



Escuela de Caminos

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
UPC BARCELONATECH

Estudio de la adherencia de armaduras de polímeros reforzados con fibras con resinas termoplásticas

Trabajo realizado por:
Andrea Moncayo Tello

Dirigido por:
Dra. Eva Oller
Dr. Nikola Tomic

Máster en:
Ingeniería Estructural y de la Construcción

Barcelona, Mayo 2021

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MASTER

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a mi familia, Mireya, María Paz y Pablo Joaquín, por el apoyo incondicional en todos los proyectos que he emprendido y me han transmitido valores como el esfuerzo, la constancia y la perseverancia diaria.

A mi novio Mauro, sus palabras de apoyo y el amor que me ha brindado siempre ha sido fundamental para lograr esta meta. Gracias por ser mi principal pilar en este y otros eventos importantes en mi vida.

A la Universidad Politécnica de Catalunya y en especial a mis tutores de tesis, Doctora Eva Oller y Doctor Nikola Tomic, por sus enseñanzas, dedicación, paciencia y conocimiento compartido.

Doy las gracias al personal del Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales "Lluís Agulló" por su colaboración a lo largo de la campaña experimental, por su buena disposición y amabilidad en todo momento.

A mis amigos del master, por todos los momentos vividos y compartidos a lo largo de esta experiencia.

RESUMEN

Aunque las barras de acero siguen siendo el tipo de armadura de hormigón más utilizado en la industria de la construcción, las estructuras expuestas a entornos altamente agresivos, como el agua de mar han demostrado que las armaduras de acero aceleran el deterioro del hormigón debido a la corrosión expansiva. La creciente preocupación por la durabilidad de las estructuras de hormigón armado, ha alentado a los investigadores a buscar alternativas de armado cuyas propiedades fisicoquímicas superen a las de las barras de acero convencionales. El uso de barras de polímeros reforzados con fibra (FRP) ha ido ganando popularidad en la comunidad de ingeniería civil por su naturaleza no corrosiva. Se han implementado varias aplicaciones estructurales de las barras de FRP en las áreas de ambiente severo y hasta ahora han mostrado un desempeño satisfactorio en servicio [1]. Las barras FRP disponibles en el mercado son barras con resina termoestable, y recientemente se están fabricando barras con resinas termoplásticas que poseen ciertas ventajas, por ejemplo, los materiales termoplásticos tienen un mayor potencial de reciclaje, ya que la mayoría de los termoplásticos se pueden fundir y remodelar después de su uso.

El buen desempeño del hormigón armado requiere una adherencia adecuada entre el material de refuerzo y el hormigón para la correcta transmisión de carga, e influye en la fisuración, afectando a la separación entre fisuras y el ancho de fisura. Aunque la adherencia de las barras de acero en el hormigón ha sido establecida y abordada claramente en varios códigos de diseño, el comportamiento adherente de las barras de FRP al hormigón varía al de barras de acero convencionales.

Este trabajo investiga el comportamiento de adherencia de las barras de polímero reforzado con fibra (FRP) en elementos de hormigón, mediante el análisis de la influencia de ciertas variables en el comportamiento adherente de las barras FRP, como son el diámetro de las barras, el tipo de resina y la trabajabilidad del hormigón. Para ello, se ha llevado a cabo un programa experimental de ensayos pull-out con 32 probetas con barras FRP con resina termoestable (viniléster) de 10mm y 13mm de diámetro, barras FRP con resina termoplástica de 10mm de diámetro y barras de acero de 10mm de diámetro; embebidas en probetas de hormigón autocompactante de resistencia a la compresión 40MPa y de hormigón convencional con la misma resistencia a compresión. Previamente a la realización de los ensayos experimentales de pull-out, se han realizado 12 ensayos de tracción longitudinal de las distintas barras para caracterizar sus propiedades.

Todas las probetas fallaron por falla de extracción, ya que el cubo de hormigón proporcionó un confinamiento adecuado a las barras para permitirles alcanzar su máxima resistencia de adherencia.

Los resultados obtenidos muestran que los diferentes tratamientos superficiales de las barras FRP, que a diferencia del acero no se encuentran estandarizados, movilizan distintos mecanismos adherentes y modifican el comportamiento adherente de las barras FRP.

La influencia de las características de la armadura de refuerzo (tipo de resina y diámetro de la barra) y la trabajabilidad del hormigón circundante sobre el comportamiento adherente, se refleja en las curvas Tensión de adherencia media-Deslizamiento obtenidas.

Palabras clave: Adherencia, Barras FRP, resina termoplástica, resina termoestable, ensayo pull-out.

ABSTRACT

Although steel bars are still the most used type of concrete reinforcement in the construction industry, structures exposed to highly aggressive environments such as seawater have shown that steel reinforcement accelerates the deterioration of concrete due to expansive corrosion. The growing concern about the durability of reinforced concrete structures has encouraged researchers to seek reinforcement alternatives whose physicochemical properties exceed those of conventional steel bars. The use of fiber reinforced polymer (FRP) bars has been gaining popularity in the civil engineering community for its non-corrosive nature. Various structural applications of FRP bars have been implemented in severe environment areas and have so far shown satisfactory performance in service [1]. The FRP bars available on the market are bars with thermosetting resin, and recently bars are being manufactured with thermoplastic resins that have certain advantages, for example, thermoplastic materials have a higher recycling potential, since most thermoplastics can be melted and reshape after use.

The good performance of reinforced concrete requires adequate bond between the reinforcing material and the concrete for correct load transmission, and influences cracking, affecting the gap between cracks and the crack width. Although the bond of steel bars to concrete has been clearly established and addressed in various design codes, the bond behavior of FRP bars to concrete varies of the bond behavior of the conventional steel bars.

This work investigates the bond behavior of fiber-reinforced polymer (FRP) bars in concrete elements, by analyzing the influence of certain parameters on the adherence behavior of FRP bars, such as the diameter of the bars, the type of resin and the workability of the concrete. For this, an experimental program has been carried out, with 32 test pieces tested to pull-out with FRP bars with thermosetting resin (vinyl ester) of 10mm and 13mm of diameter, FRP bars with thermoplastic resin of 10mm of diameter and steel bars of 10mm of diameter; embedded in specimens of self-compacting concrete with a compressive strength of 40MPa and conventional concrete with a compressive strength of 40MPa. 12 longitudinal traction tests were carried out on the different bars.

The results obtained show that the different surface treatments of the FRP bars, which unlike steel are not standardized, mobilize different bond mechanisms and modify the bond behavior of the FRP bars.

The influence of the characteristics of the reinforcement (type of resin and diameter of the bar) and the workability of the surrounding concrete on the bonding behavior, is reflected in the bond stress-slip curves obtained.

Keywords: Bond behaviour, FRP bars, thermoplastic resin, thermosetting resin, pull-out test.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT.....	IV
ÍNDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 OBJETIVOS GENERALES	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO	3
2.1 BARRAS DE POLÍMEROS REFORZADAS CON FIBRAS	3
2.1.1 COMPONENTES DE LOS FRP.....	4
2.1.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS BARRAS FRP	8
2.2 ADHERENCIA DE BARRAS DE REFUERZO FRP AL HORMIGÓN.....	10
2.2.1 ENSAYO PULL-OUT	10
2.2.2 INTERACCIÓN HORMIGÓN-BARRA DE ARMADURA DE FRP	13
2.2.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ADHERENCIA	14
3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	26
3.1 PARÁMETROS EN ESTUDIO	26
3.2 MATERIALES.....	27
3.2.1 BARRAS FRP.....	27
3.2.1 HORMIGÓN	28
3.3 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	30
3.3.1 CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN.....	30
3.3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS BARRAS FRP	34
3.4 PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS DE PULLOUT.....	44
3.4.1 PREPARACIÓN DEL MOLDE	44
3.4.2 PREPARACIÓN DE LA BARRA.....	44
3.4.1 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS	45
3.5 CONFIGURACIÓN DE LOS ENSAYOS	51

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LOS ENSAYOS PULL-OUT	54
5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LOS ENSAYOS PULL-OUT	60
5.1 RELACIÓN TENSIÓN DE ADHERENCIA MEDIA-DESLIZAMIENTO	60
5.2 TENSIÓN DE ADHERENCIA MÁXIMA	65
5.2.1 INFLUENCIA TIPO DE RESINA	65
5.2.2 INFLUENCIA DIÁMETRO DE LAS BARRAS	68
5.2.3 INFLUENCIA DE LA TRABAJABILIDAD DEL HORMIGÓN	69
6 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	70
6.1 CONCLUSIONES	70
6.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	72
7 REFERENCIAS.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Tipos de barras FRP [1]	3
Figura 2.2. Esquema simplificado del comportamiento de diferentes tipos de fibra y acero convencional [7]	5
Figura 2.3. Esfuerzo-deformación para barras FRP y barras de acero [13]	9
Figura 2.4. Muestra de ensayo de adherencia perpendicular a la dirección del vertido del hormigón	11
Figura 2.5. Muestra de ensayo de adherencia paralelo a la dirección del vertido del hormigón	12
Figura 2.6. Modelo típico del ensayo pull-out y posibles resultados típicos [19].....	12
Figura 2.7 Curva típica Esfuerzo de adherencia medio vs Deslizamiento extremo cargado [11].	13
Figura 2.8 Formación del anillo de tracción en el hormigón equilibrando las fuerzas de adherencia [11].	14
Figura 2.9 (a) Barras GFRP ensayadas, (b) Resultado de los ensayos experimentales [19].	15
Figura 2.10 a) Acabado superficial de las barras (R1-R7), b) Curvas tensión de adherencia media-deslizamiento para probetas con CFRP (R1 y R3) [23].	16
Figura 2.11 Resistencia de adherencia según hormigón C1 o C2 [23].	17
Figura 2.12 Barras de GFRP utilizadas en [27].	18
Figura 2.13 Espécimen de ensayos en [27].	19
Figura 2.14 (a)Falla de adherencia interfacial en barras GFRP, (b) Falla en interfaz 1, (c) Falla en interfaz 2	20
Figura 2.15 Barras de CFRP y dimensiones de los resaltos en mm utilizados en [26].	21
Figura 2.16 Curva adherencia-deslizamiento de barras de GFRP con diferentes geometrías de resaltos. $d = 8 \text{ mm}$ [29].	22
Figura 2.17 Ensayo pull-out a) tradicional y b) modificado usados en [20].	23
Figura 2.18 Resultados de ensayos experimentales en (a) barras de acero y GFRP con resaltos. (b)Barras enarenadas y enrolladas en espiral	24
Figura 3.1 Barras FRP (A, B, C) y barra de acero (D) ensayadas.	27
Figura 3.2 Nomenclatura para probetas en estudio	29
Figura 3.3 Pulido de las probetas previo el ensayo de compresión	30
Figura 3.4 Ensayo a compresión del hormigón.....	31
Figura 3.5 Ensayo a tracción indirecta del hormigón	32
Figura 3.6 Protección de las barras FRP para ensayo a tracción	35
Figura 3.7 Extensómetro y galgas extensiométricas utilizadas en los ensayos de tracción	36
Figura 3.8 Ensayo a tracción de las barras a) ST-10 y b) VE-10.....	37
Figura 3.9 Desprendimiento de la resina en los extremos de las barras FRP	38
Figura 3.10 Falla de las barras FRP por desprendimiento de la resina	38
Figura 3.11 Adhesivo X60 utilizado para protección de los extremos de las barras FRP.....	39
Figura 3.12. Curva esfuerzo-deformación barras VE-10mm.....	39
Figura 3.13 Curva esfuerzo-deformación barras VE-13mm.....	40
Figura 3.14 Curva esfuerzo-deformación barras TP-13mm.....	40
Figura 3.15 Curva esfuerzo-deformación barras ST-10mm	41
Figura 3.16 Barras después del ensayo a tracción.....	43
Figura 3.17 Preparación de las probetas	44
Figura 3.18 Probeta del ensayo pull-out.....	45
Figura 3.19 Fabricación del hormigón	46
Figura 3.20 Ensayo de extensión de flujo	46
Figura 3.21 Ensayo de asentamiento con el cono de Abrams	47
Figura 3.22 Compactación de las probetas con hormigón convencional C40	48
Figura 3.23 Probetas luego del hormigonado	49
Figura 3.24 Probetas en cámara de curado	49
Figura 3.25 Colocación de la protección en el extremo cargado de la barra FRP	50

Figura 3.26 Protección de la barra por el aplastamiento de las mordazas de la máquina durante el ensayo.	51
Figura 3.27 Configuración estándar para todos los ensayos pull-out.....	52
Figura 3.28. Colocación del LVDT en el extremo descargado de la barra.....	53
Figura 4.1 Barras ensayadas a pull-out con hormigón SCC40.	56
Figura 4.2 Barras ensayadas a pull-out con hormigón C40.	57
Figura 4.3 Desprendimiento de la resina en las abrazaderas de las barras.....	58
Figura 4.4 Verificación del deslizamiento del tubo PVC dentro de la probeta 3-ST-10-C40.....	59
Figura 5.1 Curva Tensión de adherencia media-Deslizamiento extremo libre barras VE-10-SCC40	60
Figura 5.2 Curva Tensión de adherencia media-Deslizamiento extremo libre barras VE-10-C40	61
Figura 5.3 Curva Tensión de adherencia media-Deslizamiento extremo libre barras VE-13-SCC40	61
Figura 5.4 Curva Tensión de adherencia media-Deslizamiento extremo libre barras VE-13-C40	62
Figura 5.5 Curva Tensión de adherencia media-Deslizamiento extremo libre barras TP-13-SCC40	63
Figura 5.6 Curva Tensión de adherencia media-Deslizamiento extremo libre barras TP-13-C40	63
Figura 5.7 Curva Tensión de adherencia media-Deslizamiento extremo libre barras ST-10-SCC40.....	64
Figura 5.8 Curva Tensión de adherencia media-Deslizamiento extremo libre barras ST-10-C40.....	65
Figura 5.9 Comparación de las curvas Tensión de adherencia-Deslizamiento extremo libre barras a) TP-13-SCC40 y VE-13-SCC40 y b) TP-13-C40 y VE-13-C40.....	66
Figura 5.10 Comparación de las curvas Tensión de adherencia-Deslizamiento extremo libre a) barras VE-10-SCC40 y ST-10-SCC40 y b) barras VE-10-C40 y ST-10-C40	67
Figura 5.11 Distribución de las tensiones normales en la sección transversal de una barra FRP	68
Figura 5.12 Comparación de la Tensión de adherencia máxima entre las barras VE-10 y V3-13.....	69
Figura 6.1 Curva Tensión de adherencia-deslizamiento extremo cargado.....	72
Figura 6.2 Curvas Tensión de adherencia-deslizamiento extremo cargado y deslizamiento extremo libre en barras de CFRP [38].	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Propiedades de Fibras de carbono, vidrio y aramida.....	6
Tabla 2.2 Propiedades matrices termoestables [5].	7
Tabla 2.3 Propiedades matrices termoplásticas [5].....	8
Tabla 2.4 Conclusiones de diferentes autores sobre los factores que influyen en la adherencia de barras FRP.....	25
Tabla 3.1 Características de las barras ensayadas.	27
Tabla 3.2 Dosificación del hormigón SCC40.....	28
Tabla 3.3 Dosificación del hormigón C40.	28
Tabla 3.4 Propiedades mecánicas del hormigón CSS40 a los 14 días.	33
Tabla 3.5 Propiedades mecánicas del hormigón C40 a los 14 días.....	34
Tabla 3.6 propiedades técnicas de la resina HILTI HIT-RE-500 V4.....	35
Tabla 3.7 Especificaciones adhesivo X60.....	39
Tabla 3.8 Propiedades de tracción longitudinal de las barras	42
Tabla 4.1 Resultados de probetas con hormigón CSS40	55
Tabla 4.2 Resultados de probetas con hormigón C40	55
Tabla 5.1 Comparación de la adherencia máxima de las barras en hormigón autocompactante y hormigón convencional.....	69

1 INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En la gran mayoría de aplicaciones de hormigón armado, las barras de acero son el material más utilizado en el mundo, por su eficacia y rentabilidad. Sin embargo, en ciertos entornos agresivos, la corrosión del acero genera problemas de durabilidad, y trae como resultado una importante penalización económica por reparación y rehabilitación. Con el paso del tiempo, la industria de la construcción ha desarrollado nuevas técnicas, como barras de refuerzo revestidas con epoxi, membranas sintéticas o protección catódica, para inhibir la corrosión, pero se desconoce su fiabilidad a largo plazo, agrega costos adicionales o complica la construcción. Recientemente, las propiedades no corrosivas de las barras de polímero reforzado con fibra han hecho que estas barras reciban mayor atención y se consideren un material de refuerzo alternativo.

En la actualidad, las armaduras FRP existentes en el mercado son con resinas termoestables. Recientemente, se están fabricando barras con resinas termoplásticas, las cuales son únicas en su capacidad para ser post formadas. La composición termoplástica permite la fabricación de curvas en el producto mucho después de que haya salido de la línea de pultrusión. Además, los productos termoplásticos se pueden soldar entre sí mediante fusión localizada de los dos elementos que se van a unir. Esto podría hacerse mediante métodos como el calentamiento por contacto tradicional o con técnicas ultrasónicas o de radiofrecuencia. La capacidad de soldar térmicamente puede permitir la producción de mallas y rejillas de refuerzo livianas que pueden reducir los costos de colocación del refuerzo en el proyecto [2].

Los códigos existentes para las estructuras de hormigón armado con barras de acero no son lo suficientemente flexibles para adaptarse directamente al diseño de estructuras de hormigón armado con barras FRP. Motivo por el cual, para que los materiales FRP sean ampliamente aceptados en la industria de la construcción, se debe investigar todos los aspectos de su comportamiento estructural. Actualmente se está llevando a cabo una gran cantidad de investigación en todo el mundo sobre estructuras reforzadas con barras FRP, con el objetivo de desarrollar pautas de diseño específicas para éstas [3].

Uno de los aspectos fundamentales del comportamiento estructural es la adherencia, ya que es la clave para la "cooperación" entre las barras de refuerzo y el hormigón; se requiere un nivel adecuado de adherencia entre el refuerzo y el hormigón para establecer y mantener la interacción compuesta entre la armadura y el hormigón circundante mediante la transferencia de carga de uno a otro. Por lo tanto, la calidad de la adherencia tiene una influencia importante en la formación de fisuras y, consecuentemente, afecta la distancia entre fisuras y el ancho de éstas [4]. La adherencia de las armaduras de acero con el hormigón se ha investigado ampliamente en los últimos 40 años y se ha publicado una gran cantidad de trabajo experimental y analítico sobre este tema. Sin embargo, los códigos de diseño no incorporan ninguna disposición para el uso de materiales de refuerzo alternativos distintos del acero.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de este estudio es investigar y comprender los diversos aspectos del comportamiento adherente de las barras de refuerzo FRP con resina termoplástica y resina termoestable en elementos de hormigón mediante ensayos pull-out, y llegar a algunas conclusiones que ayudarán al desarrollo de pautas de diseño para el uso de refuerzo de FRP.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para lograr el objetivo principal se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Revisar la literatura orientada en el comportamiento adherente entre las barras FRP y el hormigón, e identificar los diversos parámetros que influyen en las características de la adherencia, y diferentes modelos analíticos que representen el comportamiento adherente.
2. Investigar experimentalmente mediante ensayos pull-out los principales parámetros que afectan el comportamiento de la adherencia de barras de fibra de vidrio con resina termoestable o termoplástica, y compararlas con armaduras convencionales de acero:
 - Material de refuerzo (FRP o acero).
 - Tipo de resina (termoestable o termoplástica).
 - Diámetro de la barra FRP.
 - Trabajabilidad del hormigón.
3. Con base en los resultados experimentales, definir la influencia de las diferentes variables tanto en el desarrollo de la adherencia como en el modo de falla adherente de las muestras de FRP para los ensayos pull-out.

2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

En este capítulo, se presenta una breve descripción de los polímeros reforzados con fibra (FRP), sus componentes constituyentes y sus propiedades mecánicas. Además, se proporciona una revisión de la literatura disponible sobre la adherencia entre barras de refuerzo FRP y el hormigón: los mecanismos de adherencia existentes y los factores que influyen en la adherencia. Finalmente, se presenta una recopilación de los resultados existentes en la literatura sobre la obtención de la relación tensión de adherencia-deslizamiento con la ayuda de ensayos pull-out de barras de FRP embebidas en hormigón.

2.1 BARRAS DE POLÍMEROS REFORZADAS CON FIBRAS

A lo largo de los años, se han investigado diferentes soluciones de refuerzo en entornos corrosivos agresivos, como revestimientos galvanizados, membranas sintéticas y revestimientos epoxi de hormigón impregnado con polímero [5]. Finalmente, las barras de refuerzo FRP fueron consideradas como una alternativa a las barras de acero para estructuras sometidas a una exposición ambiental severa, y en la década de 1980 se convirtieron en una solución viable y comercialmente disponible como refuerzo interno para estructuras de hormigón. Las barras de FRP pueden presentar diversos acabados superficiales como se observa en la Figura 2.1.



Figura 2.1 Tipos de barras FRP [1]

Se considera a los polímeros reforzados con fibra un material compuesto, es decir, un material formado por dos o más partes, en este caso, formado por fibras continuas impregnadas en una resina o matriz polimérica, que juntas alcanzan prestaciones superiores a las propiedades de los materiales individuales [6].

Las fibras proporcionan resistencia y rigidez, mientras que la matriz actúa como aglutinante que conserva unidas las fibras y las mantiene rectas; desempeña un papel de capa protectora que protege a las fibras

de la abrasión y la corrosión; y facilita la transferencia de cargas y la distribución de tensiones entre las fibras [6] [7] [8].

Los FRP se clasifican según el tipo de fibra utilizada (según sus siglas en inglés), por ejemplo: CFRP que contiene fibras de carbono, GFRP que contiene fibras de vidrio, AFRP que contiene fibras de aramida y BFRP que contiene fibras de balasto. El uso en aumento de los materiales compuestos de FRP en el campo de la construcción se da gracias a que es un material que puede ser modelado en casi todas las formas necesarias para su uso estructural, tales como barras, cables, perfiles, paneles, láminas y tejidos mediante el uso de diferentes técnicas conocidas como: pultrusión, moldeo o por moldeo in-situ. Las fibras pueden ser colocadas en una dirección, donde el compuesto es unidireccional o en muchas direcciones y el compuesto se convierte en bi o multidireccional. En la reparación de estructuras es más común el uso de compuestos unidireccionales prefabricados de CFRP con resina epoxi, mientras que en la fabricación de armaduras, paneles o perfiles se emplea con mayor frecuencia las fibras de vidrio con poliéster o viniléster [6].

2.1.1 COMPONENTES DE LOS FRP

A continuación, se presenta una breve descripción de los componentes constituyentes de los polímeros reforzados con fibras.

2.1.1.1 Fibras

Las fibras son las responsables de las buenas propiedades estructurales del composite. Principalmente, consiguen que el material compuesto presente elevadas propiedades específicas de rigidez y resistencia en su dirección longitudinal. Son más resistentes que el material por el que están conformadas, debido a la orientación preferencial de las moléculas a lo largo de la dirección de la fibra.

Para un desempeño estructural adecuado, las fibras deben cumplir ciertos requerimientos, como presentar una alta resistencia última, una conveniente elongación en tracción, baja variación de resistencia entre fibras individuales, mantener estables sus propiedades durante su manejo y fabricación, uniformidad del diámetro y superficie de la fibra, alta tenacidad, durabilidad, disponibilidad de diversas formas y un costo aceptable [9].

Existen muchos tipos de fibras, pero las más utilizadas en aplicaciones de ingeniería civil son las fibras de carbono, aramida, vidrio y basalto. Todas las fibras tienen generalmente mayor capacidad de resistencia que el acero ordinario y son elásticas hasta su falla. En la figura 2.2 se presenta un esquema simplificado del comportamiento de varios tipos de fibras, de una barra de acero ordinaria y un tendón de acero. Se puede apreciar que las propiedades más importantes que difieren entre los tipos de fibra son la rigidez y la deformación por tracción.

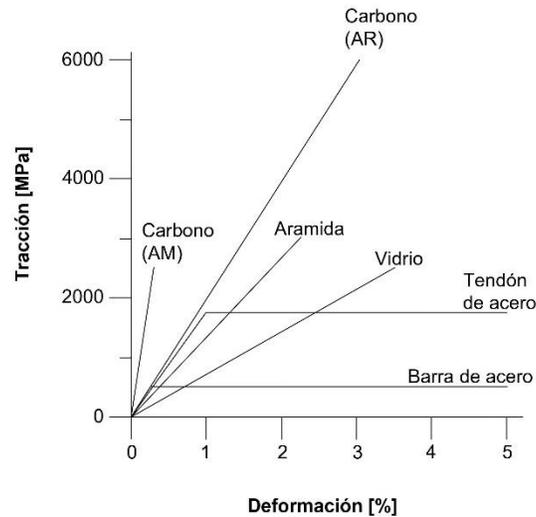


Figura 2.2. Esquema simplificado del comportamiento de diferentes tipos de fibra y acero convencional [7]

Fibras de carbono:

Las fibras de carbono poseen mayor resistencia y rigidez que otros tipos comunes de fibras y no se ven afectadas por los rayos ultravioletas o los materiales alcalinos. Su módulo de tracción y su resistencia son estables a medida que aumenta la temperatura; también son muy resistentes a factores ambientales agresivos. Estas fibras se comportan elásticamente y fallan de manera frágil. Sin embargo, su resistencia al impacto es menor que las fibras de aramida y vidrio. Y la desventaja más importante, es su alto costo causado por el elevado precio de las materias primas y el largo proceso de carbonización y grafitización, lo que genera un gran obstáculo para su uso en aplicaciones de ingeniería civil. No obstante, se debe mencionar que, dado que el consumo de este material ha aumentado considerablemente y la calidad ha mejorado, el coste se ha reducido significativamente [10].

Fibras de aramida:

Todas las fibras de aramida presentan bajo peso unitario y una alta resistencia, asimismo, muestran un buen rendimiento bajo impacto. Estas fibras son más resistentes que las fibras de vidrio y más frágiles que las fibras de carbono [11]. Las fibras de aramida poseen una buena resistencia a la abrasión, la descomposición química y la desintegración térmica [12]. Sin embargo, las fibras de aramida son débiles en compresión y vulnerables a los rayos ultravioleta, siendo propensas a dañarse cuando no están protegidas a la luz del sol, por lo cual, no son ampliamente utilizadas en ingeniería civil [12].

Fibras de vidrio:

La fibra de vidrio está hecha principalmente de arena de sílice. Los tipos de vidrio más comunes son eléctricos (vidrio E), de alta resistencia (vidrio S) y resistente a los álcalis (vidrio AR) [5].

El vidrio E presenta altas propiedades de aislamiento eléctrico, baja susceptibilidad a la humedad y altas propiedades mecánicas. El vidrio S tiene mayor resistencia a la tracción y módulo, pero su mayor costo lo

hace menos popular que el vidrio E. Las fibras de vidrio AR son altamente resistentes al ataque de álcalis en matrices a base de cemento, pero, por el momento, no se dispone de tamaños compatibles con resinas termoestables que se utilizan comúnmente para barras de FRP [5].

Las fibras de vidrio poseen gran resistencia, pero es el bajo costo lo que hace que los polímeros reforzados con fibras de vidrio (GFRP) sean el refuerzo de FRP más popular en aplicaciones de ingeniería civil.

Una de las desventajas de las fibras de vidrio es su módulo relativamente bajo en comparación con las fibras de carbono o aramida [11]. Aparte de su uso en el campo estructural y en la industria aeroespacial, las fibras de vidrio se utilizan en la fabricación de aislantes térmicos, cascos de barcos, piezas ligeras de automóviles y neumáticos de caucho.

La tabla 2.1 presenta un resumen de las propiedades de las fibras descritas anteriormente.

	Resistencia a tracción	Módulo	Resistencia álcalis	Resistencia al impacto	Conductividad eléctrica	Costo
Fibra de Carbono	MUY ALTA	ALTO	ALTO	BUENA	ALTA	MUY ALTO
Fibra de Vidrio						
Vidrio E	MEDIA	MEDIA	ALTO	ALTA	ALTA	MEDIO
Vidrio S	ALTA	ALTO	ALTO	ALTA	MEDIA	MEDIO
Vidrio AR	BUENA	MEDIA	MUY ALTO	ALTA	MEDIA	MEDIO
Fibra de Aramida	ALTA	ALTO	ALTO	MUY ALTA	NULA	ALTO

Tabla 2.1 Propiedades de Fibras de carbono, vidrio y aramida

2.1.1.2 Matriz polimérica

Generalmente, se conoce con el nombre de resina durante su fabricación y con el nombre de matriz una vez que el polímero ha sido curado. La matriz generalmente representa entre el 30 y 60% del volumen del compuesto polimérico [9].

En un material compuesto polimérico, la matriz puede considerarse tanto un componente estructural, como de protección. Tiene como propósitos permitir la transferencia de cargas entre fibras, brindar la configuración geométrica adecuada para que el material compuesto se comporte como un único sólido y protege a las fibras contra daños ambientales y mecánicos. Por lo tanto, la elección de la matriz es un parámetro muy importante en el diseño de un material compuesto y afectará tanto las propiedades mecánicas como físicas del producto final.

Las matrices poliméricas son de dos tipos, las resinas termoestables y las resinas termoplásticas. Las resinas termoestables son polímeros formados de manera irreversible a partir de material con baja viscosidad y bajo peso molecular. Estos polímeros presentan una fuerte unión tanto con las moléculas como entre las moléculas. Si se calientan después de su curado, no se funden y conservan su forma hasta que comiencen a descomponerse térmicamente a alta temperatura [9].

Las resinas termoplásticas se ablandan cuando se calientan a temperaturas elevadas y se solidifican nuevamente cuando se enfrían, incluso sometándose a valores de temperatura mayores a su temperatura de formación [13].

Resinas termoestables:

Las resinas termoestables son comúnmente utilizadas para aplicaciones estructurales, siendo las más comunes el epoxi, poliéster y viniléster; se producen utilizando una resina líquida con un agente de curado y pequeñas proporciones de otros materiales [14]. Estas resinas, experimentan una alteración química permanente cuando se curan, y no pueden volver a su estado líquido original mediante el uso de calor [13].

Las resinas termoestables presentan una viscosidad inicial baja, lo que permite incorporar fracciones de alto volumen de fibra y, al mismo tiempo, conservar una buena humectación de la fibra. Son fáciles de procesar y de bajo costo. Sin embargo, tienen una vida útil limitada y una baja resistencia al impacto.

La tabla 2.2 presenta las propiedades de las resinas termoestables normalmente usadas.

Propiedad	Matriz		
	Poliéster	Epoxi	Viniléster
Densidad (kg/m ³)	1200–1400	1200–1400	1150–1350
Resistencia a tracción (MPa)	34.50–104	55–130	73–81
Módulo de elasticidad (GPa)	2.10–3.45	2.75–4.10	3.00–3.50
Coefficiente de Poisson	0.35–0.39	0.38–0.40	0.36–0.39
Coefficiente de expansión térmica (10 ⁻⁶ /°C)	55–100	45–65	50–75
Contenido de humedad (%)	0.15–0.60	0.08–0.15	0.14–0.30

Tabla 2.2 Propiedades matrices termoestables [5].

Resinas termoplásticas:

Las resinas termoplásticas se ablandan desde el estado sólido para su tratamiento en caliente y vuelven a este estado una vez el procesamiento ha sido completado y se enfrían, sin sufrir ninguna transformación química durante este proceso. Además, al poder ser moldeadas o dobladas fácilmente, lo que reduce el costo de suministro de varillas con formas personalizadas.

La reciclabilidad es una importante ventaja que ofrecen los materiales compuestos termoplásticos en comparación con los compuestos termoendurecibles. Al final de su ciclo de vida, la mayoría de ellos simplemente se envían a vertederos porque el reciclaje no se considera una opción económicamente viable. Esta perspectiva puede haber llevado a los industriales del sector de la construcción a estudiar la cuestión de la reciclabilidad de los materiales compuestos utilizados.

Los compuestos con matrices termoplásticas pueden ser reparados, porque la transición al estado de ablandamiento puede lograrse cualquier número de veces mediante la aplicación de calor [9].

La Polietere tercetona (PEEK) es la resina termoplástica más común para aplicaciones de alto rendimiento, debido a que tiene una alta resistencia a la fractura, asimismo, PEEK tiene una absorción de agua muy baja (aproximadamente el 0.5% en peso) a temperatura ambiente. El polisulfuro de fenileno (PPS) es un termoplástico de muy buena resistencia química. La polisulfona (PSUL) es un termoplástico con una elongación de rotura alta y excelente estabilidad en condiciones calientes y húmedas. Algunas propiedades de estas matrices termoplásticas se presentan en la tabla 2.3.

Propiedad	Matriz		
	PEEK	PPS	PSUL
Densidad (kg/m ³)	1320	1360	1240
Resistencia a tracción (MPa)	100	82.7	70.3
Módulo de tracción (GPa)	3.24	3.30	2.48
Elongación de tracción (%)	50	5	75
Coefficiente de Poisson	0.40	0.37	0.37
Coefficiente de expansión térmica (10 ⁻⁶ /°C)	47	49	56

Tabla 2.3 Propiedades matrices termoplásticas [5].

2.1.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS BARRAS FRP

Al ser un material compuesto, las propiedades mecánicas de las barras de FRP varían significativamente de una muestra a otra, dependiendo de la naturaleza y el volumen de las fibras, las propiedades mecánicas de la resina, la orientación de las fibras y la adherencia entre fibras y matriz. Motivos por los cuales, no es posible establecer valores universales para las propiedades mecánicas y sólo pueden establecerse valores indicativos.

A diferencia de las barras de acero, las barras de FRP son ortotrópicas, es decir, sus propiedades mecánicas son diferentes en sus dos direcciones transversales, teniendo el eje longitudinal como el más fuerte y no presentan ductilidad [15].

Las propiedades de la matriz influyen en la resistencia a cortante del material compuesto, así como en sus propiedades químicas, eléctricas y térmicas; adicionalmente, la matriz brinda soporte lateral contra el pandeo de las fibras bajo solicitaciones de compresión [16].

Las propiedades físicas del material compuesto se pueden estimar aproximadamente, si se conocen las propiedades de la fibra y de la matriz, junto con su fracción volumétrica. Este análisis a nivel de fibra se conoce como micromecánica.

Módulo de elasticidad:

Las barras de FRP generalmente poseen un módulo de Young menor que las de acero (presentando las barras de GFRP los valores más bajos), con lo cual, las deformaciones en estructuras de hormigón reforzadas con FRP son mayores que las deformaciones de las estructuras de hormigón reforzadas con

acero. Así también, el módulo de elasticidad de las barras de FRP permanece habitualmente constante hasta la falla, es decir, presentan un comportamiento elástico frágil; mientras que las barras de acero presentan un comportamiento dúctil. Estas dos diferencias en las propiedades mecánicas afectan el comportamiento adherente entre el hormigón y las barras de refuerzo, motivo por el cual, es importante considerarlas al momento de desarrollar códigos de diseño [15].

Resistencia a la tracción:

Usualmente, las barras de GFRP pueden desarrollar más del doble de la resistencia a tracción de las barras de acero, mientras que las de CFRP y AFRP pueden desarrollar más de tres veces de la resistencia, dependiendo de la naturaleza de las fibras y la matriz.

En la Figura 2.3 se presenta una comparación de las resistencias a tracción de barras FRP y barras de acero.

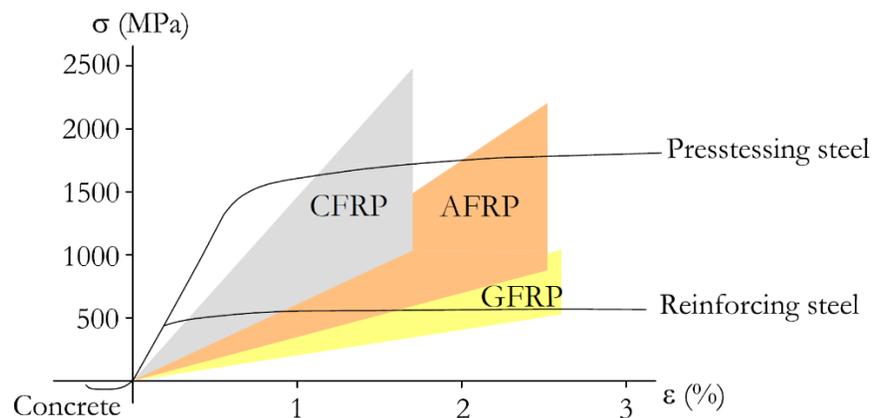


Figura 2.3. Esfuerzo-deformación para barras FRP y barras de acero [13]

Como se observa en la figura 2.3, para un valor determinado de deformación, las barras de FRP no presentan un único valor de resistencia a la tracción como el caso del acero, sino un rango de valores, esto es debido a que su resistencia varía en función del área de la sección transversal. Según el Boletín 10 de fib [17], cuando se tracciona una barra de FRP, puede existir un movimiento diferencial entre el núcleo y las fibras de la superficie de la barra, lo que da como resultado una distribución no uniforme de las tensiones normales a lo largo de la sección transversal; es decir, las fibras ubicadas cerca del centro de la sección transversal de la barra no están sujetas a tanta tensión como las que están cerca de la superficie exterior.

2.2 ADHERENCIA DE BARRAS DE REFUERZO FRP AL HORMIGÓN

Debido a que el comportamiento resistente de las estructuras reforzadas con FRP se basa en una adecuada transferencia de tensiones entre el hormigón y el refuerzo, la adherencia es un punto clave para controlar el desempeño de estas estructuras.

Se espera que el comportamiento de adherencia entre las barras de FRP y el hormigón varíe del de las barras de acero convencionales ya que algunos parámetros clave que influyen en el comportamiento de adherencia son diferentes. Algunos de estos parámetros son [1]:

- El módulo de elasticidad de las barras de FRP es más bajo en comparación con el del acero, tanto en la dirección lateral como longitudinal.
- La rigidez a cortante de las barras de FRP es mucho menor que la del acero.
- La resistencia al cortante de la matriz de resina es menor que la del acero, un factor que se espera que controle la resistencia de las corrugas superficiales de la barra.

2.2.1 ENSAYO PULL-OUT

El estudio de la adherencia comienza en Europa, por lo que los ensayos son normalizados por el Comité Euro-internacional du Béton (CEB), que mediante varias investigaciones ha establecido dos ensayos que permiten caracterizar y cuantificar la tensión de adherencia: ensayos pull-out test y Beam test [18].

El resultado principal del ensayo es la fuerza de adherencia de la barra al hormigón. Según el ACI 440.3R-04 [19], el ensayo está diseñado para usarse en pruebas de laboratorio en las que la variable principal es el tamaño o tipo de barra FRP, no debe usarse para establecer valores de adherencia de diseño y longitudes de desarrollo para barras de FRP empotradas en hormigón. Este ensayo también puede usarse para determinar la conformidad de un producto o un tratamiento con un requisito relacionado con su efecto en la adherencia entre la barra FRP y el hormigón. El resultado obtenido de este método de prueba debe usarse solo con fines comparativos para comparar parámetros o variables de resistencia de la adherencia [19].

Para realizar ensayos de adherencia pull-out con barras de FRP, la guía de ACI 440.3R-04 [19] indica que se debe utilizar una máquina de ensayo con una capacidad de carga superior a la capacidad de tracción de la muestra de ensayo. Se puede usar una máquina de prueba con control de velocidad de carga o de velocidad de desplazamiento. La carga se debe aplicar a la barra de refuerzo a una velocidad no superior a 20 kN/minuto o a un desplazamiento del cabezal no superior a 1.3 mm/minuto, según el tipo de máquina de ensayo utilizada.

La placa de carga (ver figura 2.6) debe ser una placa de acero de al menos 200mm², 20mm de espesor y tener un orificio perforado en su centro de diámetro suficiente para acomodar la barra de FRP. El dispositivo de transmisión de carga sólo debe transmitir cargas axiales a las barras de FRP, sin aplicar torsión ni flexión. Los dispositivos de medición de desplazamiento instalados tanto en el extremo libre como en el extremo cargado de las barras de FRP deben ser dispositivos de medición de desplazamiento (LVDT) o aparatos similares, con una lectura precisa de 0.01 mm.

Los moldes para las probetas deben estar hechos referiblemente de metal de no menos de 6mm de espesor. Los moldes deben ser herméticos y contruidos para que se puedan quitar fácilmente sin alterar las barras incrustadas.

Preparación de las probetas

El ACI 440.3R-04 [19] indica que las muestras de prueba deben contener una barra de FRP embebida perpendicularmente a la dirección del vertido del hormigón (figura 2.4), o dos barras de FRP embebidas paralelas al vertido del hormigón (figura 2.5). Si una muestra ha fallado, se ha deslizado en la sección de adherencia, o se ha fragmentado el hormigón, se debe realizar una prueba adicional en una muestra separada tomada del mismo lote que la muestra fallada.

Para las probetas con la barra empotrada perpendicularmente a la dirección de vertido del hormigón (figura 2.4), los especímenes deben consistir en cubos de hormigón de 200mm en cada lado, con una sola barra FRP incrustada a lo largo del eje central en cada espécimen. Si se produce una rotura del hormigón, se requiere un cubo de 300 mm y se deben realizar nuevas pruebas.

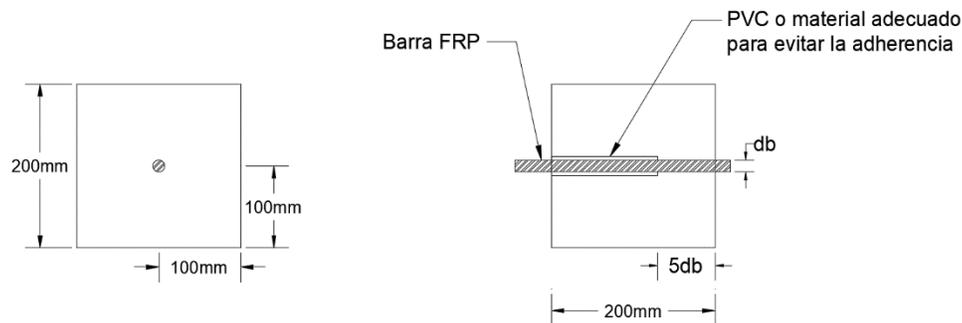


Figura 2.4. Muestra de ensayo de adherencia perpendicular a la dirección del vertido del hormigón

Las probetas con la barra empotrada paralela a la dirección de vertido del hormigón deben consistir en prismas de hormigón de 200 x 200 x 400mm (figura 2.5). Se deben incrustar dos barras en cada muestra, perpendiculares al eje más largo y paralelas entre sí. En la dirección más larga, el eje de una de las barras debe ubicarse a 100mm del costado del prisma y el eje de la otra barra a 300mm. Se debe formar una ranura triangular en cada uno de los dos lados opuestos del prisma paralelo a las barras y en la mitad de la altura del prisma. Estas ranuras deben tener al menos 13 mm de profundidad, medidas perpendiculares a la superficie del hormigón. Las ranuras deben facilitar la rotura del prisma en dos probetas en el plano debilitado antes de realizar las pruebas de adherencia.

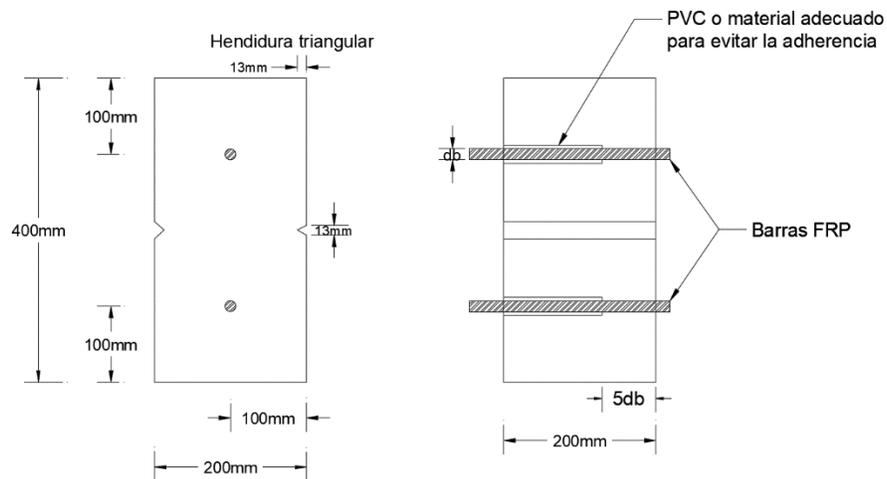


Figura 2.5. Muestra de ensayo de adherencia paralelo a la dirección del vertido del hormigón

La longitud de adherencia de la barra FRP debe ser cinco veces el diámetro de la barra. Fuera de la sección de anclaje, la barra incrustada debe revestirse con PVC u otro material adecuado para evitar el contacto entre la barra y el hormigón. En el extremo libre, las barras deben sobresalir ligeramente del hormigón, de modo que el extremo de los LVDT se apoye en la barra (figura 2.6).

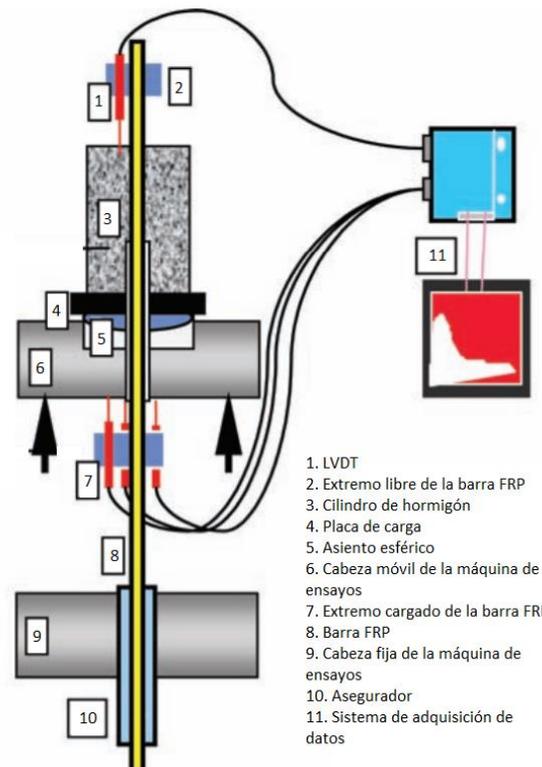


Figura 2.6. Modelo típico del ensayo pull-out y posibles resultados típicos [19]

El resultado del ensayo pull-out es un diagrama que relaciona la tensión de adherencia local y el deslizamiento de la barra respecto a la superficie de la probeta de hormigón en el extremo opuesto del que se aplicó la carga. Para obtener la tensión de adherencia media, se puede suponer una distribución uniforme de la tensión tangencial a lo largo de la barra.

2.2.2 INTERACCIÓN HORMIGÓN-BARRA DE ARMADURA DE FRP

A continuación, se presenta una descripción del comportamiento adherente entre una barra FRP y el hormigón, siendo este comportamiento diferente para el caso de barras lisas, barras con corrugaciones o con superficies tratadas según [17].

Cuando se consideran barras lisas, la adherencia se rige principalmente por la adhesión entre la superficie de la barra y el hormigón que la rodea, o por la resistencia al corte interlaminar entre capas sucesivas de fibras en la superficie de la barra.

La interacción de la barra de FRP con corrugas o con su superficie tratada con el hormigón se resume en la Figura 2.7.

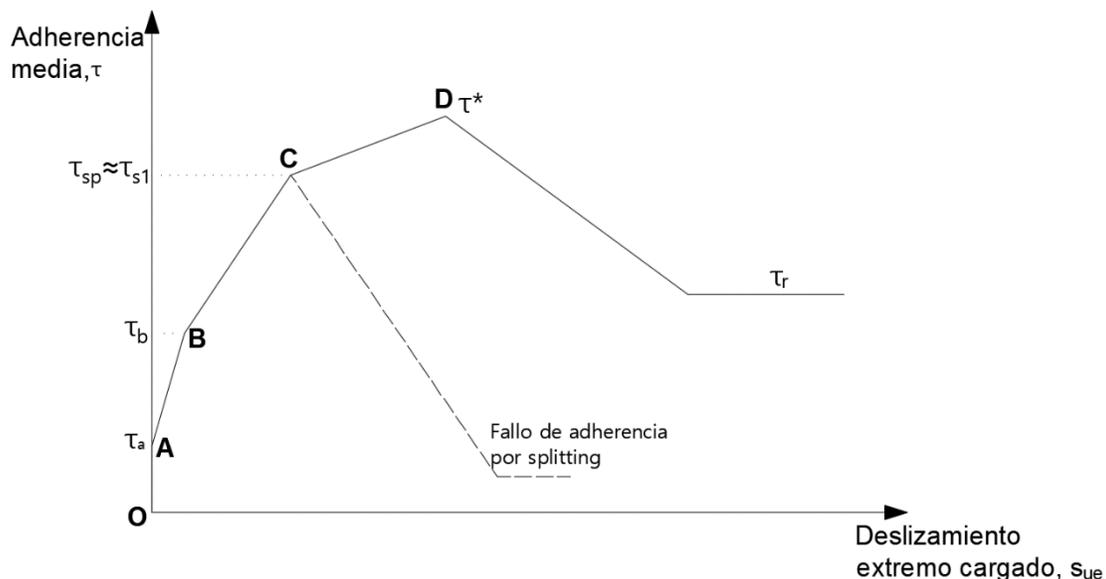


Figura 2.7 Curva típica Esfuerzo de adherencia medio vs Deslizamiento extremo cargado [11].

Al inicio de la carga, tramo OA, el principal mecanismo de adherencia que resiste la carga externa es la adhesión química entre los dos materiales, en esta etapa no se observa deslizamiento medible. Para valores de tensión de adherencia más altos ($\tau > \tau_a$), la adhesión química se rompe y se establece un mecanismo de adherencia diferente (tramo AB). El deslizamiento en el extremo cargado de la barra aumenta y las deformaciones de la barra inducen grandes esfuerzos en el hormigón, originando microfisuras que permiten que la barra se deslice. A medida que aumenta el deslizamiento de la barra, sección

BC, los esfuerzos en el hormigón aumentan considerablemente y la componente radial de las fuerzas de adherencia se equilibra contra un anillo de tracción desarrollado en el hormigón (Ver figura 2.8). Si la barra no está adecuadamente confinada y el valor del anillo de tensiones de tracción excede la resistencia a la tracción del hormigón, pueden aparecer fisuras que atraviesan el recubrimiento y se produce un fallo frágil en la superficie del hormigón, llamado fallo por splitting. Si se puede proporcionar suficiente resistencia, tramo CD, la tensión de adherencia puede alcanzar su valor máximo (τ^*). Una vez que se alcanza la tensión máxima de adherencia, el mecanismo resistente se rompe. La fuerza de adherencia residual depende principalmente de la resistencia a la fricción, τ_r .

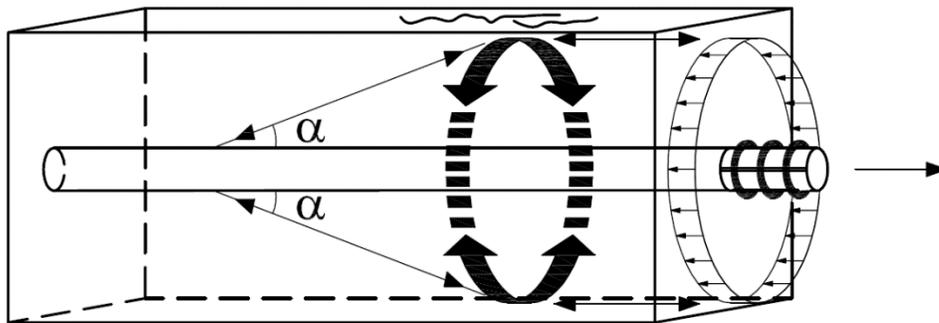


Figura 2.8 Formación del anillo de tracción en el hormigón equilibrando las fuerzas de adherencia [11].

Dependiendo de la relación entre la resistencia del hormigón y la resistencia a cortante de las corrugas superficiales de la barra, pueden existir diferentes casos donde se pierde la adherencia [17]:

- *Desprendimiento de parte o de todas las corrugas superficiales de la barra.* La fuerza de adherencia de las barras de FRP se controla mediante la resistencia al corte entre capas sucesivas de fibra o mediante la resistencia al corte de las corrugaciones de la barra. Por lo tanto, un aumento en la resistencia del hormigón no corresponde a un aumento en la resistencia de adherencia de la barra de FRP.
- *Fallo por cortante en el hormigón.* El hormigón se aplasta frente a las corrugas de la barra; por lo tanto, la resistencia adherente depende en gran medida de la resistencia al cortante del hormigón.
- *Modo combinado.* Con niveles intermedios de resistencia del hormigón, es probable que ocurra un modo combinado de los fallos anteriores.

2.2.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ADHERENCIA

Al igual que en el hormigón armado con barras de acero, existen varios factores que influyen en la adherencia entre el hormigón y el refuerzo de FRP.

Según el Boletín 10 de fib [17] el comportamiento de adherencia de las barras de FRP en el hormigón depende principalmente de los siguientes parámetros: forma de la sección transversal de la barra, corrugas de la barra, módulo elástico en dirección axial, módulo elástico en dirección transversal, efecto Poisson, posición de la barra en la sección transversal, anclaje de las barras, recubrimiento de hormigón,

distancia entre barras paralelas, coeficiente de expansión térmica, influencias ambientales, diámetro de la barra, resistencia del hormigón, refuerzo transversal.

Otros parámetros son: longitud de empotramiento de la barra de refuerzo de FRP, tipo de fibra/resina, densidad del hormigón (por ejemplo, hormigón ligero), tipo de superficie de varilla [20].

Influencia del tipo de superficie de la barra FRP

El efecto de la superficie de la barra de armadura sobre la resistencia de adherencia es un fenómeno complejo, porque la barra puede tener varias configuraciones de superficie. A diferencia de la armadura de acero, no se ha establecido una configuración de superficie estándar para las barras de armadura de FRP. Las diferentes configuraciones de superficie conducen a diferencias en el comportamiento de la adherencia.

Lee et al. presentaron en [21] los resultados de un programa experimental sobre el comportamiento adherente de dos tipos de barras de GFRP y barras de acero en hormigón de alta resistencia. El programa experimental consistió en ensayar probetas cúbicas de hormigón de 150mm, con una longitud de empotramiento de cuatro veces el diámetro de la barra de refuerzo y se aplicaron dos diferentes mejoras en la superficie de las barras: revestimiento de arena (GFRP-SC) y envoltura helicoidal con revestimiento de arena (GFRP-HW), como se observa en la figura 2.9.a. Las diferencias en el tratamiento de la superficie influyeron en el comportamiento adherente, ya que la tensión de adherencia de las barras de acero y las barras de GFRP con revestimiento de arena disminuyó rápidamente después de alcanzar la tensión de adherencia máxima, mientras que las barras de GFRP con envoltura helicoidal y revestimiento de arena mostraron una reducción gradual de la tensión de adherencia, ver figura 2.9.b.

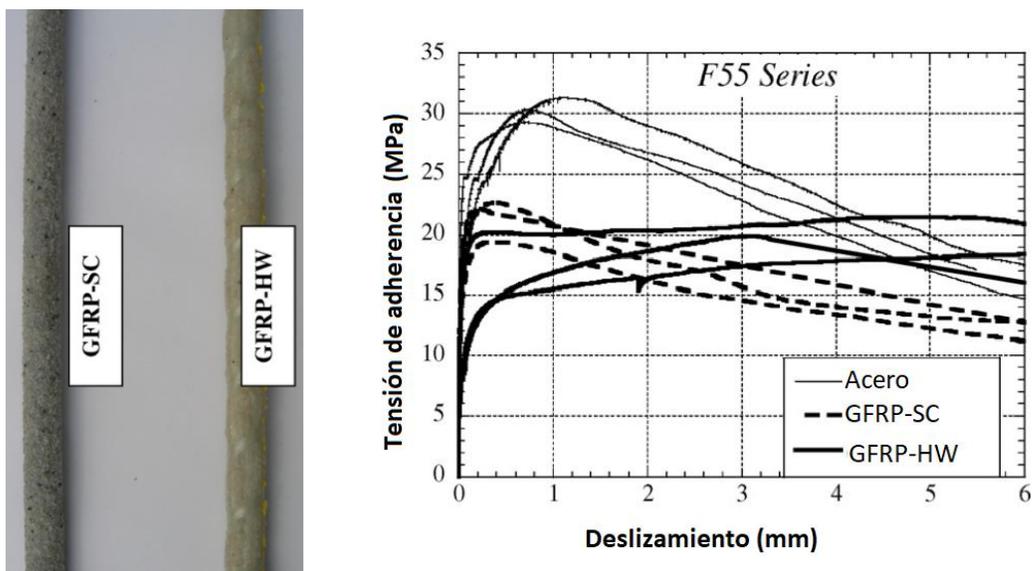


Figura 2.9 (a) Barras GFRP ensayadas, (b) Resultado de los ensayos experimentales [19].

Aiello et al. [22] realizaron ensayos pull-out con polímeros reforzados con fibra de aramida, carbono y vidrio (AFRP, CFRP y GFRP) enarenados externamente y enrollados en espiral con fibras, con resaltos de GFRP, con enarenado fino de CFRP y GFRP, con enarenado grueso de CFRP y GFRP y barras de acero tradicionales lisas y corrugadas. Los resultados experimentales mostraron que para las barras de FRP con resaltos, la contribución del entrelazamiento mecánico es muy eficiente, con una resistencia tres veces superior a la de las barras enarenadas. Para las barras de FRP con arena fina y gruesa, la adherencia se atribuyó a la fricción y a la adhesión química (dada por la arena aplicada en la superficie); por lo tanto, se produjo una caída repentina de la tensión de adherencia después de que se perdió el enlace químico.

Kanakubo et al. [23] confirmaron la adherencia mediante la fricción para barras lisas mientras que la adhesión y la fricción se definieron como el componente principal de la adherencia en barras de FRP con resaltos en espiral según [24].

Se presentaron los resultados de 88 ensayos de pull-out en el estudio de Baena Muñoz *et al.* [25]. Se analizó la adherencia para barras de CFRP (R1) y GFRP (R2) revestidas con arena, barras de CFRP con una superficie texturizada (R3), barras de GFRP con superficie con envoltura helicoidal y revestimiento de arena (R4), barras de GFRP con superficie estriada (R5), barras de GFRP con una envoltura helicoidal en la superficie, pero sin revestimiento de arena (R6) y, por último, se utilizaron barras de acero (R7) para fines comparativos, como se muestra en la figura 2.10.a. Los autores concluyeron que de entre los acabados superficiales de las barras de CFRP, el acabado de revestimiento de arena (R1) produce un incremento en la adherencia química, desempeñando la mayor resistencia de adherencia de entre esta tipología de barras, como se observa en la figura 2.10.b. Para el caso de barras GFRP, diferentes acabados superficiales activan diferentes mecanismos de transferencia de esfuerzos, sin destacarse ninguno de ellos sobre los otros.

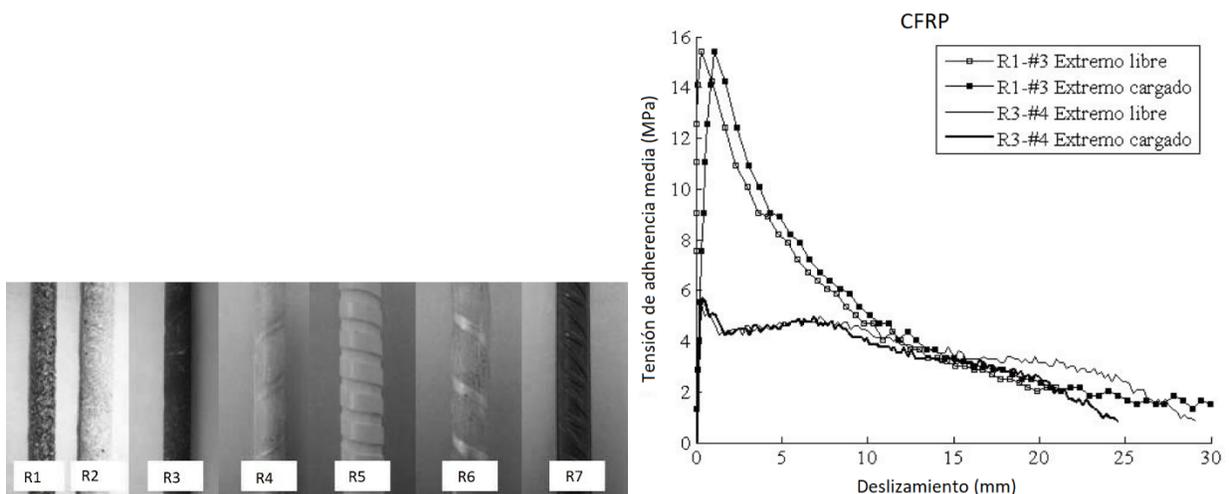


Figura 2.10 a) Acabado superficial de las barras (R1-R7), b) Curvas tensión de adherencia media-deslizamiento para probetas con CFRP (R1 y R3) [23].

Influencia del diámetro de la armadura

A pesar de que la rigidez inicial no se vió afectada por el diámetro de la barra de armadura en [25], los resultados experimentales confirmaron la tendencia de las armaduras de mayor diámetro a tener menor adherencia, especialmente en el caso del hormigón de alta resistencia, como se muestra en la figura 2.11.

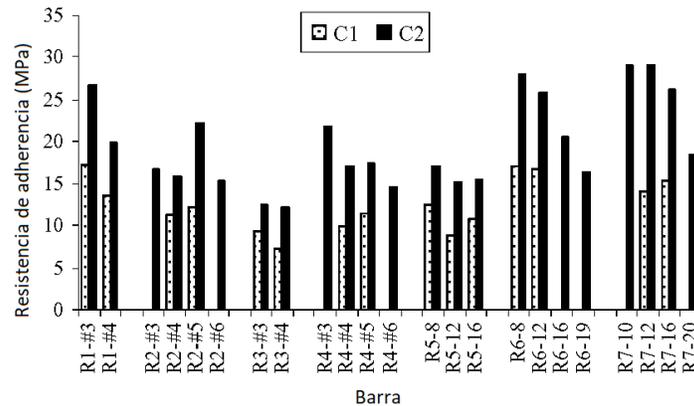


Figura 2.11 Resistencia de adherencia según hormigón C1 o C2 [23].

Según M. Baena Muñoz [15] y M. Guadagnini et al. [26], las razones de esto son las siguientes: en primer lugar, debido al aumento del diámetro, se puede atrapar más agua debajo de la barra de armado, lo que a su vez crea más vacíos de los que se formarían debajo de una barra más pequeña. La presencia de vacíos disminuye el área de contacto entre la barra de refuerzo y el hormigón circundante y, por lo tanto, se reduce la fuerza de adherencia. En segundo lugar, el efecto Poisson también puede influir en este fenómeno; cuando se tracciona la barra de refuerzo de FRP, el diámetro se reduce y, como consecuencia, se reducirán las tensiones del entrelazamiento mecánico y la fricción entre la barra de FRP y el hormigón. La reducción es más pronunciada para diámetros mayores. Por último, las barras de mayor diámetro dan como resultado longitudes de empotramiento más largas, ya que para los experimentos es una práctica común que la longitud de empotramiento sea una función del diámetro. La tensión de adherencia máxima se mueve gradualmente desde el extremo cargado hacia el extremo descargado de la barra durante el ensayo pull-out, como consecuencia, en caso de longitudes de empotramiento más largas, la tensión de adherencia promedio es menor.

Influencia de la longitud de empotramiento

Chaallal y Benmokrane [27] realizaron una campaña experimental, con el propósito de investigar el comportamiento de la adherencia en barras de GFRP mediante ensayos pull-out. Se ensayaron barras con tres diámetros distintos (12,7 mm, 15,9 mm y 19,1 mm) y las barras se incrustaron verticalmente en cilindros de hormigón de 150x300 mm con longitudes de empotramiento de 5 o 10 veces el diámetro de la barra. Los autores concluyeron que las longitudes de empotramiento más bajas producen mayor fuerza de adherencia, similar al comportamiento de las barras de acero.

Los resultados obtenidos del estudio de la adherencia entre barras de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) y el hormigón mediante ensayos pull-out en [28], demostraron que para cualquier tipo de superficie de barra (lisas, mecanizadas o enarenadas), la resistencia de la adherencia es mayor para longitudes de empotramiento más bajas, debido a la distribución no uniforme de las tensiones de adherencia a lo largo de la longitud de empotramiento.

Influencia de la presión de confinamiento

Con el objetivo de analizar el comportamiento adherente entre las barras FRP y el hormigón a diferentes niveles de presión de confinamiento, Malvar [29] analizó experimentalmente las características de adherencia de cuatro tipos diferentes de barras de refuerzo de GFRP con diferentes resaltos superficiales en hormigón ligero ($f'_c = 29\text{MPa}$).

Las barras Tipo A tenían un resalto sobresaliente helicoidal y pequeñas hendiduras en la superficie de la barra. La barra tipo B presentaba hendiduras helicoidales obtenidas durante la fabricación. Las barras de tipo D se fabricaron de manera similar a las de tipo B, pero se agregó una capa exterior de resina superficial para proteger las fibras. Las barras tipo C tenían un resalto helicoidal pegado a la superficie. Los 4 tipos de barras ensayadas se muestran en la Figura 2.12.

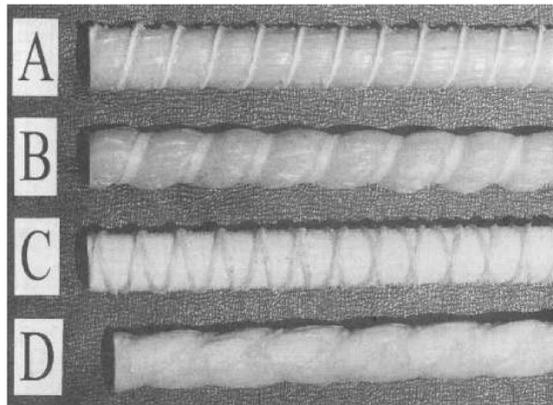


Figura 2.12 Barras de GFRP utilizadas en [27].

Los ensayos de pull-out se realizaron con barras de GFRP número 6 (diámetro= 19 mm), introducidas en un cilindro de hormigón de 76 mm de diámetro y 102 mm de largo, sometido a una presión radial axisimétrica de confinamiento. Se consideró una longitud de empotramiento de 67 mm (Ver Figura 2.13).

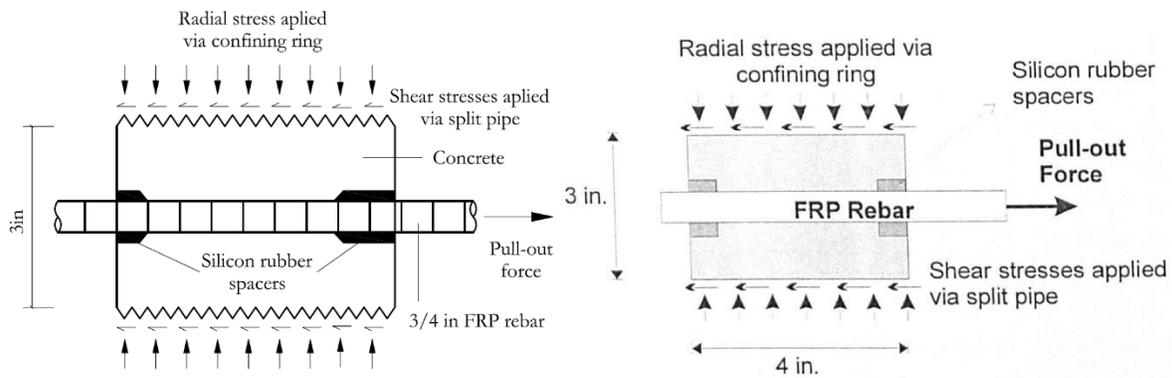


Figura 2.13 Espécimen de ensayos en [27].

Para cada tipo de barra, se obtuvieron las relaciones tensión de adherencia-deslizamiento y tensión de adherencia-deformación radial para cinco niveles de presión de confinamiento. El autor llegó a la conclusión de que la resistencia adherente de las barras tipo A, B y D, podría aumentarse incrementando la presión de confinamiento, pero sólo cuando la pérdida de adherencia se produce por la fragmentación del cilindro de hormigón. Es decir, cuanto mayor sea el confinamiento, más difícil será que las fisuras avancen a través del hormigón, lo que significa que es menos probable que ocurra una falla por *splitting*. Las barras de tipo C no desarrollaron suficiente fuerza de adherencia, debido a que el resalto helicoidal se despegó en niveles de carga bajos.

Influencia del tipo de fibra y resina

El comportamiento de transferencia de carga entre el refuerzo de FRP y el hormigón fue experimentalmente investigado por Nanni et al. en [30]. Se realizaron mediciones de la resistencia adherente utilizando ensayos convencionales pull-out y se utilizaron barras de superficie lisa y rugosa con longitudes de empotramiento de 5 y 10 diámetros de barra. Se examinaron varios tipos de barras rugosas con diferente configuración de fibra/resina: vidrio-éster de vinilo (GV), carbono-éster de vinilo (CV) y carbono-epoxi (CE). Los resultados mostraron las barras FRP rugosas de GV y CV desarrollaron tensiones de adherencia promedio de 13 y 14 MPa respectivamente, mientras que las barras rugosas de CE desarrollaron tensiones de adherencia de 23 MPa. Todas las probetas con barras con resaltes mecanizados fallaron por desprendimiento de los resaltes seguido de deslizamiento, lo que indica que la falla fue controlada por la fuerza y la acción mecánica de los resaltes de la superficie de la varilla en lugar de la adherencia y la fricción. Con lo cual, el factor de control en términos de fuerza de adherencia pareció ser el tipo de resina y no el tipo de fibra.

Según el Boletín 10 de fib [17], el tipo de resina, en lugar del tipo de fibra, controla la fuerza de adherencia en el caso de hormigón normal y de alta resistencia.

Influencia de la resistencia del hormigón

Se pudo observar en [21] que la resistencia a la compresión del hormigón afecta no sólo la fuerza de adherencia, sino también el modo de falla de las barras de GFRP ensayadas. Cuando se consideró hormigón de alta resistencia, la falla ocurre en la interfaz resina-fibra, y con hormigón de menor resistencia, la falla ocurre en la interfaz hormigón-resina. Como resultado, la fuerza de adherencia de las barras de FRP no depende en gran medida del valor de la resistencia del hormigón, sino más bien de las resistencias relativas al cortante de las interfaces hormigón-resina y resina-fibra (ver figura 2.14.a).

En la figura 2.14.b que corresponde a una muestra de hormigón de resistencia normal, se observa hormigón adherido a la barra en la longitud de empotramiento, lo que indica que la falla de la adherencia interfacial ocurre principalmente en la interfaz 1. La figura 2.14.c corresponde a una muestra de hormigón de alta resistencia, y expone las fibras del núcleo dañadas debido a la delaminación interlaminar, entre la capa exterior y el núcleo de la fibra de las barras GRFP, en la interfaz 2.

Adicionalmente, la pérdida de adherencia de las barras de acero se produjo debido al aplastamiento del hormigón contra las corrugaciones de la barra, lo que significa que la resistencia de la adherencia probablemente se rige por la resistencia a la compresión del hormigón.

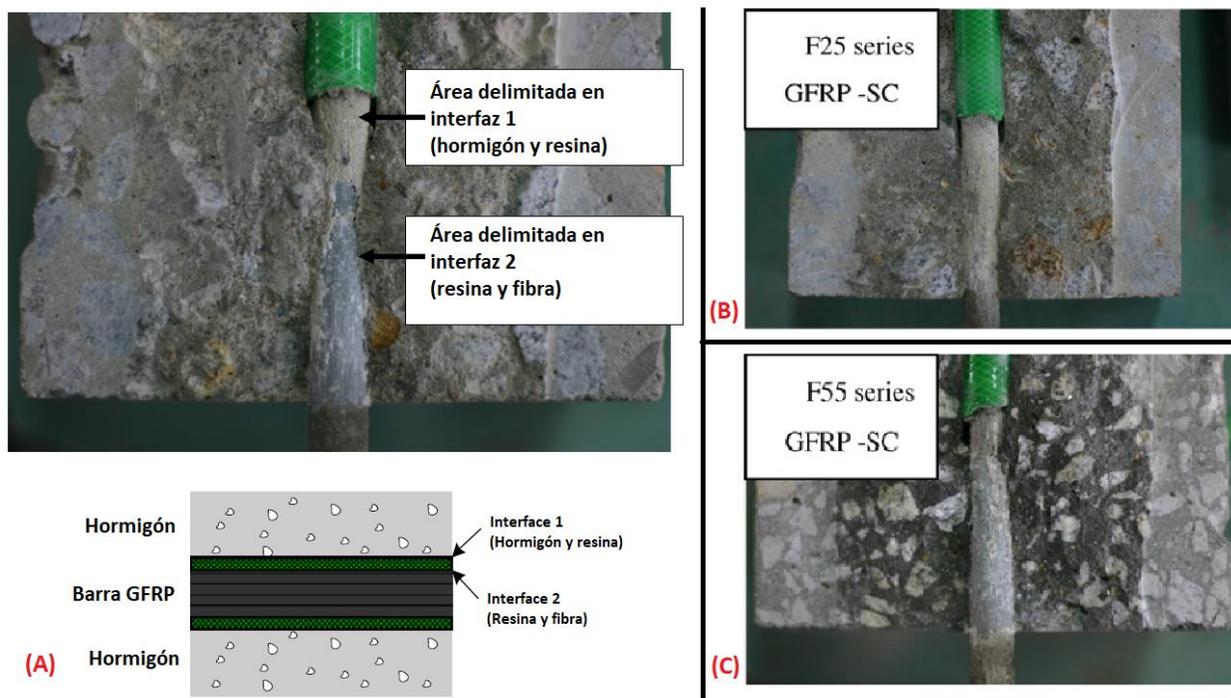


Figura 2.14 (a)Falla de adherencia interfacial en barras GFRP, (b) Falla en interfaz 1, (c) Falla en interfaz 2

Para analizar la influencia de la resistencia del hormigón en el comportamiento de adherencia, en [25] M. Baena Muñoz et al. utilizaron dos resistencias de hormigón diferentes, C1 y C2, con valores medios de resistencia a la compresión de 28.63 MPa y 52.19 MPa, respectivamente. Los autores señalaron que, para

los hormigones con resistencias dentro del rango estudiado, el incremento en la resistencia a compresión del hormigón provoca un incremento en la adherencia; se han observado factores de incremento de entre 1.3 y 2.1. Sin embargo, el aumento de adherencia también dependió del tipo de armadura.

Influencia de la geometría de los resaltos de las barras FRP

En [28], AL-Mahmoud et al. realizaron ensayos pull-out con barras de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) con un mecanizado superficial para crear resaltos en la barra con tres configuraciones diferentes (ver Figura 2.15). Adicionalmente, se consideraron barras de acero lisas y corrugadas. Las muestras armadas con las barras de CFRP tenían una longitud de empotramiento de 5 y 10 veces el diámetro de la barra, mientras que la longitud de empotramiento para las muestras reforzadas con barras de acero fue de 5 veces el diámetro de la barra.

Para estudiar mejor la influencia de las tres configuraciones diferentes de las barras de refuerzo mecanizadas en el comportamiento adherente, se definió la relación del resalto de hormigón (Concrete Lug Ratio-CLR), como:

$$\text{CLR} = \frac{w_c}{w_c + w_f} \quad (2.1)$$

Donde w_c es el ancho del resalto o hendidura de la barra mecanizada, y w_f es la distancia entre resaltos.

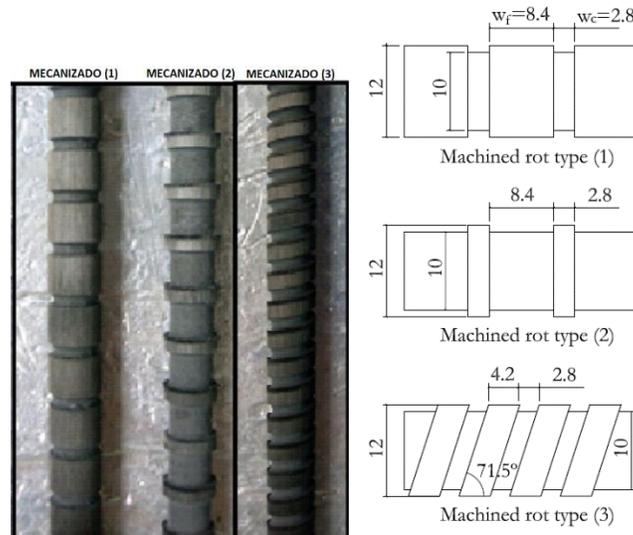


Figura 2.15 Barras de CFRP y dimensiones de los resaltos en mm utilizados en [26].

Se encontró que un CLR del 35% era suficiente para asegurar una fuerza de adherencia equivalente a la de las barras de acero corrugadas con falla por adherencia debido al desprendimiento del hormigón. Sin embargo, se encontró que era necesario un CLR del 78% para lograr una mejor fuerza de adherencia, donde la falla ocurre por el corte de los resaltos de CFRP (lo que lleva a una carga máxima de extracción de las varillas de CFRP mecanizadas).

En [31], Hao et al. sugirieron recomendaciones sobre la relación óptima entre los resaltos de la barra y el diámetro de la barra de refuerzo, donde se realizó un estudio extenso sobre el efecto de la geometría del resalto en la adherencia de las barras de refuerzo de GFRP, utilizando el área relativa del resalto R_r , como término descriptivo.

$$R_r = \frac{\text{área del resalto proyectada en el eje normal al de la barra}}{\text{perímetro nominal de la barra} * \text{distancia entre centros de los resaltos}}$$

De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos en [31], los autores concluyeron que cualquier aumento en el espaciado de los resaltos (es decir, reducción en el área relativa de los resaltos) causaría una reducción tanto en la rigidez inicial como en la fuerza de adherencia máxima, mientras que el valor de deslizamiento final cargado en la carga máxima aumentaría. Esta tendencia general no se confirmó para un espaciado de los resaltos igual al 50% del diámetro de la barra de refuerzo, porque el resalto de hormigón resultante no podía ofrecer suficiente acción de apoyo y podría agrietarse fácilmente con valores de deslizamiento relativamente bajos. En cambio, el aumento de la altura del resalto del 4% al 6% (es decir, el aumento del área relativa del resalto) provocó un aumento tanto de la rigidez inicial como de la resistencia de adherencia máxima. Por lo tanto, se sugirieron recomendaciones de diseño de que el espaciado óptimo de los resaltos sea igual al diámetro de la barra y la altura óptima del resalto sea el 6% del diámetro de la barra. Esta geometría de resalto óptima deriva en un área relativa óptima de resalto igual a 0.06, ver figura 2.14.

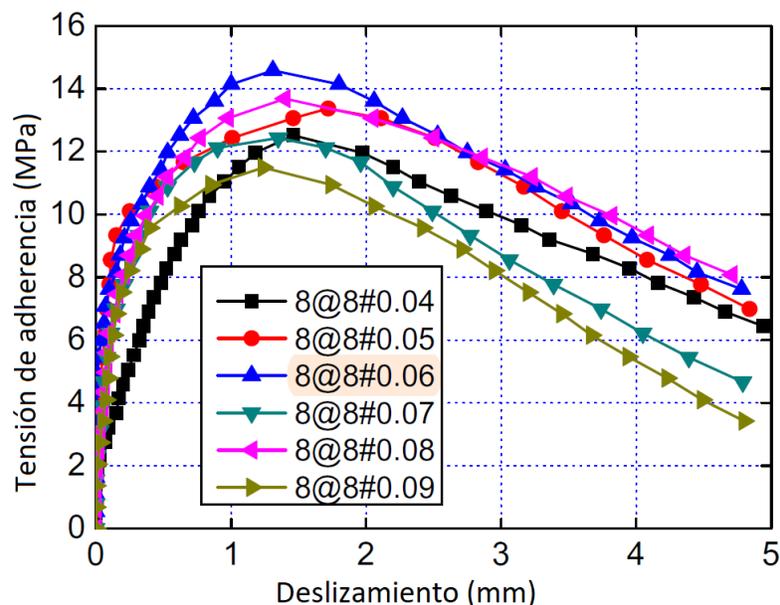


Figura 2.16 Curva adherencia-deslizamiento de barras de GFRP con diferentes geometrías de resaltos. $d = 8$ mm [29].

El efecto de la geometría de la armadura sobre la resistencia de adherencia entre el refuerzo de FRP y el hormigón se investigó en [32]. Freimanis et al. utilizaron armaduras de FRP disponibles comercialmente con variaciones controladas en profundidad y espaciado de los resaltos. Se observó un aumento en la resistencia de adherencia al aumentar la profundidad del resalto, pero no se mostró una dependencia particular del espaciado de los resaltos.

Influencia del tipo de ensayo

Aunque los ensayos pull-out han sido ampliamente aceptados para estudiar el comportamiento de adherencia de las barras de acero y de FRP, un tema crítico en la configuración del ensayo es que las condiciones de tensión difieren de las que ocurren en la zona de tensión de elementos a flexión. Debido a que en los ensayos de pull-out, el hormigón que rodea la barra se coloca bajo compresión longitudinal, existe una influencia favorable en el mecanismo de adherencia [22]. Como parte de un proyecto de investigación más amplio sobre la adherencia entre el refuerzo de FRP (barras de refuerzo, láminas, laminados) y el hormigón, el estudio realizado por Aiello et al. [22] presentó los resultados de ensayos pull-out tradicionales y modificados. El ensayo pull-out modificado se diseñó de manera que se evitaran los esfuerzos de compresión sobre el hormigón. Los esquemas de la configuración de los ensayos se muestran en la figura 2.17.

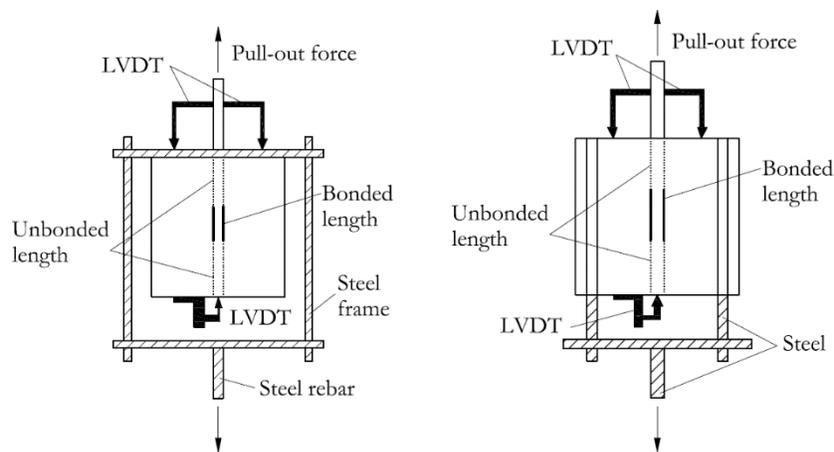


Figura 2.17 Ensayo pull-out a) tradicional y b) modificado usados en [20].

La acción de compresión sobre el hormigón, introducida en la prueba de extracción tradicional, fue beneficiosa cuando se utilizaron barras de refuerzo de acero y FRP con resaltes, porque esa acción redujo la posibilidad de fisuración del hormigón, ver figura (2.18.a). Por el contrario, la compresión sobre el hormigón produjo un efecto negativo sobre la adherencia en lo que se refiere a las varillas de FRP enarenadas y enrolladas en espiral. El aumento de la tensión en la interfaz promovió el daño de los resaltes, considerando que en ese caso las deformaciones superficiales fueron menos efectivas en términos de entrelazamiento mecánico con respecto al caso anterior, ver figura (2.18.b).

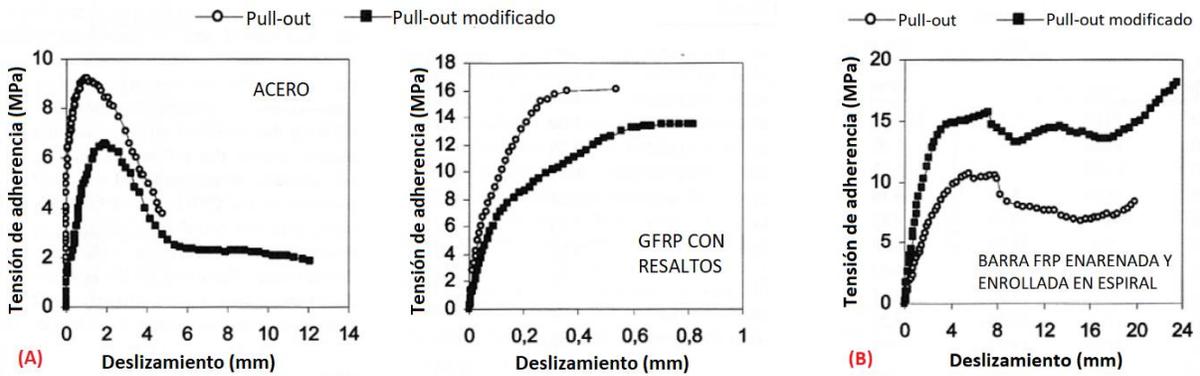


Figura 2.18 Resultados de ensayos experimentales en (a) barras de acero y GFRP con resaltes. (b) Barras enarenadas y enrolladas en espiral

A continuación, se presenta la tabla 2.4 resumiendo las principales conclusiones de los estudios indicados anteriormente acerca de los factores que influyen en la adherencia de barras FRP.

Autores	Conclusiones sobre la influencia del tipo de la superficie de la barra FRP
Aiello <i>et al.</i> [20]	En varillas de FRP con resaltos, la contribución del entrelazamiento mecánico es muy eficiente, con una resistencia tres veces superior a la de las varillas enarenadas.
Kanakubo <i>et al.</i> [21]	Indican la existencia de un mecanismo de adherencia mediante la fricción para barras lisas.
Larralde y Silva-Rodriguez [22]	En barras de FRP con resaltos en espiral, la adhesión y la fricción se definieron como el componente principal de la adherencia.
Lee <i>et al.</i> [19], Aiello <i>et al.</i> [20] y Marta Baena <i>et al.</i> [23]	Coinciden en definir una adherencia química adicional cuando se consideran las barras de FRP con revestimiento de arena, lo que resulta en grandes incrementos de fuerza adherente con una falla de adherencia frágil debido al fallo en la interfaz barra-recubrimiento superficial arenoso.
Autores	Conclusiones sobre la influencia del diámetro de la barra FRP
M. B. Muñoz [11], Marta Baena <i>et al.</i> [23] y Guadagnini <i>et al.</i> [24]	Confirmaron la tendencia de que los diámetros más grandes de las barras de refuerzo desarrollen una menor resistencia de adherencia promedio
Autores	Conclusiones sobre la influencia de la longitud de empotramiento de la barra FRP
Chaallal y Benmokrane [25] y AL-Mahmoud <i>et al.</i> [26]	Los autores demostraron que la resistencia de la adherencia es mayor para longitudes de empotramiento más bajas, debido a la distribución no uniforme de las tensiones de adherencia a lo largo de la longitud de empotramiento.
Autores	Conclusiones sobre la influencia de la presión de confinamiento
Malvar [27]	El autor llegó a la conclusión de que la resistencia adherente de las barras podría aumentarse incrementando la presión de confinamiento, pero sólo cuando la pérdida de adherencia se produce por la fragmentación del cilindro de hormigón.
Autores	Conclusiones sobre la influencia del tipo de fibra y resina
FIB Bulletin 10 [14] y Nanni <i>et al.</i> [28]	La fuerza de adherencia es controlada por el tipo de resina y no por el tipo de fibra.
Autores	Conclusiones sobre la influencia de la resistencia del hormigón
Lee <i>et al.</i> [19]	La fuerza de adherencia de las varillas de FRP no depende en gran medida del valor de la resistencia del hormigón, sino más bien de las resistencias relativas al cortante de las interfaces hormigón-resina y resina-fibra
Autores	Conclusiones sobre la influencia la geometría de los resaltos de las barras FRP
AL-Mahmoud <i>et al.</i> [26]	Los autores definen un indicador CLR, que considera la geometría del resalto. Indicaron que un CLR del 35% era suficiente para asegurar una fuerza de adherencia equivalente a la de las barras de acero corrugadas con falla por adherencia debido al desprendimiento del hormigón.
Hao <i>et al.</i> [29]	Utilizaron el área relativa del resalto R_r , como término descriptivo. Y se demostró que el aumento de la altura del resalto del 4% al 6% provoca un aumento tanto de la rigidez inicial como de la resistencia de adherencia máxima. Por lo tanto, se sugirieron recomendaciones de diseño de que el espaciado óptimo de los resaltos sea igual al diámetro de la barra y la altura óptima del resalto sea el 6% del diámetro de la barra.
Autores	Conclusiones sobre la influencia del tipo de prueba
Aiello <i>et al.</i> [20]	La acción de compresión sobre el hormigón, introducida en la prueba de extracción tradicional, fue beneficiosa cuando se utilizaron barras FRP con resaltos, porque esa acción redujo la posibilidad de agrietamiento del hormigón. Por el contrario, la compresión sobre el hormigón produjo un efecto negativo sobre la adherencia en lo que se refiere a las varillas de FRP enarenadas y enrolladas en espiral. El aumento de la tensión en la interfaz promovió el daño de los resaltos.

Tabla 2.4 Conclusiones de diferentes autores sobre los factores que influyen en la adherencia de barras FRP.

3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Con el objetivo de investigar el comportamiento adherente de barras FRP en estructuras de hormigón, se ha realizado una campaña experimental con 32 ensayos pull-out siguiendo las recomendaciones del ACI 440.3R-04 [19]. En este capítulo, se realiza una descripción de la campaña experimental, indicando los parámetros a estudiar, los materiales utilizados y sus propiedades mecánicas, la preparación de las probetas, la configuración experimental y el procedimiento de ensayo.

3.1 PARÁMETROS EN ESTUDIO

El comportamiento adherente de las barras FRP con el hormigón, es uno de los aspectos fundamentales del comportamiento estructural, y depende de varios parámetros. El objetivo principal de esta tesina es comprender la influencia de algunos de estos parámetros en el desarrollo de la adherencia entre las barras de FRP y el hormigón. Los factores examinados en este programa experimental se listan a continuación:

- Material de refuerzo (FRP o acero).
- Tipo de resina (termoestable o termoplástica).
- Diámetro de la barra FRP.
- Trabajabilidad del hormigón.

Se ha comparado el comportamiento de barras FRP con el comportamiento de las barras de acero, debido a que el FRP es un material ortotrópico y tienen propiedades mecánicas diferentes a las del acero.

Una evaluación adecuada de la influencia de estos factores en el desarrollo de la adherencia es crucial para comprender cómo estos materiales interactúan con el hormigón y para estimar longitudes de anclaje adecuadas.

3.2 MATERIALES

3.2.1 BARRAS FRP

Se utilizaron barras FRP con fibra de vidrio y resina viniléster (termoestable), barras FRP con fibra de vidrio y resina termoplástica y barras de acero con fines comparativos. Las características de las barras utilizadas se detallan en la Tabla 3.1.

Barra	Resina	Diámetro nominal (mm)	Nomenclatura
FRP	Viniléster	10.0	VE10
FRP	Viniléster	12.7	VE13
FRP	Termoplástica	12.7	TP13
Acero	-	10.0	ST10

Tabla 3.1 Características de las barras ensayadas.

Todas las barras FRP fueron producidas por la empresa Sireg. En la Figura 3.1 se observan los diferentes tipos de barras ensayadas.

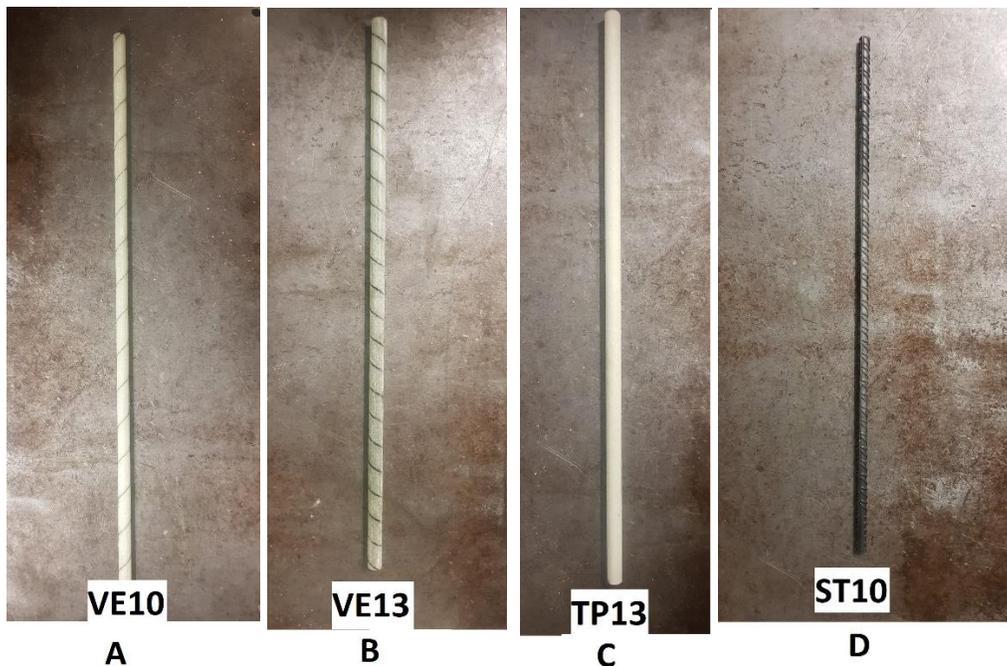


Figura 3.1 Barras FRP (A, B, C) y barra de acero (D) ensayadas.

Las barras VE10 y VE13, presentan una envoltura helicoidal en la superficie junto con un recubrimiento de arena de cuarzo, mientras que las barras TP13 presentan una superficie con revestimiento de arena de cuarzo.

3.2.1 HORMIGÓN

Con el objetivo de examinar la influencia de la trabajabilidad del hormigón en el desarrollo de la adherencia de las barras de FRP, se realizaron 2 mezclas de hormigón en laboratorio: hormigón autocompactante con resistencia a la compresión de 40MPa (SCC40) y hormigón convencional con resistencia a la compresión de 40MPa (C40).

La dosificación de las 2 mezclas de hormigón se indica en las tablas 3.2 y 3.3

Dosificación Hormigón SCC40	
Material	kg/m³
Agua	212
Cemento	475
Árido fino	1134.40
Árido grueso	486.15
Plastificante	2.38
Superplastificante	4.28

Tabla 3.2 Dosificación del hormigón SCC40.

Dosificación Hormigón C40	
Material	kg/m³
Agua	204
Cemento	475
Árido fino	1160.40
Árido grueso	497.30
Plastificante	2.38

Tabla 3.3 Dosificación del hormigón C40.

Se ensayaron 32 probetas para el estudio de la adherencia entre las barras y el hormigón. El análisis se realizó en base al tipo de resina de las barras FRP, el diámetro de las barras y la trabajabilidad del hormigón.

Se utilizó la siguiente nomenclatura para identificar las probetas ensayadas:

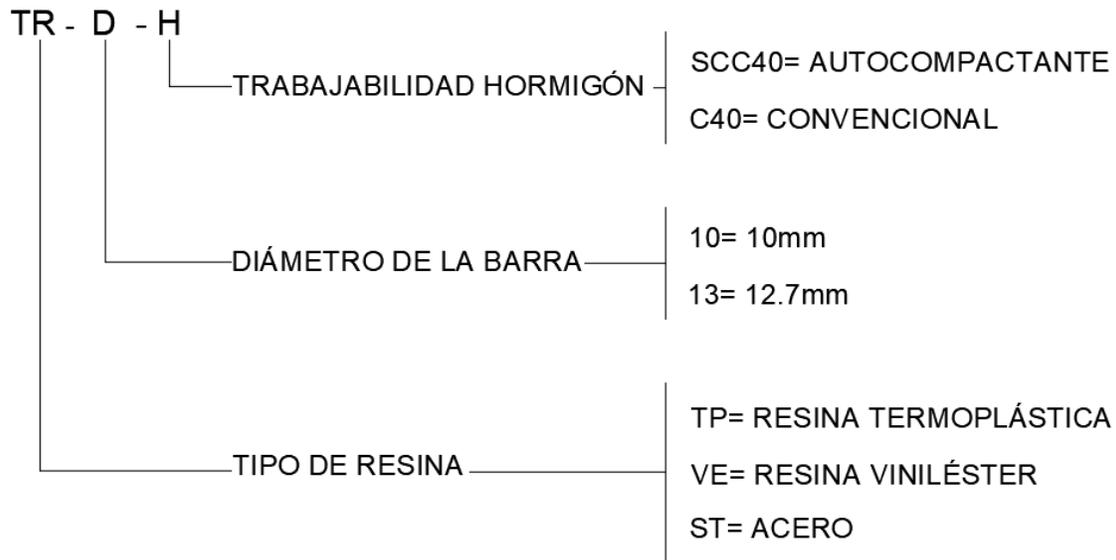


Figura 3.2 Nomenclatura para probetas en estudio

Por ejemplo, ST-10-SCC40 hace referencia a un espécimen con barra de acero de 10mm de diámetro, realizada en hormigón autocompactante con una resistencia a compresión de 40 MPa.

3.3 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Para una adecuada interpretación de los resultados de los ensayos pull-out, se debe tener una correcta caracterización de los materiales empleados, es decir, es indispensable realizar ciertos ensayos previos que permitan conocer con exactitud el comportamiento tanto del hormigón como de las barras FRP.

3.3.1 CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN

Como primer paso, se realizó una primera mezcla con cada una de las dosificaciones indicadas en las tablas 3.2 y 3.3 para la verificación de la consistencia y resistencia de estas. Se verificó la consistencia con ayuda del cono de Abrams, y se ensayaron a compresión 3 probetas de cada mezcla a los 7 días para verificar su resistencia.

Posteriormente, para cada mezcla de hormigón, se moldearon y curaron seis cilindros de control estándar de 200mm de longitud y 100mm de diámetro en las mismas condiciones que las muestras a ensayar por pull-out y se realizaron ensayos a los 14 días para determinar la resistencia a compresión, módulo de deformación y la resistencia a tracción indirecta del hormigón.

Resistencia a compresión y módulo de deformación

Siguiendo la norma UNE-EN-12390-3-2009 [33], tres de las muestras de control se ensayaron a compresión directa en la prensa Ibertest para determinar la resistencia del hormigón en compresión, y otras tres muestras se utilizaron para determinar el módulo de deformación secante.

Como primer paso, las superficies de las probetas utilizadas fueron pulidas con disco de diamante, como se observa en la figura 3.3. A continuación, las probetas fueron pesadas y medidas con el fin de obtener su densidad.



Figura 3.3 Pulido de las probetas previo el ensayo de compresión

Finalmente, las muestras fueron sometidas al ensayo de resistencia de compresión a la edad de 14 días, a través de una prensa de control Ibertest. Cada muestra fue posicionada dentro de la prensa de manera que la carga que reciba sea perpendicular. La velocidad del ensayo fue de 25mm/min hasta la rotura de cada probeta.



Figura 3.4 Ensayo a compresión del hormigón

Como se puede apreciar en la figura 3.4, la rotura es satisfactoria porque la cara visible es la que falla, generando poco daño en las caras que están en contacto con los platos.

La resistencia a compresión viene dada por la ecuación 3.1:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.1)$$

donde:

f_c = Resistencia a compresión (MPa)

F = Carga máxima de rotura (N)

A_c = área transversal de la probeta (mm²)

Resistencia a tracción indirecta

Se ensayaron tres muestras en tracción indirecta según la norma UNE-EN-12390-6-2010 [34], para determinar la resistencia del hormigón en tracción. Las condiciones del ensayo fueron las mismas que en el ensayo a compresión, con la diferencia que las probetas fueron colocadas en posición horizontal en el interior de la prensa (ver figura 3.5).

Mediante la ecuación 3.2 se determinó la velocidad de incremento de carga de la prensa:

$$R = \frac{s \cdot \pi \cdot L \cdot d}{2} \quad (3.2)$$

donde:

R = Velocidad de incremento de carga (N/s)

L = longitud de la probeta (mm)

d = dimensión de la sección transversal de la probeta (mm)

s = incremento tensión (MPa/s), la norma determina un valor constante entre 0.04 MPa/s y 0.06 MPa/s.

Para este caso, el incremento de carga fué de 0.05 MPa/s.

Por lo tanto, la velocidad de incremento de carga requerida fue de 0.2 MPa/s para todas las probetas.

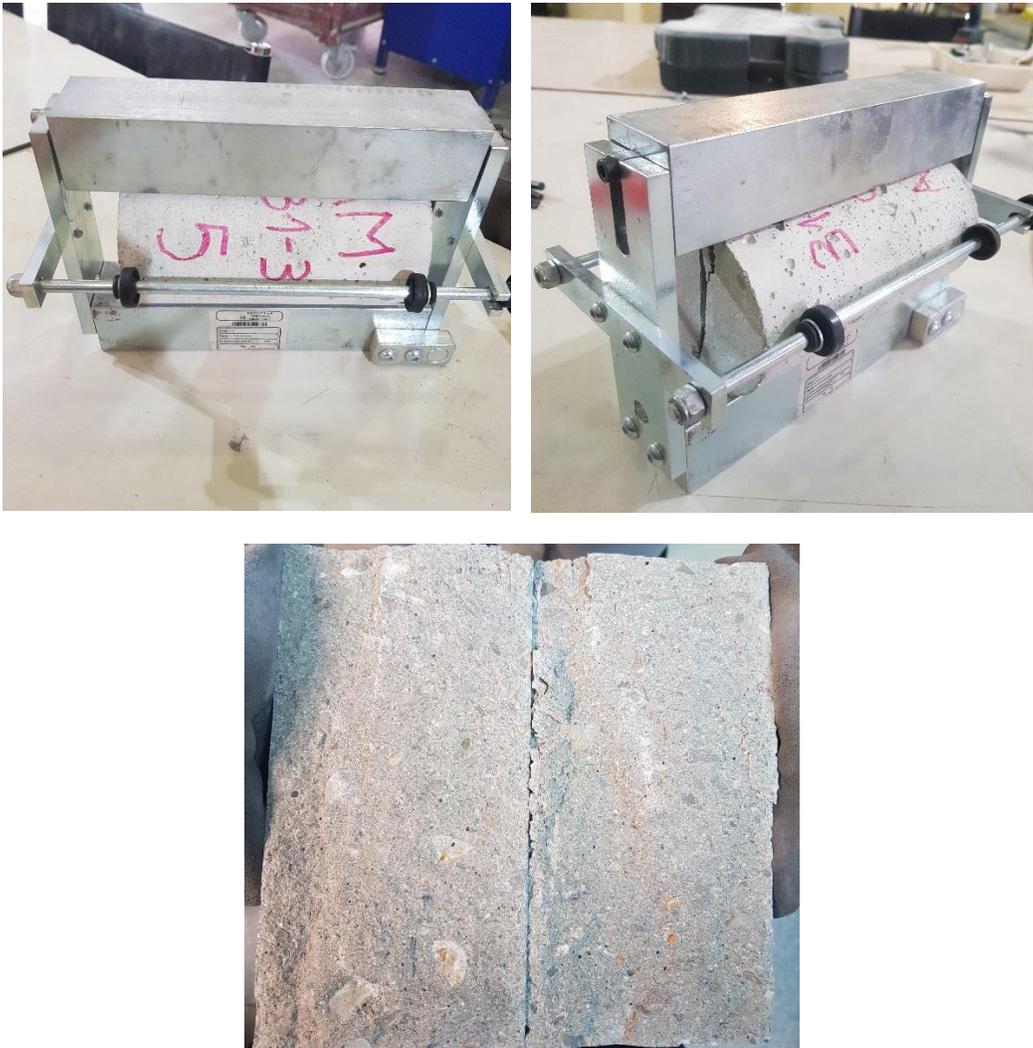


Figura 3.5 Ensayo a tracción indirecta del hormigón

Finalmente, el valor de resistencia a tracción f_{ct} se obtuvo con ayuda de la siguiente fórmula:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (3.3)$$

donde:

f_{ct} = resistencia a tracción indirecta de la probeta cilíndrica de hormigón (MPa)

F = carga máxima de rotura (N)

L = longitud de la probeta cilíndrica (mm)

d = diámetro de la probeta cilíndrica (mm).

El resumen de los resultados obtenidos se muestra en la Tabla 3.4. para el hormigón autocompactante y en la Tabla 3.5 para hormigón convencional de la misma resistencia característica de diseño.

Resistencia a compresión													
Peso (g)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	h_3 (mm)	h promedio (mm)	Peso específico (kN/m3)	F_{ult} (kN)	f_c (MPa)	Edad días	f_{cm} (Mpa)	Desviación estándar	Coef. De variación %	f_{ck} (Mpa)	
3441.5	194.4	194.4	194.3	194.4	10.02	362.30	46.13	7					
3499.0	194.4	194.2	194.2	194.3	10.19	365.50	46.54	7	47.4	1.8	3.8%	44.4	
3505.0	194.4	194.5	194.3	194.4	10.20	388.06	49.41	7					

Resistencia a tracción													
Peso (g)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	h_3 (mm)	h promedio (mm)	Peso específico (kN/m3)	F_{ult} (kN)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	Edad días	f_{ctm} (Mpa)	Desviación estándar	Coef. De variación %	$f_{ct,k}$ (Mpa)	
3467.5	194.3	194.4	194.3	194.3	10.10	94.17	3.09	7					
3448.5	194.5	194.6	194.5	194.5	10.03	77.51	2.54	7	3.06	0.51	16.7%	2.22	
3505.5	194.4	194.5	194.3	194.4	10.20	108.68	3.56	7					

Módulo de elasticidad					
F_{MAX} por ciclos (KN)	E_c (MPa)	Edad días	E_{cm} (Mpa)	Desviación estándar	Coef. De variación %
115	29996	7			
115	28673	7	28493	1600	5.6%
115	26811	7			

Tabla 3.4 Propiedades mecánicas del hormigón CSS40 a los 14 días.

Resistencia a compresión												
Peso (g)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h promedio (mm)	Peso específico (kN/m ³)	F _{ult} (kN)	f _c (MPa)	Edad días	f _{cm} (Mpa)	Desviación estándar	Coef. De variación %	f _{ck} (Mpa)
3524,0	194,5	194,4	194,4	194,4	10,26	355,88	45,31	7				
3515,5	194,5	194,4	194,6	194,5	10,23	331,93	42,26	7	44,9	2,4	5,3%	40,9
3526,5	194,4	194,6	194,5	194,5	10,26	369,05	46,99	7				

Resistencia a tracción												
Peso (g)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h promedio (mm)	Peso específico (kN/m ³)	F _{ult} (kN)	f _{ct,sp} (MPa)	Edad días	f _{ctm} (Mpa)	Desviación estándar	Coef. De variación %	f _{ct,k} (Mpa)
3526,5	194,4	194,4	194,4	194,4	10,27	78,86	2,58	7				
3546,0	194,4	194,4	194,4	194,4	10,32	91,28	2,99	7	2,87	0,25	8,7%	2,46
3548,0	194,4	194,5	194,5	194,5	10,32	92,87	3,04	7				

Módulo de elasticidad					
F _{MAX} por ciclos (KN)	E _c (MPa)	Edad días	E _{cm} (Mpa)	Desviación estándar	Coef. De variación %
115	31145	7			
115	30981	7	31198	248	0,8%
115	31468	7			

Tabla 3.5 Propiedades mecánicas del hormigón C40 a los 14 días.

Como se aprecia en las tablas 3.4 y 3.5, la resistencia a compresión media a los 14 días del hormigón autocompactante SCC40 de 47.4 MPa es ligeramente superior a la resistencia a compresión promedio del hormigón convencional de 44.9 MPa. De la misma manera, el hormigón autocompactante presenta una resistencia a tracción indirecta de 3.06 MPa mayor a la resistencia a tracción indirecta de 2.87 MPa del hormigón convencional. Por último, el módulo de elasticidad del hormigón autocompactantes es de 28.5GPa, mientras que el módulo de elasticidad del hormigón convencional es de 31.2 GPa. Se puede decir que, aunque existen diferencias entre los valores de las propiedades mecánicas de los dos hormigones en estudio, las variaciones son pequeñas y pueden ser despreciables.

3.3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS BARRAS FRP

Se realizaron ensayos de acuerdo con el ACI 440.R3-04 [19], para determinar las propiedades mecánicas de las barras, en particular la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad de las mismas y poder comparar con el valor nominal dado por el fabricante.

Propiedades de tracción longitudinal de las barras FRP

La resistencia a tracción y el módulo de Young de las barras FRP se obtuvieron según el apartado B.2 del ACI 440.R3-04 [19], y según la norma UNE-EN 10080 [35] para las barras de acero. Se utilizaron muestras de 500mm de longitud, para cada tipo de barra.

Se adaptó un sistema de protección especial en los extremos de las barras FRP, debido a que las barras FRP presentan baja resistencia transversal, y pueden presentar daños en las fibras de la zona de agarre si se ensayan a tensión utilizando los mismos sistemas de agarre que se utilizan para las barras de acero.

La protección de los extremos de las barras FRP consistió en abrazaderas formadas por tubos de acero de 25mm de diámetro y 100mm de longitud. En un principio los tubos fueron rellenos con resina HILTI HIT-RE 500 V4 para fijar correctamente la barra, ver imagen 3.6. La resina utilizada tuvo 7 días de curado antes de realizar los ensayos a tracción.

En la tabla 3.6 se muestran algunas de las propiedades técnicas de la resina HILTI HIT-RE 500 V4.

Especificaciones resina HILTI HIT-RE 500 V4	
Esfuerzo de adherencia ASTM C882M-13A	
2 días de curado	10.8MPa
14 días de curado	11.7MPa
Resistencia a la compresión ASTM D695-10	82.7MPa
Módulo de compresión ASTM D695-10	2600MPa
Resistencia a la tracción día 7 ASTM D638-14	49.3MPa
Elongación en la ruptura ASTM D638-14	1.1%

Tabla 3.6 propiedades técnicas de la resina HILTI HIT-RE-500 V4



Figura 3.6 Protección de las barras FRP para ensayo a tracción

Cada muestra fue montada en la máquina de ensayo, cuidando que el eje longitudinal de la barra coincidiera con la línea que une las dos mordazas de la máquina de ensayo. Se procedió a medir la distancia libre entre las mordazas antes de empezar el ensayo.

Como instrumentos de medición, se utilizaron galgas extensométricas unidireccionales, debido a que se necesita la medida de deformación en una sola dirección, y un extensómetro de $\pm 5\text{mm}$ de rango de medición (ver figura 3.7)



Figura 3.7 Extensómetro y galgas extensiométricas utilizadas en los ensayos de tracción

Debido a que ACI 440.3R-04 no establece una velocidad específica de ensayo (tan solo establece que la muestra debe de romper de 1 a 10 min), la tasa de desplazamiento fue de 1mm/min, constante durante todo el ensayo para las barras FRP, mientras que para las barras de acero se manejó una velocidad de desplazamiento de 1mm/min hasta la plastificación, posteriormente se aumentó la velocidad a 5mm/min.

Durante el ensayo a tracción de las barras FRP, cuando el extensómetro marcaba 0.5mm de abertura, éste era desmontado de la barra como medida de precaución, debido a que dichas barras presentan una falla frágil y puede causar daños en el aparato de medición, motivo por el cual, las galgas extensométricas fueron las encargadas de medir el desplazamiento último de las barras.

En la figura 3.8 se observa el ensayo a tracción realizado a dos de las barras en estudio.

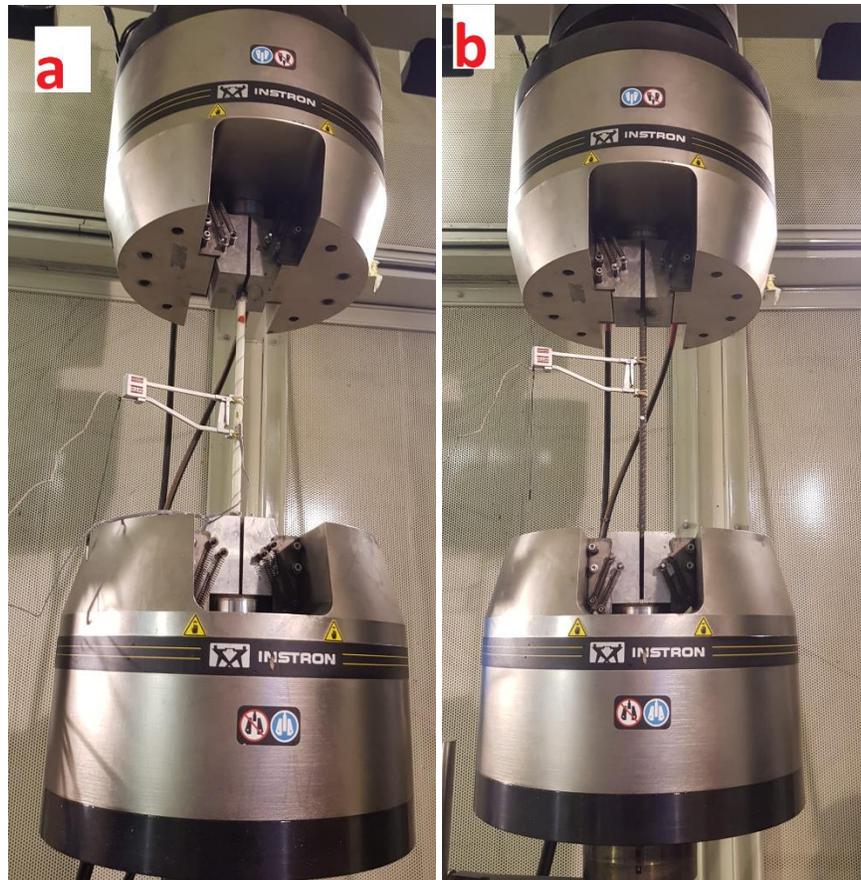


Figura 3.8 Ensayo a tracción de las barras a) ST-10 y b) VE-10

Durante el ensayo a tracción, existió una incidencia debido a que la resina utilizada en los extremos de las barras para protección de éstas se desprendió de las abrazaderas al ser aplastada por las mordazas de la maquina durante el ensayo (ver figura 3.9), motivo por el cual algunas de las barras ensayadas llegaron a la falla a una carga menor a la real y no fallaron de manera adecuada (splitting), como se observa en la figura 3.10.

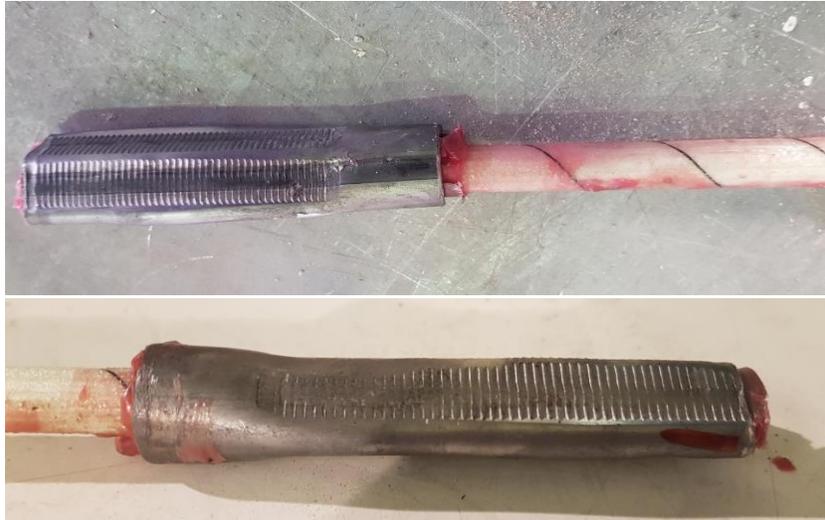


Figura 3.9 Desprendimiento de la resina en los extremos de las barras FRP



Figura 3.10 Falla de las barras FRP por desprendimiento de la resina

Por esta razón, se repitieron los ensayos a tracción de las barras, y se utilizó el adhesivo X60 de la marca comercial HBM. El pegamento usado es de endurecimiento rápido y está conformado por dos componentes: componente A-polvo y componente B-líquido (ver figura 3.11). La función de diseño del adhesivo es la instalación de medidores de deformación. Éste se adhiere a todos los metales de uso común y de una serie de sustancias no metálicas como el hormigón, la porcelana, el vidrio, la madera y algunos plásticos. Las especificaciones del adhesivo x60 se muestran en la tabla 3.7

Tras la mezcla de ambos componentes, el adhesivo endurece a los 5 minutos, teniendo un plazo de trabajabilidad de 1 minuto.



Figura 3.11 Adhesivo X60 utilizado para protección de los extremos de las barras FRP

Especificaciones adhesivo X60	
Módulo de elasticidad después del endurecimiento	13000 (MPa)
Resistencia	$>10^{15}$ (Ω)
Contracción durante el curado, depende de la proporción de la mezcla	
1:4	4.00 (%)
1:2	6.60 (%)
1:1	10.00 (%)

Tabla 3.7 Especificaciones adhesivo X60

En las figuras 3.12, 3.13, 3.14 y 3.15 se observa los diagramas esfuerzo-deformación obtenidos con cada tipo de barra.

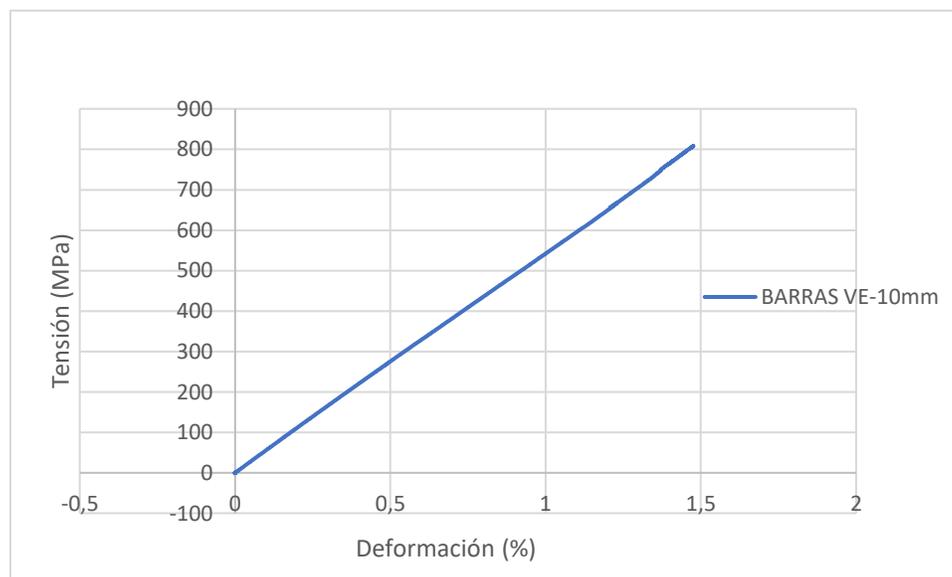


Figura 3.12. Curva esfuerzo-deformación barras VE-10mm

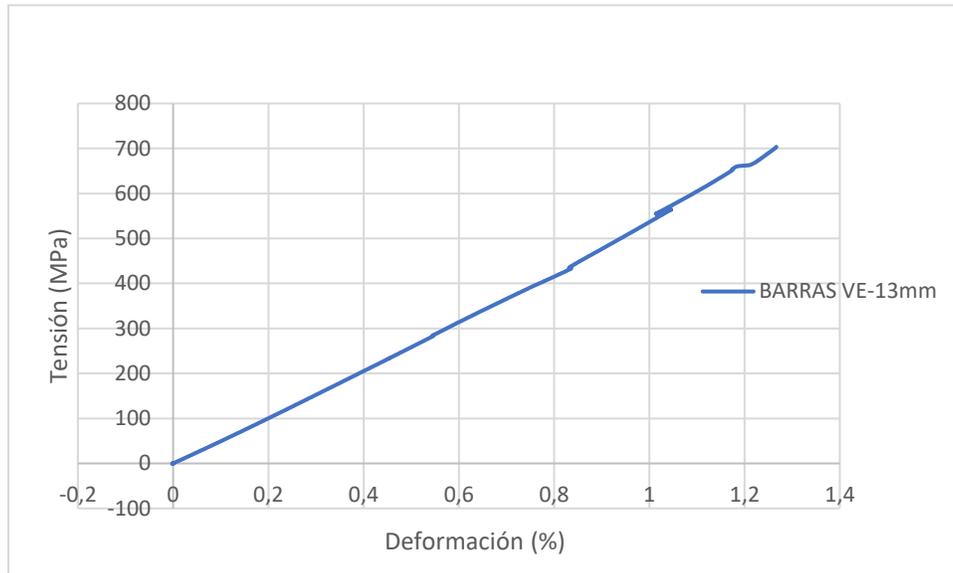


Figura 3.13 Curva esfuerzo-deformación barras VE-13mm

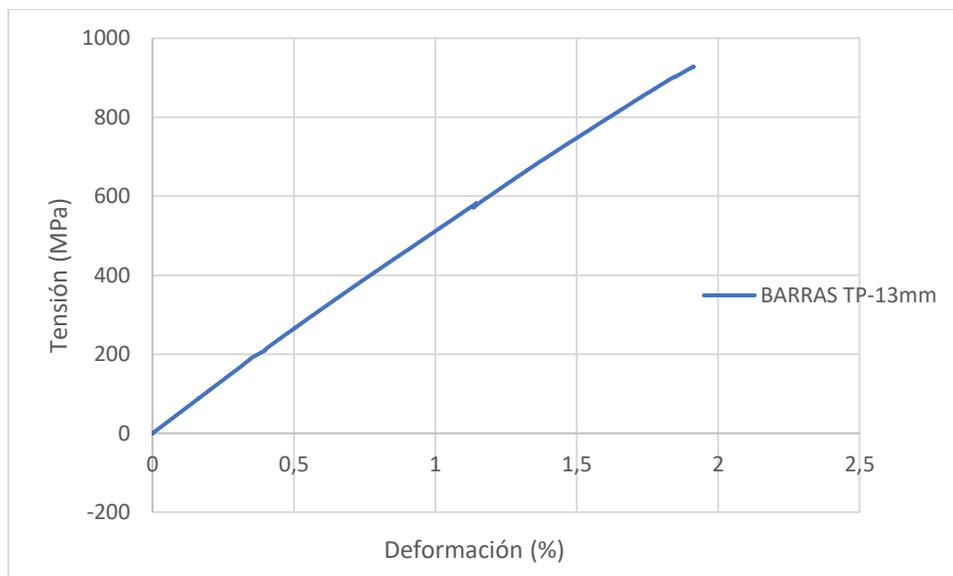


Figura 3.14 Curva esfuerzo-deformación barras TP-13mm

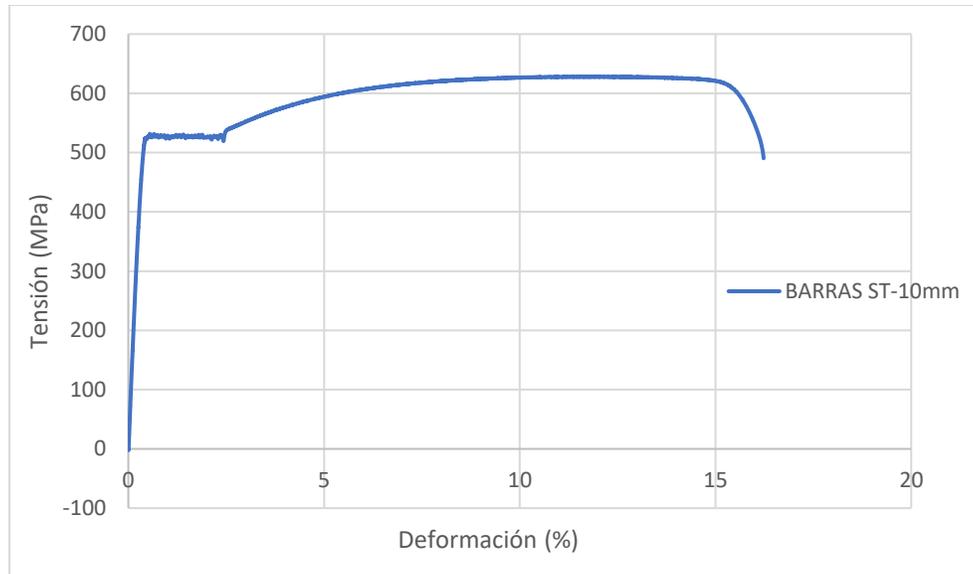


Figura 3.15 Curva esfuerzo-deformación barras ST-10mm

El comportamiento ante los esfuerzos de tracción de todas las barras FRP ensayadas en este estudio es elástico-lineal hasta la rotura (ver figuras 3.12, 3.13 y 3.14). Por el contrario, las barras de acero corrugadas ensayadas a tracción poseen un comportamiento elasto-plástico (ver figura 3.15).

La resistencia a la tracción para las barras de acero se calculó de acuerdo con la ecuación 3.4:

$$f_{fu} = \frac{F_m}{A} \quad (3.4)$$

Se debe tener en cuenta que las barras FRP tienen un comportamiento frágil, por lo que su resistencia máxima se definió igual que su resistencia de rotura. Por tanto, se utilizó la siguiente ecuación:

$$f_{fu} = \frac{F_u}{A} \quad (3.5)$$

Donde A es el área de la sección transversal de las barras.

Finalmente, el módulo de elasticidad a tracción se debe tomar como una regresión lineal de los puntos de datos del 20 al 50% de la resistencia a la tracción de la barra, siempre que la curva tensión-deformación sea lineal durante este rango de carga. El módulo de elasticidad se calculó a partir de la diferencia entre los valores de la curva de tensión-deformación al 20 y al 50% de la capacidad de tracción, como se indica en la ecuación 3.6.

$$E_L = \frac{F_1 - F_2}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot A} \quad (3.6)$$

donde:

E_L = módulo de elasticidad, MPa;

A = área de la sección transversal, mm^2 ;

F_1 y ε_1 = carga y deformación correspondiente, respectivamente, a aproximadamente el 50% de la capacidad de tracción última o capacidad de tracción garantizada, N y adimensional, respectivamente;

F_2 y ε_2 = carga y deformación correspondiente, respectivamente, a aproximadamente el 20% de la capacidad de tracción última o capacidad de tracción garantizada, N y adimensional, respectivamente.

En la Tabla 3.8 se muestran los valores medios F_{fu} y E_L , calculados mediante un análisis unidimensional, en los diferentes tipos de barras, a partir de los resultados obtenidos en cada muestra. Los valores de las características mecánicas de cada barra ensayada se encuentran en el anexo A.

Barra	Resistencia a la tracción promedio (MPa)	Módulo de Young promedio (GPa)	Resistencia a la tracción del fabricante (MPa)	Módulo de Young del fabricante (GPa)
VE10	808.47	44.83	900	46
VE13	703.50	46.71	850	46
TP13	928.10	53.49	900-1000	58
ST10	530.13	153.92	500-690	200

Tabla 3.8 Propiedades de tracción longitudinal de las barras

Los valores medios de la Tabla 3.8 muestran que las barras TP13 desarrollan una mayor tensión (928.10MPa) y un módulo elástico (52.49) más elevado que el resto de las barras FRP. El módulo elástico de las barras de acero es del orden de 3.5 veces que el de las barras FRP.

Por último, en la figura 3.16 se presentan las barras después de haber fallado a tracción al finalizar el ensayo.

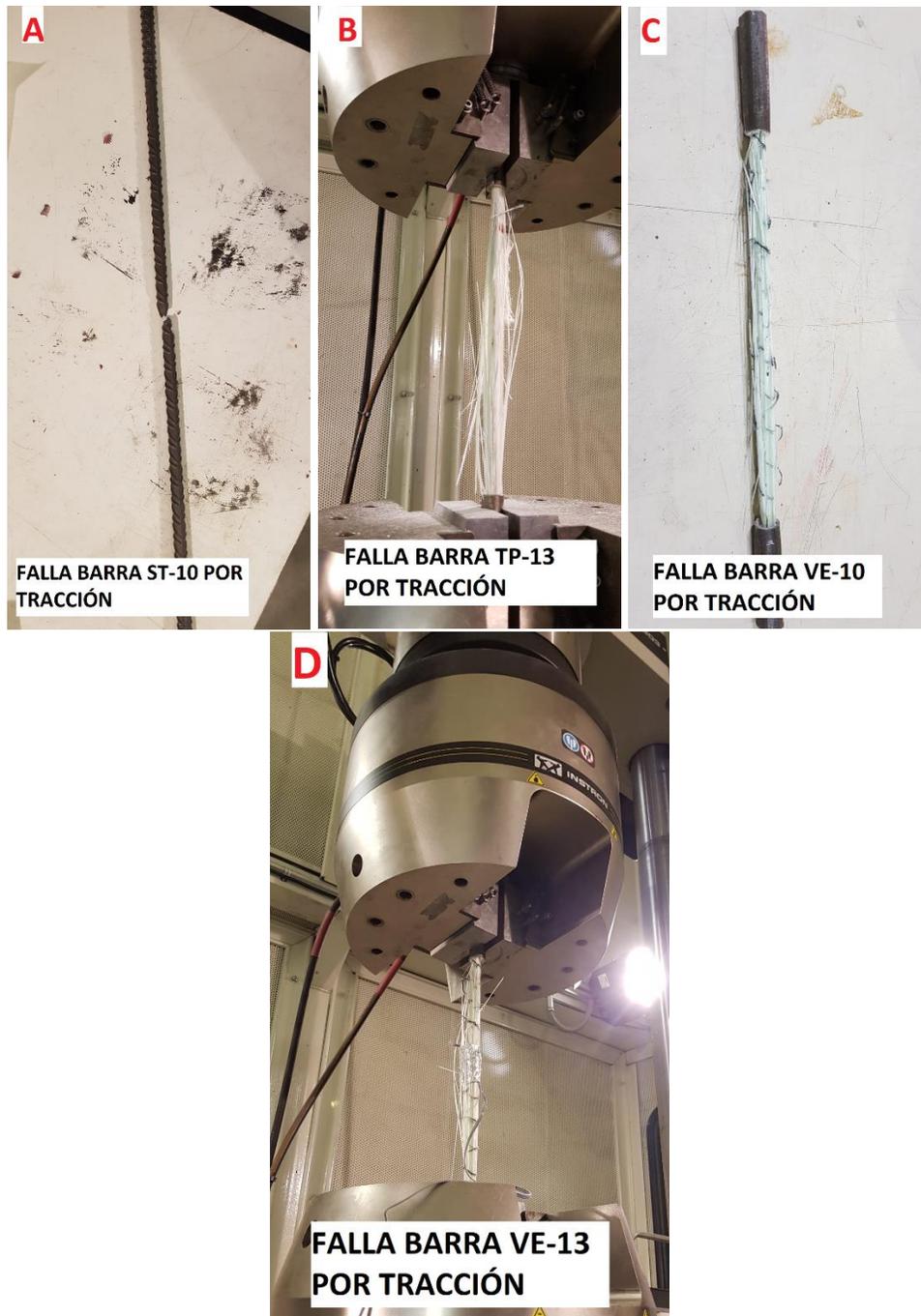


Figura 3.16 Barras después del ensayo a tracción

Los resultados del ensayo de tracción muestran que las barras de FRP poseen un modo de rotura frágil, en el cual la barra rompe repentinamente por splitting de la sección resistente (Fig. 3.16.B, C y D). En cambio, las barras de acero corrugadas poseen un modo de rotura dúctil ocasionado por el agotamiento de la sección resistente (Fig. 3.16.A).

3.4 PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS DE PULLOUT

3.4.1 PREPARACIÓN DEL MOLDE

Los moldes utilizados para los ensayos pull out realizados con probetas cúbicas de hormigón son de metal de 10mm de espesor y de 200mm cada lado como refiere la norma ACI 440.3R-04 [19]. Se recubrió el interior del molde con una fina capa de aceite para facilitar el desmoldeo de los cubos de hormigón. Las barras fueron colocadas en el centro de los moldes como se muestra en la figura 3.17.

Una vez colocada cada barra, el espacio sobrante en la abertura del molde por donde se inserta la barra, fue sellado con burletes para impedir la entrada de agua y otras sustancias. Cada barra fue ajustada al molde mediante abrazaderas metálicas a ambos lados del molde, de manera que la barra no se deslice durante el hormigonado.

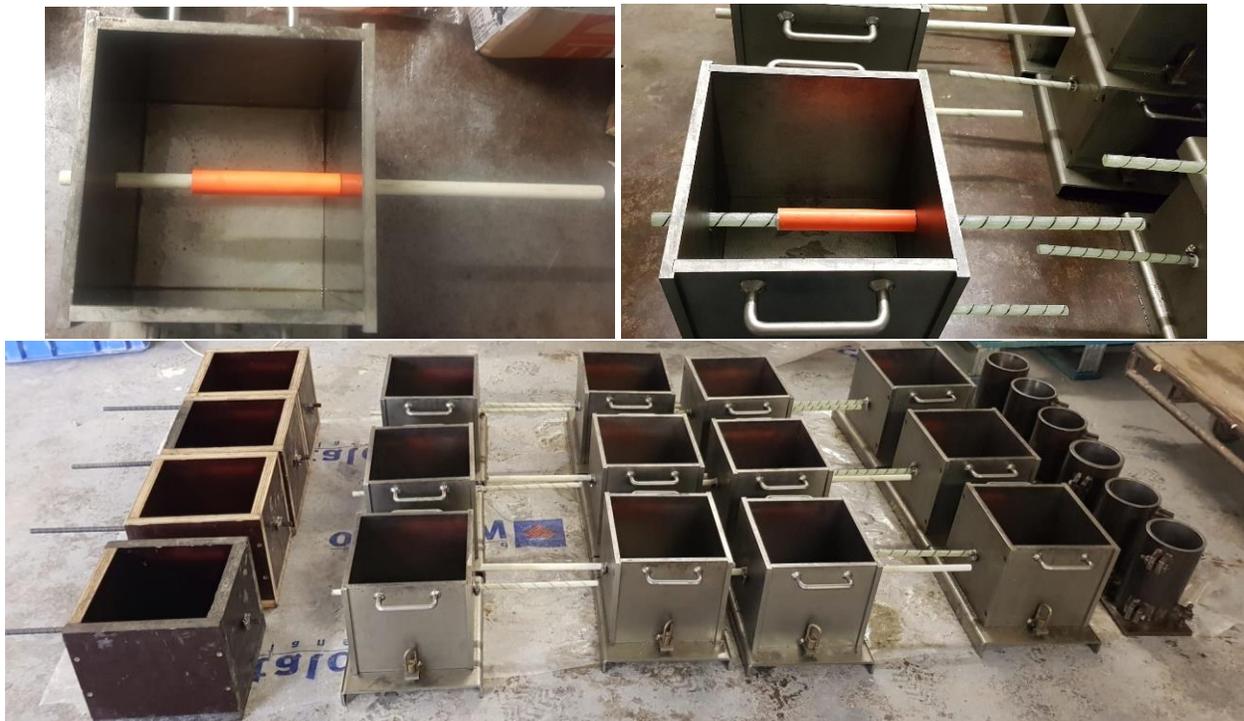


Figura 3.17 Preparación de las probetas

3.4.2 PREPARACIÓN DE LA BARRA

Las barras de FRP utilizadas fueron cortadas en 500mm de longitud. En el extremo de las barras que actuó como extremo cargado durante el ensayo pull-out, se adoptó el mismo sistema de protección utilizado durante los ensayos de las barras FRP a tracción.

En el otro extremo de las barras, que actuó como extremo descargado durante el ensayo pull-out, se delimitó la longitud de adherencia, $l_b = 5d_b$, donde d_b es el diámetro de la barra FRP. Para evitar el contacto entre las barras FRP y el hormigón en la zona fuera del área perteneciente a la longitud de adherencia, las barras fueron revestidas con tubos de PVC con diámetro interior ligeramente mayor que el diámetro exterior de las barras. Se impidió el deslizamiento de las barras dentro de los tubos PVC y la entrada de hormigón entre el PVC y las barras mediante la colocación de burletes en los extremos de los tubos PVC, confiriendo así su impermeabilidad.

En el extremo libre, las barras sobresalieron ligeramente del hormigón de modo que el extremo del LVDT se apoyó en la barra, como se muestra en la figura 3.18, donde se indica el esquema de las probetas para el ensayo pull-out.

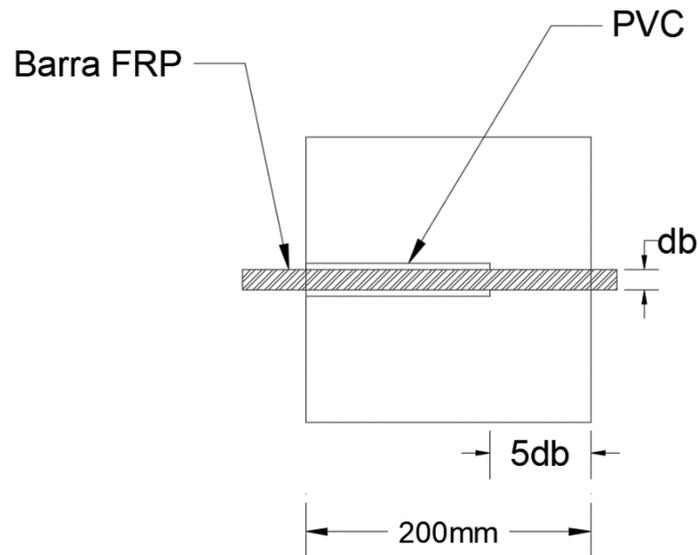


Figura 3.18 Probeta del ensayo pull-out

3.4.1 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Para cada mezcla de hormigón, se realizaron 16 probetas de ensayo pull-out, 4 probetas para cada tipo de barra. Adicionalmente, se fabricaron 6 probetas cilíndricas de 200mmx100mm para la caracterización del hormigón; por lo que se fabricó 160 litros de hormigón aproximadamente por mezcla. Éste fue el motivo por el cual, se utilizó una hormigonera de 200 litros de capacidad (ver figura 3.19).



Figura 3.19 Fabricación del hormigón

En el caso del hormigón autocompactante SCC40, se realizó el ensayo de extensión de flujo, dando como resultado un diámetro final de extensión de 50cm. Las probetas se fabricaron por vertido simple, de una sola vez y sin varillado. Únicamente se realizó el acabado superficial con llana.



Figura 3.20 Ensayo de extensión de flujo

Mientras que, en el caso del hormigón convencional, para determinar su consistencia, se realizó el ensayo de asentamiento con el cono de Abrams, dando como resultado un asentamiento de 9cm, que hace referencia a una consistencia “blanda”, según la norma UNE 83313:90 [36] (ver figura 3.21).



Figura 3.21 Ensayo de asentamiento con el cono de Abrams

Durante la ejecución de los especímenes para el ensayo pull-out, se colocó el hormigón en dos capas de aproximadamente el mismo espesor y cada capa fue vibrada con la ayuda de una mesa vibratoria. Se tomaron 6 muestras de control del mismo lote de hormigón para ensayarlas en compresión y en tensión indirecta.

Se prestó especial atención durante el vertido del hormigón y la vibración para no alterar la posición de las barras; y se realizó una adecuada nivelación de la superficie de la probeta con una llana, para eliminar agujeros y minimizar las irregularidades geométricas.



Figura 3.22 Compactación de las probetas con hormigón convencional C40

Finalmente, y para evitar la pérdida de humedad se cubrieron las muestras con plástico.



Figura 3.23 Probetas luego del hormigonado

Al día siguiente las probetas y los cilindros de control fueron desmoldados, marcados y trasladados a la sala de curado del laboratorio a una temperatura a 20 °C y una humedad del 80% aproximadamente, donde permanecieron por 14 días hasta ser ensayadas. Se realizó el mismo procedimiento para cada mezcla de hormigón.



Figura 3.24 Probetas en cámara de curado

Después de 14 días de fabricadas, las probetas fueron retiradas de la sala de curado y se colocó la protección en los extremos de las barras FRP un día antes de ensayar las probetas, de manera que la resina HILTI HIT-RE-500 V3 alcance la resistencia adecuada.



Figura 3.25 Colocación de la protección en el extremo cargado de la barra FRP

En la figura 3.26 se puede observar cómo actúa la protección de las abrazaderas fabricadas en las barras FRP al momento del ensayo.

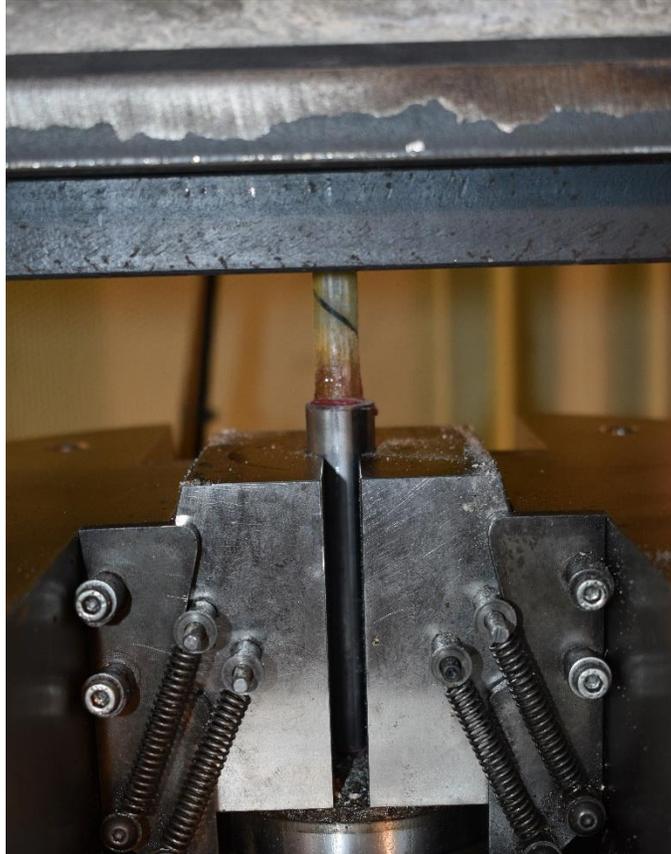


Figura 3.26 Protección de la barra por el aplastamiento de las mordazas de la máquina durante el ensayo.

3.5 CONFIGURACIÓN DE LOS ENSAYOS

En la figura 3.27 se observa la configuración estándar para toda la serie de ensayos. El equipo constaba de una placa de acero de 25mm de espesor conectada en los cuatro bordes con cuatro varillas de 20 mm de diámetro. La placa disponía de un orificio en su centro que permitía que la barra de FRP pasara a través y pueda ser sujeta por la mordaza inferior.

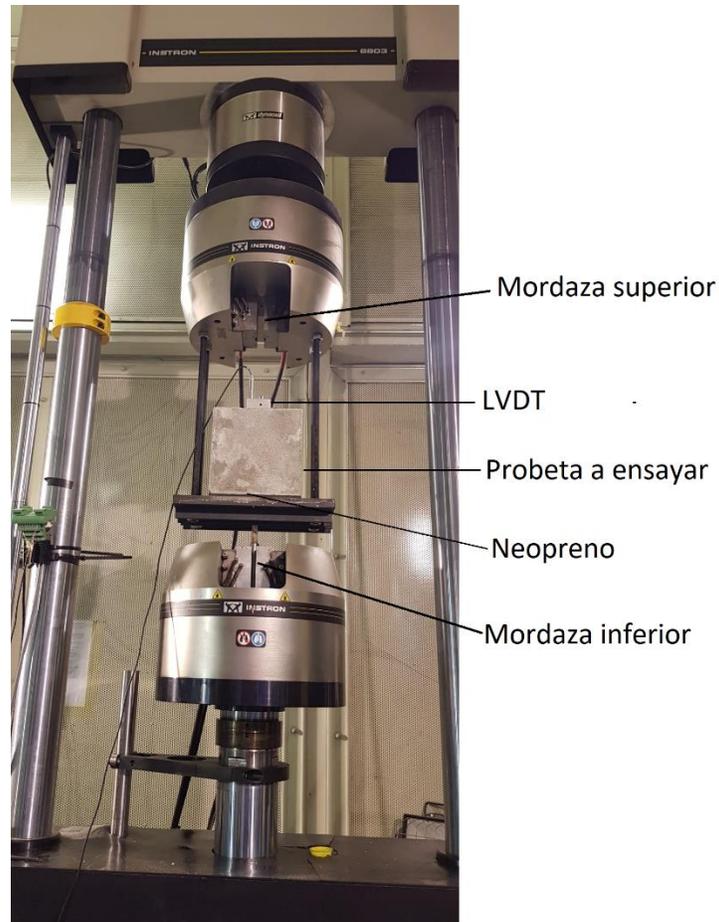


Figura 3.27 Configuración estándar para todos los ensayos pull-out.

Entre el bloque de hormigón y la placa de soporte de acero, se introdujo un cuadrado de neopreno de 0.5cm de espesor para asegurar el contacto entre la superficie del bloque de hormigón y la placa de soporte de acero, de esta manera se evitó que pequeñas irregularidades en la superficie de la probeta introduzcan alguna flexión accidental en la barra durante la carga.

Se midió el deslizamiento de la barra en el extremo descargado (extremo superior) con ayuda de un LVDT, que se ajustó a la barra mediante la ayuda de un cubo de aluminio de tal manera que el LVDT tocara la superficie superior del cubo de hormigón, tal como se muestra en la figura 3.28.

Los ensayos se realizaron en modo de control de desplazamiento. Los datos de salida de la máquina hidráulica y el LVDT se registraron utilizando un sistema automático de adquisición de datos.

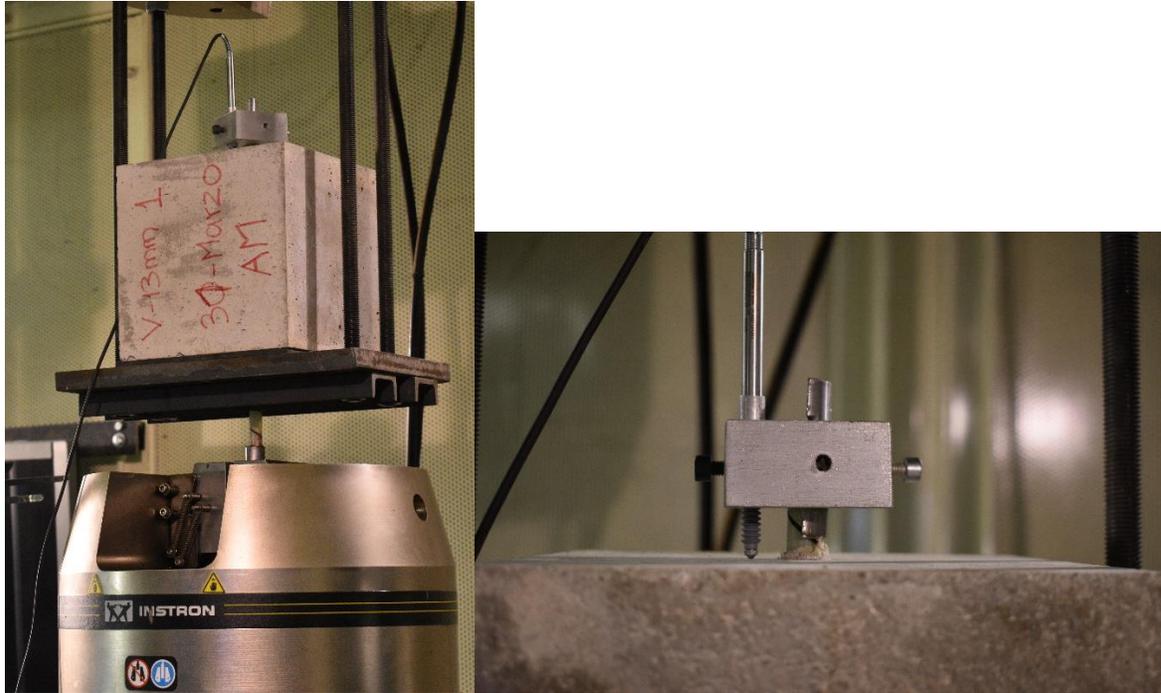


Figura 3.28. Colocación del LVDT en el extremo descargado de la barra

El procedimiento de ensayo fue el siguiente: se empezó con una medida inicial del LVDT de 2.5mm, y el desplazamiento de extracción se aplicó a la muestra a una velocidad de 0.6mm/min hasta que la medición del LVDT llegó a -2.5mm, a continuación, se modificó la velocidad de desplazamiento a 1.2mm/min. Cuando el LVDT tuvo una medición de -5mm, éste fue retirado del ensayo debido a que su rango máximo de medición llega a -5mm. Posteriormente se continuó con el ensayo sin el LVDT hasta la extracción de la barra.

Cuando terminó la prueba, se guardaron los datos experimentales y se retiró la muestra para un examen más detallado.

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LOS ENSAYOS PULL-OUT

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los ensayos pull-out descritos en el capítulo 3.

Los datos obtenidos a partir de los resultados experimentales se utilizaron para producir las curvas de tensión de adherencia-deslizamiento de cada espécimen.

La tensión de adherencia promedio a lo largo de todo el ensayo, es la carga de extracción registrada en la barra, dividida por el área de la superficie nominal de la longitud de empotramiento de la barra [19]. Tal como se indica en la ecuación 4.1:

$$\tau_{av} = \frac{P}{\pi \cdot d_b \cdot l_b} \quad (4.1)$$

donde:

τ_{av} = Esfuerzo de adherencia promedio (MPa).

P= Carga de tracción registrada (N).

d_b =Diámetro de la barra (mm).

l_b = Longitud de empotramiento (mm).

El valor de adherencia promedio máximo se obtiene mediante la ecuación 4.1 cuando la carga de extracción alcanza su valor máximo (F_{max}) durante el ensayo.

La curva de tensión de adherencia-deslizamiento en el extremo libre de la barra se obtiene directamente de la medición de deslizamiento del LVDT.

En la tabla 4.1 se exponen los resultados de las probetas con hormigón autocompactante SCC40 y en la tabla 4.2 los resultados de las probetas con hormigón convencional C40. Se presenta la carga de adherencia máxima obtenida en KN, la tensión de adherencia máxima τ_{max} en MPa, el valor de deslizamiento del extremo libre correspondiente al punto de máxima adherencia, y el modo de fallo para cada probeta.

Probeta		P_{max} (KN)	T_{max} (MPa)	S_m (mm)	Modo de rotura
VE-10- SCC40	1	24,64	15,69	0,14	Pull-out
	2	22,88	14,57	0,19	Pull-out
	3*	-	-	-	-
	4	25,87	16,47	0,16	Pull-out
VE-13- SCC40	1	28,09	11,09	3,19	Pull-out
	2	24,56	9,70	2,74	Pull-out
	3	26,38	10,41	6,26	Pull-out
	4	24,47	9,66	7,10	Pull-out
TP-13- SCC40	1	13,18	5,20	1,06	Pull-out
	2	14,98	5,75	7,24	Pull-out
	3	16,03	6,33	0,69	Pull-out
	4	14,59	5,76	2,29	Pull-out
ST-10- SCC40	1	31,61	20,13	0,55	Pull-out
	2	26,84	17,09	0,94	Pull-out
	3	29,03	18,48	0,41	Pull-out
	4	36,20	23,05	0,82	Pull-out

Tabla 4.1 Resultados de probetas con hormigón CSS40

Espécimen		P_{max} (KN)	T_{max} (MPa)	S_m (mm)	Modo de rotura
VE-10-C40	1	-	-	-	-
	2	28,95	18,43	0,19	Pull-out
	3	29,93	19,05	0,19	Pull-out
	4	24,15	15,37	0,18	Pull-out
VE-13-C40	1	30,43	12,01	2,32	Pull-out
	2	34,79	13,73	5,26	Pull-out
	3	23,83	9,41	7,11	Pull-out
	4	25,87	10,21	2,85	Pull-out
TP-13-C40	1	13,90	5,44	5,35	Pull-out
	2	14,30	5,65	5,77	Pull-out
	3	14,90	5,84	7,62	Pull-out
	4	13,25	5,22	7,53	Pull-out
ST-10-C40	1	31,40	19,99	1,13	Pull-out
	2	30,68	19,53	1,00	Pull-out
	3	-	-	-	-
	4	29,79	18,96	0,59	Pull-out

Tabla 4.2 Resultados de probetas con hormigón C40

Los especímenes fallaron por la extracción de las barras de refuerzo. No se observó ruptura de la barra ni fisuración del hormigón circundante.

El modo de falla de adherencia en las barras de FRP difiere del modo de falla de adherencia de las barras de acero corrugadas, debido a que en el caso de las barras FRP la rotura se produce parcialmente en la superficie de la barra, y no solo en el hormigón como en el caso de las barras de acero, al despegar parte de la capa superficial de la barra. Esto se aprecia en las figuras 4.1 y 4.2, donde se muestra el estado de las barras extraídas del cubo de hormigón, al finalizar el ensayo.

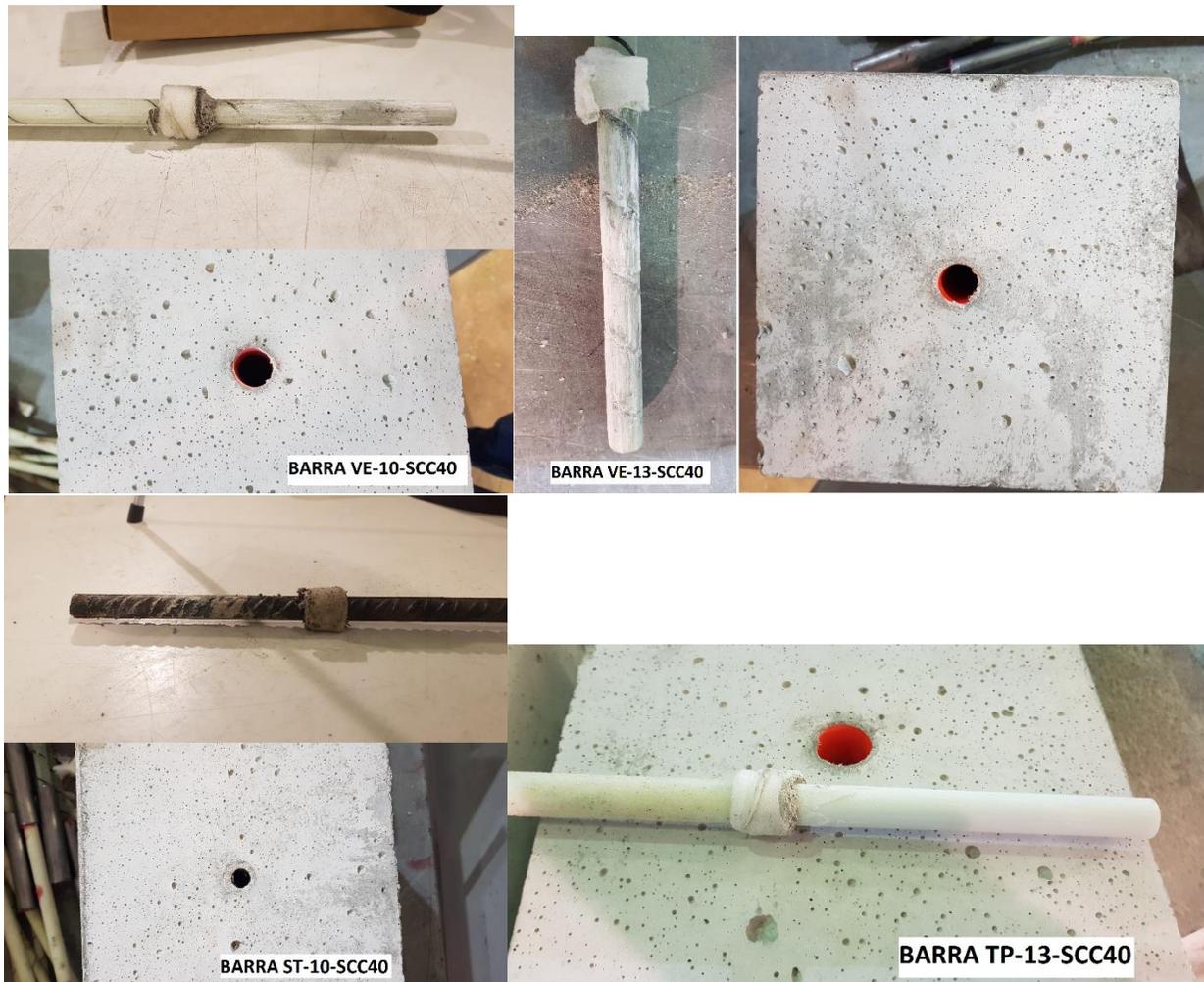


Figura 4.1 Barras ensayadas a pull-out con hormigón SCC40.

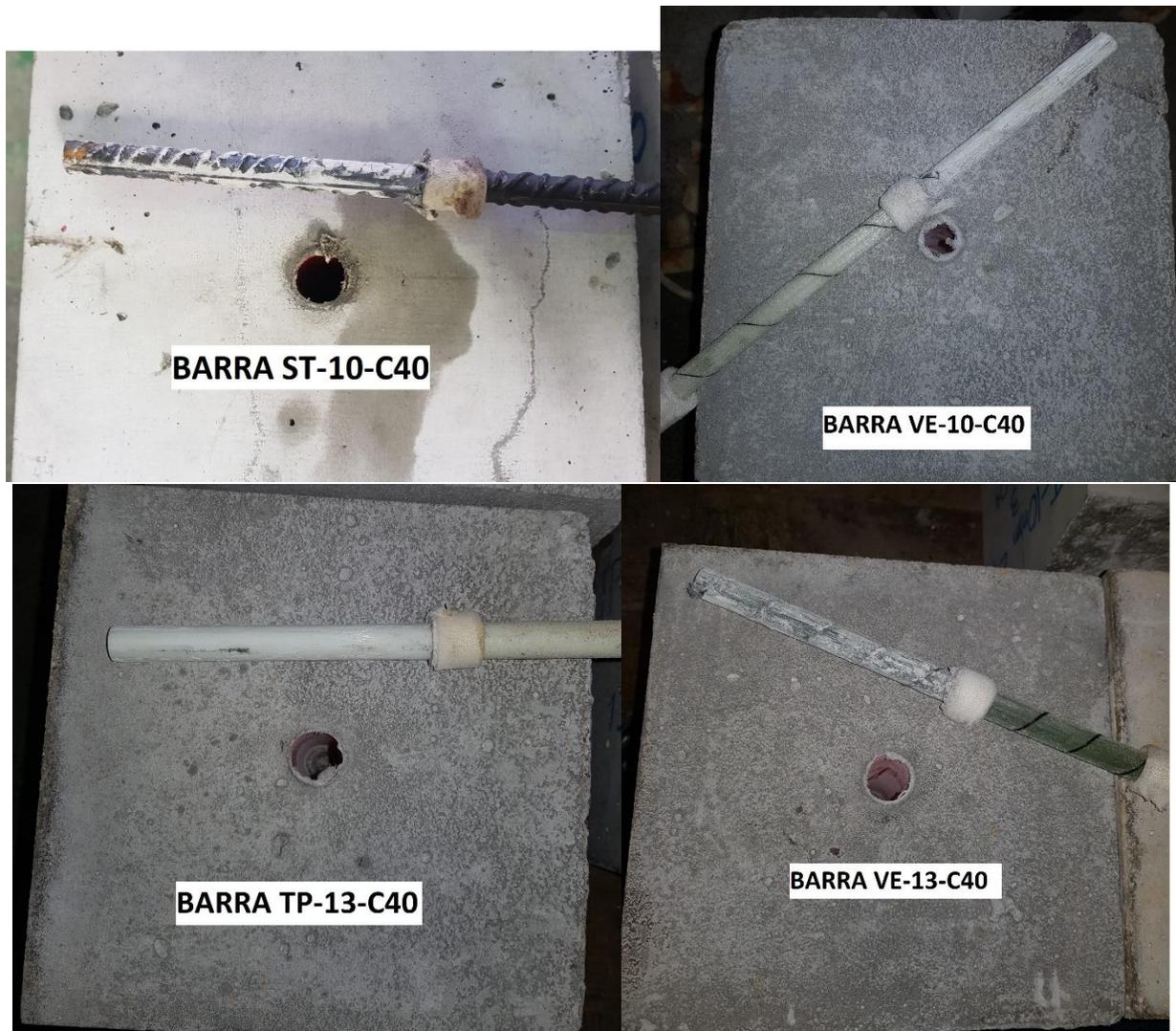


Figura 4.2 Barras ensayadas a pull-out con hormigón C40.

Durante el ensayo de las probetas VE-10-SCC40 número 3 y VE-10-C40 número 1, la resina de la protección del extremo cargado de las barras se desprendió de las abrazaderas al ser aplastada por las mordazas de la máquina, por lo que se tuvo que parar los ensayos, las barras se muestran en la figura 4.3. Los resultados de estos dos ensayos fueron omitidos.



Figura 4.3 Desprendimiento de la resina en las abrazaderas de las barras

Por último, se omitió el resultado de la probeta ST-10-C40, debido a que, al realizar la extracción de la barra del cubo de hormigón, ésta presentaba hormigón en la zona de no adherencia. Posterior a esto, se realizó un ensayo brasileño a la probeta de hormigón, y se verificó que el tubo de PVC, que impide la adherencia entre la barra y el hormigón, se deslizó de su lugar al momento del hormigonado de la muestra.



Figura 4.4 Verificación del deslizamiento del tubo PVC dentro de la probeta 3-ST-10-C40

5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LOS ENSAYOS PULL-OUT

En este capítulo se examina el modo de fallo relacionado con la adherencia entre las barras y el hormigón de cada probeta, y se discuten los diversos parámetros que influyen en el desarrollo de la adherencia, según los resultados presentados en la sección 4.

5.1 RELACIÓN TENSIÓN DE ADHERENCIA MEDIA-DESLIZAMIENTO

La relación tensión de adherencia media-deslizamiento del extremo libre se caracteriza por un primer tramo ascendente en el que la tensión de adherencia aumenta registrando pequeños incrementos de deslizamiento. Una vez se alcanza la tensión máxima de adherencia se inicia un segundo tramo de ablandamiento. Todas las curvas experimentales obtenidas se muestran en el apéndice B.

En las figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 se presentan las curvas representativas de cada clase de barra ensayada para ilustrar el comportamiento adherente diferente para cada tipo de barra.

La figura 5.1 muestra el comportamiento adherente de las barras de diámetro 10 mm con resina viniléster (termoestable) embebidas en hormigón autocompactante. Se observa como la tensión adherente máxima se encuentra entre 14.57 y 16.47 MPa en función de la muestra, siendo el deslizamiento máximo promedio de 6.76 mm. Tal y como muestra la Figura 5.2, la tensión de adherencia máxima fue mayor para el hormigón convencional, siendo esta entre 15.37 y 19.05 MPa y un deslizamiento máximo de 7.58mm.

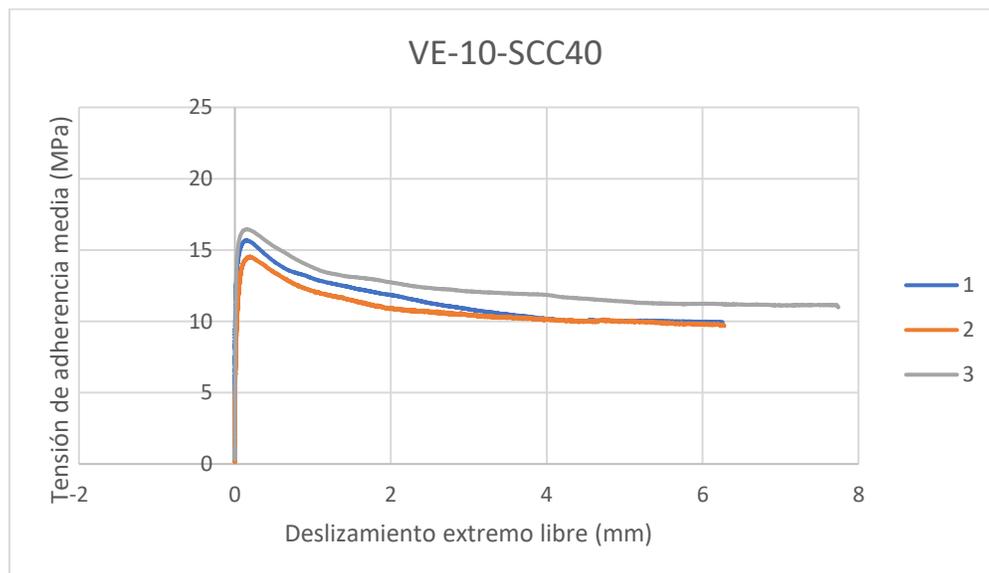


Figura 5.1 Curva Tensión de adherencia media-Deslizamiento extremo libre barras VE-10-SCC40

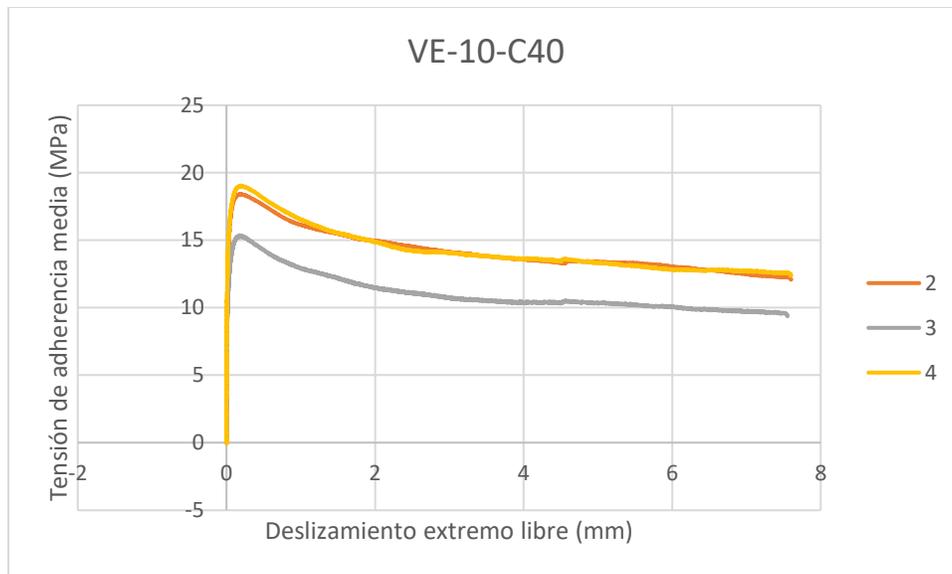


Figura 5.2 Curva Tensión de adherencia media-Deslizamiento extremo libre barras VE-10-C40

La figura 5.3 muestra el comportamiento adherente de las barras de diámetro 13 mm con resina viniléster (termoestable) embebidas en hormigón autocompactante. La tensión adherente máxima se encuentra entre 9.66 y 11.09 MPa en función de la muestra (promedio de 10.21MPa), y el deslizamiento promedio máximo de 7.72mm. En la figura 5.4, se observa que la tensión de adherencia máxima para un hormigón convencional fue entre 9.41MPa y 13.73MPa (promedio 11.34MPa) ligeramente mayor que para el hormigón autocompactante, y con un deslizamiento promedio máximo de 7.60mm.

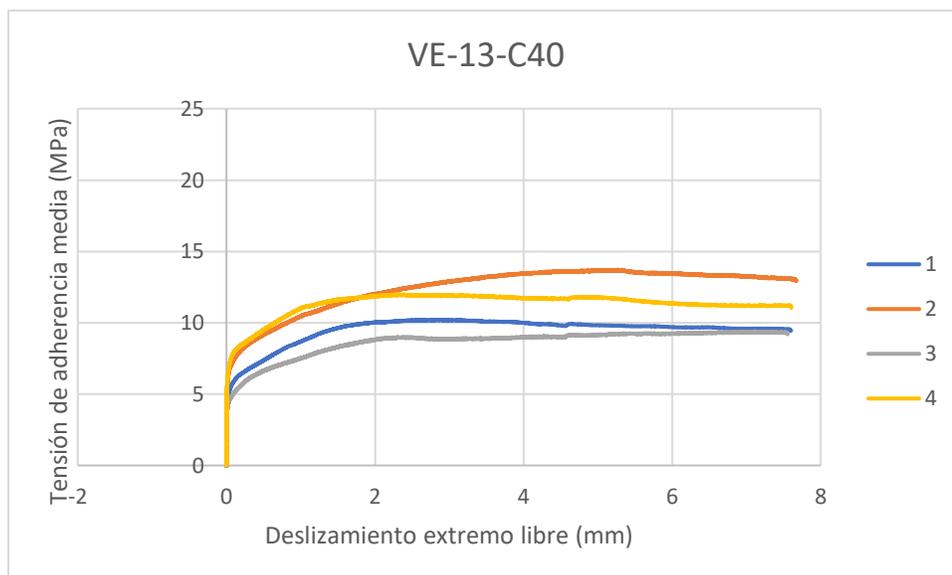


Figura 5.3 Curva Tensión de adherencia media-Deslizamiento extremo libre barras VE-13-SCC40

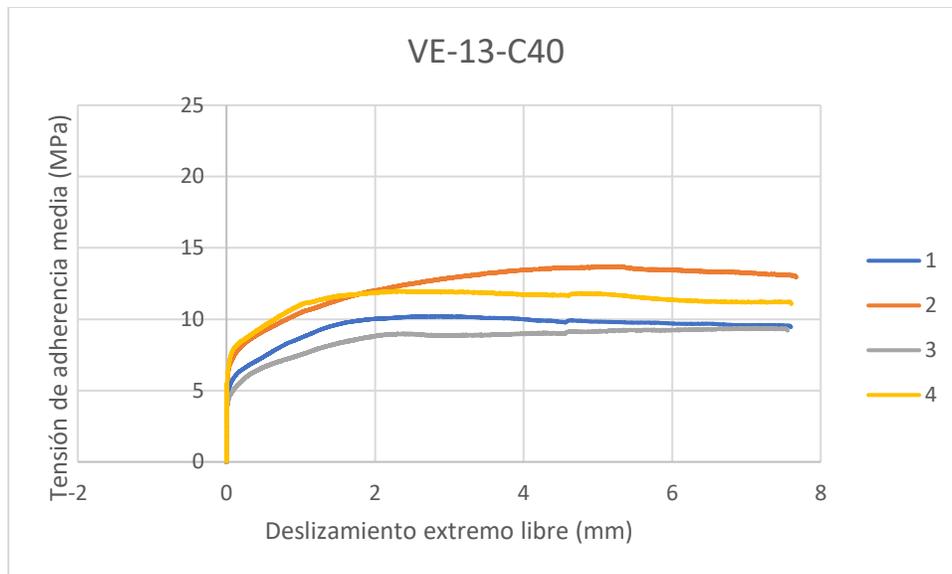


Figura 5.4 Curva Tensión de adherencia media-Deslizamiento extremo libre barras VE-13-C40

En el caso de las barras VE-10 y VE-13, que presentan una envoltura helicoidal en la superficie junto con un recubrimiento de arena de cuarzo, el hormigón triturado que se adhiere a las pequeñas deformaciones de las barras ejerce una acción de acuñamiento. Las barras de viniléster, VE presentaron un espaciado de nervadura que disminuye con el diámetro de la barra. Es decir, las barras VE-10 presentan un mayor espaciado de la nervadura que las barras VE-13. Al comparar las figuras 5.1 y 5.2 con las figuras 5.3 y 5.4, se puede observar que la forma de las curvas tensión de adherencia media-deslizamiento de las barras VE cambia con el diámetro de las barras ensayadas.

Cuando el espaciado de las nervaduras aumenta, la acción de acuñamiento disminuye, mientras que, para diámetros mayores, el espaciado de la nervadura disminuye y se desarrolla una mayor resistencia mecánica después del punto donde se pierde la adherencia química, lo que aumenta la tensión de adherencia. Esto explica la diferencia en las curvas de tensión de adherencia media-deslizamiento obtenidas cuando se utilizan diámetros diferentes.

Para diámetros más pequeños, el deslizamiento del extremo libre correspondiente a la tensión de adherencia máxima es significativamente menor que para diámetros más grandes.

La resistencia de adherencia para barras de diámetro 10mm es controlada por la adherencia química, mientras que en el caso de barras de diámetro 13mm la fricción y la resistencia mecánica dominan el comportamiento adherente. Este contraste en el comportamiento adherente se relaciona con la diferencia existente entre los acabados superficiales de las barras, ya que la geometría de las nervaduras es igual para todos los diámetros considerados pero la distancia entre nervaduras varía de un diámetro a otro.

El cambio de comportamiento que se produce cuando se modifica el diámetro de la barra, se observa tanto en el hormigón autocompactante SCC40 como en el hormigón convencional C40.

La figura 5.5 muestra el comportamiento adherente de las barras de diámetro 13 mm con resina termoplástica embebidas en hormigón autocompactante. La tensión adherente máxima se encuentra entre 5.20 y 6.33 MPa en función de la muestra (promedio de 5.76MPa), y el deslizamiento promedio máximo es 7.5mm. Tal y como muestra la figura 5.6, la tensión de adherencia máxima fue ligeramente menor para el hormigón convencional, siendo esta entre 5.22 y 5.84 MPa (promedio de 5.54MPa) y un deslizamiento máximo promedio de mm.

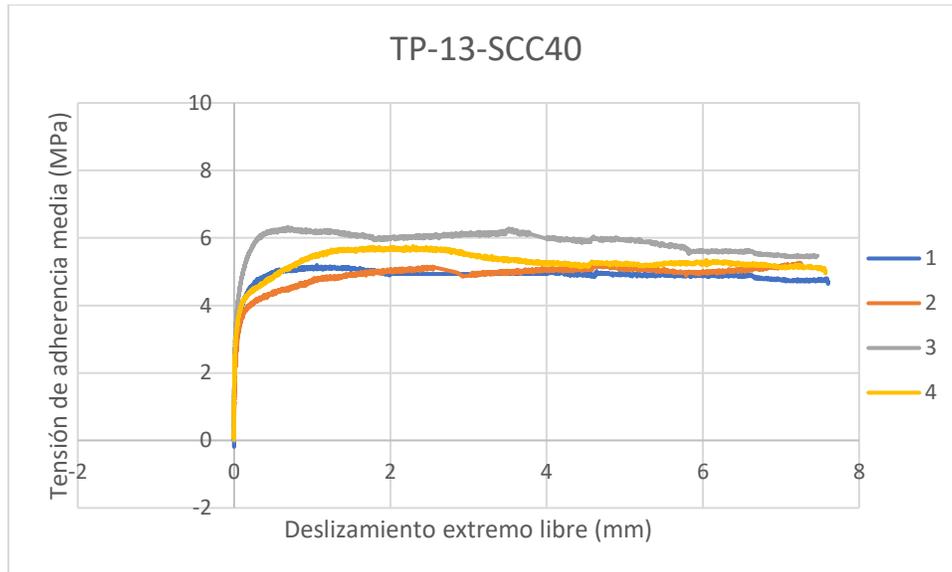


Figura 5.5 Curva Tensión de adherencia media-Deslizamiento extremo libre barras TP-13-SCC40

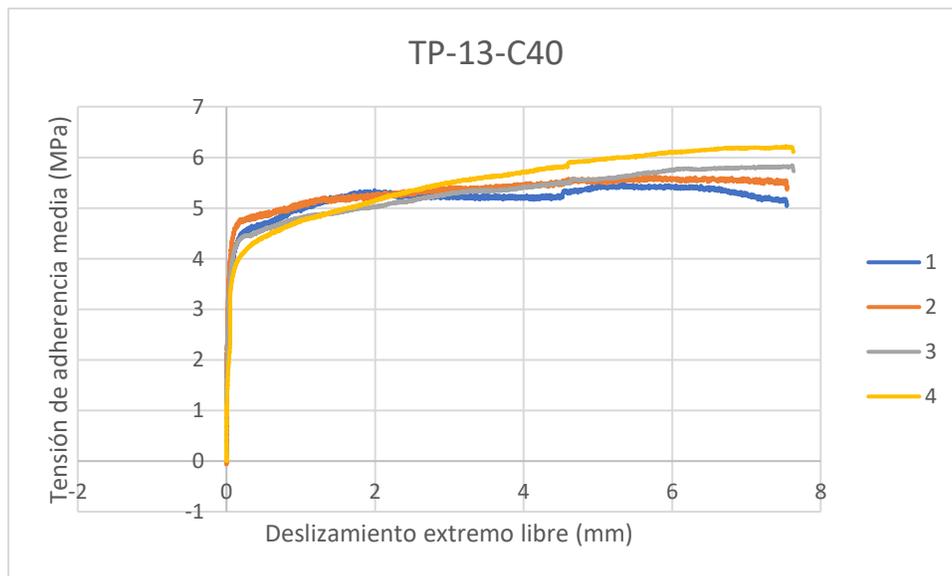


Figura 5.6 Curva Tensión de adherencia media-Deslizamiento extremo libre barras TP-13-C40

Las barras TP13 presentan una superficie con revestimiento de arena de cuarzo, con lo cual, la transferencia de carga es proporcionada por fricción.

El acabado superficial arenoso contribuye a un incremento en la adherencia química, tal y como indicaron [37]. La fricción disminuye a medida que la barra de refuerzo se extrae más y la superficie de contacto se daña.

Como se indica en [38] si el hormigón posee una resistencia a compresión inferior a 30 MPa, los gránulos de arena se desprenderán poco a poco, produciéndose daños en la interfaz barra/hormigón. Sin embargo, con hormigón de resistencia a compresión en torno a 45 MPa, como es el caso del hormigón en estudio, la rotura por pull-out se producirá solo en la superficie de la barra por el total desprendimiento de los gránulos de arena, como se observa en las figuras 4.1 y 4.2.

Para fines de comparación, también se realizaron pruebas de extracción con barras de acero. La figura 5.7 muestra el comportamiento adherente de las barras de acero de diámetro 10 mm embebidas en hormigón autocompactante. La tensión adherente máxima se encuentra entre 17.09 y 23.05 MPa en función de la muestra (promedio de 19.69MPa), y el deslizamiento promedio máximo es 7.58 mm. Como se observa en la figura 5.8, la tensión de adherencia máxima fue ligeramente menor para el hormigón convencional, siendo esta entre 18.96 y 19.99 MPa (promedio de 19.49MPa) y un deslizamiento máximo promedio de 7.61 mm.

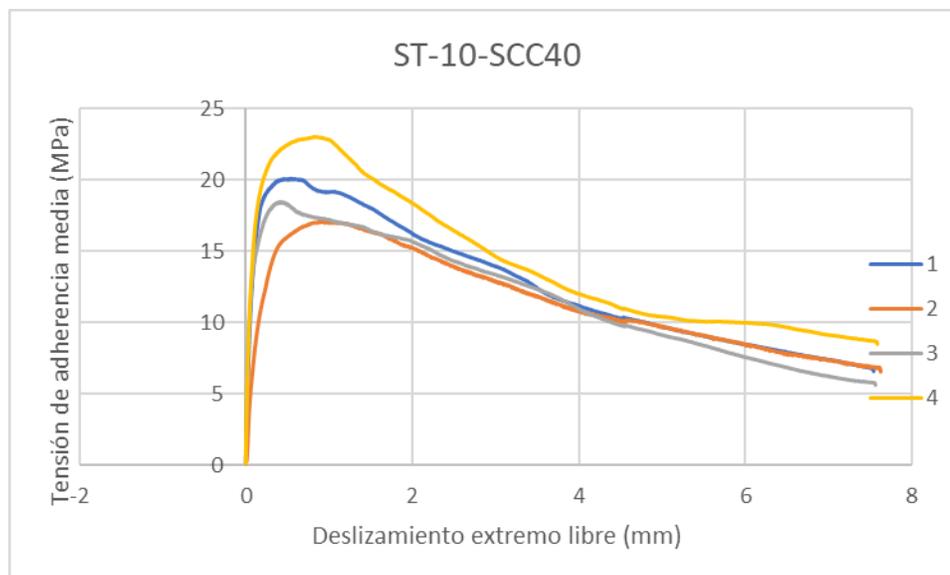


Figura 5.7 Curva Tensión de adherencia media-Deslizamiento extremo libre barras ST-10-SCC40

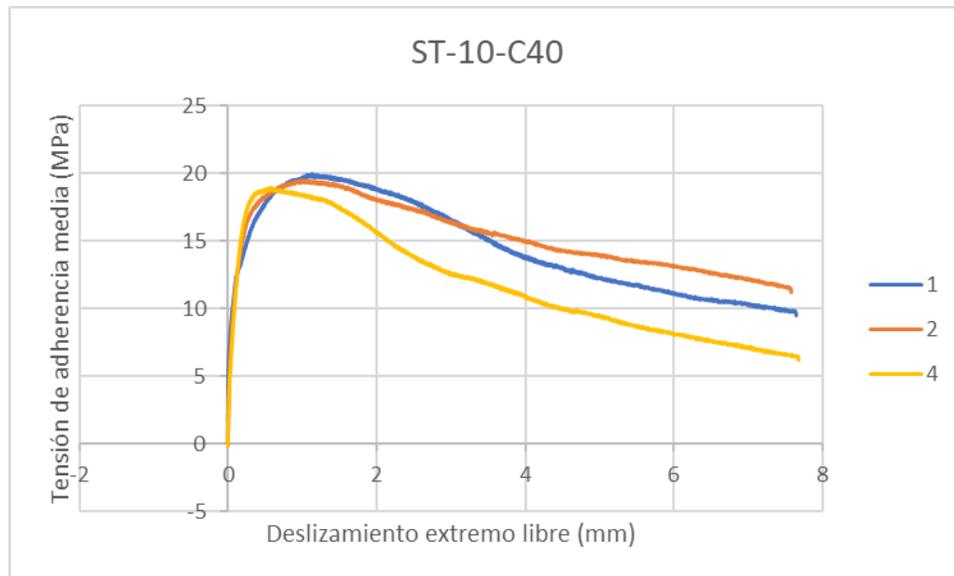


Figura 5.8 Curva Tensión de adherencia media-Deslizamiento extremo libre barras ST-10-C40

A diferencia de las barras FRP, las barras corrugadas de acero alcanzan una tensión adherente elevada, debido a que este tipo de geometría superficial mejora la adherencia. Las barras de acero desarrollan inicialmente su adherencia por adhesión química; al incrementar la tensión, se produce un mecanismo de acuñaamiento mecánico más rozamiento de las corrugas de la barra contra el hormigón, comenzado de este modo el deslizamiento relativo de la barra respecto al hormigón, al mismo tiempo que se reduce la rigidez de la pendiente ascendente de la gráfica tensión adherente-deslizamiento, este comportamiento se observa en las probetas con hormigón autocompactante SCC40 y en las probetas con hormigón convencional C40.

La resistencia del hormigón es un factor que influye notablemente en el comportamiento adherente entre el armado y el hormigón, puesto que el fenómeno de adherencia depende en gran medida del acuñaamiento mecánico producido entre las corrugas de la barra de acero y el hormigón situado enfrente de las mismas. Por lo tanto, la tensión ejercida por las corrugas contra el hormigón producirá esfuerzos de corte y axiales de compresión en el mismo, por lo que, el desarrollo de la adherencia entre ambos dependerá del comportamiento multiaxial del hormigón, tanto a esfuerzos de compresión como a esfuerzos de tracción.

5.2 TENSIÓN DE ADHERENCIA MÁXIMA

En esta sección se analiza la influencia de los diferentes tipos de barras, el diámetro de estas y la trabajabilidad del hormigón, sobre la tensión de adherencia máxima.

5.2.1 INFLUENCIA TIPO DE RESINA

Muchos autores [17], [30] han concluido que el tipo de resina en lugar del tipo de fibra parece controlar la fuerza de adherencia de las barras de FRP. Este efecto se debe a la resistencia a corte de la capa superficial de la barra FRP.

Como se observa en las figuras 5.9.a y 5.9.b, en donde se compara el comportamiento adherente de la barra con resina viniléster 2-VE-13 y la barra con resina termoplástica 2-TP-13, la barra VE-13 alcanza una mayor tensión de adherencia, con lo cual inicialmente, se podría decir que la resina viniléster tiene un mejor comportamiento adherente que la resina termoplástica.

Sin embargo, se debe recalcar que debido a que las barras TP no presentan ligeras nervaduras como las barras VE, la resistencia adherente se basa principalmente en la adherencia química y de fricción, y se espera baja resistencia por adherencia mecánica, por lo que la tensión de adherencia de las barras TP es menor que la tensión de adherencia de las barras VE.

Esto se refleja en el estudio de Padilla et al. [39], en donde se concluye que las barras con superficie arenosa presentan una resistencia menor que las barras nervadas o de hélice. Según las adherencias reportadas, las barras con recubrimiento arenoso solo alcanzaron el 50% de la adherencia de las barras con hélice; comportándose de la misma manera que en este estudio.

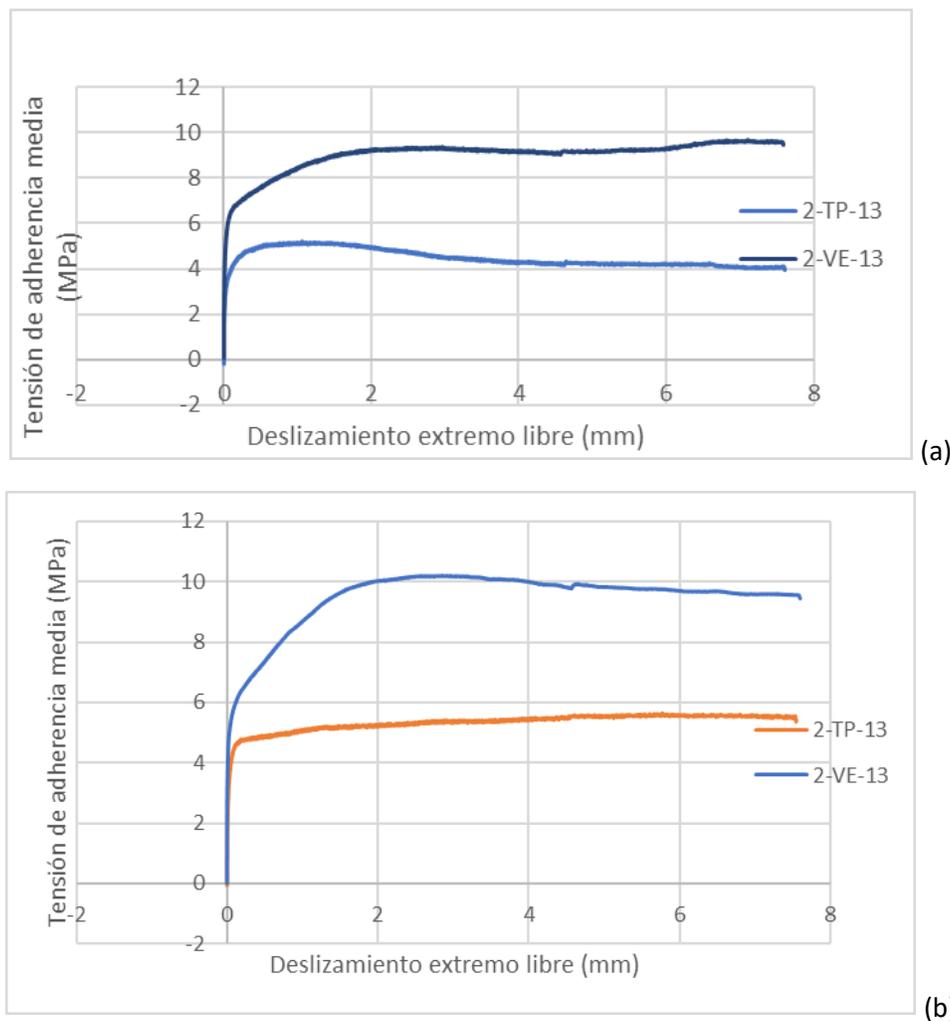


Figura 5.9 Comparación de las curvas Tensión de adherencia-Deslizamiento extremo libre barras a) TP-13-SCC40 y VE-13-SCC40 y b) TP-13-C40 y VE-13-C40

De manera adicional, queda demostrado en la gráfica 5.10 que el acero tiene un mejor comportamiento adherente que las barras FRP, llegando a una tensión de adherencia máxima promedio de 19.79MPa, mientras que las barras de viniléster tuvieron una tensión de adherencia máxima promedio de 15.57MPa en el caso de hormigón autocompactante SCC40, mientras que para el hormigón convencional C40 la tensión de adherencia máxima promedio de las barras de acero y las barras VE-10, fueron de 19.49 y 17.62 respectivamente.

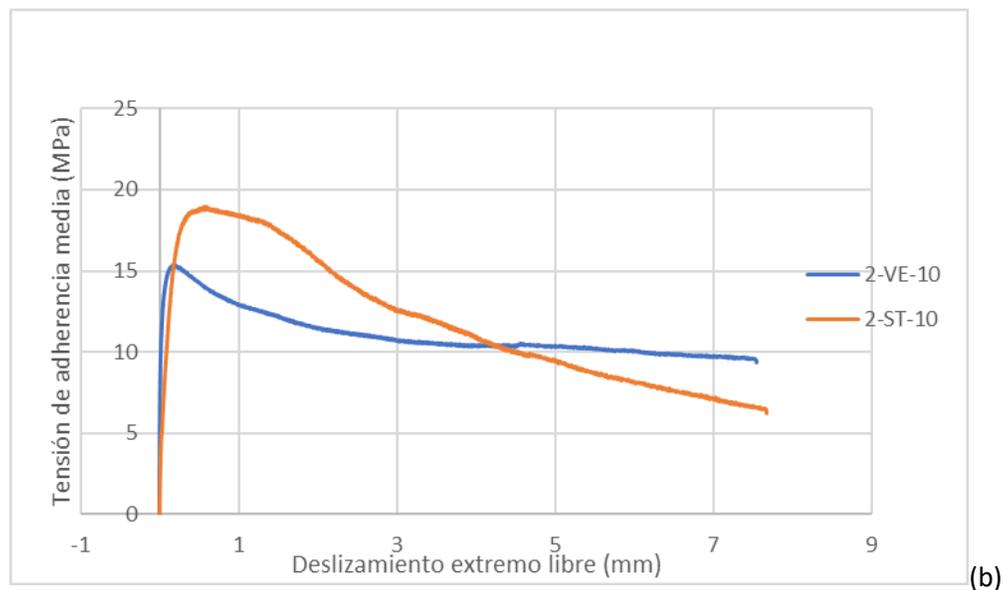
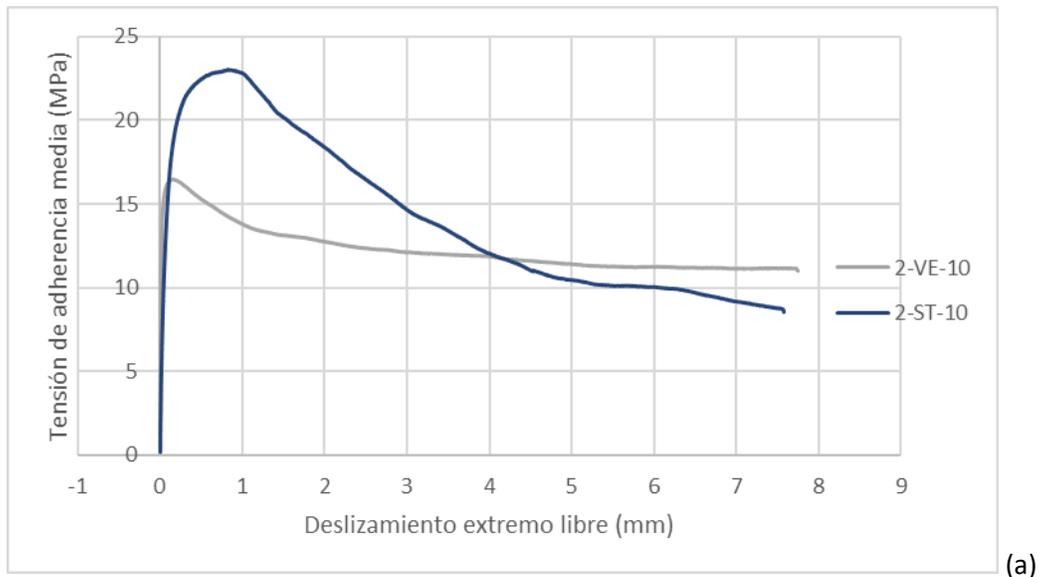


Figura 5.10 Comparación de las curvas Tensión de adherencia-Deslizamiento extremo libre a) barras VE-10-SCC40 y ST-10-SCC40 y b) barras VE-10-C40 y ST-10-C40

5.2.2 INFLUENCIA DIÁMETRO DE LAS BARRAS

Como se observa en la figura 5.12, las barras de VE con diámetro 10mm tienen una adherencia máxima mayor a las barras de diámetro 12.7mm, esto coincide con varias referencias en la literatura [1], [30], [25] que han señalado que las barras con diámetros más grandes desarrollan tensiones de adherencia más bajas. Esto se puede explicar debido a que el ensayo pull-out, la tensión de adherencia máxima se mueve gradualmente desde el extremo cargado hacia el extremo descargado de la barra, mientras que el valor de tensión de adherencia en el extremo cargado disminuye considerablemente, teniendo una distribución no lineal de tensiones a lo largo de la barra. Algunos autores [1] han sugerido que esta migración y distribución de esfuerzos no lineal explicaría la dependencia de la fuerza de adherencia con el diámetro de la barra, ya que esta distribución no lineal es más evidente en el caso de las longitudes de empotramiento más grandes necesarias para diámetros más grandes ($l_b = 5 d_b$).

Adicionalmente, el efecto Poisson también puede influir en este fenómeno debido a la reducción del diámetro de la barra FRP cuando ésta se encuentra sometida a tracción. Esta reducción del diámetro (en valor absoluto) aumenta con el tamaño de la barra, lo que puede conducir a una reducción de las tensiones de adherencia mecánicas y de fricción [37].

La influencia del diámetro de las barras también se debe al comportamiento elástico y la resistencia a cortante de las barras FRP. Debido a que cuando una barra FRP es sometida a una tensión a través de su superficie, se producen alargamientos diferentes entre las fibras internas (menores alargamientos) y las situadas en la capa exterior de la barra (mayores alargamientos), lo cual, produce una distribución no uniforme de las tensiones normales en la sección transversal de la barra. La tensión adherente desarrollada entre las barras FRP y el hormigón está directamente relacionada con el valor de la tensión normal ejercida en la superficie de la barra " σ_{max} " y, es proporcional a la tensión media desarrollada en la barra " σ_{media} ". Por lo tanto, el aumento del diámetro de la barra incrementa la diferencia entre σ_{max} y σ_{media} , especialmente cuando la resistencia a cortante de la barra es muy pequeña, lo que produce la disminución de la tensión adherente de la barra (ver figura 5.11). La resistencia a cortante de las barras FRP depende principalmente de la resistencia a cortante de la matriz polimérica y de la resistencia a corte de la interfaz entre la matriz polimérica y el refuerzo de fibra.

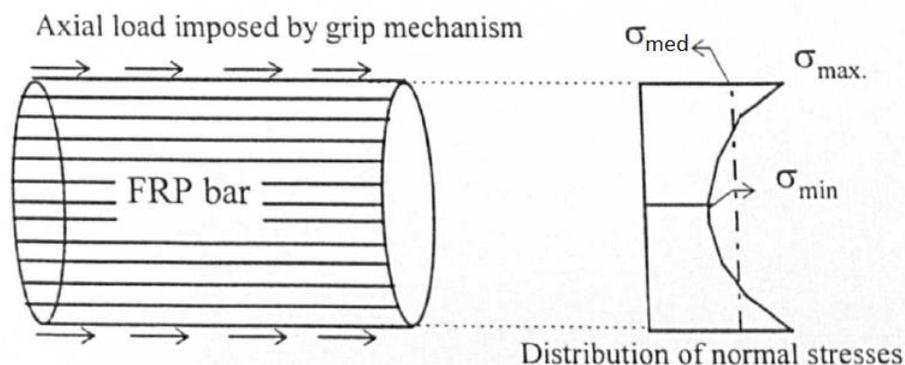


Figura 5.11 Distribución de las tensiones normales en la sección transversal de una barra FRP

La tendencia general de disminución de la resistencia de la adherencia con el aumento de los diámetros de las barras de refuerzo se observa en probetas con hormigón autocompactante SCC40 y hormigón convencional C40.

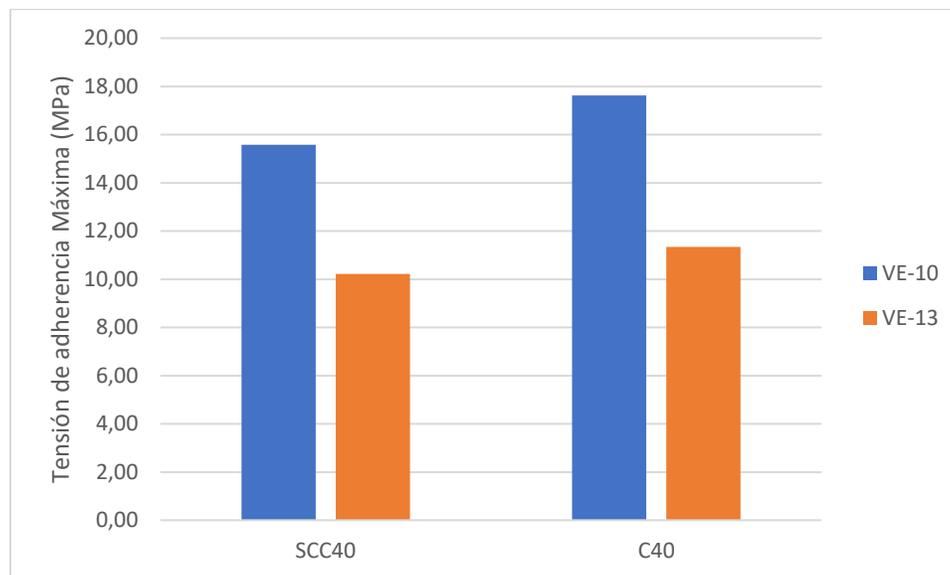


Figura 5.12 Comparación de la Tensión de adherencia máxima entre las barras VE-10 y V3-13

5.2.3 INFLUENCIA DE LA TRABAJABILIDAD DEL HORMIGÓN

Espécimen	T_{\max} (Mpa)	
	CSS40	C40
VE-10	15.57	17.62
VE-13	10.21	11.34
TP-13	5.76	5.54
ST-10	19.69	19.49

Tabla 5.1 Comparación de la adherencia máxima de las barras en hormigón autocompactante y hormigón convencional.

En la tabla 5.1 se indica la tensión de adherencia máxima promedio para cada tipo de barra, tanto en hormigón autocompactante SCC40, como en hormigón convencional C40. Se puede observar que para las barras con resina viniléster (termoestable), la adherencia en el hormigón convencional es ligeramente mayor, mientras que para las barras con resina termoplástica y de acero, la adherencia es prácticamente la misma en las dos clases de trabajabilidad del hormigón.

También se debe indicar que el comportamiento adherente es el mismo para las dos trabajabilidades del hormigón, esto se observa en las figuras 5.1 a 5.8, en donde la forma de las curvas tensión de adherencia-deslizamiento del extremo libre es la misma para hormigón CSS40 y hormigón C40.

6 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En este último capítulo, se establecen las conclusiones más relevantes del estudio experimental sobre el comportamiento adherente entre los diferentes tipos de barras FRP y el hormigón. Al mismo tiempo, se definen las futuras líneas de investigación que pueden llevarse a cabo a partir de este estudio experimental.

6.1 CONCLUSIONES

El uso de barras con resina termoplástica es muy reciente y posee varias ventajas importantes. Los compuestos con resina termoendurecible tienen la característica de endurecerse permanentemente; como resultado, no pueden volver a transformarse ni reciclarse. Los compuestos con resina termoplástica proporcionan respuestas reales para remediar estas limitaciones, ya que son:

Termoformables y termosoldables: el material termoplástico se ablanda cuando se calienta. Posteriormente, se pueden moldear o soldar (proceso fácil de controlar, evitando el uso de adhesivos).

Reciclable: es posible recuperar y reutilizar el material fundiéndolo.

Debido a todos estos beneficios, es de gran interés el desarrollo de barras FRP con resinas termoplásticas.

En relación a las propiedades mecánicas de las barras FRP con resina termoplástica, resistieron una tensión de tracción superior a las barras FRP con resina termoestable (viniléster) y a las barras de acero. Sin embargo, el módulo elástico de las barras de acero es del orden de 3.5 veces el de las barras FRP.

En cuanto al comportamiento adherente de las barras, el recubrimiento de arena de cuarzo en las barras TP-13, condujo a un aumento de la adherencia química. La tensión de adherencia disminuye según la superficie del revestimiento de arena se desprende de la barra de refuerzo.

En el caso de las barras VE de 13mm de diámetro (VE-13), el espaciado de las nervaduras superficiales era menor al de las barras de diámetro 10mm, por lo cual, la forma de las curvas de tensión de adherencia-deslizamiento obtenidas para barras VE cambió con el diámetro de la barra de refuerzo.

Finalmente, para las barras de acero corrugadas, el comportamiento de adherencia se rigió por la resistencia generada por el hormigón que se adhiere en la parte frontal de las deformaciones superficiales de la barra.

La influencia de ciertos factores en el comportamiento adherente de las barras FRP ensayadas, se resumen a continuación:

Tipo de resina:

Las barras con resina termoestable (viniléster) alcanzaron una tensión de adherencia aproximadamente del doble de la tensión de adherencia máxima de las barras con resina termoplástica. Estos resultados se observaron para los dos tipos de trabajabilidad del hormigón. Con lo cual, se podría concluir que la resina viniléster presenta un mejor comportamiento adherente que la resina termoplástica.

Sin embargo, esta amplia diferencia en la resistencia adherente también puede deberse a las diferentes texturas superficiales de las barras. Ya que en el estudio de Padilla et al. [39], las barras con recubrimiento arenoso solo alcanzaron el 50% de la adherencia de las barras con hélice; comportándose de la misma manera que en este estudio.

Esto puede ser debido a que las barras TP no presentan ligeras nervaduras como las barras VE, la resistencia adherente se basa principalmente en la adherencia química y de fricción, y se espera baja resistencia por adherencia mecánica, por lo que la tensión de adherencia de las barras TP es menor que la tensión de adherencia de las barras VE.

Diámetro de la barra:

Los resultados confirmaron la tendencia de las barras de menor diámetro a desarrollar una mayor tensión de adherencia que las barras de mayor diámetro. La influencia del diámetro de la barra en el comportamiento adherente se debe a:

- a) Durante el ensayo pull-out, la tensión de adherencia máxima se mueve gradualmente desde el extremo cargado hacia el extremo descargado de la barra, mientras que el valor de tensión de adherencia en el extremo cargado disminuye considerablemente, teniendo una distribución no lineal de tensiones a lo largo de la barra. Es decir, la distribución de la adherencia entre la barra de refuerzo y el hormigón se produce de manera no lineal sobre toda la longitud adherente, y es por ello que diámetros mayores provocan menores tensiones de adherencia medias.
- b) El efecto Poisson, el cual, al tensionar la barra produce una mayor disminución del diámetro en barras con diámetro más grande, lo que origina una disminución de la tensión adherente.
- c) Como tercera influencia encontraríamos lo que se conoce como efecto “shear lag”, las barras de FRP muestran una baja rigidez a cortante en su dirección axial, lo que provoca un movimiento relativo entre las fibras del núcleo de la barra y las fibras superficiales resultando en una distribución no uniforme de la tensión normal de la sección transversal de la barra. La tensión adherente desarrollada entre las barras FRP y el hormigón está directamente relacionada con el valor de la tensión normal ejercida en la superficie de la barra “ σ_{\max} ” y, es proporcional a la tensión media desarrollada en la barra “ σ_{media} ”. Por lo tanto, el aumento del diámetro de la barra incrementa la diferencia entre σ_{\max} y σ_{media} , especialmente cuando la resistencia a cortante de la barra es muy pequeña, lo que produce la disminución de la tensión adherente de la barra.

Trabajabilidad del hormigón:

Durante este estudio experimental no se encontraron grandes diferencias en la tensión de adherencia máxima de las barras con hormigón autocompactante y con hormigón convencional. Las barras con resina viniléster (termoestable) presentaron una adherencia ligeramente mayor con el hormigón convencional que con el hormigón autocompactante; mientras que para las barras con resina termoplástica y de acero, la adherencia fue prácticamente la misma en las dos clases de trabajabilidad del hormigón.

También se debe indicar que el comportamiento adherente es el mismo para las dos trabajabilidades del hormigón, debido a que las curvas tensión de adherencia-deslizamiento del extremo libre para hormigón CSS40 y hormigón C40, presentan la misma forma.

6.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El tema de adherencia de las barras de FRP en el hormigón es muy amplio, puede ser incluso más amplio que la adherencia de las barras de acero, y este estudio ha aportado solo una pequeña cantidad de conocimiento con la esperanza de que se continúe investigando hacia una mejor comprensión del tema.

- Para un análisis más detallado acerca del comportamiento adherente de barras FRP mediante ensayos pull-out, se recomienda medir adicionalmente al deslizamiento del extremo libre de la barra, el deslizamiento del extremo cargado, de esta manera se puede estudiar la rigidez inicial de la curva tensión de adherencia-deslizamiento. Pues como lo explica Calvet en [38], en el extremo libre de la barra no comienza a producirse deslizamiento relativo hasta el final del tramo 2-3 de la curva tensión de adherencia-deslizamiento del extremo cargado (ver figura 6.1). Esta diferencia entre las curvas con deslizamiento en el extremo cargado y con deslizamiento en el extremo libre se observa en la figura 6.2.



Figura 6.1 Curva Tensión de adherencia-deslizamiento extremo cargado

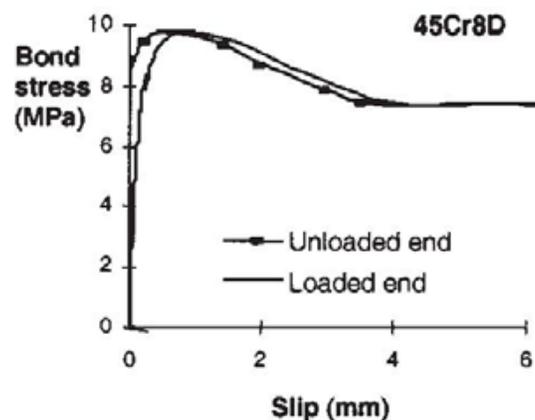


Figura 6.2 Curvas Tensión de adherencia-deslizamiento extremo cargado y deslizamiento extremo libre en barras de CFRP [38].

- Se requiere más trabajo experimental para comprender y cuantificar el efecto de los diversos parámetros que influyen en la resistencia adherente de las barras de FRP. Los ensayos de adherencia tipo beam test son más adecuados para este propósito, ya que reflejan condiciones prácticas con mayor precisión.
- Una vez conocidos los parámetros que influyen en el comportamiento adherente de las barras FRP, se deben proponer modelos analíticos de la relación tensión de adherencia-deslizamiento que consideren la influencia de dichos parámetros, ya que en la literatura existen modelos analíticos de la curva adherencia-deslizamiento disponibles, cuyo objetivo es determinar sus parámetros mediante el ajuste de curvas de datos experimentales; sin embargo, no se han desarrollado formulaciones específicas para los diferentes tipos de barras de refuerzo y sus características.

7 REFERENCIAS

- [1] Z. Achillides, Bond behaviour of FRP bars in concrete, PhD Thesis, University of Sheffield, 1998.
- [2] S. Kocaoza, V.A. Samaranayakeb, A. Nanni , Tensile characterization of glass FRP bars, Center for Infrastructure Engineering Studies, University of Missouri, 2004.
- [3] Neocleous, K., Design and safety philosophy for concrete structures reinforced with Fiber Reinforced Polymers (FRP), PhD Thesis, University of Sheffield., 1999.
- [4] Achillides Z. and Pilakoutas K., «Bond strength of FRP bars in concrete,» de *Greek conference for concrete*, Greek, 1996.
- [5] Antonio Nanni, Antonio De Luca, Hany Jawaheri, Reinforced concrete with FRP bars: Mechanics and Design, CRC Press, 2014.
- [6] A. Alzate, Análisis de los modelos de comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas a cortante con polímeros armados con fibras (FRP). Validación y calibración experimental, Doctorado, Universidad Politécnica de Madrid, 2012.
- [7] V. Bhise, Strength degradation of GFRP bars, Master, Virginia Polytechnic Institute and State University, pp 3-5, 2002.
- [8] M. Alsalihi, Mechanical properties of glass fiber reinforced polymer bars after exposure to elevated temperatures, Master, The University of Wisconsin, 2014.
- [9] (FIB), «Fib Bulletin 40- FRP Reinforcement in RC Structures.,» *Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (FIB).*, 2007.
- [10] G. David Cripps, « “Carbon Fibre/Fiber”,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.netcomposites.com/guide/carbon-fibrefiber/34>. [Último acceso: 10 10 2020].
- [11] E. Sayed-Ahmed y N. Shrive, «Smart FRP Prestressing Tendons: Properties and Prospects. In Proceedings of the Second Middle East Symposium on Structural Composites for Infrastructure Applications,» Hurghada, Egypt,, 1999.
- [12] G. David Cripps, «Aramid Fibre/Fiber,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.netcomposites.com/guide/aramid-fibrefiber/33>.
- [13] W. Somboonsong, Development of Ductile Hybrid Fiber Reinforced Polymer (D-H-FRP) Reinforcement for Concrete Structures, PhD thesis, Drexel University, 1997, pp 7-26.
- [14] H. Blontrock, L. Taerwe, S. Matthys, Properties of fiber reinforced plastics at elevated temperatures with regard to fire resistance of reinforced concrete members, in Proceedings of the 4th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement concrete structures, ACI SP-188, 1999.

- [15] M. B. Muñoz, Study of bond behaviour, Doctorado, Universidad de Girona, 2010.
- [16] G. Pulido, D., Pons, J. , Refuerzo de estructuras con materiales compuestos (FRP). Cemco (IETcc-CSIC), Madrid, España, pp 21-35, 2007.
- [17] (FIB), FIB Bulletin 10-Bond of Reinforcement in Concrete, State-of-art Report, Bulletin 10, fib – International Federation for Structural Concrete, Lausanne Switzerland, 2000.
- [18] M. Molina Huelva, Comportamiento de estructuras de hormigón armado con una deficiente transferencia de tensiones hormigón-acero : análisis experimental y propuesta de un modelo de evaluación estructural, Tesis (Doctoral), Universidad Politécnica de Madrid , 2005.
- [19] ACI Committee 440, Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures, 2017.
- [20] Sólyom, Sándor & Balázs, György, «Bond strength of FRP rebars,» *CONCRETE STRUCTURES* vol 16. 62-68, 2015.
- [21] Lee, J.Y., Kim, T.Y., Kim, T.J., Yi, C.K., Park, J.S., You, Y.C., «Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete.,» de *Composites Part B-Engineering* , 2008, p. :258–270..
- [22] Aiello, M.A., Leone, M., Pecce, M., «Bond performances of FRP rebars reinforced concrete.,» *Journal of Materials in Civil Engineering* , vol. 3, nº 19, p. 205–213, 2007.
- [23] Kanakubo, T., Yonemaru, K., Fukuyama, H., Fujisawa, M., Sonobe, Y., « Bond performance of concrete members reinforced with FRP bars,» *First International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, pp. 767-788, 1993.
- [24] Larralde, J., Silva-Rodriguez, R., «Bond and slip of frp rebars in concrete.,» *Journal of Materials in Civil Engineering* , vol. 1, nº 5, p. 30–40., 1993.
- [25] Marta Baena Muñoz, Lluís Torres Llinàs, Albert Turon Travesa, Cristina Barris Peña, , «Estudio de la adherencia entre armaduras de materiales compuestos de matriz polimérica (FRP) y hormigón,» *Hormigón y Acero* , vol. 59, nº 250, pp. 67-75, 2008.
- [26] Guadagnini, M., Pilakoutas, K., Waldron, P., Achillides, Z. , «Tests for the evaluation of bond properties of FRP bars in concrete,» 2nd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE), 2004, pp. 343-350.
- [27] Chaallal, O., Benmokrane, B.. , «Pullout and Bond of Glass-Fiber Rods Embedded in Concrete and Cement Grout,» *Materials and Structures*, vol. 3, nº 26, p. 167–175, 1993.
- [28] AL-Mahmoud, F., Castel, A., Francois, R., Tourneur, C., «Effect of surface pre-conditioning on bond of carbon fibre reinforced polymer rods to concrete,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 9, nº 29, p. 677–689, 2007.

- [29] L. Malvar, «Tensile and bond properties of GFRP reinforcing bars,» *ACI Materials Journal*, vol. 3, nº 92, p. 276–285, 1995.
- [30] Nanni, A., Al-Zahrani, M.M., Al-Dulaijan, S.U., Bakis, C.E., Boothby, T.E., «Bond of FRP reinforcement to concrete - experimental results,» *Second International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures.*, 1995, pp. 135-145.
- [31] Hao, Q.D., Wang, Y.L., He, Z., Ou, J.P., «Bond strength of glass fiber reinforced polymer ribbed rebars in normal strength concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 2, nº 23, p. 865–871., 2009.
- [32] Freimanis, A.J., Bakis, C.E., Nanni, A., Gremel, D.A., A comparison of pull-out and tensile behaviours of FRP reinforcement for concrete, *Second International Conference on Composites in Infrastructure*, 1998.
- [33] Aenor ed., UNE-EN-12390-3. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. Asociación Española de Normalización y Certificación, 2009.
- [34] Aenor ed., UNE-EN-12390-6. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6. Resistencia a tracción indirecta de probetas, 2010.
- [35] Aenor ed., UNE EN 10080:2006: Acero para el hormigón armado. Acero soldable para armaduras de hormigón armado. Generalidades. Madrid., 2006.
- [36] Aenor ed., UNE-EN 12350-2:2020 Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento, 2020.
- [37] Marta Baena, Lluís Torres, Albert Turon, Cristina Barris, , «Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test,» *Composites*, vol. Part B, nº 40, p. 784–797, 2009.
- [38] V. CALVET, INFLUENCIA DE LOS DISTINTOS TRATAMIENTOS SUPERFICIALES DE LAS BARRAS DE FIBRA DE CARBONO EN SU COMPORTAMIENTO ADHERENTE CON EL HORMIGON, VALENCIA: TESIS DOCTORAL, 2014.
- [39] Amando Padilla Ramírez, Jesús Antonio Flores Bastamente, Victor Cortes Guillermo Landa, «CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE ADHERENCIA ENTRE VARILLAS DE PRFV Y CONCRETO,» *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, 2006.
- [40] G. David Cripps, «Glass Fibre/Fiber,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.netcomposites.com/guide/glass-fibrefiber/32>. [Último acceso: 10 10 2020].
- [41] Pilakoutas, K., Achillides, Z., Waldron, P., Non-ferrous reinforcement in concrete structures. In: Topping, E.M.L.&B., editor. *Centenary Conference on Innovation in Civil and Structural Engineering*. Civil-Comp Ltd, 1997.
- [42] Eligehausen, R., Popov, E., & Bertero, V. , Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations : experimental results and analytical model, 1983.

- [43] Cosenza, E., Manfredi, G., Realfonzo, R., de *Analytical modelling of bond between FRP reinforcing bars and concrete*, Second International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures., 1995, p. 164–171.
- [44] Cosenza, E., Manfredi, G., Realfonzo, R., «Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete,» *Journal of Composites for Construction* , vol. 1, nº 2, p. 40–51, 1997.
- [45] Focacci, F., Nanni, A., Bakis, C.E., «Local bond-slip relationships for FRP reinforcement in concrete,» *Journal of Composites for Construction* , vol. 4, nº 1, p. 24–31, 2000.
- [46] Malvar, L.J., Cox, J.V., Cochran, K.B., «Bond between carbon fiber reinforced polymer bars and concrete. I: Experimental study,» *Journal of Composites for Construction* , vol. 7, nº 2, p. 154–163, 2003.
- [47] Okelo, R., Yuan, R.L., «Bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete,» *Journal of Composites for Construction* , vol. 3, nº 9, p. 203–213, 2005.
- [48] Tighiouart, B., Benmokrane, B., Gao, D., «Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars,» *Construction and Building Materials* , vol. 12, nº 8, p. 453–462, 1998.
- [49] ACI318R-95, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, Farmington Hills, Michigan (USA): ACI Committee 318, American Concrete Institute, 1995.

