

Universidad Nacional de Rosario  
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura  
Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras



Tesis Doctoral

# **COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS**

Rubén Edgardo López

Director: Dr. Ing. Miguel Eduardo Tornello

Co-Director: Dr. Ing. Pedro Alberto Busnelli

Miembros del Jurado: Dra. Ing. Noemí Graciela Maldonado

Dr. Ing. Oscar Möller

Dra. Ing. Lía Isabel Orosco Segura

*Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, en  
cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de*

**Doctor en Ingeniería**

Diciembre de 2022

COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

Certifico que el trabajo incluido en esta tesis es el resultado de tareas de investigación originales y que no ha sido presentado para optar a un título de postgrado en ninguna otra Universidad o Institución.



**Rubén Edgardo López**

## RESUMEN

### Breve presentación del problema

En el presente trabajo se estudió el comportamiento bajo cargas dinámicas de un sistema de refuerzo para elementos de hormigón armado utilizando láminas pultruidas de fibra de vidrio vinculadas mediante sistemas resinosos y mecánicos.

En investigaciones previas, se pudo comprobar que los elementos reforzados mediante una vinculación mixta adhesiva-mecánica presentan una considerable capacidad de carga residual que otorga a las estructuras la posibilidad de desviar resistencias hacia otros elementos sin producir el colapso global.

Esta característica hace que este sistema sea recomendado para estructuras sometidas a grandes esfuerzos que pueden llegar a ser destructivos como los sismos.

### Enfoque y planificación del trabajo

Se dividió el trabajo en dos etapas. En primer lugar, se realizaron ensayos estáticos de los diferentes sistemas de vinculación en estudio para poder comparar las capacidades resistentes. Estos sistemas son:

- EB-FRP (Externally Bounded FRP): es el sistema de vinculación más difundido y consiste en adherir la lámina al soporte de hormigón mediante un puente adhesivo epoxídico.
- MF-FRP (Mechanically Fastened FRP): este sistema consiste en vincular la lámina al soporte mecánicamente a través de pasadores (pernos de anclaje).
- EB-MF-FRP (Externally Bounded Mechanically Fastened FRP): es un sistema de vinculación mixto desarrollado para los objetivos de la presente tesis en nuestra Facultad, que consiste en adherir y abulonar la lámina al soporte de hormigón.

Para la realización de estos ensayos fue necesario diseñar un equipo específico que permitió la ejecución de un número adecuado de ensayos.

En la segunda etapa se estudió el comportamiento de los tres sistemas de unión frente a un subgrupo de acciones dinámicas, "fatiga de bajo ciclado". Estas pruebas dieron como resultado parámetros para el dimensionamiento de refuerzos frente a cargas sísmicas para los sistemas EB-FRP y EB-MF-FRP, el sistema MF-FRP presentó mecanismo de rotura de fatiga en pernos con excesivas deformaciones.

Para la ejecución de estos ensayos fue necesario diseñar un nuevo equipo que, al igual que en el caso anterior, posibilitó la ejecución de una buena cantidad de ensayos.

### Datos significativos y hallazgos más importantes

Ya se había comprobado la efectividad del refuerzo de vigas de hormigón armado con láminas pultruidas de fibra de vidrio como sistema alternativo o complementario de los tradicionales refuerzos con láminas de fibra de carbono [Busnelli, A.P. (2018) - Diseño del refuerzo de vigas de hormigón armado con láminas de PRFV

- Tesis Doctoral FCEIA]. El uso de estas láminas de menor costo, representaba una economía en la aplicación.

Además, en el sistema de vinculación mixta de adhesión con resina y abulonado, se pudo comprobar un sensible aumento de capacidad portante frente a otros sistemas de refuerzo y se verificaron roturas sin colapso con importantes valores de resistencia residual.

También motiva esta investigación, el hecho que existen pocos antecedentes de refuerzos con materiales compuestos pultruidos bajo cargas cíclicas, problema de difícil solución dado que la componente de compresión de la carga cíclica tendería a delaminar los materiales compuestos.

En esta investigación, se obtuvieron los siguientes hallazgos para destacar:

- Se determinaron parámetros de rotura estática para cada uno de los sistemas de vinculación. Los valores obtenidos en estos ensayos estáticos se tomaron como referencia para los ensayos dinámicos posteriores.
- Se pudo establecer la capacidad de carga relativa entre los diferentes sistemas de vinculación con variantes en el número de bulones.
- Los ensayos de cargas alternadas de bajo ciclado permitieron determinar la prestación de cada uno de los sistemas estudiados bajo números limitados de ciclos como los que se presentan habitualmente durante los terremotos.
- Se confeccionaron gráficas para el proyecto de refuerzos en función del número de ciclos estimados para el sismo diseño.

### Conclusiones

- El sistema mixto adherido abulonado EB-MF-FRP se demostró como el de mejor prestación mecánica bajo cargas estáticas.
- Los sistemas de vinculación resinosos EB-FRP y EB-MF-FRP mostraron un buen comportamiento frente a cargas cíclicas alternadas. No así la vinculación exclusivamente mecánica MF-FRP.
- Estos dos sistemas también mostraron un buen comportamiento frente a cargas cíclicas pulsantes.

## **ABSTRACT**

### Brief presentation of the problem

In the present work, the behavior under dynamic loads of a reinforcement system for reinforced concrete elements using pultruded sheets of fiberglass linked by resinous and mechanical systems was studied.

In previous investigations, it was possible to verify that the elements reinforced by means of a mixed adhesive-mechanical linkage present a considerable residual load capacity that gives the structures the possibility of diverting resistance towards other elements without causing global collapse.

This feature makes this system recommended for structures subjected to high stresses that can be destructive like earthquakes.

### Work focus and planning

The work was divided into two stages. First, static tests of the different linkage systems under study were carried out in order to compare the resistant capacities. These systems are:

- EB-FRP (Externally Bounded FRP): it is the most widely used bonding system and consists of adhering the plate to the concrete support using an epoxy resin.
- MF-FRP (Mechanically Fastened FRP): this system consists of mechanically linking the plate to the support through anchor bolts.
- EB-MF-FRP (Externally Bounded Mechanically Fastened FRP): it is a mixed bonding system developed for the purposes of this thesis in our Faculty, which consists of adhering and bolting the sheet to the concrete support.

To carry out these tests, it was necessary to design a specific equipment that allowed the execution of an adequate number of tests.

In the second stage, the behavior of the three joint systems was studied against a subgroup of dynamic actions, "low cycle fatigue". These tests resulted in parameters for the sizing of reinforcements against seismic loads for the EB-FRP and EB-MF-FRP systems. The MF-FRP system presented a fatigue failure mechanism in bolts with excessive deformations.

For the execution of these tests, it was necessary to design a new equipment that, as in the previous case, enabled the execution of a good number of tests.

### Significant data and most important findings

The effectiveness of reinforced concrete beams with pultruded fiberglass sheets has already been proven to be an alternative or complementary system to traditional carbon fiber sheet reinforcements [Busnelli, A.P. (2018) - Design of the reinforcement of reinforced concrete beams with GRP sheets - FCEIA Doctoral Thesis]. The use of these lower cost sheets represented an economy in the application.

In addition, in the mixed bonding system with resin adhesion and bolting, a significant increase in bearing capacity compared to other reinforcement systems could be verified and breaks without collapse were verified with important values of residual strength.

This research is also motivated by the fact that there is little history of reinforcements with pultruded composite materials under cyclic loads, a problem that is difficult to solve given that the compression component of the cyclic load would tend to delaminate the composite materials.

In this investigation, the following findings were obtained to highlight:

- Static failure parameters were determined for each of the linkage systems. The values obtained in these static tests were taken as a reference for subsequent dynamic tests.
- It was possible to establish the relative load capacity between the different linkage systems with variants in the number of bolts.
- The tests of alternating loads of low cycling allowed to determine the performance of each of the systems studied under limited numbers of cycles such as those that usually occur during earthquakes.
- Graphs were made for the reinforcement project based on the number of cycles estimated for the design earthquake.

### Conclusions

- The EB-MF-FRP bolted and bonded mixed system proved to be the one with the best mechanical performance under static loads.
- The EB-FRP and EB-MF-FRP resin bonding systems showed a good behaviour against alternating cyclic loads. Not so the exclusively mechanical MF-FRP linkage.
- These two systems also showed good behavior against pulsating cyclic loads.

### **Agradecimientos:**

Se agradece el apoyo de las siguientes empresas que hicieron posible el desarrollo de este proyecto:

- I.M.A.E. Instituto de mecánica Aplicada y Estructura de Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (F.C.E.I.A) de Universidad Nacional de Rosario (U.N.R)
- C.M.E. Argentina S.A. - Garín (Buenos Aires) - Provisión de láminas pultruidas
- Phoenix S.R.L. - Rosario (Santa Fe) - Provisión de resinas epoxi y tejidos de fibra de carbono
- ALMACO - Asociación Latinoamericana de Materiales Compuestos

Además, se agradece la colaboración de las siguientes personas, sin las cuales este proyecto no se hubiera podido realizar:

#### Docentes de la F.C.E.I.A.:

Dr. Ing. Alberto Pedro Busnelli

Ing. Jorge Carlos Adué

Ing. Emiliano Gavilán

Ing. Danilo Pizzolitto

#### Alumnos de la F.C.E.I.A.:

Lucia Marrone

Edgard M. Muruchi

Marcelo R. Perno

Franco G. D'angelo

Martin E. Carni

Nahuel Georgeot

Enrique Noc

#### No docentes de la F.C.E.I.A.:

Uriel Peralta

Jorgelina Gavilán

#### Externos:

Ing. Luis Tierno - CME Argentina S.A.

Ing. Rafael Perlo - Phoenix S.R.L.

Dr. Ing. Angelo di Tommaso - Università di Bologna

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1. Motivación .....	17
1.2. Hipótesis .....	17
1.3. Objetivos de la tesis.....	18
1.4. Metodología.....	18
1.5. Estructura de la tesis.....	19
1.6. Actualización bibliográfica del tema.....	20
2. ESTADO DEL ARTE .....	22
2.1. Efectos dinámicos en las estructuras.....	22
2.2. Comportamiento de los materiales compuestos fibro-reforzados frente a las cargas dinámicas.....	23
2.3. Materiales compuestos sometidos a esfuerzos de fatiga.....	24
2.4. Materiales compuestos sometidos a esfuerzos de impactos .....	39
2.5. Materiales compuestos sometidos a vibraciones .....	45
2.6. Aplicación de materiales compuestos en estructuras sometidas a esfuerzos sísmicos .....	48
2.6.1. Recomendaciones normativas para los refuerzos sísmicos .....	48
2.6.2. Criterio de jerarquía de resistencias .....	49
2.6.3. Trabajos de investigación .....	51
2.7. Sistemas de refuerzo MF-FRP (Mechanically Fastened FRP) .....	67
3. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN EL REFUERZO A FLEXIÓN .....	75
3.1. Láminas pultruídas de PRFV .....	75
3.2. Hormigón .....	77
3.3. Acero.....	78
3.4. Resina.....	78
3.5. Varillas roscadas.....	79

4.	ENSAYOS PRELIMINARES .....	80
4.1.	Ensayos estáticos de vigas de hormigón armado reforzadas con láminas de PRFV adheridas y abulonadas .....	80
4.1.1.	Materiales utilizados .....	80
4.1.2.	Ensayos de las vigas .....	80
4.1.3.	Resultados de los ensayos .....	81
4.1.4.	Análisis de resultados.....	84
4.1.5.	Conclusiones - Ensayos estáticos .....	86
4.2.	Ensayos de fatiga en vigas de hormigón armado reforzadas con láminas de PRFV adheridas y abulonadas .....	89
4.2.1.	Preparación de vigas .....	89
4.2.2.	Ensayos.....	91
4.2.3.	Resultados de los ensayos a fatiga de las vigas .....	93
4.2.4.	Conclusiones Ensayos de fatiga .....	99
5.	ENSAYOS ESTÁTICOS DE RESISTENCIA DEL SISTEMA LÁMINA-HORMIGÓN .....	100
5.1.	Valores estadísticos .....	100
5.2.	Ensayos de tracción centrada.....	101
5.2.1.	Preparación de probetas .....	101
5.2.2.	Ensayos.....	105
5.2.3.	Resultados de los ensayos .....	107
5.3.	Ensayos de tracción excéntrica .....	109
5.3.1.	Diseño de la máquina para ensayos de tracción excéntrica .....	109
5.3.2.	Preparación de probetas.....	111
5.3.3.	Programación de los ensayos .....	111
5.3.4.	Ensayo de tracción asimétrica .....	118
5.3.5.	Resultados de ensayos .....	118
5.3.6.	Resumen de resultados.....	136

6.	ENSAYOS DINÁMICOS DE RESISTENCIA DEL SISTEMA LÁMINA-HORMIGÓN.....	137
6.1.	Diseño de la máquina de ensayos .....	137
6.2.	Elaboración de probetas .....	141
6.2.1.	Determinación de la resistencia característica de las probetas recicladas .....	142
6.2.2.	Determinación de la resistencia característica de las probetas nuevas .....	142
6.3.	Programación de los ensayos.....	143
6.4.	Ensayos de cargas alternadas.....	143
6.4.1.	Láminas adheridas (EB-FRP) .....	144
6.4.2.	Láminas adheridas y ancladas con un bulón central (EB-MF-FRP) .....	146
6.4.3.	Láminas adheridas y ancladas con dos bulones (EB-MF-FRP) .....	148
6.4.4.	Láminas solo ancladas (MF-FRP) con un bulón central y con dos bulones .....	149
6.5.	Ensayos de cargas pulsantes .....	151
6.5.1.	Láminas adheridas (EB-FRP) .....	151
6.5.2.	Láminas adheridas y ancladas con dos bulones (EB-MF-FRP).....	153
6.6.	Ensayos de cargas alternadas con tratamiento superficial.....	154
6.6.1.	Láminas adheridas (EB-FRP) .....	155
6.6.2.	Láminas adheridas y ancladas con dos bulones (EB-MF-FRP).....	155
7.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	156
7.1.	Ensayos de fatiga .....	156
7.2.	Ensayos estáticos de resistencia del sistema lámina-hormigón .....	156
7.2.1.	Ensayos de tracción centrada.....	157
7.2.2.	Ensayos de tracción excéntrica.....	157
7.3.	Ensayos dinámicos de resistencia del sistema lámina-hormigón .....	162
7.3.1.	Ensayos de ciclos alternados - Gráficos %-N .....	162
7.3.2.	Ensayos de ciclos alternados - Gráficos S-N .....	164
7.3.3.	Ensayos de ciclos pulsantes.....	172
7.3.4.	Ensayos de ciclos alternados con preparación especial de la superficie .....	172
7.4.	Ensayos estáticos post ensayos dinámicos.....	173

COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

7.4.1.	Estáticos post ciclados de ciclos alternativos en sistema EB-FRP.....	173
7.4.2.	Estáticos post ciclados de ciclos alternativos en sistemas con mayor rugosidad.....	173
7.4.3.	Estáticos post ciclados de ciclos pulsantes.....	174
8.	CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES .....	176
8.1.	Ensayos estáticos de resistencia del sistema lámina-hormigón .....	176
8.1.1.	Ensayos de tracción centrada.....	176
8.1.2.	Ensayos de tracción excéntrica.....	176
8.2.	Ensayos dinámicos de resistencia del sistema lámina-hormigón .....	179
8.2.1.	Ensayos de ciclos alternados .....	179
8.2.2.	Ensayos de ciclos alternados con preparación especial de la superficie .....	180
8.2.3.	Ensayos de ciclos pulsantes.....	180
8.2.4.	Ensayos de fatiga .....	180
8.3.	Futuras investigaciones.....	181
8.3.1.	Diámetro de los bulones .....	181
8.3.2.	Mejoramiento de la rugosidad superficial del hormigón.....	181
8.3.3.	Ensayos de cargas pulsantes y de fatiga .....	182
8.3.4.	Ensayos de cargas pulsantes sin cambio de signo .....	182
8.3.5.	Ensayos estáticos post ensayos dinámicos .....	183
8.3.6.	Experimentación numérica .....	183
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	184
	Artículos .....	184
	Normas y reglamentos .....	191
	ANEXOS .....	192
	ANEXO 1 - Fotografías de los ensayos estáticos .....	193
	ANEXO 2 - Diseño de la máquina de ensayos dinámicos .....	217
	ANEXO 3 – Gráficos de los ensayos dinámicos .....	225
	ANEXO 4 – Fotografías de los ensayos dinámicos .....	268

### Abreviaturas y símbolos

#### a) Materiales y sistemas

AFRP	Aramid Fiber Reinforced Polymers
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymers
EB-FRP	Externally Bounded Fiber Reinforced Polymers
EB-MF-FRP	Externally Bounded Mechanically Fastened Fiber Reinforced Polymers
FRP	Fiber Reinforced Polymers
FRCM	Fiber Reinforced Cementitious Matrix
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymers
MF-FRP	Mechanically Fastened Fiber Reinforced Polymers
NSM	Near Surface Mounted
PRFV	Polímeros Reforzados con Fibras de Vidrio
SFRC	Steel Fiber Reinforced Concrete

#### b) Instituciones

ACI	American Concrete Institute
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
FCEIA	Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la U.N.R.
IMAE	Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras de la FCEIA
UNR	Universidad Nacional de Rosario
UTN	Universidad Tecnológica Nacional

#### c) Parámetros de cálculo

$A$	= área de una cara de aporte, donde la lámina está adherida al hormigón [ $\text{cm}^2$ ].
$d$	= distancia de la fibra comprimida extrema al centroide de refuerzo a tracción (mm)
$d_f$	= profundidad efectiva del refuerzo de flexión FRP (mm)
$E_f$	= módulo de elasticidad de tracción de FRP (MPa)
$E_s$	= módulo de elasticidad del acero, psi (MPa)
$f_c$	= esfuerzo de compresión en el hormigón (MPa)
$f'_c$	= resistencia a la compresión especificada del hormigón (MPa)
$f_f$	= nivel de tensión en refuerzo FRP (MPa)
$f_{f,s}$	= nivel de tensión en el FRP causado por un momento dentro del rango elástico del miembro (MPa)
$f_{fu}$	= tensión última de diseño a la tracción de FRP (MPa)
$f_{s,s}$	= nivel de tensión en el refuerzo de acero en cargas de servicio (MPa)
$k$	= relación entre la profundidad del eje neutro y la del refuerzo medida a partir de la fibra de compresión extrema
$N$	= Número de ciclos
$N_b$	= Número de bulones en la union
$P$	= carga medida en los gatos [kN]
$P_c$	= Carga característica.
$P_{rot}$	= Carga de rotura.
$P_{prom}$	= Carga promedio.

- $\tau$  = tensión de adherencia alcanzada [MPa]  
 $\tau_u$  = Tensión de rotura a N ciclos [MPa]  
 $\tau_r$  = Tensión de rotura estática (N = 1) [MPa]  
 $\varepsilon_{bi}$  = deformación en el hormigón en la fibra traccionada en el momento de la instalación del FRP (mm/mm)  
s = desvío standard  
t = parámetro de t-Student  
n = Número de muestras

d) Graficas

- Figura 2.1 - Comportamiento a fatiga de distintos tipos de compuestos epoxy/fibra unidireccional comparados con el aluminio.
- Figura 2.5 - Evolución del módulo de Young con el número de ciclos
- Figura 2.10- Gráfico S/N para láminas de GFRP con fibras tejidas en matriz viniléster poliuretánica y poliéster.
- Figura 2.27- Gráficos carga-desplazamiento de los ensayos de resistencia residual.
- Figura 2.29- (a) Grafico frecuencia-aceleración (b) Grafico tiempo-aceleración.
- Figura 2.38- Ciclos de desplazamientos en el extremo de la viga.
- Figura 2.39- Grafico carga-desplazamiento.
- Figura 2.42- Protocolo de cargas.
- Figura 2.43- Disipación de energía acumulada de las muestras.
- Figura 2.49- Curva de histéresis y envolventes de un espécimen.
- Figura 2.52- Curva de histéresis.
- Figura 2.55- Curvas de histéresis.
- Figura 4.2 - Diagrama carga-flecha de la V5 (2db12).
- Figura 4.5 - Diagrama carga-flecha de la V3 (2db10)
- Figura 4.8 - Diagrama carga-flecha y tabla de valores de la V9 (2db8).
- Figura 5.14- Distribución de resultados de tensiones de adherencia de las probetas ensayadas.
- Figura 5.54- Resumen de resultados.
- Figura 6.9 - Esquema de ciclado de cargas. P = Valor de rotura estático del espécimen. a/b/c: % del valor de P en cada escalón
- Figura 6.10- Probetas sistema EB-FRP. Número de ciclos en función del porcentaje de probetas que los superan.
- Figura 6.11- Probetas sistema EB-MF-FRP con un bulón. Número de ciclos en función del porcentaje de probetas que los superan.
- Figura 6.12- Probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones. Número de ciclos en función del porcentaje de probetas que los superan.
- Figura 6.13- Probetas sistema MF-FRP con uno y dos bulones. Número de ciclos en función del porcentaje de probetas que los superan comparados con el sistema EB-FRP.

- Figura 6.14- Esquema de cargas pulsantes.  $P$  = Valor de rotura estático del espécimen.  $a/b$ : % máximo y mínimo de  $P$
- Figura 6.15- Probetas sistema EB-FRP. Número de ciclos en función del porcentaje de probetas que los superan.
- Figura 6.16- Probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones. Número de ciclos en función del porcentaje de probetas que los superan.
- Figura 6.17- Ranurado de la superficie de  $H^\circ$  y modo de falla.
- Figura 7.1 - Ciclos requeridos para la rotura de probetas según el porcentaje de tensión
- Figura 7.2 - Comparación entre valores experimentales y teóricos
- Figura 7.3 - Comparación entre valores experimentales y teóricos (Eje ciclos escala log)
- Figura 7.4 - Comparación entre función adoptada y la de mayor valor  $r_2$
- Figura 7.5 - Comparación entre función adoptada y la de mayor valor  $r_2$  (Eje ciclos escala log)
- Figura 7.6 - Comparación entre valores experimentales y teóricos
- Figura 7.7 - Comparación entre valores experimentales y teóricos (Eje ciclos escala log)
- Figura 7.8 - Comparación entre función adoptada y la de mayor valor  $r_2$
- Figura 7.9 - Comparación entre función adoptada y la de mayor valor  $r_2$  (Eje ciclos escala log)

e) Tablas

- Tabla 2.1 - Tabla 10-2.9 de la norma ACI 440 R17 - Tensión límite por carga de servicio cíclica en el refuerzo FRP en función del tipo de fibra.
- Tabla 2.2 - Tensión máxima en GPa para  $10^4$  y  $10^6$  ciclos para los diferentes materiales del gráfico de Figura 2.1.
- Tabla 2.3 - Máxima carga alcanzada en cada refuerzo.
- Tabla 2.4 - Descripción de los especímenes.
- Tabla 3.1 - Composición de las láminas pultruidas estándar de PRFV
- Tabla 3.2 - Composición de las láminas pultruidas de PRFV reforzadas
- Tabla 3.3 - Resultados de ensayos de tracción por flexión.
- Tabla 3.4 - Resultados de ensayos de compresión simple.
- Tabla 3.5 - Datos técnicos Concrecive 227
- Tabla 4.1 - Resumen de resultados
- Tabla 4.2 - Resumen de resultados obtenidos de las vigas.
- Tabla 4.3 - Armaduras para vigas.
- Tabla 4.4 - Resultados del ensayo de la viga 0 sin refuerzo.
- Tabla 4.5 - Resultados del ensayo de la viga 1.
- Tabla 4.6 - Resultados del ensayo de la viga 2.
- Tabla 4.7 - Resultados del ensayo de la viga 3.
- Tabla 5.1 - Tabla t-Student para valores de  $n \leq 10$  para obtener los valores característicos de los fractiles 5% y 10 %

- Tabla 5.2 - Resultados de los ensayos de tracción centrada.
- Tabla 5.3 - Tensiones de rotura promedio y característica
- Tabla 5.4 - Ensayo de adherencia con láminas pegadas al hormigón.
- Tabla 5.5 - Tensiones de rotura promedio y característica
- Tabla 5.6 - Ensayo de adherencia con láminas pegadas al hormigón ancladas con 1 bulón central.
- Tabla 5.7 - Tensiones y cargas de rotura promedio y características.
- Tabla 5.8 - Ensayo de adherencia con láminas pegadas al hormigón y ancladas con 2 bulones centrales.
- Tabla 5.9 - Tensiones y cargas de rotura promedio y características.
- Tabla 5.10 - Ensayo de adherencia con láminas ancladas al hormigón con 1 bulón central.
- Tabla 5.11 - Cargas de rotura promedio y característica.
- Tabla 5.12 - Ensayo de adherencia con láminas ancladas al hormigón con 2 bulones centrales.
- Tabla 5.13 - Cargas de rotura promedio y característica
- Tabla 5.14 - Ensayo de adherencia con láminas ancladas al hormigón con 2 bulones centrales (cont.).
- Tabla 5.15 - Cargas de rotura promedio y característica.
- Tabla 5.16 - Ensayo de adherencia con láminas ancladas al hormigón con 3 bulones centrales.
- Tabla 5.17 - Cargas de rotura promedio y característica.
- Tabla 5.18 - Ensayo de adherencia con láminas ancladas al hormigón con 2 bulones centrales en probeta de H<sup>0</sup>A<sup>0</sup>.
- Tabla 5.19 - Carga de rotura promedio
- Tabla 5.20 - Ensayo de adherencia con láminas ancladas al hormigón con 3 bulones centrales en probeta de H<sup>0</sup>A<sup>0</sup>.
- Tabla 5.21 - Carga de rotura promedio
- Tabla 6.1 - Tensiones promedio obtenidas de los ensayos de resistencia estática
- Tabla 6.2 - Cargas promedio obtenidas de los ensayos de resistencia estática
- Tabla 6.3 - Probetas sistema EB-FRP
- Tabla 6.4 - Número de probetas sistema EB-FRP que superaron n ciclos
- Tabla 6.5 - Porcentaje de probetas sistema EB-FRP que superaron n ciclos
- Tabla 6.6 - Probetas sistema EB-MF-FRP con un bulón
- Tabla 6.7 - Número de probetas sistema EB-MF-FRP con un bulón que superaron n ciclos
- Tabla 6.8 - Porcentaje de probetas sistema EB-MF-FRP con un bulón que superaron n ciclos
- Tabla 6.9 - Probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones
- Tabla 6.10 - Número de probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones que superaron n ciclos

Tabla 6.11 - Porcentaje de probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones que superaron n ciclos

Tabla 6.12 - Probetas sistema MF-FRP con uno y dos bulones

Tabla 6.13 - Número de probetas sistema MF-FRP con un bulón que superaron n ciclos

Tabla 6.14 - Número de probetas sistema MF-FRP con dos bulones que superaron n ciclos

Tabla 6.15 - Porcentaje de probetas sistema MF-FRP con un bulón que superaron n ciclos

Tabla 6.16 - Porcentaje de probetas sistema MF-FRP con dos bulones que superaron n ciclos

Tabla 6.17 - Probetas sistema EB-FRP

Tabla 6.18 - Número de probetas sistema EB-FRP con dos bulones que superaron n ciclos

Tabla 6.19 - Porcentaje de probetas sistema EB-FRP con dos bulones que superaron n ciclos

Tabla 6.20 - Probetas sistema EB-FRP

Tabla 6.21 - Número de probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones que superaron n ciclos

Tabla 6.22 - Porcentaje de probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones que superaron n ciclos

Tabla 6.23 - Probetas sistema EB-FRP

Tabla 6.24 - Probetas sistema EB-MF-FRP

Tabla 7.1 - Ciclos requeridos para la rotura de probetas según el porcentaje de tensión

Tabla 7.2 - Comparación entre valores experimentales y teóricos

Tabla 7.3 - Comparación entre valores experimentales y teóricos

Tabla 7.4 - Ensayo estáticos post ciclados alternativo - sistema EB-FRP

Tabla 7.5 - Ensayo estáticos de referencia, sin ciclado previo

Tabla 7.6 - Ensayo estáticos post ciclados alternativo

Tabla 7.7 - Ensayo estáticos post ciclados alternativo

# CAPÍTULO 1

---

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Motivación

Esta tesis doctoral surge como una continuación de la tesis realizada en nuestra institución por Alberto Pedro Busnelli [Busnelli A. (2018)], cuyos resultados obtenidos mostraron que uno de los campos de aplicación de mayor utilidad para los refuerzos de láminas pultruidas adheridas y abulonadas podrían ser las estructuras sometidas a cargas sísmicas, ya que los elementos reforzados presentaron una considerable capacidad de carga residual que otorgaría a las estructuras la posibilidad de desviar resistencias hacia otros elementos sin producir el colapso global.

En dicho trabajo se realizaron solamente ensayos con cargas monotónicas crecientes, por lo tanto, para comprobar su efectividad para soportar cargas dinámicas como las introducidas por equipos vibrantes, circulación de vehículos o cargas de origen sísmico, se presentaba como una investigación necesaria el estudio del comportamiento de estos refuerzos bajo cargas variables, con y sin inversión de signo.

Además, se consideró importante evaluar el comportamiento relativo de las tres posibilidades de vinculación con el hormigón que posibilitan las láminas pultruidas de fibra de vidrio, esto es la unión resinosa, la unión mecánica y la unión mixta.

Previamente a las pruebas dinámicas, se realizaron ensayos de resistencia estática de los diferentes sistemas de anclaje para considerar estos valores como referencia para los ensayos de ciclado.

### 1.2. Hipótesis

#### a) Resistencia del refuerzo

*Los refuerzos a flexión utilizando láminas pultruidas de fibra de vidrio presentan un desempeño eficaz frente a esfuerzos variables de bajo ciclo.*

La muy buena performance que mostraron estos refuerzos a flexión en los ensayos de vigas permite suponer que su respuesta frente a cargas cíclicas ratificará este desempeño. Se quiere comparar además las prestaciones mecánicas de los tres sistemas de vinculación que posibilitan estas láminas de grueso espesor.

b) Sistemas de anclaje

*Las láminas pultruídas de fibra de vidrio pueden ser vinculadas al hormigón mediante adhesión, por medios mecánicos o por una combinación de ambos sistemas.*

Se experimentó con buenos resultados la vinculación resinosa y mixta de estas láminas, pero no se investigó su prestación con vinculación exclusivamente mecánica con la profundidad de los otros sistemas. Se programan ensayos estáticos y dinámicos con los tres sistemas estudiando, en el caso de las uniones mecánicas, la variación de prestación según la cantidad de bulones.

c) Ensayos bajo cargas cíclicas

*Los refuerzos vinculados mediante sistemas resinosos soportan cargas cíclicas alternadas y pulsantes.*

El comportamiento estructural de los sistemas resinosos permite suponer que este tipo de vinculación es adecuado para soportar cargas dinámicas. Se experimenta el comportamiento de probetas bajo cargas variables de bajo número de ciclos tanto alternadas como pulsantes. No es de suponer que las vinculaciones exclusivamente mecánicas soporten este tipo de solicitaciones porque la variación de esfuerzos afecta sensiblemente las uniones por corte y aplastamiento.

### 1.3. Objetivos de la tesis

- El objetivo principal del trabajo de tesis es determinar un valor de respuesta de los diferentes sistemas de vinculación entre las láminas pultruídas de fibra de vidrio y un soporte de hormigón mediante ensayos de bajo número de ciclos, estableciendo su relación con los valores obtenidos en ensayos estáticos.
- De esta manera, se propone brindar a los proyectistas una herramienta de diseño que les permita obtener valores de respuesta dinámica a través de simples ensayos estáticos de su diseño de unión.
- Se pretende que los resultados sean fácilmente reproducibles o mejorados por la industria de la construcción clásica, no requiriendo de prácticas complicadas, sólo reproducibles en condiciones de laboratorio, por tal motivo se decide trabajar con materiales de uso comercial como láminas pultruídas, adhesivos, y tornillería.

### 1.4. Metodología

Este es un trabajo experimental, para lo cual se diseñan y programan ensayos de distintas características:

- Ensayos estáticos de los sistemas de unión:  
Se diseña y construye un dispositivo de ensayo para obtener valores de rotura con carga estática de los diferentes sistemas de unión en cantidad suficiente como para poder llegar a conclusiones confiables.
- Ensayos de sistemas de unión con fatiga de bajo ciclado:  
Del mismo modo, se diseña y construye otro dispositivo de ensayo para someter las probetas a ciclos de carga alternos y pulsantes.

- Pruebas de fatiga a flexión en vigas:  
Se prevé ensayar a modo de complemento algunas vigas con refuerzos a flexión a fatiga de alto ciclado.

El universo de resultados obtenidos nos permitirá arribar a conclusiones. Los ensayos se instrumentan de tal manera de obtener información en función del tiempo de los patrones de carga realmente dados a la unión.

En los capítulos siguientes se describen todas las tareas realizadas desde la confección de especímenes hasta la ejecución de los ensayos.

### **1.5. Estructura de la tesis**

La tesis se estructura de la siguiente manera:

#### Capítulo 1 - Introducción

Se presentan aspectos generales de la tesis como la motivación de la investigación, las hipótesis, los objetivos, la metodología de los ensayos, la estructura de la tesis y una actualización bibliográfica del tema.

#### Capítulo 2 - Estado del arte

Se resume el estado del arte de los sistemas de refuerzo con materiales compuestos aplicados a estructuras solicitadas dinámicamente. Se refieren estudios realizados sobre la prestación de diferentes materiales de refuerzo en aplicaciones de distinto tipo. Se describe la metodología de cálculo de la normativa vigente y sus limitaciones.

#### Capítulo 3 - Materiales utilizados en los ensayos

Se describen las características geométricas y mecánicas de los materiales utilizados en los ensayos y se presentan los diferentes ensayos realizados sobre las láminas pultruidas.

#### Capítulo 4 - Ensayos preliminares

Se presentan ensayos preliminares realizados en el IMAE relacionados con este trabajo. En este capítulo se resumen los ensayos de flexión sobre vigas de hormigón armado reforzadas con láminas pultruidas de GFRP adheridas y abulonadas que se tomaron como punto de partida para la realización de este trabajo.

Además, se describen los ensayos de fatiga de alto ciclado que se realizaron sobre vigas reforzadas con el mismo sistema de vinculación.

## Capítulo 5 - Ensayos estáticos de resistencia del sistema lámina-hormigón

### a) Tracción centrada

Se describen los ensayos programados en primera instancia consistentes en el pegado de dos láminas en caras paralelas de probetas prismáticas de hormigón. Los resultados obtenidos poco confiables y la dificultad de confección de las probetas llevaron a diseñar un dispositivo diferente.

### b) Tracción excéntrica

Este método de ensayo se demostró muy simple y efectivo. Se muestran los resultados obtenidos para los distintos sistemas de unión lamina-hormigón con variantes en su vinculación.

## Capítulo 6 - Ensayos dinámicos de resistencia del sistema lámina-hormigón

En este capítulo se presentan los ensayos realizados para estudiar el comportamiento de los diferentes sistemas de unión frente a cargas cíclicas. Para ello fue también necesario diseñar y desarrollar un dispositivo específico.

## Capítulo 7 - Discusión de los resultados

Se analizan los resultados obtenidos en los ensayos, se presentan tablas de resumen, gráficos e indicadores para cuantificar y calibrar el sistema de refuerzo.

## Capítulo 8 - Conclusiones y futuras investigaciones

Se presentan las conclusiones obtenidas del análisis de los resultados de la investigación divididas en diferentes ítems y se recomiendan argumentos a profundizar para continuar el desarrollo de los sistemas de refuerzo con láminas de GRFP.

## Referencias bibliográficas

Se presenta la bibliografía consultada y citada en la tesis en orden alfabético, dividida en artículos, reglamentos y manuales.

### **1.6. Actualización bibliográfica del tema**

#### a) Normativa

El diseño de elementos de hormigón armado reforzado externamente con materiales compuestos fibro-reforzados está reglamentado en EEUU y en muchos países por la norma ACI 440 y documentos derivados como por ejemplo la CNR DT 200 italiana y su traducción al español.

- ACI 440.2R-17 (2017) - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.
- CNR-DT 200 R1 (2013) - Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati

- CNR-DT 200 R1 (2014) - Guía para el diseño y construcción de sistemas FRP pegados externamente para el reforzamiento de estructuras existentes.

En estas normas se presentan métodos de diseño para sistemas de refuerzo en general, incluyendo telas, mallas o láminas para diferentes tipos de fibras.

El refuerzo de vigas de hormigón armado con láminas de fibra de vidrio simplemente adheridas se encuentra comprendido en la normativa mencionada. No así el sistema aquí propuesto de anclajes extremos abulonados.

#### b) Publicaciones

Son muy numerosas las publicaciones sobre estudios de materiales compuestos fibro-reforzados solicitados a acciones dinámicas y su aplicación como refuerzo de estructuras. desde hace varios años es motivo de numerosas investigaciones.

Las aplicaciones y trabajos de investigación disponibles se refieren a refuerzos con telas y mallas de diferentes fibras y con láminas pultruidas de fibra de carbono. No se dispone de información sobre trabajos referidos a la utilización de refuerzos a flexión con láminas pultruidas de fibra de vidrio ya que estos materiales no tienen todavía una difusión comercial para esta aplicación y por lo tanto tampoco se impulsó su investigación.

En la bibliografía se detallan las publicaciones consultadas para la realización del presente trabajo a las que se hace referencia en el texto entre corchetes [ ] cada vez que se extrae algún dato, concepto, gráfico, tabla, etc.

# CAPÍTULO 2

---

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Efectos dinámicos en las estructuras

Las cargas estáticas son aquellas que se aplican en un tiempo tal que las aceleraciones producidas en los elementos de las estructuras se pueden despreciar.

Por el contrario, cuando la velocidad de aplicación o de variación de las cargas produce aceleraciones considerables, ya sea parcialmente o en la totalidad de la estructura, se habla en general de cargas dinámicas.

Este tipo de cargas puede presentarse en las siguientes situaciones:

- a) **Fatiga:** Cargas de larga duración que varían su amplitud en el tiempo con o sin cambio de signo. Si su frecuencia coincide con el período de vibración de la estructura, la misma puede entrar en resonancia
- b) **Impacto:** Cargas que se aplican y suprimen de manera repentina, debidas a choques, caídas, etc.
- c) **Vibraciones:** Cargas variables de baja amplitud producidas por equipos en funcionamiento, tránsito, etc.
- d) **Sismo:** Cargas de corta duración, muchas veces de gran amplitud difícil de predecir.
- e) **Viento:** Cargas de media duración que puede presentarse de manera continua o en ráfagas con cierta periodicidad.
- f) **Acción hidráulica:** Cargas debidas a olas por ejemplo en estructuras portuarias o civiles tanto en zonas marítimas o fluviales

Las cargas dinámicas, además de originar cambios tanto en la magnitud de las tensiones como en las deformaciones a que dan lugar, afectan la forma y el límite de rotura de los materiales que se puede reducir de manera considerable. Muchos materiales que frente a cargas estáticas tienen un comportamiento dúctil, en el caso de cargas dinámicas presentan un comportamiento frágil.

Como ya se mencionó, cuando las cargas dinámicas se presentan con una repetición periódica y su frecuencia coincide con el período de vibración de la estructura, se verifica un fenómeno de resonancia que puede originar deformaciones muy grandes que pueden llevar la estructura al colapso.

La determinación analítica de las tensiones que se originan como consecuencia de las cargas dinámicas puede resultar compleja y en cierto modo, un tanto indefinida. Cuando estamos en presencia de solicitaciones estáticas, los esfuerzos en los elementos pueden determinarse de

manera más precisa que en el caso de solicitaciones dinámicas. En este tipo de cargas, ocurre una transferencia de energía cinética, que en la práctica es muy difícil de cuantificar.

## **2.2. Comportamiento de los materiales compuestos fibro-reforzados frente a las cargas dinámicas**

La utilización de materiales compuestos para reforzar estructuras sometidas a esfuerzos dinámicos es una solución muy difundida por la ventaja que presentan estas aplicaciones con respecto a tradicionales métodos con sistemas cementicios húmedos que deben realizarse en ausencia de movimientos en fase de hidratación.

Cuando se emplean soluciones adhesivadas con resinas, se deben controlar las condiciones de humedad y temperatura del ambiente, pero resultan factibles las intervenciones con equipos en funcionamiento ya que el proceso de polimerización no se ve mayormente afectado por posibles vibraciones de la estructura. En efecto, un campo de aplicación emblemático de los sistemas FRP son los refuerzos en viaductos sin interrupción de tráfico, con las consiguientes ventajas económicas.

Se dispone de numerosas investigaciones sobre el comportamiento frente a cargas dinámicas de refuerzos con telas y mallas de diferentes fibras y con láminas pultruidas de fibra de carbono. También se dispone de estudios realizados en láminas compuestas de fibra de vidrio, pero generalmente se tratan de especímenes confeccionados con el método de colocación *manual hand lay-up*. Es muy poca la información disponible sobre trabajos referidos a la utilización de láminas pultruidas de fibra de vidrio y los estudios realizados para este tipo de materiales se refieren a estructuras construidas con perfiles y no a láminas utilizadas como refuerzo estructural para estructuras de hormigón armado como las propuestas en este trabajo. Este tipo de aplicación no tiene todavía una difusión comercial y por lo tanto tampoco se impulsó su investigación a nivel internacional.

En efecto, en esta investigación, se continúan los estudios del sistema mixto adhesivado y abulonado con láminas pultruidas constituidas exclusivamente de fibra de vidrio, extendiendo su aplicación a estructuras sometidas a esfuerzos dinámicos, principalmente en lo referido a cargas sísmicas, si bien se realizan estudios complementarios de fatiga.

La posibilidad de abulonar láminas de mayor espesor a los soportes estructurales se viene estudiando hace algunos años, pero los sistemas patentados como el Safstrip de Strongwell contemplan solo la vinculación mecánica y no la vinculación mixta. En efecto, esta alternativa ha dado muy buenos resultados. Este sistema es conocido como MF FRP (Mechanically Fastened FRP) y utiliza generalmente láminas pultruidas de fibra de carbono de mayor espesor que las usadas para el sistema adhesivado reforzadas con rovings y mats de fibras de vidrio que le permiten soportar mayores esfuerzos de ojalamiento (*bearing*). Como se mencionó, este sistema está pensado para sustituir el método de vinculación entre láminas y estructuras, mientras que en este trabajo proponemos una acción complementaria entre ambos sistemas.

A continuación, se presenta el estado de arte en la investigación del comportamiento de materiales compuestos sometidos a distintos tipos de cargas dinámicas.

### 2.3. Materiales compuestos sometidos a esfuerzos de fatiga

La fatiga de materiales compuestos es una de las situaciones más estudiadas desde que se comenzaron a utilizar los FRP como elementos estructurales. La mayoría de los estudios se han realizado en el campo aeroespacial que fue una de las principales industrias en incorporar estos materiales como reemplazo a los tradicionales materiales metálicos.

Desde fin del siglo pasado, el desarrollo de los sistemas de refuerzo con FRP en construcciones civiles impulsó la realización de estudios experimentales para sus variadas aplicaciones.

En efecto, la fatiga fue uno de los fenómenos a los cuales se le dio fundamental importancia en el campo teórico experimental. Tal es así, que el método de dimensionamiento propuesto por la norma ACI 440-17 en el Paso 14 contempla la verificación del límite de rotura por fluencia lenta más fatiga en servicio del refuerzo FRP mediante la siguiente fórmula:

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left( \frac{E_f}{E_s} \right) \left( \frac{d_f - kd}{d - kd} \right) - \varepsilon_{bi} E_f \quad (2-1)$$

Donde

$f_{f,s}$  = nivel de tensión en el FRP causado por un momento dentro del rango elástico del miembro (MPa)

$f_{s,s}$  = nivel de tensión en el refuerzo de acero en cargas de servicio (MPa)

$E_f$  = módulo de elasticidad de tracción de FRP (MPa)

$E_s$  = módulo de elasticidad del acero (MPa)

$d_f$  = profundidad efectiva del refuerzo de flexión FRP (mm)

$d$  = distancia de la fibra comprimida extrema al centroide de refuerzo a tracción (mm)

$k$  = relación entre la profundidad del eje neutro y la del refuerzo medida a partir de la fibra de compresión extrema

$\varepsilon_{bi}$  = deformación en el hormigón en la fibra traccionada en el momento de la instalación del FRP (mm/mm)

El límite a comparar se obtiene de la tabla 10.2.9 de la norma ACI 440 R17 en función del tipo de fibra del refuerzo

Tipo sollicitación	Tipo de Fibra		
	GFRP	AFRP	CFRP
Tensión limite bajo carga cíclica	$0,30f_{fu}$	$0,20f_{fu}$	$0,55f_{fu}$

Tabla 2.1 - Tabla 10-2.9 de la norma ACI 440 R17 - Tensión limite por carga de servicio cíclica en el refuerzo FRP en función del tipo de fibra.

Si bien este trabajo está dirigido principalmente al estudio del efecto de las cargas dinámicas derivadas de esfuerzos sísmicos, la fatiga, tanto de los materiales como de los sistemas, es uno de los fenómenos tenidos en cuenta en los estudios preliminares.

A continuación, se presenta una reseña de algunos de los trabajos consultados.

a) Ensayos sobre materiales compuestos

Comparando resultados obtenidos en ensayos sobre materiales compuestos reforzados con diferentes tipos de fibra, se pudo comprobar que aquellos a base de fibras de carbono tienen una resistencia a la fatiga muy buena, principalmente en la dirección 0°. Por tal motivo son aptos para las aplicaciones con ciclos repetitivos como la aviación, los puentes y las aplicaciones marinas. Las fibras de vidrio, en cambio presentan peores características de fatiga que las de carbono e incluso que las aramídicas.

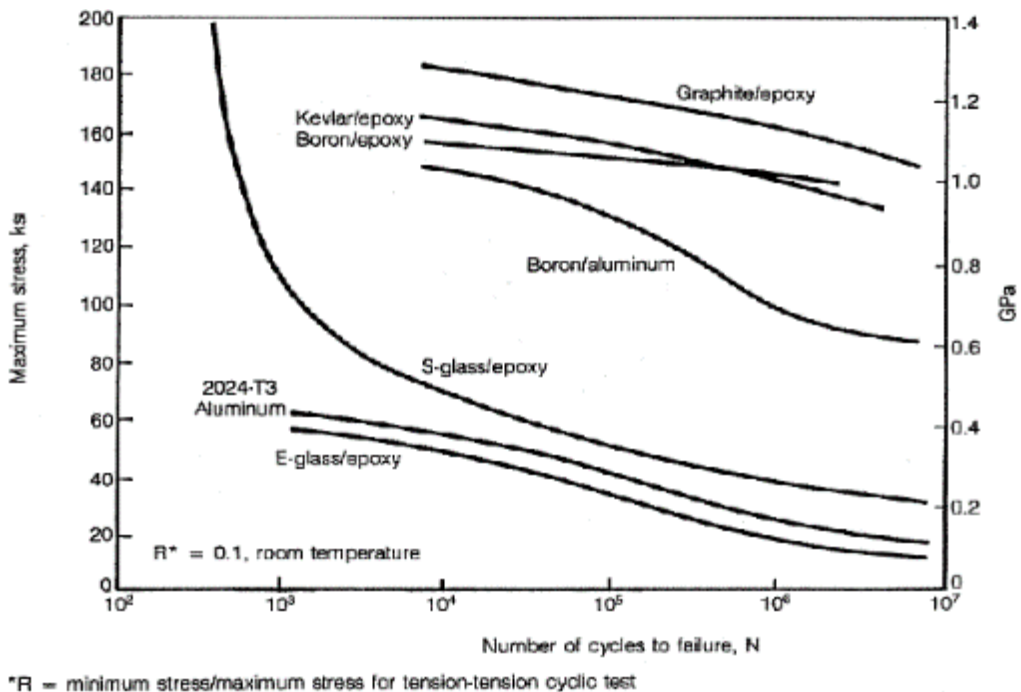


Figura 2.1 - Comportamiento a fatiga de distintos tipos de compuestos epoxi/fibra unidireccional comparados con el aluminio [Nexus Projectes]

En la Figura 2.1 se puede apreciar la comparativa a fatiga de materiales compuestos a base de resina epoxi y distintos tipos de fibra con otros materiales como la aleación boro-aluminio y el aluminio 2024 T3.

Para un bajo número de ciclos, se destaca la fuerte caída de resistencia de los compuestos con vidrio S. Este tipo de fibra se utiliza solo en los casos en que se requieren elevadas características mecánicas, generalmente en el campo aeronáutico o aeroespacial ya que presenta una resistencia a la tracción y un módulo de elasticidad muy superiores a los otros tipos de vidrio. La mayoría de los materiales compuestos utilizados se elaboran con vidrio E, que, como se puede observar, presenta la mayor disminución de resistencia proporcional.

En la Tabla N° 2.1 se indica la disminución de resistencia entre  $10^4$  ciclos y  $10^6$  ciclos relacionada con el gráfico de Figura 2.1.

Tabla 2.2 - Tensión máxima en GPa para  $10^4$  y  $10^6$  ciclos para los diferentes materiales de la Figura 2.1 [Nexus Projectes]

	Matriz epoxy					Aluminio 2024-T3	Aleación B-Al
	Carbon (graphite)	Aramida (Kevlar)	Boro (Boron)	Vidrio S (S-glass)	Vidrio E (E-glass)		
10.000 ciclos	1,24	1,14	1,08	0,48	0,34	0,38	1,02
1.000.000 ciclos	1,12	1,00	1,02	0,28	0,14	0,19	0,69
Disminución absoluta	0,12	0,14	0,06	0,21	0,21	0,19	0,33
Disminución relativa	10,0%	12,1%	5,7%	42,9%	60,0%	50,9%	32,4%

La resistencia a la fatiga del sistema depende tanto de las fibras como de la matriz. Los investigadores C.M Manjunatha., S. Sprenger, A.C. Taylor y A.J. Kinloch comprobaron que el agregado de micro partículas de goma y nano partículas de sílice a la matriz epoxídica aumenta de seis a diez veces la duración a fatiga de paneles compuestos de fibra de vidrio [Manjunatha C.M., S. Sprenger, A.C. Taylor, A.J. Kinloch (2010)].

Con respecto a la orientación de las fibras, Zakaria K.A. y otros realizaron ensayos de tracción y fatiga en los que probaron que las muestras con orientación  $[0/90^\circ]$  presentaron mayor resistencia que las de orientación  $[\pm 45^\circ]$ . Realizaron fractografías en las que se puede observar que la falla ocurre cuando las fibras ya no acompañan a la carga aplicada. La débil adhesión entre la matriz y el refuerzo produjo una rápida propagación de las grietas. Las superficies de fractura mostraron claramente que la fibra se alineó con la carga y la propagación de la grieta se dio casi perpendicular al eje de carga. [Zakaria K.A., R.H. Jimit, S.N.R. Ramli, A.A. Aziz, O. Bapokutty, M.B. Ali (2016)]. Resultados similares habían obtenido Ferreira y otros [Ferreira J.A.M., J.D.M. Costa, P.N.B. Reis (1999)].

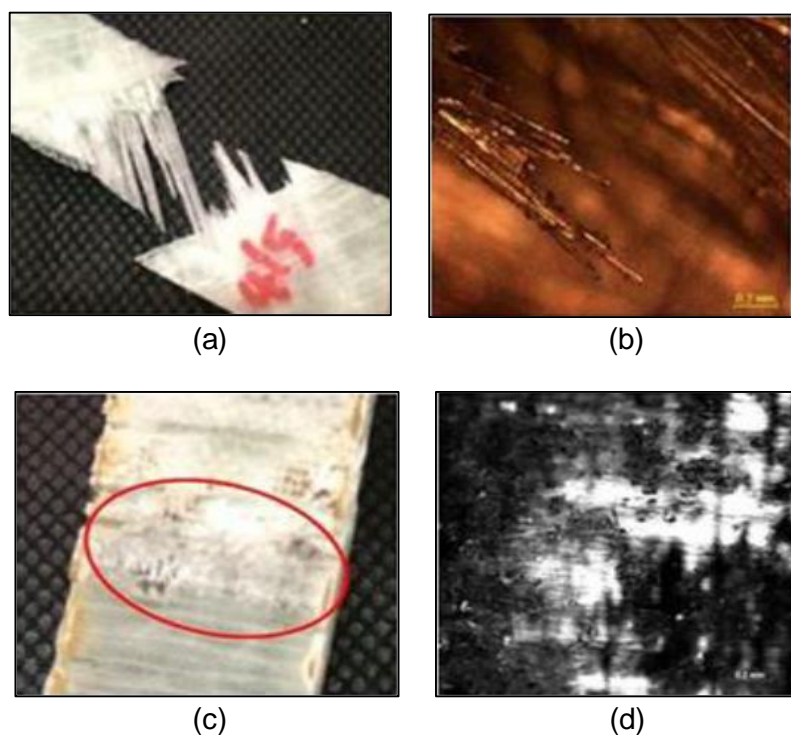


Figura 2.2 - Fractografía de los ensayos de tracción de GFRP  $[\pm 45^\circ]$  (a) observación normal (b) microscopio invertido y de GFRP  $[0/90^\circ]$  (c) observación normal (d) microscopio invertido [Zakaria K.A. y otros (2016)]

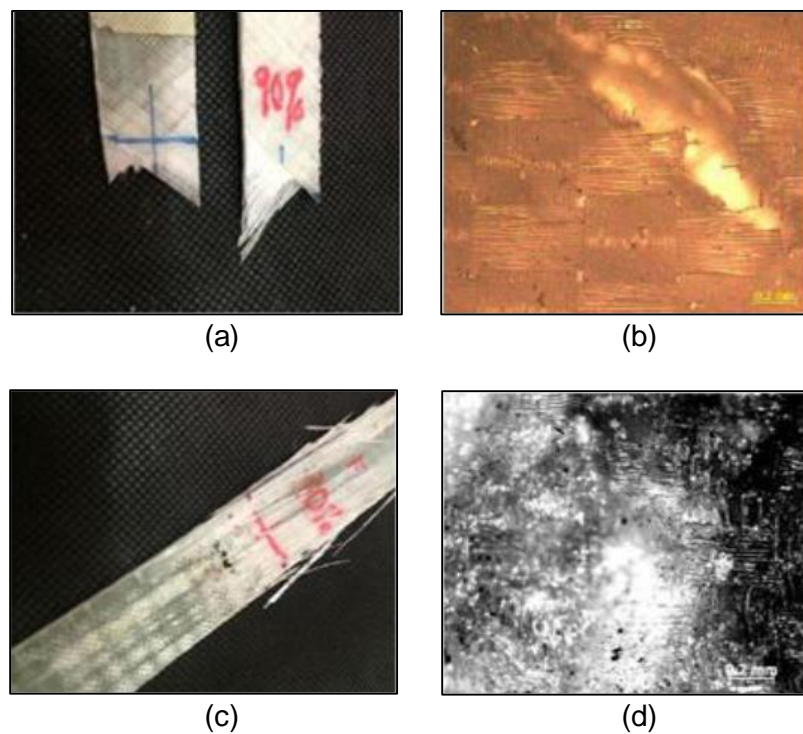


Figura 2.3 - Fractografía de los ensayos de fatiga de GFRP [ $\pm 45^\circ$ ] (a) observación normal (b) microscopio invertido y de GFRP [0/90°] (c) observación normal (d) microscopio invertido [Zakaria K.A. y otros (2016)]

Siempre en lo referido a la orientación de las fibras, Catangiu A. y otros realizaron ensayos de fatiga por flexión sobre varillas rectangulares confeccionadas mediante estratos sucesivos de fibra de vidrio y resina con diferentes orientaciones de fibras:  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $25^\circ$  y  $45^\circ$ . Se aplicó una carga variable sobre una ménsula según la menor inercia del rectángulo. Comprobaron la disminución del módulo de Young  $E$  en función de la orientación y del número de ciclos [Catangiu A., A.T. Dumitrescu, D. Ungureanu (2011)].

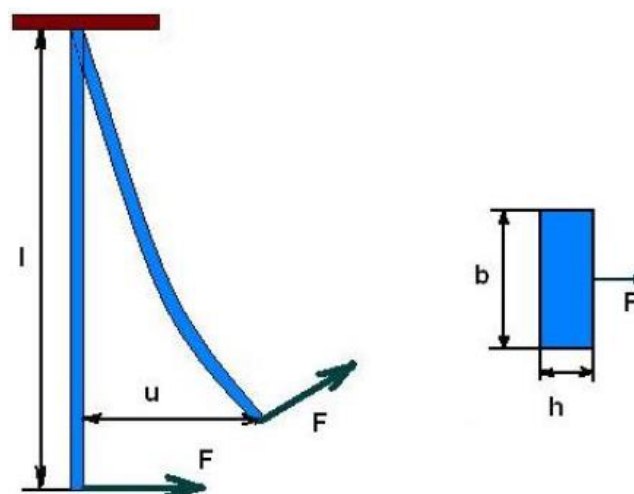


Figura 2.4 - Disposición de las probetas en los ensayos de fatiga por flexión [Catangiu A., A.T. Dumitrescu, D. Ungureanu (2011)]

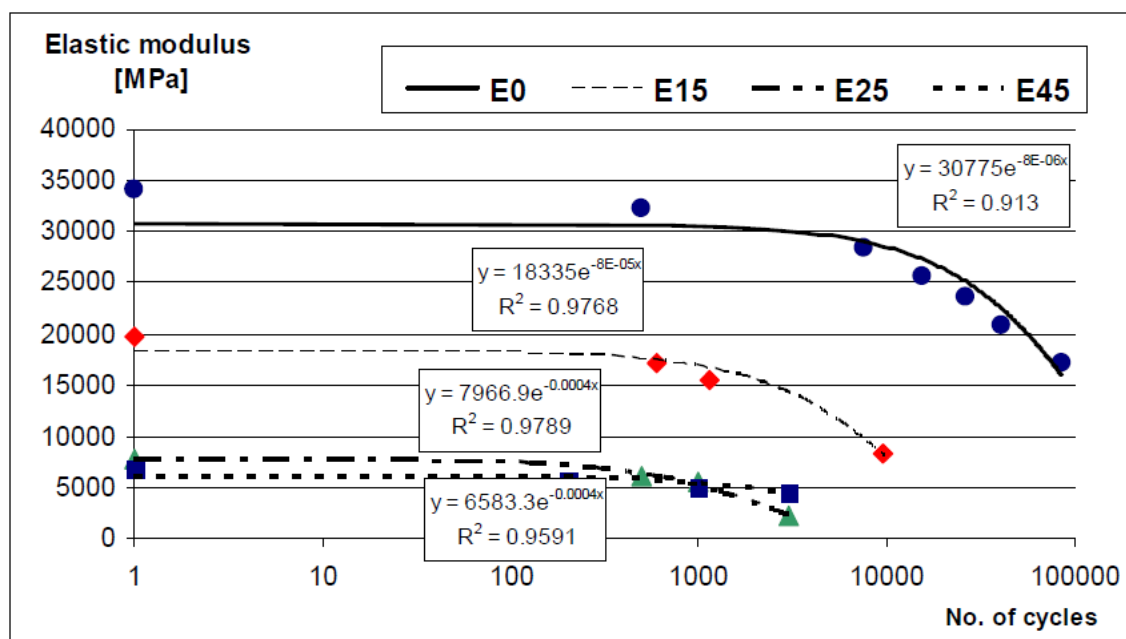


Figura 2.5 - Evolución del módulo de Young con el número de ciclos [Catangiu A., A.T. Dumitrescu, D. Ungureanu (2011)]

El valor de E pasó de un valor inicial de 34000 MPa para las varillas con orientación de fibras 0° a 20000 MPa para 15°, 8000 MPa para 25° y 7000 MPa para 45°. A su vez se comprobó que la orientación 0° fue la que soportó mayor número de ciclos antes de perder su rigidez.

Con respecto al comportamiento de elementos pultruidos de fibra de vidrio frente a otros tipos de parámetros, como los ambientales, por ejemplo, resulta interesante el estudio que realizaron unos investigadores franceses sobre el comportamiento a fatiga de materiales compuestos reforzados con diferentes tipos de fibra de vidrio en agua de mar para sistemas de conversión de energía oceánica, demostrando que la influencia de las pruebas en agua de mar en lugar de aire es pequeña. Sin embargo, pudo comprobar que el envejecimiento producido por el agua de mar reduce significativamente la duración frente a la fatiga, por lo que resulta muy importante la formulación química de la matriz [Boisseau A., P. Davies, F. Thiebaud (2013)].

Sara Eliasson y otros (2019) realizaron pruebas de fatiga de probetas de CFRP unidireccional orientadas a la aplicación de estos productos en la industria automotriz. Se realizaron pruebas de fatiga para distintos porcentajes de carga última con una relación de carga de 0.1 y con una frecuencia de 5 Hz. Se realizaron ensayos estáticos y dinámicos sobre probetas encabezadas para permitir el ajuste de las mordazas [Eliasson S., S.Wanner, Z. Barsoum, P. Wennhage (2019)].



Figura 2.6 - Modos de falla para probetas de CFRP en pruebas de tracción estática [Eliasson S., S. Wanner, Z. Barsoum, P. Wennhage (2019)]



Figura 2.7 - Modos de falla para probetas de CFRP en pruebas de fatiga a diferentes porcentajes de UTS (Ultimate Tensile Strength), con  $R = 0.1$  y  $f = 5$  Hz [Eliasson S., S. Wanner, Z. Barsoum, P. Wennhage (2019)]

Otra aplicación muy difundida de elementos pultruidos de fibra de vidrio es su utilización para la fabricación de laminados gruesos destinados a álabes de turbinas eólicas. F. Lahuerta y otros [Lahuerta F., R.P.L. Nijssen, F.P.van der Meer, L.J. Sluys (2016)] estudiaron el efecto del espesor en la compresión para materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio unidireccional. Se realizaron ensayos de compresión estática y fatiga a escala en laminados de vidrio-epoxi de 4 mm, 10 mm y 20 mm de espesor. Mientras que las pruebas estáticas en laminados con diferentes espesores no mostraron cambios significativos en las tensiones finales, las pruebas de fatiga mostraron una disminución en la vida de fatiga debido al aumento del espesor.

Por su parte, Anand Gaurav y Kalyan K. Singh publicaron una reseña de numerosos ensayos para analizar el comportamiento a fatiga analizando diferentes factores como ser el tipo de fibra, material de matriz, orientación de las fibras y contenido de fibras incluyendo el efecto de los nanotubos de carbono en la vida útil de los compuestos poliméricos [Gaurav A., K. Singh (2016)]. Resulta muy interesante para este trabajo algunas investigaciones citadas en esta reseña como la realizada por Broughton, W R. y otros (2011) y la de B. Aidi y otros (2015). En la primera se estudió el comportamiento de fatiga por tensión de un orificio en una lámina de GFRP bajo carga de amplitud constante verificando la reducción gradual de la rigidez de la lámina debido al agrietamiento y la delaminación de las capas [Broughton, W R; Gower, M R L; Lodeiro, M J; Pilkington, G D; Shaw, R M (2011)]. Aidi y otros, en cambio estudiaron la fatiga de láminas pultruidas de carbono perforadas utilizando tomografía computada de rayos X para rastrear el patrón de daño por fatiga. Se utilizó DIC (Digital Image Correlation) para trazar la magnitud y los contornos de la tensión en el agujero en varias fracciones de la vida de las muestras fatigadas. En la Figura 2.8 se puede ver que las tensiones axiales máximas fueron observadas en la dirección perpendicular a la carga (en color rojo) mientras que las tensiones axiales mínimas se observaron en la dirección paralela a la carga (en color lila) [Aidi B., M.K. Philen, S.W. Case (2015)].

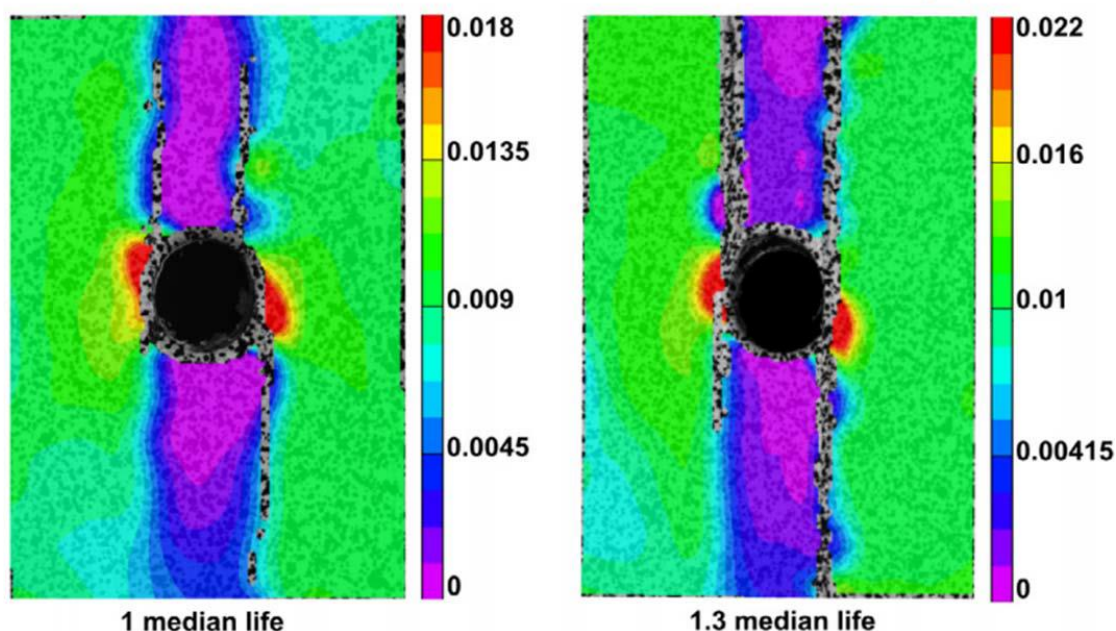


Figura 2.8 - Tensiones axiales en los bordes de un agujero en una lámina de CFRP solicitada a fatiga [Aidi B., M.K. Philen, S.W. Case (2015)]

K.P. Dyer y D.H. Isaac analizaron el comportamiento a fatiga de láminas pultruidas de fibra de vidrio con dos matrices diferentes, poliéster y viniléster poliuretánica, y tres tipos de fibras de vidrio E. Las probetas ensayadas fueron láminas con muescas laterales para forzar la rotura en la zona central y fueron encabezadas para permitir el ajuste de las mordazas de la máquina de ensayo como se muestra en la Figura 2.10.

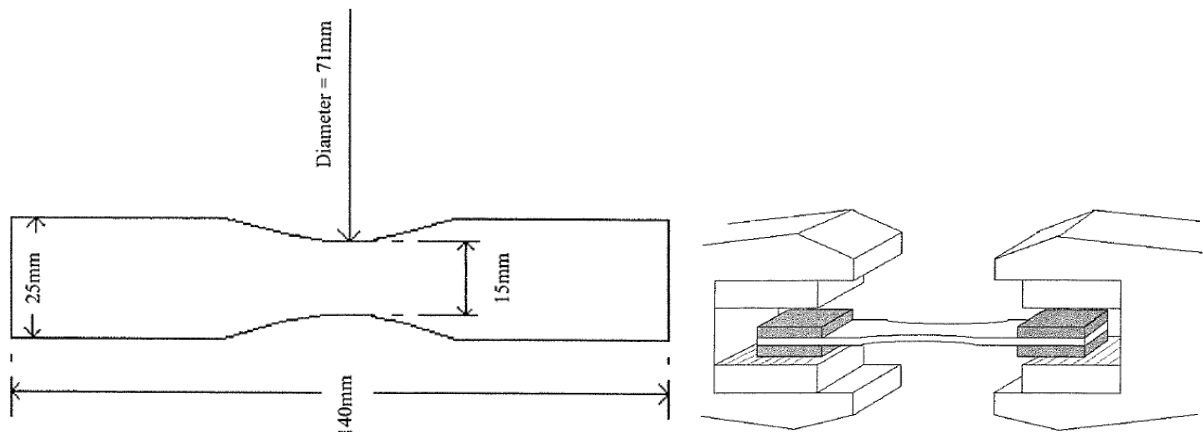


Figura 2.9 - Geometría de las probetas y encabezamiento de los extremos [Dyer K.P., D.H. Isaac (1998)]

Se elaboraron las curvas S/N (tensión vs. Número de ciclos) para los diferentes tipos de probetas. En estas gráficas se puede evidenciar un mejor comportamiento de la matriz viniléster poliuretánica frente a la matriz poliéster.

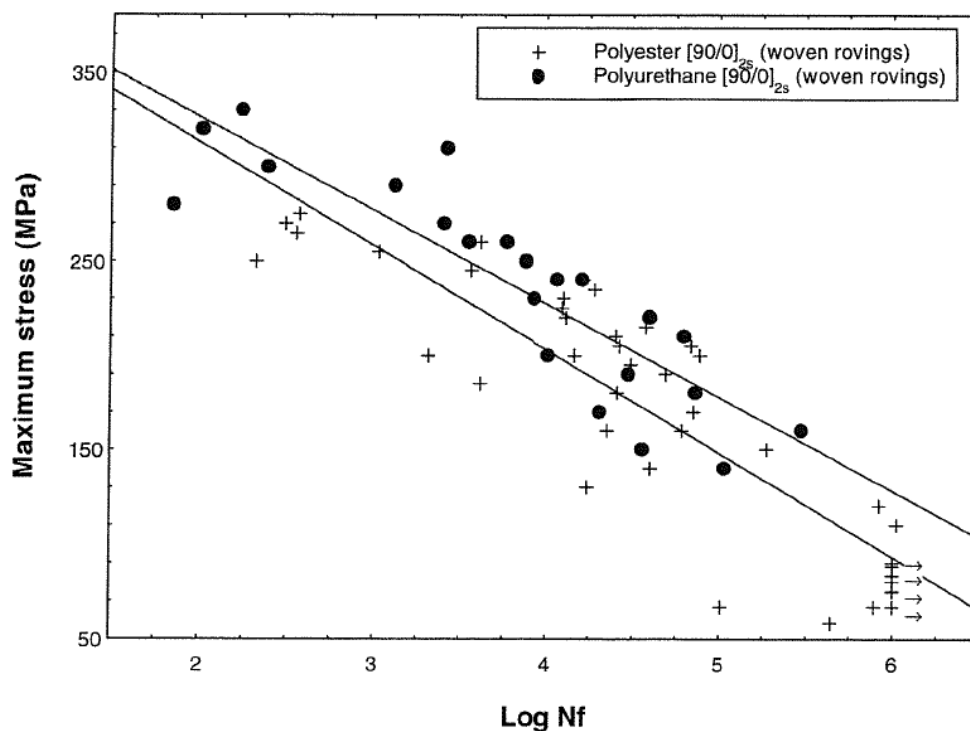


Figura 2.10 - Gráfico S/N para láminas de GFRP con fibras tejidas en matriz viniléster poliuretánica y poliéster [Dyer K.P., D.H. Isaac (1998)]

b) Estudios varios sobre fatiga en sistemas de refuerzo con FRP

Se realizaron diversos estudios sobre el comportamiento a fatiga de los sistemas de refuerzo con láminas pultruidas de fibra de carbono adheridas. A continuación, se presentan algunos de ellos divididos en sistemas adheridos externamente EB-FRP, con elementos introducidos en caladuras NSM y sistemas pretensados.

Sistemas EB-FRP

En el año 2001, Esteves J.L. y otros realizaron ensayos sobre pequeñas vigas (sección 10 cm x 20 cm y 2,5 m de luz) reforzadas con láminas de CFRP adheridas externamente comprobaron una muy buena respuesta de las mismas. La aplicación de una carga sinusoidal con una carga máxima del 70% de la carga estática máxima de la viga dio como resultado  $6 \times 10^5$  ciclos [Esteves J.L., P. Vieira, A.T. Marques (2001)].



Figura 2.11 - Detalle del extremo de la lámina adherida [Esteves J.L., P. Vieira, A.T. Marques (2001)]

Por su parte, Hesham Diab, Zhishen Wu y Kentaro Iwashita realizaron una investigación experimental de la fatiga en la interfaz hormigón FRP validada por un modelo numérico en la que identificaron tres tipos de modalidades de despegado [Diab H., Z. Wu, K. Iwashita (2007)]. La geometría de las probetas utilizadas en este trabajo se consideró como modelo para los primeros ensayos de los sistemas de anclaje que se desarrollan más adelante. Como se verá, luego se decidió reemplazarlas por otro tipo de especímenes de más fácil elaboración.

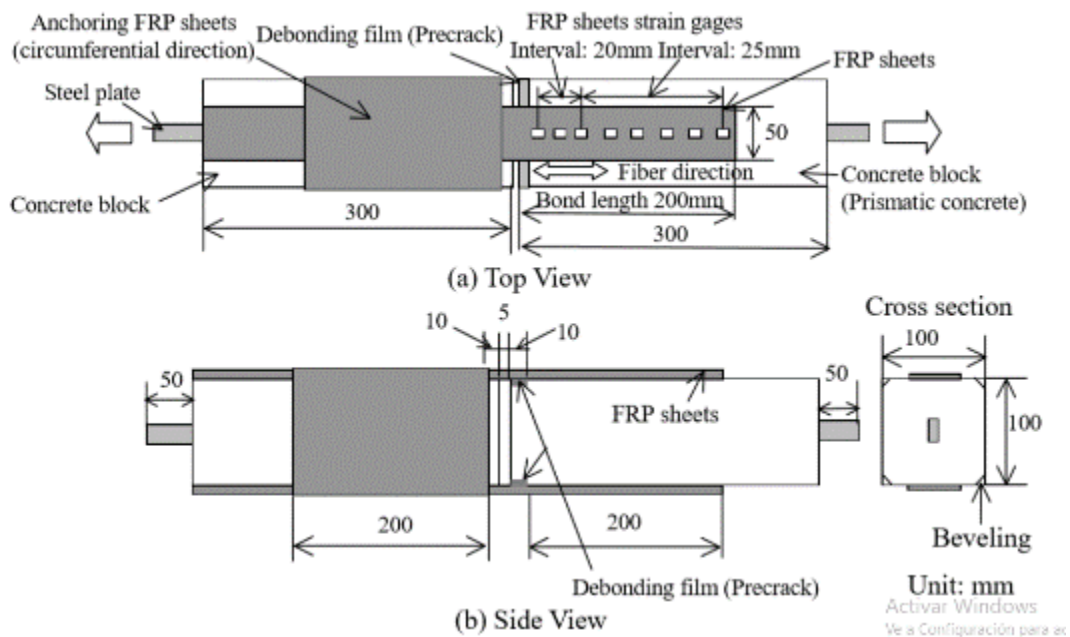


Figura 2.12 - Dimensiones de las probetas ensayadas [Diab H., Z. Wu, K. Iwashita (2007)]

Mohammed Mahal pudo comprobar en su tesis doctoral la buena prestación a fatiga de vigas reforzadas tanto en sistemas EB-FRP como en sistemas NSM [Mahal M.S.M (2015)]. En dicho trabajo, resumió los resultados obtenidos en investigaciones anteriores [Mahal M., T. Blanksvärd, B. Täljsten (2013)]. Se realizaron numerosos ensayos estáticos y dinámicos, tanto sobre los materiales como sobre estructuras reforzadas que se esquematizan en la Figura 2.14.

Los ensayos demostraron que los sistemas NSM presentaron mejores resultados frente a cargas dinámicas que los EB-FRP. Experimentaron también con diferentes tipos de fibra, encontrando que las telas de fibra de carbono se comportaron mejor en los ensayos dinámicos que las de vidrio [Mahal M., B. Täljsten, T. Blanksvärd (2015)].

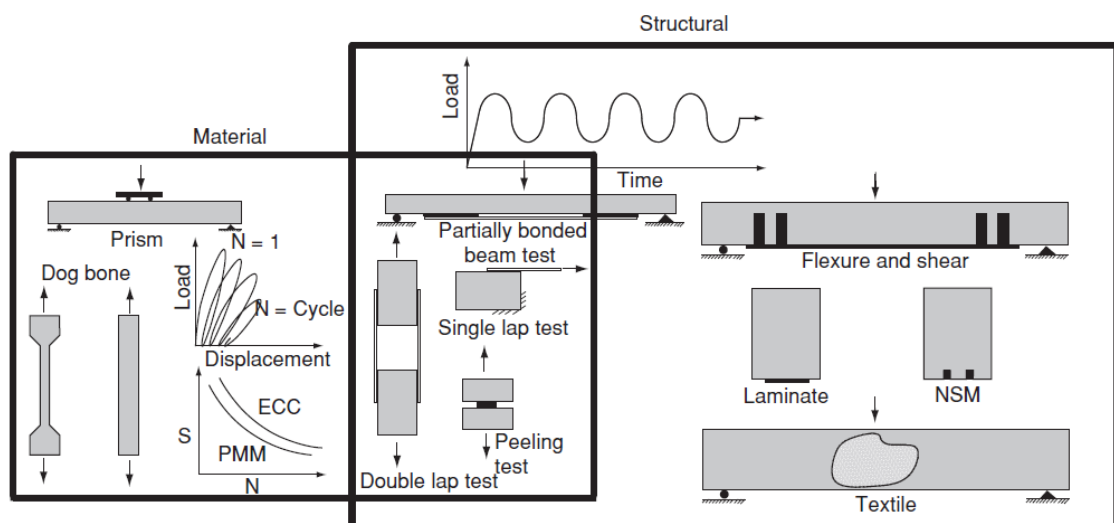


Figura 2.13 - Diferentes tipos de ensayos realizados sobre materiales y sobre estructuras [Mahal M., T. Blanksvärd, B. Täljsten (2013)]

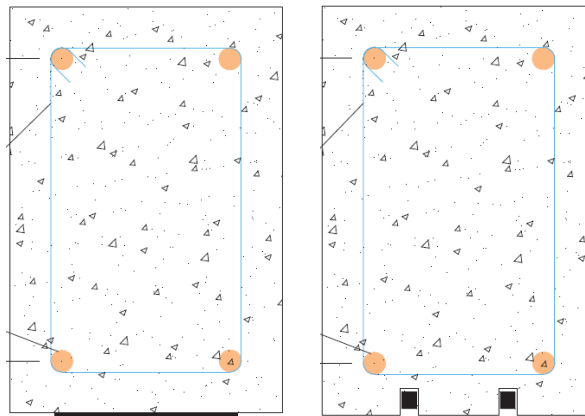


Figura 2.14 - Vigas reforzadas con láminas adheridas externamente EB-FRP y barras inseridas en canaletas NSM [Mahal M., T. Blanksvärd, B. Täljsten (2015)]

K. Harries estudió la delaminación de refuerzos en vigas de diferente geometría sometidas a ciclos de carga. Pudo comprobar que las geometrías que presentaron delaminación intermedia IC (intermediate crack induced) resultaron más críticas en términos de su comportamiento a fatiga que aquellos especímenes que presentaron delaminación extrema por esfuerzos de *peeling* [K. Harries (2005)].

### Sistemas NSM

Como se mencionó, el sistema de refuerzo de vigas de hormigón armado reforzadas con barras y láminas pultruidas de fibra de carbono insertadas mediante el sistema NSM se demostró como una alternativa interesante en lo que se refiere a su respuesta dinámica [Mahal M., T. Blanksvärd, B. Täljsten (2015)]. Yost J.R. y otros sometieron a fatiga ocho vigas reforzadas con barras y con láminas pultruidas de fibra de carbono insertadas en canaletas realizadas en el recubrimiento inferior de los especímenes. Se realizaron ensayos estáticos y dinámicos aplicando dos cargas muy cercanas en la zona central de la viga. Tanto las vigas reforzadas con barras como con láminas soportaron 2.000.000 de ciclos sin observar pérdida de adhesión o de transferencia de esfuerzos. De esta experimentación surge que es indiferente el uso de uno u otro tipo de elemento pultruido [Yost J.R., S.P. Gross, M.J. Deitch (2007)].

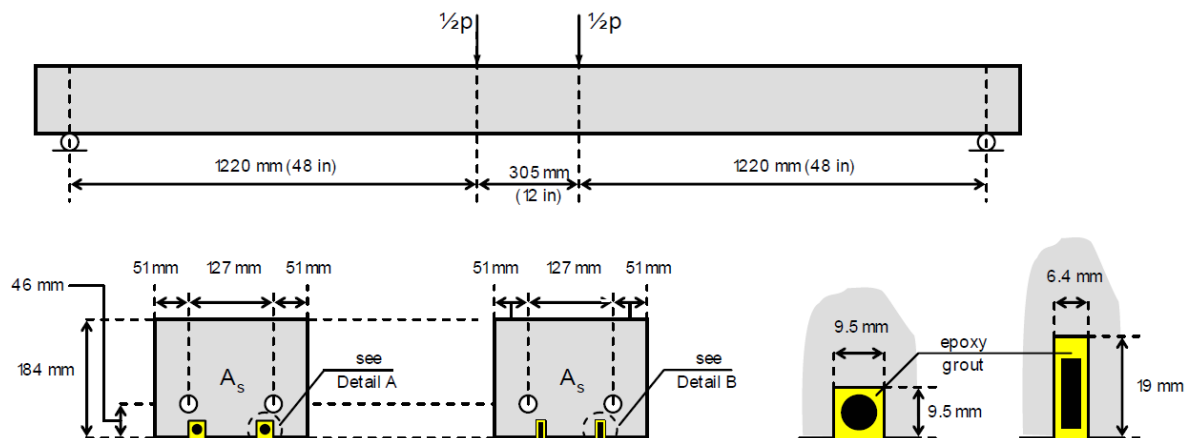


Figura 2.15 - Detalle de barras y láminas inseridas en canaletas NSM [Yost J.R., S.P. Gross, M.J. Deitch (2007)]

Resultados similares obtuvieron Paul Ciobanu y otros. Realizaron ensayos en vigas reforzadas con distintos tipos de elementos pultruidos de fibra de carbono y compararon los resultados con vigas iguales sin reforzar. Elaboraron especímenes reforzados con una barra de 8 mm de diámetro, otra con dos barras de 8 mm, otra con dos láminas de 1,4 mm x 18 mm y otra con tres láminas iguales. Pudieron comprobar que el método NSM CFRP ofrece ventajas significativas, en comparación con las clásicas soluciones de EB-FRP realizadas por otros investigadores consultados, incluyendo un menor riesgo de despegamiento, un uso más eficiente del material FRP y una mejor protección contra daños externos [Ciobanu P., N. Țăranu, S. Popoaei, D. Banu (2012)].

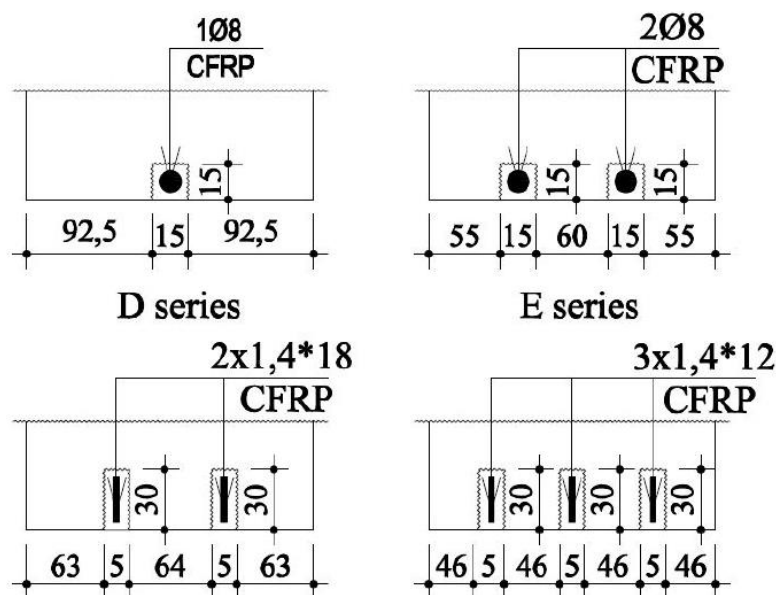


Figura 2.16 - Detalle de barras y láminas insertadas en canaletas NSM [Ciobanu P., N. Țăranu, S. Popoaei, D. Banu (2012)]

Isamu Yoshitake y otros (2020) realizaron pruebas de cargas cíclicas en sistemas NSM con barras de CFRP con adherencia mejorada a través de protuberancias creadas con tiras de GFRP. En lugar de realizar caladuras en el recubrimiento, este sistema contempla la inserción de las barras en una capa de mortero de alta resistencia adherido con resina epoxi a la superficie de hormigón [Yoshitake, I., H. Hasegawa, K. Shimose (2020)] [Hasegawa H., I. Yoshitake, T. Kato (2020)].



Figura 2.17 - Barras de CFRP con la adherencia mejorada a través de cintas de GFRP [Yoshitake, I., H. Hasegawa, K. Shimose (2020)] [Hasegawa H., I. Yoshitake, T. Kato (2020)]

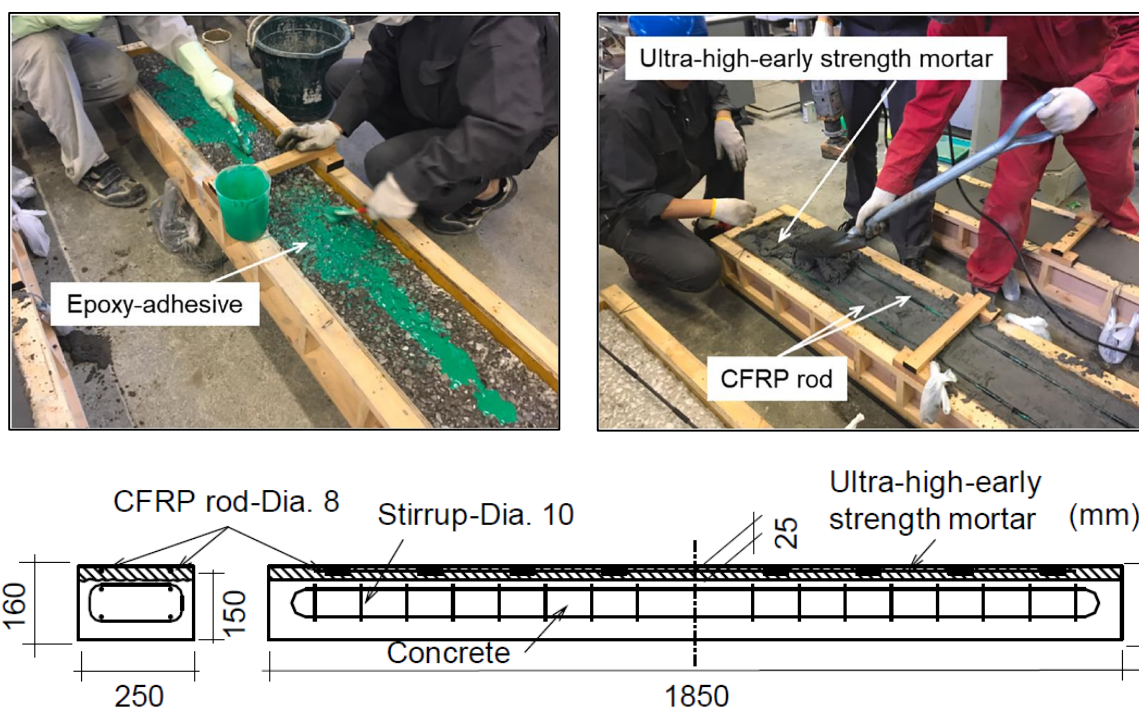


Figura 2.18 - Ejecución de la capa de mortero superficial adherida con resina epoxy en la que se insertan las barras de CFRP con adherencia mejorada. [Yoshitake, I., H. Hasegawa, K. Shimose (2020)]

Se realizaron diez ensayos de flexión estáticos con carga monotónica creciente y cinco ensayos de fatiga con cargas cíclicas. La carga se introdujo en dos puntos cercanos al centro de la viga mediante un bloque sobre el cual actuaba un gato hidráulico.

Se pudo comprobar que las vigas reforzadas con varillas de CFRP mejoradas por adherencia demostraron mayor capacidad de carga ante cargas repetidas, como las que se pueden producir en losas de la cubierta de un puente que fue la aplicación que dio origen a la investigación. Las barras de adherencia mejorada mostraron mejor prestación que las barras simples, en los ensayos estáticos como en los ensayos de cargas cíclicas y se verificó también que estas barras se fijaron firmemente al hormigón, incluso bajo la mayor carga cíclica.

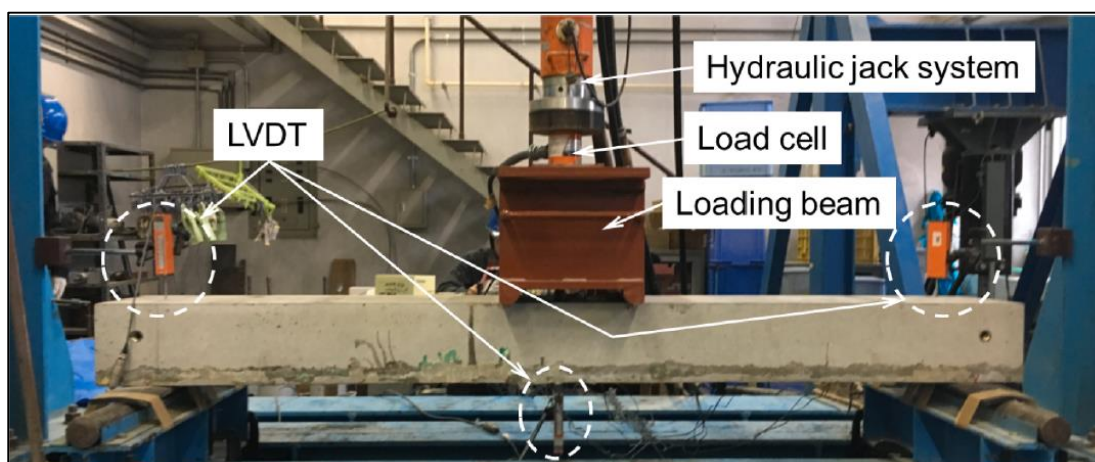


Figura 2.19 - Esquema de carga [Yoshitake, I., H. Hasegawa, K. Shimose (2020)]

### Sistemas pretensados

El pretensado de refuerzos de FRP se demostró como una muy buena solución para incrementar la resistencia a fatiga de elementos de hormigón armado sometidos a flexión. En efecto, es un sistema utilizado habitualmente para el refuerzo de puentes y viaductos ya que cuenta además con la ventaja de no necesitar la interrupción del tráfico vehicular para su aplicación. A diferencia de las soluciones con materiales húmedos como los morteros u hormigones, el puente resinoso permite realizar reparaciones bajo la actuación de cargas dinámicas ya que su polimerización no se ve afectada por las vibraciones como si sucede con el proceso de cristalización del cemento. Si una estructura cementada es sometida a movimientos cuando se comienzan a formar los cristales, se producen roturas en la estructura de la reparación.

Estos sistemas utilizan siempre láminas o barras de CFRP ya que son las que presentan menor relajación de tensiones bajo efectos de pretensión como pudieron comprobar S. Mehdizad Taleie y otros [Mehdizad Taleie S., A. Vatani Oskouei, H. Moghaddam (2007)].

Q. L. Ma, X. Z. Lu, L. P. Ye y K. Zhang realizaron un estudio sobre el comportamiento a la fatiga de vigas de hormigón armado con láminas pultruidas pretensadas de CFRP [Ma Q.L., X.Z. Lu, L.P. Ye, K. Zhang (2007)]. Ensayaron a fatiga por flexión siete vigas de sección T iguales, una sin reforzar, una reforzada con una lámina de CFRP solamente adherida y cinco reforzadas con láminas de CFRP pretensadas con dos cargas aplicadas en la zona central. Pudieron comprobar que, si bien las láminas de CFRP sin pretensar pueden prolongar la vida de fatiga de las vigas ya que disminuyen el rango de tensiones del acero, las láminas de CFRP pretensadas prolongan la vida de fatiga aún más porque no solo disminuyen dicho rango de tensiones, sino que también restringen la apertura de grietas.

En el año 2000, Abass Braimah en su tesis doctoral pudo comprobar que la utilización de barras de fibra de carbono pretensadas en sustitución de cables de acero dio muy buenos resultados. Elaboró vigas de manera similar a las viguetas pretensadas, esto es con barras tensadas en banco que transmiten la carga por fricción una vez endurecido el hormigón. El pretensado fue realizado mediante gatos que traccionaban cables de acero vinculados a las barras de CFRP con manguitos de acople [A. Braimah (2000)].

En lo que se refiere al estudio de fatiga sobre vigas de hormigón armado reforzado con láminas de CFRP pretensadas, resulta muy interesante un trabajo realizado por los investigadores brasileños M. Garcez, L. Meneghetti y R.M. Teixeira [Garcez M.R., L.C. Meneghetti, R. M. Teixeira (2019)]. En dicho trabajo, se ejecutaron pruebas de carga cíclica en dos vigas de hormigón armado reforzadas con láminas de CFRP Sika Carbodur S512 y pruebas de capacidad de carga estática en otras dos vigas reforzadas más una quinta viga de control.

Las vigas eran placas de sección transversal rectangular 6500 × 1000 × 220 mm, siete barras de refuerzo de acero de 12 mm en la parte inferior, estribos 8 mm separados 90 mm y dos láminas de CFRP de 50 mm. La resistencia del hormigón a 28 días fue de 44 MPa.

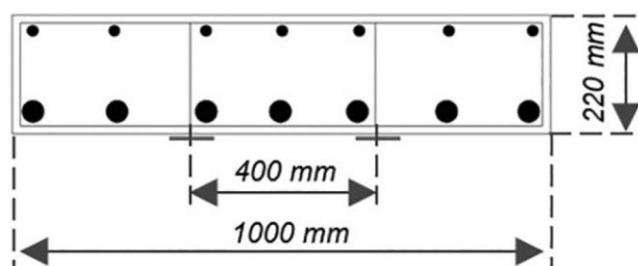


Figura 2.20 - Sección transversal de las vigas [Garcez M.R., L.C. Meneghetti, R. M. Teixeira (2019)]

El sistema de pretensado utilizado en estas vigas fue el método de anclaje gradual propuesto por Meier (2001) que se basa en el principio de reducción de la fuerza de pretensado aplicada en la lámina de CFRP gradualmente desde el centro hacia ambos extremos de la viga [Meier U. (2001)]. Este método permite evitar los problemas de concentración de tensión en los extremos de la lámina producidos por los sistemas de pretensados convencionales. El pretensado se realiza en varios pasos. En primer lugar, se pretensa con la fuerza máxima la lámina y se la pega sólo en la parte central. Se acelera la catalización del adhesivo mediante la aplicación de calentamiento eléctrico de la lámina de CFRP. Esto es posible por las características de conductividad eléctrica de la fibra de carbono. Luego, se reduce la fuerza de pretensado al 80% y nuevamente se acelera el curado del adhesivo. Se repite este proceso en varias etapas con una fuerza de pretensado del 60%, 40%, 20% y 0%.

Los resultados mostraron la eficiencia del pretensado de CFRP, tanto en una mejora de la capacidad de carga y de las condiciones de servicio, ya que se verificaron menores deflexiones y menores aberturas de grietas. Ambas vigas reforzadas fallaron en la interfaz hormigón / adhesivo. Los resultados de la deformación de rotura del CFRP mostró la efectividad del sistema de anclaje gradual propuesto por Meier, utilizado para garantizar la eficiencia de las tiras pretensadas.

#### 2.4. Materiales compuestos sometidos a esfuerzos de impactos

Una aplicación muy difundida de los materiales compuestos es su utilización para resistir esfuerzos generados por impactos, aunque aquellos a base de fibras de vidrio, como los que se tratan en esta tesis, son los menos empleados en este tipo de aplicaciones debido a que presentan menor resistencia, tanto al corte como a la tracción, respecto a los otros dos tipos de fibras más difundidas como son las de carbono y aramida. Si bien las solicitaciones de impacto no son objeto de este trabajo, se presentan algunas investigaciones analizadas.

Las fibras más utilizadas para este tipo de solicitaciones son las de aramida por presentar una mayor resistencia al corte que las de carbono y que las de vidrio. Las fibras de aramida son fibras de naturaleza orgánica, constituidas por poliamidas aromáticas en forma extremadamente orientada. Introducidas por primera vez en 1971 con el nombre comercial de Kevlar® de la empresa Dupont. Se producen dos tipos de fibras, el Kevlar 29 y el Kevlar 49. El Kevlar 29 se utiliza para la fabricación de ropas de protección, chalecos antibalas, redes de contención, cables y toda aplicación donde se necesite un material resistente a los impactos. En lo que respecta a la utilización en obras civiles como material compuesto AFRP, se utiliza principalmente el Kevlar 49.

El módulo de elasticidad normal y la resistencia a tracción son intermedios entre los de las fibras de vidrio y los de las fibras de carbono. Las fibras aramídicas pueden degradarse por exposición prolongada a la luz solar, con pérdida de la resistencia a tracción hasta un 50%. Además, pueden resultar sensibles a la humedad. La pérdida de resistencia bajo carga a largo plazo (*creep*) es similar a la de las fibras de vidrio, pero con respecto a estas últimas la resistencia a rotura es mucho más elevada, mientras que la deformación a largo plazo (relajamiento) es mucho más marcada y progresiva en el tiempo. También la resistencia a fatiga flexional es más elevada que la de las fibras vidrio.

Benoit Vieille y otros realizaron un estudio comparativo sobre el comportamiento frente a impactos de baja velocidad de compuestos a base telas de fibra de carbono con matrices termoplásticas y termo-endurecidas. Las matrices termoplásticas presentaron un mejor comportamiento frente a los impactos. Se verificaron menores delaminaciones entre capas. Es interesante este trabajo porque en los últimos años se viene trabajando cada vez más en el desarrollo de productos termoplásticos como alternativa a las más difundidas matrices a base de epoxi [Vieille, B., V.M. Casado, C. Bouvet (2013)].

En el campo balístico, como ya se mencionó, las fibras más utilizadas son las de aramida y son numerosas las investigaciones al respecto [Lee Y.S., E.D. Wetzel, N.J. Wagner (2003)], [Abu Talib A.R., L.H. Abbud, A. Ali, F. Mustapha (2012)], [Pekbey Y., K. Aslantas, N. Yumak (2017)], [de Oliveira Braga F., É. Pereira Lima Jr., E. de Sousa Lima, S.Neves Monteiro (2017)]. Sin embargo, se han realizado investigaciones sobre otras fibras. N.K. Naik y otros realizaron ensayos de impactos de bala sobre tejidos de fibra de vidrio E obteniendo resultados satisfactorios [Naik N.K., P. Shrirao, B.C.K. Reddy (2005)]. Fernanda Santos da Luz y otros, ensayaron telas de yute [Santos da Luz, F., E. Pereira Lima Junior, L. H. Leme Louro, S. N. Monteiro (2015)]

K.H. Min y otros realizaron un estudio comparativo sobre el comportamiento de distintos tipos de telas utilizadas como refuerzo de probetas de hormigón sometidas a cargas estáticas y de impacto. Se ensayaron probetas prismáticas de 10x10x40 cm reforzadas con telas de fibra de carbono, vidrio y aramida en su fibra inferior y con un refuerzo en U en su zona central. En los ensayos estáticos se aplicaron cargas sobre dos puntos a los tercios de las probetas, mientras que las pruebas dinámicas se realizaron aplicando una carga en el centro de la luz. Si bien en los ensayos estáticos se evidencia el mejor comportamiento de las telas de fibras de aramida y de carbono, en los ensayos de impacto no encontraron diferencias significativas entre los distintos tipos de telas [Min K.H., S.H. Cho, D.Y. Yoo, Y.S. Yoon (2010)].

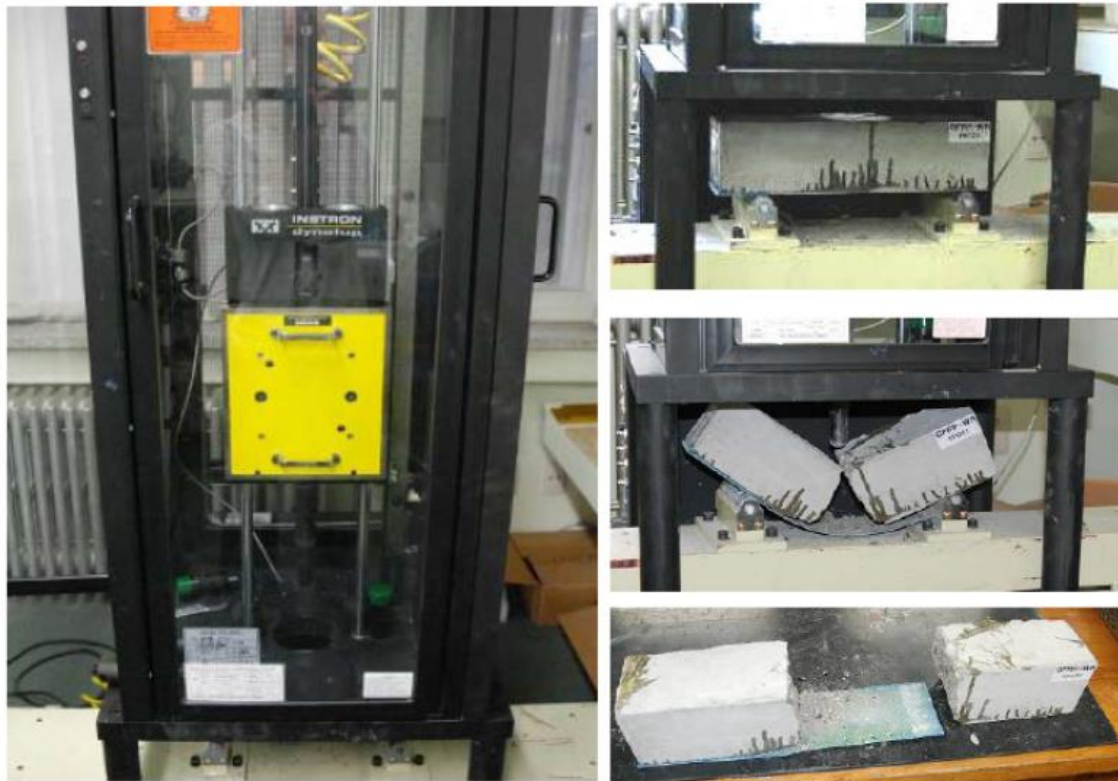


Figura 2.21 - Ensayos de impacto [Min K.H., S.H. Cho, D.Y. Yoo, Y.S. Yoon (2010)]

Amaro A.M. y otros realizaron ensayos de impactos únicos y de impactos múltiples sobre láminas circulares de fibra de vidrio E, fabricadas por el proceso de moldeo de autoclave / bolsa de vacío, impactadas en su centro. En las pruebas de impacto único se aplicaron 3 J, mientras en las de impacto acumulativo se aplicaron 1J + 2J y 1J + 1J + 1J. Las curvas de energía-tiempo han demostrado que el único impacto de 3J es más perjudicial para la placa, respecto a los otros casos de daño acumulativo. Se verificó que se produce una evolución insignificante del daño en el caso de tres impactos consecutivos. Los ensayos fueron comparados con un modelo teórico [Amaro A.M., Reis P.N.B., de Moura M.F.S.F., Neto M.A. (2013)].

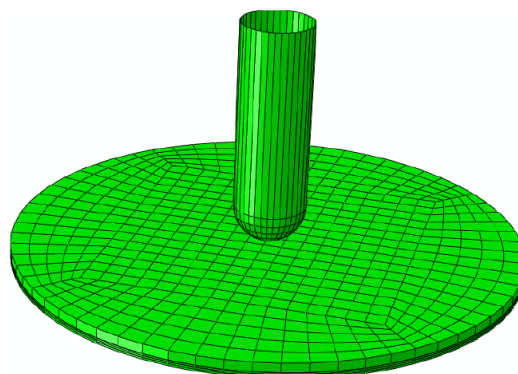


Figura 2.22 - Modelo de los ensayos de impacto sobre placas circulares [Amaro A.M., Reis P.N.B., de Moura M.F.S.F., Neto M.A. (2013)]

Pruebas similares realizaron Gayatri Vineela y otros. En este caso fueron ensayos de impacto sobre láminas de fibra de vidrio de 2,4 mm de espesor y 30 x 30 cm confeccionadas por el método por el proceso Filament Winding con diferentes orientaciones de fibras [0/90], [30/60] y [45/90]. Dejaron caer una esfera de 8 cm de diámetro evaluando los esfuerzos y deformaciones en cada uno de los especímenes. Los resultados obtenidos fueron comparados con valores teóricos obtenidos por el programa Abaqus. Se concluyó que la orientación [30/60] presentó mejor resistencia que la [0/90] y ésta a su vez que la [45/90] [Gayatri Vineela. M, Gayathri Tadepalli, A. Krishnaiah (2016)]

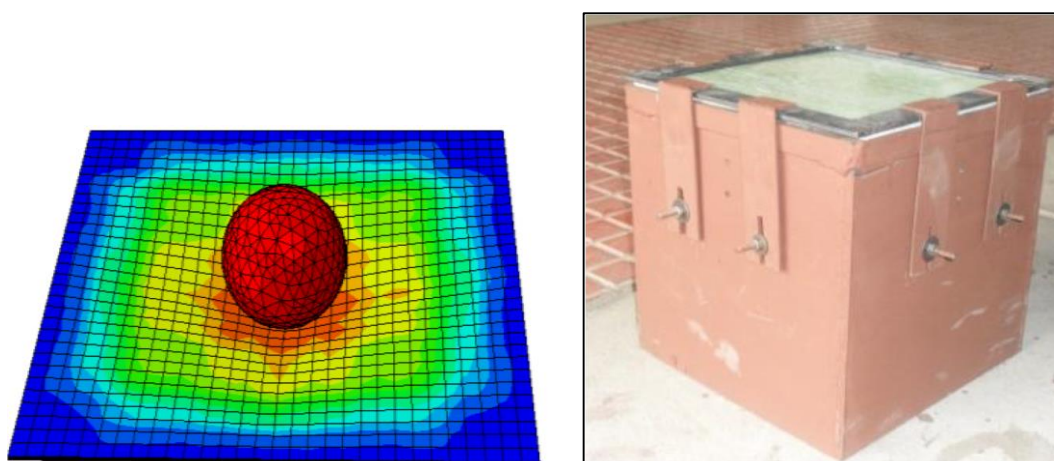


Figura 2.23 - Modelo de Abaqus y probeta [Gayatri Vineela. M, Gayathri Tadepalli, A. Krishnaiah (2016)]



Figura 2.24 - Dispositivo de ensayo [Gayatri Vineela. M, Gayathri Tadepalli, A. Krishnaiah (2016)]

Otro tipo de ensayos de impacto realizados son los ejecutados con sistemas de péndulo tipo Charpy. Un ejemplo de esto fueron los realizados por Rita Roy y otros que construyeron un

péndulo con el que impactaron barras de cilíndricas de fibra de carbono de 4 mm de diámetro y 180 mm de longitud. Las barras de resina vinil éster fueron reforzadas con dos tipos de fibra de carbono unidireccional, uno de alta resistencia (DHMS) y otro de mediana resistencia (VLMS). Se fabricaron usando como molde tubos de vidrio huecos que se rompieron una vez catalizada la resina. Los ensayos consistieron en impactos sucesivos aplicados por el péndulo. Como era de esperar, los especímenes de alta resistencia presentaron mejores comportamientos de fatiga por impacto [Roy R., B.K. Sarkar, A.K. Rana, N.R. Bose (2001)].

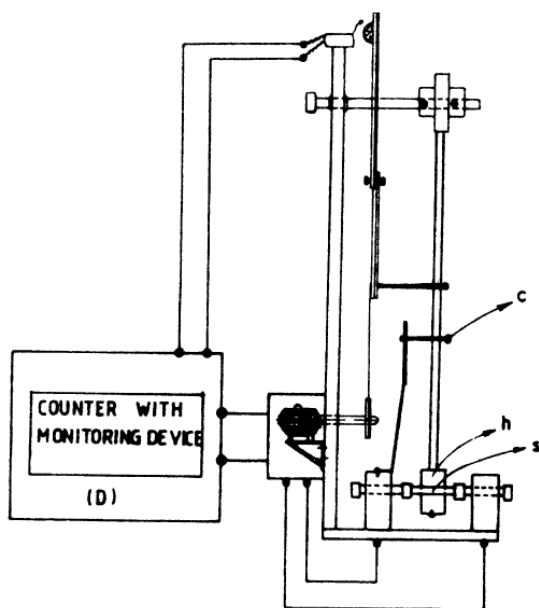


Figura 2.25 - Diagrama esquemático del aparato de fatiga por impacto repetido [Roy R., B.K. Sarkar, A.K. Rana, N.R. Bose (2001)]

Por su parte, Cathrine Høgmo Strand realizó un estudio experimental y numérico de las propiedades mecánicas de especímenes de CFRP con temperaturas variables. Estudió tres tipos de situaciones, pruebas de flexión de cuatro puntos, ensayos de Charpy e impacto de proyectiles de aire comprimido. Los ensayos con el péndulo de Charpy se realizaron sobre probetas prismáticas con dos configuraciones de temperatura diferentes: temperatura ambiente (alrededor de 22 ° C) y temperatura fría (alrededor de -20 ° C). Se verificó que una exposición general a temperaturas frías debilita las muestras de CFRP en un 9-10% incluso después de un corto tiempo [Strand C.H. (2017)].

Beirnes, M.J. y otros investigaron el efecto de las bajas temperaturas en la resistencia al impacto de paneles de SFRC reforzado con telas de fibra de carbono. Estos paneles se pensaron para ser utilizados como parte de un sistema de protección modular de la industria militar y debían estar preparados para resistir los impactos de proyectiles o de una explosión. Se realizaron ensayos estáticos y dinámicos y se determinaron las resistencias a la flexión residual del panel después de las pruebas dinámicas. Todos los ensayos se realizaron con paneles a temperatura ambiente de laboratorio y temperaturas de frío extremo para simular condiciones árticas. Las pruebas estáticas y dinámicas consistieron en ensayos de flexión de tres puntos. Los ensayos dinámicos consistieron en impactos realizados a diferentes alturas de martillo. Una vez que se completó un ensayo de impacto, la resistencia a la flexión residual del panel se determinó usando la misma configuración de flexión de tres

puntos. Los paneles de temperatura fría se colocaron en un congelador de tamaño industrial capaz de reducir la temperatura del panel a  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

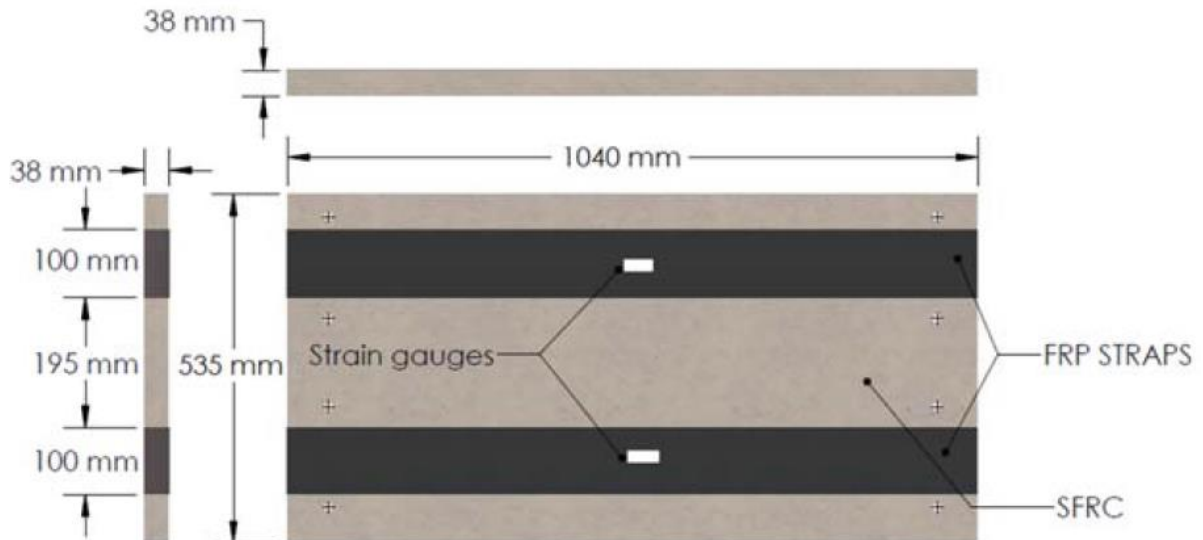


Figura 2.26 - Dimensiones de los paneles [Beirnes, M.J., R.G. Wight, M.A. Dagenais (2019)]

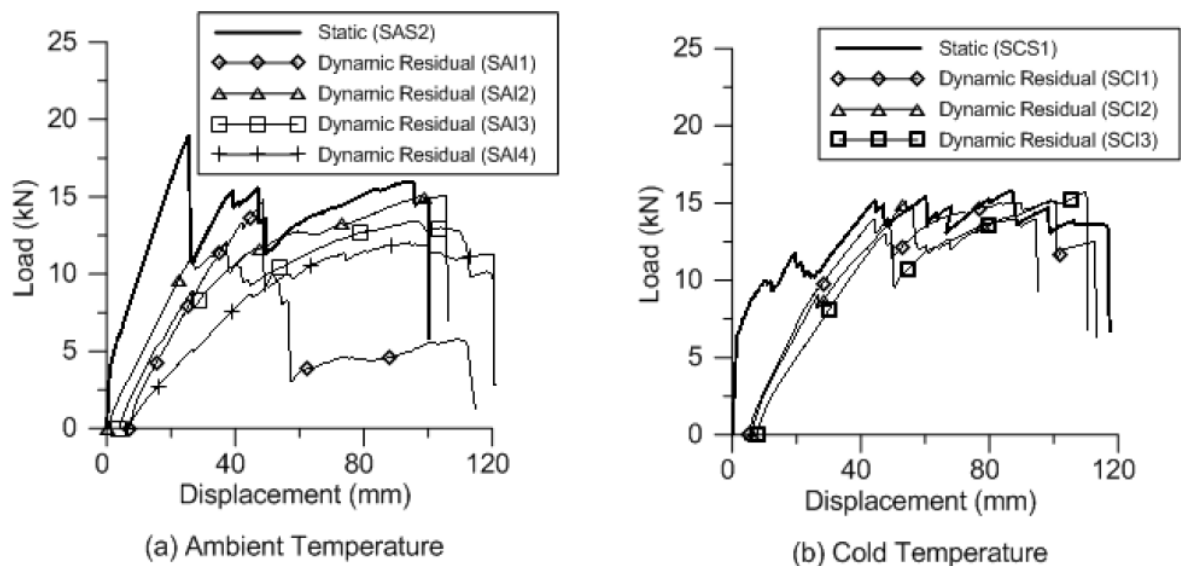


Figura 2.27 - Gráficos carga-desplazamiento de los ensayos de resistencia residual [Beirnes, M.J., R.G. Wight, M.A. Dagenais (2019)]

Se pudo comprobar que los paneles ensayados a baja temperatura mostraron resistencias a la flexión residual similares a las cargas estáticas, mientras que, en el caso de los paneles ensayados a temperatura ambiente, las cargas residuales fueron sensiblemente menores a los obtenidos en las pruebas originales.

## 2.5. Materiales compuestos sometidos a vibraciones

En el campo aeronáutico y aeroespacial se han realizado numerosas investigaciones sobre el comportamiento de materiales compuestos sometidos a vibraciones por ser este tipo de sollicitaciones uno de los argumentos principales a abordar en el diseño de sus carrocerías.

Se resumen a continuación algunos trabajos realizados sobre el comportamiento de materiales compuestos frente a vibraciones.

Parsuram Nayak en su tesis doctoral, estudió el comportamiento de láminas producidas por el método hand lay-up sometidas a vibraciones. Realizó una investigación experimental y numérica de vibración libre de placas compuestas de fibra de vidrio / epoxi en voladizo. Se determinó la frecuencia natural y la forma de modo de la placa usando un programa computacional (ANSYS) [Nayak P. (2008)].

Se ensayaron placas empotradas en un macizo de hormigón sometidas a impactos cercanos al apoyo mediante un martillo modal. Se dispuso en el extremo un acelerómetro conectado a un analizador.



Figura 2.28 - (a) Martillo modal (b) Lámina en voladizo (c) Acelerómetro [Nayak P. (2008)]

Se obtuvieron gráficos frecuencia-aceleración, frecuencia-carga, tiempo-carga y tiempo-aceleración para cada uno de los especímenes y se compararon los resultados experimentales con los valores obtenidos mediante los modelos matemáticos. Las diferencias obtenidas fueron del orden del 15 %.

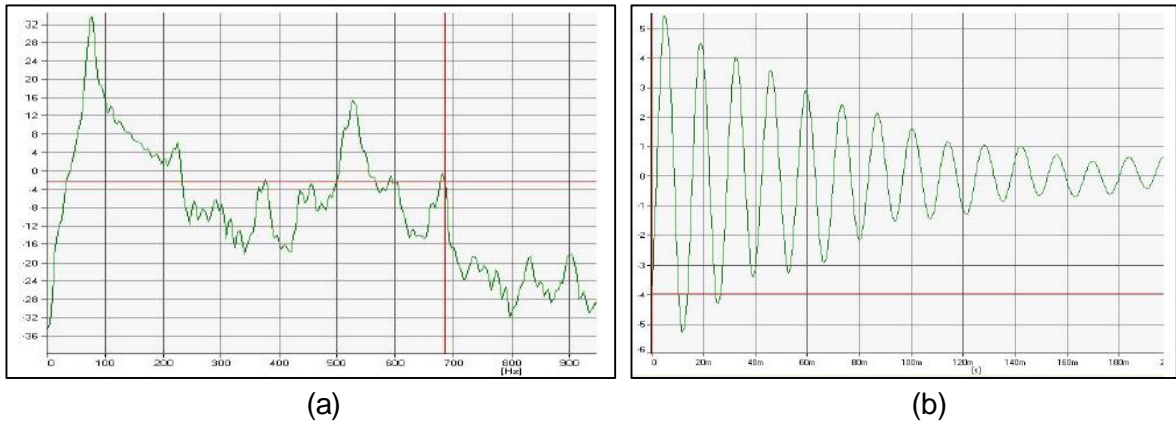


Figura 2.29 - (a) Grafico frecuencia-aceleración (b) Grafico tiempo-aceleración [Nayak P. (2008)]

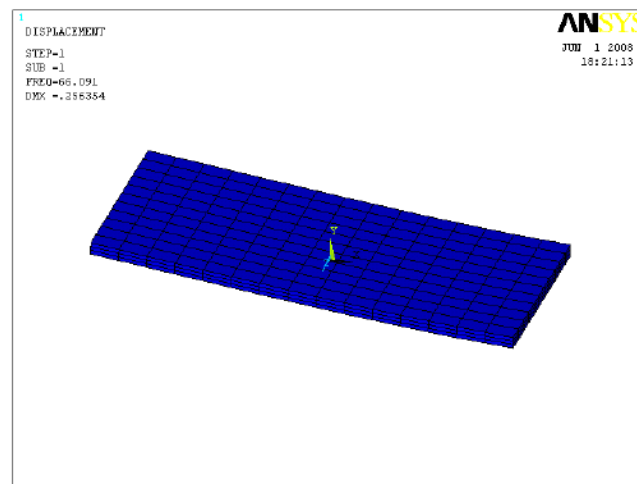


Figura 2.30 - Modelización para ANSYS [Nayak P. (2008)]

Un análisis similar fue realizado por C K Hirwani y otros (2016). En ese trabajo se estudiaron respuestas de vibración libre de placas compuestas laminadas numéricamente y validadas con experimentos posteriores. Para calcular las frecuencias numéricas, las placas compuestas se modelaron con dos enfoques de sub-laminado en el paquete de elementos finitos ANSYS. Para el análisis experimental, la placa compuesta de vidrio / epoxy se fabricó utilizando también el método de colocación manual hand lay-up. Las frecuencias naturales de la placa también se calcularon experimentalmente con la ayuda del analizador de vibración (NI-CDAQ) y se validaron al comparar el resultado de la simulación [Hirwani C.K., S.S. Sahoo, S.K. Panda (2016)].

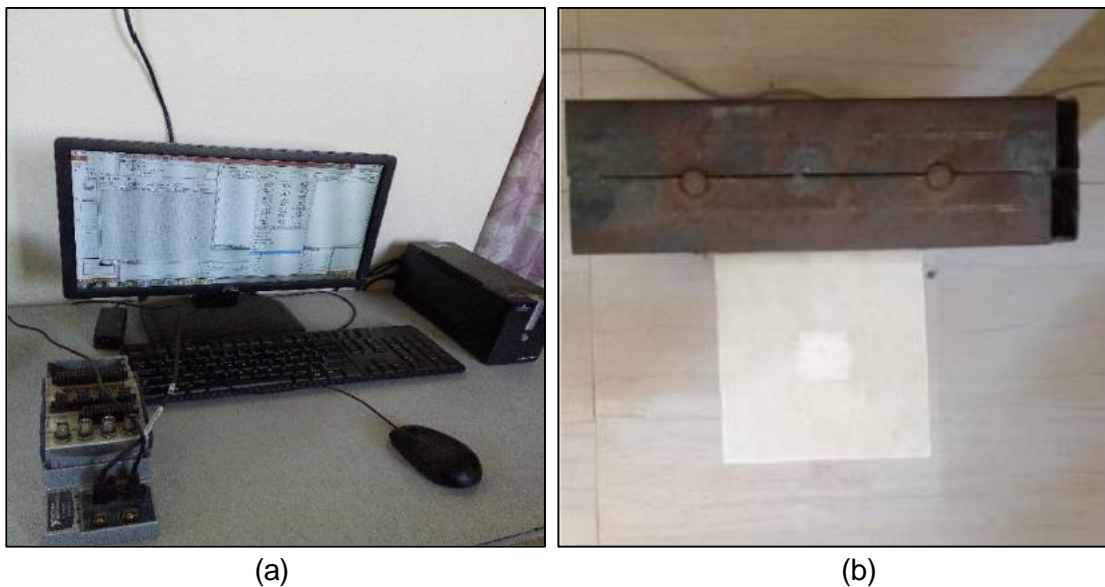


Figura 2.31 - (a) Analizador de vibración (NI-CDAQ) (b) Lámina en voladizo [Hirwani C.K., S.S. Sahoo, S.K. Panda (2016)]

Curtu I. y otros (2011) realizaron un análisis modal del comportamiento dinámico de placas elaboradas con tejidos de fibras de vidrio E y resina poliéster con diferentes números de capas, espesor y presión de fabricación. Se ensayaron 15 muestras de cada tipo y se obtuvieron las frecuencias naturales de cada espécimen y su forma modal comparando los resultados con los valores numéricos obtenidos por elementos finitos (FEM) [Curtu I., M.D. Stanciu, V. Ciofoaia (2011)].

Las placas se apoyaron en cuatro puntos. Se dispusieron acelerómetros cercanos a los apoyos. Los impactos se aplicaron en su punto central.

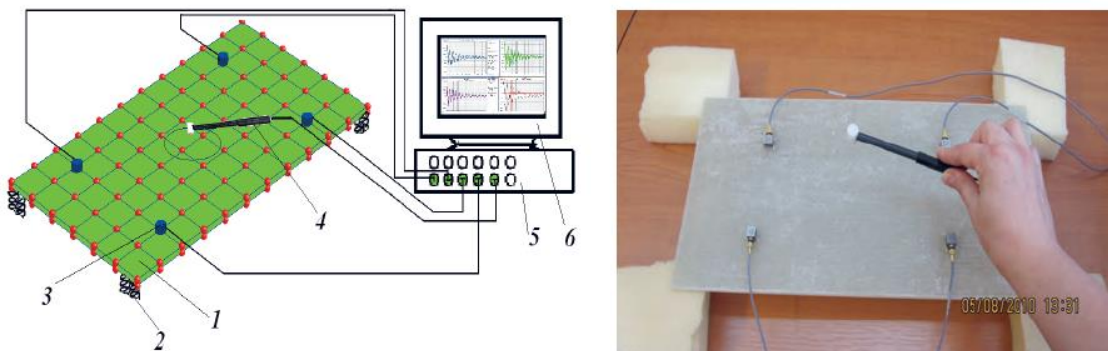


Figura 2.32 - Ensayo de impacto en placas [Curtu I., M.D. Stanciu, V. Ciofoaia (2011)].

Se obtuvo como conclusión que el método propuesto puede predecir frecuencias naturales de placas compuestas. El comportamiento dinámico de los compuestos depende del número de capas y de sus características físicas como densidad, espesor y proceso de fabricación. Este método experimental representa una forma no destructiva que se puede utilizar para predecir el comportamiento dinámico de materiales compuestos con el fin de diseñar elementos

empleados en diferentes aplicaciones como la industria automotriz, paneles de insonorización para autopistas, arquitectura de salas de conciertos, aislamiento acústico de edificios, etc.

## **2.6. Aplicación de materiales compuestos en estructuras sometidas a esfuerzos sísmicos**

Una de las principales aplicaciones que tuvieron los materiales compuestos, desde que se difundió su uso en las construcciones civiles a inicios de la década de 1990, fue su utilización como refuerzos de estructuras existentes sometidas a esfuerzos sísmicos. Estos productos fueron capaces de resolver situaciones que los materiales tradicionales no podían solucionar o cuya utilización resultaba demasiado costosa [Ascione L. (2000)] [Busnelli, A.P. (2010)].

Los países que comenzaron a desarrollar tecnológicamente y comercialmente estos sistemas fueron justamente aquellos en los que los sismos afectan gran parte de su geografía como Japón o Italia. En este país, justamente, se difundió notablemente la aplicación de materiales compuestos para la reparación y refuerzo de edificios históricos. En efecto, en Italia se da una situación muy particular que es la presencia de innumerables construcciones y monumentos de enorme valor patrimonial en zonas de alto riesgo sísmico. Lamentablemente han sido las catástrofes el motor para la difusión de esta nueva tecnología, el punto de partida fue el recordado terremoto de Umbria en 1997 que causó grandes daños, entre ellos el derrumbe parcial de la Basílica de San Francisco de Asís en la provincia de Perugia. El daño de este monumento mundialmente famoso fue el eje de promoción para las distintas técnicas de reparación utilizadas y a partir de allí se dio inicio a programas de refuerzo preventivo de una gran cantidad de construcciones con riesgo sísmico.

Lamentablemente, los sismos constituyen en muchas zonas del planeta una permanente amenaza no sólo para las vidas humanas sino también para el patrimonio y economía de los países afectados. Es de hacer notar que en los últimos años se han verificado muchos sismos que se posicionan entre los más destructivos de la historia, por lo que se están tomando medidas para la mitigación de sus efectos tanto en fase de reglamentación para estructuras nuevas como para el refuerzo de estructuras existentes.

### 2.6.1. Recomendaciones normativas para los refuerzos sísmicos

Se han desarrollado y aplicado muchas técnicas de refuerzo para la reparación y rehabilitación de estructuras dañadas por terremotos y sísmicamente deficientes [FEMA 547 (2006)]. La identificación de un método de rehabilitación efectivo está directamente relacionada con el resultado de una evaluación sísmica de la estructura y se basa en la consideración de muchos factores, incluidos el tipo de estructura, el objetivo de rehabilitación, el fortalecimiento de la eficacia del sistema, posibilidad de construcción y costo [ACI 440.2R-17 (2017)].

Las principales ventajas de los refuerzos con FRP se pueden resumir de la siguiente manera:

a) A nivel de componentes, el refuerzo con FRP se puede utilizar para mitigar eficazmente los mecanismos de falla frágiles. Estos pueden incluir falla por corte de unión viga-columna no confinadas, falla por corte (de vigas, columnas o ambas) y falla de empalmes de barras. El refuerzo de FRP también se puede utilizar para aumentar la capacidad a flexión de los miembros de hormigón armado, para resistir el pandeo de las barras de acero de flexión y para aumentar la capacidad de rotación inelástica de los miembros de hormigón armado.

b) La implementación de los esquemas de refuerzo con FRP se traduce en un aumento en el desplazamiento global y la capacidad de disipación de energía de la estructura, mejorando así el comportamiento general de las estructuras de hormigón armado sometidas a acciones sísmicas.

c) El refuerzo a corte y confinamiento con FRP tiene un pequeño efecto sobre la rigidez o la masa de la estructura. En tales casos, normalmente no se requiere una reevaluación de la demanda sísmica después de la aplicación. Cuando se necesita aumentar la rigidez estructural, el refuerzo con FRP de los componentes locales se puede combinar con otras técnicas tradicionales de refuerzo.

La norma ACI 440.2R-17 incorpora el capítulo 13 donde se presentan pautas de diseño para el refuerzo sísmico de elementos de hormigón armado utilizando compuestos de FRP unidos externamente (EB FRP). Se presentan métodos de cálculo para refuerzos de confinamiento de columnas, refuerzos de flexión, refuerzos de corte, unión viga columna y refuerzos de tabiques.

La agencia norteamericana FEMA (Agencia Federal de Manejo de Emergencias) y el Programa Nacional de Reducción de Riesgos de Terremotos (NEHRP) proporcionan una lista completa de referencias sobre estándares de diseño técnico y técnicas de análisis que están disponibles para los profesionales del diseño. Otros organismos también han elaborado guías similares para la mejora sísmica de estructuras existentes de hormigón armado como ser Japan Building Disaster Prevention Association (2005), Eurocode 8 (2005), International Federation for Structural Concrete (2003, 2006), Italian National Research Council (2004), etc.

#### 2.6.2. Criterio de jerarquía de resistencias

El concepto de jerarquía de resistencias (*capacity design*) en las estructuras sometidas a esfuerzos sísmicos prevé la identificación de un mecanismo de colapso que permita la máxima ductilidad de la estructura en términos de desplazamientos.

Se deben proporcionar zonas disipativas que conduzcan a la activación del mecanismo de colapso deseado, evitando la formación de fenómenos de ruptura frágiles.

El objetivo del "diseño de capacidad" es, por lo tanto, producir una jerarquía en las modalidades de colapso en el cual las formas dúctiles preceden a las frágiles; esto se logra diseñando las zonas disipativas con una resistencia de diseño cercana a los valores de tensión de diseño y áreas potencialmente frágiles con una resistencia más alta (considerando también eventuales sobre-resistencias) a la resistencia máxima desarrollada en las zonas disipativas antes mencionadas (rótulas plásticas) [Linee guida Assobeton (2011)].

La jerarquía de resistencia se aplica en dos niveles:

- Nivel 1: entre elementos

Esta jerarquía de resistencia se obtiene sobredimensionando algunos elementos en comparación con otros para lograr el mecanismo de colapso deseado (por ejemplo, sobredimensionando las columnas en comparación de las vigas para evitar la formación de un "piso débil").

- Nivel 2: entre solicitaciones

Esta jerarquía de resistencias se obtiene en el interior de un mismo elemento al sobredimensionar la resistencia contra mecanismos de rotura frágiles (por ejemplo, sobredimensionando la resistencia a corte con respecto a la resistencia a flexión).

El criterio de la jerarquía de resistencias es ampliamente considerado en los documentos normativos. Para evitar el desastroso mecanismo del piso débil, que ha llevado a tantos eventos trágicos en el momento de los terremotos en todo el mundo, debe ser respetada la regla de la "viga débil en la columna fuerte". Esto se logra verificando que en todos los nodos de los niveles intermedios la resistencia de las columnas sea mayor que la de las vigas [Toniolo G. (2007)].

La regla de "corte fuerte con momento débil" consiste en sobredimensionar la armadura de corte considerando, en lugar de las acciones aplicadas, dos momentos de sobrerresistencia en los extremos. De esta manera, se evita la posibilidad de rotura frágil debido al corte, ya que se plastificarán en primer lugar las secciones sometidas a flexión.

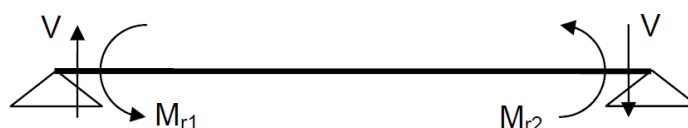


Figura 2.33 - Corte fuerte con momento débil [Toniolo G. (2007)].

La regla de "columna fuerte con viga débil" consiste en dimensionar las columnas, en todos los nodos de los niveles intermedios de un pórtico de varias plantas considerando, en lugar de las acciones aplicadas, la resistencia a flexión de las vigas contiguas, de modo que las columnas no puedan plastificarse antes que las vigas.

El criterio se ilustra en la figura siguiente donde se indican con  $M'_{Ep}$  y  $M''_{Ep}$  los momentos actuantes en las secciones superior e inferior de la columna y con  $M'_{Rt}$  y  $M''_{Rt}$ , los momentos resistentes de las secciones de las dos vigas.

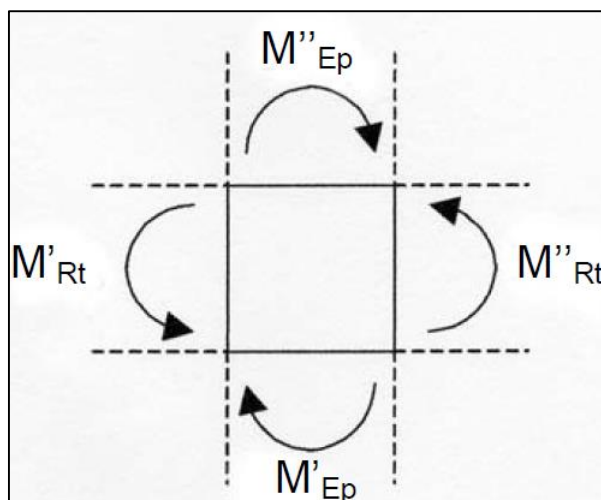


Figura 2.34 - Columna fuerte con viga débil [Toniolo G. (2007)].

Es necesario considerar que las reglas sobre la jerarquía de resistencias (nudo sobre barra, columna sobre viga y corte sobre momento) son cualitativas, no cuantitativas [Gómez-Martínez y otros (2015)].

Teniendo en cuenta este criterio, un refuerzo a flexión en las vigas de un edificio sometido a esfuerzos sísmicos como el propuesto en este trabajo, tiene sentido si previamente se resuelven las zonas más sensibles o más frágiles como las columnas, los nudos de pórtico o los apoyos de vigas sometidos a esfuerzos de corte importantes.

Hay que tener en cuenta además que los sismos provocan en las estructuras cargas de valor extraordinario que muchas veces producen solicitaciones con inversión de signo. En lo referido a la aplicación en este tipo de situaciones, los compuestos fibro-reforzados presentan algunas limitaciones para su utilización, ellas son:

- Resistencia unidireccional:  
Las fibras trabajan sólo a tracción, por lo que la resistencia a compresión de los compuestos fibro-reforzados está prácticamente limitada a la de la matriz
- Poca resistencia a la reversión de los esfuerzos:  
Relacionada con la característica anterior. Frente a cargas dinámicas se observa un cambio, a veces brusco, del tipo de esfuerzo (tracción a compresión) situación que afecta la matriz de adherencia para muchos ciclos de carga y descarga.

En el sistema de vinculación propuesto en este trabajo, cuando se produce una inversión en el signo de los momentos externos, es de esperar que el refuerzo FRP abulonado solamente en sus extremos contribuya mecánicamente mientras no se produzca su delaminación. En efecto, si se pretende que, ante una inversión del momento, la lámina pultruida pueda trabajar comprimida, va a ser necesaria la disposición de una mayor cantidad de bulones adecuadamente separados para evitar el pandeo de la misma. Este es un tema que se debe desarrollar en investigaciones posteriores.

### 2.6.3. Trabajos de investigación

Se han realizado numerosos trabajos de investigación sobre la aplicación de materiales compuestos para reforzar estructuras sometidas a esfuerzos sísmicos. Los materiales estudiados son generalmente tejidos de fibras de carbono, vidrio y, en menor medida, de aramida. Con respecto a la utilización de láminas pultruidas, todos los trabajos se orientan a las planchuelas de fibras de carbono. No se encontraron trabajos realizados con láminas de fibra de vidrio como las estudiadas en el presente trabajo.

A continuación, se presentan algunas investigaciones divididas según el tipo de estudio.

#### **1) Refuerzos de nudos de pórticos**

Los refuerzos de nudos de pórticos son quizá una de las zonas más estudiadas de las estructuras sometidas a esfuerzos sísmicos. Los sistemas más difundidos son las envolturas con telas de fibra de carbono o vidrio, con capas sucesivas de tejidos unidireccionales o con tejidos bidireccionales (o multidireccionales). Se presentan algunos estudios particulares sobre el tema.

Abhijit Mukherjee y Mangesh Joshi realizaron una investigación sobre el desempeño de las uniones viga-columna de hormigón armado bajo carga cíclica. Se elaboraron uniones reforzadas con telas de CFRP y GFRP envolviendo tanto las vigas como las columnas y todo el nudo en sí. Se usaron también láminas pultruidas de CFRP para reforzar las zonas de las vigas cercanas al nudo. Las columnas fueron sometidas a fuerzas axiales mientras que las vigas se sometieron a una carga cíclica con desplazamiento controlado. La amplitud del desplazamiento se incrementó monótonamente utilizando un actuador dinámico [Mukherjee A., M. Joshi (2003)].

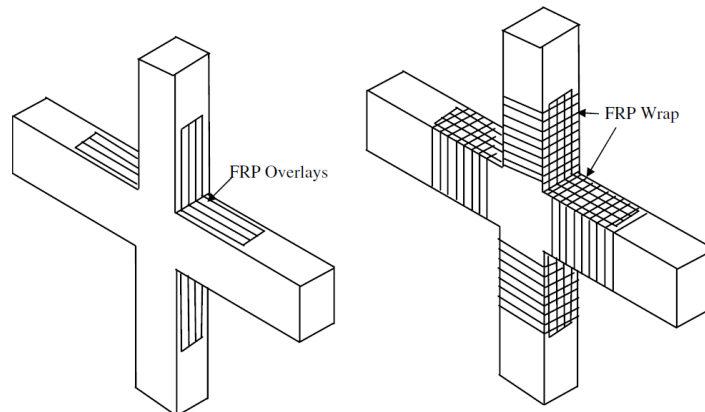


Figura 2.35 - Refuerzos con telas [Mukherjee A., M. Joshi (2003)].

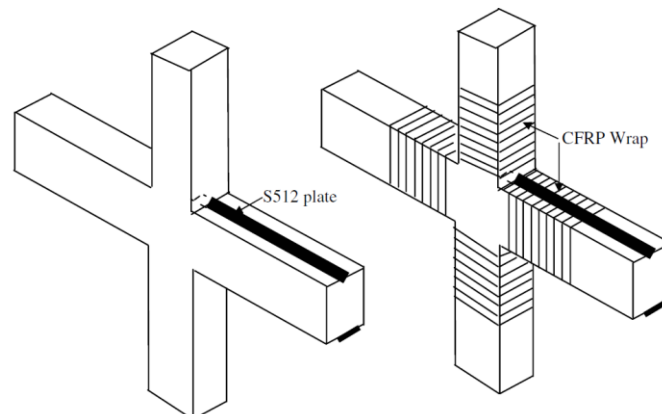


Figura 2.36 - Refuerzos con láminas [Mukherjee A., M. Joshi (2003)].

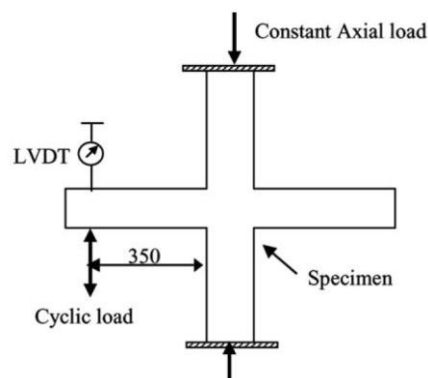


Figura 2.37 - Esquemas de cargas en el nudo viga-columna [Mukherjee A., M. Joshi (2003)].

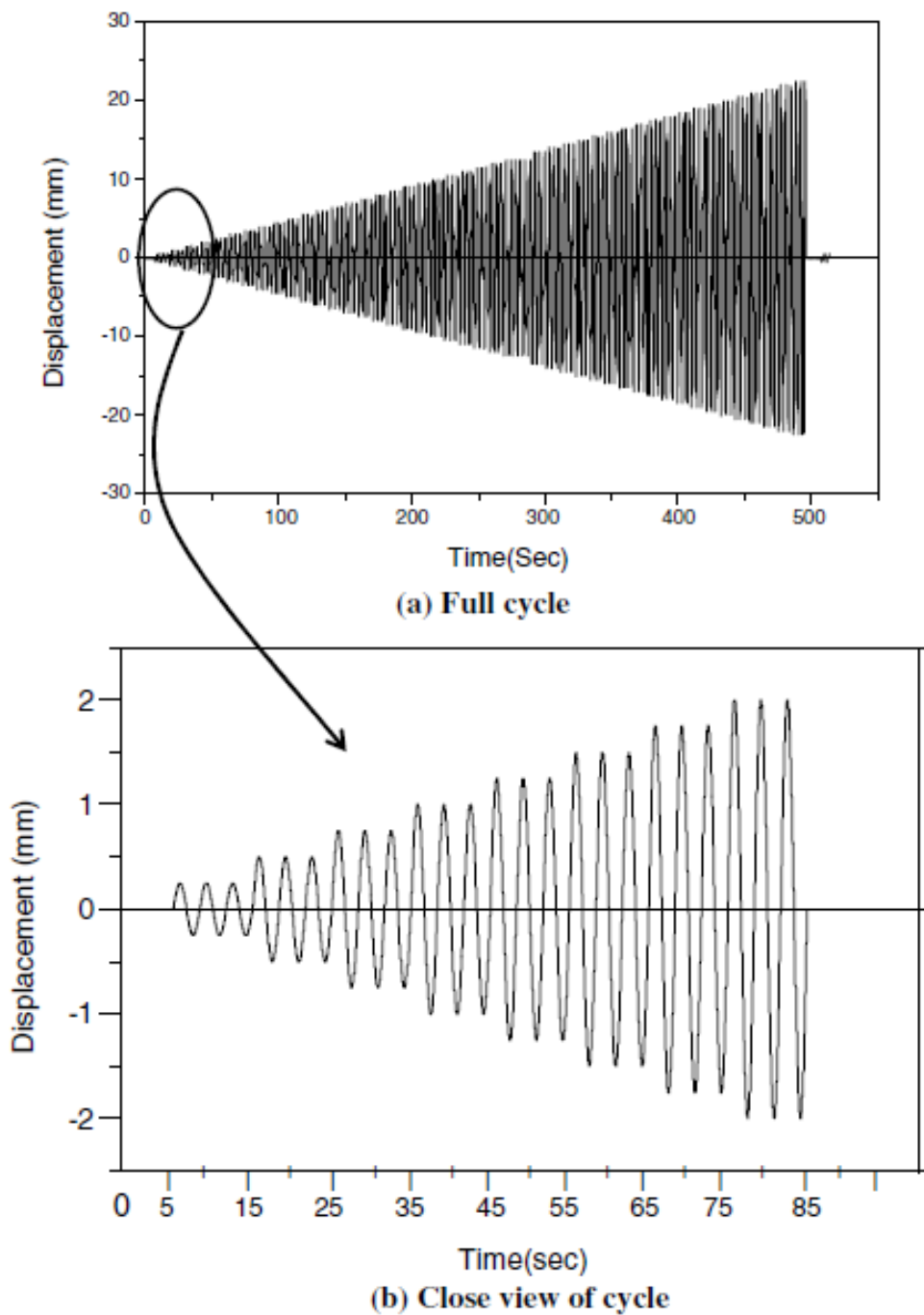


Figura 2.38 - Ciclos de desplazamientos en el extremo de la viga [Mukherjee A., M. Joshi (2003)].

Se trazaron las curvas histeréticas de los especímenes y se comparó la capacidad de disipación de energía de varias configuraciones de FRP.

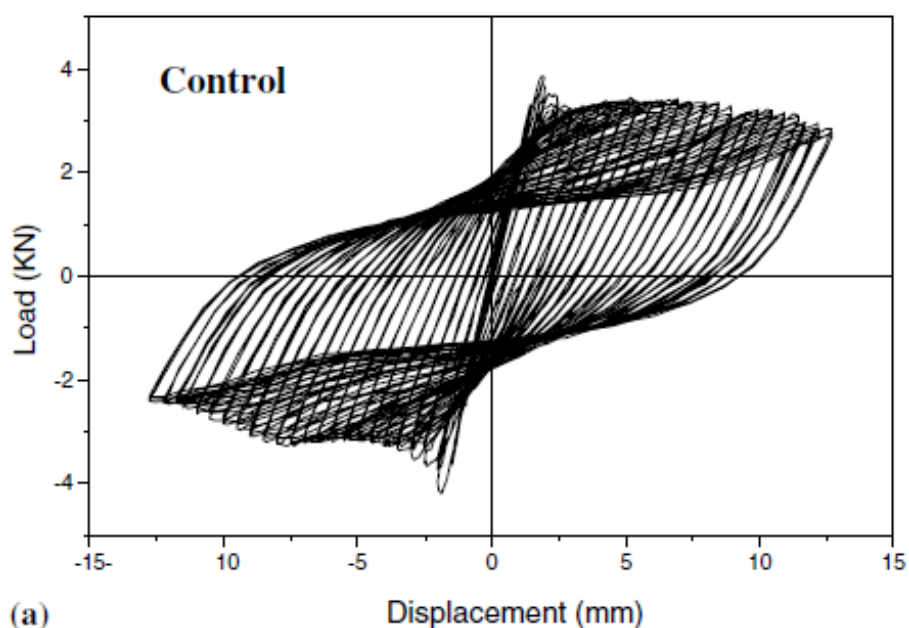


Figura 2.39 - Grafico Carga-Desplazamiento [Mukherjee A., M. Joshi (2003)].

Se pudo comprobar que tanto los materiales compuestos de fibra de vidrio como de fibra de carbono se pueden usar de manera eficiente para la adaptación sísmica y la rehabilitación de uniones viga columna. Las uniones presentaron siempre una resistencia mejorada independientemente de las características del refuerzo. Los especímenes reforzados con CFRP mostraron un comportamiento más rígido que los reforzados con GFRP. Se verificó que los refuerzos de FRP no solo restauraron su resistencia original, sino que presentaron una mejora considerable en su capacidad de carga, rigidez inicial y capacidad de disipación de energía.

Heecheul Kim y otros evaluaron la resistencia sísmica de nudos de vigas de hormigón armado reforzadas con tejidos de FRP (CFRP y AFRP) y abrazaderas de restricción de pandeo (BRB - Buckling Restrained Braces). Se rehabilitaron y ensayaron seis nudos viga-columna. Los resultados de los ensayos se compararon en términos de bucles de histéresis, degradación de la rigidez, disipación de energía y ductilidad. El resultado de la comparación mostró que envolver el nudo con tejidos de FRP puede contribuir a aumentar el efecto del confinamiento y retrasar el desarrollo de grietas en las articulaciones. Además, la utilización de las BRB puede mejorar la rigidez y la capacidad de disipación de energía. Tanto los tejidos de FRP como las BRB pueden mejorar de manera efectiva la resistencia, la rigidez y la ductilidad [Kim H., D. J. Kim, M. S. Kim, Y.H. Lee (2014)].

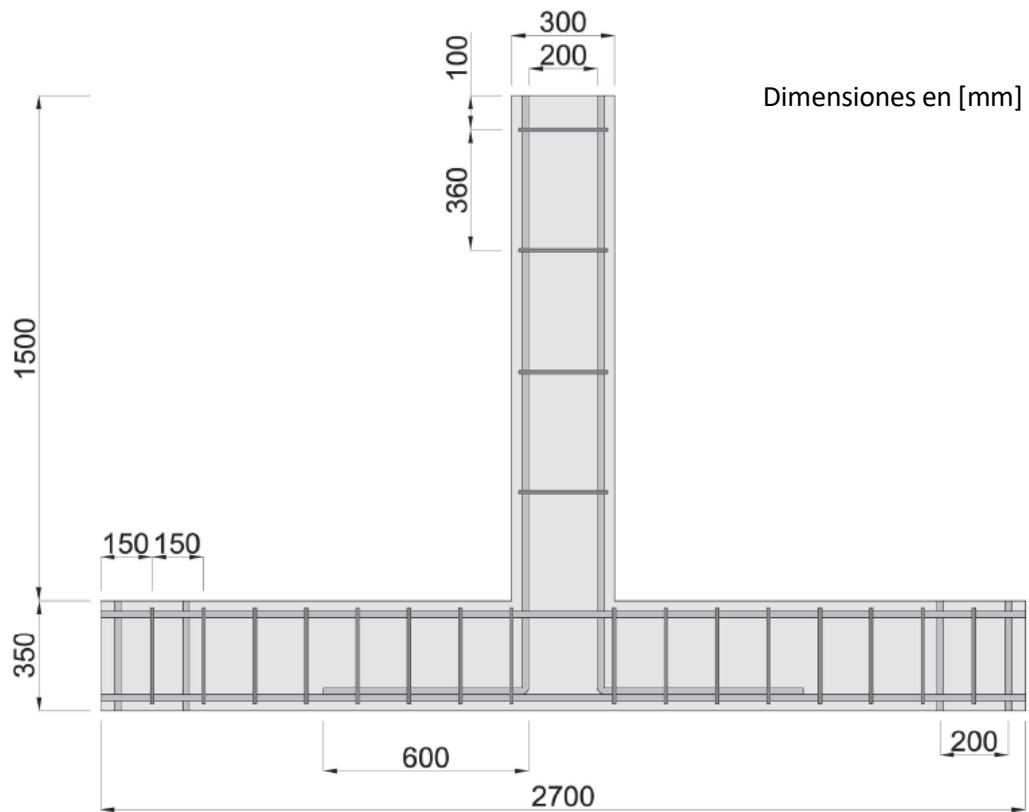


Figura 2.40 - Detalle del nudo [Kim H., D. J. Kim, M. S. Kim, Y.H. Lee (2014)]

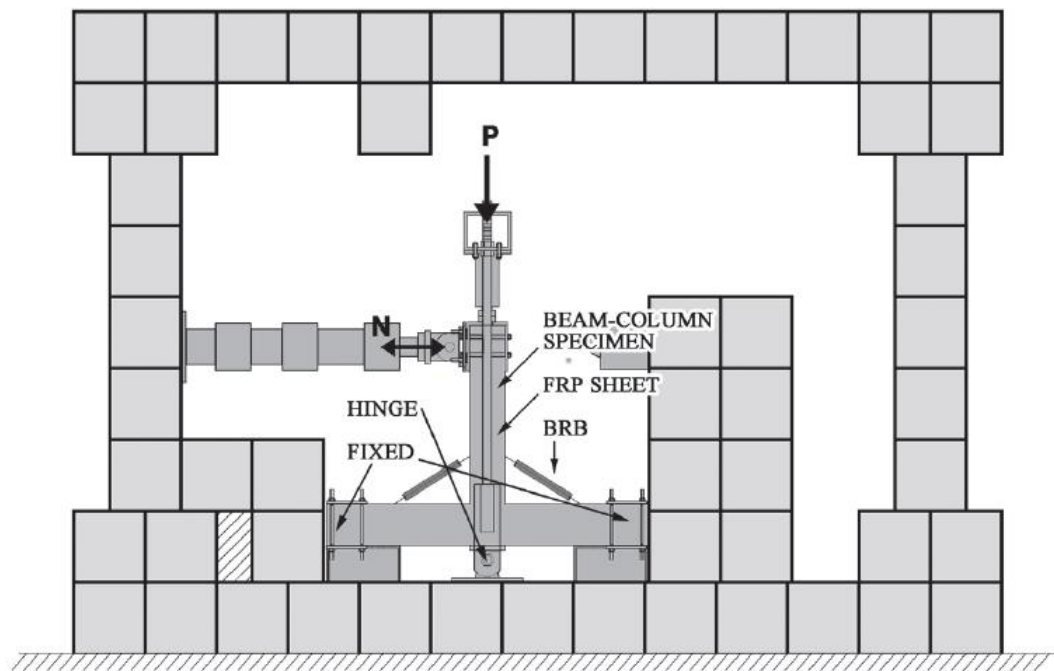


Figura 2.41 - Instrumentación del ensayo [Kim H., D. J. Kim, M. S. Kim, Y.H. Lee (2014)]

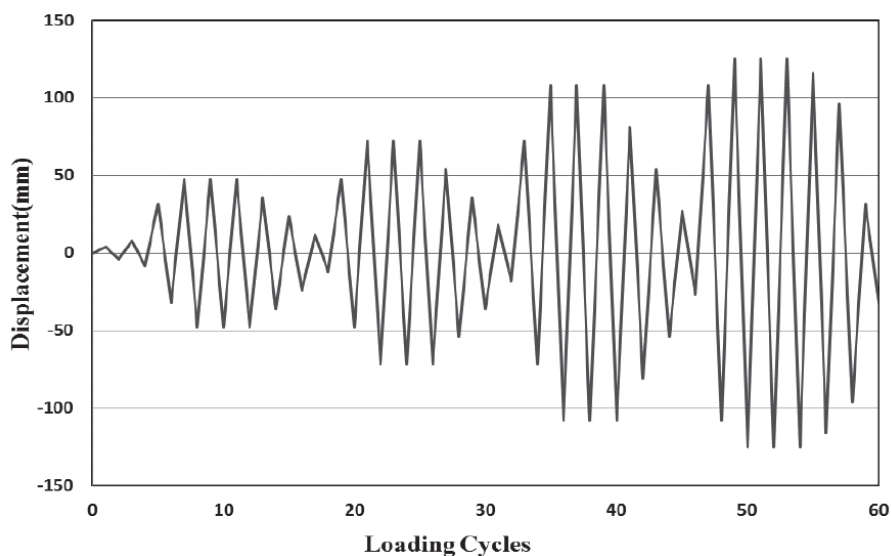


Figura 2.42 - Protocolo de cargas [Kim H., D. J. Kim, M. S. Kim, Y.H. Lee (2014)]

Tabla 2.3 - Máxima carga alcanzada en c/refuerzo [Kim H., D. J. Kim, M S. Kim, Y.H. Lee (2014)]

Specimen	Maximum load (kN)	Ratio of maximum load
Control	67.20	1.00
BRB	126.96	1.89
AFRP	73.15	1.09
CFRP	74.17	1.10
CFRP-BRB	131.56	1.96
AFRP-BRB	133.15	1.98

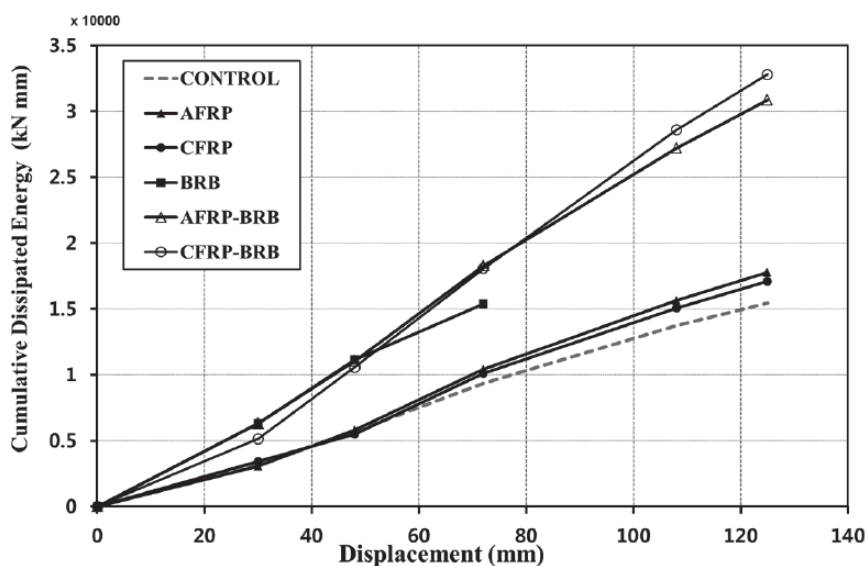


Figura 2.43 - Disipación de energía acumulada de las muestras [Kim H., D. J. Kim, M. S. Kim, Y.H. Lee (2014)]

Los ensayos demostraron que los sistemas de refuerzo combinados de telas de FRP con abrazaderas BRB arrojaron los mejores resultados. Los refuerzos con tela incrementaron ligeramente la carga máxima del espécimen de control, mientras que el uso de las BRB mejoró notablemente la performance.

Kang Seok Lee y otros estudiaron un tipo de refuerzo particular proyectando fibras. Los refuerzos con telas de FRP presentan algunos inconvenientes, tales como la necesidad de un tratamiento superficial previo, problemas en las juntas con costos de material relativamente elevados. En este trabajo se presenta un nuevo método consistente en un sistema de FRP pulverizado, que se logra mezclando vidrio picado y fibras de carbono con resina epoxi y viniléster al aire libre y pulverizando aleatoriamente la mezcla resultante sobre la superficie irregular de las columnas de hormigón [Lee K.S., B.Y. Lee, S.Y. Seo (2016)].



Figura 2.44 - Fibras de vidrio y de carbono cortadas utilizadas para los refuerzos [Lee K.S., B.Y. Lee, S.Y. Seo (2016)]

Se diseñaron cinco columnas sometidas a corte que se reforzaron con FRP pulverizado utilizando diferentes combinaciones de fibras cortas de carbono o vidrio y resinas epoxídicas o de vinilo. También se ensayó una columna de control no reforzada. Se llevaron a cabo pruebas de carga cíclica, y se investigaron la capacidad y la deformación de carga máxima, así como la histéresis en la relación de carga lateral-deriva. Los resultados mostraron que las resistencias al corte y las capacidades de deformación de las columnas reforzadas utilizando FRP pulverizado mejoraron notablemente, en comparación con las de la columna de control.



(a)



(b)

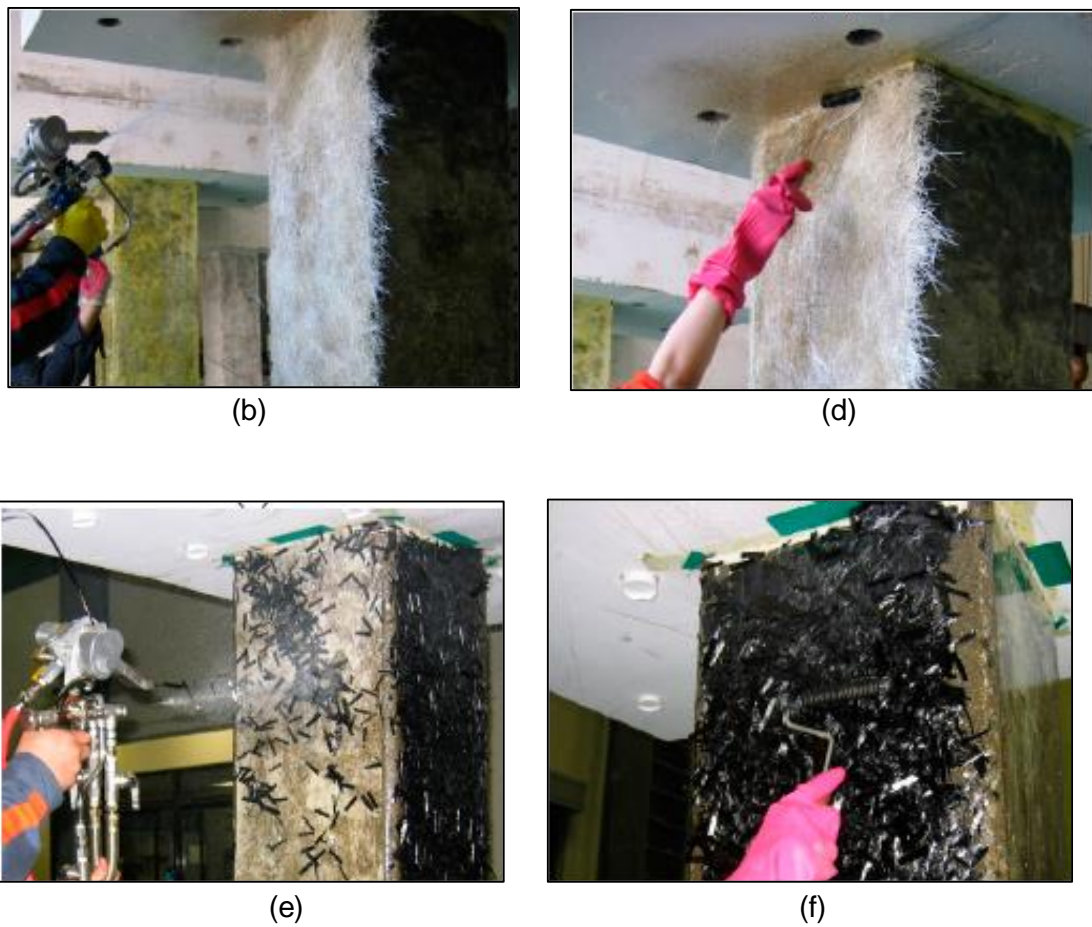


Figura 2.45 - Procedimiento de preparación de las muestras: (a) Armado de las columnas; (b) Columnas terminadas; (c) Reforzado de un espécimen usando FRP rociado con fibras de vidrio cortadas; (d) Tratamiento superficial; (e) Reforzado de un espécimen usando FRP rociado con fibras de carbono cortadas; (f) Tratamiento superficial [Lee K.S., B.Y. Lee, S.Y. Seo (2016)]

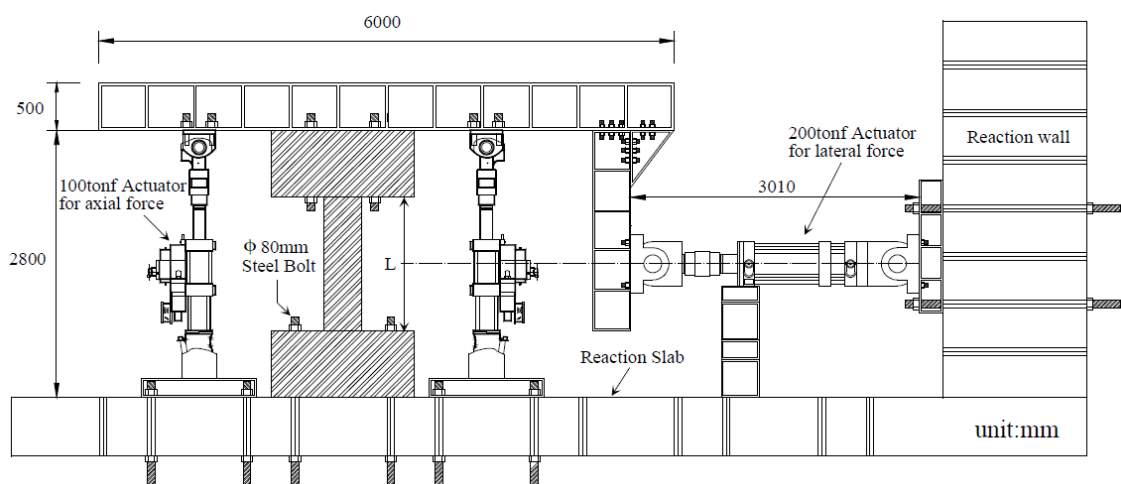


Figura 2.46 - Disposición del ensayo [Lee K.S., B.Y. Lee, S.Y. Seo (2016)]

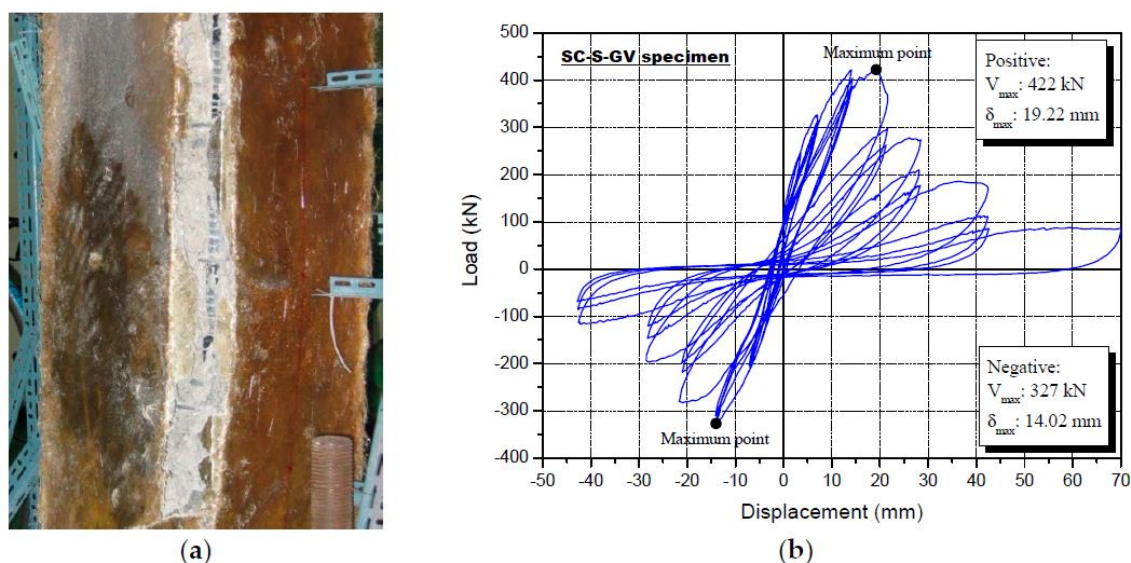


Figura 2.47 - (a) Modo de falla de una columna reforzada con fibra de vidrio y éster de vinilo (b) Relación carga-desplazamiento. [Lee K.S., B.Y. Lee, S.Y. Seo (2016)]

Se investigó también la posibilidad de utilizar las ecuaciones de diseño de refuerzo de láminas de FRP existentes para los cálculos de FRP proyectados, y se propuso una ecuación de diseño de fortalecimiento sísmico para el refuerzo FRP pulverizado.

Se encontró que el material óptimo era vidrio cortado de 38 mm y fibras de carbono mezcladas con resina en una proporción de 1: 2. El espesor de diseño óptimo fue del orden de 4,0 a 4,4 mm. La resistencia máxima al corte de los especímenes reforzados mostró incrementos promedios de 1,31 (31%) veces, mayor que la muestra de control.

Juan Carlos Vielma Pérez y otros realizaron un estudio experimental y numérico de un refuerzo pre-sísmico de uniones viga columna de hormigón armado con FRP no conformes con los reglamentos actuales. En efecto, la ocurrencia de terremotos fuertes recientes ha evidenciado la vulnerabilidad de las edificaciones en varios países de Latinoamérica. Esta vulnerabilidad se debe en gran medida a edificaciones que se construyen de manera informal, sin observar prescripciones normativas.

Para evaluar el comportamiento de las uniones viga-columna reforzadas con telas de fibras de carbono, se construyeron ocho especímenes con una geometría de "L" invertida, correspondientes a uniones exteriores de nivel de cubierta, una sin refuerzo y siete reforzadas. Además, se han realizado simulaciones numéricas aplicando modelos de fibra incorporando las características de los materiales que constituyen los especímenes.



Figura 2.48 - Esquema de pórtico de ensayo [Vielma Pérez J.C y otros (2014)]

Denominación	Descripción
SR	Junta viga-columna sin refuerzo FRP.
RC1	Junta viga-columna con refuerzo transversal-refuerzo a corte con una capa de FRP.
RF1	Junta viga-columna con refuerzo longitudinal-refuerzo a flexión con una capa de FRP.
RM1	Junta viga-columna con refuerzo mixto-refuerzo a corte-flexión con una capa de FRP.
RC2	Junta viga-columna con refuerzo transversal-refuerzo a corte con dos capas de FRP.
RF2	Junta viga-columna con refuerzo longitudinal - refuerzo a flexión con dos capas de FRP.
RM2	Junta viga-columna con refuerzo mixto-refuerzo a corte-flexión con dos capas de FRP.
RCE	Junta viga-columna con refuerzo transversal envuelta-refuerzo a corte con una capa de FRP.

Tabla 2.4 - Descripción de los especímenes [Vielma Pérez J.C y otros (2014)]

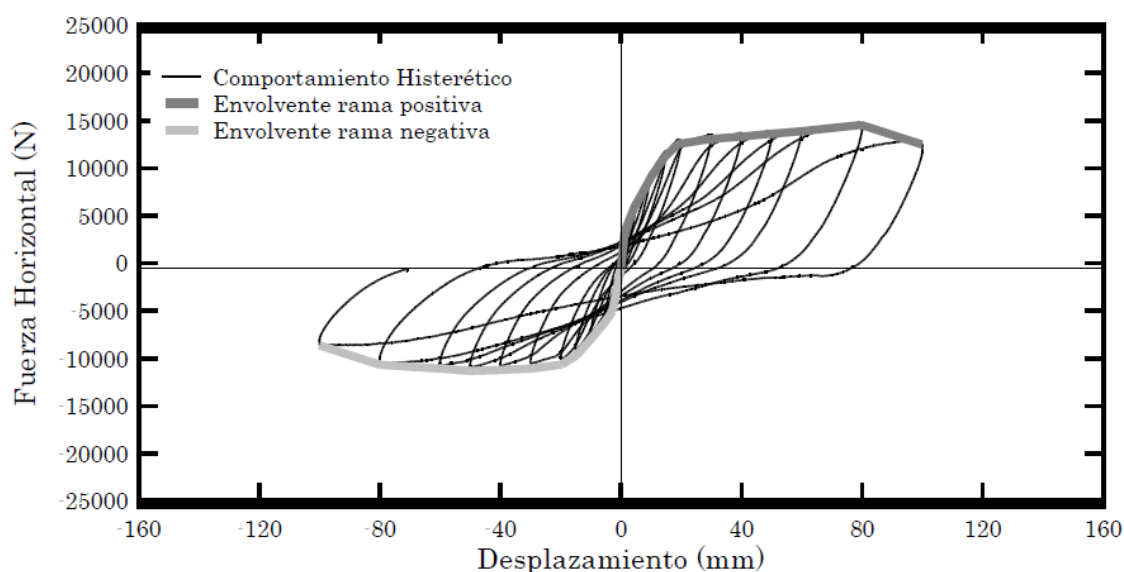


Figura 2.49 - Curva de histéresis y envolventes de un espécimen [Vielma Pérez J.C y otros (2014)]

Los resultados de los ensayos mostraron que, en líneas generales, el refuerzo con láminas aisladas de FRP no proporcionó mejoras a la respuesta sismo resistente de las juntas viga-columna con armadura de refuerzo precaria. Sólo se apreciaron mejorías cuando las láminas se colocaron de forma continua alrededor de caras ortogonales de los elementos concurrentes en las uniones.

Los valores de la ductilidad global de las uniones mostraron que su comportamiento cuando fueron reforzadas con láminas aisladas de FRP resultaron menores a los valores obtenidos en la unión sin refuerzo, excepto en el caso RCE.

Al comparar las curvas envolventes de cada uno de los especímenes en las ramas positiva y negativa se concluyó que el espécimen que logró mantener mayor capacidad de disipar energía fue el RM1. Sin embargo, no se pudo decir lo mismo en lo que respecta a la capacidad de deformación. Se observó también un aumento ligero de la rigidez en los especímenes RM1 y RF1.

Al comparar los resultados experimentales y numéricos, se notó un buen ajuste entre las curvas, sin embargo, las ramas negativas de las curvas obtenidas de forma numérica mostraron valores más elevados que sus contrapartes experimentales debido a que el modelo de fibras usado no logró reproducir adecuadamente el fenómeno de debonding. En líneas generales, los modelos numéricos tendieron a sobreestimar el aporte del FRP.

Los resultados numéricos obtenidos al aplicar acelerogramas sintéticos mostraron que el refuerzo con FRP no aportó rigidez significativa que permita la reducción de las derivas de entrepiso, por tanto, su aporte a la reducción de los niveles de daños alcanzados fue escasa [Vielma Pérez J.C, C.V. Pérez Moreno, H. Rodríguez, R.A. Picón Rodríguez (2014)].

## 2) Zonas de empalmes de columnas

Kumar Ghosh y Shamim Sheikh estudiaron empalmes de columnas de hormigón armado realizadas con solapes insuficientes e inadecuado refuerzo de confinamiento transversal en las posibles regiones de rótula plástica cerca de las uniones viga-columna, siguiendo las disposiciones de diseño anteriores a 1970. Estas recomendaciones se demostraron superadas por las nuevas consideraciones reglamentarias de carga sísmica. Los investigadores evaluaron la efectividad de envolturas realizadas con tejidos de fibra de carbono (CFRP) en la zona de empalme bajo la carga simulada de un terremoto. Se construyeron y probaron un total de 12 columnas, seis circulares de 356 mm (14 pulg.) de diámetro y seis cuadradas de 305 mm (12 pulg.) de lado. Las columnas tenían 1,47 m (58 in) de largo y un dado extremo de 510 x 760 x 810 mm (20 x 30 x 32 in) con una junta de construcción en la interfaz y barras longitudinales empalmadas en las columnas. Las variables estudiadas en este programa incluyeron el efecto de la presencia de empalmes solapados, la efectividad del CFRP en el fortalecimiento previo al terremoto y la reparación posterior al terremoto de columnas deficientes, así como los efectos del nivel de carga axial, la forma de la sección transversal de la columna y el acero transversal de refuerzo. Se encontró que la técnica de envoltura con telas de CFRP era efectiva para mejorar la resistencia sísmica de las columnas y daba como resultado curvas de histéresis más estables con menor rigidez y degradaciones de resistencia en comparación con las columnas no reforzadas [Ghosh K.K., S.A. Sheikh (2007)].

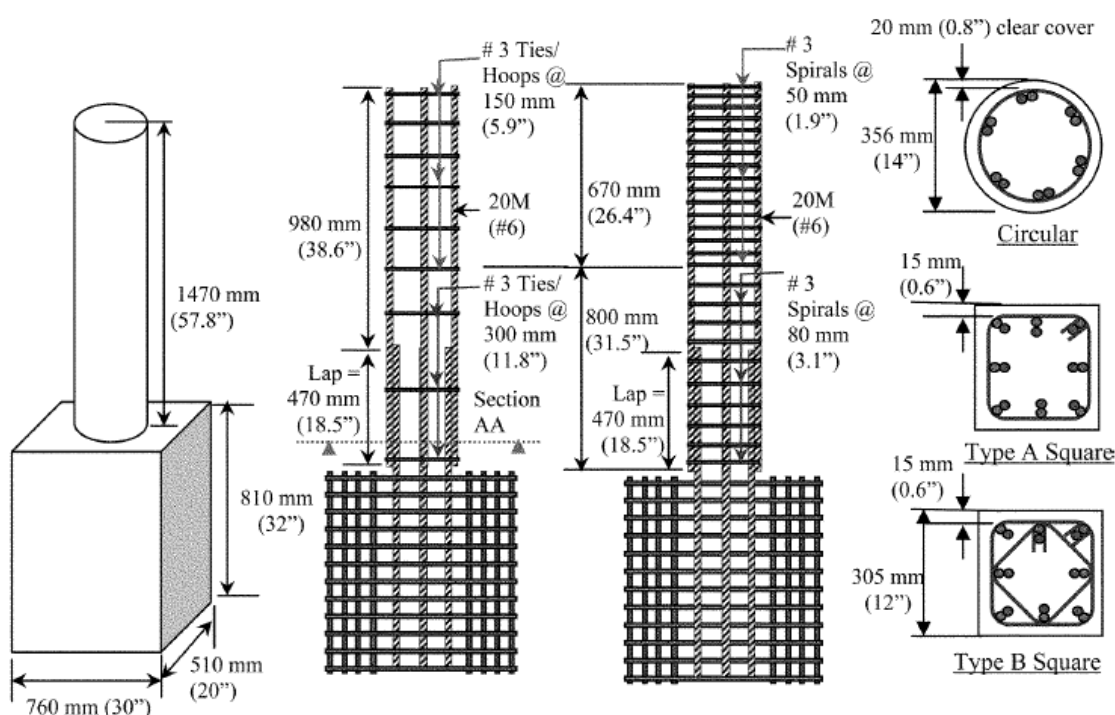


Figura 2.50 - Detalle de las probetas ensayadas [Ghosh K.K., S.A. Sheikh (2007)]

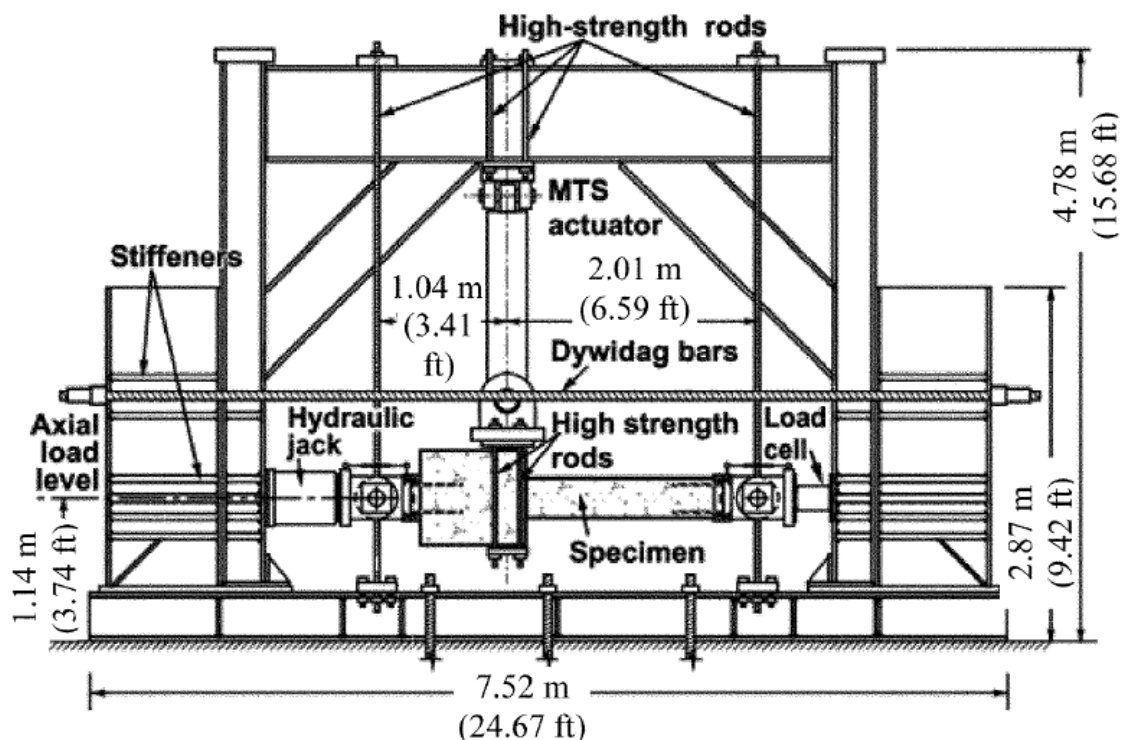


Figura 2.51 - Pórtico de ensayo [Ghosh K.K., S.A. Sheikh (2007)]

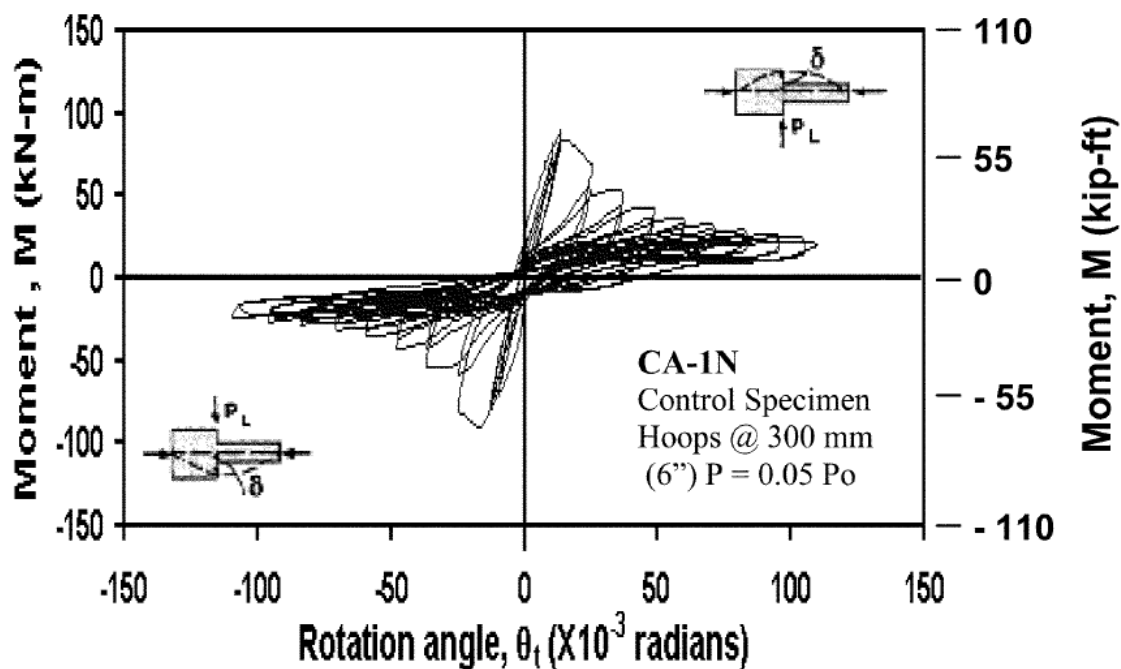


Figura 2.52 - Curva de histéresis [Ghosh K.K., S.A. Sheikh (2007)]

Se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Los empalmes solapados son insuficientes en la posible región de la rótula plástica de una columna conduce a una ductilidad significativamente reducida y un comportamiento histórico inestable con una rápida degradación de la resistencia debido a un fallo prematuro del empalme. El fortalecimiento de esta región con

envolturas de CFRP aumentó considerablemente su resistencia a la flexión, ductilidad y capacidad de disipación de energía, dando como resultado un comportamiento histerético más estable. El confinamiento externo proporcionado por las telas de CFRP puede compensar en gran medida los efectos adversos del confinamiento inadecuado y los detalles de empalme deficientes de las columnas;

- La reparación de columnas previamente dañadas con telas de CFRP dio como resultado mejoras en la resistencia y la ductilidad. El nivel de mejora, sin embargo, depende del daño experimentado por la columna antes de la intervención;
- El mayor contenido de acero transversal con un espaciado cercano o una distribución eficiente del acero proporcionó un mejor confinamiento del hormigón del núcleo y generó una presión de sujeción alrededor de las barras de refuerzo longitudinales empalmadas que retrasó el inicio del deterioro del hormigón, el inicio de la curvatura de la barra y el deslizamiento. Esto dio lugar a un rendimiento más dúctil de las columnas;
- Las mejoras de la ductilidad en las columnas cuadradas con envolturas de CFRP fueron significativamente más bajas que las de las columnas circulares debido a un mecanismo de confinamiento más eficiente en estas últimas.

José C. Álvarez y Sergio F. Breña estudiaron el comportamiento de columnas encamisadas con telas en la zona de empalme sometidas a esfuerzos sísmicos. En su informe presentan recomendaciones para reforzar columnas circulares y rectangulares. Las recomendaciones se basan en un estudio de las características de la respuesta histerética de las columnas encamisadas determinadas a través de pruebas de laboratorio. Las curvas se construyeron usando estos datos y determinando parámetros clave y las características multi-lineales de estas envolturas.



Figura 2.53 - Zona de empalme colapsada [Álvarez J.C., S.F. Breña (2017)]

La investigación presentada en este informe se puede utilizar para desarrollar curvas de la columna vertebral de columnas encamisadas que utilizan chaquetas de acero o FRP compatibles con ACI 369.1-11 y ASCE / SEI 41-13. Se espera que el estudio facilite futuras actualizaciones de estos documentos mediante incluyendo procedimientos de modelado no lineales para columnas encamisadas.

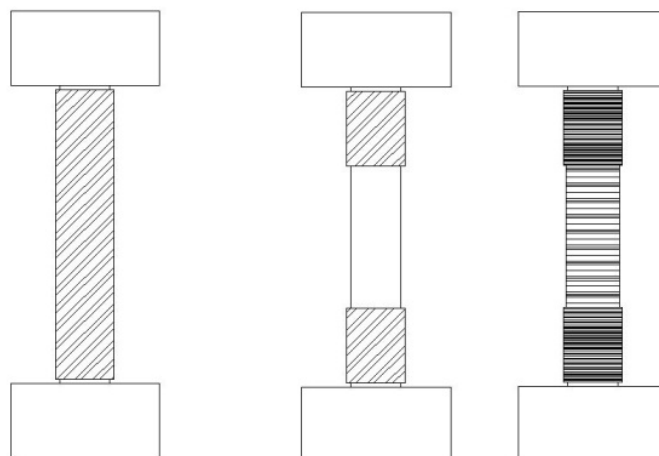


Figura 2.54 - Tipos de refuerzo estudiados [Álvarez J.C., S.F. Breña (2017)]

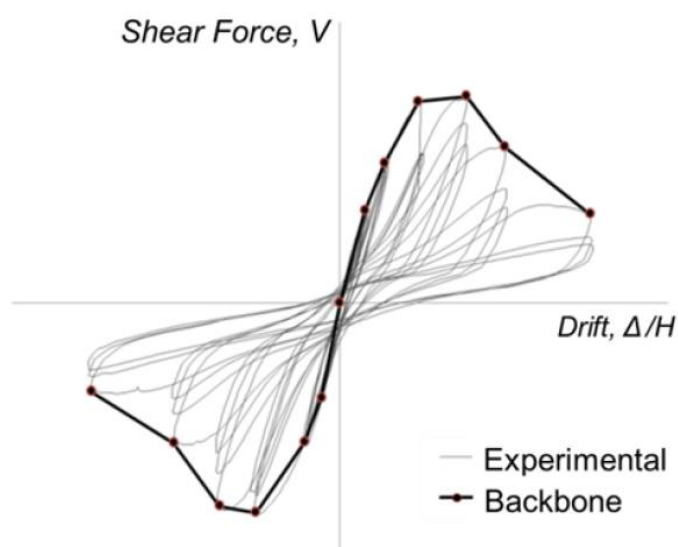


Figura 2.55 - Curvas de histéresis [Álvarez J.C., S.F. Breña (2017)]

El estudio reveló que el recubrimiento eliminó la potencial de falla de corte en la región encamisada y la sección estaría dominada por la flexión. La resistencia a la flexión de una columna encamisada se puede estimar utilizando un modelo de fibra que debe incluir el efecto de confinamiento de la cubierta sobre el concreto.

Usando este procedimiento, la resistencia de la columna encamisada (rendimiento y pico) se estimó en aproximadamente  $\pm 10\%$ .

### 3) Análisis global de estructuras

Es muy interesante el trabajo realizado por Julio Darío Páez Cornejo de la universidad ecuatoriana ULEAM en el que analizó las variaciones en el comportamiento estructural en estructuras reforzadas con FRP mediante la elaboración de 50 modelos computacionales con distintas características geométricas tales como: irregularidad en planta, irregularidad en elevación, vigas chatas, vigas placas con diferente número de pisos. Las estructuras fueron pre-dimensionadas con los reglamentos ecuatorianos y, una vez identificados los elementos de menor capacidad, los mismos fueron reforzados con FRP siguiendo la norma ACI 440 y las estructuras se analizaron nuevamente. Se compararon las estructuras con y sin refuerzo y se establecieron comparaciones entre los análisis eigenvectores, modal espectral y pushover estático. Se observa cómo el refuerzo de FRP hace disminuir los periodos de vibración, aumenta la frecuencia, disminuye los factores de participación modal y aumenta considerablemente la capacidad de la estructura permitiendo soportar mayores solicitaciones con un menor desplazamiento en el último piso.



















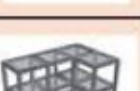





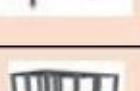
	1 NIVEL	2 NIVELES	3 NIVELES	4 NIVELES	5 NIVELES
CON VOLADOS					
REGULARES					
IRREGULAR EN ELEVACIÓN					
IRREGULAR EN PLANTA					
DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA					

Figura 2.56 - Estructuras analizadas [Páez Cornejo J.D. (2016)]

## 2.7. Sistemas de refuerzo MF-FRP (Mechanically Fastened FRP)

Los sistemas MF FRP (Mechanically Fastened FRP), como alternativa a la vinculación con resina, surgieron como una necesidad de rápida intervención. En efecto, la vinculación mecánica no requiere los tiempos de espera necesarios para la polimerización de la resina de adherencia. Son especialmente indicados para trabajos de urgencia o donde resulte muy difícil lograr las condiciones necesarias para un sistema resinoso como zonas de presencia permanente de humedad [Busnelli A. (2018)].

Estas láminas tienen un espesor un espesor y características mecánicas que permitan su fijación con bulones en los extremos del refuerzo como las mencionadas Safstrip de Strongwell. Reiteramos que la técnica de abulonado permite anclar el refuerzo al núcleo de la estructura garantizando la transmisión de esfuerzos más allá del recubrimiento.

Las condiciones del soporte suelen ser a veces una limitación para los sistemas adheridos, esta solución vinculando la lamina al nucleo del hormigón es indiferente a las condiciones del substrato.

La fijación mecánica es un complemento de la adhesión resinosa, recibiendo una denominación mixta MF-EB-FRP.

A continuación, diferentes sistemas de vinculación:

### a) Láminas pultruidas de fibra de carbono reforzadas

Como alternativa a los sistemas adhesivados (resinosos o cementicios), la firma Strongwell desarrolló una lámina pultruida de fibra de carbono de mayor espesor que las usadas para los sistemas adhesivados, apta para la fijación con medios mecánicos. Se comercializan con una sección de 4"x1/8" (102 mm x 3,2 mm) en rollos de hasta 30 m. Estas láminas están compuestas por estratos de fibras de carbono en medio de capas de fibras de vidrio. Ambos materiales están vinculados con resina viniléster resistente a la corrosión. Las fibras de carbono otorgan la resistencia principal a la lámina, mientras que las capas de fibra de vidrio incrementan su resistencia al aplastamiento producido por los anclajes mecánicos (*bearing*). Finalmente están cubiertas con una película que mejoran su resistencia a la corrosión y a la degradación por rayos UV.



Figura 2.57 - Láminas de fibra de carbono de alto espesor [Safstrip - Strongwell]

Numerosas investigaciones existen sobre la utilización de estas láminas vinculadas con sistemas de fijación como una alternativa a los sistemas resinosos. [Lamanna AJ, Bank LC, Scott DW. (2001)] [Lamanna A.J., L.C. Bank, D.T. Borowicz, D. Arora (2003)] [Lamanna AJ, Bank LC, Scott DW. (2004)] [Bank L., D. Arora (2007)] [Elsayed W. (2008)] [Ohelers D.J., M.S.Mohamed Ali, M.Haskett, M.C.Griffith (2008)] [Napoli A. (2009)] [Napoli A., F. Matta, E. Martinelli, A. Nanni, R. Realfonzo (2010)].[Martinelli E., A. Napoli, B. Nunziata, R. Realfonzo (2011)].[Martinelli E., A. Napoli, B. Nunziata, R. Realfonzo (2013)] [Martinelli E., A. Napoli, B. Nunziata, R. Realfonzo (2014)].



Figura 2.58 - Láminas Safstrip vinculadas mecánicamente [Lamanna A.J., L.C. Bank, D.T.Borowicz, D.Arora (2003)]



Figura 2.59 - Detalle del ojalamiento de láminas Safstrip vinculadas mecánicamente [Bank L., D. Arora (2007)]

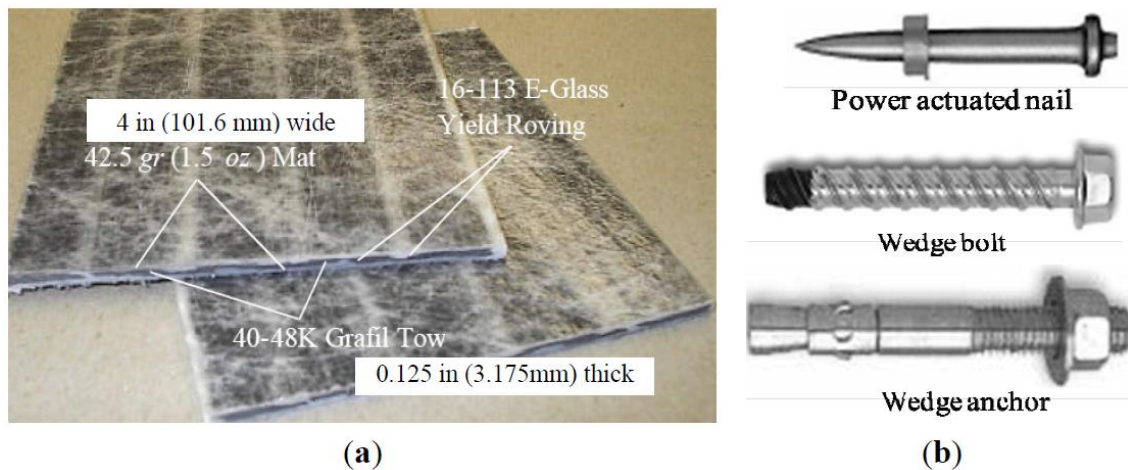


Figura 2.60 - (a) Detalle de láminas Safstrip b) Clavos y tornillos usados como conectores [Martinelli E., A. Napoli, B. Nunziata, R. Realfonzo (2014)]

b) Láminas híbridas fabricadas por el método de infusión de vacío

Alternativa desarrollada para aumentar el espesor de las láminas y otorgarle una mayor resistencia al aplastamiento de los pernos es la fabricación de láminas híbridas vidrio carbono como las utilizadas en los trabajos de Hannah Breton y Loring y Davids [Breton H. (2013)] [Loring H., W.G. Davids (2015)]. En estos trabajos se usaron láminas híbridas fabricadas por el método de infusión de vacío de 102 mm x 5,5 mm de espesor como alternativa a las láminas pultruídas Safstrip. [Busnelli A. (2018)].

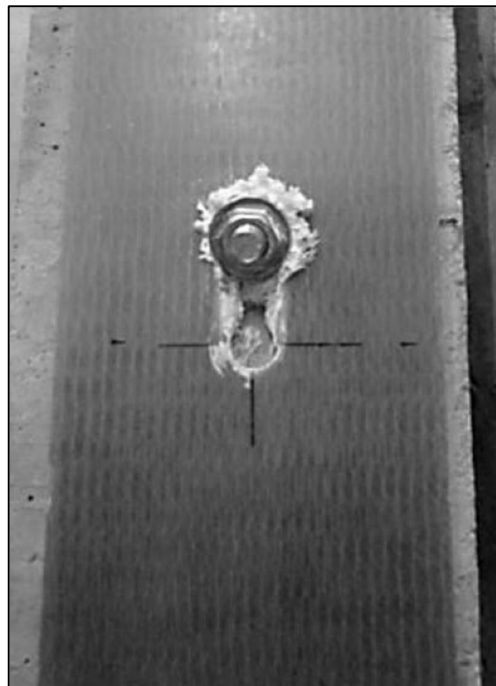


Figura 2.61 - Detalle del ojalamiento de láminas híbridas de fibras de vidrio y carbono [Breton H. (2013)]

c) Sistema Kimia

Sistema de anclaje desarrollado por la empresa Kimia S.p.A. de Perugia, denominado Kimitech FRP-LOCK, consistente en un ojal metálico de acero inoxidable insertado en un extremo multicapa para vincular con un perno seguido de una porción de fibras libres para impregnar in situ, de longitud suficiente para rehabilitar la continuidad estructural del refuerzo, ya sean láminas o telas de FRP. La longitud de la pieza es de 50 cm. [Busnelli A. (2018)].

El perno es de acero inoxidable y tiene 16 mm de diámetro. Se rosca en un vástago de 3 cm de diámetro y 15 cm de longitud que se inserta en el soporte.



Figura 2.62 - Ojal metálico KIMITECH FRP-LOCK [Kimia S.p.A.]



Figura 2.63 - Perno KIMITECH FRP-LOCK [Kimia S.p.A.]

d) Otros sistemas de anclaje mecánicos extremos

Yoshitake, Yumikura, Mimura, y Kim probaron varios sistemas de anclajes extremos para mejorar la prestación de láminas adheridas. Además de ensayar un sistema similar al de Kimia S.p.A., utilizaron una placa metálica anclada que presionaba los extremos de las planchuelas [Yoshitake I., K. Yumikura, Y. Mimura, y Y. Kim (2011)].

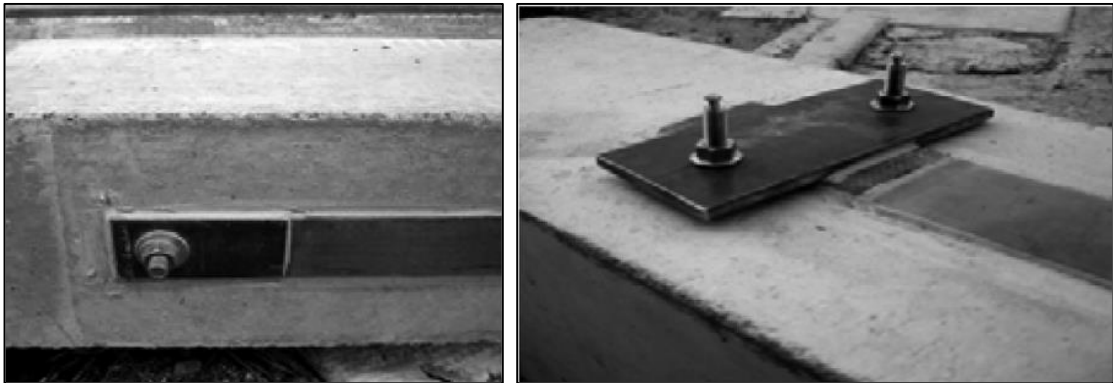


Figura 2.64 - Anclajes extremos abulonados [Yoshitake I., K. Yumikura, Y. Mimura, y Y. Kim (2011)]

La razón principal de estos sistemas de anclajes extremos es aumentar la resistencia a la delaminación de extremo.

Resulta muy novedoso el sistema estudiado por Tariq Aljaafreh y otros. Estos investigadores compararon dos sistemas de anclaje para telas de fibra de carbono, el tradicional U-wrap y un anclaje mecánico realizado por dos bulones extremos. Se verificó que la envoltura en U de CFRP resultó más efectiva que el anclaje mecánico para retrasar la falla de delaminación del refuerzo de flexión y aumentar su tensión de tracción. Sin embargo, el anclaje mecánico fue más efectivo para aumentar la rigidez elástica de las vigas [Aljaafreh T., E. Beneberu, N. Yazdani (2017)]. [Busnelli A. (2018)].



Figura 2.65 - Anclaje extremo abulonado en un refuerzo de telas de CFRP [Aljaafreh T., E. Beneberu, N. Yazdani (2017)]



Figura 2.66 - Otros sistemas de anclajes extremos abulonados

La norma ACI 440.2R-17 propone la utilización de diferentes sistemas de mejoramiento de anclaje extremo mediante conectores mecánicos o de fibra.

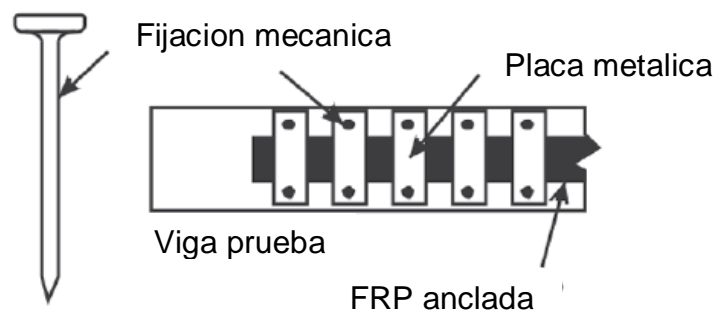


Figura 2.67 - Anclajes extremos mediante conectores mecánicos ACI 440.2R-17

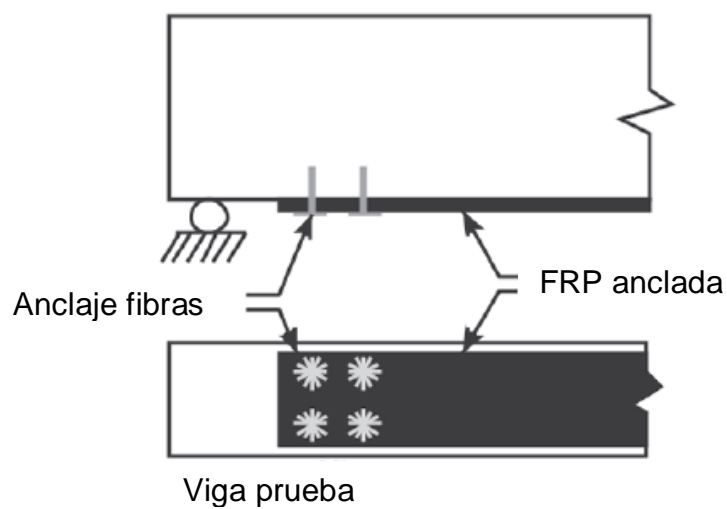


Figura 2.68 - Anclajes extremos mediante conectores de fibras ACI 440.2R-17

e) Láminas pretensadas

Estas láminas pultruídas admiten el pretensado mediante dispositivos específicos [Pellegrino C., C. Modena (2009)], [Pellegrino C., E. Bordignon, M. Muner, C. Modena (2007)]. En las fotos de la figura siguiente se observa una secuencia del procedimiento para pretensar laminas pultruídas de fibra de carbono. Si bien este sistema de refuerzo todavía no está incluido en los reglamentos, se prevé la introducción del pretensado en la norma CNR DT 200/2004 [Pellegrino C., C. Modena, G. Giacomini (2009)]

Los estudios sobre la relajación de tensiones de los FRP bajo efectos de pretensión determinaron que las fibras de carbono son las que mejor se comportan [Mehdizad Taleie S., A. Vatani Oskouei, H. Moghaddam (2007)]. [Busnelli A. (2018)].

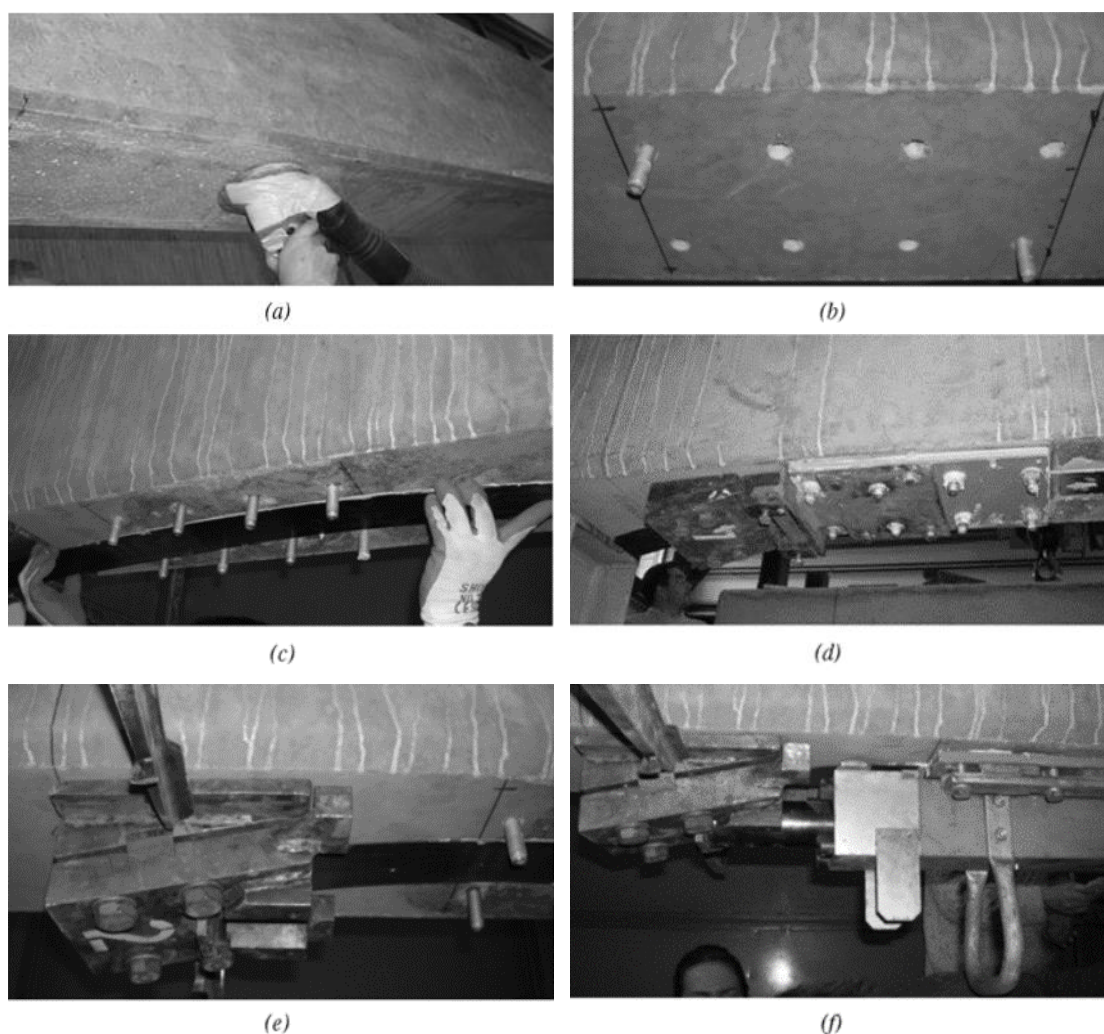


Figura 2.69 - Proceso de pretensado: a) preparación de la superficie del hormigón; (b) perforación del hormigón para colocar los pernos; (c) posicionamiento de la lámina de FRP; d) anclaje fijo unido por un elemento removible de acero a la placa durante el proceso de pretensado; (e) inserción de la lámina dentro del anclaje de acero móvil y extraíble; (f) gato hidráulico que empuja el anclaje de acero móvil contrastando con la placa de acero abulonada - [Pellegrino C., C. Modena (2009)]

También se debe destacar el sistema de pretensado por el método de anclaje gradual propuesto por Meier (2001) ya mencionado, que se basa en el principio de reducción de la fuerza de pretensado gradualmente desde el centro hacia los extremos de la viga [Meier U. (2001)] evitando los problemas de concentración de tensión en los extremos de la lámina producidos por los sistemas de pretensados convencionales. Se utiliza un dispositivo diseñado por I. Stoecklin y U. Meier que consiste en un aparato que arrolla la lámina y se ancla en los extremos de la viga permitiendo regular la fuerza de pretensado aplicada [Stöcklin, I., U. Meier (2003)]. Se puede ver la aplicación de este sistema en el trabajo realizado por M.R: Garcez y otros en el que se analizó la prestación de vigas reforzadas bajo cargas estáticas (2012).

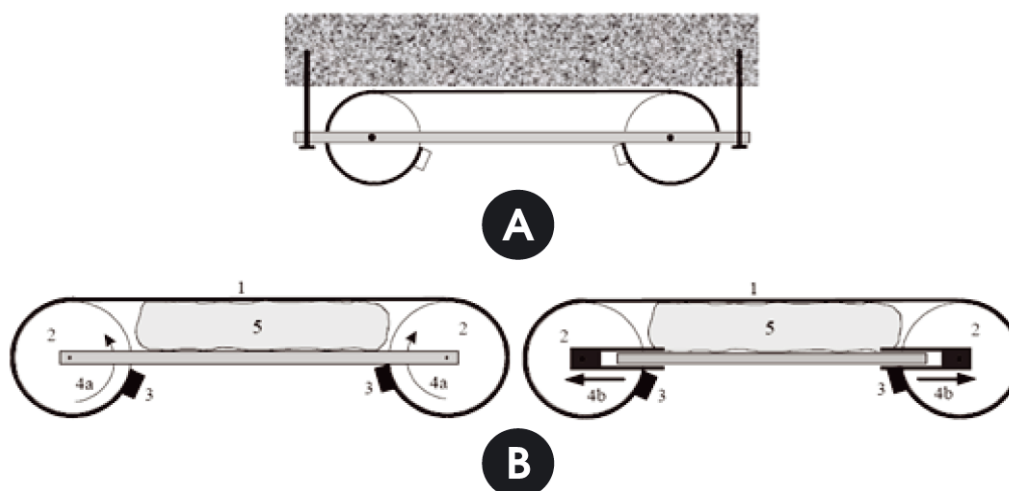


Figura 2.70 - Dispositivo de pretensado desarrollado por Stoecklin y Meier (A) - Colocación del dispositivo de pretensado debajo de la viga; (B) Dos maneras de pretensar una lámina de CFRP [Garcez M.R., G.L. Silva Filho, U. Meier (2012)]

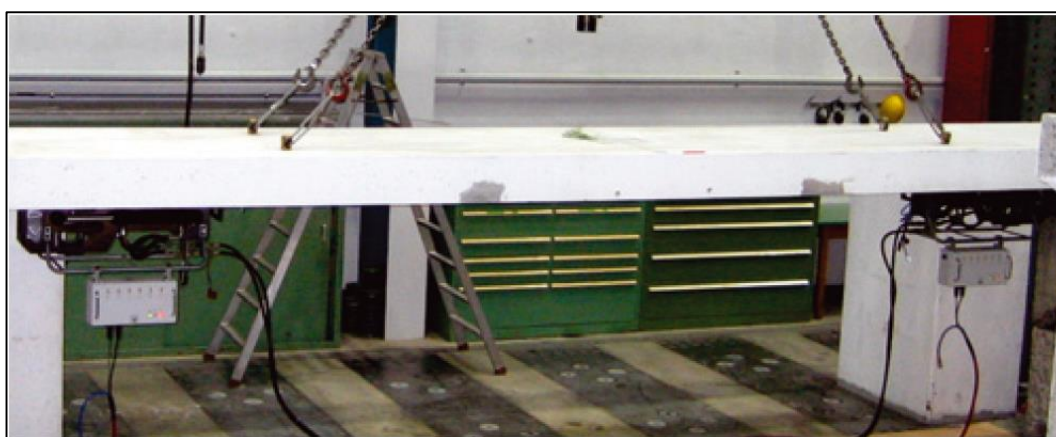


Figura 2.71 - Dispositivo de pretensado desarrollado por Stoecklin y Meier - montaje en una viga [Garcez M.R., G.L. Silva Filho, U. Meier (2012)]

## CAPÍTULO 3

### 3. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN EL REFUERZO A FLEXIÓN

#### 3.1. Láminas pultruídas de PRFV

Datos suministrados por el fabricante C.M.E. Argentina S.A.

Se utilizaron dos tipos de láminas pultruídas:

Diseño 1: láminas con diseño estándar, que fueron las mismas utilizadas en los trabajos preliminares

Diseño 2: láminas reforzadas para garantizar una mayor resistencia al ojalamiento.

La cantidad de fibras longitudinales es la misma para ambos productos. En las Tablas N° 3.1 y 3.2 se presentan las características geométricas y mecánicas de ambos tipos.

Tabla 3.1 - Composición de las láminas pultruídas estándar de PRFV

<b>Fibras</b>	
Tipo de fibra	vidrio E
<b>Distribución de fibras</b>	
Roving tejido 1 por 1 - 0/90	300 g/m <sup>2</sup>
Matt unifilo	300 g/m <sup>2</sup>
Fibras	120 mechas de 4400 tex 530 g en total
Matt capa 2	300 g/m <sup>2</sup>
Roving tejido	300 g/m <sup>2</sup>
vidrio longitudinal	68% en peso
vidrio transversal	6% en peso
<b>Resina</b>	
Tipo de resina	Vinil éster
Marca	BASF A430

Tabla 3.2 - Composición de las láminas pultruidas de PRFV reforzadas

<b>Fibras</b>	
Tipo de fibra	vidrio E
<b>Distribución de fibras</b>	
Matt multidireccional	300 g/m <sup>2</sup>
Combo	90 ° 300 g/m <sup>2</sup>
	0° 50 g/m <sup>2</sup>
Fibras	40 mechas de 4400 tex
	90° 150 g/m <sup>2</sup>
	0° 150 g/m <sup>2</sup>
	40 mechas de 4400 tex
Combo	90 ° 300 g/m <sup>2</sup>
	0° 50 g/m <sup>2</sup>
Matt capa 2	300 g/m <sup>2</sup>
<b>Resina</b>	
Tipo de resina	Vinil éster
Marca	BASF A430

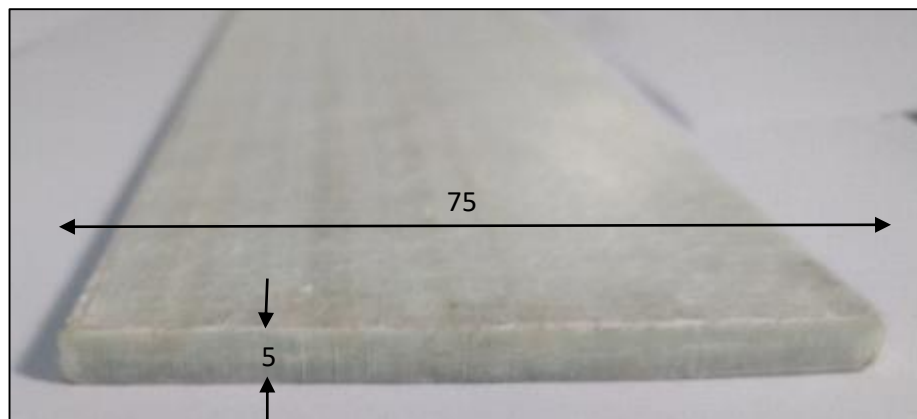


Figura 3.1 - Sección de las láminas pultruidas 75 x 5 mm

### 3.2. Hormigón

Para los ensayos se utilizaron saldos de probetas prismáticas de hormigón sin armar requeridas en control de calidad de pavimentos de dimensión original 15 x 15 x 60 cm que, luego de los ensayos, al partirse prácticamente al medio resultaban de 15 x 15 x aproximadamente 30 cm de longitud.

Para un primer grupo de probetas, el proveniente de los ensayos de rotura por flexión, se contaba con los resultados obtenidos de los informes emitidos por el Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras IMAE, preservando la confidencialidad de los clientes que les dieron origen el anexo.

De cada uno de estos ensayos se disponía el valor de resistencia a flexión que se puede correlacionar con la resistencia a la compresión según la fórmula indicada en el reglamento CIRSOC 201 (2005):

$$f_r = 0.625 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (3-1)$$

Por lo tanto, la resistencia a compresión  $f'_c$  se puede obtener como:

$$f'_c = (f_r / 0.625)^2 \quad (3-2)$$

Tabla 3.3 - Resultados de ensayos de tracción por flexión.

	Resistencia a tracción (MPa)								
VALORES	6,55	4,75	3,58	4,88	4,66	6,17	4,18	4,46	5,45
	4,54	4,62	4,67	4,36	4,07	6,61	4,87	4,51	5,39
	4,96	3,54	5,31	5,28	3,85	6,32	3,62	4,81	4,97
	5,38	6,57	3,78	3,21	3,67	6,13	4,59	4,87	5,18
	6,83	4,34	4,55	3,64	6,48	6,64	4,19	3,91	6,22
	6,50	4,35	4,25	3,53	6,28	6,37	4,90	3,82	6,14
	5,63	4,75	6,42	4,95	7,19	7,19	4,84	4,31	
	6,14	4,62	6,24	3,82	6,45	6,47	5,08	4,63	
	6,06	3,54	5,42	3,99	6,34	6,30	4,74	4,74	
	5,68	6,63	5,93	3,67	5,13	4,91	4,91	4,55	
	5,35	4,34	4,00	3,77	6,95	6,55	4,47	4,45	
	5,54	4,35	4,21	4,12	6,72	6,43	4,48	4,23	
	6,63	4,38	4,61	4,20	5,06	6,51	4,72	4,24	
	3,87	4,64	4,47	4,14	6,63	4,46	4,44	3,88	
	4,04	3,86	4,97	3,79	6,51	4,53	5,87	3,95	
	3,72	4,18	5,56	5,41	6,43	4,47	6,68	3,84	
	7,16	4,58	5,50	3,87	6,01	4,29	4,72	3,91	
7,06	3,99	5,24	3,23	6,89	3,31	4,44	5,64		
7,09	4,49	3,96	5,33	6,54	4,35	4,76	5,78		
Prom	5,03								
Desv, Estand	1,05								
Caract. 5%	3,30								

La resistencia a la compresión característica resulta:  $f'_c = (3.3/0.625)^2 = 27.88$  MPa

De otro segundo grupo de probetas prismáticas los valores de resistencia a compresión se obtuvieron de probetas cilíndricas moldeadas para control, verificando valores de resistencia a compresión del orden de los obtenidos indirectamente a través de los valores de tracción por flexión.

Tabla 3.4 - Resultados de ensayos de compresión simple.

	Resistencia a compresión (MPa)				
VALORES	33,35	38,07	30,08	33,07	31,08
	35,06	38,43	34,91	37,24	25,17
	24,86	37,9	37,82	37,1	27,91
	38,32	41,7	22,23	32,71	36,34
	38,26	40,46	25,33	37,15	25,7
	39,23	21,56	28,19	37,46	22,34
	37,76	36,95	22,34	33,55	28,61
	34,68	27,14	30,74	41,15	25,72
	33,44	27,14	31,1	40,21	37,79
	40,95	27,33	29,7	40,95	
	24,72	30,63	21,81	40,48	
	36,88	31,47	36,16	30,72	
Prom	32,79				
Desv,Estan	5,95				
Caract. 5%	22,84				

En este caso, la resistencia a la compresión característica resulta:  $f'_c = 22.84$  MPa

Se puede ver que en ambos casos los resultados confirman que se tratan de hormigones de una calidad igual o superior a la encontrada en la mayoría de las estructuras construidas.

### 3.3. Acero

Las barras de acero de armaduras utilizadas fueron todas de calidad ADN420 (Tensión de fluencia 420 MPa).

### 3.4. Resina

Para el pegado de las láminas al hormigón se empleó la resina epoxi bicomponente Concrevisive 227 de la empresa BASF Argentina S.A.



Figura 3-2 - Adhesivo epoxi. Bicomponente Concrecive 227 - BASF Argentina S.A.

Tabla 3.5 - Datos técnicos Concrecive 227

Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	1,73 a 1,79
Espesor recomendado de aplicación (mm)	1 a 2
Pot life a 20°C (min) (*)	50 a 90
Endurecimiento completo a 20°C (días) (s/MasterEmaco ADH 227)	7
Resistencia a la compresión ASTM C109/109M (MPa) (7d)	>85
Adhesión al hormigón NBR 14050 (MPa) (24hs)	>3
Adhesión al acero NBR 14050 (MPa) (14d)	14
Temperatura de aplicación (°C) (s/MasterEmaco ADH 227)	10 a 35

### 3.5. Varillas roscadas

Se utilizaron varillas roscadas de acero SAE 1045 de diámetro Ø 3/8" y Ø 7/16" de 10 cm de longitud con tuercas y arandelas afines.

Estas varillas permitieron lograr una profundidad de anclaje de 8 cm anclándose en el núcleo resistente de las vigas.

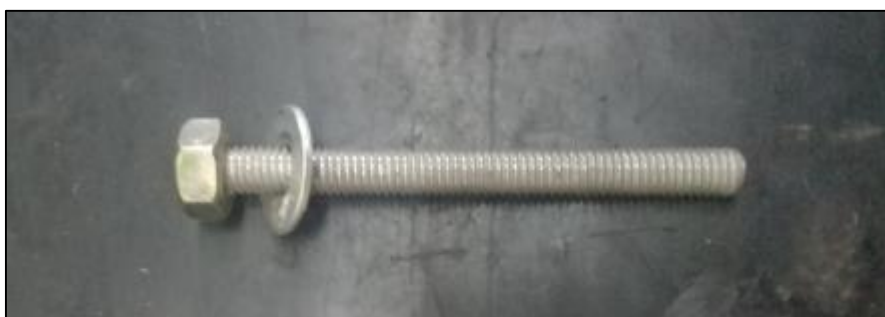


Figura 3.3 - Varilla roscada SAE 1045

## CAPÍTULO 4

### 4. ENSAYOS PRELIMINARES

#### 4.1. Ensayos estáticos de vigas de hormigón armado reforzadas con láminas de PRFV adheridas y abulonadas

Como ya se mencionó, este trabajo surge como una continuación de la tesis realizada por Alberto Busnelli [Busnelli A. (2018)]. Se presenta un resumen de los ensayos realizados, los resultados obtenidos y las conclusiones principales.

##### 4.1.1. Materiales utilizados

- Láminas pultruidas de fibra de vidrio E, matriz resina viniléster (CME Argentina)
- Resina epoxi estructural Resin 70 Phoenix con su correspondiente imprimación
- Varillas roscadas SAE 1010, diámetro  $\varnothing$  10 mm
- Hormigón H25 (CIRSOC 201)
- Acero ADN420 (CIRSOC 201)

##### 4.1.2. Ensayos de las vigas

Cada una de las doce vigas de 300 cm, se apoyaron en un rodillo fijo y un rodillo móvil separados 280 cm. Se sometieron a un par de fuerzas aplicadas en simultáneo mediante un sistema de gatos hidráulicos, ubicadas en forma equidistante al eje central, 70 cm a cada lado, esto es, a los cuartos de la luz.

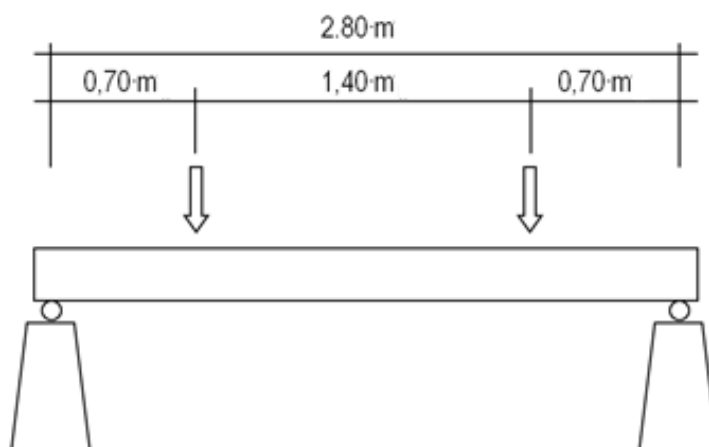


Figura 4.1 - Disposición de los gatos hidráulicos.

Los ensayos consistieron en someter la viga a distintos escalones de carga, desde 500 kg hasta 2500 kg, y descarga hasta 500 kg, luego se reanuda la carga hasta la rotura. Se observó siempre un “acomodamiento” de las cargas, luego de la descarga a 500 kg siempre se verificó una flecha residual. Para cada viga se obtuvo en primer lugar el valor de dicha carga de rotura.

Posteriormente se obtuvo la carga para la cual se mantenía un valor estable sin incrementar deformaciones. La determinación de ese valor se realizó manipulando la carga de los gatos mientras se observaba el movimiento de la aguja del indicador. O sea que fue un proceso iterativo. Se midió la flecha en el centro de la viga con una cinta métrica.

Finalmente, luego de mantener unos minutos la carga estable, se aumentó la carga hasta provocar el colapso de la viga. Se midió entonces la máxima flecha verificada luego de la rotura final de cada viga para cuantificar el desplazamiento límite.

#### 4.1.3. Resultados de los ensayos

##### a) Vigas tipo 1 (armadura de acero: dos barras de 12 mm)

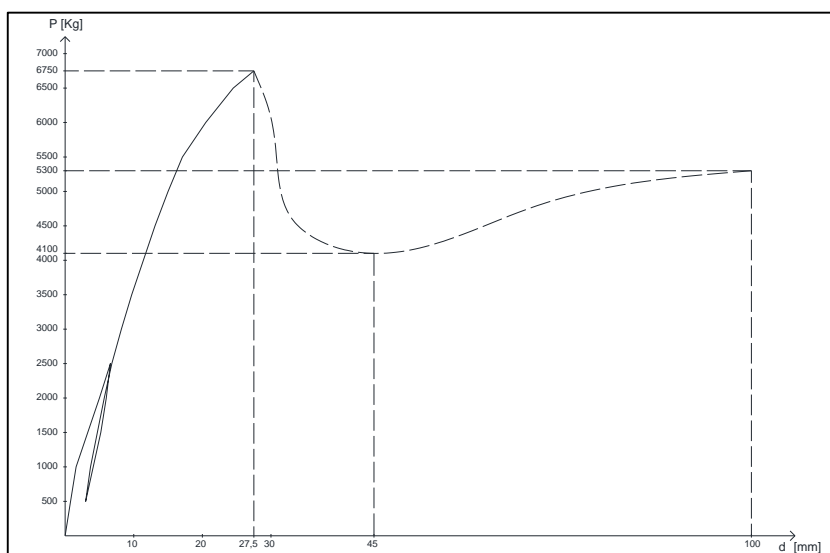


Figura 4.2 - Diagrama carga-flecha de la V5 (2db12).



Figura 4.3 - Detalle zona de rotura V5 (2db12).



Figura 4.4 - Liger ojalamiento de los pernos de la V5 (2db12).

b) Vigas tipo 2 (armadura de acero: dos barras de 10 mm)

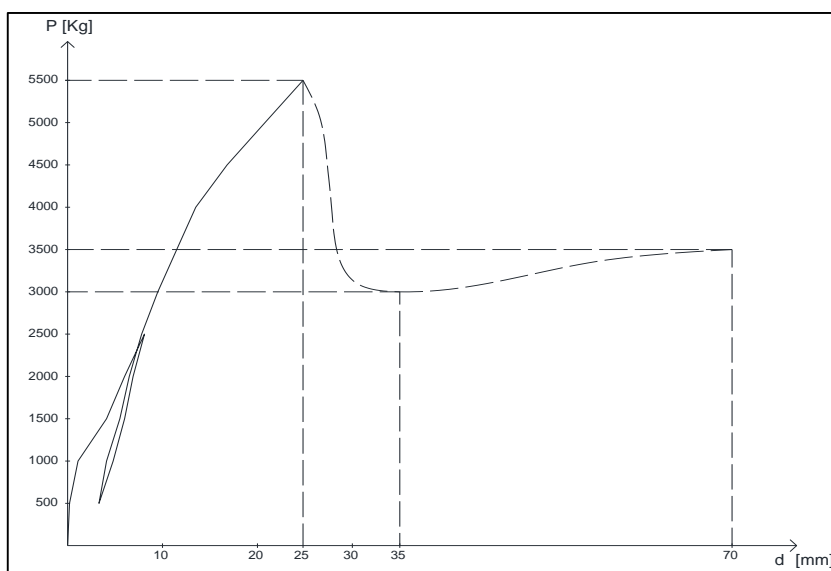


Figura 4.5 - Diagrama carga-flecha de la V3 (2db10).



Figura 4-6 - Rotura V2 (2db10).



Figura 4.7 - Ojalamiento de los pernos de la V2 (2db10).

c) Vigas tipo 3 (armadura de acero: dos barras de 8 mm)

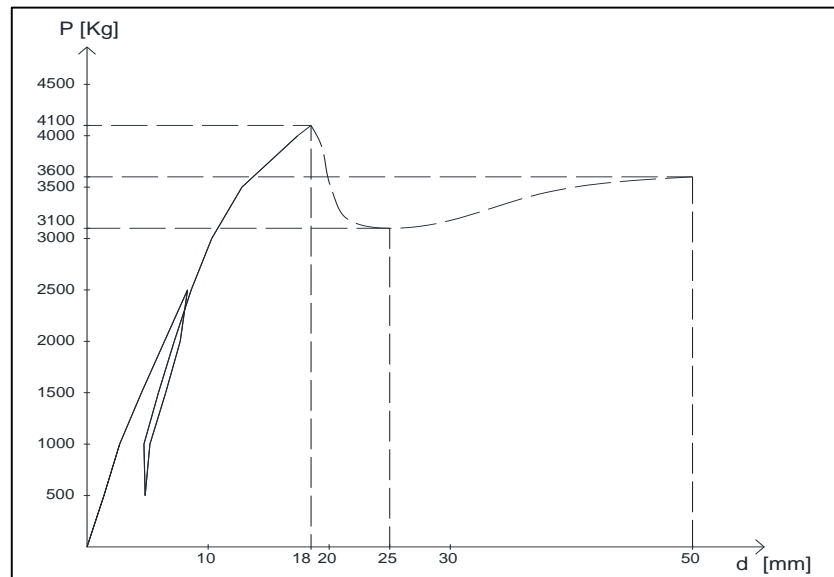


Figura 4.8 - Diagrama carga-flecha y tabla de valores de la V9 (2db8).



Figura 4.9 - Detalle rotura de apoyo V11 (2db8).



Figura 4.10 - Detalle desprendimiento de recubrimiento en V11 (2db8).

#### 4.1.4. Análisis de resultados

En la Tabla N° 4.1 se resumen los resultados de los ensayos y se indican sus valores promedio, su desviación estándar y el valor característico 5 %.

Tabla 4.1 - Resumen de resultados

Tipo 1 - 2Ø12				Tipo 2 - 2Ø10				Tipo 3 - 2Ø8			
	Carga máxima (kN)	Carga residual (kN)	Carga rotura (kN)		Carga máxima (kN)	Carga residual (kN)	Carga rotura (kN)		Carga máxima (kN)	Carga residual (kN)	Carga rotura (kN)
Ensayos	66,2	40,2	51,9	Ensayos	51,7	27,0	42,1	Ensayos	40,2	30,4	35,3
	64,2	41,7	53,9		53,9	31,4	44,1		40,7	23,5	34,3
	63,7	44,1	54,9		53,9	29,4	34,3		40,2	26,5	40,2
	68,6	49,0	52,9		58,6	34,3	41,7		41,2	34,3	42,3
Pprom.	65,7	43,7	53,4	Pprom.	54,5	30,5	40,5	Pprom.	40,5	28,7	38,0
s	2,2	3,9	1,3	s	2,1	3,8	5,3	s	0,5	4,7	3,9
Pc5%	60,4	34,6	50,4	Pc5%	49,5	21,5	28,2	Pc5%	39,4	17,6	28,9

En la Tabla N° 4.2 se resumen los resultados de los ensayos realizados sobre las vigas V1 a V12 y su comparación con valores teóricos y de ensayos anteriores.

Tabla 4.2 - Resumen de resultados obtenidos de las vigas.

VIGAS	Carga máxima en cada gato (kN)									
	Sin refuerzo		Con refuerzo sin abulonar		Con refuerzo abulonado					
	Prom. 1	Mayor valor 2	Prom. 3	P teórica ACI 440 4	Carga máxima		Carga residual		Carga rotura final	
				Prom. 5	Pc 5% 6	Prom. 7	Pc 5% 8	Prom. 9	Pc 5% 10	
1	40,08	44,49	54,78	49,29	65,66	60,42	43,73	34,63	53,41	50,43
2	33,81	34,50	40,67	41,29	54,54	49,54	30,50	21,54	40,55	28,16
3	sin datos	sin datos	sin datos	32,58	40,55	39,44	28,67	17,62	38,02	28,95

Para cada grupo de vigas se presentan los valores de carga en cada gato obtenidos en los diferentes ensayos realizados.

En las columnas 1 y 2 se indican los valores mayores y promedios obtenidos en los ensayos de vigas sin refuerzo. No se dispone de datos de vigas armadas con 2 barras de 8 mm. Estos datos se obtuvieron en la segunda serie de ensayos preliminares.

En la columna 3 se indican los valores promedio obtenidos en los ensayos de vigas reforzadas con láminas adheridas sin abulonar y fueron obtenidos también en la segunda serie de ensayos.

En la columna 4 se colocaron los valores de carga de diseño teóricos para laminas simplemente adheridas obtenidos mediante la utilización de la norma ACI 440-2R-17 para los tres tipos de armaduras. Se puede observar que son valores similares a los de la columna 3. Estas cargas teóricas se utilizan en los siguientes párrafos como un valor de referencia para comparar las cargas experimentales.

Finalmente, en las seis últimas columnas, se indican los resultados obtenidos en la última serie de ensayos. Se presentan los valores promedio y característico para las cargas máxima, residual y de rotura final indicados en el punto anterior.

#### 4.1.5. Conclusiones - Ensayos estáticos

Con estos ensayos se pretendía comprobar la efectividad del sistema de refuerzo estructural y su viabilidad económica para promover su utilización masiva. Para su difusión y explotación comercial será necesario un mayor desarrollo experimental para comprobar, entre otras cosas, distintas geometrías de refuerzo, otros sistemas de abulonado. Se debe ampliar el rango de vigas reforzadas realizando un número de mediciones que permita proponer valores confiables para brindar al usuario los datos técnicos necesarios para su dimensionamiento.

Es necesario, además, determinar las características mecánicas de los sistemas de anclajes mediante ensayos que permitan suministrar a los usuarios los datos técnicos necesarios para su dimensionamiento y especificación. Este es uno de los objetivos del presente trabajo.

##### a) Economía del sistema de refuerzo

El análisis económico demostró que el sistema de refuerzo con láminas pultruidas de fibra de vidrio resulta sensiblemente más económico que las intervenciones con láminas de fibra de carbono. En efecto, su costo resultó solo un 16 % (comparativa hecha en año 2016) del obtenido para aplicaciones similares en elementos de carbono.

Este era uno de los objetivos buscados para difundir la aplicación de estos elementos, principalmente en el mercado local ya que los productos utilizados son de fabricación nacional.

##### b) Incremento del momento de rotura

Los resultados obtenidos permitieron demostrar la eficacia de este tipo de refuerzo para incrementar el momento de rotura de las vigas. El abulonado mejoró el anclaje de los extremos de las láminas y controló los esfuerzos de peeling, permitiendo el desarrollo de mayores tensiones en la lámina pultruída.

Los incrementos de los valores de carga característicos (5%) respecto a los valores teóricos calculados mediante la aplicación de la norma ACI 440-R17 para refuerzos solamente adheridos fueron de 23% para las vigas V1 (2db12), 20% para las vigas V2 (2db10) y 21% para las vigas V3 (2db8).

Se puede concluir entonces como un criterio de corrección que el sistema abulonado permite incrementar aproximadamente un 20 % el valor de carga teórico.

##### c) Capacidad resistente residual

Una de las conclusiones más interesantes que se deduce de esta investigación es la importante capacidad portante residual que demostraron las vigas luego de producirse la rotura de la vinculación adhesiva.

El abulonado constituye una vinculación adicional que, como se dijo, contribuye a incrementar la capacidad resistente y, una vez que se produce la rotura del puente resinoso, comienza desarrollar una especie de mecanismo atirantado sostenido en sus extremos.

Este fenómeno le brinda al elemento flexionado una mayor ductilidad y la posibilidad de disipar energía hacia otros elementos de la estructura evitando su colapso. Este hecho hace recomendable la aplicación de este sistema en estructuras sometidas a cargas dinámicas

destructivas como las acciones sísmicas o los fuertes vientos. Es de hacer notar que en este trabajo se realizaron solamente ensayos con cargas monotónicas crecientes, por lo tanto, para comprobar su efectividad en este tipo de aplicaciones, es necesario el estudio del comportamiento del sistema bajo cargas dinámicas que constituye uno de los objetivos de este trabajo.

Si se consideran los valores característicos (5%) de las cargas residuales que mantuvieron un valor estable luego de alcanzar la carga de rotura que despegó el refuerzo, se pudo observar que fueron como mínimo del orden del 50 % de la carga teórica determinada por la norma ACI 440-R17 para refuerzos solamente adheridos (70 % para las vigas tipo 1, 52 % para las vigas tipo 2 y 54 % para las vigas tipo 3).

Si, en cambio, se analizan los valores característicos (5%) obtenidos para la carga de rotura final alcanzada al recargar las vigas hasta su agotamiento, pudiendo estimar que se llegó a un valor del orden de la carga de diseño teórica para láminas simplemente adheridas (102 % para las vigas tipo 1, 68 % para las vigas tipo 2 y 89% para las vigas tipo 3). O sea que el sistema abulonado le permitió a la estructura soportar, luego del despegado del refuerzo, una carga similar para la que fue diseñada.

#### d) Incremento de la energía de deformación

Otra conclusión muy significativa que se obtuvo al estudiar este sistema de refuerzo de láminas abulonadas fueron los importantes incrementos de energía de deformación que se obtuvieron en todas las vigas ensayadas.

Se obtuvieron mayores incrementos de energía para las vigas más armadas. La explicación de este fenómeno puede deducirse por los distintos mecanismos de rotura que presentaron los tres tipos de vigas.

#### e) Fijación al núcleo resistente

El abulonado posibilita la fijación del refuerzo al núcleo resistente de los elementos flexionados, no dependiendo de la calidad del recubrimiento de hormigón. Esta es una de las debilidades más cuestionadas a los sistemas tradicionales de refuerzos con materiales compuestos simplemente adheridos.

En efecto, casi todas las investigaciones sobre materiales compuestos se realizaron en laboratorio, experimentando con especímenes nuevos donde los recubrimientos se encontraban en perfecto estado. Los modelos de cálculo no pueden contemplar las variaciones del estado de los materiales de soporte que afectan las resistencias a la tracción y al corte de los mismos condicionando el resultado de la intervención.

Muchas veces los recubrimientos presentan vicios ocultos que no se pueden detectar a simple vista tales como micro lesiones, debilitamientos por agresiones externas, fenómenos de carbonatación, etc. En muchos casos, la limpieza y preparación de la superficie no son suficientes para garantizar la adecuada adhesión del refuerzo.

El correcto estudio del estado de los materiales con que están construidas las estructuras a reforzar puede llegar a ser muy extenso y costoso, si pensamos en técnicas de ultrasonido, termo detección, análisis químicos, etc.

En general, en las estructuras de hormigón armado, los problemas de deterioro se limitan a las zonas superficiales mientras que el núcleo de los elementos conserva sus propiedades mecánicas prácticamente inalteradas.

Por lo tanto, si bien este sistema de fijación mediante anclajes profundos requiere de tareas adicionales que incrementan ligeramente el costo y el tiempo de la intervención, las ventajas que se obtienen son muy importantes tanto en lo referido al incremento de la capacidad de carga, a la posibilidad de disponer de un mecanismo resistente residual y al notable aumento de la energía de deformación disponible para situaciones extremas.

#### f) Carga máxima y vinculación de las láminas pultruídas

La carga máxima se alcanzó casi siempre por el despegado de las láminas sin observarse daños en las mismas. En efecto, las láminas pultruídas se ojalaron en sus extremos, pero permanecieron intactas en el resto de su longitud. Se puede deducir por lo tanto que, si se mejora el anclaje de la lámina, por ejemplo, mediante una vinculación con mayor cantidad de pernos distribuidos a lo largo de la viga, se podría obtener una capacidad de carga mayor y se incrementaría la ductilidad del elemento reforzado.

Es de suponer que al verse incrementada la adherencia lámina-hormigón por la mayor fricción resultante de la presión continua que ejercerían los bulones, se lograría aumentar aún más la carga máxima del sistema

Esta forma de vinculación es una combinación entre las técnicas de adhesión de láminas (EB-FRP Externally Bonded FRP) y fijación mecánica (MF-FRP Mechanically Fastened FRP) como el que se obtiene utilizando la lámina pultruída Safstrip de la firma Strongwell.

Es de hacer notar que, en el caso que se logre un incremento de capacidad de carga flexional muy importante mejorando la vinculación de las láminas, es probable que el elemento falle por otros mecanismos como el corte o la rotura de la cabeza comprimida por lo que se tienen que estudiar todos los fenómenos involucrados.

#### g) Control de las tensiones de peeling

Las tensiones de tracción transversal en extremos (peeling) son mayores cuanto más rígidas sean las láminas de refuerzo. Dichas tensiones se generan por la resistencia que ofrecen las láminas para acompañar la curvatura del elemento flexionado.

En las láminas pultruídas el peeling se presenta como un problema a resolver. Los refuerzos extremos con telas en forma de U no son suficientes para controlar las tensiones transversales y se tiene que recurrir a otros dispositivos.

En efecto, el peeling era uno de los problemas a resolver cuando se decidió el uso de las láminas de fibra de vidrio de C.M.E. Argentina S.A. de 5 mm de espesor. En la segunda serie de ensayos [Busnelli A.P., R.E. López, M. del Río (2014)] se comprobó la insuficiencia de los refuerzos de tela en forma de U y se comenzó a pensar en el abulonado como sistema de vinculación en los extremos.

Los ensayos de las vigas demostraron que el abulonado con varillas roscadas se comportó como un sistema muy eficiente para controlar el peeling.

## 4.2. Ensayos de fatiga en vigas de hormigón armado reforzadas con láminas de PRFV adheridas y abulonadas

Se realizaron ensayos preliminares de fatiga sobre vigas similares a las utilizadas en el proyecto de Alberto Busnelli [A. Busnelli (2018)]. Estos ensayos fueron incluidos en dos proyectos finales de alumnos de la FCEIA [Marrone L., E. Muruchi, M. Perno (2018)] [Carni, M., F. D'Angelo (2018)].

Estos ensayos fueron los primeros que se realizaron con una central hidráulica Bosch con actuadores Bosch de 25 t y doble efecto. Según la rigidez del elemento estructural a ensayar la hidráulica nos permite manejar frecuencias del orden de 2 a 5 Hz (siempre y cuando se esté alejado de las frecuencias naturales de resonancia del conjunto máquina-probeta), resultando por esto ensayos de muy largo tiempo, 4 a 5 días por muestra, si las probetas no fallan antes.

Los extensos tiempos de disponibilidad de equipo requeridos, los costos asociados con ello sumados a pérdidas parciales de algunas muestras por fallas en la operación del ensayo hicieron que la fatiga de estos refuerzos no fuera un capítulo en la investigación de este trabajo. Sin embargo, se considera importante incluir la experiencia adquirida ya que los resultados obtenidos permiten inferir el comportamiento en fatiga de las vigas reforzadas.

### 4.2.1. Preparación de vigas

En esta etapa se elaboraron 12 vigas de 3 m de longitud y sección 0,14 m x 0,30 m con iguales perchas (2db6) y estribos (1db6 c/12,5 cm) pero con diferentes armaduras principales como se muestra en la Tabla N°4.3.

Tabla 4.3 - Armaduras para vigas.

Viga	Armadura flexión
V1	2 db 8
V2	2 db 8
V3	2 db 10
V4	2 db 10
V5	2 db 12
V6	2 db 12
V7	2 db 8
V8	2 db 8
V9	2 db 10
V10	2 db 10
V11	2 db 12
V12	2 db 12

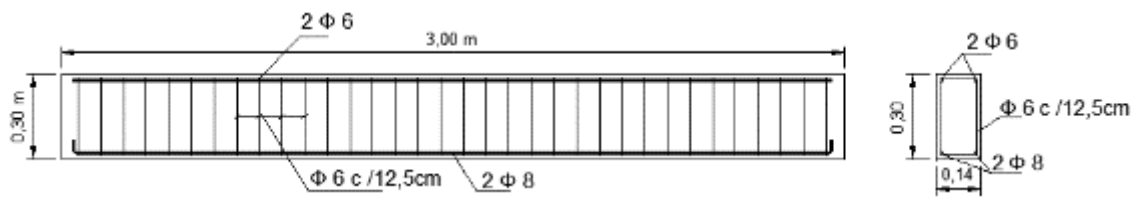


Figura 4.11 - Esquema de armaduras.

Para el hormigonado de las vigas se optó por comprar hormigón elaborado de una planta de la ciudad. La calidad especificada fue H-25 CIRSOC 201-2005, Equivalente a la clase H-21 de la versión anterior.



Figura 4.12 - Preparación de las vigas.



Figura 4.13 - Vista del área de hormigonado.

Una vez hormigonadas las vigas se procedió a cubrirlas con film para preservar la humedad y temperatura en el fraguado.

Transcurridos 28 días, se procedió al pegado de las láminas de PRFV. Previamente se generó una rugosidad en la superficie con un disco de alambre para lograr una mejor adherencia.

Luego de pegar las láminas y dejar transcurrir el tiempo de catalización, se procedió con la colocación de los pernos de anclajes. Primero se realizaron las perforaciones mediante un taladro. Seguidamente se limpiaron los agujeros y se rellenaron con la misma resina utilizada para el pegado de las láminas. Finalmente, una vez endurecida la resina, se procedió al ajuste de los pernos con una llave dinamométrica con un torque de 50 Nm para cada tuerca.

#### 4.2.2. Ensayos

Los ensayos a fatiga de las vigas consistieron en la aplicación de una carga cíclica mediante un gato hidráulico que, a través una percha, dividía su efecto en dos cargas en los cuartos de la luz.

Las vigas fueron apoyadas sobre dos dados de hormigón que, previamente se fijaron a la losa de apoyo para evitar cualquier desplazamiento. Los apoyos móviles se materializaron mediante una planchuela metálica curva y un cilindro de acero, para que la viga pudiera desplazarse libremente en el sentido longitudinal.

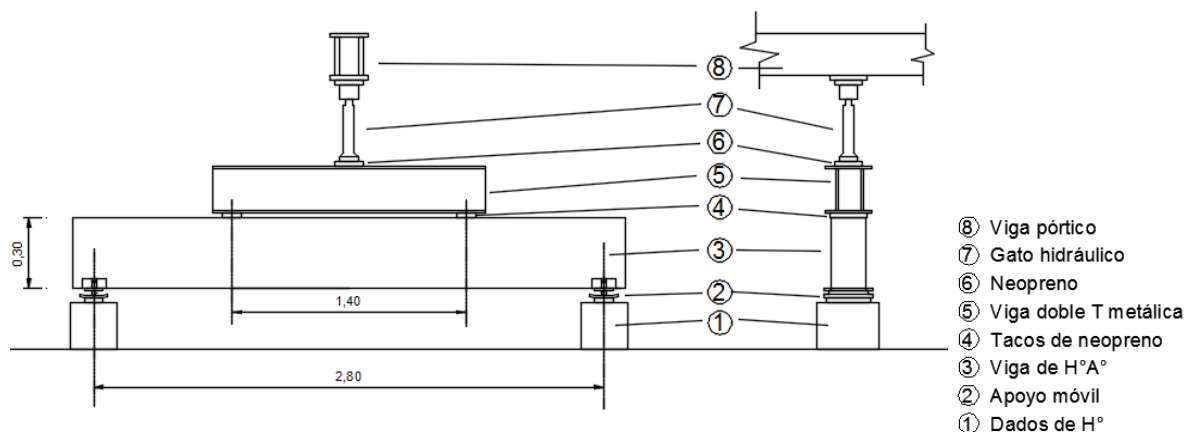


Figura 4.14 - Esquema de ensayo.

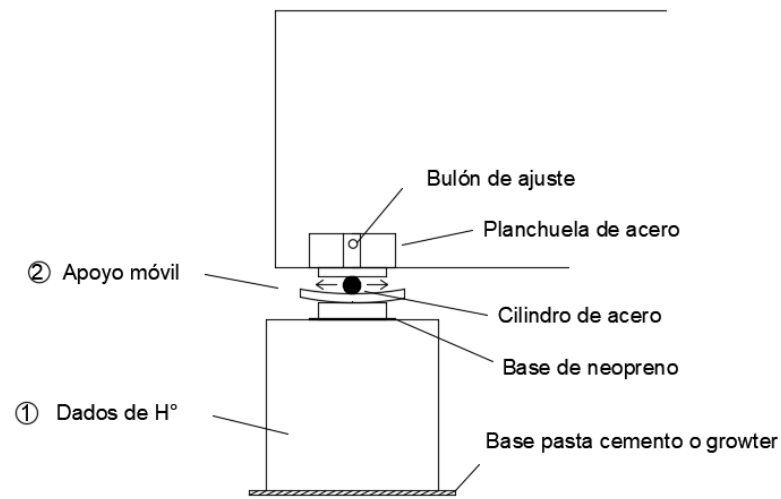


Figura 4.15 - Detalle Apoyo.



Figura 4.16 - Materialización del apoyo móvil.

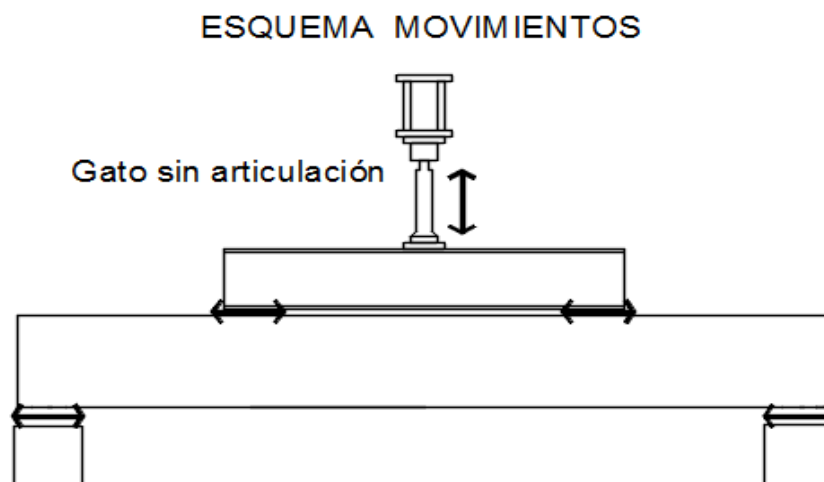


Figura 4.17 - Esquema de movimientos.



Figura 4.18 - Montaje de viga para ensayo a fatiga.

Para la determinación del valor de carga cíclica a aplicar, se tuvo en cuenta lo siguiente:

- la relación entre la carga de rotura estática y de rotura a más de 2000000 de ciclos en barras de acero obtenidas en ensayos realizados en el IMAE, es del orden del 40 %.;
- el umbral de rango de tensiones especificado por el Reglamento CIRSOC 301 (2005) es de  $F_{TH} = 165$  MPa, que para aceros F24 ( $F_y=240$  MPa) constituye el 70 % del valor de fluencia;
- Esteves J.L. y otros realizaron ensayos sobre pequeñas vigas (sección 10 cm x 20 cm y 2,5 m de luz) reforzadas con láminas de CFRP aplicando carga sinusoidal del 70 % de la carga estática máxima de la viga, dando como resultado  $6 \times 10^5$  ciclos [Esteves J.L., P. Vieira, A.T. Marques (2001)]

Considerando estos antecedentes, para estos ensayos se adoptó una carga cíclica de valor máximo igual al 50 % de la carga de rotura de los ensayos estáticos. La frecuencia de la pulsación adoptada fue de 3.0 Hz.

#### 4.2.3. Resultados de los ensayos a fatiga de las vigas

##### a) Viga 0 - 2db12 sin refuerzo:

Se realizó un ensayo preliminar que tenía como objetivo poner a punto la máquina de reciente adquisición para los ensayos posteriores. Se ensayó una viga de hormigón con idéntica geometría que se había elaborado para otro ensayo que tenía una armadura pasiva de tracción de 2db12. Esta viga no tenía aplicado el refuerzo de GFRP. La carga de rotura obtenida en los ensayos estáticos para este tipo de viga era de aproximadamente 40 kN en cada punto de apoyo, o sea 80 kN totales aplicados en el punto central.

Este ensayo se realizó en tres días consecutivos, ya que no se podía dejar la máquina funcionando fuera de los horarios con presencia de personal, por razones de seguridad y porque además se quería estar presente en el momento en que se produjera algún evento de importancia. El primer día se comenzó aplicando una carga en el gato del 50% de la carga de

rotura, o sea  $0.5 \times 80 \text{ kN} = 40 \text{ kN}$ . Como valor mínimo se adoptó  $5 \text{ kN}$  y la frecuencia inicial fue de  $2 \text{ Hz}$ . El segundo día se aumentó la frecuencia a  $3 \text{ Hz}$  y el tercer día se aumentó la carga máxima a  $50 \text{ kN}$ , manteniendo la carga mínima en  $5 \text{ kN}$ .



Figura 4.19 - Puesta a punto de la máquina de ensayo con viga sin refuerzo.

Tabla 4 4 - Resultados del ensayo de la viga 0 sin refuerzo.

Día	Hr Inicio	Hr Fin	Duración [min]	Hz	Fmín kN	Fmáx kN
1	11:30	13:20	110	2	5	40
2	09:21	11:40	139	3	5	40
3	07:57	13:00	303	3	5	50

La viga sin refuerzo ensayada a fatiga llegó a 92760 ciclos de carga sin presentar deterioros visibles. Se decidió entonces adoptar esos valores de porcentajes de cargas de rotura para las cargas pulsantes de los ensayos posteriores.

b) Viga 1 - 2db8 con refuerzo



Figura 4.20 - Ensayo a fatiga V1.

Para el ensayo a fatiga de la Viga 1 con armadura pasiva 2db8 se tuvo presente que la carga de rotura promedio en el ensayo estático fue de 40,5 kN en cada punto, o sea 81 kN en el punto central (Tabla 4-1). Por una coincidencia, la carga de rotura resultó similar al de la viga sin refuerzo que tenía una armadura pasiva mayor 2db12, se adoptó entonces un valor de carga pulsante igual al ensayo anterior, de 5 kN a 40 kN con una frecuencia de 3 Hz.

Al igual que en el caso del ensayo preliminar, se aplicaron ciclos de carga en varios días durante los horarios de trabajo, deteniendo la máquina y retomando la carga al día siguiente. Los primeros cuatro días transcurrieron sin inconvenientes. Aproximadamente a los 100.000 ciclos se comenzaron a formar unas pequeñas fisuras de corte en los apoyos.

Lamentablemente, al iniciar el ensayo el quinto día, se produjo una sobrecarga imprevista que hizo desprender el refuerzo, pero sin cortar los pernos. Se decidió continuar con el ensayo para verificar cuantos ciclos podían soportar los pernos a la fatiga, se cortaron luego de 18.000 ciclos.

Tabla 4.5 - Resultados del ensayo de la viga 1.

Día	Hr Inicio	Hr Fin	Duración [min]	Ciclos
1	07:55	10:40	165	29700
2	13:00	14:00	60	10800
3	07:09	11:56	287	48060
4	10:05	13:05	180	32400
Por sobrecarga imprevista falla corte adhesivo Se continua con los pernos actuando				
5	08:50	10:30	100	18000
<b>TOTAL CICLOS</b>				<b>138960</b>

En la Figura N° 4.21 se observan las fisuras diagonales que se formaron en la viga 1 frente a los ciclos de carga.



Figura 4.21 - Fisuras de la viga debido a la flexión, debajo de la carga aplicada V1.

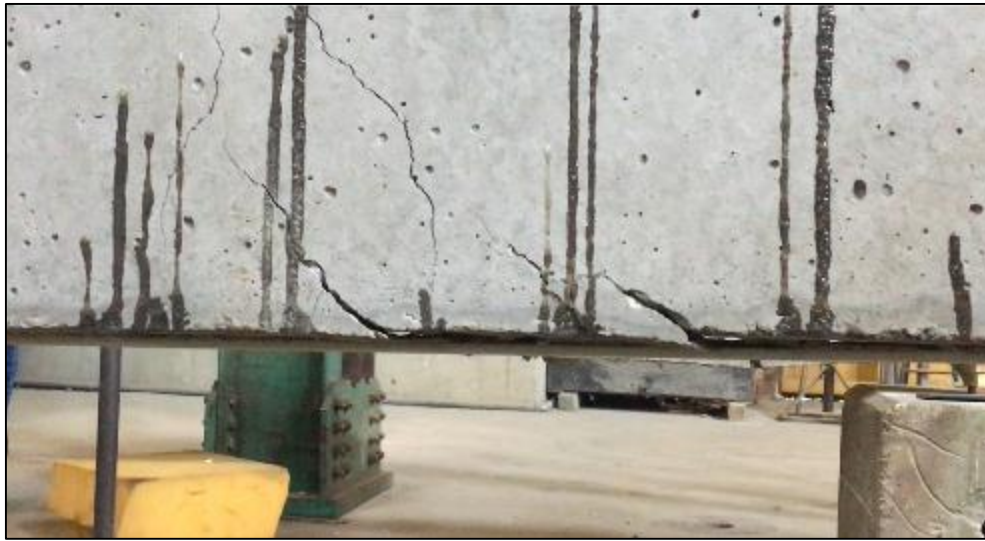


Figura 4.22 - Desprendimientos parciales de la lámina V1.

En la Figura 4.24 se observa como la lámina ya totalmente desprendida del hormigón quedó sujeta únicamente en los extremos por medio de bulones. Los bulones se cortaron por fatiga, como se observa en la Figura 4.25.



Figura 4.23 - Lámina desprendida en la viga V1.3



Figura 4.24 - Desprendimiento completo de la lámina y corte de los bulones en un extremo de la viga V1.



Figura 4.25 - Corte de los bulones V1.

c) Viga 2 - 2db8 con refuerzo

La Viga 2 tenía la misma armadura pasiva 2db8 de la viga anterior, por lo tanto, se adoptó el mismo valor de carga pulsante de 5 kN a 40 kN con una frecuencia de 3 Hz.

Los dos primeros días se aplicaron ciclos de carga durante los horarios de trabajo, pero a partir del tercer día se probó programar la máquina para que trabaje en continuación. El ensayo se interrumpió el viernes a las 19.00 para no dejar trabajando la máquina el fin de semana. Desafortunadamente, al igual que en el ensayo anterior, al iniciar el ensayo el lunes siguiente se produjo una sobrecarga accidental que desprendió el refuerzo completamente cortando los bulones. Se había llegado casi al millón de ciclos sin que se apreciaran más que unas pocas fisuras en el hormigón y manteniéndose prácticamente intacto el refuerzo.



Figura 4.26 - Ensayo a fatiga V2.

Tabla 4.6 - Resultados del ensayo de la viga 2.

Día	Hr Inicio	Hr Fin	Duración [min]	Ciclos
1	12:05	14:15	130	23400
2	07:25	09:42	137	24660
3	07:33	00:00	987	177660
4	00:00	24.00	1440	259020
5	00:00	24.00	1440	259020
6	00:00	19.00	1140	205200
<b>TOTAL CICLOS</b>				<b>948960</b>

d) Viga 3 - 2db10 con refuerzo

Para el ensayo a fatiga de la Viga 3 con armadura pasiva 2db10 se tuvo presente que la carga de rotura promedio en el ensayo estático fue de 54,5 kN en cada punto, o sea 109 kN en el punto central (Tabla 4-1). Se adoptó entonces un valor de carga pulsante igual al ensayo anterior, de 5 kN a 55 kN con una frecuencia de 3 Hz.

Las sobrecargas imprevistas en los ensayos anteriores habían sido motivo de consultas sobre el funcionamiento de la máquina al proveedor del equipo que sugirió el inmediato envío del equipo, todavía en garantía, para evitar deterioros mayores. Esta decisión hizo que se tuviera que interrumpir el ensayo cuando se había llegado casi a 650.000 ciclos sin presentar deterioros ni en el hormigón ni en el refuerzo.

Tabla 4.7 - Resultados del ensayo de la viga 3.

Día	Hr Inicio	Hr Fin	Duración [min]	Ciclos
1	13:53	00:00	607	109260
2	00:00	24:00	1440	259020
3	00:00	24:00	1440	259020
4	08:58	10:53	115	21110
<b>TOTAL CICLOS</b>				<b>648410</b>



Figura 4.27 - Vista inferior de la viga V3.

#### 4.2.4. Conclusiones Ensayos de fatiga

A pesar de la poca y accidentada experiencia en la búsqueda de conocer la respuesta de este tipo de refuerzo ante cargas cíclicas punzantes se puede destacar:

- Los ensayos fueron pocos, pero con buena respuesta, ya que la cantidad de ciclos alcanzados, antes de los accidentes, fue mayor a lo esperado habiendo iniciado con valores del 50% de los valores de rotura estática.
- A pesar de ser el sistema completo, hormigón-resina-lamina pultruida un sistema heterogéneo y la lámina misma un sistema heterogéneo de fibra de vidrio y resina, no mostro debilidades en alguna de las interfaces, puntos de inicio de falla en ensayos de fatiga.
- Cualquier plan de ensayo dinámico con alto número de ciclos insume con sistemas hidráulicos no menos de 5 días por espécimen, sumado a esto la elaboración las probetas de escala real muestran que el camino iniciado en este trabajo de seguir así será largo, quizás **se deba** trabajar en desarrollar un dispositivo que emule los fenómenos estudiados a menor costo de tiempo, en principio.

# CAPÍTULO 5

## 5. ENSAYOS ESTÁTICOS DE RESISTENCIA DEL SISTEMA LÁMINA-HORMIGÓN

### 5.1. Valores estadísticos

Para la evaluación de los parámetros medidos en los ensayos se utilizaron las siguientes fórmulas estadísticas:

$$P_{prom} = \frac{\sum P}{n} \quad (5-1)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (P - P_{prom})^2}{n - 1}} \quad (5-2)$$

$$P_{c5\%} = P_{prom} - t \times s \quad (5-3)$$

Donde el parámetro t de student se obtiene de la Tabla N° 5.1 considerando el valor para n-1 muestras.

Tabla 5.1 - Tabla t-Student para valores de  $n \leq 10$  para obtener los valores característicos de los fractiles 5% y 10 %

n	t student	
	5%	10%
1	6,3137	3,0777
2	2,9200	1,8856
3	2,3534	1,6377
4	2,1318	1,5332
5	2,0150	1,4759
6	1,9432	1,4398
7	1,8946	1,4149
8	1,8595	1,3968
9	1,8331	1,383
10	1,8125	1,3722

Se considera como criterio para ensayos con menos de cuatro muestras presentar sólo el valor promedio.

## 5.2. Ensayos de tracción centrada

El objetivo de estos ensayos fue determinar la capacidad de carga estática de la vinculación entre láminas y hormigón considerando los distintos sistemas de anclajes analizados: EB-FRP, MF-FRP, EB-MF-FRP, pero se ensayaron sólo probetas con láminas pegadas (EB-FRP) ya que la ejecución de los especímenes resultó muy laboriosa y, además, los resultados arrojados no resultaron confiables. Por tal motivo se interrumpió la confección de este tipo de probetas y se decidió optar por otro método de prueba de tracción excéntrica que resultó ser muy ágil y económico y que se describe en el punto siguiente. De todos modos, se estima conveniente detallar los trabajos realizados en esta primera serie como muestra del itinerario recorrido en la investigación.

En esta primera serie, en base a investigaciones precedentes [Diab H., Z. Wu, K. Iwashita (2007)], se confeccionaron probetas de hormigón armado con una barra de acero centrada que podía ser tomada por las mordazas de la máquina de ensayos de tracción.

El conjunto estaba compuesto por dos bloques de hormigón vinculados con dos láminas pultruidas de PRFV pegadas en caras opuestas con la resina epoxi.

### 5.2.1. Preparación de probetas

Las probetas consistían en dos bloques de hormigón armado de 10 x 10 cm de sección y una longitud de 15 cm cada uno que se hormigonaban juntos con un separador central de poliestireno expandido vinculados ambos a través de una barra de acero ADN420 diámetro 16 mm dispuesta en su eje. Una vez endurecida la mezcla, se procedía a retirar el poliestireno expandido y se pegaban las láminas. Finalmente se procedía a cortar la barra garantizando en esta secuencia el centrado de la carga.

A continuación, se describe el proceso de fabricación de las probetas.

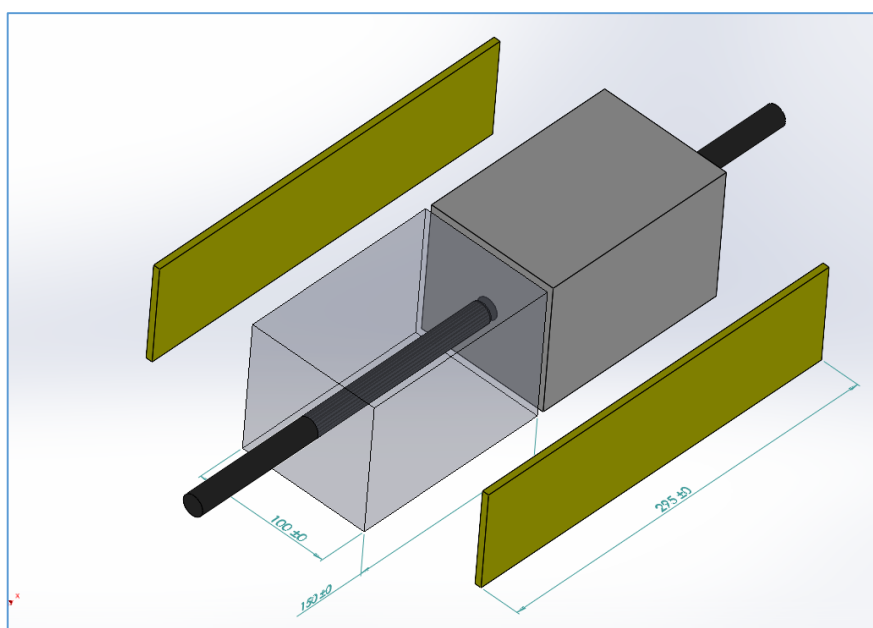


Figura 5.1 - Croquis del modelo

1) Construcción de la probeta de hormigón



2) Pegado de la Lamina



3) Corte de la barra para independizar los bloques

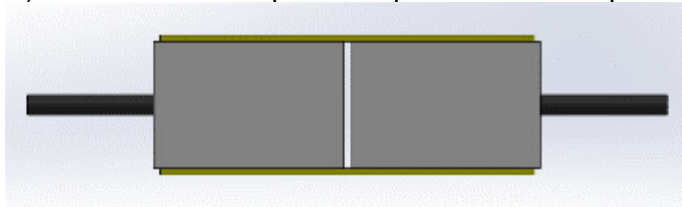


Figura 5.2 - Etapas de la elaboración de probetas

a) Encofrados

Se confeccionaron encofrados plásticos con una impresora 3D divididos en partes abulonadas que facilitaban el desmolde.



Figura 5.3 - Ensamblado de encofrados

### Armaduras

Los bloques se armaron con un estribo en espiral de acero  $\varnothing 4,2$  mm. Además, se dispusieron arandelas soldadas a la barra de acero  $\varnothing 16$  mm dentro de los bloques para incrementar la adherencia hormigón/acero de modo de asegurar que la rotura sea producto del desprendimiento entre la lámina PRFV-hormigón y no por deslizamiento de la barra.

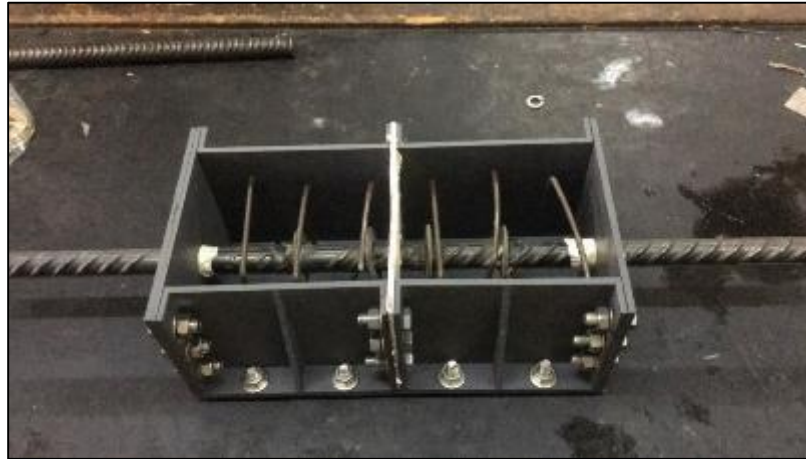


Figura 5.4 - Encofrado definitivo con disposición de la armadura

### b) Confección de la probeta

Luego, se procedió a hormigonar las probetas con una mezcla diseñada para obtener una resistencia característica 30 MPa.

Las probetas se compactaron con una varilla. Finalizado el hormigonado, se metieron en una cámara de curado a 100 % humedad y 25° durante 7 días.



Figura 5.5 - Desencofrado de probeta

c) Pegado de las láminas

Las láminas se pegaron en las caras laterales opuestas que el encofrado plástico les había conferido una buena terminación plana.

En primer lugar, se aplicó una imprimación epoxi. Luego de unas horas se procedió al pegado de las láminas ubicándolas con centradores plásticos con Adhesivo epoxi bicomponente Concrecive 227 - BASF Argentina S.A.

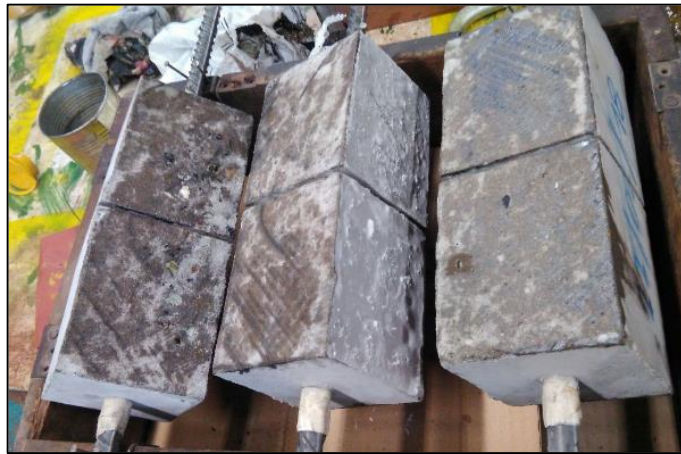


Figura 5.6 - Imprimación de superficie de hormigón



Figura 5.7 - Pegado de lámina y sujeción

d) Corte de la barra central

Al día siguiente se procedió a cortar las barras centrales. De esta manera se aseguró la colinealidad de los elementos a ensayar.



Figura 5.8 - Cortado de barra de acero

### 5.2.2. Ensayos

Las probetas se ensayaron en una máquina de tracción con una velocidad de carga de 50 kgf/s. La fuerza se aplicó de manera sostenida hasta la rotura de la pieza y se cuantificó el valor dado por la máquina de ensayo.



Figura 5.9 - Dispositivo de ensayo tracción centrada

Se observó que las probetas rompieron de diversas formas. Se pudieron distinguir tres tipos de rotura:

- desprendimiento de la lámina, sin dañar el hormigón;
- desprendimiento de la lámina con parte de hormigón del bloque;
- rotura propia del hormigón.



Figura 5.10 - Desprendimiento de la lámina y rotura de probeta



Figura 5.11 - Rotura del hormigón



Figura 5.12 - Desprendimiento de la lámina más rotura del hormigón

### 5.2.3. Resultados de los ensayos

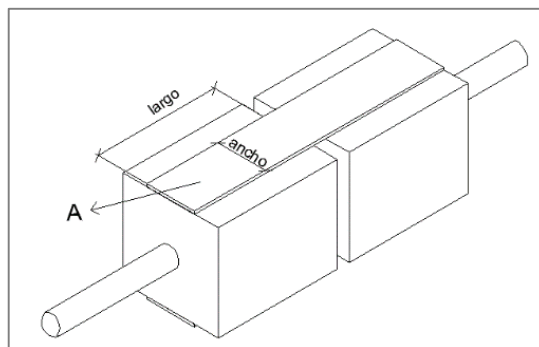


Figura 5.13 - Esquema de probeta

Las tensiones de adherencia  $\tau$  se calculan de la siguiente manera:

$$\tau [MPa] = \frac{Prot[kgf]}{2 \times A[cm^2] \times 10} \quad (5-4)$$

Donde:

- $\tau$  es la tensión de adherencia máxima alcanzada,
- $P_{rot}$  es la carga de rotura alcanzada en el ensayo,
- $A$  es el área de una cara de aporte, donde la lámina está adherida al hormigón.

En la tabla siguiente se muestra un resumen de los resultados obtenidos mediante estos ensayos. Se presenta la resistencia como una tensión tangencial, aunque en algunos casos se haya producido una combinación de esfuerzos de corte y tracción.

Tabla 5.2 - Resultados de los ensayos de tracción centrada.

Listado de probetas	Fecha	Medidas		Área [cm <sup>2</sup> ]	P rot. [kgf]	T <sub>rot</sub> [MPa]
		a [cm]	b [cm]			
1	20/3/2018	7,5	12,5	93,75	3497	1,865
2	20/3/2018	7,5	12,5	93,75	3039	1,621
3	20/3/2018	7,5	12,5	93,75	3622	1,932
4	29/5/2018	7,5	12,4	93,00	2116	1,138
5	29/5/2018	7,5	12,3	92,25	2287	1,240
6	29/5/2018	7,5	12,5	93,75	2453	1,308
7	29/5/2018	7,5	12,3	92,25	2555	1,385
8	29/5/2018	7,5	12,3	92,25	2556	1,385
9	29/5/2018	7,5	12,3	92,25	2712	1,470
10	29/5/2018	7,5	12,5	93,75	2221	1,185
11	29/5/2018	7,5	12,4	93,00	2144	1,153

Tabla 5.3 - Tensiones de rotura promedio y característica

T <sub>prom</sub> [MPa]	Desviación estándar [MPa]	t-student	T <sub>c5%</sub> [MPa]
1,43	0,275	1,813	0,93

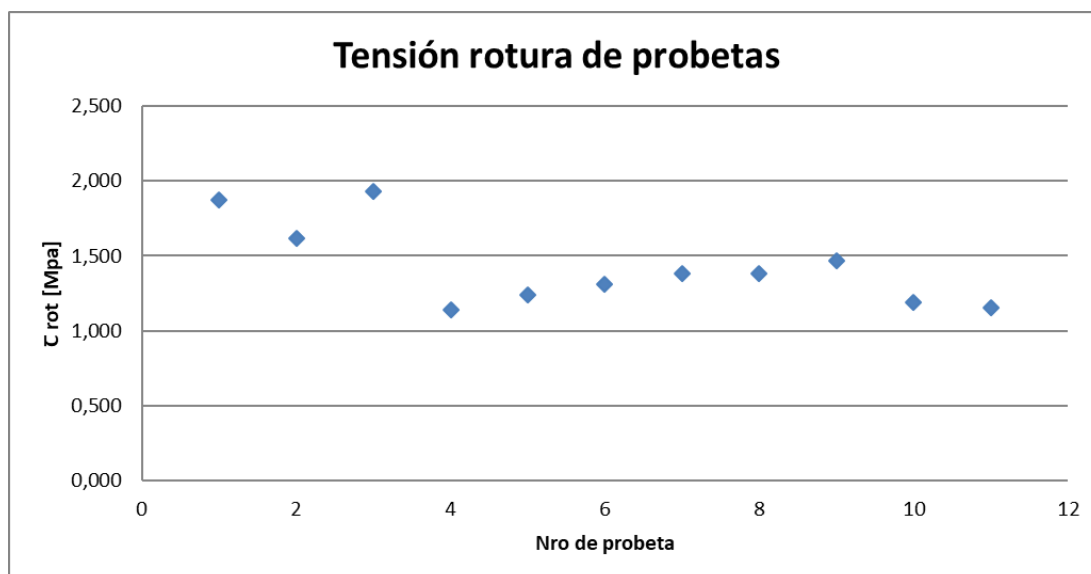


Figura 5.14 - Distribución de resultados de tensiones de adherencia de las probetas ensayadas.

Las roturas de las probetas no siguieron un patrón único de falla, sino que hubo diferentes formas que no representaban la hipótesis de falla planteada. Las roturas verificadas resultaron combinaciones de falla del hormigón y desprendimientos parciales de las fibras. El área desprendida fue difícil de calcular y, por lo tanto, los resultados de las tensiones no resultaban confiables.

Esta serie de ensayos no resultó adecuada para poder evaluar la resistencia del sistema lámina-hormigón EB-FRP, tanto por las complicaciones en la elaboración de las probetas como por la falta de resultados satisfactorios.

En consecuencia, se optó por diseñar un nuevo tipo de ensayo de tracción asimétrica partiendo de la idea original de aprovechar bloques de hormigón disponibles en el IMAE sobrantes de los ensayos de flexión de probetas de hormigón para pavimentos. De esta manera se economizaba la fabricación de probetas y se disponía de una gran cantidad de especímenes. Además, al disponer de los resultados de los ensayos de flexión, se podía conocer la resistencia del hormigón de cada una de las probetas. Si bien estas probetas no estaban armadas, como se pudo verificar en los ensayos posteriores, este hecho no fue significativo porque las roturas se verificaron siempre en los estratos superficiales.

### 5.3. Ensayos de tracción excéntrica

#### 5.3.1. Diseño de la máquina para ensayos de tracción excéntrica

Para estos ensayos se tuvo que diseñar una máquina específica. Se construyó un bastidor metálico que alojaba un gato hidráulico, una celda de carga y una mordaza para tomar las láminas. En el extremo opuesto, donde se ubicaban las probetas se dispuso un tope que oficiaba de apoyo reactivo. En las Figuras N° 5.15 y 5.16 se muestra el esquema del dispositivo y algunas fotos del mismo.

COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

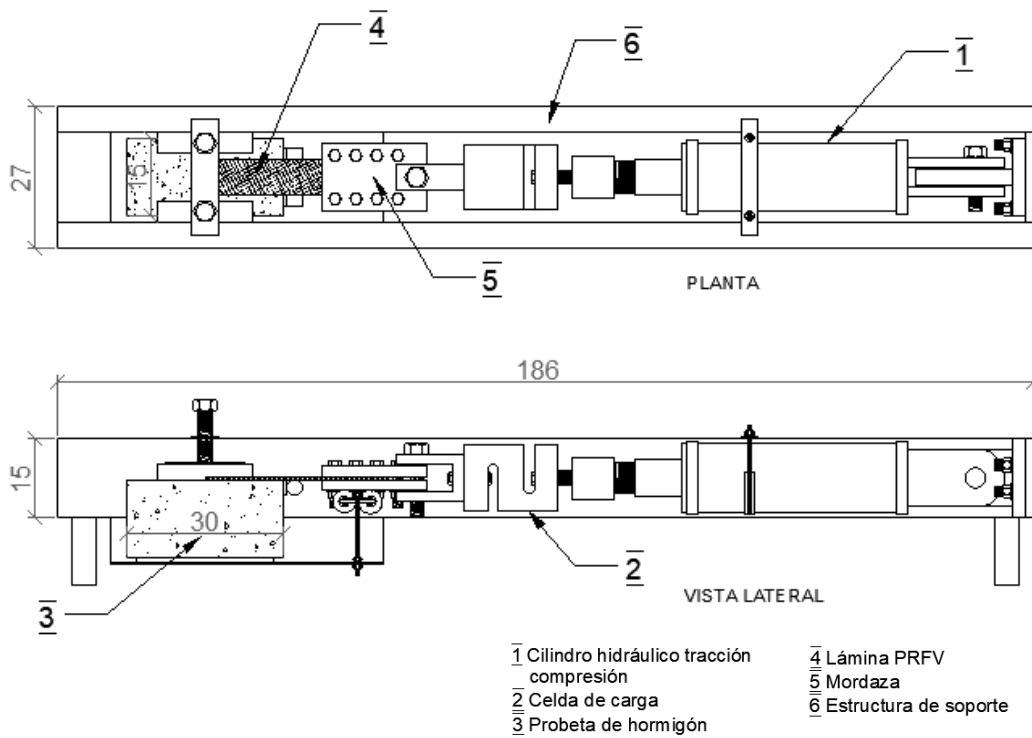


Figura 5.15 - Esquema de máquina para ensayo tracción asimétrica. Medidas en cm.

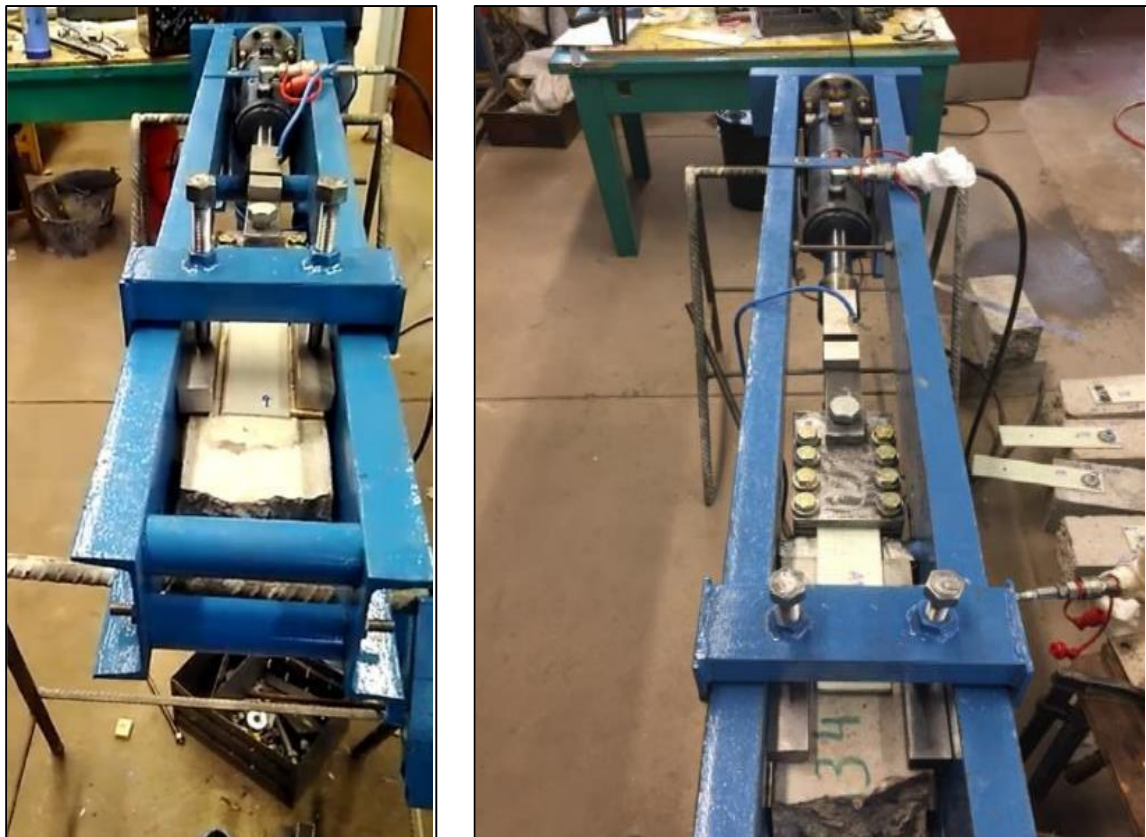


Figura 5.16 - Máquina para ensayo tracción asimétrica.

### 5.3.2. Preparación de probetas

Como ya se mencionó, para la elaboración de los especímenes se reutilizaron bloques de hormigón, saldos de probetas rectangulares de ensayos de flexión del Laboratorio de Materiales, de sección cuadrada 15 cm por 15 cm y largo variable de aproximadamente 50 cm. De esta manera se agilizó el armado de las probetas y los ensayos correspondientes.

Además de estas probetas disponibles de hormigón simple, se fabricaron probetas de hormigón armado para poder comprobar si la presencia de armaduras influía en los resultados.

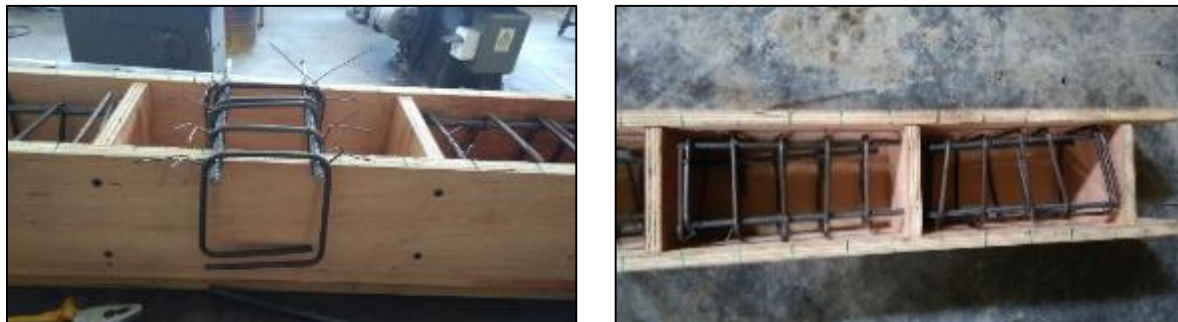


Figura 5.17 - Encofrado y armaduras



Figura 5.18 - Encofrado hormigonado de probetas armadas.

### 5.3.3. Programación de los ensayos

Se realizaron ensayos de los distintos sistemas de unión entre láminas y bloques de hormigón variando algunos parámetros. Los sistemas ensayados fueron los siguientes:

- 1- Pegado de las láminas con resina epoxi (EB-FRP) - 10 probetas
- 2- Pegado de láminas + Anclaje con 1 bulón (EB-MF-FRP) - 10 probetas
- 3- Pegado de láminas + Anclaje con 2 bulones (EB-MF-FRP) - 10 probetas
- 4- Anclaje con 1 bulón (MF-FRP) - 22 probetas
- 5- Anclaje con 2 bulones (MF-FRP) - 13 probetas
- 6- Anclaje con 3 bulones (MF-FRP) - 7 probetas
- 7- Anclaje con 2 bulones - Probetas de hormigón armado (MF-FRP) - 3 probetas
- 8- Anclaje con 3 bulones - Probetas de hormigón armado (MF-FRP) - 3 probetas

A continuación, se describen las preparaciones de las distintas series de probetas:

El tiempo de preparación promedio por probeta de de 1,5 hs mas el tiempo de frague del epoxy en los modelos pegados (24 hs) y sin contar la elaboración de la probeta de hormigón que era un residuo de otro laboratorio. Todos los ensayos se realizaron a una temperatura ambiente media de 25 °C.

#### 1- Pegado de láminas con resina (EB-FRP)

En primer lugar, se cepillaron las caras de los bloques de hormigón a las que se iban a pegar las láminas y se les creó una rugosidad intencional para obtener una mayor adherencia. Se lijaron las láminas para quitar cualquier suciedad de su superficie y luego se quitó el polvo superficial con un trapo humedecido con thinner.

A continuación, se imprimó la superficie de hormigón con el primer epoxy y, luego de unas horas, se procedió a distribuir la resina epoxy en la superficie mediante una brocha y pegar la lámina cuidando su alineación con el bloque.

La resina que se utilizó para el pegado de las láminas fue Concrecive 227 de BASF.

La longitud de pegado variaba entre 15 y 25 cm, resultando así distintas áreas de adherencia. El centrado de las láminas en las probetas se realizó con guías plásticas.

Para estos ensayos se usaron láminas de diseño estándar de CME.

Las probetas se identificaron con números.



Figura 5.19 - Guías plásticas para el centrado de la lámina pultruída.



Figura 5.20 - Probetas con láminas pegadas.

## 2- Pegado de lámina + Anclaje con 1 bulón (EB-MF-FRP)

El pegado de las láminas se realizó del mismo modo que en el grupo anterior. Al día siguiente, se realizaron las perforaciones, se limpiaron los orificios con aire a presión, se llenaron con resina epoxi y se introdujeron los pernos lentamente con el fin de sacar todo el aire alojado en la perforación y lograr que queden inmersos en la resina. Los pernos tenían colocados la tuerca y la arandela. Se cuidaba que la resina no rebalsara por sobre la arandela y tomara contacto con la tuerca para permitir el ajuste posterior.

Al día siguiente, se les dio un pequeño ajuste a las tuercas y. luego de una semana, previo a la realización de los ensayos, se les dio el ajuste final con un torque de aproximadamente 50 Nm.

Los bulones se ubicaron en la parte central de la sección pegada.

Se utilizaron láminas de la variante reforzada. Estas láminas fueron diseñadas con mayor cantidad de fibras transversales para aumentar la resistencia al desgarramiento.

A las probetas de esta serie de probetas se las nombró con la letra P seguida de un número.

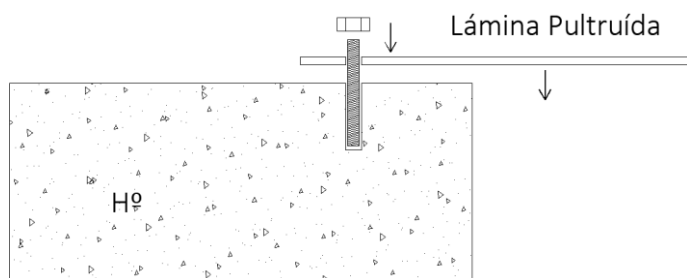


Figura 5.21 - Esquema de fijación de lámina con el bloque de hormigón.



Figura 5.22 - Probeta con lámina pegada y anclada con un bulón.

### 3- Pegado de láminas + Anclaje con 2 bulones (EB-MF-FRP)

Se armaron del mismo modo que la serie anterior, con la diferencia que se anclaron con dos bulones en línea siguiendo la dirección de la carga, separados 8 cm y centrados en la zona de pegado.

A las probetas de esta serie de probetas se las nombró con la letra Q seguida de un número.



Figura 5.23 - Probeta con lámina pegada y anclada con dos bulones.

### 4- Anclaje con 1 bulón (MF-FRP)

En esta oportunidad se prepararon probetas en donde la lámina soló quedó anclada al hormigón mediante un bulón. De esta manera se evitó depender del estado del recubrimiento del hormigón, como también de los cuidados que hay que tener al manipular la resina. La ventaja principal de este sistema es la velocidad que se logra tanto en la intervención como en la puesta en carga.

En esta serie se unió la lámina mediante un bulón central y no hizo falta darle rugosidad a la superficie de hormigón. El procedimiento de perforación, relleno con resina y ajuste de bulones fue similar al del caso anterior.

Cabe destacar que, además de los ensayos principales, en esta serie se analizaron otros parámetros:

- Se quiso evaluar la influencia de la distancia de arranque reduciendo la separación del bulón al límite de la lámina.
- Se analizaron otros sistemas de apriete. En este caso se probó utilizar arandelas de mayor diámetro, dos arandelas, una chapa puesta transversal a la tracción y una chapa doblada colocada de canto, rodeando el perno. Estas variaciones tuvieron la intención de reforzar la zona del agujero, evitando la concentración de tensiones al incrementar el área de presión sobre la lámina al ajustar la tuerca, con el fin de minimizar los desgarramientos u ojalamientos en la lámina.
- Otra variante que se introdujo fue el cambio de diámetro del bulón. Se usaron pernos  $\varnothing 3/8$ " y  $\varnothing 7/16$ ".

La intención de estos ensayos fuera del programa original, fue solamente obtener una muestra inicial para abrir el análisis de otros parámetros del sistema que quedarán para futuras investigaciones.

A las probetas de esta serie de probetas se las nombró con la letra A seguida de un número.



Figura 5.24 - Diferentes probetas con láminas ancladas con un bulón con chapas de distribución.



Figura 5.25 - Diferentes probetas con láminas ancladas con un bulón y arandelas de mayor diámetro.

### 5- Anclaje con 2 bulones (MF-FRP)

En esta serie de probetas se colocaron dos bulones alineados con la dirección de la carga espaciados 8 cm.



Figura 5.26 - Probetas con láminas ancladas con 2 bulones.

Al igual que en los casos anteriores, el torque dado fue de aproximadamente 50 Nm medido con el torquímetro para asegurar el correcto anclaje.

A las probetas de esta serie de probetas se las nombró con la letra B seguida de un número.

### 6- Anclaje con 3 bulones (MF-FRP)

Al igual que en el caso anterior, se dispusieron tres pernos de anclaje, alineados con la dirección de la carga y equi espaciados en 8 cm. Ajustados con un torque de aproximadamente 50 Nm.

A las probetas de esta serie de probetas también se las nombró con la letra A seguida de un número.



Figura 5.27 - Probetas con láminas ancladas con 3 bulones.

### 7- Anclaje con 2 bulones en probetas de hormigón armado (MF-FRP)

Igual preparación que en los casos anteriores.

A las probetas de esta serie de probetas también se las nombró con la letra A seguida de un número y de una (A) que designaba Armada.



Figura 5.28 - Probetas de hormigón armado con láminas ancladas con 2 bulones.

### 8- Anclaje con 3 bulones en probeta de Hormigón Armado

Igual preparación que en los casos anteriores.

A las probetas de esta serie de probetas también se las nombró con la letra A seguida de un número y de una (A) que designaba Armada.



Figura 5.29 - Probetas de hormigón armado con láminas ancladas con 3 bulones.

### 5.3.4. Ensayo de tracción asimétrica

La metodología del ensayo fue la siguiente:

- disposición de la probeta en el extremo opuesto al gato hidráulico;
- fijación de la lámina en la mordaza centrando la lámina con unos tutores;
- sujeción del bloque de hormigón;
- ajuste de los bulones de la mordaza.

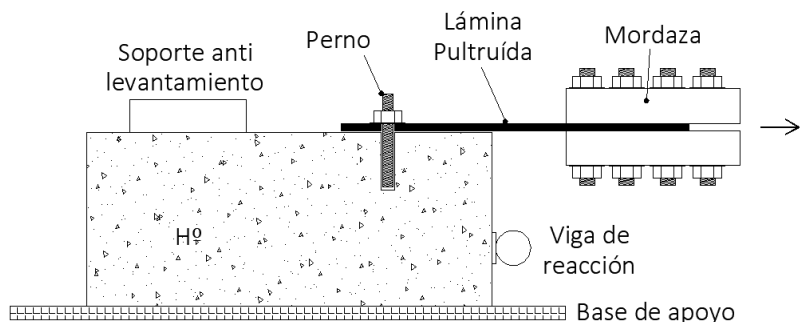


Figura 5.30 - Esquema de ensayo a tracción asimétrica.

### 5.3.5. Resultados de ensayos

Se presentan a continuación las tablas con los resultados de cada serie de ensayos.

#### Nomenclatura:

FH Falla Hormigón. Rotura de hormigón, el adhesivo epoxi se despegó por completo de la probeta

FF Falla Fibra. El adhesivo epoxi se despegó por completo de la placa de fibra de vidrio

FM Falla Mixta

a Longitud de la zona pegada

b Ancho de la lámina

#### 1 Láminas adheridas con resina al hormigón (EB-FRP):

Tabla 5.4 - Ensayo de adherencia con láminas pegadas al hormigón.

Listado de probetas	Fecha	Medidas		Carga [kN]	$\tau_{\text{máx}}$ [MPa]	Tipo de falla
		a [cm]	b [cm]			
1	5/6/2018	23,0	7,4	37,18	2,184	FH
2	5/6/2018	19,7	7,4	42,39	2,908	FM
3	5/6/2018	14,9	7,5	35,69	3,194	FH
4	19/6/2018	15,2	7,5	31,01	2,720	FH
5	5/6/2018	22,0	7,4	31,49	1,934	FH
6	5/6/2018	20,0	7,5	34,58	2,305	FF
7	19/6/2018	16,5	7,5	32,52	2,628	FM
8	19/6/2018	16,4	7,4	28,69	2,364	FH
9	20/6/2018	16,5	7,5	33,20	2,683	FM
10	20/6/2018	18,0	7,5	30,40	2,252	FH

Tabla 5.5 - Tensiones de rotura promedio y característica

$T_{prom}$ [MPa]	$S$ [MPa]	$t$	$T_{c5\%}$ [MPa]
2,52	0,42	1,833	1,75

Se muestra a continuación el listado de las probetas ensayadas y el tipo de falla correspondiente:

Probeta 1, 4, 5, 8 y 10: Se desprendió la lámina con todo el recubrimiento de hormigón.

Probeta 2, 7 y 9: Se desprendió la lámina, la resina quedó adherida parcialmente al hormigón, y algunas partes en la planchuela.

Probeta 3: Se desprendió la lámina, la resina quedó adherida a la planchuela, quedando el bloque de hormigón intacto.

Probeta 6: Se desprende la lámina completamente limpia, la resina queda adherida en el hormigón.



Figura 5.30 - Tipología de falla FH - Probeta 3.



Figura 5.31 - Tipología de falla FH - Probeta 5.

2- Láminas adherida con resina al hormigón y ancladas con un bulón central (EB-MF-FRP)

En estos ensayos, las probetas se cargaron hasta romper la unión resinosa. En ese momento se descargó el gato y a continuación, se comenzó nuevamente a aplicar carga hasta producir la rotura del bulón.

Tabla 5.6 - Ensayo de adherencia con láminas pegadas al hormigón ancladas con 1 bulón central.

Listado de probetas	Fecha	Medidas		Adherencia + bulón [kN]	Bulón [kN]	T <sub>máx1</sub> [MPa]	Tipo de falla
		a [cm]	b [cm]				
P1	19/6/2018	15,3	7,4	49,20	25,00	4,33	FH
P2	5/6/2018	21,0	7,5	58,32	23,42	3,72	FM
P3	19/6/2018	20,8	7,5	56,40	25,35	3,63	FH
P4	19/6/2018	17,0	7,4	59,55	28,23	4,73	FH
P5	19/6/2018	16,3	7,5	64,08	30,40	5,22	FM
P6	21/6/2018	18,0	7,4	51,88	24,56	3,88	FM
P7	21/6/2018	18,5	7,5	55,57	25,39	4,03	FH
P8	21/6/2018	19,0	7,4	57,46	27,51	4,09	FM
P9	22/6/2018	16,5	7,5	59,14	25,18	4,80	FM
P10	22/6/2018	17,0	7,5	48,92	29,71	3,82	FM

Tabla 5.7 - Tensiones y cargas de rotura promedio y características.

Adherencia + bulón	T <sub>prom</sub> [MPa]	S [MPa]	t	T <sub>c5%</sub> [MPa]
	4,23	0,53	1,833	3,25
Bulón	P <sub>prom</sub> [kN]	S [kN]r	t	P <sub>c5%</sub> [kN]
	26,48	2,34	1,833	22.18

Listado de las probetas ensayadas y el tipo de falla correspondiente:

Probeta P1: Se desprende la lámina con la resina adherida a ella quedando la superficie del hormigón intacta. Corte del bulón - Capacidad resistente post-rotura.

Probeta P2, P3: Se desprende la lámina con algunas partes del recubrimiento de hormigón. Corte del bulón - Capacidad resistente post-rotura.

Probeta P4: Se desprende la lámina con la resina adherida a ella con una capa del recubrimiento de hormigón. Corte del bulón - Capacidad resistente post-rotura.

Probeta P5: Se desprende la lámina con partes de la resina, y del recubrimiento de hormigón. Corte del bulón - Capacidad resistente post-rotura.



Figura 5.32 - Tipología de falla FH - Probeta P1.



Figura 5.33 - Tipología de falla FH - Probeta P4.

3- Láminas adherida con resina al hormigón y ancladas con dos bulones (EB-MF-FRP):

Al igual que en el caso anterior las probetas se cargaron hasta romper la unión resinosa y, luego de la descarga, se reinició la carga hasta producir la rotura de los bulones.

Tabla 5.8 - Ensayo de adherencia con láminas pegadas al hormigón, ancladas con 2 bulones centrales.

Listado de probetas	Fecha	Medidas		Adherencia + bulón [kN]	Bulones [kN]	T <sub>máx1</sub> [MPa]	Tipo de falla
		a [cm]	b [cm]				
Q1	3/7/2018	20,2	7,5	67,89	72,64	4,48	FH
Q2	3/7/2018	15,9	7,5	68,52	51,24	5,75	FH
Q3	3/7/2018	18,0	7,5	71,23	52,65	5,28	FH
Q4	3/7/2018	19,8	7,5	70,47	69,57	4,75	FM
Q5	3/7/2018	16,2	7,4	67,90	54,12	5,66	FH
Q6	18/7/2018	19,0	7,4	73,54	52,86	5,23	FH
Q7	18/7/2018	20,1	7,5	72,20	69,46	4,79	FM
Q8	18/7/2018	19,8	7,5	73,24	54,97	4,93	FH
Q9	20/7/2018	18,8	7,4	72,87	51,75	5,24	FM
Q10	20/7/2018	18,9	7,5	72,25	55,84	5,10	FH

Tabla 5.9 - Tensiones y cargas de rotura promedio y características.

Adherencia + bulones	T <sub>prom</sub> [MPa]	s [MPa]	t	T <sub>c5%</sub> [MPa]
	5,12	0,40	1,833	4,39
Bulones	P <sub>prom</sub> [kN]	s [kN]	t	P <sub>c5%</sub> [kN]
	58,50	8,47	1,833	42,97

Listado de las probetas ensayadas y el tipo de falla correspondiente:

Probeta Q1: Se desprende la lámina, hay ojalamiento y desgarramiento. Los bulones no cortan, se desplazan - Capacidad resistente post rotura.

Probeta Q2: Se desprende la lámina con todo el recubrimiento de hormigón. Cortan los bulones - Capacidad resistente post rotura.

Probeta Q3: Se desprende la lámina con todo el recubrimiento de hormigón. Cortan los bulones - Capacidad resistente post rotura.



Figura 5.34 - Tipología de falla FH - Probeta Q1.



Figura 5.35 - Tipología de falla FH - Probeta Q3.

4- Láminas ancladas al hormigón con un bulón (MF-FRP)

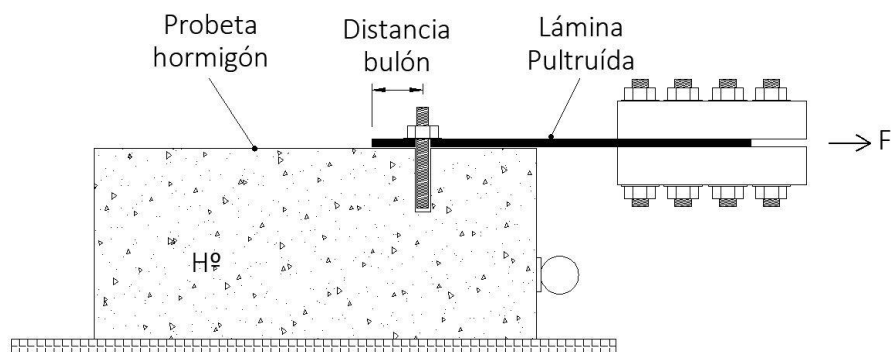


Figura 5.36 - Distancia desde filo posterior lámina al bulón.

Tabla 5.10 - Ensayo de adherencia con láminas ancladas al hormigón con 1 bulón central.

Listado de probetas	Fecha	Carga rotura bulón [kN]	Condiciones		
			Diámetro bulón	Distancia al bulón [cm]	Sujeción
A1	5/6/2018	21,82	Ø3/8"	9,3	1 arandela
A2	10/7/2018	24,81		7,3	
A3	10/7/2018	24,73		7,7	
A4	10/7/2018	23,85		7,7	
A5	10/7/2018	24,08		7,8	
A6	10/7/2018	22,60		7,6	
A7	22/8/2018	22,49		6,5	
A8	22/8/2018	22,50		6,5	
A9	5/9/2018	23,52		5	
A10	22/8/2018	22,25		5	
A11	29/8/2018	28,45	Ø7/16"	8	1 arandela
A12	29/8/2018	29,12		8	
A13	5/9/2018	28,73		8	
A14	5/9/2018	27,68		8	
A15	5/9/2018	22,79	Ø3/8"	3	1 arandela
A16	5/9/2018	21,20		3	
A17	29/8/2018	21,72	Ø3/8"	3	2 arandelas
A18	5/9/2018	20,66		3	
A19	5/9/2018	16,03	Ø3/8"	3	Reforzada con chapa
A20	22/8/2018	22,69		3	
A21	22/8/2018	20,19	Ø3/8"	3	Cuchilla
A22	29/8/2018	18,74		3	

Tabla 5.11 - Cargas de rotura promedio y característica.

Probetas	Condiciones			P <sub>prom</sub> [kN]	s[kN]	t	Pc5% [kN]
	Diámetro bulón	Sujeción	Distancia al bulón [cm]				
A1 a A10	3/8"	1 arandela	>5	23,27	1,07	1,833	21,30
A15 y A16			3	22,00			
A17 y A18		2 arandelas	3	21,19			
A19 y A20		con chapa	3	19,36			
A21 y A22		cuchilla	3	19,47			
A11 a A14	7/16"	1 arandela	8	28,50	0,61	2,3534	27,06

Listado de las probetas ensayadas y el tipo de falla correspondiente:

Probeta A1, A2, A3, A4: Corte del bulón - ojalamiento de 1 cm aproximadamente.

Probeta A5 y A6: Corte del bulón - ojalamiento 0,5 cm

Probeta A7: Corte del bulón - se utilizó un bulón SAE 1045. Ojalamiento de 3 mm.

Probeta A8: Corte del bulón - se utilizó un bulón SAE 1045.

Probeta A9: Corte del bulón - ojalamiento 0,5 cm.

Probetas A11, A12, A13: corte del bulón.

Probetas A11, A12, A13: corte del bulón.

Probeta A14: corte del bulón.

Probeta A15 y A16: Desgarramiento de fibras.

Probeta A17: Ojalamiento y desgarre de fibras.

Probetas A18 y A19: Desgarramiento de fibras.

Probetas A20, A21 y A22: Ojalamiento y desgarramiento de algunas fibras

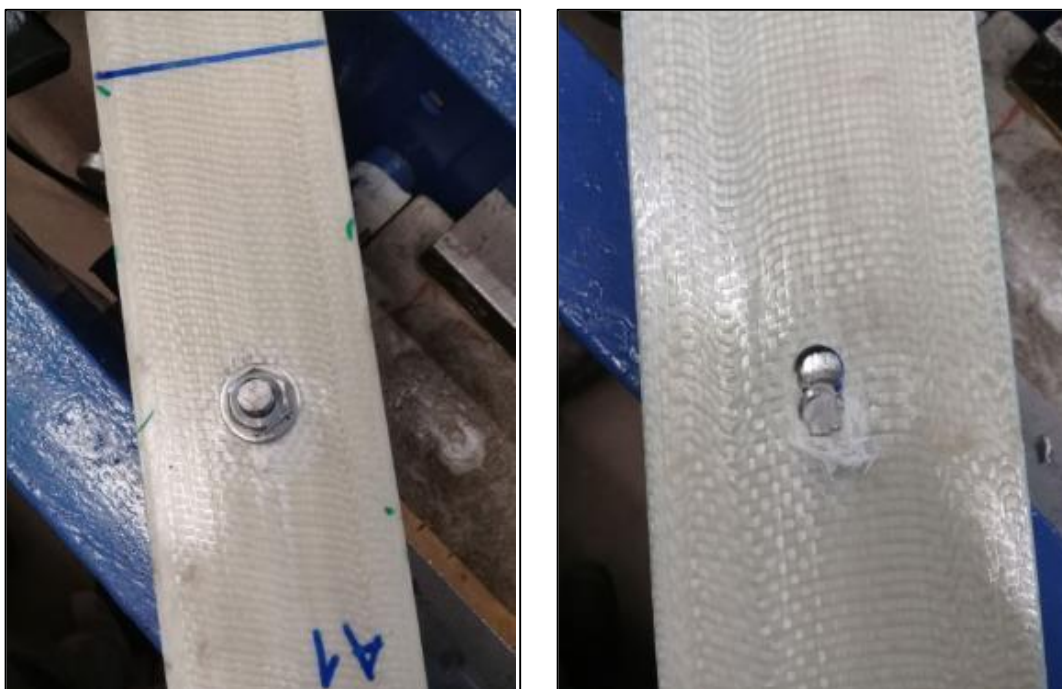


Figura 5.37 - Tipología de falla - Ojalamiento y corte bulón - Probeta A1.



Figura 5.38 - Tipología de falla - Corte de bulón - Probeta A7.



Figura 5.39 - Tipología de falla - Desgarramiento de fibras - Probeta A15 y A16.



Figura 5.40 - Tipología de falla - Desgarramiento fibras - Probeta A18 y A19.



Figura 5.41 - Tipología de falla - Ojalamiento y Desgarramiento fibras - Probeta A21 y A22.

5- Láminas ancladas al hormigón con dos bulones (MF-FRP)

Tabla 5.12 - Ensayo de adherencia con láminas ancladas al hormigón con 2 bulones centrales.

Listado de probetas	Fecha	Carga rotura bulón [kN]	Condiciones		
			Diámetro bulón	Distancia al bulón [cm]	Sujeción
B1	10/7/2018	33,22	Ø3/8"	3	1 arandela
B2	10/7/2018	39,85	Ø3/8"	3	1 arandela
B3	10/7/2018	40,22	Ø3/8"	3	1 arandela
B4	10/7/2018	39,85	Ø3/8"	3	1 arandela
B5	12/7/2018	35,45	Ø3/8"	3	1 arandela
B6	12/7/2018	38,16	Ø3/8"	3	1 arandela

Tabla 5.13 - Cargas de rotura promedio y característica

$P_{prom}$ [kN]	s [kN]	t	$P_{c5\%}$ [kN]
37,79	2,86	2,015	32,03

Listado de las probetas ensayadas y el tipo de falla correspondiente:

Probeta B1: Ojalamiento de 1,5 cm de la lámina y desgarramiento en correspondencia con el bulón más alejado de la tracción. Ojalamiento de 0,5 cm en el otro bulón.

Probetas B2 y B6: Ojalamiento de 1 cm de la lámina y desgarramiento en correspondencia con el bulón más alejado de la tracción. - Corte del bulón más cercano a la aplicación de la carga - Capacidad resistente post rotura.

Probetas B3 y B5: desgarramiento en correspondencia con el bulón más alejado de la tracción. - Corte del bulón más cercano a la aplicación de la carga - Capacidad resistente post rotura.

Probeta B4: Corte 1er bulón - corte 2do bulón - Capacidad resistente post rotura.



Figura 5.42 - Tipología de falla - Ojalamiento y desgarramiento fibras - Probeta B2.



Figura 5.43 - Tipología de falla - Ojalamiento y desgarramiento fibras - Probeta B4.

Se hizo una segunda tanda de ensayos aumentando la distancia del segundo bulón al borde.

Tabla 5.14 - Ensayo de adherencia con láminas ancladas al hormigón con 2 bulones centrales (cont.).

Listado de probetas	Fecha	Carga rotura bulón [kN]	Condiciones		
			Diámetro bulón	Distancia al bulón [cm]	Sujeción
A23	10/10/2018	32,90	Ø3/8"	6	1 arandela
A24	5/10/2018	40,50	Ø3/8"	6	1 arandela
A25	5/10/2018	43,90	Ø3/8"	6	1 arandela
A26	13/10/2018	37,21	Ø3/8"	6	1 arandela
A27	10/10/2018	41,03	Ø3/8"	6	1 arandela
A39	25/11/2018	38,61	Ø3/8"	6	1 arandela
A40	25/11/2018	39,60	Ø3/8"	6	1 arandela

Tabla 5.15 - Cargas de rotura promedio y característica.

$P_{prom}$ [kN]	$s$ [kN]	$t$	$P_{c5\%}$ [kN]
39,11	3,45	1,9432	32,41

Listado de las probetas ensayadas y el tipo de falla correspondiente:

Probeta A23: Desprendimiento del hormigón en la zona de anclaje - Corte de ambos bulones

Probeta A24 y A39: Rotura producida por el corte de los dos bulones

Probeta A25: Rotura de probeta y desgarramiento del hormigón en la zona del anclaje - Capacidad resistente post rotura igual a 16.07 kN

Probeta A26: Rotura de la probeta - Corte del bulón trasero

Probeta A27 y A40: Rotura de probeta - Corte de ambos bulones

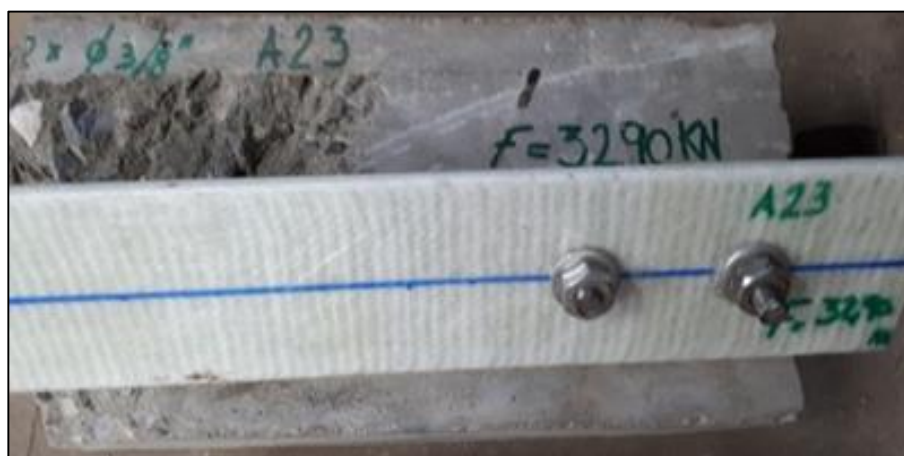


Figura 5.44 - Tipología de falla - Desprendimiento del H° y corte de bulón - Probeta A23.



Figura 5.45 - Tipología de falla - Rotura de la probeta corte bulones - Probeta A25.



Figura 5.46 - Tipología de falla - Rotura de la probeta corte 1 bulón - Probeta A26

6- Anclaje con 3 bulones (MF-FRP)

Tabla 5.16 - Ensayo de adherencia con láminas ancladas al hormigón con 3 bulones centrales.

Listado de probetas	Fecha	Bulón [kN]	Condiciones		
			Diámetro bulón	Distancia al bulón [cm]	Sujeción
A28	10/10/2018	54,32	Ø3/8"	6	1 arandela
A29	13/10/2018	61,20	Ø3/8"	6	1 arandela
A30	13/10/2018	55,48	Ø3/8"	6	1 arandela
A31	5/10/2018	52,45	Ø3/8"	6	1 arandela
A32	13/10/2018	55,50	Ø3/8"	6	1 arandela
A41	25/11/2018	56,87	Ø3/8"	6	1 arandela
A42	25/11/2018	53,30	Ø3/8"	6	1 arandela

Tabla 5.17 - Cargas de rotura promedio y característica.

$P_{prom}$ [kN]	$s$ [kN]	$t$	$Pc5\%$ [kN]
55.59	2.88	1,9432	49.99

Listado de las probetas ensayadas y el tipo de falla correspondiente:

Probeta A28 y A41: Probeta confinada por cuñas laterales de madera - Rotura del hormigón en correspondencia con el primer bulón.

Probeta A29, A30, A32 y A42: Probeta confinada por cuñas laterales de madera - Rotura del hormigón en correspondencia con el último bulón.

Probeta A31: Rotura de probeta por desgarramiento del hormigón - Ojalamiento en los 3 bulones - Capacidad resistente post rotura igual a 15.18 kN.



Figura 5.47 - Tipología de falla - Rotura del H° en correspondencia 1° bulón - Probeta A28.



Figura 5.48 - Tipología de falla - Rotura del H° en correspondencia 3° bulón - Probeta A29.



Figura 5.49 - Tipología de falla - Rotura de H° y Ojalamiento en los 3 bulones - Probeta A31

7- Anclaje con 2 bulones en probeta de hormigón armado (MF-FRP)

Tabla 5.18 - Ensayo de adherencia con láminas ancladas al hormigón con 2 bulones centrales en probeta de H<sup>0</sup>A<sup>0</sup>.

Listado de probetas	Fecha	Carga rotura bulón [kN]	Condiciones		
			Diámetro bulón	Distancia al bulón [cm]	Sujeción
A33(A)	24/11/2018	48,80	Ø3/8"	6	1 arandela
A34(A)	24/11/2018	42.70	Ø3/8"	6	1 arandela
A38(A)	24/11/2018	36,63	Ø3/8"	6	1 arandela

Tabla 5.19 - Carga de rotura promedio

P <sub>prom</sub> [kN]	s [kN]	t	Pc5% [kN]
42,71	6,09	2,9200	24,94

El valor de la carga de rotura promedio resultó ligeramente superior al del ensayo con probetas sin armar:  $42.71 / 39.11 = 1.09$ , o sea un 9 % mayor.

Listado de las probetas ensayadas y el tipo de falla correspondiente:

Probeta A33 (A): Corte del primer bulón - Ojalamiento en el segundo bulón - Capacidad resistente post rotura igual a 15,18 kN.

Probeta A34 (A) y A38(A): Rotura de probeta - Desprendimiento del hormigón.



Figura 5.50 - Tipología de falla - Corte 1° bulón y Ojalamiento 2° bulón - Probeta A33(A).



Figura 5.51 - Tipología de falla - Desprendimiento del H° - Probeta A34(A).

8- Anclaje con 3 bulones en probeta de hormigón armado (MF-FRP)

Tabla 5.20 - Ensayo de adherencia con láminas ancladas al hormigón con 3 bulones centrales en probeta de H°A°.

Listado de probetas	Fecha	Bulón [kN]	Condiciones		
			Diámetro bulón	Distancia al bulón [cm]	Sujeción
A35(A)	24/11/2018	68,47	Ø3/8"	6	1 arandela
A36(A)	24/11/2018	54,90	Ø3/8"	6	1 arandela
A37(A)	24/11/2018	53,18	Ø3/8"	6	1 arandela

Tabla 5.21 - Carga de rotura promedio

P <sub>prom</sub> [kN]	s [kN]	t	Pc5% [kN]
58,85	8,375	2,9200	34,39

El valor de la carga de rotura promedio resultó ligeramente superior al del ensayo con probetas sin armar:  $58.85 / 55.59 = 1.06$ , o sea un 6 % mayor.

Listado de las probetas ensayadas y el tipo de falla correspondiente:

Probetas A35(A) y A36(A): Rotura por aplastamiento del hormigón en el apoyo transversal de la máquina de carga.

Probeta A37(A): Rotura por corte del tercer bulón - Arrancamiento del tercer bulón - Capacidad resistente post rotura igual a 21,98 kN.



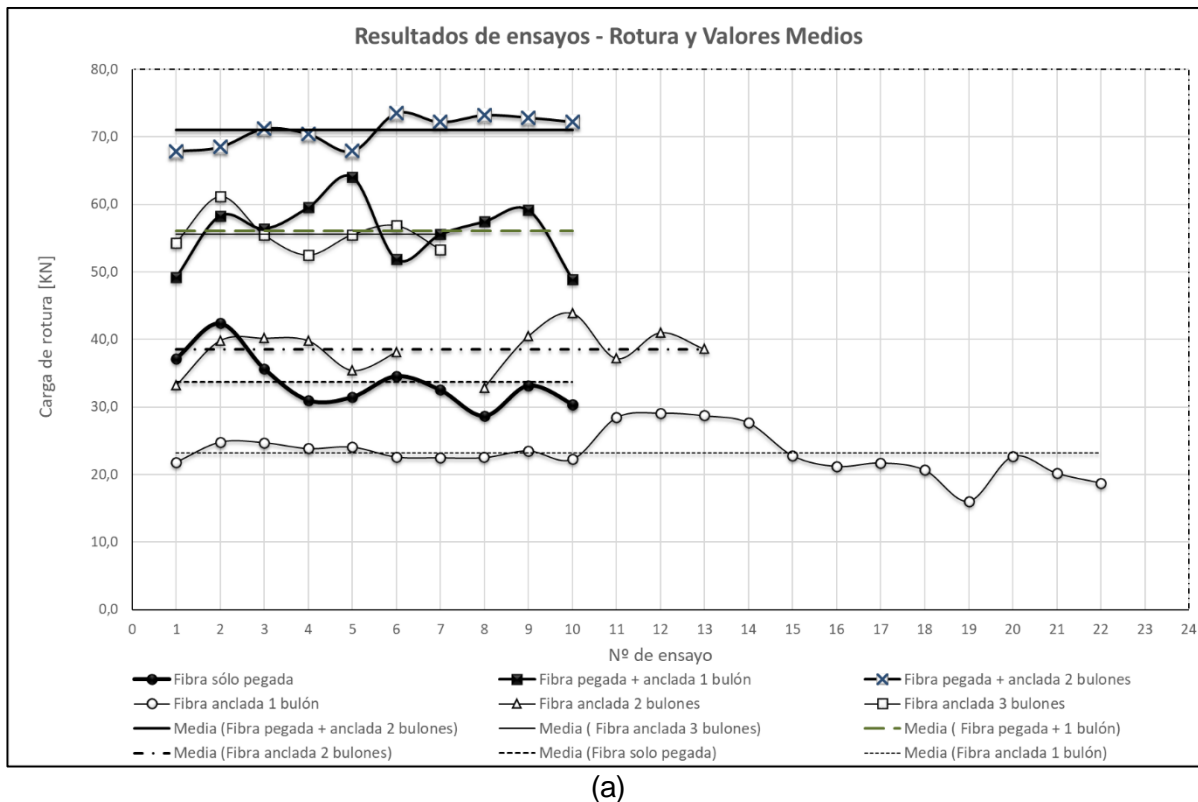
Figura 5.52 - Tipología de falla - Rotura H° - Probeta A35(A).



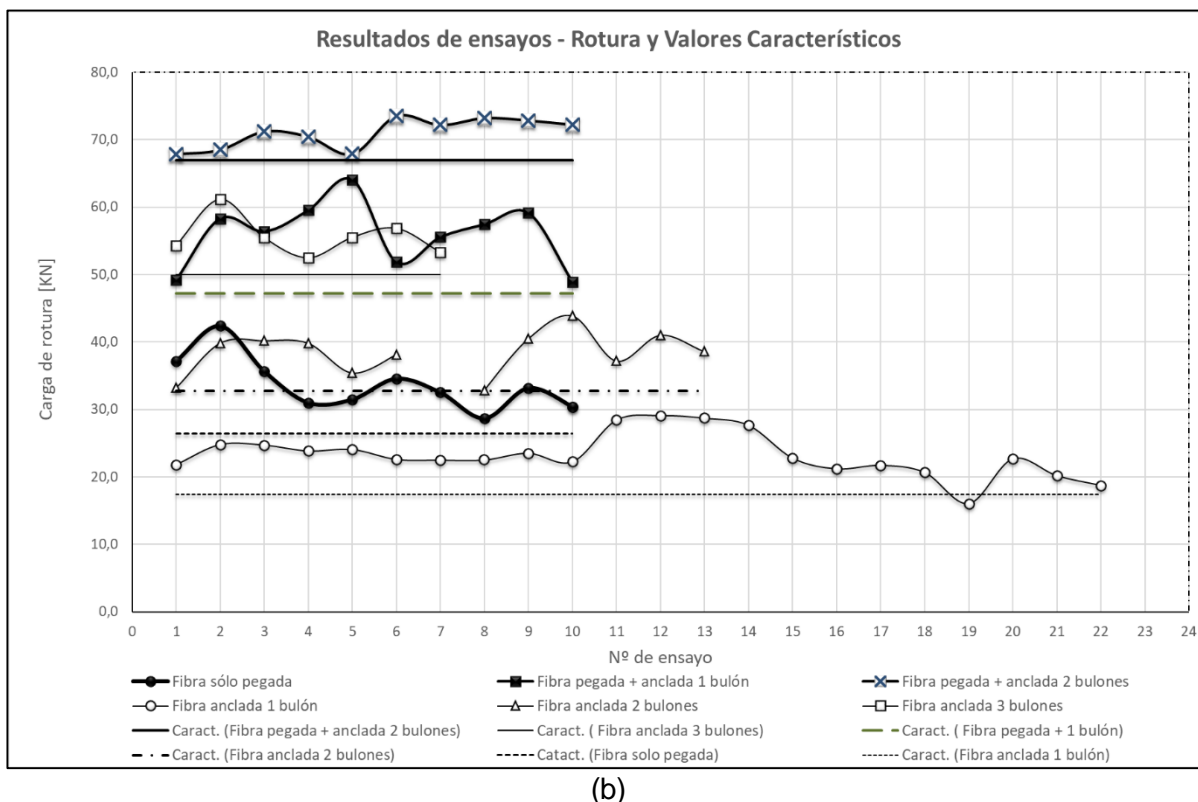
Figura 5.53 - Tipología de falla - Rotura H° y Corte del 3° bulón - Probeta A37(A).

### 5.3.6. Resumen de resultados

En el gráfico de Figura 5.54 (a) y (b) se representan los resultados de los ensayos 1 a 6. No se grafican los valores obtenidos en las probetas de hormigón armado 7 y 8.



(a)



(b)

Figura 5.54 - Resumen de resultados.

## CAPÍTULO 6

### 6. ENSAYOS DINÁMICOS DE RESISTENCIA DEL SISTEMA LÁMINA-HORMIGÓN

#### 6.1. Diseño de la máquina de ensayos

Para la realización de los ensayos dinámicos de resistencia fue necesario diseñar una máquina que permitiera ejercer cargas alternadas sobre las láminas vinculadas a los bloques de hormigón.

Se inició un proceso de diseño y evaluación de alternativas apoyándonos en la construcción de los mismos en modelos a escala y así decidir cuál más conveniente.

Básicamente había disponibles dos modos de accionamiento para el dispositivo que generáramos:

a) Diseñar un dispositivo para ser montado en una máquina de ensayos universales con la función ciclado disponible, el instituto IMAE posee una de hasta 100 kN. Esto obliga a llevar los ensayos ya mostrados y esquematizados con la probeta en posición vertical.

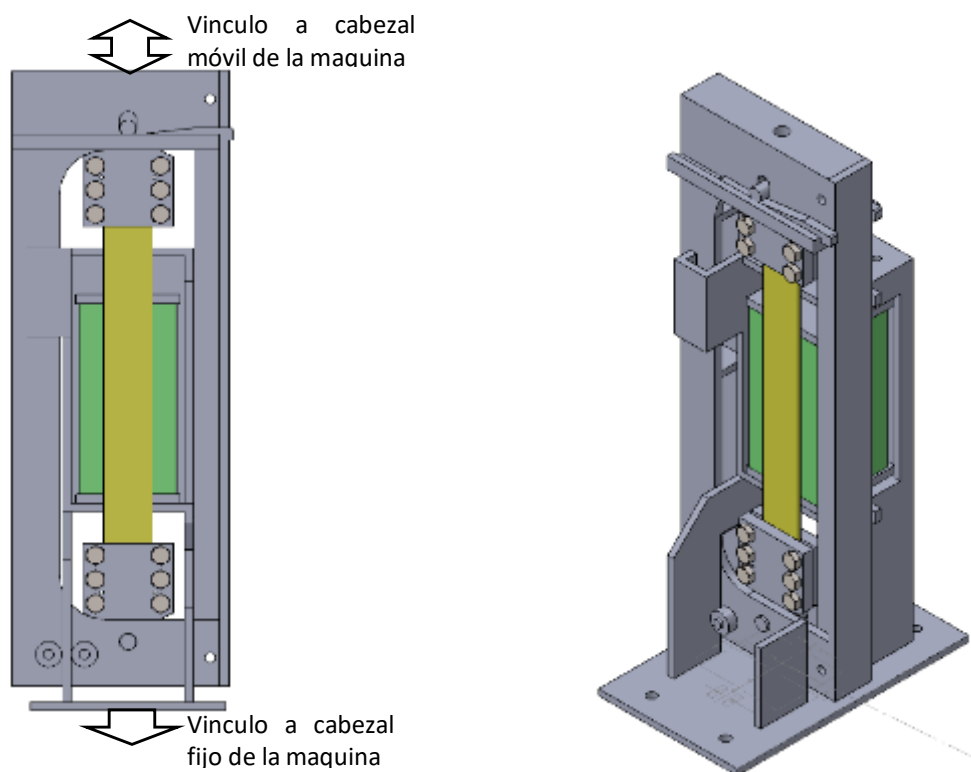


Figura 6.1 - Prototipo Versión a1.

Prototipado Versión a1.



Prototipado Versión a2.



Prototipado Versión a3.



Figura 6.2 - Prototipo Versiones a1-a2-a3.

b) Diseñar un dispositivo independiente que pueda ser conectado a una central hidráulica que permita su operación y control.

Finalmente se optó por la opción b) y tener así un dispositivo independiente de las demandas de uso de las máquinas universales del instituto.

Se construyó un equipo con un marco metálico similar al utilizado en los ensayos estáticos, al cual se le incorporó un cilindro hidráulico de doble efecto.

Este nuevo equipo permite evaluar la respuesta del sistema lámina hormigón ya sea ante efectos estáticos como ante efectos dinámicos de fatiga de bajos ciclos.

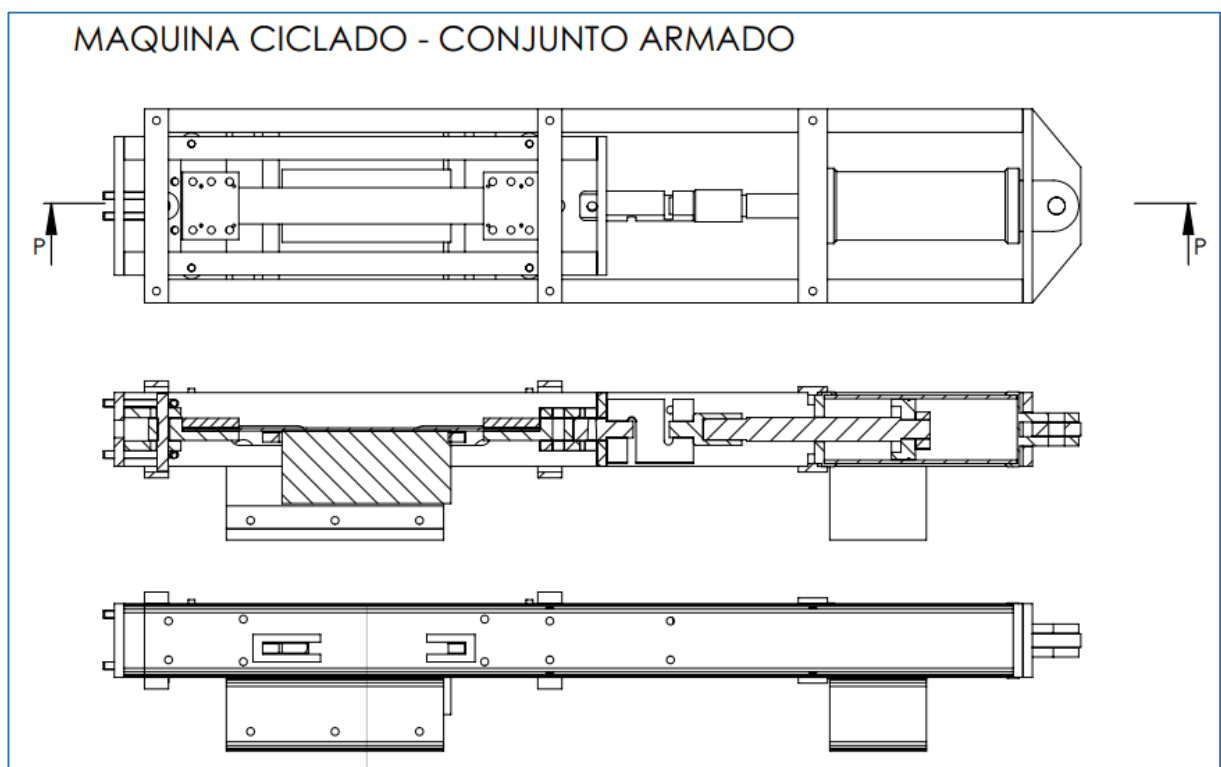


Figura 6.3 - Equipo de ensayo dinámico - Esquema.

Previamente a la construcción de la máquina, se elaboró un prototipo a escala 1:4 con una impresora 3D para comprobar el correcto ensamble y funcionamiento de los distintos componentes. Para ello fue necesario dibujar cada una de las piezas del equipo y emitir los planos constructivos. Los planos constructivos se adjuntan en el anexo 1.

Una vez verificada la factibilidad de funcionamiento del dispositivo, se procedió a su construcción y montaje.

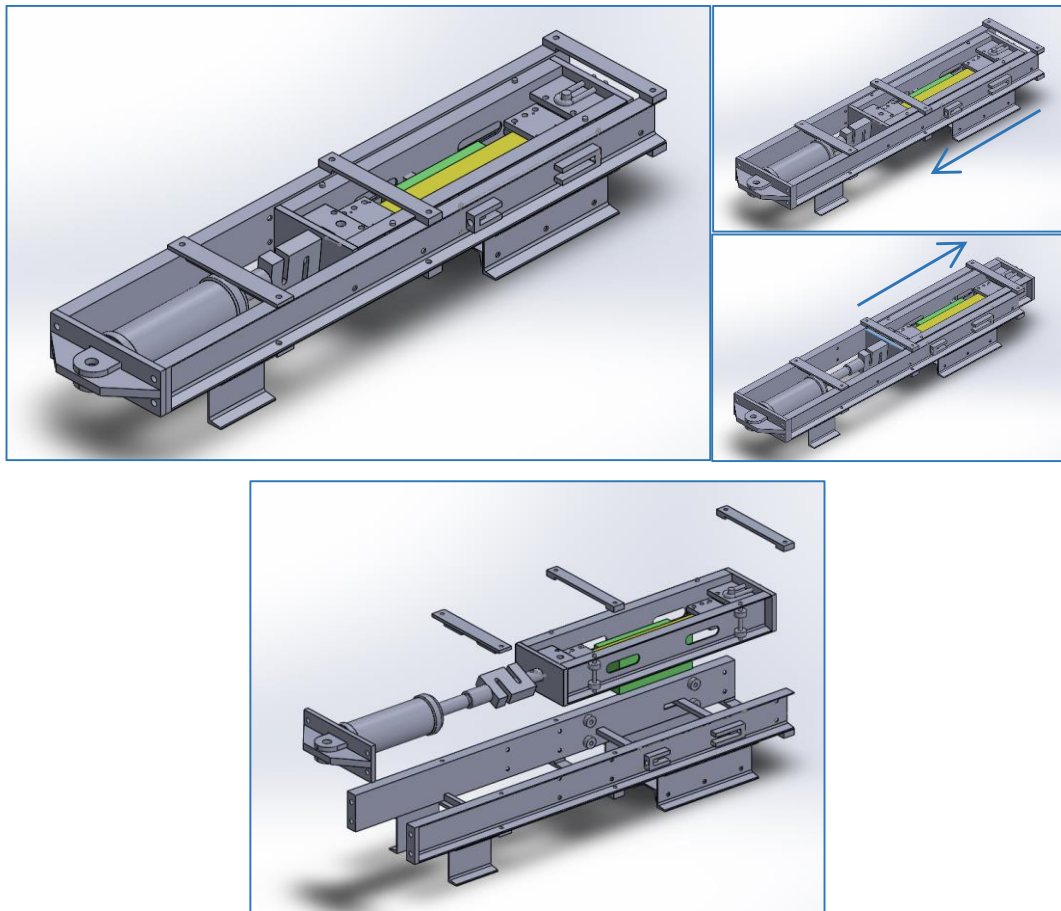


Figura 6.4 - Equipo de ensayo dinámico - Axonometría y despiece.

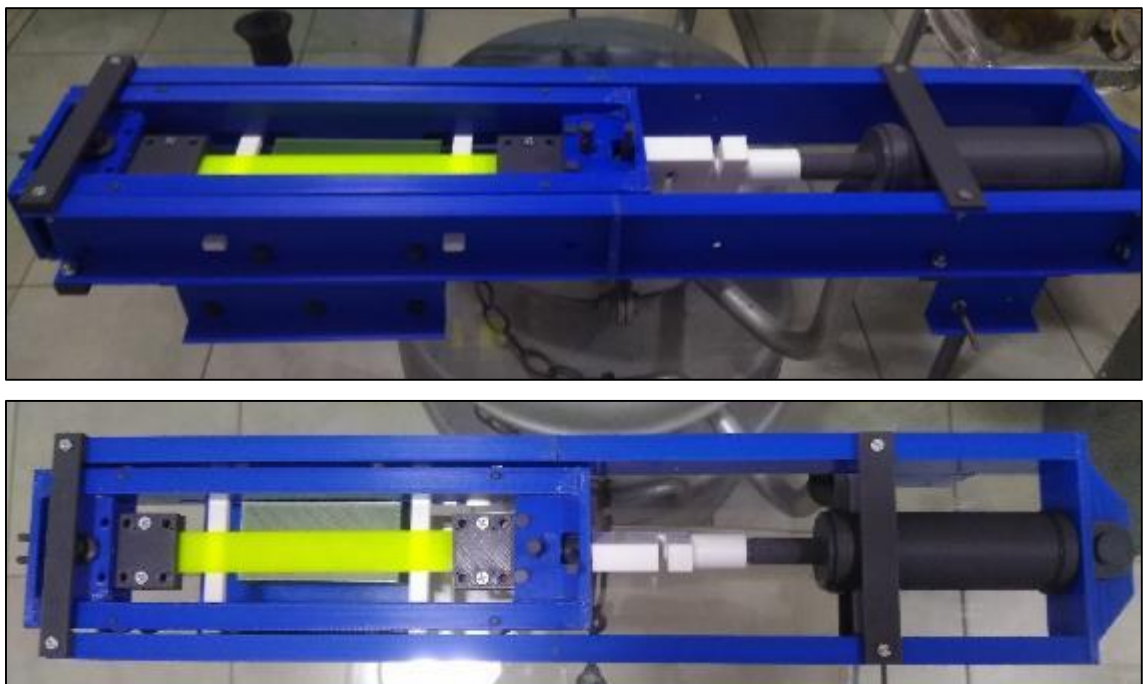


Figura 6.5 - Equipo de ensayo dinámico - Prototipo escala 1:4.



Figuras 6.6 - Equipo de ensayo dinámico finalizado.

## 6.2. Elaboración de probetas

Al igual que en los ensayos estáticos, este nuevo equipo se diseñó para reutilizar los restos de probetas de ensayos de flexión de hormigón para pavimentos por la gran disponibilidad de especímenes que permitían ahorrar mucho tiempo y dinero.

En los ensayos estáticos se podían utilizar los restos de probetas tal cual se encontraban porque tenían una cara perfectamente plana que permitía apoyar el soporte que contrastaba el efecto del gato hidráulico en un único sentido. Este caso, al ser sometidas a cargas alternadas, a las probetas hubo que mecanizarles la cara irregular (cara resultado de la

fractura por flexión) para obtener prismas de caras paralelas que se puedan fijar correctamente al bastidor. De esta manera, se obtenían probetas prismáticas de 15 x 15 x aprox. 28/30 cm.

Además de estos especímenes reciclados, se elaboraron probetas nuevas de la misma dimensión.



Figura 6.7 - Sistemas probeta de hormigón-lámina

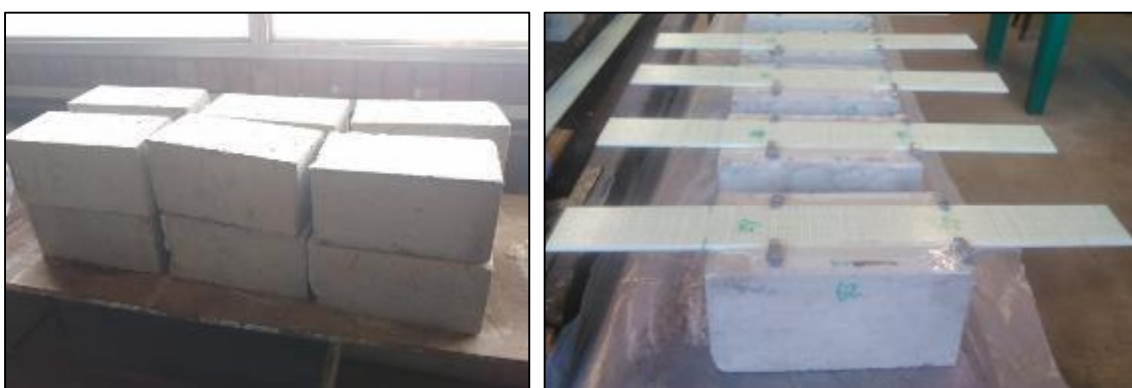


Figura 6.8 - Probetas con caras paralelas

#### 6.2.1. Determinación de la resistencia característica de las probetas recicladas

Para esta segunda serie de ensayos se utilizaron probetas recicladas de las cuales se disponían los valores de resistencia a rotura por flexión  $f_r$ . Para cada uno de esos resultados se obtuvo el valor de resistencia a compresión mediante la fórmula indicada en el reglamento CIRSOC 201 - 2013 como se mostró en el capítulo 3.

La resistencia a la compresión característica resultó ser:  $f'_c = 27.88\text{MPa}$ .

#### 6.2.2. Determinación de la resistencia característica de las probetas nuevas

Para esta segunda serie de ensayos se utilizaron también probetas nuevas prismáticas elaboradas para ser utilizadas en estos ensayos y su resistencia se obtuvo de los ensayos de las probetas cilíndricas testigo.

Como se mostró en el capítulo 3, la resistencia a la compresión característica resultó ser:

$f'_c = 22.84\text{MPa}$ .

### 6.3. Programación de los ensayos

El estudio de la respuesta frente a cargas cíclicas de los tres sistemas de vinculación lámina hormigón consistió principalmente en la evaluación de la resistencia frente a la aplicación de cargas alternadas. Para cada uno de los sistemas (EB-FRP, MF-FRP y EB-MF-FRP), se realizaron ensayos de cargas cíclicas escalonadas en función de los valores de resistencia estática. Finalmente, la investigación se concentró principalmente en los sistemas adheridos realizando sólo unos pocos ensayos de los sistemas de vinculación exclusivamente mecánica ya que este tipo de vinculación comenzaba a presentar deformaciones excesivas ya en los primeros ciclos inmediatamente fallaba la fricción entre lamina y hormigón resultando un sistema que se degradaba rápidamente, ojalamiento de la lámina, roturas en los bordes de la perforación del anclaje al hormigón aumentando la longitud de flexión del perno, generando grandes deformaciones y su pronta rotura con bajo ciclado y carga.

Al establecer el número de ciclos al que se debían someter las probetas se pensó en los ciclos de carga que se presentan en los sismos más frecuentes. En tal sentido se supuso razonable una resistencia de la probeta a la aplicación de 45 ciclos de carga divididos en tres escalones crecientes. Se propusieron cinco ciclos para cada uno de los dos primeros escalones, mientras que el último valor de carga cíclica se mantendría hasta la rotura de la probeta siempre y cuando se produjera antes de cien ciclos, considerando que este era un valor límite para el ensayo.

Como complemento de la investigación, se realizaron ensayos de cargas pulsantes, es decir cargas variables entre valores mínimos y máximos de un mismo sentido, para estudiar el comportamiento de refuerzos de estructuras sometidas a este tipo de sollicitaciones y ensayos alternativos en probetas con preparación especial de la superficie porque los estudios previos habían evidenciado que el mejoramiento de la adhesión superficial influía sobre la resistencia del sistema. El sentido de estos ensayos fue abrir una puerta a futuras investigaciones sobre estos parámetros.

### 6.4. Ensayos de cargas alternadas

Las cargas cíclicas alternadas se escalonaron en función de los valores de tensión promedio obtenidos de los ensayos de resistencia estática que se resumen en la Tabla N° 6.1.

Tabla 6.1 - Tensiones promedio obtenidas de los ensayos de resistencia estática

Sistema	T <sub>prom</sub> [MPa]
Láminas adheridas (EB-FRP)	2.52
Láminas adheridas y ancladas con un bulón central (EB-MF-FRP)	4.23
Láminas adheridas y ancladas con dos bulones (EB-MF-FRP)	5.12

También se realizaron ensayos dinámicos sobre probetas sólo abulonadas a partir de los valores promedios de la carga de rotura obtenidos en los ensayos estáticos.

Tabla 6.2 - Cargas promedio obtenidas de los ensayos de resistencia estática

Sistema	P <sub>prom</sub> [kN]
Láminas ancladas con un bulón central (MF-FRP)	23.27
Láminas ancladas con dos bulones (MF-FRP)	37.79

Se establecieron tres escalones de cargas alternadas con valores de porcentajes crecientes de la resistencia estática. Se comenzó cargando cada probeta con cinco ciclos del porcentaje menor, se continuó con cinco ciclos del porcentaje medio y por último se cargó con el porcentaje mayor hasta la rotura de la unión, poniendo como límite 100 ciclos para suspender el ensayo.

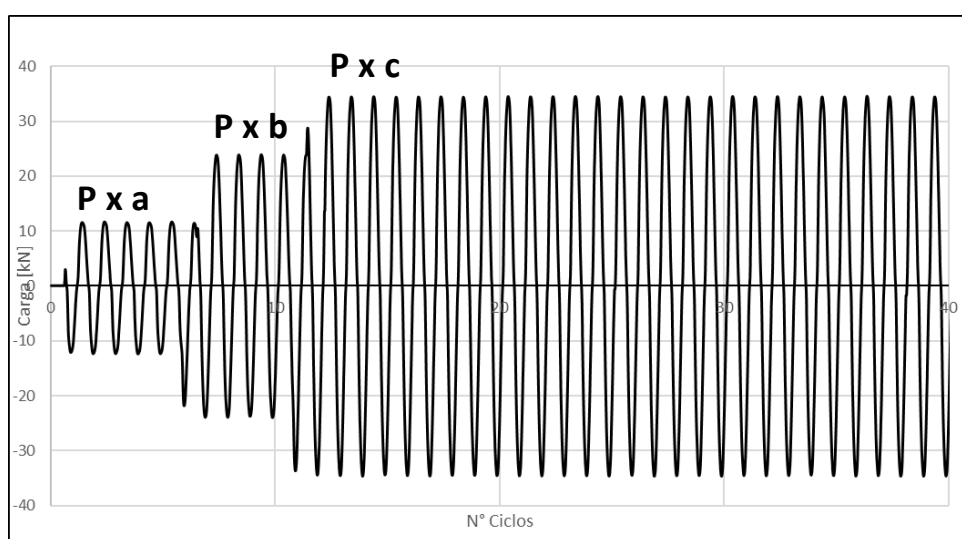


Figura 6.9 - Esquema de ciclado de cargas. P = Valor de rotura estático del espécimen. a/b/c: % del valor de P en cada escalón

Se utilizó la siguiente nomenclatura:

Tipo de Especimen:

- LP: Lamina Solo Pegada
- LP+1B: Lamina Pegada más un bulón de anclaje
- LP+2B: Lamina Pegada más dos bulones de anclaje

En todos los especímenes la longitud de la unión es de 20 cm, el aporte a la unión resulta, en el caso LP+1B de un bulón cada 20 cm, y en el caso LP+2B dos bulones cada 20 cm.

A continuación, se presentan los resultados de cada uno de los sistemas

6.4.1. Láminas adheridas (EB-FRP)

Las probetas correspondientes a este sistema de vinculación fueron numeradas del siguiente modo: 1 a 10, 19, 25 a 29, 51 a 56, 67 a 71.

Se comenzó ensayando con ciclos de carga alternadas en escalones crecientes de 20%, 40% y 60% de la carga máxima estática, Esto es, cinco ciclos variando entre +/-20%, luego otros cinco ciclos entre +/-40% y finalmente se subió a +/-60% hasta alcanzar la rotura de la probeta

o superar los 100 ciclos. Estos fueron los primeros ensayos y para ellos se utilizaron un mayor número de probetas, doce en total.

Luego se continuó ensayando cinco probetas con escalones de ciclos de mayor porcentaje (25%-50%-75%) y cinco con escalones de menor porcentaje (15%-30%-45%). Finalmente, se ensayaron otras cinco probetas con escalones de carga intermedios (17.5%-35%-52.5%).

Tabla 6.3 - Probetas sistema EB-FRP

Probeta N°	Escalón (%)	Cantidad
1 a 10 - 19 - 25	20/40/60	12
26 a 29 - 51	25/50/75	5
52 a 56	15/30/45	5
67 a 71	17.5/35/52.5	5

En la Tabla N° 6.4 se muestra para cada escalón de carga la cantidad de especímenes que superaron los ciclos aplicados. Se establece el límite convencional de 45 ciclos como porcentaje aceptable ante cargas sísmicas.

Tabla 6.4 - Número de probetas sistema EB-FRP que superaron n ciclos

Porcentaje de carga estática			Total Muestras	Probetas que superaron n ciclos																
1° %	2° %	3° %		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200
25,00%	50,00%	75,00%	5	5	5	4	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1
20,00%	40,00%	60,00%	12	12	12	11	11	11	10	9	9	9	9	9	8	8	8	8	4	4
17,50%	35,00%	52,50%	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	3	2	1	0	0	0
15,00%	30,00%	45,00%	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
TOTAL			27	27	27	25	25	24	23	22	21	21	20	20	18	16	15	14	9	9

En esta Tabla N° 6.5, en cambio, se indican los porcentajes de probetas que superaron los ciclos aplicados.

Tabla 6.5 - Porcentaje de probetas sistema EB-FRP que superaron n ciclos

Porcentaje de carga estática			Total Muestras	% de Probetas que superaron n ciclos																
1° %	2° %	3° %		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200
25,00%	50,00%	75,00%	5	100	100	80	80	60	60	60	60	60	60	60	40	40	40	40	20	20
20,00%	40,00%	60,00%	12	100	100	92	92	92	83	75	75	75	75	75	75	67	67	67	33	33
17,50%	35,00%	52,50%	5	100	100	100	100	100	100	100	80	80	80	80	60	40	20	0	0	0
15,00%	30,00%	45,00%	5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	80	80	80	80	80	80	80	80
TOTAL			27	100	100	93	93	89	85	81	78	78	74	74	67	59	56	52	33	33

A continuación, se muestra un gráfico en el que se representan en abscisas los números de ciclos y en ordenadas, el porcentaje de muestras que los van superando. De esta manera, se pudo ver que todas las probetas superaron los dos primeros escalones de carga (10 ciclos) y

comenzaron a desprenderse recién en el tercer escalón con diferente cantidad de ciclos resistentes. A manera de resumen, se confeccionó una curva global considerando la totalidad de las probetas ensayadas, esta curva consideraría la posibilidad de que la estructura estuviera sometida a ciclos de carga con diferentes porcentajes del valor máximo de su resistencia estática durante el evento.

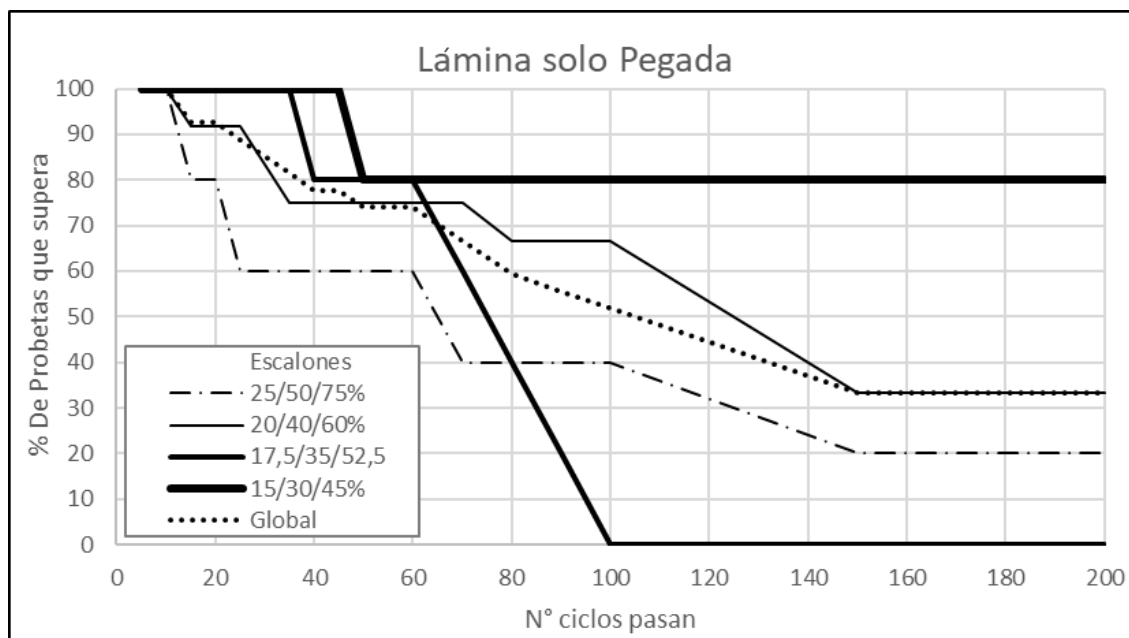


Figura 6.10 - Probetas sistema EB-FRP. Número de ciclos en función del porcentaje de probetas que los superan.

#### 6.4.2. Láminas adheridas y ancladas con un bulón central (EB-MF-FRP)

##### 1 bulón - Probetas 20 a 24, 30 a 34, 40 a 45, 62 a 66, 72 a 76

Para este sistema de vinculación se ensayaron cinco grupos de probetas con diferentes escalones de carga alternadas que se presentan en la Tabla N° 6.6.

Tabla 6.6 - Probetas sistema EB-MF-FRP con un bulón

Probeta N°	Escalón (%)	Cantidad
20 a 24	22.5/45/67.5	5
30 a 34 - 45	20/40/60	6
40 a 44	17.5/35/52.5	5
62 a 66	15/30/45	5
72 a 76	16/32/48	5

A continuación, se muestra para cada escalón de carga la cantidad de especímenes que superaron los ciclos aplicados.

Tabla 6.7 - Número de probetas sistema EB-MF-FRP con un bulón que superaron n ciclos

Porcentaje de cargas estática			Total Muestras	Probetas que superaron n ciclos																
1° %	2° %	3° %		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200
22,5%	45,0%	67,5%	5	5	3	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,0%	40,0%	60,0%	6	6	5	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17,5%	35,0%	52,5%	5	5	5	5	5	4	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16,0%	32,0%	48,0%	5	5	5	5	5	5	5	5	3	3	3	2	0	0	0	0	0	0
15,0%	30,0%	45,0%	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	2	2	2	0	0	0	0
TOTAL			26	26	23	22	19	17	14	12	8	8	7	4	2	2	0	0	0	0

En esta otra tabla, se indican los porcentajes de probetas que superaron los ciclos aplicados.

Tabla 6.8 - Porcentaje de probetas sistema EB-MF-FRP con un bulón que superaron n ciclos

Porcentaje de cargas estática			Total Muestras	% de Probetas que superaron n ciclos																
1° %	2° %	3° %		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200
22,5%	45,0%	67,5%	5	100	60	60	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,0%	40,0%	60,0%	6	100	83	67	50	33	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17,5%	35,0%	52,5%	5	100	100	100	100	80	60	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16,0%	32,0%	48,0%	5	100	100	100	100	100	100	100	60	60	60	40	0	0	0	0	0	0
15,0%	30,0%	45,0%	5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	80	40	40	40	0	0	0	0
TOTAL			26	100	88	85	73	65	54	46	31	31	27	15	8	8	0	0	0	0

A continuación, se muestra el gráfico en el que se representan en abscisas los números de ciclos y en ordenadas, el porcentaje de muestras que los van superando y la curva global considerando la totalidad de las probetas ensayadas.

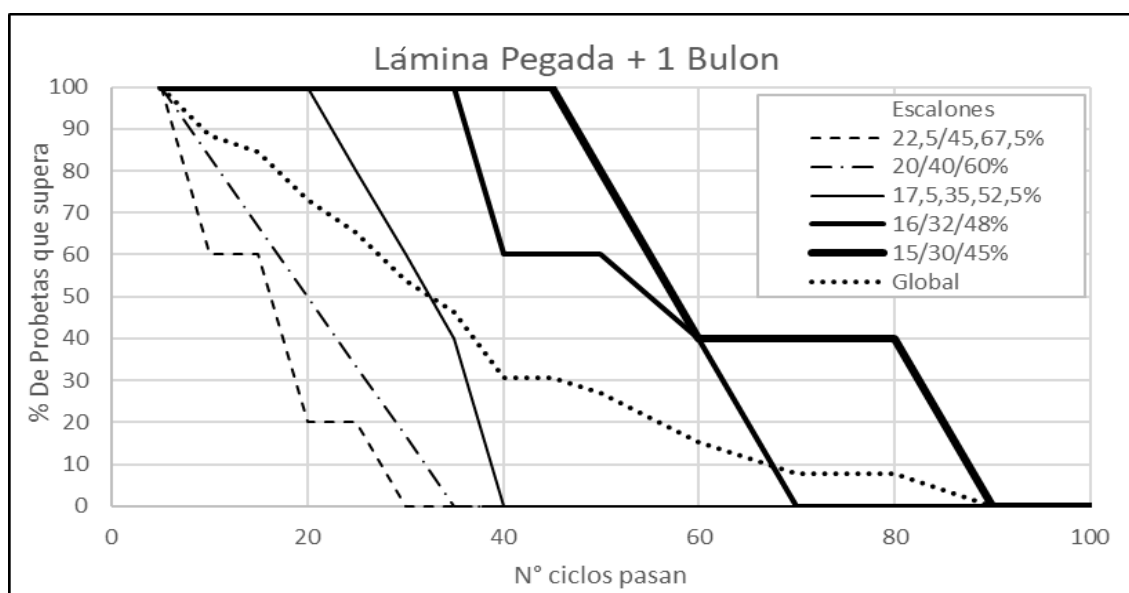


Figura 6.11 - Probetas sistema EB-MF-FRP con un bulón. Número de ciclos en función del porcentaje de probetas que los superan.

6.4.3. Láminas adheridas y ancladas con dos bulones (EB-MF-FRP)

2 bulones - Probetas 35 a 39, 46 a 50, 57 a 61, 77 a 81

Para este sistema de vinculación se ensayaron cuatro grupos de probetas con diferentes escalones de carga alternadas que se presentan en la Tabla N° 6.9.

Tabla 6.9 - Probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones

Probeta N°	Escalón (%)	Cantidad
35 - 36 - 46 a 48	20/40/60	5
37 a 39 - 49 - 50	15/30/45	5
57 a 61	12/24/36	5
77 a 81	13.5/27/40.5	5

A continuación, se muestra para cada escalón de carga la cantidad de especímenes que superaron los ciclos aplicados.

Tabla 6.10 - Número de probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones que superaron n ciclos

Porcentaje de cargas estática			Total Muestras	Probetas que superaron n ciclos																
1°	2°	3°		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200
%	%	%																		
20,0%	40,0%	60,0%	5	5	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,0%	30,0%	45,0%	5	5	5	5	5	4	3	3	3	3	2	1	1	1	1	1	0	0
13,5%	27,0%	40,5%	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	3	2	2	2	2	2
12,0%	24,0%	36,0%	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	0	0	0
TOTAL			20	20	20	17	16	15	14	13	13	13	12	10	9	8	7	2	2	2

En esta otra tabla, se indican los porcentajes de probetas que superaron los ciclos aplicados.

Tabla 6.11 - Porcentaje de probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones que superaron n ciclos

Porcentaje de cargas estática			Total Muestras	% de Probetas que superaron n ciclos																
1°	2°	3°		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200
%	%	%																		
20,0%	40,0%	60,0%	5	100	100	40	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,0%	30,0%	45,0%	5	100	100	100	100	100	80	60	60	60	60	40	20	20	20	20	0	0
13,5%	27,0%	40,5%	5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	80	60	40	40	40	40	40
12,0%	24,0%	36,0%	5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	80	0	0	0
TOTAL			20	100	100	85	80	75	70	65	65	65	65	60	50	45	40	35	10	10

A continuación, se muestra el gráfico en el que se representan en abscisas los números de ciclos y en ordenadas, el porcentaje de muestras que los van superando y la curva global considerando la totalidad de las probetas ensayadas.

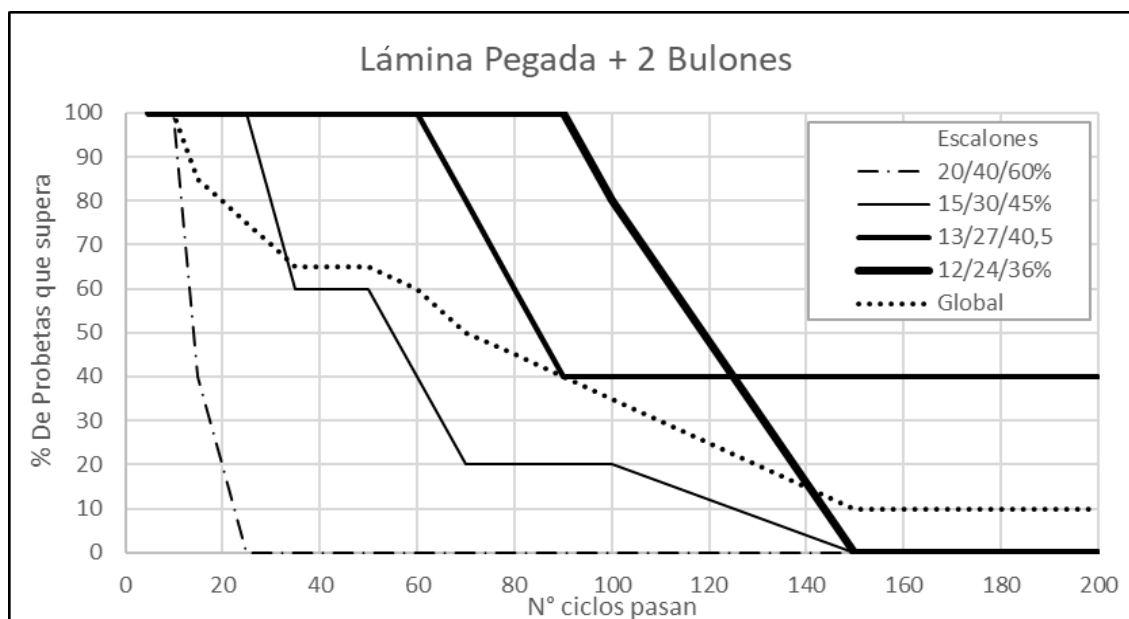


Figura 6.12 - Probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones. Número de ciclos en función del porcentaje de probetas que los superan.

6.4.4. Láminas solo ancladas (MF-FRP) con un bulón central y con dos bulones

Se confeccionaron sólo ocho probetas, cuatro con un bulón central y cuatro con dos bulones. No se realizaron más ensayos de este tipo porque se pudo comprobar que, a partir de pocos ciclos, este sistema comenzaba a presentar deformaciones excesivas debidas al ojalamiento de las láminas y al aplastamiento del hormigón producido por la presión de los pernos, sistema completamente dislocado. A pesar de que estas deformaciones provocaban solicitaciones alternadas de flexión y corte en los pernos que producían su rotura por fatiga a elevado numero de ciclos.

1 bulón - Probetas 11 a 14 / 2 bulones - Probetas 15 a 18

En este caso se ensayaron solo cuatro probetas de cada tipo con escalones de carga 20%-40%-60%.

Tabla 6.12 - Probetas sistema MF-FRP con uno y dos bulones

Probeta Nº	Bulones	Escalón (%)	Cantidad
11 a 14	1 bulón	20/40/60	4
15 a 18	2 bulones	20/40/60	4

A continuación, se muestra para cada grupo de probetas la cantidad de especímenes que superaron los ciclos aplicados.

Tabla 6.13 - Número de probetas sistema MF-FRP con un bulón que superaron n ciclos

Porcentaje de cargas estática			Total Muestras	Probetas que superaron n ciclos																
1°	2°	3°		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200
%	%	%																		
20,0%	40,0%	60,0%	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	2	1	1	0			

Tabla 6.14 - Número de probetas sistema MF-FRP con dos bulones que superaron n ciclos

Porcentaje de cargas estática			Total Muestras	Probetas que superaron n ciclos																
1°	2°	3°		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200
%	%	%																		
20,0%	40,0%	60,0%	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	2	2	2	2	0	0

En estas otras tablas, se indican los porcentajes de probetas que superaron los ciclos aplicados.

Tabla 6.15 - Porcentaje de probetas sistema MF-FRP con un bulón que superaron n ciclos

Porcentaje de cargas estática			Total Muestras	% de Probetas que superaron n ciclos																
1°	2°	3°		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200
%	%	%																		
20,0%	40,0%	60,0%	4	100	100	100	100	100	100	100	100	75	75	50	25	25	0	0	0	0

Tabla 6.16 - Porcentaje de probetas sistema MF-FRP con dos bulones que superaron n ciclos

Porcentaje de cargas estática			Total Muestras	% de Probetas que superaron n ciclos																
1°	2°	3°		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200
%	%	%																		
20,0%	40,0%	60,0%	4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	75	50	50	50	50	0	0

A continuación, se muestra el gráfico en el que se representan en abscisas los números de ciclos y en ordenadas, el porcentaje de muestras que los van superando y la gráfica de las probetas solo pegadas con el mismo escalón de cargas.

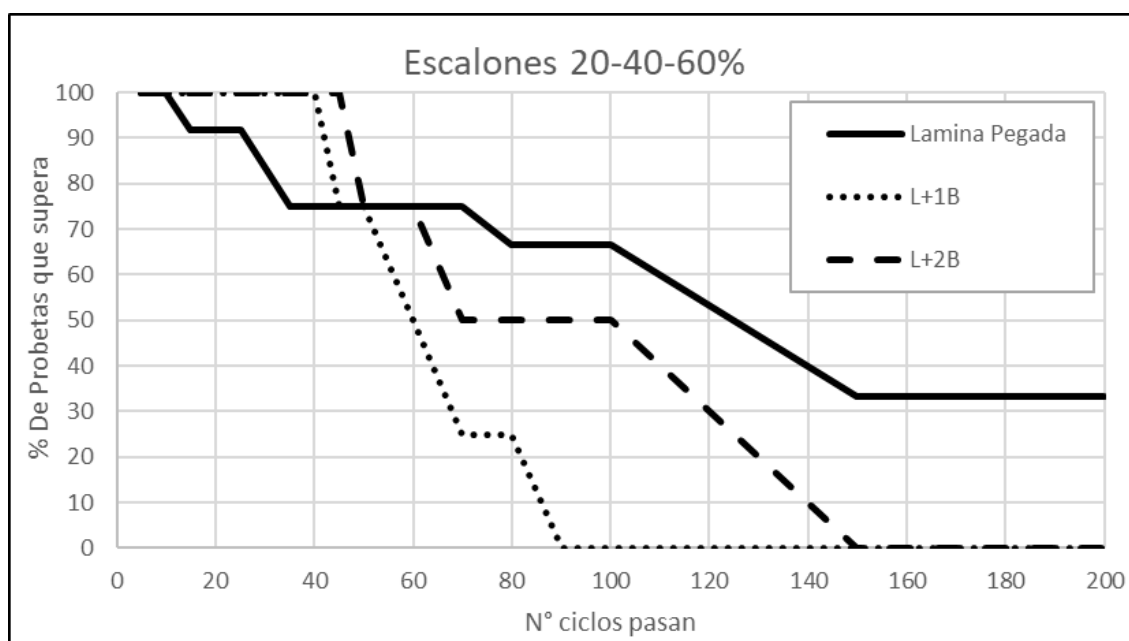


Figura 6.13 - Probetas sistema MF-FRP con uno y dos bulones. Número de ciclos en función del porcentaje de probetas que los superan comparados con el sistema EB-FRP

## 6.5. Ensayos de cargas pulsantes

Se realizaron 18 ensayos de cargas pulsantes, 9 sobre probetas solo adheridas y 9 sobre probetas adheridas con dos bulones. Los valores máximos y mínimos de cargas a aplicar se establecieron, al igual que en los ensayos anteriores, como porcentajes de las tensiones promedio obtenidas en los ensayos de cargas estáticas.

En este caso, no se aplicaron escalones de carga, sino que se decidió ciclar entre valores máximos y mínimos.

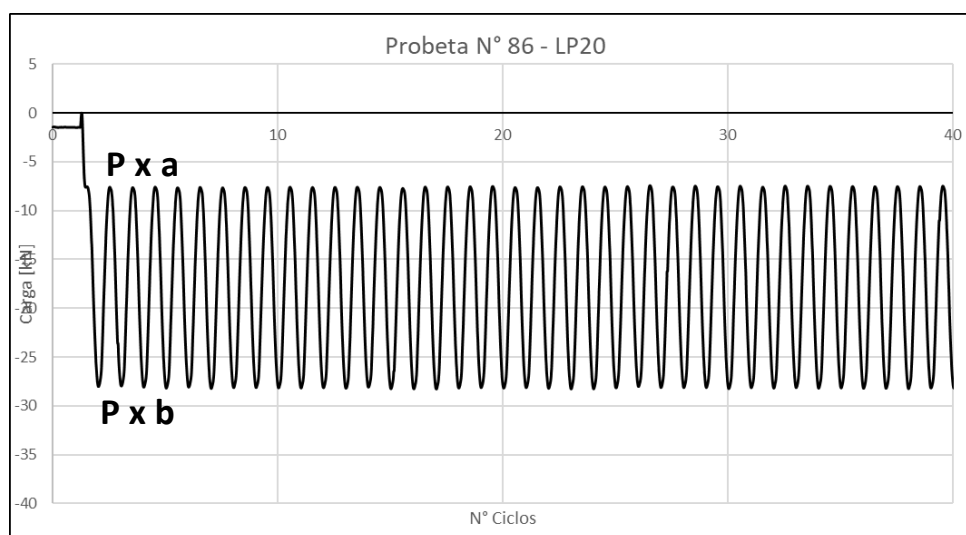


Figura 6.14 - Esquema de cargas pulsantes. P = Valor de rotura estático del espécimen. a/b: % máximo y mínimo de P

### 6.5.1. Láminas adheridas (EB-FRP)

Se ensayaron las probetas 82 a 90. Se comenzó con escalones de carga entre 5% y 60% de la carga de rotura del ensayo estático. Se superaron los 100 ciclos sin problemas, en la última parte del ensayo de la probeta 83 se aumentó la carga máxima y siguió sin romperse la probeta. La tercera probeta 84 se ensayó variando entre 5% y 75%. Para las últimas probetas se aumentó el valor mínimo y se mantuvo el máximo. Los escalones de variación se presentan en la Tabla N° 6-17:

Tabla 6.17 - Probetas sistema EB-FRP

Probeta N°	Escalón (%)	Cantidad
82 - 83	5/60	2
84	5/75	1
85 a 87	20/75	3
88 a 90	50/75	3

En todos los casos se superaron los 100 ciclos.

A continuación, se muestra para cada escalón de carga la cantidad de especímenes que superaron los ciclos aplicados.

Tabla 6.18 - Número de probetas sistema EB-FRP con dos bulones que superaron n ciclos

Porcentaje de carga estática		Total Muestras	Probetas que superaron n ciclos																
Min %	Max %		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200
5,00%	75,00%	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0
5,00%	60,00%	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
20,00%	75,00%	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	0
50,00%	75,00%	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0
TOTAL		9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	8	7	7	7	3	0

En esta otra tabla, se indican los porcentajes de probetas que superaron los ciclos aplicados.

Tabla 6.19 - Porcentaje de probetas sistema EB-FRP con dos bulones que superaron n ciclos

Porcentaje de carga estática		Total Muestras	% de Probetas que superaron n ciclos																
Min %	Max %		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200
5,00%	75,00%	2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0
5,00%	60,00%	1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0
20,00%	75,00%	3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	67	67	67	67	33	0	0
50,00%	75,00%	3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0
TOTAL		9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	89	78	78	78	33	0	0

A continuación, se muestra el gráfico en el que se representan en abscisas los números de ciclos y en ordenadas, el porcentaje de muestras que los van superando y la curva global considerando la totalidad de las probetas ensayadas.

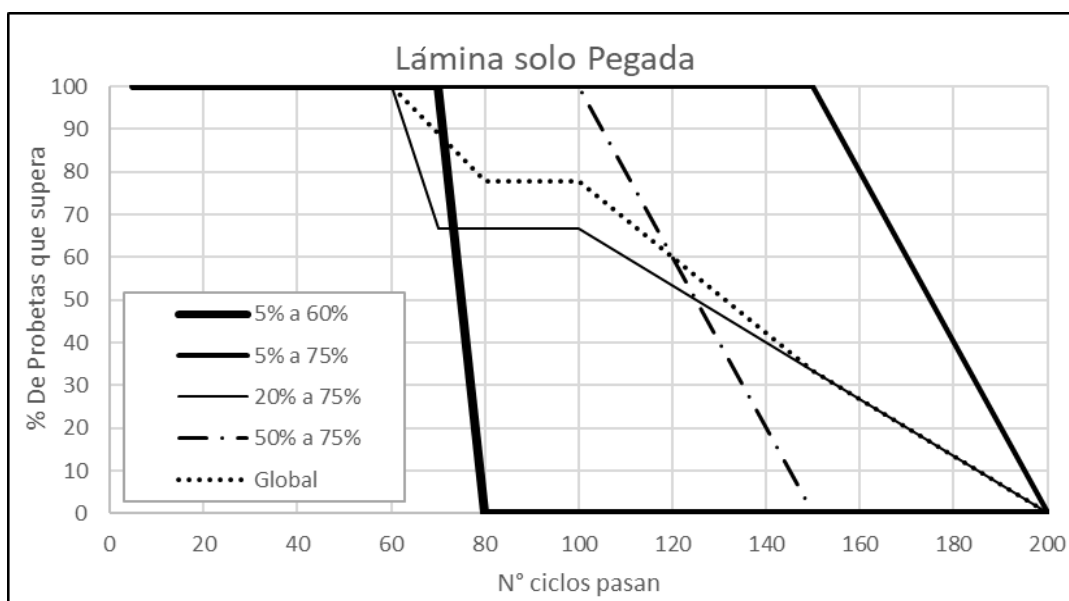


Figura 6.15 - Probetas sistema EB-FRP. Número de ciclos en función del porcentaje de probetas que los superan.

6.5.2. Láminas adheridas y ancladas con dos bulones (EB-MF-FRP)

Se ensayaron las probetas 91 a 99 manteniendo el valor máximo de carga y variando el valor mínimo. Se comenzó con escalones de carga entre 5% y 60% de la carga de rotura del ensayo estático, se siguió con escalones entre 20 y 60% y se finalizó con 40% y 60% como se muestra en la Tabla N° 6.20:

Tabla 6.20 - Probetas sistema EB-FRP

Probeta N°	Escalón (%)	Cantidad
91 - 93	5/60	3
94 a 96	20/60	3
97 a 99	40/60	3

En todos los casos se superaron los 100 ciclos.

A continuación, se muestra para cada escalón de carga la cantidad de especímenes que superaron los ciclos aplicados.

Tabla 6.21 - Número de probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones que superaron n ciclos

Porcentaje de carga estática		Total Muestras	Probetas que superaron n ciclos																
Min %	Max %		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200
5,00%	60,00%	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0
20,00%	60,00%	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	0
40,00%	60,00%	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0
TOTAL		9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	2	0

En esta otra tabla, se indican los porcentajes de probetas que superaron los ciclos aplicados.

Tabla 6.22 - Porcentaje de probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones que superaron n ciclos

Porcentaje de carga estática		Total Muestras	% de Probetas que superaron n ciclos																
Min %	Max %		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200
5,00%	60,00%	3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0
20,00%	60,00%	3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	67	0
40,00%	60,00%	3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0
TOTAL		9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	22	0

A continuación, se muestra el gráfico en el que se representan en abscisas los números de ciclos y en ordenadas, el porcentaje de muestras que los van superando y la curva global considerando la totalidad de las probetas ensayadas.

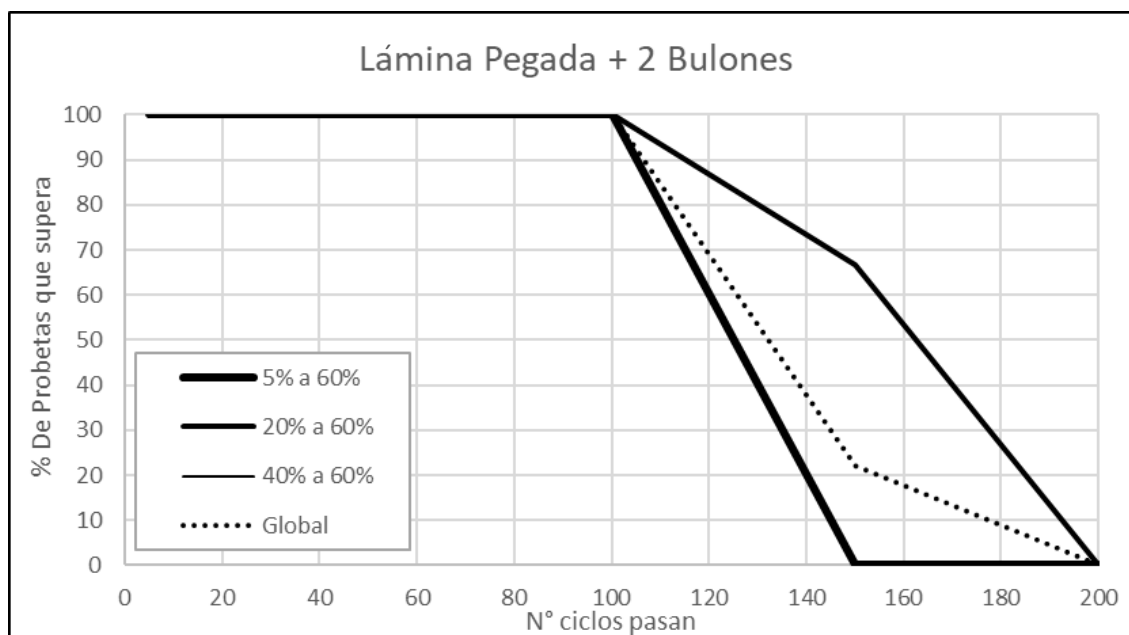


Figura 6.16 - Probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones. Número de ciclos en función del porcentaje de probetas que los superan.

### 6.6. Ensayos de cargas alternadas con tratamiento superficial

La creación de rugosidades en la superficie del hormigón en contacto con los refuerzos adheridos se presenta como una técnica comprobada de mejoramiento de las prestaciones del sistema [Matana M., G. Galecki, N. Maerz, A. Nanni (2005)], [Mohammadi M., D. Mostofinejad, M. Barghian (2017)], [Mostofinejad D., S. Shameli, A. Hosseini (2012)].

Además, en el caso de uniones mecánicas, las rugosidades superficiales también representan una condición favorable para la transmisión de esfuerzos tangenciales [CIRSOC 201 (2005)].

Tomando en cuenta estos antecedentes, en este trabajo se quiso comprobar la influencia de tratamientos superficiales en sistemas adheridos y en sistemas adheridos y abulonados.

Se realizaron diez ensayos de cargas alternadas sobre probetas a las cuales se les realizó un tratamiento a la superficie de hormigón creando rugosidades intencionales con ranuras de 2 mm de profundidad producidas con un disco de amoladora. Se ensayaron cinco probetas solo adheridas y cinco probetas adheridas con dos bulones.

La primera probeta de cada serie fue sometida a un ensayo estático para determinar la carga máxima y las otras cuatro se sometieron a cargas alternadas en escalones de carga establecidos como porcentajes del ensayo estático con el mismo criterio de los ensayos principales, esto es, cinco escalones de carga baja, cinco de carga media y luego la aplicación de la carga máxima hasta la rotura de la probeta.

### 6.6.1. Láminas adheridas (EB-FRP)

Se ensayaron las probetas 100 a 104. Se comenzó con un ensayo estático de la probeta 100 para determinar su carga de rotura que resultó de 46.28 kN. La tensión tangencial considerando el área de contacto de 7.5 cm x 20 cm resultó 3.09 MPa, 23% superior al valor de carga estática promedio de las probetas solo adheridas sin preparación de superficie que era 2.52 MPa. Para comparar con los ensayos principales, los escalones de carga aplicados se calcularon como porcentajes de la carga estática original. Se adoptó un escalón único de 25%-50%-75%.

Tabla 6.23 - Probetas sistema EB-FRP

Probeta N°	Escalón (%)	Cantidad
100	Ensayo estático	1
101 a 104	25/50/75	4

En todos los casos se superaron los 100 ciclos.

### 6.6.2. Láminas adheridas y ancladas con dos bulones (EB-MF-FRP)

Se ensayaron las probetas 105 a 109. Se comenzó con un ensayo estático de la probeta 105 para determinar su carga de rotura que resultó de 83.70 kN. La tensión tangencial considerando el área de contacto de 7.5 cm x 20 cm resultó 5.58 MPa, 9% superior al valor de carga estática promedio de las probetas adheridas con dos bulones sin preparación de superficie que era 5.12 MPa. Para comparar con los ensayos principales, los escalones de carga aplicados se calcularon como porcentajes de la carga estática original. Se adoptó un escalón único de 20%-40%-60%.

Tabla 6.24 - Probetas sistema EB-MF-FRP

Probeta N°	Escalón (%)	Cantidad
105	Ensayo estático	1
106 a 109	20/40/60	4

En todos los casos se superaron los 100 ciclos.



Figura 6.17 – Ranurado de la superficie H° y modo de falla

# CAPÍTULO 7

---

## 7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### 7.1. Ensayos de fatiga

Los pocos ensayos de fatiga realizados no permiten obtener resultados concluyentes si bien dan algunos indicios sobre el comportamiento a fatiga del sistema de refuerzo EB-MF-FRP. Estos ensayos fueron los primeros que se realizaron con la central hidráulica Bosch y como se comentó en el punto 4.2.- no se llevó adelante una investigación completa. Sin embargo, vale la pena analizar lo sucedido en cada uno de los pocos casos ensayados.

La primera viga V1 se ensayó aplicando cargas pulsantes en los gatos considerando como referencia los valores del orden del 50 % de los valores de rotura estáticos aplicados a series vigas (ver Tabla 4.1 y 4.2). Este ensayo fue viciado por la aplicación de una sobrecarga imprevista que produjo el desprendimiento de la lámina con solo 145980 ciclos de carga. Sin embargo, se continuó el ensayo hasta el corte de los bulones por unos 18.000 ciclos más pudiendo obtener un valor de ciclos de rotura por fatiga de los mismos.

En el ensayo de la viga V2 se alcanzó casi un millón de ciclos (948.960) sin que se apreciaran más que unas pocas fisuras en el hormigón y manteniéndose prácticamente intacto el refuerzo. Lamentablemente, al reiniciar el equipo, se produjo otra sobrecarga imprevista que generó la falla de la viga.

El ensayo de la tercera viga V3 tuvo que ser interrumpido porque la máquina tuvo que ser enviada al proveedor para mantenimiento y reforma programadas con anterioridad. Cuando se interrumpió el ensayo, se habían alcanzado 648410 ciclos de carga sin presentar deterioros ni en el hormigón ni en el refuerzo.

Estos ensayos permiten inferir que someter a fatiga de cargas pulsantes mejora las prestaciones del refuerzo ya que las roturas se debieron a fenómenos ajenos a los ensayos.

### 7.2. Ensayos estáticos de resistencia del sistema lámina-hormigón

Los resultados de los numerosos ensayos estáticos para evaluar la resistencia del sistema lámina hormigón con los tres tipos de vinculaciones estudiadas, esto es, EB-FRP, MF-FRP y EB-MF-FRP, permiten establecer en algunos casos hipótesis para el dimensionamiento de estos sistemas de refuerzo y, en otros casos, los hallazgos posibilitan inferir mejoras en el funcionamiento que deberían profundizarse en investigaciones futuras.

Como se vio, se realizaron dos tipos de ensayos estáticos. En primer lugar, se experimentó con ensayos de tracción centrada, pero luego, debido a lo laborioso/costoso que resultaron, se decidió cambiar el ensayo por un sistema de tracción excéntrica que posibilitó realizar un buen número de pruebas con mayor facilidad y economía.

### 7.2.1. Ensayos de tracción centrada

Se confeccionaron once probetas de hormigón armado con dos láminas pegadas en caras opuestas que se ensayaron con la máquina de tracción, aplicando la carga de manera sostenida hasta la carga de rotura. No se ensayaron probetas de los sistemas abulonados.

Se pudo verificar que los ensayos no siguieron un patrón único de falla, ya que resultaron combinaciones de roturas de los bloques de hormigón y desprendimientos parciales de las fibras. De esta manera, resultó muy dificultoso calcular con precisión el área de contacto involucrada para poder establecer las tensiones de diseño del sistema.

Otro aspecto a tener en cuenta en el análisis de resultados es que la rotura no se produjo de manera simétrica. Esto es, una vez que fallaba una de las caras, la otra resultaba sobrecargada y, por lo tanto, el valor de tensión calculado arrojaba valores menores al que hubiera resultado si las dos caras hubiesen trabajado conjuntamente.

En efecto, el valor de tensión promedio obtenido fue de 1.43 MPa, mucho menor al valor de 2.52 MPa obtenido en los ensayos de tracción excéntrica que se realizaron posteriormente.

Como se mencionó, debido a la obtención de resultados poco confiables sumados a las dificultades en la confección de probetas que encarecían y complicaban la realización de un número adecuado de especímenes, se decidió idear un nuevo método de ensayo.

### 7.2.2. Ensayos de tracción excéntrica

Los ensayos de tracción excéntrica resultaron ser muy simples, tanto en lo que se refiere a la confección de las probetas como a la realización de los ensayos propiamente dichos. Por lo tanto, se pudo obtener una considerable cantidad de valores de carga de rotura para los diferentes medios de vinculación estudiados. A continuación, se analizan los resultados de cada uno de los sistemas y se realiza una comparación entre ellos.

#### a) Sistema EB-FRP

##### Probetas 1 a 10

Estas probetas fueron el primer grupo que se ensayó luego de haber puesto a punto el equipo. Como las áreas de pegado no fueron uniformes, se decidió presentar como indicador la tensión de rotura tangencial resultante de dividir en cada caso la carga por el área de contacto. La tensión promedio obtenida fue de 2.52 MPa y la desviación standard, 0.42 MPa, por lo que la tensión característica 5% resultó 1.75 MPa. A través del coeficiente de variación  $\delta = s/T_{prom} = 0.167$  podemos valorar la dispersión de los resultados, en principio consideramos que es un valor razonable en lo que refiere a la confiabilidad de los ensayos. (la relación entre los valores característicos y medio es del 70%).

Las roturas se produjeron generalmente en el recubrimiento evidenciando un correcto pegado de la lámina. Algunas presentaron rotura mixta, en algunas zonas se despegó la lámina y sólo una probeta evidenció un problema de pegado porque se despegó casi en totalidad la lámina arrastrando muy poco hormigón.

Estos valores obtenidos para el sistema de vinculación más difundido se toman como referencia para comparar las capacidades resistentes de los otros sistemas de vinculación con ayuda mecánica.

#### b) Sistema EB-MF-FRP

##### 1 bulón - Probetas P1 a P10

Las diez probetas P1 a P10 se elaboraron agregando a la lámina pegada con resina un bulón Ø3/8" (9,5 mm) ajustado sobre una arandela y ubicado con una separación del agujero al borde mínima de aproximadamente 6 cm. Estas eran las características de las uniones abulonadas utilizadas en los ensayos generales de vigas [Busnelli 2018].

La tensión promedio obtenida fue de 4.23 MPa y la desviación standard, 0.53 MPa, por lo que la tensión característica 5% resultó 3.25 MPa. El coeficiente de variación  $\delta = 0.126$ , valor que indica una mayor confiabilidad que el sistema de lamina solo pegada (la relación entre los valores característicos y medio resulta del 77%).

Comparando con el ensayo sobre sistemas EB-FRP, se observa que se incrementó el valor de la tensión de rotura un 68% ( $4.23/2.52 = 1.68$ ).

Una vez rota la unión resinosa, se reinició el ensayo hasta producir la rotura de los bulones. El valor de carga de rotura promedio fue de 26.48 kN y la desviación standard, 2.34 kN, por lo que el valor característico 5% resultó 22.18 kN. La relación entre los valores característicos y medio resultó ser 84%, buena receptibilidad de la prueba.

Para comparar este valor de carga de rotura con el ensayo sobre sistemas EB-FRP, **se puede** suponer que el área de incidencia del bulón se puede obtener como el producto del ancho de la lámina, esto es 7.5 cm, por 20 cm que es aproximadamente la longitud involucrada en estas probetas. En ese caso, la carga promedio que se obtendría pegando la lámina con resina sería de  $0.252 \text{ kN/cm}^2 \times 7.5 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} = 37,80 \text{ kN}$ , o sea, un valor aproximadamente un 43% mayor ( $37,80/26.48 = 1.43$ ).

##### 2 bulones - Probetas Q1 a Q10

Las probetas Q1 a Q10 arrojaron una tensión promedio de 5,12 MPa con una desviación standard, 0.40 MPa, por lo que la tensión característica 5% resultó 4,39 MPa. El coeficiente de variación  $\delta = 0.078$ , indicando mayor confiabilidad que el sistema anterior de lamina pegada + un bulón. (la relación entre los valores característicos y medio resulta del 86%).

Comparando con el ensayo sobre sistemas EB-FRP, observamos que se duplicó el valor de la tensión de rotura ( $5.12/2.52 = 2.03$ ), mejorando también el índice de variación  $\delta$  de 0.167 a 0.078 y la confiabilidad de la unión.

Si, en cambio, lo se compara con el ensayo anterior de probetas con un solo bulón se obtendrá  $5.12/4.23 = 1.21$ , mejorando también el índice de variación  $\delta$  de 0.126 a 0.078 y la confiabilidad de la unión.

El valor de carga de rotura promedio de los bulones una vez rota la unión resinosa fue de 58.50 kN y la desviación standard, 8.47 kN, por lo que el valor característico 5% resultó 42.97

kN. El coeficiente de variación  $\delta = 0.145$ , (la relación entre los valores característicos y medio resultó ser 73%), buena repetibilidad de la prueba.

Al igual que en el caso anterior, para comparar este valor con el ensayo sobre sistemas EB-FRP, (37,80 kN), se observa que el agregado de un bulón hace que se supere la carga obtenida en el sistema resinoso un 55% ( $58.50/37,80 = 1.55$ ). mejorando también el índice de variación  $\delta$  de 0.167 a 0.145 y la confiabilidad de la unión.

Comparando en cambio los valores de carga de rotura de los bulones en los dos ensayos se tiene  $58.50/26.48 = 2.21$ . O sea que con dos bulones se obtuvo un valor mayor al doble que en el caso de un bulón, prácticamente se cumple la linealidad resultante de sumar un bulón.

#### c) Sistema MF-FRP

##### 1 bulón - Probetas A1 a A22

Al igual que en el sistema EB-MF-FRP, las diez probetas iniciales A1 a A10 se elaboraron con un bulón  $\varnothing 3/8"$  (9.5 mm) ajustado sobre una arandela y ubicado con una separación del agujero al borde mínima de aproximadamente 6 cm.

El valor de carga de rotura promedio obtenido en estos diez ensayos fue de 23.27 kN y la desviación standard, 1.07 kN, por lo que el valor característico 5% resultó 21.30 kN. El coeficiente de variación  $\delta = 0.046$ , (la relación entre los valores característicos y medio resultó ser 92%), valor muy bajo que demuestra buena receptibilidad de la prueba.

Comparando el valor medio con el obtenido en el ensayo sobre sistemas EB-FRP, suponiendo la misma área de incidencia de los casos anteriores (37,80kN), se observa que ese valor resulta un 62% mayor ( $37,80/23,27 = 1.62$ ).

Si, en cambio, la comparación se hace con el valor de carga promedio que se tuvo para la rotura del bulón luego del despegado de la lámina en los ensayos EB-MF-FRP, se tiene:  $23.27/26.48 = 0.88$ , o sea valores muy próximos.

En esta serie, además de los ensayos programados, se experimentaron otros parámetros para observar si se producían variaciones significativas:

- las probetas A11 a A14 se confeccionaron con un bulón de mayor diámetro  $\varnothing 7/16"$  (11.1 mm);
- las probetas A15 y A16 se confeccionaron con el mismo bulón original de  $\varnothing 3/8"$  (9.5 mm), pero disminuyendo la distancia al borde a 3 cm para provocar el desgarramiento.

Los resultados obtenidos fueron los esperables. En el caso de las probetas A11 a A14, el valor de carga de rotura promedio obtenido fue de 28.50 kN y la desviación standard, 0.61 kN, por lo que el valor característico 5% resultó 27.06 kN. La dispersión de resultados hizo que la relación entre los valores característicos y medio sea del 95%, o sea buena repetitividad. El incremento de 17 % en el diámetro del bulón (36% de incremento de área) produjo un incremento del 22% ( $28.50/23.27 = 1.22$ ).

En el caso de las probetas A15 y A16, como se supuso, la menor distancia al borde produjo el desgarramiento de la lámina, pero el valor de la carga no resultó sustancialmente menor que en el caso anterior.

Otro parámetro que se quiso analizar fue el mejoramiento de la distribución de presiones para minimizar el desgarramiento en la zona del agujero. Se probaron tres formas alternativas de sujeción, manteniendo la reducida distancia de 3 cm para comparar los resultados con el caso anterior:

- a las probetas A17 y A18 se le colocaron dos arandelas, la segunda de mayor diámetro;
- a las probetas A19 y A20 se les dispuso una chapa de distribución;
- a las probetas A21 y A22 se les colocó una cuchilla que presionaba transversalmente la lámina.

Los resultados obtenidos no mostraron diferencias sustanciales con respecto a la vinculación tradicional de las probetas A15 y A16.

### 2 bulones - Probetas B1 a B6, A23 a A27-A39-A40 y A33(A)-A34(A)-A38(A)

En este caso se ensayaron tres grupos de probetas:

- B1 a B6 - distancia del bulón extremo al borde de la lámina 3 cm
- A23 a A27-A39-A40 - distancia del bulón extremo al borde de la lámina 6 cm
- A33(A)-A34(A)-A38(A) - distancia del bulón extremo al borde de la lámina 6 cm - probetas de hormigón armado

En el primer grupo el valor de carga de rotura promedio obtenido fue de 37.79 kN y la desviación standard, 2.86 kN, por lo que el valor característico 5% resultó 32.03 kN. La dispersión de resultados hizo que la relación entre los valores característicos y medio sea del 85%, buena repetitividad de la prueba.

En el segundo grupo los valores obtenidos fueron de 39.11 kN para el valor promedio, 3.45 la desviación standard y 32.41 kN el valor característico 5%. La dispersión de resultados hizo que la relación entre los valores característicos y medio sea del 83%, similar al caso anterior.

La comparación entre estos dos primeros grupos muestra que el haber aumentado la separación al borde del último agujero mejoró en un 3 % el valor promedio de resistencia.

Las tres probetas elaboradas con bloques de hormigón armado arrojaron un valor de carga de rotura promedio de 42.71 kN, 9 % superior al caso anterior que tenía la misma separación al borde libre.

Si se comparan el valor promedio obtenido para las probetas A1 a A10 con un solo bulón con las A23 a A27-A39-A40 que tienen la misma distancia al borde libre se obtiene que la disposición de un segundo bulón incrementó en 68 % la carga de rotura ( $39.11 \text{ kN} / 23.27 \text{ kN} = 1.68$ ). O sea que el agregado de un bulón no alcanzó a duplicar la carga de rotura.

Si, en cambio, se comparan los resultados de estas pruebas con el ensayo sobre sistemas EB-FRP, suponiendo la misma área de incidencia considerada en el punto anterior que arrojaba un valor de carga promedio de 37,80 kN, se observa que los valores son equivalentes ( $37,80/37.79 = 1.00$  para separación de 3 cm y  $37,80/39.11 = 0.97$  para separación de 6 cm).

Si, en cambio, la comparación se hace con el valor de carga promedio que se tuvo para la

rotura de los bulones luego del despegado de la lámina en los ensayos EB-MF-FRP, se tiene:  $58.50/37.79 = 1.55$  para la separación de 3 cm y  $58.50/39.11 = 1.50$  para la separación de 6 cm, o sea que en este caso se verificaron valores un 50% superior.

### 3 bulones - Probetas A28 a A32-A41-A42 y A35(A)-A36(A)-A37(A)

En este caso se ensayaron dos grupos de probetas:

- A28 a A32-A41-A42 - distancia del bulón extremo al borde de la lámina 6 cm
- A35(A)-A36(A)-A37(A) - distancia del bulón extremo al borde de la lámina 6 cm - probetas de hormigón armado

En el primer grupo el valor de carga de rotura promedio obtenido fue de 55.59 kN y la desviación standard, 2.88 kN, por lo que el valor característico 5% resultó 49.99 kN. La dispersión de resultados hizo que la relación entre los valores característicos y medio sea del 90%, buena repetibilidad de la prueba.

Las tres probetas elaboradas con bloques de hormigón armado arrojaron un valor de carga de rotura promedio de 58.85 kN, 6 % superior al caso anterior.

Si se comparan el valor promedio obtenido en esta prueba de láminas ancladas con tres bulones con el de las probetas A1 a A10 ancladas con un solo bulón (23.27 kN) y con las A23 a A27-A39-A40 ancladas con dos bulones (39.11 kN), se tienen las siguientes relaciones:

$55,59 / 23.27 = 2.39$ , o sea que el agregado de dos bulones no alcanzó a triplicar la carga de rotura.

$55,59 / 39.11 = 1.42$ , o sea que el agregado de un bulón no alcanzó a aumentar un 50% la carga de rotura.

Si, en cambio, se comparan los resultados de estas pruebas con el ensayo sobre sistemas EB-FRP, suponiendo la misma área de incidencia considerada en el punto anterior que arrojaba un valor de carga promedio de 37,80 kN, se observa que en este caso se logra incrementar dicha carga un 47% ( $55.59/37,80 = 1.47$ ).

#### d) Comparación entre los seis sistemas estudiados

Observando el resumen de resultados en Figura 5.54 de las cargas de rotura de los seis sistemas que se ensayaron.

Se puede observar lo siguiente:

- la repetitividad de los ensayos fue en general muy buena;
- el sistema EB-MF-FRP con dos bulones fue el que presentó mayor capacidad de carga;
- en el sistema MF-FRP, la variación de la capacidad de carga en función del número de bulones de la vinculación es casi lineal;
- el sistema MF-FRP con dos bulones dio valores de carga equivalentes al sistema EB-FRP;
- en los ensayos con el sistema EB-MF-FRP, si bien la falla se produce por la rotura del puente resinoso, la presencia de los bulones incrementa sensiblemente el valor de la carga resistente.

### 7.3. Ensayos dinámicos de resistencia del sistema lámina-hormigón

Los resultados de los ensayos de resistencia estáticos se expresaron como cargas o tensiones. En los ensayos dinámicos, en cambio, lo que se obtuvo fue el número de ciclos que soportaron las probetas al ser sometidas a cargas variables. Estas cargas fueron establecidas como porcentajes de las cargas de rotura estáticas.

Se elaboraron 109 probetas para realizar diferentes tipos de ensayos dinámicos de evaluación de resistencia. Los ensayos principales, 81 probetas, fueron los de ciclos alternados para los tres sistemas en estudio. En el caso de los sistemas EB-MF-FRP y MF-FRP se ensayaron probetas con uno y dos bulones. No se ensayaron probetas MF-FRP con tres bulones porque se quiso concentrar el estudio en cinco opciones.

Los ensayos comenzaron aplicando cinco ciclos de la carga más baja, continuando con cinco ciclos de la carga media, que era el doble de la carga inicial, para finalizar con ciclos de la carga más alta, igual a tres veces la carga inicial, hasta producir la rotura de la probeta.

En cada ensayo se contabilizó el número de ciclos que produjo la rotura. Se agruparon las probetas en intervalos de cinco ciclos para poder elaborar las curvas de resumen. El objetivo de estas curvas es brindar una herramienta de diseño considerando la duración más frecuente de los sismos que se produzcan en cada zona.

Finalmente se realizaron dos tipos de ensayos más para investigar otros parámetros. Se ensayaron 18 probetas con cargas pulsantes, o sea de un solo signo y 10 probetas con cargas alternadas, pero mejorando la superficie de pegado.

#### 7.3.1. Ensayos de ciclos alternados - Gráficos %-N

##### a) Sistema EB-FRP

Se ensayaron 27 probetas solo pegadas (nº 1 a 10, 19, 25 a 29, 51 a 56, 67 a 71) con cuatro opciones de escalones de carga. Observando las graficas del Figura 6.10 donde se resumen los resultados de todos los ensayos.

Se puede ver que hasta los 60 ciclos las cuatro gráficas se disponen según la intensidad de las cargas y solo la gráfica 17.5/35.0/52.5 rompe ese orden porque hubo probetas más cargadas que lograron superar los 100 ciclos. Aún las probetas más cargadas superaron los dos primeros escalones de carga, es decir que en el caso de sismos cortos aún con cargas cíclicas se puede soportar un 75 % de la carga estática.

Si se analiza la curva global que considera la totalidad de las probetas ensayadas, se puede decir que aproximadamente un 75 % de las probetas superaron los 45 ciclos considerados como un valor orientativo para los sismos más frecuentes de la zona.

b) Sistema EB-MF-FRP

1 bulón - Probetas 20 a 24, 30 a 34, 40 a 45, 62 a 66, 72 a 76

Se ensayaron 26 probetas pegadas y vinculadas con un bulón con cinco opciones de escalones de carga. Observando las graficas del Figura 6.11 donde se resumen los resultados de todos los ensayos.

Se puede ver que en este caso las cinco gráficas se disponen según la intensidad de las cargas. Todas las probetas superaron el primer escalón de carga, pero para las cargas más altas hubo algunas probetas que no llegaron a completar totalmente los cinco ciclos del segundo escalón. Se puede ver que, en este caso, a partir del 50 % de la carga de rotura estática no se llega a los 45 ciclos convenidos.

Si se analiza la curva global que considera la totalidad de las probetas ensayadas, se puede decir que solo un 30 % de las probetas superaron los 45 ciclos, por lo que se tienen que adoptar mayores seguridades estructurales en este tipo de unión.

2 bulones - Probetas 35 a 39, 46 a 50, 57 a 61, 77 a 81

Se ensayaron 20 probetas pegadas y vinculadas con dos bulones con cuatro opciones de escalones de carga. Observando las graficas del Figura 6.12 donde se resumen los resultados de todos los ensayos

Se puede ver que en este caso las cuatro gráficas se disponen según la intensidad de las cargas hasta 90 ciclos. Todas las probetas superaron los dos primeros escalones de carga. Al igual que en el caso anterior, se puede ver que a partir del 45 % de la carga de rotura estática no se llega a los 45 ciclos convenidos.

Si se analiza la curva global que considera la totalidad de las probetas ensayadas, se puede decir que un 65 % de las probetas superaron los 45 ciclos.

c) Sistema MF-FRP

1 bulón - Probetas 11 a 14 y 2 bulones - Probetas 15 a 18

Como se mencionó, se ensayaron solo cuatro probetas de cada uno de estos tipos porque, luego de pocos ciclos, se comenzaban a evidenciar deformaciones excesivas que provocaban el ojalamiento progresivo de las láminas y, al mismo tiempo, el movimiento alternado generaba el aplastamiento del hormigón por la presión de los pernos metálicos. De esta manera, los pernos se encontraban sometidos a sollicitaciones alternadas de flexión y corte que producían su rotura por fatiga.

Observando las graficas del Figura 6.13 donde se resumen los resultados de todos los ensayos

En este gráfico se puede ver que ambos sistemas MF-FRP superaron los dos primeros escalones de cargas y a partir de los 40 o 45 ciclos aproximadamente se empiezan a romper las primeras probetas. En un principio los dos sistemas soportan mayor cantidad de ciclos que las probetas solamente pegadas, pero a partir de un número de ciclos se rompen todas las probetas mientras que en el caso EB-FRP hubo probetas que soportaron mayor número de

ciclos. Si bien de este gráfico se desprende que ambos grupos de probetas con sistema solo abulonados soportan los 45 ciclos convenidos, las deformaciones evidenciadas no los muestran como una solución recomendable para soportar efectos sísmicos.

### 7.3.2. Ensayos de ciclos alternados - Gráficos S-N

Se presentan los gráficos S-N (en inglés Stress - Number of cycles) en los cuales se representan en ordenadas las tensiones máximas ejercidas en cada ensayo y en abscisas los números de ciclos mínimos que produjeron la rotura de la probeta.

Se consideran sólo los casos de vinculaciones resinosas con y sin bulones. No se tienen en cuenta los ensayos sobre anclajes exclusivamente mecánicos por haberse comprobado que no representan una vinculación apta para refuerzos donde se produzcan alternancias de signo en las sollicitaciones.

En la Tabla N° 7.1 y el grafico de Figura N° 7.1 se resumen los números de ciclos requeridos mínimos para provocar la rotura de las probetas para cada tipo de vinculación, esto significa que hasta ese número de ciclos el 100% de las probetas resistieron la carga máxima del ensayo.

Tabla 7.1 - Ciclos requeridos para la rotura de probetas según el porcentaje de tensión

N° Ciclos Requeridos	LP		LP+1B		LP+2B	
	% $\tau$ rot	$\tau_{max}$ (Mpa)	% $\tau$ rot	$\tau_{max}$ (Mpa)	% $\tau$ rot	$\tau_{max}$ (Mpa)
1	100.0	2.52	100	4.23	100.0	5.12
5	75.0	1.89	67.5	2.85	60.0	3.07
10	75.0	1.89	60	2.54	60.0	3.07
15	60.0	1.51	52.5	2.22	45.0	2.30
20	52.5	1.32	52.5	2.22	45.0	2.30
25	52.5	1.32	48.0	2.03	45.0	2.30
30	52.5	1.32	48.0	2.03	40.5	2.07
35	52.5	1.32	48.0	2.03	40.5	2.07
40	45.0	1.13	45.0	1.90	40.5	2.07
45	45.0	1.13	45.0	1.90	40.5	2.07
50	45.0	1.13			40.5	2.07
60					40.5	2.07
70					36.0	1.84
80					36.0	1.84
90					36.0	1.84
100						

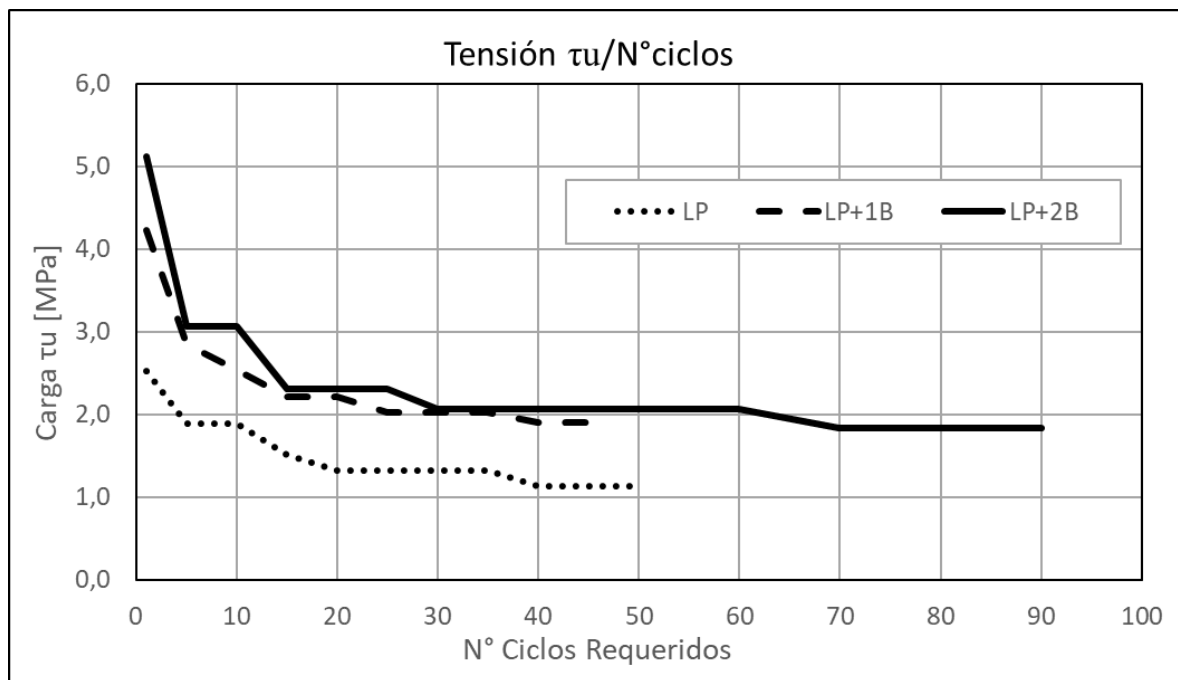


Figura 7.1 - Ciclos requeridos para la rotura de probetas según el porcentaje de tensión

Al hacer una aproximación potencial de las gráficas se puede elaborar una ley general para cada una de las opciones de vinculación.

$$\tau_u = \tau_r \times N^{-(0,0315 \times nb + 0,1885)} \quad (7-1)$$

Donde:

N = Número de ciclos

nb = Número de bulones en la unión

$\tau_u$  = Tensión de rotura a N ciclos

$\tau_r$  = Tensión de rotura estática (N = 1)

En la Tabla 7.2 y en Figura 7.2 que se presentan a continuación se representan los valores anteriores junto con los valores teóricos calculados con la fórmula potencial.

Tabla 7.2 - Comparación entre valores experimentales y teóricos

N° Ciclos Requerido	LP			LP+1B			LP+2B		
	% τ rot	τmax	τmax teo	% τ rot	τmax	τmax teo	% τ rot	τmax	τmax teo
1	100,0	2,52	2,52	100,0	4,23	4,23	100,0	5,12	5,12
2	75,0	2,36	2,21		3,81	3,63		4,61	4,30
3	75,0	2,21	2,05		3,38	3,32		4,10	3,88
4	75,0	2,05	1,94		2,96	3,12		3,58	3,61
5	75,0	1,89	1,86	67,5	2,85	2,97	60,0	3,07	3,42
10	75,0	1,89	1,63	60,0	2,54	2,55	60,0	3,07	2,87
15	60,0	1,51	1,51	52,5	2,22	2,33	45,0	2,30	2,59
20	52,5	1,32	1,43	52,5	2,22	2,19	45,0	2,30	2,41
25	52,5	1,32	1,37	48,0	2,03	2,08	45,0	2,30	2,28
30	52,5	1,32	1,33	48,0	2,03	2,00	40,5	2,07	2,18
35	52,5	1,32	1,29	48,0	2,03	1,93	40,5	2,07	2,09
40	45,0	1,13	1,26	45,0	1,90	1,88	40,5	2,07	2,02
45	45,0	1,13	1,23	45,0	1,90	1,83	40,5	2,07	1,97
50	45,0	1,13	1,21				40,5	2,07	1,91
60							40,5	2,07	1,83
70							36,0	1,84	1,76
80							36,0	1,84	1,70
90							36,0	1,84	1,65
100									

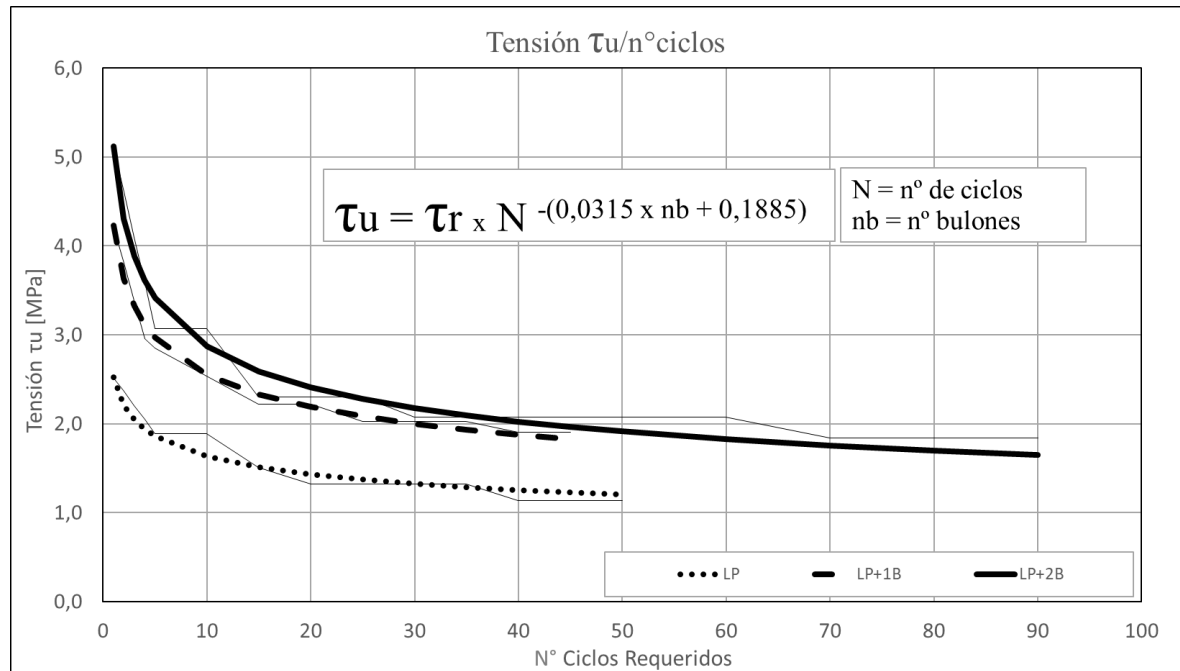


Figura 7.2 - Comparación entre valores experimentales y teóricos

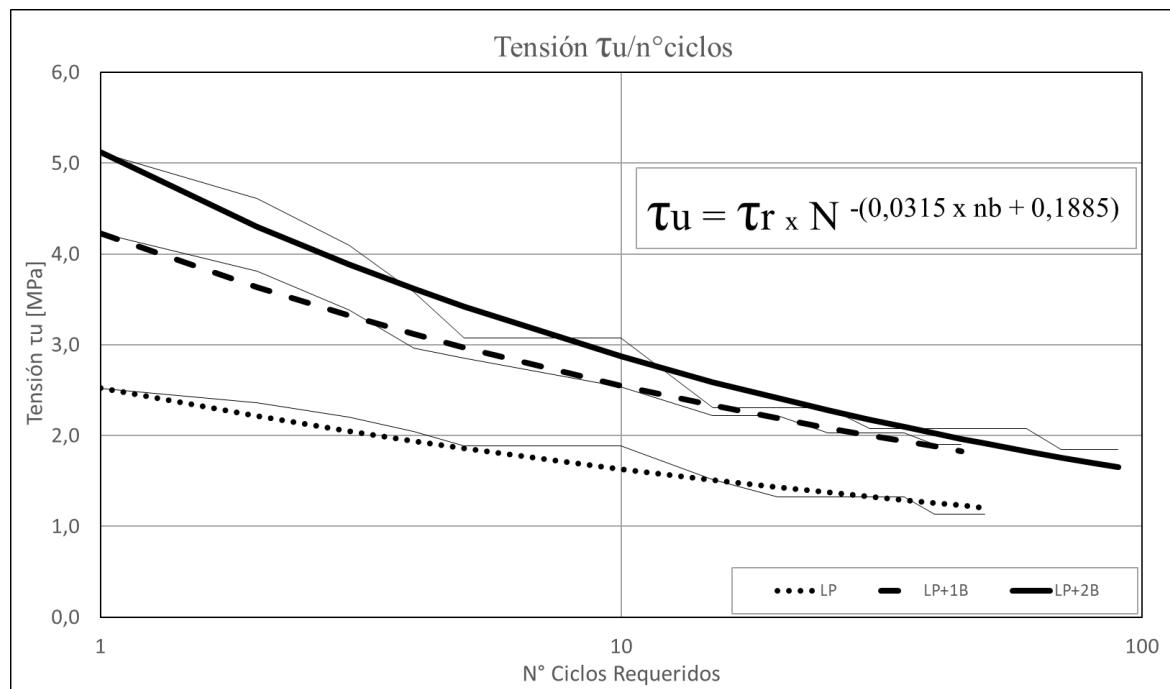


Figura 7.3 - Comparación entre valores experimentales y teóricos (Eje ciclos escala log)

En las gráficas, Figura 7.2 en escala decimal o Figura 7.3 con eje ciclos en escala log(x), se puede ver que las curvas que se obtienen con la ecuación potencial copian de manera aceptable los resultados experimentales. Esta ecuación resulta muy útil para poder estimar de manera simple la pérdida de capacidad de carga en función del número de ciclos partiendo del valor de rotura estática que se puede obtener con un ensayo mucho más sencillo que el de cargas alternadas.

El uso de los parámetros  $\tau_r$  y  $nb$ , utilizados como constantes en la función potencial que domina el comportamiento, responde a la intención vincularlos a la unión a estudiar a pesar que, desde el punto de vista matemático, estas constantes generan la mejor aproximación.

En los gráficos de las Figuras 7.4 y 7.5 se contrastan las curvas adoptadas con las mejores aproximaciones, de mayor coeficiente de determinación  $r^2$  posible. Por las diferencias observadas se considera conveniente mantener como constantes a  $\tau_r$  y  $nb$ .

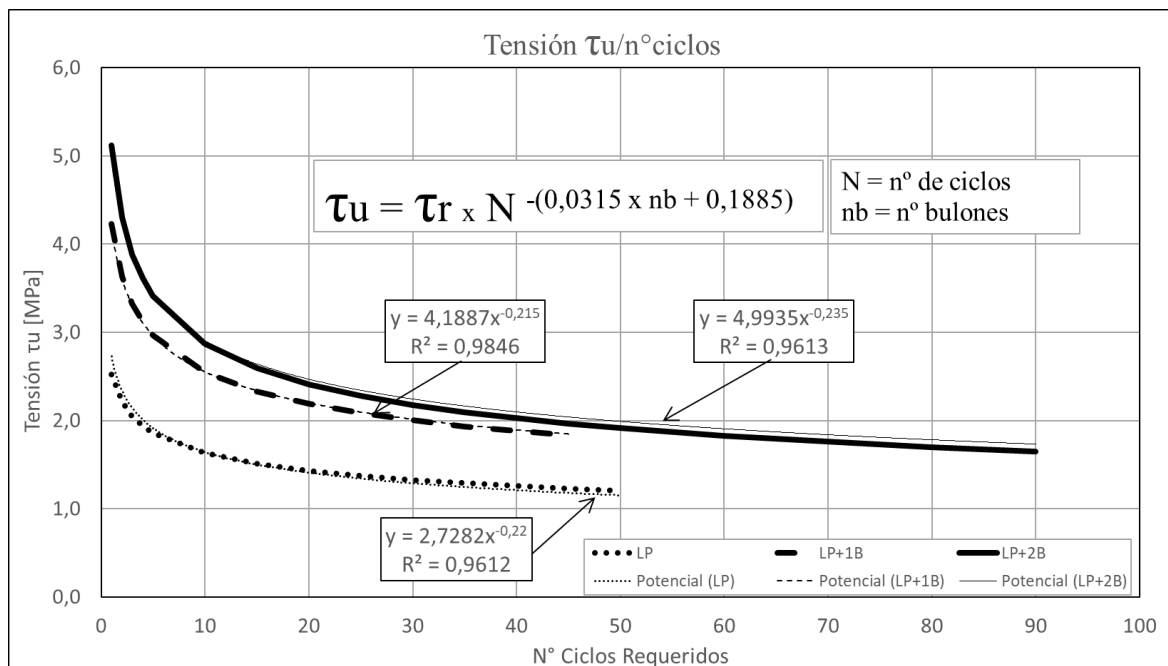


Figura 7.4 - Comparación entre función adoptada y la de mayor valor  $r^2$

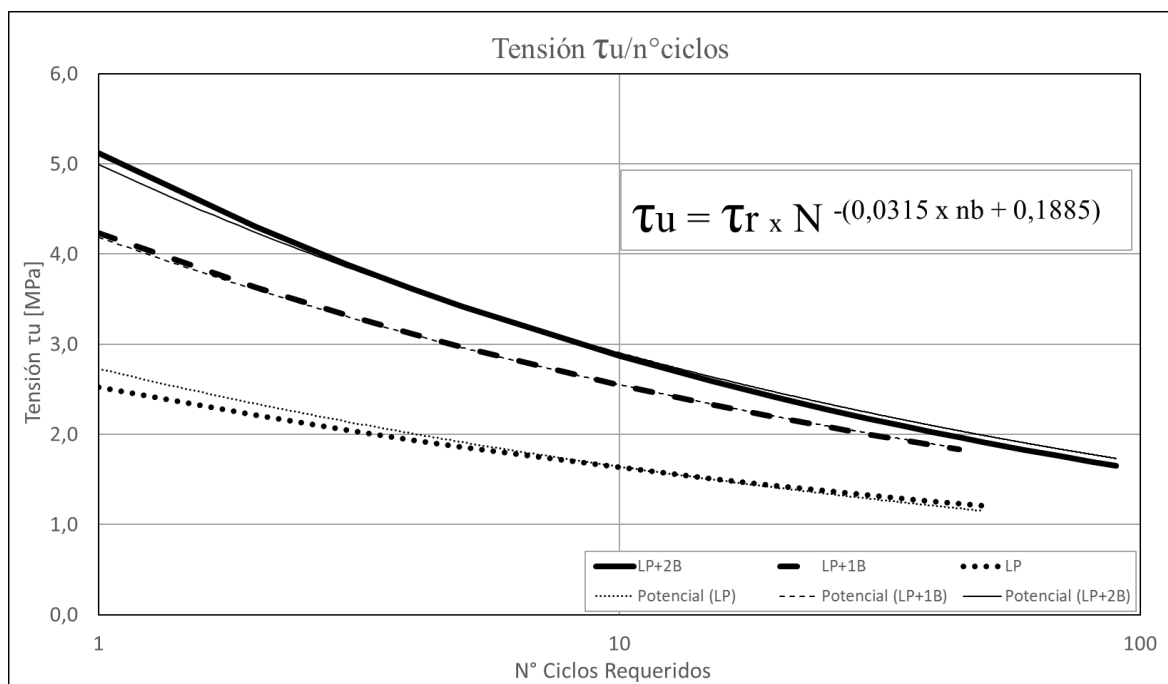


Figura 7.5 - Comparación entre función adoptada y la de mayor valor  $r^2$  (Eje ciclos escala log)

Se propone además una simplificación en la fórmula potencial haciéndola independiente de la cantidad de bulones. Si bien la curva resultante no copia los resultados de los ensayos como lo hace la ecuación 7-2, constituye una buena aproximación, con las curvas ubicadas del lado de la seguridad (5% por debajo en LP+1B, 10 % por debajo en LP y similar a la mejor aproximación en LP+2B).

$$\tau_u = \tau_r \times N^{(-0.23)} \quad (7-2)$$

Donde:

N = Número de ciclos

$\tau_u$  = Tensión de rotura a N ciclos

$\tau_r$  = Tensión de rotura estática (N = 1)

En la Tabla 7.3 y Figura 7.6 se presentan a continuación se representan los valores anteriores junto con los valores teóricos calculados con la fórmula potencial mono-paramétrica.

Tabla 7.3 - Comparación entre valores experimentales y teóricos

N° Ciclos Requeridos	LP			LP+1B			LP+2B		
	% $\tau$ rot	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\tau_{max teo}$ (Mpa)	% $\tau$ rot	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\tau_{max teo}$ (Mpa)	% $\tau$ rot	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\tau_{max teo}$ (Mpa)
1	100.0	2.52	2.52	100	4.23	4.23	100.0	5.12	5.12
2	75.0	2.36	2.15		3.81	3.61		4.61	4.37
3	75.0	2.21	1.96		3.38	3.29		4.10	3.98
4	75.0	2.05	1.83		2.96	3.08		3.58	3.72
5	75.0	1.89	1.74	67.5	2.85	2.92	60.0	3.07	3.54
10	75.0	1.89	1.48	60	2.54	2.49	60.0	3.07	3.01
15	60.0	1.51	1.35	52.5	2.22	2.27	45.0	2.30	2.75
20	52.5	1.32	1.27	52.5	2.22	2.12	45.0	2.30	2.57
25	52.5	1.32	1.20	48.0	2.03	2.02	45.0	2.30	2.44
30	52.5	1.32	1.15	48.0	2.03	1.93	40.5	2.07	2.34
35	52.5	1.32	1.11	48.0	2.03	1.87	40.5	2.07	2.26
40	45.0	1.13	1.08	45.0	1.90	1.81	40.5	2.07	2.19
45	45.0	1.13	1.05	45.0	1.90	1.76	40.5	2.07	2.13
50	45.0	1.13	1.02				40.5	2.07	2.08
60							40.5	2.07	2.00
70							36.0	1.84	1.93
80							36.0	1.84	1.87
90							36.0	1.84	1.87
100							36.0	1.84	1.82

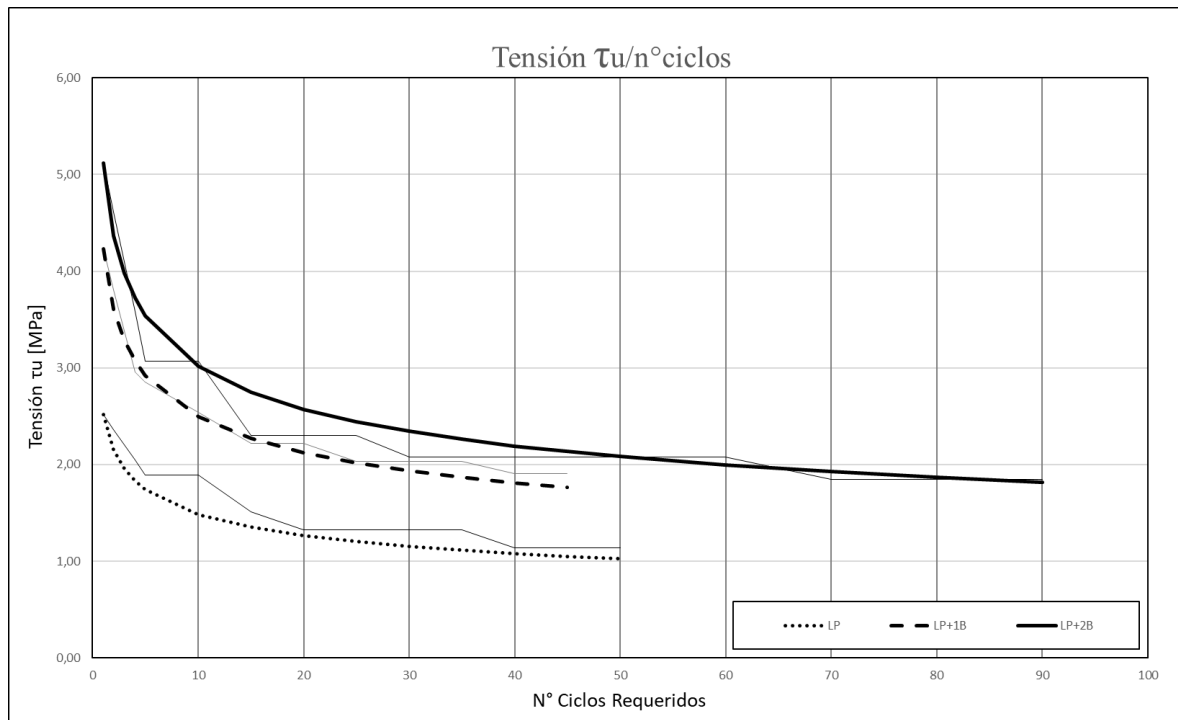


Figura 7.6 - Comparación entre valores experimentales y teóricos

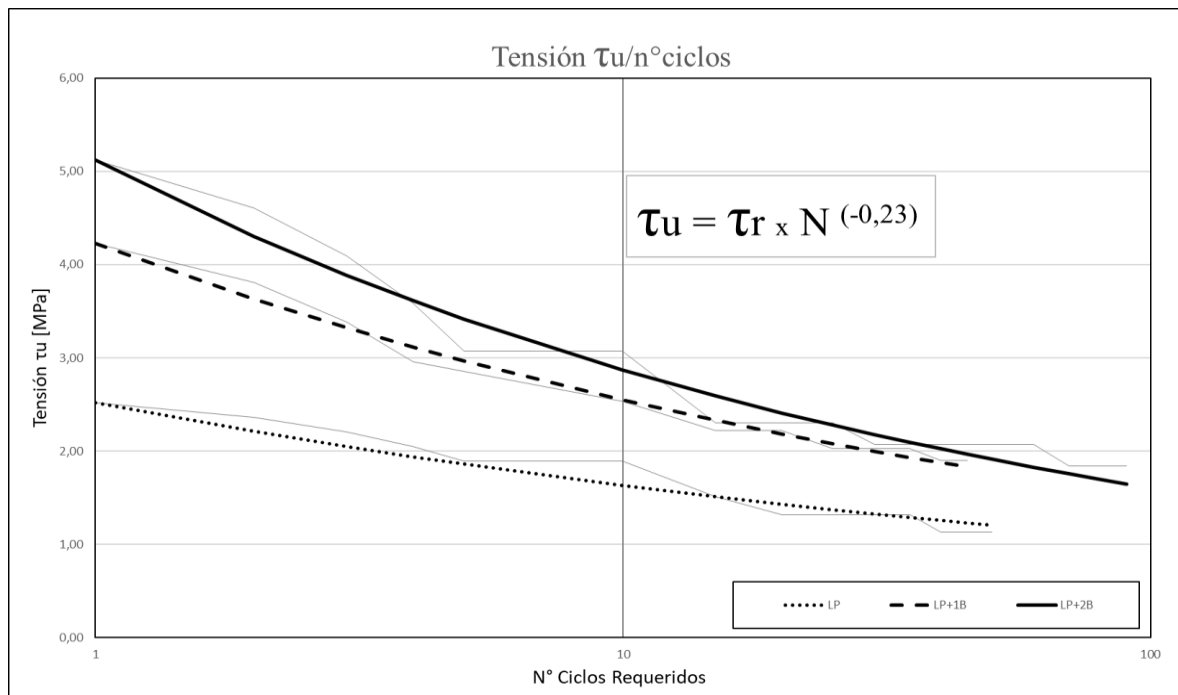


Figura 7.7 - Comparación entre valores experimentales y teóricos (Eje ciclos escala log)

Realizando similar contraste entre las curvas adoptadas con las mejores aproximaciones, de mayor coeficiente de determinación  $r^2$  posible, en Figuras 7.8 y 7.9 se vuelve a justificar la adopción, en este caso, de un único parámetro ( $\tau_r$ ) y una constante numérica única (N).

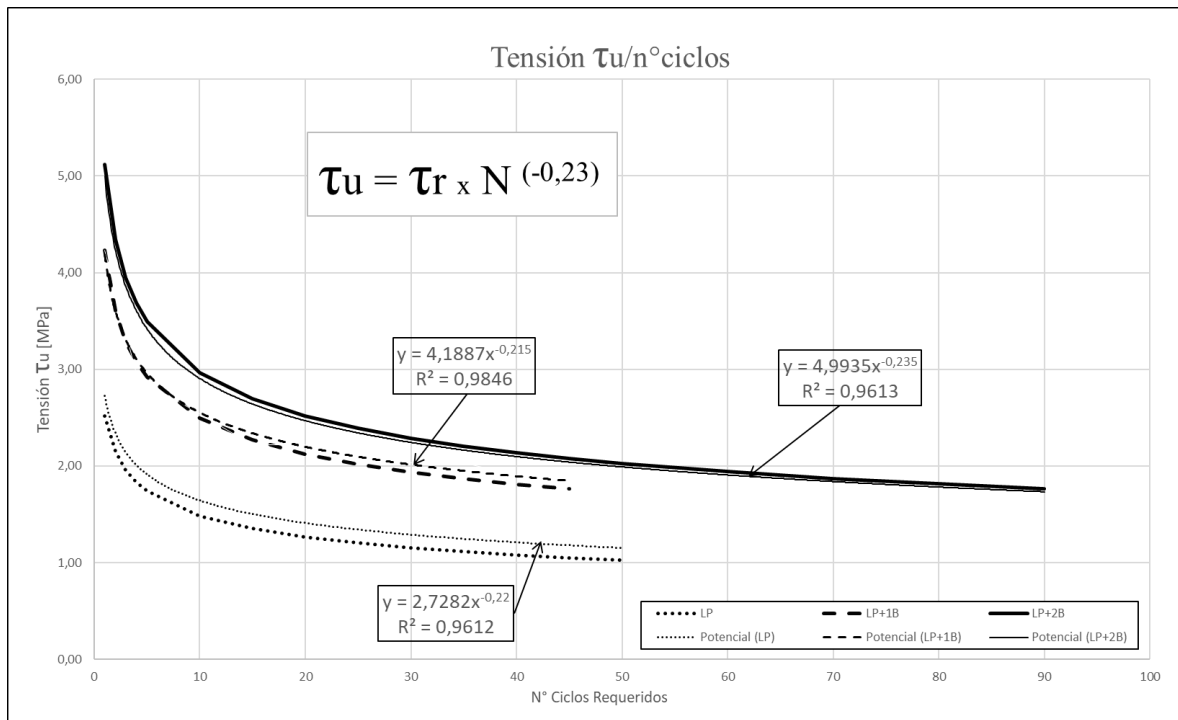


Figura 7.8 - Comparación entre función adoptada y la de mayor valor  $r^2$

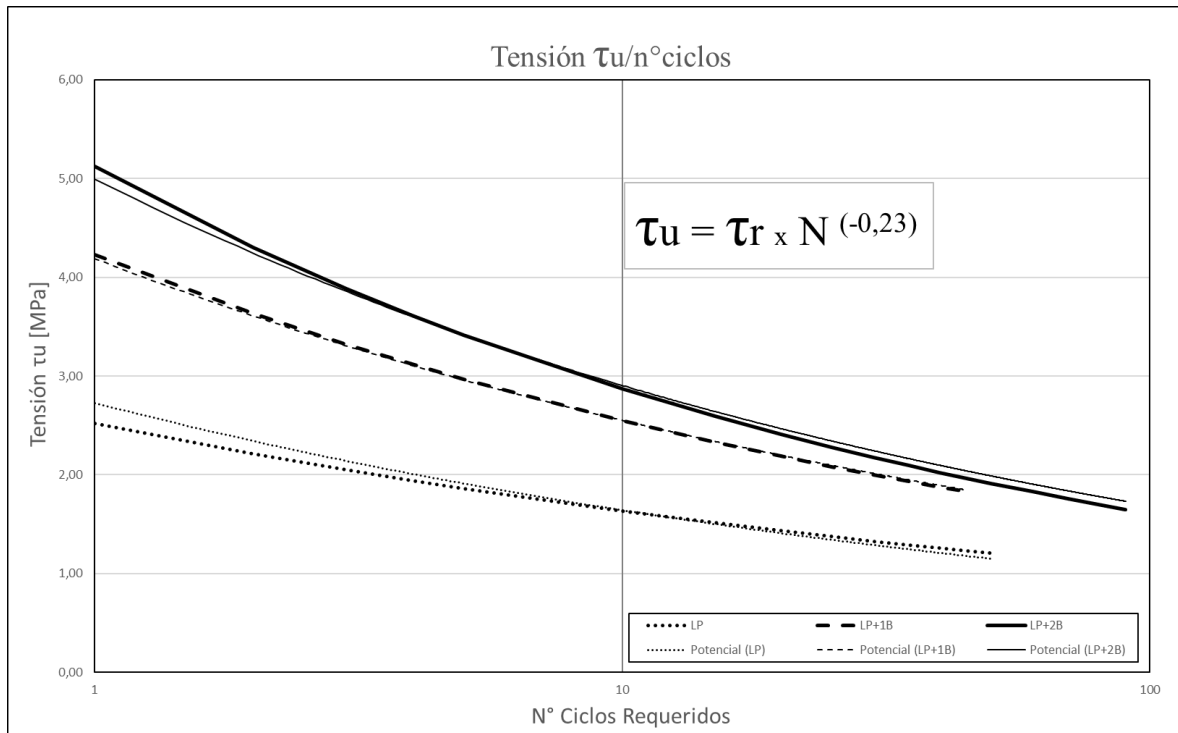


Figura 7.9 - Comparación entre función adoptada y la de mayor valor  $r^2$  (Eje ciclos escala log)

### 7.3.3. Ensayos de ciclos pulsantes

Los ensayos de cargas pulsantes se pensaron como un complemento de los ensayos principales. Se realizaron nueve ensayos sobre probetas solo adheridas y nueve sobre probetas adheridas con dos bulones. Se aplicaron porcentajes relativamente altos de la carga estática máxima (60 % y 75 %) variando los valores mínimos.

#### a) Sistema EB-FRP

Como las primeras probetas ensayadas entre 5% y 60% de la carga de rotura del ensayo estático superaron los 100 ciclos sin evidenciar el inicio de desprendimientos, se decidió aumentar el valor máximo a 75 % para las probetas siguientes variando la carga mínima entre 5 %, 20 % y 50%. Se superaron los 100 ciclos también en estos casos. Estos resultados indican que para analizar la respuesta de este sistema de vinculación ante cargas pulsantes se necesitarían ensayos de larga duración como los realizados para las pruebas de fatiga.

#### b) Sistema EB-MF-FRP con dos bulones

En este caso se mantuvo la carga máxima en 60% y la carga mínima se varió entre 5 %, 20% y 40 %. Al igual que en el caso anterior, se superaron largamente los 100 ciclos y al momento de interrumpir los ensayos no se pudieron observar deterioros en los especímenes.

### 7.3.4. Ensayos de ciclos alternados con preparación especial de la superficie

En estos ensayos complementarios se quiso experimentar la respuesta de las probetas mejorando la adherencia mecánica de la superficie siguiendo las recomendaciones de estudios previos.

#### a) Sistema EB-FRP

El ensayo de carga estática dio como resultado una carga de rotura de 46.28 kN, 23 % superior al valor de carga estática promedio de las probetas solo adheridas sin preparación de superficie. Si bien se trató de un ensayo sobre un único espécimen, el incremento que se obtuvo es considerable y justifica la profundización de su estudio.

Además, el hecho de que se hayan superado los 100 ciclos adoptando escalones de carga relativamente exigentes 25%-50%-75%, demuestra que la preparación mecánica de las superficies es una acción totalmente recomendable.

#### b) Sistema EB-MF-FRP con dos bulones

En este caso el ensayo de carga estática dio como resultado una carga de rotura de 83.70 kN, un 9 % superior al valor de carga estática de las probetas similares sin preparación de superficie. También en para este grupo de probetas se superaron los 100 ciclos adoptando escalones de carga relativamente exigentes 20%-40%-60%, ratificado la conclusión anterior sobre la recomendación de la creación de rugosidades intencionales en la superficie de contacto.

#### 7.4. Ensayos estáticos post ensayos dinámicos.

Durante el desarrollo de los ensayos dinámicos no todos los especímenes llegaron a la rotura y, pasados los 100 ciclos, muchos fueron suspendidos.

Si bien el ensayo dinámico se dio por finalizado, en aquellos casos que no se alcanzaba la rotura se decidió iniciar un ensayo estático posterior intentado poder obtener alguna observación adicional.

Es necesario tener en cuenta que la cantidad de muestras no fue importante, por lo que los resultados no son concluyentes pero su particularidad puede inducir nuevas líneas de investigación.

Estos resultados se obtuvieron solamente en dos de los sistemas estudiados, Lamina solo Pegada (EB-FRP) y Lamina Pegada con 2 bulones (EB-MF-FRP).

##### 7.4.1. Estáticos post ciclados de ciclos alternativos en sistema EB-FRP

El promedio de las tensiones obtenidas resultó del orden de la tensión de referencia estático de este sistema de unión. Por lo tanto, en principio se podría decir que los ciclos aplicados no deterioraron unión resinosa.

Tabla 7.4 - Ensayos estáticos post ciclados alternativo - sistema EB-FRP

Tipo Union	Probeta N°	Superficie		P rot. adher. [kN]	P rot total [kN]	$\tau_{prom}$ [MPa]	$\tau_{prom}$ Referencia [MPa]
		a [m]	b [m]				
LP	68	0,075	0,20	48,24	48,24	3,22	2,52
	70	0,075	0,20	47,74	47,74	3,18	
	71	0,075	0,20	47,87	47,87	3,19	
	69	0,075	0,20	27,85	27,85	1,86	
					Promedio	2,86	

##### 7.4.2. Estáticos post ciclados de ciclos alternativos en sistemas con mayor rugosidad

En la tabla 7.5 se presentan los resultados de ensayos estáticos para los sistemas LP (EB-FRP) y LP+2B (EB-MF-FRP). Se puede observar que se verificaron valores de rotura levemente superiores a los de referencia.

En la tabla 7-6 se muestran los valores de rotura de las probetas post ciclado que no alcanzaron la rotura.

La mayoría de las probetas no colapsó durante el ensayo dinámico y los valores de rotura estáticos resultaron superiores a los de referencia, como era de esperar, debido al aumento provocado mecánicamente en la superficie del hormigón.

Tabla 7.5 - Ensayos estáticos de referencia, sin ciclado previo

Tipo Union	Probeta N°	Superficie		P rot. adher. [kN]	P rot total [kN]	$\tau_{prom}$ [MPa]	$\tau_{prom}$ Referencia [MPa]
		a [m]	b [m]				
LP	100	0,075	0,20	46,28	46,28	3,09	2,52
					Promedio	3,09	
LP+2B	105	0,075	0,20	83,70	83,70	5,58	5,12
					Promedio	5,58	

Tabla 7.6 - Ensayos estáticos post ciclados alternativo

Tipo Union	Probeta N°	Superficie		P rot. adher. [kN]	P rot total [kN]	$\tau_{prom}$ [MPa]	$\tau_{prom}$ Referencia [MPa]
		a [m]	b [m]				
LP	100	0,075	0,20	46,28	46,28	3,09	2,52
	101	0,075	0,20	60,36	60,36	4,02	
	102	0,075	0,20	50,55	50,55	3,37	
	103	0,075	0,20	59,04	59,04	3,94	
	104	0,075	0,20	70,38	70,38	4,69	
						Promedio	
LP+2B	105	0,075	0,20	83,72	83,72	5,58	5,12
	106	0,075	0,20	62,17	62,17	4,14	
	107	0,075	0,20	62,07	62,07	4,14	
	108	0,075	0,20	70,03	70,03	4,67	
	109	0,075	0,20	81,57	81,57	5,44	
						Promedio	

#### 7.4.3. Estáticos post ciclados de ciclos pulsantes

La Tabla 7.7 muestra los valores de rotura, de ensayos estáticos, de los especímenes una vez superados los 100 ciclos. Claramente se observa que el hecho de no alternar el signo de la carga durante el ciclado no produjo el deterioro de la unión, manteniéndose los valores de rotura próximos a los de referencia.

Resulta, en esta etapa difícil de explicar por qué en el sistema EB-FRP (LP) los resultados de rotura estática post ciclado pulsante son aproximadamente un 50 % superiores a los de referencia iniciales.

En el sistema EB-MF-FRP (LP+2B) el valor de rotura estático post ciclado obtenido resultó un 13% menor que el valor de referencia. En este caso resulta lógico justificar este descenso debido a un posible deterioro del sistema de unión.

COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

Tabla 7.7 - Ensayos estáticos post ciclados alternativo

Tipo Union	Probeta N°	Superficie		P rot. adher. [kN]	P rot total [kN]	$\tau_{prom}$ [MPa]	$\tau_{prom}$ Referencia [MPa]
		a [m]	b [m]				
LP	82	0,075	0,20	55,54	55,54	3,70	2,52
	83	0,075	0,20	56,70	56,70	3,78	
	86	0,075	0,20	58,00	58,00	3,87	
	87	0,075	0,20	45,11	45,11	3,01	
	88	0,075	0,20	49,99	49,99	3,33	
	89	0,075	0,20	54,58	54,58	3,64	
	90	0,075	0,20	45,07	45,07	3,00	
					Promedio	3,48	
LP+2B	91	0,075	0,20	80,71	80,71	5,38	5,12
	92	0,075	0,20	63,34	63,34	4,22	
	93	0,075	0,20	64,67	64,67	4,31	
	94	0,075	0,20	80,33	80,33	5,36	
	95	0,075	0,20	75,06	75,06	5,00	
	96	0,075	0,20	61,57	61,57	4,10	
	97	0,075	0,20	90,67	90,67	6,04	
	98	0,075	0,20	50,50	50,50	3,37	
	99	0,075	0,20	56,32	56,32	3,75	
					Promedio	4,62	

## CAPÍTULO 8

---

### 8. CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

En este trabajo se profundizó el estudio de la utilización de láminas pultruidas de fibra de vidrio (GFRP o PRFV) como sistema de refuerzo para estructuras de hormigón armado. Ya se había comprobado en un trabajo anterior [Busnelli A. (2018)] la efectividad de la utilización de estas láminas como alternativa a los preformados más difundidos a base de fibras de carbono utilizando un sistema complementario de vinculación mecánica a la tradicional vinculación resinosa entre láminas y hormigón. En efecto, este sistema mixto combinaba la vinculación adhesiva de refuerzos externos, denominada EB-FRP, con la vinculación a través de conectores, conocida como MF-FRP, y se lo denominó EB-MF-FRP.

Además de haberse podido comprobar su prestación de resistencia estructural como refuerzo de vigas de hormigón armado sometidas a solicitaciones de flexión, se habían verificado características que alentaban su utilización en estructuras sometidas a cargas dinámicas como las producidas por los sismos.

En este trabajo se ejecutaron en primer lugar un conjunto de ensayos estáticos sobre probetas confeccionadas con los tres sistemas de vinculación mencionados y, en base a los resultados de estas pruebas, se programaron los ensayos de cargas variables.

#### 8.1. Ensayos estáticos de resistencia del sistema lámina-hormigón

##### 8.1.1. Ensayos de tracción centrada

Estos ensayos no arrojaron resultados confiables y, además, la confección de las probetas resultó muy laboriosa. Por este motivo se decidió diseñar otro método de prueba. No se pueden sacar conclusiones de estas actividades.

##### 8.1.2. Ensayos de tracción excéntrica

El método de ensayo de tracción excéntrica permitió la realización de una buena cantidad de pruebas sobre los tres sistemas de vinculación estudiados con variantes de cada uno de ellos. Se presentan las conclusiones de los mismos.

##### e) Sistema EB-FRP

Estos ensayos constituyeron el punto de referencia para las pruebas posteriores. Las roturas se verificaron principalmente arrancando el recubrimiento de hormigón por lo que el pegado de las probetas resultó correcto. La dispersión de los resultados fue aceptable y se tomaron como base para la comparación de los ensayos estáticos posteriores.

f) Sistema EB-MF-FRP

Se ensayaron dos grupos de probetas con sistema de vinculación mixta resina bulón. En el caso de las probetas con un bulón se confinaba sólo la zona central de la longitud de anclaje, mientras que la disposición de dos bulones involucraba prácticamente toda la unión.

La vinculación mecánica adicional produjo un incremento significativo en la carga estática de las probetas en comparación con el sistema EB-FRP. En efecto, con un bulón la carga se incrementó un 68 %, mientras que con dos bulones el incremento fue más del doble, 103 %.

En los ensayos sobre vigas [Busnelli A. (2018)] también se había evidenciado un aumento importante en la capacidad de carga del sistema mixto con respecto a la unión sólo adherida. En este caso se supuso que dicho aumento de carga podía deberse al control de las tensiones transversales de *peeling* que en el caso de estas láminas tan rígidas era mucho más importante que en las tradicionales láminas delgadas a base de fibras de carbono. Pero en los ensayos de tracción excéntrica no existe tal efecto, por lo tanto, debe existir otro fenómeno que aumenta la resistencia de la unión. La causa puede ser de origen física como el incremento de la fuerza de rozamiento que depende del esfuerzo normal entre las superficies, o de origen química como la polimerización bajo presión, o una combinación de ambos efectos.

Comparando entre sí los ensayos de probetas con uno y dos bulones, se verificó que el agregado de un bulón incrementó la carga de rotura un 21 % al sistema mixto, mientras que duplicó (en realidad la relación fue de 121 %) la resistencia residual del sistema abulonado una vez rota la unión resinosa.

g) Sistema MF-FRP

En este caso, como parte de la investigación, se ensayaron probetas vinculadas con uno, dos y tres bulones de diámetro Ø3/8" (9,5 mm) ajustados sobre arandelas y ubicados manteniendo una separación del agujero al borde mínima de aproximadamente 6 cm.

Comparando la carga de rotura promedio de estos ensayos con los ensayos anteriores se puede concluir lo siguiente:

- Cuando se confrontan las cargas de rotura obtenidas en los tres ensayos con los del sistema EB-FRP se verifica que el sistema sólo adherido presentó una carga 62 % mayor que el sistema vinculado con un solo bulón, mientras que se obtuvieron valores de carga similares en el caso de la vinculación con dos bulones y la vinculación con tres bulones superó en 47 % al valor sólo adherido.
- Si en cambio se compara la carga de rotura promedio con las obtenidas como carga residual de los bulones en los ensayos sobre sistemas EB-MF-FRP cuando se rompió la unión resinosa, se verificaron valores similares en el caso de un solo bulón, mientras que en el caso de dos bulones los valores de carga residual de los sistemas mixtos resultaron un 50 % superior.
- Si se comparan las cargas de rotura entre los tres sistemas abulonados se puede observar que el agregado de un segundo bulón incrementó en 68 % la carga de rotura y el agregado del tercer bulón incrementó la carga un 139 %

Además de estos ensayos programados se quiso evaluar la variación de otros parámetros

como el diámetro del bulón, la distancia a la fibra extrema para forzar la rotura por desgarramiento y la variación de otras formas de vinculación que disminuyeran el ojalamiento, principal causa de la rotura de este sistema. También se experimentó con probetas de hormigón armado para verificar si la presencia de armaduras mejoraba la carga del sistema ya que algunas probetas habían mostrado grandes fisuraciones e incluso el desprendimiento de zonas enteras de hormigón. Si bien se ensayaron pocas probetas de estas alternativas de vinculación, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- El aumento del diámetro del bulón de 9.5 mm a 11.1 mm produjo un incremento del 22 % en la carga de rotura. Este aumento de carga en este caso se corresponde con el aumento de diámetro, aunque es lógico deducir que ante mayores incrementos de diámetro el aumento de capacidad portante estará limitado por la disminución de área de la planchuela. El diámetro ideal sería el que equilibre estos dos fenómenos y es uno de los temas que quedan abiertos para futuras investigaciones.
- Como era de suponer, la menor distancia al borde (3 cm) produjo el desgarro de la lámina, pero el valor de la carga no resultó sustancialmente menor que en el caso anterior, por lo que no se puede afirmar que la distancia ensayada sea sustancialmente crítica. Se puede concluir que, aunque no resulte recomendable la especificación de una distancia tan pequeña, en el caso de tener que diseñarse una unión así por limitaciones geométricas de la estructura a reforzar su prestación es aceptable.
- Con respecto al mejoramiento de la unión abulonada, se realizaron ensayos con sistemas que distribuyeran el esfuerzo hacia los laterales de la perforación. A tal fin, se utilizaron arandelas más grandes o planchuelas que involucraban mayor área de presión y cuchillas que concentraban el esfuerzo normal en toda una línea transversal de la planchuela manteniendo la distancia reducida de 3 cm. Los resultados obtenidos no mostraron diferencias sustanciales con respecto a la vinculación tradicional de las probetas.
- Las probetas de hormigón armado arrojaron valores superiores a aquellas de hormigón simple, 9 % en el caso de la vinculación con dos bulones y 6 % en el caso de tres bulones. Estos resultados estarían mostrando que, en las aplicaciones más habituales en estructuras armadas, para las uniones abulonadas se pueden esperar valores superiores a los de los ensayos.

#### h) Comparación entre los cinco sistemas estudiados

Comparando los cinco sistemas de vinculación estudiados se puede concluir lo siguiente:

- El sistema que mostró la mayor carga última fue el pegado y abulonado con dos pernos con una carga de aproximadamente 70 kN
- Las probetas pegadas y abulonadas con un perno y las probetas sólo ancladas con tres bulones dieron valores equivalentes de carga de aproximadamente 57 kN, presentándose como la segunda opción en orden de resistencia.
- Las probetas sólo abulonadas con un perno y las probetas sólo adheridas también dieron valores equivalentes de carga, en este caso de aproximadamente 37 kN.
- Por último, el sistema menos resistente fue el sólo abulonado con un perno.
- En general las dispersiones de resultados fueron bajas, demostrando una buena confiabilidad en los resultados de este grupo de ensayos.

## 8.2. Ensayos dinámicos de resistencia del sistema lámina-hormigón

Los ensayos que evaluaron la prestación de los sistemas de vinculación lámina-hormigón estudiados, sometidos a acciones dinámicas fueron los siguientes:

- Ensayos de ciclos alternados

Constituyeron el cuerpo principal de la investigación. Involucraron 81 especímenes de los diferentes sistemas de vinculación sometidos a ensayos de tracción excéntrica con cargas alternadas escalonadas. Como complemento se realizaron algunos ensayos similares sobre probetas a las que se le realizó una preparación especial a la superficie de hormigón en contacto con la lámina.

- Ensayos de ciclos pulsantes

Se realizaron unos pocos ensayos sobre probetas sometidas a tracción excéntrica que, sin embargo, permitieron sacar conclusiones.

- Ensayos de fatiga

Fueron ensayos accidentados sobre vigas reforzadas de los que también se pueden deducir algunas conclusiones.

### 8.2.1. Ensayos de ciclos alternados

Los resultados de estos ensayos dinámicos de evaluación de resistencia fueron los números de ciclos soportados por los distintos sistemas de vinculación estudiados sometidos a diferentes escalones de cargas.

Con estos resultados se elaboraron gráficos en los que se representó en abscisas los números de ciclos y en ordenadas los porcentajes de probetas que superaban dichos ciclos. La idea de estos gráficos es que sirvan como una herramienta de diseño para la aplicación de cada uno de los sistemas como refuerzos de estructuras de hormigón sometidas a esfuerzos sísmicos.

La forma de utilización de los gráficos sería la siguiente: en base a los números de ciclos más probables de los sismos de la zona estudiada, obtenidos de los estudios estadísticos de registros, se obtiene el porcentaje de carga estática máxima que soportaría el sistema elegido. O, lo que es lo mismo, la inversa de este porcentaje constituye el coeficiente de seguridad adicional que es necesario tener en cuenta en el método de diseño de refuerzo estático de cada uno de los sistemas.

Se pueden utilizar las gráficas individuales que estarían considerando un sismo de intensidad uniforme o la gráfica de resumen que se constituye como una mezcla probable de ciclos de intensidades variables.

#### a) Sistema EB-FRP

Analizando la curva global que considera la totalidad de las probetas ensayadas, sismos de pocos ciclos, por ejemplo 20, son superados por el 90 % de las probetas. Si consideramos los 45 ciclos convenidos, se observa que aproximadamente un 75 % de las probetas estarían

soportando los esfuerzos de diseño (% del valor de ensayo estático). En estos ejemplos, es necesario afectar a la resistencia del sistema por un coeficiente de 0.90 o 0.75 según el caso.

b) Sistema EB-MF-FRP

Razonando de manera similar, en los sistemas con un bulón, para 20 ciclos se puede considerar un coeficiente de 0.75 y para 45 ciclos, de 0.30. En cambio, para los sistemas con dos bulones, los coeficientes serían de 0.80 y 0.65 para 20 y 45 ciclos respectivamente.

c) Sistema MF-FRP

Este sistema no se presentó como una solución apropiada para soportar cargas alternativas porque se comenzaron a evidenciar deformaciones excesivas a partir de los primeros ciclos. En esta situación, se dejaba de verificar una vinculación colaborante entre los dos materiales y comenzaban a resistir cada uno por su lado. Los ensayos se transformaron en pruebas de fatiga de los bulones.

8.2.2. Ensayos de ciclos alternados con preparación especial de la superficie

La creación de rugosidades en la superficie del hormigón en contacto con la lámina se demostró una técnica muy recomendable ya que se vieron mejoradas tanto los valores de carga de rotura estáticos como dinámicos en los dos sistemas experimentados EB-FRP y EB-MF-FRP.

En efecto, en el sistema sólo adherido, el único ensayo realizado superó en un 23 % el valor promedio del ensayo convencional y, en el caso del sistema adherido y abulonado, el incremento resultó de un 9%.

Con respecto a los ensayos de cargas alternadas, se lograron superar los 100 ciclos aplicando cargas escalonadas de porcentajes relativamente elevados de las cargas estáticas, 25%-50%-75% para el sistema EB-FRP y 20%-40%-60% para el sistema EB-MF-FRP, por lo que es absolutamente aconsejable esta técnica de preparación en refuerzos de estructuras sometidas a esfuerzos sísmicos.

8.2.3. Ensayos de ciclos pulsantes

Si bien se realizaron sólo nueve ensayos sobre probetas solo adheridas y nueve sobre probetas adheridas con dos bulones, los resultados obtenidos muestran que las cargas pulsantes no presentan un inconveniente para este tipo de refuerzos.

En ambos sistemas estudiados (EB-FRP y EB-MF-FRP) se aplicaron porcentajes relativamente altos de la carga estática máxima (60 % y 75 %) variando los valores mínimos y en todos los ensayos se superaron los 100 ciclos.

Se concluye que, si en una estructura se verifica que nunca los esfuerzos van a sufrir cambios de signo, es recomendable la utilización de estos sistemas de refuerzo.

8.2.4. Ensayos de fatiga

Si bien se realizaron unos pocos ensayos de fatiga con cargas pulsantes sobre vigas reforzadas con láminas adheridas y abulonadas (EB-MF-FRP) y se produjeron diversos

inconvenientes que no permitieron su adecuada conclusión, en todos los casos las roturas producidas se debieron a fenómenos ajenos a los ensayos en sí y la vinculación entre lámina y hormigón no presentaba deterioros visibles.

Si se tiene en cuenta además que los ensayos de ciclos de cargas excéntricas pulsantes analizados en el punto anterior corroboraron el buen comportamiento del sistema analizado, se puede concluir que el sometimiento a fatiga de una viga reforzada mediante cargas pulsantes no produce disminución en las prestaciones del refuerzo.

### **8.3. Futuras investigaciones**

Este trabajo deja algunos frentes abiertos para futuras investigaciones que permitan ir completando el estudio del funcionamiento de los refuerzos de vigas de hormigón armado con láminas pultruidas de PRFV vinculadas mediante los tres sistemas estudiados.

A continuación, se presentan alguno de estos argumentos a profundizar.

#### **8.3.1. Diámetro de los bulones**

Los ensayos de este trabajo se concentraron en la utilización de bulones de acero SAE 1045 de diámetro 3/8" (9.5 mm). Sin embargo, en algunos ensayos estáticos, se probó utilizar un diámetro ligeramente superior 7/16" (11.1 mm) y se verificó un incremento del 22 % en la carga de rotura. Por lo tanto, este incremento de diámetro se presenta como una alternativa superadora y recomendable.

Para determinar el bulón ideal, se deberían hacer ensayos incrementando el diámetro de los bulones hasta que el aumento de capacidad portante comience a estar limitado por la disminución de área de la planchuela.

Este tipo de ensayos se debería realizar tanto en los sistemas de vinculación mecánica (MF-FRP) como en los sistemas mixtos (EB-MF-FRP).

#### **8.3.2. Mejoramiento de la rugosidad superficial del hormigón**

Las mejoras que presentó la preparación superficial del hormigón consistente en la creación intencional de rugosidades ameritan la profundización del estudio de diferentes técnicas.

En este trabajo, se procedió a provocar ranuras de unos pocos milímetros de profundidad con una amoladora. Este método artesanal fue muy simple para actuar sobre las pocas probetas ensayadas, pero se lo podría considerar como algo trabajosos cuando se deba intervenir sobre áreas mayores.

Se podrían intentar investigar la prestación de otras técnicas más industrializadas como por ejemplo el arenado, el granallado o el fresado.

Resultaría interesante preparar las superficies según diferentes texturas como las CSP (Concrete Surface Profiles) clasificadas por el ICRI (International Concrete Repair Institute) y evaluar la influencia de cada tipo de configuración.

### 8.3.3. Ensayos de cargas pulsantes y de fatiga

La investigación sobre la aplicación de cargas pulsantes en los ensayos de fatiga sobre vigas demostró la buena respuesta de estos sistemas de refuerzo. La investigación adicional debería considerar la ejecución de ensayos de larga duración para analizar la aplicación de los refuerzos a estructuras sometidas a cargas variables como ser puentes o viaductos.

### 8.3.4. Ensayos de cargas pulsantes sin cambio de signo

Como se muestra en el punto 6.5, se ensayaron con pulso de un solo signo solo Lámina pegada (EB-FRP) en pulsos de 5 a 60 %, 5 a 75 %, 20 a 75%, 50 a 75 %, y Lamina pegada con dos bulones (EB-MF-FRP) en pulsos de 5 a 60 %, 20 a 60% y 40 a 60%.

Si bien el número de especímenes es bajo, se supone que el hecho de no alternar el sentido de la carga reduce de manera importante la degradación de la unión, aumentando significativamente la resistencia y la cantidad de ciclos alcanzados.

Recordando las Figuras 6.15 y 6.16, a continuación, se puede observar que es casi independiente de la cantidad de ciclos, hasta 100 ciclos, pudiendo alcanzarse valores del 75% den Lamina pegada y del 60% en lámina pegada con dos bulones, muy superiores a los porcentajes cuando la carga cambia de signo.

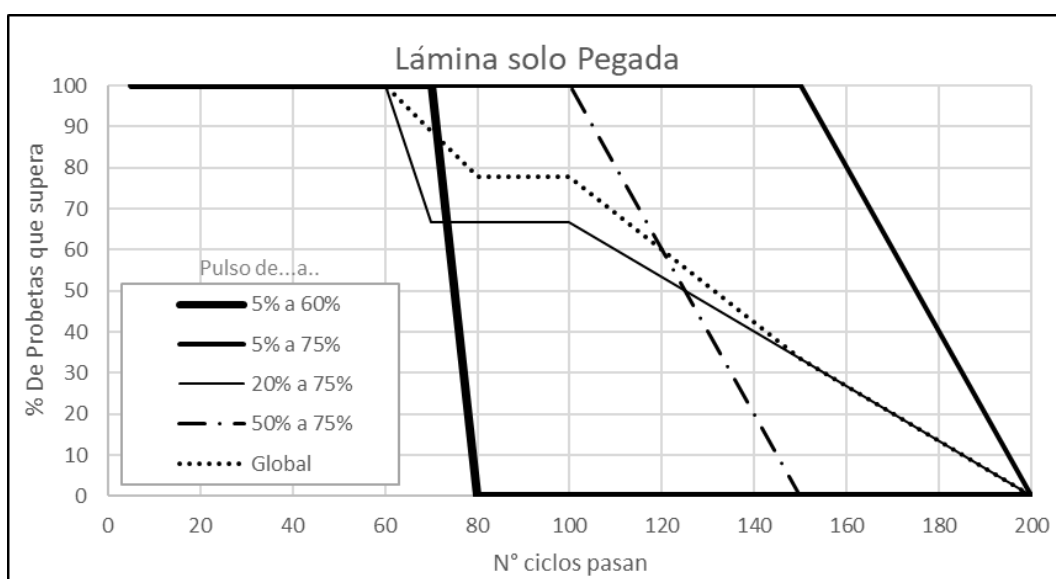


Figura 6.15 (copia) - Probetas sistema EB--FRP.

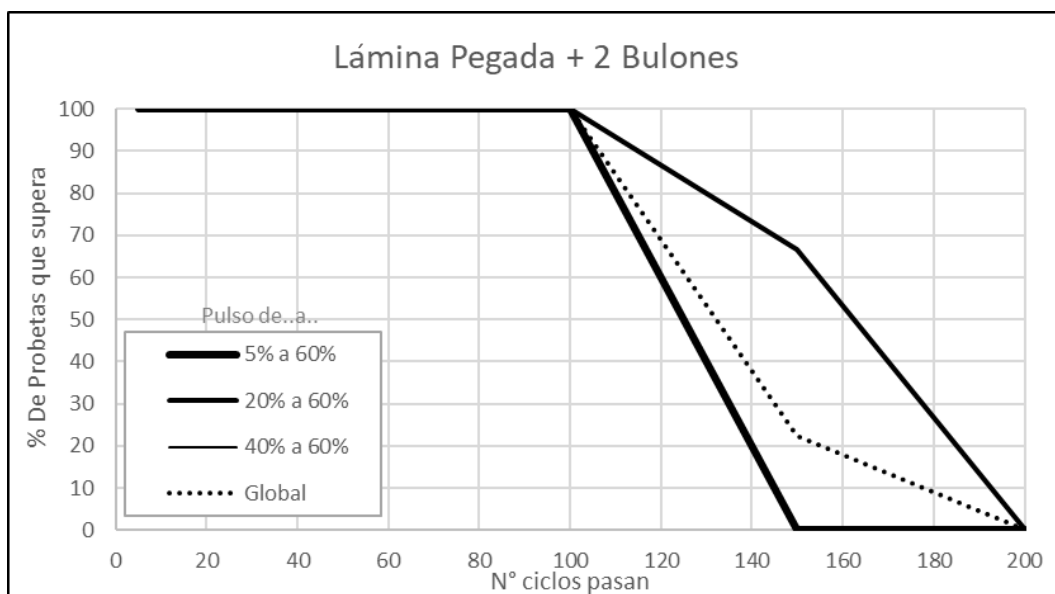


Figura 6.16 (copia) - Probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones.

Este comportamiento nos permite suponer que en situaciones reales donde el sistema ya se encuentra precargado, por sí mismo o por sobrecarga de la estructura, ante la aparición de un sismo el estado de carga alternativo podría no cambiar de signo.

#### 8.3.5. Ensayos estáticos post ensayos dinámicos

En los ensayos estáticos realizados en probetas del sistema EB-FRP que habían superado los 100 ciclos se verificó un incremento de resistencia inesperado respecto a los resultados obtenidos en los ensayos estáticos originales que ameritaría la profundización del estudio de este fenómeno. Es posible que estas solicitaciones variables generen un proceso de endurecimiento mecánico de la resina, mejorando quizás también su adherencia.

En el sistema lámina pegada con dos bulones EB-MF-FRP no se verificó un incremento sino una ligera disminución, demostrando que el sistema no se ve afectado por la aplicación de ciclos de carga.

#### 8.3.6. Experimentación numérica

Con un número suficiente de resultados y los recursos para llevar adelante experimentación numérica que permita, como ya ocurre en diversos campos, predecir la respuesta de estos sistemas eficiente y económicamente, sin la necesidad de ensayos con costos económicos y de tiempo importantes.

# REFERENCÍAS

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Artículos

- [1] Abu Talib A.R., L.H. Abbud, A. Ali, F. Mustapha (2012) - Ballistic impact performance of Kevlar-29 and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder/epoxy targets under high velocity impact - *Materials and Design* 35, pp.12-19
- [2] Aidi B., M.K. Philen, S.W. Case (2015) - Progressive damage assessment of centrally notched composite specimens in fatigue - *Compos. Part A*, 74, 47 (2015)
- [3] Aljaafreh T., E. Benerberu, N. Yazdani (2017) - Anchorage Effect on Flexural Fiber Reinforced Polymer (FRP) Laminate Strengthening of Lightweight Concrete Beams - *Journal of Engineering and Architecture* December 2017, Vol. 5, No. 2, pp. 14-25
- [4] Alvarez J.C., S.F. Breña (2017) - Modeling parameters for the nonlinear seismic analysis of reinforced concrete columns retrofitted using FRP or steel jacketing - Report submitted to the Concrete Research Council of the ACI Foundation (CRC Project Report no. 71)
- [5] Amaro A.M., Reis P.N.B., de Moura M.F.S.F., Neto M.A. (2013) - Influence of multi-impacts on GFRP composites laminates, *Composites: Part B*
- [6] Ascione L. (2000) - I materiali compositi nell'ingegneria civile: relazioni costitutive e caratterizzazione sperimentale - 3a Giornata di Studio sui Materiali Compositi - Firenze
- [7] Bank L.C., D. Arora (2007) - Analysis of RC beams strengthened with mechanically fastened FRP (MF-FRP) strips - *Composited structures* 79 - pages 180-191
- [8] Bank L.C., M.G. Oliva, Han-Ug Bae, J.W. Barker, Seung-Woon Yoo (2007) - Pultruded FRP Plank as Formwork and Reinforcement for Concrete Members - *Advances in Structural Engineering* Volume 10 No. 5 - pages 524-535
- [9] Beirnes, M.J., R.G. Wight, M.A. Dagenais (2019) - Cold Temperature Effects on the Impact Resistance of SFRC Panels Strengthened with FRP Straps - FRPRCS-14, Belfast - June 2019
- [10] Boisseau A., P. Davies, F. Thiebaud (2013) - Fatigue Behaviour of Glass Fibre Reinforced Composites for Ocean Energy Conversion Systems - *Applied Composite Materials* - Volume 20 - pp 145-155

- [11] Braimah A. (2000) - Long-Term and Fatigue Behaviour of Carbon Fibre Reinforced Polymer Prestressed Concrete Beams - Doctoral Thesis - Queen's University - Kingston, Ontario, Canada
- [12] Breton H. (2013) - Mechanically fastened fiber-reinforced polymer (FRP) flexural retrofit systems for reinforced concrete flat-slab bridges - Thesis for the Degree of Master of Science University of Maine
- [13] Broughton, W R; Gower, M R L; Lodeiro, M J; Pilkington, G D; Shaw, R M (2011) - An experimental assessment of open-hole tension-tension fatigue behaviour of a GFRP laminate - Compos. A, Appl. Sci. Manuf., 42 (10). pp. 1310-1320
- [14] Busnelli A.P., R.E. López, M. del Rio (2014) - Refuerzo de vigas de hormigón armado con láminas de PRFV” - 23º Jornadas de Ingeniería Estructural
- [15] Busnelli, A.P. (2010) - Materiales compuestos fibrorreforzados en la construcción. Escuela de Ingeniería Civil - Publicación interna curso FCEIA
- [16] Busnelli, A.P. (2010) - El fenómeno de la delaminación en elementos fibrorreforzados. Escuela de Ingeniería Civil - Publicación interna curso FCEIA
- [17] Busnelli, A.P., R.E. López, J.C. Adué (2016) Uso de láminas pultruidas de polímeros reforzados con fibra de vidrio para incrementar la resistencia a flexión de vigas de hormigón armado - Gaceta Técnica Volumen 15 - Universidad de Barquisimeto (Venezuela)
- [18] Busnelli, A.P. (2018) - Diseño del refuerzo de vigas de hormigón armado con láminas de PRFV - Tesis Doctoral FCEIA
- [19] Carni, M., F. D'Angelo (2018) - Refuerzo de estructuras de hormigón armado con láminas PRFV - Parte II . Proyecto final FCEIA-UNR
- [20] Catangiu A., A.T. Dumitrescu, D. Ungureanu (2011) - Experimental results for bending fatigue behaviour of glass-epoxy composite materials - The Scientific Bulletin of Valahia University - Materials and Mechanics - Nr. 6 (year 9)
- [21] Ciobanu P., N. Țăranu, S. Popoaei, D. Banu (2012) - Structural response of reinforced concrete beams strengthened in flexure with near surface mounted fibre reinforced polymer reinforcement experimental setup-Buletinul institutului politehnic din iași-Fasc. 4.
- [22] Curtu I., M.D. Stanciu, V. Ciofoaia (2011) - The modal analysis of plates made of woven composite materials - Buletinul AGIR nr. 1/2011 - pp. 82-85.
- [23] de Oliveira Braga F., É. Pereira Lima Jr., E. de Sousa Lima, S. Neves Monteiro (2017) - The Effect of Thickness on Aramid Fabric Laminates Subjected to 7.62 MM Ammunition Ballistic Impact - Materials Research. 2017; 20(Suppl. 2): 676-680
- [24] Diab H., Z. Wu, K. Iwashita (2007) - Experimental and numerical investigation of fatigue behavior of FRP-concrete interface - Proceedings of the FRPRCS-8 Symposium - Patras (Greece) - paper 2-29

- [25] Dyer K.P., D.H. Isaac (1998) - Fatigue behaviour of continuous glass fibre reinforced composites - Composites Part B 29B pp 725-733 - Elsevier Science Ltd.
- [26] Eliasson S., S.Wanner, Z. Barsoum, P. Wennhage (2019) - Development of fatigue testing procedure for unidirectional carbon fiber composites - Universite de Sherbrooke (Quebec)
- [27] Elsayed W. (2008) - Strengthening of reinforced concrete two-way slabs using mechanically fastened FRP systems - These de doctorat es sciences appliquees - Universite de Sherbrooke (Quebec)
- [28] Esteves J.L., P. Vieira, A.T. Marques (2001) - Fatigue behaviour of reinforced concrete beam strengthened with a CFRP reinforced system - University of Porto, Portugal
- [29] Ferreira J.A.M., J.D.M. Costa, P.N.B. Reis (1999) - Static and fatigue behaviour of glass-fibre-reinforced polypropylene composites - Theoretical and Applied Fracture Mechanics 31 - pages 67-74
- [30] Garcez M.R., L.C. Meneghetti, R. M. Teixeira (2019) - The effect of FRP prestressing on the fatigue performance of strengthened RC beams - Structural Concrete. 2019 - pp. 1-16.
- [31] Garcez M.R., G.L. Silva Filho, U. Meier (2012) - Reforço de vigas de concreto armado com laminados de PRFC protendidos. Parte 1: Análise sob ação de carregamento estático - Revista Ibracon de Estruturas e Materiais Volume 5 - nº 3 - pp 343-351, carregamento estático- Structural Concrete. 2019 - pp. 1-16.
- [32] Gaurav A., K. Singh (2016) - Fatigue Behavior of FRP Composites and CNT-Embedded FRP Composites: A Review - POLYMER COMPOSITES - 2016
- [33] Gayatri Vineela. M, Gayathri Tadepalli, A. Krishnaiah (2016) - Impact behaviour of Fibre Reinforced composites with change in Fibre Orientation - International Journal of Current Engineering and Technology, Vol.6, No.1
- [34] Ghosh K.K., S.A. Sheikh (2007) - Seismic Upgrade with Carbon Fiber-Reinforced Polymer of Columns Containing Lap-Spliced Reinforcing Bars - ACI Structural Journal/March-April 2007 - pp 227-236
- [35] Gómez-Martínez F., A. Pérez-García, F. De Luca, G. M. Verderame (2015) - Comportamiento de los edificios de HA con tabiquería durante el sismo de Lorca de 2011: aplicación del método FAST - Informes de la Construcción, Vol 67, No 537 - Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja
- [36] Harries K. (2005) - Fatigue behaviour of bonded FRP used for flexural retrofit - Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005)
- [37] Hasegawa H., I. Yoshitake, T. Kato (2020) - Bond performance of ultra-high modulus carbon fiber reinforced polymer (CFRP) rod attached with glass fiber reinforced polymer (GFRP) ribs - JSCE Proceedings E2 (Materials / Concrete Structure) - Vol. 76, No. 2, 89-97, 2020 pp 89-97

- [38] Hirwani C.K., S.S. Sahoo, S.K. Panda (2016) - Effect of delamination on vibration behaviour of woven Glass/Epoxy composite plate-An experimental study - 5th National Conference on Processing and Characterization of Materials - IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 115
- [39] Kim H., D. J. Kim, M. S. Kim, Y.H. Lee (2014) - Seismic response of beam-column joints rehabilitated with FRP sheets and buckling restrained braces - JVE International Ltd. Journal of Vibroengineering. August 2014. volume 16 - pp. 2385-2393
- [40] Lahuerta F., R.P.L. Nijssen, F.P.van der Meer, L.J.Sluys (2016) - Thickness scaled compression tests in unidirectional glass fibre reinforced composites in static and fatigue loading - Composite Science and Technology Volume 123 - pag. 115-124
- [41] Lamanna A.J., L.C. Bank, D.T. Borowicz, D. Arora (2003) - Strengthening of concrete beams with mechanically fastened FRP strips - Papers University of Wisconsin, Madison USA
- [42] Lamanna AJ, Bank L.C., Scott D.W. (2001) - Flexural strengthening of reinforced concrete beams using fasteners and fiber-reinforced polymer strips. ACI Struct J 2001;98(3):368-76
- [43] Lamanna AJ, Bank L.C., Scott D.W. (2004) - Flexural strengthening of reinforced concrete beams by mechanically attaching fiber-reinforced polymer strips. J Compos Construct 2004;8(3):203-10
- [44] Lee Y.S., E.D. Wetzel, N.J. Wagner (2003) - The ballistic impact characteristics of Kevlar® woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid - Journal of Materials Science 38 (2003) 2825 - 2833
- [45] Lee K.S., B.Y. Lee, S.Y. Seo (2016) - A Seismic Strengthening Technique for Reinforced Concrete Columns Using Sprayed FRP - Polymers 2016, 8, 107
- [46] Loring H., W.G. Davids (2015) Mechanically fastened hybrid composite strips for flexural strengthening of concrete beams. - Construction and building materials 76 - pages 118-129
- [47] Ma Q.L., X.Z. Lu, L.P. Ye, K. Zhang (2007) - Study on the fatigue behavior of RC beams strengthened with prestressed CFRP sheets - Proceedings of the FRPRCS-8 Symposium - Patras (Greece) - paper 4-7
- [48] Mahal M.S.M. (2015) - Fatigue Behaviour of RC beams Strengthened with CFRP - Doctoral Thesis - Luleå University of Technology - Sweden
- [49] Mahal M., T. Blanksvärd, B. Täljsten (2013) - Examination at a Material and Structural Level of the Fatigue Life of Beams Strengthened with Mineral or Epoxy Bonded FRPs: The State of the Art - Advances in Structural Engineering Vol 16 - No. 7 - pages 1311-1327
- [50] Mahal M., B. Täljsten, T. Blanksvärd (2015) - Experimental performance of RC beams strengthened with FRP materials under monotonic and fatigue loads - Journal of Composites for Construction January 2015

- [51] Manjunatha C.M., S. Sprenger, A.C. Taylor, A.J. Kinloch (2010) - The Tensile Fatigue Behaviour of a Glass-Fiber Reinforced-Plastic Composite Using a Hybrid-Toughened Epoxy Matrix - Journal of Composite Materials, vol. 44 - pages 2095-2109
- [52] Martinelli E., A. Napoli, B. Nunziata, R. Realfonzo (2011) - FRP laminates mechanically fastened to concrete: experimental observations and numerical modeling - First Middle East Conference of Smart Monitoring Assessment and Rehabilitation of Civil Structures
- [53] Martinelli E., A. Napoli, B. Nunziata, R. Realfonzo (2013) - Flexural response of RC beams strengthened by MF-FRP laminates: numerical modeling - Second Conference of Smart Monitoring Assessment and Rehabilitation of Civil Structures
- [54] Martinelli E., A. Napoli, B. Nunziata, R. Realfonzo (2014) - RC Beams Strengthened with Mechanically Fastened Composites: Experimental Results and Numerical Modeling - Polymers 2014, 6, pp 613-633
- [55] Marrone L., E. Muruchi, M. Perno (2018) - Refuerzo de estructuras de hormigón armado con láminas PRFV. Proyecto final FCEIA-UNR.
- [56] Matana M., G. Galecki, N. Maerz, A. Nanni (2005) - Concrete substrate preparation and characterization prior to adhesion of externally bonded reinforcement - Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005), pp 133-139
- [57] Mehdizad Taleie S., A. Vatani Oskouei, H. Moghaddam (2007) - Experimental investigation of FRP relaxation and its effect on pre-stressing techniques - Proceedings of the FRPRCS-8 Symposium - Patras (Greece) - paper 1-4
- [58] Meier U. (2001) - Polyfunctional use of advanced composite materials with concrete - 3rd International Conference on Concrete under Severe Conditions, Environment, and Loading: CONSEC'01; 2001, Jun 18-20; Vancouver, Canada
- [59] Min K.H., S.H. Cho, D.Y. Yoo, Y.S. Yoon (2010) - Behaviors of FRP sheet reinforced concrete to impact and static loading - Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures -High Performance, Fiber Reinforced Concrete, Special Loadings and Structural Applications- B. H. Oh, et al. (eds)
- [60] Mohammadi M., D. Mostofinejad, M. Barghian (2017) - Effects of Surface Preparation Method on FRP-Concrete - Journal of Composites for Construction - February 2017
- [61] Mostofinejad D., S. Shamel, A. Hosseini (2012) - Experimental study on the effectiveness of EBROG method for flexural strengthening of RC beams - Conference paper - June 2012
- [62] Mukherjee A., M. Joshi (2003) - FRPC reinforced concrete beam-column joints under cyclic excitation - Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Bombay - pp 185-199
- [63] Naik N.K., P. Shrirao, B.C.K. Reddy (2005) - Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Parametric studies - Aerospace Engineering Department, Indian Institute of Technology Bombay, pp. 104-116

- [64] Napoli A. (2009) - RC Structures Strengthened with Mechanically Fastened FRP Systems - University of Miami
- [65] Napoli A., F. Matta, E. Martinelli, A. Nanni, R. Realfonzo (2010) - Modelling and verification of response of RC slabs strengthened in flexure with mechanically fastened FRP laminates - Magazine of Concrete Research, 2010, 62, No. 8, August, páginas 593-605
- [66] D. Ohelers, M.M. Sadakkathulla, M. Haskett, M.C. Griffith (2008) A partial-interaction ductility model for FRP plated RC flexural members Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008) Zurich, Switzerland
- [67] D. Ohelers, M.M. Sadakkathulla, M.C. Griffith, T. Ozbakkaloglu (2007) - Fundamental issues that govern the rotation of FRP retrofitted RC columns and beams: the intractable plastic hinge ductility problem - Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS 2007) S.T. Smith (ed) 2007 International Institute for FRP in Construction - pages 23-32
- [68] Páez Cornejo J.D. (2016) - Análisis comparativo de estructuras con y sin reforzamiento (FRP) - Alternativa - Vol 17 - Nº 3 - 2017 - pp. 43-52
- [69] Pekbey Y., K. Aslantas, N. Yumak (2017) - Ballistic impact response of Kevlar Composites with filled epoxy matrix - Steel and Composite Structures 24(2) - June 2017:191-200
- [70] C. Pellegrino, G. Boschetto, D. Tinazzi, C. Modena (2005) - Progress on understanding bond behaviour in RC elements strengthened with FRP - Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005) Chen and Teng (eds) © 2005 International Institute for FRP in Construction - pages 63-68
- [71] Pellegrino C., E. Bordignon, M. Muner, C. Modena (2007) - Il rinforzo a flessione di travi in C.A. e C.A.P. con FRP in armatura lenta e pretesa - Rivista STRADE & AUTOSTRADE 1-2007 - pagine 110-113
- [72] Pellegrino C., C. Modena (2009) - Flexural Strengthening of Real-Scale RC and PRC Beams with End-Anchored Pretensioned FRP Laminates - ACI Structural Journal/May-June 2009 - pages 319-328
- [73] Pellegrino C., C. Modena, G. Giacomini (2009) - Possibile integrazione al documento CNR-DT 200/2004 riguardante il sistema di rinforzo con lamine FRP presollecitate - Studi di revisione CNR
- [74] Roy R., B.K. Sarkar, A.K. Rana, N.R. Bose (2001) - Impact fatigue behaviour of carbon fibre-reinforced vinylester resin composites - Bull. Mater. Sci., Vol. 24, No. 1, February 2001, pp. 79-86
- [75] Santos da Luz, F., E. Pereira Lima Junior, L. H. Leme Louro, S. N. Monteiro (2015) - Ballistic Test of Multilayered Armor with Intermediate Epoxy Composite Reinforced with Jute Fabric Materials Research 2015; 18(Suppl 2): 170-177
- [76] Stöcklin, I., U. Meier (2003) - Strengthening of concrete structures with prestressed and gradually anchored CFRP- Sixth international symposium on FRP reinforcement for concrete structures - Singapore. Anais... FRPRCS-6. 2003

- [77] Strand C.H. (2017) - Mechanical and Impact tests of CFRP - Master thesis in Technology and Safety in the High North - UiT, The Arctic University of Norway
- [78] Tierno L.A., M.J. Lazo Pacheco (2009) - Cálculo y diseño de estructuras con perfilera de materiales compuestos pultruidos - Publicación C.M.E. Argentina S.A.
- [79] Vieille, B., V.M. Casado, C. Bouvet (2013) - About the impact behavior of woven-ply carbon fiberreinforced thermoplastic- and thermosetting-composites: A comparative study - Composite Structures, vol. 101. pp. 9-21.
- [80] Vielma Pérez J.C, C.V. Pérez Moreno, H. Rodríguez, R.A. Picón Rodríguez (2014) - Refuerzo pre-sísmico de juntas exteriores no conformes de concreto armado con FRP, estudio experimental y numérico - Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, Passo Fundo, v. 11, n. 1, p. 155-175, jan. /jun. 2014
- [81] Yoshitake, I., H. Hasegawa, K. Shimose (2020). Monotonic and cyclic loading tests of reinforced concrete beam strengthened with bond-improved carbon fiber reinforced polymer (CFRP) rods of ultra-high modulus - Engineering Structures, Vol. 206, 110175, 2020
- [82] Yoshitake, I., K. Yumikura, Y. Mimura, Y. J. Kim (2011). Composite strips with various anchor systems for retrofitting concrete beams - International Journal of Computing Science and Mathematics, 5(1), page 43-48
- [83] Yost J.R., S.P. Gross, M.J. Deitch (2007) - Fatigue behavior of concrete beams strengthened in flexure with near surface mounted CFRP - Proceedings of the FRPRCS-8 Symposium - Patras (Greece) - paper 8-9
- [84] Zakaria K.A., R.H. Jimit, S.N.R. Ramli, A.A. Aziz, O. Bapokutty, M.B. Ali (2016) - Study on fatigue life and fracture behaviour of fibreglass reinforced composites - Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES), Volume 10, Issue 3, pp. 2300-2310

## **Normas y reglamentos**

- ACI 440.2R-17 (2017) - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.
- CIRSOC 201 (2005) - Reglamento argentino de estructuras de hormigón
- CIRSOC 301 (2005) - Reglamento argentino de estructuras de acero para edificios
- CNR-DT 200 (2004) - Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati
- CNR-DT 200 R1 (2014) - Guía para el diseño y construcción de sistemas FRP pegados externamente para el reforzamiento de estructuras existentes
- FEMA 547 (2006) - Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings - Federal Emergency Management Agency
- CIRSOC 201 (2009) - Effects of Strength and Stiffness Degradation on Seismic Response - Federal Emergency Management Agency
- FEMA P-1051 (2016) - 2015 NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples - Federal Emergency Management Agency
- Linee Guida ASSOBETON per la progettazione sismica di strutture prefabbricate (2011)
- Nexus Projectes S.L. (2015) grafica extraida de Busnelli, A.P. (2018) - Diseño del refuerzo de vigas de hormigón armado con láminas de PRFV - Tesis Doctoral FCEIA



Tesis Doctoral

# **COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS**

Rubén Edgardo López

## **ANEXOS**

Diciembre de 2022

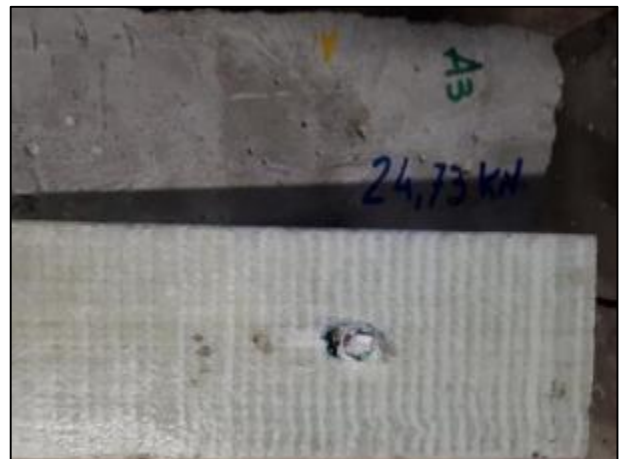
## ANEXO 1 - FOTOGRAFÍAS DE LOS ENSAYOS ESTÁTICOS

Probeta A1 – Sin Imagen

Probeta A2



Probeta A3



Probeta A4



Probeta A5



Probeta A6



Probeta A7



Probeta A8



Probeta A9



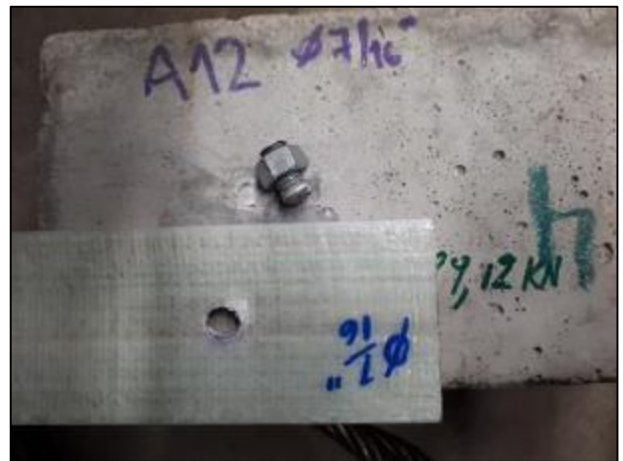
Probeta A10



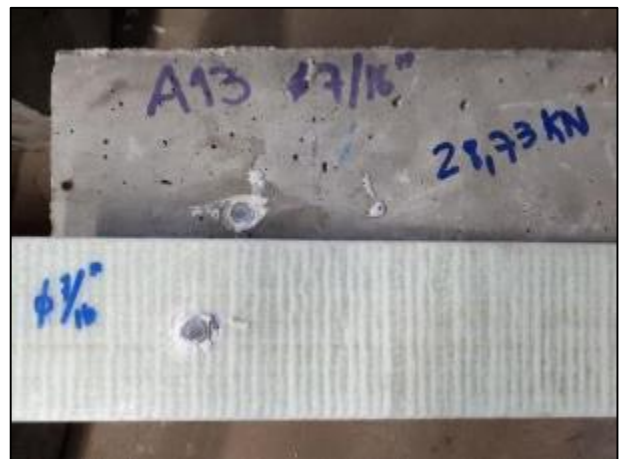
Probeta A11



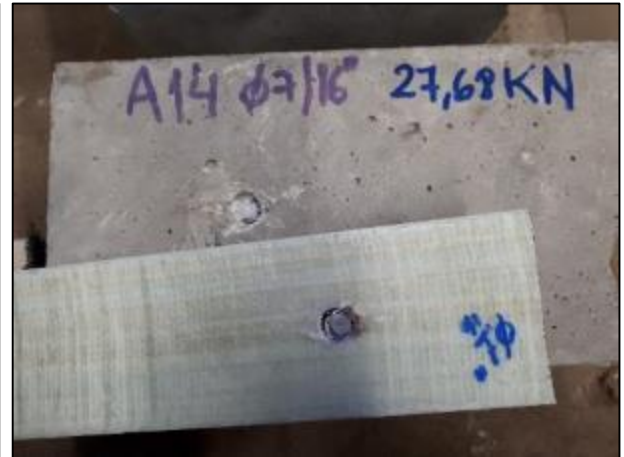
Probeta A12



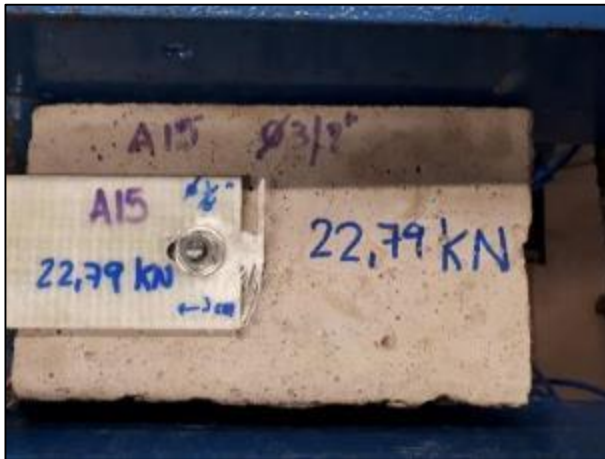
Probeta 13



Probeta A14



Probeta A15



Probeta A16



Probeta A17



Probeta A18



Probeta A19



Probeta A20



Probeta A21



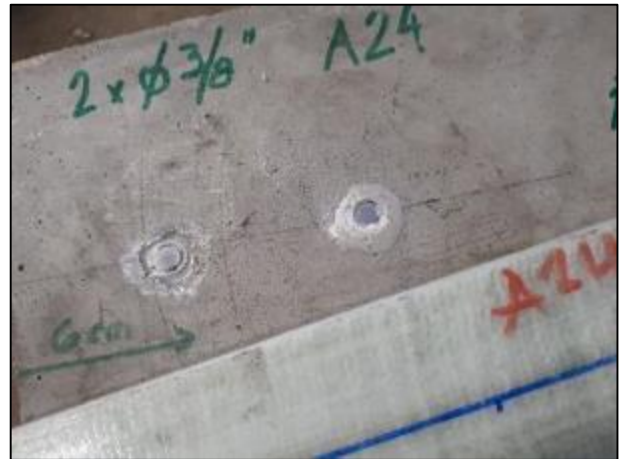
Probeta A22



Probeta A23



Probeta A24



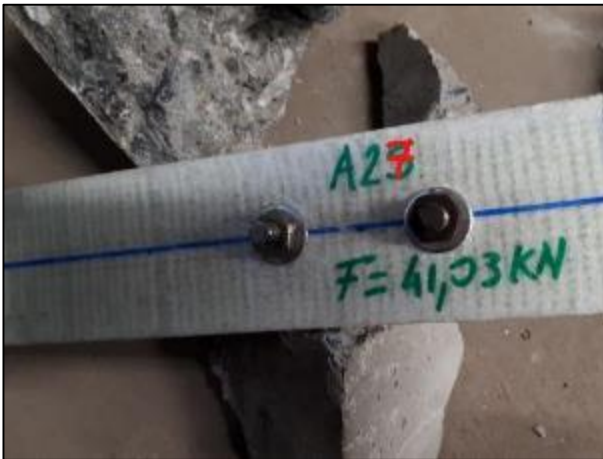
Probeta A25



Probeta A26



Probeta A27



Probeta A28



Probeta A29



Probeta A30



Probeta A31



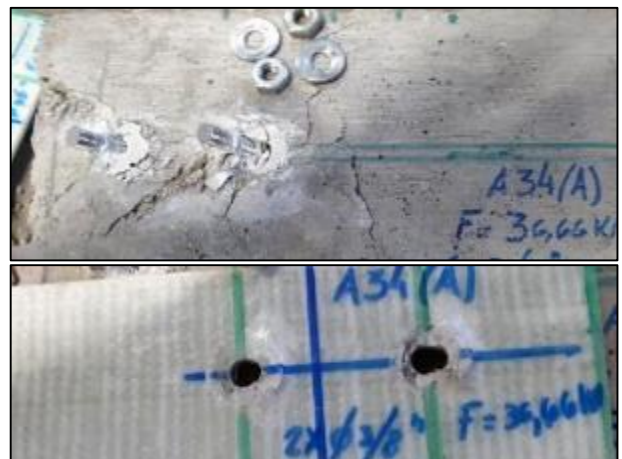
Probeta A32



Probeta A33



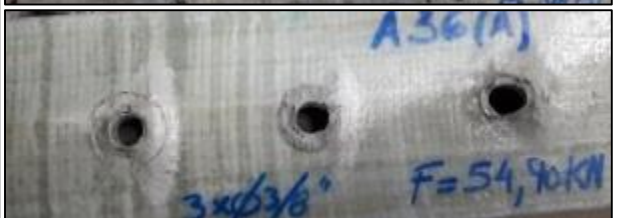
Probeta A34



Probeta A35



Probeta A36



Probeta 37



Probeta A38 a A42 – Sin Imagen

Probeta B1



Probeta B2



Probeta B3



Probeta B4



Probeta B5 – B6 – Sin Imagen

Probeta P1



Probeta P2



Probeta P3



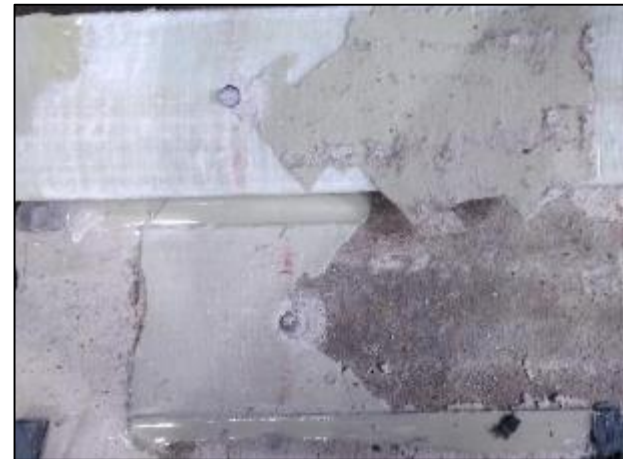
Probeta P4



Probeta P5



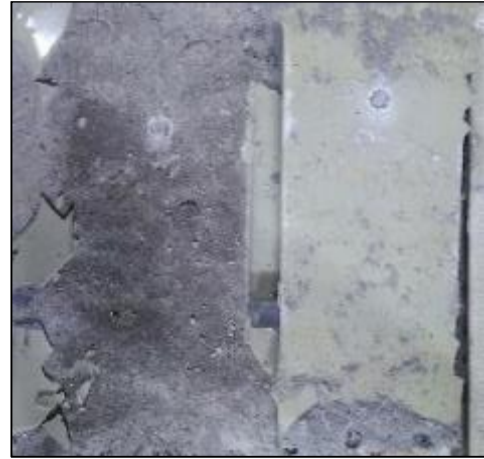
Probeta P6



Probeta P7



Probeta P8



Probeta P9



Probeta P10



Probeta Q1



Probeta Q2

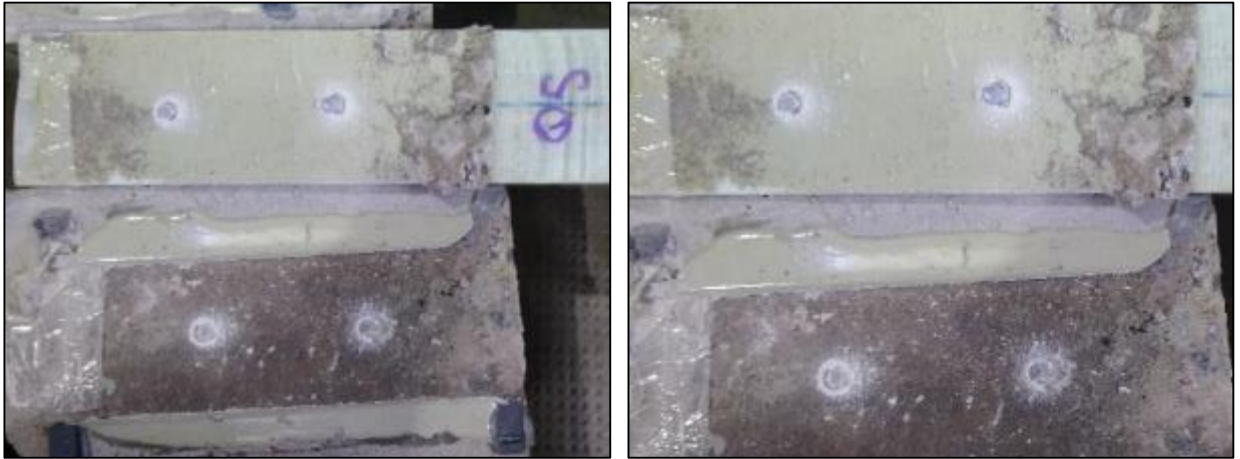


Probeta Q3



Probeta Q4 – Sin Imagen

Probeta Q5



Probeta Q6 – Sin Imagen

Probeta Q7



Probeta Q8



Probeta Q9



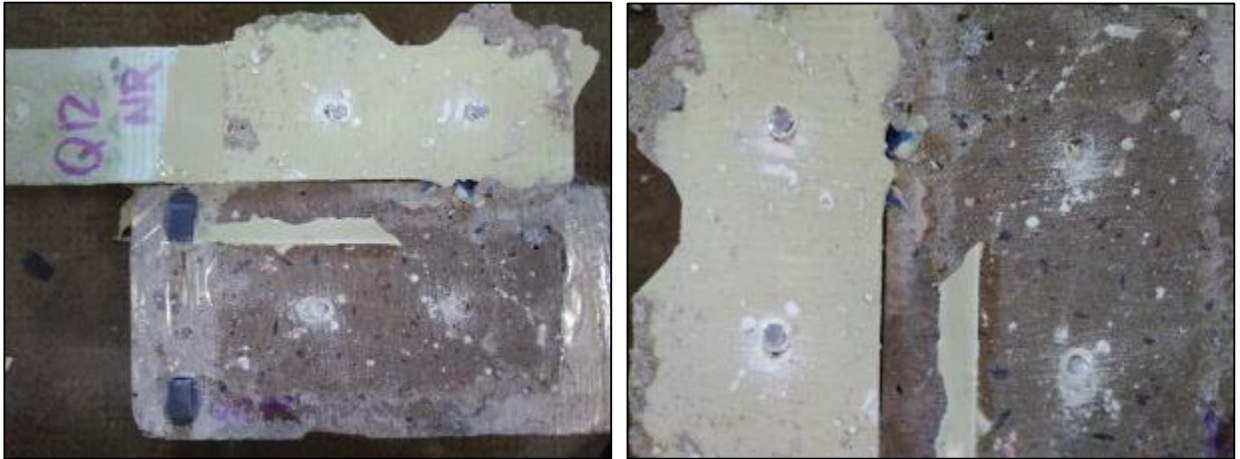
Probeta Q10



Probeta Q11



Probeta Q12



Probeta 1 – Sin Imagen

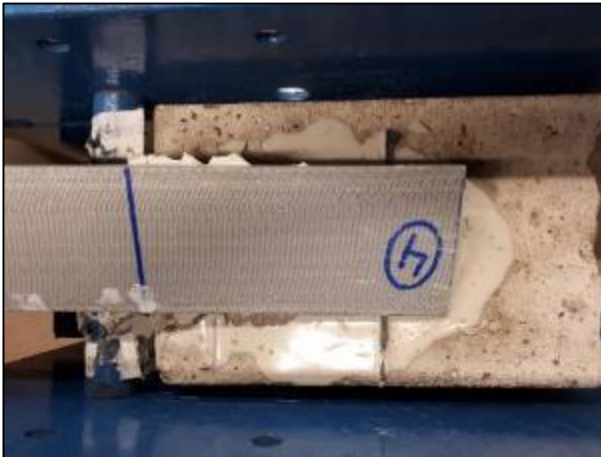
Probeta 2



Probeta 3



Probeta 4



Probeta 5



Probeta 6

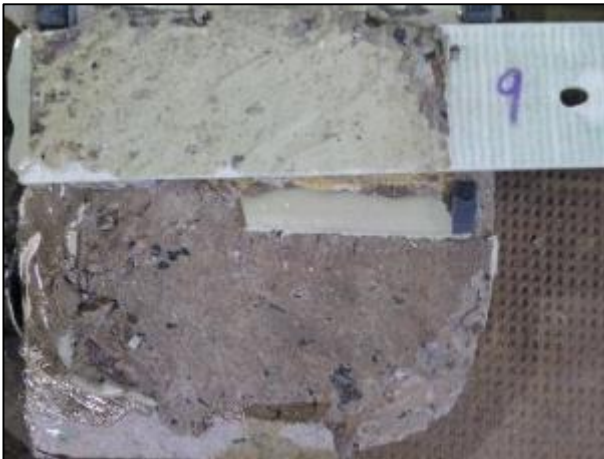


Probeta 7 – Sin Imagen

Probeta 8



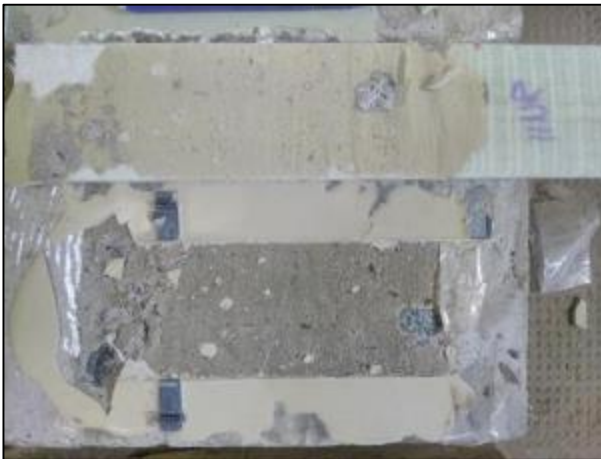
Probeta 9



Probeta 10



Probeta 11



Probeta 12



## ANEXO 2 - DISEÑO DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS DINÁMICOS

En este anexo se presentan los planos con los que se construyó la máquina de ensayos para la cual se elaboró previamente un prototipo a escala planteado con una impresora 3D.

MAQUINA CICLADO - CONJUNTO ARMADO

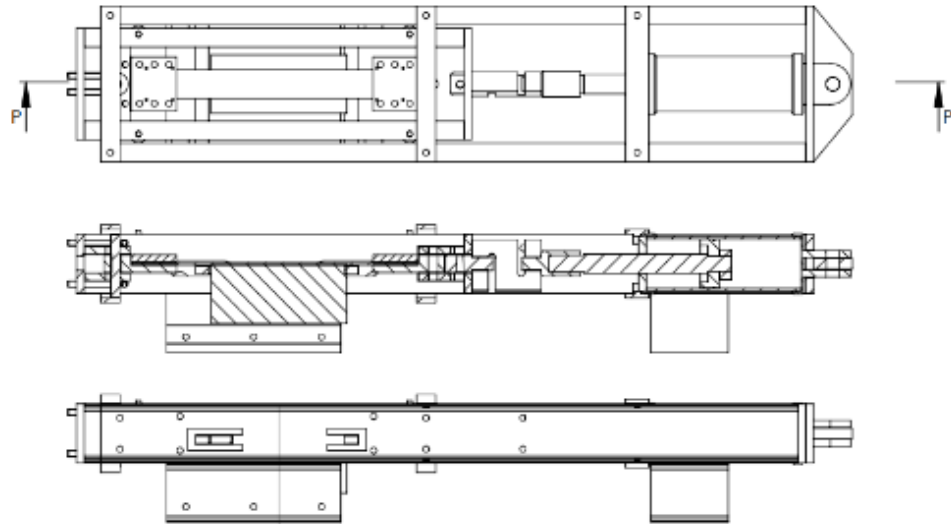


Figura 2-1 – Equipo de ensayo dinámico - Esquema.

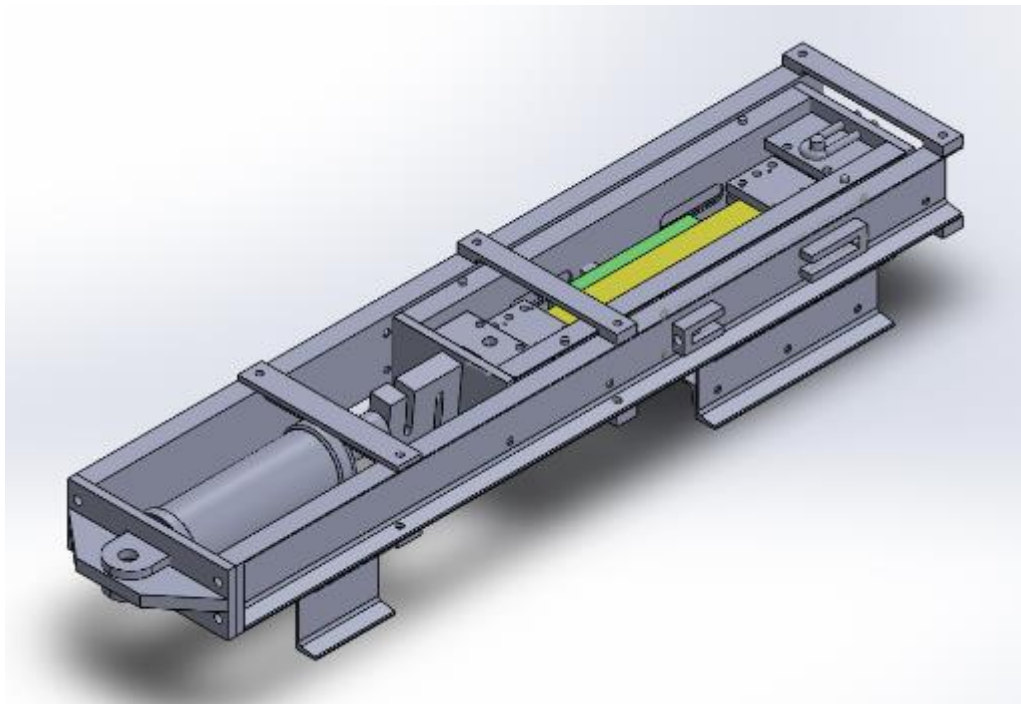


Figura 2-2 – Equipo de ensayo dinámico - Axonometría.

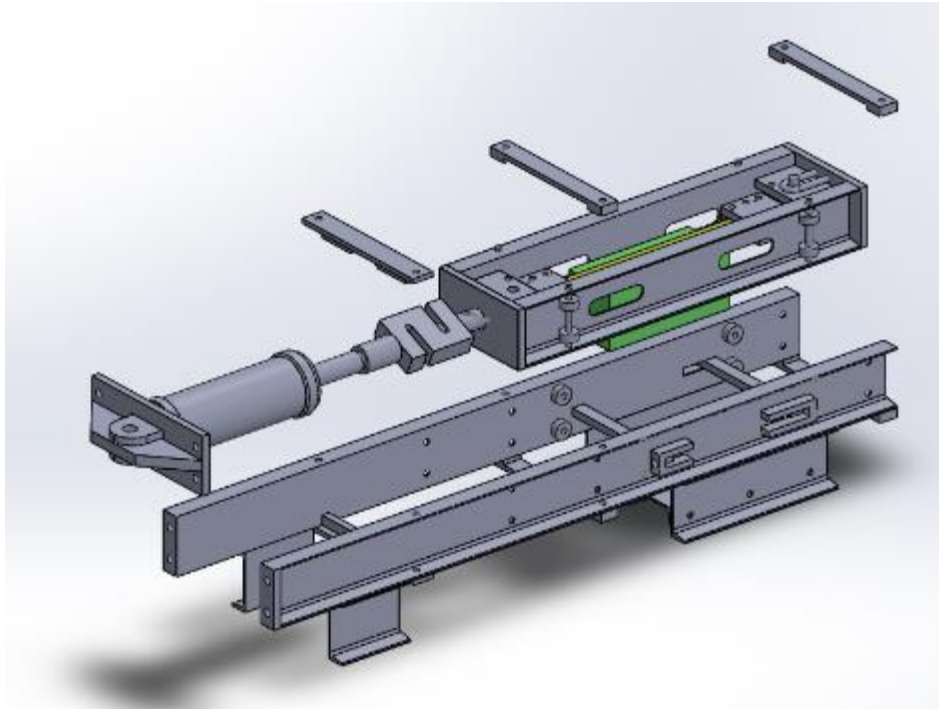


Figura 2-3 – Equipo de ensayo dinámico - Despiece.

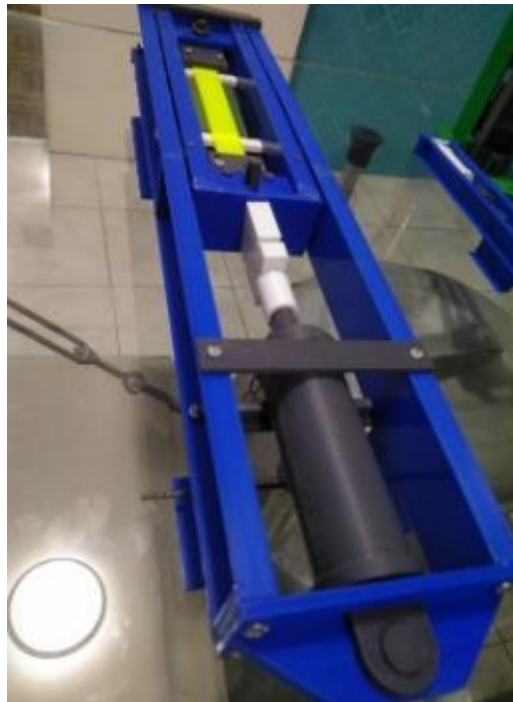
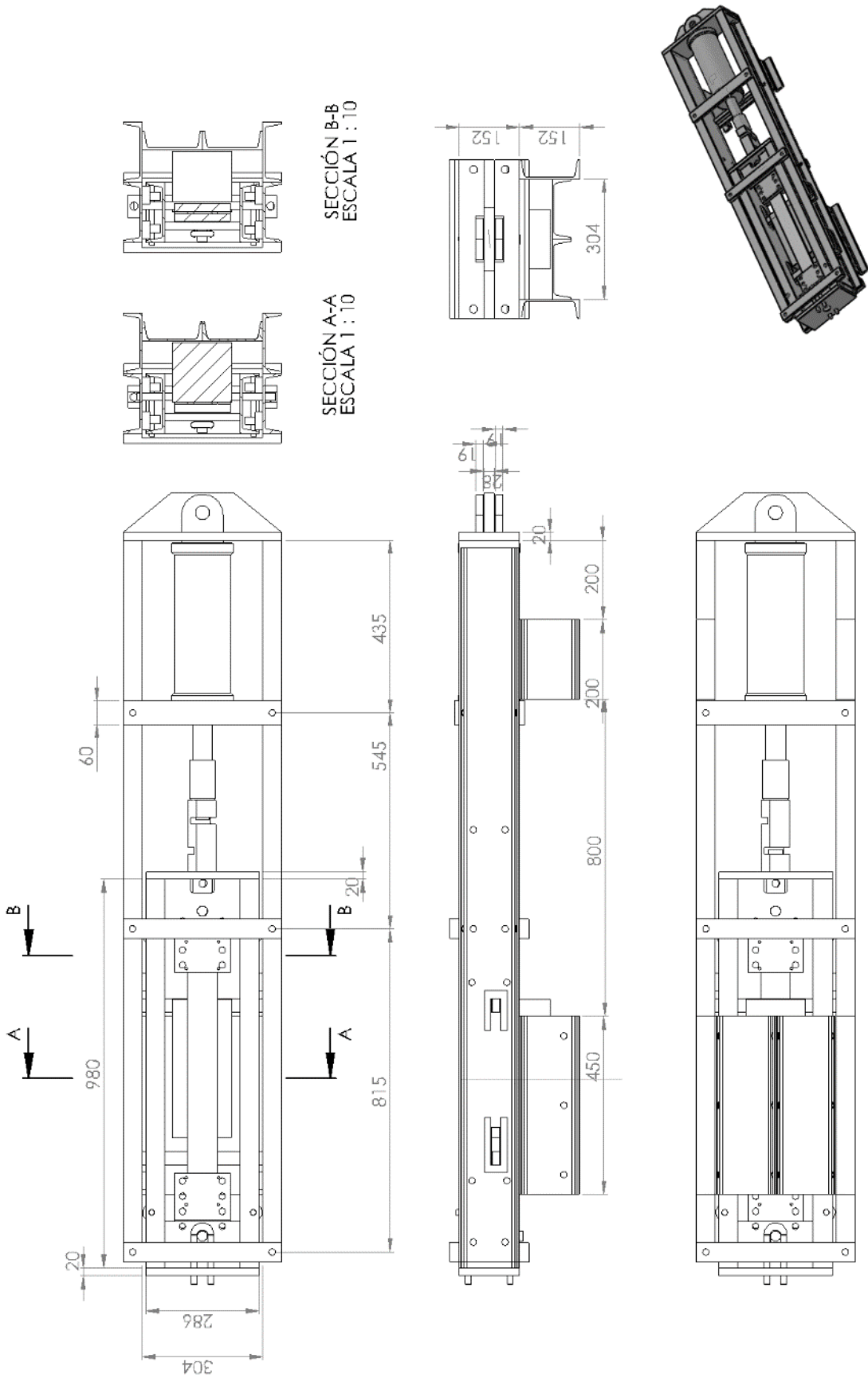


Figura 2-4 – Equipo de ensayo dinámico – Prototipo escala 1:4.



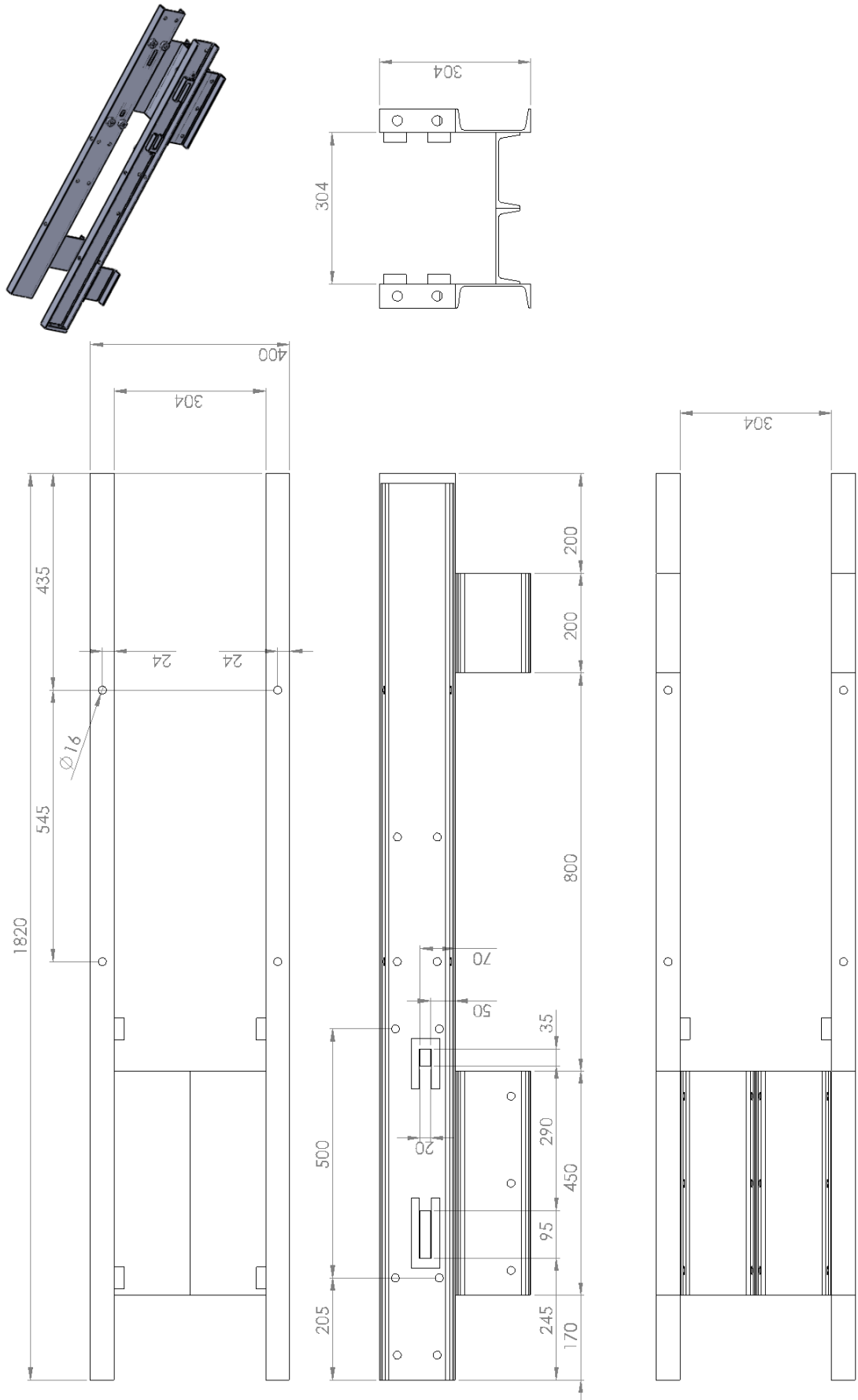
Figura 2-5 – Equipo de ensayo dinámico finalizado.

MAQUINA CICLADO - CONJUNTO ARMADO

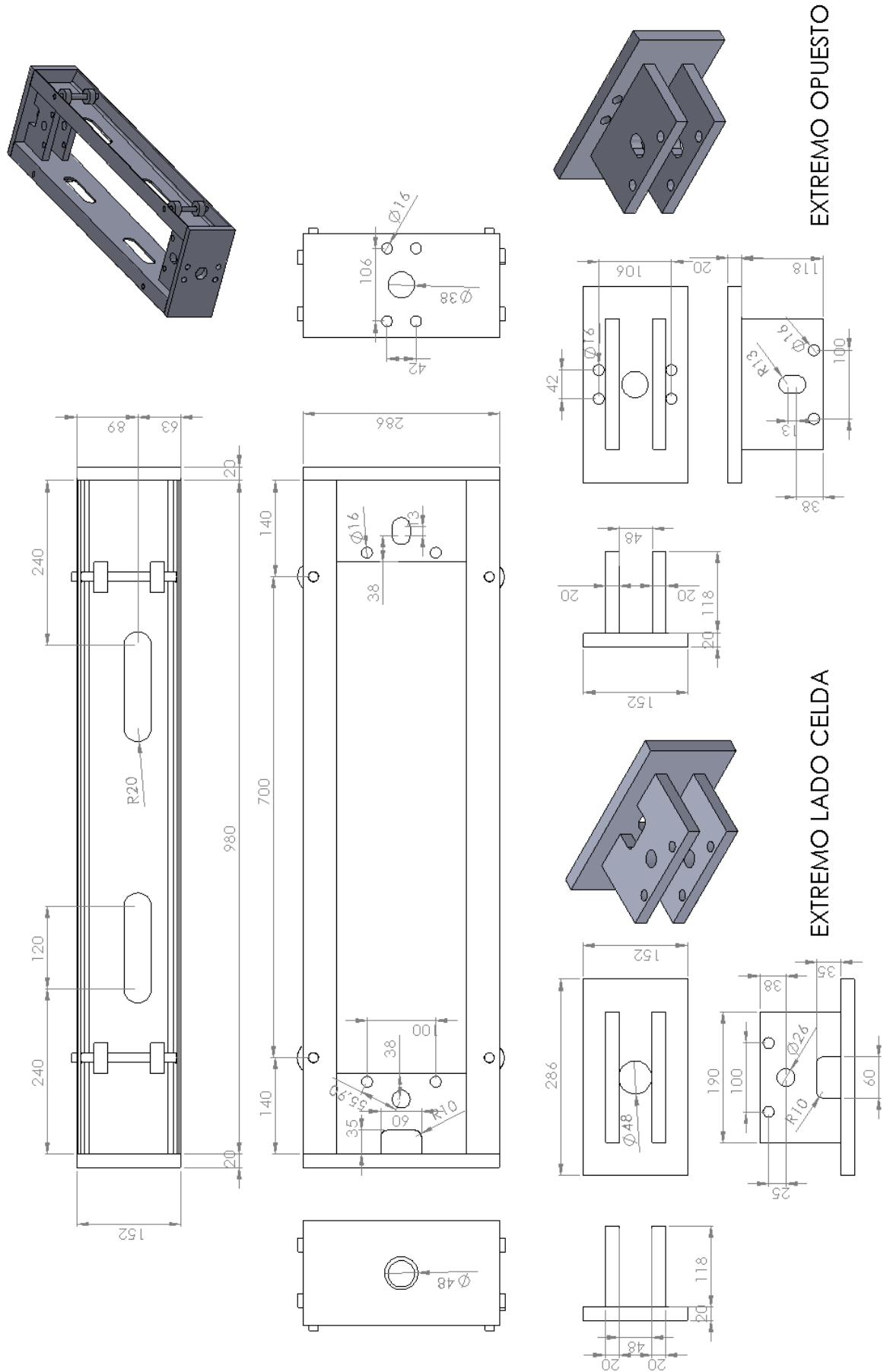


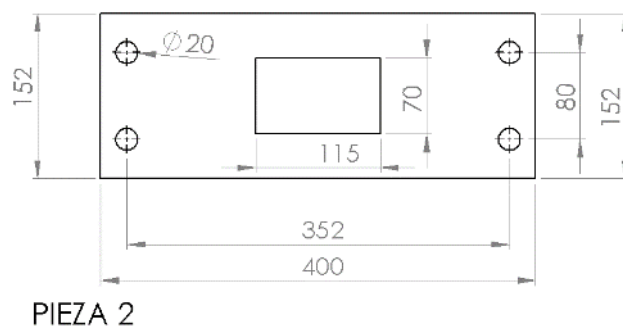
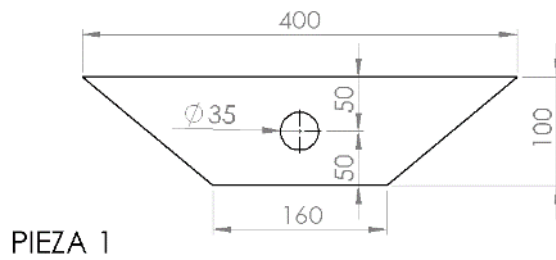
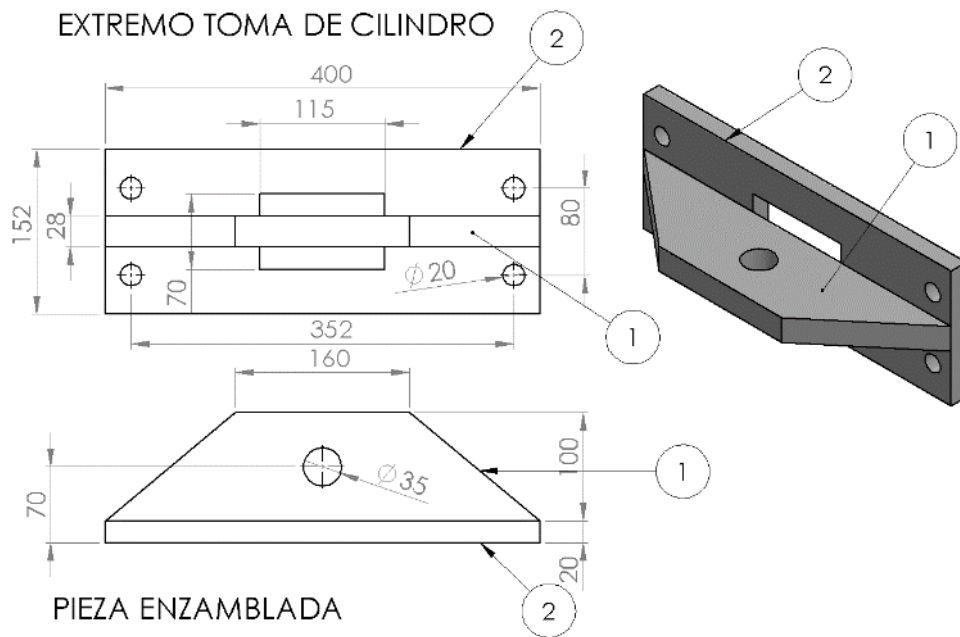
ESCALA 1 : 10

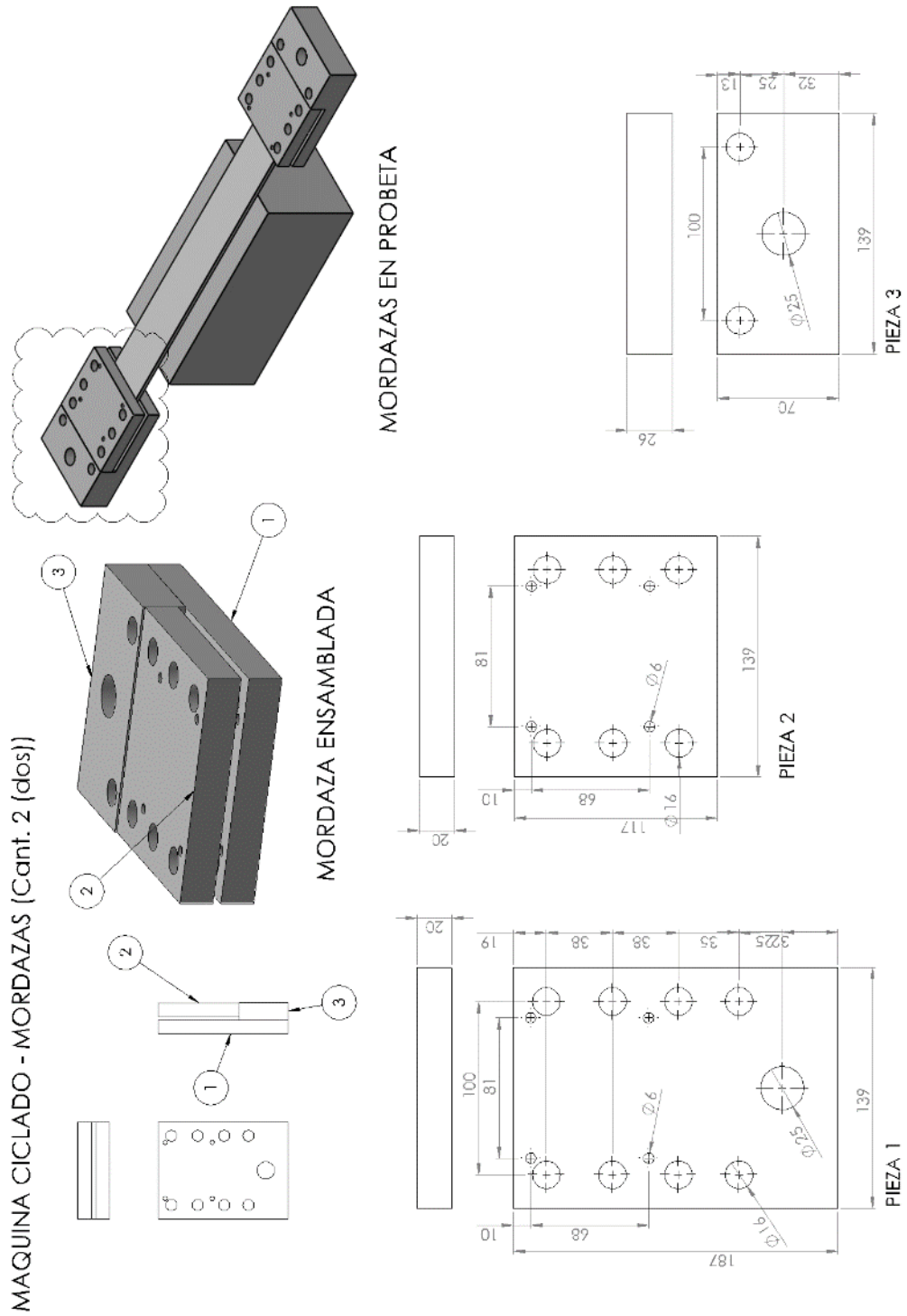
MAQUINA CICLADO - BASTIDOR EXTERIOR



MAQUINA CICLADO - BASTIDOR INTERINO

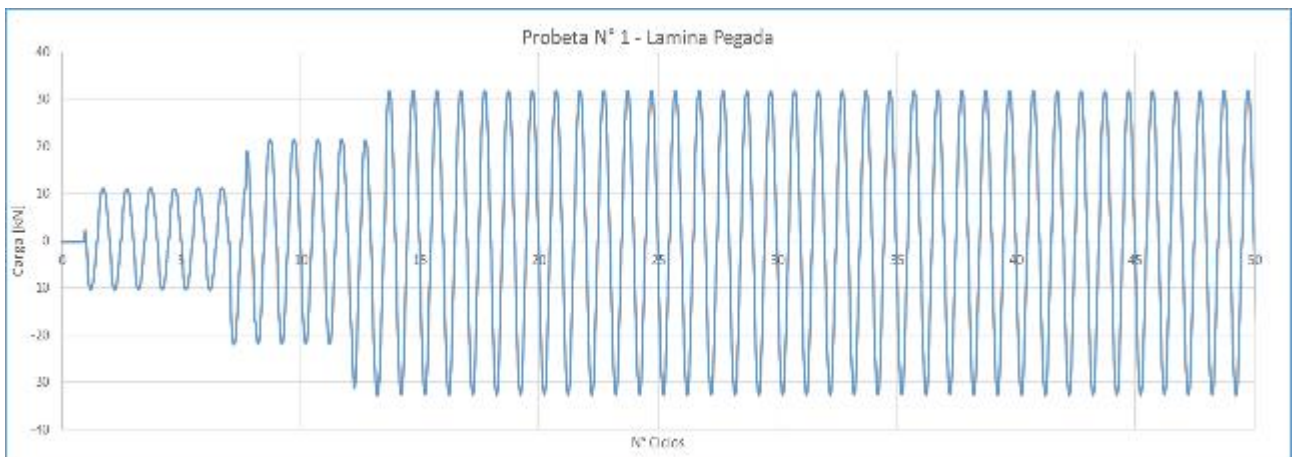
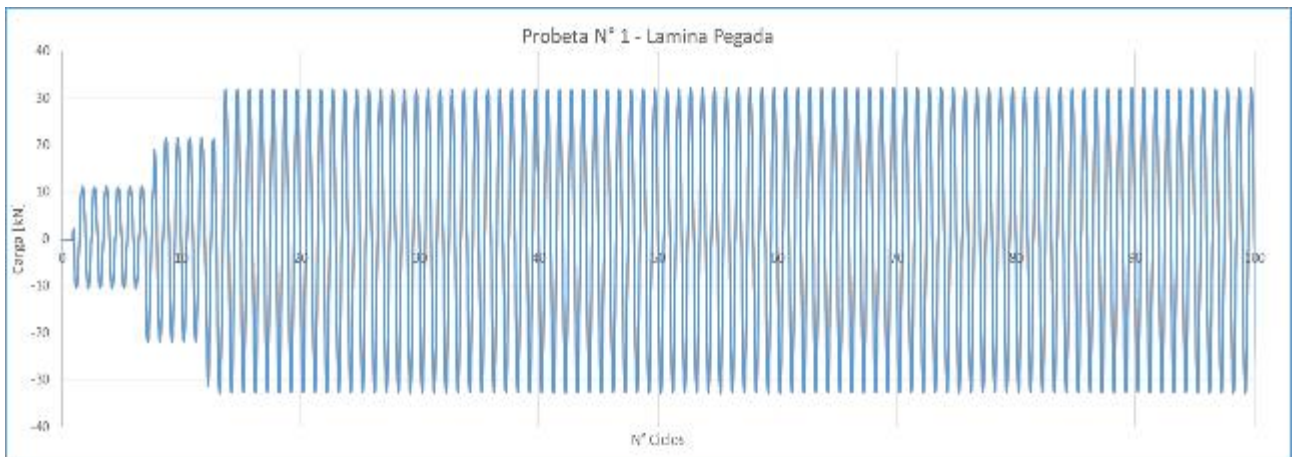
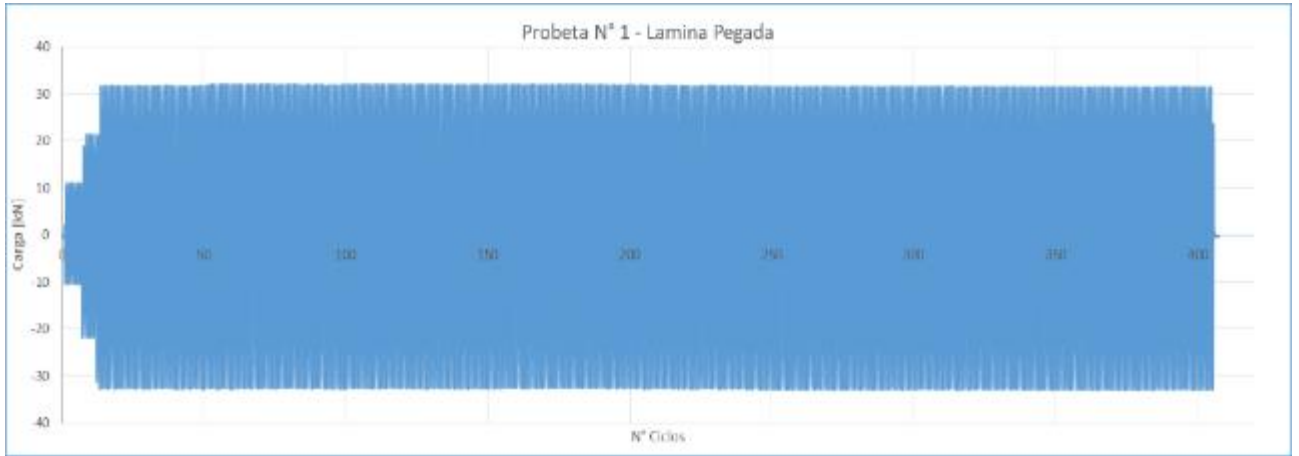




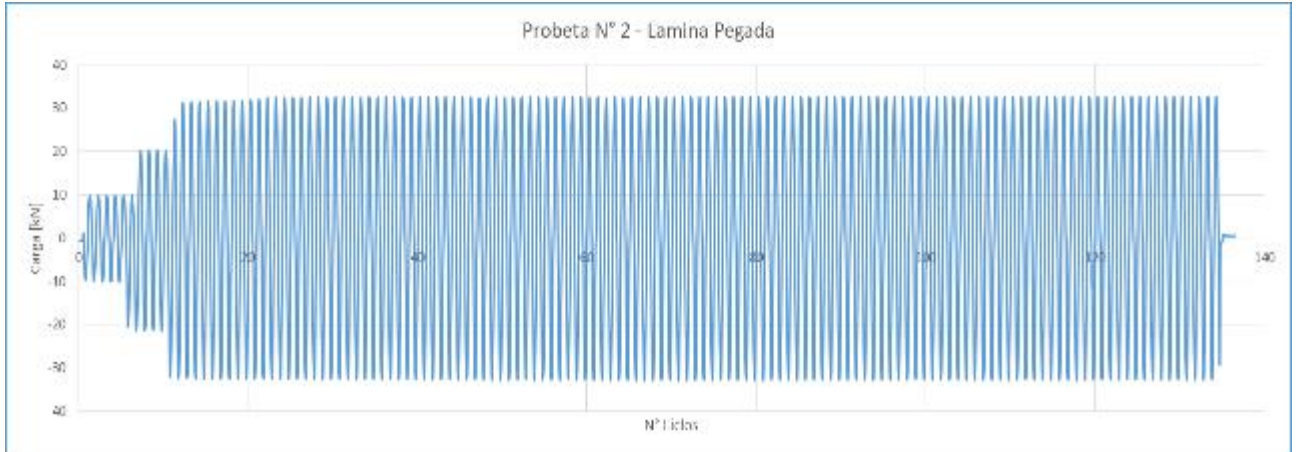


### ANEXO 3 – GRÁFICOS DE LOS ENSAYOS DINÁMICOS

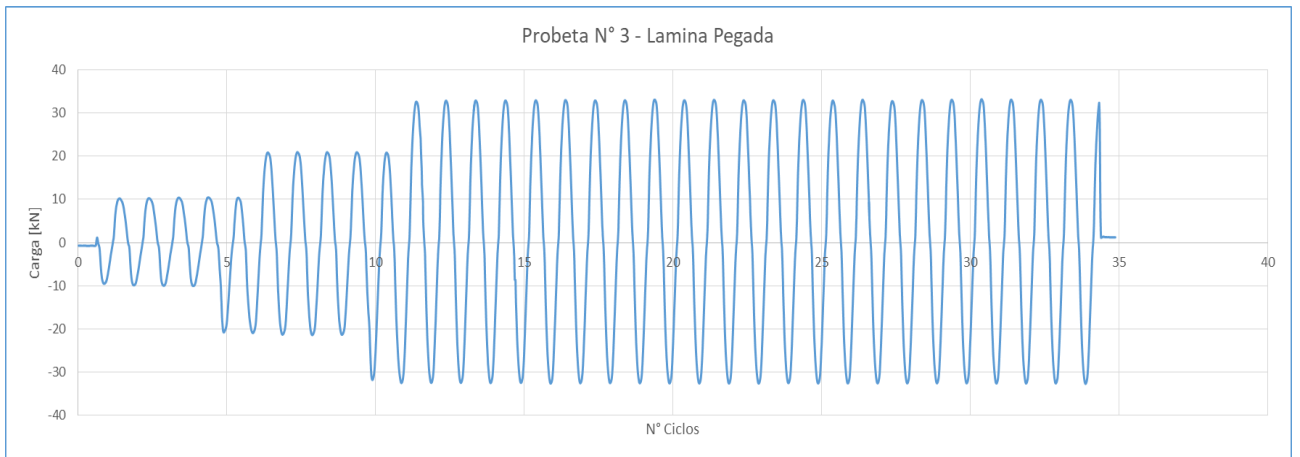
Probeta 001



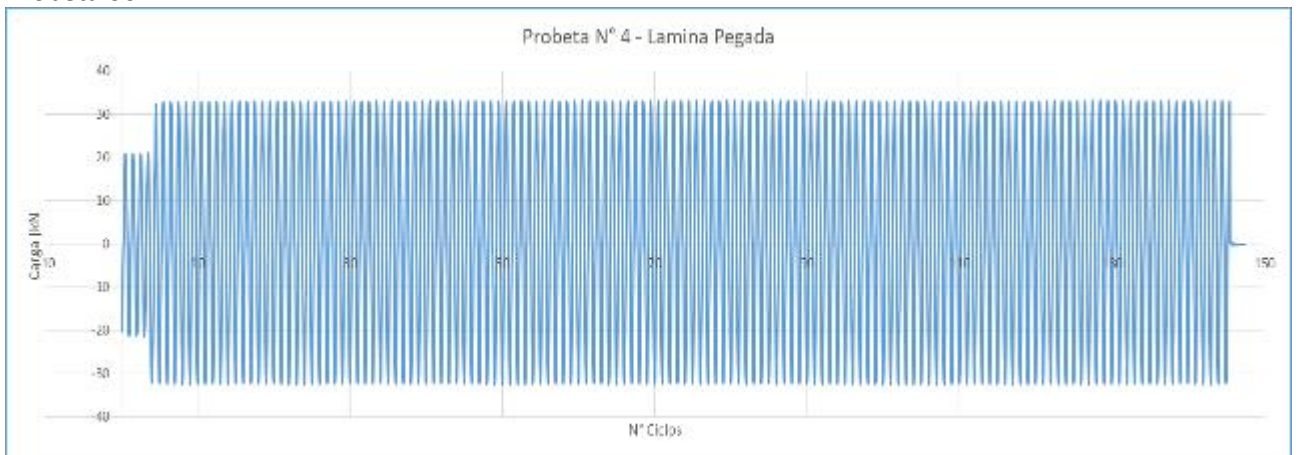
Probeta 002



Probeta 003



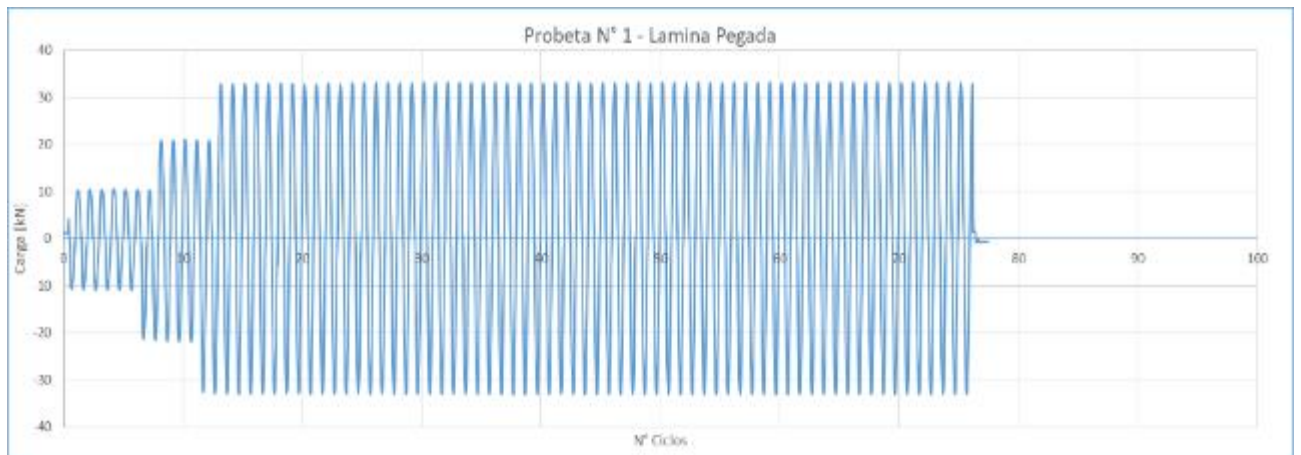
Probeta 004



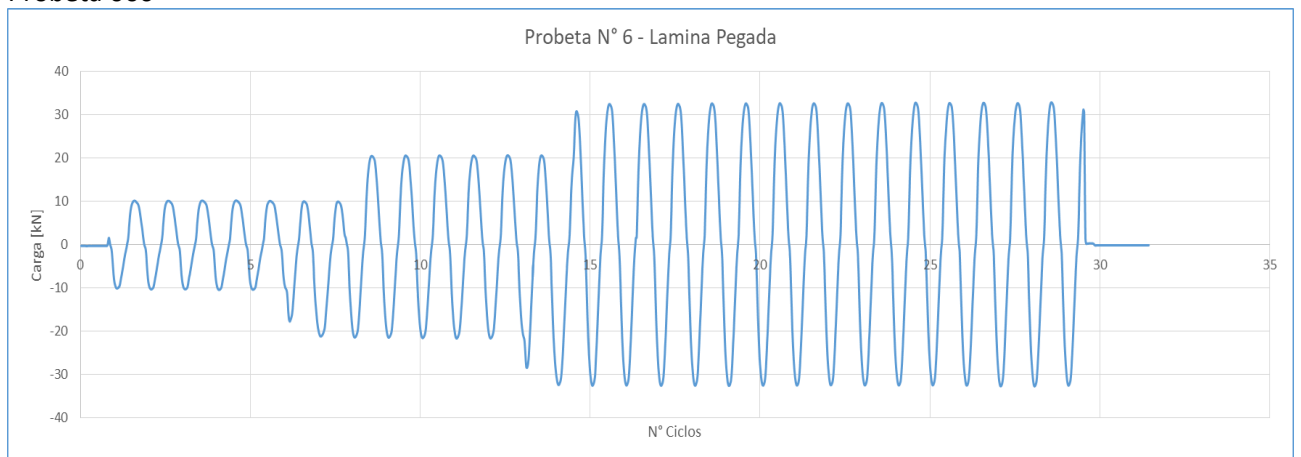
# COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

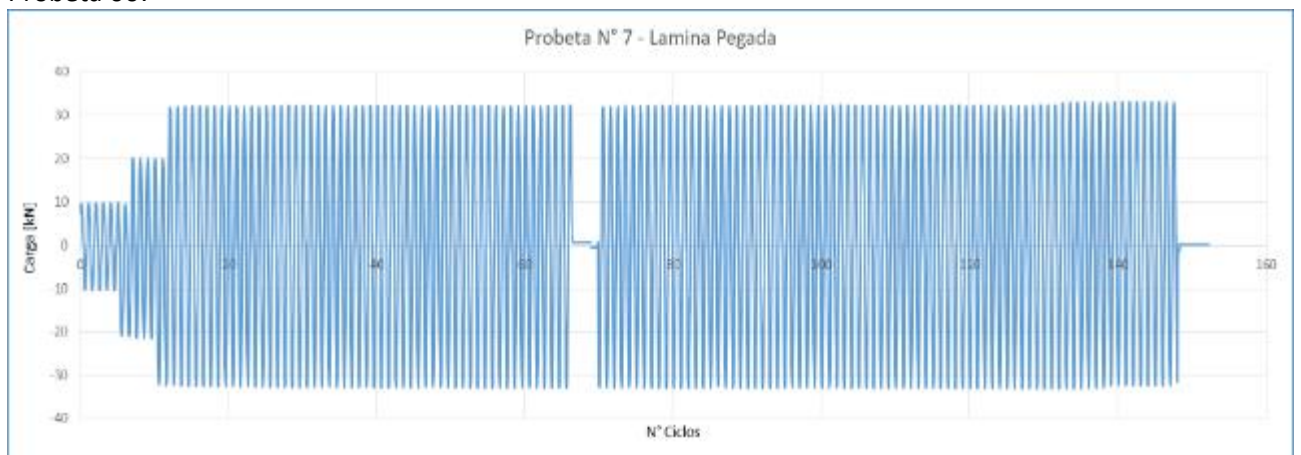
## Probeta 005



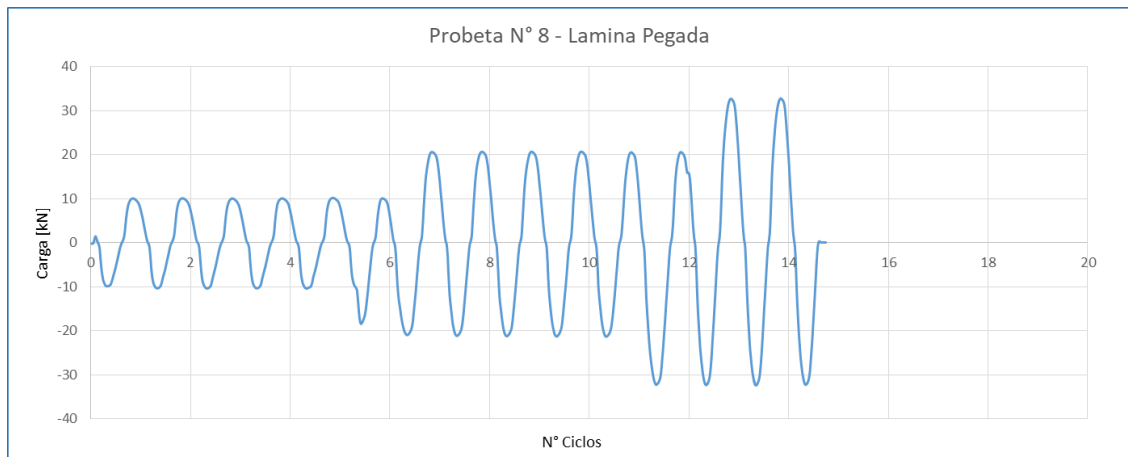
## Probeta 006



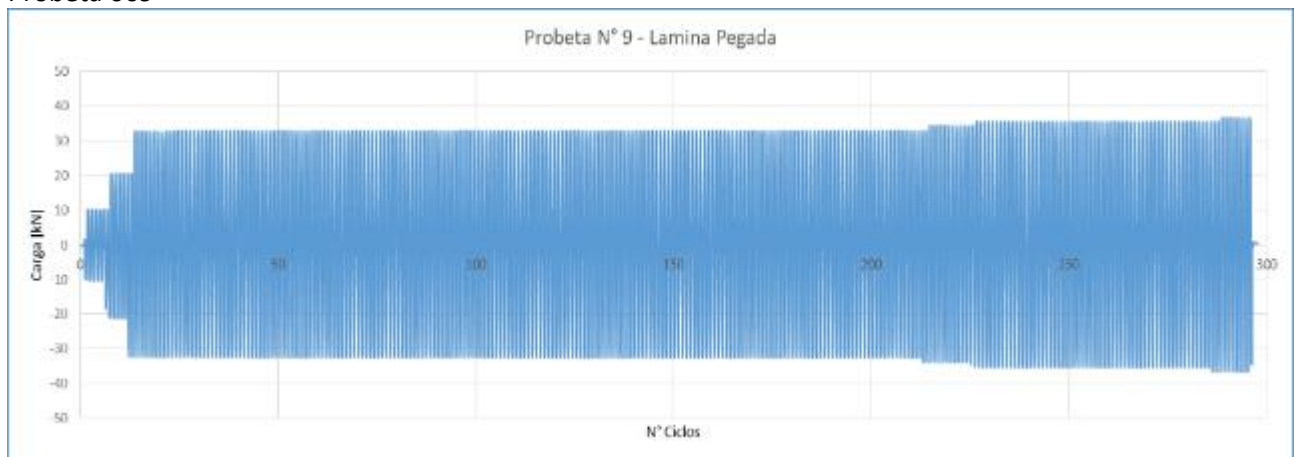
## Probeta 007



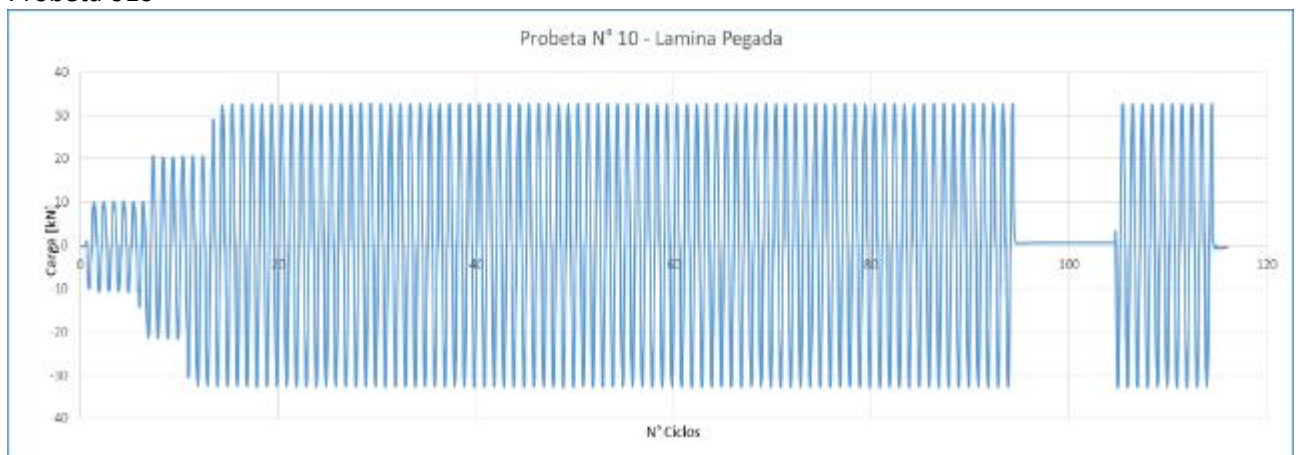
Probeta 008



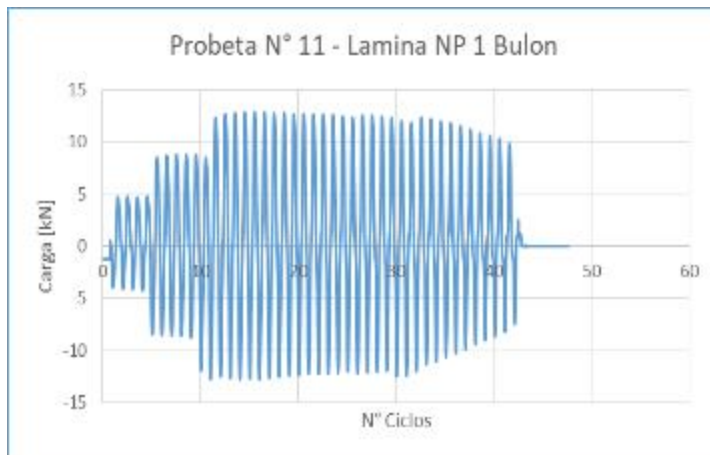
Probeta 009



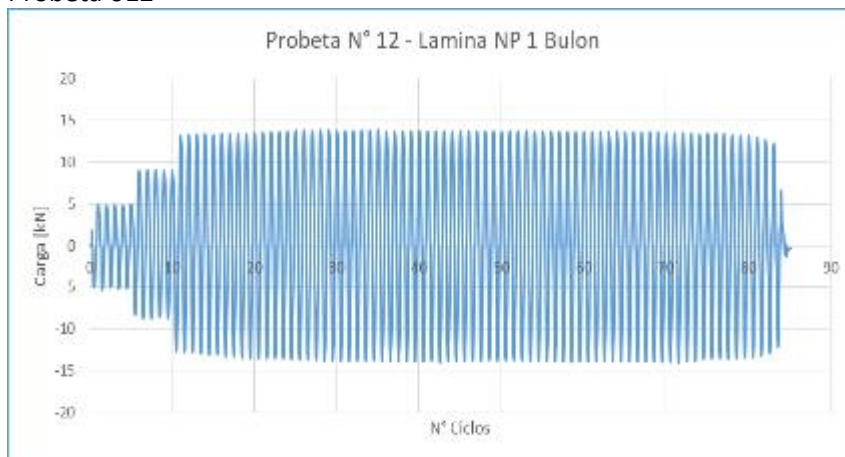
Probeta 010



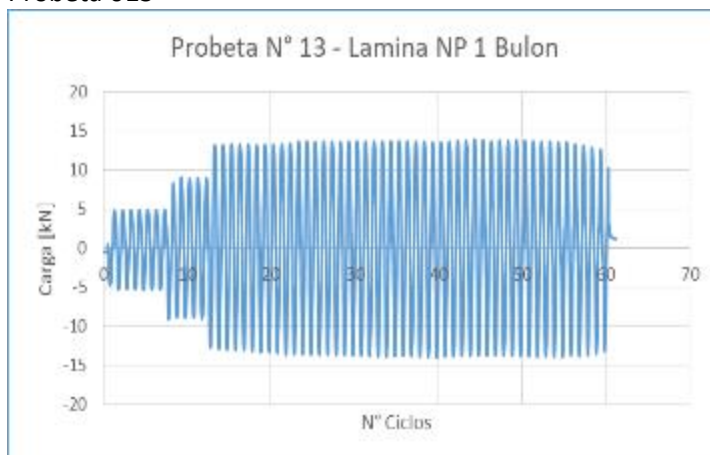
Probeta 011



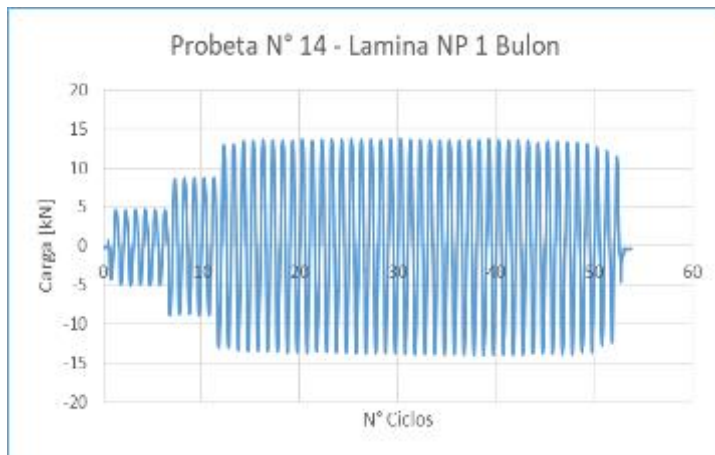
Probeta 012



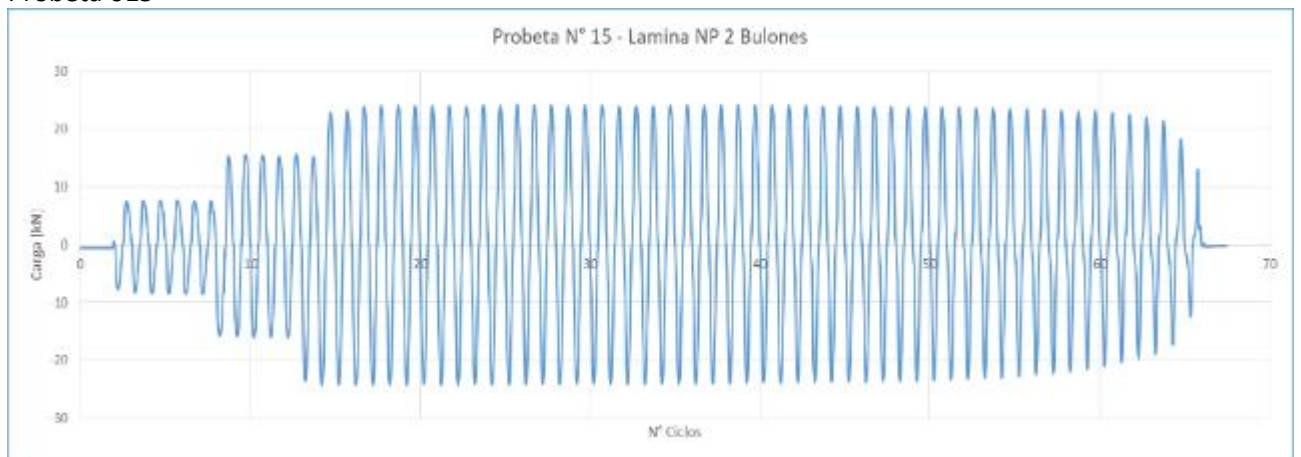
Probeta 013



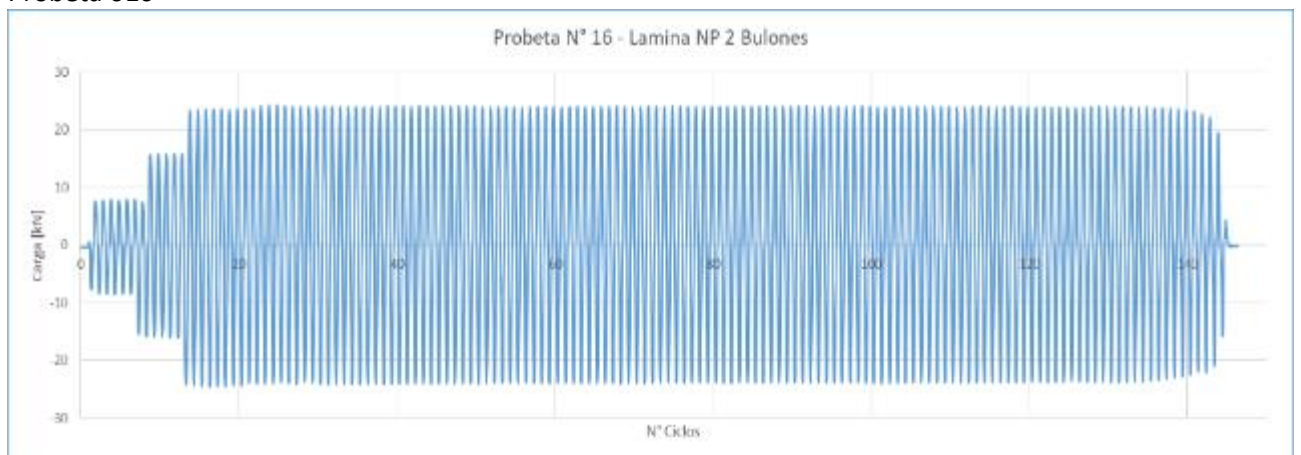
Probeta 014



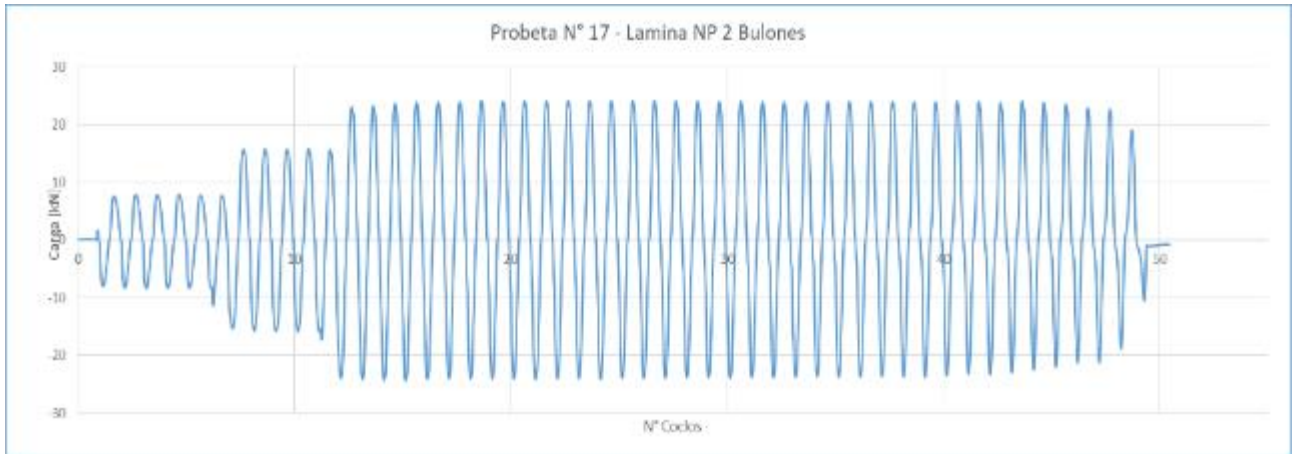
Probeta 015



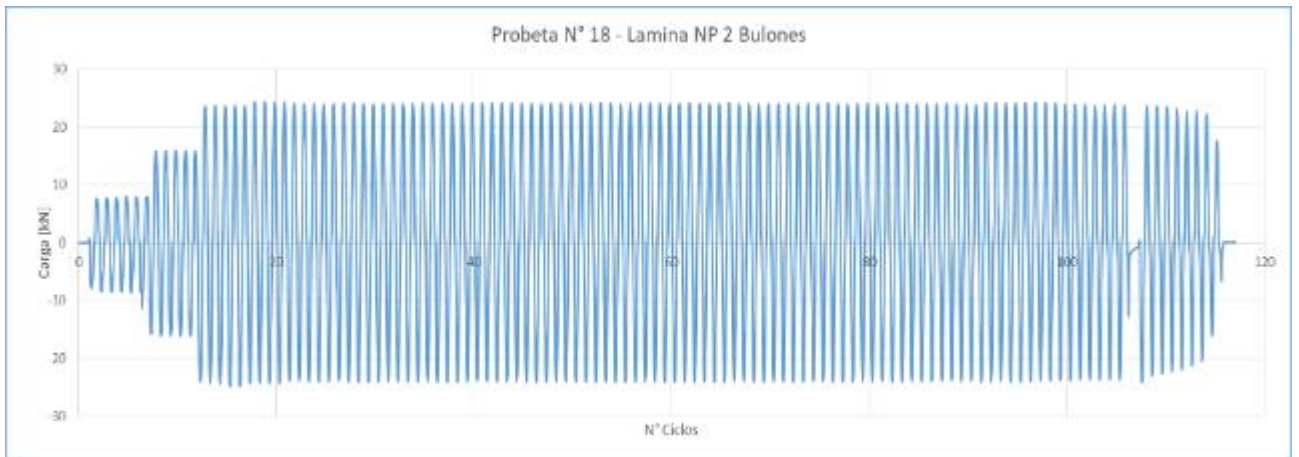
Probeta 016



Probeta 017



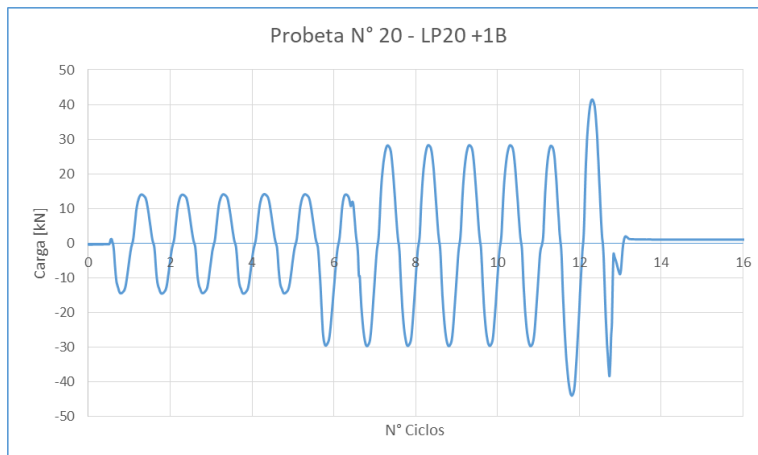
Probeta 018



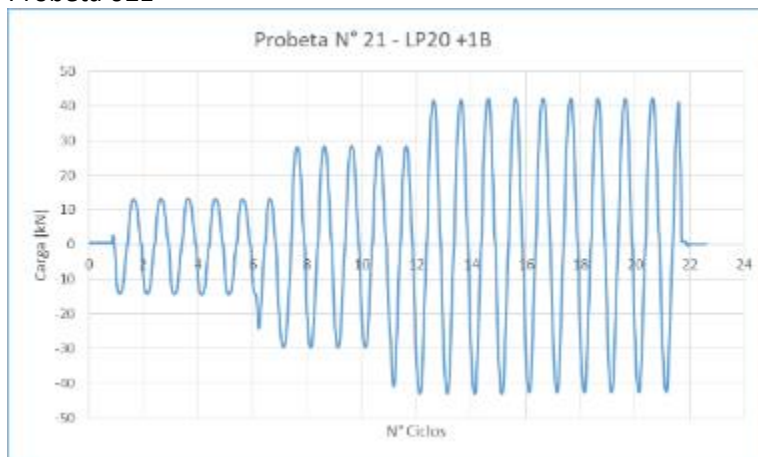
Probeta 019

NO HAY GRAFICA	
Datos	
Ciclos totales	461
Cantidad de ciclos al 20%	5
Cantidad de ciclos al 40%	5
Cantidad de ciclos al 60%	440
Cantidad de ciclos al 70% (carga de rotura)	11

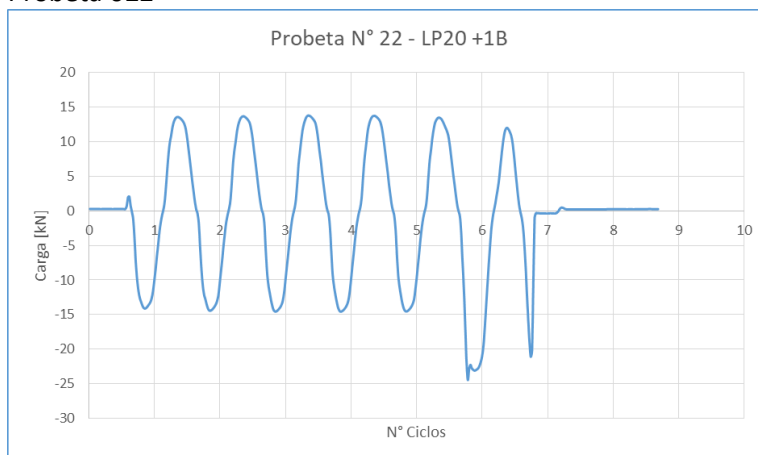
Probeta 020



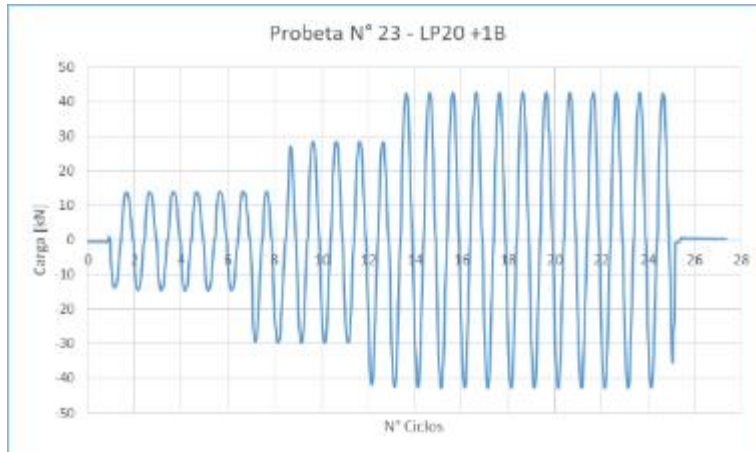
Probeta 021



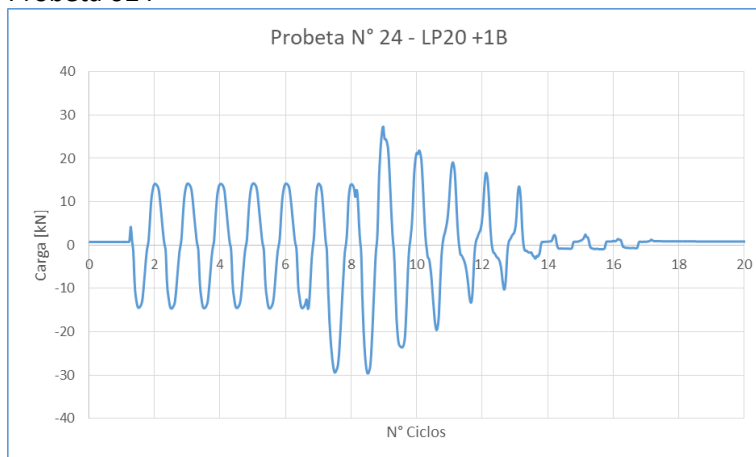
Probeta 022



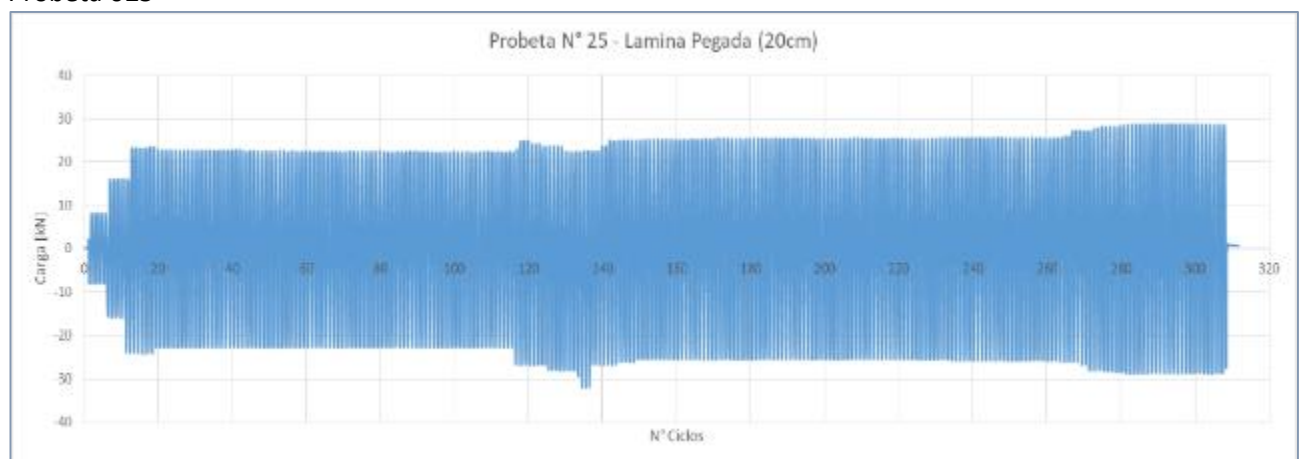
Probeta 023



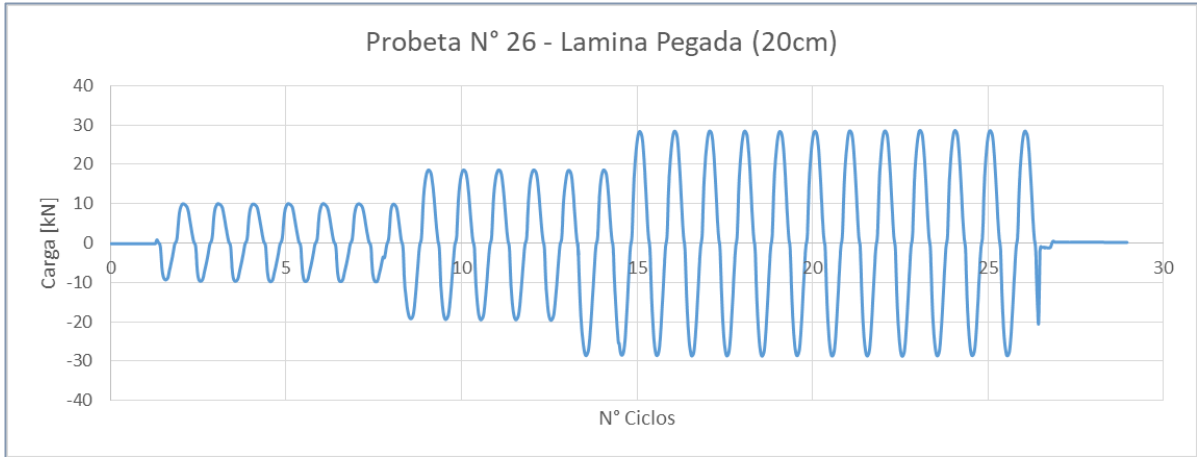
Probeta 024



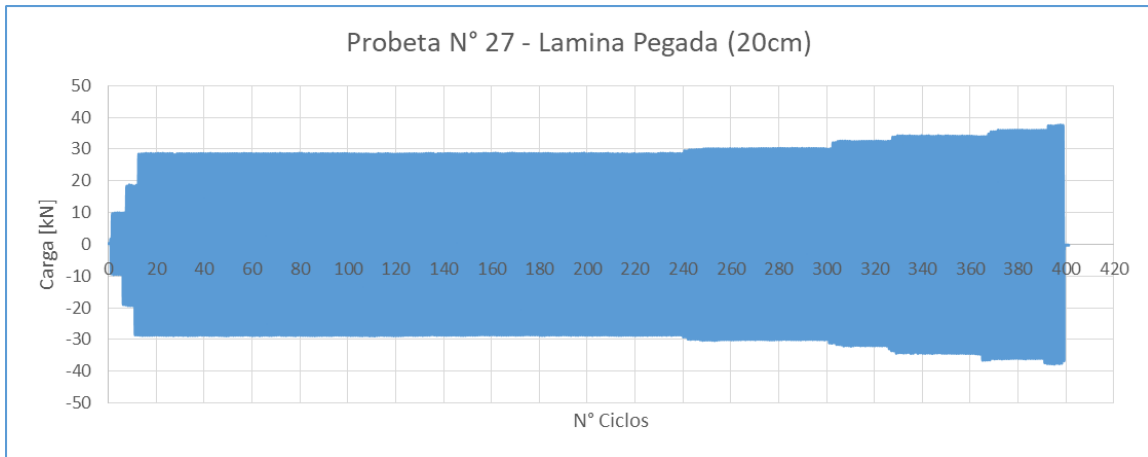
Probeta 025



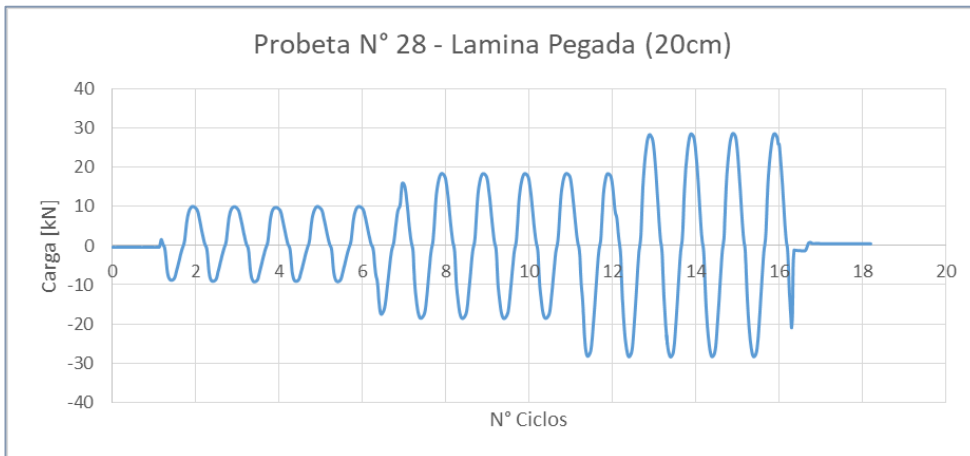
Probeta 026



Probeta 027

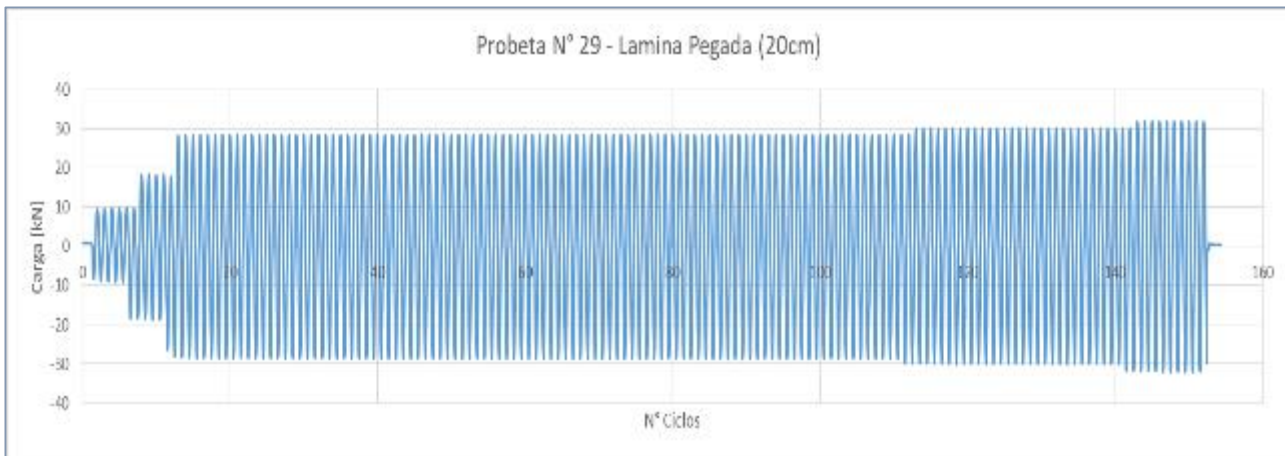


Probeta 028

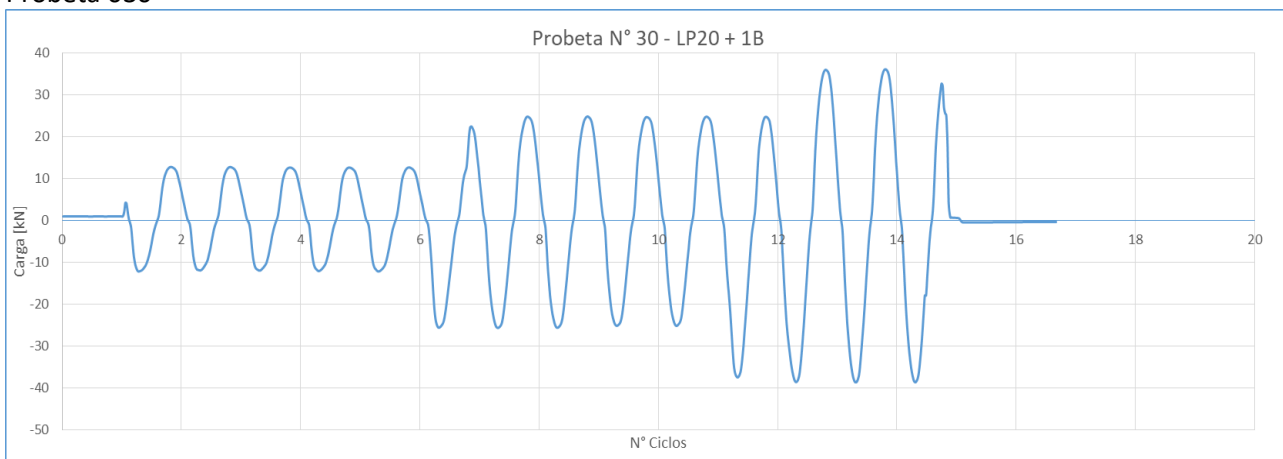


Probeta

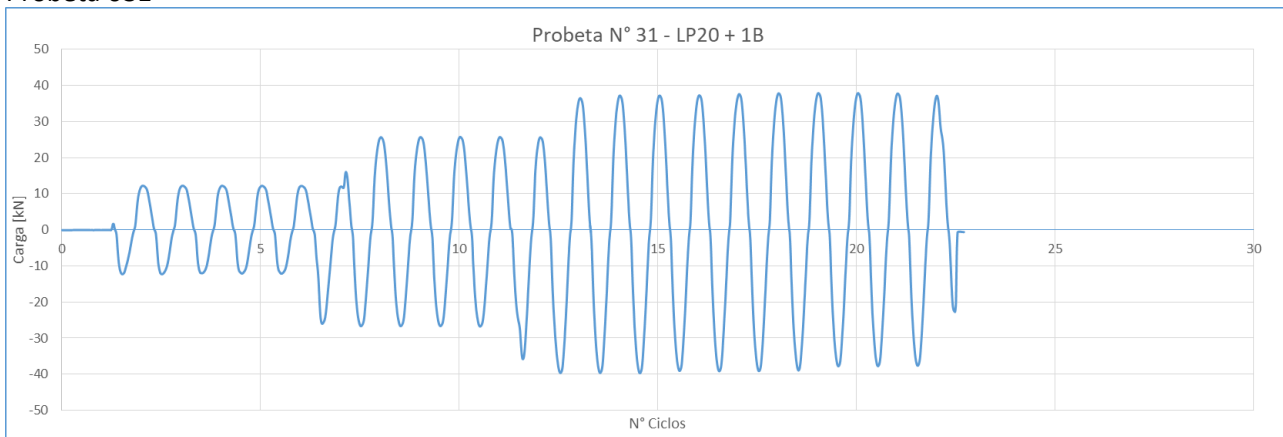
029



Probeta 030



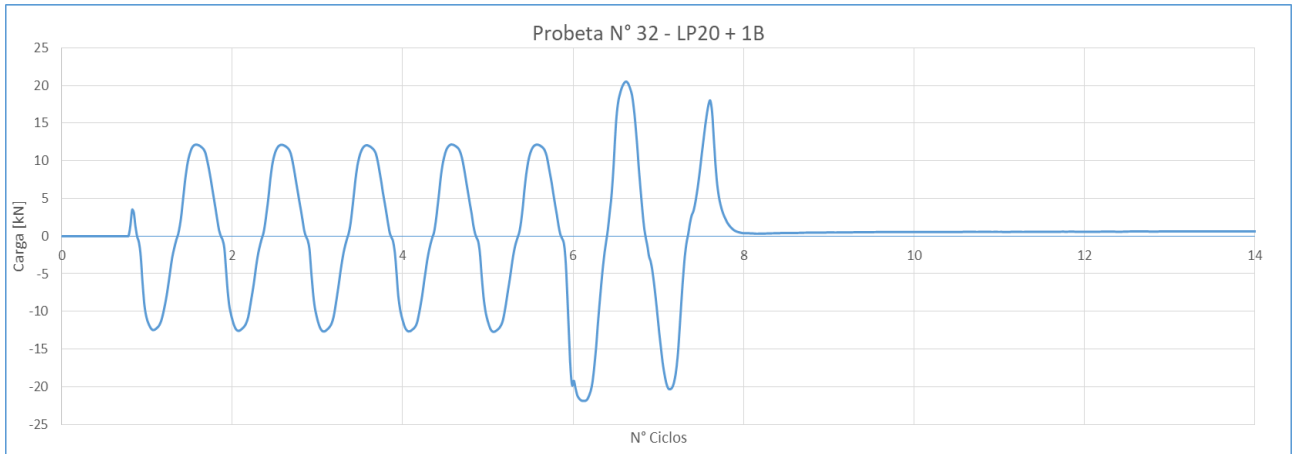
Probeta 031



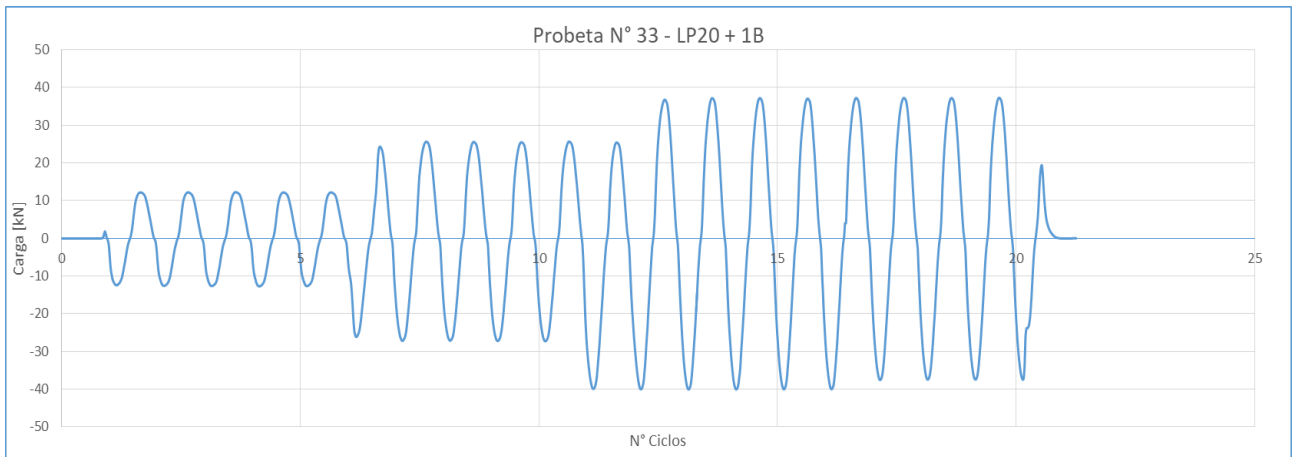
# COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

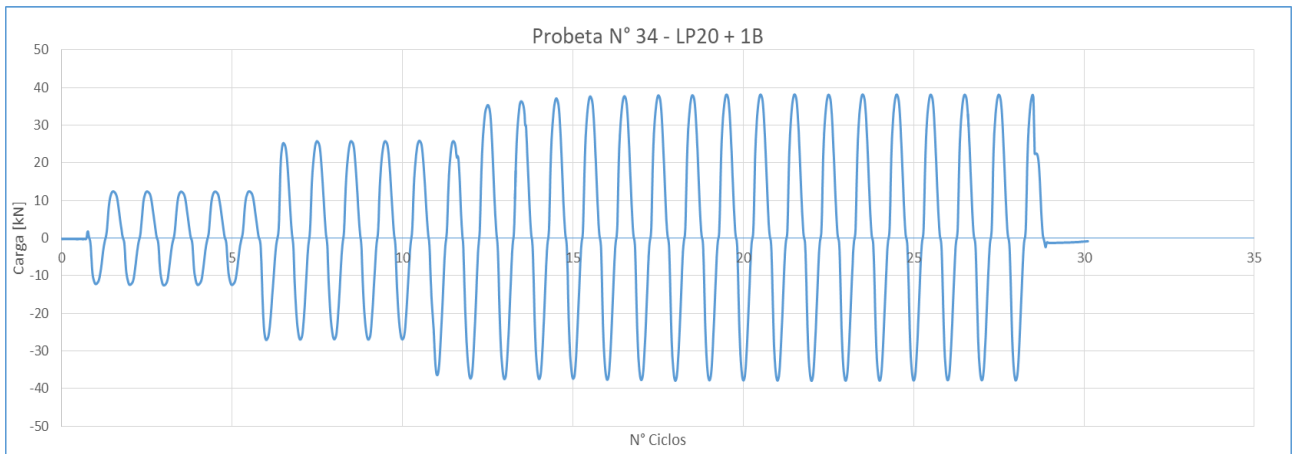
## Probeta 032



## Probeta 033



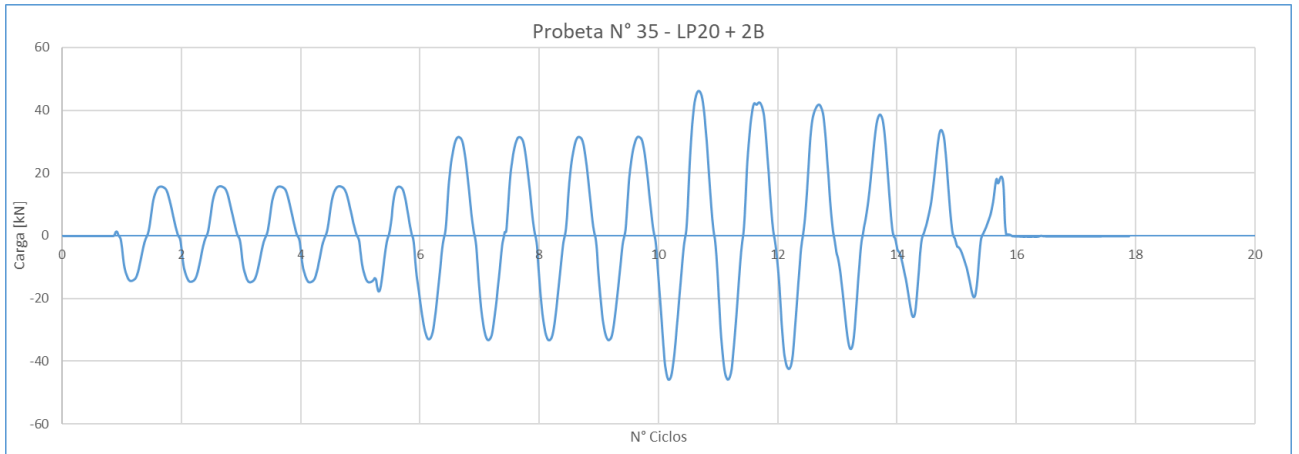
## Probeta 034



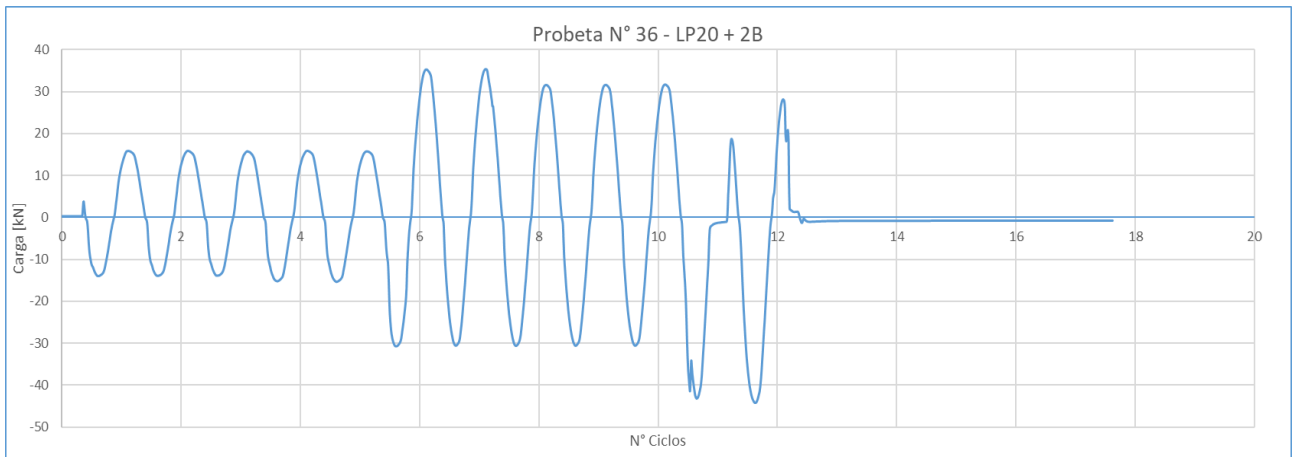
# COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

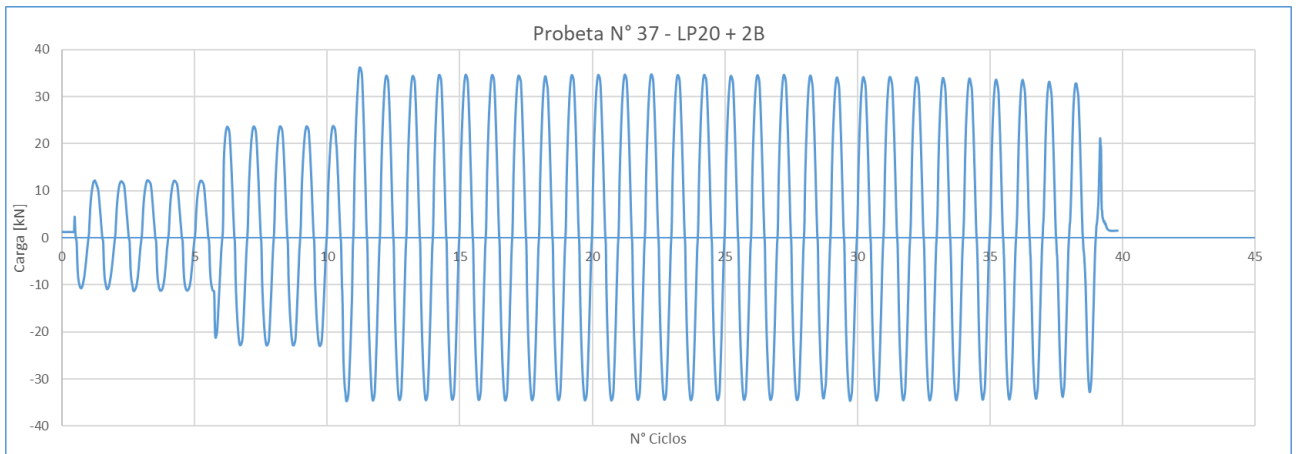
## Probeta 035



## Probeta 036



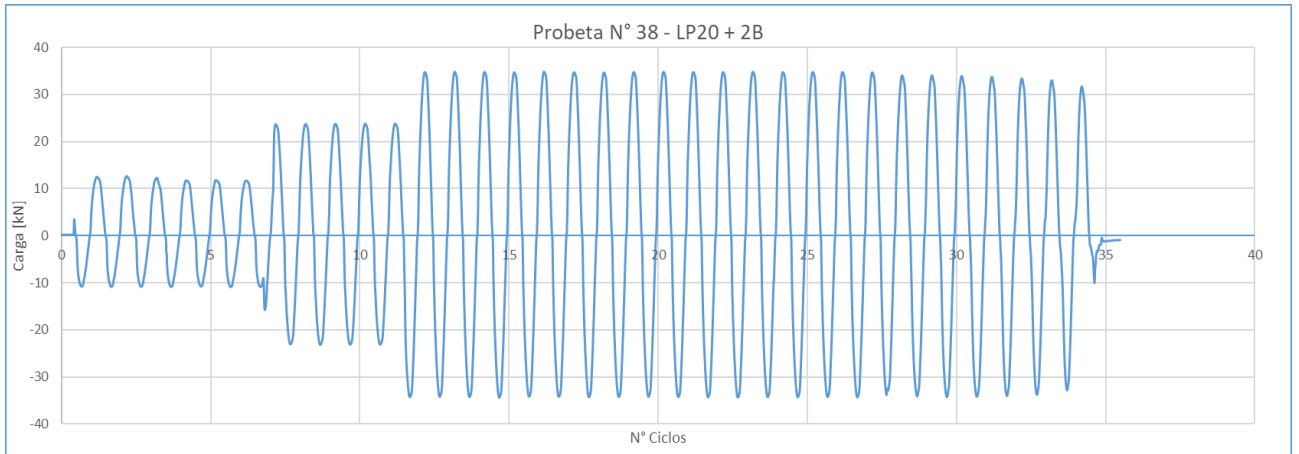
## Probeta 037



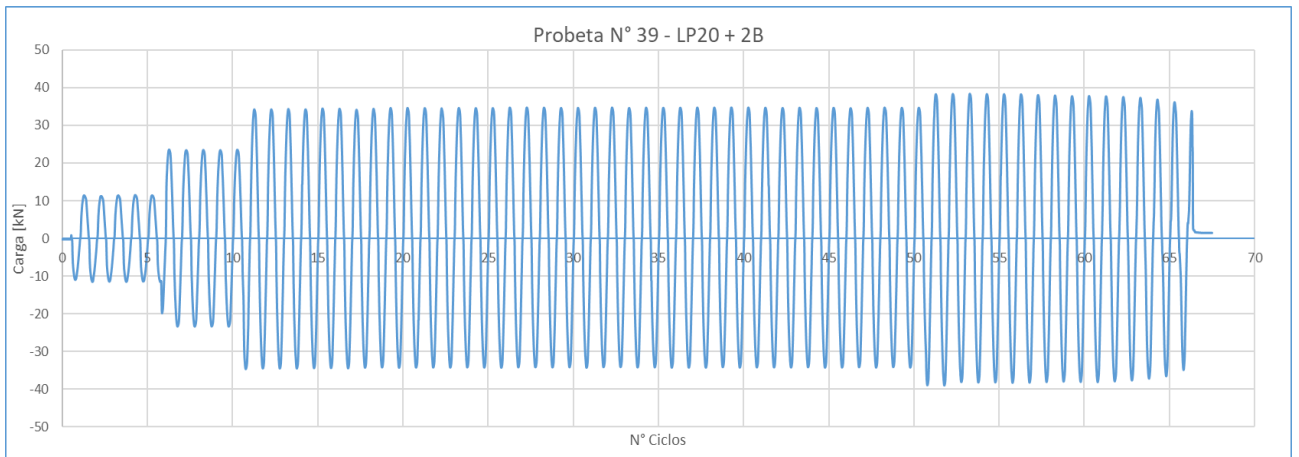
# COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

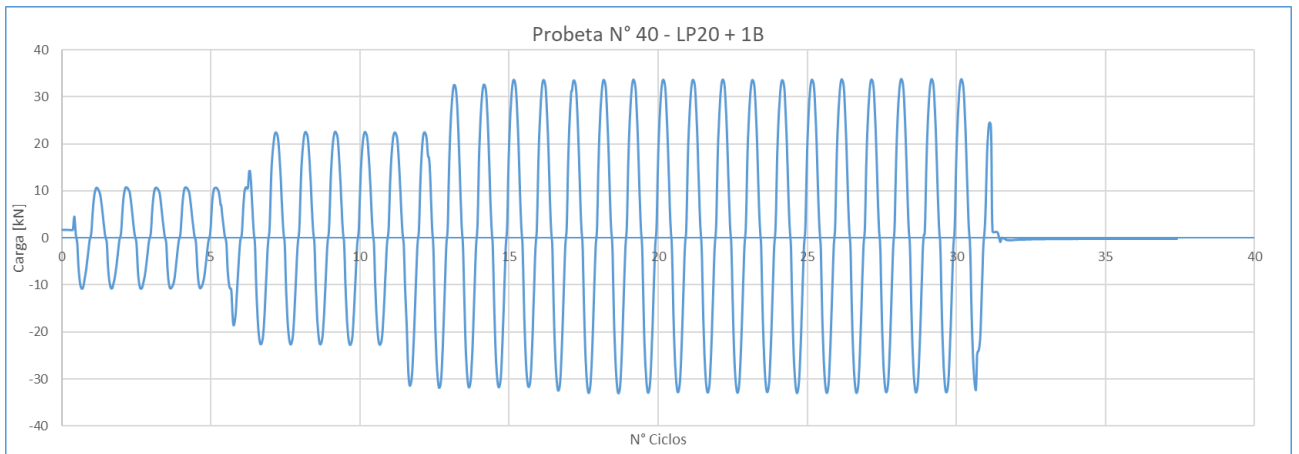
## Probeta 038



## Probeta 039



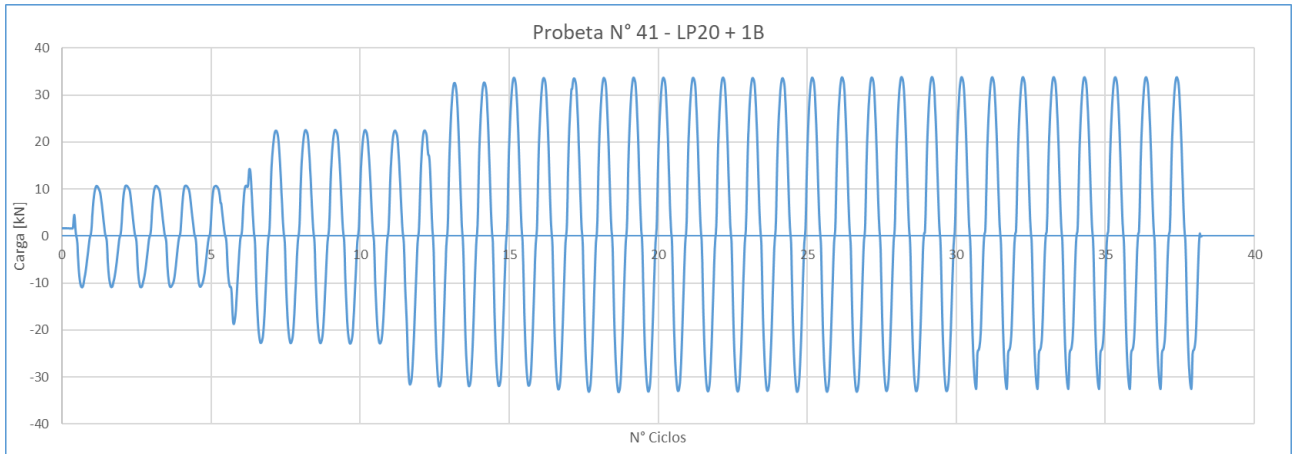
## Probeta 040



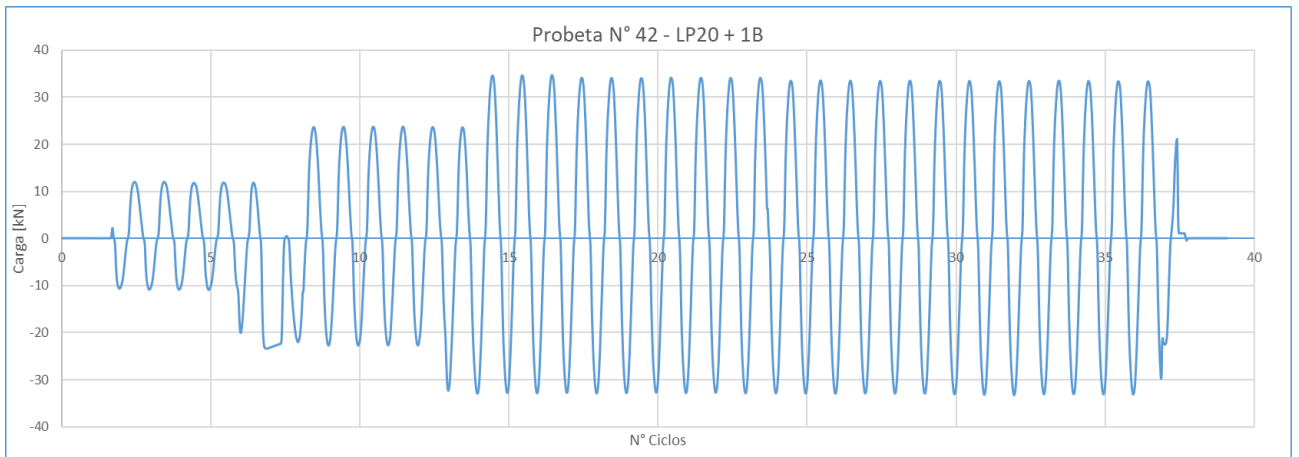
# COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

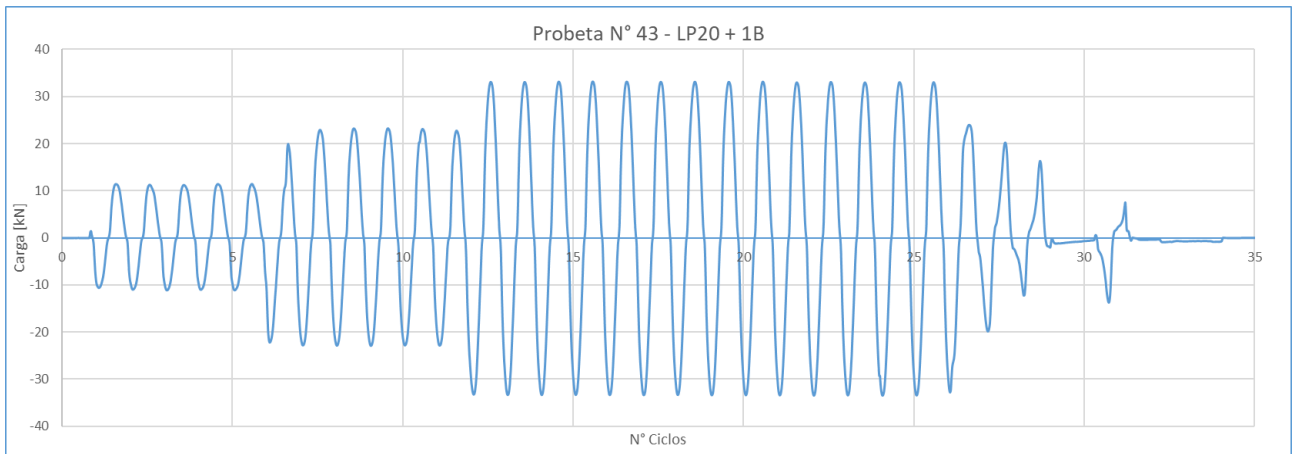
## Probeta 041



## Probeta 042



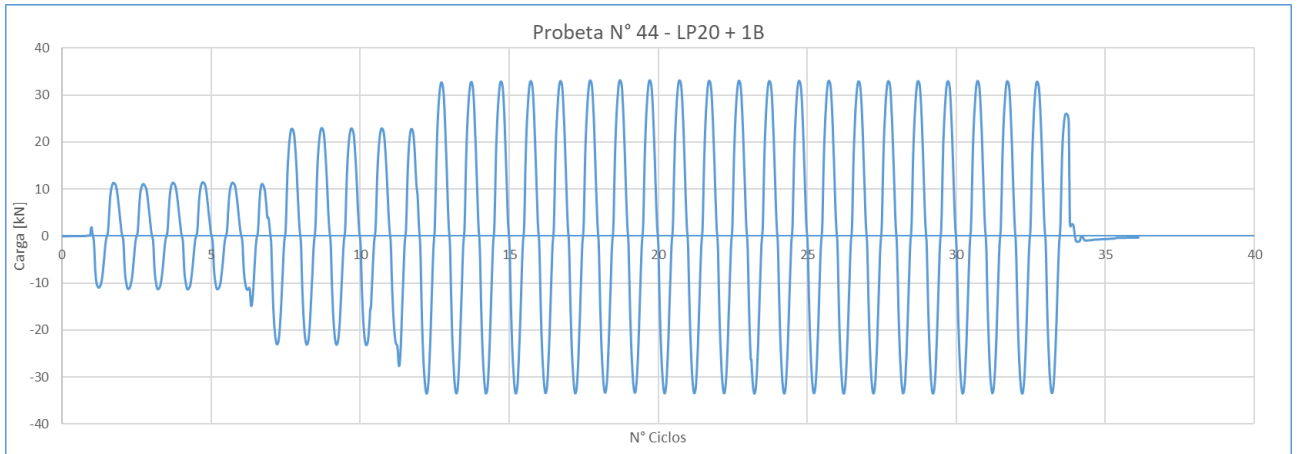
## Probeta 043



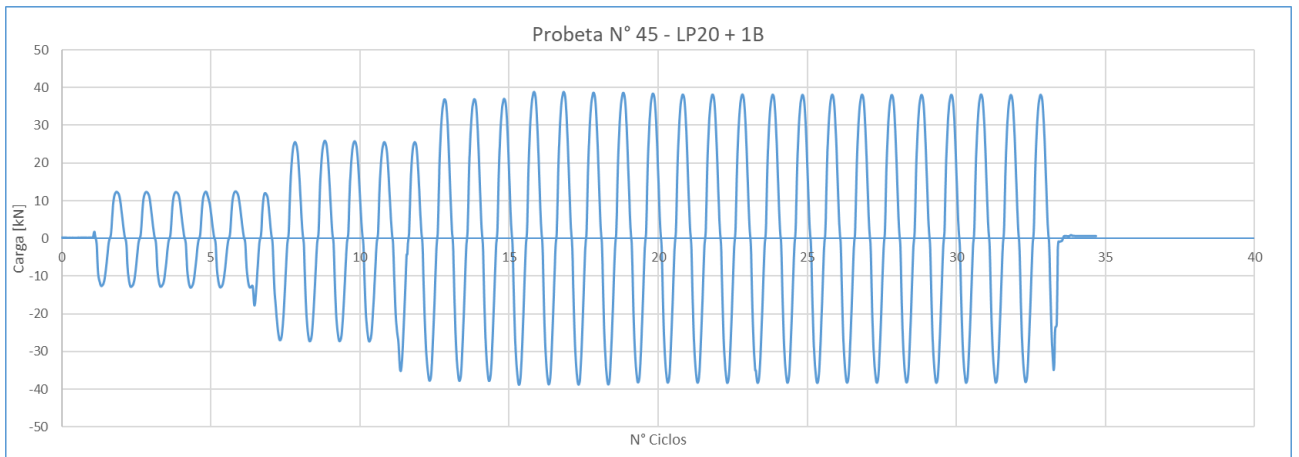
# COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

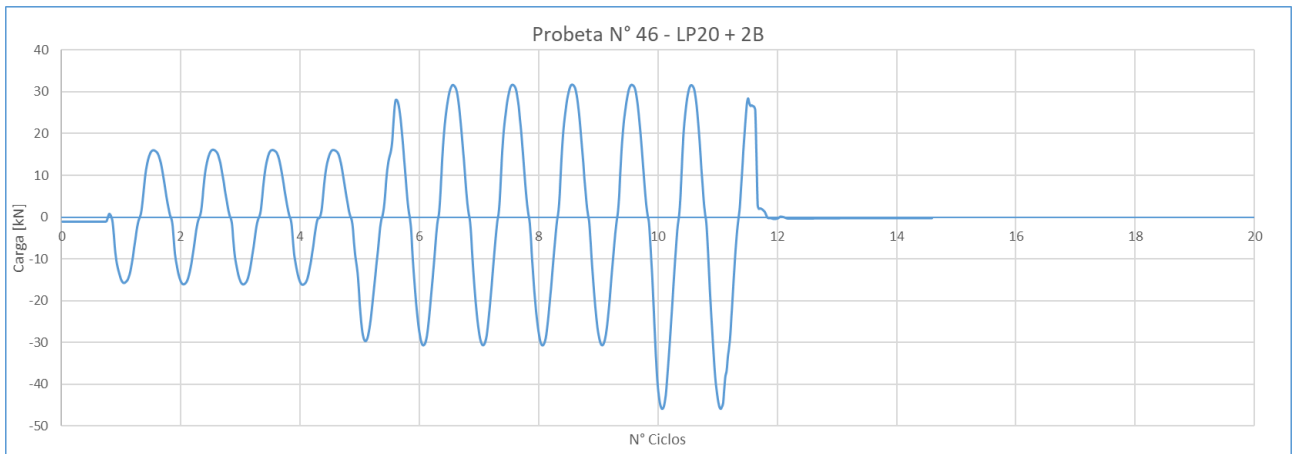
## Probeta 044



## Probeta 045



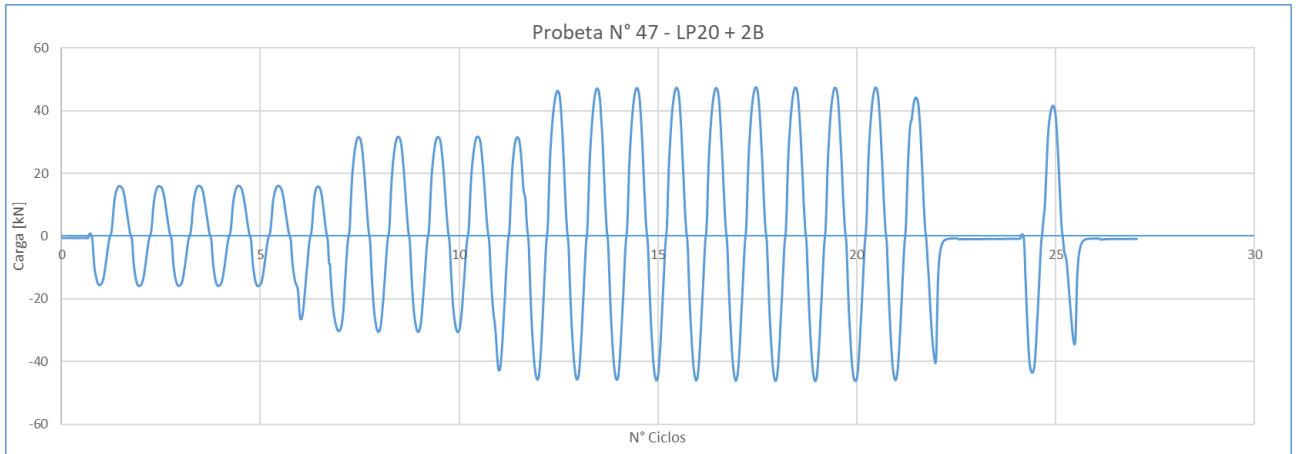
## Probeta 046



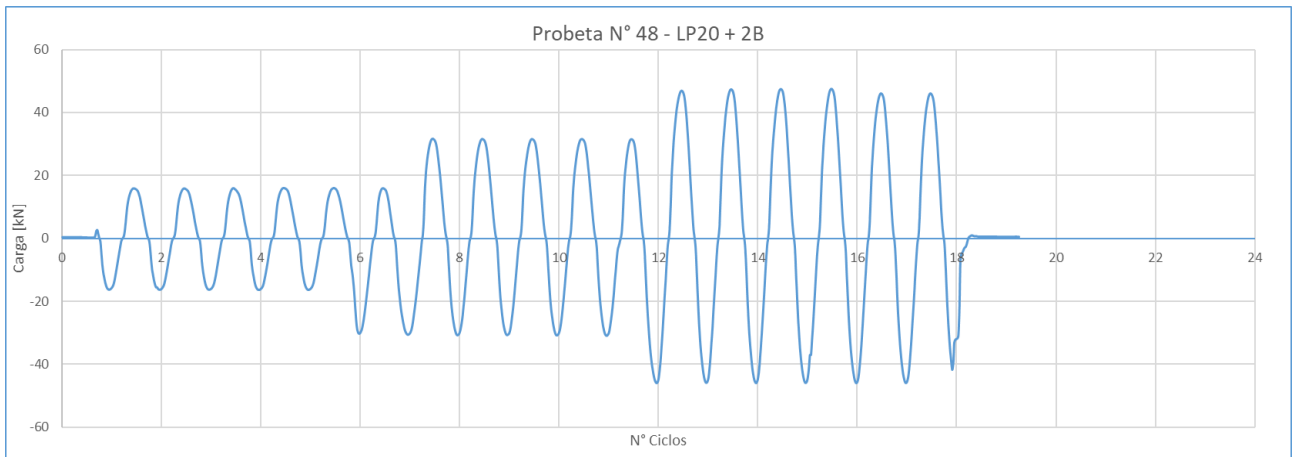
# COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

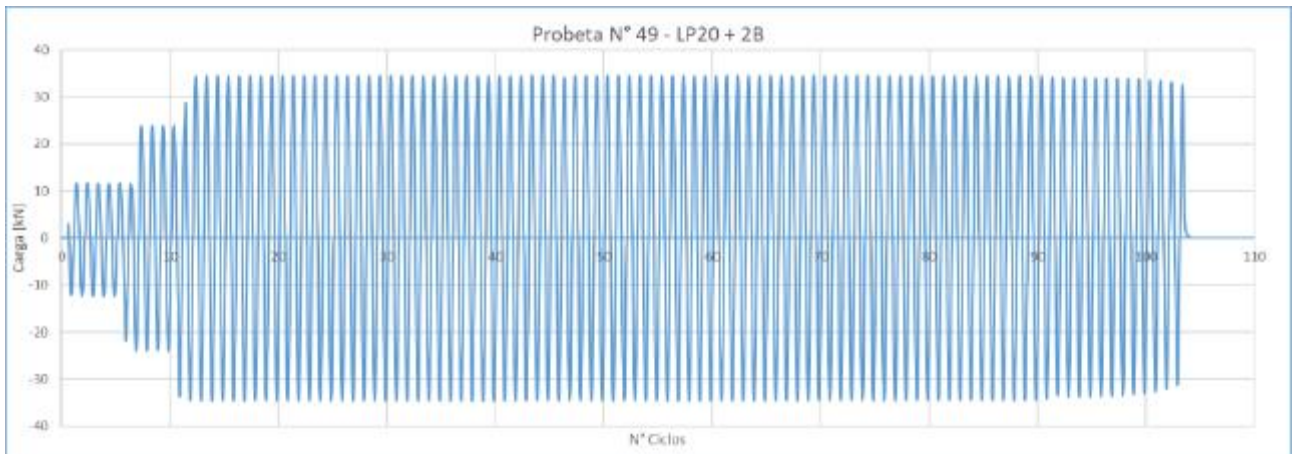
## Probeta 047



## Probeta 048



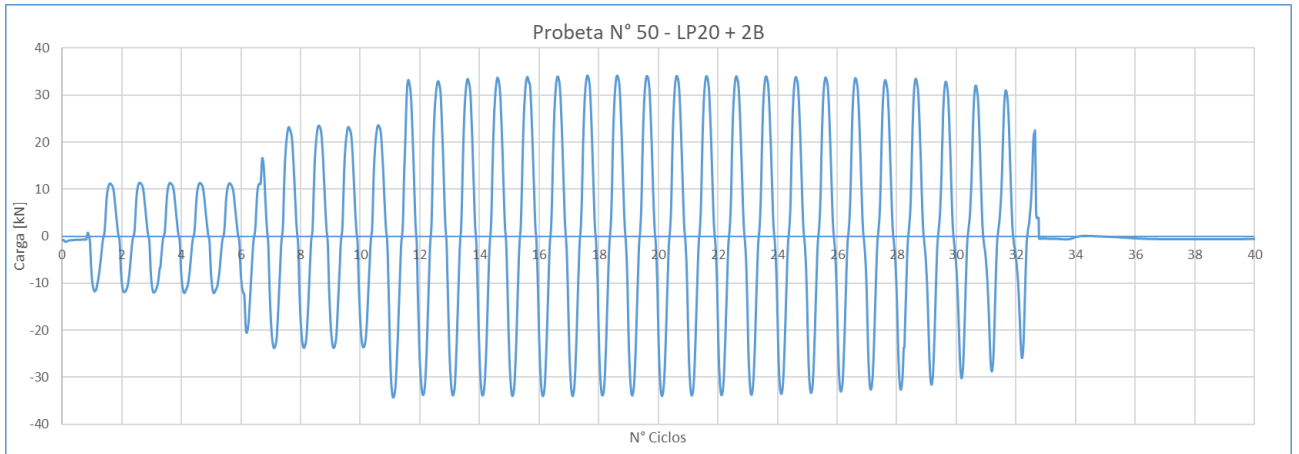
## Probeta 049



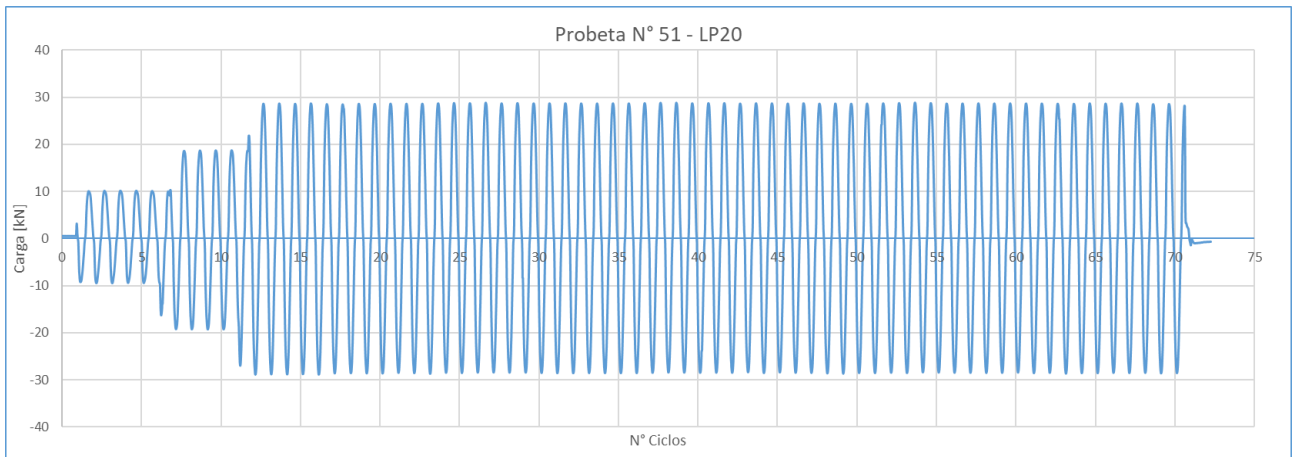
# COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

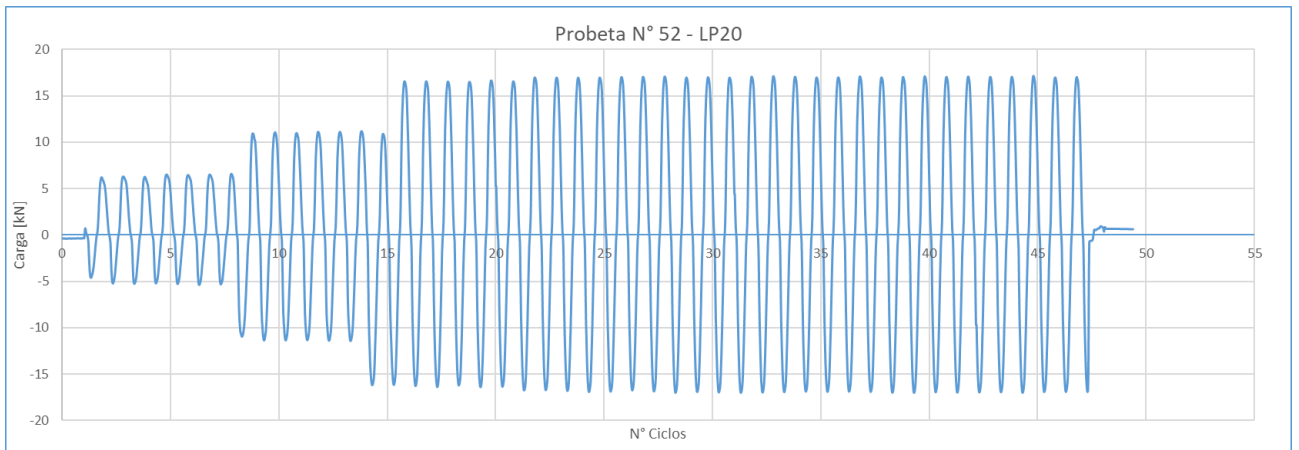
## Probeta 050



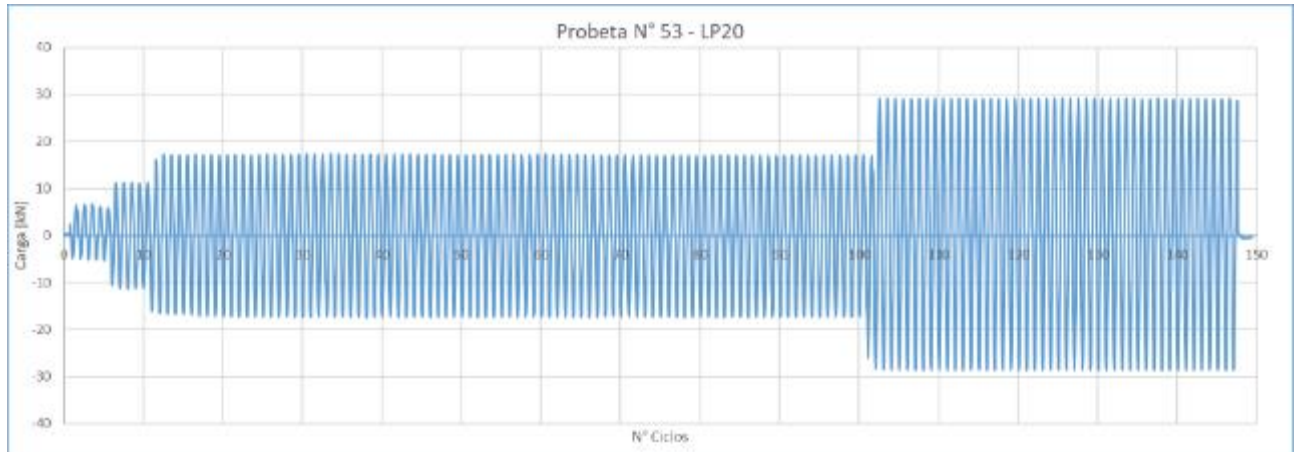
## Probeta 051



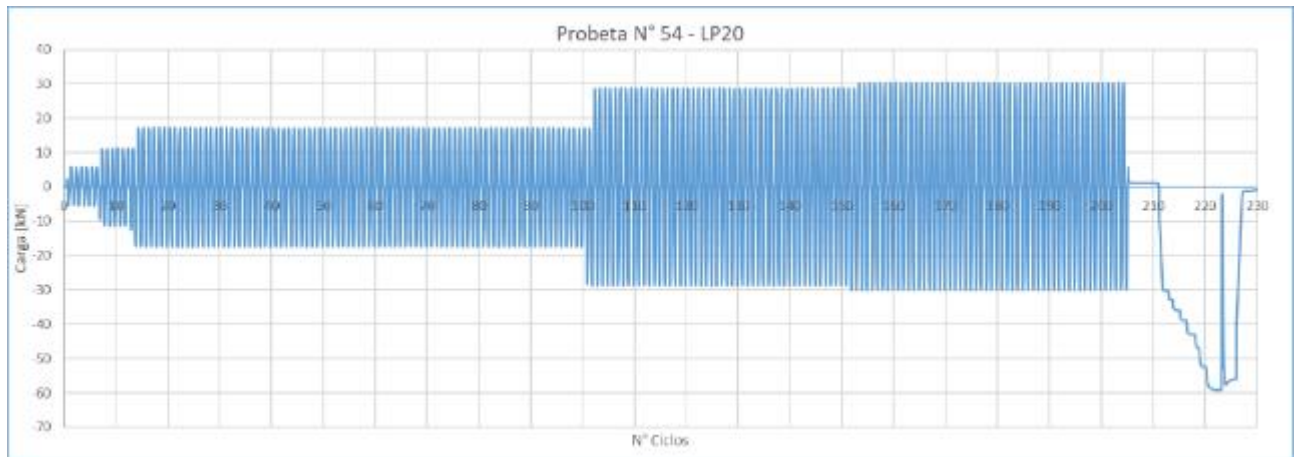
## Probeta 052



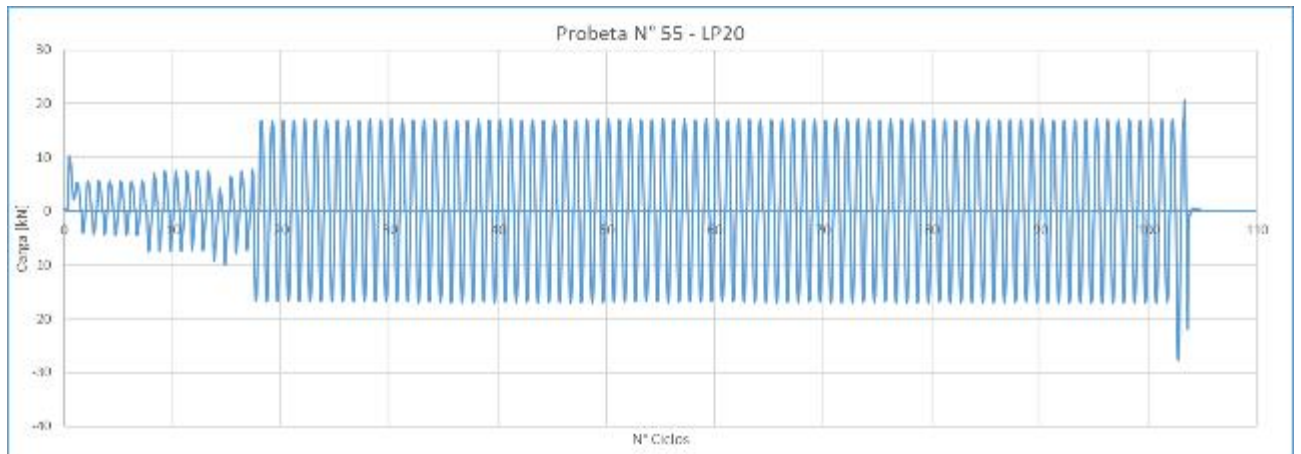
Probeta 053



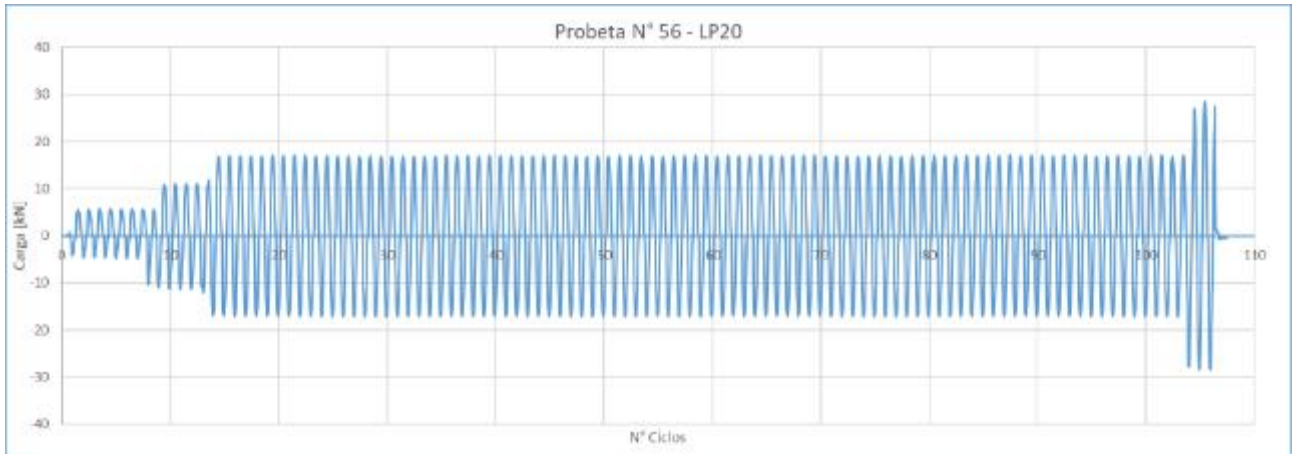
Probeta 054



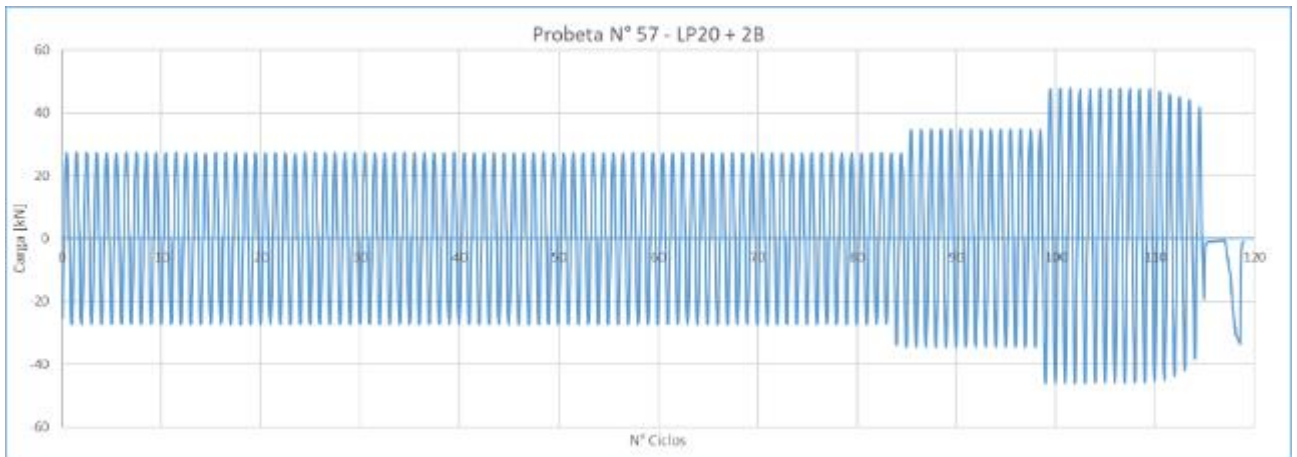
Probeta 055



Probeta 056

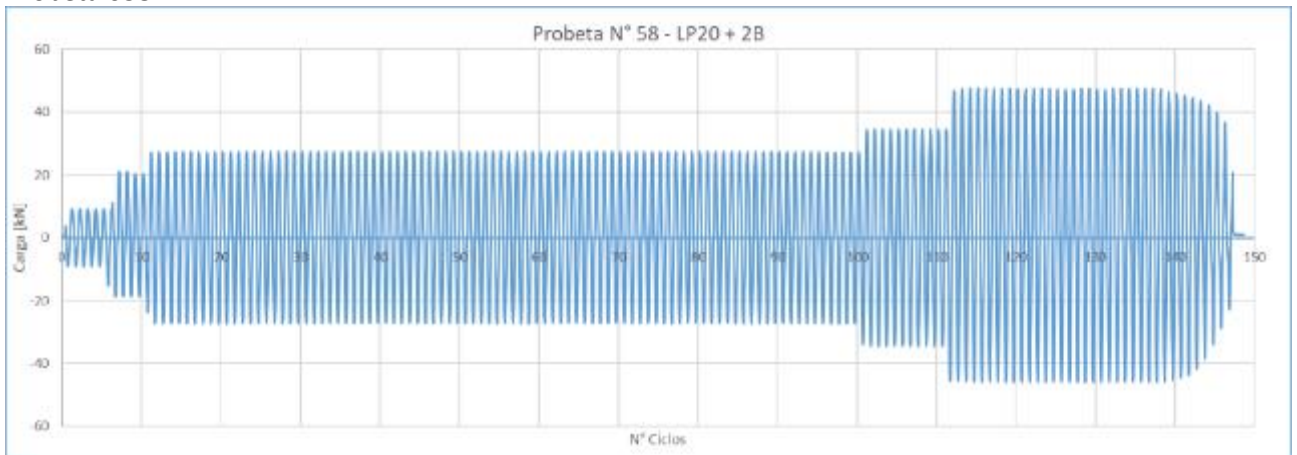


Probeta 057

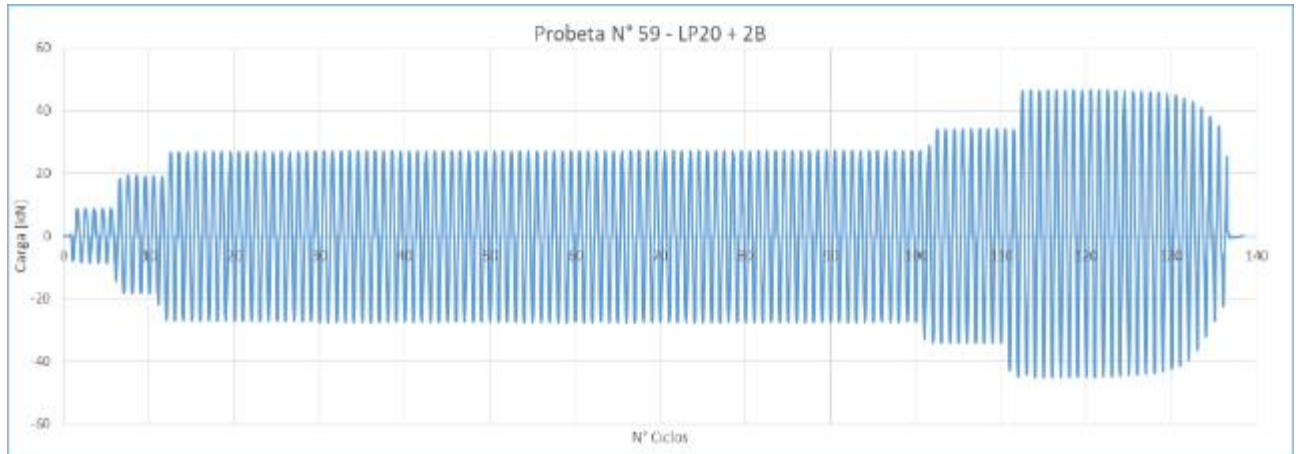


Faltan los primeros dos escalones (10 ciclos), inicio tarde la grabación del registro.

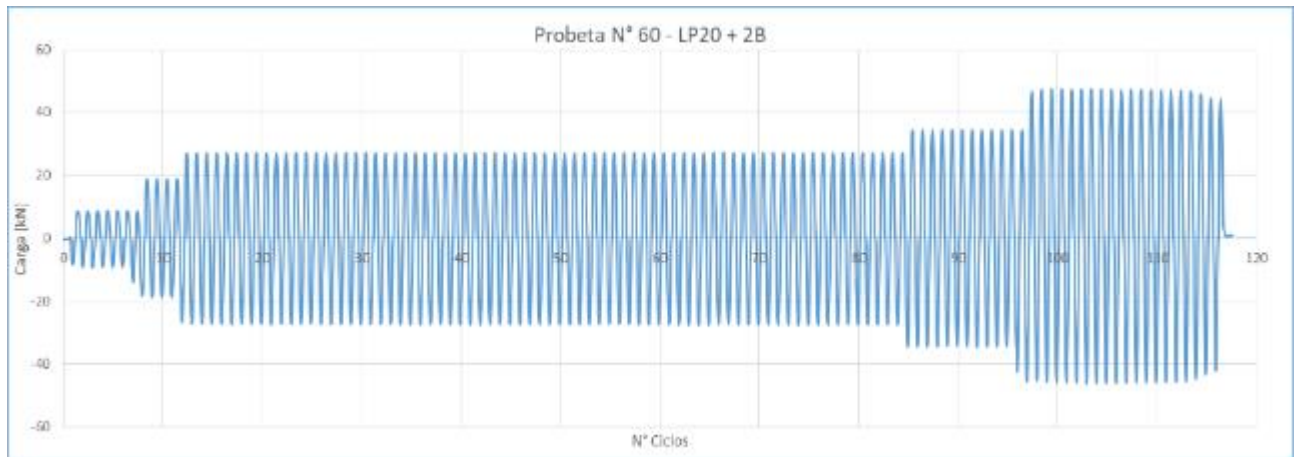
Probeta 058



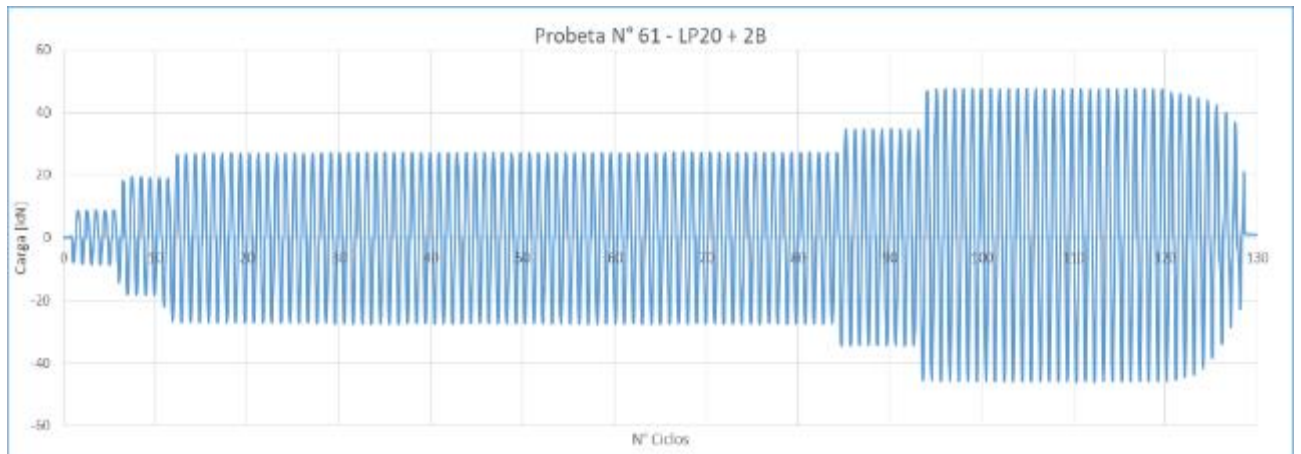
Probeta 059



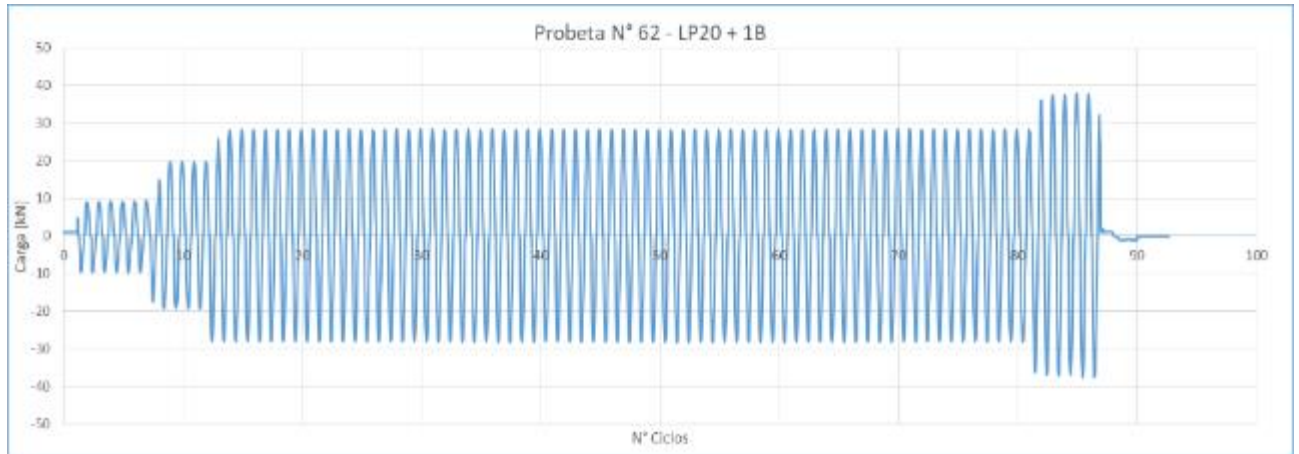
Probeta 060



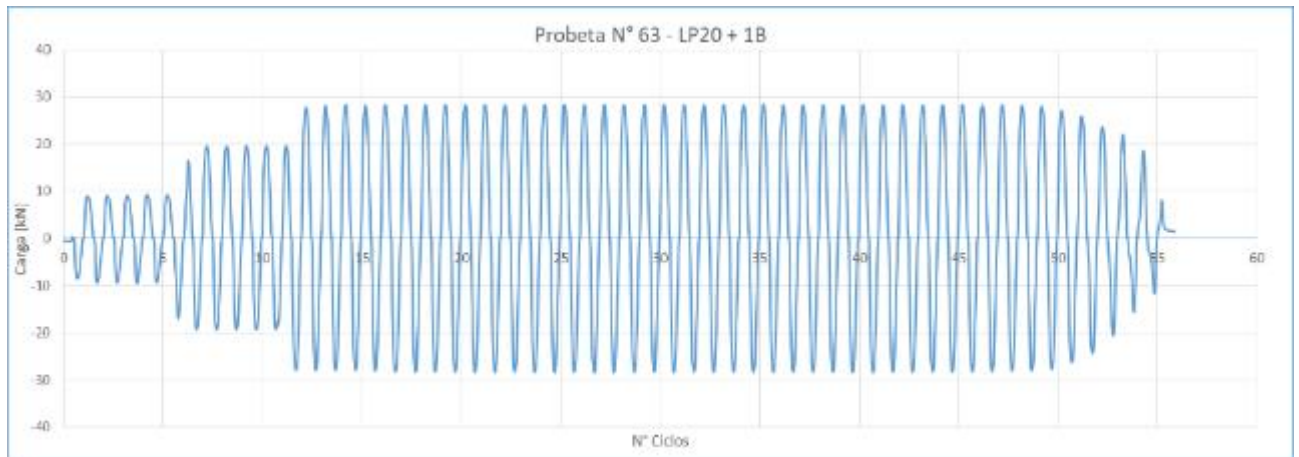
Probeta 061



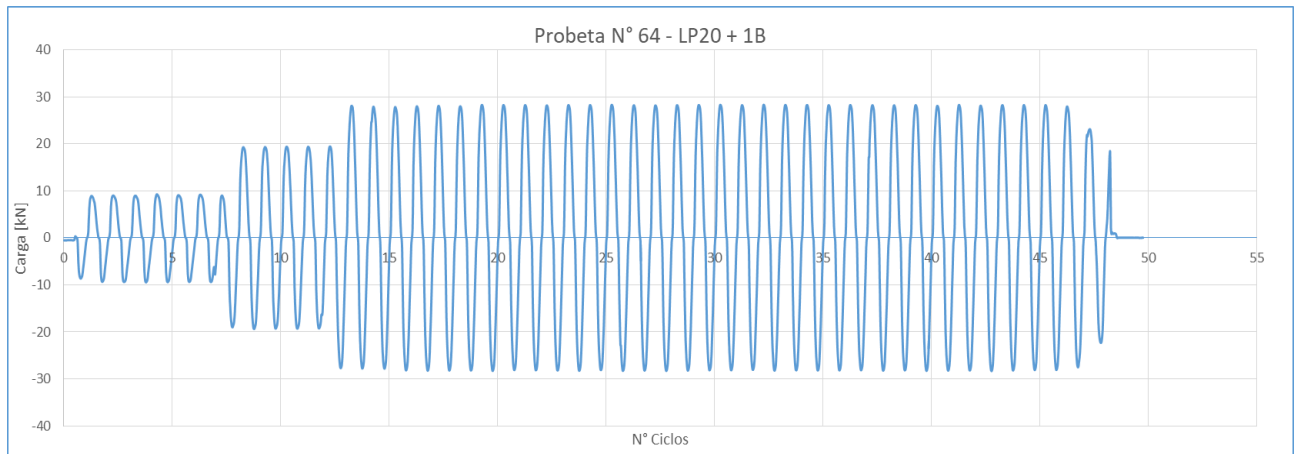
Probeta 062



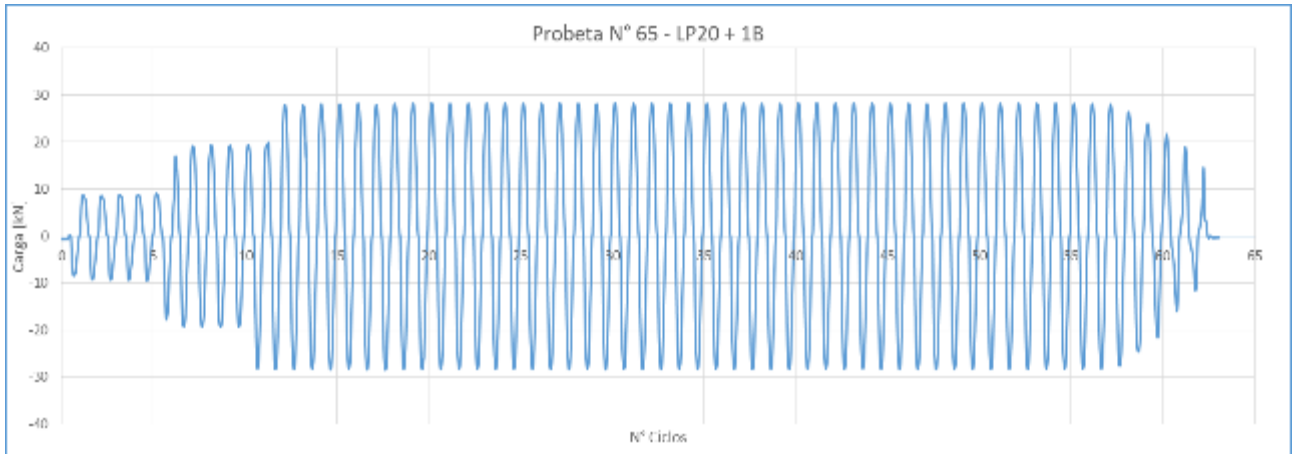
Probeta 063



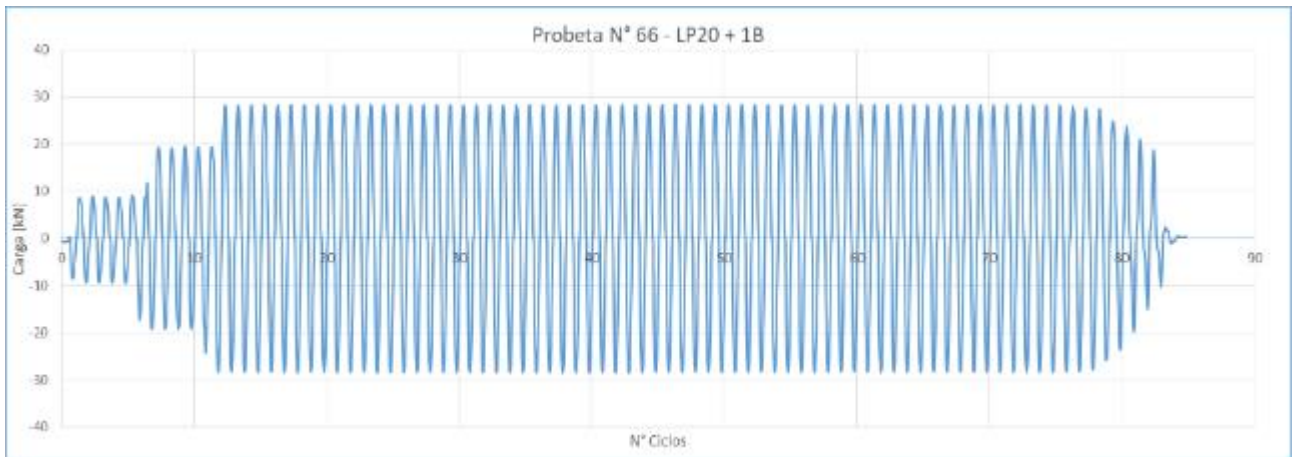
Probeta 064



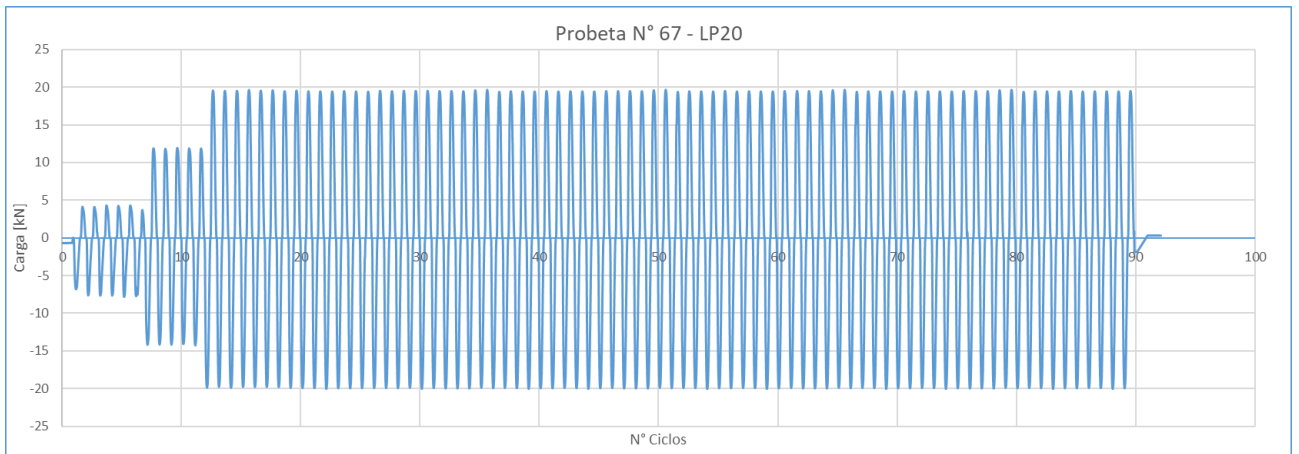
Probeta 065



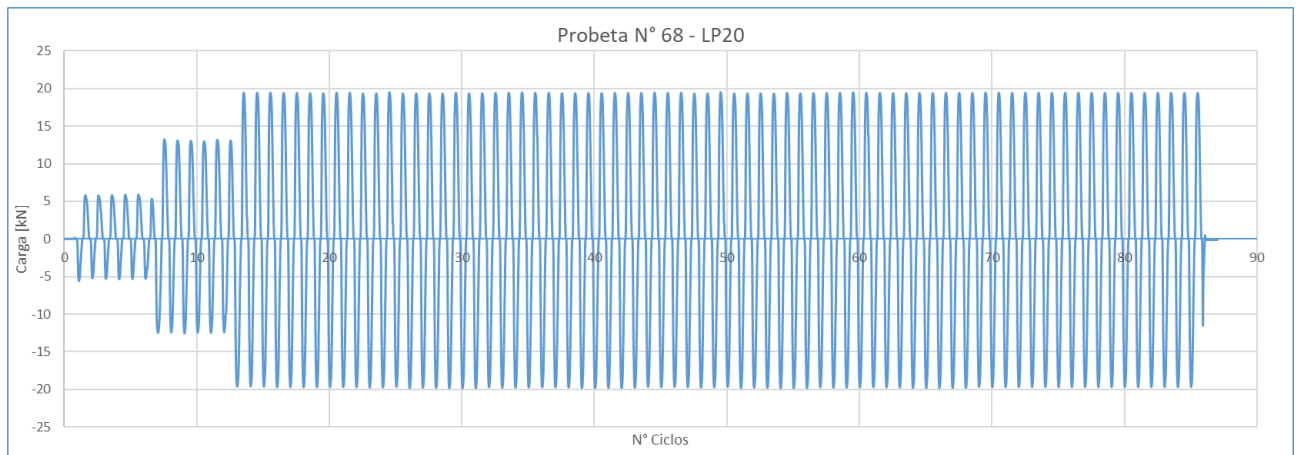
Probeta 066



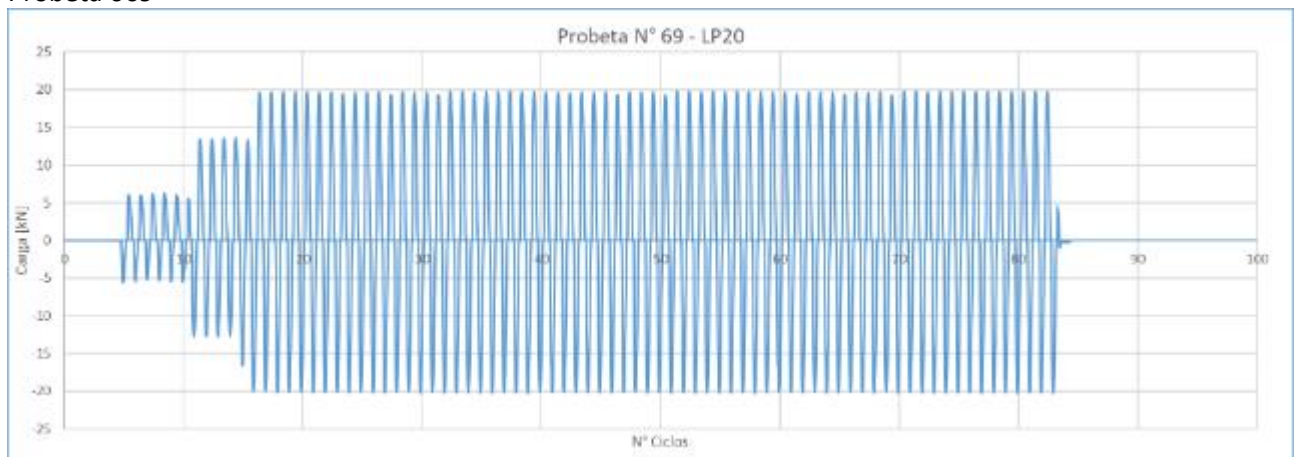
Probeta 067



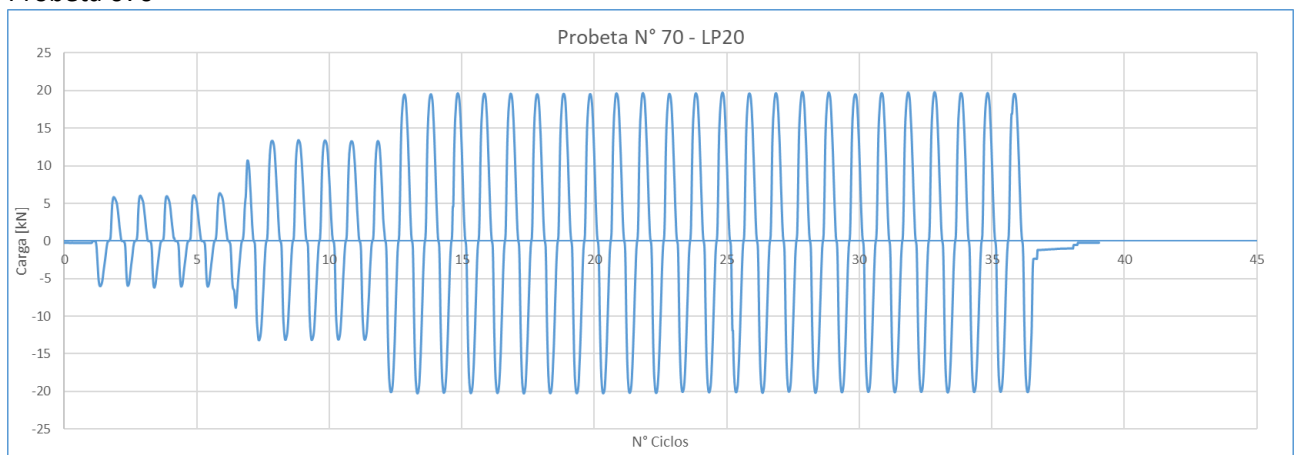
Probeta 068



Probeta 069



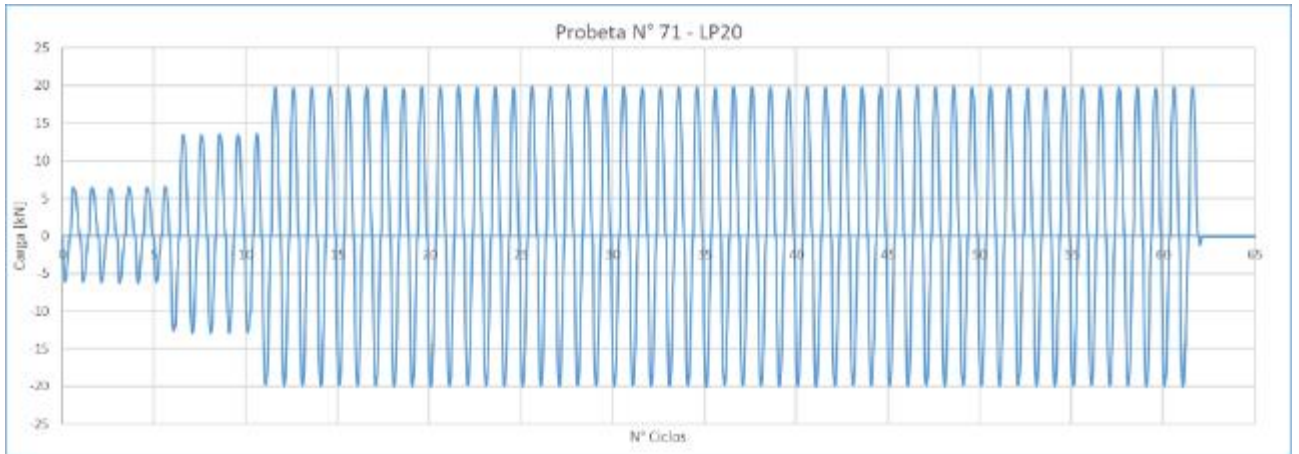
Probeta 070



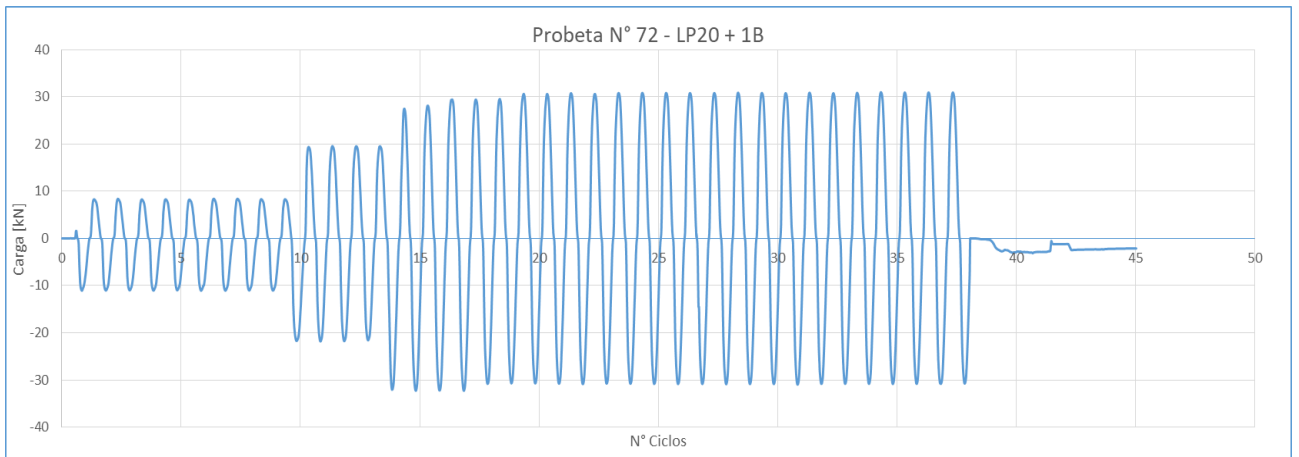
# COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

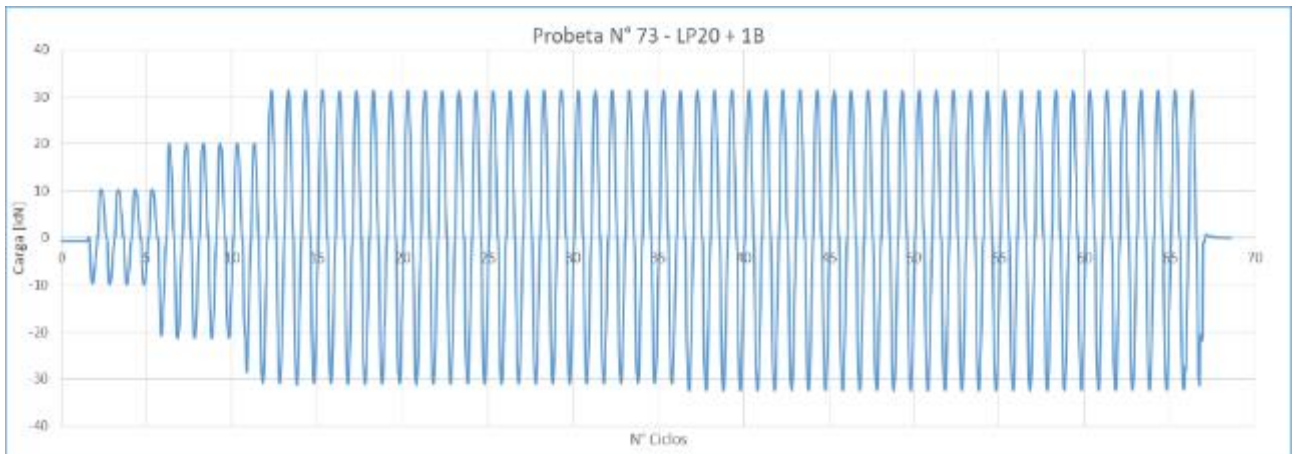
## Probeta 071



## Probeta 072



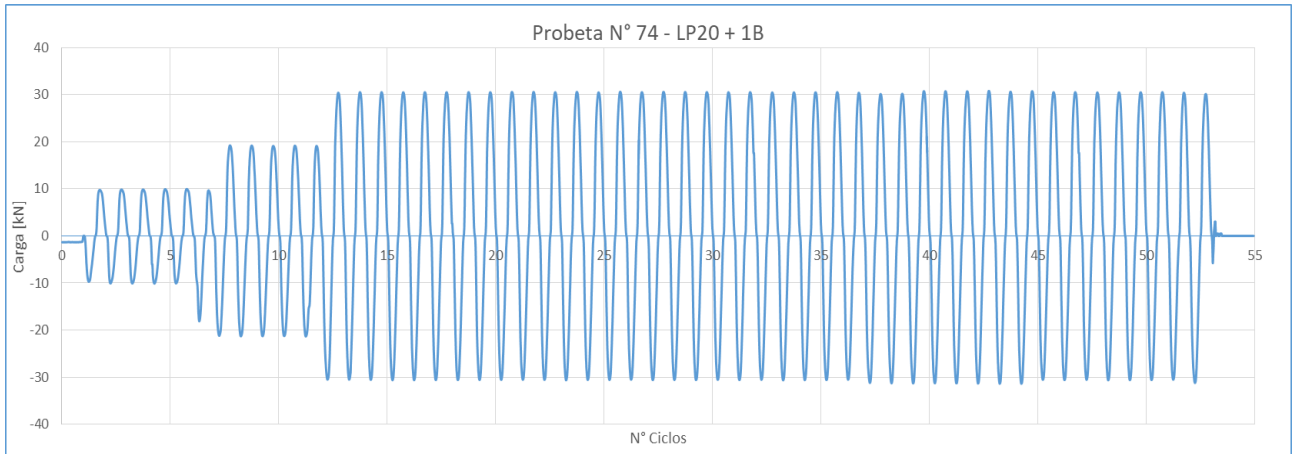
## Probeta 073



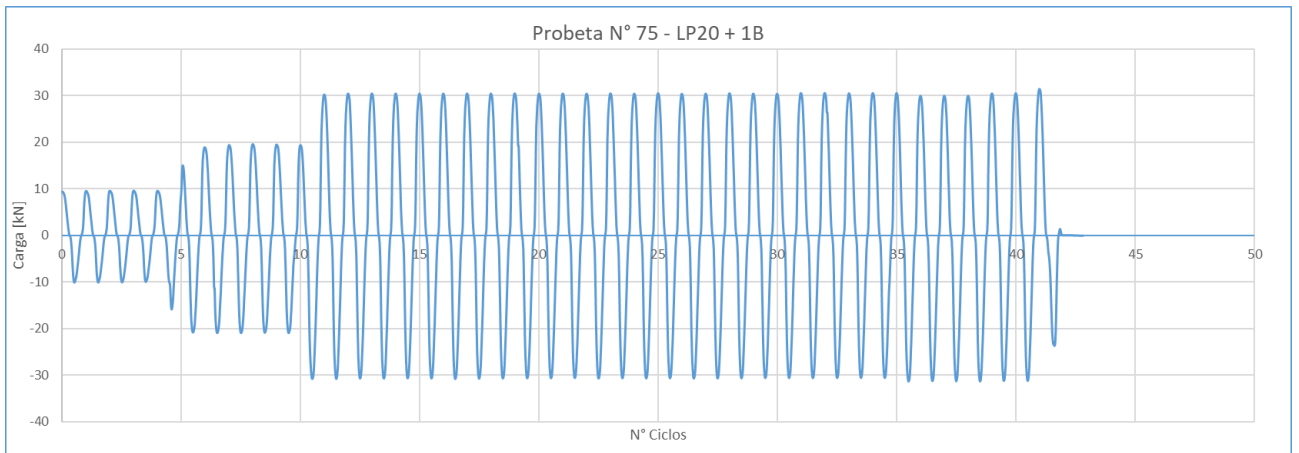
# COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

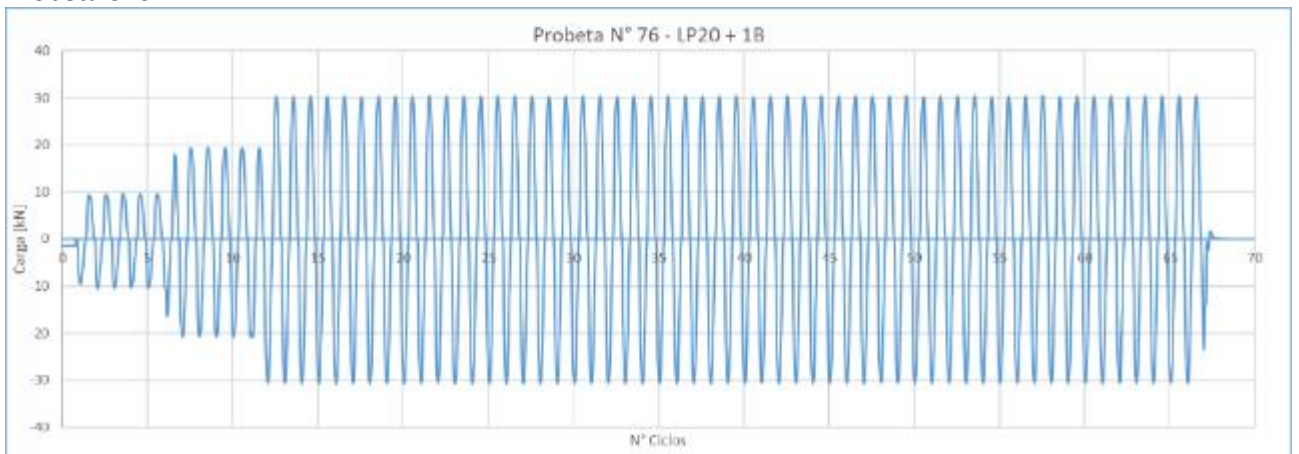
## Probeta 074



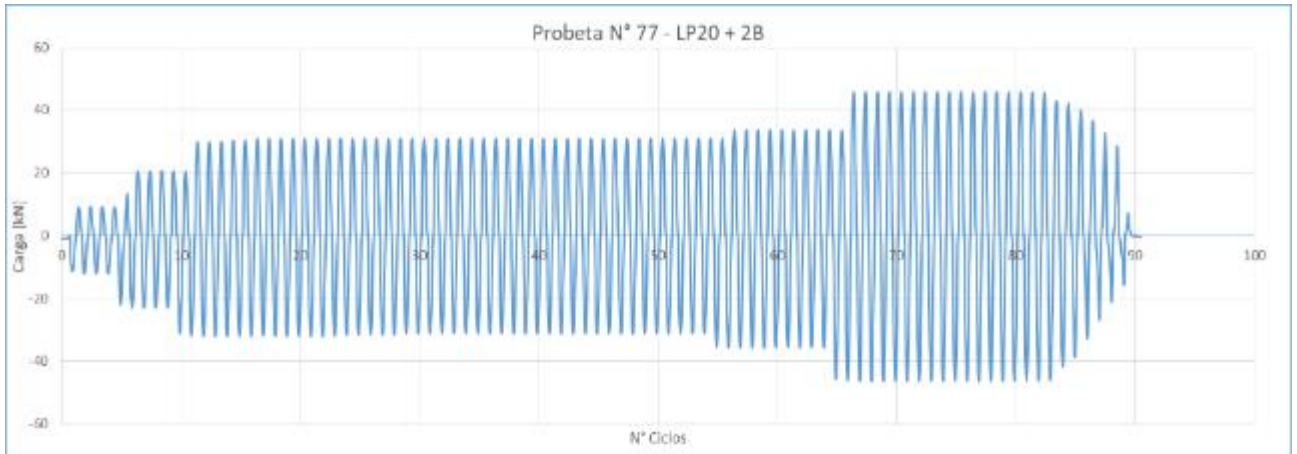
## Probeta 075



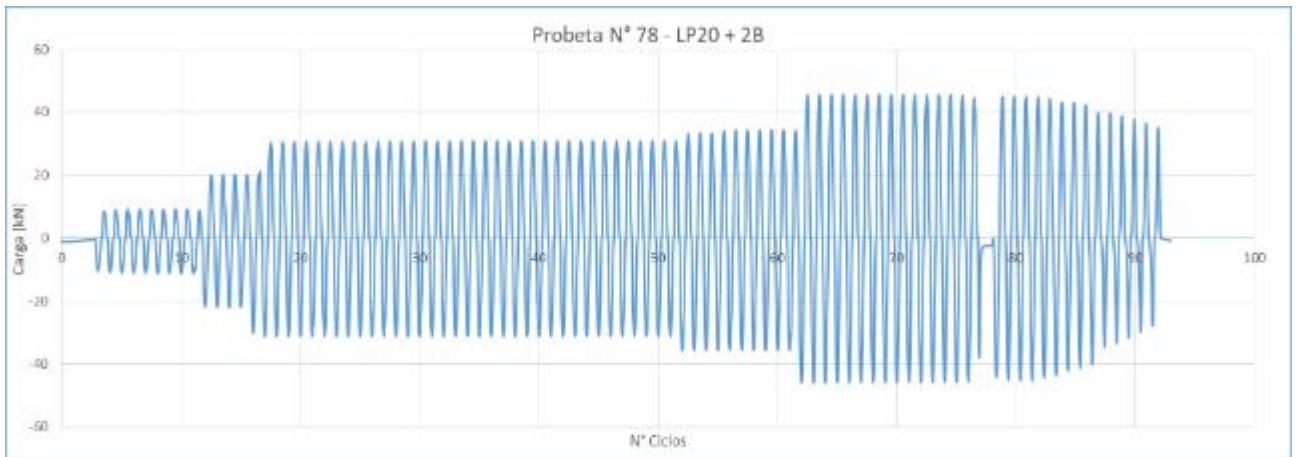
## Probeta 076



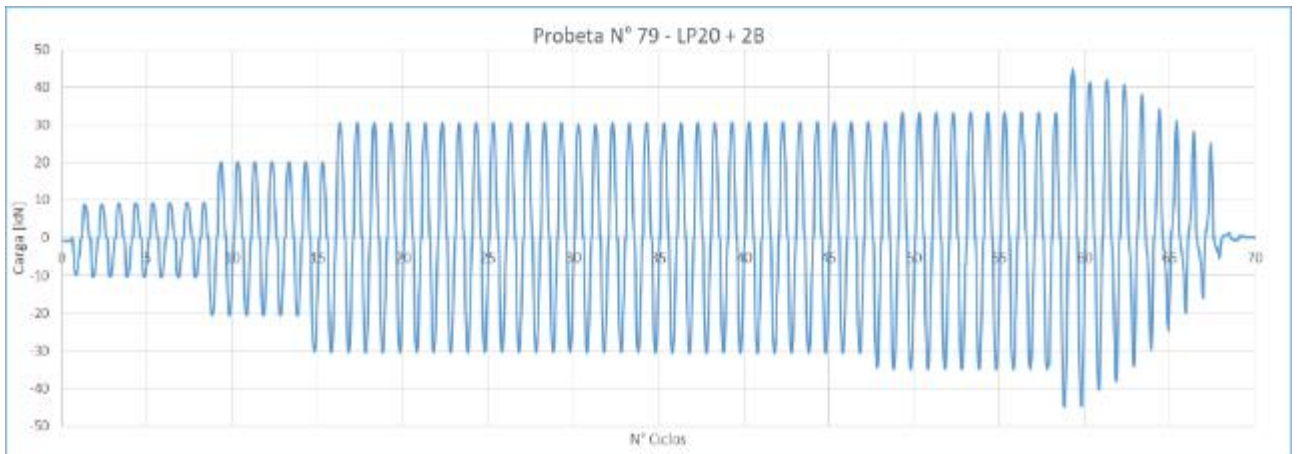
Probeta 077



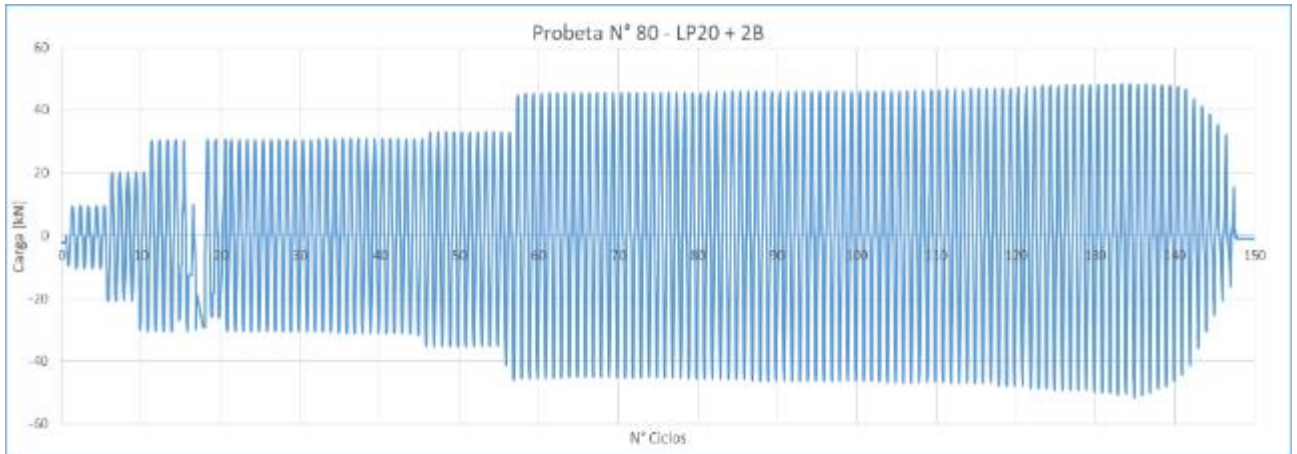
Probeta 078



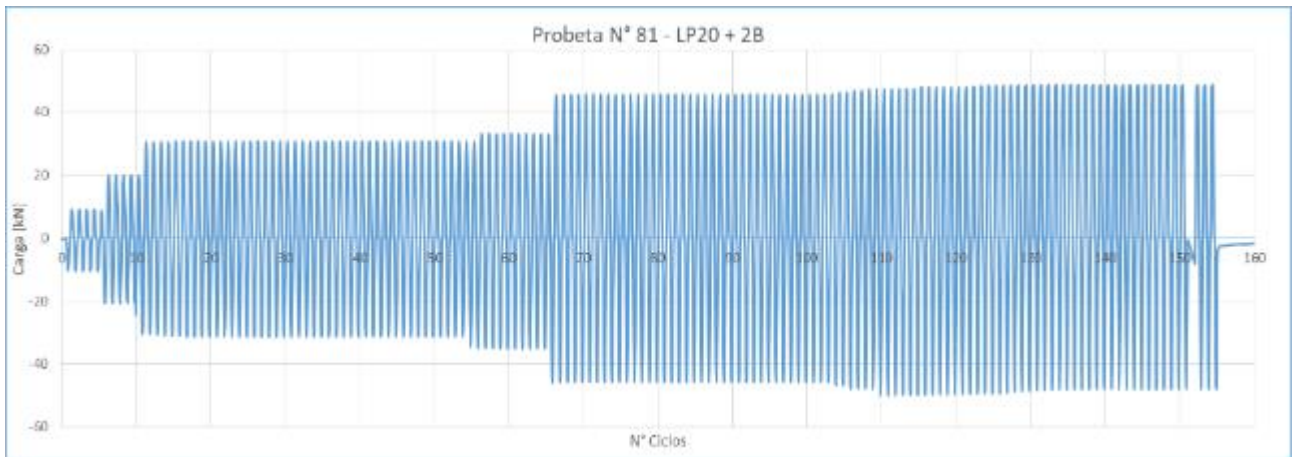
Probeta 079



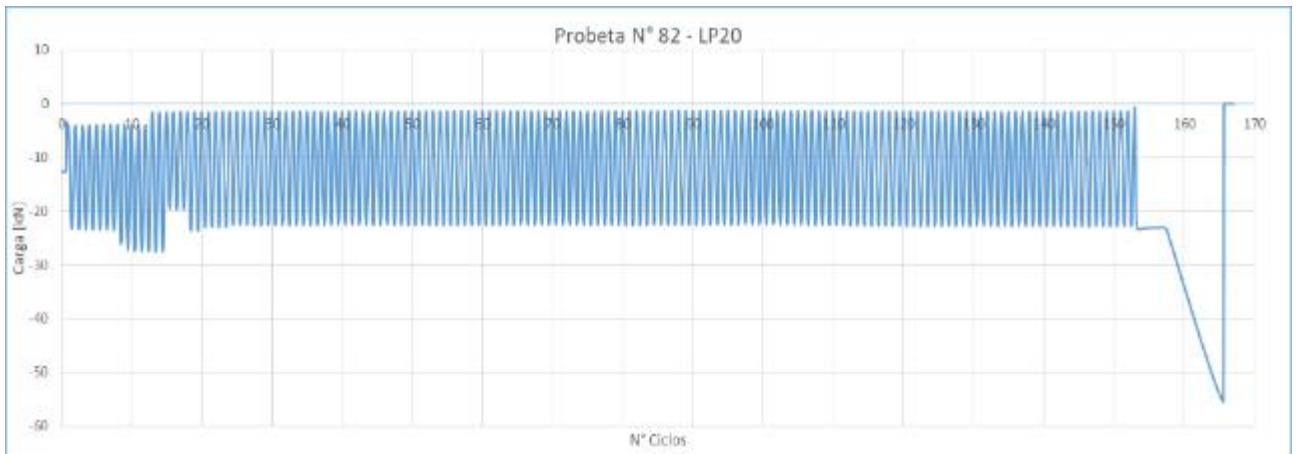
Probeta 080



Probeta 081

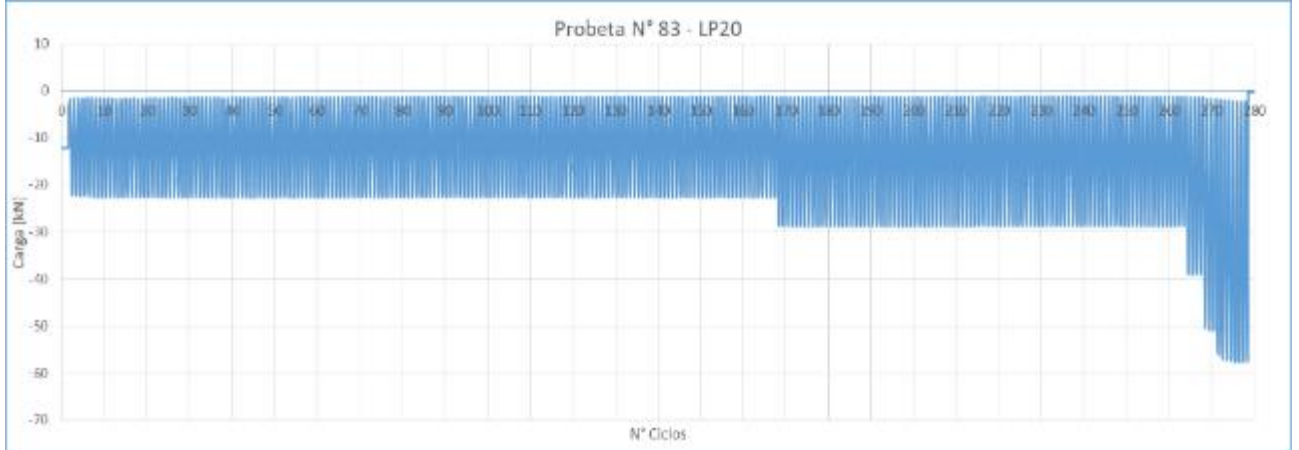


Probeta 082

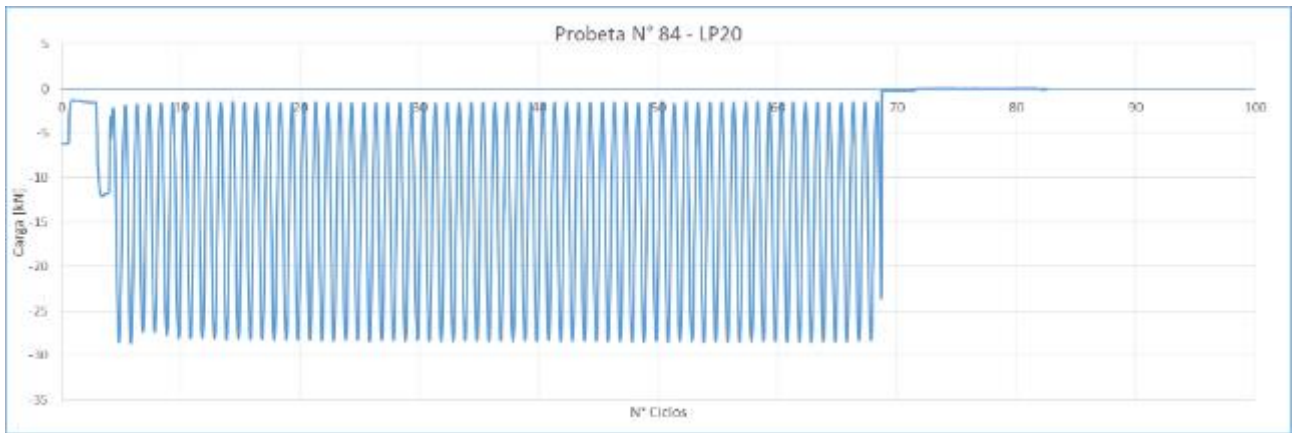


Probeta

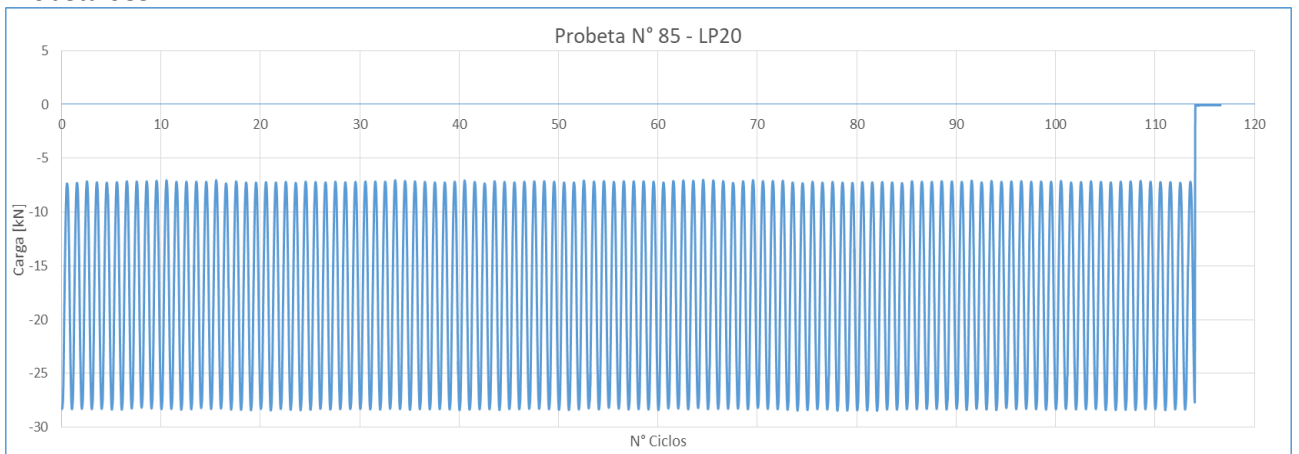
083



Probeta 084



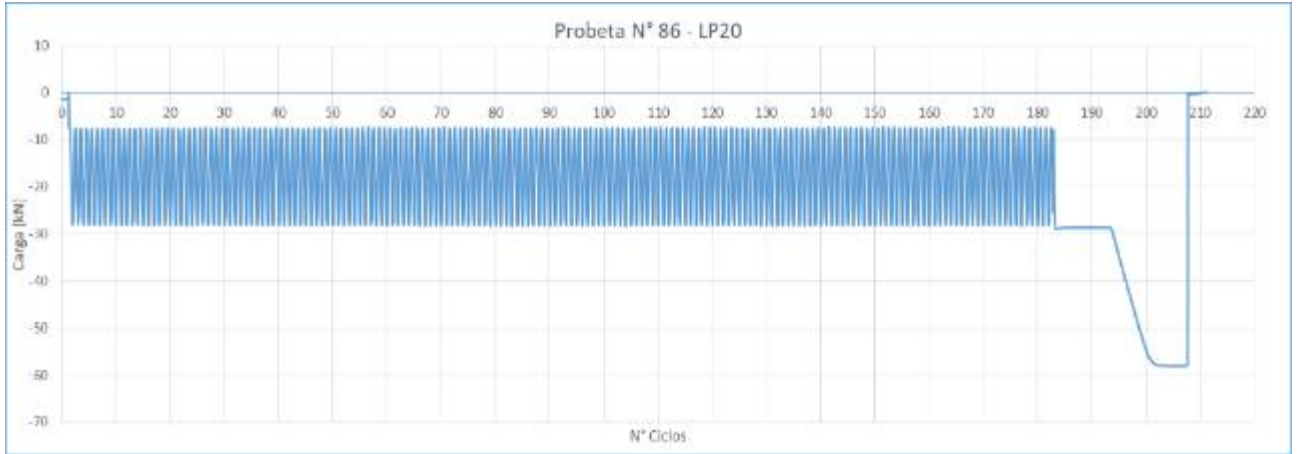
Probeta 085



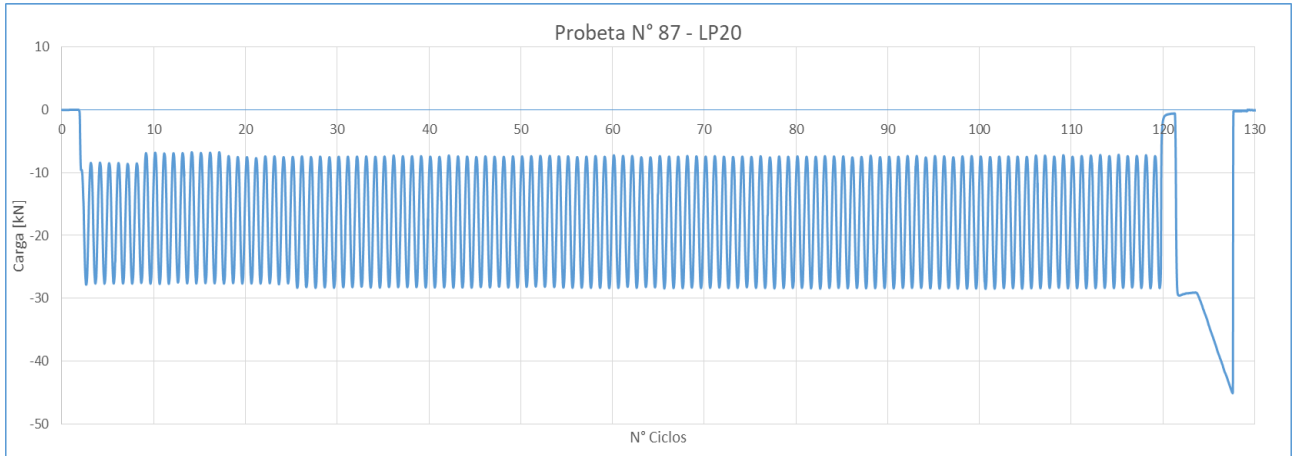
COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

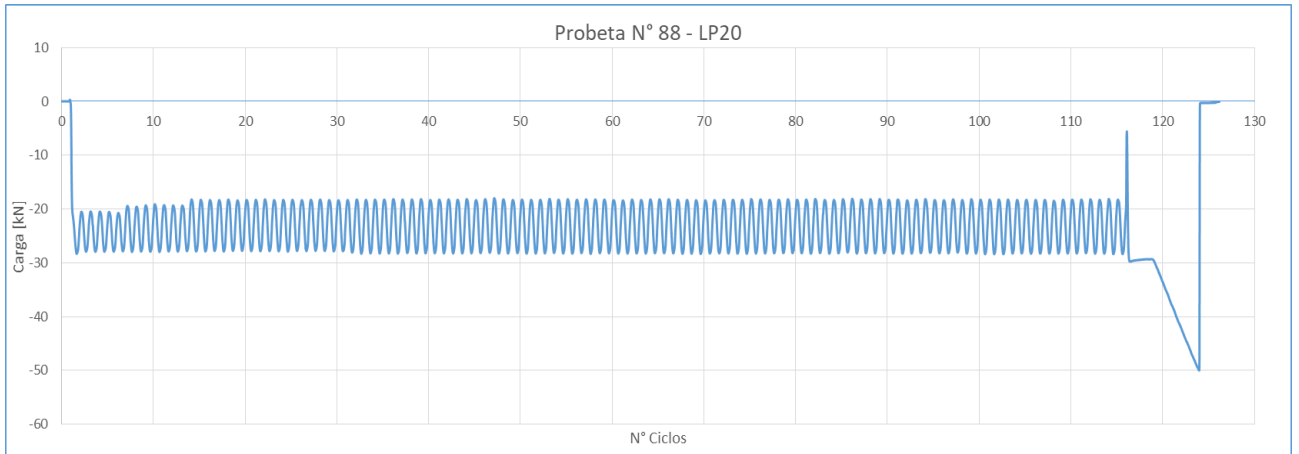
Probeta 086



Probeta 087



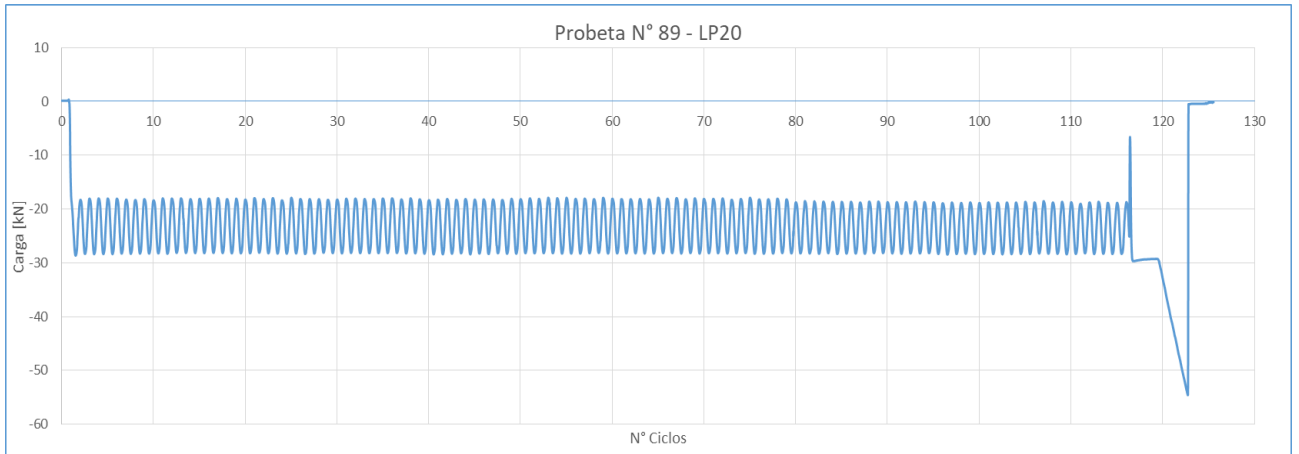
Probeta 088



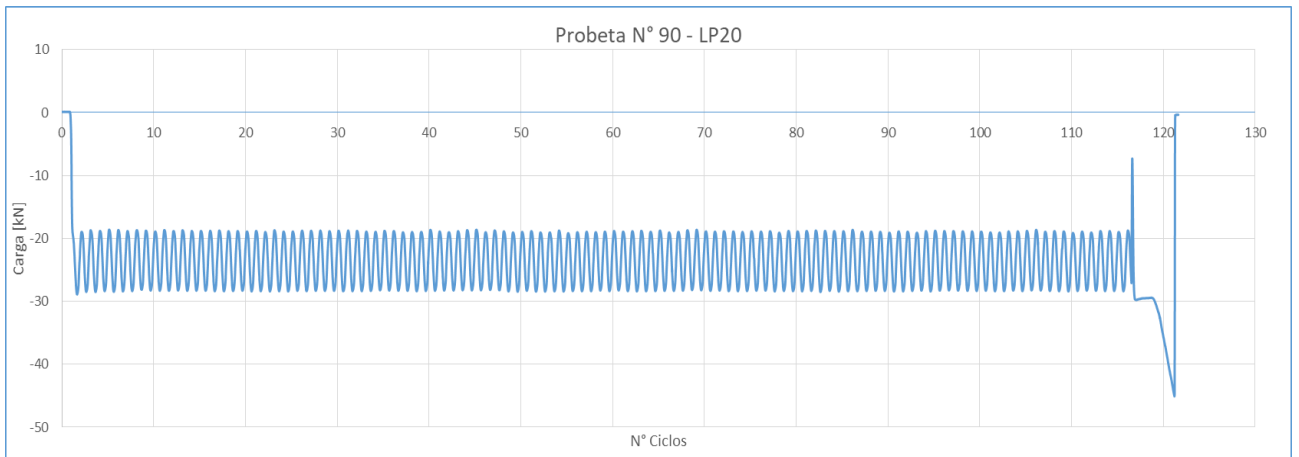
# COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

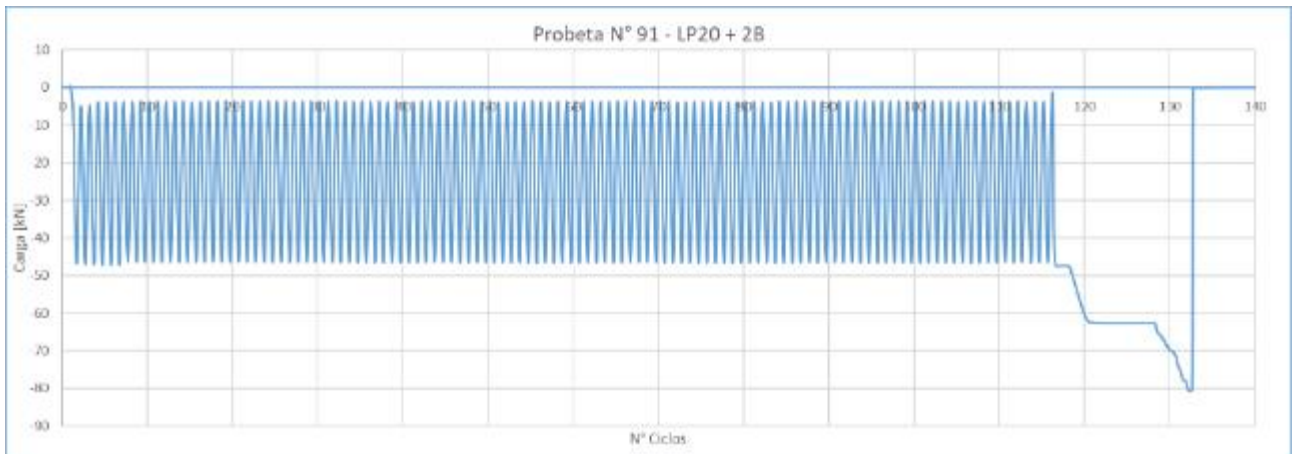
## Probeta 089



## Probeta 090



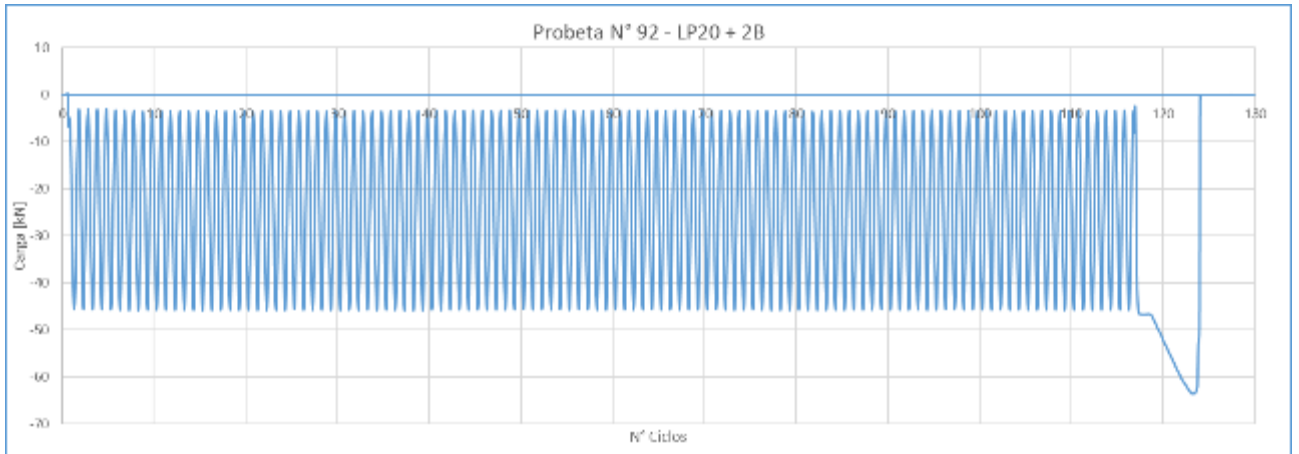
## Probeta 091



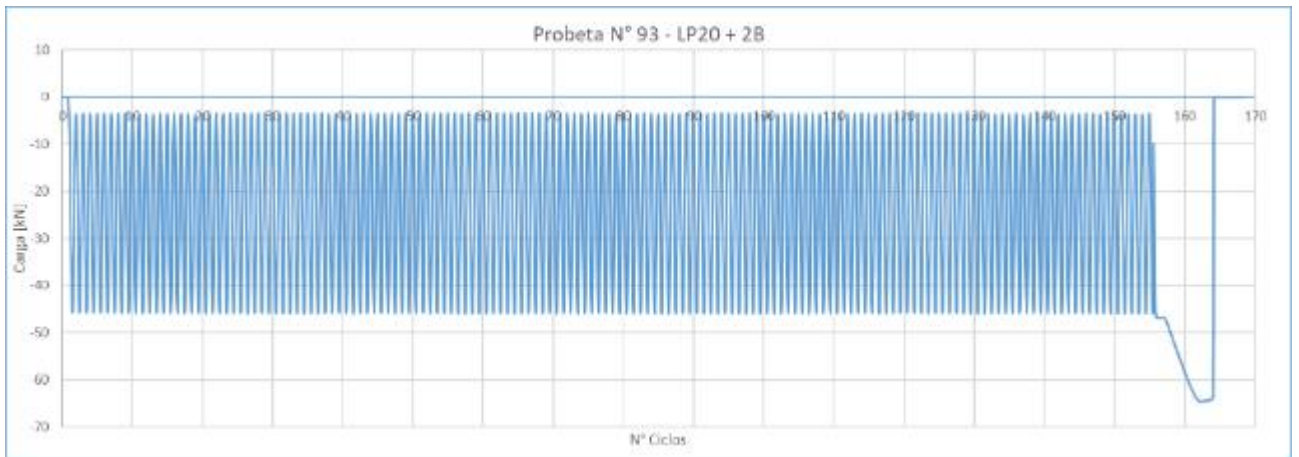
COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

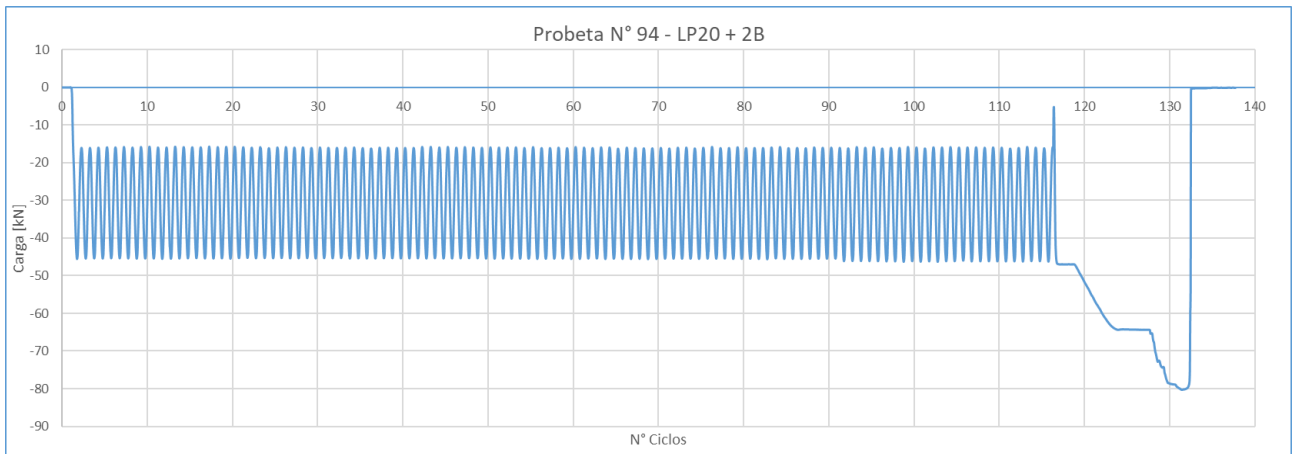
Probeta 092



Probeta 093



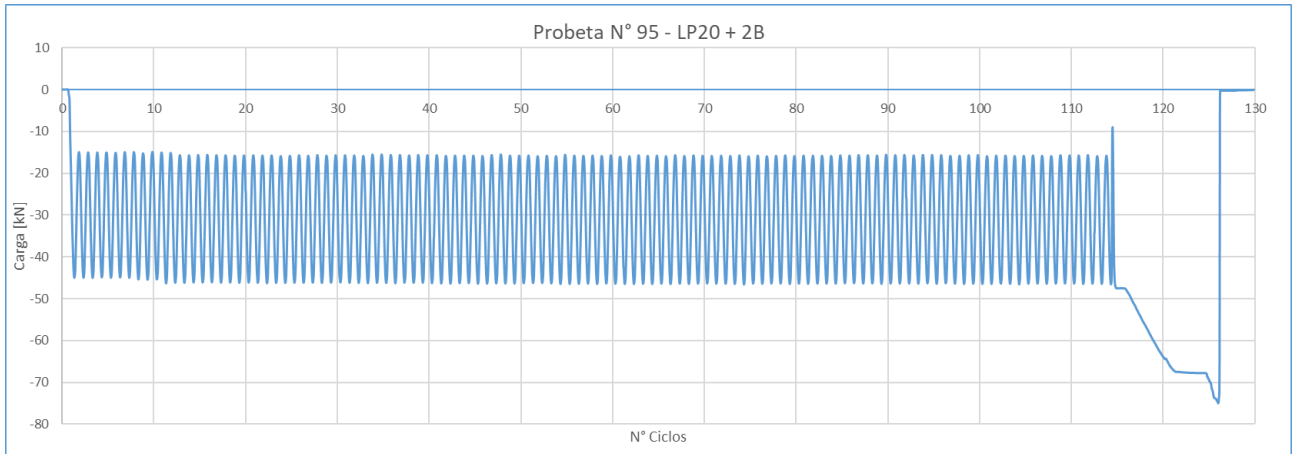
Probeta 094



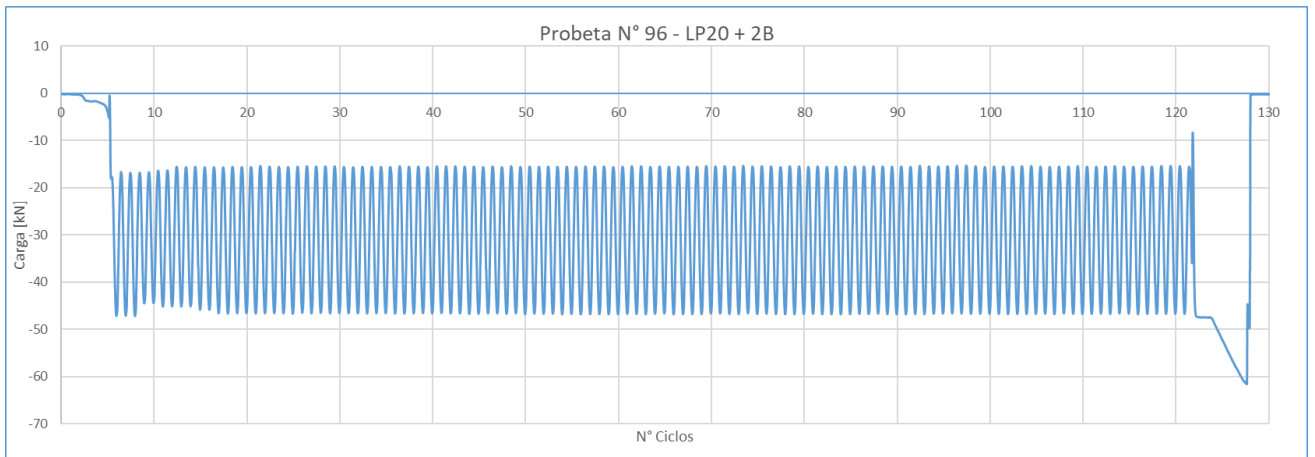
COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

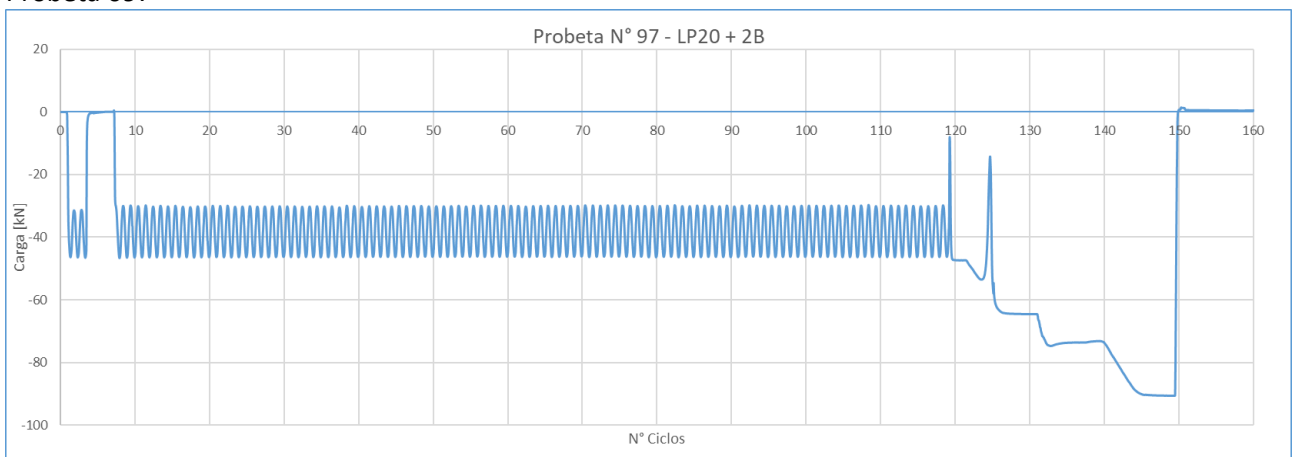
Probeta 095



Probeta 096



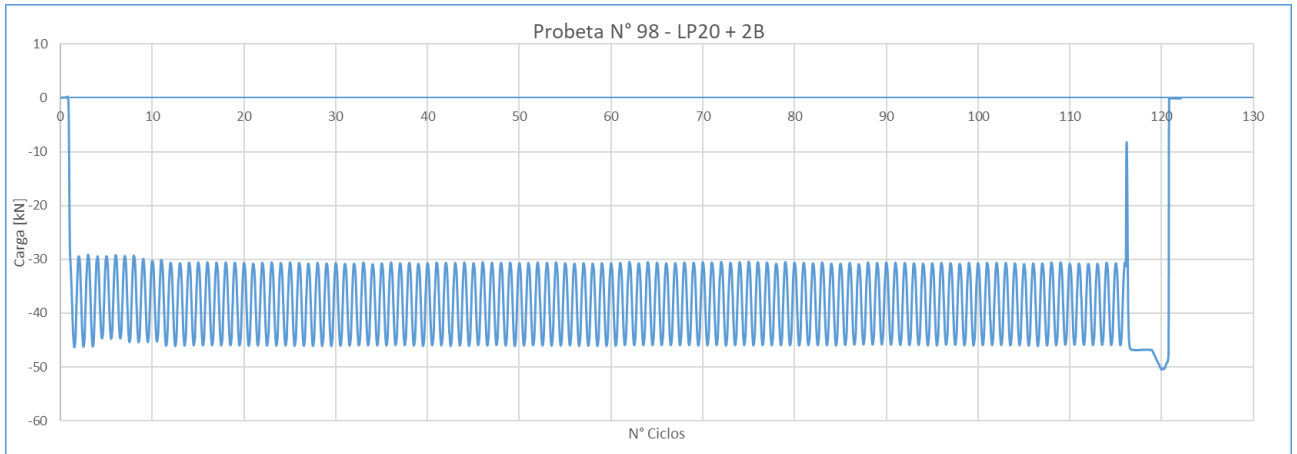
Probeta 097



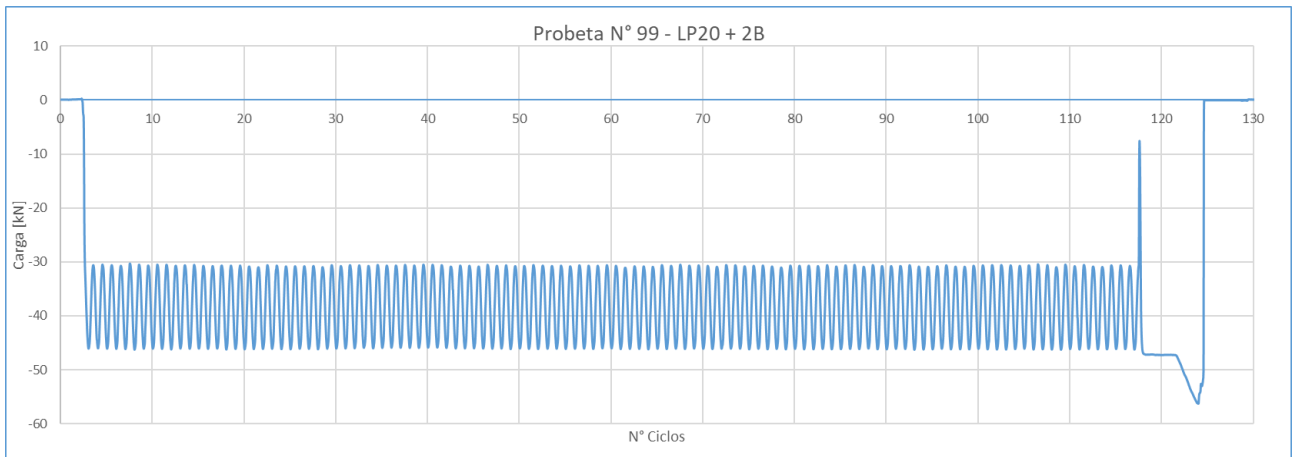
# COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

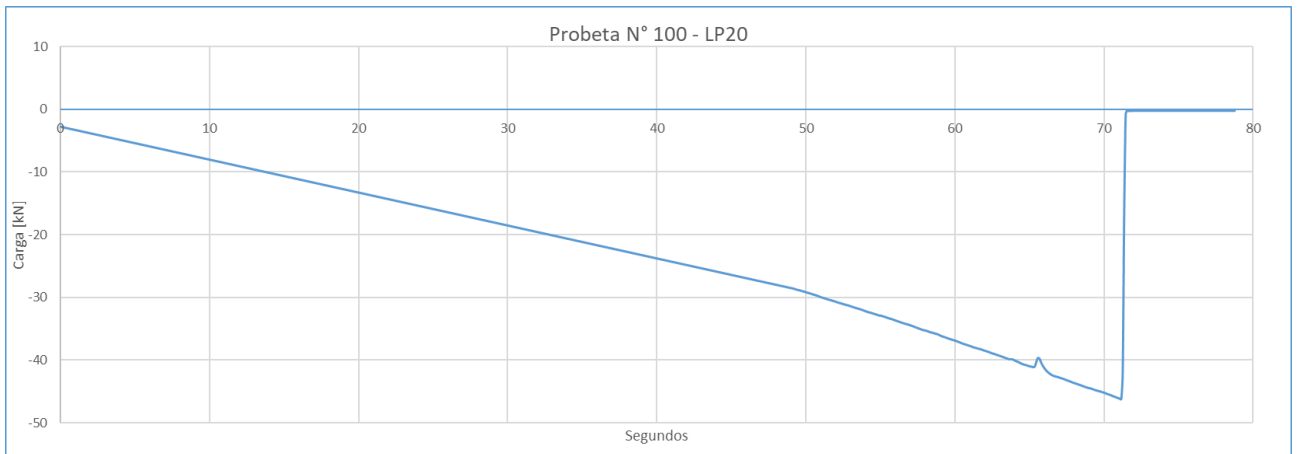
## Probeta 098



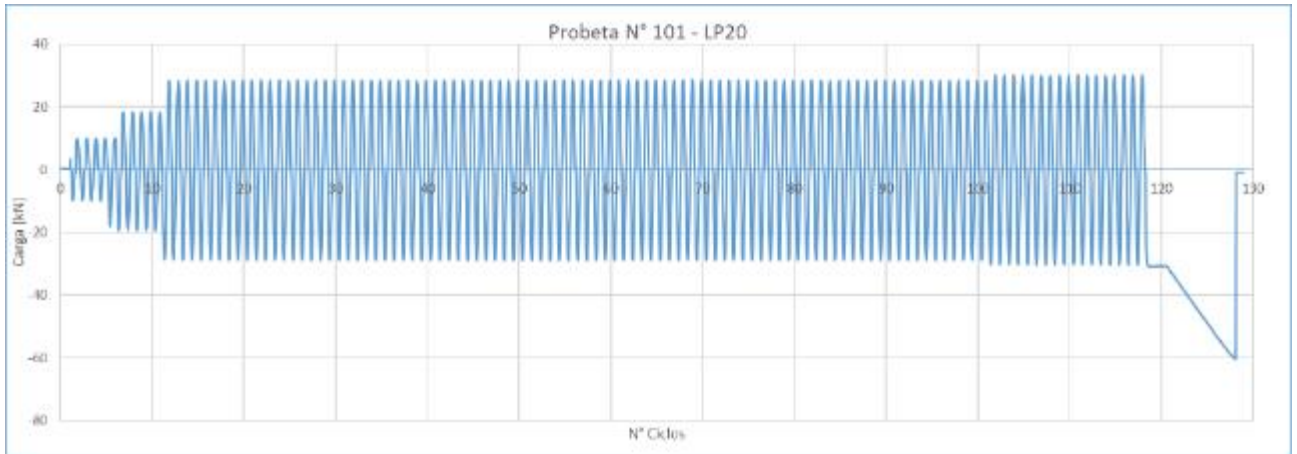
## Probeta 099



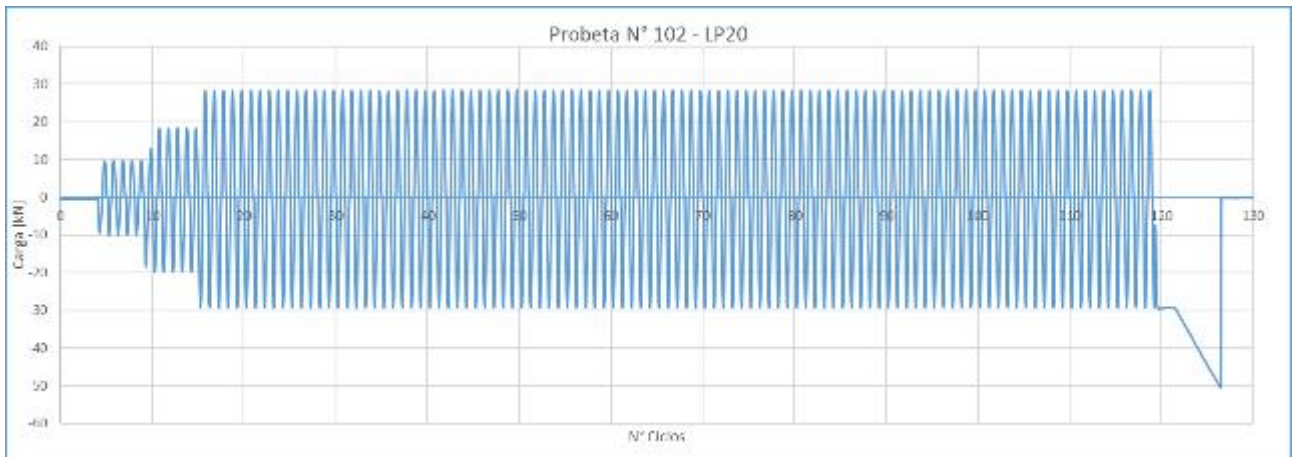
## Probeta 100



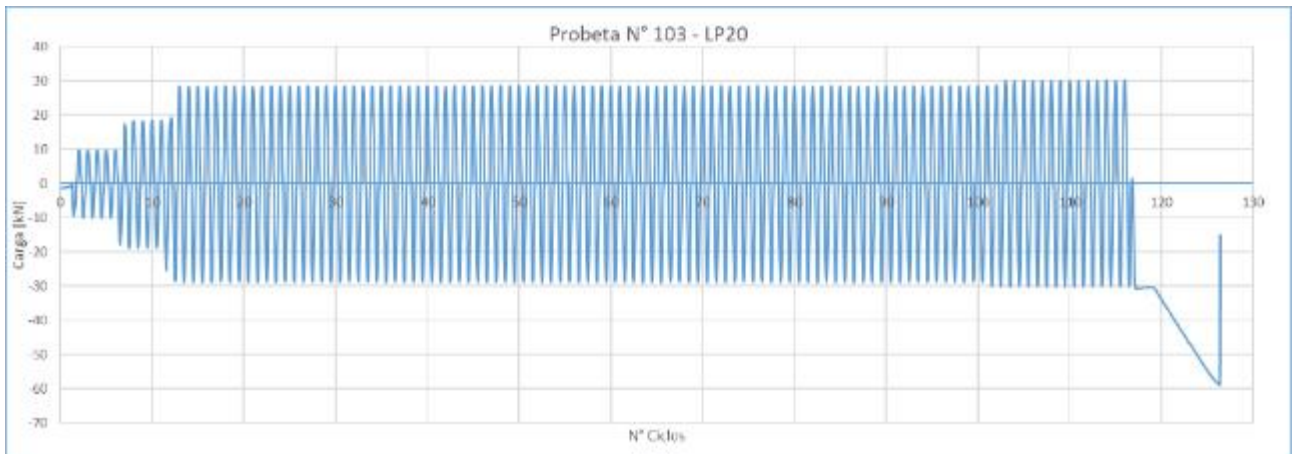
Probeta 101



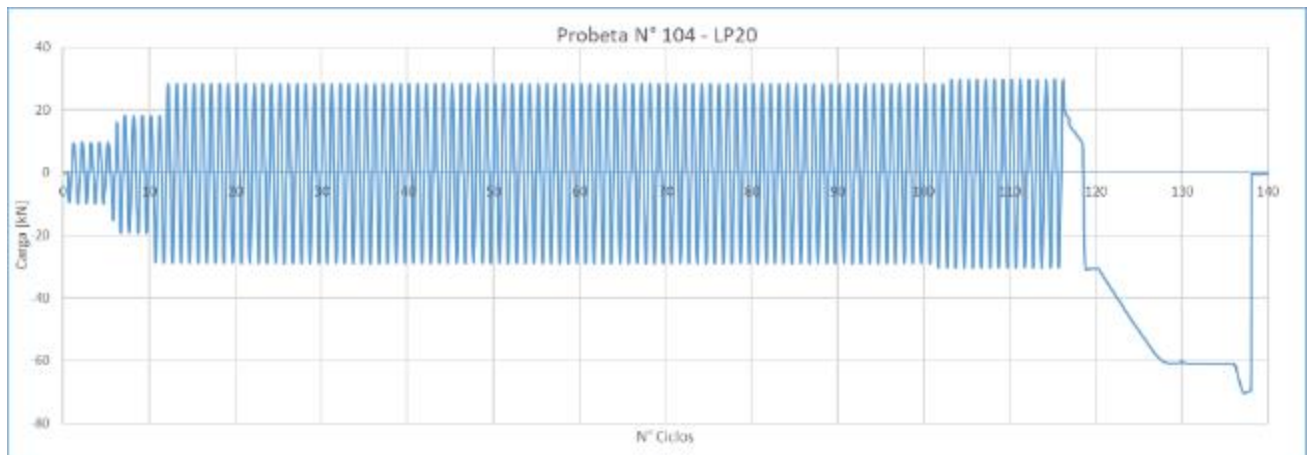
Probeta 102



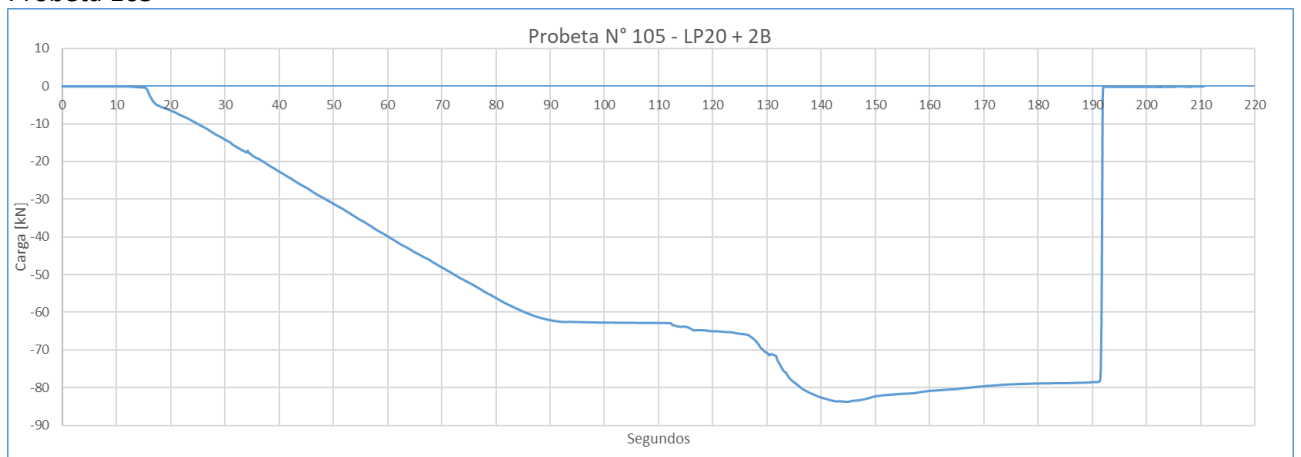
Probeta 103



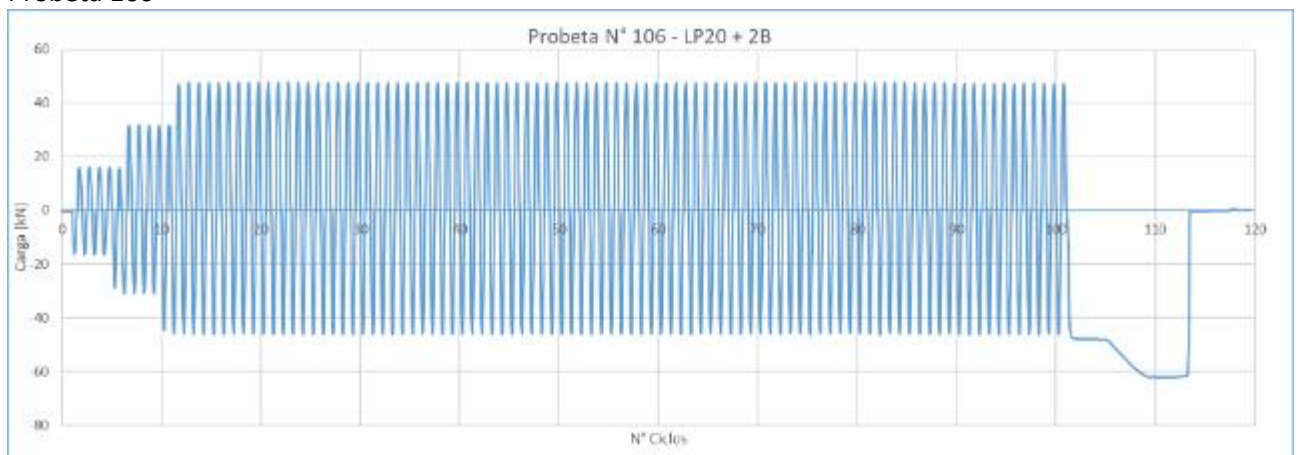
Probeta 104



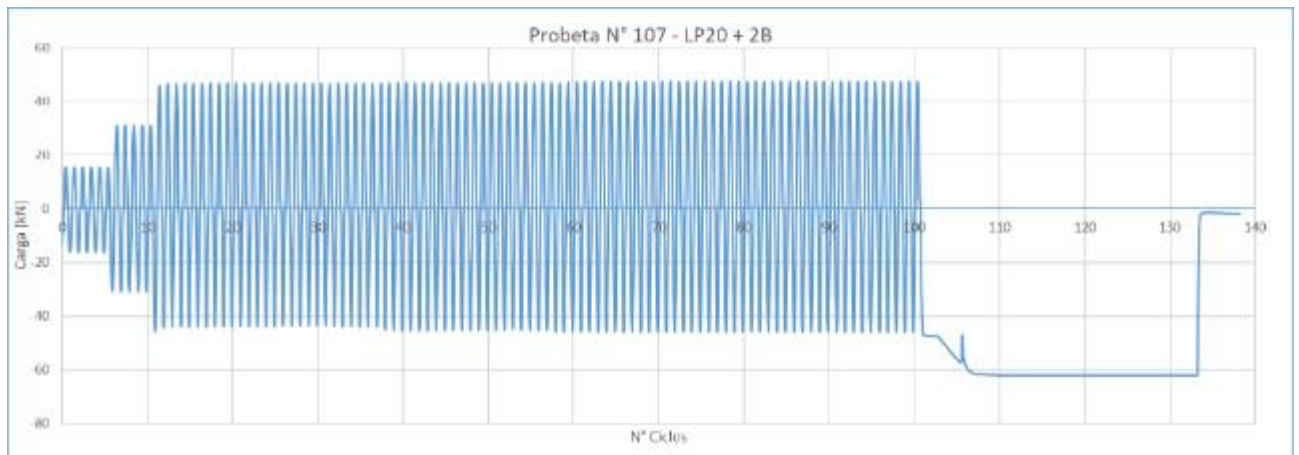
Probeta 105



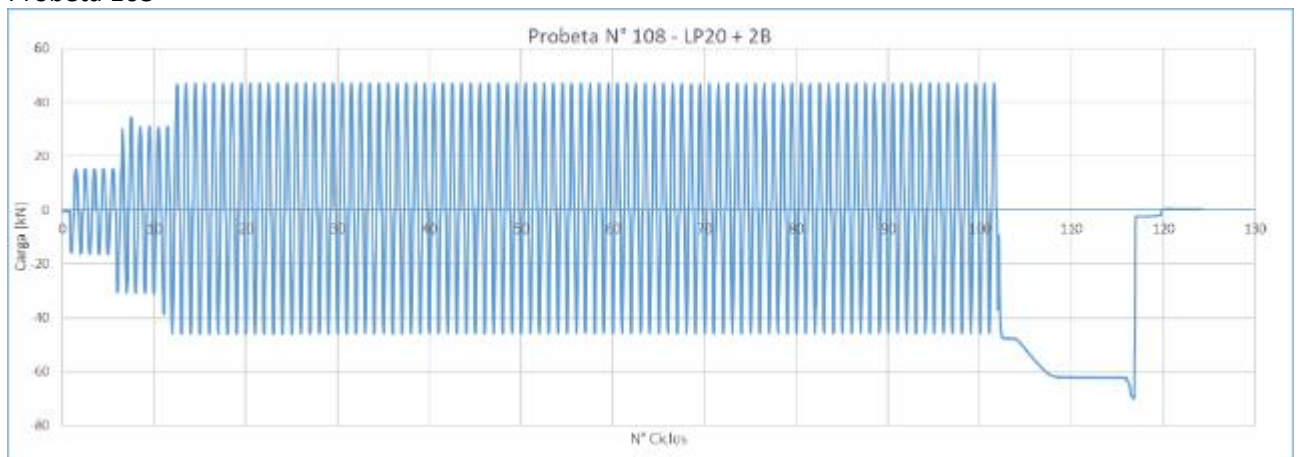
Probeta 106



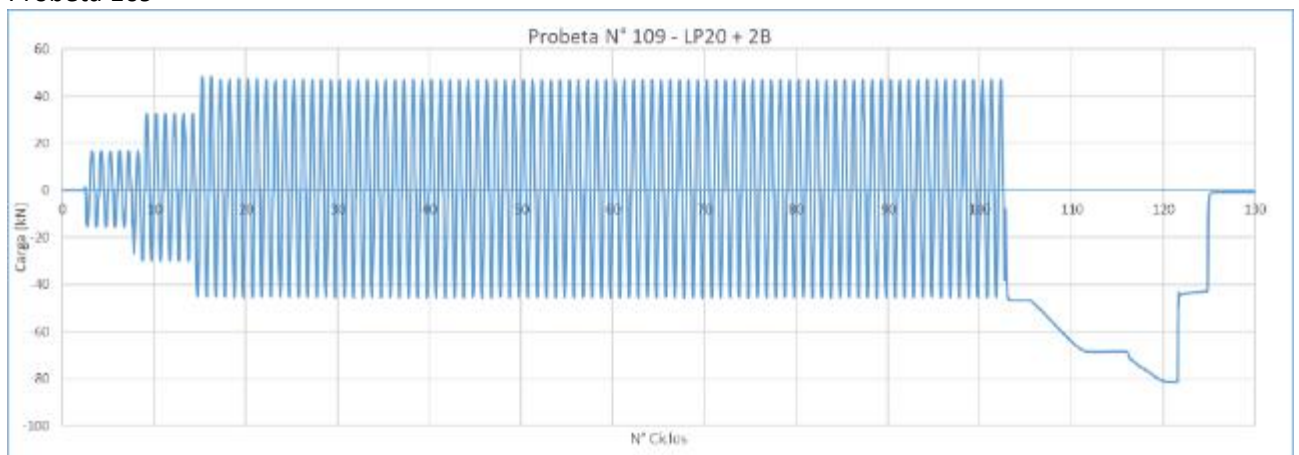
Probeta 107



Probeta 108



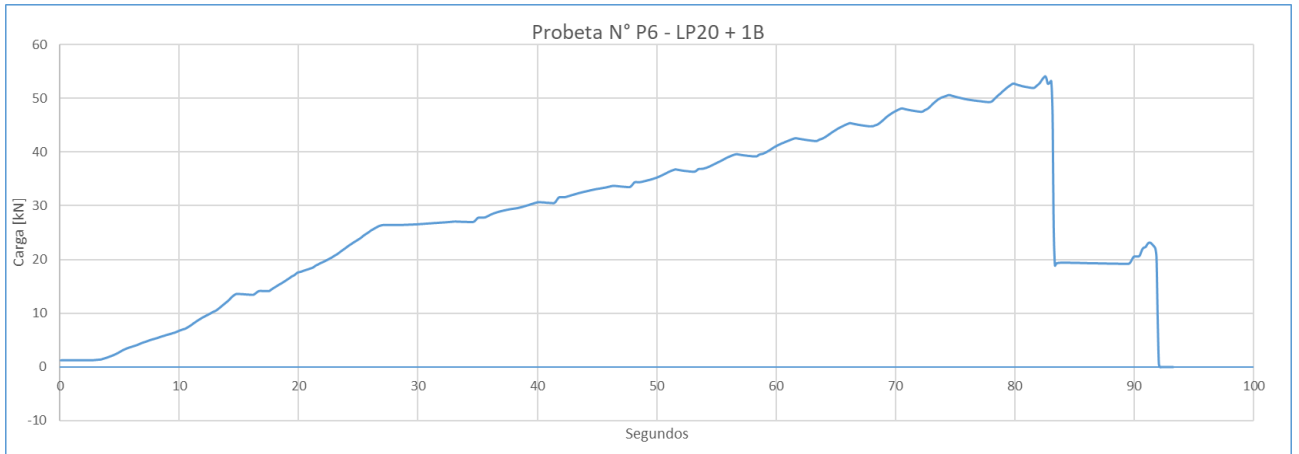
Probeta 109



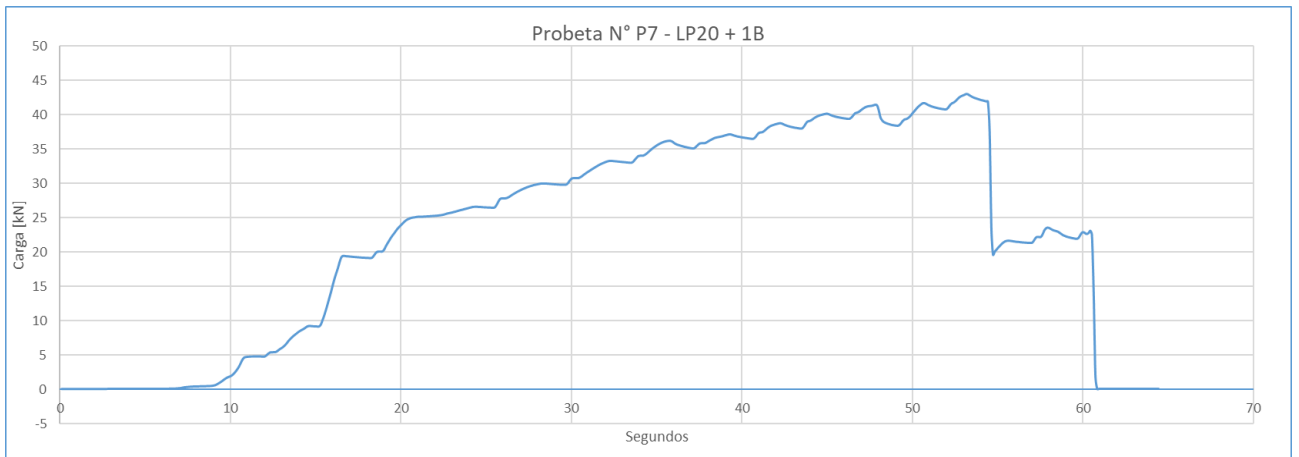
# COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

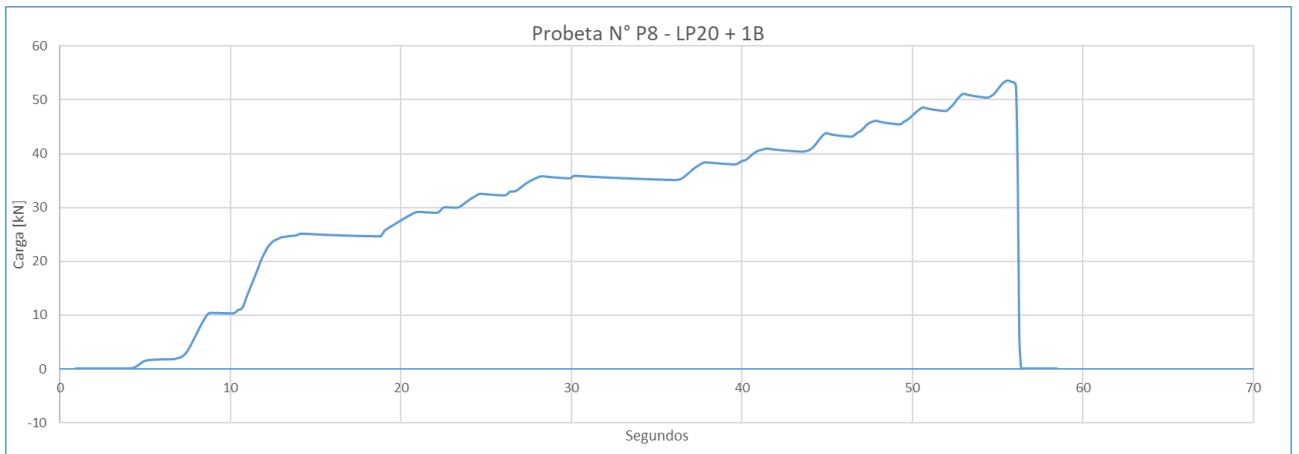
## Probeta P6



## Probeta P7



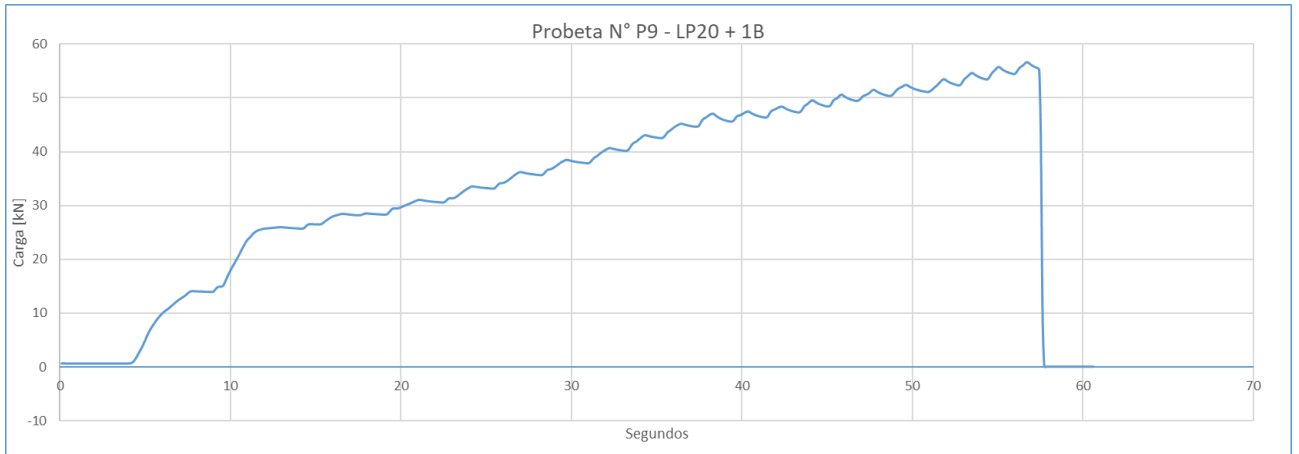
## Probeta P8



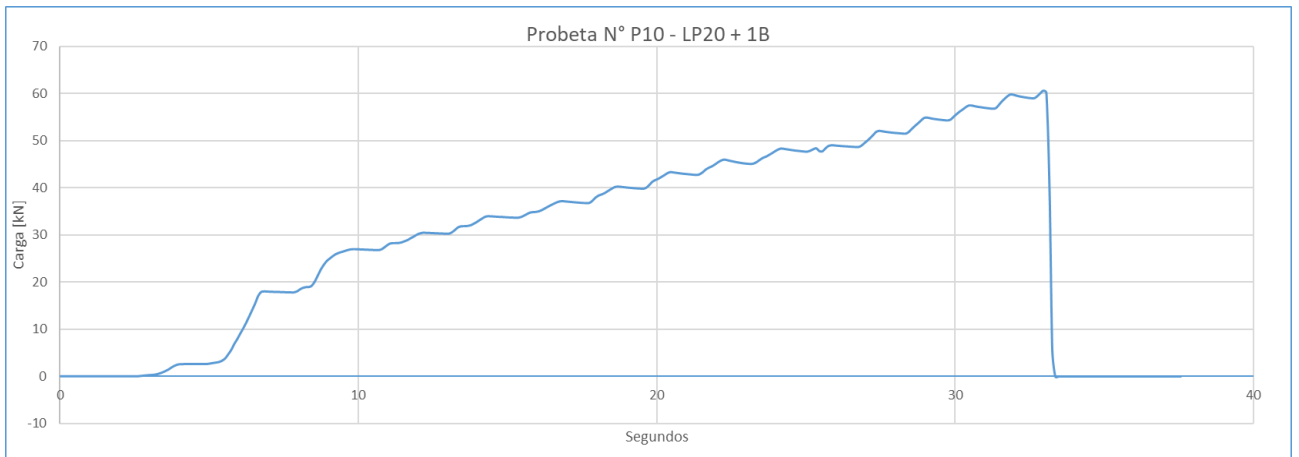
# COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

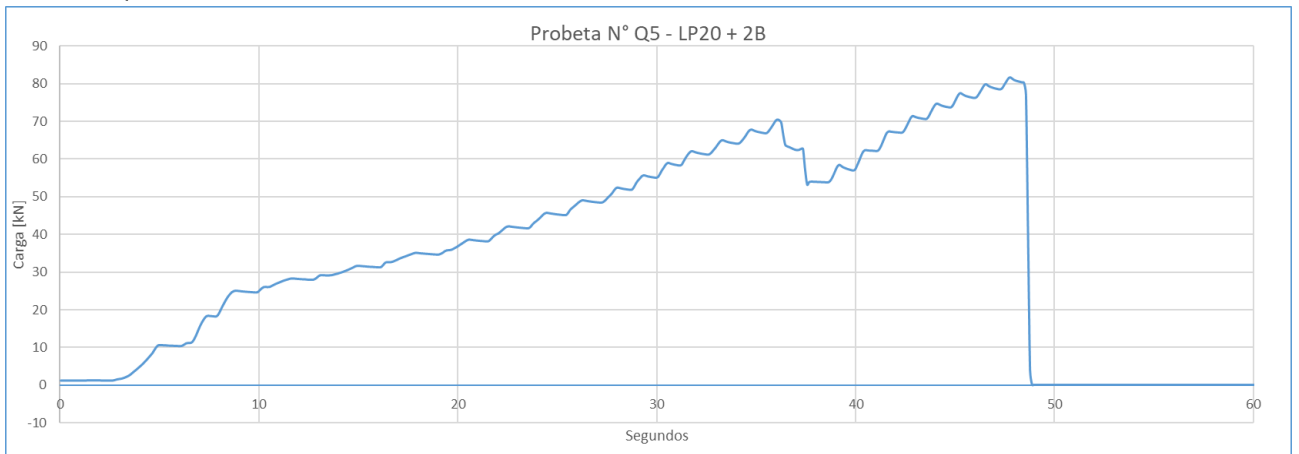
## Probeta P9



## Probeta P10



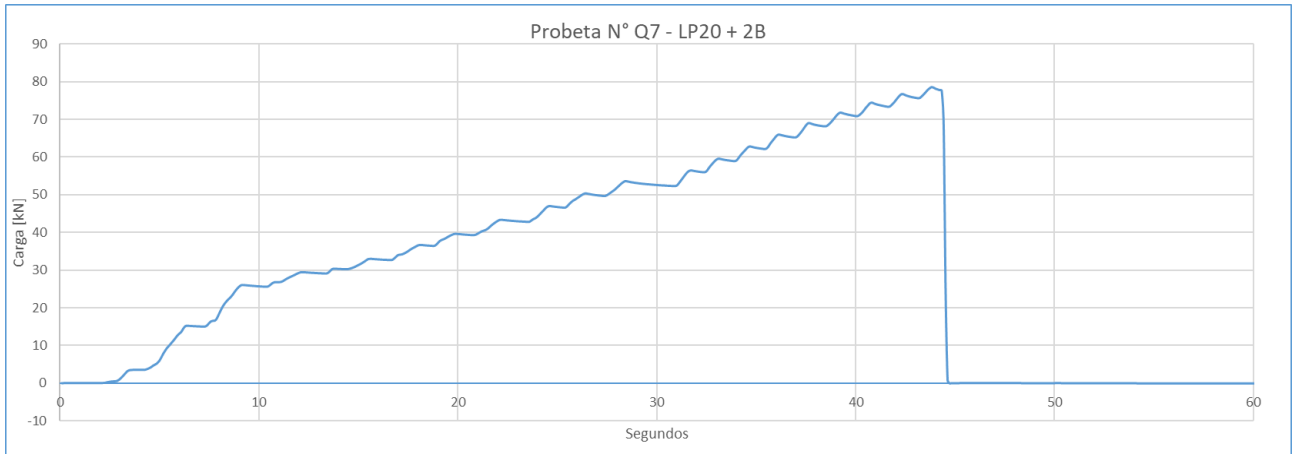
## Probeta Q5



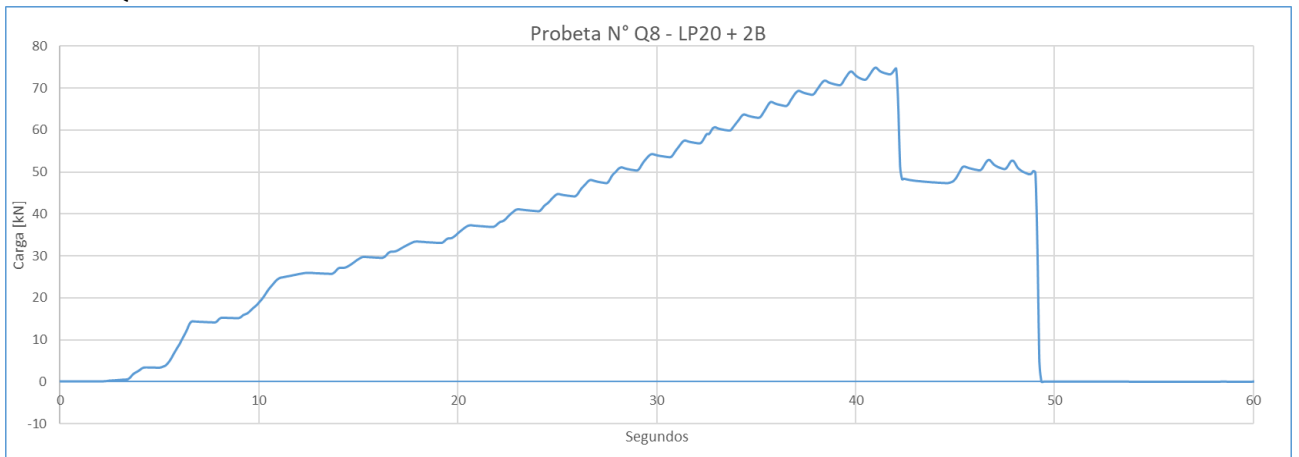
# COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

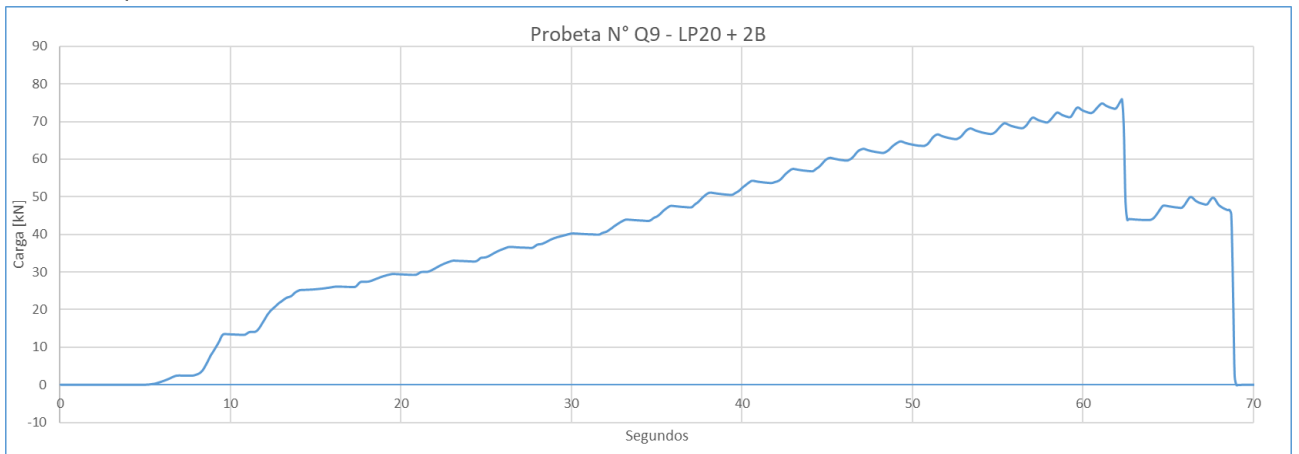
## Probeta Q7



## Probeta Q8



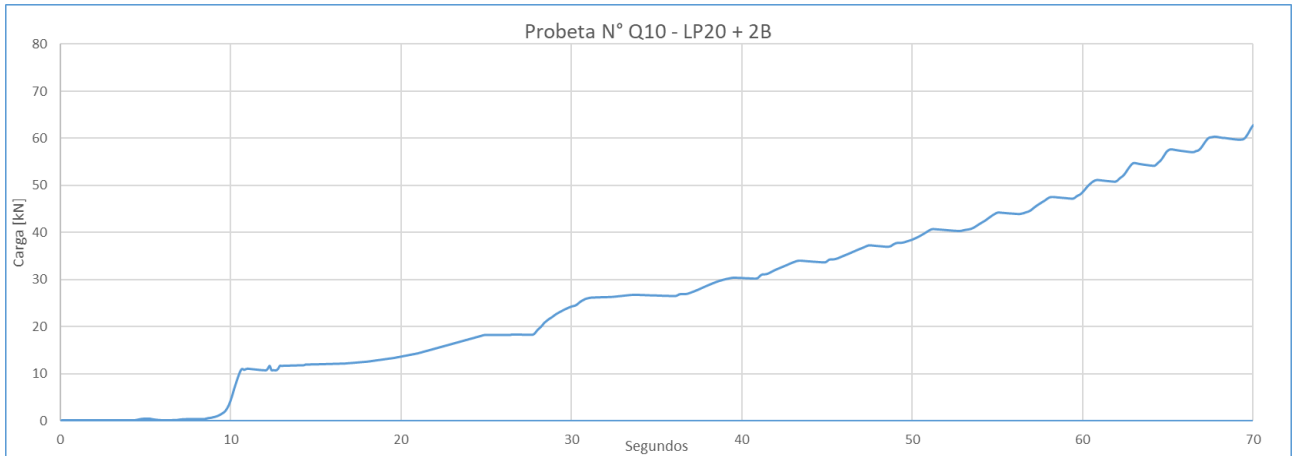
## Probeta Q9



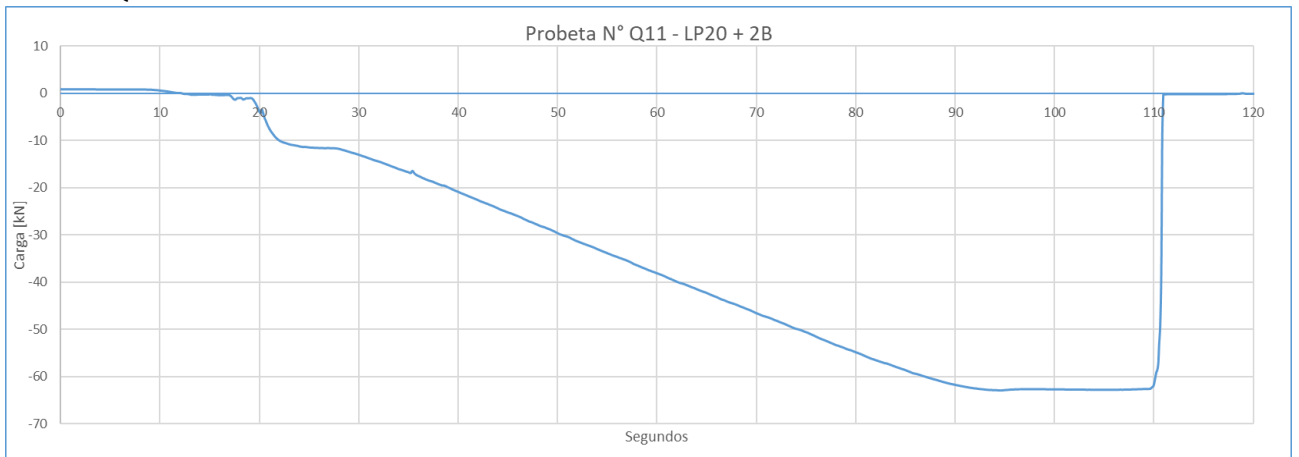
# COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

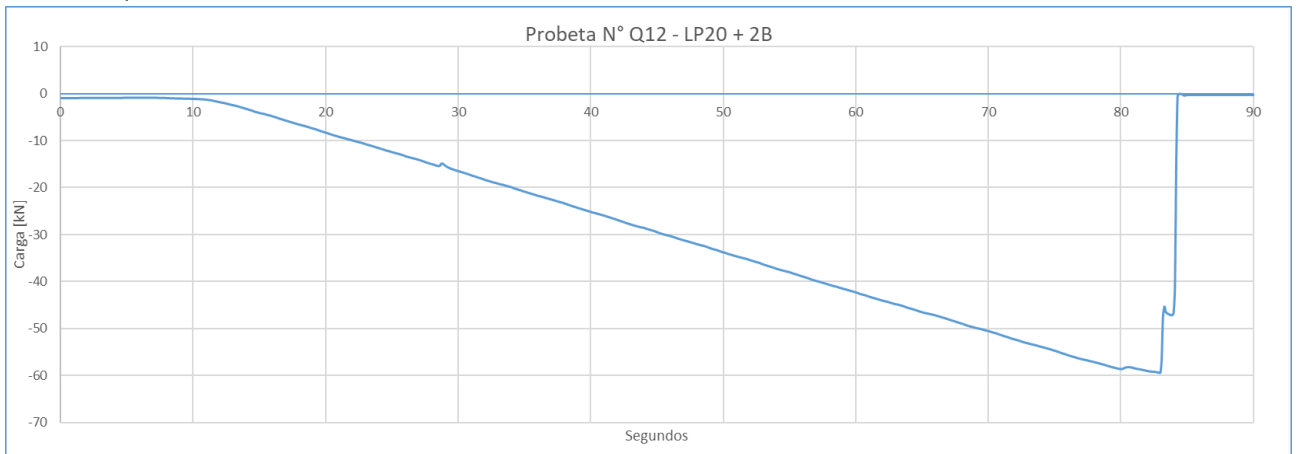
## Probeta Q10



## Probeta Q11NR



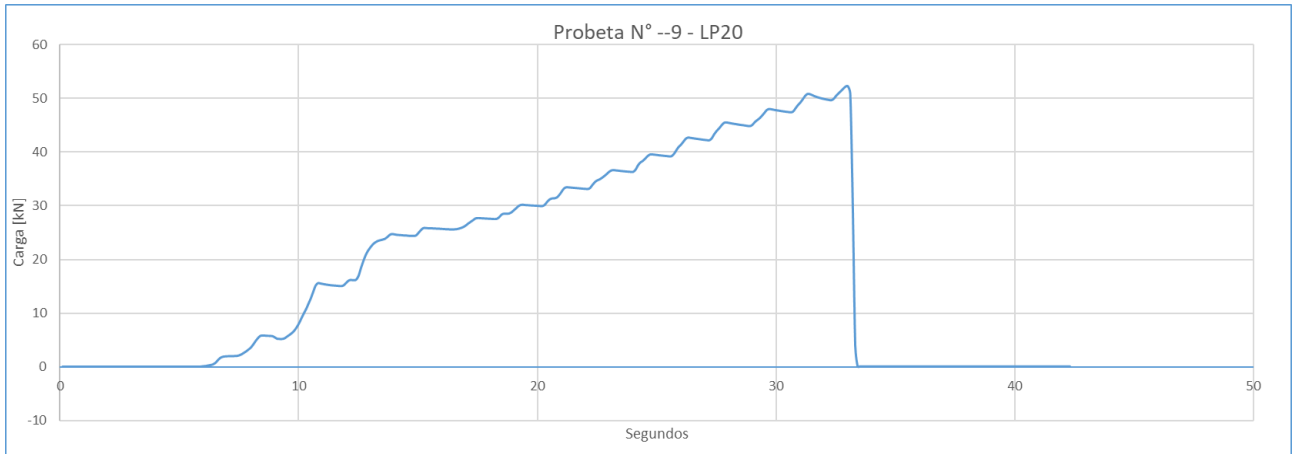
## Probeta Q12NR



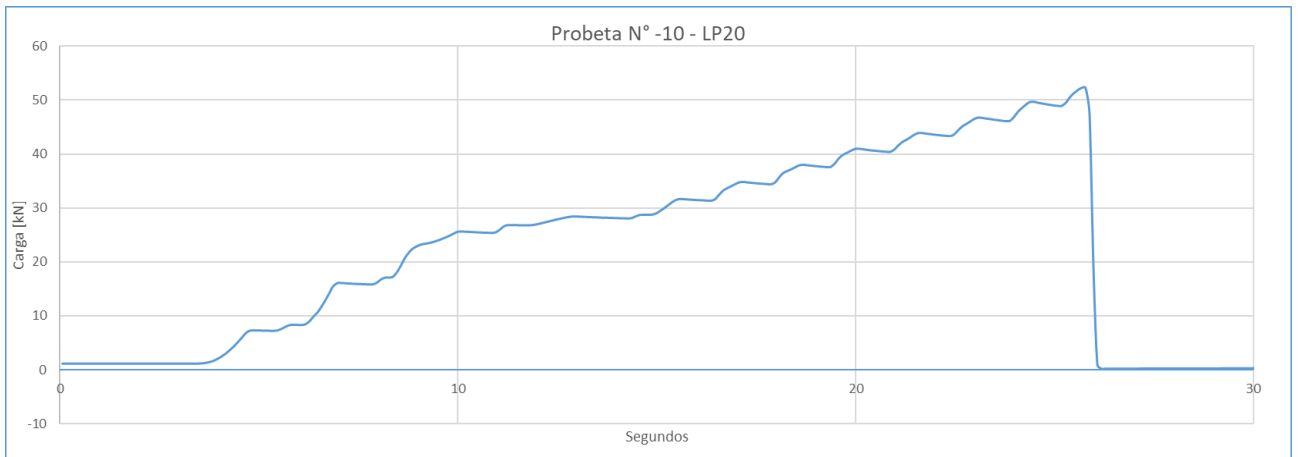
# COMPORTAMIENTO DE REFUERZOS EN HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE PRFV FRENTE A EFECTOS DINÁMICOS

Tesis Doctoral - Rubén Edgardo López - FCEIA - UNR

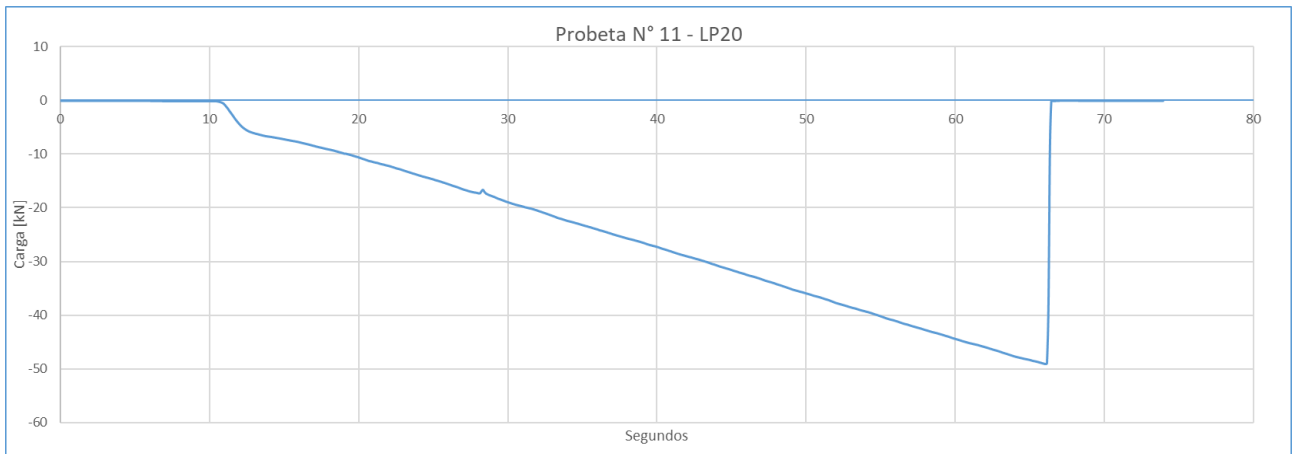
## Probeta --9



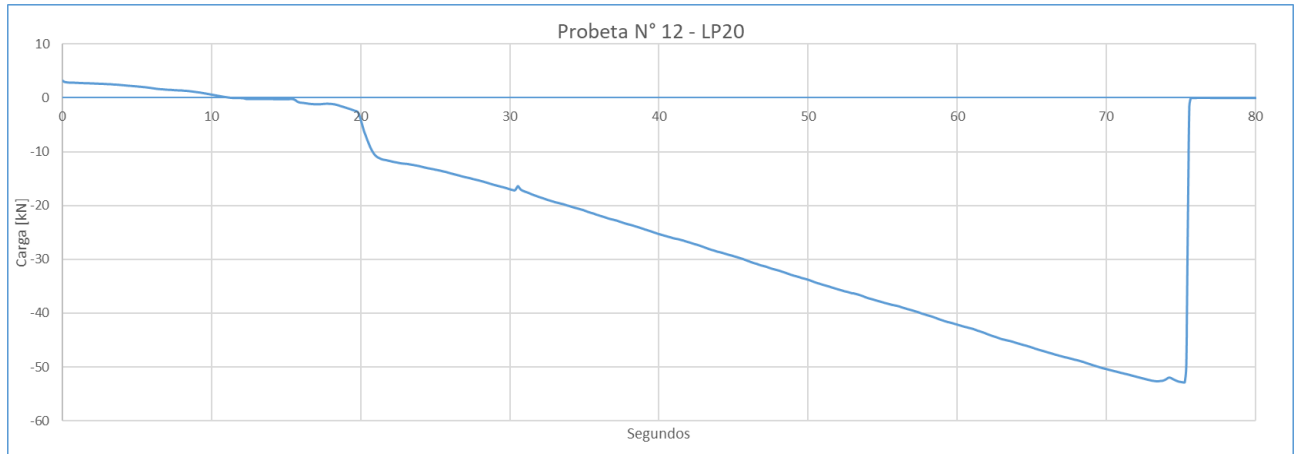
## Probeta -10



## Probeta 011



Probeta -12

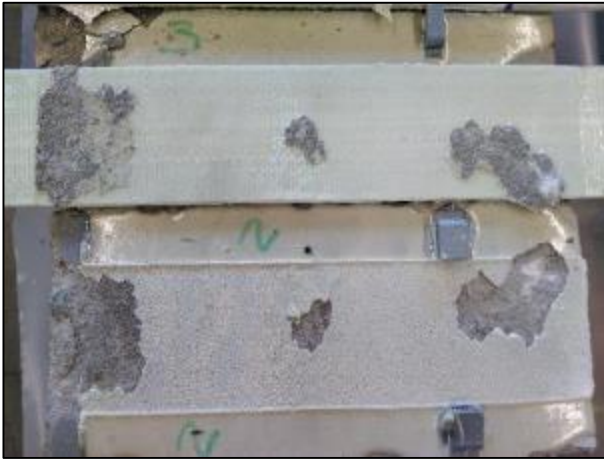


## ANEXO 4 – FOTOGRAFÍAS DE LOS ENSAYOS DINÁMICOS

Probeta 001



Probeta 002



Probeta 003



Probeta 004



Probeta 005



Probeta 006



Probeta 007



Probeta 008



Probeta 009



Probeta 010



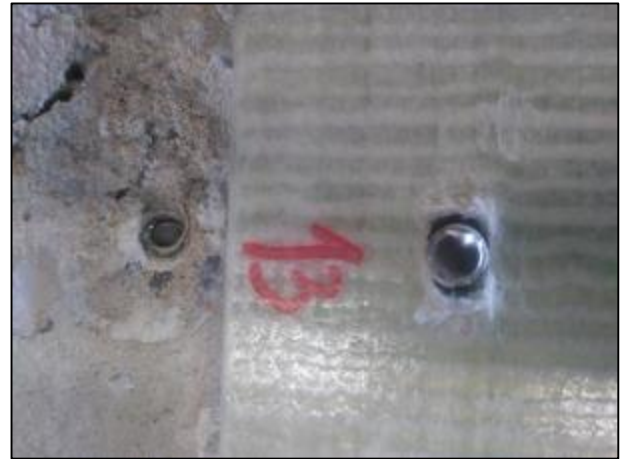
Probeta 011



Probeta 012



Probeta 013



Probeta 014



Probeta 015



Probeta 016



Probeta 017



Probeta 018



Probeta 019



Probeta 020



Probeta 021



Probeta 022



Probeta 023



Probeta 024



Probeta 025



Probeta 026



Probeta 027



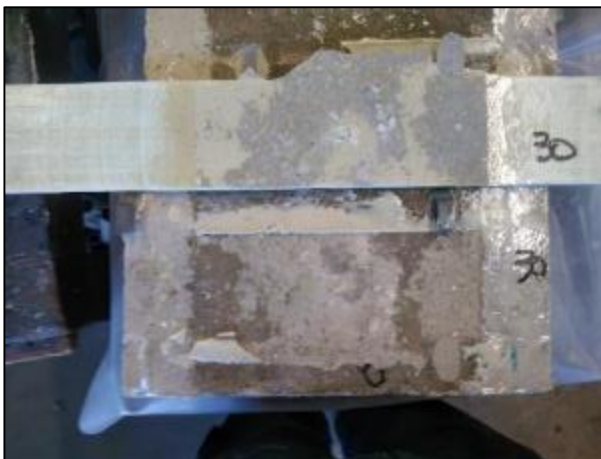
Probeta 028



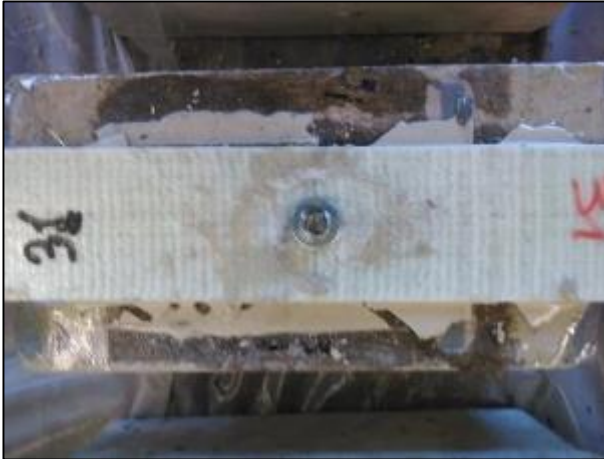
Probeta 029



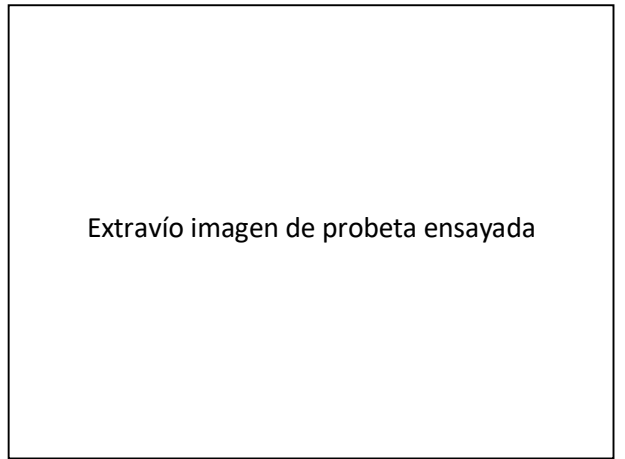
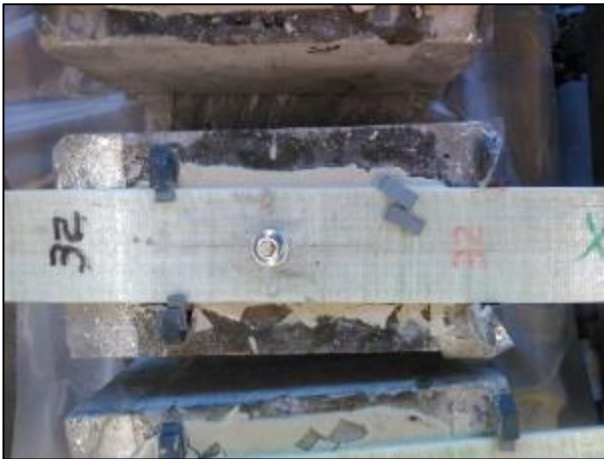
Probeta 030



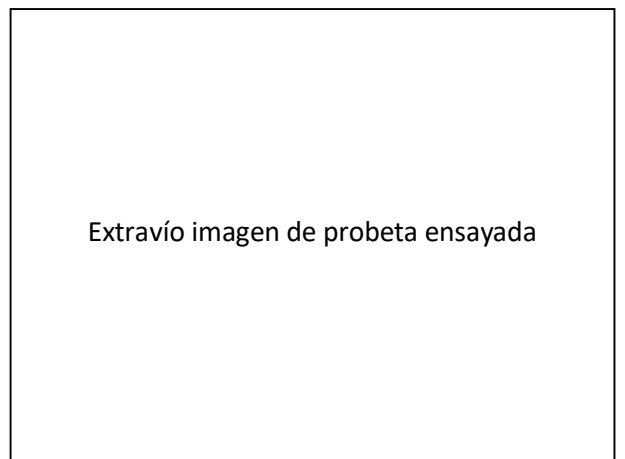
Probeta 031



Probeta 032



Probeta 033



Probeta 034



Extravío imagen de probeta ensayada

Probeta 035



Probeta 036



Probeta 037



Probeta 038



Probeta 039



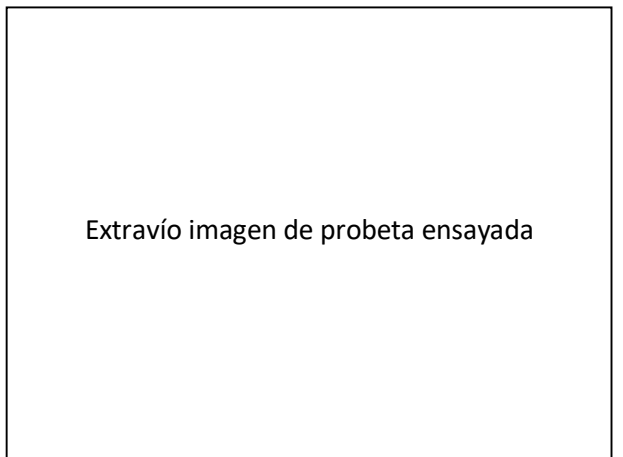
Probeta 040



Probeta 041



Probeta 042



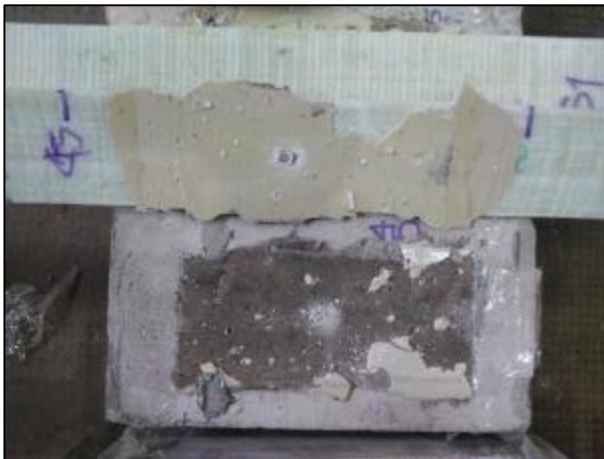
Probeta 043



Probeta 044



Probeta 045



Probeta 046



Probeta 047



Probeta 048



Probeta 049



Probeta 050



Probeta 051



Probeta 052



Probeta 053



Probeta 054



Probeta 055



Probeta 056



Probeta 057



Probeta 058



Probeta 059



Probeta 060



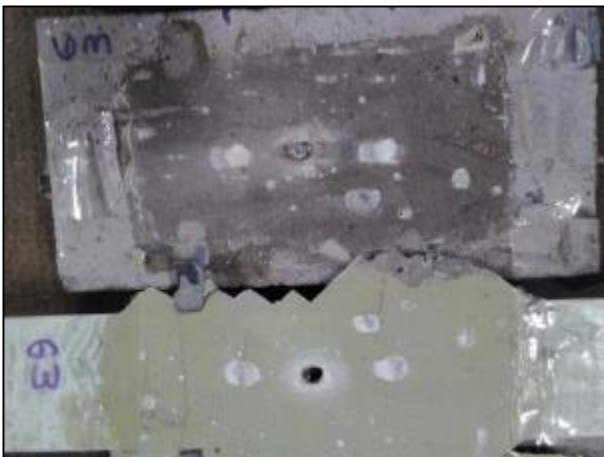
Probeta 061



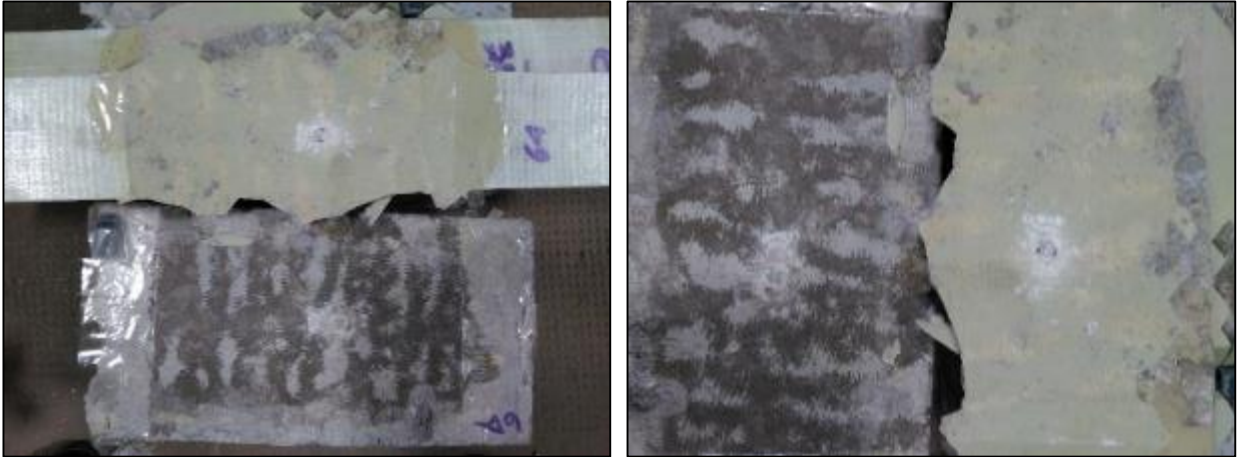
Probeta 062



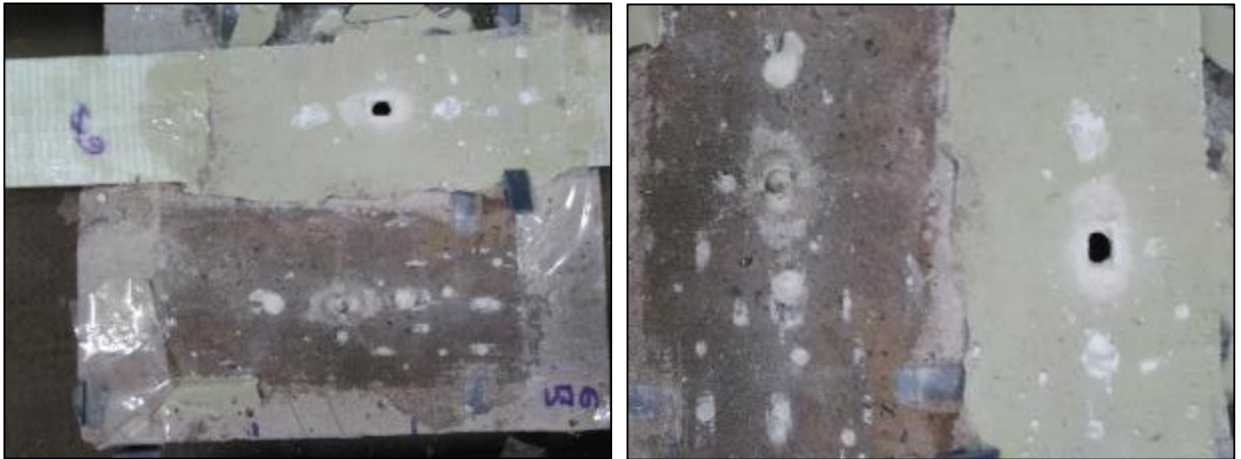
Probeta 063



Probeta 064



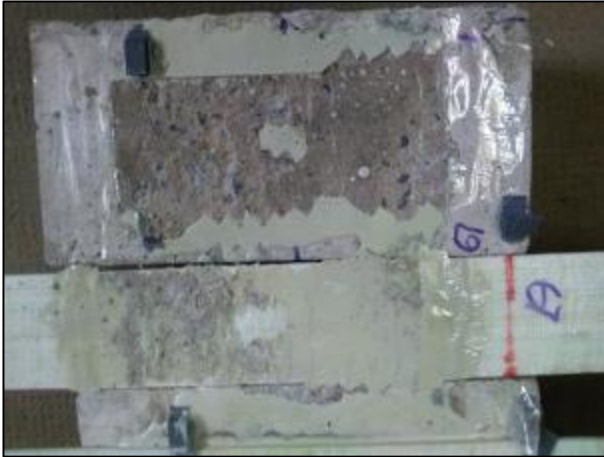
Probeta 065



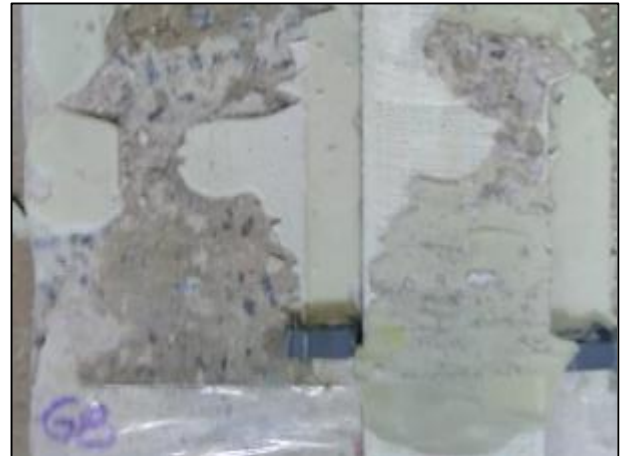
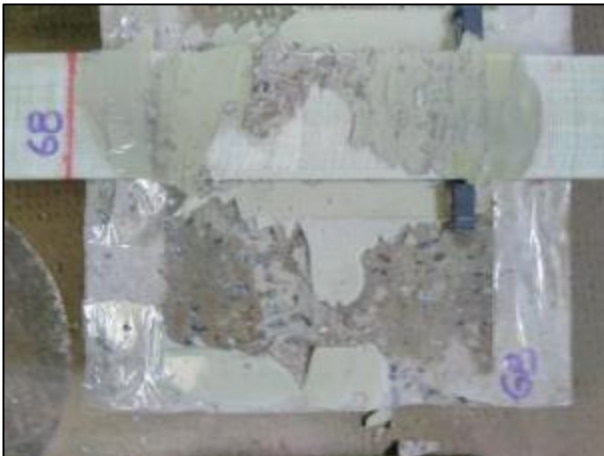
Probeta 066



Probeta 067



Probeta 068



Probeta 069



Probeta 070



Probeta 071



Probeta 072



Probeta 073



Probeta 074



Probeta 075



Probeta 076



Probeta 077



Probeta 078



Probeta 079



Probeta 080



Probeta 081



No rompio

Probeta 082



Probeta 083



Probeta 084



Probeta 085



Probeta 086



Probeta 087



Probeta 088



Probeta 089



Probeta 090



Probeta 091



Probeta 092



Probeta 093



Probeta 094



Probeta 095



Probeta 096



Probeta 097



Probeta 098



Probeta 099



Probeta 100



Probeta 101



Probeta 102



Probeta 103



Probeta 104



Probeta 105



Probeta 106



Probeta 107



Probeta 108



Probeta 109

