



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ENSAYO DE ADHERENCIA DE BARRAS DE ANCLAJE COMPUESTAS POR
FIBRA DE VIDRIO REFORZADO**

MEMORIA PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

SEBASTIÁN ALEXIS OLEA SEPÚLVEDA

**PROFESOR GUÍA:
RICARDO HERRERA MARDONES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JUAN FELIPE BELTRÁN
RICARDO MOFFAT COVARRUBIAS**

**SANTIAGO DE CHILE
2015**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
SEBASTIÁN ALEXIS OLEA SEPÚLVEDA

“ENSAYO DE ADHERENCIA DE BARRAS DE ANCLAJE COMPUESTAS POR FIBRA
DE VIDRIO REFORZADO”

Hoy en día es habitual el uso de barras o mallas de acero estructural para todo tipo de construcciones o reforzamientos en el área de la minería. El problema asociado a este tipo de barras o mallas, es que cuando estas estructuras son demolidas, reparadas o se incluyen en el proceso de explotación, finalizan en las máquinas chancadoras. Fracción del acero se extrae con imanes, pero el restante deteriora las chancadoras y estas máquinas conforman un activo primordial para el proceso minero. Para evitar el deterioro de las máquinas chancadoras, se plantea usar barras de fibra de vidrio reforzado en lugar de las barras de acero convencionales.

El objetivo de este trabajo fue determinar la fuerza de adherencia de barras de anclaje compuestas por fibras sintéticas a usarse en el área de la minería.

Dentro de la innovación que constituyen las barras de fibras en el mercado de la minería, es necesario estudiar y determinar cada una de sus propiedades de forma analítica y experimental. Para verificar la adherencia de las barras con el hormigón se ensayaron 14 barras de fibras a tracción. Para unir las barras al hormigón se utilizaron resinas epoxi. Las barras de 22 milímetros de diámetro tienen una resistencia última mayor a las 18 toneladas. Se utilizaron probetas de hormigón para emular la construcción dentro de la mina donde las barras se insertan en roca.

Se obtuvo la fuerza y la deformación por adherencia. Con los datos obtenidos se calcularon los módulos de elasticidad de las barras ensayadas. Además se encontró una relación entre la profundidad de empotramiento y la resistencia última de las barras con valores de R del orden de 0,6 y 0,8. Finalmente y con estos valores se logró determinar que el largo de empotramiento usando las mínimas resistencias es de 98 centímetros, tal que las barras de fibra no fallen por adherencia, sino que por fluencia de las mismas.

DEDICATORIA

A mi hermano que cerró un capítulo de mi vida y me acompañará siempre, a mi hija que abrió otro y me acompaña siempre.

AGRADECIMIENTOS

A mis profesores, por la disposición y apoyo. Al profesor Ricardo que me dio su confianza, gracias por siempre tener la puerta abierta para responder dudas e inquietudes y así llegar a buen puerto. Gracias a Víctor y al profesor Pedro por su apoyo en el trabajo de laboratorio.

A la Universidad de Chile por permitirme ser parte de su comunidad y formarme como el profesional de excelencia soy al egresar. Gracias en especial a los profesores del Departamento de Ingeniería Civil que muchas veces entregaron más de lo que se les pidió.

A mis todos mis amigos y compañeros que estuvieron durante esta hermosa carrera en cada una de esas largas noches de estudio, tareas y planos. Gracias Felipe, Gary, Gonzalo, Paola, Cristian, Bastián y Francisco. En especial a Jorge que estuviste en las buenas y también cuando más lo necesite. Gracias por cada trasnoche que pasaste preparándome para un control o un examen. Porque con ustedes compartí los momentos más gratos de mi estadía en la escuela y los recordaré siempre con mucho cariño.

A mis hermanas por el apoyo que me dieron en los momentos que los necesité. A Marisol y Ramón que colaboraron en que pudiese trabajar, ser estudiante, papá y cumplir en todos los aspectos.

A Magdalena por el amor y cariño. Junto a la Trini son lo mejor que me ha pasado en la vida y agradezco que podamos compartir juntos nuestros días. Gracias por estar ahí siempre que le he necesitado.

A mis padres que me formaron como persona en todos los aspectos posibles y me apoyaron de manera incondicional. Por ese ejemplo de vida que me enseñó que los valores se viven en el día a día. Gracias porque sin ustedes no sería quien soy y no estaría donde estoy.

Gracias a todos los que me apoyaron en esta difícil pero gratificante etapa de mi vida y forman parte de mi recuerdo de una u otra forma. No esperaba llegar acá pero ustedes me ayudaron a ser quien soy hoy. Falta mucho por recorrer y aprender pero deben saber que de alguna u otra forma son una pequeña parte de mí. Agradezco haber pasado por los pasillos de la Escuela de Ingeniería y compartir con quienes creo serán la punta del conocimiento de nuestro país. Todos ustedes influyeron de alguna forma durante estos 6 largos años y me trajeron hasta aquí.

¡Muchas Gracias!

TABLA DE CONTENIDO

1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 MOTIVACIÓN Y GENERALIDADES	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	2
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	2
1.3 ALCANCES	3
2. CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES.....	4
2.1. ASPECTOS NORMATIVOS DEL ENSAYO PULL OUT.....	4
2.2. DETERMINACIÓN DE TENSIÓN DE ADHERENCIA EN ENSAYOS PULL- OUT CON CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.....	6
2.3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL EN BARRAS DE FIBRA DE VIDRIO REFORZADO	9
2.4. DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES PARA UNA BARRA EMPOTRADA	12
2.4.1. <i>Distribución teórica de tensiones</i>	12
2.4.2. <i>Distribución experimental de tensiones</i>	17
3. CAPÍTULO 3: ESTUDIO EXPERIMENTAL	21
3.1. CONDICIONES DEL ENSAYO:	21
3.1.1. <i>Diseño de la Mordaza</i>	21
3.1.1.1. Alternativa 1.....	21
3.1.1.2. Alternativa 2.....	23
3.1.2. <i>Características de la mordaza</i>	25
3.2. BARRAS DE FIBRA DE VIDRIO REFORZADO (BFVR).....	25
3.3. PROBETAS DE HORMIGÓN	26
3.3.1. <i>Hormigón a usar</i>	27
3.3.2. <i>Construcción de probetas</i>	27
3.4. ADHESIVO HORMIGÓN-BARRA.....	30
3.5. METODOLOGÍA DEL ENSAYO	33
4. CAPÍTULO 4: RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	36
4.1. ENSAYOS PRELIMINARES.....	36
4.2. PRIMERA SERIE DE ENSAYOS.....	37
4.3. SEGUNDA SERIE DE ENSAYOS.....	42
4.3.1. <i>Metodología</i>	42
4.3.2. <i>Resultados</i>	43
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
5.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	48
5.2. ANÁLISIS DE LAS RIGIDECES DE LAS BARRAS	49

5.3. COMPARACIÓN CON RESULTADOS TEÓRICOS	53
6. CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES	57
6.1. RESUMEN	57
6.2. CONCLUSIONES	57
6.3. LIMITACIONES.....	58
BIBLIOGRAFÍA.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1: PARÁMETROS PARA BARRAS DEFORMADAS SEGÚN CEB (COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON_RILE, 1983).....	8
TABLA 2.2: TENSIÓN DE ADHERENCIA DE LA BARRAS DE FIBRA DE VIDRIO REFORZADA Y DE BARRAS DE ACERO A PARTIR DE LOS ENSAYOS BEAM (BENMOKRANE ET AL, 1996)	11
TABLA 3.1: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL HORMIGÓN PRESEC®	27
TABLA 3.2: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PUENTE ADHERENTE A USAR.....	31
TABLA 3.3: CAPACIDADES TEÓRICAS DEL ADHESIVO EPOXI	32
TABLA 3.4: MATRIZ DE ENSAYOS CON LOS CÓDIGOS Y DESCRIPCIONES DE CADA PROBETA.....	33
TABLA 4.1: MÁXIMOS VALORES PARA LAS PROBETAS 1F200MM, 2F200MM, 2P200MM, 2A200MM, 3.1F150MM, 3A150MM, 3P150MM, 3.2F150MM, 1F100MM, 2A100MM, 2P100MM, 1F50MM, 2F50MM Y 2P50MM.	43
TABLA 5.1: RESUMEN DE MÓDULOS DE ELASTICIDAD Y RIGIDEZ PARA CADA PROBETA.....	52
TABLA 5.2.: RESUMEN DE DATOS SEGÚN EL ANÁLISIS DE LAS ECUACIONES DE FARMER (1975).....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1: CONFIGURACIÓN TÍPICA DEL ENSAYO PULL-OUT EN ROCA SEGÚN LA NORMA ASTM (D4435-84, 1998)	5
FIGURA 2.2 COMPONENTE RADIAL DE LA TENSIÓN DE ADHERENCIA EN LA ZONA DE ANCLAJE (TEPFERS, 1979)	7
FIGURA 2.3: MECANISMO DE FALLA POR ADHERENCIA ENTRE EL CONCRETO Y EL ACERO (BARBOSA & SÁNCHEZ, 2006).....	7
FIGURA 2.4: TENSIÓN DE ADHERENCIA VS DESLIZAMIENTO (CEB 235,1997).....	8
FIGURA 2.5 BARRAS DE FIBRA DE VIDRIO REFORZADO, GFRP POR SU NOMBRE EN INGLÉS (BENMOKRANE, 1996).....	10
FIGURA 2.6: BARRA EN TENSIÓN PARA UN ANCLAJE INSERTO EN ROCA (FARMER,1975).....	13
FIGURA 2.7: BARRA EN TENSIÓN PARA UN ANCLAJE INSERTO EN ROCA (FARMER, 1975)	13
FIGURA 3.1: MODELO EN SAP PARA LA PLACA SUPERIOR DE LA MORDAZA	22
FIGURA 3.2: SET DE PLANOS PARA LA CONSTRUCCIÓN EN MAESTRANZA DE LA MORDAZA EN LA PRIMERA ALTERNATIVA.	22
FIGURA 3.3 ESQUEMA DE LA ALTERNATIVA 1	23
FIGURA 3.4 ESQUEMA DE LA ALTERNATIVA 2.....	24
FIGURA 3.5: VISTAS PARA LA CONSTRUCCIÓN EN MAESTRANZA DE LA MORDAZA DE LA SEGUNDA ALTERNATIVA.	24
FIGURA 3.6: CAJA DE ACERO QUE FUNCIONA COMO MORDAZA PARA CONTENER LA PROBETA DE HORMIGÓN.....	25
FIGURA 3.7: CINCO TIPOS DE BARRAS DE FIBRA DE VIDRIO REFORZADO	26
FIGURA 3.8: ENCUADRAMIENTO DE LOS MOLDES DE ACERO	27
FIGURA 3.9: SELLADO DE LOS MOLDES DE ACERO CON SILICONA	28
FIGURA 3.10: FIJACIÓN DE MADERA PARA EL CENTRADO DE LOS TUBOS	28
FIGURA 3.11: PREPARACIÓN DEL HORMIGÓN EN LABORATORIO	29
FIGURA 3.12: NIVELACIÓN DE LOS TUBOS DE PVC	29
FIGURA 3.13: PROBETAS CUBIERTAS PARA EVITAR LA PÉRDIDA DE HUMEDAD	30
FIGURA 3.14: PUENTE ADHERENTE SIKA® ANCHOFIX 1 USADO PARA EMBEBER LAS BARRAS EN EL HORMIGÓN	31
FIGURA 3.15: CONFIGURACIÓN ESTÁNDAR PARA TODA LA SERIE DE ENSAYOS.....	35
FIGURA 4.1: IMAGEN DE LA FALLA LOCAL GENERADA EN LAS BARRAS PRODUCTO DEL ENSAYO A TRACCIÓN	36
FIGURA 4.2: CURVA DE TENSIÓN DESPLAZAMIENTO DE UNA BARRA DE FIBRA DE VIDRIO REFORZADO	37
FIGURA 4.3 GRÁFICO DE TENSIÓN DESPLAZAMIENTO DE LA PROBETA 1F200MM ..	38
FIGURA 4.4 FALLA OBSERVADA EN LA PROBETA 1	38
FIGURA 4.5: GRÁFICO DE TENSIÓN DESPLAZAMIENTO DE LA PROBETA 1F50MM ..	39

FIGURA 4.6 GRÁFICO DE TENSIÓN DESPLAZAMIENTO DE LA PROBETA 1F100MM .	40
FIGURA 4.7: GRÁFICO DE TENSIÓN DESPLAZAMIENTO DE LA PROBETA 2F50MM ..	41
FIGURA 4.8 RESUMEN DE DATOS DE LA PRIMERA SERIE DE ENSAYOS.	41
FIGURA 4.9: SEIS PROBETAS CORRESPONDIENTES A LA SEGUNDA SERIE DE ENSAYOS.....	42
FIGURA 4.10: RESUMEN DE DATOS PARA LA PROBETAS 1F200MM, 2F200MM, 2P200MM Y 2A200MM.....	44
FIGURA 4.11: GRIETA VERTICAL OBSERVADA EN LA PROBETA 2A200MM.	44
FIGURA 4.12: RESUMEN DE DATOS DE LAS PROBETAS 1F100MM, 2P100MM Y 2A100MM	45
FIGURA 4.13: RESUMEN DE DATOS DE LAS PROBETAS 1F50MM, 2F50MM Y 2P50MM.	46
FIGURA 4.14: RESUMEN DE DATOS PARA LAS PROBETAS 3.1F150MM, 3A150MM, 3.2F150MM Y 3F150MM	47
FIGURA 5.1: RESUMEN DE DATOS DE TENSIONES MÁXIMAS PARA CADA LONGITUD DE EMPOTRAMIENTO.....	48
FIGURA 5.2. : RELACIÓN TENSIÓN DE CORTE PROMEDIO VS CENTÍMETROS DE EMPOTRAMIENTO	49
FIGURA 5.3: REGIÓN LINEAL ELÁSTICA DEFORMACIÓN DE LAS PROBETAS EMPOTRADAS 20 CENTÍMETROS.....	50
FIGURA 5.4 REGIÓN LINEAL ELÁSTICA DE LAS PROBETAS EMPOTRADAS 10 CENTÍMETROS.....	51
FIGURA 5.5. REGIÓN LINEAL ELÁSTICA DE LAS PROBETAS EMPOTRADAS 5 CENTÍMETROS.....	51
FIGURA 5.6: REGIÓN ELÁSTICA PARA LAS PROBETAS EMPOTRADAS 15 CENTÍMETROS.....	52
FIGURA 5.7: GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN TEÓRICA DE TENSIONES DE CORTE SEGÚN LAS ECUACIONES DE FARMER (1975)	56

1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación y Generalidades

Actualmente en la explotación minera subterránea resulta frecuente el uso de barras de anclaje como una rápida solución para asegurar distintos tipos de fortificación. Sin embargo en el frente de la mina se obliga a demoler túneles y fortificaciones, y las barras de anclaje de acero no se pueden extraer en su totalidad con imanes por estar insertas en rocas. Esto deteriora las chancadoras que trituran las rocas y constituyen un activo importante en el proceso.

Ante esta situación, se estudia la factibilidad de usar como anclaje barras compuestas por fibras de vidrio reforzado con plástico, con las resistencias requeridas, con el objetivo de no deteriorar las chancadoras, cuando se necesite la demolición de la fortificación.

Estas barras traen además una serie de beneficios, entre los que destacan la reducción de costos, un mejor control de fisuras del hormigón y mayor productividad y eficiencia, a lo que se suma el cuidado del medio ambiente, ya que disminuyen la huella de carbono. Además son mucho más livianas, con una densidad aproximada de 0,25 veces la del acero, y tienen neutralidad a los disturbios eléctricos (Nanni, 1993), magnéticos y además son más duraderos ya que a diferencia de las barras de acero convencional, las de fibra no se corroen (Saadatmanesh, 1994). Éste último aspecto es bastante relevante porque puede extender su uso fuera de la minería. Mundialmente las barras de fibra de vidrio se están utilizando en estructuras con alta exposición a la corrosión como puentes, muelles y estructuras marinas (Neale & P. Labossière, 1992).

En el presente estas barras están sometidas a diferentes estudios para caracterizarlas como un nuevo material. Se estudia su resistencia a la fluencia, corte, a la dilatación térmica y también su resistencia a la adherencia. Esta memoria se enfoca en la resistencia a la adherencia.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Determinar la capacidad de adherencia de las barras de fibra de vidrio reforzado.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar el ensayo a utilizar para probar la resistencia a la adherencia.
- Validar una relación entre el largo de empotramiento y la resistencia a la adherencia. De esta forma se tendrá una guía de diseño para el uso de estas barras.
- Determinar las resistencias últimas a la adherencia de cada barra.

1.3 Alcances

En el capítulo 1 se realiza una breve descripción y contextualización del tema. Se describen los objetivos y metodología del trabajo de título.

En el capítulo 2 se expone una breve revisión de los trabajos previos con respecto a ensayos en barras de acero empotradas en hormigón de los que se rescatan ciertas relaciones que se esperan homologar para las fibras. Se estudian también trabajos previos realizados en fibras de vidrios. Finalmente se estudia un modelo analítico para barras empotradas

En el capítulo 3 se explican las metodologías usadas durante los ensayos experimentales. Se describe el diseño del ensayo y también se caracteriza cada uno de los materiales utilizados para la construcción de las probetas.

En el capítulo 4 se presentan los resultados experimentales preliminares y los resultados del ensayo de adherencia para los distintos largos de empotramiento.

En el capítulo 5 se propone una relación entre el largo de empotramiento y la resistencia a la adherencia con los datos obtenidos a partir de los ensayos experimentales. Se realiza también una comparación con los modelos teóricos encontrados en la literatura.

En el capítulo 6 se resumen las relaciones encontradas y se concluye sobre los resultados obtenidos. Se explican también las limitaciones de la memoria.

2. CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES

Las barras de fibra de vidrio son un material innovador en la industria, por lo tanto, la bibliografía disponible al respecto es escasa. A pesar de lo anterior, resulta importante citar las metodologías de los ensayos utilizados comúnmente para barras de acero y cables de acero.

También se describe la caracterización de material de barras similares de fibra de vidrio fabricadas a través de un proceso de extrusión.

2.1. Aspectos Normativos del ensayo Pull out

La norma ASTM (D4435-84, 1998) estandariza el ensayo de tipo “pull-out” en roca, dicho ensayo se aplica a pernos adheridos a la roca mediante cemento, resina, entre otros; su objetivo es medir la resistencia contra la deformación y la resistencia última del perno anclado. Este método de ensayo excluye los pernos post tensados.

Se define el desplazamiento, como el de la cabeza del perno (figura 2.1), la falla como la inhabilidad del sistema de anclaje o de la roca a resistir un cambio sustancial de deformación, la carga como la fuerza axial total en el perno, la presión como fuerza por unidad de área y la capacidad última como la máxima carga sostenida por el sistema de anclaje.

La importancia de este ensayo estándar es que dada una roca, con ciertas características, entrega el desempeño del perno bajo ciertas condiciones y así se puede determinar el largo, el espaciamiento y el tamaño del perno a usar. Idealmente se espera una falla por corte en la interfaz anclaje-roca o en el enlace puente adherente-roca. Para obtener valores consecuentes con la realidad se debe perforar bajo las mismas condiciones en las que se espera usar durante la construcción.

Para el montaje del ensayo es necesario un sistema de carga como puede ser un ariete hidráulico hueco montado sobre una placa de reacción que no admita deformaciones para las cargas solicitantes. Es necesario también un transductor de carga que pueda medir la carga sobre la barra, un dial que mida el desplazamiento, un sistema de anclaje, un perno de anclaje, un equipo de perforación y sistema de medición de la perforación. En la figura 2.1 se puede observar una configuración típica del ensayo.

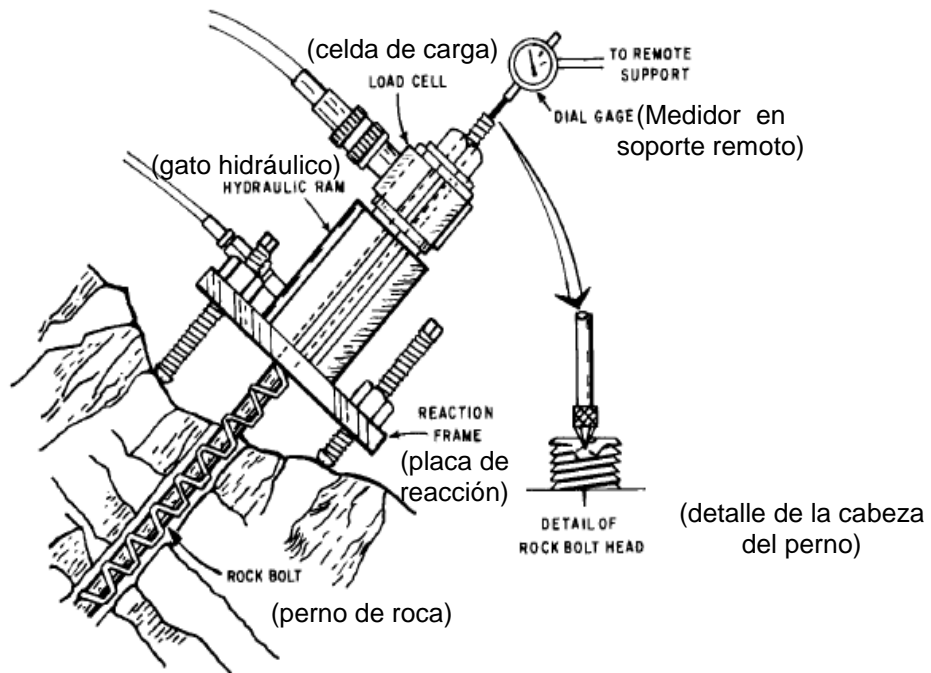


Figura 2.1: CONFIGURACIÓN TÍPICA DEL ENSAYO PULL-OUT EN ROCA SEGÚN LA NORMA ASTM (D4435-84, 1998)

El procedimiento de ensayo es el siguiente: realizar la perforación de manera completamente recta, limpiar la zona de polvo, medir la perforación tanto su diámetro como profundidad, instalar y lechar los pernos de anclaje. En su defecto, si se usa resina, esta debe usarse de acuerdo a las recomendaciones del proveedor. Finalmente se aplica la carga hasta la falla, registrando tanto la carga como el desplazamiento.

Para determinar la tensión en el perno se determina σ_b en MPa como:

$$\sigma_b = \frac{P}{A}$$

donde:

P= Carga del perno en Newton

A= Área transversal inicial del perno en milímetros

Para determinar la deformación elástica del perno U_b en mm:

$$U_b = \frac{\sigma_b}{E} * L$$

σ_b = tensión en el perno, MPa

L= Largo expuesto del perno entre el anclaje y la cabeza, mm

E= Módulo elástico del acero del perno, MPa

2.2. Determinación de tensión de adherencia en ensayos pull-out con concreto de alta resistencia.

Gomes & Filho (2013) estudiaron la tensión de adherencia de acuerdo a los parámetros propuestos por el CEB (Comité Euro-International du Beton_Rile, 1983). La innovación de este estudio con respecto a los anteriores fue comparar los resultados del ensayo de adherencia con concreto de distintas resistencias.

También le da importancia a la relación que existe en el vínculo por adherencia entre la barra y el hormigón. Los parámetros más importantes en el análisis de adherencia son el largo de empotramiento y la rigidización por tracción.

Luego se explica cómo funciona el vínculo entre la barra y el hormigón. Los factores que influyen en la adherencia son 3: la adhesión química, la fricción y los resaltes de la barra, donde el último de estos factores es el más importante, ya que es el concreto a compresión entre los resaltes, el que genera esa fuerza.

De este modo la falla por adherencia ocurre por los siguientes modos:

- Aplastamiento del concreto que rodea los resaltes
- Corte en el concreto que rodea la barra
- Astillamiento longitudinal de la cubierta de concreto (más frecuente)
- Una combinación de estas tres fallas

La falla por adherencia se origina porque la fuerza de tracción es transmitida al hormigón a través de los resaltos propagando una tensión interna en forma de anillos, los que producen grietas a lo largo de la barra empotrada. Cuando estos anillos están cargados hasta la falla aparecen grietas longitudinales y finalmente el cono de falla con un ángulo de inclinación α . Estas grietas aumentan el deslizamiento entre la barra y el hormigón. Cuando la componente radial llega a su valor máximo el hormigón se rompe súbitamente (Tepfers, 1979). Un esquema de este tipo de falla se puede ver en la Figura 2.2.

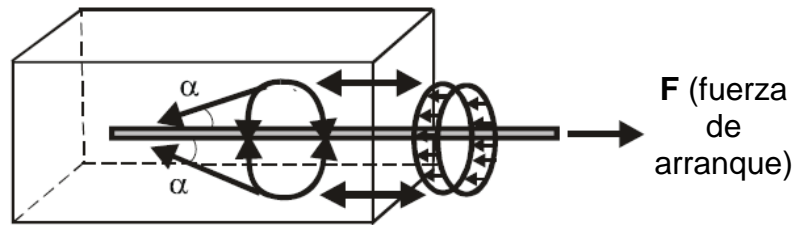


Figura 2.2 Componente radial de la tensión de adherencia en la zona de anclaje (Tepfers, 1979)

Además, el mecanismo de falla observado nos indica que las tensiones generadas por los resaltos generan pequeñas grietas en el hormigón que validan lo anterior como se detalla en la figura 2.3.

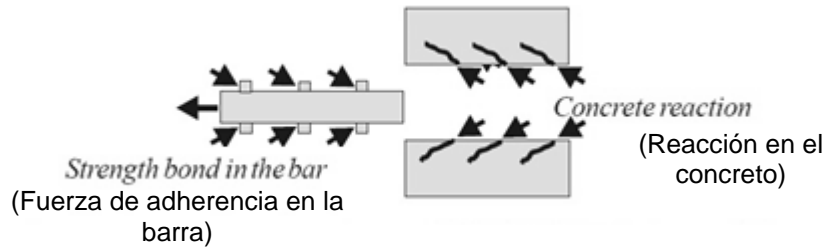


Figura 2.3: Mecanismo de falla por adherencia entre el concreto y el acero (Barbosa & Sánchez, 2006)

De acuerdo a las disposiciones de publicaciones anteriores, (Comité Euro-International du Beton_Rile, 1983) la tensión por adherencia se puede calcular de la siguiente manera:

$$\tau = \tau_{max} * \left(\frac{s}{s_1}\right)^\alpha$$

$$\tau = \tau_{max} , \quad 0 < s < s_1$$

$$\tau = \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_r) * \left(\frac{s - s_2}{s_3 - s_2} \right) \quad s_2 < s \leq s_3$$

$$\tau = \tau_r, \quad s_3 < s$$

El parámetro s corresponde al deslizamiento, τ es la resistencia a la adherencia y f_c es la resistencia a la compresión del hormigón en MPa. Las ecuaciones anteriores se rigen bajo los parámetros de adherencia según la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Parámetros para barras deformadas según CEB (Comité Euro-International du Beton_Rile, 1983)

Parámetro	Concreto No confinado		Concreto confinado	
	Condiciones de Adherencia		Condiciones de Adherencia	
	Buena	Otras	Buena	Otras
s_1	0.6mm	0.6mm	1.0mm	
s_2	0.6mm	0.6mm	3.0mm	
s_3	1.0mm	2.5mm	Espaciamiento entre resaltos	
α	0.4		0.4	
τ_{max}	$2.0(f_c)^{1/2}$	$1.0(f_c)^{1/2}$	$2.5(f_c)^{1/2}$	$1.25(f_c)^{1/2}$
τ_u	$0.15\tau_{max}$		$0.40\tau_{max}$	

Estos modelos son similares a los propuestos por publicaciones previas (Martins, 1989) resultando gráficos bastante similares para tensión de adherencia contra desplazamiento como resultado de la figura 2.4. donde se observa la tensión de adherencia contra el desplazamiento según los parámetros del CEB (Comité Euro-International du Beton_Rile, 1983)

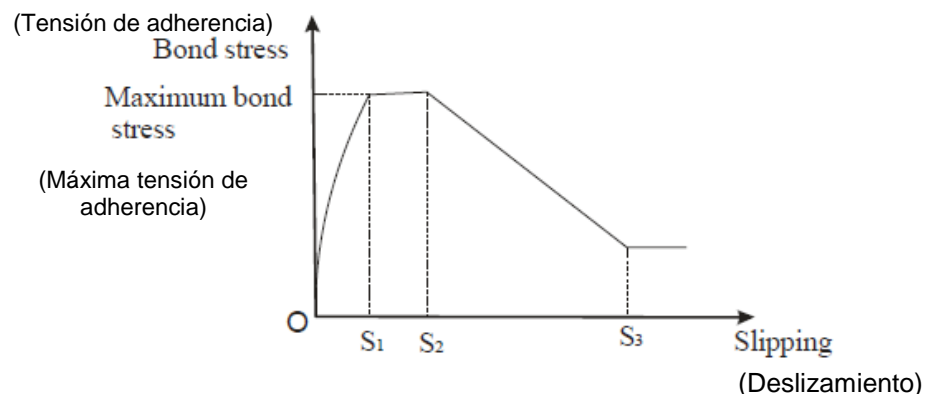


Figura 2.4: Tensión de adherencia vs deslizamiento (CEB 235,1997)

Gomes & Filho (2013), con el objetivo de materializar las condiciones del pull-out test ensayan un cubo de concreto que contiene la barra. Ésto se monta sobre una placa rígida y se extrae con un gato hidráulico. De esta forma se logra obtener tanto la tensión de adherencia promedio como la tensión máxima y finalmente un gráfico de tensión de adherencia versus deslizamiento

A modo de conclusión se analiza que a medida que aumenta la resistencia a la compresión del concreto, aumenta la tensión de adherencia. Asimismo a medida que el diámetro aumenta, la tensión de adherencia aumenta. Se encuentran expresiones que representan la fuerza de adherencia a través de regresiones hechas a partir de los resultados experimentales.

Finalmente una correlación estadística hecha entre los resultados experimentales y los tres modelos estudiados muestran que existe una pobre aplicabilidad y bastantes limitaciones. Estas se basan principalmente en la diferencia entre los materiales usados en este estudio y el de los modelos analíticos.

2.3. Análisis experimental en barras de fibra de vidrio reforzado

Benmokrane et al. (1996), investigaron la fuerza de adherencia de barras compuestas de fibra de vidrio reforzado con distintos diámetros y la distribución de tensiones a lo largo de la barra.

Las barras de fibra de vidrio reforzado con plástico (GFRP por su nombre en inglés "*glass fiber reinforced plastic*") se usan como solución al problema de la corrosión en barras de acero convencional. De este modo, esta publicación busca generar una guía de diseño para estas barras.

Las barras son construidas por un proveedor canadiense. Se generan por un proceso de extrusión, y para mejorar la superficie se recubren de una arena que mejora sus características de adherencia. Para el estudio se ensayaron barras de 12.7, 15.9, 19.1 y 25.4 milímetros de diámetro. Éstas se pueden observar en la figura 2.5.

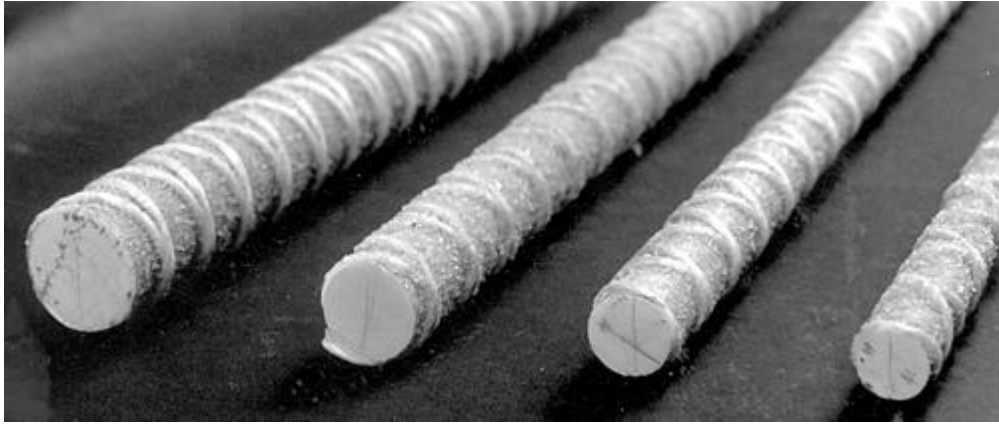


Figura 2.5 Barras de fibra de vidrio reforzado, GFRP por su nombre en inglés (Benmokrane, 1996).

Las barras en estudio se probaron a la flexión, cambio por temperatura, corte, fatiga y a la adherencia bajo una serie de distintos ensayos. Los ensayos de adherencia se probaron en hormigones de 30 MPa de resistencia a la compresión.

Los autores se enfocan principalmente en el estudio de la adherencia de las barras compuestas mediante 2 ensayos: el ensayo de viga (beam test), y el ensayo pull-out.

Para ambos ensayos se probaron tanto barras de fibra como barras de acero convencional y también se generaron probetas con strain-gage embebidos en el hormigón y sin strain-gage para observar si estos afectaban de alguna manera los experimentos.

En relación a los resultados obtenidos se pudo observar que en general las tensiones se atenúan rápidamente desde el extremo cargado hacia el extremo empotrado. Se observa una distribución no lineal de tensiones tanto en la barras de GFRP como en las barras de acero. En la tabla 2.2 se observan los resultados de tensión de adherencia a partir del ensayo de viga.

Tabla 2.2: Tensión de adherencia de la barras de fibra de vidrio reforzada y de barras de acero a partir de los ensayos beam (Benmokrane et al, 1996)

Tensión de Adherencia promedio τ , MPa, al deslizamiento							
	d_b ,mm	0,01 mm	0,1 mm	0,2 mm	Máximo	$\tau_{0,1}/\tau_{max}$	$\tau_{0,2}/\tau_{max}$
GFRP	12,7	1,7	7,6	8,7	10,6	0,71	0,82
Acero	12,7	2,7	8,0	9,5	14,2	0,57	0,67
GFRP	15,9	0,7	5,6	5,8	7,3	0,76	0,80
Acero	15,9	3,8	5,7	7,5	13,2	0,43	0,57
GFRP	19,1	0,7	3,8	5,7	6,6	0,57	0,86
Acero	19,1	2,6	4,2	5,8	11,6	0,36	0,50
GFRP	25,4	0,5	3,6	6,2	6,4	0,56	0,97
Acero	25,4	3,3	6,6	7,3	7,4	0,89	0,99

En la tabla 2.2 se observa que $\tau_{0,1}$, $\tau_{0,2}$ y τ_{max} son las tensiones de adherencia de las barras a deslizamientos de 0,1 milímetro, 0,2 milímetros y máximo respectivamente. Además se puede concluir que la fuerza de adherencia disminuye a medida que aumenta el diámetro, lo cual es consecuente con lo observado en otras publicaciones. También, la máxima tensión para las barras GFRP es aproximadamente 0.6 a 0.9 veces comparándolas con las barras de acero.

Se encontraron resultados similares en los ensayos pull-out donde los resultados para las barras de fibra eran entre 0.73 y 0.96 veces los de las barras de acero.

De acuerdo a los autores, para las barras de acero la fuerza de adherencia se debe a dos factores; la adhesión al concreto de la barra de refuerzo y la trabazón mecánica que generan los resaltos del acero al comprimir el hormigón entre resaltos, donde la mayor contribución viene del segundo factor.

La diferencia entre las tensiones de adherencia de la barra de fibra de vidrio y la barra de acero se debe a que cada una posee una superficie distinta, lo que significa que los resaltos de las barras juegan un factor importante en la barras de fibra.

Es importante destacar que todos los ensayos fallaron por extracción (“pull-out”). Éste tipo de falla puede deberse a que al realizar un ensayo de tipo pull-out, el hormigón que rodea la barra se comprime, lo cual reduce la posibilidad de grietas, y aumenta la tensión de corte, generando las fallas por extracción.

2.4. Distribución de tensiones para una barra empotrada

Farmer (1975) compara la distribución de tensiones teórica para un anclaje en roca pegado con resina con resultados empíricos obtenidos a partir de anclajes instrumentados en concreto, caliza y yeso.

Explica como el uso del ensayo de arranque (*"pull-out"*) deriva en una serie de datos de diseño ignorando la distribución de tensiones dentro de la roca que tienen una importante implicancia en la estabilidad del anclaje. También explica que a pesar de que hay modelos teóricos, existe escasez de corroboración de los mismos, a través de resultados experimentales como lo hace esta publicación.

2.4.1. Distribución teórica de tensiones

Para el análisis teórico se supone una barra de módulo de elasticidad E_a y radio a está inserta un largo L en una perforación de roca de radio R como se muestra en la figura 2.6. La barra se encuentra rodeada de resina epoxi resistente al corte con un módulo de rigidez G_g . El módulo de elasticidad de la roca es de un orden de magnitud más grande que la resina.

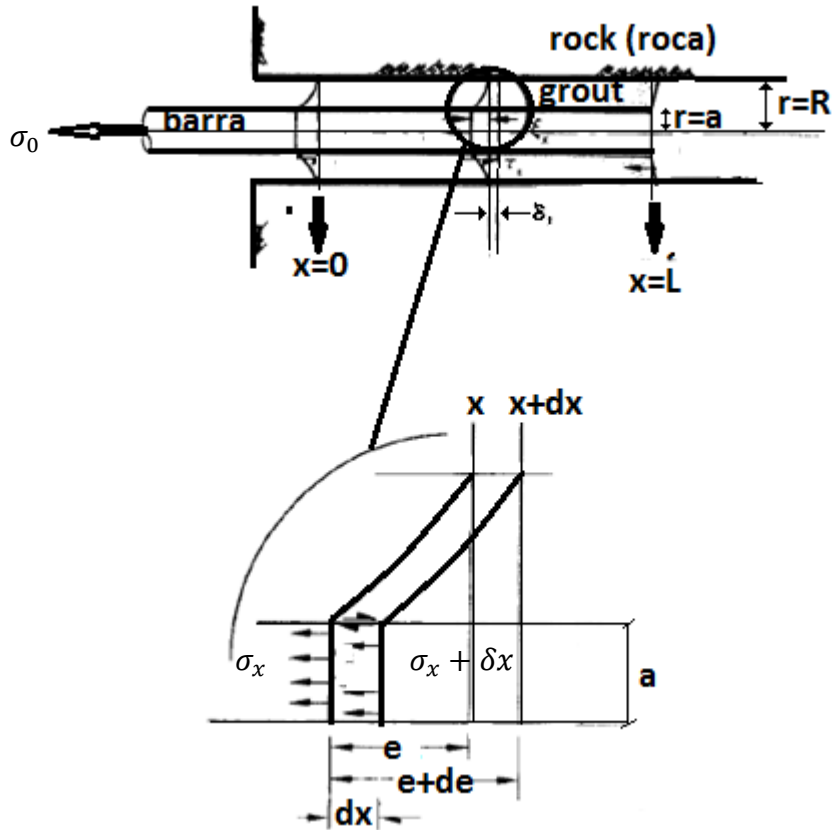


Figura 2.6: Barra en tensión para un anclaje inserto en roca (Farmer,1975)

Si una fuerza de tracción se aplica al perno, ésta se transfiere al grout a través de fuerzas de corte en la interfaz perno-grout causando una extensión diferencial del perno y un esfuerzo de corte en el grout a lo largo del anclaje. En una delgada porción diametral entre x y una pequeña diferencia se puede representar la transferencia de esfuerzos mediante la ecuación (2.1):

$$\pi a^2 \delta \sigma_x = -2\pi a \tau_x \delta x \quad (2.1)$$

donde:

a : Radio del perno

σ_x : Esfuerzo axial del perno

τ_x : Esfuerzo de corte en la interfaz perno-resina

x: Coordenada de profundidad de empotramiento en el perno

O de forma análoga la ecuación 2.1 se convierte en

$$\frac{\delta\sigma_x}{\delta x} = -\frac{2}{a}\tau_x \quad (2.2)$$

Pero como la deformación es elástica se puede reemplazar $\sigma_x = -E_a\delta\xi_x/\delta x$, donde ξ es la extensión de la barra. De esta forma la ecuación 2.2 se convierte en:

$$\frac{\delta\xi_x}{\delta x^2} = \frac{2}{a} \frac{\tau_x}{E_a} \quad (2.3)$$

Farmer realiza un análisis diferente para dos casos de empotramiento. El primero ocurre si estamos presentes a un anillo de grout delgado, es decir si $R - a < a$, entonces el esfuerzo de corte τ_x en la interfaz acero-resina será representativo del esfuerzo de corte en el anillo. Donde R es el radio de perforación y a corresponde al radio del perno. Así se puede derivar la ecuación 2.4.

$$\tau_x = \frac{\xi_x}{R - a} G_g \quad (2.4)$$

Si el anillo de resina es grueso, es decir $R - a > a$, entonces el τ_x será afectado por los cambios radiales en el esfuerzo de corte y se puede resolver mediante la ecuación 2.5.

$$\tau_x = \frac{\xi_x}{a \ln(R/a)} G_g \quad (2.5)$$

En ambos casos la ecuación 3 tomará la forma de una ecuación diferencial homogénea, ecuación 2.6, con una respectiva solución estándar en la ecuación 2.7.

$$\frac{\delta\xi_x}{\delta x^2} - \alpha^2\xi_x = 0 \quad (2.6)$$

$$\xi_x = A \exp(\alpha x) + B \exp(-\alpha x) \quad (2.7)$$

Donde la constante α toma los valores de la ecuación 2.8 dependiendo si estamos frente a un anillo delgado o a un anillo grueso respectivamente:

$$\alpha^2 = \frac{2G_g}{E_a a(R-a)}, \quad \frac{2G_g}{E_a a^2} \ln\left(\frac{R}{a}\right) \quad (2.8)$$

Luego resolviendo la ecuación 2.7 para las condiciones de borde de $\sigma_x = \sigma_0$ en el extremo libre de la vara de acero, es decir $x = 0$, y $\sigma_x = 0$ para un largo L de empotramiento, es decir $x = L$, las constantes A y B resultan:

$$A = \frac{\sigma_0}{E_a \alpha} \frac{\exp(-\alpha L)}{\exp(\alpha L) - \exp(-\alpha L)} \quad (2.9)$$

$$B = \frac{\sigma_0}{E_a \alpha} \frac{\exp(\alpha L)}{\exp(\alpha L) - \exp(-\alpha L)} \quad (2.10)$$

Resolviendo lo anterior en la ecuación 2.7 con las constantes resulta:

$$\xi_x = \frac{\sigma_0}{E_a \alpha} \frac{\cosh(\alpha(L-x))}{\sinh(\alpha L)} \quad (2.11)$$

Si el largo de empotramiento es mucho mayor que $1/\alpha$, un supuesto común en la mayoría de los empotramientos, entonces la ecuación 2.11 se transforma en un simple decaimiento exponencial (ecuación 2.12). Considerando la profundidad de empotramiento se puede llegar a una expresión en función del esfuerzo de corte en la ecuación 2.13:

$$\xi_x = \frac{\sigma_0}{E_a \alpha} \exp(-\alpha x) \quad (2.12)$$

$$\tau_x = \frac{1}{2} a \alpha \sigma_0 \exp(-\alpha x) \quad (2.13)$$

Para materiales elásticos se puede asumir que el módulo de Young E es igual a dos veces el módulo de rigidez. De esta forma la ecuación 2.8 se puede expresar en términos de una relación entre módulos K:

$$K = \frac{2G_g}{E_a} = \frac{E_g}{E_a}$$

De esta forma la constante alfa de la ecuación 2.8 queda de la siguiente manera para anillo delgado y anillo grueso respectivamente:

$$\alpha = \frac{K}{a(R - a)} \text{ o } \frac{K}{a^2(\ln(R/a))} \quad (2.14)$$

Una implicancia del decaimiento exponencial en las ecuaciones 2.12 y 2.13 significa que cuando αx es igual a 4,6 el resultados de $\exp(-4,6) = 0,01$ y tanto los valores de la deformación como la tensión de corte, es decir ξ_x y τ_x , son reducidos al 1% de su magnitud al extremo del anclaje. En otras palabras, la carga en el anclaje es efectivamente disipada y el largo de anclaje es equivalente al largo de transferencia LT dado por la ecuación 2.15:

$$LT = \frac{4,6}{\alpha} \quad (2.15)$$

En conclusión el largo de transferencia es equivalente al diseño óptimo de largo de empotramiento.

Se puede observar un ejemplo aproximado para una distribución de corte a lo largo de un típico anclaje de acero en resina en la figura 2.7. Para la relación resina/acero se conocen relaciones de K aproximadamente igual a 0,01 y valores de $(R-a)=0,25a$. De esta forma se simplifica la ecuación 2.14 resultando la distribución al corte τ_x de la siguiente manera:

$$\frac{\tau_x}{\sigma_0} = 0,1 \exp\left(-\frac{0,2x}{a}\right) \quad (2.16)$$

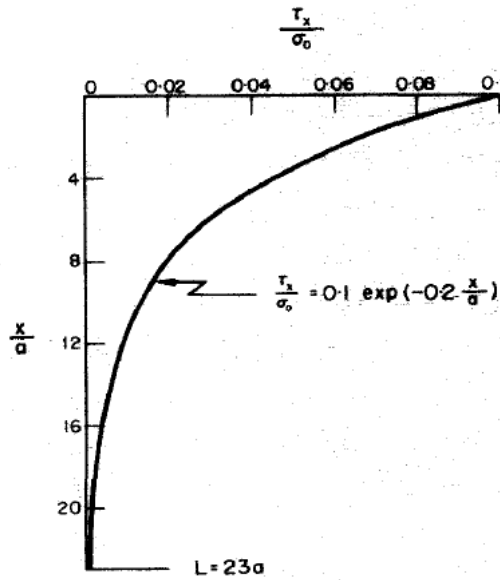


Figura 2.7: Distribución de tensiones teórica a lo largo de una perforación rígida considerando un anillo delgado de resina (Farmer 1975)

2.4.2. Distribución experimental de tensiones

Para los resultados experimentales se llevaron a cabo una serie de ensayos de barras de acero insertas en concreto, caliza y yeso. Los largos de empotramiento fueron de 350 y 500 milímetros y cada barra fue instrumentada con 6 sensores. Las barras fueron insertas mediante una resina epoxi.

Los resultados de barras embebidas en concreto 500 y 350 milímetros se pueden observar en las figuras 2.8 y 2.9 respectivamente donde se observan:

- Carga-desplazamiento en el extremo embebido
- Distribución de tensiones a lo largo del empotrado
- Distribución de tensión de corte o adherencia; como la tensión promedio entre 2 sensores calculada según la ecuación 2.17.

$$\tau_{1,2} = \frac{E_a}{2 l a (\epsilon_1 - \epsilon_2)} \quad 2.17$$

Donde l es la separación entre sensores.

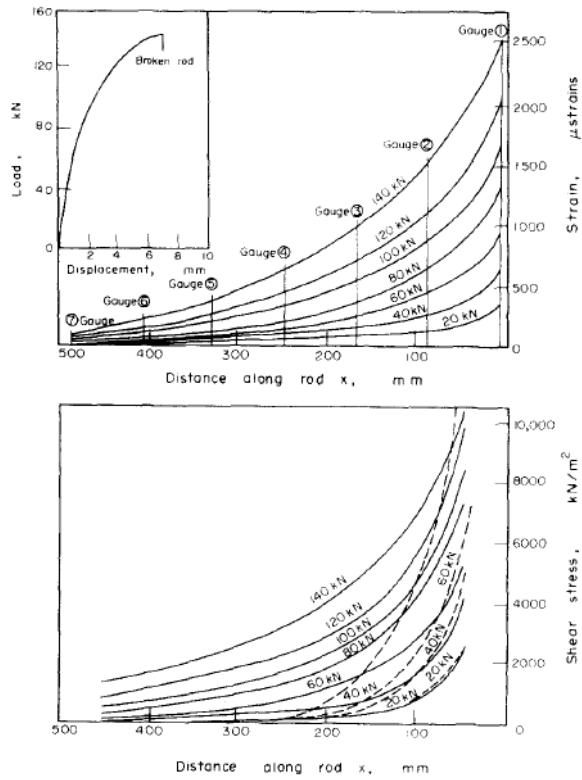


Figura 2.8: Curva de carga-desplazamiento, distribución de tensiones y corte calculado a partir de la curva de tensiones para barras embebidas 500 milímetros en concreto.

Es importante señalar con respecto a las figura 2.8 que en la imagen superior, cada curva representa la distribución de tensiones a una carga específica. Para la imagen inferior las líneas punteadas representan la distribución teórica de tensión de corte y las líneas sólidas, representan la distribución calculada a partir de las curvas de tensión.

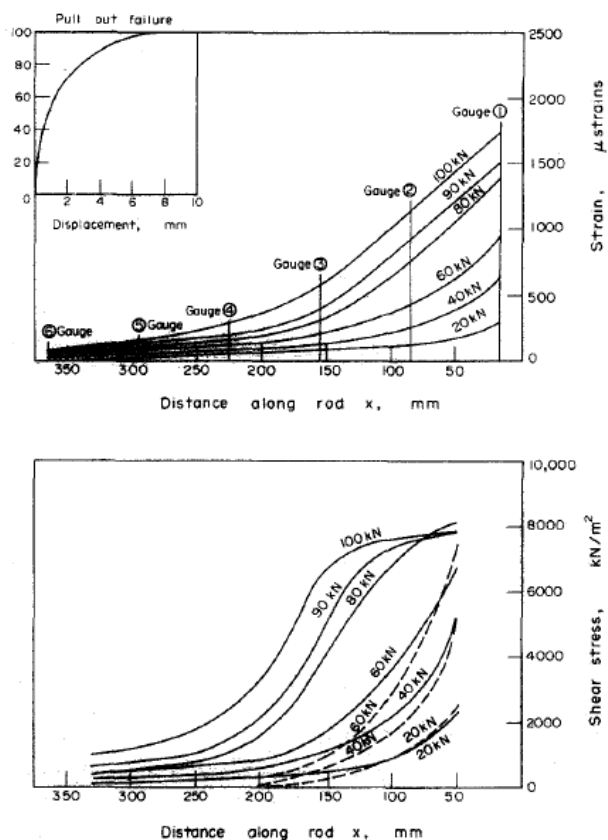


Figura 2.9: Curva de carga-desplazamiento, distribución de tensiones y corte calculado a partir de la curva de tensiones para barras embebidas 350 milímetros en concreto.

Al igual que en la figura anterior en la figura 2.9 cada curva representa la distribución de tensiones a una carga específica. Para la imagen inferior las líneas punteadas representan la distribución teórica de tensión de corte y las líneas sólidas representan la distribución calculada a partir de las curvas de tensión.

Es importante señalar que dada la configuración geométrica del ensayo, se diseñó para un anillo delgado según la ecuación 2.4. Por lo tanto la falla observada representa la tensión de adherencia en el puente adherente.

Así, es razonable deducir basado en la ecuación 2.13 que la falla ocurrirá en la zona más débil de la interfaz. De esa forma en rocas más débiles la falla se presentará en la roca, mientras que en las más fuertes, la falla se presentara en la resina o en la barra.

Contrastando los análisis teórico y experimental se puede concluir, que las simulaciones en concreto, para ambos largos de empotramiento son similares para bajos estados de carga. A medida que aumenta la carga se generan diferencias considerables. Es evidente que a medida que aumenta la sollicitación el sistema completo se ha desligado y la resistencia a la adherencia se debe al roce entre las capas superficiales de cada material. El comportamiento no lineal de carga desplazamiento es ilustrativo del efecto descrito.

La implicancia de estos resultados, es que el diseño de los sistemas de anclaje depende principalmente de las propiedades de la roca en que está embebido ya que a medida que disminuye su resistencia, disminuye la resistencia del sistema completo. De igual forma el puente adherente toma un rol importante a medida que se tienen menores resistencias en la roca.

También se infiere que la mayoría de los modelos descritos corresponden a un comportamiento inicial del anclaje cuando el sistema en su conjunto se encuentra en el rango lineal. Después de esto, cuando empiezan a existir grietas, el sistema completo pierde su linealidad y falla por la zona de mayor debilidad.

3. CAPÍTULO 3: ESTUDIO EXPERIMENTAL

3.1. Condiciones del ensayo:

La idea básica del ensayo consistía en anclar una barra en una probeta que simulara la roca en el túnel, usando un adhesivo común en estas labores. Luego, la barra se sometería a tracción en su extremo libre, manteniendo fija la probeta a la que estaba anclada

Dada la imposibilidad de contar con muestras de roca inalterada adecuada para hacer los ensayos en laboratorio, se pensó en utilizar probetas de hormigón para simular el efecto que produce la roca cuando se ancla en una fortificación minera. Para ello, se fabricaron 10 probetas cúbicas de hormigón, utilizando moldes cúbicos de 20 centímetros proporcionados por Idiem. Se esperaba reutilizar algunas de las probetas de hormigón lo que en la práctica fue imposible ya que éstas se rompían durante los ensayos.

Como lo que interesaba estudiar era la adherencia roca-adhesivo-barra se debía evitar que al tirar la barra embebida en el concreto, se produjera una falla tipo cono ya que no se estaría determinando la fuerza de adherencia, sino la resistencia al arranque de la probeta

3.1.1. Diseño de la Mordaza

Para el diseño de la mordaza se estudiaron dos alternativas para realizar los ensayos las que se describen a continuación.

3.1.1.1. Alternativa 1

Esta alternativa utilizaba la máquina universal Instram 600LX y consistía en construir una mordaza que contuviera la probeta cúbica de hormigón. Se diseñó a partir de la zona más solicitada: la plancha superior que es la que transmite la carga de tracción a la que se somete la probeta. La diferencia de esta cara con la cara inferior radica en que la plancha superior debe tener una perforación para ingresar la probeta, lo que debilita la sección.

Para esto, se modeló en SAP 2000 la plancha superior de forma simplemente apoyada y se le aplicó una carga distribuida de 13 toneladas como muestra la figura 3.1. Esta carga se obtuvo como una fracción de la fuerza total de las barras de fibras, que de acuerdo a la información del proveedor, tienen una resistencia última cercana a las 18 toneladas. Se modelaron distintos espesores de plancha y con la plancha de 16 milímetros se obtuvieron deformaciones menores de medio milímetro en la zona más solicitada.

A partir del modelo validado se generó un set de planos, figura 3.2, que se enviaron a distintas maestranzas para cotización.

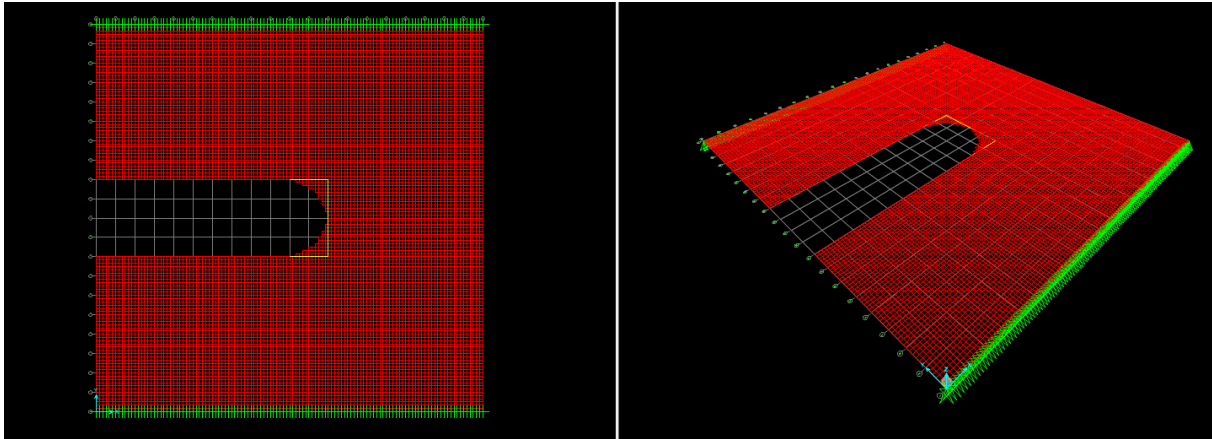


Figura 3.1: Modelo en SAP para la placa superior de la mordaza

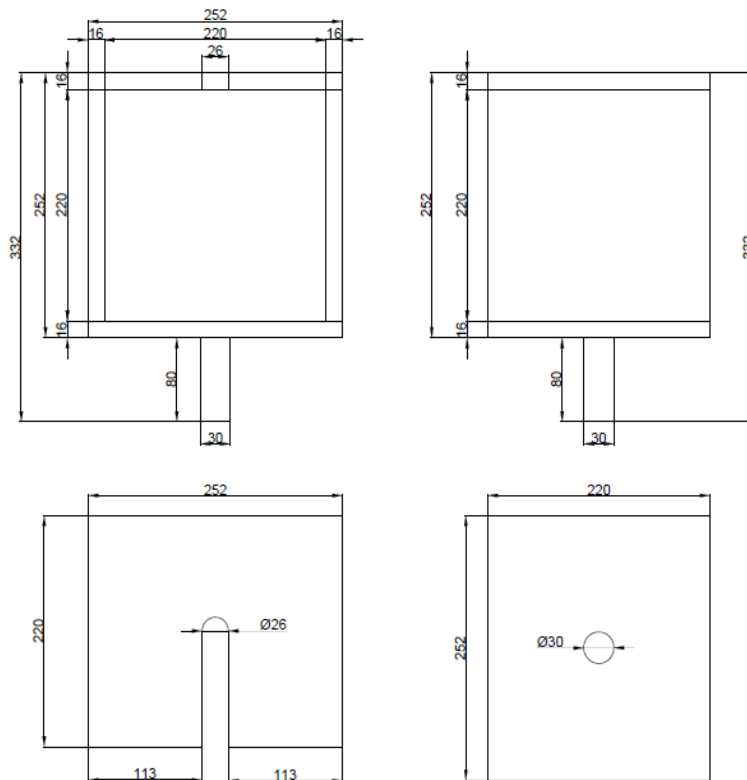


Figura 3.2: Set de planos para la construcción en maestranza de la mordaza en la primera alternativa.

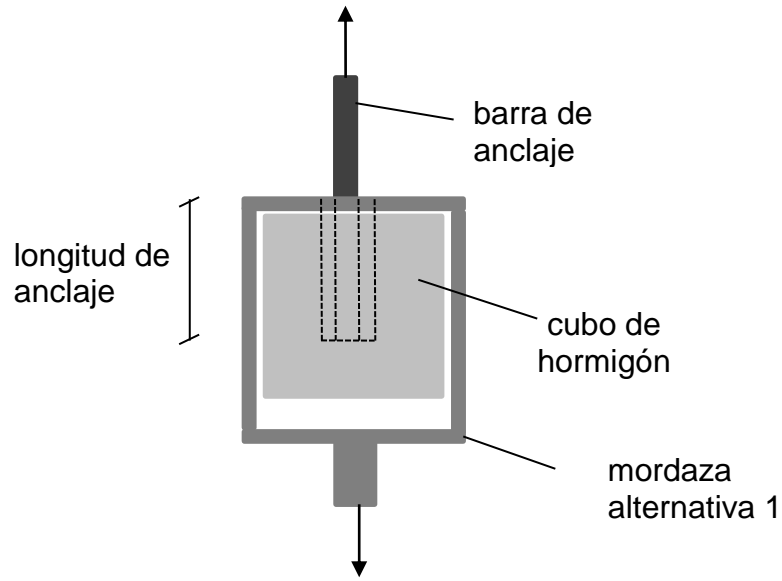


Figura 3.3 Esquema de la alternativa 1

3.1.1.2. Alternativa 2

La segunda alternativa consideraba no utilizar la máquina universal, sino generar la tracción necesaria con un gato hidráulico. Debía proveerse un espacio donde poder instalar un extensómetro para medir con mayor precisión la deformación de la barra durante el ensayo. Al igual que la alternativa 1 debía evitarse la falla tipo cono del hormigón por lo que es necesario darle un apoyo a la cara superior de la probeta.

Considerando lo anterior se pensó en una caja de acero con dos de sus caras libres para poder insertar el extensómetro dentro de ella. También dos de sus caras debían tener una perforación para que la barra pueda pasar de un extremo al otro. El gato hidráulico se instalaría en la parte superior y sometería a tracción la barra a partir de la caja como se observa en la figura 3.4

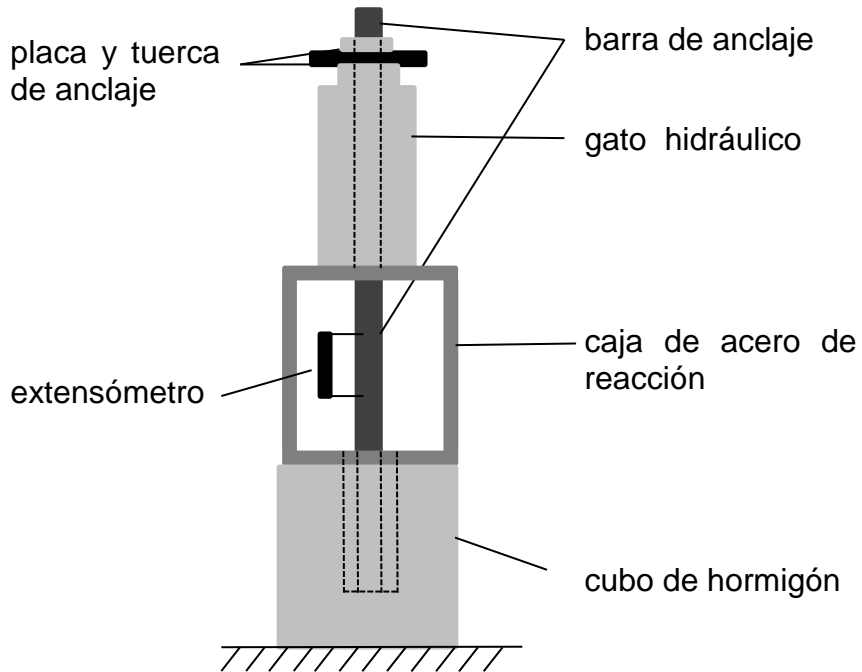


Figura 3.4 Esquema de la alternativa 2

En la figura 3.5 se puede observar un plano con el diseño a construir.

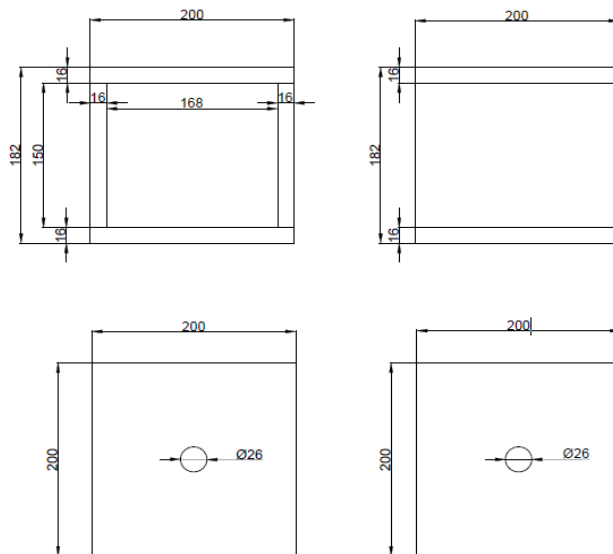


Figura 3.5: Vistas para la construcción en maestranza de la mordaza de la segunda alternativa.

Finalmente la solución usada en todos los ensayos fue la alternativa 1, materializada en la mordaza fabricada en maestranza.

3.1.2. Características de la mordaza

La mordaza a utilizar fue la definida en la alternativa 1 y fue construida por una maestranza especializada. La recomendación de la maestranza fue mecanizar las caras de apoyo y por facilidad en la construcción se materializó a cabalidad con una plancha de acero de 16 milímetros de espesor. El acero usado fue A36. La pieza final se puede observar en la figura 3.6.



Figura 3.6: Caja de acero que funciona como mordaza para contener la probeta de hormigón.

3.2. Barras de fibra de vidrio reforzado (BFVR)

Las barras fueron provistas por investigadores del IM2 (Codelco). Originalmente se consideraron 5 tipos de barras, todas de 22 mm de diámetro exterior nominal. En la Figura 3.7 se observan los cinco tipos de barra, de izquierda a derecha estas son:

- Barra de solo fibra
- Barra de fibra con núcleo de cable de acero

- Barra de fibra con núcleo de cable PET
- Barra de fibra con núcleo de barra de acero estriada
- Barra de fibra con núcleo de barra de acero liso



Figura 3.7: Cinco tipos de barras de fibra de vidrio reforzado

De éstas se descartaron las dos últimas ya que fueron sometidas a pruebas de trituración por investigadores del IM2 y los resultados no fueron satisfactorios.

Es importante destacar que a pesar de que estas barras a ensayar tienen diferentes núcleos, no se esperaba observar mayores diferencias en la resistencia de adherencia ya que la superficie de las estas es la misma y de acuerdo a la literatura estudiada (Farmer, 1975) no existen cambios en la tensión de adherencia siempre y cuando las rigideces de ambas barras sean similares. La rigidez de la barra es importante porque determina cómo será la distribución de tensiones a lo largo del extremo empotrado de la barra. Esta hipótesis será válida más adelante usando resultados experimentales.

3.3. Probetas de hormigón

Como se explicó al principio de este capítulo y ante la imposibilidad de tener un macizo rocoso en laboratorio donde hacer el ensayo de arranque (“*pull-out*”) y dentro del marco del diseño del ensayo, se decidió generar probetas de hormigón que simularían la roca para el ensayo de acuerdo a las consideraciones del CEB (Comité Euro-International du Beton_Rile, 1983) expuestas anteriormente .

3.3.1. Hormigón a usar

El hormigón usado fue Presec® H-02, pre dosificado y envasado en seco. Este hormigón es desarrollado con áridos de menor tamaño a lo habitualmente utilizado en los hormigones, lo que mejora su trabajabilidad y compactación. En la tabla 3.1 se detallan las propiedades mecánicas especificadas por el proveedor.

Tabla 3.1: Especificaciones técnicas del hormigón Presec®

Características Técnicas	
Resistencia Característica	200 kg/cm^2
Tamaño máximo nominal	8 mm
Nivel de Confianza	90%
Rendimiento	17±1 lt/saco
Dosis de agua	4±0,5 lt/saco
Cono	6±1 lt/saco
Tiempo de trabajabilidad	120 min

3.3.2. Construcción de probetas

Para la construcción de las probetas se gestionó con Idiem el préstamo de 10 moldes de acero con los cuales se confeccionaron las probetas cúbicas de 20 centímetros.

Luego de una limpieza general se rearmaron, encuadraron (figura 3.8) y sellaron con silicona, figura 3.9, para evitar que se perdiera lechada durante el hormigonado y así asegurar la estanqueidad de los moldes.

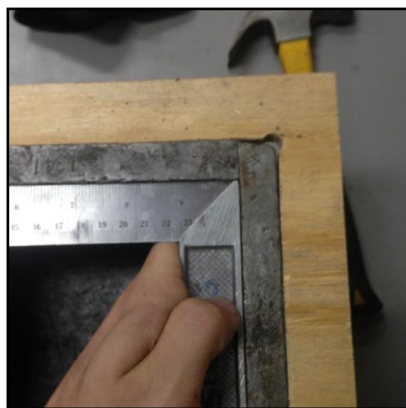


Figura 3.8: Encuadramiento de los moldes de acero



Figura 3.9: Sellado de los moldes de acero con silicona

También se instaló un collarín de madera para más tarde poder fijar un tubo plástico que genera la perforación en la probeta de concreto. Para esto se tensaron 2 hilos desde las esquinas para encontrar el centro de la probeta y luego se apernó una pieza de madera para fijar el tubo figura 3.10.

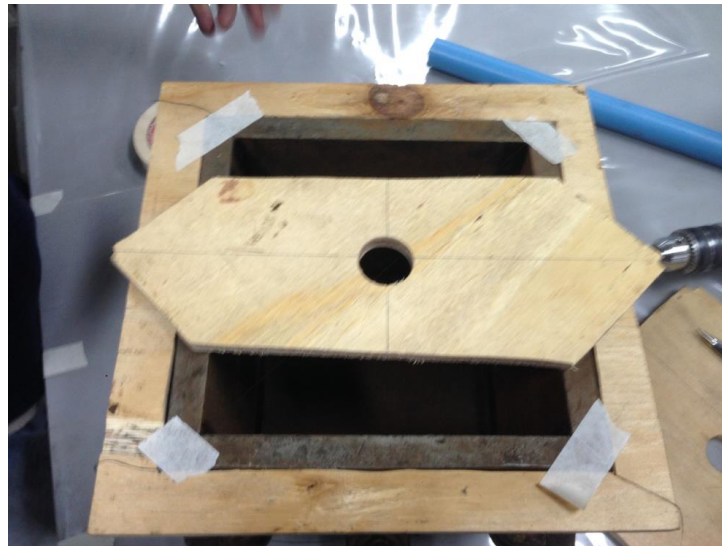


Figura 3.10: Fijación de madera para el centrado de los tubos

Luego se fabricó el concreto de acuerdo a las especificaciones del proveedor usando 4,5 litros de agua por saco y la mezcladora de concreto del laboratorio de Sólidos, Medios Particulados y Sistemas Estructurales. En la figura 3.11 se observan la mezcladora de concreto y la colada de hormigón.



Figura 3.11: Preparación del hormigón en laboratorio

Luego se insertaron tubos de plástico a distintas profundidades con el objetivo de tener distintas longitudes de empotramiento. De esta forma se buscaba obtener una relación de profundidad de anclaje/ fuerza de adherencia. Para que los tubos quedasen verticales y centrados, se utilizó un nivel de burbuja (figura 3.12).



Figura 3.12: Nivelación de los tubos de pvc

Finalmente y para evitar la pérdida de humedad se envolvieron las muestras en plástico (figura 3.13). Se dejaron curar durante 28 días para obtener la resistencia final a temperatura ambiente.



Figura 3.13: Probetas cubiertas para evitar la pérdida de humedad

3.4. Adhesivo hormigón-barra

La idea inicial era utilizar un puente adherente con lechada de hormigón pero luego de un par de reuniones de coordinación con la contraparte del IM2 se determinó desechar la lechada de cemento ya que el objetivo del ensayo es homologar de la manera más fiel posible las condiciones de la mina en donde no se usa lechada de cemento para los pernos de anclaje.

Dado lo anterior se generaron probetas de prueba usando 2 pegamentos epoxi:

- 1) Sika® Anchorfix 1 (Figura 3.14)
- 2) Hilti® Cápsula química HVU ¾

La composición en base a granos del producto Hilti y la falta de equipamientos necesarios dificultaron su uso, en cambio el producto Sika fue más fácil de trabajar, dado que se aplica de forma directa con una pistola convencional de calafeteo.



Figura 3.14: Puente adherente Sika® Anchofix 1 usado para embeber las barras en el hormigón

En la figura 3.14 se puede observar el producto Sika. Las principales ventajas son que tiene un rápido curado que le da una rigidez temprana, tiene poco olor y una alta capacidad de carga. Se mezcla a partir de 2 componentes en proporción 10:1 lo que resulta un color grisáceo. Este color se cambió con colorante para poder diferenciar el adhesivo del hormigón en las probetas una vez falladas. En la tabla se detallan algunas de sus propiedades técnicas

Tabla 3.2: Especificaciones técnicas del puente adherente a usar

Propiedades Mecánicas	
Espesor máximo de aplicación	3 milímetros
Resistencia a compresión	60 N/mm^2 o
Resistencia a flexión	28 N/mm^2
Resistencia a la tracción	12 N/mm^2
Módulo de Elasticidad a Compresión	3500 N/mm^2
Módulo de Elasticidad a Tracción	4500 N/mm^2

Finalmente la ficha técnica del adhesivo a usar especifica la ecuación 3.1 para determinar la capacidad de carga a tracción y la ecuación 3.2 para determinar la capacidad de carga al corte.

$$N_{tracción} = \frac{h_{ef} - 50}{2,5} \quad (3.1)$$

$$V_{tracción} = \frac{h_{ef} * d_e * f_{cm} * 0,5}{1000} \quad (3.2)$$

Donde

$N_{tracción}$: Carga característica de anclaje a tracción (kN)

h_{ef} : Longitud efectiva del anclaje (mm)

$V_{tracción}$: Carga efectiva del anclaje al corte (kN)

d_e : Diámetro de la perforación (mm)

f_{cm} : Resistencia característica del hormigón (MPa)

Las capacidades señaladas corresponden cuando el adhesivo se somete a tracción. Las fórmulas del adhesivo cuando éste se somete a compresión son distintas pero no se ocupan en esta memoria. De este modo las capacidades máximas del adhesivo epoxi para las distintas longitudes de empotramiento generadas en las probetas se observan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: capacidades teóricas del adhesivo epoxi

h_{ef} (mm)	$N_{tracción}$ (toneladas)	$V_{tracción}$ (toneladas)	$N_{tracción}$ (MPa)	$V_{tracción}$ (MPa)
50	0	1,427	0	3,1796
100	2,039	2,855	52,5663	3,1807
150	4,038	4,282	104,1015	3,1803
200	6,118	5,710	157,7249	3,1807

Los valores de la tabla 3 deben considerarse de manera referencial ya que algunas configuraciones a ensayar se escapan de las recomendaciones dadas por el proveedor y las ecuaciones 3.1 y 3.2 no se pueden extrapolar ya que tienen un origen experimental.

La capacidad a tracción en mega pascales fue calculada a partir del valor dado por la fórmula en tracción dividida por el área neta de la barra de fibra de 22 milímetros de diámetro. De forma análoga la capacidad al corte en mega pascales se derivó a dividiendo la capacidad obtenida por la fórmula por el perímetro de la perforación multiplicado por la profundidad de perforación. Aquí se supondrá que la interfaz de falla será resina-hormigón.

Asimismo estos valores fueron fundamentales para la experimentación, ya que en los ensayos de sólo las barras no se alcanzaron valores superiores a las 8 toneladas, lo que estaba por encima de la capacidad máxima del adhesivo epoxi cercano a las 6 toneladas.

3.5. Metodología del ensayo

Para facilitar el análisis de los datos expuestos todas las probetas ensayadas se homologaron de acuerdo a la matriz de ensayos detallada en la tabla 3.4. De esta forma el código de cada probeta queda compuesto de acuerdo a 1 o 2 si corresponde a la primera o segunda serie de ensayos. Luego la letra mayúscula F, P, A si el núcleo corresponde a fibra, PET, o acero respectivamente. Finalmente el número final del código corresponde a los milímetros de empotramiento en la probeta de hormigón.

Tabla 3.4: Matriz de ensayos con los códigos y descripciones de cada probeta

Código del Ensayo	Número de probeta	Tipo de barra	Longitud de empotramiento
1F200mm	1	Sólo Fibra	200 milímetros
1F50mm	2	Sólo Fibra	50 milímetros
1F100mm	3	Sólo Fibra	100 milímetros
2F50mm	4	Sólo Fibra	50 milímetros
2F200mm	5	Sólo Fibra	200 milímetros
2P200mm	6	Fibra con núcleo PET	200 milímetros
2A200mm	7	Fibra con núcleo Acero	200 milímetros
2P100mm	8	Fibra con núcleo PET	100 milímetros
2A100mm	9	Fibra con núcleo Acero	100 milímetros
2P50mm	10	Fibra con núcleo PET	50 milímetros
3F150mm	11	Sólo Fibra	150 milímetros

3A150mm	12	Fibra con núcleo Acero	150 milímetros
3F150mm	13	Sólo Fibra	150 milímetros
3P150mm	14	Fibra con núcleo PET	150 milímetros

También es importante describir el proceso de montaje del ensayo donde cada probeta de hormigón se fraguó durante un mes previo al ensayo. La resina epoxi se fraguó durante una semana previo al ensayo.

Finalmente se montaron la mordaza de acero y la probeta de hormigón en la máquina universal. Se midió la longitud libre entre la mordaza superior y la caja de acero y se ensayó a un milímetro de alargamiento por minuto. Bajo la probeta de hormigón se colocó a partir de la probeta 3 una tabla de madera para evitar la fractura del hormigón después de la falla del ensayo. En la figura 3.13 se expone el montaje típico usado en todos los ensayos descrito anteriormente en el esquema de la figura 3.4

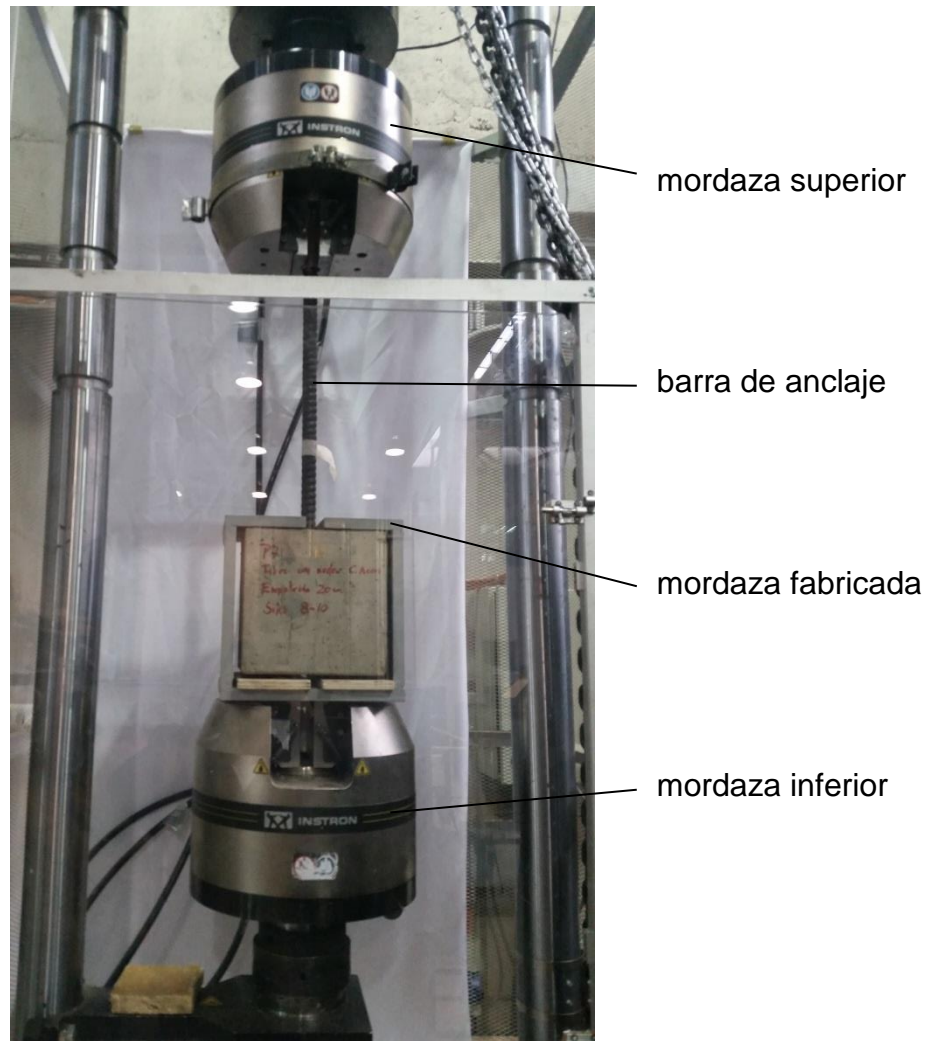


Figura 3.15: Configuración estándar para toda la serie de ensayos.

Para todos los ensayos se utilizó el siguiente procedimiento.

- Se ensayó a deformación creciente y se midió la fuerza versus la deformación hasta la falla de adherencia
- Se determinó la fuerza última de adherencia entre la barra de fibra y el bloque de hormigón y qué puente adherente funciona de mejor manera.
- Mediante el perímetro de perforación y la profundidad de la misma se estimó la resistencia al corte de la probeta.

4. CAPÍTULO 4: RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los resultados obtenidos luego de una serie de ensayos experimentales tanto de las barras de fibra como de los ensayos realizados en los cubos de hormigón.

4.1. Ensayos Preliminares

Con el objetivo de obtener experiencia con el material y la máquina universal usada en los ensayos, se realizaron ensayos de tracción hasta la fluencia de las barras de fibra de vidrio reforzado. Estos ensayos sirvieron para notar que, en primer lugar, la máquina trituraba las barras en las mordazas por su baja resistencia al corte. Como consecuencia de esto se generaba una falla local en los extremos de las barras que no permitía ensayarlas más allá de las 2 toneladas como se observa en la figura 4.1. Estos resultados no eran satisfactorios, ya que se estimaba que las barras de fibra alcanzan resistencias últimas cercanas a las 18 toneladas de acuerdo a la información entregada por el proveedor



Figura 4.1: Imagen de la falla local generada en las barras producto del ensayo a tracción

A raíz del problema anterior se estudiaron varias soluciones a modo de revestimiento en las puntas de la barra con el objetivo de tener una mejor distribución de tensiones en los extremos de la misma y así evitar la rotura local inducida por las mordazas de acero de máquina universal. Después de probar distintos materiales de recubrimiento la mejor solución fue un producto comercialmente conocido como acero líquido. Éste tiene altas resistencias a la compresión y al corte siendo un pegamento epoxi en base a dos componentes que se mezclan para generar el material.

Así se lograron valores a la tracción mayores que los obtenidos de manera regular sin el revestimiento pero sin alcanzar la fluencia de la barra. El máximo valor de tensión fue aproximadamente 271 MPa, que corresponden a una carga cercana a las 10 tonf. Éstos son suficientes para ensayar la barra a la adherencia ya que los valores de tracción para lograr las tensiones de falla de adherencia son bastante menores. En la figura 4.2 se puede observar el comportamiento del tendón de fibra de 22 milímetros sometido a tracción con el recubrimiento en los extremos.

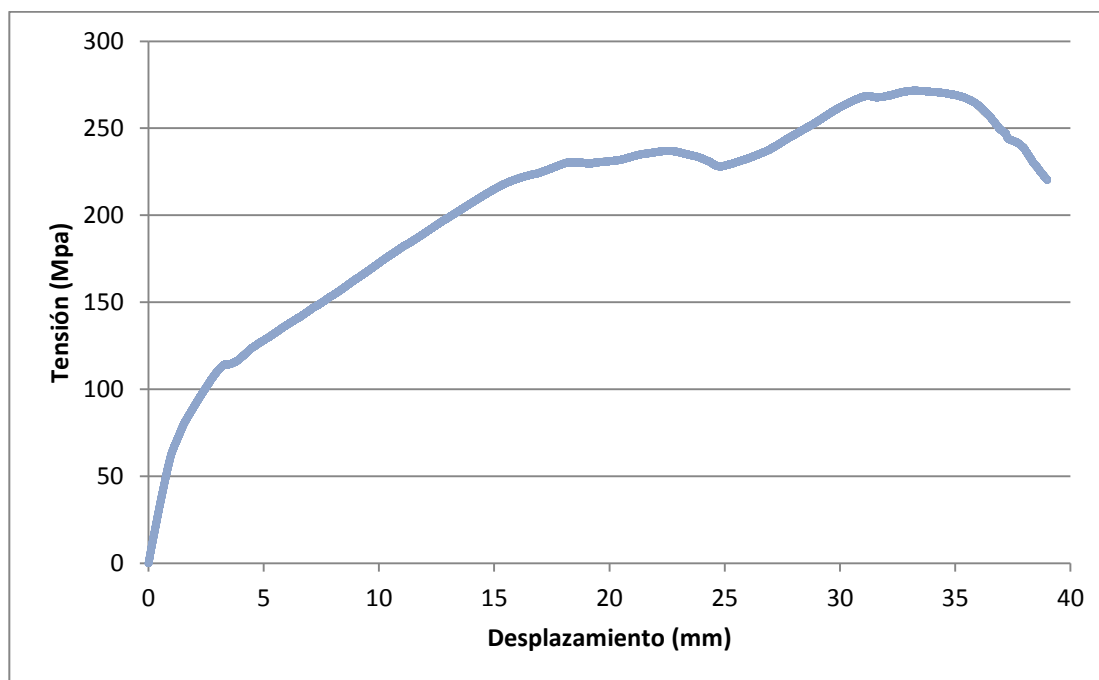


Figura 4.2: Curva de tensión-desplazamiento de una barra de fibra de vidrio reforzado

En el gráfico se observa que en un principio la fibra se comporta de forma lineal y luego sufre distintos cambios de pendientes que coinciden con distintas fracturas que sufre el recubrimiento epoxi en los extremos debido a las tensiones a las que está sometido.

4.2. Primera serie de ensayos

Para tener una idea de las resistencias mínimas y en un proceso de continua mejora, se decidió realizar un set de ensayos a distintas longitudes de empotramiento y verificar los resultados con valores estimados de tensiones de corte y fuerzas últimas encontradas en la literatura.

Para empezar y pensando en el valor máximo de empotramiento se ensayó la probeta de 20 centímetros, correspondiente al código 1F200mm. Se empotró con el adhesivo Sika® y se dejó fraguar una semana. Luego se montó como muestra la figura 3.15 y se ensayó a deformación constante de un milímetro por minuto. Esta velocidad de deformación fue constante para todos los ensayos.

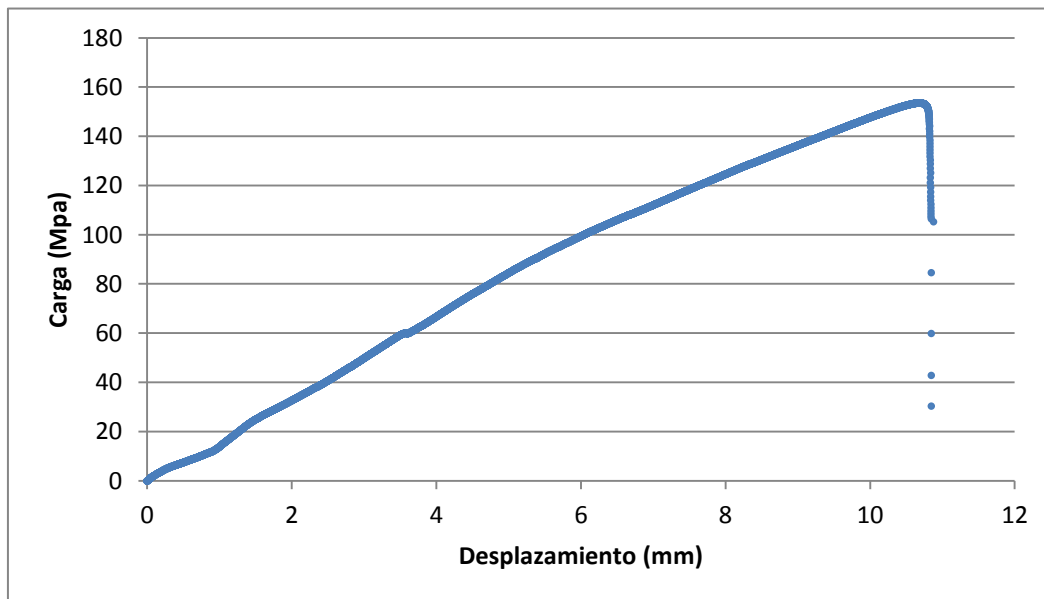


Figura 4.3 Gráfico de tensión desplazamiento de la probeta 1F200mm

La figura 4.3 representa el resultado global del ensayo. Se pueden observar varios cambios de pendientes que coinciden con los agrietamientos que generaban las mordazas en el recubrimiento epoxi de las barras en el extremo superior. La carga de apriete aplicada por las mordazas de la máquina al extremo con recubrimiento fue de 20 bar.



Figura 4.4 Falla observada en la probeta 1

La caída abrupta en el gráfico fuerza-desplazamiento ocurrió en el mismo momento que una masiva grieta dividió la probeta en dos como muestra la figura 4.4. Además de la grieta principal se generaron grietas en las direcciones transversales.

La carga máxima que resistió la probeta fue cercana a las 6 toneladas, alcanzando una tensión de corte de 3,32 MPa. Esta tensión de corte fue calculada considerando el área de contacto dado por el perímetro de perforación y la profundidad de empotramiento.

Como la falla en el hormigón ocurrió de forma repentina, de momento no se podía explicar qué la provocó por lo que se cambiaron algunos parámetros al ensayo. En primer lugar se ubicó una tabla de madera en la parte inferior del cubo de acero para evitar que se dañe al caer la probeta y se decidió grabar el ensayo para tener una evidencia gráfica de la probeta en todo momento. En segundo lugar se decidió ensayar la probeta de 5 centímetros de empotramiento, correspondiente al código 1F50mm, para obtener una mínima relación entre ambas distancias de empotramiento. El gráfico obtenido a partir del ensayo a deformación constante e igual a 1 milímetro por segundo se puede observar en la figura 4.5.

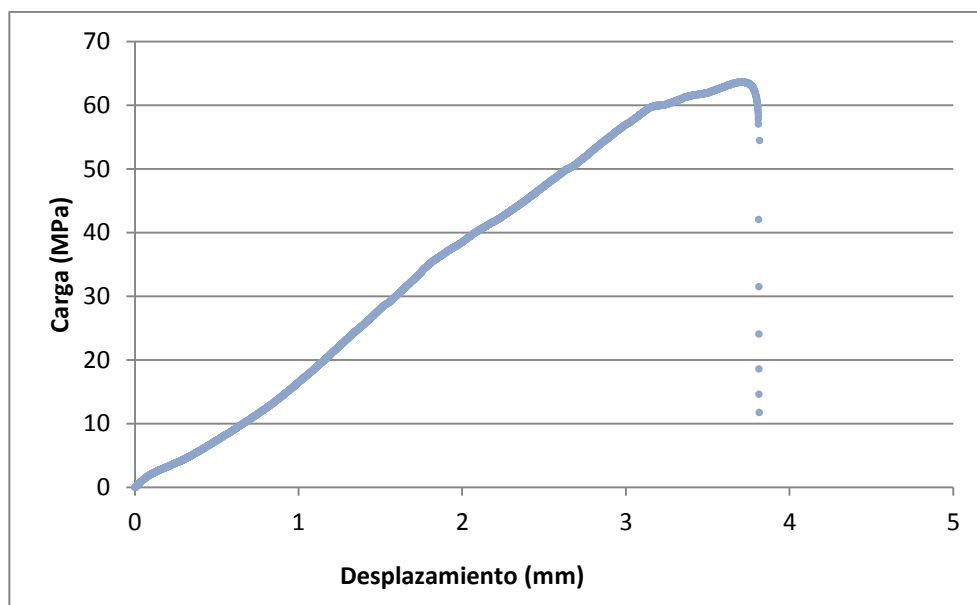


Figura 4.5: Gráfico de tensión desplazamiento de la probeta 1F50mm

La probeta de 5 centímetros falló a las 2,4 toneladas aproximadamente con una tensión de corte promedio de 5,5 MPa en la falla. Además no se rompió la probeta de hormigón. Como mejora al ensayo, se propuso colorear el puente adherente con el objetivo de poder distinguir el concreto del adhesivo epoxi.

De esta forma y con el puente adherente coloreado se ensayó una tercera probeta. Ésta con 10 centímetros de empotramiento. Los resultados del ensayo se muestran en la figura 4.6.

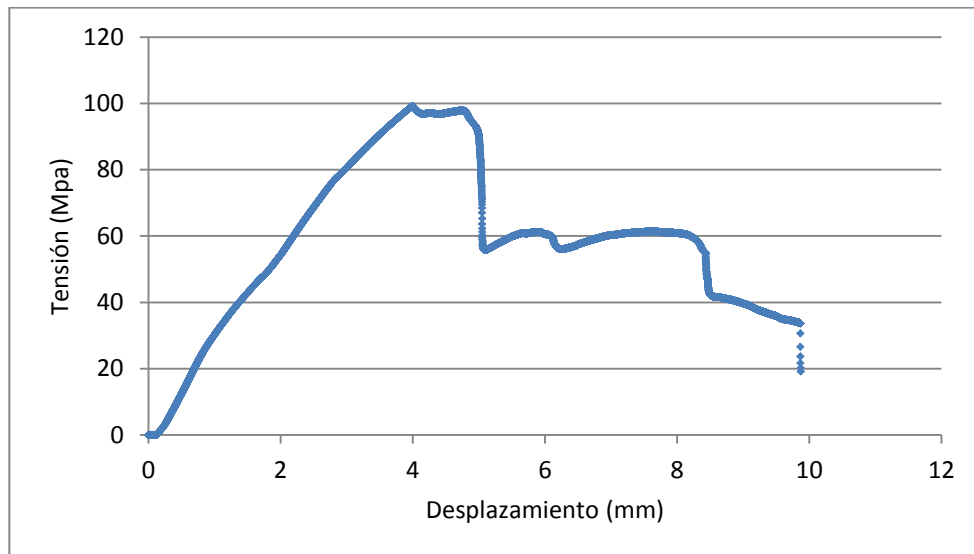


Figura 4.6 Gráfico de tensión desplazamiento de la probeta 1F100mm

La probeta falló con una grieta vertical en las direcciones principales de forma muy similar a la primera probeta como se mostró en la figura 4.5. La barra alcanzó una tensión de 100 MPa y a partir de ese valor se obtuvo una tensión de corte de 4,2 MPa. Luego la barra adquirió una resistencia residual cercana a las 60 MPa como se observa en la figura 4.6.

Como la probeta 1F50mm tuvo una falla distinta a las demás dado que no se rompió la probeta de hormigón se decidió reensayar esa longitud de empotramiento. Esta vez se confinó lateralmente para evitar la tracción del hormigón en la dirección perpendicular a la tracción. Los resultados de este ensayo se muestran a continuación en la figura 4.7.

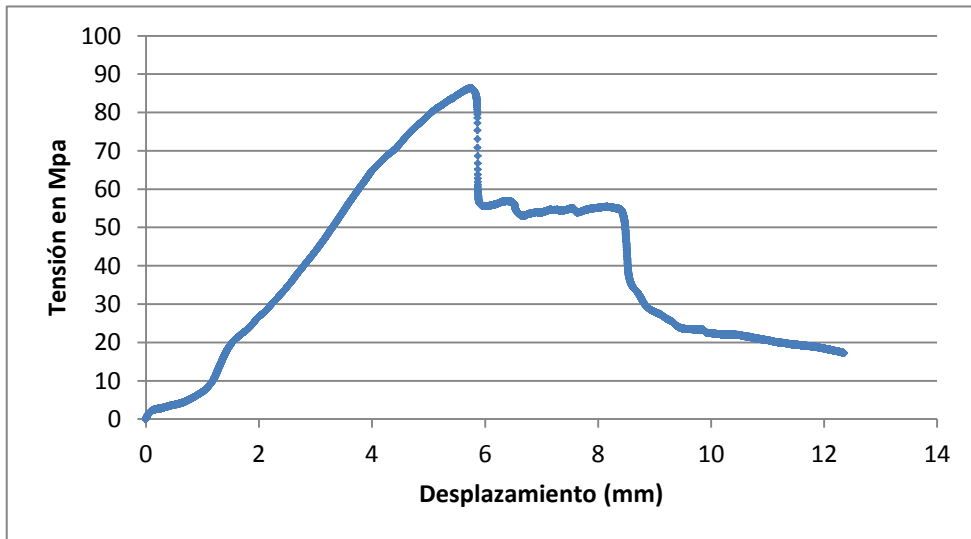


Figura 4.7: Gráfico de tensión desplazamiento de la probeta 2F50mm

Comparando los resultados expuestos en la figura 4.7 con los anteriores se observó que las tensiones máximas de la barra y de corte en la interfaz puente adherente-hormigón fueron similares a las obtenidas con la barra empotrada 10 centímetros. Esto ocurrió porque el confinamiento lateral le otorgó una mayor resistencia al hormigón, impidiendo la aparición de grietas de forma temprana. Un resumen de los datos se puede observar en la figura 4.8.

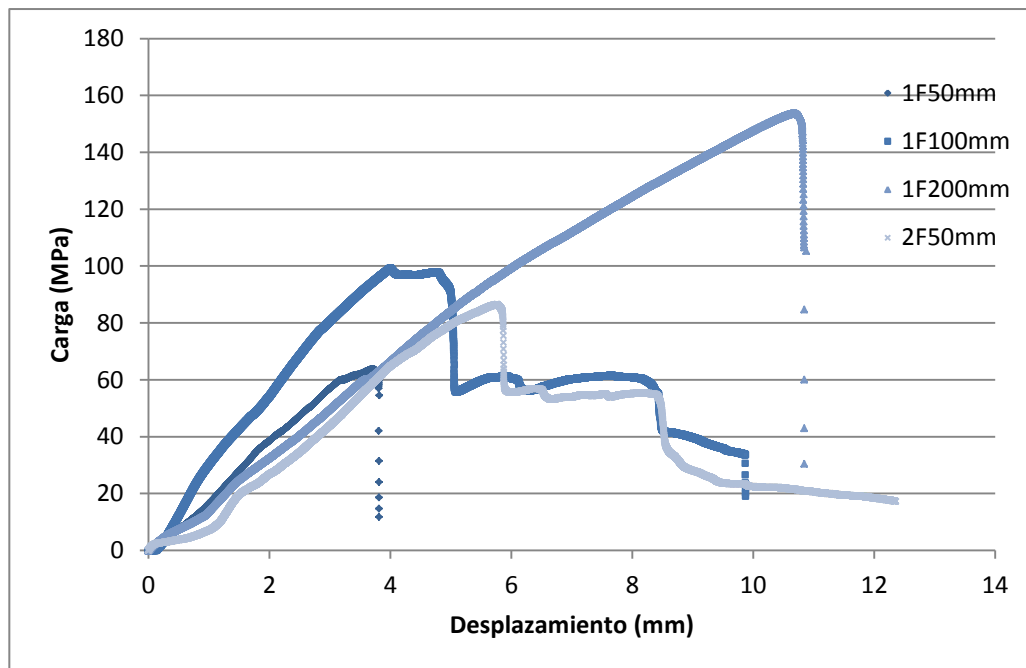


Figura 4.8 Resumen de datos de la primera serie de ensayos.

4.3. Segunda serie de ensayos

Una vez ensayadas las primeras 4 probetas se logró observar una tendencia entre la longitud de empotramiento y la tensión de adherencia. Para validar la tendencia encontrada se decidió ensayar más probetas bajo los mismos parámetros y usando la misma metodología.

La innovación con respecto a la primera serie de ensayos fue incorporar barras con núcleos de acero y PET.

4.3.1. Metodología

El objetivo, de esta segunda serie de ensayos, fue validar la relación antes encontrada con las barras de diferentes núcleos. Se supuso que las rigideces eran similares ya que la superficie de las barras era la misma, figura 3.5, y bajo la hipótesis antes mencionada en la literatura (Farmer, 1975) nos fundamentaba que la distribución de tensiones en la barra debía ser similar, por consiguiente las tensiones máximas debían ser similares. Este supuesto fue validado por los resultados experimentales.

Éstas probetas se empotraron usando el mismo adhesivo Sika® con una semana de fraguado con barras de 70 centímetros y se ensayaron a 1 milímetro por minuto. Las 6 probetas se observan en la figura 4.11.



Figura 4.9: Seis probetas correspondientes a la segunda serie de ensayos

4.3.2. Resultados

Los valores de la tablas 4.1 fueron calculados a partir de la tensión máxima de cada ensayo. La tensión de corte se calculó a partir de la tensión máxima dividida por el área de contacto entre la resina epoxi y la perforación en el hormigón.

Para las probetas 2F200mm, 2P200mm, 2A200mm se resumen en la tabla 4.1 los máximos valores encontrados:

Tabla 4.1: Máximos valores para las probetas 1F200mm, 2F200mm, 2P200mm, 2A200mm, 3.1F150mm, 3A150mm, 3P150mm, 3.2F150mm, 1F100mm, 2A100mm, 2P100mm, 1F50mm, 2F50mm y 2P50mm.

Valores máximos		
20 cm	Tensión MPa	Tensión de Corte MPa
1F200mm	153,683	3,321
2F200mm	158,433	3,423
2P200mm	163,932	3,542
2A200mm	115,475	2,495
15 cm		
3.1F150mm	212,389	6,119
3A150mm	202,243	6,486
3P150mm	149,372	4,303
3.2F150mm	111,319	3,207
10 cm		
1F100mm	99,263	4,290
2A100mm	77,397	3,345
2P100mm	109,280	4,722
5 cm		
1F50mm	63,637	5,500
2F50mm	86,432	7,470
2P50mm	91,002	7,865

Además se puede contrastar el comportamiento de cada una de las barras empotradas 20 centímetros como se muestra en la figura 4.10. La carga se obtiene como la carga directa desde la máquina universal dividida por el área neta de la barra y el desplazamiento corresponde al alargamiento entre mordazas

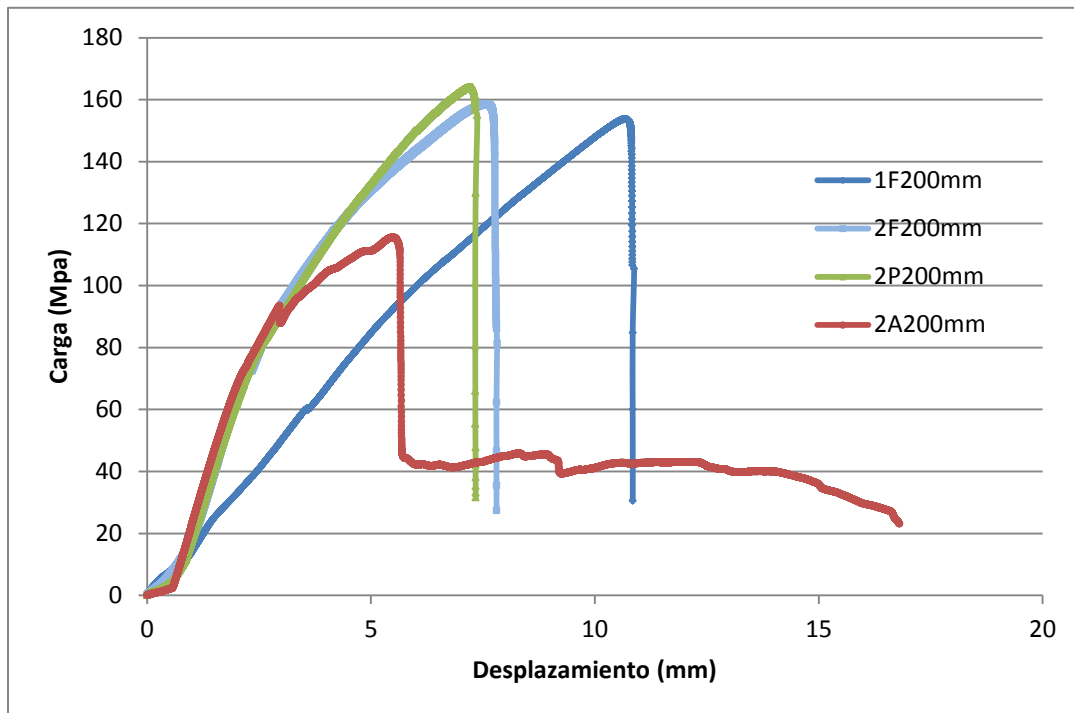


Figura 4.10: Resumen de datos para la probetas 1F200mm, 2F200mm, 2P200mm y 2A200mm

La diferencia de la barra 1F200mm puede ser producto de que ésta barra tenía una menor longitud libre. Es importante señalar que la falla observada es similar a la anteriormente vista. También se observa una grieta en el hormigón en la misma dirección de la barra y en la falla esta grieta se abre y rompe la probeta, como se puede observar en la figura 4.11.

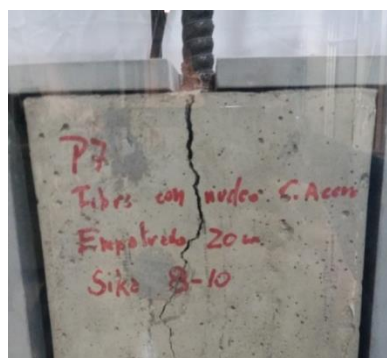


Figura 4.11: Grieta vertical observada en la probeta 2A200mm.

En la figura 4.12 se pueden observar las curvas de tensión desplazamiento de las barras embebidas 10 centímetros.

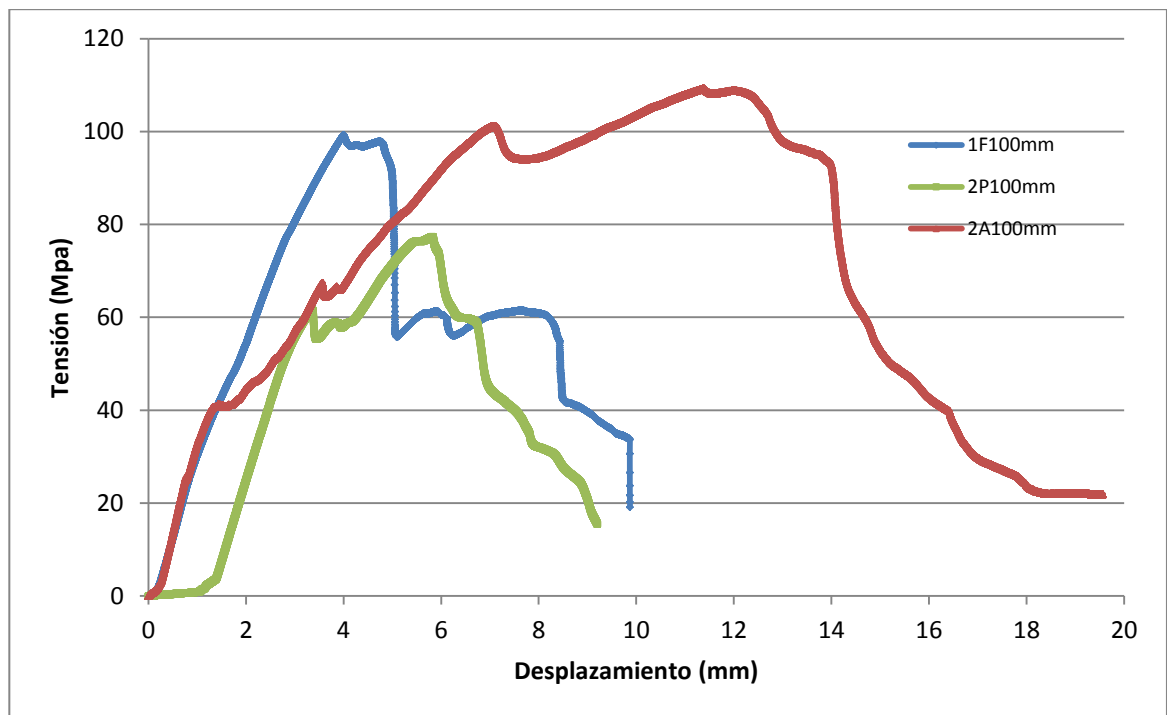


Figura 4.12: Resumen de datos de las probetas 1F100mm, 2P100mm y 2A100mm

La barra de 2P100mm tiene un comportamiento inicial diferente a las demás y éste se explica por un acomodo general de las piezas de la máquina.

Las fallas para estas probetas fueron de 2 tipos. La falla de la probeta 2A100mm fue análoga a las observadas anteriormente a diferencia de la falla de la probeta 2P100mm que presentó la usual grieta vertical en el hormigón pero a una distancia de 10 centímetros de la parte superior de la probeta.

Luego se presenta un resumen de los datos obtenidos a partir de las 2 probetas de 5 centímetros antes ensayadas más la nueva probeta con núcleo de PET ensayada durante la segunda serie de ensayos en la figura 4.13.

Nuevamente la curva 2P50mm presenta un comportamiento inicial extraño que se puede justificar por el acomodo de las piezas al iniciar el ensayo.

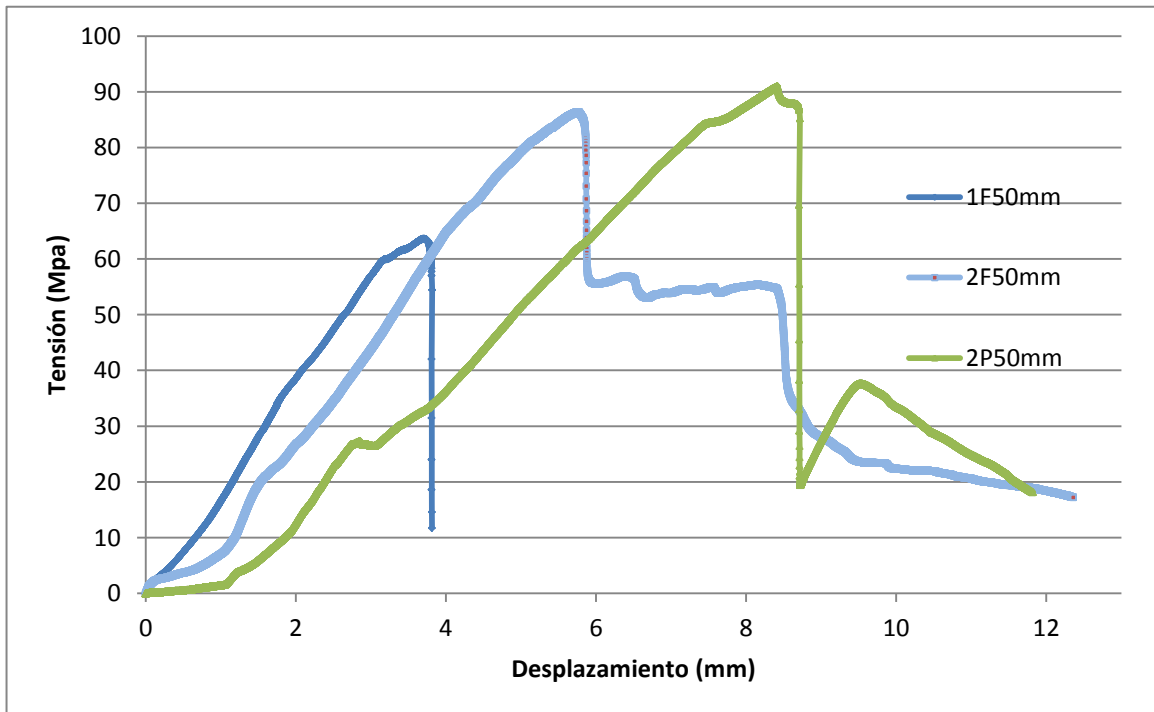


Figura 4.13: Resumen de datos de las probetas 1F50mm, 2F50mm y 2P50mm.

Finalmente, en la figura 4.14, se muestran los ensayos correspondientes a la tercera serie de probetas con largo de empotramiento de 150 milímetros. Se observa que dos de las probeta alcanzaron altos valores por sobre las 8 toneladas. Esto se puede explicar porque el adhesivo usado adquirió una mayor resistencia.

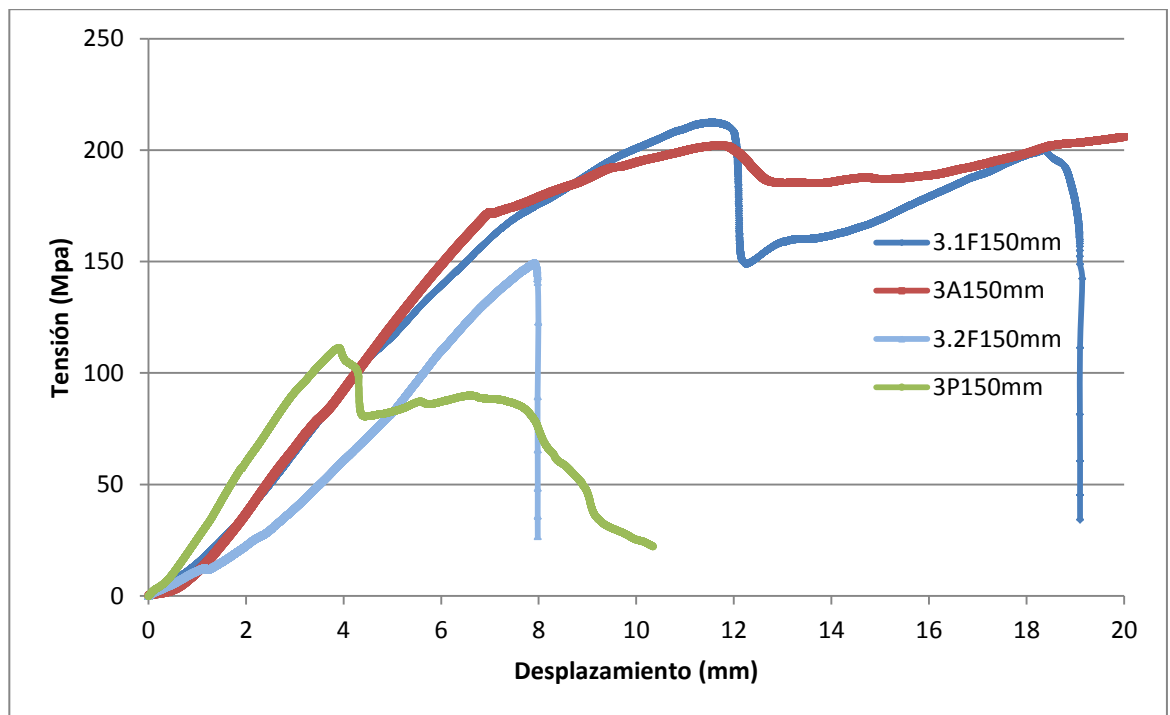


Figura 4.14: Resumen de datos para las probetas 3.1F150mm, 3A150mm, 3.2F150mm y 3P150mm

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se realiza un resumen de los resultados experimentales. Luego se hace una estimación de los módulos de elasticidad y rigidez de las barras ensayadas y finalmente se contrastan ambos resultados con un análisis de las fórmulas teóricas de Farmer (1975).

5.1. Análisis de resultados experimentales

Una vez concluidos todos los ensayos se procedió al análisis de los mismos. Contrastando todos los valores máximos de las cargas máximas en cada barra y enfrentándolas junto a la longitud de anclaje de cada barra, da como resultado la figura 5.1. La tensión es el valor máximo de cada probeta dividido por el área nominal de la barra.

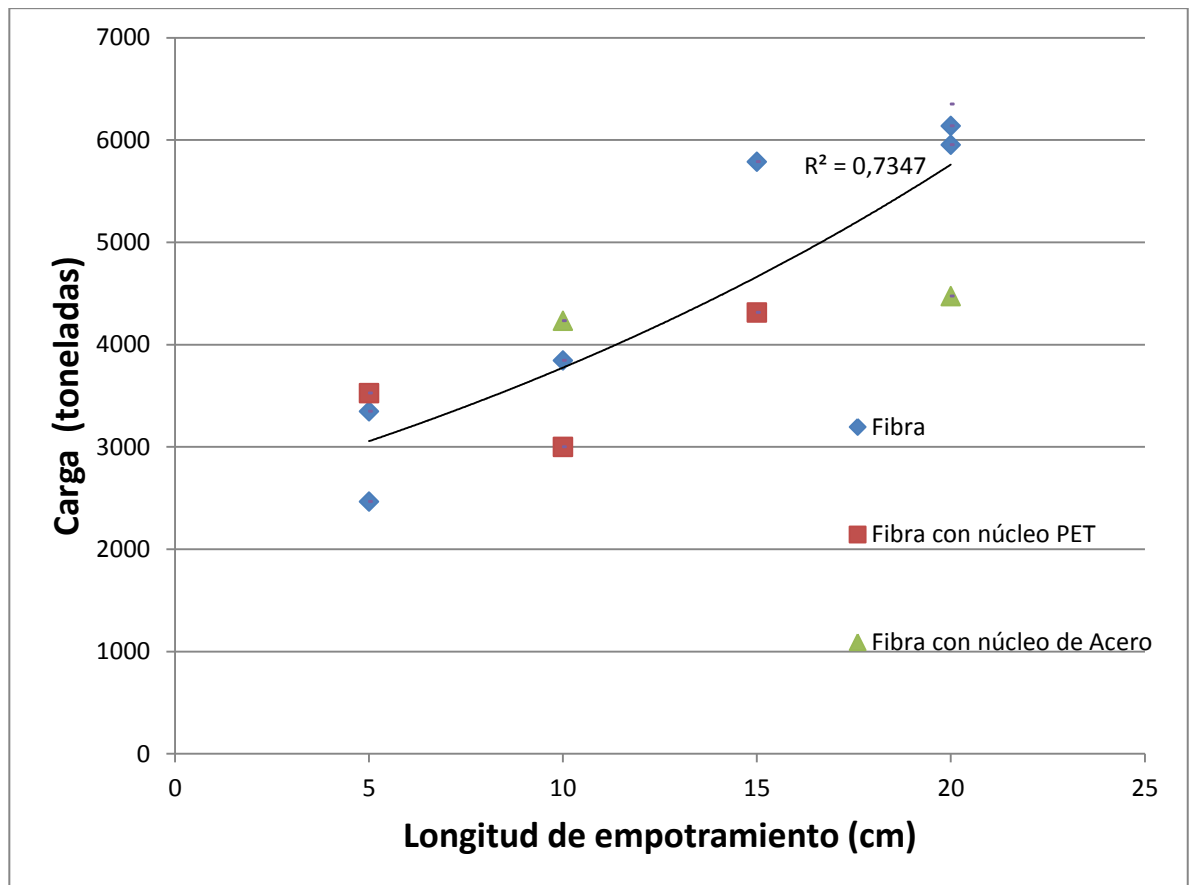


Figura 5.1: Resumen de datos de cargas máximas para cada longitud de empotramiento

En la figura se observa que no existe mayor diferencia, en lo que al ensayo de adherencia corresponde, entre las barras de sólo fibra, fibra con núcleo de acero o fibra con núcleo PET.

De forma análoga, se tomaron los valores máximos de cada ensayo y se calculó una tensión de corte promedio en la falla a partir de la fuerza de tracción máxima dividida por el área de contacto, calculada a partir del perímetro de perforación multiplicada por la profundidad de empotramiento. Este análisis dio como resultado el gráfico mostrado en la figura 5.2.

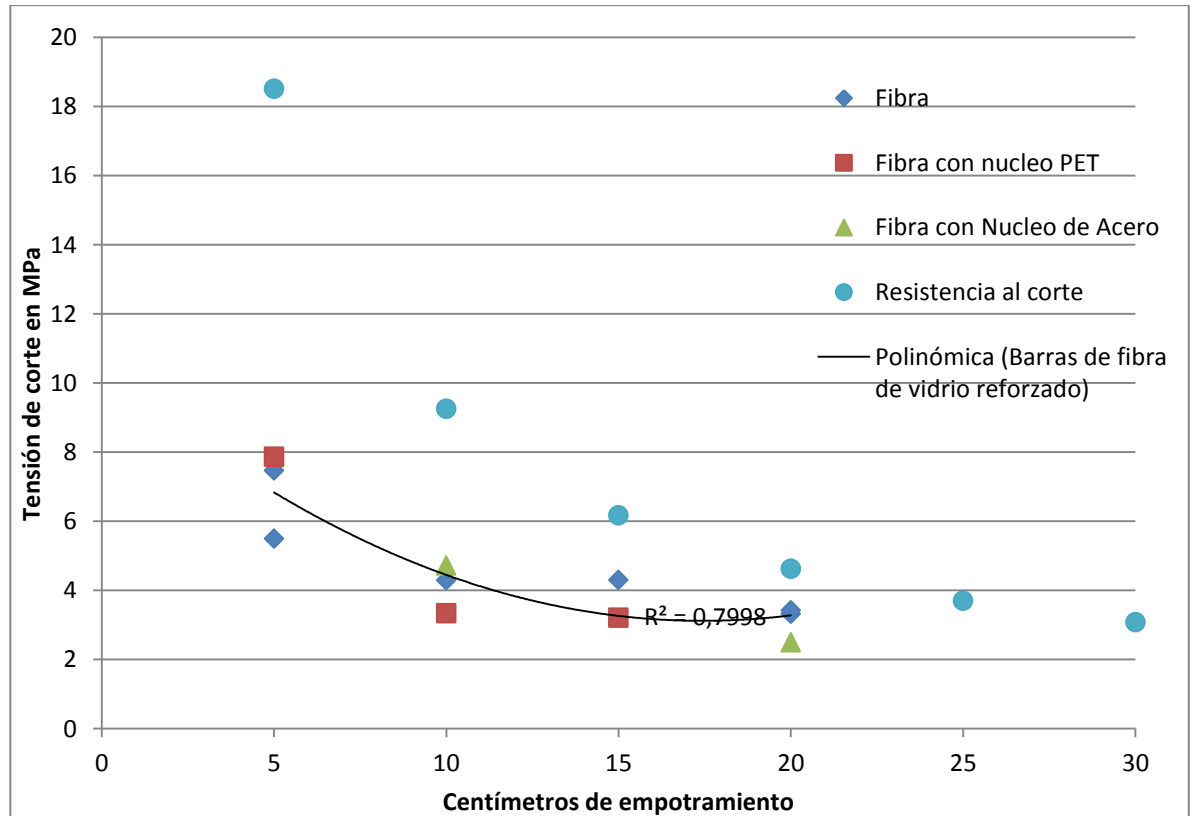


Figura 5.2. : Relación Tensión de corte promedio vs centímetros de empotramiento

Al igual que en la figura anterior no se observan comportamientos distintos para barras de distinto núcleo, si no que más bien una sola tendencia general.

También se observa la resistencia al corte de la barra que se calculó como el valor nominal de la fluencia de la barra, 570 MPa, dividido por el área de corte en la que está embebida. Es importante mencionar que se toma un valor de corte promedio para cada una de las longitudes de empotramiento a que a medida que se aumenta la longitud de empotramiento los ensayos toman, se adquiere cada vez un porcentaje mayor de la resistencia nominal.

5.2. Análisis de las rigideces de las barras

Para la primera y segunda serie de ensayos se usó la hipótesis de que las rigideces de las barras con distintos núcleo son semejantes por lo que la distribución de tensiones y por consiguiente las tensiones de adherencia máximas serian similares.

Esta hipótesis sería validada con respecto a los valores de tensiones máximas ya que independiente del núcleo de cada barra los resultados no tuvieron mayores variaciones y tampoco muestran una tendencia relativa a las barras de sólo fibra. Es decir las barras con núcleo de acero o núcleo PET no fueron mayores o menores que las barras de fibra.

Se buscó a partir de los datos experimentales el módulo de elasticidad a raíz de los gráficos. Se eliminaron los primeros datos que corresponden principalmente al acomodo de las piezas del ensayo y se truncaron los datos después del primer cambio significativo de pendiente.

También se analizaron las probetas por separado, ya que se obtiene un módulo de elasticidad en conjunto de la barra libre más la barra adherida al cubo de hormigón con pegamento epoxi. De esta forma y para las barras empotradas en 20 centímetros se obtienen las curvas de la figura 5.3.

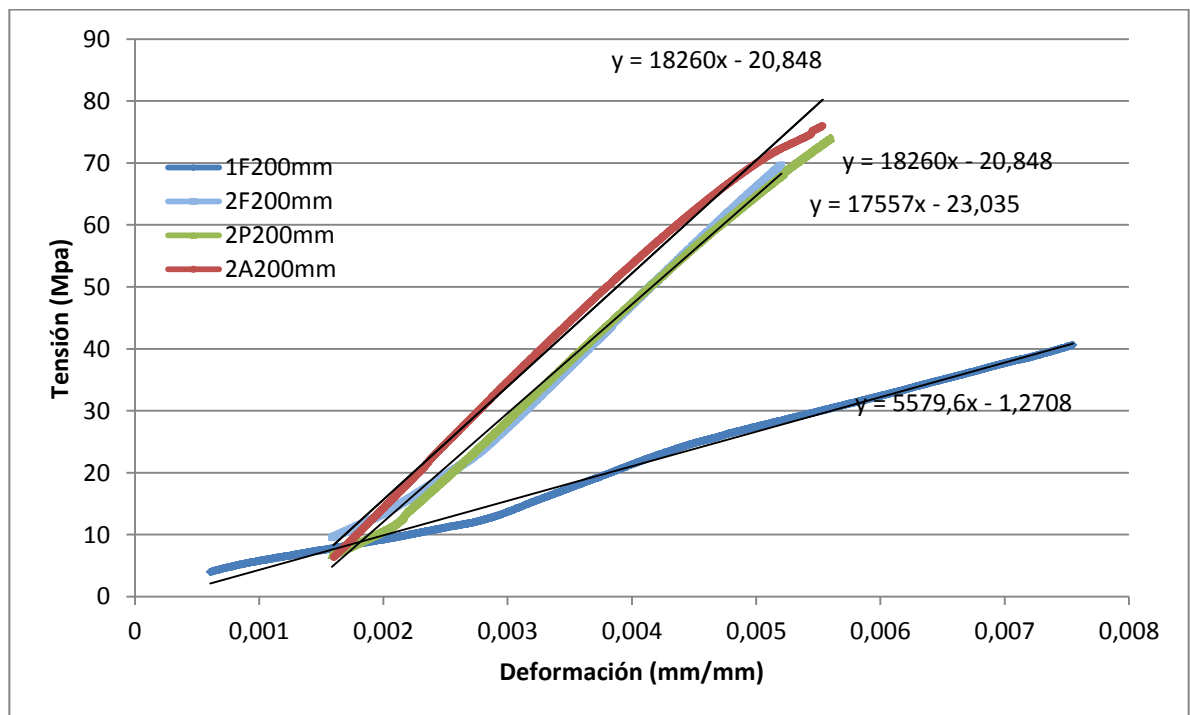


Figura 5.3: Región lineal elástica deformación de las probetas empotradas 20 centímetros.

De forma análoga se generaron las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 correspondientes a las barras empotradas 10 y 5 centímetros.

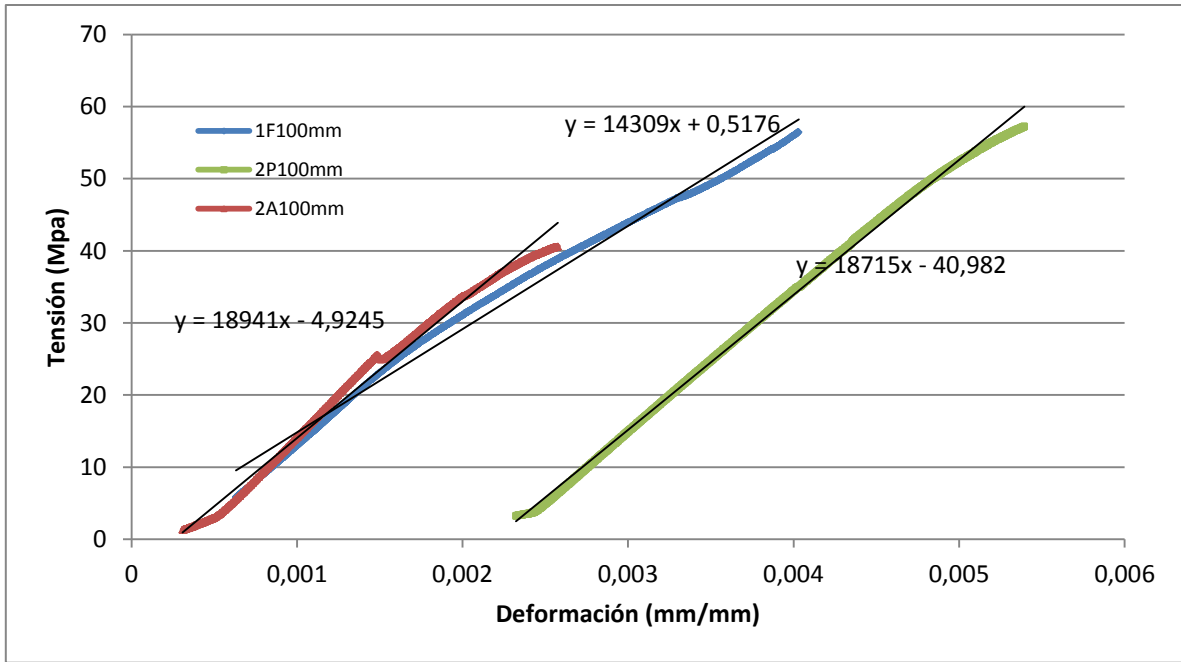


Figura 5.4 Región lineal elástica de las probetas empotradas 10 centímetros.

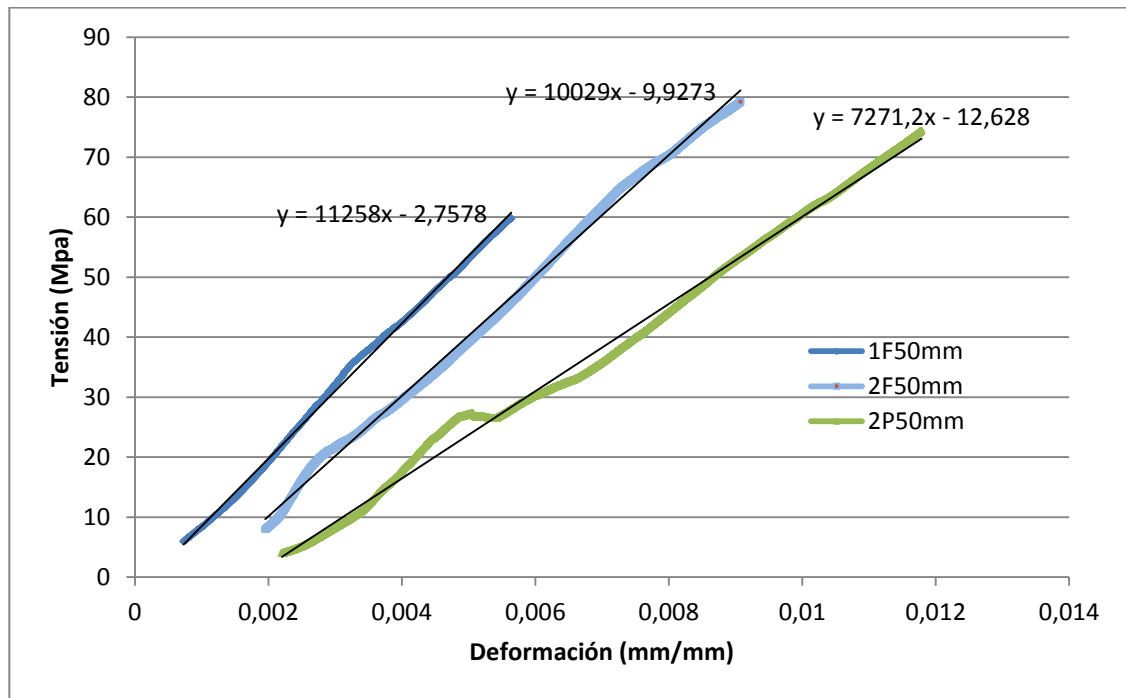


Figura 5.5. Región lineal elástica de las probetas empotradas 5 centímetros

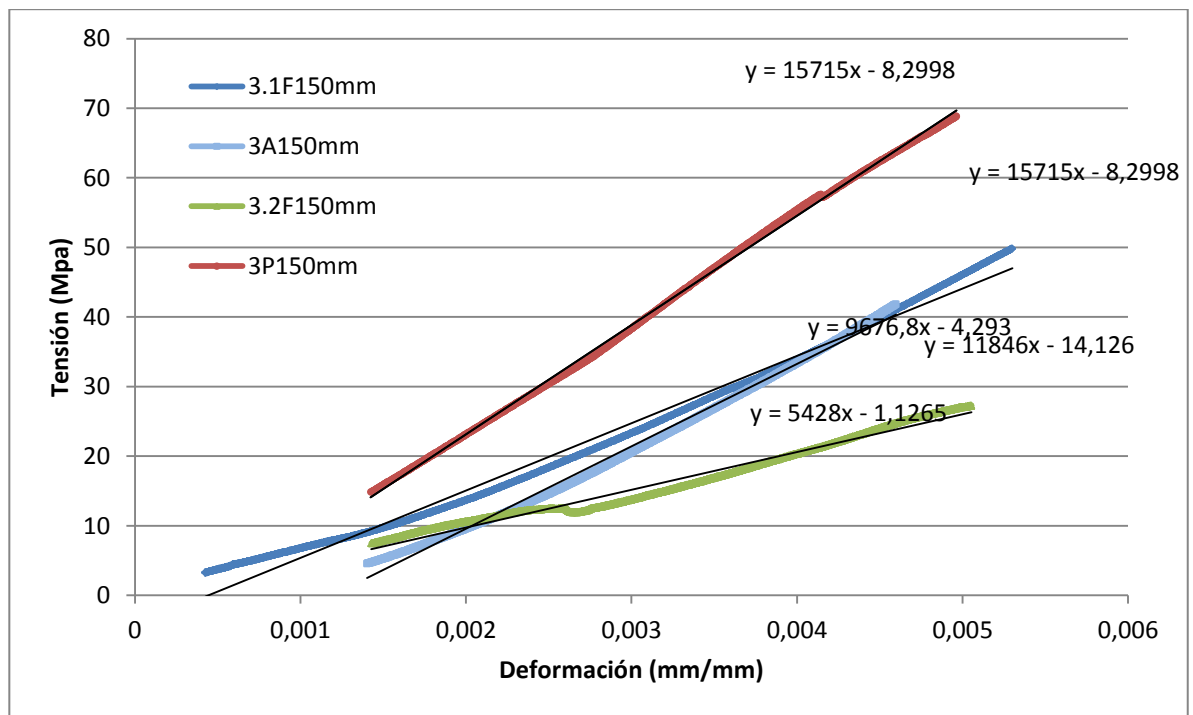


Figura 5.6: Región elástica para las probetas empotradas 15 centímetros

A modo de resumen en la tabla 5.1 se pueden observar los módulos de elasticidad de cada probeta.

Tabla 5.1: Resumen de módulos de elasticidad y rigidez para cada probeta

Milímetros de Empotramiento	Probeta	Largo Inicial milímetros	Ebarra Mpa
200	P1 (Fibra)	330	5556,21
50	P2 (Fibra)	560	11258,24
100	P3 (Fibra)	515	14309,275
50	P4 (Fibra)	550	10028,7
200	P5 (Fibra)	415	16881,37
200	P6 (PET)	415	17852,055
200	P7 (Acero)	413	18259,969
100	P8 (PET)	570	18714,81
100	P9 (Acero)	515	18941,185
50	P10 (PET)	565	11077,955
150	P11(Fibra)	470	15715,299
150	P12(Acero)	470	15715,897
150	P13(PET)	460	9676,831
150	P14(Fibra)	460	5428,412

Existe una variabilidad en los datos que puede corresponder tanto a variaciones en las barras durante la construcción de las mismas, o al hecho de considerar un módulo de elasticidad combinado entre la barra que está libre, más el efecto que produce la sección de barra embebida en el hormigón. Independiente de lo anterior y descartando las barras de distinto largo, probetas 1 y 4, se calculan módulos de rigidez y cizalladura promedio:

$$E_{promedio} \cong 15000 [MPa]$$

Suponiendo el valor del módulo de elasticidad de la barra de fibra como el promedio de todas las barras ensayadas y usando como dato los valores de los módulos de elasticidad del cable de acero y cable PET se puede calcular el área equivalente de cada una de las barras compuestas. El resultado de este análisis nos indica que la barra con núcleo PET tiene un área equivalente a un 90% de la barra de fibra y la barra con núcleo de acero tiene un área equivalente de un 170% del área de fibra. Esto radica ya que el módulo de elasticidad del cable de acero es un orden de magnitud mayor que el de fibra y el módulo del cable de acero resulta un orden de magnitud menor que el de fibra. Observando los datos experimentales no existen mayores diferencias entre los módulos de las barras de diferentes núcleos con los datos actuales. Tampoco existe una tendencia marcada entre las barras de fibra, las barra con núcleo de acero y las barras con núcleo PET.

5.3. Comparación con resultados teóricos

Con el objetivo de poder comparar los resultados experimentales y estimar la distribución de tensiones de corte en función de la profundidad de empotramiento se realizó un análisis usando las fórmulas de Farmer (1975).

En primer lugar se caracterizó a partir de los ensayos experimentales un módulo de elasticidad en el rango elástico de las barras. Ante la falta de un valor entregado por el proveedor se usó un valor medio calculado como un promedio entre el módulo de la barra y el módulo de la sección embebida en el hormigón.

Luego a partir de la ficha técnica del proveedor se obtuvo el módulo de rigidez del puente adherente usado en los ensayos. Dadas las condiciones del ensayo resultó la configuración de anillo delgado de Farmer (1975) por lo que se usó la ecuación 2.4 para calcular la constante alfa.

Usando las siguientes condiciones de borde: en el extremo libre la tensión es la tensión de la barra y en el extremo embebido la tensión es cero, resulta el decaimiento exponencial de la ecuación 2.13 detallado en el capítulo 2.

Integrando la ecuación 13 en el largo de empotramiento resulta la ecuación 5.1, donde el corte total está en función del diámetro del perno, la tensión inicial y la constante alfa, de la ecuación 2.4, que depende de la relación entre los módulos de elasticidad y rigidez principalmente donde a es el radio de la barra.

$$\int_0^l \tau_x = \frac{a\sigma_0(1 - e^{-\alpha l})}{2} \quad (5.1)$$

Finalmente multiplicando esta fuerza por el perímetro de empotramiento constante en la longitud de empotramiento resulta la fuerza en la falla representada por la ecuación 5.2.

$$F_{falla} [MPa] = \pi a^2 \sigma_0 (1 - e^{-\alpha l}) \quad (5.2)$$

Los datos se resumen en la tabla 5.2

Tabla 5.2.: Resumen de datos según el análisis de las ecuaciones de Farmer (1975)

Probeta	σ_0 en la falla [Mpa]	$\int_0^l \frac{\tau_x}{\sigma_0}$	τ_x en el largo [Mpa/mm]	Tension de arranque [MPa]
P1 (fibra)	153,683	5,49999	845,255	153,683
P2 (fibra)	63,637	5,46638	347,864	63,248
P3 (fibra)	99,2629	5,49979	545,925	99,259
P4 (fibra)	86,432	5,46638	472,470	85,904
P5 (fibra)	152,433	5,49999	838,380	152,433
P6 (PET)	163,932	5,49999	901,624	163,932
P7 (acero)	115,475	5,49999	635,111	115,475
P8 (PET)	77,3967	5,49979	425,666	77,394
P9 (Acero)	109,2795	5,49979	601,014	109,275
P10 (PET)	91,002	5,46638	497,452	90,446
P11(Fibra)	212,388	5,49999	1168,132	212,388
P12(Acero)	225,142	5,49979	1238,234	225,133
P13(PET)	149,372	5,46638	816,524	148,459
P14(Fibra)	111,319	5,49999	612,253	111,319

En donde el valor σ_0 es el valor de la tensión de la barra en la falla, luego el valor de la integral es la integral de la ecuación 5.1 dividida por la tensión σ_0 . El valor de τ_x corresponde al valor de la ecuación 5.1 y la tensión de arranque corresponde al

resultado de la ecuación 5.1 multiplicado por el perímetro de empotramiento y dividido por el área neta de la barra.

Además se puede graficar la fuerza de corte en función de la profundidad para distintas tensiones de falla en el extremo libre como se observa en la figura 5.7

Suponiendo una falla entre la resina y el hormigón, es importante destacar que el valor de largo de transferencia óptimo dado por Farmer de la ecuación 15 resulta de 48 milímetros. Este parámetro es resultado de una relación entre el módulo de rigidez de la resina y el módulo de elasticidad de las barras. Por el mismo motivo la tensión de corte dividida por la tensión inicial, la tercera columna de la tabla 5.2, no varía en los distintos largo de empotramiento.

De forma análoga se analizó la ecuación 2.13 para determinar las tensiones de la barra a lo largo del empotramiento para distintos estados de cargas en el empotramiento y la tensión de corte calculada a partir de la tensión en la barra como se muestra en la figura 5.7. Para estos análisis se usó el valor promedio del módulo de elasticidad de todas las barras y se supone que la barra está en el rango lineal elástico.

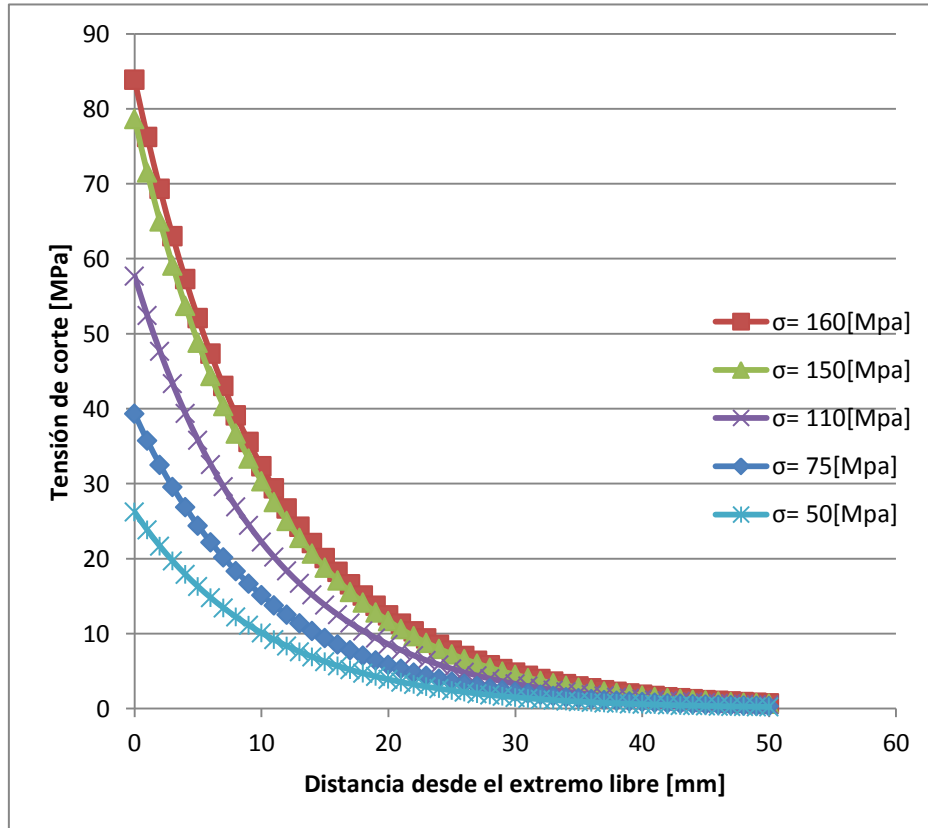


Figura 5.7: Gráfico de distribución teórica de tensiones de corte según las ecuaciones de Farmer (1975)

A pesar que las tensiones de corte son mayores que lo calculado a priori por los resultados experimentales, se observa que después de los primeros 3 cm de empotramiento, se alcanzan los valores observados de tensiones de corte para la falla del orden de 3 a 7 MPa.

6. CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

6.1. Resumen

A través de los ensayos realizados se determinó la resistencia última a la adherencia de cada una de las barras de fibra ensayadas bajo los parámetros antes descritos.

Se logró encontrar una relación entre la longitud de empotramiento y la resistencia de la barra a la tracción. Se determinó además un módulo de elasticidad de las barras de fibra, que se usó para generar un modelo teórico de la distribución de tensiones en el empotrado.

6.2. Conclusiones

La fuerza de adherencia en barras de acero, como se explicó anteriormente, está controlada por tres factores: adhesión química, fricción y los resaltos de las barras. En barras de acero es éste último factor el más importante, ya que es el concreto a compresión entre resaltos es el que produce una trabazón mecánica y se lleva la mayor parte de los esfuerzos. La diferencia importante con las barras de fibra es que éstas no tienen una alta resistencia al corte ya que están compuesta de un material frágil, por lo que los otros factores de resistencia al deslizamiento como lo son la fricción y la adhesión química empiezan a jugar un rol más importante.

En concordancia con los resultados experimentales, se puede validar la hipótesis de que los distintos núcleos de las barras no afectan de mayor manera la rigidez de las mismas, ya que el comportamiento de las barras con núcleo PET y con núcleo de acero no varió en relación al comportamiento y valores máximos obtenidos con las barras de sólo fibra. Además realizando un análisis de los resultados experimentales se observa que los módulos de elasticidad de cada una de las barras no difieren en mayor cantidad, ya que todos tienen el mismo orden de magnitud. Las disimilitudes se pueden atribuir a diferencias en el proceso constructivo o en algunas variaciones en los tiempos de fraguado. También existen variaciones entre las proporciones de la barra libre con la barra embebida en hormigón, lo que genera un módulo de elasticidad distinto.

Si observamos los ensayos con las condiciones más similares a las condiciones reales, es decir las probetas de 20 centímetros de empotramiento, se observaron masivas grietas en el hormigón. Esto se explica ya que el hormigón es la zona de mayor debilidad para esa configuración. Se espera que en condiciones reales los valores de las tensiones de adherencias aumenten a medida que el macizo rocoso en el cual sean instalados tenga una mayor resistencia.

En relación a la tensión de corte en función de la profundidad de empotramiento, que es el objetivo de este estudio, se observa a través de los resultados experimentales

una relación exponencial decreciente con la profundidad de empotramiento. Esto se puede explicar porque la distribución de tensiones dentro de la barra no es uniforme, sino que llega un valor máximo y luego decae exponencialmente con la profundidad. Para una relación más exacta se requiere el ensayo de más probetas. Los resultados validan entonces el análisis teórico antes expuesto ya que las menores longitudes de empotramiento presentan las mayores tensiones de corte, que en estos primeros centímetros es donde la distribución real es mayor. De forma análoga, las mayores longitudes de empotramiento presentaron menores tensiones de corte pues la distribución de tensiones teóricas es cercana a cero para longitudes mayores.

Los largos de transferencia teóricos de las barras de fibras calculadas a partir de las fórmulas de Farmer (1975) son mucho más bajos que la de las barras de acero. Las barras de fibras presentan ante la evidencia experimental un módulo de elasticidad mucho menor al de las barras de acero. Esto conlleva a que en la interfaz fibra epoxi exista una menor deformación y una mayor transferencia de carga al hormigón, por lo que se alcanzan grandes tensiones de corte en pequeños largos de empotramiento. Esto nos lleva finalmente, a que los largos de transferencia óptimos sean similares y cercanos a los 5 centímetros de acuerdo a las fórmulas teóricas. Este valor puede ser más preciso a medida que los módulos de elasticidad del material sean más exactos.

A pesar que las regresiones hechas a partir de los resultados experimentales nos entregan valores de R del orden de 0,6 y 0,8, se puede generar algún tipo de código con un factor de seguridad. Hecho este ejercicio, se entrega una relación entre las longitudes de empotramiento y generando una regresión con una ecuación exponencial decreciente, se entrega un valor de R igual a 0,85 como se denotó en la figura 5.3.

Si consideramos la resistencia a la falla en MPa como la tensión dividido la longitud de empotramiento resulta que las probetas de 20 centímetros de empotramiento tienen las menores solicitaciones por centímetro. Tomando el menor de estos valores es decir la probeta que falló a las 115 MPa y la dividimos por la longitud de empotramiento resulta una resistencia de 5,57 MPa por centímetro de empotramiento. Tomando un supuesto conservador que las barras resisten 22 toneladas, un valor cercano a las 570 MPa, resulta una longitud de empotramiento de 98 centímetros. Es decir con esa longitud de empotramiento el sistema de anclaje no fallará por adherencia.

6.3. Limitaciones

La mayor limitación se asocia al número de probetas ensayadas. Se espera más adelante poder ensayar probetas con largos de empotramiento distintos a los ya ensayados y homologar de la mejor manera la experiencia de otras publicaciones donde el número de probetas es cercano a las 40 o 50 probetas. También es necesario para la validación de los resultados afinar de mejor manera el módulo de elasticidad de cada barra.

Finalmente será interesante validar el modelo de distribución de tensiones de Farmer mediante una barra instrumentada y verificar los valores máximos con los valores de falla observados experimentalmente. También será interesante analizar un modelo numérico para ahondar en la falla y realizar variaciones con los módulos de rigidez y elasticidad de tanto la barra, el puente adherente y la roca

BIBLIOGRAFÍA:

- A. Nanni, e. (1993). Fiber Reinforced Plastic (GFRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Application. *Developments en Civil Engineering*, Elsevier, 450 pp.
- Barbosa, & Sánchez. (2006). Analysis of the Bond Behaviour of the Brazilian Steel by Theory of Plasticity. *Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural*. Brazil 2006
- Benmokrane, B., Chaallal, O., & Tighiouart, B. (1996). Bond Strength and Load Distribution of composite GFRP Reinforcing Bars in Concrete. *ACI Materials Journal Title n° 93-M28*, 246-252 pp.
- Chaallal, O., Benmokrane, B., & Aïtcin, P. C. (1991). Physical and Mechanical Properties of GFRP Reinforcing Bars. *Technical Report, Civil Engineering Department, Université de Sherbrooke*, 200p.
- Comité Euro-International du Béton_Rile, C. F. (1983). Bond Test Reinforcement Steel – Pull Out Test. *Georgi Publishing Company*.
- Standard Test Method for Rock Bolt Anchor Pull Test (1998). D4435-84, N. A.
- Farmer. (1975). Stress Distribution along a Resin Grouted Rock Anchor . *Int Journal Rock Mechanics and Minerals Sci & Geomech. Vol 12.*, 347-351 pp.
- Gomes, M. T., & Filho, S. S. (2013). Investigation of Bond Stress in Pull Out Specimens with High Strength Concrete. *Global Journal of Researches in Engineering Civil and Structural Engineering Volume 13 Issue 3 Version 1.0*.
- Martins, P. C. (1989). Modélisation du Comportement jusqu'à la Rupture de Poutres en Béton à Précontrainte Extérieure ou Mixte. Thèse de D. Sc. *Ecole Centrale, Paris, France*.
- Neale, K. W., & P. Labossière. (1992). Advanced Composite Materials on Bridges and Structures. *1st International Conference, Canadian Society for Civil Engineering*, (pág. 700 pp.). Sherbrooke, Quebec.
- Saadatmanesh, H. (1994). Fiber Composites for New and Existing Structures. *ACI Structural Journal V. 91, No. 3*, pp. 346-354.

Tepfers, R. (1979). Craking of Concrete cover alt_xong Anchored Deformed Reinforced Bars. *Magazine of Concrete Research*, v. 31, n.106, 3-12 pp.