

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A TENSIÓN DE ANCLAJES POST-INSTALADOS EN CONCRETO DE
BAJAS EMISIONES ADICIONADO CON FIBRAS POLIMÉRICAS**

Jose Ricardo Parra Miranda,

Leidy Milena García Cuevas



UNIVERSIDAD
La Gran Colombia

Vigilada MINEDUCACIÓN

Especialización en Diseño y Construcción de Obras de Infraestructura y Edificaciones

Facultad de Ingenierías

Universidad La Gran Colombia

Bogotá D.C.

2025

**Análisis del comportamiento a tensión de anclajes post-instalados en concreto de
bajas emisiones adicionado con fibras poliméricas.**

Jose Ricardo Parra Miranda,

Leidy Milena García Cuevas

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
Especialista en Diseño y Construcción de Obras de Infraestructura y Edificaciones**

Director Miguel Antonio Caro Pallares



UNIVERSIDAD
La Gran Colombia

Vigilada MINEEDUCACIÓN

Especialización en Diseño y Construcción de Obras de Infraestructura y Edificaciones

Facultad de Ingenierías

Universidad La Gran Colombia

Bogotá D.C.

2025

Tabla de contenido

RESUMEN	6
ABSTRACT.....	6
INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVOS.....	9
OBJETIVO GENERAL.....	9
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
1. MARCO REFERENCIAL.....	10
1.1. REQUERIMIENTOS GENERALES PARA LA RESISTENCIA DE LOS ANCLAJES.....	14
1.2 REQUISITOS DE DISEÑO PARA CARGAS DE TRACCIÓN.....	15
1.2.1 RESISTENCIA DEL ACERO DE UN ANCLAJE EN TRACCIÓN.....	15
1.2.2 RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO DE UN ANCLAJE EN TRACCIÓN.....	15
2. ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	18
2.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	18
2.1.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS.....	18
2.1.2. GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA GRAVA.....	22
2.1.3. GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA ARENA.....	23
2.1.4. DENSIDAD DEL CEMENTO Y FINURA POR BLAINE.....	24
2.2. DOSIFICACIÓN Y FABRICACIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO.....	26
2.3. MATRIZ DE ENSAYOS.....	27
2.4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	37
3. CONCLUSIONES.....	61
LISTA DE REFERENCIA O BIBLIOGRAFÍA.....	63

Lista de Figuras

Figura 1: <i>Modo de falla de anclajes sometidos a tensión</i>	14
Figura 2: <i>Cálculo de ANco para anclajes individuales</i>	17
Figura 3: <i>Curva granulométrica de la grava</i>	19
Figura 4: <i>Curva granulométrica de la arena</i>	20
Figura 5: <i>Registro fotográfico de los ensayos de caracterización de agregados</i>	21
Figura 6: <i>Registro fotográfico gravedad específica de la grava</i>	22
Figura 7: <i>Registro fotográfico gravedad específica de la arena</i>	23
Figura 8: <i>Registro fotográfico de la densidad del cemento y finura</i>	25
Figura 9: <i>Caracterización del concreto</i>	27
Figura 10: <i>Cubos de concreto fundidos</i>	28
Figura 11: <i>Cilindros con fibras poliméricas</i>	29
Figura 12: <i>Lote patrón sin adición de fibras poliméricas</i>	30
Figura 13: <i>Curado de concreto</i>	31
Figura 14: <i>Marcación de muestras</i>	32
Figura 15: <i>Perforación de muestras</i>	33
Figura 16: <i>Limpieza de la muestra</i>	34
Figura 17: <i>Instalación de barras corrugadas de ½"</i>	35
Figura 18: <i>Ensayos en máquina universal</i>	36
Figura 19: <i>Esquema de fijación de muestra en la máquina universal</i>	36
Figura 20: <i>Gráfico de resistencia a la tensión</i>	38
Figura 21: <i>Gráfico de resistencia al arrancamiento</i>	39
Figura 22: <i>Gráfico de resistencia a la adherencia</i>	41
Figura 23: <i>Modalidad teórica de falla</i>	42
Figura 24: <i>Modalidad de falla en muestras con 1,8 kg/m³ de fibra y profundidad de 6 veces el diámetro</i>	45
Figura 25: <i>Modalidad de falla en muestras con 1,8 kg/m³ de fibra y profundidad de 7 veces el diámetro</i>	47
Figura 26: <i>Modalidad de falla en muestras con 3,25 kg/m³ de fibra y profundidad de 6 veces el diámetro</i>	49
Figura 27: <i>Modalidad de falla en muestras con 3,25 kg/m³ de fibra y profundidad de 7 veces el diámetro</i>	51
Figura 28: <i>Modalidad de falla en muestras con 4,7 kg/m³ de fibra y profundidad de 6 veces el diámetro</i>	53
Figura 29: <i>Modalidad de falla en muestras con 4,7 kg/m³ de fibra y profundidad de 7 veces el diámetro</i>	55
Figura 30: <i>Modalidad de falla en muestras patrón</i>	57
Figura 31: <i>Resultados generales</i>	60

Lista de Tablas

Tabla 1: <i>Caracterización de la grava</i>	18
Tabla 2: <i>Caracterización de la arena</i>	19
Tabla 3: <i>Dosificación del concreto</i>	26
Tabla 4: <i>Características de las muestras</i>	26
Tabla 5: <i>Cantidades de muestras</i>	31
Tabla 6: <i>Cálculo de NSA</i>	37
Tabla 7: <i>Cálculo de Ncb</i>	39
Tabla 8: <i>Cálculo de Na</i>	40
Tabla 9: <i>Muestras con 1,8 kg/m³ de fibra y profundidad de 6 veces el diámetro</i>	44
Tabla 10: <i>Muestras con 1,8 kg/m³ de fibra y profundidad de 7 veces el diámetro</i>	46
Tabla 11: <i>Muestras con 3,25 kg/m³ de fibra y profundidad de 6 veces el diámetro</i>	48
Tabla 12: <i>Muestras con 3,25 kg/m³ de fibra y profundidad de 7 veces el diámetro</i>	50
Tabla 13: <i>Muestras con 4,27 kg/m³ de fibra y profundidad de 6 veces el diámetro</i>	52
Tabla 14: <i>Muestras con 4,7 kg/m³ de fibra y profundidad de 7 veces el diámetro</i>	54
Tabla 15: <i>Muestras patrón</i>	56

Resumen

Este estudio presenta un análisis experimental del comportamiento a tracción de anclajes postinstalados en un concreto de bajas emisiones (Ecoplanet) de 21 MPa, adicionando fibras poliméricas en tres dosificaciones: 1,8; 3,25 y 4,7 kg/m³. El programa experimental incluyó la caracterización de agregados y cemento, el diseño de la mezcla y la fabricación de 105 probetas cúbicas y testigos cilíndricos para control de calidad.

Los anclajes se instalaron con adhesivo epóxico Anchorfix-3001 (Sika) y se sometieron a ensayos de tracción en una máquina universal, evaluando su desempeño a diferentes profundidades de empotramiento. Los resultados demostraron que la adición de fibras poliméricas mejora la adherencia y el arrancamiento de los anclajes, especialmente en profundidades menores. La dosificación de 4,7 kg/m³ evidenció los mayores incrementos de resistencia, alcanzando valores superiores a 30 kN en profundidades de 6 diámetros, mientras que la dosificación de 1,8 kg/m³ también mostró mejoras significativas en adherencia.

El análisis comparativo con la mezcla patrón (sin fibras) indicó que, aunque la profundidad de empotramiento sigue siendo el factor más influyente en la capacidad de carga, la incorporación de fibras mejora la uniformidad de los resultados y reduce la dispersión de fallas por adherencia. Estos hallazgos aportan evidencia técnica relevante para el diseño y optimización de anclajes en concretos sostenibles y destacan la importancia de un adecuado control de instalación.

Palabras clave: *anclajes postinstalados, concreto sostenible, fibras poliméricas, resistencia a tracción, adherencia, arrancamiento.*

Abstract

This study presents an experimental analysis of the tensile behavior of post-installed anchors in a 21 MPa low-emission concrete (Ecoplanet), incorporating polymeric fibers in three dosages: 1.8, 3.25, and 4.7 kg/m³. The experimental program included the characterization of aggregates and cement, mix design, and the preparation of 105 concrete cubes and cylindrical specimens for quality control.

The anchors were installed using Sika's Anchorfix-3001 epoxy adhesive and subjected to tensile tests with a universal testing machine, evaluating their performance at different embedment depths. The results demonstrated that the addition of polymeric fibers enhances both adhesion and pull-out resistance, especially at lower embedment depths. The 4.7 kg/m³ dosage showed the highest improvements, achieving values above 30 kN at 6-diameter embedment, while the 1.8 kg/m³ dosage also provided significant adhesion benefits.

The comparative analysis with the control mix (without fibers) revealed that, although embedment depth remains the most influential factor in tensile capacity, the addition of fibers improves result uniformity and reduces dispersion in adhesion failures. These findings provide relevant technical insights for the design and optimization of anchors in sustainable concretes, emphasizing the importance of proper installation practices to ensure reliable and repeatable performance.

Keywords: *post-installed anchors, sustainable concrete, polymeric fibers, tensile strength, adhesion, pull-out resistance.*

Introducción

La creciente necesidad de materiales de construcción más sostenibles ha impulsado el desarrollo de concretos innovadores, como aquellos elaborados con cementos de bajas emisiones y reforzados con fibras poliméricas. Estos materiales buscan reducir la huella ambiental de la industria sin comprometer las propiedades mecánicas necesarias para aplicaciones estructurales y no estructurales. Sin embargo, el comportamiento de los sistemas de anclaje en este tipo de concretos aún no ha sido ampliamente investigado, especialmente considerando la interacción entre el adhesivo, el concreto y los elementos de acero.

En la construcción moderna, los anclajes post-instalados se utilizan de forma habitual para fijar o vincular elementos, tanto estructurales como no estructurales, a componentes resistentes como vigas, columnas y muros. Estos sistemas son esenciales en aplicaciones donde no es posible instalar anclajes durante la etapa de vaciado del concreto, y su desempeño depende de múltiples factores, entre ellos la calidad del concreto, la profundidad de empotramiento y las propiedades del adhesivo empleado.

En este contexto, la presente investigación se enfoca en analizar el comportamiento a tracción de anclajes post-instalados con barras de $\frac{1}{2}$ " en un concreto de 21 MPa elaborado con cemento Ecoplanet y reforzado con fibras poliméricas. El estudio busca evaluar la variación de la resistencia a tracción en función de la profundidad de anclaje, empleando el adhesivo epóxico Anchorfix-3001 de Sika como elemento de fijación. Los resultados permitirán aportar información relevante para el diseño y la aplicación de anclajes en concretos innovadores, contribuyendo así a la consolidación de prácticas constructivas más sostenibles.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar los efectos de la variación en los porcentajes de fibra polimérica y las profundidades de anclaje en barras de $\frac{1}{2}$ ", instaladas en un concreto de 21 MPa elaborado con cemento de bajas emisiones Ecoplanet y reforzado con fibras poliméricas, para analizar su desempeño a tracción.

Objetivos Específicos

- Determinar las dosificaciones óptimas de concreto y los porcentajes de fibras poliméricas para la elaboración de las probetas de ensayo.
- Identificar el porcentaje de fibra polimérica que proporcione la mayor resistencia al arrancamiento de los anclajes post-instalados.
- Correlacionar las variables que influyen en la resistencia al arrancamiento, considerando la inclusión de fibras poliméricas y la variación en la profundidad de anclaje.

1. Marco Referencial

En la construcción existen diferentes tipos de sistemas constructivos conformados por múltiples tipos de componentes y herramientas constructivas, como el caso del sistema en concreto reforzado dentro de este sistema existe un dispositivo llamado anclaje que bien se pueden instalar de forma preinstalado o de forma post-instalado, la forma de uso depende mucho de las condiciones del proyecto y de las solicitaciones a las que estará el anclaje.

La efectividad de la resistencia de un anclaje depende directamente del tipo y condiciones del concreto, así como de los aditivos y formas del anclaje para adherirse al concreto, para el caso de los anclajes pre-instalados prima el tipo, condiciones del concreto y de la forma del anclaje; mientras para los anclajes postinstalados prima el tipo, condiciones del concreto y de los aditivos utilizados para la adherencia de los anclajes.

En el concreto se han realizado investigaciones experimentales donde se mejoran u optimizan las propiedades físicas, químicas o mecánicas del concreto simple o reforzado, la búsqueda de estas oportunidades de mejora del concreto son producto de las necesidades socioeconómicas de la población, que a tenido un incremento exponencial durante las últimas dos décadas, además de las afectaciones medioambientales causadas por la obtención de la materia prima para los diferentes sistemas constructivos que se deben reparar y mitigar.

Una línea de investigación que a tomado fuerza es la obtención y análisis de los concretos de alta resistencia como lo menciona Ruda y Paez (2017), la necesidad de construcciones con geometrías más esbeltas, puentes con altas solicitaciones mecánicas, pavimentos rígidos a edades tempranas de servicio o infraestructuras que se encuentran expuestos a condiciones ambientales agresivas, fomentando la aplicación de concretos de alta resistencia.

Otra investigación que se retomó en esta época es la aplicación de concretos livianos, básicamente son concretos que están compuestos por agregados con una densidad menor a la de los agregados de un concreto convencional, la NSR 10 define un agregado liviano como aquellos que tienen una densidad de equilibrio entre 1440 y 1840 kg/m³, en acuerdo con Matallana (2019), el uso de este tipo de concreto se retomó con relevancia dentro del mercado después de cerca de 2000 años, época en la que el imperio romano construyó obras emblemáticas como la bóveda del famoso panteón donde se utilizó la piedra pómez en la cúpula de esta obra emblemática de la humanidad.

Para el caso de estas líneas de investigación dentro del concreto, se han realizado para satisfacer las necesidades de la población, dar solución a un problema técnico, o simplemente por innovación, sin embargo no se puede pasar por alto los aspectos ambientales, pues el sector de la construcción es una de las actividades que mayor incidencia de contaminación tienen dentro de la industria, cabe resaltar que no hay necesidad de llegar al punto de construcción para generar los impactos ambientales negativos, pues el daño se genera desde la obtención del material, como el cemento, material de insumo primario dentro de la construcción.

Dar cumplimiento a los objetivos de desarrollo sostenible es uno de los aspectos con alta relevancia a la hora de generar un proyecto o de los procesos industriales para la fabricación de materiales. Como el concreto de bajas emisiones que tiene las mismas propiedades físicas, químicas y mecánicas al de un concreto convencional, sin embargo en el proceso de obtención se realiza con procesos que generan menores emisiones, según lo señalado por Quevedo et al.(2023):

“La empresa Holcim viene innovando para responder y contribuir hacia la transición y un futuro incluyente Net zero, lanzando el programa EcoPlanet Que permite reducir sus emisiones hasta un 50% es decir 38 kg de CO₂ por tonelada de material cementante”(Maccarelli,2021,Parr. 2).

Dentro del contexto ambiental la inclusión del cemento de bajas emisiones es un aporte muy significativo a los objetivos de desarrollo sostenible, para el caso de los ODS incluir este tipo de cemento dentro de la construcción aplica dentro del objetivo número 13 Acción por el clima, donde se tratan todas las actividades humanas, de todas las personas, de todos los países, de todos los continentes que inciden en el cambio climático directa o indirectamente a causa de los efectos de gases invernadero tales como el CO₂, de acuerdo con Emotive (s.f) este tipo de gas se genera durante los procesos para la obtención del cemento se generan unos 900 gr de CO₂ por cada 1000 gr de cemento.

Otro de los objetivos de desarrollo sostenible a los que aplicaría la inclusión del cemento de bajas emisiones es el objetivo número 9 Industria Innovación e Infraestructura en este objetivo se expone la construcción de infraestructuras resilientes además de promover la innovación sin despreciar la industrialización sostenible, que además de que permita el desarrollo social y el crecimiento económico, se generen acciones positivas en el medio ambiente. El cemento de bajas emisiones cumple con todas las propiedades físicas, químicas y mecánicas que tiene un cemento con una producción convencional, si bien no es lo más innovador de un avance muy importante para combatir las dificultades ambientales que hoy día existen.

Otro de los componentes que se han venido implementando e innovando son las fibras poliméricas que hoy día se están implementando en los concretos a fin de mejorar sus propiedades mecánicas en este aspecto Mendoza et al.,(2011), "Las principales ventajas de la adición de fibras sintéticas en el concreto son, en estado endurecido, el incremento de la tenacidad y de la resistencia al impacto y en el estado fresco el control de la contracción plástica"(p. 36).

Teniendo presente estos beneficios en las propiedades mecánicas que adquiere el concreto por la adición de las fibras sintéticas se han realizado innovaciones con un enfoque sostenible buscando el cumplimiento de los ODS, como las fibras de polipropileno, polietileno y de poliéster, que se han

fabricado con material reciclado de este tipo de materiales que a través del tiempo han sido focos contaminantes principalmente de los cuerpos de agua, afectando fauna y flora de estos ecosistemas.

Dentro de los elementos de estudio que también abarcan parte de esta investigación son los anclajes, estos elementos de conexión o transferencia han sido estudiados en concretos de alta resistencia, en concretos livianos y concretos convencionales variando los productos de adherencia para el caso de los anclajes postinstalados, las profundidades y diámetros del anclaje, dado que es un elemento muy importante dentro de los proyectos de construcción pues de ellos se adosan otros elementos de tipo estructural o del tipo no estructural en cualquiera de los casos son muy relevantes para los distintos procesos constructivos.

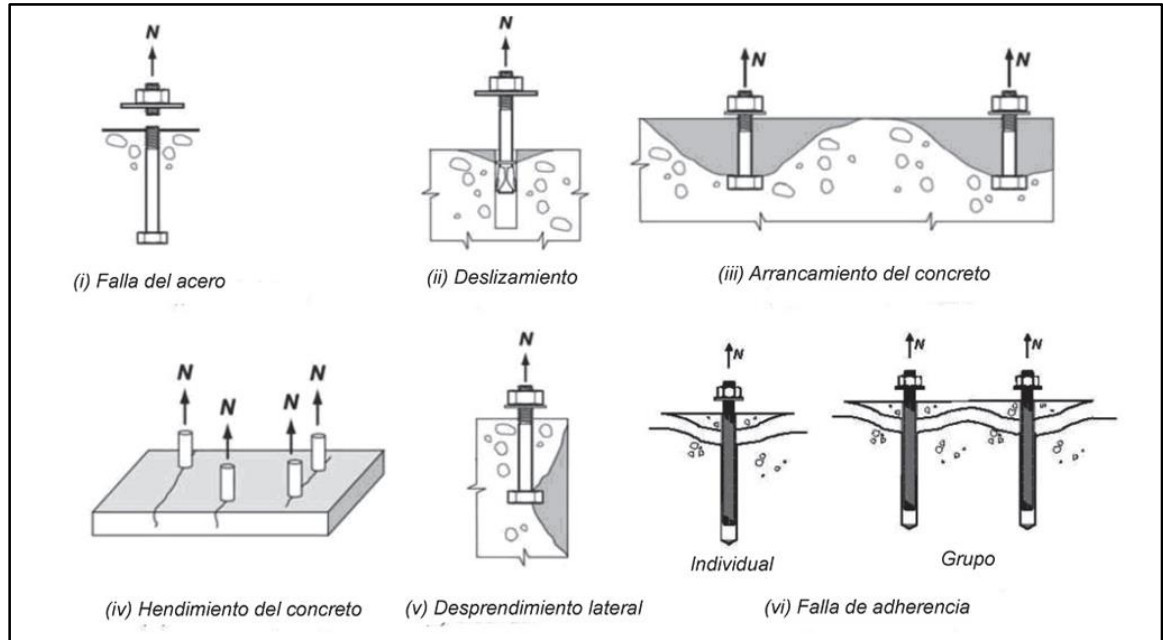
En el caso de los anclajes estructurales encontramos aquellos que se realizan para la conexión entre dos sistemas constructivos como lo es el concreto estructural y la estructura metálica, la interacción de estos dos tipos de sistemas constructivos son muy comunes en casi todas las especialidades de infraestructura pero en mayor proporción en: las construcciones de edificaciones y construcción de puentes, generalmente esta interacción se genera por dos factores principales el tiempo de ejecución, y las propiedades mercancías.

Para el caso de los anclajes no estructurales encontramos aquellos que dan soporte a la infraestructura de las redes de servicio o redes de apoyo crítico, como por ejemplo la tubería de las redes contraincendio, que para el caso de los sistemas húmedos deben soportar no solo el peso del material de la tubería si no también el peso del agua que contiene la tubería, en un caso hipotético que fallara el anclaje aparte de que se genera una emergencia dentro de la edificación dado que estos sistemas son automáticos, se generarían inundaciones y daños en el inmueble, adicional en los casos donde exista un conato de incendio la red no funcionará de forma adecuada.

En cualquiera de los casos la adherencia, agarre o unión homogénea entre el anclaje y la superficie de concreto, genera grandes impactos negativos en el caso en que ocurriese una falla, por otro lado el estudio de los esfuerzos admisibles de estos elementos en un concreto que tiene características amigables con el medio ambiente se espera que genere mayor confiabilidad en la implementación de esta combinación de materiales.

1.1. Requerimientos generales para la resistencia de los anclajes

Para analizar el comportamiento a tensión de los anclajes post-instalados, es necesario identificar previamente los posibles mecanismos de falla que pueden presentarse en condiciones experimentales y reales. De acuerdo con el Reglamento ACI 318S-14, los modos de falla más comunes se muestran en la Figura 1, los cuales constituyen la base teórica para la interpretación de los resultados obtenidos en esta investigación.

Figura 1: Modo de falla de anclajes sometidos a tensión

Nota: Tomado de Tomado de *ACI 318S-14* (American Concrete Institute, 2015).

1.2 Requisitos de diseño para cargas de tracción

1.2.1 Resistencia del acero de un anclaje en tracción

La resistencia nominal de un anclaje en tracción controlada por el acero, N_{sa} , debe ser evaluada a través de cálculos basados en las propiedades materiales del anclaje, así como las dimensiones físicas del anclaje.

De acuerdo con el reglamento *ACI 318S-14* (ACI, 2015), la resistencia nominal de un anclaje individual en tracción N_{sa} , debe calcularse aplicando la siguiente expresión:

$$N_{sa} = A_{se} N_{futa}$$

Donde:

$A_{se,N}$: Área transversal efectiva de un anclaje en tracción, mm²

f_{uta} : No debe ser mayor que el menor de $1.9f_{ya}$ ó 860 MPa.

1.2.2 Resistencia al arrancamiento del concreto de un anclaje en tracción.

El reglamento ACI 318S-14 (2015, sección 17.4.2.1) establece que la resistencia nominal de arrancamiento del concreto, para un anclaje individual (N_{cb}) no debe superar el valor límite determinado por la fórmula correspondiente.

$$N_{cb} = \frac{A_{NC}}{A_{NCO}} \psi_{ed,N} \psi_{c,N} \psi_{cp,N} N_b$$

Donde:

A_{NC} : Área proyectada de la superficie de falla para un solo anclaje o grupo de anclajes, esta debe ser aproximada a la base de la figura geométrica rectilínea que resulta de proyectar la superficie de falla hacia fuera en $1.5 h_{ef}$ a partir de la línea del eje del anclaje o, en el caso de un grupo de anclajes, desde una línea a través de una fila de anclajes adyacentes.

A_{NCO} : No debe exceder nA_{NCO}

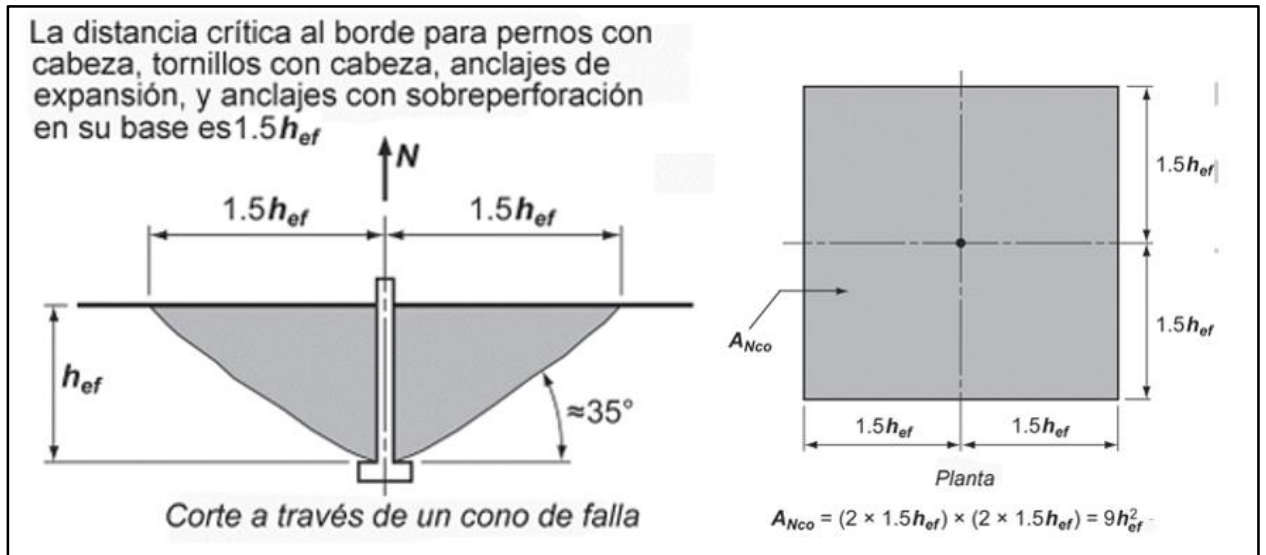
n : Número de anclajes que resisten tracción en el grupo.

A_{NCO} : Es el área proyectada de la superficie de falla de un solo anclaje con una distancia del borde igual o mayor a $1.5 h_{ef}$.

De acuerdo con el reglamento ACI 318S-14 (2015), el cálculo de la resistencia nominal de arrancamiento del concreto en tensión requiere determinar el área

crítica de concreto involucrada en el posible cono de falla. La Figura 2 ilustra estos criterios:

Figura 2: Cálculo de A_{Nco} para anclajes individuales.



Nota: Tomado de Tomado de ACI 318S-14 (American Concrete Institute, 2015).

Estos parámetros geométricos permiten una estimación más realista de la resistencia al arrancamiento y son esenciales para correlacionar los resultados experimentales con los modelos teóricos de diseño.

De acuerdo con el ACI 318S-14 (2015, sección 17.4.2.2), la resistencia básica al arrancamiento del concreto de un solo anclaje en tracción embebido en concreto fisurado N_b no debe exceder el valor calculado mediante la siguiente expresión:

$$N_b = k_c \lambda_a \sqrt{f'_c} h_{ef}^{1.5}$$

Donde:

K_c : 10 para anclajes preinstalados

K_c : 7 para anclajes postinstalados

2. Aspectos Metodológicos

2.1. Caracterización de los materiales.

2.1.1. Análisis granulométrico de los agregados.

Una parte fundamental del proyecto consistió en la caracterización de los materiales empleados, para lo cual se realizaron diversos ensayos a los agregados y al cemento. Estos incluyeron pruebas de densidad del cemento, densidad relativa y gravedad específica de la arena, finura del cemento, y análisis granulométrico tanto de la arena como de la grava.

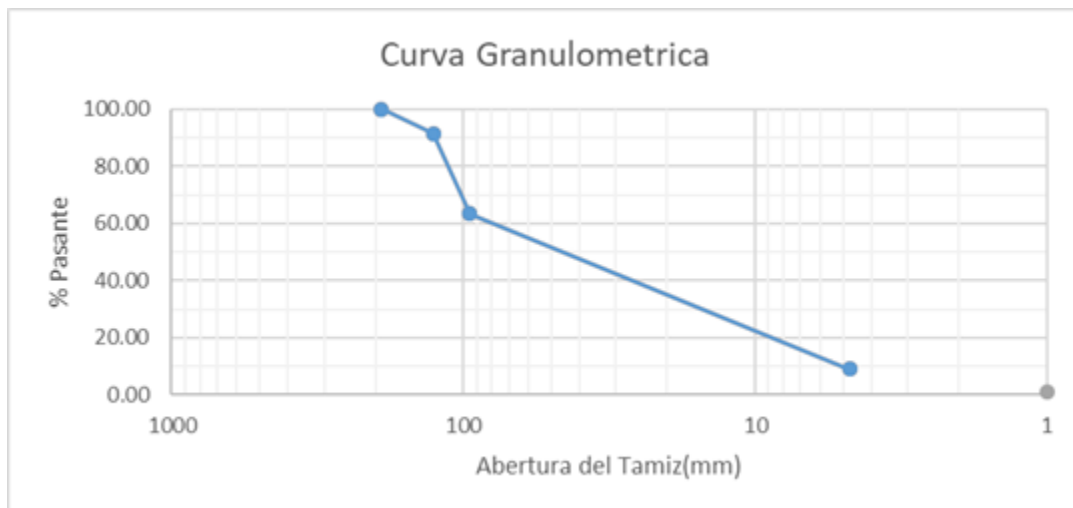
El análisis granulométrico de los agregados se llevó a cabo siguiendo el procedimiento establecido en la norma INVIAS INV E 214. Los resultados obtenidos evidenciaron que la grava utilizada corresponde a una grava fina, con tamaño nominal superior a ½". Por su parte, la arena presentó un contenido muy bajo de finos, situación que se refleja en las tablas y gráficas presentadas a continuación.

Tabla 1: Caracterización de la grava.

PESO TOTAL DE LA MUESTRA 4532 gr		GRAVAS			
ABERTURA DEL TAMIZ		Peso Retenido en (gr)	Porcentaje retenido %	Porcentaje Retenido Acumulado %	Porcentaje Pasante %
(Pulg)	(mm)				
3/4"	190,5	0,0	0,00	0,00	100,00
1/2"	127	382,00	8,43	8,43	91,57
3/8"	95,25	1272,00	28,08	36,51	63,49
N4	4,75	2464,00	54,39	90,91	9,09
Fondo		412,00	9,09	100,00	0,00
Total		4530,0	100,00	-	-

Nota: Elaboración propia.

Figura 3: Curva granulométrica de la grava.



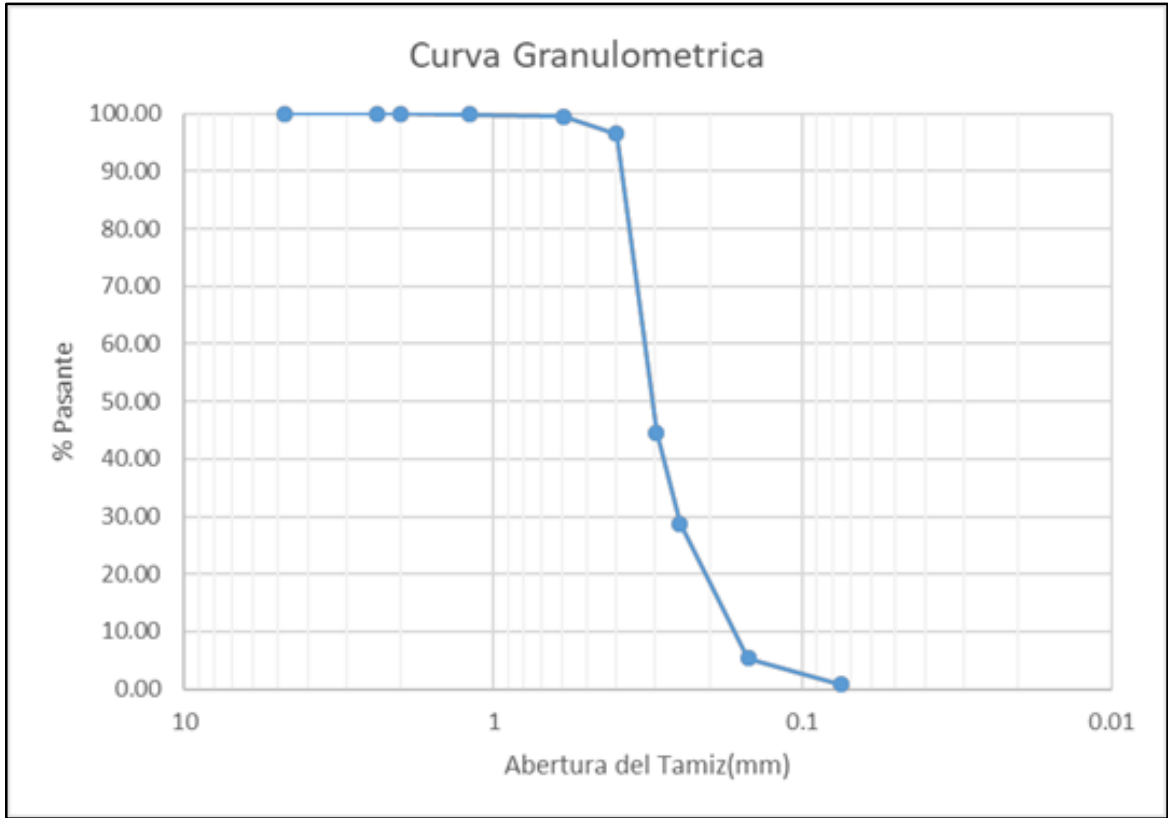
Nota: Elaboración propia.

Tabla 2: Caracterización de la arena.

PESO TOTAL DE LA MUESTRA 1500 gr		ARENAS			
ABERTURA DEL TAMIZ		Peso Retenido en (gr)	Porcentaje retenido %	Porcentaje Retenido Acumulado %	Porcentaje Pasante %
(Pulg)	(mm)				
N°4	4,76	0,2	0,01	0,00	99,99
N°8	2,38	0,4	0,03	0,03	99,96
N°10	2	0,0	0,00	0,03	99,96
N°16	1,19	0,4	0,03	0,05	99,93
N°30	0,595	5,8	0,39	0,44	99,55
N°40	0,400	44,7	2,98	3,42	96,57
N°50	0,297	779,3	51,96	55,38	44,60
N°60	0,250	238,1	15,88	71,26	28,73
N100	0,150	351,4	23,43	94,69	5,29
N200	0,075	68,2	4,55	99,24	0,75
Fondo		11,2	0,75	99,99	0,00
Total		1499,70	100,00	-	-

Nota: Elaboración propia.

Figura 4: Curva granulométrica de la arena.



Nota: Elaboración propia.

Figura 5: Registro fotográfico de los ensayos de caracterización de agregados.



Nota: Imágenes tomadas durante el proceso de preparación, tamizado y análisis granulométrico de los agregados utilizados en la investigación. Elaboración propia.

2.1.2. Gravedad específica de la grava

Se realizó el ensayo para determinar el bulk density del agregado grueso, siguiendo el procedimiento establecido en la norma INVIAS INV E 217. El resultado obtenido indicó que el agregado utilizado presenta una densidad aparente de 1,557 g/cm³.

Figura 6: Registro fotográfico gravedad específica de la grava.



Nota: Imágenes tomadas durante el proceso. Elaboración propia.

2.1.3. Gravedad específica de la arena

Se realizó el ensayo para determinar la densidad aparente (bulk density) del agregado fino, siguiendo el procedimiento descrito en la norma INVIAS INVE 217. El resultado obtenido indicó que la arena presenta una densidad aparente de 0,5227

g/cm^3 . Durante el proceso de tamizado, se evidenció una alta presencia de material fino con características similares a la pirita, lo que permite inferir que este contenido significativo de dicho mineral es el factor que contribuye a la baja densidad registrada en el agregado fino.

Figura 7: Registro fotográfico gravedad específica de la arena.



Nota: Imágenes tomadas durante el proceso. Elaboración propia.

2.1.4. Densidad del cemento y finura por Blaine

Se realizó el ensayo para determinar la densidad del cemento utilizado, Holcim ECO-planet, siguiendo el procedimiento establecido en la norma INVIAS INVE 307. El resultado obtenido indicó que este cemento presenta una densidad de $1,47 \text{ g/cm}^3$.

Figura 8: Registro fotográfico de la densidad del cemento y finura.





Nota: Imágenes tomadas durante el proceso. Elaboración propia.

2.2. Dosificación y fabricación de probetas de concreto.

Con base en los resultados obtenidos durante los ensayos de caracterización de los materiales, se realizó la dosificación del concreto para alcanzar una resistencia a compresión de 21 MPa.

Tabla 3: Dosificación del concreto.

DOSIFICACION DE MEZCLA 21 Mpa	
MATERIAL	PESO kg/m3
CEMENTO	393
ARENA	805
GRAVA	931
AGUA	174
AIRE ATRAPADO	23

Nota: Elaboración propia.

Posteriormente, se elaboraron 105 cubos de concreto, de los cuales 90 incluyeron adición de fibra polimérica y los 15 restantes se fabricaron sin fibra polimérica, manteniendo la misma resistencia de diseño de 21 MPa. Las probetas se moldearán en cubos de 15 × 15 × 15 cm, utilizando moldes acondicionados de viguetas para garantizar uniformidad en las dimensiones y en el acabado superficial.

Tabla 4: Características de las muestras.

CANTIDAD FIBRA	PROFUNDIDAD	CANTIDAD
1.8Kg/m ³	6V ϕ	15
1.8Kg/m ³	7V ϕ	15
3.25 Kg/m ³	6V ϕ	15
3.25 Kg/m ³	7V ϕ	15
4.7 Kg/m ³	6V ϕ	15
4.7 Kg/m ³	7V ϕ	15
SIN FIBRA	8V ϕ	15

Nota: Elaboración propia.

2.3. Matriz de ensayos

Con el propósito de cumplir los objetivos planteados en esta investigación, se diseñó y ejecutó un programa experimental orientado a determinar la capacidad a tracción de anclajes postinstalados, considerando como variables la profundidad de empotramiento y la adición de fibras poliméricas en un concreto elaborado con cemento Ecoplanet. A continuación, se describe de manera general el procedimiento desarrollado.

- En primer lugar, se realizaron ensayos básicos para la caracterización de los materiales, en este caso del concreto.

Figura 9: Caracterización del concreto.



Nota: Elaboración propia.

- Se elaboraron tres lotes de concreto, cada uno conformado por 30 cubos de $0.15 \times 0.15 \times 0.15$ m, con una dosificación específica de fibras poliméricas en cada lote. Esta configuración permite evaluar dos profundidades de empotramiento para cada porcentaje de fibra adicionada.

Figura 10: Cubos de concreto fundidos.



Nota: Elaboración propia.

- Adicionalmente, se fabricaron seis testigos cilíndricos de 4" por cada lote, con el propósito de controlar y analizar la influencia de las fibras en la resistencia a compresión del concreto.

Figura 11: Cilindros con fibras poliméricas.



Nota: Elaboración propia.

- Se preparó también un lote patrón sin adición de fibras poliméricas, al cual se le realizaron seis testigos cilíndricos de 4" para determinar su resistencia a compresión de referencia.

Figura 12: Lote patrón sin adición de fibras poliméricas.



Nota: Elaboración propia.

- La totalidad de probetas de concreto, pasaron por un proceso de curado de 28 días.
- El procedimiento de instalación de los anclajes se realizó una vez que las probetas de concreto cumplieron 28 días de curado, garantizando así el desarrollo completo de su resistencia a compresión.

Figura 13: Curado de concreto.

Nota: Elaboración propia.

- Para cada dosificación de fibra se evaluaron dos profundidades de empotramiento, con el objetivo de analizar el efecto combinado de estas variables en la capacidad de tracción de los anclajes postinstalados.

Tabla 5: Cantidades de muestras.

MATERIAL	CANTIDAD FIBRA	PROFUNDIDAD	CANTIDAD	SOLICITACION
BARRA CORRUGADA 1/2" 420 Mpa	1.8Kg/m3	6VØ	15	TRACCION
	1.8Kg/m3	7VØ	15	TRACCION
	3.25 Kg/m3	6VØ	15	TRACCION
	3.25 Kg/m3	7VØ	15	TRACCION
	4.7 Kg/m3	6VØ	15	TRACCION
	4.7 Kg/m3	7VØ	15	TRACCION
	SIN FIBRA	8VØ	15	TRACCION

Nota: Elaboración propia.

- Se identificó y marcó con precisión el centro de cada probeta de concreto, asegurando que el punto seleccionado correspondiera al sitio exacto donde se ejecutaría la perforación para la instalación del anclaje.

Figura 14: Marcación de muestras.



Nota: Elaboración propia.

- Se procedió a marcar la broca a utilizar, estableciendo con exactitud la profundidad de empotramiento requerida según la condición de análisis, ya fuera equivalente a 6 diámetros o 7 diámetros de la barra corrugada. Esta referencia permitió mantener la misma profundidad en todas las perforaciones, evitando variaciones que pudieran afectar los datos experimentales.

- Se realizó la perforación mecánica con equipo rotativo, empleando una broca de $\frac{5}{8}$ " , es decir, $\frac{1}{8}$ " mayor al diámetro de la barra corrugada de $\frac{1}{2}$ ". Esta diferencia de tamaño entre el diámetro de la barra y el orificio cumplió con las recomendaciones técnicas para asegurar una correcta inserción y adherencia del adhesivo epóxico.

Figura 15: Perforación de muestras.



Nota: Elaboración propia.

- Una vez realizada la perforación, se efectuó una limpieza exhaustiva del orificio utilizando aire a presión suministrado por un compresor. Esta etapa fue fundamental para eliminar polvo, restos de concreto y partículas sueltas que pudieran interferir con la adherencia del adhesivo y, en consecuencia, con el desempeño del anclaje en los ensayos de tracción.

Figura 16: Limpieza de la muestra.



Nota: Elaboración propia.

- Posteriormente, se aplicó el adhesivo epóxico Anchorfix de Sika mediante una pistola de calafateo de doble cartucho. La boquilla se introdujo hasta el fondo del orificio y se inyectó el epóxico hasta llenar aproximadamente $\frac{3}{4}$ de la profundidad de la perforación, asegurando una distribución homogénea del material dentro del espacio disponible.
- Se insertó la barra corrugada de $\frac{1}{2}$ " realizando un movimiento rotacional continuo mientras se introducía. Este procedimiento garantizó el recubrimiento completo de la barra por el adhesivo y facilitó la expulsión del exceso en la superficie, señal de que el espacio interno había sido completamente rellenado. Esta práctica estandarizada aseguró la correcta fijación de las barras y la confiabilidad de los resultados obtenidos en los ensayos de tracción posteriores.

Figura 17: Instalación de barras corrugadas de ½"



Nota: Elaboración propia.

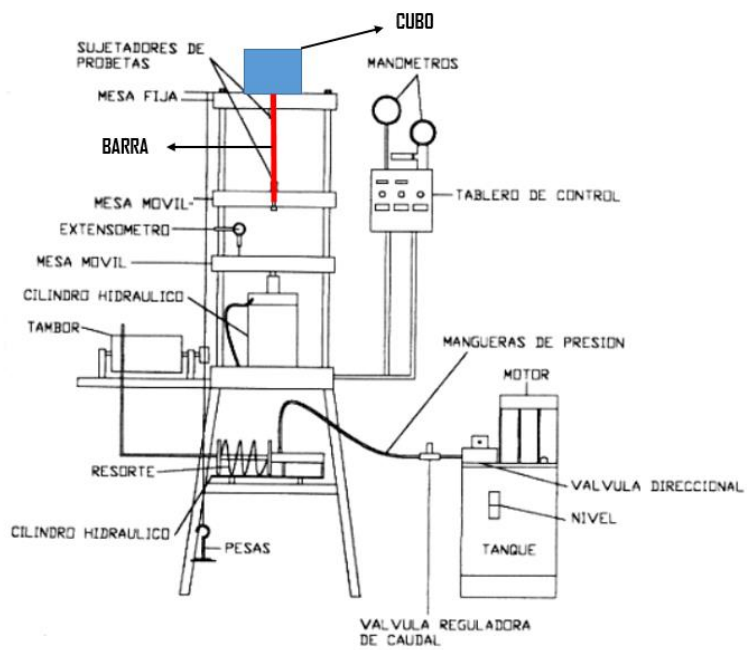
- El montaje de los anclajes se efectuó en la máquina universal de ensayos, posicionando cada cubo de concreto sobre la barra fija, correspondiente al elemento sin desplazamiento. Simultáneamente, la barra corrugada se aseguró en las mordazas del componente móvil de la máquina, permitiendo aplicar la carga de tracción de manera controlada y uniforme. Este procedimiento garantiza la correcta alineación de las probetas y la repetibilidad de los ensayos, tal como se observa en la Figura 19.

Figura 18: Ensayos en máquina universal.



Nota: Elaboración propia.

Figura 19: Esquema de fijación de muestra en la máquina universal.



Nota: Elaboración propia.

2.4. Análisis y discusión de resultados

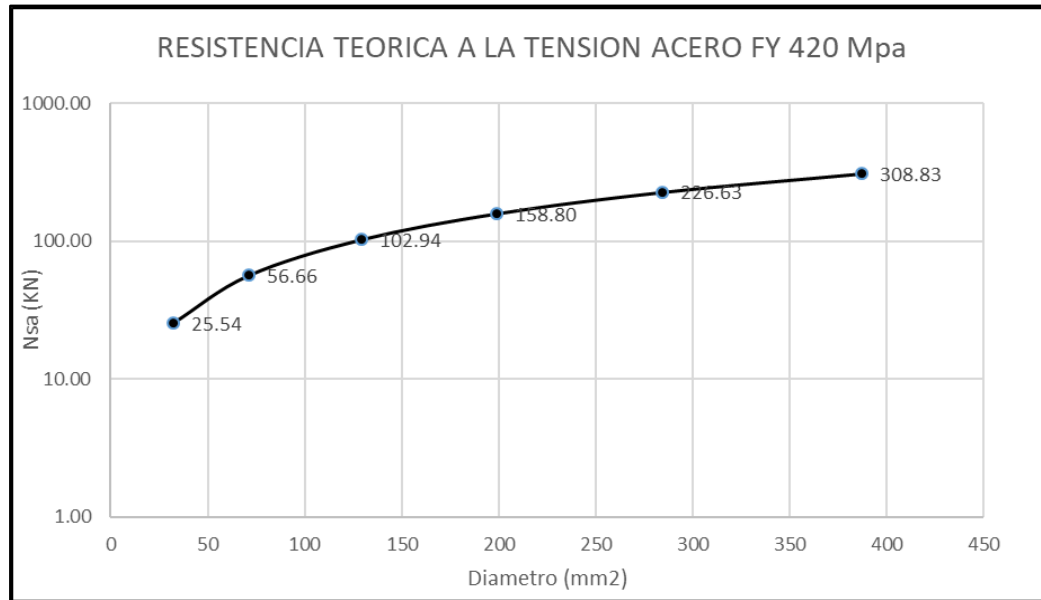
La resistencia nominal de un anclaje individual en tracción N_{sa} , debe calcularse aplicando la siguiente expresión $N_{sa} = A_{se} N_{futa}$, en la Tabla 6 se presentan los valores obtenidos para barras de diferentes diámetros, evidenciando que la resistencia nominal del anclaje en tracción aumenta proporcionalmente con el incremento del área transversal del acero. Para el caso específico de las barras de $\frac{1}{2}$ ", la resistencia nominal alcanzada fue de 102,94 kN.

Tabla 6: Cálculo de N_{sa} .

BARRA (Ø)	Ase (mm ²)	Fy (Mpa)	Futa (Mpa)	Nsa (KN)
1/4" (#2)	32	420	798	25,54
3/8" (#3)	71	420	798	56,66
1/2" (#4)	129	420	798	102,94
5/8" (#5)	199	420	798	158,80
3/4" (#6)	284	420	798	226,63
7/8" (#7)	387	420	798	308,83

Nota: Elaboración propia.

La Figura 19 muestra la relación entre el diámetro de la barra y la resistencia teórica a la tracción, donde se observa una tendencia lineal que confirma el comportamiento esperado según el modelo teórico. Este resultado respalda que el área efectiva del acero es el factor determinante en la capacidad de carga a tracción del anclaje.

Figura 20: Gráfico de resistencia a la tensión.

Nota: Elaboración propia.

La resistencia nominal de arrancamiento del concreto (N_{cb}) para un anclaje individual se calculó aplicando la fórmula establecida en el ACI 318 (2015), la cual establece el valor límite que no debe ser superado.

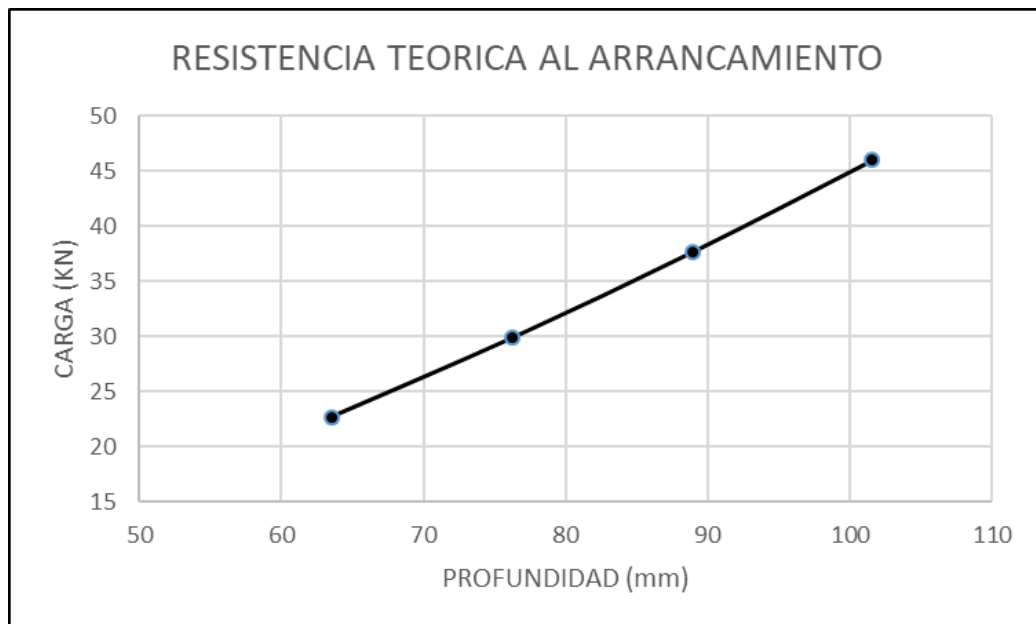
En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos para las distintas profundidades de empotramiento evaluadas. Los datos muestran un incremento progresivo de la resistencia nominal a medida que aumenta la profundidad, pasando de 23 kN a una profundidad de 63,5 mm, hasta 46 kN cuando la profundidad alcanzó 101,6 mm.

Tabla 7: Cálculo de N_{cb} .

Profundidad	Anc/Anc	cdN	cN	cpN	λ	Kc	Nb	Ncb
63,5	1	1	1,4	1	1	7	16	23
76,2	1	1	1,4	1	1	7	21	30
88,9	1	1	1,4	1	1	7	27	38
101,6	1	1	1,4	1	1	7	33	46

Nota: Elaboración propia.

La Figura 21 ilustra esta relación de forma gráfica, evidenciando un comportamiento lineal entre la profundidad del anclaje y su resistencia teórica de arrancamiento. Este patrón confirma que el aumento de la profundidad de empotramiento contribuye de forma directa a mejorar la capacidad de carga, en concordancia con lo previsto en el modelo normativo.

Figura 21: Gráfico de resistencia al arrancamiento.

Nota: Elaboración propia.

La resistencia teórica a la adherencia de los anclajes se calculó aplicando la ecuación establecida en la sección 17.4.5 del ACI 318 (2015), la cual se expresa de la siguiente forma:

$$N_a = \frac{A_{NA}}{A_{NAo}} \psi_{ed,Na} \psi_{cp,Na}$$

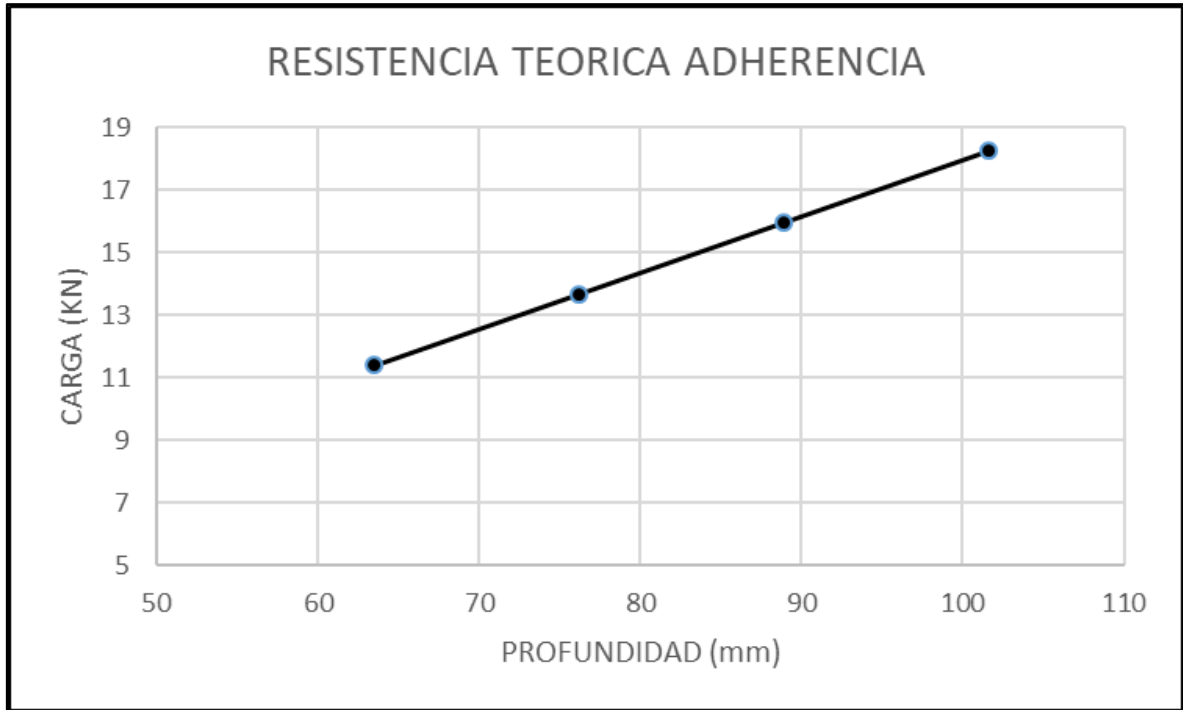
donde cada parámetro considera factores geométricos, de condición del anclaje y de material, según las especificaciones normativas. En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos para cada profundidad analizada. Estos cálculos muestran un incremento progresivo de la resistencia teórica a medida que aumenta la profundidad de empotramiento, pasando de 11 kN para una profundidad de 63,5 mm hasta 18 kN para una profundidad de 101,6 mm.

Tabla 8: Cálculo de N_a .

\varnothing (mm)	Profundidad	Anc/Anco	ψ_{edNa}	ψ_{cpNa}	λ	τ_{cr}	Nba	N_a
12.7	63.5	1	1	1	1	1	4.5	11
12.7	76.2	1	1	1	1	1	4.5	14
12.7	88.9	1	1	1	1	1	4.5	16
12.7	101.6	1	1	1	1	1	4.5	18

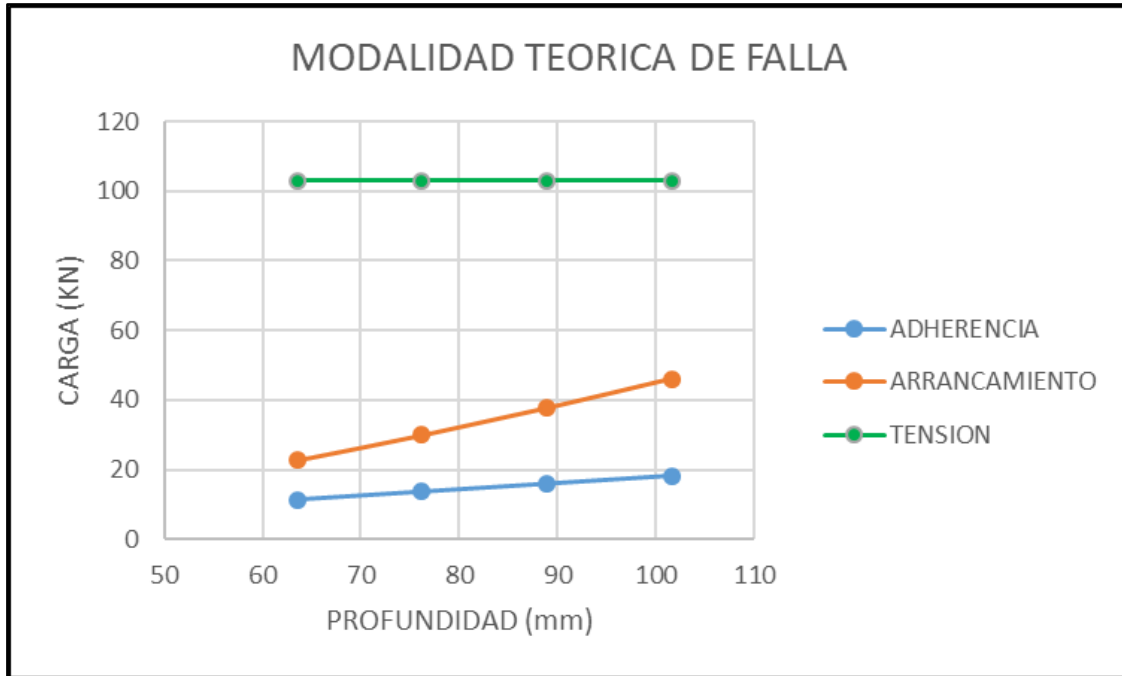
Nota: Elaboración propia.

La Figura 22 ilustra gráficamente esta relación, evidenciando un comportamiento lineal y proporcional entre la profundidad del anclaje y la resistencia teórica de adherencia, lo cual coincide con el comportamiento esperado.

Figura 22: Gráfico de resistencia a la adherencia.

Nota: Elaboración propia.

Con base en el análisis de los cálculos teóricos, considerando el diámetro y la profundidad de empotramiento de los anclajes, se identificaron las modalidades de falla predominantes para cada condición evaluada. En la Figura 22 se presentan los resultados, donde se observa que:

Figura 23: Modalidad teórica de falla.

Nota: Elaboración propia.

- La falla por adherencia presenta los valores más bajos de resistencia, en un rango aproximado entre 10 y 20 kN.
- La falla por arrancamiento muestra un comportamiento creciente con la profundidad, alcanzando valores cercanos a 45 kN en las mayores profundidades evaluadas.
- La falla por tracción del acero mantiene valores elevados y prácticamente constantes, con cargas superiores a 100 kN en todos los escenarios.

Estos resultados permiten anticipar que, bajo las condiciones experimentales establecidas, el arrancamiento y la adherencia del concreto representan los modos de falla más críticos en anclajes de menor profundidad, mientras que en profundidades mayores la resistencia del acero se mantiene como el factor determinante.

Una vez culminada esta fase de análisis teórico, se procedió con los ensayos experimentales de tracción en la máquina universal. Dichos ensayos se ejecutaron para cada tipo de mezcla, de acuerdo con el contenido de fibra y la profundidad de anclaje, con el fin de contrastar el comportamiento teórico con el observado experimentalmente, tal como se describe en las tablas presentadas en las secciones siguientes.

Ensayos a tracción de mezcla con 1,8 kg/m³ de fibra y profundidad de 6 veces el diámetro.

Para la condición correspondiente a la adición de fibra de 1,8 kg/m³ y una profundidad de empotramiento equivalente a 6 veces el diámetro, se realizaron 15 ensayos de tracción sobre probetas cúbicas.

Los resultados obtenidos, presentados en la Tabla 9, evidencian que la resistencia a tracción se ubicó en un rango entre 19,8 kN y 28,45 kN, con un promedio de 25,93 kN y una desviación estándar de 2,52 kN. Cabe resaltar que, en esta serie de pruebas, ninguna probeta presentó falla a tensión del acero, confirmando que las modalidades críticas de falla corresponden al arrancamiento del concreto y, en menor medida, a la adherencia.

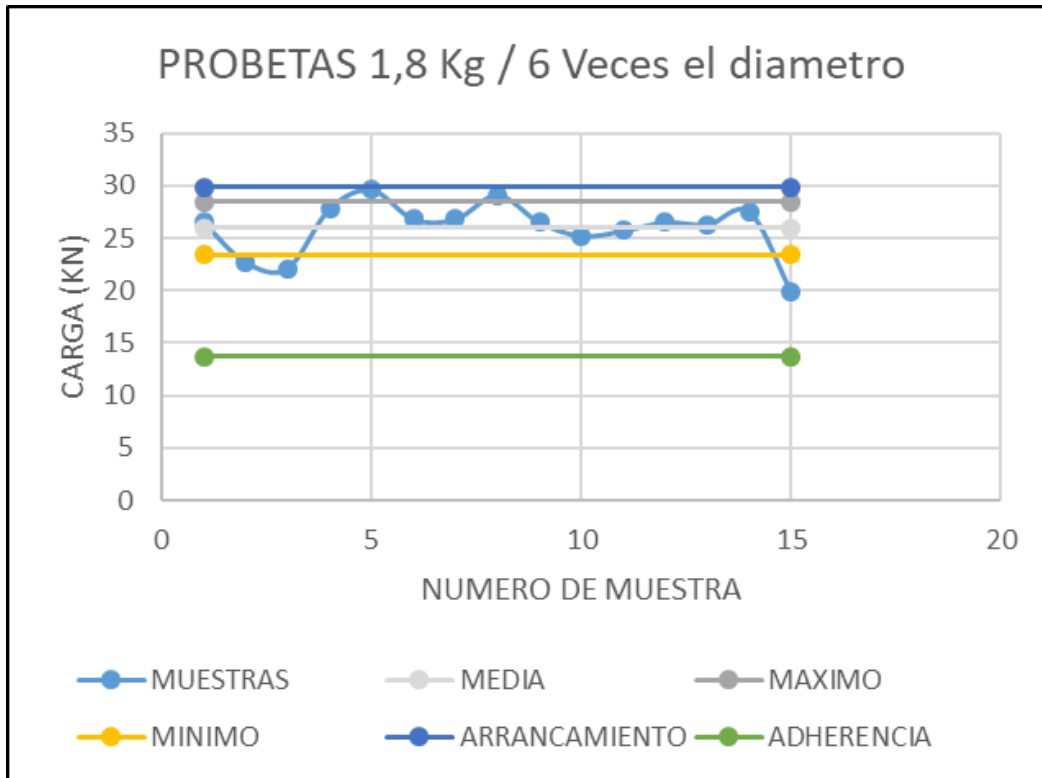
Tabla 9: Muestras con 1,8 kg/m³ de fibra y profundidad de 6 veces el diámetro.

PROBETAS KG 1,8 Y 6V			
#MUESTRA	KG FIBRA	PROFUNDIDAD 6V(mm)	RESISTENCIA TRACCION (KN)
1	1,8	76,2	26,5
2	1,8	76,2	22,7
3	1,8	76,2	22,1
4	1,8	76,2	27,8
5	1,8	76,2	29,6
6	1,8	76,2	26,8
7	1,8	76,2	26,8
8	1,8	76,2	29,1
9	1,8	76,2	26,5
10	1,8	76,2	25,2
11	1,8	76,2	25,7
12	1,8	76,2	26,5
13	1,8	76,2	26,3
14	1,8	76,2	27,5
15	1,8	76,2	19,8
		PROMEDIO	25,93
		DESVIACION ESTANDAR	2,52
		MAXIMO	28,45
		MINIMO	23,41

Nota: Elaboración propia.

La Figura 24 ilustra de manera gráfica los resultados, donde se observa un comportamiento relativamente homogéneo entre las muestras, con ligeras variaciones respecto al valor promedio. Este patrón de consistencia confirma la repetibilidad del procedimiento experimental y respalda la validez de los resultados obtenidos.

Figura 24: Modalidad de falla en muestras con 1,8 kg/m³ de fibra y profundidad de 6 veces el diámetro.



Nota: Elaboración propia.

Ensayos a tracción de mezcla con 1,8 kg/m³ de fibra y profundidad de 7 veces el diámetro.

Para la condición de adición de fibra de 1,8 kg/m³ y una profundidad de empotramiento equivalente a 7 veces el diámetro, se realizaron 15 ensayos de tracción sobre probetas cúbicas.

Tabla 10: Muestras con 1,8 kg/m³ de fibra y profundidad de 7 veces el diámetro.

PROBETAS KG 1,8 Y 7V			
#MUESTRA	kg FIBRA	PROFUNDIDAD 7V(mm)	RESISTENCIA TRACCION (KN)
1	1,8	88,9	32
2	1,8	88,9	24,6
3	1,8	88,9	31,9
4	1,8	88,9	23,1
5	1,8	88,9	26,4
6	1,8	88,9	27
7	1,8	88,9	31,4
8	1,8	88,9	17,4
9	1,8	88,9	17,8
10	1,8	88,9	23,3
11	1,8	88,9	26
12	1,8	88,9	27,5
13	1,8	88,9	25,2
14	1,8	88,9	26,5
15	1,8	88,9	27
		PROMEDIO	25,81
		DESVIACION ESTANDAR	4,19
		MAXIMO	30,00
		MINIMO	21,61

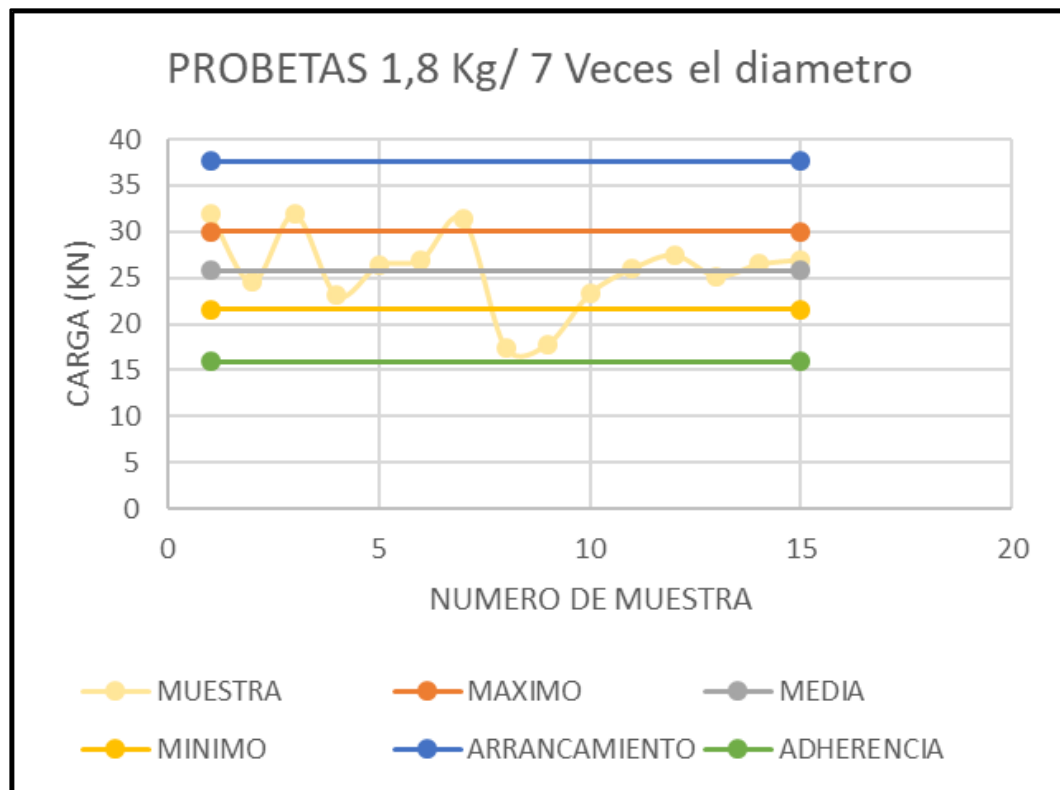
Nota: Elaboración propia.

Los resultados, presentados en la Tabla 10, muestran que la resistencia a tracción osciló entre 17,4 kN y 31,4 kN, con un promedio de 25,81 kN y una desviación estándar de 4,19 kN. Al igual que en los ensayos con profundidad de 6 diámetros, ninguna probeta presentó falla por tensión del acero, siendo las modalidades predominantes de falla el arrancamiento del concreto y, en menor medida, la adherencia.

En la Figura 25 se observa la distribución de las cargas registradas para cada muestra, donde se evidencia una mayor dispersión de resultados en comparación con los ensayos a 6 diámetros, lo que

podría asociarse a variaciones en el proceso de instalación de los anclajes o a pequeñas heterogeneidades en el concreto. No obstante, los valores promedio se mantienen dentro del rango esperado, mostrando un incremento en la resistencia nominal respecto a la profundidad de 6 diámetros, lo que confirma la relación directa entre la profundidad de empotramiento y la capacidad a tracción del anclaje.

Figura 25: Modalidad de falla en muestras con 1,8 kg/m³ de fibra y profundidad de 7 veces el diámetro.



Nota: Elaboración propia.

Ensayos a tracción de mezcla con 3.25 kg/m³ y profundidad de 6 veces el diámetro.

Para la condición correspondiente a la adición de fibra de $3,25 \text{ kg/m}^3$ y una profundidad de empotramiento equivalente a 6 veces el diámetro, se realizaron 15 ensayos de tracción en probetas cúbicas.

Los resultados, presentados en la Tabla 11, muestran que la resistencia a tracción se mantuvo en un rango entre 21,9 kN y 24,6 kN, con un promedio de 23,28 kN y una desviación estándar de 1,30 kN, indicando una baja dispersión de los datos y, por ende, una buena repetibilidad de las pruebas.

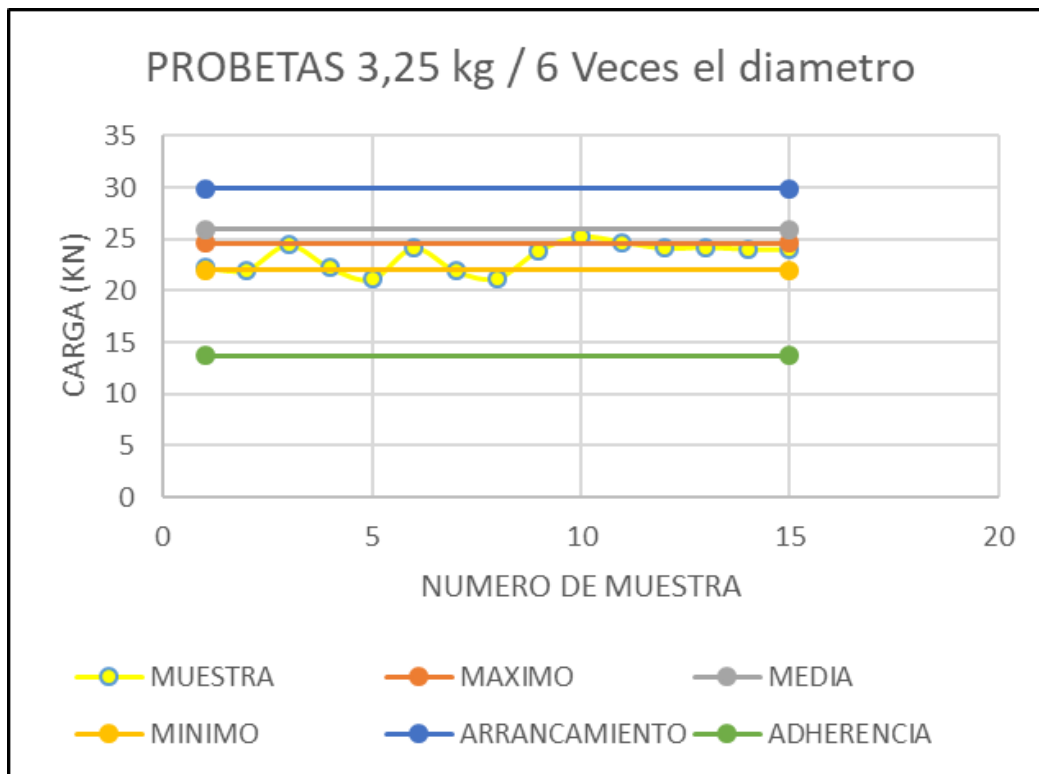
Tabla 11: Muestras con $3,25 \text{ kg/m}^3$ de fibra y profundidad de 6 veces el diámetro.

PROBETAS KG 3.25 Y 6V			
#MUESTRA	kg FIBRA	PROFUNDIDAD 6V(mm)	RESISTENCIA TRACCION (KN)
1	3,25	76,2	22,2
2	3,25	76,2	22
3	3,25	76,2	24,4
4	3,25	76,2	22,2
5	3,25	76,2	21,1
6	3,25	76,2	24,1
7	3,25	76,2	21,9
8	3,25	76,2	21,2
9	3,25	76,2	23,9
10	3,25	76,2	25,2
11	3,25	76,2	24,7
12	3,25	76,2	24,1
13	3,25	76,2	24,2
14	3,25	76,2	24
15	3,25	76,2	24
		PROMEDIO	23,28
		DESVIACION ESTANDAR	1,30
		MAXIMO	24,58
		MINIMO	21,98

Nota: Elaboración propia.

En la Figura 26 se observa que las cargas máximas y mínimas presentan poca variación entre muestras, confirmando la consistencia del procedimiento experimental. Sin embargo, al comparar estos resultados con los obtenidos en la condición de 1,8 kg/m³ de fibra y 6 diámetros, se evidencia que el incremento de la dosificación de fibra no genera un aumento significativo en la capacidad a tracción del anclaje, lo que sugiere que el aporte de la fibra a este tipo de esfuerzo es marginal en esta condición de empotramiento.

Figura 26: Modalidad de falla en muestras con 3,25 kg/m³ de fibra y profundidad de 6 veces el diámetro.



Nota: Elaboración propia.

Ensayos a tracción de mezcla con 3.25 kg/m³ y profundidad de 7 veces el diámetro.

Para la condición de adición de fibra de $3,25 \text{ kg/m}^3$ y una profundidad de empotramiento equivalente a 7 veces el diámetro, se realizaron 15 ensayos de tracción sobre probetas cúbicas.

Los resultados, presentados en la Tabla 12, muestran que la resistencia a tracción varió entre $18,78 \text{ kN}$ y $26,35 \text{ kN}$, con un promedio de $22,57 \text{ kN}$ y una desviación estándar de $3,78 \text{ kN}$, evidenciando una mayor dispersión de los valores en comparación con los ensayos realizados con 6 diámetros de empotramiento.

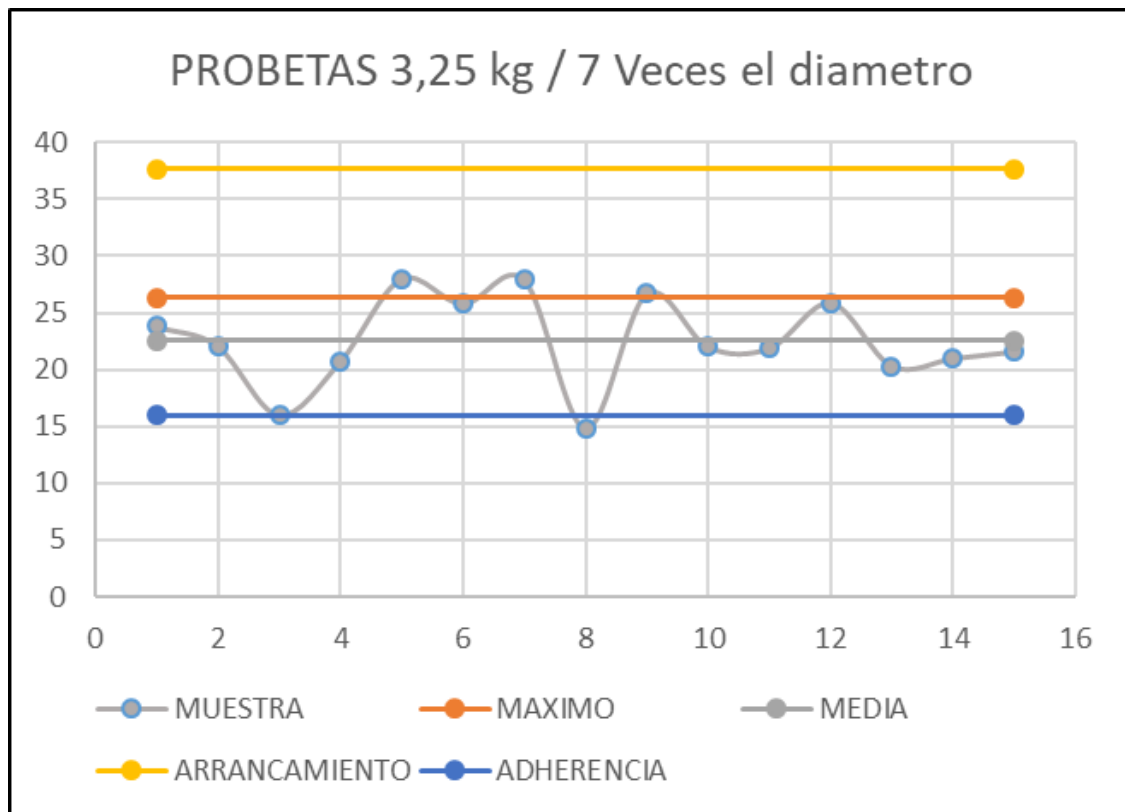
Tabla 12: Muestras con $3,25 \text{ kg/m}^3$ de fibra y profundidad de 7 veces el diámetro.

PROBETAS KG 3.25 Y 7V			
#MUESTRA	kg FIBRA	PROFUNDIDA D 7V(mm)	RESISTENC IA TRACCION (KN)
1	3,25	88,9	23,8
2	3,25	88,9	22,1
3	3,25	88,9	16
4	3,25	88,9	20,7
5	3,25	88,9	28
6	3,25	88,9	25,8
7	3,25	88,9	27,9
8	3,25	88,9	14,8
9	3,25	88,9	26,7
10	3,25	88,9	22
11	3,25	88,9	21,9
12	3,25	88,9	25,9
13	3,25	88,9	20,3
14	3,25	88,9	21
15	3,25	88,9	21,6
		PROMEDIO	22,57
		DESVIACION ESTANDAR	3,78
		MAXIMO	26,35
		MINIMO	18,78

Nota: Elaboración propia.

En la Figura 27 se observa que, aunque el valor promedio es ligeramente inferior al obtenido en otras condiciones, las cargas máximas registradas se mantienen en un rango similar. Este comportamiento sugiere que, a pesar de incrementar la profundidad de empotramiento, la dosificación de 3,25 kg/m³ de fibra no produce un aumento significativo en la resistencia a tracción, lo que refuerza la tendencia observada en los ensayos previos.

Figura 27: Modalidad de falla en muestras con 3,25 kg/m³ de fibra y profundidad de 7 veces el diámetro.



Nota: Elaboración propia.

Ensayos a tracción de mezcla con 4.7 kg/m³ y profundidad de 6 veces el diámetro.

Para la condición de adición de fibra de 4,7 kg/m³ y una profundidad de empotramiento equivalente a 6 veces el diámetro, se realizaron 15 ensayos de tracción sobre probetas cúbicas.

Los resultados, presentados en la Tabla 13, muestran que la resistencia a tracción se ubicó en un rango entre 24,72 kN y 31,65 kN, con un promedio de 28,19 kN y una desviación estándar de 3,46 kN. Estos valores evidencian un incremento en la resistencia promedio respecto a las mezclas con menor dosificación de fibra para la misma profundidad, lo que indica un efecto positivo del incremento de fibra en la capacidad de carga a tracción.

Tabla 13: Muestras con 4,27 kg/m³ de fibra y profundidad de 6 veces el diámetro.

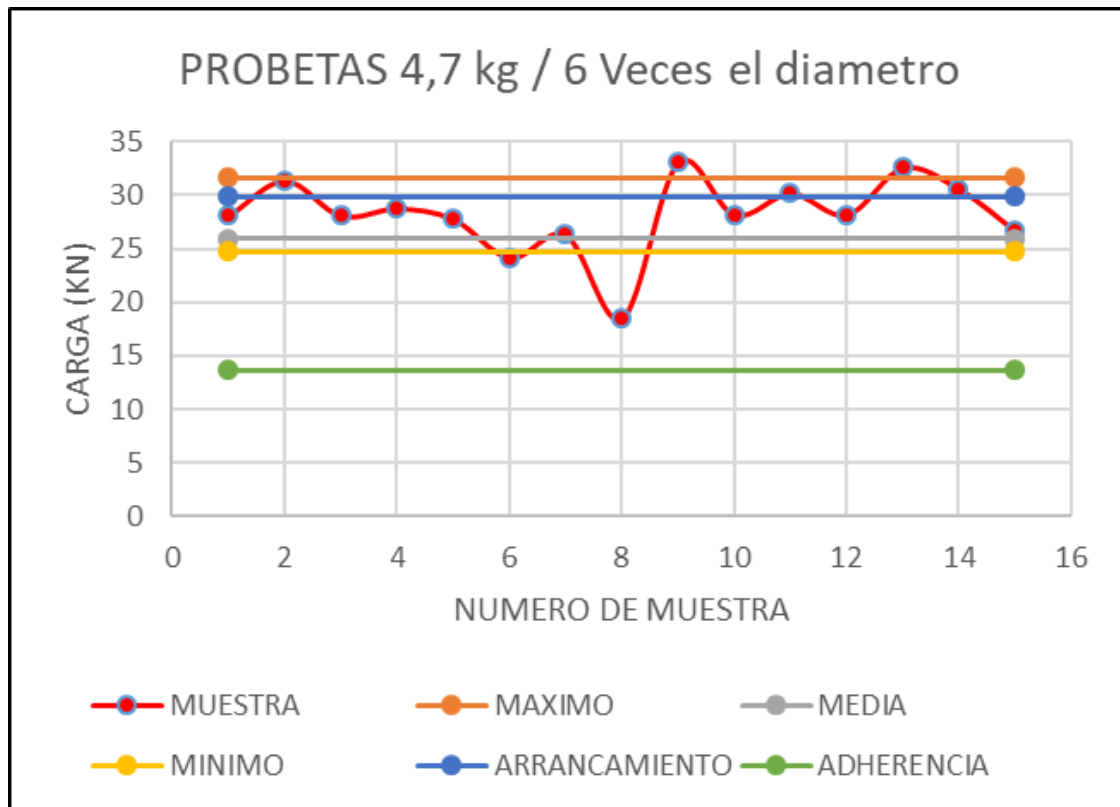
PROBETAS KG 4.7 Y 6V			
#MUESTRA	kg FIBRA	PROFUNDIDA D 6V(mm)	RESISTENC IA TRACCION (KN)
1	4,7	76,2	28,1
2	4,7	76,2	31,4
3	4,7	76,2	28,1
4	4,7	76,2	28,8
5	4,7	76,2	27,8
6	4,7	76,2	24,2
7	4,7	76,2	26,3
8	4,7	76,2	18,5
9	4,7	76,2	33,1
10	4,7	76,2	28,2
11	4,7	76,2	30,2
12	4,7	76,2	28,2
13	4,7	76,2	32,6
14	4,7	76,2	30,6
15	4,7	76,2	26,7
		PROMEDIO	28,19
		DESVIACION ESTANDAR	3,46
		MAXIMO	31,65
		MINIMO	24,72

Nota: Elaboración propia.

En la Figura 28 se observa la distribución de los resultados individuales, destacando que, aunque la mayoría de los ensayos se agrupan en torno al valor promedio, existen ligeras variaciones en algunas

probetas, lo cual podría atribuirse a pequeñas diferencias en el proceso de instalación o en la homogeneidad de la mezcla. No obstante, la tendencia general confirma que el mayor contenido de fibra contribuye a una mejora en la resistencia a tracción del anclaje cuando se mantiene constante la profundidad de empotramiento.

Figura 28: Modalidad de falla en muestras con 4,7 kg/m³ de fibra y profundidad de 6 veces el diámetro.



Nota: Elaboración propia.

Ensayos a tracción de mezcla con 4.7 kg/m³ y profundidad de 7 veces el diámetro.

Para la condición de adición de fibra de 4,7 kg/m³ y una profundidad de empotramiento equivalente a 7 veces el diámetro, se realizaron 15 ensayos de tracción sobre probetas cúbicas.

Los resultados, presentados en la Tabla 14, muestran que la resistencia a tracción varió entre 23,51 kN y 30,39 kN, con un promedio de 26,95 kN y una desviación estándar de 3,44 kN. Estos valores evidencian una ligera dispersión de resultados, pero con una tendencia clara de incremento en la capacidad promedio respecto a los ensayos realizados con menor contenido de fibra y/o menor profundidad de empotramiento.

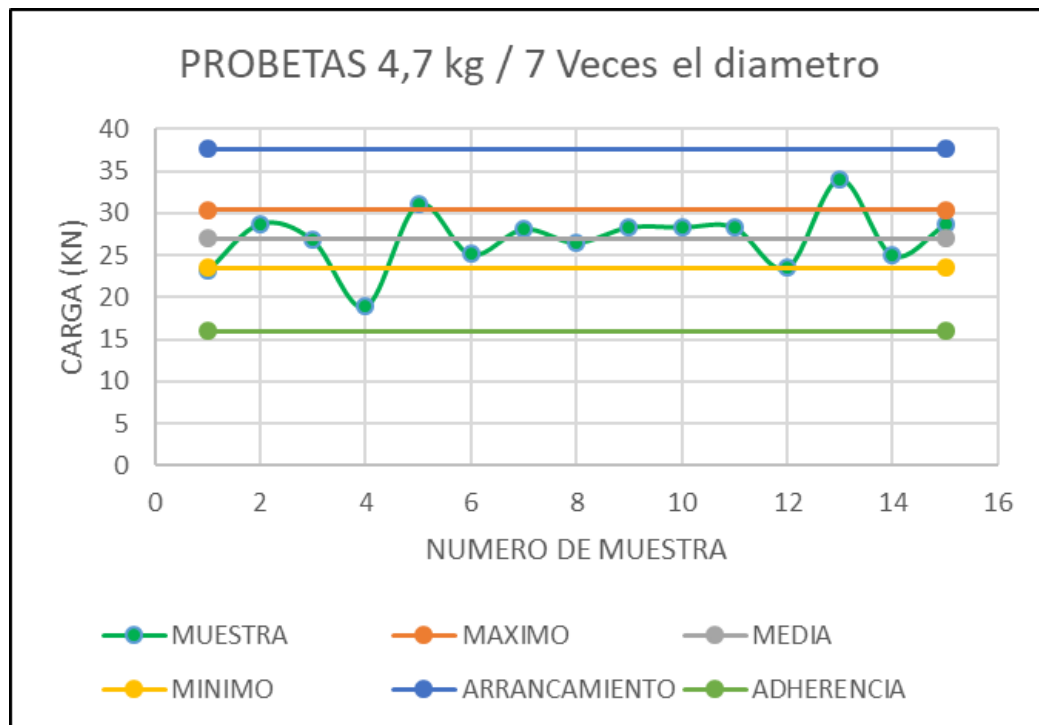
Tabla 14: Muestras con 4,7 kg/m³ de fibra y profundidad de 7 veces el diámetro.

PROBETAS KG 4.7 Y 7V			
#MUESTRA	kg FIBRA	PROFUNDIDA D 7V(mm)	RESISTENC IA TRACCION (KN)
1	4,7	88,9	23,1
2	4,7	88,9	28,7
3	4,7	88,9	26,8
4	4,7	88,9	18,9
5	4,7	88,9	31
6	4,7	88,9	25,1
7	4,7	88,9	28,1
8	4,7	88,9	26,5
9	4,7	88,9	28,3
10	4,7	88,9	28,3
11	4,7	88,9	28,3
12	4,7	88,9	23,5
13	4,7	88,9	34
14	4,7	88,9	25
15	4,7	88,9	28,6
		PROMEDIO	26,95
		DESVIACION ESTANDAR	3,44
		MAXIMO	30,39
		MINIMO	23,51

Nota: Elaboración propia.

La Figura 29 ilustra el comportamiento de las probetas evaluadas, mostrando que la mayoría de los valores se concentran cerca del promedio, mientras que algunos casos puntuales presentan desviaciones mínimas. Este comportamiento confirma que la combinación de mayor contenido de fibra y mayor profundidad de empotramiento contribuye a mejorar la capacidad de carga a tracción de los anclajes, lo que es consistente con el análisis teórico desarrollado en apartados anteriores.

Figura 29: Modalidad de falla en muestras con 4,7 kg/m³ de fibra y profundidad de 7 veces el diámetro.



Nota: Elaboración propia.

Ensayos a tracción de mezcla sin adición de fibra y profundidad de 8 veces el diámetro.

Para la condición patrón, es decir, sin adición de fibra, y con una profundidad de empotramiento equivalente a 8 diámetros, se realizaron 15 ensayos de tracción sobre probetas cúbicas.

Los resultados, presentados en la Tabla 15, muestran que la resistencia a tracción se ubicó en un rango entre 28,68 kN y 41,00 kN, con un promedio de 33,43 kN y una desviación estándar de 4,76 kN. Estos valores evidencian que, al aumentar la profundidad de empotramiento, la capacidad de carga a tracción del anclaje se incrementa de manera significativa en comparación con profundidades menores, manteniéndose como la condición de mayor resistencia registrada entre los ensayos realizados.

Tabla 15: Muestras patrón

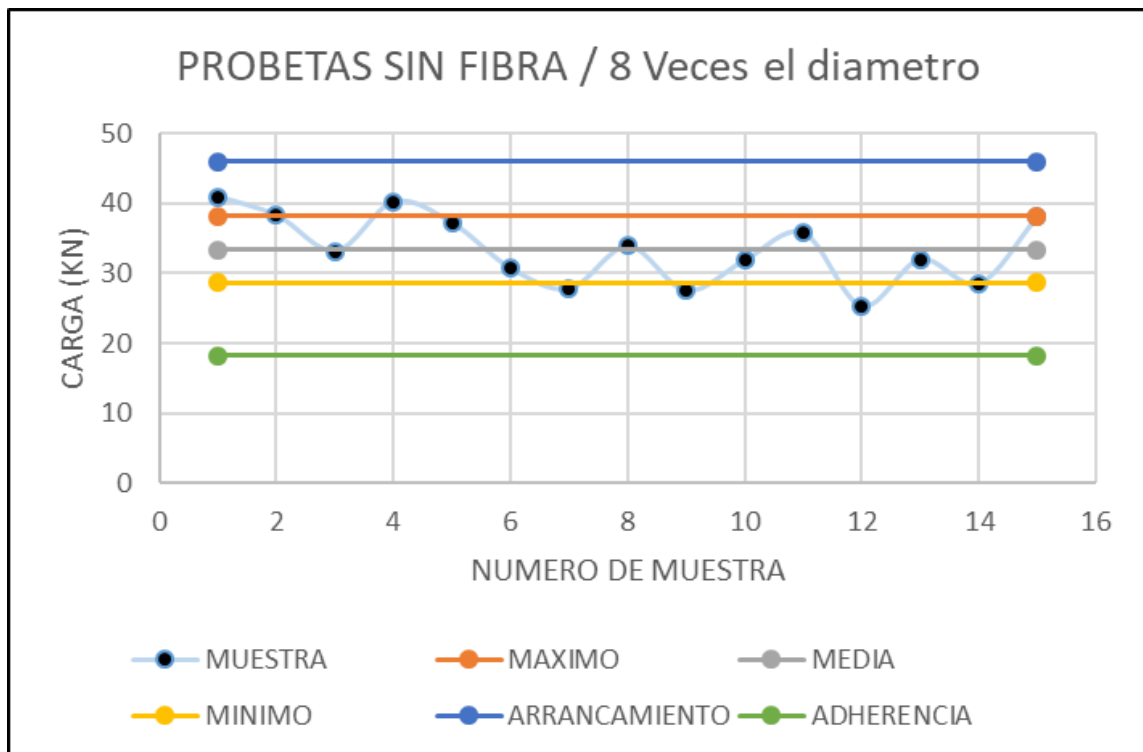
PROBETAS PATRON			
#MUESTRA	kg FIBRA	PROFUNDIDAD 8V(mm)	RESISTENCIA TRACCION (KN)
1	0	101,6	41
2	0	101,6	38,3
3	0	101,6	33,2
4	0	101,6	40,3
5	0	101,6	37,2
6	0	101,6	30,7
7	0	101,6	27,8
8	0	101,6	33,9
9	0	101,6	27,5
10	0	101,6	31,9
11	0	101,6	35,8
12	0	101,6	25,3
13	0	101,6	32
14	0	101,6	28,5
15	0	101,6	38,1
		PROMEDIO	33,43
		DESVIACION ESTANDAR	4,76
		MAXIMO	38,19
		MINIMO	28,68

Nota: Elaboración propia.

La Figura 30 muestra la distribución de resultados, donde se observa que la mayoría de las probetas se agrupan alrededor del promedio, aunque con ligeras variaciones que pueden asociarse a la

heterogeneidad propia del concreto. Estos resultados confirman que el incremento de profundidad, aun sin adición de fibras, tiene un efecto positivo sobre la capacidad de tracción de los anclajes postinstalados.

Figura 30: Modalidad de falla en muestras patrón.



Nota: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados de los ensayos realizados, se evidencia que, para las profundidades de empotramiento analizadas en barras corrugadas de $\frac{1}{2}$ ", en ningún caso la resistencia de los anclajes alcanzó el valor correspondiente a la falla por tensión del acero. Por lo anterior, el análisis se centra en las modalidades de falla por arrancamiento y falla por adherencia, las cuales fueron las predominantes en todas las probetas evaluadas.

En el caso de las probetas con la menor adición de fibra ($1,8 \text{ kg/m}^3$), se fabricaron 30 especímenes, de los cuales 15 se anclaron a una profundidad equivalente a 6 diámetros (76,2 mm). En

esta condición, se observó que la adición de fibra aporta un beneficio significativo a la resistencia de adherencia, ya que los valores obtenidos superaron de manera consistente el valor teórico de falla por adherencia. Respecto a la modalidad de arrancamiento, los resultados mostraron un comportamiento uniforme, con la mayoría de las probetas alcanzando valores por encima de la media teórica (30 kN) e, incluso, algunos especímenes lograron igualar o superar dicha resistencia.

Por otro lado, las 15 probetas con $1,8 \text{ kg/m}^3$ de fibra y profundidad de 7 diámetros (88,9 mm) mostraron un comportamiento más variable. Aunque en promedio los valores se mantuvieron cercanos a la media, un número considerable de probetas quedó por debajo de la resistencia teórica de arrancamiento (38 kN), e incluso algunas mostraron resultados cercanos a los valores teóricos de adherencia. Esto indica que el beneficio de la fibra a esta dosificación no es tan efectivo en profundidades mayores.

En el concreto con adición de $3,25 \text{ kg/m}^3$, se elaboraron también 30 probetas, de las cuales 15 se ensayaron a una profundidad de 6 diámetros. En este grupo, se observó un comportamiento uniforme y valores alejados de la falla teórica por adherencia; sin embargo, los resultados no se aproximaron a la resistencia teórica de arrancamiento y, en promedio, fueron inferiores a los obtenidos con $1,8 \text{ kg/m}^3$. Esto sugiere que, aunque la fibra mejora la adherencia, no genera un incremento proporcional en la resistencia al arrancamiento.

Las otras 15 probetas con $3,25 \text{ kg/m}^3$ y profundidad de 7 diámetros presentaron un comportamiento similar al observado en la profundidad de 6 diámetros. En algunos especímenes, los valores quedaron por debajo de la resistencia teórica de adherencia, aunque, en general, se confirmó que la fibra aporta beneficios en términos de adherencia, sin representar mejoras sustanciales en el arrancamiento.

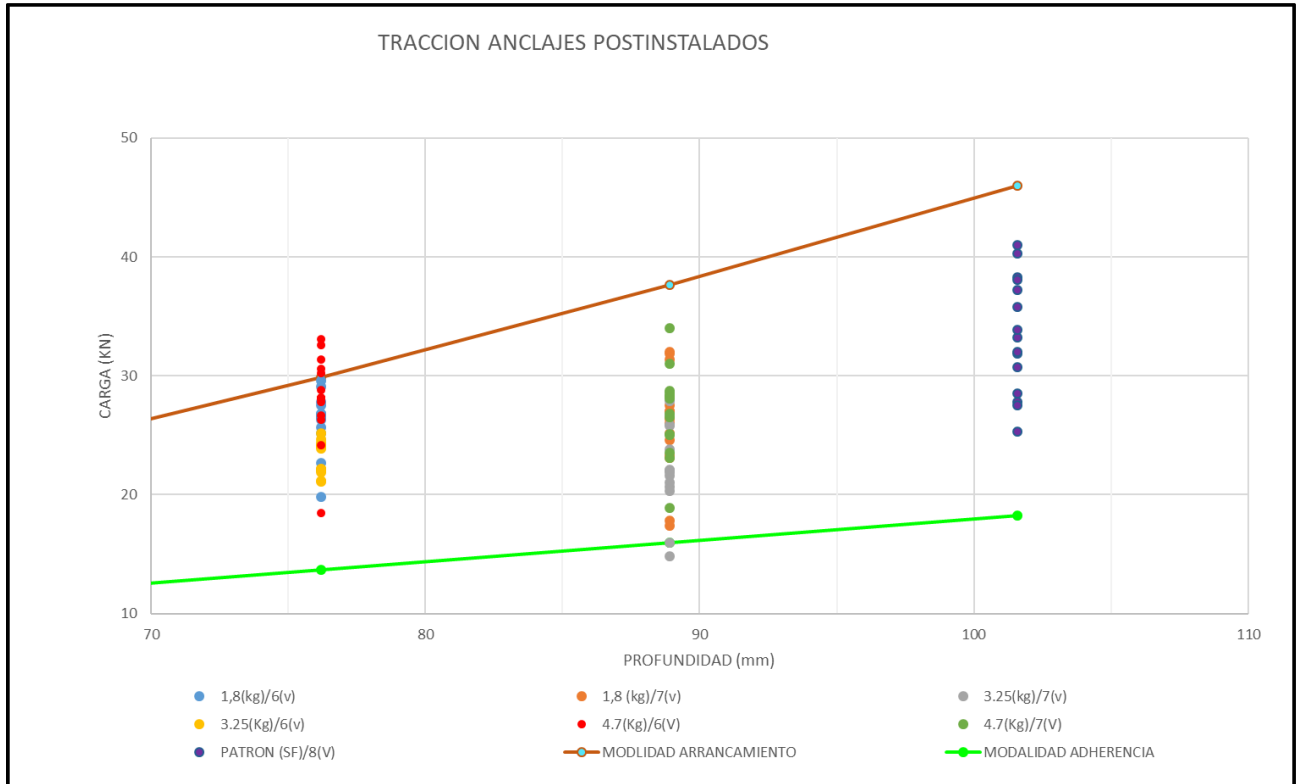
Para las probetas con $4,7 \text{ kg/m}^3$ de fibra, se elaboraron igualmente 30 especímenes. En las 15 probetas con profundidad de 6 diámetros, se evidenció una mejora significativa tanto en los valores teóricos de adherencia como en los de arrancamiento. Varios especímenes incluso superaron el valor teórico de resistencia al arrancamiento, mostrando además una mayor uniformidad y estabilidad en los resultados, con la mayoría de los valores por encima de la media.

En el caso de las 15 probetas con $4,7 \text{ kg/m}^3$ y profundidad de 7 diámetros, los resultados mostraron un comportamiento más estable que con las dosificaciones menores. La mayoría de las probetas presentó valores superiores a la media, con algunos especímenes que se aproximaron a la resistencia teórica de arrancamiento. Estos resultados indican que esta dosificación proporciona un comportamiento más regular y confiable en ambas profundidades.

Finalmente, para el concreto sin adición de fibras (muestra patrón), se realizaron 15 ensayos con una profundidad de 8 diámetros. En este grupo, los resultados fueron más irregulares y con una dispersión considerable, evidenciando una menor uniformidad respecto a las mezclas con fibra. Si bien algunas probetas alcanzaron valores elevados, la mayoría se mantuvo alejada de la resistencia teórica de arrancamiento. No obstante, debido a la mayor profundidad de empotramiento, se evidenció un buen comportamiento en términos de adherencia, aunque sin el refuerzo adicional que proporciona la fibra.

Con base en este análisis, se elaboró un diagrama resumen que sintetiza los resultados de los ensayos para cada condición de mezcla, profundidad de anclaje y modalidad de falla predominante, con el propósito de facilitar la interpretación y comparación global de los datos.

Figura 31: Resultados generales.



Nota: Elaboración propia.

Es relevante destacar que diversos factores pueden influir de manera significativa en los resultados de los ensayos, especialmente aquellos relacionados con el proceso de ejecución. Entre las variables más críticas se encuentran la limpieza adecuada de la perforación, la correcta perpendicularidad en la instalación del anclaje y la dosificación precisa del adhesivo epóxico. El control riguroso de estas condiciones resulta fundamental para garantizar la confiabilidad y repetibilidad de los resultados obtenidos.

3. CONCLUSIONES

El análisis experimental y teórico desarrollado en esta investigación permite establecer las siguientes conclusiones, las cuales sintetizan los hallazgos más relevantes sobre el comportamiento de los anclajes postinstalados en concretos con diferentes dosificaciones de fibra polimérica y distintas profundidades de empotramiento.

El análisis experimental y teórico realizado evidencia que la incorporación de fibras poliméricas en concretos de 21 MPa mejora el comportamiento de los anclajes postinstalados sometidos a esfuerzos de tracción, al incrementar tanto la resistencia por adherencia como la resistencia al arrancamiento. Este efecto es más notorio en profundidades menores, donde la interacción entre la fibra y la matriz del concreto contribuye a un mejor desempeño frente a las solicitaciones.

La caracterización previa de los agregados empleados fue un proceso fundamental para garantizar el cumplimiento de la resistencia objetivo. Dado que no siempre se tiene control sobre la procedencia o variabilidad de los materiales, los ensayos de caracterización permitieron ajustar las dosificaciones y asegurar una mezcla homogénea. Con base en estas correcciones, cada lote de probetas requirió aproximadamente 50 kg de cemento, 52,6 kg de arena, 75 kg de grava y, dependiendo de la dosificación, 0,255 kg para 1,8 kg/m³ de fibra, 0,462 kg para 3,25 kg/m³ y 0,667 kg para 4,7 kg/m³.

De las proporciones analizadas, la adición de 4,7 kg/m³ de fibra fue la que generó un mayor incremento en la resistencia al arrancamiento, con valores que superaron el límite teórico de 30 kN para profundidades de seis diámetros, alcanzando cargas máximas de 31, 32 y hasta 33 kN. Este comportamiento confirma que mayores contenidos de fibra contribuyen de manera significativa a mejorar el anclaje en condiciones de empotramiento reducido. De igual forma, las mezclas con 1,8 kg/m³ de fibra mostraron un desempeño favorable, especialmente a profundidades de seis diámetros, donde los valores de resistencia se aproximaron a los teóricos de falla por arrancamiento.

Asimismo, los resultados permitieron identificar que, aunque la adición de fibras beneficia el desempeño de los anclajes, la efectividad de este refuerzo disminuye a medida que aumenta la profundidad de empotramiento. Este comportamiento sugiere que, en profundidades mayores, el control de otros factores como el tipo de adhesivo o las condiciones de instalación puede tener un peso relativo más importante en la capacidad a tracción que la dosificación de fibra.

Finalmente, se determinó que los procedimientos durante la ejecución de los ensayos y la instalación de los anclajes tienen una influencia directa en los resultados. Factores como la limpieza deficiente de la perforación, la dosificación incorrecta del epóxico o una instalación sin la perpendicularidad adecuada de las barras pueden afectar negativamente la resistencia obtenida, siendo estas condiciones las más probables en los casos en los que se presentó falla por adherencia. Estos hallazgos refuerzan la importancia de establecer protocolos de instalación rigurosos para garantizar la confiabilidad y repetibilidad de los ensayos, así como para optimizar el comportamiento de los anclajes en aplicaciones reales.

Lista de Referencia o Bibliografía

Baker, WF, Korista, DS y Novak, LC (marzo de 2008). Ingeniería del edificio más alto del mundo: Burj Dubai. En Proc., Consejo de Edificios Altos y Hábitats Urbanos, 8.º Congreso Mundial: Alto y verde: tipología para un futuro urbano sostenible .

Morales Monroy, H y Quiroga, P. (2019). Comportamiento de anclajes posinstalados en concreto de alta resistencia, sometidos a carga de tensión y corte. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Navarro Ortiz, J. (2020). Comportamiento de anclajes postinstalados adhesivos en concreto liviano estructural de alta resistencia, sometidos a cargas de tensión y corte. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Organismo colombiano de normas técnicas (OCN). (2010). Norma de sismorresistencia para edificaciones NSR-10 (10.a ed., Apéndice C-D). Recuperado de <https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/uploads/city/attachments/3871-10684.pdf>

Ruda Arias, Y. M., & Páez Moreno, D. F. (2017). Anclajes posinstalados en concretos de alta resistencia. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 27(2), 137-156.

Semana. (2022, 17 agosto). Cementos y concretos verdes: la estrategia para reducir hasta en 50 por ciento las emisiones. Semana.com Últimas Noticias de Colombia y el Mundo. <https://www.semana.com/mejor-colombia/articulo/cementos-y-concretos-verdes-la-estrategia-para-reducir-hasta-en-50-por-ciento-las-emisiones/202237/>