en el que sólo se utilizan los esfuerzos circunferenciales para el diseño de los tubos. Para reproducir bien los efectos de la presión interna, se propone utilizar la teoría completa

de presión interna sobre secciones circulares, en la que se analizan los esfuerzos circunferenciales, pero también los esfuerzos radiales y de cortante.

$$\sigma_{\phi} = \frac{PR_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \left(1 + \frac{R_0^2}{R_i^2}\right) \quad (23)$$

$$\sigma_r = \frac{PR_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \left(1 - \frac{R_0^2}{R_i^2}\right) \quad (24)$$

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{\sigma_{\phi} - \sigma_r}{2} = \frac{PR_0^2}{R_0^2 - R_i^2} \quad (25)$$

(σ_{ϕ} : esfuerzo tangencial, σ_r : esfuerzo radial, R_0 : Radio exterior, R_i : Radio interior, P : Presión interior)

Al revisar el diseño de anclajes de Dolan y utilizando las expresiones anteriores, se obtienen los siguientes esfuerzos a lo largo del diámetro del tubo, comparados con el esfuerzo límite respectivo indicado con líneas punteadas rojas. Los esfuerzos en la pared de los tubos varían parabólicamente según la teoría de secciones con espesor grueso sujetas a presión.

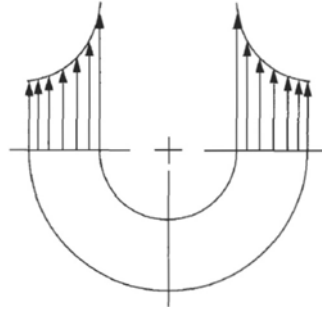
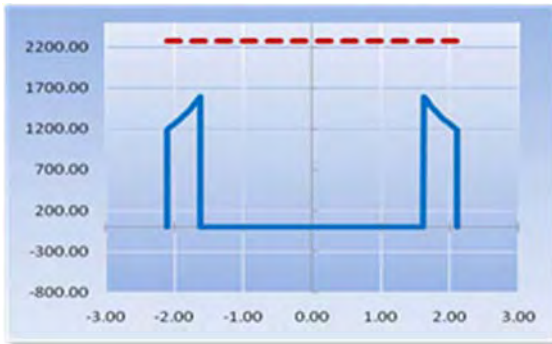
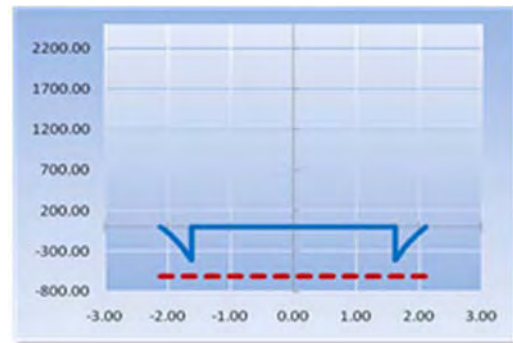


Figura 3-2 Variación de esfuerzos circunferenciales en paredes de tubo

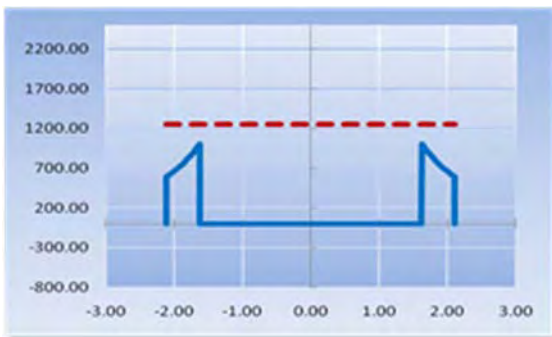
Esfuerzo circunferencial



Esfuerzo radial



Esfuerzo Cortante



Esfuerzo axial

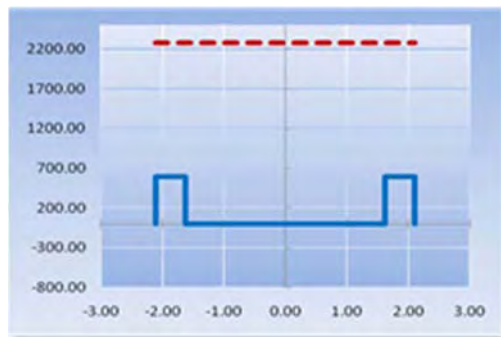


Figura 3-3 Esfuerzos en tubo tipo de Dolan et al (2000).

Se puede observar que el diseño sólo basado en esfuerzos circunferenciales no parece ser adecuado. Los esfuerzos radiales y principalmente a cortante resultan ser más importantes para diseñar el tubo de acero, debido a que con un ligero incremento de presión pueden alcanzar prematuramente su esfuerzo límite. El esfuerzo von Mises que se obtiene en una sección del tubo es de 3441 kg/cm^2 en el interior del tubo tomando en cuenta los tubos y las cargas utilizadas por Dolan. Esto indica un nivel de esfuerzos excesivo en el tubo, lo cual probablemente causó las fallas observadas en los tubos de ese estudio.

Para el rediseño de los tubos se determinaron primero las propiedades de los materiales utilizados. El grout utilizado en este estudio es un agente altamente expansivo usado en demoliciones. El material, comercialmente disponible en México, es de la marca Dexpan, con el que se pueden alcanzar presiones efectivas de aproximadamente 400 kg/cm^2 .

3.2 Comprobación experimental

Tomando en cuenta las propiedades expansivas del mortero expansivo de Dexpan se diseñaron anclajes para barras de PRF de carbono (PRFC). Las dimensiones determinadas para un torón con un diámetro de $3/8''$ corresponden a los datos que se encuentran en la

literatura. Se utilizó un tubo de $\varnothing 1\frac{1}{4}$ " de cédula 80 de Grado 36 o mayor con una longitud de 460 mm de anclaje. Los datos sobre anclajes de torones de $\frac{1}{2}$ " son escasos. El tubo que resultó del análisis es de $\varnothing 1\frac{1}{2}$ " de cédula 160 con una longitud de anclaje efectiva de 540 mm (Figura 3-4, Figura 3-5 y Figura 3-6).

En la Tabla 3-1 se comparan los diseños de anclajes que se encontraron en la literatura para plásticos reforzados con fibras de vidrio (PRFV) y plásticos reforzados con fibras de carbono (PRFC).

Tabla 3-1 Referencia comparativa

Material	diámetro de barra [mm]	diámetro ext de tubo [mm]	espesor de tubo [mm]	Longitud mínima de tubo [mm]	Referencia
PRFV	9.5	35	4.8	300	ACI 440.4
PRFV	13	42	4.8	380	ACI 440.4
PRFC	9.5	35	4.8	460	ACI 440.4
PRFC	8			250	Zhang (2004)
PRFC	7.9	33.40	4.01	330.2	Nanni (2001)
PRFC	11.1	42.16	4.83	457.2	Nanni (2001)
PRFC	11.1	42.16	3.56	457.2	Nanni (2001)
PRFC	7.9	33.4	6.35	440	Bakis (2001)
PRFC	9.5	42.2	4.86	460	estudio actual
PRFC	12.7	48.26	7.14	540	

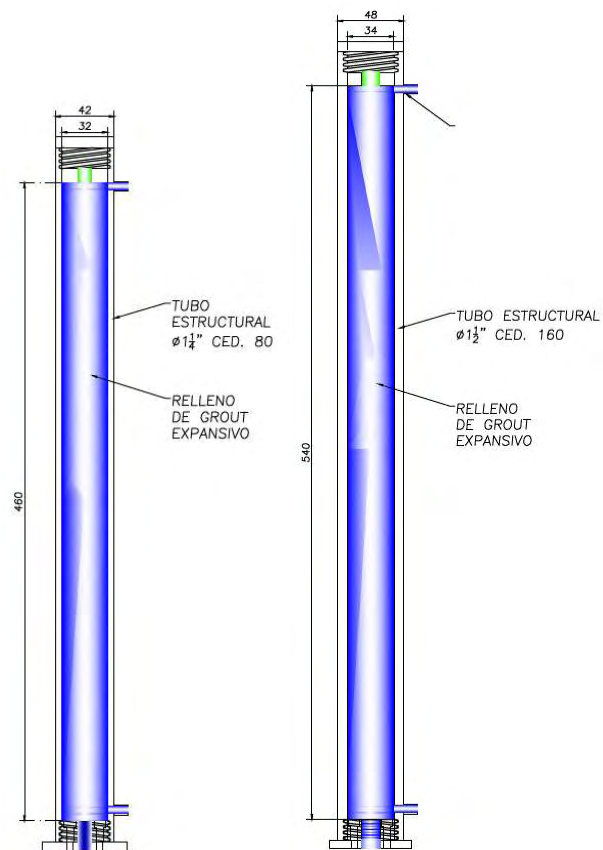


Figura 3-4 Anclajes para torones de 3/8" y 1/2" (detalles en dibujos anexos)



Figura 3-5 Tubos de anclaje fabricados



Figura 3-6 Extremos de tubos con roscas y entrada para inyección

3.3 Ensayes a tensión

3.3.1 Clasificación de barras de PRFC

Las barras se clasificaron según su tipo en:

- barras lisas de diámetro de 0.5"
- barras lisas de diámetro de 3/8"
- barras con superficie rugosa con recubrimiento arenoso de diámetro de 0.5"
- barras con superficie deformada de diámetro de 0.5"

Para determinar la densidad del compuesto se siguieron las indicaciones del ACI 440.3R-04 "Guide Test Methods for FRPs for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures". Se tomaron mediciones de geometría, peso y volumen. De cada tipo de barra se tomaron dos muestras para las pruebas, llegando a las siguientes densidades:

Tabla 3-2 Lista de barras para pruebas a tensión

	Diámetro [pulg.]	Densidad [g/cm ³]	Diámetro nominal [mm]
Barra lisa 1	0.5"	1.640	13.87
Barra lisa 2	0.5"	1.650	13.83
Barra rugosa 1	0.5"	1.677	13.82
Barra rugosa 2	0.5"	1.619	14.06
Barra deformada 1	0.5"	1.648	13.58
Barra deformada 2	0.5"	1.593	13.83
Barra lisa 1	3/8"	1.533	8.75
Barra lisa 2	3/8"	1.673	8.37

Para las propiedades mecánicas para subsiguientes cálculos es necesario conocer el contenido porcentual de las fibras en el compuesto. Para obtener este dato se tomaron en cuenta las características de los componentes publicados por el proveedor.

Tabla 3-3 Lista de propiedades de material proporcionada por el proveedor

	Matriz	Fibras
Módulo de elasticidad [kg/cm ²]	32,500	2,350,000
Resistencia última [kg/cm ²]	740	38,650
Deformación última [%]	5	1.7
Densidad [g/cm ³]	1.12	1.74
Relación de Poisson [-]	0.35	0.2

Tomando en cuenta una densidad de 1.64 g/cm³ del compuesto se obtiene que el contenido de fibras v_{fr} en el compuesto es relativamente alto:

$$v_{fr} = \frac{\rho_{cor} - \rho_m}{\rho_f - \rho_m} = 0.839 \quad (26)$$

Conociendo el contenido de fibras v_{fr} en el compuesto se puede obtener la resistencia nominal de las barras f_{cou} en sentido longitudinal:

$$f_{cou} = f_{fu}v_f + f_{mef}(1 - v_f) = 3.247 \times 10^4 \frac{kg}{cm^2} \quad (27)$$

donde f_{mef} es el esfuerzo en la matriz cuando las fibras alcanzan su límite.

De forma semejante se obtienen los módulos de elasticidad y las relaciones de Poisson del material compuesto en su sentido longitudinal y transversal utilizando reglas de mezcla:

Módulos de Elasticidad longitudinal E_{cox} según regla de mezclas:

$$E_{cox} = E_f v_f + E_m v_m = 1.977 \times 10^6 \frac{kg}{cm^2} \quad (28)$$

Módulos de Elasticidad transversal según las ecuaciones de Halpin-Tsai:

$$E_t = E_m \frac{1 + \xi \eta v_f}{1 - \eta v_f} = 4.353 \times 10^5 \frac{kg}{cm^2} \quad (29)$$

donde: $\xi = 2.0$ para secciones circulares y

$$\eta = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m} + \xi\right)} = 0.96 \quad (30)$$

Relación de Poisson longitudinal v_{cox} y transversal v_{coy} :

$$v_{cox} = v_f v_f + v_m v_m = 0.224 \quad (31)$$

$$v_{coy} = \frac{E_{coy}}{E_{cox}} v_{cox} \quad (32)$$

Por último, también se puede obtener la resistencia teórica transversal f_{tu} y la deformación última transversal ε_{tu} de la barra según Nielsen:

$$f_{tu} = f_{mu} \frac{E_t}{E_m} \left(1 - v_f^{\frac{1}{3}}\right) = 563.359 \frac{kg}{cm^2} \quad (33)$$

$$\varepsilon_{tu} = \varepsilon_{tu} \left(1 - v_f^{\frac{1}{3}}\right) = 0.002842 \quad (34)$$

3.3.2 Diseño de ensaye a tensión

La resistencia y el módulo de elasticidad de los tendones de PRFC fue medida con el procedimiento descrito en el ACI 4440.3R-8 Parte 2 tomando en cuenta las provisiones de ASTM D618, D3916 y E4 para la preparación correcta de los especímenes, la realización adecuada del ensaye y la verificación de la máquina de ensaye. Se ensayaron 5 especímenes por cada lote representativo con una longitud libre entre anclajes de por lo menos 50 cm. Este procedimiento también verificó la eficiencia de los anclajes.

La resistencia y el módulo de elasticidad de las fibras, que se obtuvieron con los ensayos de prueba fueron esenciales para la caracterización de éstas y el desarrollo de representaciones adecuadas de los fenómenos que se observan en los siguientes ensayos.

Las mediciones que se tomaron en estos ensayos son:

- Deformación en la parte central del torón
- Deslizamiento de torón a la salida del anclaje
- Carga aplicada
- Deformación circunferencial en la superficie exterior de tubos de anclaje (desde el momento de colado del grout)

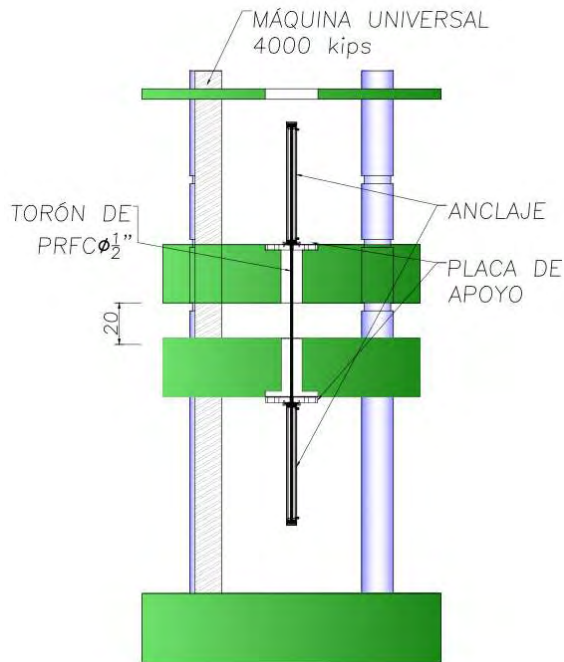


Figura 3-7 Arreglo de ensayo en máquina universal

Para efectuar los ensayos, se requirieron placas de apoyo nuevas. Las placas existentes sólo consistían en placas con una perforación en medio para el paso de una varilla. No obstante, en este caso se requiere instalar primero el conjunto de anclajes con barra en la máquina universal, y después colocar la placa de anclaje debajo del tubo de anclaje. Así que la placa tenía que estar conformada por dos partes que se unieran de forma segura para apoyar el anclaje y transferir la carga a la máquina universal. Se hizo un diseño correspondiente con dos placas maquinadas en taller a la medida. Estas incluyen preparaciones para que se traslapen y se puedan unir con tornillos de 3/4" a los orificios de la máquina universal.

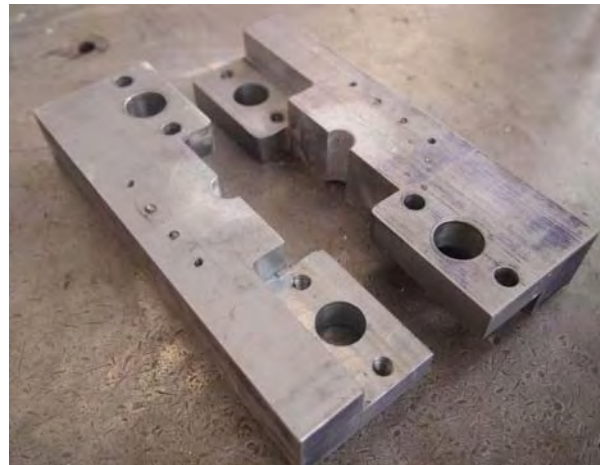
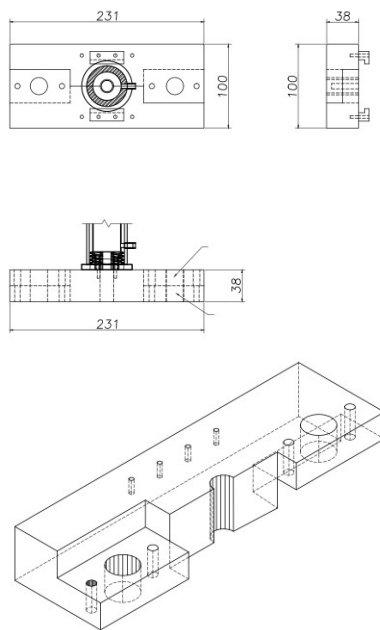


Figura 3-8 Placas de apoyo para ensayos a tensión de PRFC

Los datos obtenidos en los ensayos permitieron caracterizar las propiedades de las barras de PRF en módulo de elasticidad y resistencia, y además la eficiencia de los anclajes y la capacidad de expansión del grout.

Se construyeron bases para la colocación y alineación perfecta de los anclajes con la barra, antes del colado del mortero en los anclajes diseñadas y fabricadas ex profeso para este ensaye.



Figura 3-9 Ensamble de anclajes con barras e instrumentación

Se hicieron las preparaciones para hacer pruebas al grout tanto a compresión como a su expansibilidad. Para esto se colaron cubos en moldes para de 2"x2" siguiendo la especificación del ASTM C109. No obstante, la alta expansividad - mayor a la esperada - causó el daño de estos moldes. Aparte, se notó que la consistencia del grout después de su fraguado es polvorosa, lo cual hace pruebas de su capacidad a compresión muy difícil. La expansividad es de hecho tan alta que el procedimiento para cuantificarla según ASTM C806-04 es inadecuado. Así que se optó por la obtención de la expansividad indirectamente calculándola en función de la deformación de los tubos de anclaje.

Por otro lado, la mezcla del mortero es muy líquida. Esto también impidió hacer la prueba de fluidez al grout, no obstante, la inyección de los tubos con éste se facilitó por su liquidez, como se puede observar en Figura 3-10 y Figura 3-11.



Figura 3-10 Inyección de mortero por el extremo inferior



Figura 3-11 Control de geometría e instrumentación de barras

Se instrumentaron 4 anclajes – 2 para el ensaye de una barra de 1/2", y 2 para una barra de 3/8" - con strain gages para medir su expansión circunferencial y longitudinal en la base del anclaje. Las deformaciones en los tubos se midieron con strain gages de uso general con una rejilla tipo 125UN, una resistencia de 120Ω, encapsulada en poliamida y aptas para temperaturas de -75° a +175°C. Igualmente, se obtuvieron las deformaciones en las barras con el mismo tipo de strain gages y la carga se obtuvo con los instrumentos de la máquina universal del laboratorio de la Universidad Autónoma Metropolitana en Azcapotzalco.

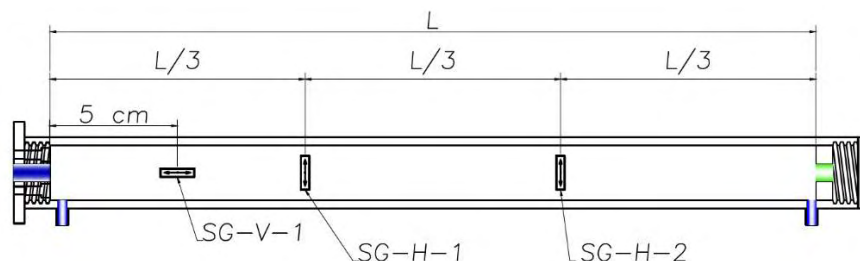


Figura 3-12 Posición de Strain Gages en anclaje tipo

Se inyectaron 2 anclajes a la vez, registrando desde el inicio las deformaciones en los anclajes. El fraguado del grout inicia aproximadamente 4 horas después de preparar la mezcla. La expansión del mismo se tarda aproximadamente 2 horas hasta llegar a su máximo. La reacción del agua con el cemento es de alto grado exotérmica. Esto, en conjunto con la descarga súbita de presión por los agujeros en los anclajes, tuvo lamentablemente el efecto de que algunos strain gages se perdieran antes de terminar la adquisición de datos. La adquisición de datos se hizo con intervalos fijos por 5 días después de haber inyectado los anclajes.

3.3.3 Resultados de ensayes

La barra de 3/8" se comportó como se esperaba. A un nivel de tensión de 5200 kg/cm² se observa un ligero quiebre en la gráfica de esfuerzo-tiempo debido al deslizamiento de la superficie del torón (Figura 3-14 izquierda). Después de este deslizamiento, la relación de carga- deformación se incrementa de forma lineal, hasta que la adhesión es terminada por corte del material más débil. En las zonas donde la adhesión se ha interrumpido, los mecanismos de fricción y entrelazado mecánico se vuelven predominantes después del deslizamiento. La curva de carga-deslizamiento se desvía a partir de este momento de su linealidad hasta llegar a la carga máxima.

Las barras se comportaron como se esperaba. Se observó un ligero acomodo del desarrollo de la deformación debido al deslizamiento de la superficie del torón. En las zonas donde la adhesión entre mortero y barra se ha interrumpido, los mecanismos de fricción y entrelazado mecánico se vuelven predominantes después del deslizamiento. Aplicando una precarga del 20% de la carga final, se puede evitar este efecto en el transcurso del ensaye. La falla final fue de tipo “escoba”, donde las fibras se rompen sin fluencia del anclaje en el centro de la barra (Figura 3-13).



Figura 3-13 Falla típica de barras PRF tipo “escoba” observada con tubos

La barra de 1/2” se precargó ligeramente para evitar el quiebre por deslizamiento, lo que se logró. No obstante, en este caso la barra no llegó a fallar, sino que se deslizó en el anclaje inferior A12-1 hasta el límite de movimiento de la máquina universal, con disminución de la carga. Aparte, se separaron las placas que conformaron el apoyo para los anclajes sobre la máquina universal. Esa separación causó una deformación de las placas. Esta deformación se ve reflejada en la gráfica de esfuerzo-deformación de la barra de 1/2” en forma de una curva, así que la gráfica no indica en este caso un comportamiento lineal hasta la falla de la barra.

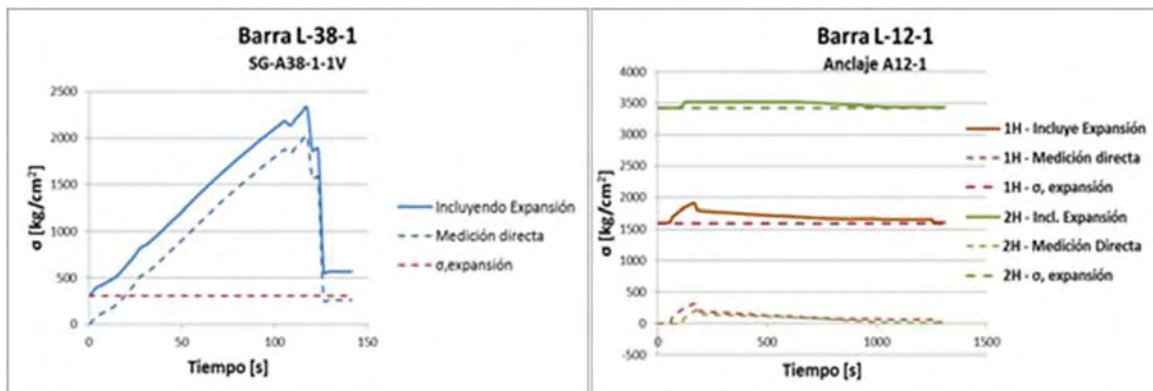


Figura 3-14 Esfuerzos combinados de expansión de grout y aplicación de carga

La gráfica esfuerzo-tiempo longitudinal en los tubos es similar a la de las barras. En la imagen izquierda de la Figura 3-14 se superpusieron los esfuerzos generados de antemano por la expansión del grout y los esfuerzos generados por la aplicación de carga para obtener los esfuerzos reales en el tubo.

El desarrollo de la deformación por la expansión del mortero depende de la temperatura de ambiente y la hora de su colado. Esto causa, que en las primeras horas de fraguado, las deformaciones en los tubos pueden diferir bastante. No obstante, después de aproximadamente 12 horas se vuelven parecidas. Se recomiendan al menos 24 horas de tiempo de fraguado antes de efectuar un ensaye con este tipo de anclaje, para eliminar la influencia de este efecto.

La nomenclatura de los Strain Gages sigue el siguiente patrón:

SG-AXX-Y-ZZ

donde: SG: Strain Gage

AXX: Anclaje de diámetro de ½" (A12) o de 3/8" (A38)

Y: Número Identificador del anclaje

ZZ: Posición (1 ó 2) y dirección de medición (H Horizontal, V Vertical)

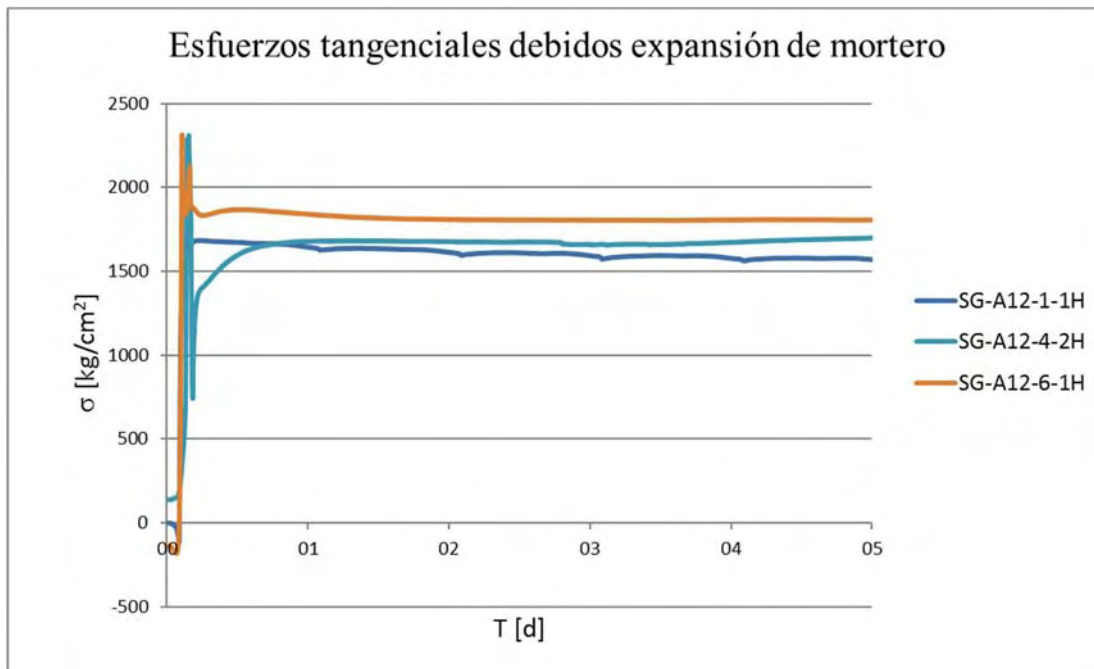


Figura 3-15 Esfuerzos en anclajes con medición de 5 días

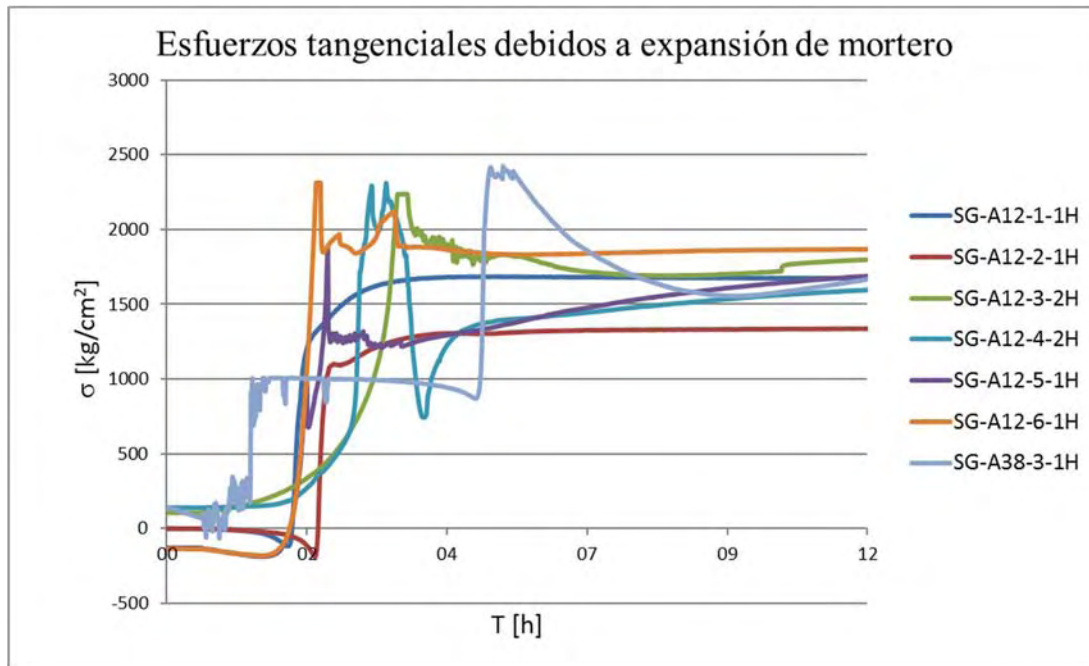


Figura 3-16 Esfuerzos tangenciales en anclajes y su evolución en las primeras 12 horas

Los esfuerzos circunferenciales en los tubos también aumentan debido a la aplicación de carga. En este caso, el esfuerzo relacionado a la expansión del grout forma la mayor parte del esfuerzo final sobre el tubo, como era de esperarse.

Debido a que las cargas se obtuvieron directamente de la máquina universal y no con una celda de carga, los datos de los strain gages no están sincronizados con los datos de carga y extensión de la barra. Para la obtención de una relación de esfuerzo en barra a deformación en strain gages, se sincronizaron posteriormente los datos transformando los tiempos y las deformaciones.

Se puede observar que las deformaciones circunferenciales no se ven influenciadas por la aplicación de carga, hasta llegar a una tensión de aproximadamente 12,000 kg/cm² en la barra (ver Fig. 3-25), lo cual causa un incremento en la tensión circunferencial en el tubo.

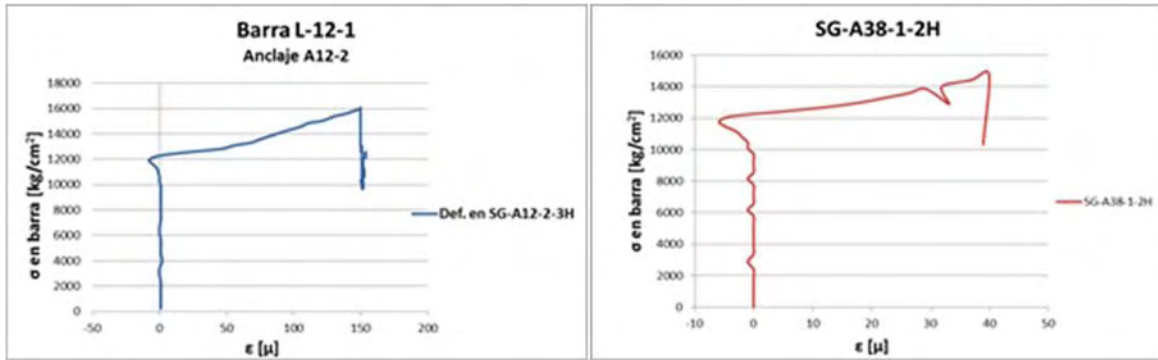


Figura 3-17 Diagrama esfuerzos (barra) - deformación circunferencial (tubo) transformado para sincronizar tiempos de adquisición de datos para la barra de 1/2" (izq.) y 3/8" (der.)

Con las gráficas y los datos obtenidos se pueden obtener los datos de módulo de elasticidad y resistencia de las barras. El módulo de elasticidad de la barra compuesta de 3/8" resulta ser 1,046,400 kg/cm². La barra de 1/2" llega a 828,396 kg/cm².

La resistencia de las barras resultó ser 13,962 kg/cm² en el caso de la barra de 3/8" con una deformación última de 1.681%. La barra de 1/2" alcanzó 16,079 kg/cm² con una deformación de 2.810%.

En ambos casos el módulo de elasticidad es menor de lo esperado (1,500,000 kg/cm²). Aparte, la resistencia de la barra de 3/8" tampoco alcanzó lo esperado (17,000 kg/cm²), mientras que la barra de 1/2" aparentemente se deslizó en el anclaje poco antes de alcanzar su límite. La deformación se esperaba de 1.7%, lo cual se cumple perfectamente en el caso de la barra de 3/8". El valor medido alto de 2.810% en el caso de la barra de 1/2" se debe en gran parte a la deformación de las placas de apoyo de los anclajes.

4 Efectos de desviación

4.1 Revisión del efecto de desviación

La desviación de tendones presforzados incrementa localmente los esfuerzos en la zona en que el desviador actúa sobre el tendón. Esto también afecta el comportamiento por flujo plástico del PRF, debido al nivel elevado de esfuerzos sostenido. Comúnmente, se considera que el esfuerzo adicional σ_h que resulta de una desviación, depende de la distancia del centroide del tendón a su cara a tensión, y , y del radio de curvatura de la silla desviadora, R , lo cual resulta en la expresión:

$$\sigma_h = \frac{E_f y}{R} \quad (35)$$

Esta expresión es válida para tendones sólidos y es conservadora para tendones formados por hilos. El esfuerzo resultante en el tendón se expresa por lo tanto de la siguiente manera como suma del esfuerzo axial más el esfuerzo adicional por desviación σ_h :

$$\sigma = \frac{P_j}{A_f} + \frac{E_f y}{R} \quad (36)$$

No obstante, se ha observado que los efectos por desviación no son tan grandes como predice esta expresión. Según la Ecuación (35), los esfuerzos adicionales por desviación para el caso de radios relativamente pequeños serían tan grandes que deberían fallar sin poder tomar cualquier esfuerzo axial. Sin embargo, se ha observado que la desviación de tendones pudo efectuarse con radios pequeños sin generar la ruptura inmediata de los mismos. Lo anterior se ha comprobado con cargas menores a la carga de ruptura de los tendones y se atribuyó la mayor capacidad a una redistribución de esfuerzos entre las fibras, debido a la flexibilidad de la matriz. (Gilstrap et al., 2001)

Varios estudios han arrojado que existen otros parámetros importantes que afectan la resistencia del tendón (El-Hacha et al. 2008, Bakht 2000). No obstante, su influencia no ha sido cuantificada adecuadamente. Una recomendación en el manual canadiense para el uso de fibras de carbono para postensado incluye algunos parámetros obviamente importantes, pero con resultados dudosos.

El manual de diseño canadiense indica para el uso de PRF presforzados (2008) una primera expresión para el radio de curvatura del desviador elaborada por Quayle (2005), la cual incluye una dependencia del nivel de carga en el tendón y del ángulo de desviación, lo cual confirma también el estudio de Knippers (2008). Este radio denominado el “radio natural” sustituye el radio R en la Ecuación (36) en caso de ser menor que el radio del desviador. La

siguiente expresi3n es la formulaci3n determinada por Quayle para el “radio natural” R_n del elemento de presfuerzo:

$$R_n = \frac{r^2}{2} \sqrt{\frac{E_{prf}\pi}{P(1 - \cos \theta)}} \quad (37)$$

donde r es el radio de la secci3n circular del tend3n de PRF, P es la fuerza en el tend3n, y θ es el 3ngulo de desviaci3n del tend3n en el desviador.

Esta expresi3n es la m3s completa a primera vista en la actualidad, debida a la inclusi3n de algunos par3metros obviamente importantes. No obstante, en las siguientes gr3ficas que ilustran el comportamiento de esta expresi3n se notan algunas deficiencias.

Las diferentes curvas de la Figura 4-1 representan diferentes niveles de presfuerzo; de 10% de f_{pu} a 50% de f_{pu} , lo cual es el l3mite para la aplicaci3n de presfuerzo en PRFC. La Figura 4-1 muestra las diferentes curvas de radio natural R_n dependiente del 3ngulo de desviaci3n del tend3n. Se observa que a partir de menos de 0.05 radianes ($\approx 2.9^\circ$) la expresi3n converge contra un valor fijo. La l3nea punteada es un radio de desviaci3n de 4500 mm que se tomar3 como referencia, debido a que este radio es conocido como un radio adecuado para una desviaci3n de 7.5° (Hanshan 2007).

La gr3fica del lado derecho muestra el nivel de esfuerzo en el tend3n seg3n Quayle (2005) dependiente del 3ngulo de desviaci3n. Se observa que el cambio de 3ngulo de desviaci3n s3lo tiene efecto mientras que el radio natural sea mayor al radio existente (4500 mm). Esto ocurre hasta un 3ngulo de desviaci3n menor a 0.05 radianes, y a 3ngulos mayores el nivel de esfuerzo se mantiene constante.

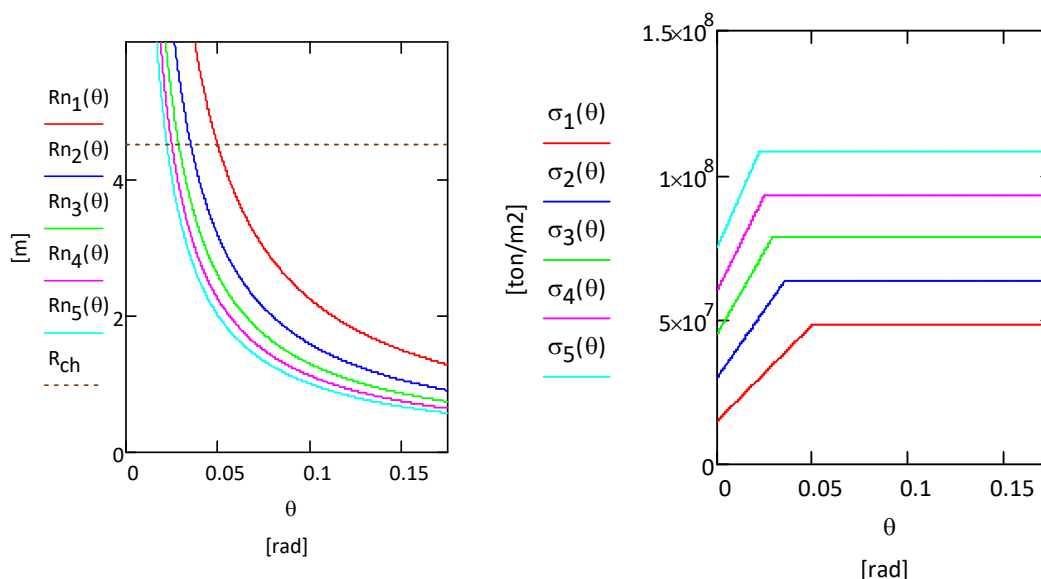


Figura 4-1 Influencia de radio de desviación sobre resistencia y esfuerzos

Sin embargo, Hanshan (2007), Tokyo Rope en su manual de 1993, Hwash et al. (2008) y Matta et al. (2009) confirman que el ángulo de desviación es uno de los parámetros importantes, que influye sobre el desarrollo de esfuerzos en los tendones.

El efecto de desviación depende realmente de muchos factores, como es el tipo y las dimensiones de tendón utilizado, las dimensiones y la superficie del desviador, las propiedades de los materiales, el tipo de carga y el ángulo de desviación. Los resultados pueden variar, aún con los mismos materiales y la misma configuración.

4.2 Análisis analítico de efectos de desviación

En vista de las deficiencias de las expresiones existentes para describir el efecto de la desviación sobre PRF, se desarrolló una propuesta nueva para analizar este efecto. Tomando en cuenta principios geométricos se determinó la siguiente expresión que describe la longitud de la cara exterior de la barra de PRF después de desviarla.

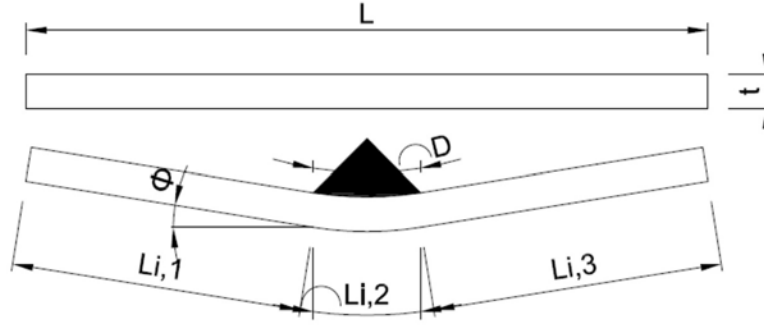


Fig. 4-2: Dimensiones del elemento postensado antes y después de desviarlo

$$L_i(\theta) = \left(d_c + \frac{t}{2}\right)\theta + 2 \sqrt{\left[-d_c \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{\Delta}{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}\right]^2 + \left[-\Delta + d_c \left(1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)\right]^2} \quad (38)$$

Esta longitud del elemento de presfuerzo desviado se utiliza para calcular el esfuerzo en su cara exterior. Esta cara es la que regirá para el límite de esfuerzo ya que en la zona del desviador sufre mayor deformación que la interior. El esfuerzo se puede calcular con la siguiente expresión:

$$f_{f,max} = \frac{P}{A_t} + E_f \left(\frac{L_i - L}{L} + \frac{t}{r}\right) \quad (39)$$

Analizando estas expresiones se espera una descripción más realista del comportamiento de elementos postensados y desviados de PRF. La Figura 4-3, la Figura 4-4 y la Figura 4-5 describen los resultados esperados. Se fijaron para este análisis paramétrico algunos valores. El módulo de elasticidad se fijó en $E_f = 1,500,000 \text{ kg/cm}^2$ y el límite de ruptura con $f_{pu} = 15,000 \text{ kg/cm}^2$.

Las diferentes líneas describen la evolución de esfuerzos con diferentes niveles de presfuerzo, variándolos de 10% de f_{pu} a 50% de f_{pu} en pasos de 10%.

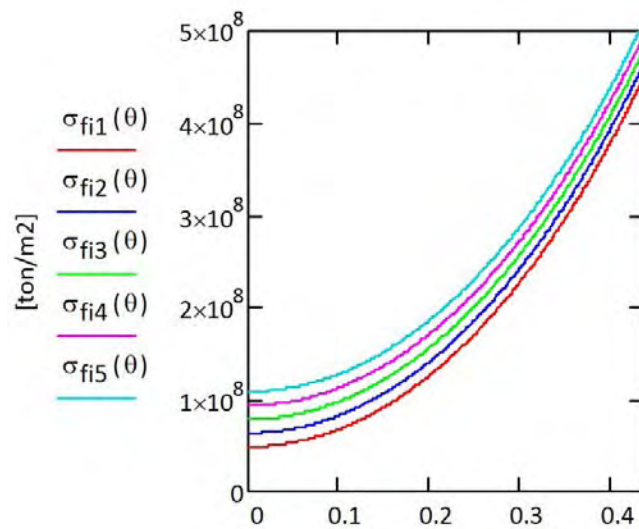


Figura 4-3 Influencia de ángulo Θ sobre el esfuerzo; se fijan el radio r y el espesor t

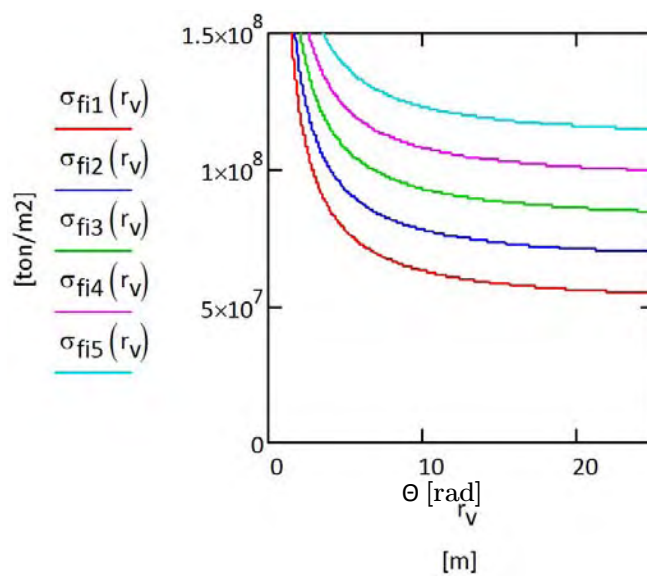


Figura 4-4 Influencia de radio r_v sobre el esfuerzo; se fijan el ángulo Θ y el espesor t

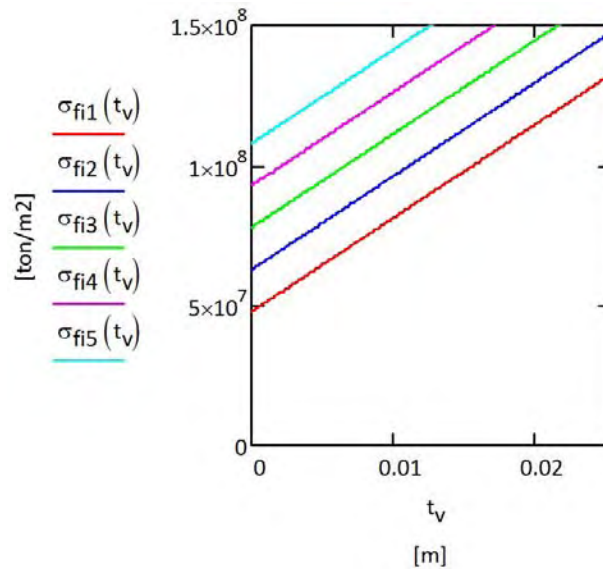


Figura 4-5 Influencia de espesor t_v sobre el esfuerzo; se fijan el ángulo Θ y el radio r

4.3 Análisis numérico de desviación

Se efectuaron una serie de modelos matemáticos con elementos finitos. Primeramente, se generó un modelo estático, donde se generó la geometría de una barra de 14 mm con propiedades de fibras de carbono y se aplicaron cargas estáticas sobre la geometría correspondiente.

Inicialmente se hicieron modelos en el programa midas FEA 2014. El modelo se hizo utilizando un análisis estático, aplicando tensión en los extremos del modelo, con una malla simulando un desviador metálico con su curvatura, y la barra de PRF sobre el desviador.

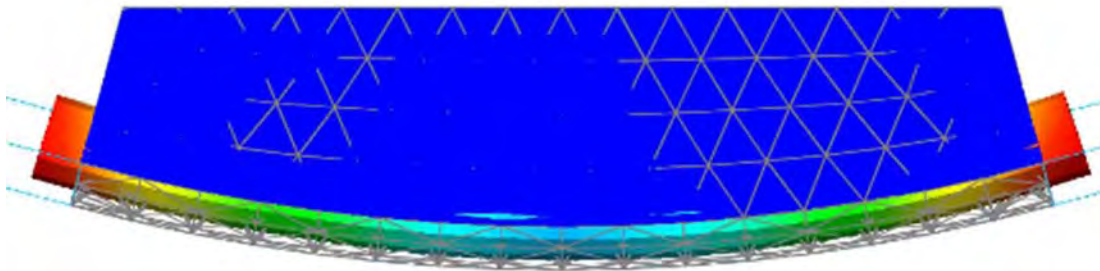


Figura 4-6 Esfuerzos debidos a desviación con $R= 30$ cm

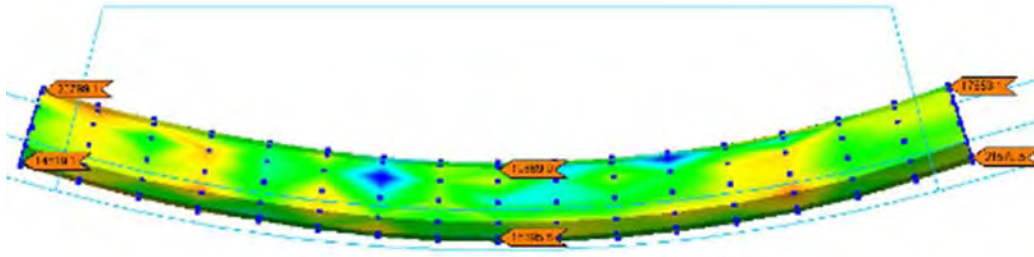


Figura 4-7 Esfuerzos máximos utilizando análisis estático; R = 30 cm

Los resultados no fueron los esperados, debido al estado ya deformado de la barra desde un inicio. No se pudo analizar el efecto de la desviación de manera adecuada, ya que el efecto del incremento de esfuerzos se debe a una deformación incremental sobre el desviador. Por esta razón se decidió cambiar el tipo de análisis y utilizar otro software más adecuado para este fin.

Se efectuó un análisis de contacto con un programa más especializado en el análisis mecánico; en este caso midas NFX 2016. En éste se permite hacer un análisis de contacto, el cual requiere el uso de cargas dinámicas. Se utilizaron elementos finitos que definen una barra recta fija entre dos apoyos, subdividiendo su sección en 8 elementos. Dos grupos de elementos simulan desviadores con radios de curvatura de 300 mm, de 600 mm y de 900 mm. Se les asignaron un desplazamiento de 20 cm verticales, el cual se genera de forma dinámica de 0 cm a 20 cm en 10 segundos, o sea muy lento para evitar efectos de vibración en el modelo. El desplazamiento genera contacto entre los grupos de elementos, así generando deformaciones en estos últimos simulando la desviación de la barra. La interfaz entre los diferentes dominios de mallas se definió rígida en plano perpendicular al contacto, y con fricción baja en sentidos transversales. La secuencia típica de los modelos es la siguiente:

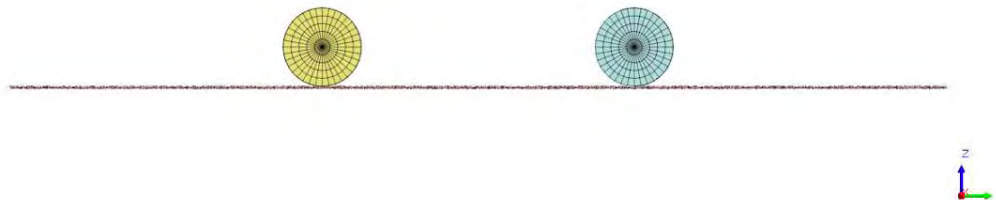
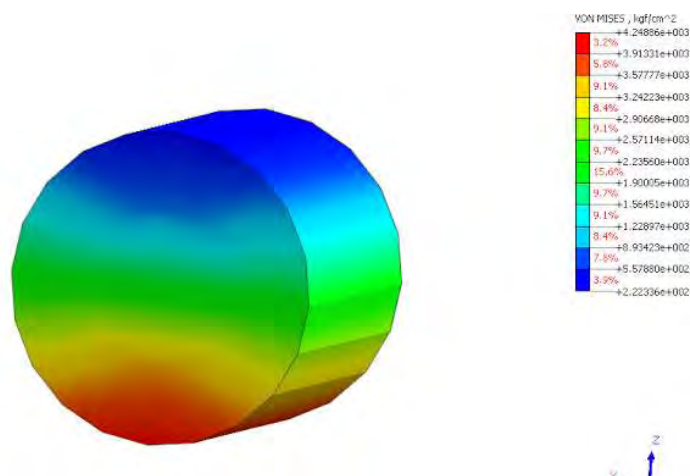
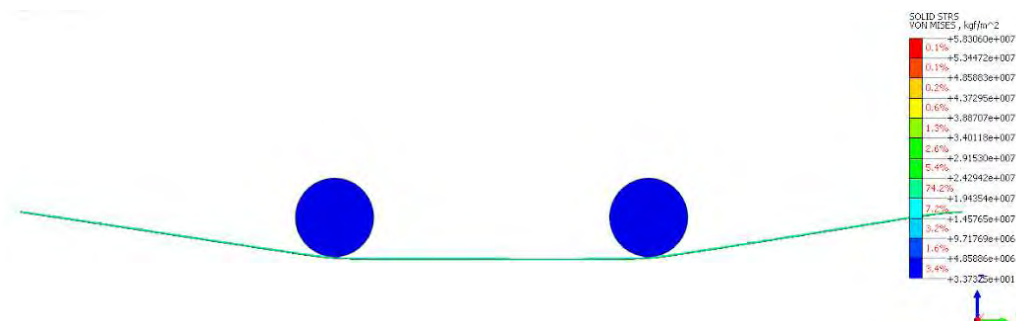
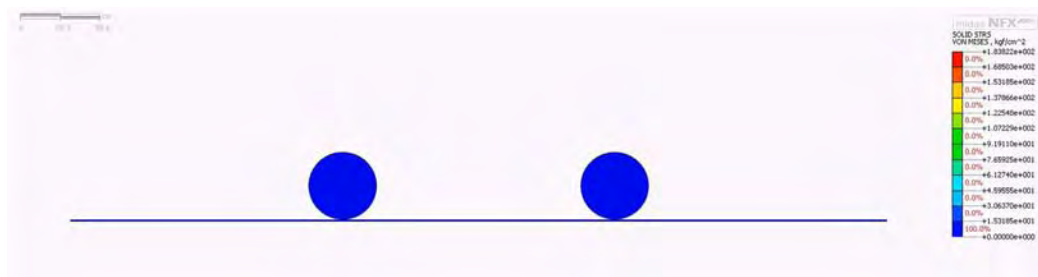


Figura 4-8 Modelo de elementos finitos con desviadores circulares



Los modelos se generaron variando los radios de los desviadores una vez sin pretensado , y una vez con un pretensado aplicado a los elementos de la barra. Se aplicó un pretensado del orden de 40% del f_{pu} , con la finalidad de que el elemento no se comporte como un elemento cable flojo, si no con una rigidez inicial debida al pretensado. Sin pretensado los efectos por desviación son mínimos ya que la barra se deforma fácilmente. Los resultados obtenidos con los modelos se presentan en Tabla 4-1 y Tabla 4-2.

Tabla 4-1 Esfuerzos mínimos y máximos en la sección circular sin pretensado por MEF

Modelo MEF - Sin pretensado			
	$f_{\max}$ [kg/cm ²]	$f_{\min}$ [kg/cm ²]	Δf [kg/cm ²]
R30	169.93	0.23	169.70
R60	167.97	0.19	167.78
R90	169.94	0.21	169.73

Tabla 4-2 Esfuerzos mínimos y máximos en la sección circular con pretensado por MEF

Modelo MEF - Con pretensado			
	$f_{\max}$ [kg/cm ²]	$f_{\min}$ [kg/cm ²]	Δf [kg/cm ²]
R30	5531.90	4551.00	980.90
R60	5527.84	4632.69	895.15
R90	5515.09	4465.95	1049.14

Para fines comparativos se presentan los resultados utilizando el mismo método analítico mencionado anteriormente para calcular los esfuerzos en la sección circular en la fibra exterior en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Esfuerzos mínimos y máximos en la sección circular según modelo analítico

<i>Modelo analítico</i>			
	$f_{\max}$ [kg/cm ²]	$f_{\min}$ [kg/cm ²]	Δf [kg/cm ²]
R30	7016.70	6097.07	919.63
R60	7000.23	6080.92	919.30
R90	6992.32	6072.68	919.63

Se observa que los resultados del análisis con MEF incluyendo pretensado se parecen a los resultados del modelo analítico, especialmente en el incremento que se genera entre el esfuerzo en la fibra superior e inferior de la sección. La diferencia se debe a la desviación de la barra y cuantifica su efecto. En el modelo de MEF con pretensado los valores oscilan entre 895 kg/cm² y 1049 kg/cm², mientras que el modelo analítico presenta resultados estables en el orden de 919 kg/cm², mostrando una buena correlación.

5 Diseño de anclajes con base en cuñas

5.1 Revisión de anclajes de cuñas

Los anclajes con base en grout expansivo son los requeridos por el ACI 440 para la realización de pruebas a tensión estandarizadas. Este sistema ha sido comprobado como eficiente para el uso con PRFC tanto bajo cargas estáticas como dinámicas. No obstante, estos anclajes tienen algunas desventajas importantes:

1. Sus dimensiones son relativamente grandes alcanzando una longitud de 60 cm para el caso de barras de 0.5 pulgadas de diámetro. Combinado con un espesor relativamente grande de la pared del tubo para poder resistir la presión del mortero expansivo, el anclaje resulta ser relativamente pesado.
2. Los anclajes deben instalarse en la barra por lo menos dos días antes de la aplicación del presfuerzo, debido a que el mortero requiere este tiempo para fraguar.
3. La longitud de la barra debe ser cortada a la medida exacta antes de su instalación, ya que este tipo de anclaje no permite ajustes posteriores a la colocación de los anclajes en éstas.

El factor de diseño común de todos los tipos de anclaje utilizados hasta ahora es la susceptibilidad a daños por cargas laterales y cortantes resultantes, que pueden terminar en la ruptura súbita de las fibras.

Los sistemas de postensado tradicionales utilizan cuñas para anclar los torones de acero de presfuerzo. Las cuñas están típicamente divididas en tres o cuatro elementos que abrazan al torón, Figura 5-1. Bajo tensión, las cuñas entran a un barrilete reaccionando contra sus caras inclinadas, de modo que se juntan a presión sobre el torón, sujetándolo así para que éste no se desplace más y quede anclado. En este caso, las puntas de las cuñas penetran ligeramente los hilos del torón creando una sujeción mecánica fuerte del torón.

Este tipo de sistema destaca por su sencilla aplicación. Se permite el libre ajuste de longitudes de torón a la hora de la instalación del presfuerzo, la instalación puede hacerse en cualquier momento en poco tiempo y sus dimensiones son relativamente compactas.

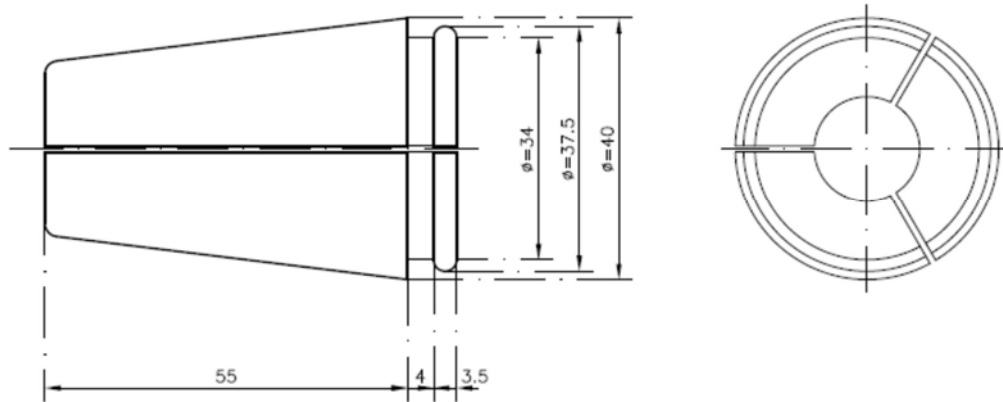


Figura 5-1 Sistema de cuñas de acero tradicionales para torones de acero (cotas en mm)

No obstante, fibras sujetadas de esta manera se rompen muy fácilmente. Como se ha visto anteriormente, la relación de la resistencia longitudinal del PRFC a la resistencia transversal es de aproximadamente 20. Esto requiere que las presiones transversales sean bajas y sin grandes concentraciones puntuales como es el caso de las cuñas de acero de sistemas tradicionales de presfuerzo.

En el laboratorio se efectuó un ensaye para revisar el tipo de falla que se genera utilizando un sistema de anclajes de cuñas para torones de presfuerzo de acero. La carga alcanzada con este tipo de cuñas fue de 2340 kg, lo cual corresponde a apenas 14.6% de la resistencia f_{pu} de la barra utilizada. La falla se dio en la zona del anclaje, donde claramente se aprecia como las cuñas cortaron las fibras cercanas a la superficie de la barra y se inició un proceso de desgarramiento (Figura 5-2)



Figura 5-2 Falla en la zona de anclaje

Sobre este tema, destacan los trabajos de Burtscher (2008) y de Horvatits (2004), los cuales han estudiado el efecto de la concentración de esfuerzos con sistemas a base de cuñas sobre torones de PRFC (Figura 5-3 y Figura 5-4). El consenso es que se requieren cuñas de material compuesto, por un lado de acero y por otro, de un material más suave para el contacto directo con el PRFC para distribuir mejor los esfuerzos. Burtscher lo logra con cuñas de acero con un recubrimiento de epoxi, el cual es de espesor variable con el mayor espesor en la punta de salida del PRFC, Figura 5-4.

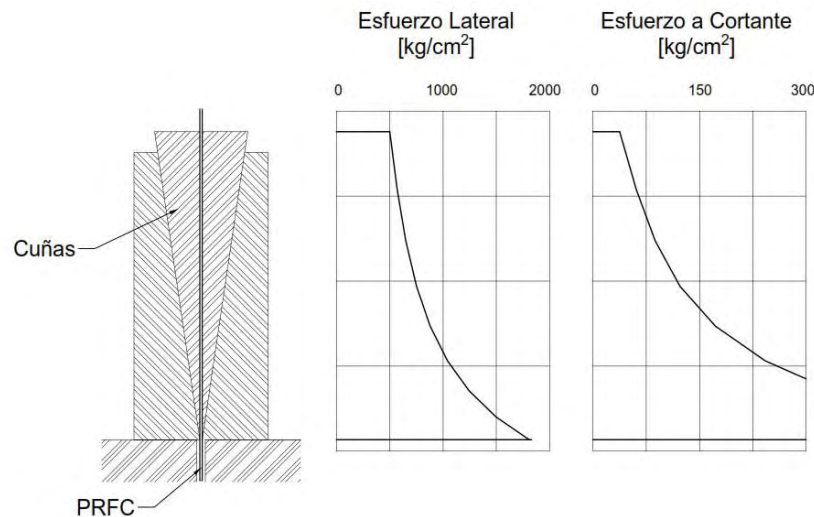


Figura 5-3 Concentración de esfuerzos con cuñas tradicionales sobre PRFC - Horvatis (2004)

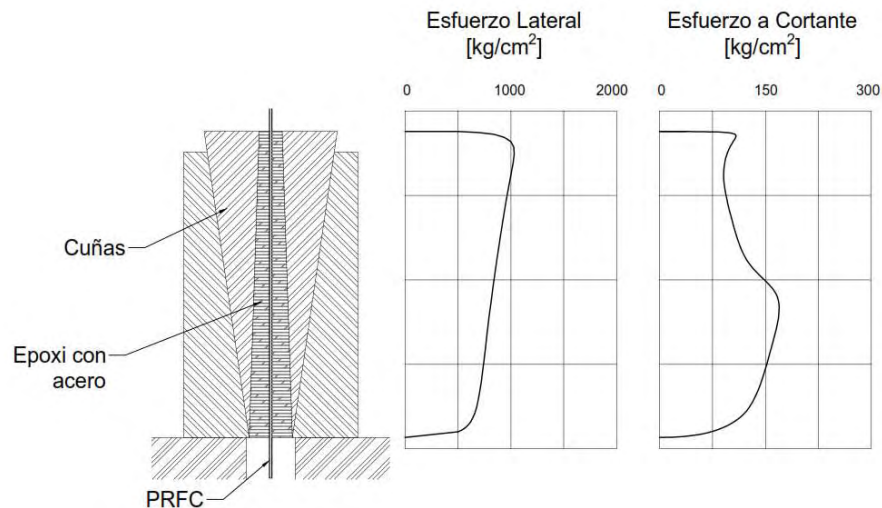


Figura 5-4 Cuñas compuestas para disminuir concentraciones de esfuerzos -Horvatis (2004)

Hovartits no utiliza un sistema de cuñas, sino utiliza un anclaje fijo encapsulado con un exterior de acero y el interior con un epoxi donde se embeben las fibras. La superficie

interior del acero se prepara de forma escalonada, la cual al final crea una mejor distribución de esfuerzos sobre las fibras.

5.2 Diseño numérico de anclaje

Para este trabajo, se estudió un sistema de cuñas compuestas de acero y de epoxi para barras de 0.5". Se crearon varios modelos con el programa MIDAS/Civil con la finalidad de medir la influencia de algunos parámetros de diseño de las cuñas y determinar los más adecuados. La carga de diseño fue de 60% del f_{pu} del PRFC ($18,580 \text{ kg/cm}^2$), lo cual toma en cuenta los límites prácticos de tensado para PRFC. Los parámetros que se utilizaron fueron:

- Módulo de elasticidad del epoxi
- Espesor del epoxi
- Superficie escalonada entre acero y epoxi en la cuña
- Inclinación de la interfaz acero-epoxi
- Longitud de anclaje

Las cuñas están en todos los casos conformadas por tres elementos, donde cada elemento contiene una capa exterior de acero y una interior de epoxi. Al final, se obtienen las distribuciones de esfuerzos en un corte vertical por el anclaje y la barra.

La cara exterior de las cuñas se preparó con una inclinación de 7° con respecto al eje longitudinal de la barra. Este ángulo es el estándar utilizado en la industria de presfuerzo de acero y tratándose de la superficie de contacto entre barrilete y cuña, no se cambia.

Para simular el deslizamiento entre cuñas y barrilete se utilizó inicialmente una representación completa del barrilete de acero y una conexión a compresión entre cuñas y éste. No obstante, utilizando apoyos rígidos perpendiculares a la superficie de las cuñas se llega a un resultado muy semejante y se logra un ahorro sustancial en tiempo de computación, por lo cual se optó por omitir en esta etapa del estudio el barrilete.

El anclaje base consiste en un cono de epoxi en el interior de las cuñas con una inclinación de 3° de la interfaz de acero-epoxi, una longitud de 10 cm, un módulo de elasticidad del epoxi de $100,000 \text{ kg/cm}^2$ y un espesor mínimo del epoxi de 3 mm en la parte superior (Figura 5-5)). El esfuerzo máximo transversal sobre la superficie de la barra σ_{xy} para este caso es de 1385 kg/cm^2 (Figura 5-6).

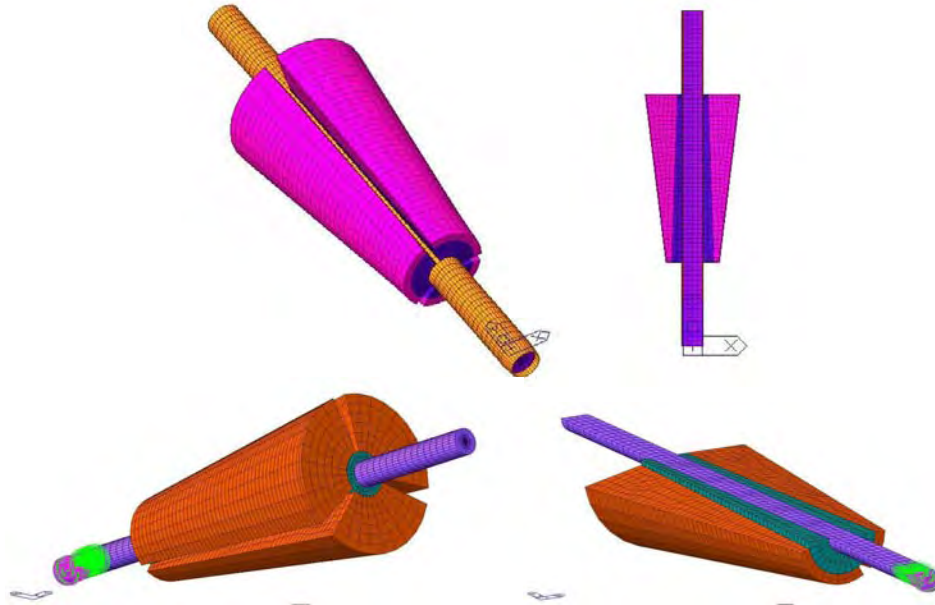


Figura 5-5 Vistas generales del anclaje modelado y corte de anclaje base

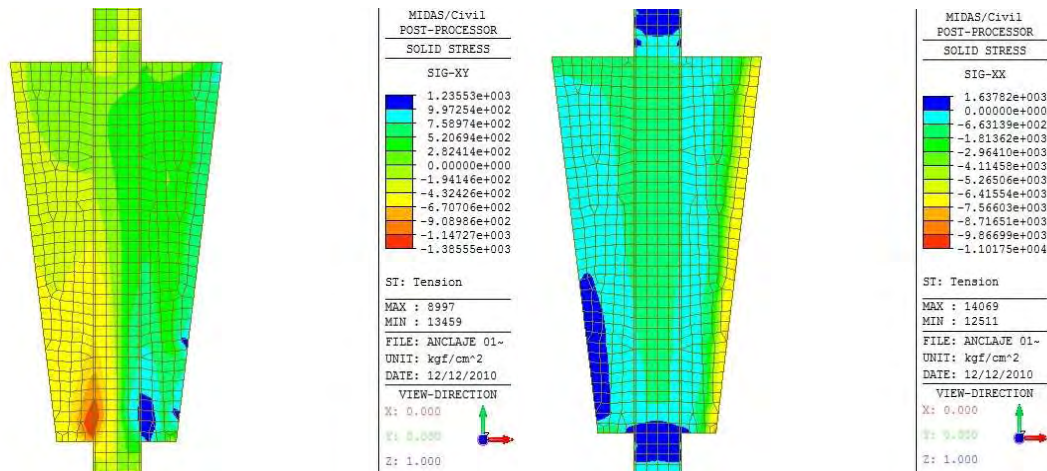


Figura 5-6 Concentración de esfuerzos de cortante y transversales del anclaje

La influencia del factor de espesor es semejante al factor del módulo de elasticidad del epoxi. Mayor espesor es equivalente en este caso a un módulo de elasticidad menor. La influencia de estos dos factores es relativamente importante, principalmente del módulo de elasticidad del epoxi. Con un espesor mínimo de 6 mm de epoxi, el esfuerzo σ_{xy} se reduce a 1247 kg/cm² (Figura 5-7 izquierda) y la reducción del módulo de elasticidad de la matriz a un tercio resulta en un esfuerzo σ_{xy} de 900.5 kg/cm². (Figura 5-7 derecha).

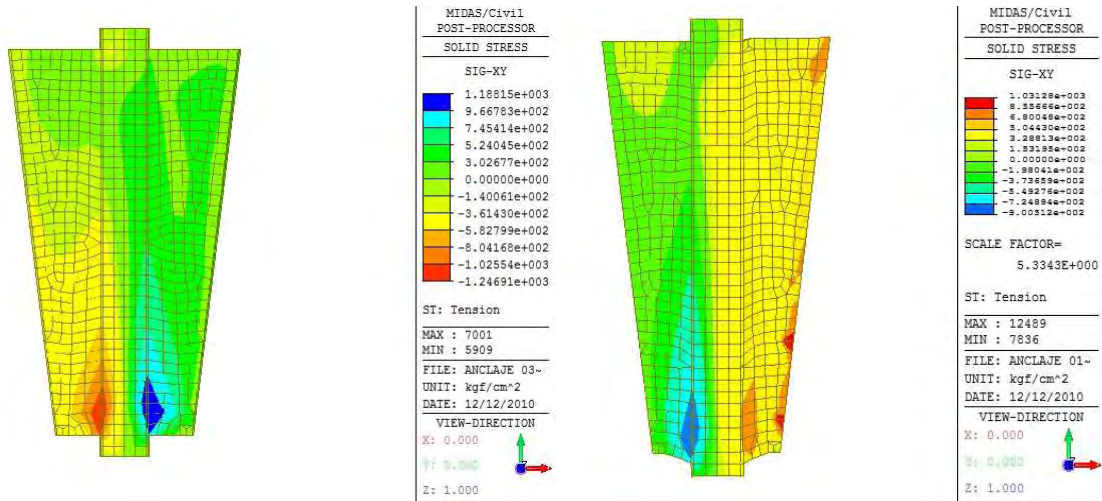


Figura 5-7 Modelo con mayor espesor de epoxi y menor módulo de elasticidad de epoxi

Una inclinación mayor de la interfaz de acero-epoxi en las cuñas resulta también en una reducción de los esfuerzos concentrados. Para el caso de una inclinación de 7° se reduce el esfuerzo máximo a 1188 kg/cm² (Figura 5-8 izquierda). No obstante, esta inclinación mayor se traduce a dimensiones de cuñas bastante mayores.

La longitud por otro lado influye sólo a menor escala. Un aumento de 25% de la longitud resulta en un esfuerzo máximo de 1341 kg/cm², poco menor con respecto al modelo base (Figura 5-8 derecha).

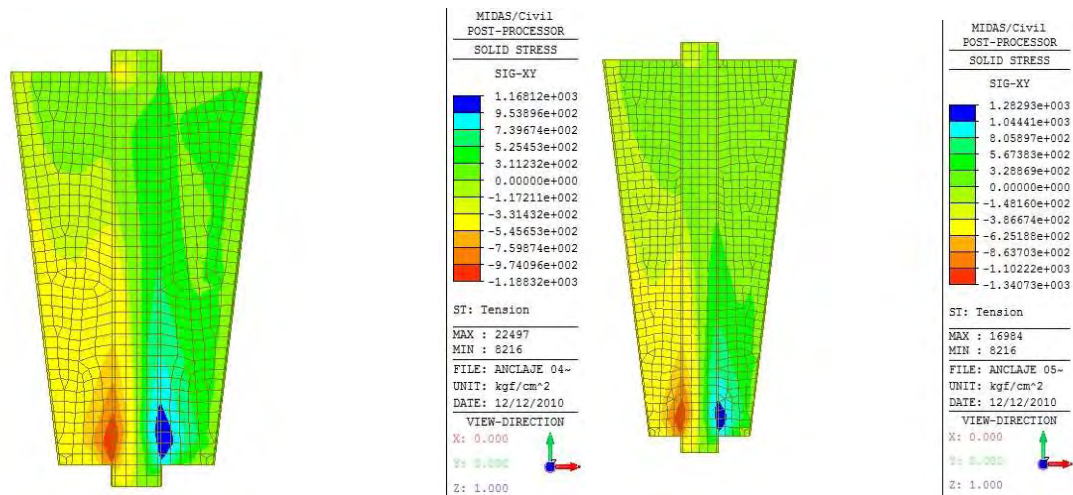


Figura 5-8 Influencia de inclinación de interfaz y de longitud de anclaje

La preparación de la cara interior de las cuñas con escalones resulta ser muy eficiente en la reducción de concentración de esfuerzos. Los escalones crean varios puntos con concentraciones menores de esfuerzos y no sólo un punto con una concentración mayor, como los anteriormente vistos (Figura 5-9 izquierda). La inclinación de los escalones crea un

efecto de anclaje localizado en cada escalón. Aparte, crea un apoyo para el epoxi, de suerte que ya no sólo dependa de su adhesión al acero, si no que cuenta con un mecanismo mecánico. El esfuerzo máximo σ_{xy} es de 847 kg/cm² (Figura 5-9 derecha).

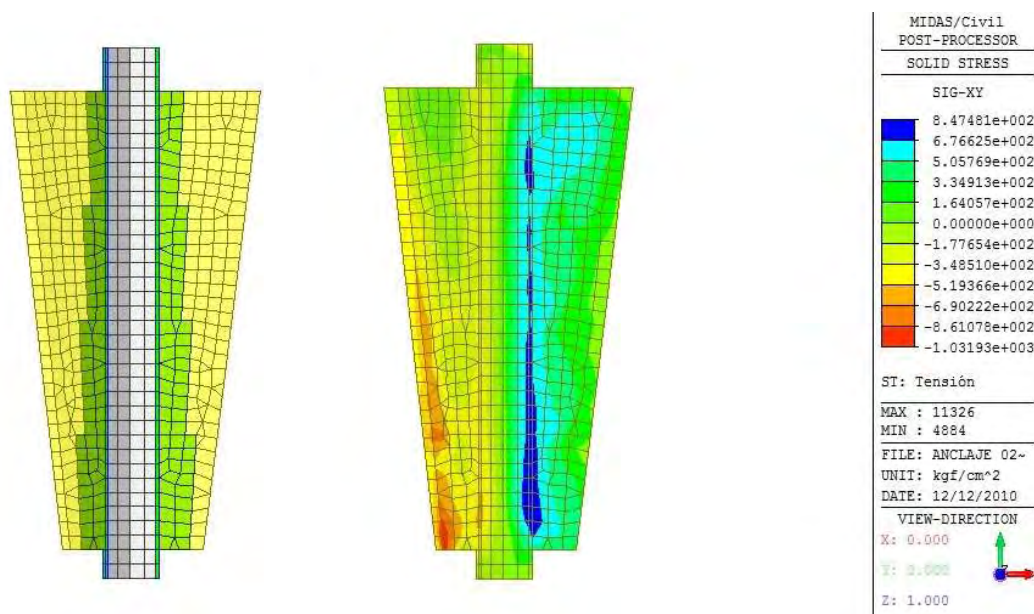


Figura 5-9 Distribución de esfuerzos con anclaje escalonado

En resumen, se puede ver que la medida de hacer escalones inclinados en conjunto con un módulo de elasticidad menor a 100,000 kg/cm² logra mantener los esfuerzos en el PRFC en un nivel semejante al límite de resistencia transversal.

5.3 Fabricación de anclajes

Se maquinaron los componentes de acero según el diseño obtenido analíticamente. Se fabricaron 4 barriletes para acomodar las cuñas, y 6 juegos de cuñas con la configuración escalonada. En el laboratorio de estructuras de la UAM Azcapotzalco se ensamblaron las cuñas y se agregó el recubrimiento epóxico para una distribución adecuada de esfuerzos sobre las varillas (Figura 5-10).

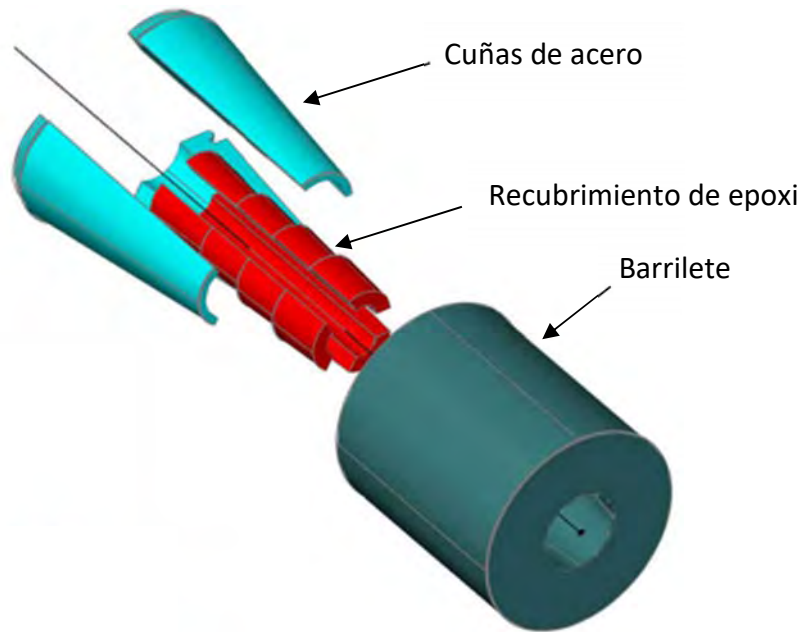


Figura 5-10 Conjunto de Anclaje: Barrilete, cuñas de acero, epoxi

Para encontrar una configuración adecuada, se hicieron una serie de iteraciones que consistieron principalmente en una adecuación de las superficies de contacto entre el epoxi de las cuñas y las varillas, y también el epoxi de las cuñas y el elemento de acero (Figura 5-11). Cabe destacar que se hicieron 21 iteraciones para la configuración de las superficies del método de fabricación. Cada una de las iteraciones fue ensayada en la máquina universal del laboratorio de estructuras y con base en la falla observada, se hicieron adecuaciones al diseño de los anclajes. La Tabla 5-1 indica adecuaciones que se hicieron y la razón por la cual se hicieron.



Figura 5-11 Inyección de epoxi líquido en molde

Tabla 5-1 Adecuaciones a proceso de fabricación

No.	Adecuación	Falla observada
1	Uso de primer diseño	Las cuñas chocaban y no alcanzaban a reaccionar bien sobre la superficie de la varilla
2	Se elevaron las cuñas en el molde con un distanciador en la base del molde	Aplastamiento por oquedades y deslizamiento
3	Se arrugó la superficie de las varillas con papel lija	Deslizamiento de varilla sobre el epoxi de las cuñas
4	Uso de varillas con arena sobre su superficie para aumentar fricción	No sirve. Se desliza más rápido que sin la arena. Sólo adecuado para uso como refuerzo en concreto.
5	Cambio de procedimiento de inyección de epoxi por la parte inferior para evitar oquedades	Difícil de lograr y se generaban también así oquedades.

6	Superficie de epoxi intencionalmente arrugada utilizando una varilla centradora maquinada	Se fractura el epoxi y pierde adherencia en las cuñas en parte superior.
7	Ranuras en parte superior de cuñas metálicas para ofrecer mejor transferencia mecánica de carga	Falla por deslizamiento entre barra y superficie de epoxi
8	Tubo de aluminio arrugado en exterior generado con esmeril	Deslizamiento entre epoxi de cuña y aluminio
9	Tubo de aluminio arrugado de ambos lados	Falla de epoxi en cuñas en la parte inferior de las cuñas (desprendimiento)
10	Ranuras adicionales en superficie interior de cuñas	Falla de epoxi por aplastamiento
11	Cambio a epoxi comercial de alta resistencia (SIKA Anchorfix 3001)	Falla de deslizamiento entre tubo de aluminio y epoxi de cuñas
12	Uso de epoxi metálico en superficie	Desgarre de epoxi metálico
13	Tubo de aluminio de mayor espesor con ranuras más profundas maquinadas	Falla por tensión transversal del epoxi
14	Adición de fibras a epoxi para evitar fallas a tensión y cambio de proceso de colocación de epoxi (la mezcla con fibras no es inyectable)	Oquedades por la poca viscosidad del compuesto
15	Adición de acetona y calor a preparación de epoxi	Deslizamiento de aluminio sobre varilla, sin fallas en anclajes

16	Utilización de fabricación rigurosa con tubos de aluminio maquinados y control geométrico adecuado	Falla en la barra llegando a 100% de f_{pu} sin daño en zona de anclajes
----	--	--

Las fallas observadas llevaron a distintos procesos de fabricación y preparaciones de la superficie de los anclajes. En la Tabla 5-2 se resumen las adecuaciones incrementales que se hicieron hasta llegar a un diseño final adecuado.

Tabla 5-2 Medidas de adecuación con respecto al diseño original

Medida adicional a diseño inicial	Objetivo
Uso de epoxi comercial de alta resistencia para uso en anclajes en concreto (Sika Anchorfix 3000)	Incrementar capacidad a compresión de epoxi
Adición de 5% volumétricos de fibras de vidrio a la mezcla del epoxi	Aumenta la resistencia a tensión transversal en el epoxi así evitando su fractura
Uso de recubrimiento de aluminio de 3mm sobre el epoxi	Aumento de capacidad de fricción entre cuñas y varilla
Ranuras sobre la cara interior de las cuñas metálicas maquinadas en torno sobre barra de aluminio	Evitar deslizamiento entre cuña metálica y recubrimiento de epoxi
Perforación de barra de aluminio con el diámetro exacto de la varilla de PRF y maquinado en el exterior para obtener una pared de aluminio de 3mm	Permite exactitud en la fabricación y un espesor adecuado para hacer preparaciones sobre las superficies del aluminio
Generación de ranuras en la cara interior de tubo de aluminio mediante machuelo generando profundidad y espaciamiento uniforme entre los especímenes (12 hilos por pulgada con una profundidad de 0.6 mm)	Aumenta la capacidad de transferencia de carga de cortante entre las caras de aluminio y barra, generando un mecanismo controlado mecánico de transferencia de carga

Generación de ranuras en la cara exterior de tubo de aluminio mediante torno generando profundidad y espaciamiento uniforme entre los especímenes (12 hilos por pulgada con una profundidad de 1 mm)	Aumenta la capacidad de transferencia de carga de cortante entre las caras de aluminio y epoxi de cuña, generando un mecanismo controlado mecánico de transferencia de carga
Colocación de epoxi en el interior de molde sin obstáculos entre las cuñas, posteriormente inserción de varilla centradora con elementos de aluminio	Colocación fácil de epoxi sin inserción de aire, permitiendo el uso de epoxi reforzado con fibras viscoso evitando la generación de oquedades
Uso de grasa sobre las caras exteriores de las cuñas	Evitar fricción excesiva entre cuñas y barrilete, lo cual impide un buen desarrollo de presión lateral sobre la varilla
Preacuñamiento a 5 ton	Aumenta capacidad a fricción del sistema entre cuñas y varillas

El diseño final de cuñas con una lámina de aluminio de 3mm de espesor, permite alcanzar el 100% de la capacidad de la varilla, siguiendo las medidas de fabricación anteriormente mencionadas. El proceso final incluye un control geométrico riguroso, especialmente en la fabricación del tubo de aluminio y el centrado del mismo en el molde.

Las últimas cuñas sufrieron un cambio de geometría a última hora, debido a que las varillas, suministradas amablemente por la empresa GAIREC tipo V-ROD para el reforzamiento de las vigas de concreto, contaban con un recubrimiento arenoso. Su diámetro nominal después de retiro del recubrimiento, el cual se comprobó que no permite desarrollar una buena adherencia a las cuñas, fue de 12.1 mm. El diámetro de las varillas utilizadas anteriormente oscilaba entre 13.9 mm y 14.1 mm, para lo cual se habían fabricado los anclajes. No obstante, la reducción de 2 mm en el diámetro causaba que las cuñas ya no tenían suficiente espacio entre ellas cuando trataban de sujetar la varilla. Las cuñas chocaban entre ellas, no podían ejercer presión adecuada sobre las caras de las varillas, y por lo tanto, la varilla se deslizaba con facilidad del anclaje. Además, la curvatura de las láminas de aluminio ya no coincidía con la curvatura de la superficie de las barras, lo cual no permitía un contacto adecuado entre aluminio y varilla.

Por lo tanto, se decidió deshacer las cuñas, que ya se habían fabricado con el último diseño, y se aprovechó para un último cambio en el procedimiento de fabricación.

Las láminas de aluminio ya no se fabricaron de un tubo de aluminio, porque no existen tubos con el diámetro adecuado para la varilla de 12.1 mm. Para la fabricación del tubo de

aluminio, que forma finalmente la superficie de reacción de las cuñas con la barra, se recorrió al torno del laboratorio con el cual se logró generar con exactitud una cuerda de 12 hilos por pulgada de 1mm de ancho con 1 mm de profundidad en la cara exterior. La geometría de las ranuras se seleccionó para garantizar que suficiente epoxi pudiera ingresar a las ranuras en el proceso de colado. La profundidad fue necesaria para poder garantizar una buena transferencia de carga entre aluminio y epoxi. Posteriormente se perforó el tubo por su eje central con una broca de 31/64”, correspondiente al diámetro de la barra de PRF que se utilizaría para los ensayos, para garantizar un contacto exacto entre aluminio y barra. Con un machuelo de 9/16” con 12 hilos por pulgada, utilizado para el diámetro de la perforación, se generó una cuerda exacta y replicable en el interior del tubo.

Para los especímenes anteriores, se maquinaba la cara exterior con ranuras circulares, a cada 2 mm, lo cual es difícil de lograr de forma uniforme en el torno del laboratorio. Se cortaba el tubo de aluminio después en tres gajos longitudinales, lo cual también es difícil de lograr con precisión. Estos se arrugaban con cambios suaves en la cara interior con un esmeril pequeño, principalmente para no generar aristas que pudieran lastimar a la varilla de PRF. Los gajos de aluminio se fijaban sobre una varilla de acero, la cual se insertaba al epoxi tratando de alinear los tres gajos con la posición de las cuñas de acero; de nuevo difícil. Todo el procedimiento logró generar cuñas, que desarrollaran un 65% del f_{pu} de las varillas, suficiente para utilizarlos a cargas de servicio, las cuales no deben rebasar el 55% de f_{pu} . No obstante, la capacidad de carga era mejorable, y la producción era difícil de reproducirse con el mismo grado de calidad, ya que dependía mucho de la experiencia y el criterio de la persona que los fabricara.

El tubo maquinado se utilizó sin cortarlo en tres partes, como se hacía en los anclajes anteriores, sino de forma completa como molde para el epoxi. Posteriormente, se utilizó una sierra de banda para separar las cuñas y así cortar el aluminio a la medida exacta que se requiere (Figura 5-12 y Figura 5-13).



Figura 5-12 Tubo de aluminio final con corrugaciones



Figura 5-13 Fabricación de tubo en torno

Para el resto del procedimiento de fabricación, se aplicaron los procedimientos que se cristalizaron del proceso iterativo de desarrollo del proceso. Se siguió la siguiente lista de uso de materiales, y procedimientos:

Material:

Descripción	Cantidad
Tubo de aluminio	1 pza

Base de molde	1 pza
Varilla centradora de molde	1 pza
Barrilete	1 pza
Roldana centradora (total 6mm)	2 pza
Sika Anchorfix 3001	1 estuche con 50ml
Desmoldante	Aprox 20ml
Separadores de plástico	3 pzas
Tapa centradora de molde	1 pza
Fibra de vidrio	3 g

Procedimiento:

1. Ensamble de molde y cuñas

- Limpiar cuñas metálicas con agua y jabón y acetona
- Cortar fibra de vidrio a una longitud de 1.5 – 2.0 cm
- Aplicar desmoldante a cara interior de barrilete, a separadores de plástico, a varilla centradora de molde y sobre cara exterior de las cuñas metálicas; con cuidado de NO aplicar en cara interior y bordes laterales de las cuñas
- Ensamblar base de molde, anillo centrador y barrilete
- Colocar cuñas en el barrilete, centrando bien los elementos, igualar altura de todas las cuñas, con cuidado de que la punta de las cuñas quede bien colocada en la esquina exterior del barrilete
- Colocar el tubo de aluminio sobre la varilla centradora
- Revisar una última vez la posición exacta de todos los elementos

2. Colado de epóxico

- Colocar 50 ml de epóxico Sika Anchorfix 3001 con dos componentes en vaso de plástico
- Agregar 3 g de fibras de vidrio en el vaso de plástico

- Mezclar bien por 60 segundos asegurando que todas las fibras estén embebidas en el epóxico
- Rellenar el espacio entre cuñas con la mezcla de epóxico y fibras
- Compactar con mucho cuidado de rellenar todos los espacios bien con un alambre limpio evitando la formación de vacíos en la mezcla
- Insertar la varilla centradora con el tubo de aluminio lentamente en el centro del molde hasta insertarlo en el orificio en placa base para asegurar que esté bien centrado en la parte inferior
- Ajustar la posición del tubo de aluminio hasta que tope con la base
- Insertar separadores de plástico entre las cuñas
- Quitar exceso de epoxi en la parte superior
- Centrar la varilla con la tapa centradora, para asegurar que en la parte superior quede bien centrado
- Guardar molde en un espacio cerrado, seguro y seco

3. Desmoldar cuñas

- Esperar al menos 24 h, de preferencia para desmoldar las cuñas
- Con un ligero golpe en la varilla desde abajo desprender cuñas de barrilete
- Con una sierra de banda separar las cuñas
- Limar y lijar el epóxico y del aluminio en las cuñas hasta que las superficies de acero queden limpias
- Lijar la superficie interior del aluminio para quitar aristas de aluminio y residuos de epoxi

5.4 Ensayes con cuñas

Los ensayos se efectuaron en la máquina universal del laboratorio de estructuras de la UAM Azcapotzalco siguiendo los lineamientos de las ETAG 013 (European Technical Approval Guidelines), que definen los criterios para aprobación de sistemas de anclajes de presfuerzo. Se requiere que la falla en las fibras ocurra fuera de la zona de anclajes, para exigir que los anclajes sean el causante de una falla. La carga debe aplicarse a una velocidad constante de aproximadamente 100 MPa/min hasta llegar a 80% de f_{pu} de la barra y sostenerla por 2 horas, antes de descargar y llevar el espécimen a la falla a una velocidad máxima de 0.002 de deformación por minuto. La incertidumbre de los valores medidos con el equipo de medición deberá estar dentro de 1%. Las cargas deberán mantenerse con una tolerancia máxima de 2%.

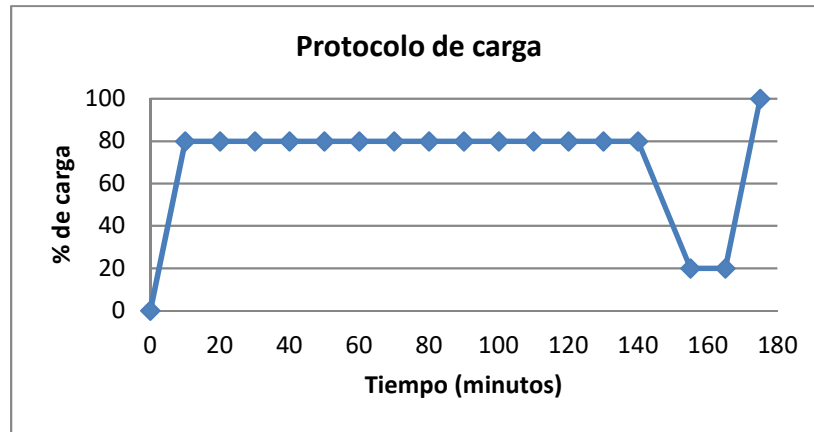


Figura 5-14 Protocolo de carga según ETAG 013

En el transcurso del ensaye se requiere la obtención del diagrama completo de carga-elongación de la barra, grabado continuamente durante la prueba (Figura 5-14). Aparte se deben tomar lecturas del desplazamiento de las cuñas debido a la carga aplicada, y también el desplazamiento de la varilla (Figura 5-15 y Figura 5-16). Esto con la finalidad de obtener datos de acuanamiento bajo carga, para poder calcular pérdidas debidas a este desplazamiento, y aparte definir si el sistema permite deslizamiento excesivo de la varilla en el anclaje. Posteriormente, debe definirse el tipo de falla observado en el ensaye, para categorizar la eficiencia del anclaje.

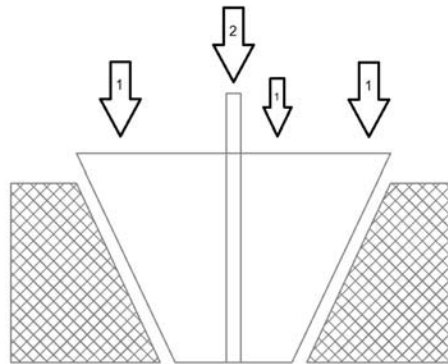


Figura 5-15 Instrumentación de anclaje



Figura 5-16 Instrumentación de anclaje físico

Las fallas que se observaron en las primeras 20 pruebas, fueron todas debidas a fallas de algún componente del anclaje o por deslizamiento prematuro de la barra en el anclaje. Sólo el último diseño de cuñas logró que se alcanzara el 100 % de la resistencia de la barra de PRF, donde se observó una falla en el tramo libre de la barra tipo escoba. En la Tabla 5-3 se muestran algunas fallas representativas de las primeras 20 cuñas. Debido a que el comportamiento mecánico de las barras de PRF es prácticamente lineal (Figura 5-17), solo se indica la carga máxima obtenida de los ensayos.

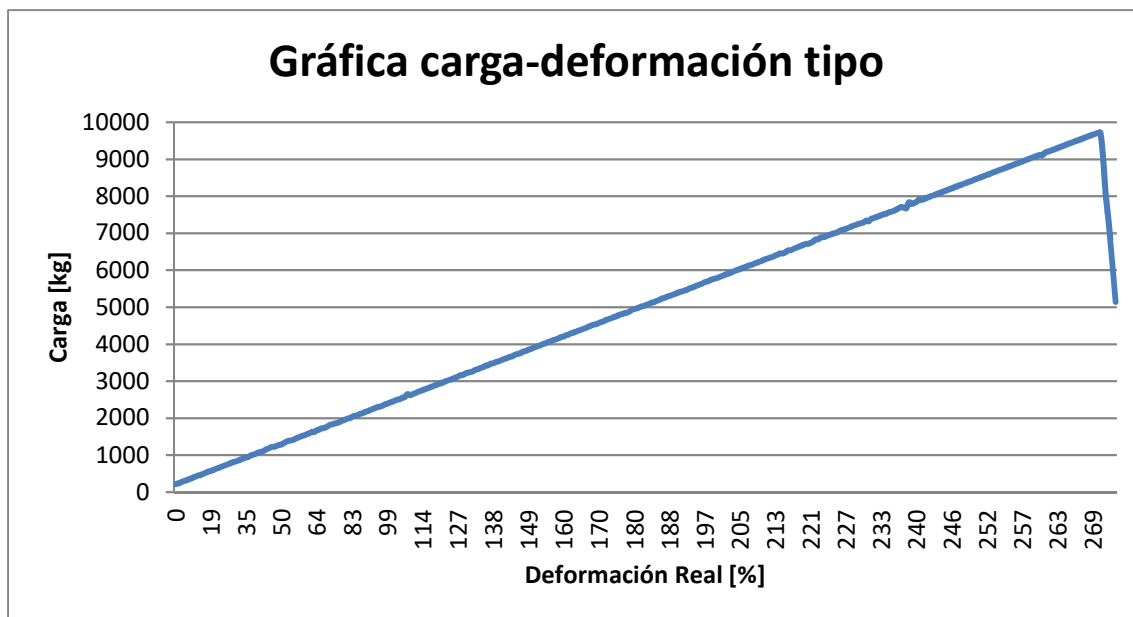


Figura 5-17 Comportamiento típico lineal de barras PRFC hasta la falla

Tabla 5-3 Fallas típicas observadas en ensayos

Foto	Cambio estudiado	Falla	Carga máxima
	Adecuación de proceso de colado de epoxi	Generación de oquedades visibles y grandes. Falla típica en múltiples ocasiones	- (descartados)

	Recubrimiento con epoxi metálico	Desgarre de epoxi metálico	12900kg
	Recubrimiento con epoxi metálico	Deslizamiento de epoxi metálico contra epoxi de cuña y varilla	10800kg
	Epoxi original con superficie arrugada	Se generan oquedades ocultas en el epoxi, que colapsan en el transcurso del ensaye, causando pérdida de fricción	2200kg

	Epoxi original con superficie arrugada	Deslizamiento sobre varilla prematureo	6100kg
	Epoxi original con superficie arrugada	Se generan oquedades en el epoxi ocultas, que colapsan en el transcurso del ensaye, causando perdida de fricción	2400kg
	Epoxi original con superficie arrugada	Fractura de epoxi en parte superior de cuñas y desprendi- miento del epoxi, causando pérdida de fricción con barra	10400kg

	Epoxi original con superficie arrugada	Deslizamiento de varilla	4500kg
	Lámina delgada de aluminio	Deslizamiento de epoxi de anclaje sobre el acero de anclaje Anclaje 6	6800kg
	Lámina delgada de aluminio	Deslizamiento de epoxi de anclaje sobre el acero de anclaje	6200kg



Lámina gruesa
de aluminio
con
corrugaciones
maquinadas

Deslizamiento
de varilla
sobre
aluminio

13800kg

Tomando en cuenta las observaciones hechas en los ensayos efectuados, se juntaron las medidas efectivas para generar un sistema eficiente de cuña compuesta eficiente. El proceso para generar el conjunto final también se ajustó, para poder generar cuñas de calidad alta y constante. El resultado final fue un sistema de anclajes que permitió llegar a una falla fuera de la zona de anclaje, así llegando a 100% del f_{pu} de la barra (Figura 5-18 y Figura 5-19).



Figura 5-18 Falla tipo escoba de espécimen en longitud libre



Figura 5-19 Falla tipo escoba de espécimen en longitud libre

La falla producida es la que se espera para elementos de PRF. En el interior del anclaje se puede observar, que en toda la longitud de sostenida por las cuñas, no se detecta ninguna falla ni en la barra, ni en las cuñas (Figura 5-18 y Figura 5-19). También, se puede observar que la profundidad de marcas sobre la superficie de las barras, resultado de la corrugación sobre la cara interior de las cuñas en el aluminio, son parejas del inicio hasta el final en profundidad (Figura 5-20, Figura 5-21, Figura 5-22 y Figura 5-23). Por lo tanto, la presión lateral sobre estas caras se distribuyó aparentemente de forma uniforme, sin generar concentraciones de carga en alguna parte del anclaje, lo cual fue un objetivo principal del diseño de las cuñas.



Figura 5-20 Superficies de cuñas y de barras sin señal de daño



Figura 5-21 Anclaje Juego 5 (superior) sin daño visible



Figura 5-22 Anclaje Juego 4 (inferior) sin daño visible



Figura 5-23 Barra con marcas de dientes de cuñas, sin daño en zona de anclaje

En este espécimen no se esperaba llegar al 100% del f_{pu} , por lo cual no se llevó a cabo el protocolo de carga de sostener la carga a 80% de f_{pu} por dos horas. Se llevará a cabo una serie de ensayos al terminar este reporte, en la cual se toma en cuenta el protocolo completo y se publicará posteriormente.

La carga máxima que se alcanzó fue de 15,032 kg, de lo cual resulta un f_{pu} de 13,072.4 kg/cm², que es un poco menor a lo indicado por el proveedor (13,827 kg/cm²), Figura 5-24. Se utilizó un extensómetro de 2" de longitud instalado sobre el tramo central de la varilla, para registrar datos exactos de deformación, inalterados por acomodos en anclajes o máquina (Figura 5-25). Éste se retiró del espécimen al alcanzar el 80% de la resistencia esperada, para proteger el equipo. El módulo de elasticidad que se obtuvo con los datos fue de 1,474,476.92 kg/cm².

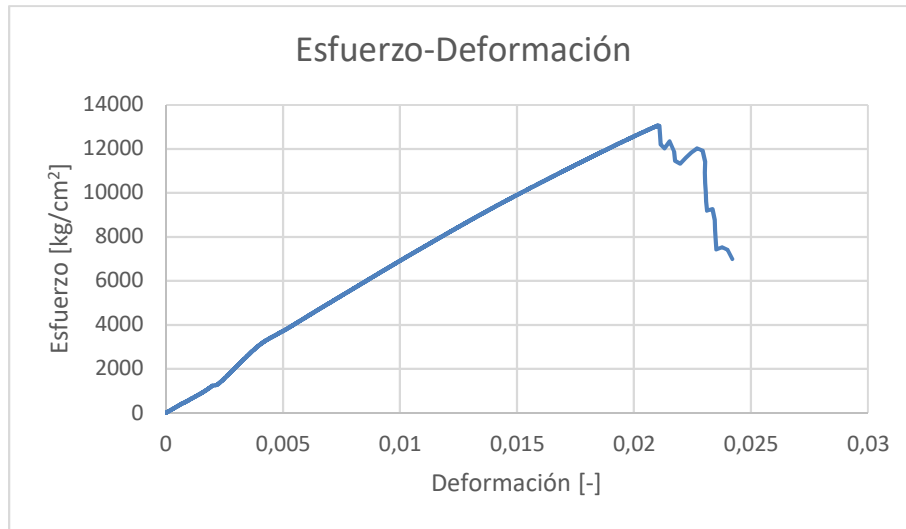


Figura 5-24 Resultado de ensaye a tensión con el último diseño de anclaje

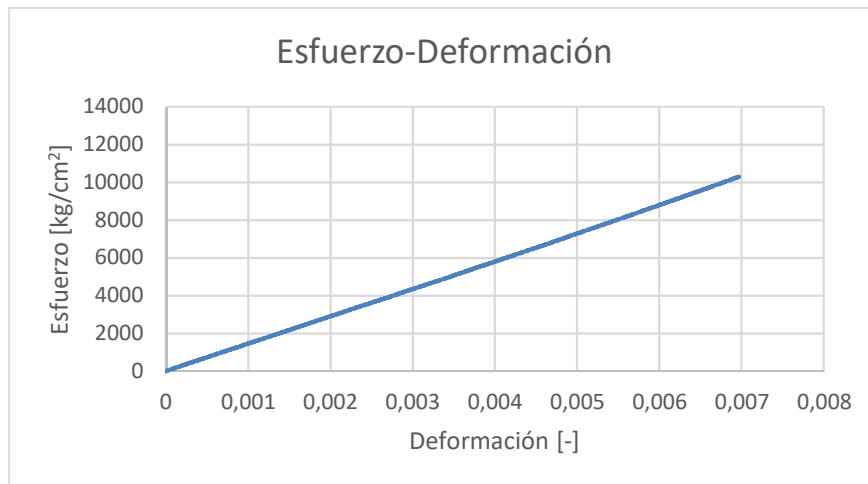


Figura 5-25 Diagrama esfuerzo – deformación directa sobre la barra PRFC

El acuíñamiento se midió una vez en el proceso de pre-acuíñamiento, donde se aplicó una carga de 5,000 kg sobre las cuñas instaladas en su barrilete correspondiente. En el anclaje superior 4 (con respecto a su instalación en la máquina universal), se registró un desplazamiento de 4.97 mm con esa carga, y en el anclaje inferior 5 de 5.77 mm (Figura 5-26).

En el transcurso del ensaye, se midió el desplazamiento de cada una de las 3 cuñas del anclaje 4 en la parte superior de la máquina universal (Figura 5-27). Éstas se desplazaron 4.12 , 4.61 mm y 3.98 mm respectivamente hasta llegar a al límite de ruptura de la barra de PRFC. El acuíñamiento se debe tomar en cuenta en su totalidad para el cálculo de pérdidas de presfuerzo en su caso.

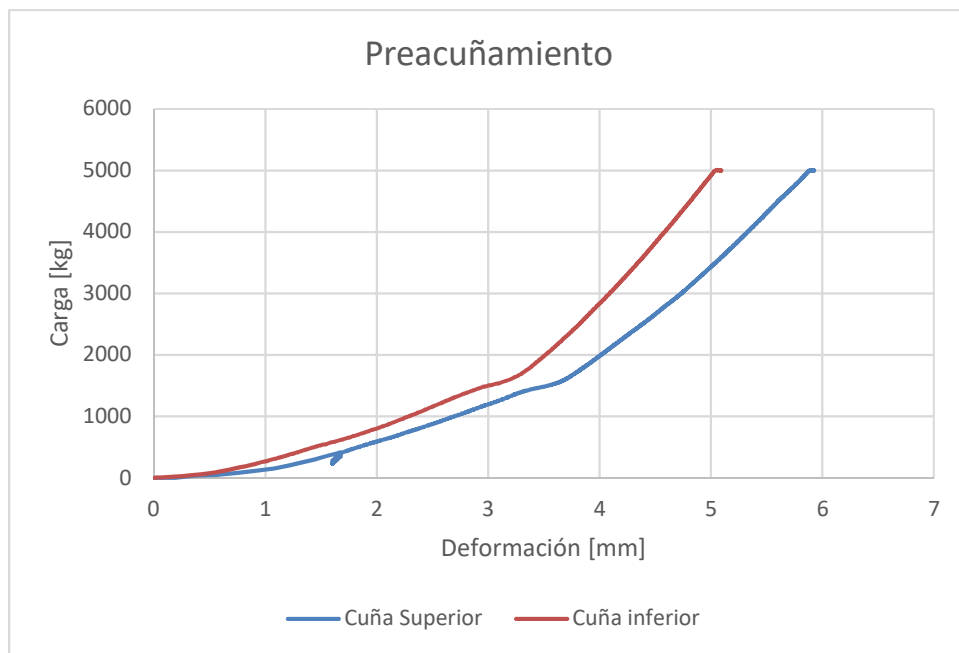


Figura 5-26 Pre-acuñamiento de anclajes en su barrilete

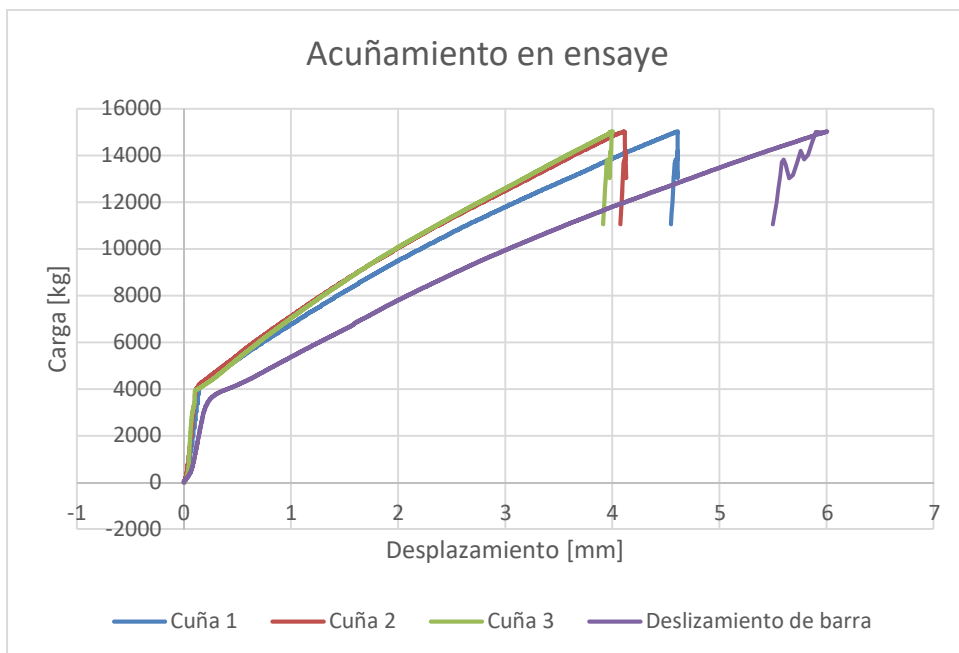


Figura 5-27 Acuñamiento debido a tensión aplicada

6 Ensayes de traveses reforzadas

6.1 Objetivo de ensayos a traveses

Debido a las diferencias entre el sistema de anclajes y de propiedades de materiales utilizando barras de PRFC con respecto a torones de acero, se requirieron ensayos a vigas de concreto, que incluyeran todos los componentes de un sistema de presfuerzo de PRFC.

El uso de los anclajes de cuñas desarrollados y comprobados (Capítulo 5) deberían mostrar su eficiencia y buen funcionamiento en un caso de reforzamiento real. Se tuvo que revisar que realmente fueran sencillos de instalar, que no se generaran fallas en los anclajes en el procedimiento de aplicación de presfuerzo, y que pudieran resistir sin fallas el proceso de aplicación de carga a la viga reforzada con las fibras.

Se tuvo que comprobar que los desviadores pudieran instalarse fácilmente, y que la desviación se pudiera aplicar correctamente. Una instrumentación de las barras de PRFC debería indicar si las previsiones de desviación que se elaboraron en el Capítulo 4 fueran correctas.

El comportamiento de la viga reforzada con PRFC tuvo que ser analizado con las propiedades de las barras de PRFC. Este material tiene un módulo de elasticidad menor al de torones de acero (Capítulo 5.4) y la estructura reforzada por lo tanto debe deformarse más que con torones de acero. Este nivel se debe comparar con cálculos, para determinar su factibilidad.

La eficiencia en general de un sistema de reforzamiento con barras de PRFC debe comprobarse, revisando la formación de grietas, la deformación de la estructura y el procedimiento de la aplicación del presfuerzo comparado con el uso de torones de acero.

6.2 Diseño de traveses

Para determinar las cargas máximas que podrían aplicarse a las traveses se efectuó una revisión de la cama de pretensado (Figura 6-1) y del marco de reacción del laboratorio de estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Para la revisión de la cama de pretensado. se tomó como base el proyecto original de 1983 comprobando las dimensiones en sitio.

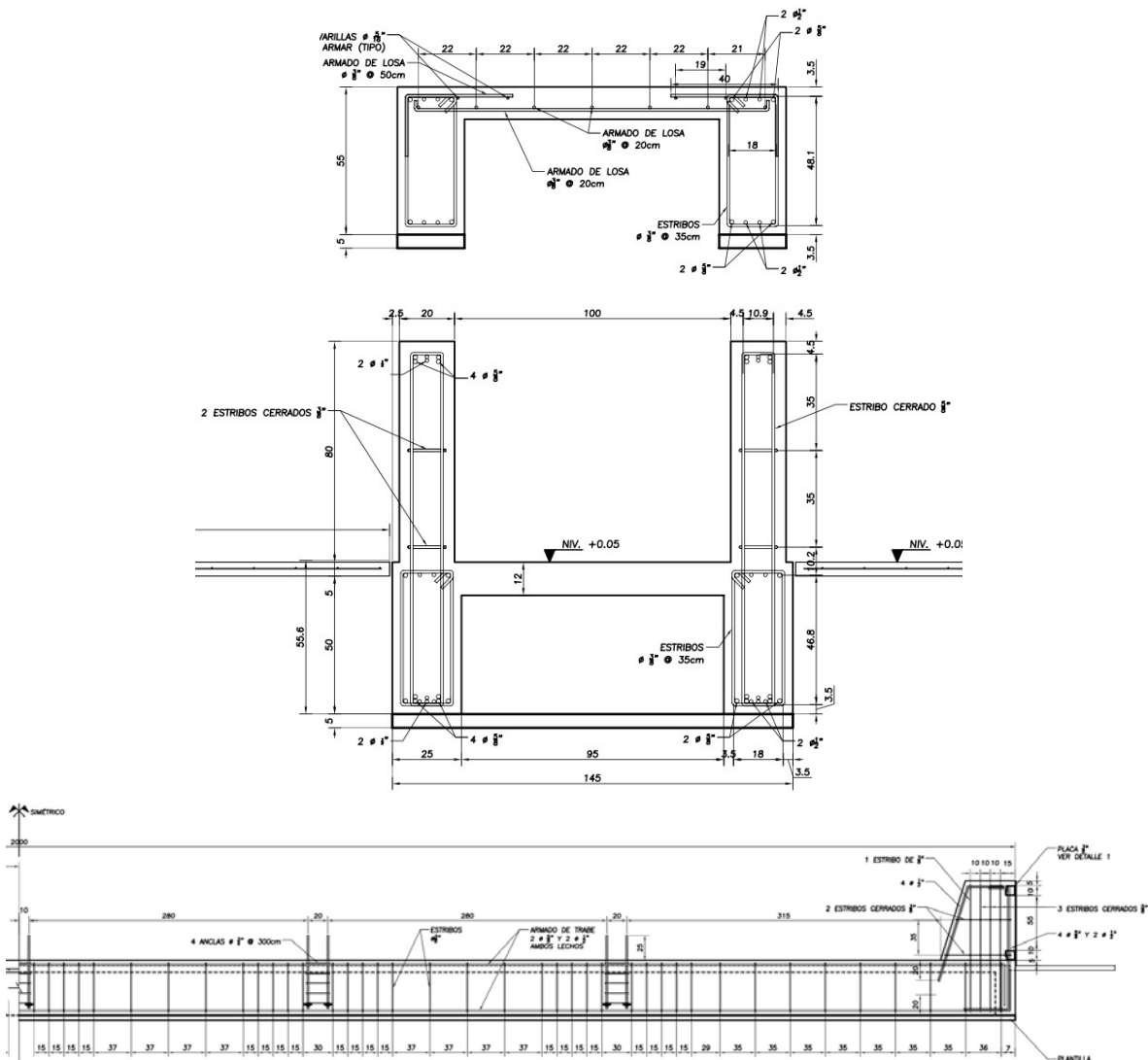


Figura 6-1 Recreación de proyecto de cama de pretensado de la UAM-A

La revisión arrojó que la cama tiene capacidad para aplicar un pretensado máximo equivalente a 4 torones de 0.5" ó 3 torones de 0.6" a una excentricidad de 10 cm con respecto al lecho superior de la cama. La limitante primaria es el cortante en las ménsulas de los extremos de la cama.

El marco de reacción del laboratorio ofrece un espacio máximo de 7 m entre columnas. Se optó por una longitud máxima de vigas de 6 m para permitir espacio para celdas de carga y gatos hidráulicos en cada extremo. La capacidad de carga no presentaba limitante práctica para este ensaye.

La longitud de la cama de pretensado es de 20 m en total con una longitud libre de 17 m entre las ménsulas. Por lo tanto, se fabricaron en cada ocasión 2 traves de 6 m de longitud, cumpliendo con restricciones geométricas.

La trabe es de sección tipo T con una relación de peralte a claro semejante a las traveses pretensados utilizadas en la construcción de puentes tradicionales carreteros (Figura 6-2). Se diseñaron tomando en cuenta un número máximo de torones de 2 de 0.5 pulgadas, debido a las limitaciones de la mesa de pretensado.

El diseño estructural se hizo con un enfoque en que la falla esperada de la viga fuera controlada por tensión a flexión y que el cortante no generara fallas prematuras.

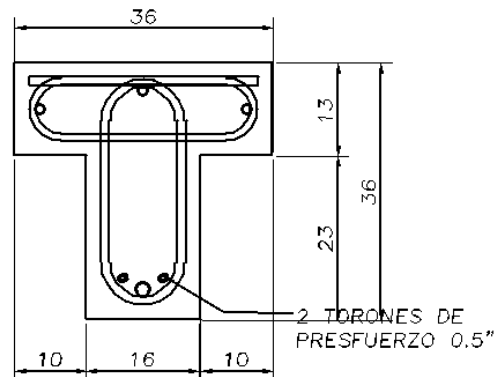


Figura 6-2 Sección tipo de trabe pretensada de 6 metros de largo

Se hizo un modelo numérico para tomar en cuenta el comportamiento reológico del concreto a largo plazo y así poder revisar si el comportamiento de la viga corresponde a lo esperado por su diseño. Para este fin se utilizó el programa midas Civil 2017 (Figura 6-3), donde se utilizó un modelo de barras con las propiedades de sección de la viga, se aplicó el presfuerzo interno y se aplicó una carga de tiempo de 3 años en un análisis de etapas constructivas, correspondiente al tiempo que ha transcurrido desde el colado (Apéndice A – Modelo numérico de viga pretensada).

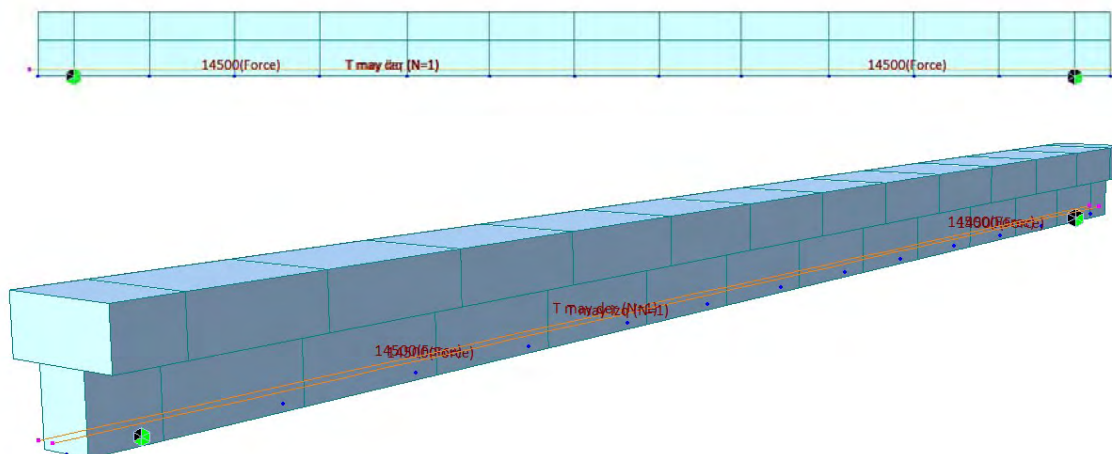


Figura 6-3 Modelo matemático incluyendo comportamiento reológico de concreto

La geometría de la sección colada varía a lo largo de la viga, debido a variaciones en la cimbra que se utilizó. No obstante, tomando el promedio de la geometría a cada metro, la geometría cumple con las indicaciones de proyecto.

Para el análisis se tomó en cuenta la sección sin agrietarse para el cálculo de contraflechas debidas al presfuerzo interno (Figura 6-4 y Figura 6-5). Se comparó con las mediciones de las contraflechas de las vigas en el laboratorio, (Tabla 6-1), indicando que el presfuerzo está actuando de manera correcta, y que se están tomando en cuenta bien las propiedades de los materiales.

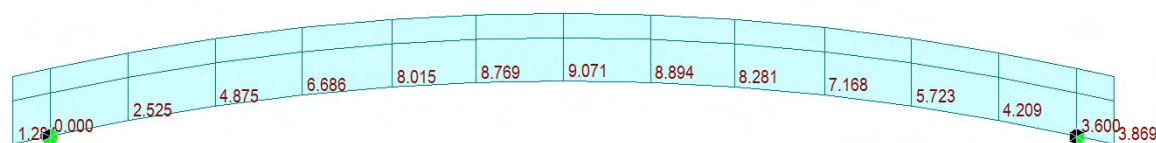


Figura 6-4 Deformación esperada al aplicar presfuerzo en mm

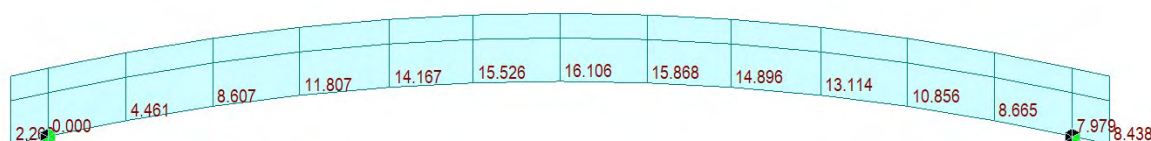


Figura 6-5 Deformación a los 1500 días debida a presfuerzo en mm

Cabe mencionar que el concreto utilizado fue mezclado en el laboratorio con los agregados existentes. Se diseñaron las mezclas de concreto para alcanzar una resistencia mínima de 300 kg/cm^2 , no obstante, en ningún caso se alcanzó este valor. Los datos también se tomaron en cuenta en los modelos matemáticos, ya que el módulo de elasticidad cambia mucho con respecto a lo esperado, y los datos de deformación difieren sustancialmente de lo esperado inicialmente. Para la obtención de las curvas de desarrollo de contracciones, acortamientos se tomó en cuenta el CEB-FIP (2010) con un cemento de fraguado normal y agregados de baja calidad.

Tabla 6-1 Contraflechas esperadas contra medidas

	Modelo	Viga 1	Viga 2	Viga 3
Contraflecha al tensar	9.07 mm	10.1 mm	8.5 mm	7.9 mm
Contraflecha a 1500 días	16.1 mm	18.1 mm	13.9 mm	13.6 mm

La mezcla de concreto de la viga 4, resultó en un f'_c de 181 kg/cm^2 y tuvo que ser descartada para los ensayos. Con esa resistencia no hubiera soportado cualquier presfuerzo externo adicional, y hubiera fallado antes de poder aplicar cargas. La contraflecha que se observó al final en esa trabe debida al presfuerzo interno, ya fue muy notoria con 36 mm, y correspondiente a un concreto de muy baja calidad.

6.3 Construcción de traveses

Se inició con un diseño de cimbra (Figura 6-6), la cual se ensambló sobre la cama de pretensado en la UAM-A. Se fabricaron los elementos de la cimbra en el taller de maderas se ensamblaron con ayuda de los ayudantes del taller de ingeniería cuidando que las caras interiores tuvieran las dimensiones adecuadas (Figura 6-7).

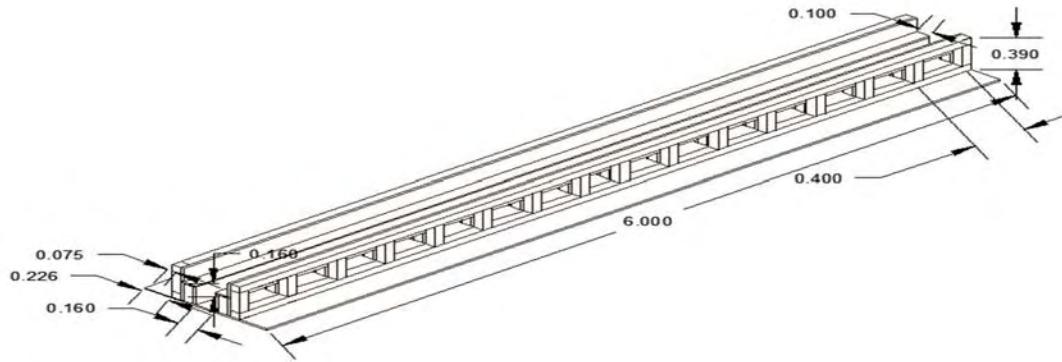


Figura 6-6 Diseño de cimbra para vigas



Figura 6-7 Montaje de cimbras sobre cama de pretensado

Se doblaron las varillas según el diseño obtenido de las traves (Figura 6-8 y Figura 6-9), y se ensamblaron. Luego después de ensamblarlas, se instrumentaron con strain gages de uso general con una rejilla tipo 125UN, una resistencia de 120Ω , encapsulada en poliamida y aptas para temperaturas de -75° a $+175^{\circ}\text{C}$ (Figura 6-10 y Figura 6-11). Éstas se protegieron con 4 capas de protección (barniz, hule, lamina de aluminio, epoxi) para poder pasar por el proceso de colado de concreto sin sufrir daño. Los cables que se utilizaron fueron de protección adecuada para quedarse embebidos en concreto, igualmente para evitar daños en ellos.

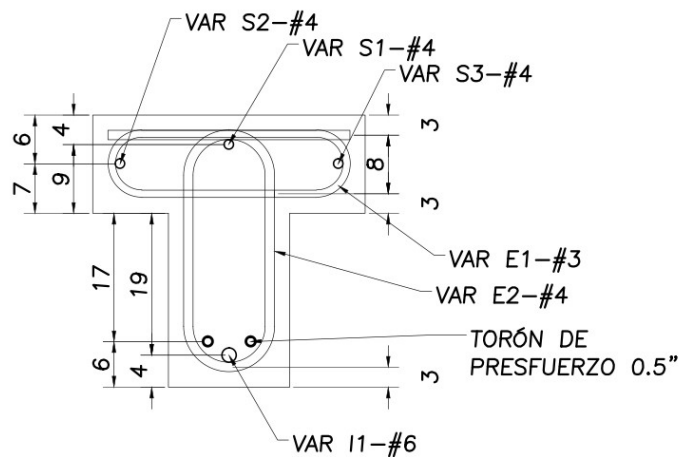


Figura 6-8 Armado de viga – sección

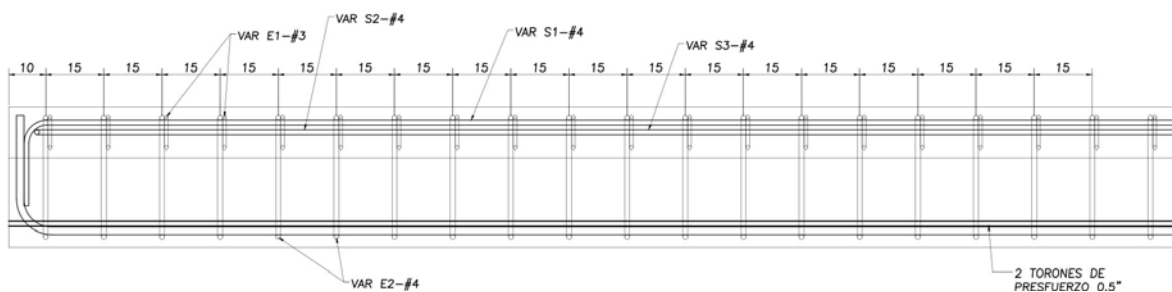


Figura 6-9 Armado de viga – mitad de corte longitudinal

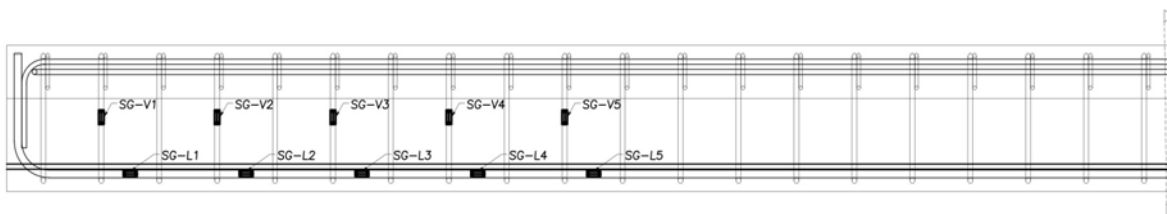


Figura 6-10 Posición de strain gages en el armado



Figura 6-11 Armado de viga físico con strain gages colocados y protegidos

Para poder aplicar el presfuerzo, se requieren vigas de reacción en los extremos de la cama de pretensado. Ante la falta de éstas, se adecuó una viga existente para poder utilizarla, se limpió y pintó (Figura 6-14). La segunda viga se fabricó con vigas doble T en existencia en el taller. Éstas se revisaron ante las cargas esperadas de presfuerzo tomando en cuenta 2 torones de $\frac{1}{2}$ " tensados al 100% de F_{pu} . Se requirió adecuar su resistencia a cortante y pandeo local con atiesadores y placas de reparto (Figura 6-12 y Figura 6-13).

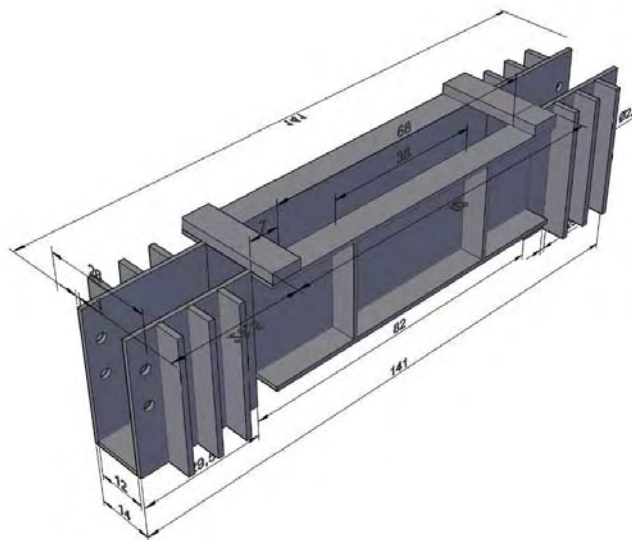


Figura 6-12 Diseño de viga de reacción existente con reforzamientos

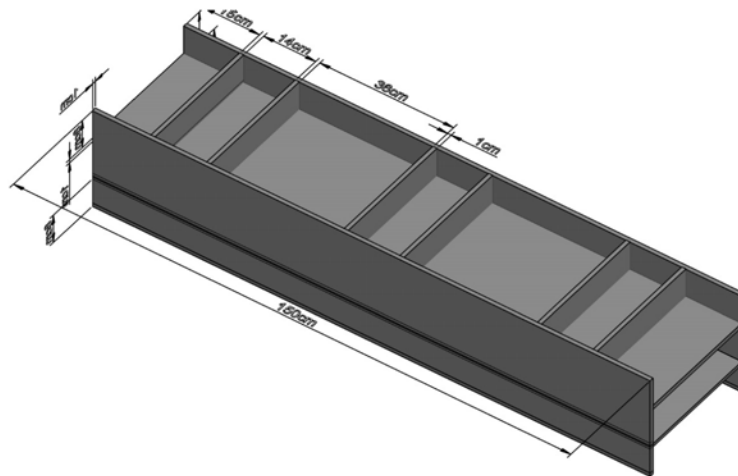


Figura 6-13 Diseño de viga de reacción nueva



Figura 6-14 Fabricación y preparación de vigas de reacción para presfuerzo

Una vez colocado el armado de dos vigas en su posición de colado junto con la cimbra, se insertaron los dos torones de $\frac{1}{2}$ " de baja relajación. Se posicionaron las vigas de reacción a una altura para garantizar que los torones una vez tensados quedaran a 4 cm del lecho inferior de las traves. Se niveló el gato para tensar de manera correspondiente, y se procedió a tensar torón por torón a una carga de 15,000 kg según la presión aplicada y registrando alargamientos del torón (Figura 6-15).



Figura 6-15 Aplicación de presfuerzo a torones

Una vez tensados los torones se procedió al proceso de colado de las vigas. Se calcularon mezclas del concreto para alcanzar un f'_c de 300 kg/cm² (Tabla 6-2). En el proceso de colado se revisó continuamente el revenimiento de la mezcla que se hizo en la revolvedora del laboratorio.

Tabla 6-2 Dosificación de concreto

DATOS							
MATERIAL	Pesss (kg/dm ³)	Absorcion (%)	Humedad(%)	PVS (kg/m ³)	PVC (kg/m ³)		
GRAVA	1.934	8.00%	1.42%	977.52	1038.39	TN=	40 mm
ARENA	2.190	3.00%	5.26%	1098.52	1268.06	MF=	2.7
CEMENTO	3.10	Rev=	12 cm	f'c=	370.0 Kg/cm ²	Vol=	530 dm ³

DOSIFICACIÓN									
MATERIAL	V (dm ³)	P _{ss} (kg/dm ³)	P _{ss} (kg)	A (%)	P _s (kg)	H (%)	P _h (kg)	Factor =Vol/1000	P'h (kg)
cemento	129.59	3.1	401.73		401.73		401.73	0.53	212.92
grava	417.55	1.934	807.46	8.00%	747.65	1.42%	758.27	0.53	401.88
arena	258.06	2.19	565.15	3.00%	548.69	5.26%	577.55	0.53	306.1
agua	184.8	1	184.8		261.07		221.59	0.53	117.44
aire	10	0	0		0		0	0.53	0
Σ=	1,000.00		1,959.14		1,959.14		1,959.14		1038.34



Figura 6-16 Colado de vigas y descimbrado

Después del colado de la primera viga, se curó la superficie del concreto por 14 días, manteniendo la superficie húmeda constantemente y cubierta para evitar pérdida de humedad. A los 14 días de colado se descimbró la primera viga, y se siguió manteniendo húmeda la superficie exterior del concreto. Se cimbró la segunda viga sobre la misma línea siguiendo el mismo procedimiento. A los 28 días de edad de la segunda viga (42 días del colado de la primera viga) se cortó el presfuerzo entre las traves, así transfiriendo la carga de lo torones a las vigas (Figura 6-18). Además, se probaron los cilindros que se colaron también junto al concreto de las traves (Figura 6-17) para obtener resistencia y módulo de elasticidad del concreto.



Figura 6-17 Determinación de propiedades de concreto de vigas en laboratorio



Figura 6-18 Corte de torones de presfuerzo

El proceso de fabricación para 2 traveses, se repitió una vez más, para obtener 4 especímenes de vigas para los ensayos, donde la cuarta trabe se tuvo que descartar por no alcanzar el f'_c requerido para poder aplicar el presfuerzo a las traveses ($f'_{c,real} = 53.1\%$ de $f'_{c,requerido}$ de 350 kg/cm^2).

6.4 Sistema de Presfuerzo y Desviación

Se diseñó un sistema de reforzamiento para las vigas, que consiste en el anclaje desarrollado a base de cuñas, dos vigas de reacción con un rótula para el anclaje, y dos desviadores. El proceso para aplicar el reforzamiento consiste en la instalación de las vigas

de reacción en los extremos de la viga en una posición que permita que la barra de presfuerzo quede un poco por debajo del eje neutro de la viga (en este caso 3 cm). Se aplica con un gato hidráulico tensión a esta barra de PRF de presfuerzo, hasta llegar a una precarga de 2000 kg. Después se desvía la barra con los desviadores dando vuelta a una barra roscada, que a su vez reacciona contra el patín superior de la viga y desciende el desviador sobre la barra (Figura 6-19).

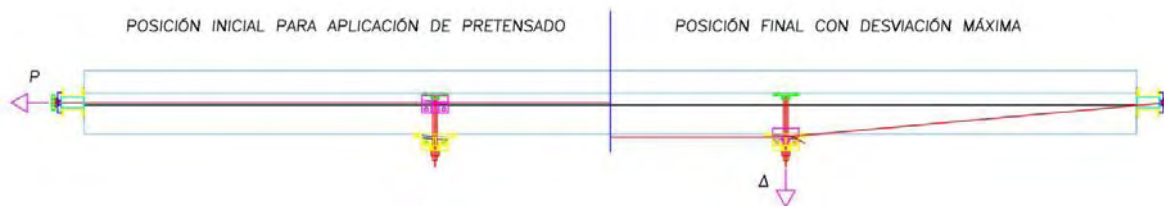


Figura 6-19 Sistema general del reforzamiento

Las vigas de reacción en los extremos de la viga pretensada consisten en dos canales unidos sobre los cuales se apoya una placa con una rótula, la cual sirve de apoyo para el anclaje de la barra de presfuerzo (Figura 6-20 y Figura 6-21). La rótula sirve para ajustar la inclinación del anclaje conforme vaya cambiando el ángulo de salida de la barra de presfuerzo debido a la desviación de la misma.

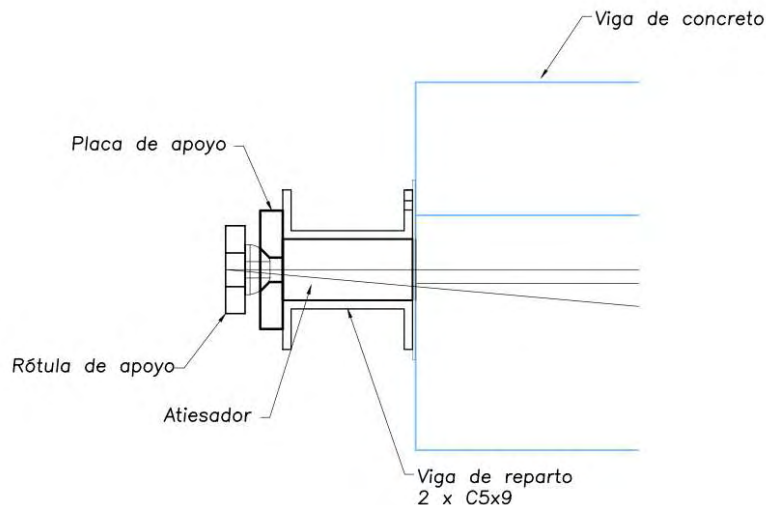


Figura 6-20 Vista lateral de la viga de reacción

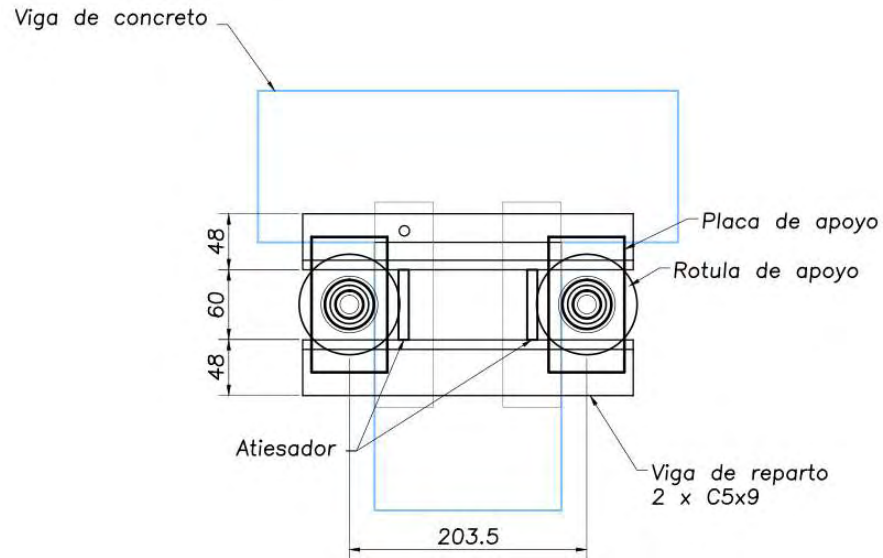


Figura 6-21 Vista frontal de la viga de reacción

La aplicación de la carga de presfuerzo se efectuó con dos gatos hidráulicos huecos de la marca ENERPAC con bombas manuales instalados sobre una de las vigas de reacción (Figura 6-22). La carga se aplicó de manera simultánea registrando deformaciones en la viga y las deformaciones en la barra de PRF. La carga en las barras de presfuerzo se registró con dos celdas de carga instaladas entre anclaje y viga de reacción del lado opuesto a los gatos hidráulicos de la viga, como se puede observar en la Figura 6-23.

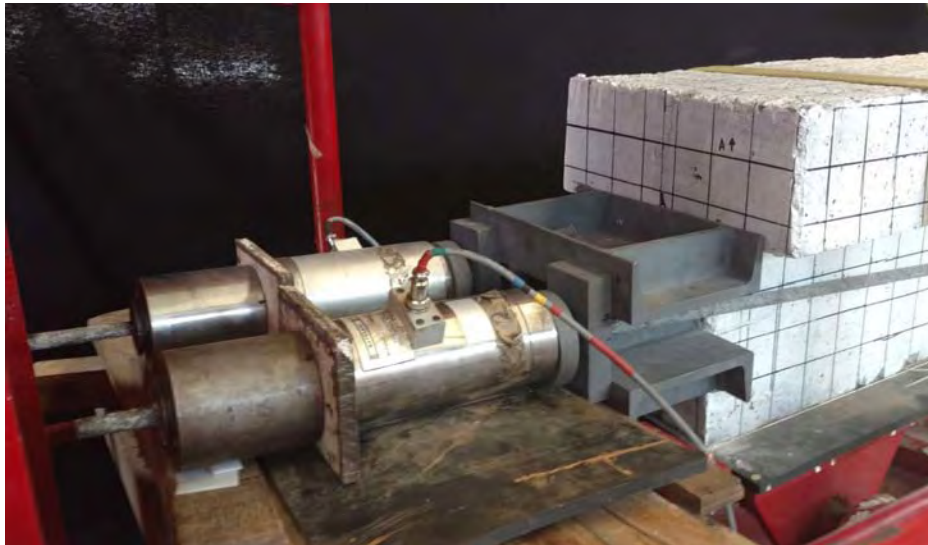


Figura 6-22 Viga de reacción con anclajes y celdas de carga



Figura 6-23 Viga de reacción con anclajes y gatos hidráulicos

Los desviadores consistieron en una placa de reparto sujeta al lecho inferior de la viga de concreto, una barra roscada que sirve para actuar el desviador hacia su posición final, y una placa zapato que sirve para fijar la posición de la barra roscada cuando actúa contra el patín de la viga. Una vez en su posición final, se fija el desviador contra la placa de reparto, para evitar cualquier movimiento. En la Figura 6-24 y la Figura 6-25 se pueden observar los elementos que conforman el desviador, y en la Figura 6-26 se muestra el desviador final instalado en una viga en posición de desviación máxima. La posición 1 corresponde a la posición inicial del desviador, cuando se aplica el presfuerzo externo. La posición 2 corresponde a la posición final del desviador, a la cual llega aplicando torque a la barra distanciadora.

La aplicación de la desviación se aplicó gradualmente de 5 en 5 cm, para garantizar que los cuatro desviadores se bajaran prácticamente de forma simultánea a su posición final. La desviación se logró con una llave perico simple, dando vuelta a la barra roscada en su extremo inferior donde se encuentra una tuerca soldada a la barra. La placa desviadora se conecta a la barra roscada con un tubo con cuerda interior actuando sobre la barra roscada.

Todos estos elementos metálicos de las vigas de reacción y de los desviadores se dejaron fabricar en un taller externo para acelerar el proceso de fabricación.

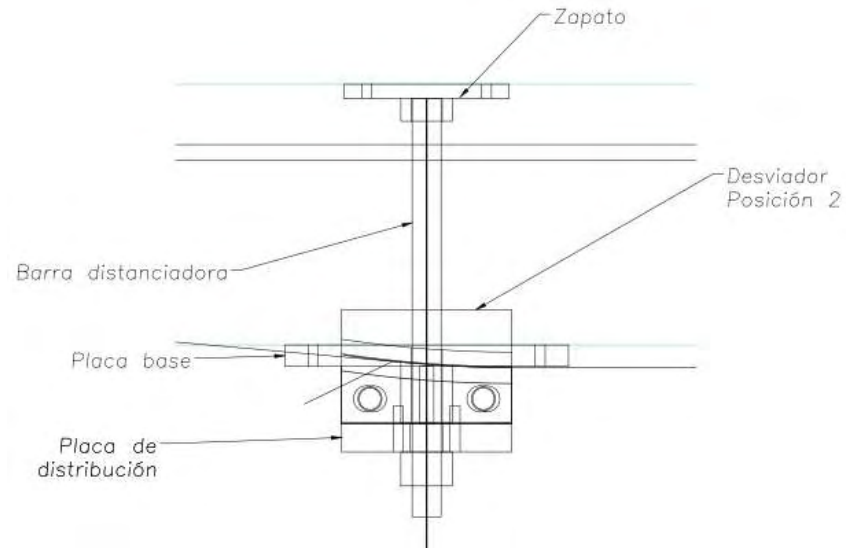


Figura 6-24 Vista lateral del sistema de desviación

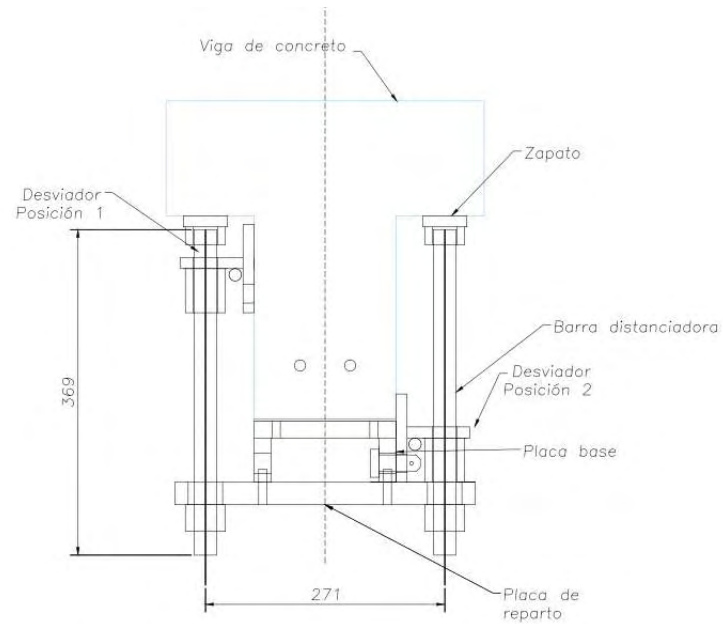


Figura 6-25 Vista frontal del sistema de desviación en dos posiciones diferentes



Figura 6-26 Desviador instalado sobre una viga en posición de desviación máxima

6.5 Ensayes de traveses

El ensaye que se efectuó fue de un tipo de ensaye a flexión con 2 puntos de carga. Se diseñaron la trabe y el reforzamiento con el objetivo que la falla fuera controlada a flexión y que se genera la máxima solicitud a las barras de refuerzo de PRF.

El procedimiento general para los ensayos fue simular primero la necesidad de un reforzamiento, aplicando una carga con esta configuración, hasta que se generaran grietas de hasta 0.3 mm bajo carga. Este grosor de grieta corresponde al grosor aceptado para estructuras de concreto sin necesidad de reforzamiento o inyección (González Cuevas 2005) Después, se aplicó el presfuerzo externo con las barras de PRF, y se aplicaron cargas hasta generar una falla. Al final, se llevó la carga aplicada al nivel que la corresponde a la falla de la viga pretensada sin el refuerzo externo.

Los ensayos se hicieron en el marco de reacción del laboratorio de estructuras de la UAM Azcapotzalco (Figura 6-28). Se había estudiado la opción de utilizar la cama de pretensado también como marco de reacción, ya que cuenta con preparaciones para anclarse (Figura 6-27), pero se descartó por la calidad dudosa y su estado corroído de las anclas. También se cambió la configuración inicial, que se tenía programada para los ensayos.



Figura 6-27 Viga sobre mesa de pretensado

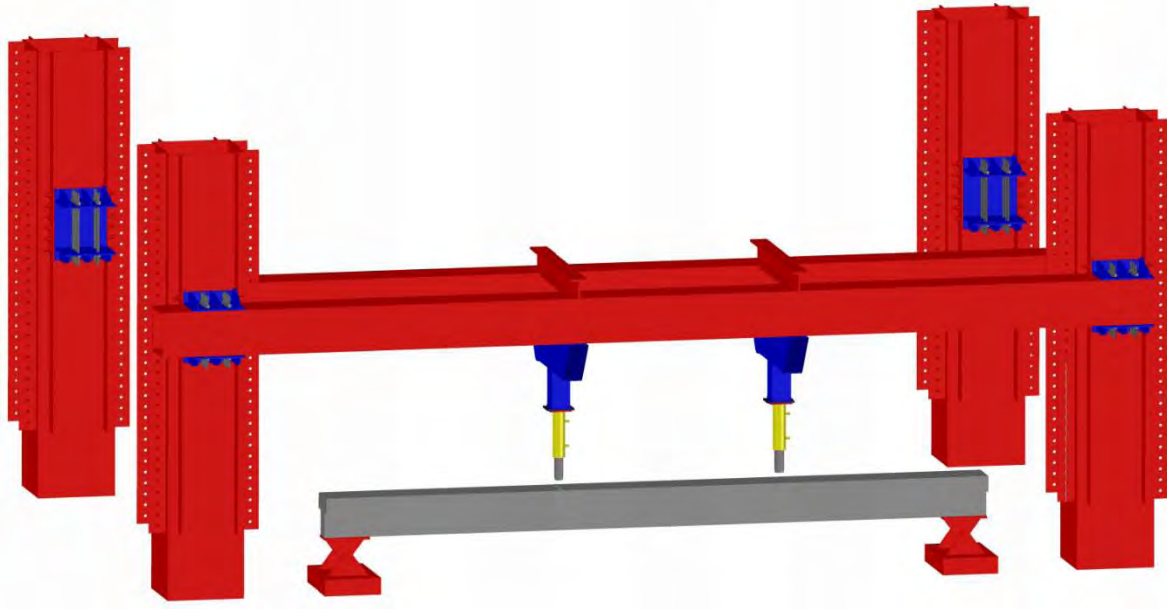


Figura 6-28 Viga en el marco de reacción con 2 puntos de carga

La configuración de los apoyos y puntos de carga se cambió, debido a la configuración existente que estaba montada en el marco, resultado de ensayos anteriores, que se llevaron a cabo en la misma posición. Las distancias entre ejes de apoyos de 560 cm y la posición de aplicación de carga a los tercios del claro 186.7 cm – 186.7 cm -186.7 cm se mantuvo constante. No obstante, para poder utilizar los marcos y los gatos que estaban instalados, se elevaron los apoyos de la viga (Figura 6-29). Los gatos se encontraron anclados al piso de reacción y aplicaban la carga a tensión, controlados de manera simultánea para una aplicación pareja de la carga.

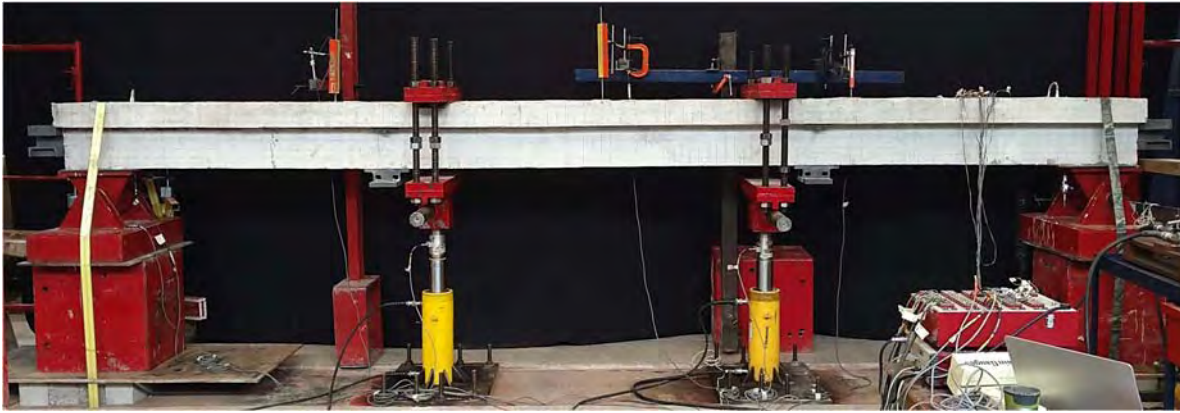


Figura 6-29 Viga en el marco de reacción con 2 puntos de carga con arreglo final tipo

Los gatos de la marca ENERPAC modelo RR-10013 tienen capacidad de 100/48 ton a compresión/tensión con 271 mm de desplazamiento y se controlaron con una bomba ENERPAC. A ésta se instalaron válvulas para controlar la aplicación simultánea de carga en los gatos.

Se instalaron dos celdas de carga en los gatos con capacidad de 30 ton. Las celdas de carga se conectaron a un sistema de adquisición de datos formado por un Data Logger TDS-300 y un Switching Box ASW-50C de la empresa Tokyo Sokki Kenkyujo (Figura 6-30).



Figura 6-30 Viga en el marco de reacción con 2 puntos de carga con arreglo final tipo

Cabe mencionar que en su primer uso para agrietar la viga 1, se notó que las celdas de carga no estaban correctamente calibradas y ya tampoco funcionaban bien. Se decidió repararlas y calibrar todos los equipos de adquisición de datos correctamente.

La deformación vertical de viga se registró con transductores de distancia inductivos de 200 mm en los cuartos del claro (Figura 6-31). Para estos se colocaron estructuras auxiliares separadas del sistema de apoyo donde se fijaron los transductores. Una pareja de transductores de 10 mm de capacidad se instaló en cada apoyo. Separados a 300 mm y a 150 mm del eje central de la rótula de los apoyos, éstos tuvieron la función de registrar una posible rotación de la viga sobre el eje de apoyos.

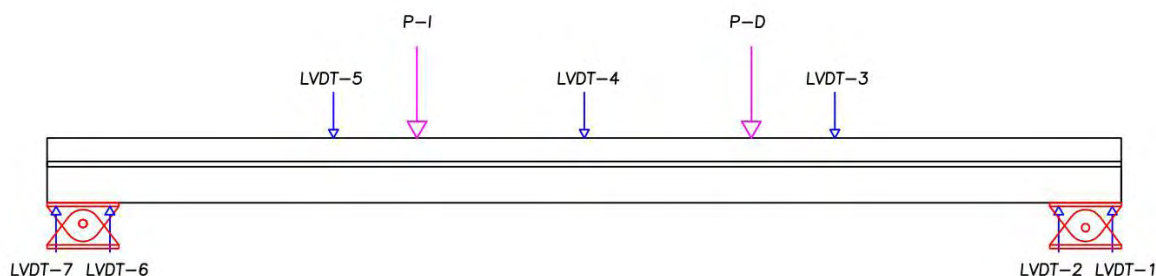


Figura 6-31 Esquema de posicionamiento de transductores LVDT 1 al 7 y celdas de carga P-I y P-D

El presfuerzo externo de PRF fue instrumentado con strain gages en un tramo recto y libre, y sobre cada desviador, para registrar el incremento de deformación por el efecto de desviación. Los strain gages utilizados fueron de uso general con una rejilla tipo 125UN, una resistencia de 120 Ω igual que en las varillas de refuerzo. Sólo se aplicó una capa de protección de barniz, ya que su uso era externo y de poca duración.

Aparte, se instalaron celdas de carga huecas de una capacidad de 20 ton en un extremo de cada varilla (Figura 6-32), para registrar la carga en las barras al momento de tensarlas, y posteriormente también en tiempo real cuando se aplicaban las cargas.

Todos los sensores se conectaron en conjunto con los strain gages, que se instalaron en las varillas al sistema de adquisición de datos para su adquisición simultánea en intervalos de 2 segundos.



Figura 6-32 Instrumentación adicional para reforzamiento – celdas de carga y strain gages SG

La carga se aplicó en ciclos con incrementos de 1000 kg. La velocidad aproximada de aplicación de carga fue de 1000 kg/min (Figura 6-33). Debido a que los controles de la bomba fueron manuales, se trató de utilizar esa velocidad en promedio. El primer ciclo de carga tenía como objetivo agrietar la viga. Se detuvo el ciclo cuando se observaban grietas

de hasta 0.3 mm de espesor. En cada ciclo se marcaron las grietas que se iban formando sobre las vigas, llevando un registro de su ubicación y de su espesor.



Figura 6-33 Ciclos de carga para agrietamiento

Posterior al agrietamiento, se instaló el presfuerzo externo de forma recta sin desviarse. El pretensado máximo que se quiso aplicar correspondía a 50% del f_{pu} de las varillas utilizadas. Para las varillas tipo V-ROD, con un f_{pu} previsto de 13,827 kg/cm² y un diámetro nominal de 12.1 mm, la carga de presfuerzo objetivo fue de 7950 kg. Para llegar a ese objetivo se determinó que los torones debían ser tensados a 2000 kg antes de ser desviados

Una vez alcanzada la carga de presfuerzo se procedió a la desviación de las barras, extendiendo los desviadores. La desviación causaba el incremento del presfuerzo esperado en la barra, y un incremento relativo de esfuerzos en el punto de desviación.

Una vez que se había alcanzado el nivel máximo de desviación, se procedió con la aplicación de carga nuevamente de forma cíclica con incrementos de 1000 kg a una velocidad de 1000 kg/min, hasta observar una falla (Figura 6-34).



Figura 6-34 Ciclos de carga con viga reforzada con PRF (o hasta falla)

Terminando el ciclo de carga con el reforzamiento, se procedió a retirar las barras de PRF y se aplicó de nuevo carga a la viga de forma cíclica hasta llegar a su límite, tomando una

deformación en el centro de 70 mm como criterio limitante, donde ya se esperaba la formación de grietas mayores a 1.0 mm (Figura 6-35).



Figura 6-35 Ciclos de carga con viga a límite último

6.6 Resultados de ensayos a vigas reforzadas

6.6.1 Viga 1 – Reforzamiento de PRFC

Se aplicó primeramente una carga para pre-agrietar la viga 1. Se detuvo el ciclo de carga cuando en el centro de la viga las grietas alcanzaban 0.3 mm de grosor (Figura 6-36, Figura 6-37), lo cual sucedió en este caso llegando a un desplazamiento de 32.5 mm (Figura 6-39). La carga registrada en ese momento fue apenas de 1,389.0 kg y no cumplía con las predicciones según cálculos por un factor de 0.45. Además, la celda C-I mostró un comportamiento errático brincando de positivo a negativo y entre valores. Se decidió retirar ambas celdas de carga, y proceder a repararlas por un ingeniero electromecánico y calibrarlas en la máquina universal del laboratorio. Las constantes de calibración para estas celdas se ajustaron a valores al doble de lo que se indicaba antes; la celda C-I cambió de constante de 0.012877 a 0.02678572 y la celda C-D de 0.0131 a 0.02592225.

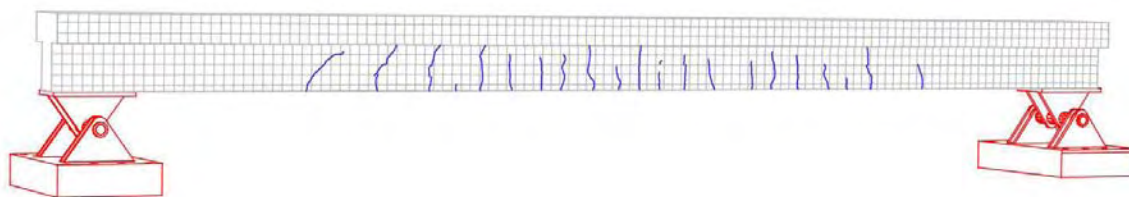


Figura 6-36 Pre-agrietamiento a 0.3 mm de espesor – vista frontal

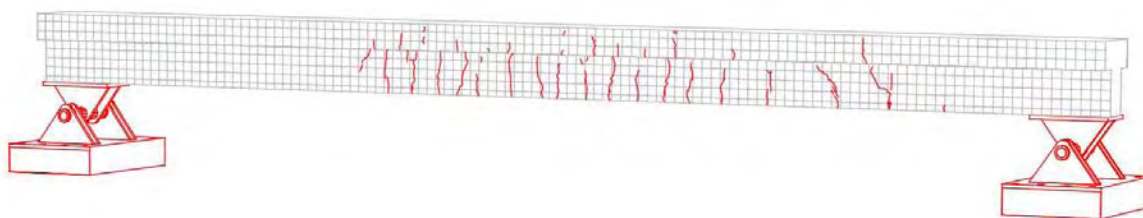


Figura 6-37 Pre-agrietamiento a 0.3 mm de espesor – vista trasera

Así, que se pudo deducir que la carga máxima alcanzada con la celda C-D fue de 2,889.2 kg, no obstante, se desconoce cuál fue la carga que se aplicó con el gato C-I debido a su comportamiento errático.

Con las celdas calibradas correctamente, se aplicó un solo ciclo de carga hasta el nivel de deflexión que se había alcanzado anteriormente, y así obtener el comportamiento de la viga con sección agrietada, como se puede observar en la Figura 6-39.

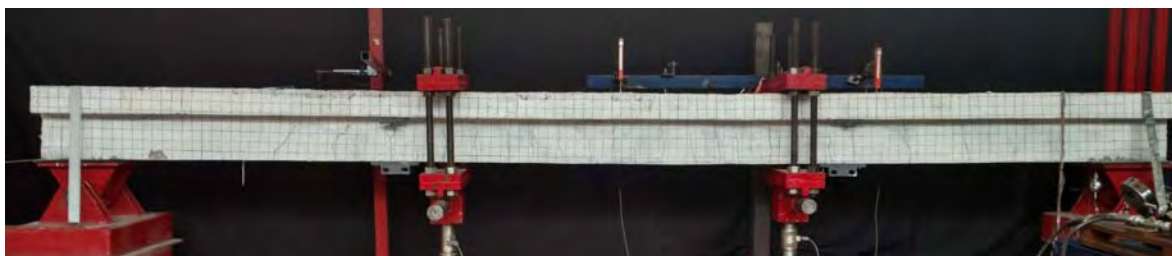


Figura 6-38 Viga 1 al final de ciclo de carga de agrietamiento – $\Delta_{centro} = 32.5$ mm

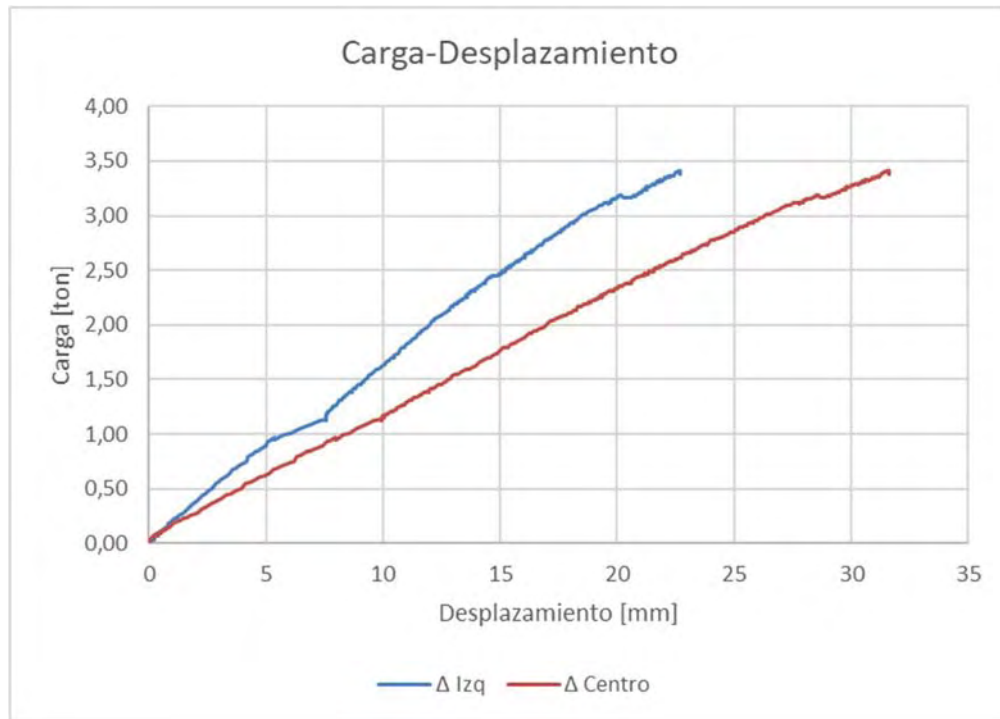


Figura 6-39 Comportamiento Carga-Desplazamiento con sección agrietada

Se siguió con la aplicación del reforzamiento con las barras de PRFC. Para eso se instalaron las vigas de reacción y los desviadores. En un extremo se instaló una celda de carga entre anclaje y viga de reacción y del otro lado (aquí nombrado el lado Derecho por su ubicación en las imágenes), se instaló un gato hidráulico hueco con capacidad de 20 ton / 15 cm de la marca ENERPAC entre la viga de reacción y el anclaje. Con bombas manuales se fue aumentando la presión en estos gatos de manera simultánea hasta alcanzar 1,500 kg de carga. El resultado del tensado se puede ver en la Figura 6-41.



Figura 6-40 Comportamiento Carga-Desplazamiento con sección agrietada

Una vez tensado, se inició el proceso de desviación de las barras de presfuerzo con los desviadores. El proceso se controló registrando el desarrollo de cargas en el presfuerzo y las deformaciones que causaba la aplicación de presfuerzo a la viga (Figura 6-41), hasta llegar a la desviación máxima (Figura 6-42).

Terminando la aplicación del presfuerzo externo, se pudo observar que las grietas prácticamente se habían cerrado, como era de esperarse.

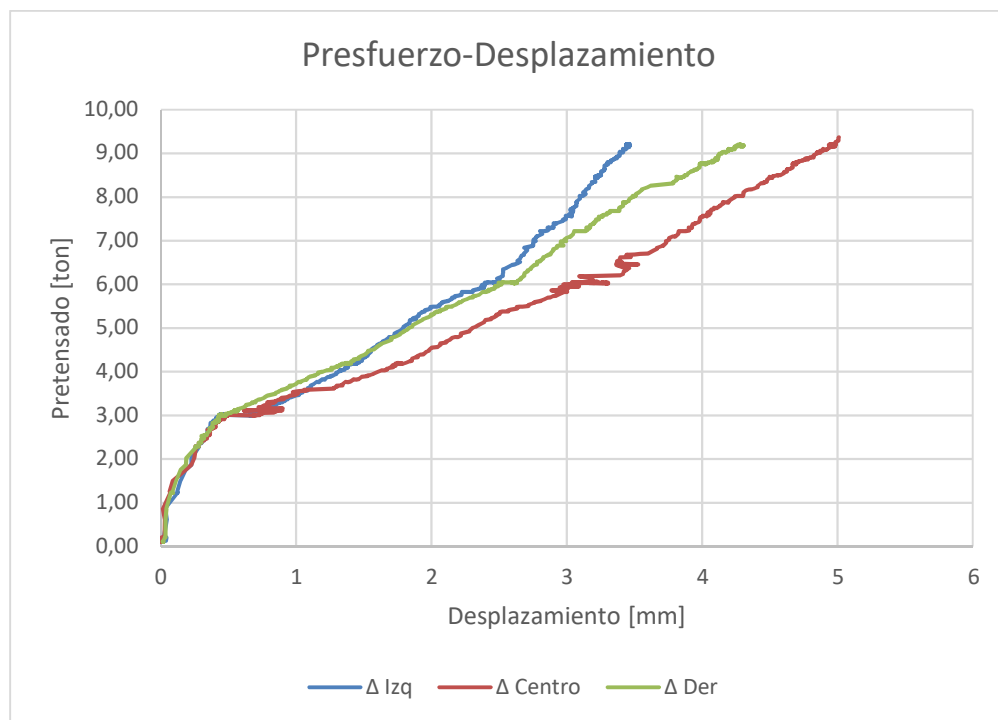


Figura 6-41 Desplazamiento debidos a aplicación de pretensado hasta 1.5 ton y posterior desviación



Figura 6-42 Viga 1 con presfuerzo externo aplicado y desviado

Después se aplicó el ciclo de carga con incrementos de 1 ton a la viga. En la Figura 6-43 se puede observar un comportamiento muy estable y lineal de la viga con el refuerzo de PRFC postensado. Se siguió con la aplicación de los ciclos de carga hasta llegar a una falla. La falla por ruptura de las barras de PRFC ocurrió a una carga aplicada de 4058 kg y hasta ahí se registró el comportamiento de carga-desplazamiento (Figura 6-43) sin detección de degradación de rigidez de la estructura. Las grietas se mantuvieron sin apertura adicional.

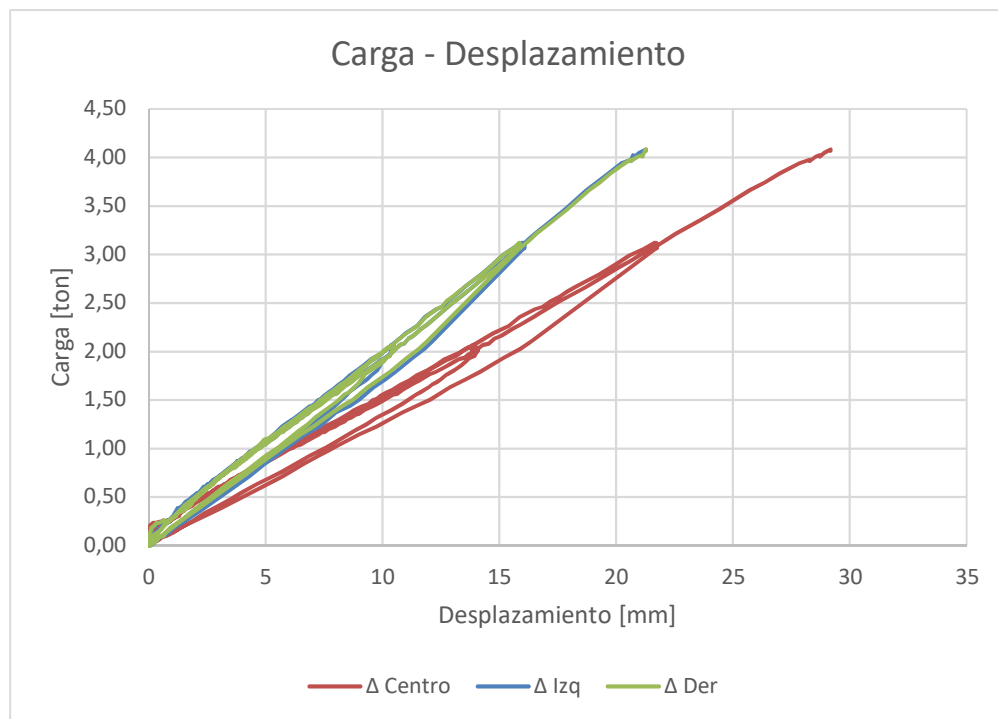


Figura 6-43 Gráfica carga – desplazamiento correspondiente a ciclo de carga

Se registró el desarrollo de carga en el anclaje de las barras de PRFC. Se utiliza en la Figura 6-44 la denominación PT-F (Frontal) y PT-T (Trasera) para las barras de PRFC según su ubicación en las fotos de registro (por ejemplo Figura 6-40) donde una varilla siempre es claramente visible y se denominó Frontal. Se observa que el desarrollo de la carga en los primeros ciclos es algo errático, lo cual se debe a la fricción que se va rompiendo en los desviadores de las barras. En el último ciclo de carga registrado se observa en la Figura 6-45 con la gráfica correspondiente aislada un comportamiento regular.

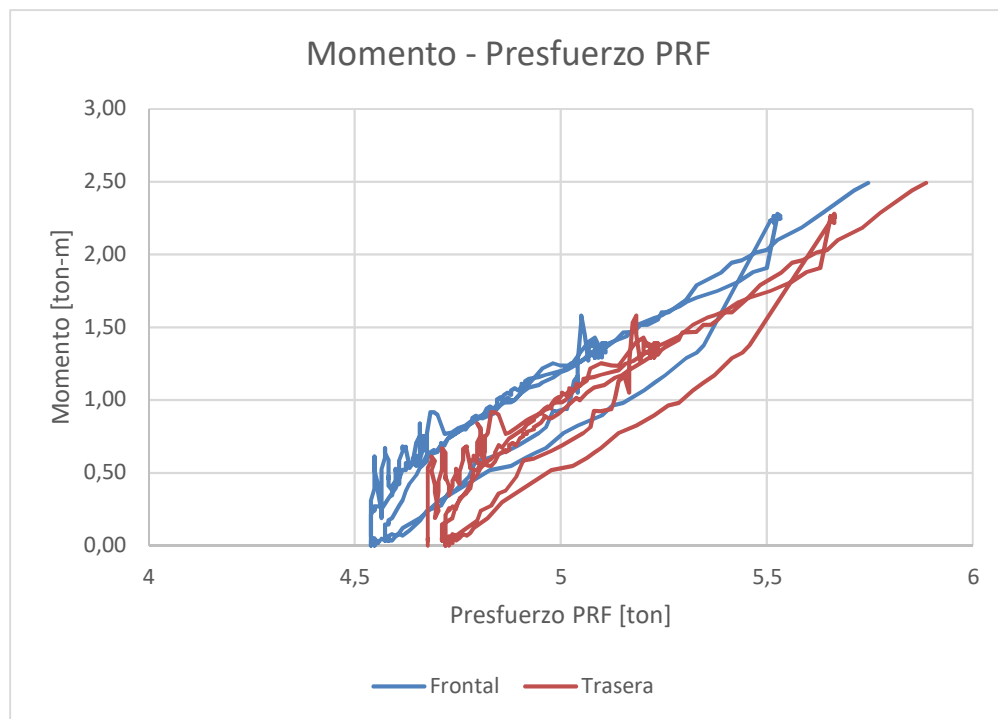


Figura 6-44 Presfuerzo en barra contra Momento debido a carga

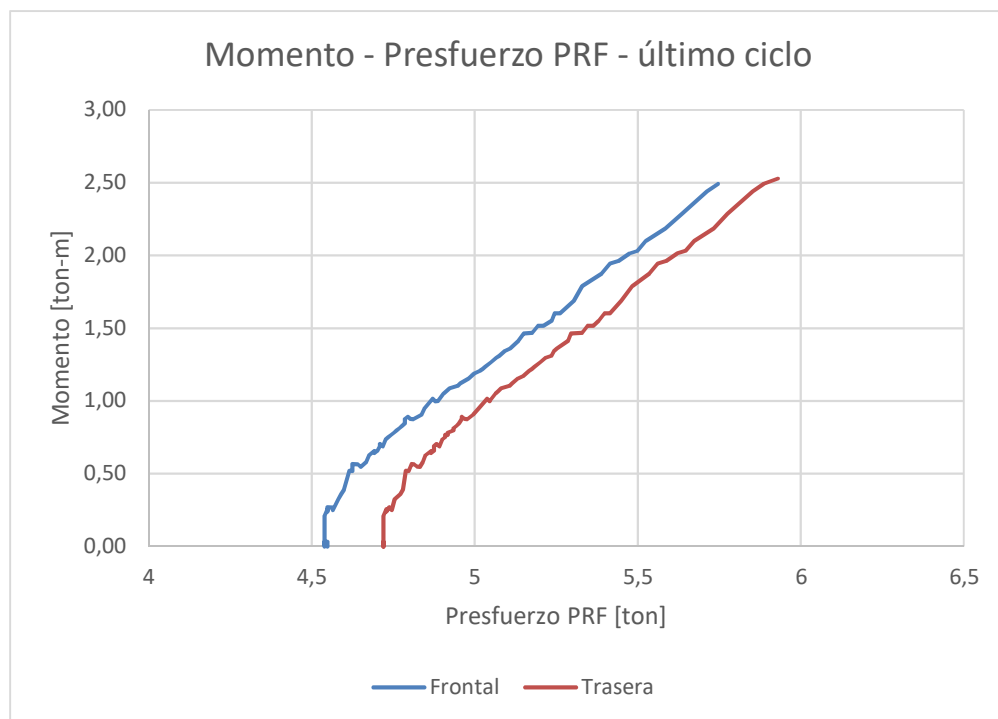


Figura 6-45 Último ciclo aislado de presfuerzo en barra contra momento debido a carga

La deformación de las barras se registró en sus tramos libres y sobre los desviadores. En las Figura 6-46 y Figura 6-47 se observan gráficas de desarrollo de esfuerzos. La nomenclatura de los strain gages en estas figuras siguen las siguientes reglas:

F o T: Barra Frontal o Trasera

L o D: Tramo Libre de la barra o en la cara exterior del punto de Desviación

1 o 2: El primer Strain Gage o el segundo según la Figura 6-32

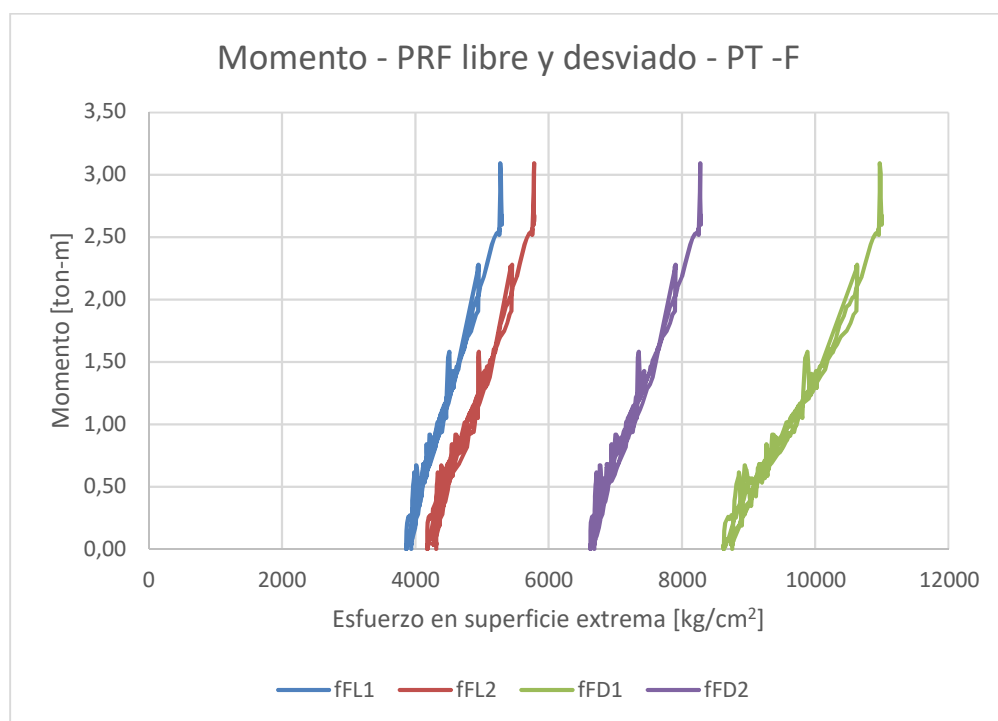


Figura 6-46 Desarrollo de esfuerzos en tramo libre y punto de desviación de la barra PT-F

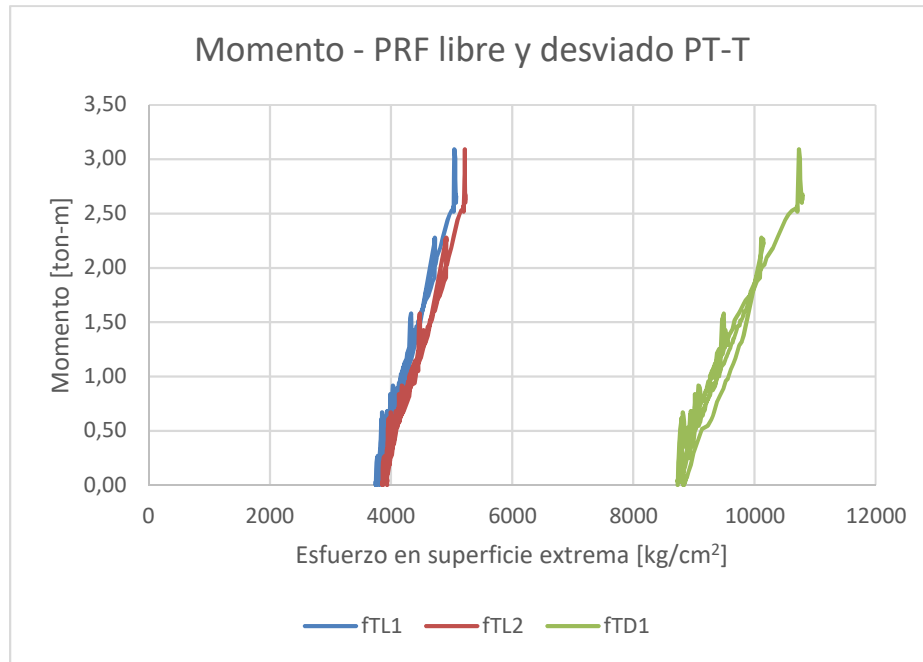


Figura 6-47 Desarrollo de esfuerzos en tramo libre y punto de desviación de la barra PT-T

Se observa un incremento importante de los esfuerzos debido a la desviación de las barras. También, se puede ver que la relación de esfuerzos en el punto de desviación f_{FD} y el esfuerzo en los tramos libres f_{FL} no es constante. El nivel de carga en la barra juega un papel importante, no obstante, en contra de la intuición del autor, disminuye el efecto de incremento de esfuerzos con un incremento en la carga de la barra. En la Figura 6-48 se observa la distribución del factor de incremento k_f con respecto al nivel de esfuerzos normalizado sobre el f_{pu} de la barra. En el intervalo de carga estudiado de 30% a 40% del f_{pu} , se puede observar un factor de incremento de 1.9 a 2.33.

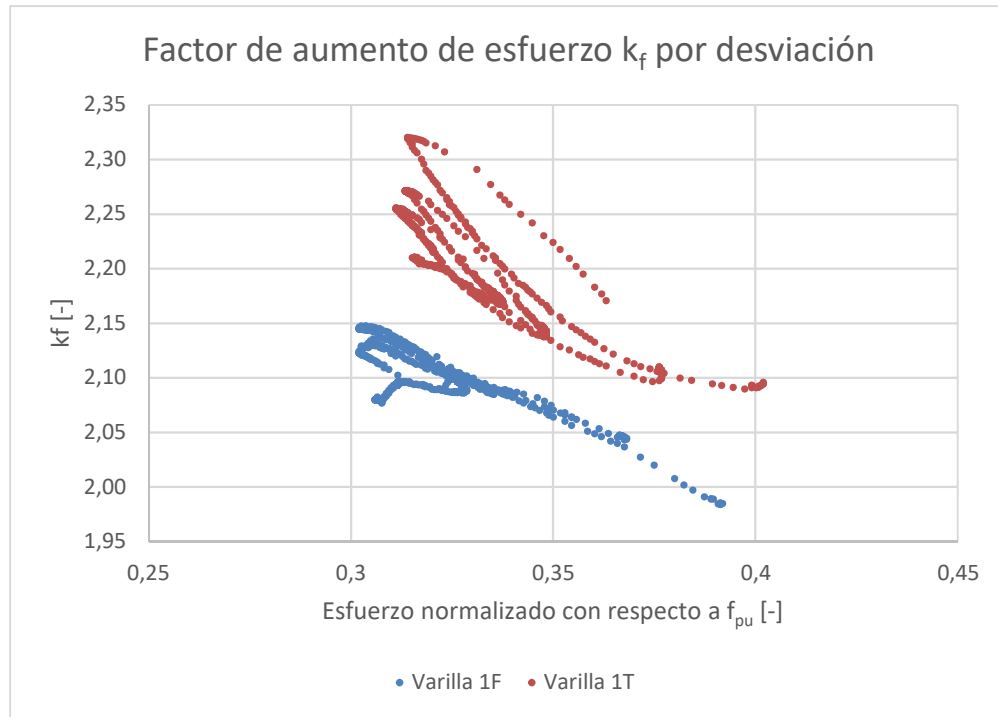


Figura 6-48 Incremento de esfuerzos en fibra exterior de barras debido a cambio de carga

La falla, que ocurrió a una carga de 4,058 kg por punto de carga, ocurrió en las barras de PRFC a la salida de los anclajes. La rótula no giró debidamente, y causó un quiebre forzado en la barra. Este tipo de quiebre causó cizallamiento en la barra y con eso la falla instantánea de la misma, como se puede observar en la Figura 6-49.



Figura 6-49 Falla por cizallamiento de las barras de PRFC en la rótula de apoyo de los anclajes

La viga hasta ese punto había demostrado un comportamiento lineal, por lo cual se intentó reforzarla una segunda vez. No obstante, los anclajes que se estaban utilizando, eran los

anclajes sin el ajuste al diámetro exacto de las varillas que suministraron para los ensayos de vigas. Se instalaron los anclajes añadiendo un recubrimiento de epoxi reforzado con fibras de vidrio sobre las barras, así generando una adhesión adicional entre barras y cuñas. No obstante, la falta de entrelazado mecánico entre barra y cuñas, y la geometría de las cuñas que se fabricaron para diámetros mayores, no permitieron una resistencia adecuada. Las barras se deslizaron en los anclajes a niveles de carga bajos en el proceso de aplicación de desviación.

Debido a una cantidad limitada de barras para los ensayos, se optó por ensayar la viga 1 finalmente al límite de su capacidad, para evaluar su comportamiento no-reforzado. Aparte, se decidió cambiar el diseño de las cuñas, adaptándolas al diámetro exacto requerido de 12.1 mm y fabricarlas con un control geométrico riguroso que se detalló en Capítulo 5.3.

Se aplicaron de nuevo ciclos de carga incrementales a la viga, y se detuvo el proceso a una carga de 5,043 kg, cuando las grietas alcanzaron un grosor de 1 mm y la deformación de la viga se comportó notoriamente no lineal llegando a 67.25 mm de desplazamiento en la sección central de la viga. Se observa el comportamiento correspondiente en la Figura 6-50 y en la fotografía final en la Figura 6-51. El comportamiento corresponde a la falla dúctil de una viga presforzada con un desarrollo de capacidad de deformación importante. No se llevó a la falla última, debido a que no es el objetivo de este estudio evaluar la falla de una trabe pretensada.

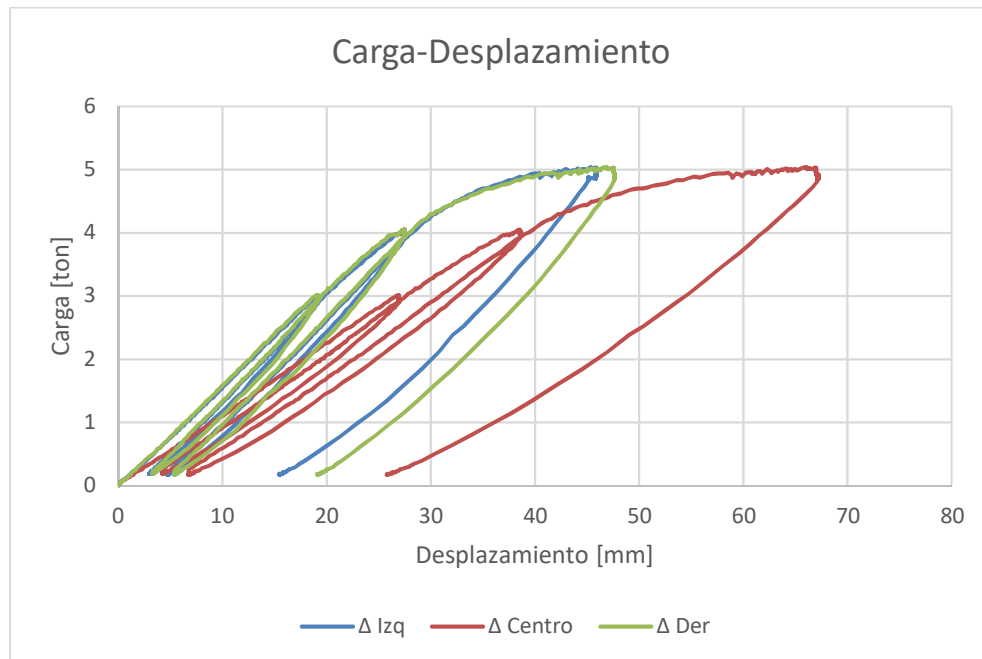


Figura 6-50 Gráfica carga vs. Desplazamiento hasta el límite último de la viga 1

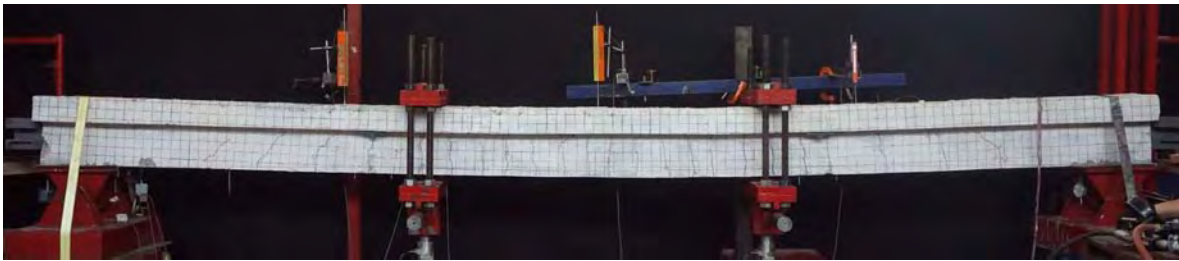


Figura 6-51 Deformación visible de la Viga 1 alcanzando su falla última

El patrón de grietas indica un comportamiento de falla a flexión, y se puede observar el desarrollo de grietas muy inclinadas hacia los extremos debidas a la influencia del presfuerzo interno de las vigas pretensadas (Figura 6-52). Se puede revisar el desarrollo paso a paso de la formación de grietas en las vigas ensayadas en el Apéndice B – Agrietamiento.

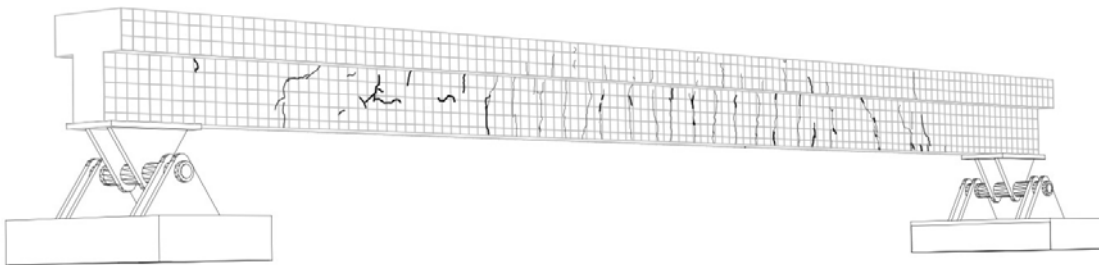


Figura 6-52 Vista general de viga agrietada

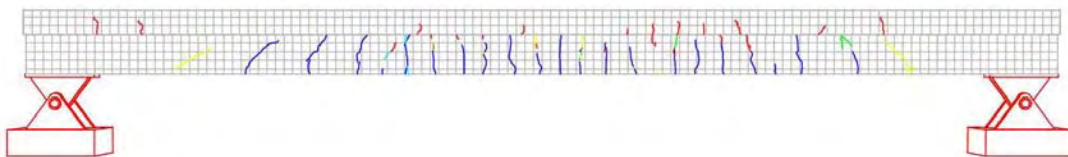


Figura 6-53 Vista frontal de viga agrietada

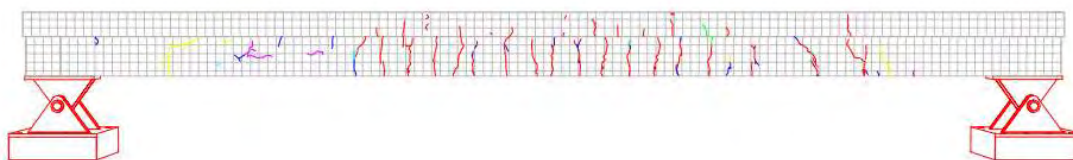


Figura 6-54 Vista trasera de viga agrietada

En la Figura 6-54 se observan las grietas formadas en el proceso de pre-agrietamiento en color rojo. Se mantuvieron por debajo de 0.1 mm de espesor después de aplicar el presfuerzo externo, y también en el proceso de aplicación de carga con el refuerzo externo con PRFC activo. Después de la remoción del presfuerzo, se llevó la viga a su capacidad última, donde las grietas anteriormente formadas se abrieron hasta 1 mm de espesor y se extendieron. Aparte, se formaron algunas grietas adicionales (color amarillo, verde y morado).

En la Figura 6-53 se observa un patrón similar registrado del lado opuesto de la viga. Aquí, las grietas que se formaron en el proceso de pre-agrietamiento, están marcadas en azul. Se registraron los mismos espesores de grieta que en el lado opuesto de la viga.

6.6.2 Viga 2 – Reforzamiento de PRFC

La viga 2 se llevó por el proceso de pre-agrietamiento, en esta ocasión pudiendo registrar los ciclos de carga correspondientes. Se logró el objetivo de un espesor de grietas de 0.3 mm y un desplazamiento de 36 mm en el centro del claro de la viga. La mayor parte de las grietas se iniciaron en el primer ciclo de carga. El patrón de grietas es parecido al patrón observado en la Viga 1 (Figura 6-55, Figura 6-56 y Figura 6-57).



Figura 6-55 Pre-agrietamiento a 0.3 mm de espesor – vista frontal

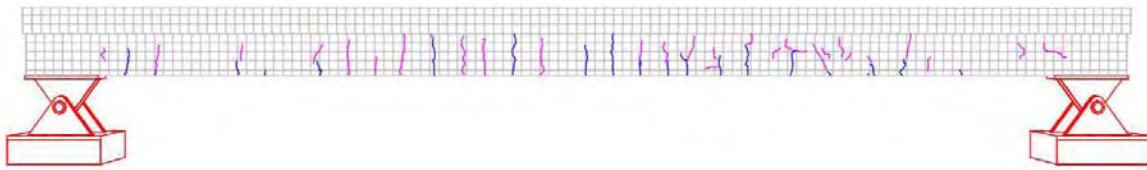


Figura 6-56 Pre-agrietamiento a 0.3 mm de espesor – vista frontal

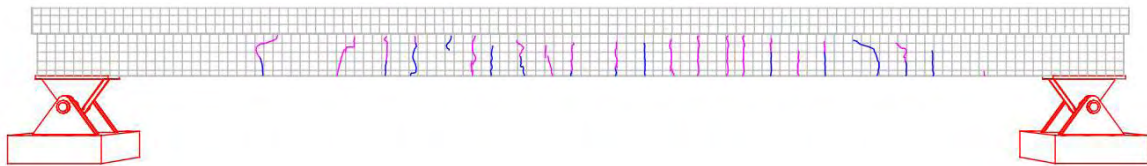


Figura 6-57 Pre-agrietamiento a 0.3 mm de espesor – vista trasera

En la gráfica de carga contra desplazamiento, que se muestra en la Figura 6-58, se observa un cambio de pendiente claro en el centro de la viga a 580 kg, indicando el inicio de formación de grietas. También en la Figura 6-59, donde se muestra el desarrollo de deformación en la varilla longitudinal debido a la carga aplicada, se puede observar el inicio de la formación de grietas a una carga de 580 kg, donde se registraron cambios notorios.

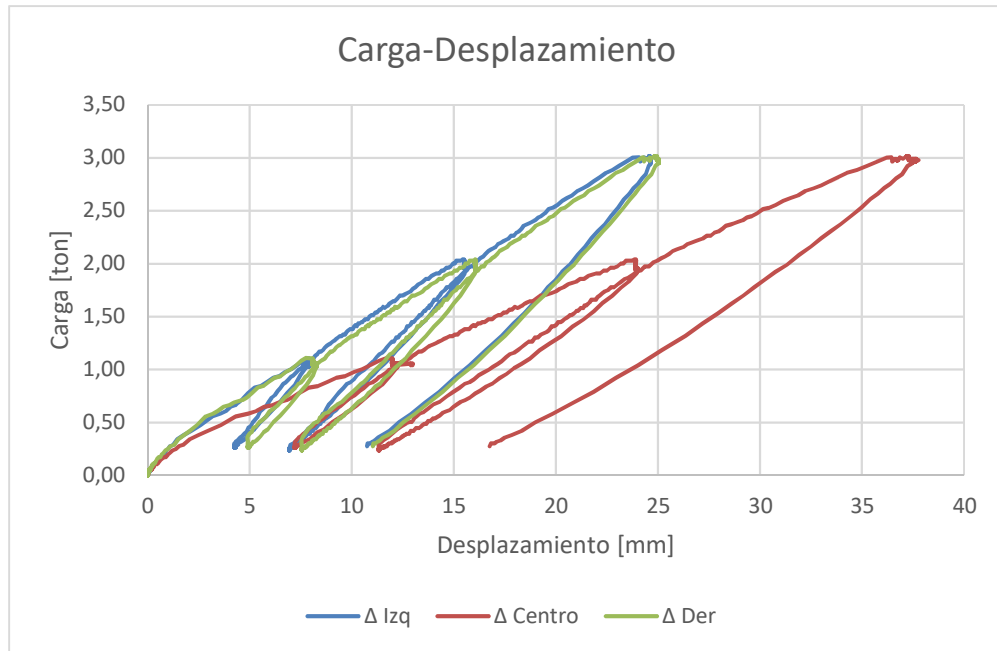


Figura 6-58 Comportamiento Carga-Desplazamiento debido a carga de pre-agrietamiento

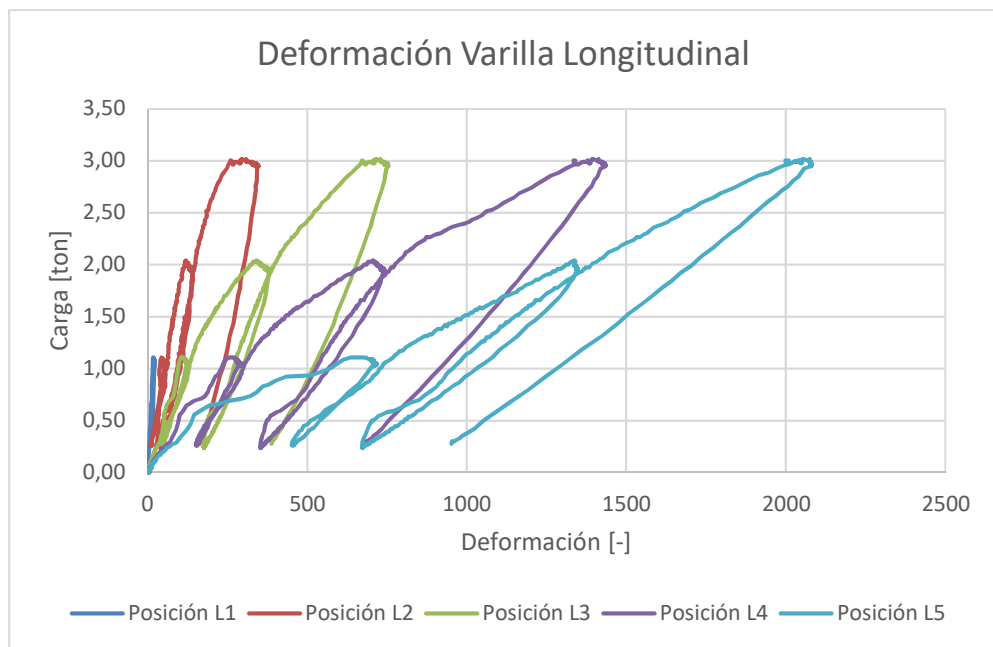


Figura 6-59 Deformación de varilla longitudinal en el ciclo de carga de pre-agrietamiento

Después se procedió a la instalación del sistema de presfuerzo externo con barras de PRFC. A éste se aplicó inicialmente una precarga de 2,500 kg, y posteriormente se inició el proceso de desviación. A pesar, de que después de observar la falla por cizallamiento en la viga se hayan rebajado aristas en las placas de apoyo, y se haya cuidado que la inclinación de los anclajes siguiera el ángulo de desviación en el proceso de su aplicación, se observó

nuevamente este tipo de falla en la salida de las barras de las rótulas de apoyo. Esta falla sucedió antes de llegar a la desviación máxima de la barra (Figura 6-60), por lo que no se alcanzó a la aplicación de cargas en esta ocasión. Las placas de apoyo y la rótula se trabajaron de nuevo en el torno y con esmeril, abriendo la salida más, principalmente hacia el borde inferior, para evitar el rozamiento que se puede observar en la Figura 6-61.

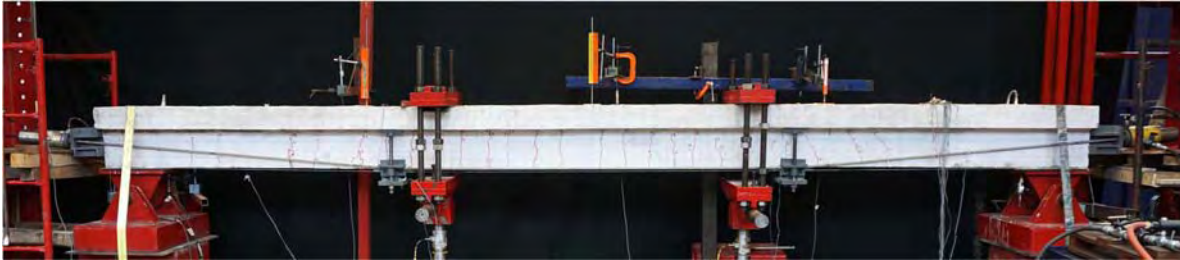


Figura 6-60 Desviación máxima a la cual se llegó con el primer refuerzo de la Viga 2



Figura 6-61 Punto de salida de barra de rótula de apoyo

Una vez terminada la adecuación, se procedió a la instalación de un segundo juego de varillas de PRFC. Se utilizaron las varillas con su último diseño, y para evitar cualquier posibilidad de falla, se colocó primero una capa de epoxi reforzado con fibras de vidrio sobre la varilla, antes de instalar las cuñas (Figura 6-62). Antes que fraguara el epoxi, se aplicó una carga de pre-acuñamiento de 2,500 kg a cada anclaje. En el ensaye a tensión posterior con estos anclajes (Figura 6-63), se verificó que el uso del epoxi no es necesario. De hecho, la adhesión del epoxi no corresponde al mecanismo principal de transferencia de carga. Sólo a cargas menores a 30% de f_{pu} transfiere adecuadamente cargas, y después predominó la transferencia de carga por entrelazado mecánico.

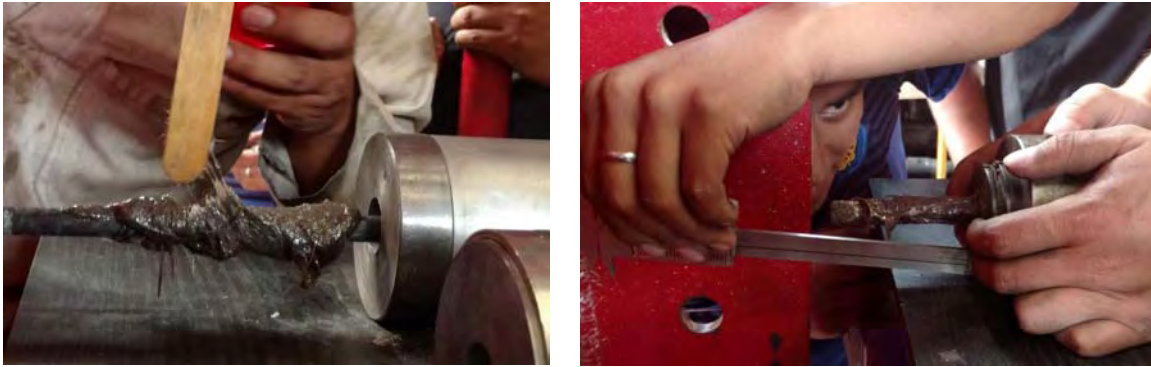


Figura 6-62 Instalación de cuñas adheridas con epoxi a la barra PRFC

Una vez fraguado el epoxi en los anclajes después de 24 horas, se procedió a la aplicación de carga de pretensado a las barras de PRFC. Se aplicaron 2,500 kg de carga de presfuerzo, y en seguida se aplicó la desviación a las barras tensadas. De nuevo se observó una recuperación de flecha de la viga (Figura 6-63) y el cierre de las grietas generadas.

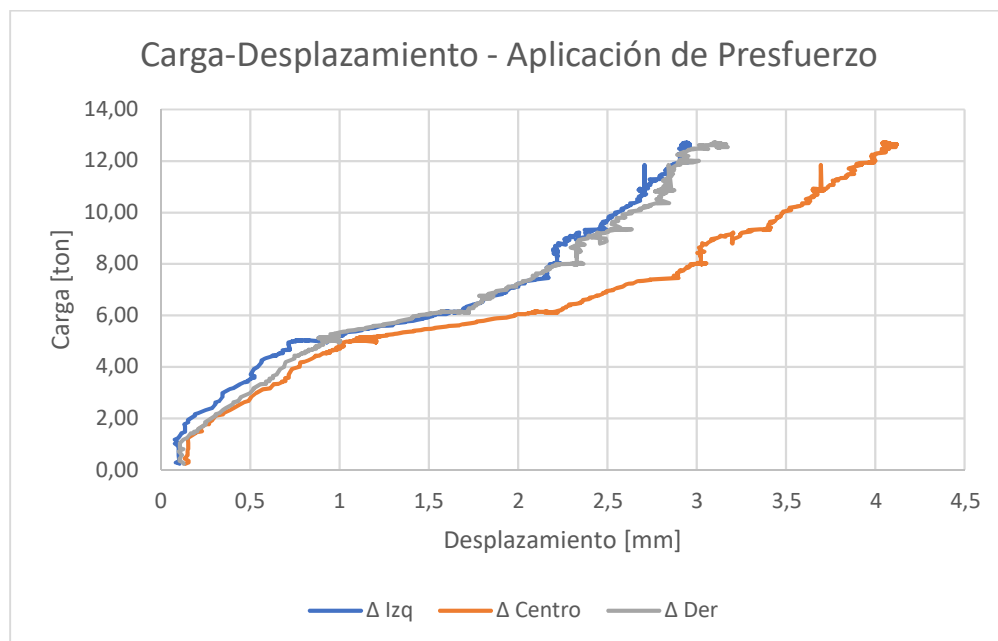


Figura 6-63 Deformación de viga debida a la aplicación de presfuerzo

Se procedió a la fijación de los desviadores con tornillos a la placa de reparto y se verificó que la inclinación de los anclajes correspondiera al ángulo de desviación de las barras (Figura 6-64).

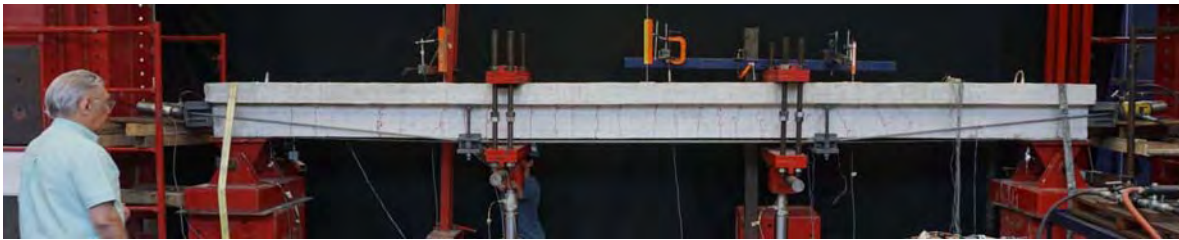


Figura 6-64 Viga 2 con presfuerzo externo aplicado y desviado

Se aplicó el ciclo de carga previsto para este ensaye y se observó de nuevo un comportamiento estable y lineal de la viga reforzada con PRFC postensado (Figura 6-65 y Figura 6-66). En esta ocasión se dio una falla a una carga aplicada de 5,071 kg. El desarrollo de deformación correspondió muy bien a la deformación observada en la Viga 1.

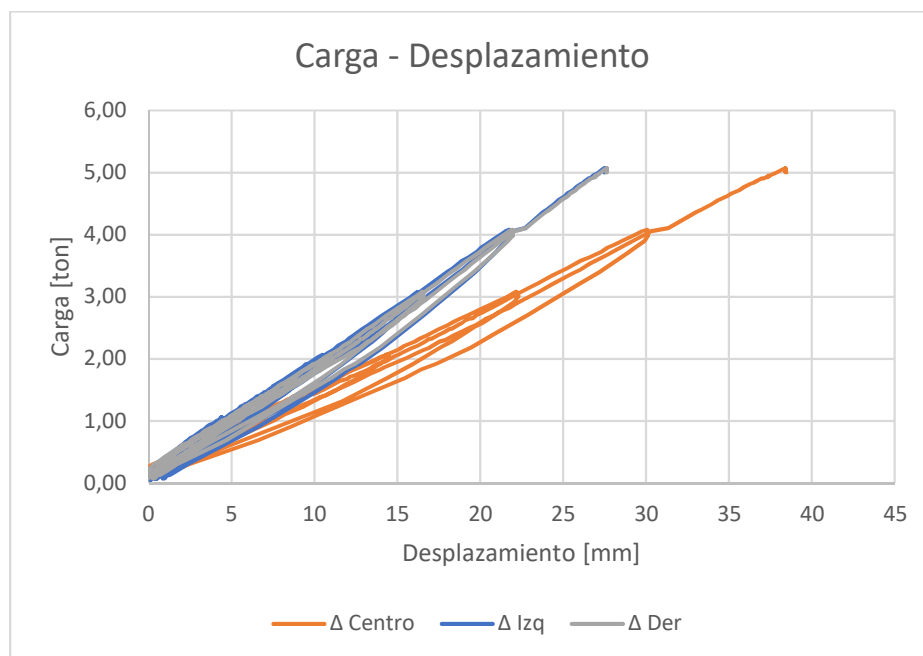


Figura 6-65 Gráfica carga – desplazamiento correspondiente a ciclos de carga

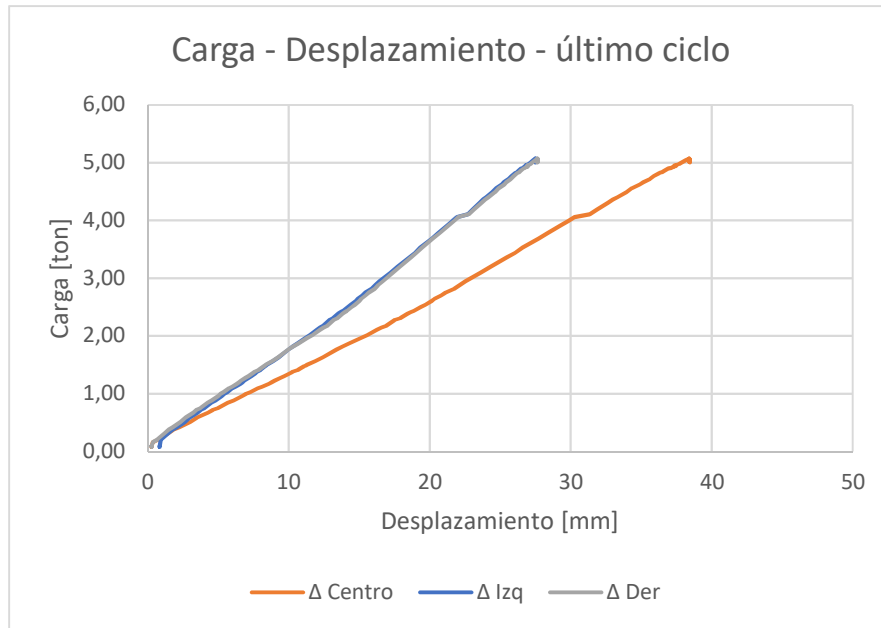


Figura 6-66 Gráfica carga – desplazamiento correspondiente a último ciclo de carga

Se incrementó el presfuerzo en las barras exteriores de PRFC conforme se flexionaba la viga, como se puede ver en la Figura 6-67, llegando a 7,698 kg de presfuerzo registrado al momento de falla. Se observa que el desarrollo de la carga en los primeros ciclos es de nuevo algo errático, lo cual se debió a la fricción que se va rompiendo en los desviadores de las barras. En el último ciclo de carga registrado se observa en la Figura 6-68 con la gráfica correspondiente aislada un, comportamiento regular.

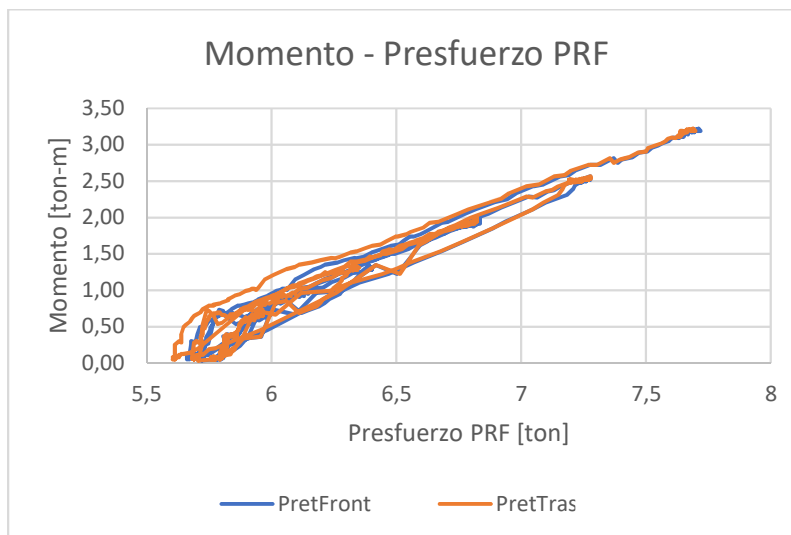


Figura 6-67 Carga en barra contra momento aplicado

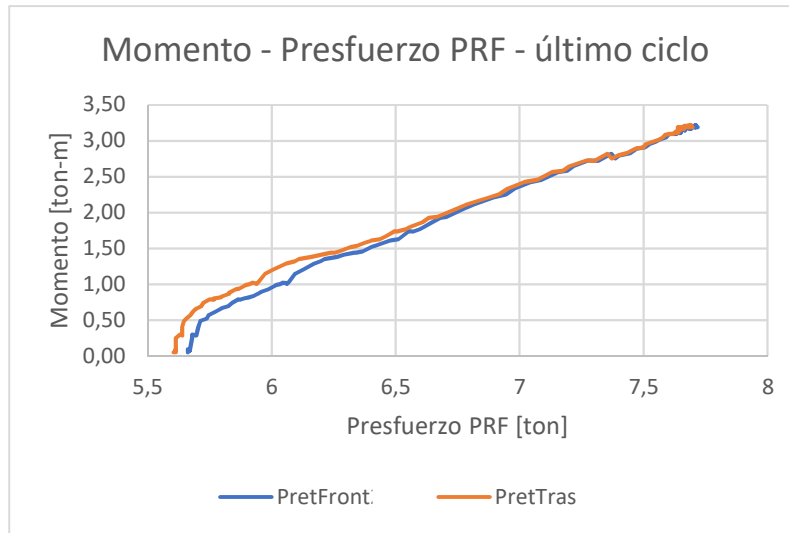


Figura 6-68 Ultimo ciclo aislado de carga en barra contra momento aplicado

El desarrollo de esfuerzos en la barra de PRFC se mostró, igual que en el ensaye a la Viga 1, con diferencias grandes entre el tramo libre y el tramo desviado. Se observa en Figura 6-69 y Figura 6-70 un incremento importante de los esfuerzos debido a la desviación de las barras, donde PT-F se refiere a la barra de presfuerzo frontal y PT-T a la trasera. De hecho, en esta ocasión la falla final se debió a este incremento de esfuerzo en las barras, como se puede ver en la gráfica de la Figura 6-69.

El límite de ruptura f_{pu} de la barra es de 13,072.4 kg/cm² y se registró en la superficie exterior de la barra en el punto de desviación esfuerzos de 14,430 kg/cm². Este exceso de esfuerzo con respecto al límite de del material, causó que las fibras exteriores se cortaran.

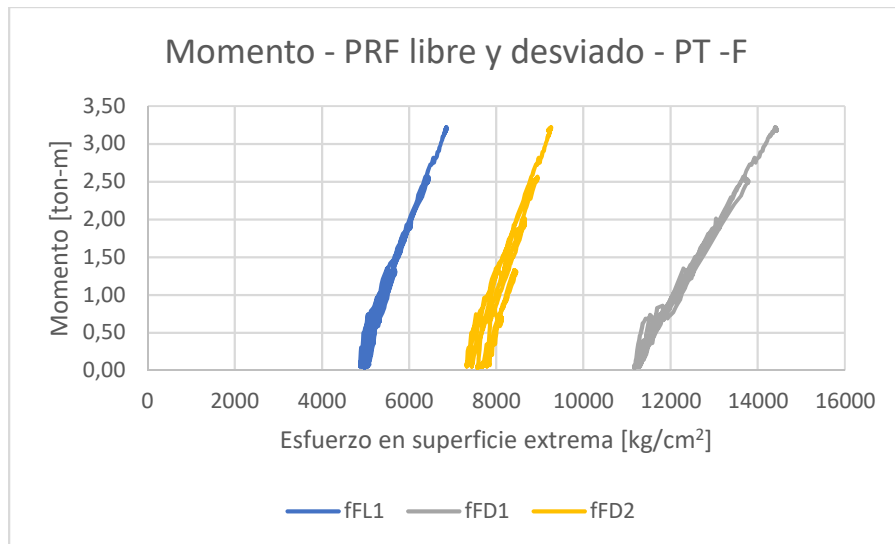


Figura 6-69 Desarrollo de esfuerzos en tramo libre y punto de desviación de la barra PT-F

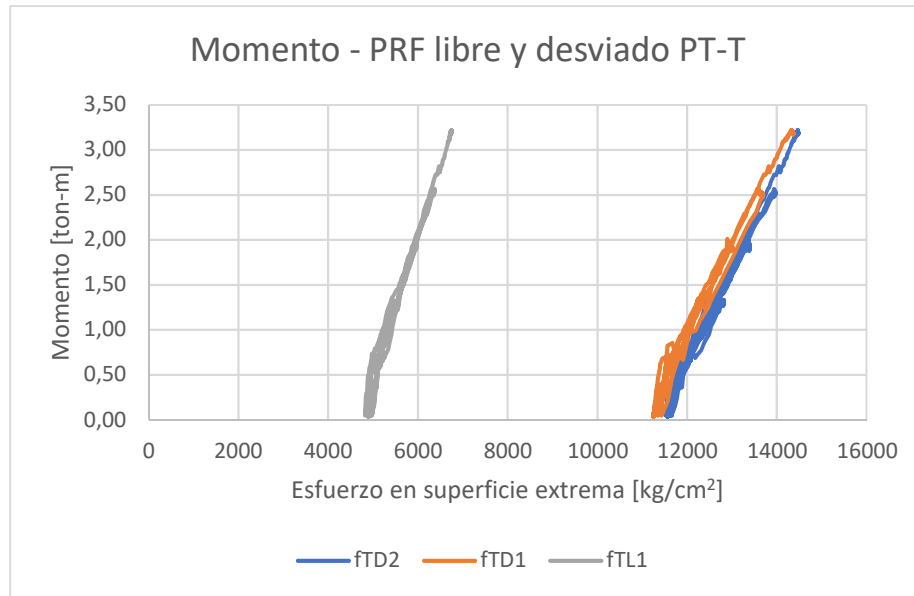


Figura 6-70 Desarrollo de esfuerzos en tramo libre y punto de desviación de la barra PT-T

En la Figura 6-71 se observa la distribución del factor de incremento k_f con respecto al nivel de esfuerzos normalizado sobre el f_{pu} de la barra. En el intervalo de carga estudiado de 36% a 52% del f_{pu} , se puede observar un factor de incremento de 2.1a 2.39.

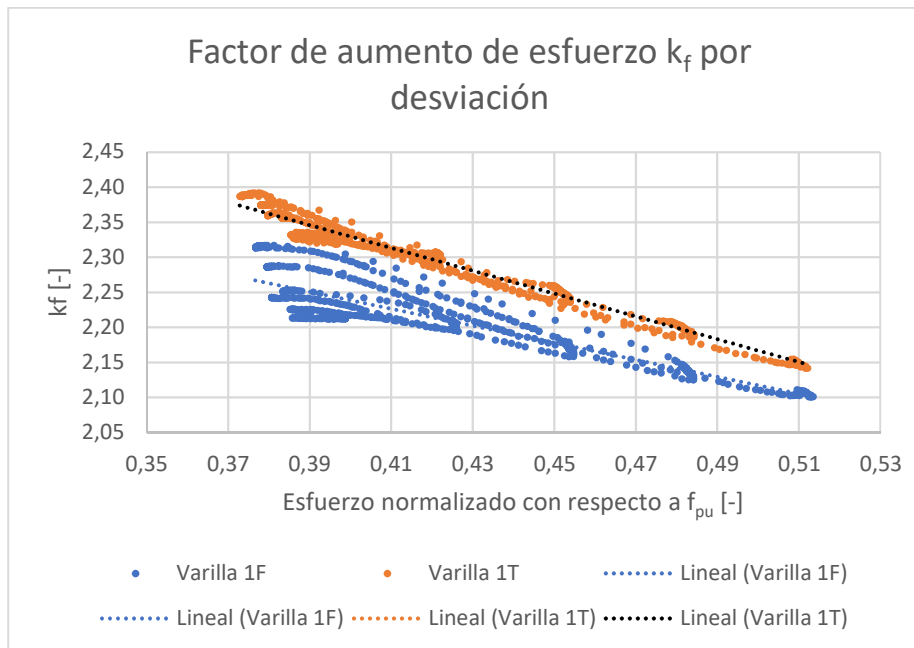


Figura 6-71 Incremento de esfuerzos en fibra exterior de barras debido a cambio de carga

En la Figura 6-72 y la Figura 6-73 se ve la falla de las varillas. En la Figura 6-74 se puede observar la sección de la barra que se encontraba sobre el desviador izquierdo de la barra

frontal. Se nota que las fibras en la superficie ya empezaron a falla , lo cual indica que esa parte de la barra también estaba excediendo el límite de ruptura del PRFC.



Figura 6-72 Falla de barra PRFC sobre el desviador derecho



Figura 6-73 Falla de barra PRFC sobre el desviador derecho a detalle

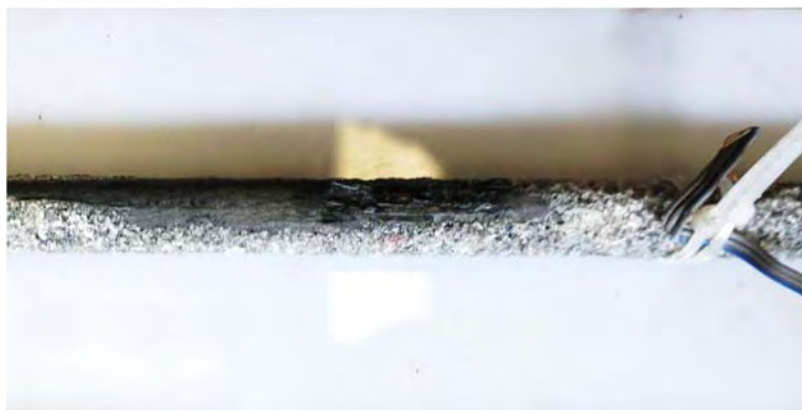


Figura 6-74 Inicio de falla en la superficie sobre el desviador izquierdo

Una vez que se retiraron todos los elementos del presfuerzo de la viga, se llevó a la falla sin el reforzamiento. La carga máxima aplicada fue de 3,925 kg con un desplazamiento máximo de 63.2 mm en el centro del claro de la viga, como se puede observar en la Figura 6-75. Las grietas que se formaron se abrieron a un espesor de 1.0 mm, e indican un patrón correspondiente a una falla por flexión (Figura 6-77 y Figura 6-78).

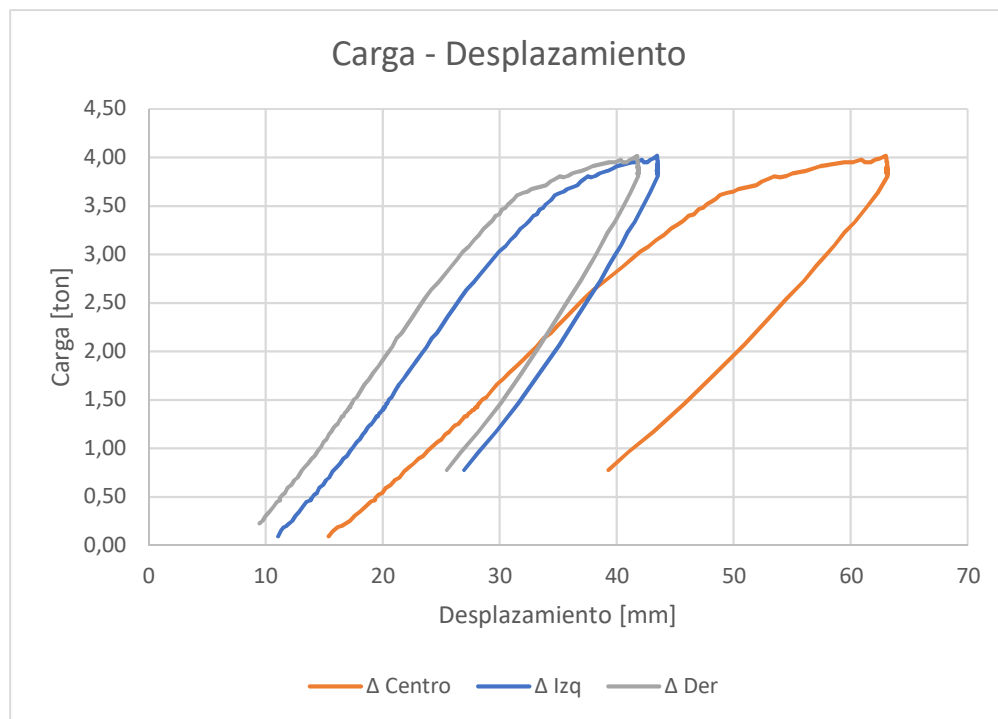


Figura 6-75 Gráfica carga vs. Desplazamiento hasta el límite último de la viga 2



Figura 6-76 Deformación visible de la Viga 2 alcanzando su falla última

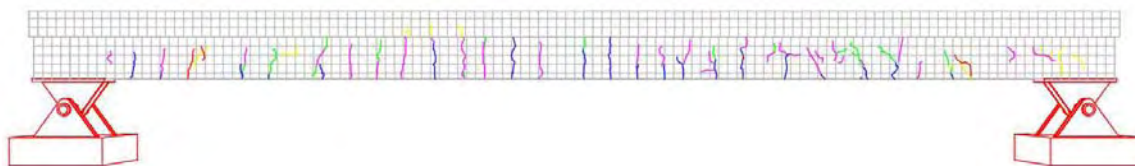


Figura 6-77 Vista frontal de viga agrietada

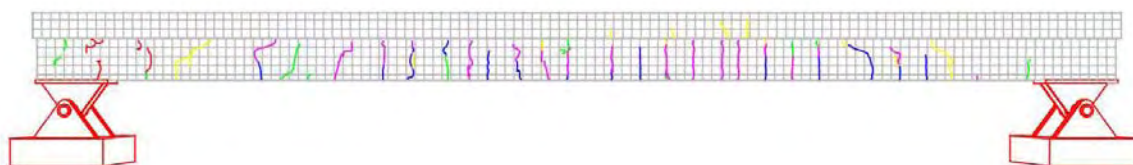


Figura 6-78 Vista trasera de viga agrietada

6.6.3 Viga 3 – Reforzamiento con torón de acero

La Viga 3 siguió el mismo patrón de las Vigas 1 y 2 para las pruebas de carga, que se le aplicaron. La diferencia con respecto a las otras vigas fue, que el refuerzo exterior se aplicó con torones de acero de presfuerzo comúnmente utilizados de 1/2". Los resultados obtenidos sirven para una comparativa de comportamiento de la viga utilizando por un lado barras de presfuerzo de PRFC y por otro lado acero de presfuerzo.

Se siguió el mismo protocolo, de pre-agrietar inicialmente la viga, hasta llegar a un espesor de grieta de 0.3 mm (Figura 6-79). El patrón de grietas es parecido al patrón observado en la Viga 1 y la Vigas 2 (Figura 6-80, Figura 6-81 y Figura 6-82)



Figura 6-79 Pre-agrietamiento a 0.3 mm de espesor – vista frontal

El comportamiento de la viga en el proceso de pre-agrietamiento es parecido al de las Vigas 1 y 2. En este caso se llegó a una carga de 3,800 kg para obtener una deflexión de 33 mm en el centro del claro y grietas de un espesor de 0.3 mm, según lo que se puede ver en la Figura 6-83.

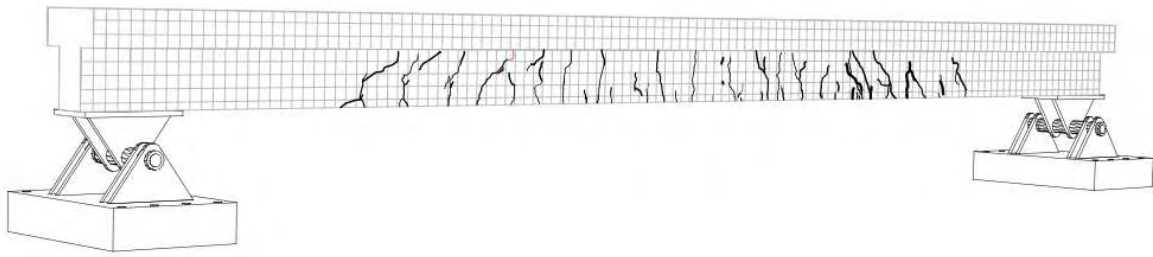


Figura 6-80 Pre-agrietamiento a 0.3 mm de espesor – vista frontal

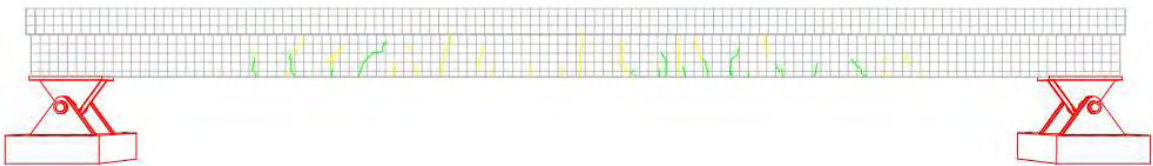


Figura 6-81 Pre-agrietamiento a 0.3 mm de espesor – vista frontal

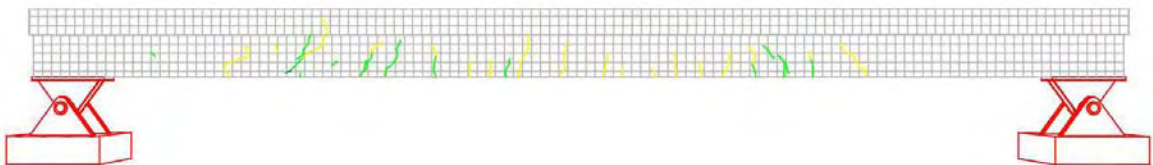


Figura 6-82 Pre-agrietamiento a 0.3 mm de espesor – vista trasera

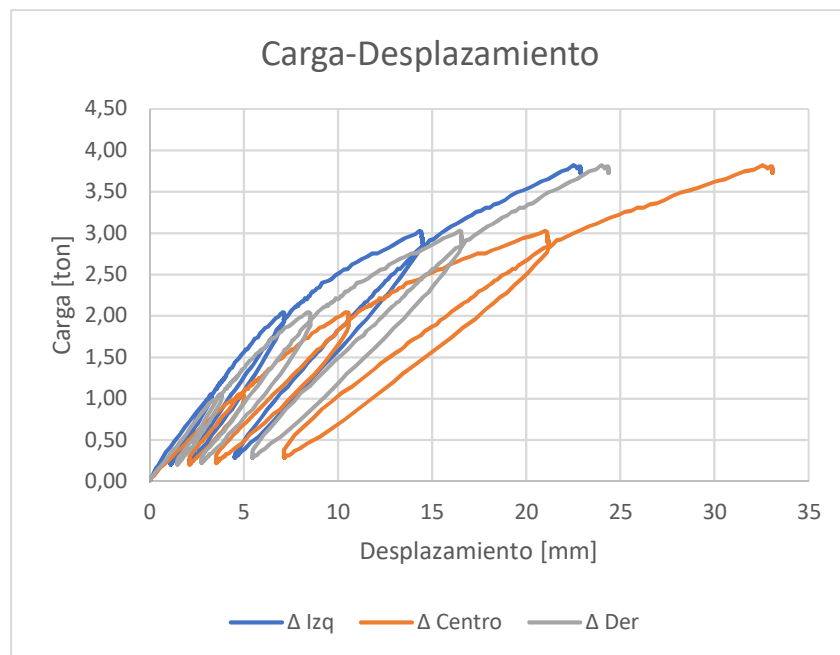


Figura 6-83 Comportamiento Carga-Desplazamiento debido a carga de pre-agrietamiento

Una vez agrietada, se procedió a aplicar el refuerzo a base de torones de acero (Figura 6-84). Éste se pretensó a 2,000 kg y se aplicó la desviación, igual que en las Vigas 1 y 2, registrando la deformación que se generó con el presfuerzo (Figura 6-85). En este caso no se tuvo la necesidad de precauñar debido al tipo de anclaje utilizado tipo SureLock de 1/2" con seguro de resorte (Figura 6-86).



Figura 6-84 Desviación con el refuerzo de torones de acero de la Viga 3

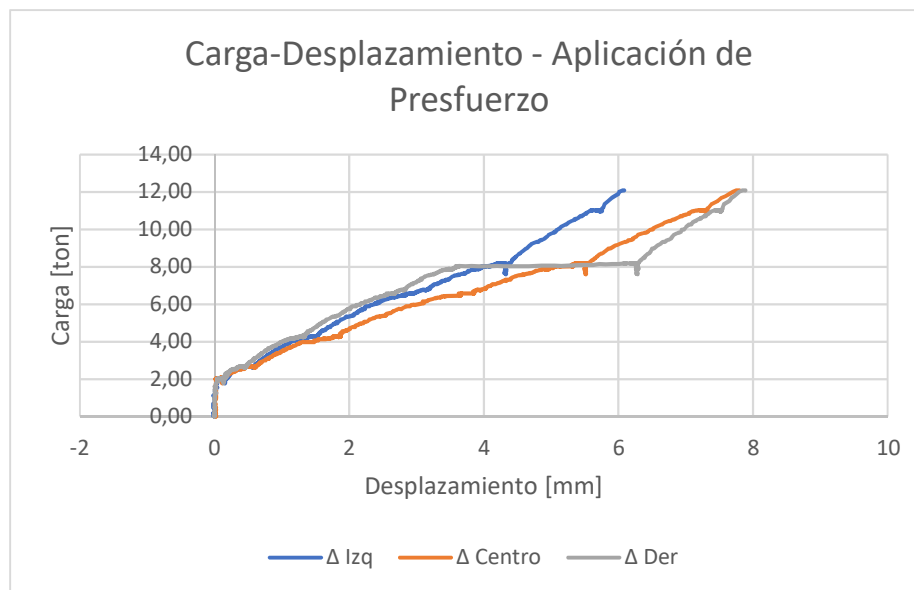


Figura 6-85 Deformación de Viga 3 debida a la aplicación de presfuerzo



Figura 6-86 Anclajes para torones de acero de 1/2" tipo SureLock

Se aplicó el mismo protocolo de carga, que se había utilizado para las Vigas 1 y 2. En este caso se llevó la carga aplicada a 7,000 kg, donde se alcanzaron 38.1 mm de deflexión en el centro del claro. Aquí el mayor módulo de elasticidad del torón de acero se hace notorio, generando una mayor rigidez a la estructura y así disminuyendo el nivel de deflexión de la viga (Figura 6-87 y Figura 6-88). La rotación en los apoyos se mantuvo estable en el transcurso del ensaye (Figura 6-89).

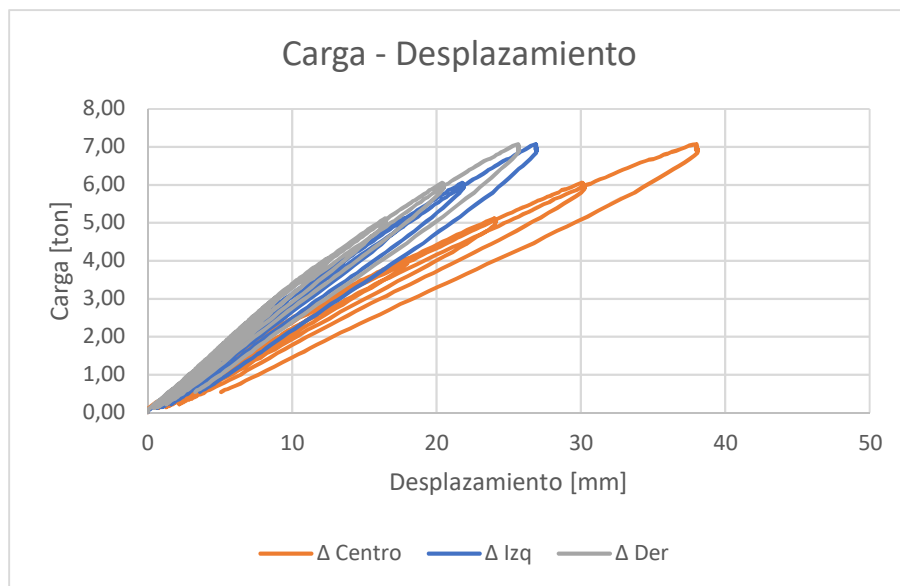


Figura 6-87 Gráfica carga – desplazamiento correspondiente a ciclos de carga

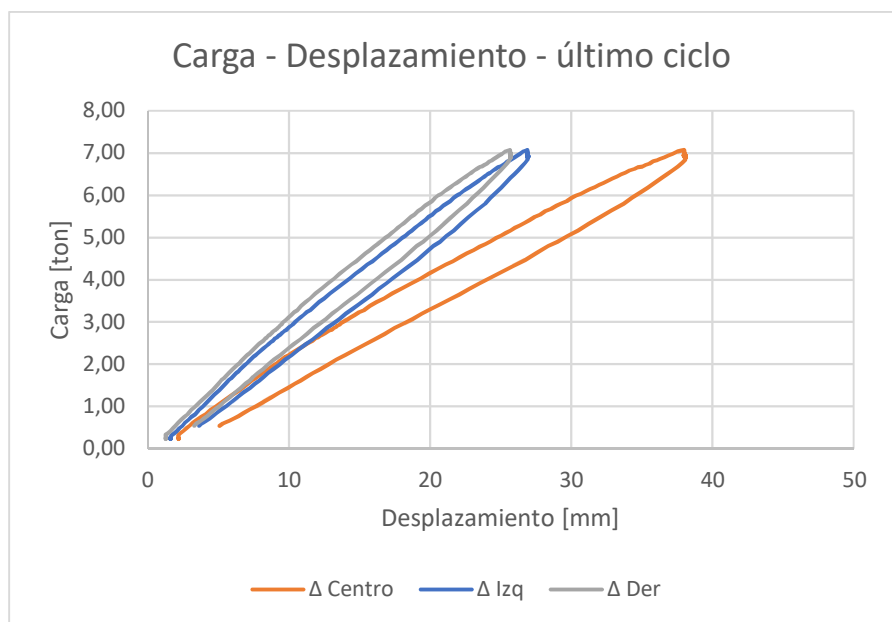


Figura 6-88 Gráfica carga – desplazamiento correspondiente a último ciclo de carga

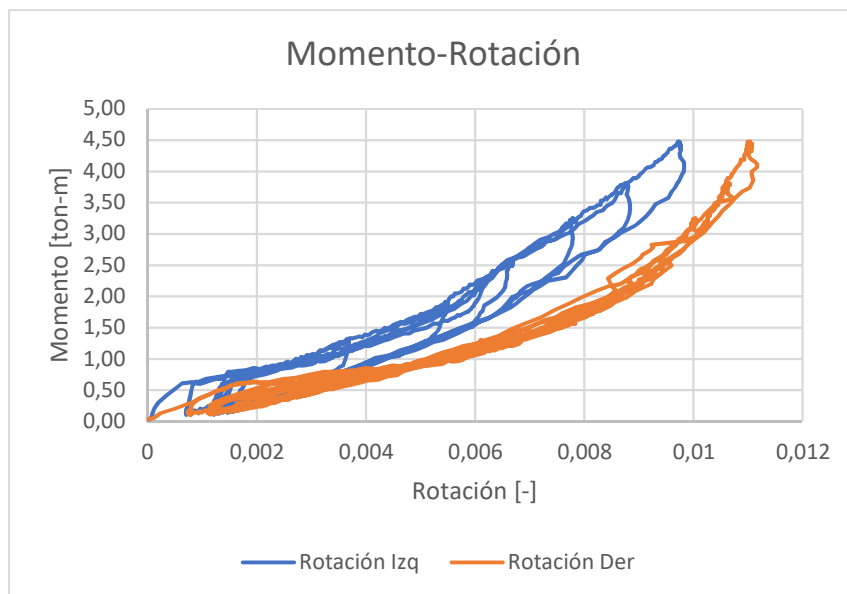


Figura 6-89 Rotación en apoyos de Viga 3

El desarrollo de la carga de presfuerzo en los torones de acero fue muy parecido al desarrollo de la carga en las barras de PRFC. Se llegaron a niveles de carga muy parecidos ante la carga aplicada (Figura 6-90 y Figura 6-91).

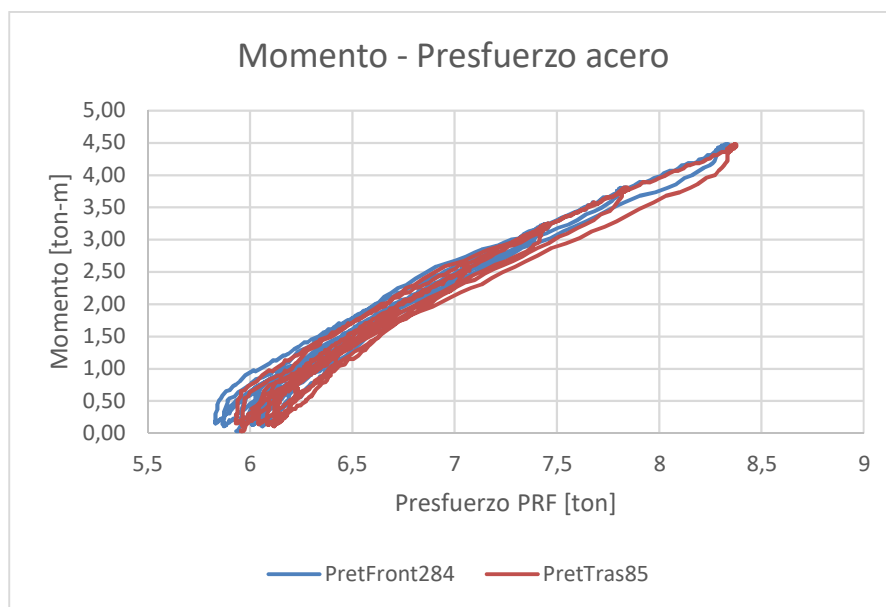


Figura 6-90 Carga en torón versus momento aplicad

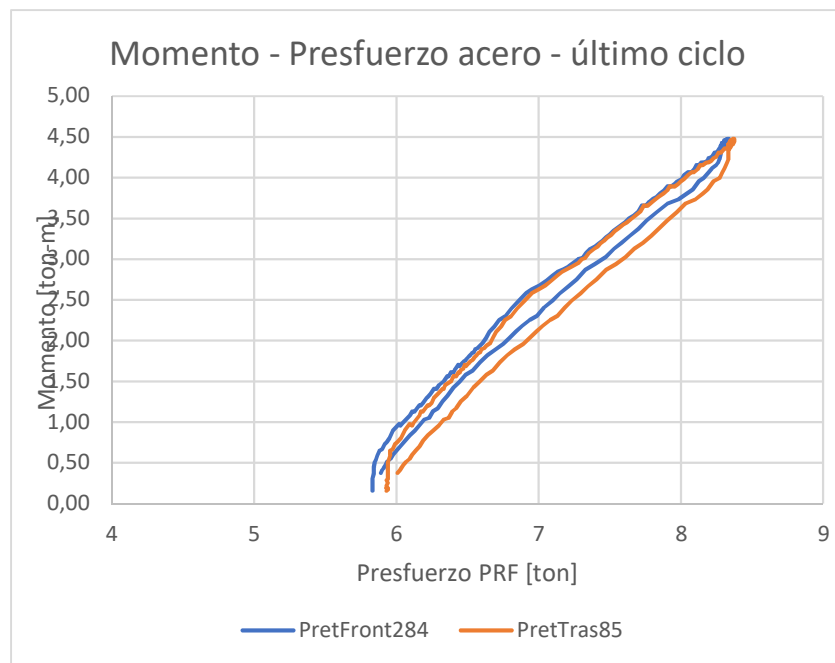


Figura 6-91 Último ciclo aislado de carga en barra contra momento aplicado

Después de concluir el ciclo de carga con la Viga 3 reforzada, se llevó la viga a la falla sin refuerzo externo adicional. Para llegar a un espesor de grieta de 1.0 mm, se aplicaron 5,000 kg de carga y se generó una deflexión de 43.2 mm en el centro del claro (Figura 6-93), llegando a una deflexión claramente visible (Figura 6-92). Las grietas que se formaron se abrieron a un espesor de 1.0 mm, e indican un patrón correspondiente a una falla por flexión (Figura 6-94 y Figura 6-95).



Figura 6-92 Deformación visible de la Viga 3 alcanzando su falla última

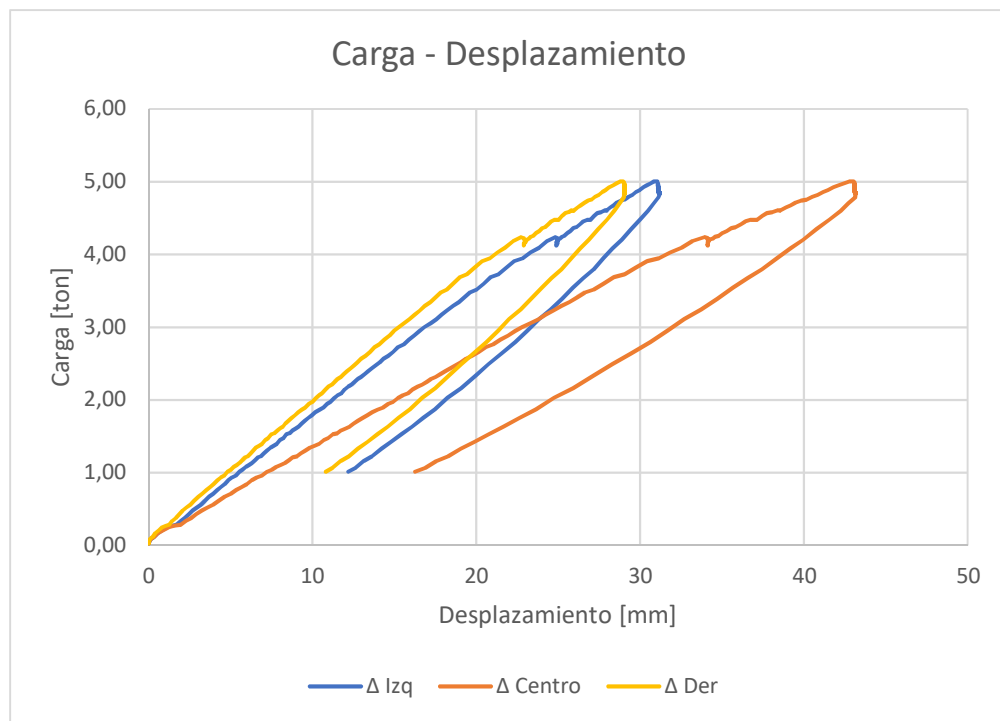


Figura 6-93 Gráfica carga vs. Desplazamiento hasta el límite último de la viga 3

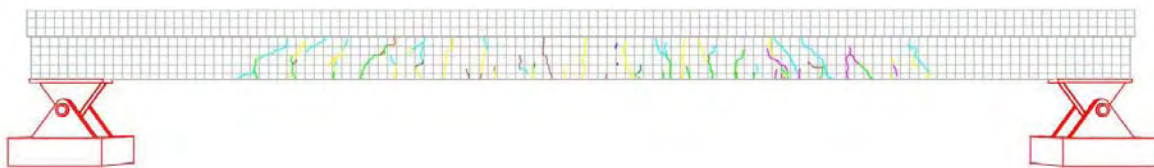


Figura 6-94 Vista frontal de viga agrietada

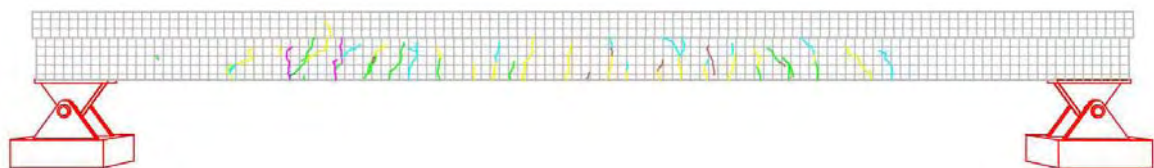


Figura 6-95 Vista trasera de viga agrietada

7 Conclusiones

Se llevaron a cabo análisis y diseño de anclajes para torones de plásticos reforzados con fibras de carbono. Uno de ellos a base de tubos con mortero expansivo, donde se logró un diseño que experimentalmente desarrolló la capacidad completa del torón sin presentar deslizamiento. Otro tipo de anclaje que se desarrolló en este estudio está conformado por cuñas compuestas. Después de su diseño analítico se llevó a cabo una iteración del proceso de fabricación y de la selección de materiales y sus geometrías. Se llegó a un proceso de fabricación y un diseño de un sistema de anclajes que desarrollara la capacidad completa de un torón de PRFC sin presentar falla en el anclaje y sin que se deslizara el torón en el anclaje. El anclaje cumple con este comportamiento lo exigido por parte de la ETAG 013 para sistemas de anclajes de torones. El desarrollo de este anclaje presenta la parte medular de este estudio, y abre el camino para su certificación y registro como patente.

El sistema de anclaje de cuñas se aplicó finalmente a especímenes de vigas pretensadas pre-agrietadas con la finalidad de comprobar su uso real como reforzamiento para estructuras de concreto. Su proceso de instalación se depuró para evitar fallas de corte y deslizamiento de los torones de PRFC que se presentaron inicialmente.

En los mismos ensayos se utilizó un sistema de desviadores extensibles, lo cual permitió la aplicación del presfuerzo en los torones sin el uso de gatos de pretensado. Se logró desarrollar el nivel de pretensado requerido para el reforzamiento de las vigas. Sobre los desviadores se midieron las deformaciones en los torones, lo cual permitió determinar el experimentalmente el aumento de esfuerzos en los torones debido a la desviación. El efecto de desviación fue analizado analíticamente y numéricamente en este estudio. No obstante, el incremento de esfuerzos por desviación fue mayor a lo que se había previsto.

Con el sistema de anclaje de cuñas y el sistema de desviación se midió el comportamiento a flexión de dos vigas reforzadas bajo carga en ensayos de 4 puntos. Se compararon los resultados con los obtenidos utilizando torones tradicionales de acero. El módulo de elasticidad menor de PRFC con respecto al de acero de presfuerzo resulta en mayores deformaciones. No obstante, se pudo registrar un incremento de al menos 34% de carga de servicio para las traveses controlando también el desarrollo de grietas en las vigas.

7.1.1 Anclajes tubulares

El diseño de los anclajes tubulares con relleno de mortero expansivo fue adecuado con respecto a diseños existentes y publicados en la literatura. Se diseñaron anclajes para barras de $\frac{1}{4}$ " y de $\frac{1}{2}$ " y se ensayaron en el laboratorio de la UAM Azcapotzalco. Las fallas se observaron en el tramo central de la varilla, sin producir falla o deslizamiento significativo

en el tramo anclado de las barras. Los problemas observados en la literatura con los anclajes, no se han observado en los especímenes ensayados. Este tipo de anclaje no es muy económico, y la recuperación de los anclajes para un reúso de los mismos es sumamente difícil. Su uso solo se recomienda para el caso de que se quiera ensayar el espécimen de una barra de PRFC y se quiera asegurar que no influya el comportamiento del anclaje sobre los resultados.

Se comprobó que la adhesión entre el tubo y el mortero expansivo se rompe a un nivel de 20% del f_{pu} de las varillas, y el entrelazado mecánico del mortero en el tubo se vuelve predominante. Se recomienda aplicar un protocolo de carga, que incluya una precarga de 25% del f_{pu} esperado de la barra, descarga, y después aplicar la carga hasta llegar al f_{pu} . Con este protocolo se elimina la influencia del tipo de anclaje prácticamente en su totalidad.

Utilizando estos anclajes, y utilizando un protocolo de ensaye con una precarga elevada, se pudieron obtener las propiedades de los especímenes de barras de PRFC, tanto módulo de elasticidad como resistencias sin interferencia del comportamiento de los anclajes.

7.1.2 Efectos de desviación

Se mostró, que las fórmulas actualmente disponibles en la literatura no describen de manera satisfactoria el efecto de incremento de esfuerzos debido a una desviación de un elemento presforzado de PRFC. Se propuso una fórmula, resultado de un proceso analítico, que describe de manera más lógica su efecto.

Modelos numéricos con un análisis de contacto resultaron en incrementos de esfuerzos muy parecidos, siempre y cuando se aplique un presfuerzo de por lo menos 40% de f_{pu} a los elementos de la barra de PRFC.

No obstante, el incremento observado en los ensayos a las vigas reforzados no sustenta las teorías de la literatura o la elaborada en este estudio. Tomando en cuenta las propiedades del material del PRFC, sus dimensiones y el radio de desviación de 100 cm y un ángulo de desviación de 7.13° , se obtienen los factores de incremento de esfuerzo debido a desviación. El factor de aumento de esfuerzos tomando en cuenta el código canadiense, hubiera sido 3.59. Con las ecuaciones del estudio presente, hubiera resultado en un factor de 1.25, mientras que el observado es de 2.125 a un nivel de presfuerzo de 50% de f_{pu} .

La teoría estándar descrita por la Ecuación (35) para elementos desviados resulta ser, para este caso en particular, la teoría con la mejor aproximación. Su predicción del factor de aumento resulta ser 2.36, lo cual sería un poco conservador, pero idóneo para este caso. Se recomienda su uso para diseños de sistemas de presfuerzo para aplicaciones que involucren barras de PRFC con diámetros parecidos a los utilizados en este estudio (12-15 mm).

7.1.3 Anclajes de cuñas

Se desarrolló un diseño de cuñas aptas para su uso con barras de PRFC. El reto inicial de desarrollar un diseño que cumpliera con las limitaciones de una resistencia transversal muy baja de barras de PRFC, se resolvió analíticamente. Las dimensiones y las propiedades de material se determinaron correctamente.

No obstante, la transferencia de carga en las interfaces de epoxi de las cuñas a las barras de PRFC tuvo que ajustarse empíricamente, para generar una transferencia mecánica de la carga en la barra a las cuñas satisfactoria. La interfaz funcional se logró con una superficie de aluminio entre el epoxi de las cuñas a la barra de PRFC. El aluminio se debe preparar con una superficie maquinada adherida a la superficie del epoxi de la cuña, y una superficie maquinada que entra en contacto con la barra de PRFC.

Se utilizó aluminio por tratarse de un material con una resistencia alta en relación con su módulo de elasticidad. Esto permite que el aluminio se pueda deformar y adaptarse a las cargas impuestas, mientras que tenga suficiente resistencia para transmitir cargas con solo 1 mm de espesor nominal. Aparte, permite generar un maquinado rápido y económico.

El control de calidad en la ejecución de los trabajos de colado de epoxi, generación de una cuerda de 1 mm de ancho y 1 mm de profundidad sobre el aluminio y el ensamble correcto de todos los elementos, resultó ser un factor crucial para poder contar con cuñas funcionales.

En las primeras pruebas se pudo observar que el comportamiento de las cuñas antes cargas cumple con sus expectativas, donde la barra no se desliza sobre las caras de las cuñas de forma excesiva.

Se recomienda aplicar una precarga a las cuñas antes de tensarlas. En este estudio, una precarga para acuar el anclaje de 5,000 kg dio buenos resultados. Una vez pre-acuadas, se registró un acuaramiento adicional de 4.12 mm en promedio bajo una carga de 100% del f_{pu} . Por lo tanto se recomienda utilizar los siguientes valores para el cálculo de pérdidas por acuaramiento:

4 mm; para el caso que se aplique un pre-acuaramiento

9 mm; para el caso sin pre-acuaramiento

Por su comportamiento observado, la fácil reutilización de las cuñas y su costo reducido en comparación con los anclajes tubulares (\$2,500 MXN vs \$750 MXN para prototipos), se recomienda utilizar este anclaje de cuñas para efectuar ensayos a barras de PRFC.

7.1.4 Vigas reforzadas

Se efectuaron ensayos a dos vigas pretensadas y reforzadas externamente con barras de PRFC postensadas y a una viga pretensada y reforzada con torones de presfuerzo tradicionales de acero de presfuerzo.

Ambos tipos de refuerzo lograron el objetivo de añadir capacidad de carga a la viga reforzada, cerrar las grietas, que se generaron en proceso de pre-agrietamiento, y mantener estas con un espesor menor a 0.3 mm. Se logró aplicar un reforzamiento, que mantuviera la viga en un estado de servicio permisible incrementando su capacidad de carga. El límite del reforzamiento con barras de PRFC fue controlado finalmente por una ruptura de las fibras sobre los desviadores.

En el transcurso de los ensayos se logró llegar a un procedimiento de instalación del sistema de reforzamiento sencillo y rápido de lograr. La aplicación de desviación se pudo lograr sin gran esfuerzo.

La predicción de deformaciones utilizando modelos con un análisis de etapas constructivas tomando en cuenta el comportamiento reológico del concreto y la relajación de torones de acero de presfuerzo y una degradación de la rigidez de la sección a 35% debido a agrietamiento, resultó en una predicción de deformaciones dentro de un rango de 2 mm.

Tabla 7-1 Deformaciones debidas a un estado de carga – según modelo MEF y ensaye a Viga 1

Estado de carga	Modelo MEF	Viga 1
	Δ_{centro} [mm]	Δ_{centro} [mm]
Al tensado	-9.07	-10
Tiempo – 3 años	-7.04	-5
Sección agrietada a 4 ton	34.48	32.3
Con presfuerzo externo a 4 ton	25.873	28.7

Tabla 7-2 Deformaciones debidas a un estado de carga – según modelo MEF y ensaye a Viga 2

Estado de carga	Modelo MEF	Viga 2
	Δ_{centro} [mm]	Δ_{centro} [mm]
Al tensado	-9.23	-11
Tiempo – 3 años	-7.65	-8
Sección agrietada a 4 ton	35.3	38.0
Con presfuerzo externo a 4 ton	26.81	34.0

Tabla 7-3 Deformaciones debidas a un estado de carga – según modelo MEF y ensaye a Viga 3

Estado de carga	Modelo MEF	Viga 3
	Δ_{centro} [mm]	Δ_{centro} [mm]
Al tensado	-9.23	-12
Tiempo – 3 años	-7.65	-4
Sección agrietada a 4 ton	35.3	33.09
Con presfuerzo externo a 4 ton	32.32	24.24

Se mostró la eficiencia del presfuerzo de PRFC para aumentar la capacidad de carga de las vigas de concreto pretensadas. No se pudo llegar al límite posible con las barras de PRFC porque se indujeron fallas prematuras en la zona de anclajes, rótulas de apoyo del presfuerzo o en los desviadores. Como se esperaba, el torón de acero de presfuerzo logra una mayor rigidez de la estructura debido a un módulo de elasticidad un 30.5% mayor comparado con la barra de PRFC. Las barras de PRFC lograron aumentar la rigidez de la viga un 26.8% y 29.3% respectivamente, mientras que el torón de acero de presfuerzo logró aumentar la rigidez de la viga un 46.7%, así controlando algo mejor la deformación de la viga ante las cargas impuestas.

7.1.5 Trabajos futuros

Los anclajes formados por cuñas indican un buen funcionamiento. Falta ensayar estos anclajes antes cargas cíclicas y con variaciones amplias de temperatura. Los ensayos correspondientes servirán para registrar el sistema de cuñas como sistema certificado para su uso presforzado. Esto se llevará a cabo en los próximos meses.

El uso de tiras de PRFC de secciones rectangulares se está popularizando para el reforzamiento presforzado. Estas tiras se dejan enrollar más fácilmente para el transporte y se pueden fabricar con anchos variables para producir la sección óptima para su aplicación. Por lo tanto, se recomienda estudiar una adecuación del anclaje con cuñas desarrollado en este trabajo, adaptado a la geometría de tiras rectangulares.

Los efectos de desviación requieren numerosos estudios adicionales, donde se determinaría experimentalmente la influencia de factores como el radio de desviación y el ángulo de desviación. Se deben hacer principalmente para sistemas con tiras más flexibles, las cuales se ven menos afectadas por efectos de desviación.

El costo de PRFC está disminuyendo cada vez más rápido, debido al uso más extenso en la industria automotriz. Numerosas aplicaciones han surgido en la industria de la construcción en los últimos años, por lo cual el volumen de producción de PRFC debe incrementarse cada vez más. La disminución de precio consecuente requiere cada vez más ingenieros con conocimientos más profundos de este tipo de material. El trabajo más importante va a ser, que en la enseñanza se encuentren más temas relacionados con el uso adecuado de este material. Aparte, que se genere más estandarización en las propiedades de los materiales.

8 REFERENCIAS

Abdelrahman, A.A.; Rizkalla, S.H. (1999). "Deflection of Concrete Beams Pretensioned by CFRP Reinforcements"; *Journal of Composites for Construction*

ACI Committee 440 (2008). "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures"; American Concrete Institute, ACI 440.2R-08

ACI Committee 440 (2004). "Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons"; American Concrete Institute, ACI 440.4R-04

Al Chami, G.; Thériault, M.; Neale, K.W. (2006). "Long-term Creep Performance of CFRP-strengthened Concrete Elements"; *Proceedings of 2nd International Congress of fib*, ID 10-53

Aram, M.R.; Czaderski, C.; Motavalli, M. (2008). "Effects of Gradually Anchored Prestressed CFRP Strips Bonded on Prestressed Concrete Beams"; *Journal of Composites for Construction*

Bakht, B.; Al-Bazi, G.; Banthia, N.; Cheung, M.; Erki, M.-A. (2000). "Canadian Bridge Design Code Provisions for Fiber-Reinforced Structures"; *Journal of Composites for Construction*

Barbero, E.J. (1999). "Introduction to Composite Materials Design"; Taylor & Francis Group

Burtscher, S.L. (2008). "An efficient anchorage for fibre reinforced plastics"; *Proceedings of "Structural Composites for Infrastructure Applications, Hurghada, Egypt*

Burtscher, S.L. (2005). "Composite Wedge System for Prestressing of CFRP"; *Proceedings of 2nd International Congress of fib*, ID 10-17

Burtscher, S.L. (2008) "Wedge Anchorage for CFRP Strips"; *Journal of Composites for Construction*

Chandoga, M.; Bilcik, J.; Cernansky, L. (2006). "Rehabilitation of Bridge Deck with Externally Bonded Prestressed CFRP Plates"; *Proceedings of 2nd International Congress of fib*, ID 14-16

- Choi, M.-C.; Ibell, T.J. (2004). "Behavior of Fiber-Reinforced Polymer-Reinforced Anchorage Zones for Post-Tensioned Concrete Structures"; ACI Structural Journal, T.101-S61
- Czaderski, C.; Meier, U. (2006). "Long-term Behaviour of CFRP Strips for Post-strengthening"; Proceedings of 2nd International Congress of fib, ID 10-52
- Dolan, C.W.; Bakis, C.E.; Nanni, A. (2001). "Design Recommendations For Concrete Structures Prestressed With FRP Tendons"; FHWA, Final Report
- El-Hacha, R.; Campbell, T.I. (2008). "Prestressing Concrete Structures with Fiber-Reinforced Polymers"; ISIS Canada Corporation, Design Manual No.5
- El-Hacha, R.; Wight, R.G. (2003). Green, M.F.; "Innovative system for prestressing fiber-reinforced polymer sheets"; ACI Structural Journal;10(3): 305-313
- El-Hacha, R.; Wight, R.G.; Green, M.F. (2004). "Prestressed Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets for Strengthening Concrete Beams at Room and Low Temperatures"; Journal of Composites for Construction, 8(1): 3-13
- Elrefai, A.; West, J.; Soudki, K. (2007) "Performance of CFRP tendon-anchor assembly under fatigue loading"; Composite Structures, Vol. 80
- Elrefai, A.; West, J.; Soudki, K. (2003). "Strengthening of RC Beams with External Post-Tensioned CFRP Tendons"; Fiber Reinforced Polymer Reinforcements, SP 245-8
- Erki, M.A.; Rizkalla, S.H. (1993). "Anchorage For FRP"; Concrete International
- Fam, A.Z.; Rizkalla, S.H.; Tadros, G (1997). "Behavior of CFRP for Prestressing and Shear Reinforcements of Concrete Highway Bridges"; ACI Structural Journal, V 94, No. 1, January-February, pp. 77-86
- Fischli, F.; Clénin, R. (2006). "Strengthening of Structures with Post-Tensioned CFRP Laminates"; Proceedings of 2nd International Congress of fib, ID 10-78
- Garden, H. N.; Hollaway, L.C. (1998). "An Experimental Study of the Influence of Plate End Anchorage of Carbon Fibre Composite Plates Used to Strengthen Reinforced Concrete Beams"; Composite Structures Vol. 42, pp. 175-188
- González Cuevas, O.M. (2005). "Aspectos fundamentales de concreto reforzado"; 4a. ed.; Limusa

Grace, N.F.; Abdel-Sayed, G.; Navarre, F.C.; Nacey, R.B.; Bonus, W. (2003). "Full-Scale Test of Prestressed Double-Tee Beam"; Concrete International

Grace, N.F.; Rohleder, W.J.; Tang, B.; Doe, T.A.; Burgess, C.J. (2008). "Use of CFCC Strands in a cable-stayed bridge in the USA"; Proceedings of "Structural Composites for Infrastructure Applications, Hurghada, Egypt

Grace, N.F.; Sayed, G.A. (1998). "Ductility of prestressed bridges using CFRP strands"; Concrete International, Volume 20, Issue 6, Pages 25-29

Grace, N.F.; Singh, S.B.; Shinouda, M.M.; Mathew, S.S. (2005). "Concrete Beams Prestressed with CFRP"; Concrete International

Hollaway, L.C.; Leeming, M.B. (2000). "Strengthening of Reinforced Concrete Structures using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering"; CRC Press, Taylor & Francis Group

Horvatis, J.; Gaubinger, B. (2004) Dorn, M.; Cserno, T; Kollegger, J.; "Entwicklung einer Vergussverankerung für Zugglieder aus Faserverbundwerkstoff"; Bauingenieur, Vol. 79

Horvatis, J.; Kollegger, J. (2005). "External CFRP-tendons with a New Anchorage System for Bridge Strengthening in Austria"; Proceedings of 2nd International Congress of fib, ID 14-10

Hwash, M.; Knippers, J.; Saad, F. (2008). "Improved Utilization of externally prestressedd CFRP-strips by means of deviation"; Proceedings of "Structural Composites for Infrastructure Applications, Hurghada, Egypt

Hwash, M.; Knippers, J.; Saad, F. (2008). "Improved Utilization of externally prestressedd CFRP-strips by means of deviation"; Proceedings of "Structural Composites for Infrastructure Applications, Hurghada, Egypt

Jeyasehar, C.A.; Mohankumar, G. (2008). "Strengthening by External Prestressing"; Concrete International, pp. 61-66

Jian, H.; Wengjun, X.; Yigui, Z.; Peng, W.; Hanshan, D. (2007). "Use of external prestressing in Hewei Bridge in China"; Proceedings of the 26th Southern African Transport Conference (SATC)

Keller, T. (2007). "Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Concstruction "; International Association for Bridge and Structural Engineering

Kim, Y.J.; Heffernan, P.J. (2008). "Fatigue Behavior of Externally Strengthened Concrete Beams with Fiber-Reinforced Polymers: State of the Art"; Journal of Composites for Construction

Kim, Y.J.; Shi, C.; Green, M.F. (2008). "Ductility and Cracking Behavior of Prestressed Concrete Beams Strengthened with Prestressed CFRP Sheets"; Journal of Composites for Construction

Knippers, J. ; Hwash, M. (2008). "Umgelenkte Lamellen aus kohlefaserverärktem Kunststoff für freistehene Spannglieder im Konstruktiven Ingenieurbau"; Beton- und Stahlbetonbau 103, Heft 10

Lees, J.M.; Winistörfer, A.; Meier, U. (2002). "External Prestressed Carbon Fiber-Reinforced Polymer Straps for Shear Enhancement of Concrete"; Journal of Composites for Construction

Lenzi, M.; Osti, R.; Campana, P.; Ciciatiello, G. (2006). "Rehabilitation of Bridge Deck with Externally Bonded Prestressed CFRP Plates"; Proceedings of 2nd International Congress of fib, ID 10-65

Matta, F.; Nanni, A.; Abdelrazaq, A.; Gremel, D.; Koch, R. (2009). "Externally post-tensioned carbon FRP bar system for deflection control"; Construction and Building Materials, Vol. 23

Mayo, R.; Nanni, A.; Gold, W.; Barker, M. (2003). "Strengthening of Bridge G270 with Externally Bonded Carbon Fiber Reinforced Polymer Reinforcement"; Fiber Reinforced Polymer Reinforcements, SP 188-39

Meier, U. (2008). "Long-Term Experience with the Application of Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) For Cables of Suspended Structures"; Proceedings of "Structural Composites for Infrastructure Applications, Hurghada, Egypt

Monti, G.; Liotta, M.A. (2006) "Pretension of Externally Bonded FRP Sheets for Flexural Reinforcement of RC Beams: Methods and Design Equations"; Proceedings of 2nd International Congress of fib, ID 10-63

Monti, G. (2006). "Modelling aspects and design issues for anchorages shear strengthening and confinement"; fib, Course Documentation, Mexico City

Morris, D. (2004). "Pressure Vessel Design Manual"; Gulf Professional Publishing

Naaman, A.E.; Changdrangsu, K. (2004). "Innovative Bridge Deck System Using High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites"; ACI Structural Journal, T.101-S07

Nanni, A.; Focacci, F.; Cobb, C. A.; "Proposed Procedure for the Design of RC Flexural Members Strengthened with FRP Sheets"; Proceedings of the Second International Conference on Composites in Infrastructure, ICCI '98, Arizona, USA, 5-7 January, 1998

Rosenboom, O.A.; Rizkalla, S.H. (2004). "Fatigue Behavior of Prestressed Concrete Bridge Girders Strengthened with Various CFRP Systems"; Fiber Reinforced Polymer Reinforcements, SP 230-35

Rostásy, F.S. (1998). "Draft Guidelines for the Acceptance Testing of FRP Posttensioning Tendons"; Journal of Composites for Construction

Shaheen, E.; Shrive, N.G. (2006). "Reactive Powder Concrete Anchorage for Post-Tensioning with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Tendons"; ACI Materials Journal, T.103-M48

Soudki, K. (2008). "Use of post-tensioned CFRP tendons to flexural strengthen concrete beams"; Proceedings of "Structural Composites for Infrastructure Applications, Hurgada, Egypt

Suter, R.; Jungo, D. (2001). "Vorgespannte CFK-Lamellen zur Verstärkung von Bauwerken"; Beton- und Stahlbetonbau 96, Heft 5

Triantafillou, T.C.; Deskovic, N.; Deuring, M. (1992). "Strengthening Concrete Structures with Prestressed Fibre Reinforced Plastic Sheets"; ACI Structural Journal, 89(3): 235-244

Yu, P.; Silva, P. F.; Nanni, A. (2008). "Description of a Mechanical Device for Prestressing of Carbon Fire-Reinforced Polymer Sheets - Part I"; ACI Structural Journal, V.105-S01

Yu, P.; Silva, P. F.; Nanni, A. (2008). "Description of a Mechanical Device for Prestressing of Carbon Fire-Reinforced Polymer Sheets - Part II"; ACI Structural Journal, V.105-S02

Zhang, B.; Benmokrane, B. (2004). "Design and evaluation of a new bond-type anchorage system for fiber reinforced polymer tendons"; Canadian Journal of Civil Engineering V. 31 no. 1

Zou, P.X.W. (2003). "Predicting the long-term behaviour of concrete beams pretensioned by fibre reinforced polymers - Part A: a theoretical framework"; Journal of composites for construction

Zou, P.X.W. (2003). "Predicting the long-term behaviour of concrete beams pretensioned by fibre reinforced polymers - Part B: illustrative examples"; Journal of composites for construction

9 Apéndice A – Modelo numérico de viga pretensada

Los modelos que se elaboraron para verificar los pre-cálculos a mano se hicieron en el programa midas Civil v 2016. Se hizo un análisis de etapas constructivas, que refleja el historial de las vigas y la secuencia de sus cargas. En este análisis se utiliza el estado final de la etapa anterior (elementos mecánicos y deformaciones) como estado inicial para la siguiente etapa. Aparte se incluyen las propiedades de los materiales en el tiempo, especialmente tomando en cuenta el comportamiento reológico del concreto.

Los elementos que conforman el modelo son simples elementos viga con 6 grados de libertad en cada nodo. Se modeló la longitud completa de la viga de 600 cm con los nodos 2 y 14 a 20 cm del extremo, donde se ubicaron restricciones de desplazamientos en vertical y transversal a los nodos simulando los apoyos físicos. El claro central de 560 cm se subdividió en 12 elementos para obtener resultados confiables de deformación a lo largo de la viga.

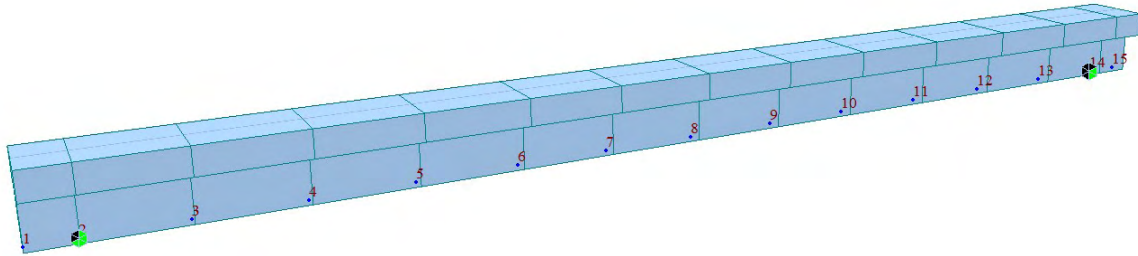


Figura 9-1 Geometría general de modelo

Para la sección de los modelos se utilizó la sección gruesa prevista de proyecto, y confirmada en los especímenes (Tabla 9-1):

Tabla 9-1 Propiedades de sección gruesa de viga

A	836	cm ²
Asy	559.5144	cm ²
Asz	506.8998	cm ²
Ixx	57309.04	cm ⁴
Iyy	89560.77	cm ⁴
Izz	58394.67	cm ⁴

Las propiedades del material de concreto se calcularon para un concreto de 280 kg/cm². Para la determinación del desarrollo del f'_c , el factor de contracción (Figura 9-3) y el factor de flujo plástico (Figura 9-2), se tomaron en cuenta las previsiones del CEB-FIP (2010), las cuales, por experiencia del autor, reflejan de manera confiable el comportamiento del concreto utilizado en México.

Se utilizó una humedad de 70% de promedio, y se especificó un concreto de fraguado normal y un agregado de calidad baja de arenisca, lo cual corresponde al agregado utilizado en el laboratorio.

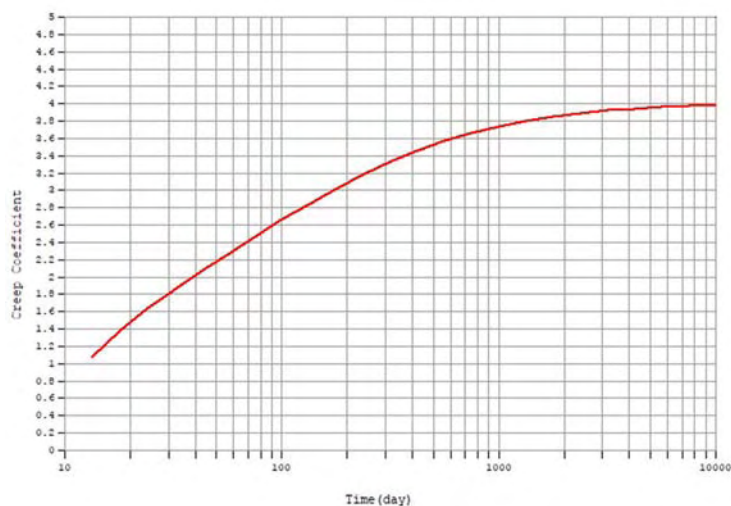


Figura 9-2 Desarrollo del factor de flujo plástico en el tiempo

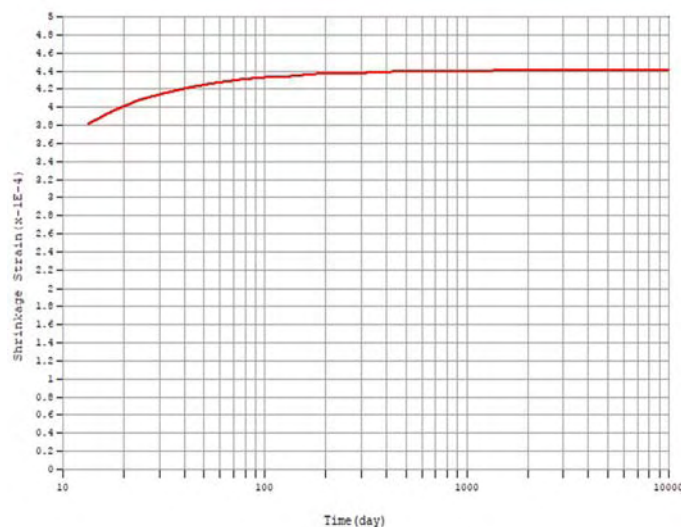


Figura 9-3 Desarrollo del factor de contracción en el tiempo

Se definió el refuerzo de la sección correspondientemente al proyecto ejecutado, con 3 varillas del #4 en el lecho superior y una varilla en el lecho inferior. Las propiedades del

material se utilizaron conforme a las varillas utilizadas, con una fluencia real del 125% de la fluencia nominal (5280 kg/cm^2). A cada 15 cm de definieron los estribos de varillas de #3 (Figura 9-4).



Figura 9-4 Definición de armado longitudinal

El presfuerzo interno se definió con una trayectoria constante a 4 cm del lecho inferior (Figura 9-5) con dos torones de acero de presfuerzo de baja relajación A416 grado 270 de 0.5", aplicando una carga de pretensado de 14,500 kg.

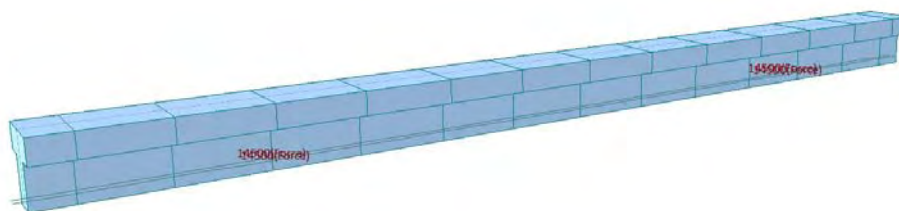


Figura 9-5 Definición de presfuerzo de torones de 0.5"

Las barras de PRFC se modelaron con su trayectoria final desviada y con un diámetro de 1.21 cm (Figura 9-6). El módulo de elasticidad utilizado fue de $1,470,000 \text{ kg/cm}^2$, lo cual corresponde al módulo de elasticidad determinado experimentalmente. Se aplicó un acañamiento de 9 mm según lo que se obtuvo en los ensayos a las cuñas.

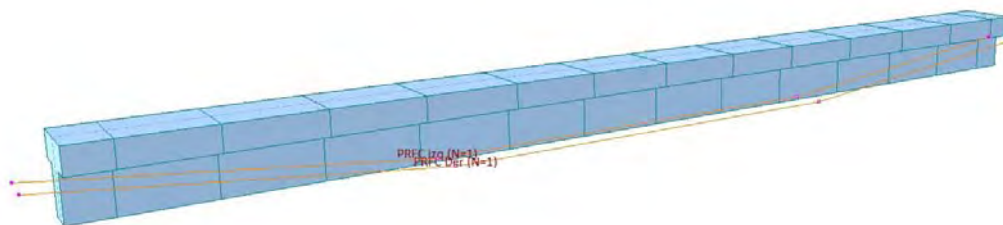


Figura 9-6 Definición de reforzamiento de barras externas desviadas de PRFC

La primera etapa constructiva corresponde a la etapa de aplicación del pretensado. Se toma en cuenta que el concreto tiene una edad de 28 días, y que está actuando el peso propio de la viga y el presfuerzo interno de la viga, y se aplican las restricciones a los nodos apoyados. La segunda etapa incluye una carga de tiempo, en este caso de 3 años.

Posteriormente, se aplica una precarga y una reducción del EI a lo correspondiente para una sección agrietada (35% del EI de la sección gruesa). Con la sección agrietada, se activa el presfuerzo externo, y después una carga externa que corresponde a una carga de ensaye de 4,000 kg (Figura 9-7).

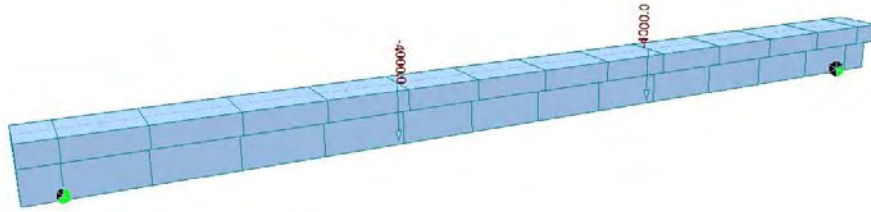


Figura 9-7 Carga de ensaye 4,000 kg a los tercios del claro

Las propiedades de la sección de la viga se dejaron ajustar por la presencia del refuerzo pasivo de varillas de acero, y se dejaron ajustar por la posición del presfuerzo.

El desarrollo del presfuerzo interno se muestra en las Figura 9-8 a Figura 9-12:



Figura 9-8 Presfuerzo en torones internos con pérdidas instantáneas del presfuerzo

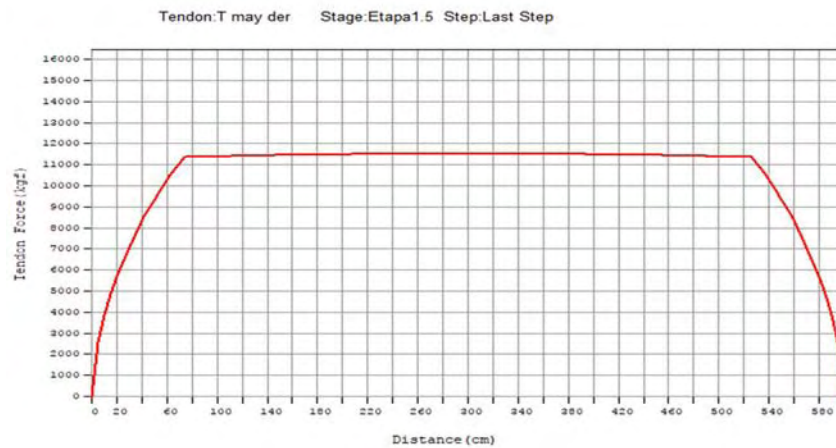


Figura 9-9 Presfuerzo en torones después de pérdidas por acortamiento de concreto y relajación del acero a los 4 años



Figura 9-10 Tensión en 1 torón aplicando 4000 kg de carga con sección agrietada

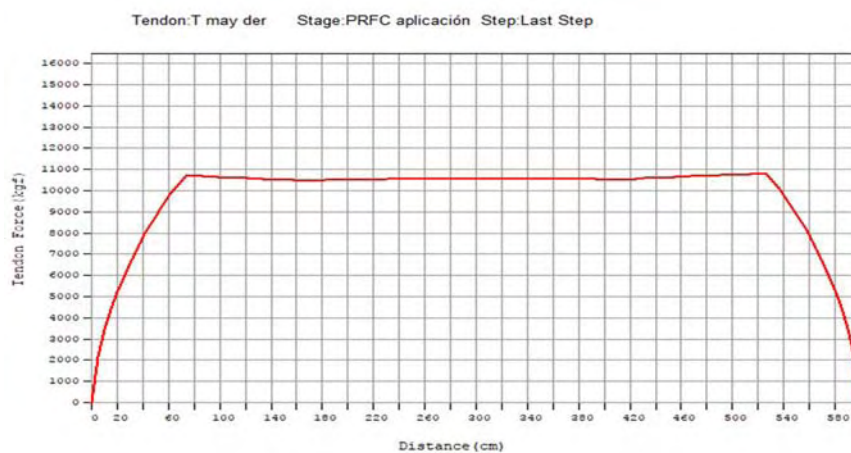


Figura 9-11 Presfuerzo en torón interno después de aplicación de presfuerzo externo sin carga



Figura 9-12 Presfuerzo en torón interno después de aplicación de presfuerzo externo y con 4000 kg de carga

Las deformaciones se obtuvieron para cada etapa constructiva

Las diferencias entre las Vigas 1, y 2 son solo en las propiedades ligeramente diferentes entre los concretos utilizados. Los resultados para cada estado de carga de esas vigas se reportan en el capítulo 7.1.4. La viga 3 cambia en la propiedad del material del presfuerzo externo, utilizando en éste un módulo de elasticidad de 1,900,00 kg/cm².

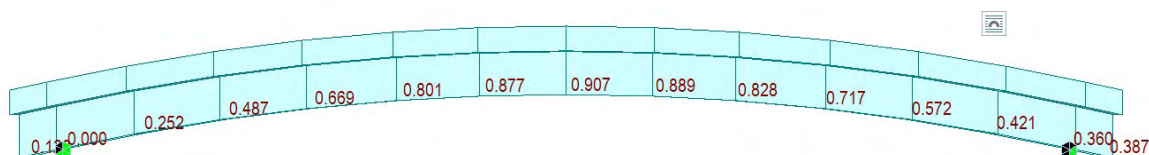


Figura 9-13 Deformación debida a presfuerzo a la hora de aplicar pretensado

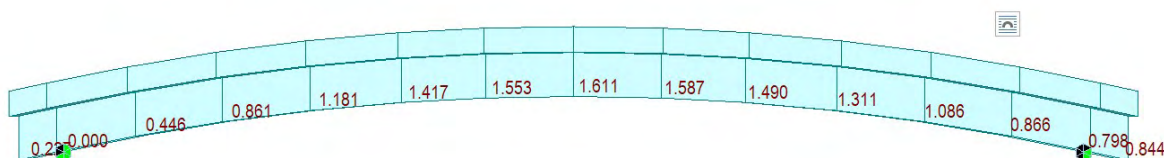


Figura 9-14 Deformación después del transcurso de 4 años

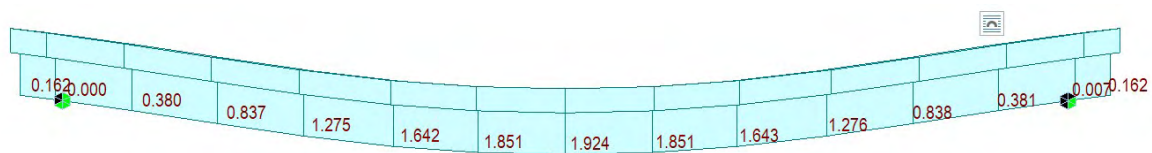


Figura 9-15 Deformación debida a aplicación de carga de 4,000kg con sección agrietada

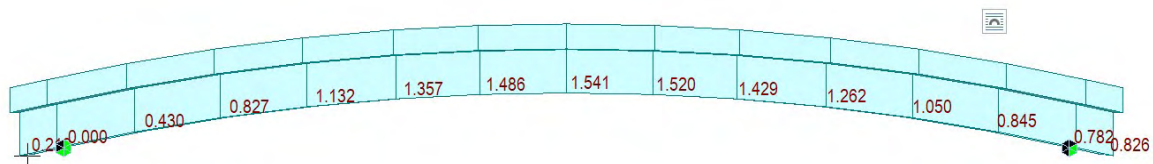


Figura 9-16 Deformación de sección agrietada sin carga ni presfuerzo externo

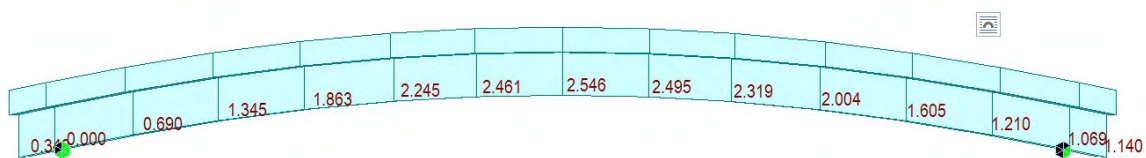


Figura 9-17 Deformación con presfuerzo externo aplicado

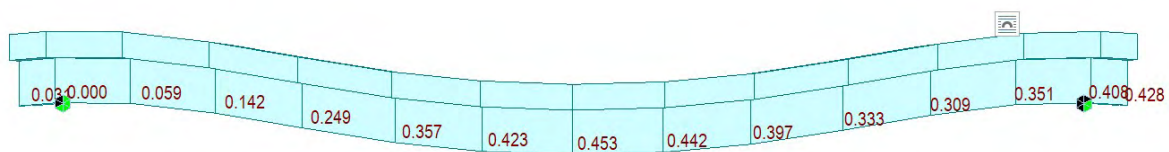


Figura 9-18 Deformación de viga con carga de 4,000 kg, incluyendo presfuerzo externo

10 Apéndice B – Agrietamiento

10.1 Viga 1 – Desarrollo de agrietamiento

Vista frontal:

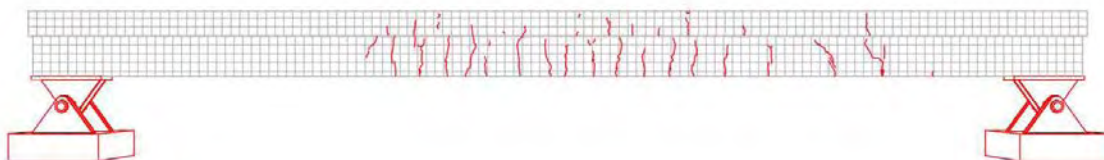


Figura 10-1 Pre-agrietamiento a 0.3 mm de grosor a 1,000 kg

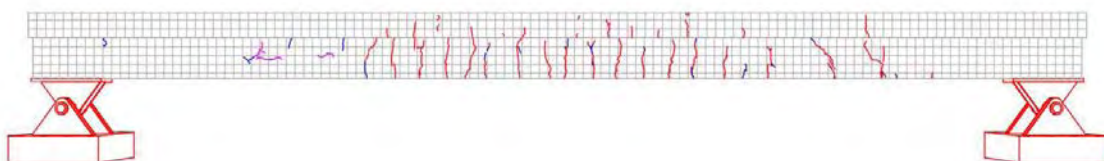


Figura 10-2 Grosor máx. 0.5 mm a 3,500 kg

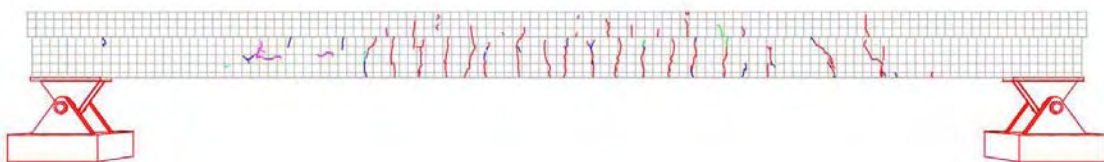


Figura 10-3 Grosor máx. 0.8 mm a 4,000 kg

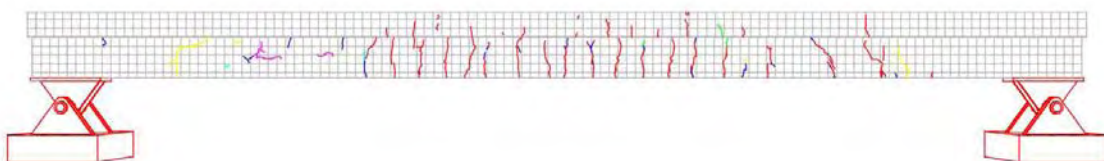


Figura 10-4 Grosor máx. 1.5 mm a 5000 kg

Vista trasera:

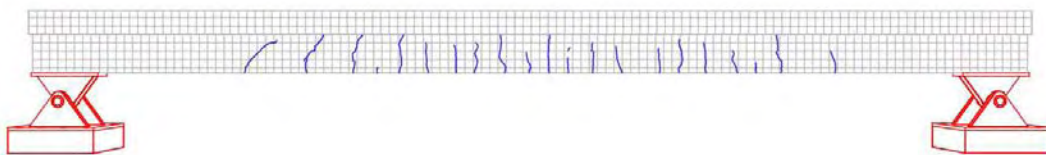


Figura 10-5 Pre-agrietamiento a 0.3 mm de grosor a 1,000 kg

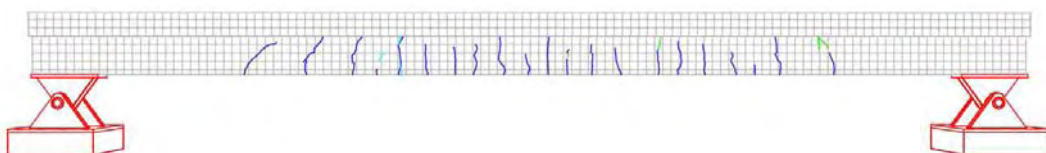


Figura 10-6 Grosor máx. 0.5 mm a 3,500 kg

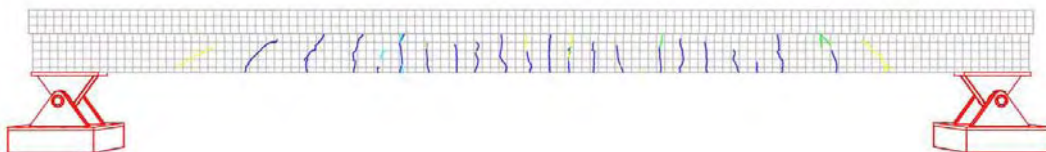


Figura 10-7 Grosor máx. 0.8 mm a 4,000 kg

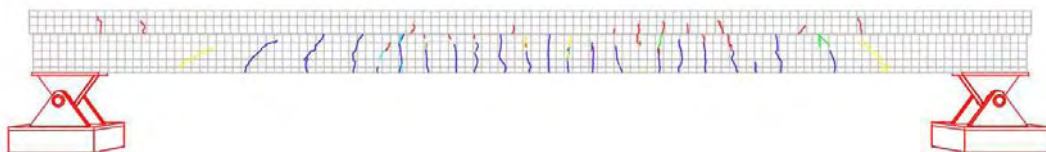


Figura 10-8 Grosor máx. 1.5 mm a 5000 kg

10.2 Viga 2 – Desarrollo de agrietamiento

Vista frontal

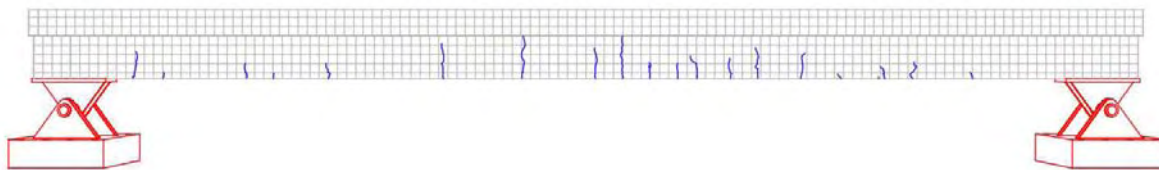


Figura 10-9 Pre-agrietamiento - Grosor máx. 0.2 mm a 1,000 kg

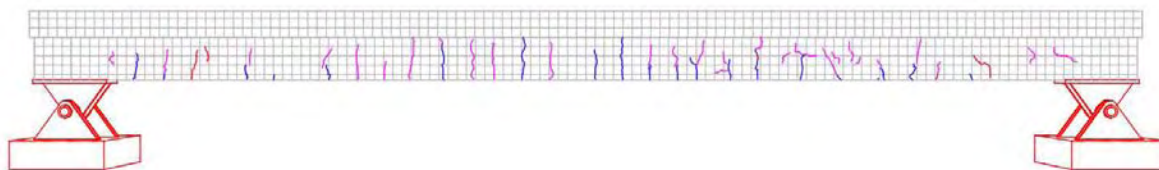


Figura 10-10 Pre-agrietamiento - Grosor máx. 0.35 mm a 2,000 kg

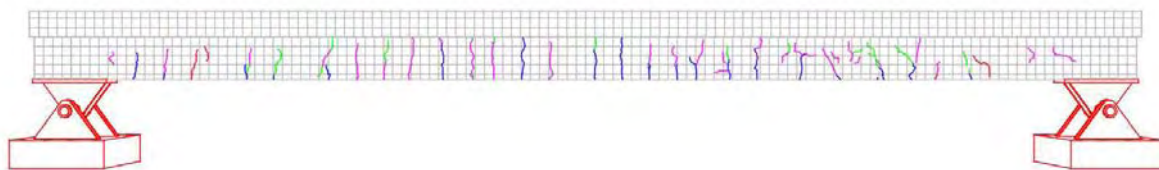


Figura 10-11 Pre-agrietamiento - Grosor máx. 0.5 mm a 3,000 kg

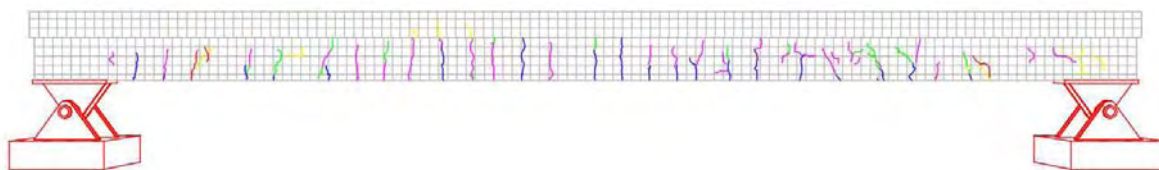


Figura 10-12 Grosor máx. 1.5 mm a 4,000 kg

Vista trasera:



Figura 10-13 Pre-agrietamiento - Grosor máx. 0.2 mm a 1,000 kg

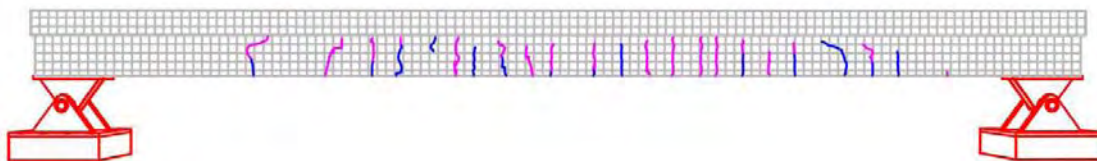


Figura 10-14 Pre-agrietamiento - Grosor máx. 0.35 mm a 2,000 kg

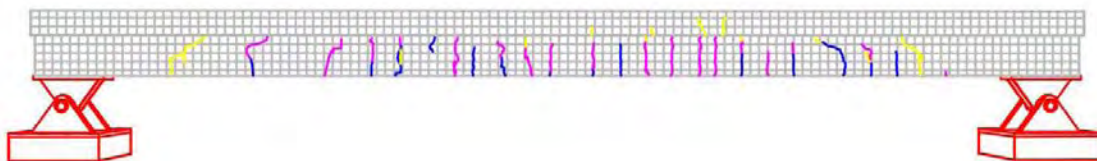


Figura 10-15 Pre-agrietamiento - Grosor máx. 0.5 mm a 3,000 kg

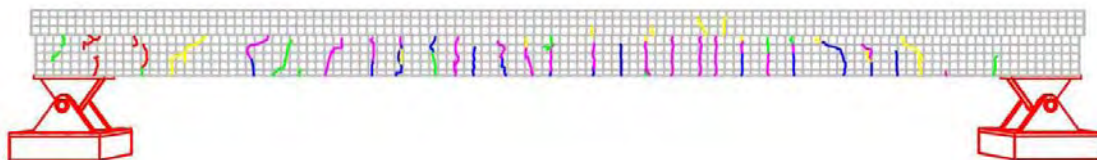


Figura 10-16 Grosor máx. 1.5 mm a 3,000 kg

10.3 Viga 3 – Desarrollo de agrietamiento



Figura 10-17 Pre-agrietamiento - Grosor máx. 0.2 mm a 1,000 kg

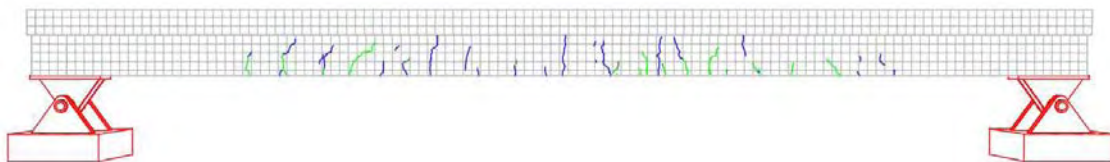


Figura 10-18 Pre-agrietamiento - Grosor máx. 0.35 mm a 2,000 kg

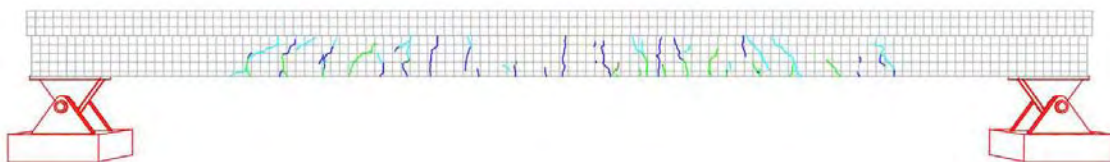


Figura 10-19 Pre-agrietamiento - Grosor máx. 0.5 mm a 3,000 kg

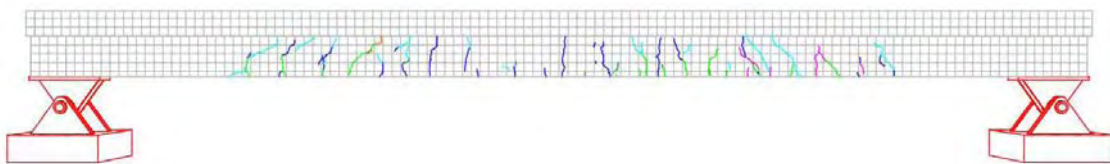


Figura 10-20 Grosor máx. 0.8 mm a 4,000 kg

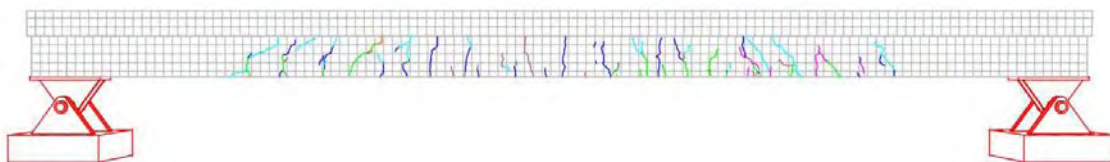


Figura 10-21 Grosor máx. 1.5 mm a 5,000 kg

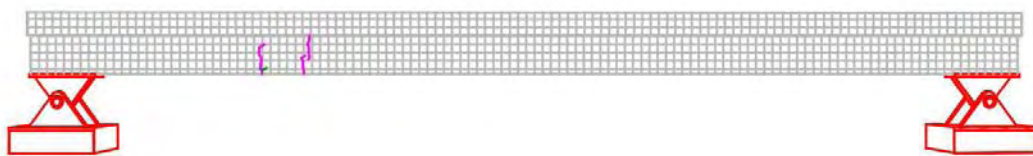


Figura 10-22 Pre-agrietamiento - Grosor máx. 0.2 mm a 1,000 kg

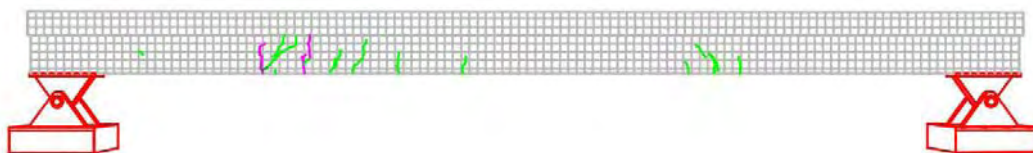


Figura 10-23 Pre-agrietamiento - Grosor máx. 0.35 mm a 2,000 kg

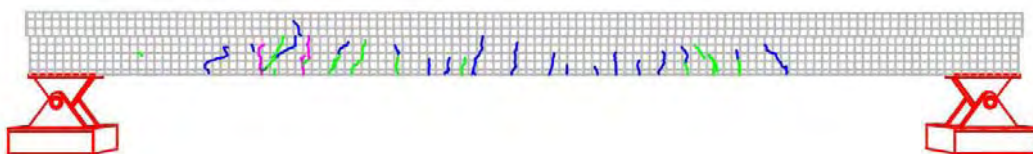


Figura 10-24 Pre-agrietamiento - Grosor máx. 0.5 mm a 3,000 kg

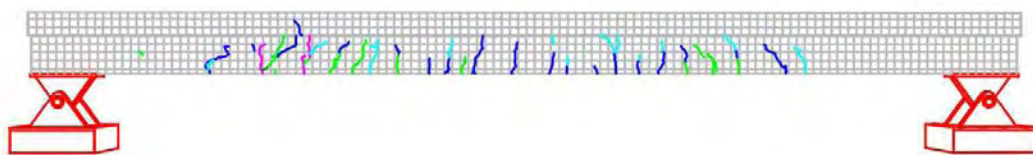


Figura 10-25 Grosor máx. 0.8 mm a 4,000 kg

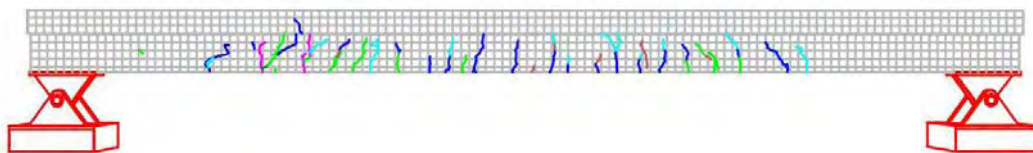


Figura 10-26 Grosor máx. 1.5 mm a 5,000 kg

11 Apéndice C – Gráficas adicionales de ensayos

Los datos obtenidos de los ensayos pasaron por un posproceso, donde para cada ciclo de carga se inicia cada gráfica desde cero.

Aparte cabe mencionar que se hicieron correcciones para la obtención de las deformaciones verticales. Debido al ensamble de los apoyos, se previó que éstos sufrieran una deformación importante en el transcurso de los ensayos. Los transductores de distancia inductivos colocados en los apoyos sirvieron para medir la rotación, y por otro lado también para medir el desplazamiento vertical que sufría la estructura de los apoyos al mismo tiempo. Las deformaciones en el centro del claro se corrigieron con una interpolación lineal de las deformaciones en los apoyos en su punto correspondiente.

11.1 Gráficas adicionales - Viga 1

11.1.1 Pre-agrietamiento:

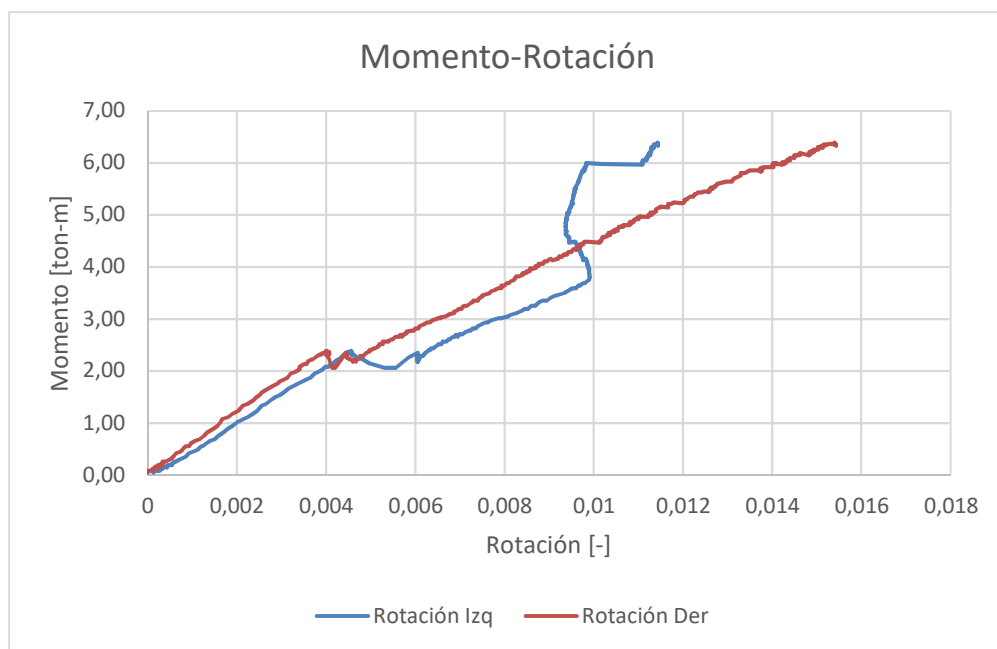


Figura 11-1 Pre-agrietamiento - Momento rotación en ambos apoyos de la viga

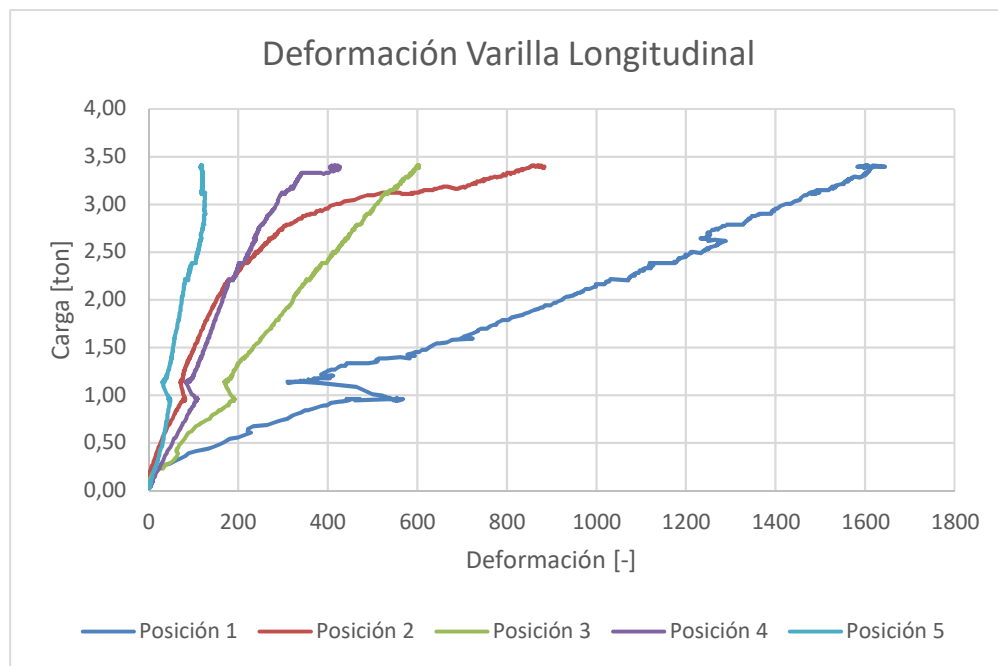


Figura 11-2 Pre-agrietamiento - Deformaciones en Varilla longitudinal

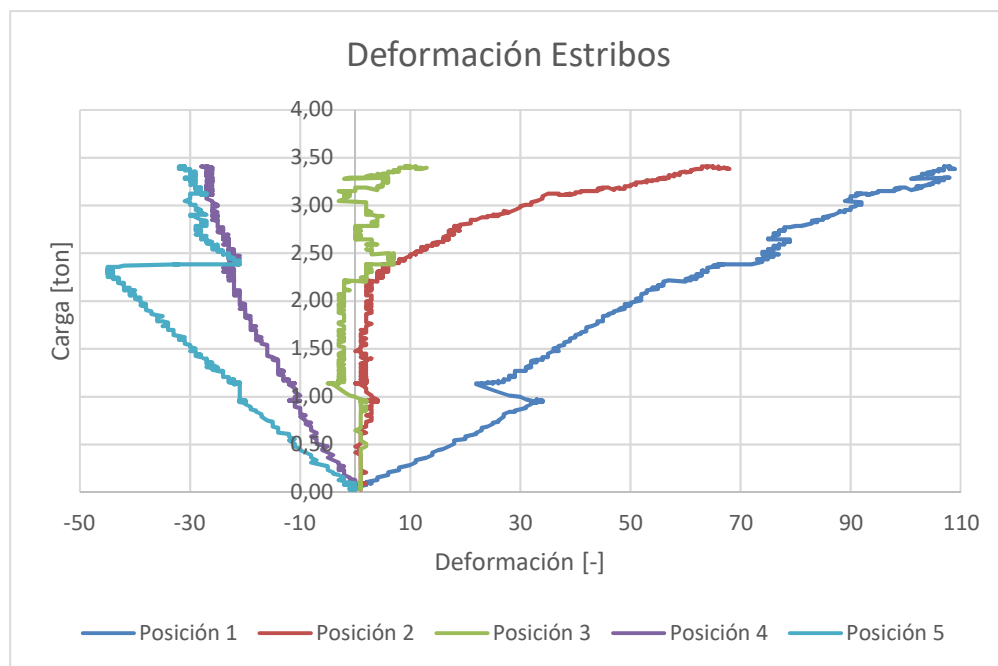


Figura 11-3 Pre-agrietamiento – Deformación en estribos

11.1.2 Ensaye con presfuerzo externo de PRFC

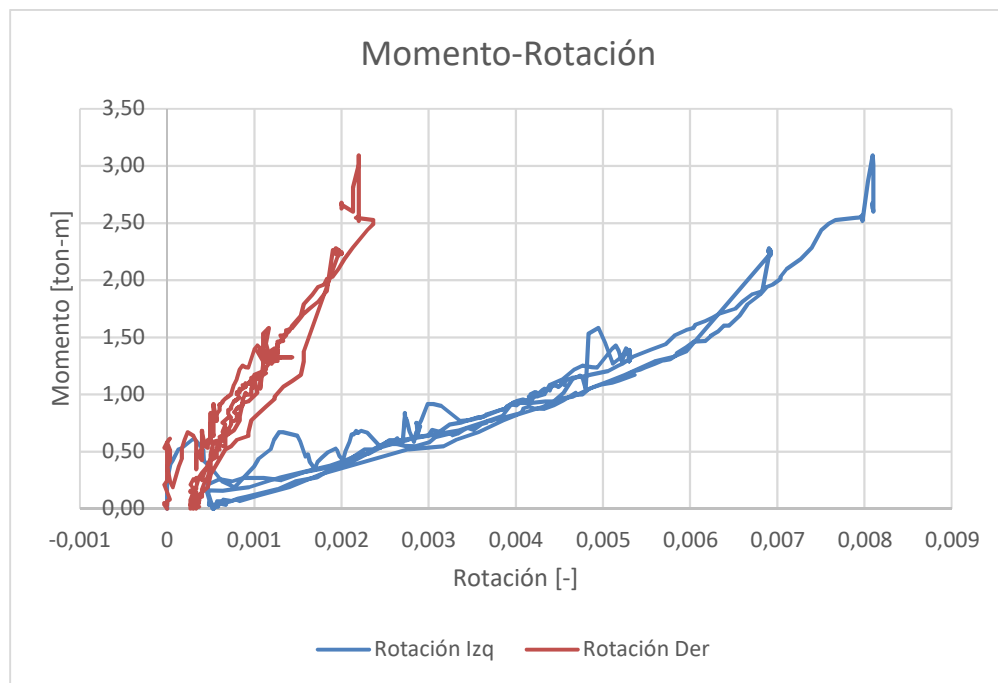


Figura 11-4 Ensaye con reforzamiento de PRFC – Momento – Rotación en los apoyos de la viga

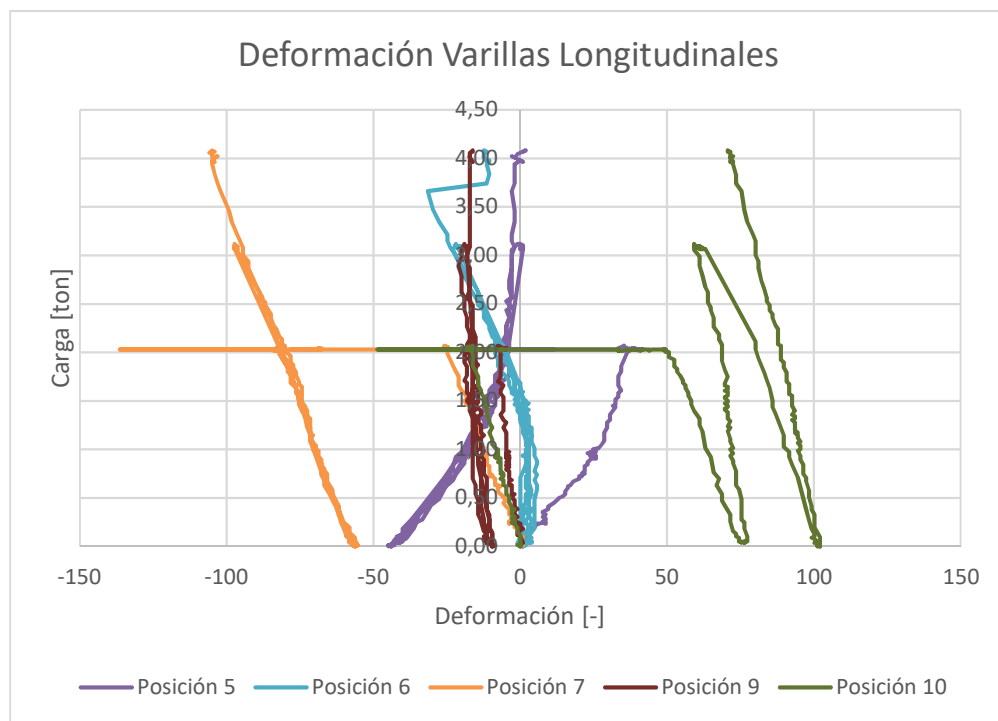


Figura 11-5 Ensaye con reforzamiento de PRFC – Deformación de varillas longitudinales

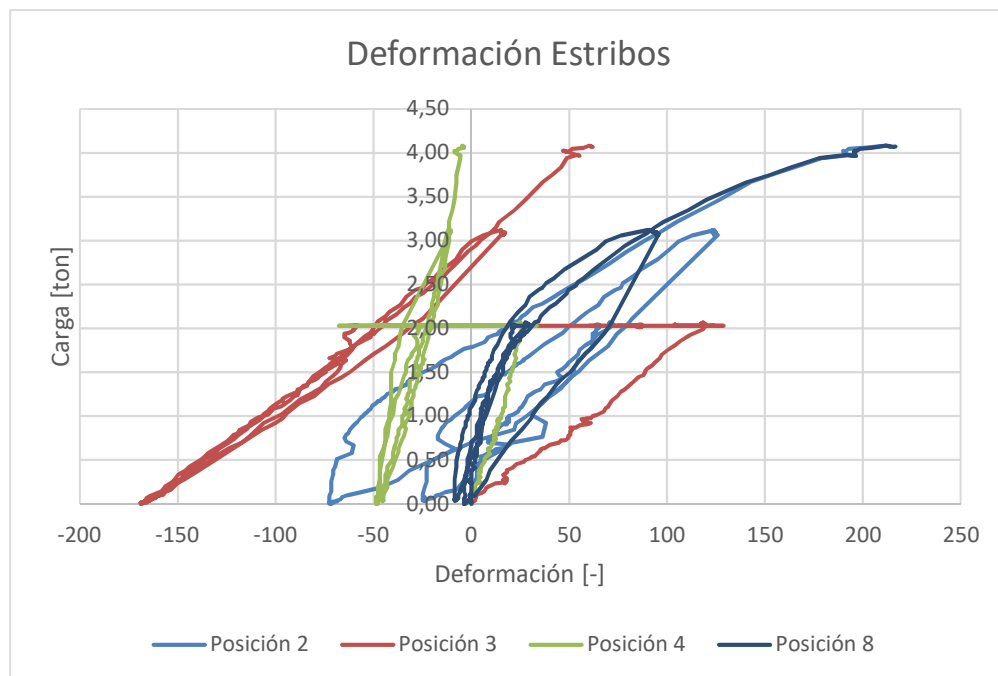


Figura 11-6 Ensaye con reforzamiento de PRFC – Deformación de estribos

11.2 Gráficas adicionales – Viga 2

11.2.1 Pre-agrietamiento

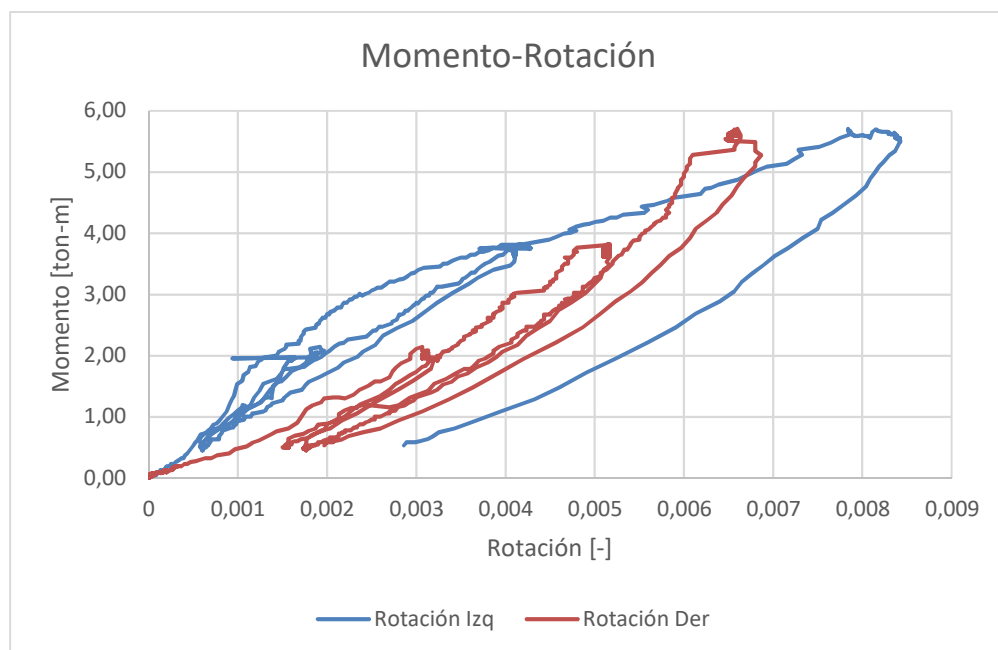


Figura 11-7 Momento – Rotación en ambos apoyos de las vigas

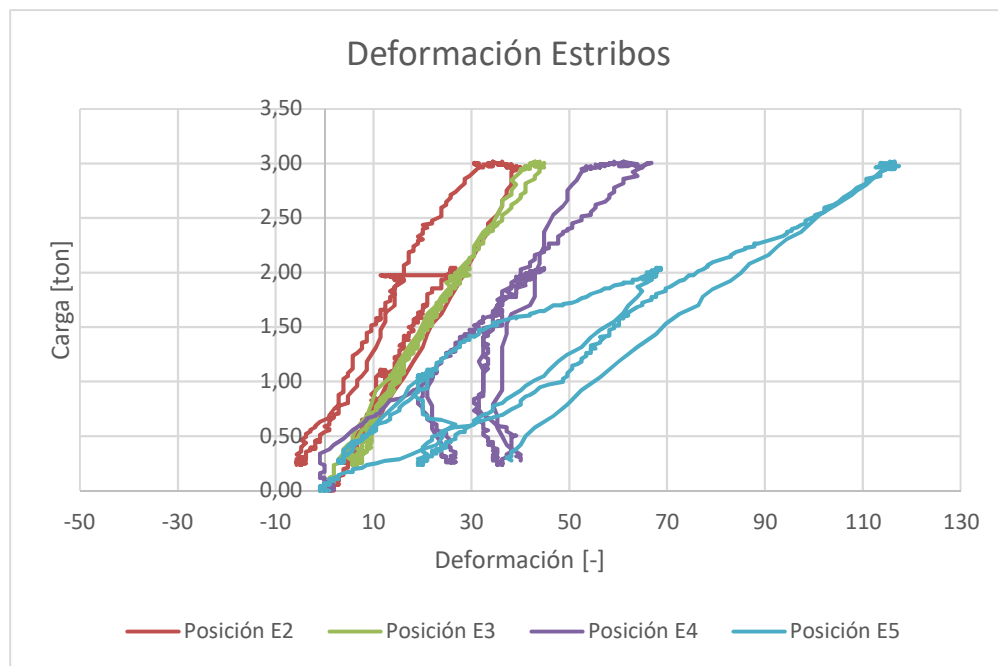


Figura 11-8 Deformación en estribos debido a pre-agrietamiento

11.2.2 Ensaye con presfuerzo externo de PRFC

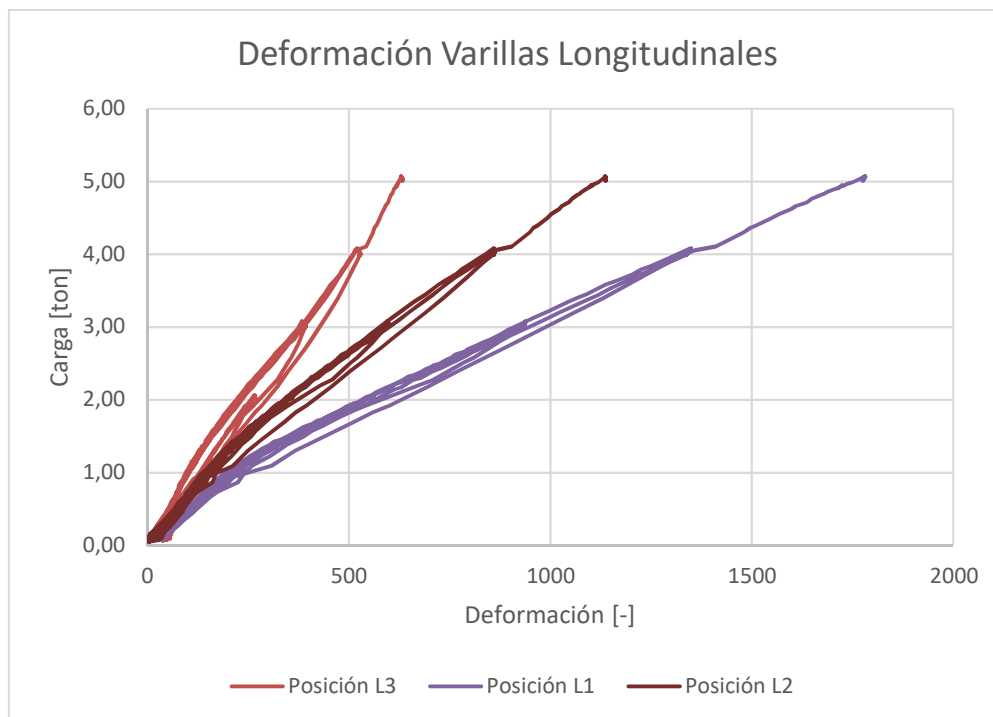


Figura 11-9 Ensaye con reforzamiento de PRFC – Deformación de varillas longitudinales

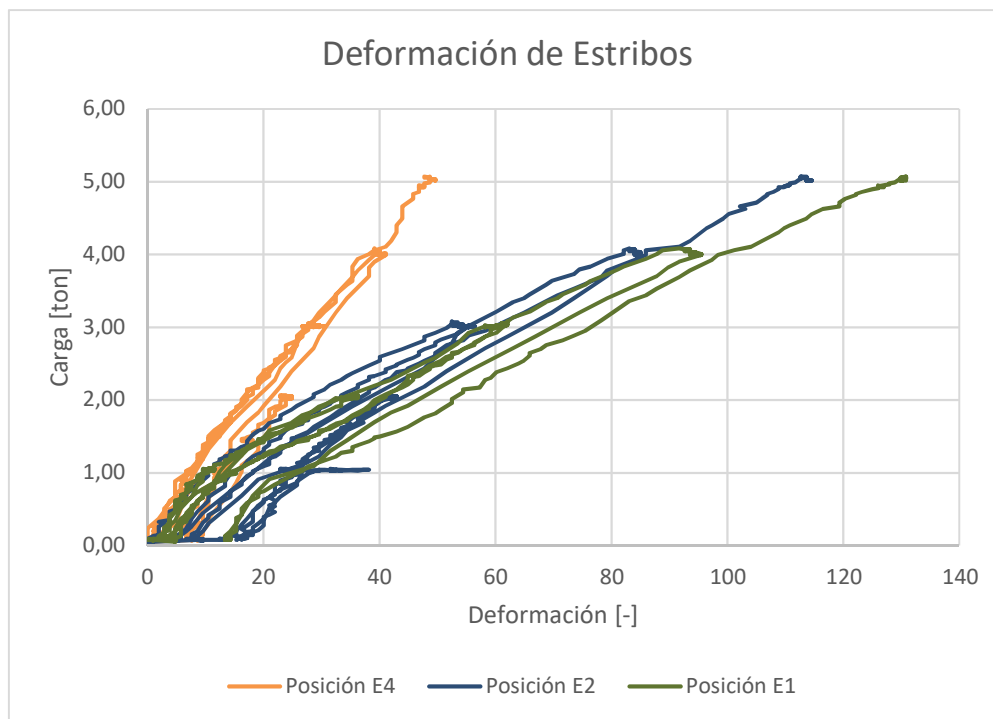


Figura 11-10 Ensaye con reforzamiento de PRFC – Deformación de varillas longitudinales

11.2.3 Prueba a falla última sin reforzamiento

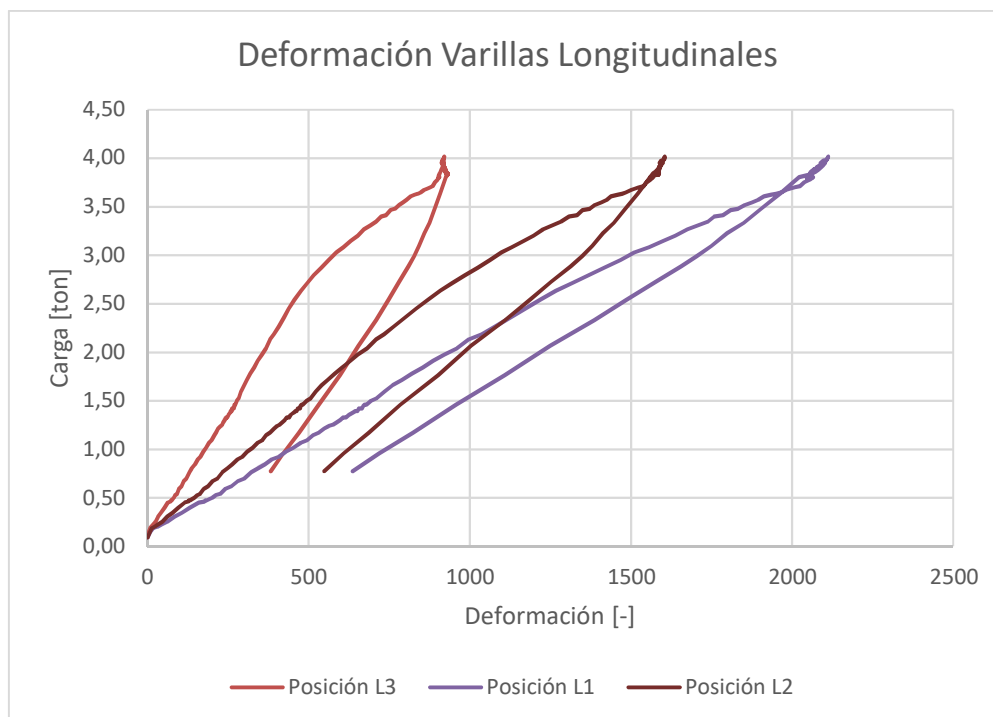


Figura 11-11 Ensaye a falla final de Viga 2 – Deformación de varilla longitudinal



Figura 11-12 Ensayo a falla final de Viga 2 – Deformación de estribos

11.3 Gráficas adicionales – Viga 3

11.3.1 Pre-agrietamiento

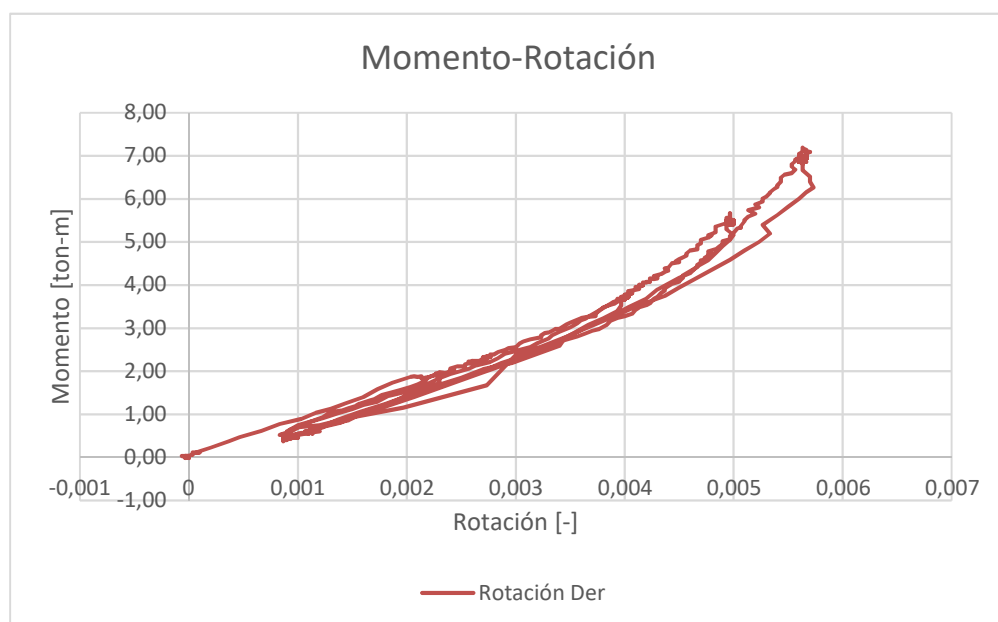


Figura 11-13 Momento – Rotación en apoyo de Viga 3

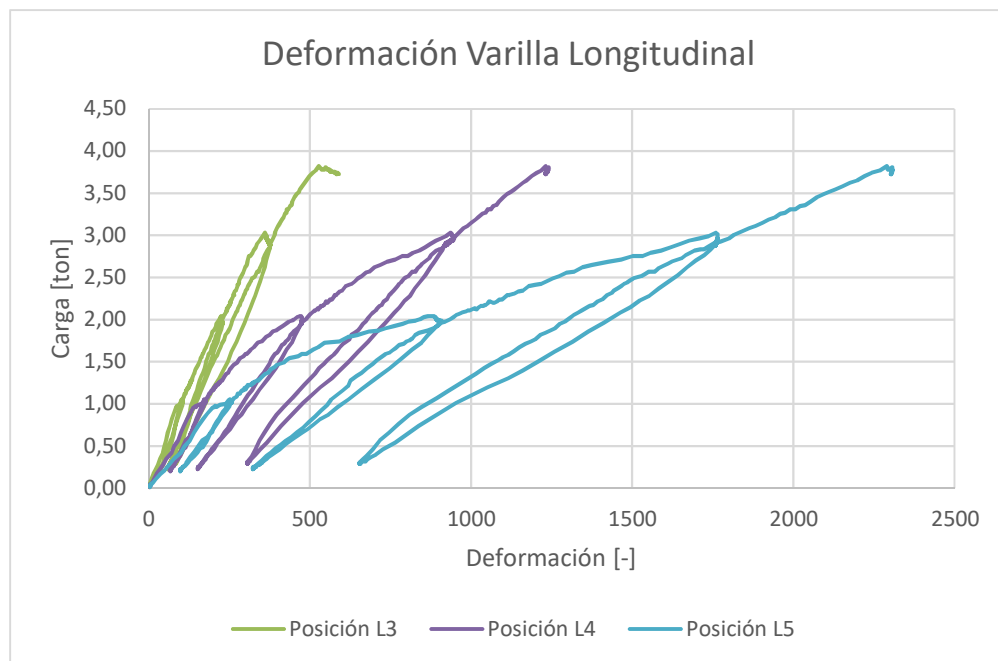


Figura 11-14 Deformación en varillas longitudinales debido a pre-agrietamiento de Viga 3

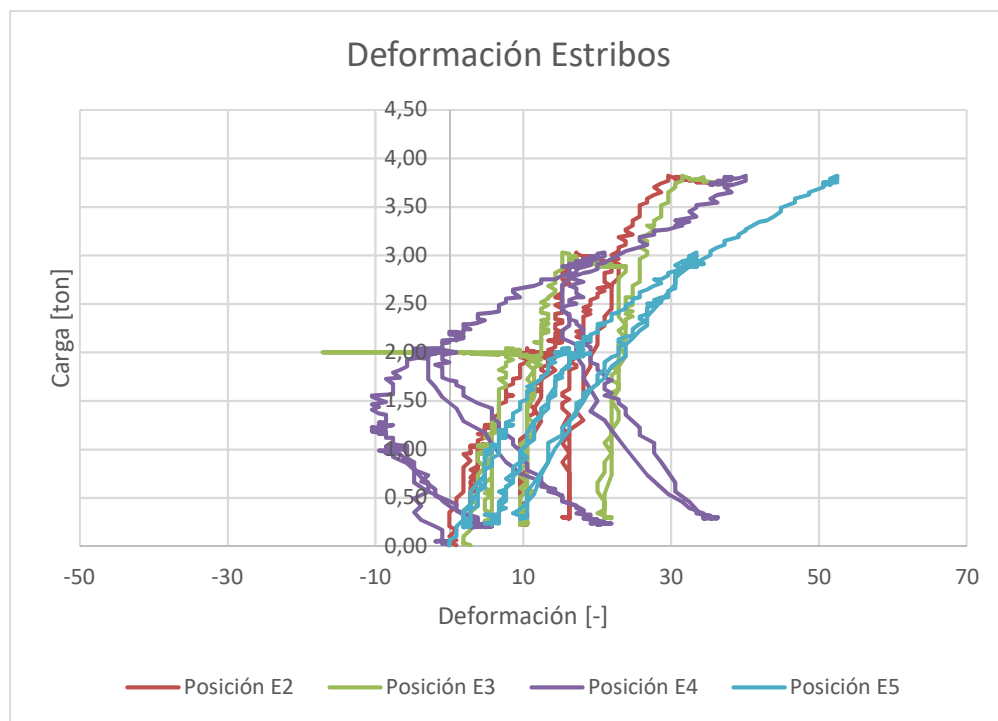


Figura 11-15 Deformación en estribos debido a pre-agrietamiento de Viga 3

11.3.2 Ensaye con presfuerzo externo de acero de presfuerzo

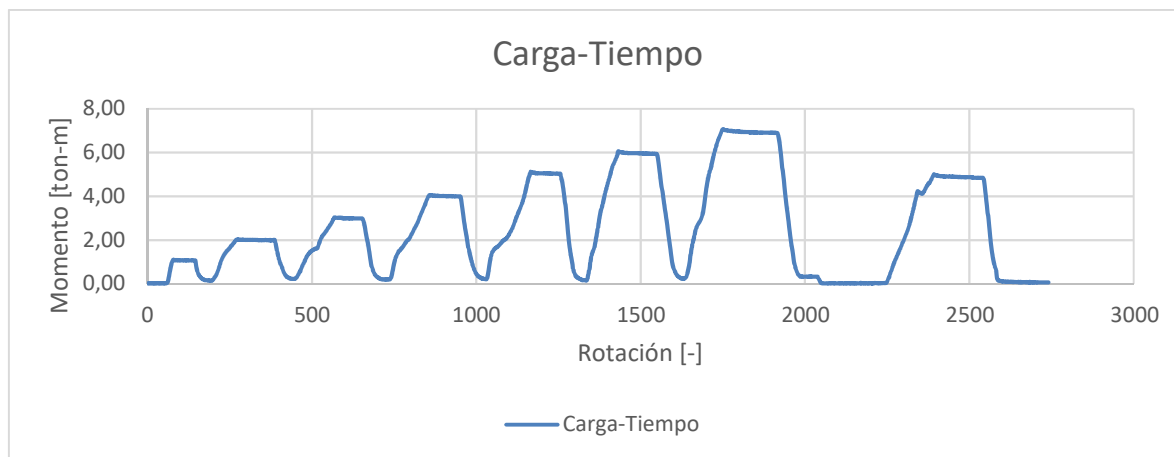


Figura 11-16 Historial de carga aplicada a la Viga 3

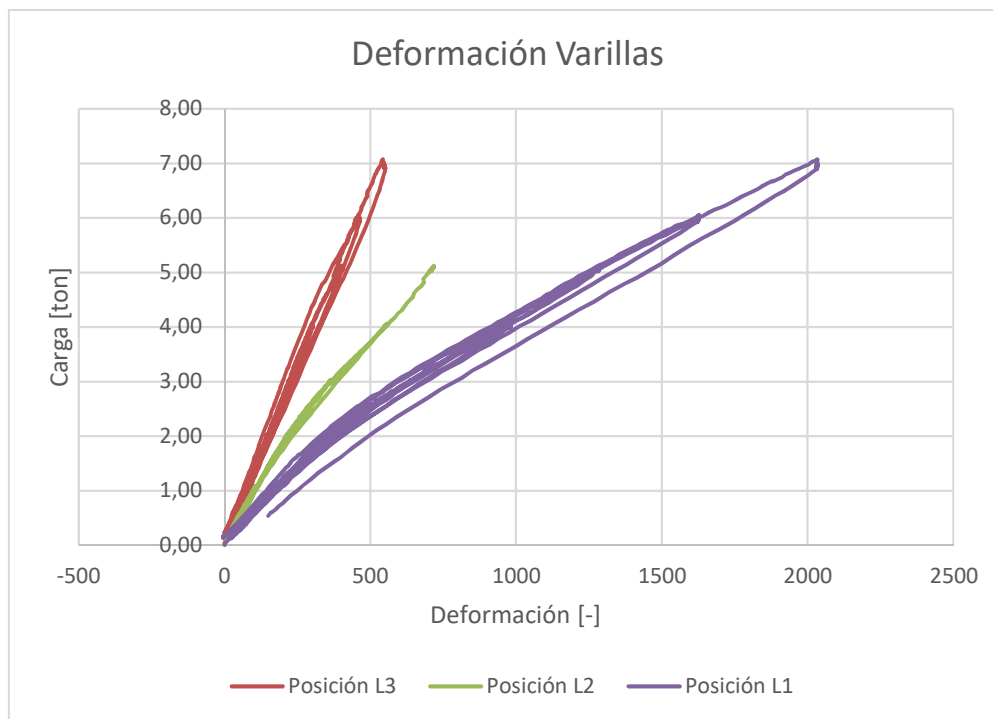


Figura 11-17 Ensaye con reforzamiento de acero de refuerzo a Viga 3 – Deformación de varillas longitudinales

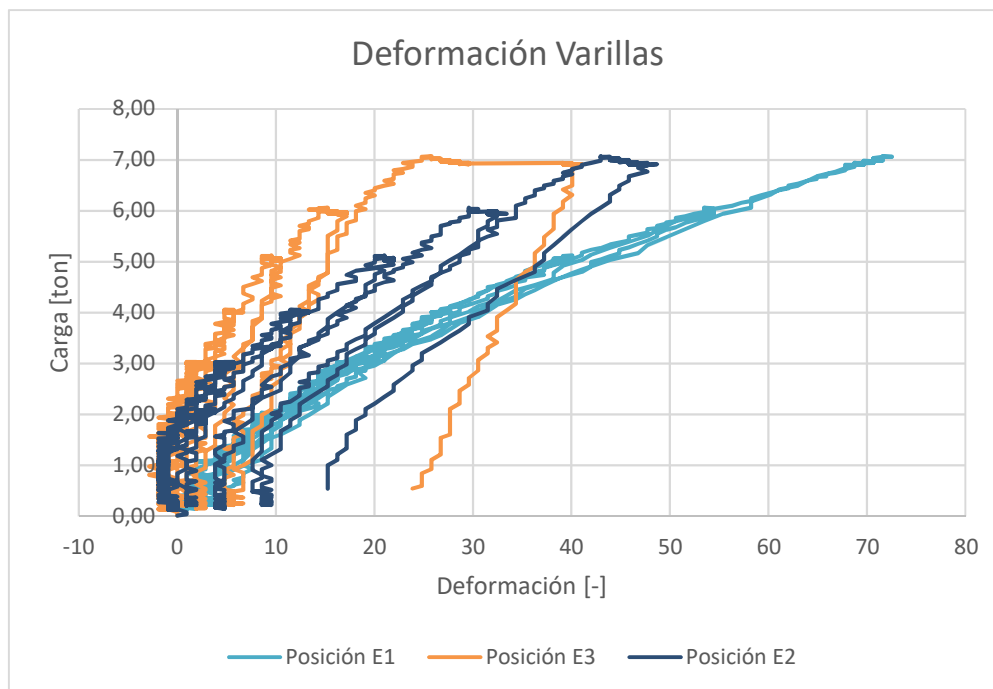


Figura 11-18 Ensayo con reforzamiento de acero de refuerzo a Viga 3 – Deformación de estribos

11.3.3 Prueba a falla última sin reforzamiento externo

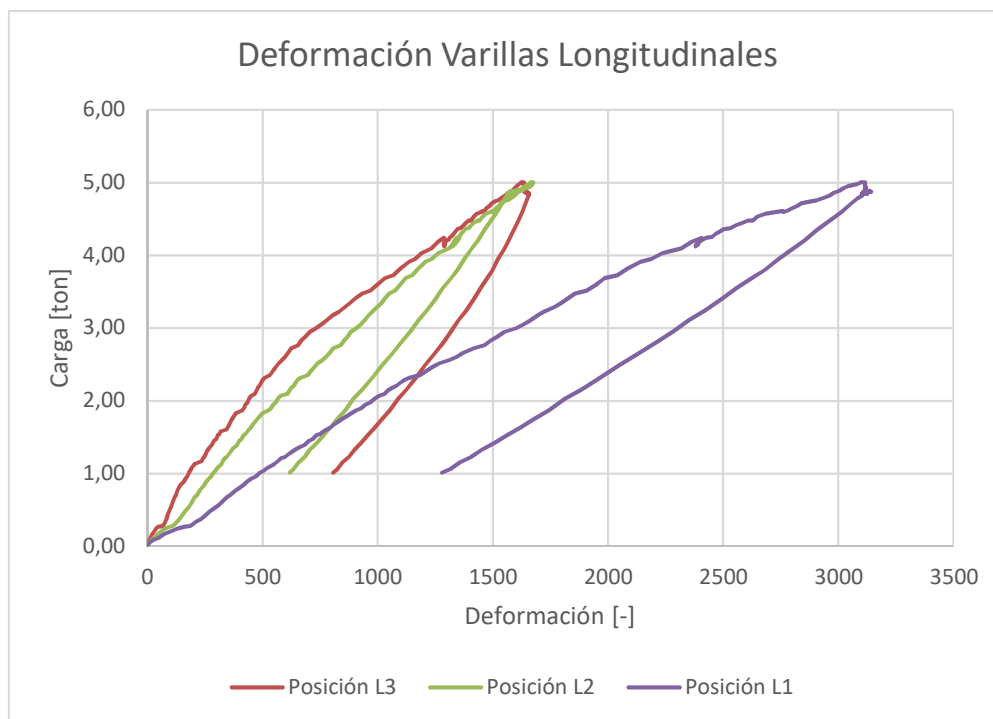


Figura 11-19 Ensayo a falla final de Viga 3 – Deformación de varilla longitudinal

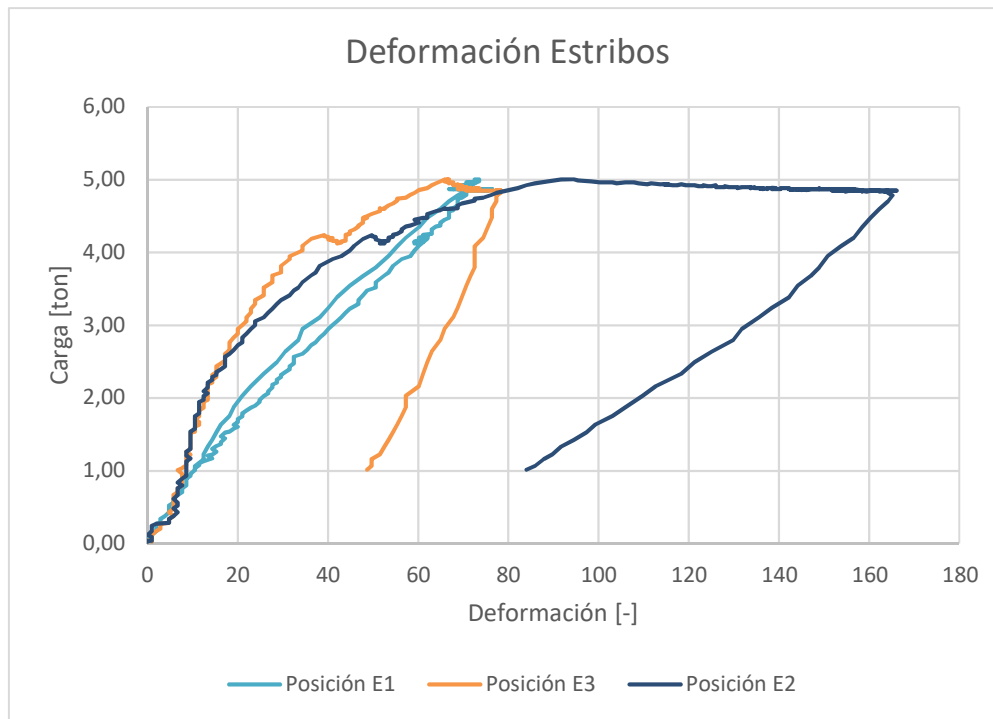


Figura 11-20 Ensayo a falla final de Viga 3 – Deformación de estribos