

**COMPORTAMIENTO DE ANCLAJES POSTINSTALADOS ADHESIVOS
EN CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL DE ALTA RESISTENCIA,
SOMETIDOS A CARGAS DE TENSION Y CORTE.**

José María Navarro Ortiz.

**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en estructuras**



Bogotá, 2 de Julio de 2020.

**COMPORTAMIENTO DE ANCLAJES POSTINSTALADOS ADHESIVOS
EN CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL DE ALTA RESISTENCIA,
SOMETIDOS A CARGAS DE TENSION Y CORTE.**

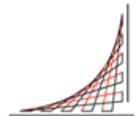
José María Navarro Ortiz.

**Tesis para optar el grado de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en
Estructuras**

**Pedro Nel Quiroga Saavedra, Ph. D.
Director**

**Donald F. Meinheit, Ph. D.
Asesor**

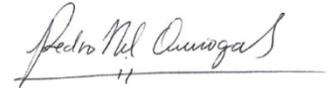
**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en estructuras**



2 de Julio de 2020.

Copyright © 2019 por José María Navarro Ortiz. Todos los derechos reservados.

La tesis de maestría titulada “**COMPORTAMIENTO DE ANCLAJES POSTINSTALADOS ADHESIVOS EN CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL DE ALTA RESISTENCIA, SOMETIDOS A CARGA DE TENSIÓN Y CORTE**”, presentada por José María Navarro Ortiz, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras.

A handwritten signature in black ink, reading "Pedro Nel Quiroga Saavedra", written over a horizontal line.

DIRECTOR DE LA TESIS

ING. Pedro Nel Quiroga Saavedra Ph.D., M.Sc

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., Septiembre de 2020

Dedicatoria

Primero que todo a Dios por permitirme optar a este título de maestría en Ingeniería civil con énfasis en Estructuras.

A mi esposa e hijos por su apoyo incondicional en todas las etapas de este logro profesional.

A todos los lectores que utilicen esta tesis con el deseo de ampliar sus conocimientos en este tema.

Agradecimientos

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, a todos sus funcionarios y profesores sin los cuales no hubiese sido posible el desarrollo de este proyecto de grado.

A las empresas Argos (Dra. Andrea Jiménez) y Holcim (Ing. Andrés Felipe Rincón) por proveer el concreto utilizado en la construcción de las losas.

A Sika Colombia, y los ingenieros Andrés Vanegas y Jorge Rendón por proveer el adhesivo epóxico y demás materiales que facilitaron la instalación y ejecución de los anclajes.

Al ingeniero Pedro Nel Quiroga quien me brindó su apoyo guiándome en el proceso de elaboración de esta tesis y en el desarrollo y planteamiento de los ensayos.

Resumen

Los anclajes son bastante usados en la actualidad para unir o apoyar estructuras metálicas a las de concreto. En esta unión se presenta una transferencia de esfuerzos tanto en los elementos que se unen (concreto y el elemento metálico) como en los elementos transmisores (pernos). En el concreto puede ocurrir desprendimiento y en el perno puede ocurrir falla por tracción o por corte. Actualmente existe una amplia variedad de anclajes y sistemas de fijación, incluidas la fijación por gas y las tecnologías con adhesivos.

Esta investigación ofrecerá una comparación de los valores de la carga resistente de un anclaje empleando la normatividad vigente respecto a los valores experimentales de la carga de falla realizados a los anclajes postinstalados adhesivos.

Con el fin de lograr lo expuesto anteriormente, se planteó un programa experimental en el que se analizará el comportamiento de anclajes postinstalados adhesivos en concreto liviano estructural, para lo cual se construyeron 27 losas macizas de concreto liviano, en las que se anclaron 201 barras roscadas, 115 de estos anclajes fueron ensayados a cargas de tensión y 39 se ensayaron a cortante, para un total de 154 ensayos.

Los resultados obtenidos se compararon con las ecuaciones que determinan la resistencia de los anclajes mediante la formulación establecida en la normativa vigente, al igual que la modalidad de falla esperada de los mismos ante diferentes configuraciones geométricas.

Se planteó un programa para determinar las capacidades a tensión y cortante de anclajes postinstalados adhesivos con barras roscadas en concreto liviano estructural de alta resistencia con peso específico 1.82 T/m^3 usando epóxico AnchorFix300 proporcionado por Sika, para ello se fundieron 27 losas (9 para ensayos confinados a tensión, 9 para ensayos no confinados a tensión y 9 para ensayos a cortante) de espesores de 10 cm, 15 cm y 20 cm en donde se anclaron varillas roscadas de diámetros $3/8''$, $1/2''$ y $5/8''$ ancladas a 5cm, 10 cm y 15 cm; los anclajes se separaron a 3 veces la profundidad del anclaje.

Los resultados de los ensayos se compararon con los datos calculados mediante las ecuaciones del ACI 318-19 y se concluyó que 1) Para los anclajes postinstalados con profundidades de anclajes superiores a 100 mm, las ecuaciones del reglamento americano ACI 318-19 predicen bien la falla al usar las varillas roscadas de $3/8''$, $1/2''$ y $5/8''$ ancladas en concretos livianos, 2) En anclajes no confinados en concreto liviano para varillas roscadas de diámetros $1/2''$ y $5/8''$ la falla predominante es arrancamiento del concreto, independiente de su longitud de anclaje, sin embargo los valores obtenidos de la fuerza a tensión difieren de los resultados de las ecuaciones pero no están lejos de estos valores, 3) A mayor diámetro y mayor profundidad del anclaje se presenta menor variación de los resultados teóricos vs los resultados experimentales.

Abstract

Anchors are widely used today to join or support metal structures to concrete. In this union, there is a transfer of forces both in the elements that are joined (concrete and the metallic element) and in the transmitting elements (bolts). Detachment may occur in concrete and shear failure or shear failure may occur. Currently there is a wide variety of anchors and fastening systems, including gas fastening and adhesive technologies.

This investigation will offer a comparison of the values of the resistant load of an anchor using the current regulations respect to the experimental values of the failure load made to the post-installed adhesive anchors.

In order to achieve it, an experimental program was proposed in which the behavior of post-installed anchors in lightweight structural concrete will be analyzed, for this, 27 solid concrete slabs were built, on which 201 threaded bars were anchored, where 162 of these anchors were tested at tension loads, while the remaining 39 were tested at shear.

The results obtained will be compared with the equations that determine the resistance of the anchors through the formulation established in the current normatives, as well as the expected failure mode of the anchors before different geometric configurations.

A program was proposed to determine the tensile and shear capacities of adhesive post-installed anchors with threaded rods in high strength structural lightweight concrete with 1.82 T /

m³ specific weight, using AnchorFix300 epoxy provided by Sika, for this purpose 27 slabs were cast (9 for tension-confined tests, 9 for tests not confined to tension and 9 for shear tests) of thicknesses of 10 cm, 15 cm and 20 cm where threaded rods with diameters 3/8 ", 1/2" and 5/8 "anchored at 5cm, 10 cm and 15 cm; the anchors have separated threefold depth of the anchor.

The results of the tests were compared with the data calculated using the ACI 318-19 equations and it was concluded that 1) For post-installed anchors with anchor depths greater than 100 mm, the equations of the American regulation ACI 318-19 well predict the fails to use 3/8", 1/2" and 5/8" threaded rods anchored in lightweight concrete, 2) In unconfined anchors in lightweight concrete for 1/2" and 5/8" threaded rods, the predominant failure is the removal of the concrete, regardless of its anchorage length, however, the values obtained from the tensile force differ from the results of the equations but are not far from these values, 3) The greater the diameter and the greater the depth of the anchorage, the less variation there is in the theoretical results vs. the experimental results.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 29 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 29 |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN..... | 31 |
| 1.3 ÁRBOL DEL PROBLEMA..... | 32 |
| 2. OBJETIVOS | 33 |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL: | 33 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:..... | 33 |
| 3. MARCO TEÓRICO | 34 |
| 3.1 CONCRETO LIVIANO | 34 |
| 3.2 ANCLAJES POSTINSTALADOS..... | 34 |
| 3.3 DEFINICIONES..... | 36 |
| 3.4 REQUISITOS GENERALES PARA LA RESISTENCIA DE LOS ANCLAJES..... | 38 |
| 4. ESTADO DEL ARTE | 41 |
| 4.1 APLICACIÓN DE ANCLAJES EN CONCRETO BAJO CONDICIONES ESPECIALES. | 41 |
| 4.2 COMPORTAMIENTO A TENSIÓN DE ANCLAJES QUÍMICOS POSTINSTALADOS EN CONCRETO DE BAJA RESISTENCIA. | 43 |
| 4.3 OPTIMIZACIÓN DE ANCLAJES ADHESIVOS AL CONCRETO POR FUNCIÓN DE DESEABILIDAD. ... | 44 |
| 4.4 COMPORTAMIENTO DE ANCLAJES ADHESIVOS SOMETIDOS A CARGAS DE TENSIÓN Y CORTANTE..... | 45 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.5 | COMPORTAMIENTO DE LA ADHERENCIA DE BARRAS DE GFRP DE SUPERFICIE ACANALADA Y BEZA INCLINADA EN CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA..... | 46 |
| 4.6 | COMITÉ TÉCNICO PARA ESTABLECER EL MÉTODO DE EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD Y DISEÑO AVANZADO DE ANCLAJES POST-INSTALADOS EN CONCRETO..... | 47 |
| 4.7 | ANCLAJES POSTINSTALADOS EN CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO (CATTANEO & MUCIACCIA, 2016)..... | 49 |
| 4.8 | COMPORTAMIENTO DE ANCLAJES POSTINSTALADOS DE GRANDES DIÁMETROS EN CONCRETO (WANG, WU, OUYANG, & ZHAI, 2016)..... | 50 |
| 4.10 | ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A TRACCIÓN EN ANCLAJES ESTRUCTURALES POSTINSTALADOS CON ADHESIVO EPÓXICO. | 53 |
| 4.11 | COMPORTAMIENTO DE ANCLAJES POST-INSTALADOS EN CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A TENSIÓN Y CORTANTE. | 55 |
| 4.12 | ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE PERNOS DE ANCLAJE EN ACERO DE REFUERZO CORRUGADO POST-INSTALADOS CON ADHESIVO EPÓXICO EN CONCRETO LIGERO SOMETIDOS A TENSIÓN Y CORTANTE. | 56 |
| 4.13 | ANCLAJES CON BARRA ENROSCADA EN PLACAS ELABORADAS CON CONCRETOS LIVIANOS. | 57 |
| 5. | FASE EXPERIMENTAL | 60 |
| 5.1 | MATERIALES | 60 |
| 5.1.1 | <i>Concreto Liviano</i> | 60 |
| 5.1.2 | <i>Barras roscadas</i> | 62 |
| 5.1.3 | <i>Adhesivo epóxico</i> | 62 |
| 5.2 | LOSAS DE CONCRETO..... | 63 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 5.2 | MATRIZ DE ENSAYOS | 67 |
| 5.3 | INSTALACIÓN DE ANCLAJES..... | 67 |
| 5.4 | MONTAJE PARA LOS ENSAYOS | 71 |
| 5.4.1. | <i>Ensayos no confinados a tensión.</i> | 71 |
| 5.4.2. | <i>Ensayos confinados a tensión.</i> | 73 |
| 5.4.3. | <i>Ensayos a cortante.</i> | 75 |
| 6. | CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE LOS ANCLAJES SEGUN ACI 318-19 | 77 |
| 6.1 | RESISTENCIA DEL ACERO DE UN ANCLAJE EN TRACCIÓN | 77 |
| 6.2 | RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO DE UN ANCLAJE EN TRACCIÓN | 79 |
| 6.3 | RESISTENCIA A LA ADHERENCIA EN TRACCIÓN DE ANCLAJES ADHERIDOS..... | 82 |
| 6.4 | MODALIDAD DE FALLA DE ANCLAJES A TRACCIÓN DE ACUERDO CON ACI 318-19 | 85 |
| 6.5 | RESISTENCIA DEL ACERO DEL ANCLAJE SOMETIDO A CORTANTE | 87 |
| 7. | RESULTADOS DE LOS ENSAYOS | 89 |
| 7.1 | ENSAYOS CONFINADOS A TENSIÓN..... | 89 |
| 7.2 | ENSAYOS NO CONFINADOS A TENSIÓN..... | 94 |
| 7.3 | ENSAYOS A CORTANTE | 98 |
| 8. | ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS | 102 |
| 8.1 | RELACIÓN CARGA EXPERIMENTAL A CARGA SEGÚN ACI 318-19..... | 102 |
| 8.2 | ENSAYOS CONFINADOS A TENSIÓN..... | 102 |
| 8.3 | ENSAYOS NO CONFINADOS A TENSIÓN..... | 104 |
| 8.4 | ENSAYOS A CORTANTE | 106 |

**9. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS
SOBRE EL TEMA DE ANCLAJES EN LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA.**

108

| | | |
|------------|---|------------|
| 9.1 | COMPORTAMIENTO DE ANCLAJES POST-INSTALADOS EN CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A TENSIÓN Y CORTANTE. | 109 |
| 9.2 | ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE PERNOS DE ANCLAJE EN ACERO DE REFUERZO CORRUGADO POST-INSTALADOS CON ADHESIVO EPÓXICO EN CONCRETO LIGERO SOMETIDOS A TENSIÓN Y CORTANTE. | 110 |
| 9.3 | ANCLAJES CON BARRA ENROSCADA EN PLACAS ELABORADAS CON CONCRETOS LIVIANOS. . | 111 |
| 9.4 | COMPORTAMIENTO DE ANCLAJES POSTINSTALADOS ADHESIVOS EN CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL, SOMETIDOS A CARGAS DE TENSIÓN Y CORTE. | 112 |
| 9.5 | CARACTERÍSTICAS OBSERVADAS Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PRUEBAS DE LAS CUATRO INVESTIGACIONES REALIZADAS SOBRE EL TEMA DE ANCLAJES EN LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA..... | 113 |
| 10. | CONCLUSIONES..... | 122 |
| 11. | RECOMENDACIONES..... | 124 |
| 12. | BIBLIOGRAFÍA | 125 |
| 13. | ANEXOS | 127 |
| 13.1 | CONCRETO LIVIANO..... | 127 |
| 13.2 | BARRAS ROSCADAS ASTM A-193 B7..... | 134 |
| 13.3 | RESULTADOS DE ENSAYOS CONFINADOS A TENSIÓN..... | 134 |
| 13.4 | RESULTADOS DE ENSAYOS NO CONFINADAS A TENSIÓN..... | 137 |

| | | |
|------|---------------------------------------|-----|
| 13.5 | RESULTADOS DE ENSAYOS A CORTANTE..... | 140 |
| 13.6 | DISTRIBUCIÓN DE PERFORACIONES..... | 142 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Resistencia requerida para los anclajes | 38 |
| Tabla 2 Separación crítica de anclajes para considerar efectos de grupo. (American Concrete Institute, 2019)..... | 40 |
| Tabla 3:Especificacion del espesor de la placa aligerada en función del diámetro del perno enroscado. Fuente: Ramírez Martínez, Ronald | 58 |
| Tabla 4 Resistencia promedio obtenida. Fuente:Holcim. | 61 |
| Tabla 5 Especificaciones de las losas para ensayos de tensión. Fuente. Autor. | 63 |
| Tabla 6:Especificaciones de las losas para ensayos de cortante. Fuente: Autor. | 66 |
| Tabla 7:Diámetros, profundidades y sollicitaciones para barras ASTM A-193 Fuente: Autor. | 67 |
| Tabla 8:Resistencia teórica a tensión del acero ASTM A-193 B7. Fuente: Autor. | 78 |
| Tabla 9:Datos constantes para el cálculo de la resistencia teórica al arrancamiento. Fuente: Autor. | 80 |
| Tabla 10:Resistencia al arrancamiento del concreto de un anclaje a tracción según ACI 318-19. Fuente: Autor. | 81 |
| Tabla 11:Datos constantes para el cálculo de la resistencia teórica a la adherencia. Fuente: Autor | 84 |
| Tabla 12:Resistencia a la adherencia según ACI 318-19. Fuente: Autor | 84 |
| Tabla 13:Resistencia a cortante del acero ASTM A-193 B7 Fuente: Autor..... | 88 |
| Tabla 14:Carga promedio de falla para barras $\Phi 3/8''$. Fuente: Autor. | 89 |
| Tabla 15:Carga promedio de falla para barras $\Phi 1/2''$. Fuente: Autor. | 90 |
| Tabla 16:Carga promedio de falla para barras $\Phi 5/8''$ Fuente: Autor. | 91 |
| Tabla 17:Carga promedio y modalidad de falla para barras $\Phi 3/8''$. Fuente: Autor. | 94 |
| Tabla 18:Carga promedio y modalidad de falla para barras $\Phi 1/2''$. Fuente: Autor. | 95 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 19:Carga promedio y modalidad de falla para barras $\Phi 5/8''$. Fuente: Autor. | 95 |
| Tabla 20:Carga promedio de falla para barras $\Phi 3/8''$. Fuente: Autor. | 98 |
| Tabla 21:Carga promedio de falla para barras $\Phi 1/2''$. Fuente: Autor. | 98 |
| Tabla 22:Carga promedio de falla para barras $\Phi 5/8''$. Fuente: Autor. | 99 |
| Tabla 23:Relacion RET para ensayos confinados a tensión. Fuente: Autor. | 102 |
| Tabla 24:Comparación de carga y modalidad de falla real y teórica. Fuente: Autor. | 104 |
| Tabla 25:Relacion RET para ensayos a cortante. Fuente: Autor. | 106 |
| Tabla 26:Cuadro comparativo de Investigaciones sobre anclajes en la ECI | 109 |
| Tabla 27:Resultado del ensayo de cilindro de concreto. Fuente: Autor. | 131 |
| Tabla 28:Densidad de las muestras tomadas. Fuente: Autor. | 132 |
| Tabla 29:Resultados de barras roscadas ASTM A-193 B7. Fuente: Autor. | 134 |
| Tabla 30:Ensayos confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 $\Phi 3/8''$. Fuente: Autor. | 134 |
| Tabla 31:Ensayos confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 $\Phi 1/2''$. Fuente: Autor. | 135 |
| Tabla 32:Ensayos confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 $\Phi 5/8''$. Fuente: Autor. | 136 |
| Tabla 33:Ensayos no confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 $\Phi 3/8''$. Fuente: Autor.... | 137 |
| Tabla 34:Ensayos no confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 $\Phi 1/2''$. Fuente: Autor.... | 138 |
| Tabla 35:Ensayos no confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 $\Phi 5/8''$. Fuente: Autor.... | 139 |
| Tabla 36:Ensayos a cortante de barras ASTM A-193 B7 $\Phi 3/8''$. Fuente: Autor. | 140 |
| Tabla 37:Ensayos a cortante de barras ASTM A-193 B7 $\Phi 1/2''$. Fuente: Autor. | 140 |
| Tabla 38:Ensayos a cortante de barras ASTM A-193 B7 $\Phi 5/8''$. Fuente: Autor. | 141 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 1 | Árbol del problema..... | 32 |
| Figura 2 | Anclajes postinstalados..... | 35 |
| Figura 3 | Tipos de anclajes. Fuente: Reglamento ACI 318-19..... | 37 |
| Figura 4 | Modos de falla para anclajes sometidos a tensión. (American Concrete Institute, 2019). | 39 |
| Figura 5 | Modos de falla para anclajes sometidos a cortante. (American Concrete Institute, 2019). | 39 |
| Figura 6: | Esfuerzo a la compresión del concreto liviano usado en este trabajo. Fuente: HOLCIM61 | |
| Figura 7: | Formaleta y vaciado del concreto liviano. Fuente: Autor..... | 64 |
| Figura 8: | Losas fundidas en su formaleta. Fuente: Autor..... | 64 |
| Figura 9: | Toma de muestras en cilindros. Fuente: Autor..... | 65 |
| Figura 10: | Losas demarcadas con las perforaciones para ensayos a tensión. Fuente: Autor..... | 65 |
| Figura 11: | Losa fundida para ensayos de cortante ya armada con las varillas de anclaje. Fuente: Autor. | 66 |
| Figura 12: | Perforación de los primeros anclajes. Fuente: Autor..... | 68 |
| Figura 13: | Distribución de perforaciones en losa de $t=20\text{cm}$ para profundidad de anclaje de 15cm en varillas de $\Phi 3/8''$. Fuente: Autor. | 68 |
| Figura 14: | Perforación de las losas con taladro rotopercurtor. Fuente: Autor. | 69 |
| Figura 15: | Soplador para la limpieza de la perforación con aire a presión, cepillo de cerdas de alambre. Fuente: Autor..... | 70 |
| Figura 16: | Epóxico Sika Anchorfix 3001 y cepillos de cerdas de alambre y el dispositivo de aplicación del epóxico. Fuente: Autor | 70 |

| | |
|--|----|
| Figura 17:Inyección del producto epóxico en la perforación. Fuente: Autor. | 71 |
| Figura 18:Ejemplo de montaje para ensayos no confinados a tensión. Fuente: ACI 355.4 | 72 |
| Figura 19:Montaje Final para ensayos no confinados a tensión. Fuente: Autor | 72 |
| Figura 20:Ejemplo de montaje para ensayos confinados a tensión. Fuente: ACI 355.4-11. | 73 |
| Figura 21:Montaje final para ensayos confinados a tensión. Fuente: Autor..... | 74 |
| Figura 22:Bomba hidráulica Fuente: Autor. | 74 |
| Figura 23:Consola de medición y pantalla de lectura digital Fuente: Autor. | 75 |
| Figura 24:Ejemplo de montaje para ensayos de cortante. Fuente: ASTM E488-15. | 75 |
| Figura 25:Montaje final para ensayos a cortante. Fuente: Autor. | 76 |
| Figura 26:Resistencia a la tensión del acero ASTM A-193 B7 de acuerdo con el ACI 318-19. Fuente: Autor..... | 78 |
| Figura 27: Definición de A_{NC0} y A_{NC} . Fuente ACI 318-19..... | 80 |
| Figura 28:Resistencia al arrancamiento en el concreto según ACI 318-19. Fuente: Autor..... | 82 |
| Figura 29: Definición de A_{Na} y A_{Na0} . Fuente: ACI318-19..... | 83 |
| Figura 30:Resistencia a la adherencia según ACI 318-19. Fuente: Autor..... | 85 |
| Figura 31:Modalidad de falla para barras $\Phi 3/8''$ ASTM A-193 B7 según ACI 318-19. Fuente: Autor. | 86 |
| Figura 32:Modalidad de falla para barras $\Phi 1/2''$ ASTM A-193 B7 según ACI 318-19. Fuente: Autor. | 86 |
| Figura 33:Modalidad de falla para barras $\Phi 5/8''$ ASTM A-193 B7 según ACI 318-19. Fuente: Autor. | 87 |
| Figura 34:Resistencia a cortante del acero ASTM A-193 B7 según ACI 318-19. Fuente: Autor. . | 88 |
| Figura 35:Cargas de falla para barras $\Phi 3/8''$. Fuente: Autor. | 90 |

| | |
|--|-----|
| Figura 36:Cargas de falla para barras $\Phi 1/2''$. Fuente: Autor. | 91 |
| Figura 37:Cargas de falla para barras $\Phi 5/8''$. Fuente: Autor. | 92 |
| Figura 38:Anclaje $\Phi 3/8''$ en ensayo confinado a tensión. Falla por adherencia. Fuente: Autor..... | 92 |
| Figura 39:Anclaje $\Phi 1/2''$ en el momento de realizar el ensayo confinado a tensión. Falla por adherencia. Fuente: Autor. | 93 |
| Figura 40:Falla por adherencia de anclaje $\Phi 1/2''$ a profundidad de embebido igual a 50 mm. Fuente: Autor..... | 93 |
| Figura 41:Cargas de falla para barras $\Phi 3/8''$. Fuente: Autor. | 94 |
| Figura 42:Cargas de falla para barras $\Phi 1/2''$. Fuente: Autor. | 95 |
| Figura 43:Cargas de falla para barras $\Phi 5/8''$. Fuente: Autor. | 96 |
| Figura 44:Falla por arrancamiento del concreto $\Phi 1/2''$ a profundidad de embebido 150 mm. Fuente: Autor..... | 96 |
| Figura 45:Falla por arrancamiento del concreto con extracción de anclaje $\Phi 5/8''$ a profundidad de embebido de 100 mm. Fuente: Autor..... | 97 |
| Figura 46:Falla por arrancamiento del concreto con extracción de anclaje $\Phi 5/8''$ a profundidad de embebido de 150 mm. Fuente: Autor..... | 97 |
| Figura 47:Cargas de falla para barras $\Phi 3/8''$. Fuente: Autor. | 98 |
| Figura 48:Cargas de falla para barras $\Phi 1/2''$. Fuente: Autor. | 99 |
| Figura 49:Cargas de falla para barras $\Phi 5/8''$. Fuente: Autor. | 100 |
| Figura 50:Anclaje $\Phi 1/2''$ ensayo a corte. Falla del Concreto. Fuente: Autor. | 100 |
| Figura 51:Anclaje $\Phi 1/2''$ ensayo a corte. Falla del acero. Fuente: Autor..... | 101 |
| Figura 52:Ensayo de Cortante $\Phi 1/2''$. Corte total del anclaje por falla del acero. En este ensayo se presenta Falla del concreto. Fuente: Autor..... | 101 |

| | |
|---|-----|
| Figura 53: Resistencia según ACI 318-19 y experimental de ensayos a tensión confinados para $\Phi 3/8''$. Fuente: Autor..... | 103 |
| Figura 54: Resistencia según ACI 318-19 y experimental de ensayos a tensión confinados para $\Phi 1/2''$. Fuente: Autor..... | 103 |
| Figura 55: Resistencia según ACI 318-19 y experimental de ensayos a tensión confinados para $\Phi 5/8''$. Fuente: Autor..... | 103 |
| Figura 56: Resistencia ACI 318-19 y experimental de ensayos a tensión no confinados para $\Phi 3/8''$. Fuente: Autor..... | 105 |
| Figura 57: Resistencia ACI 318-19 y experimental de ensayos a tensión no confinados para $\Phi 1/2''$. Fuente: Autor..... | 105 |
| Figura 58: Resistencia ACI 318-19 y experimental de ensayos a tensión no confinados para $\Phi 5/8''$. Fuente: Autor..... | 106 |
| Figura 59: Resistencia ACI 318-19 y experimental de ensayos a cortante para $\Phi 3/8''$. Fuente: Autor. | 107 |
| Figura 60: Resistencia ACI 318-19 y experimental de ensayos a cortante para $\Phi 1/2''$. Fuente: Autor. | 107 |
| Figura 61: Resistencia ACI 318-19 y experimental de ensayos a cortante para $\Phi 5/8''$. Fuente: Autor. | 108 |
| Figura 62. Comparación de Anclajes Confinados a tensión. Fuente: Propia..... | 114 |
| Figura 63. Comparación de Anclajes No confinados a tensión. Fuente: Propia..... | 116 |
| Figura 64: Carga Experimental en ensayos no confinados de $3/8''$. Fuente: Propia. | 117 |
| Figura 65: Carga Experimental en ensayos no confinados de $1/2''$. Fuente: Propia | 117 |
| Figura 66: Carga Experimental en ensayos no confinados de $5/8''$. Fuente: Propia | 117 |

| | |
|---|-----|
| Figura 67. comparación de Anclajes a cortante. Fuente: Propia..... | 119 |
| Figura 68: Mixer para fundida del concreto liviano enviada por HOLCIM. Fuente: Autor | 129 |
| Figura 69:Cilindro de concreto liviano antes de someterlo a la prueba de compresión. Fuente: Autor. | 129 |
| Figura 70:Cilindro de concreto ensayado a compresión después de los 28 días. Fuente: Autor. . | 130 |
| Figura 71:Valor de la Carga de falla (39 Ton). Fuente: Autor..... | 130 |
| Figura 72:Cilindro fallado del concreto liviano suministrado por Holcim. Fuente: Autor | 131 |
| Figura 73:Peso de un cilindro en estado seco (3.1 Kg). Fuente: Autor | 132 |
| Figura 74:Distribución de perforaciones para ensayos confinados. Fuente: Autor. | 143 |
| Figura 75:Distribución de perforaciones para ensayos no confinados. Fuente: Autor..... | 144 |
| Figura 76:Distribución de perforaciones para ensayos a cortante. Fuente: Autor. | 145 |

NOMENCLATURA

| | |
|-------------|---|
| A_{brg} | Área de apoyo de la cabeza de un perno o tornillo de anclaje, o barra corrugada con cabeza. |
| ACI | American Concrete Institute. |
| A_{Nc} | Área de falla proyectada del concreto en un anclaje solo o en un grupo de anclajes, utilizada para calcular la resistencia a tracción. |
| A_{Nco} | Área de falla proyectada del concreto en un anclaje solo, utilizada para calcular la resistencia a tracción cuando no se encuentra limitada por la distancia al borde o el espaciamiento. |
| $A_{se,N}$ | Área transversal efectiva del anclaje en tracción. |
| $A_{se,NO}$ | Área efectiva de la sección transversal del anclaje en tracción. |
| $A_{se,V}$ | Área efectiva de la sección transversal del anclaje en cortante. |
| A_{Vc} | Área proyectada de falla del concreto de un anclaje solo o de un grupo de anclajes, utilizada para calcular la resistencia al cortante. |
| A_{Vco} | Área proyectada de falla del concreto de un anclaje solo, utilizada para calcular la resistencia a cortante, cuando no se encuentra limitada por la influencia de una esquina, del espaciamiento, o del espesor del elemento. |
| C L | Concreto liviano. |
| $c_{a,máx}$ | Máxima distancia medida desde el centro del fuste de un anclaje al borde del concreto. |
| $c_{a,mín}$ | Mínima distancia medida desde el centro del fuste de un anclaje al borde del concreto. |

- c_{a1}** Distancia medida desde el centro del fuste de un anclaje hasta el borde del concreto en una dirección. Si se aplica cortante al anclaje, c_{a1} se mide en la dirección de la fuerza cortante aplicada.
- c_{a2}** Distancia desde el centro del fuste de un anclaje hasta el borde del concreto en dirección perpendicular a c_{a1} .
- c_{ac}** Distancia crítica al borde requerida para desarrollar la resistencia básica del concreto al arrancamiento de un anclaje postinstalado en concreto no fisurado sin refuerzo suplementario para controlar el hendimiento.
- d_a** Diámetro exterior de un anclaje o diámetro del fuste del perno con cabeza, del tornillo con cabeza, o del perno con forma de gancho.
- d_a'** Valor que se sustituye por d_a cuando se emplea un anclaje sobredimensionado.
- e_h** Distancia desde la superficie interna del fuste de un perno en forma de J o de L hasta parte externa de la punta del perno en forma de J o L.
- e_N'** Distancia entre la resultante de tracción en un grupo de anclajes cargados en tracción y el centroide del grupo de anclajes cargados en tracción.
- e_V'** Distancia entre la carga resultante de cortante en un grupo de anclajes solicitados en cortante en la misma dirección y el centroide del grupo de anclajes cargados a cortante en la misma dirección.
- f'_c** Resistencia especificada a la compresión del concreto.
- f_{uta}** Resistencia especificada a la tracción del acero del anclaje.
- f_{ya}** Resistencia especificada a la fluencia en el acero del anclaje.
- h_a** Espesor de un elemento en el que se coloca un anclaje, medido paralelamente al eje del anclaje.
- h_{ef}** Profundidad efectiva de embebido del anclaje.

| | |
|------------|---|
| k_c | Coefficiente para la resistencia básica al arrancamiento del concreto en tracción. |
| k_{cp} | Coefficiente para la resistencia al desprendimiento por cabeceo del anclaje. |
| l_e | Longitud de apoyo de la carga de un anclaje para cortante. |
| N | Número de unidades, tales como ensayos de resistencia, barras, alambres, dispositivos de anclaje para torones individuales, anclajes, o brazos de una cabeza de cortante. |
| N_b | Resistencia básica al arrancamiento del concreto en tracción de un solo anclaje en concreto fisurado. |
| N_{cb} | Resistencia nominal al arrancamiento del concreto en tracción de un solo anclaje. |
| N_{cbg} | Resistencia nominal al arrancamiento del concreto en tracción de un grupo de anclajes. |
| N_n | Resistencia nominal en tracción. |
| N_p | Resistencia a la extracción por deslizamiento por tracción de un solo anclaje en concreto fisurado. |
| N_{pn} | Resistencia nominal a la extracción por deslizamiento por tracción de un solo anclaje. |
| N_{sa} | Resistencia nominal de un solo anclaje o de un grupo de anclajes en tracción determinado por la resistencia del acero. |
| N_{sb} | Resistencia al desprendimiento lateral de un solo anclaje. |
| N_{sbg} | Resistencia al desprendimiento lateral de un grupo de anclajes. |
| N_{ua} | Fuerza mayorada de tracción aplicada a un anclaje o grupo de anclajes. |
| S | Espaciamiento medido centro a centro de unidades tales como refuerzo longitudinal, refuerzo transversal, tendones de preesfuerzo, alambres, o anclajes. |
| σ_s | Desviación estándar de la muestra. |

| | |
|--------------|--|
| τ_{cr} | Esfuerzo de adherencia característico de los anclajes adherido con base en la presencia o ausencia de fisuración, MPa. |
| V_b | Resistencia básica al arrancamiento por cortante de un solo anclaje en concreto fisurado. |
| V_{cb} | Resistencia nominal al arrancamiento del concreto por cortante de un solo anclaje. |
| V_{cbg} | Resistencia nominal al arrancamiento del concreto al cortante de un grupo de anclajes. |
| V_{cp} | Resistencia nominal al desprendimiento del concreto por cabeceo de un anclaje solo. |
| V_{cpg} | Resistencia nominal al desprendimiento del concreto por cabeceo de un grupo de anclajes. |
| V_n | Resistencia nominal a cortante. |
| V_{sa} | Resistencia nominal a cortante de un solo anclaje o de un grupo de anclajes determinada por la resistencia del acero. |
| V_{ua} | Fuerza cortante mayorada aplicada a un anclaje solo o a un grupo de anclajes. |
| λ | Factor de modificación que tiene en cuenta las propiedades mecánicas reducidas del concreto de peso liviano, relativa a los concretos de peso normal de igual resistencia a la compresión. |
| λ_a | $=0.8\lambda$ |
| Φ | Factor de reducción de resistencia. |
| $\Psi_{c,N}$ | Factor de modificación para la resistencia a tracción de anclajes con base en presencia o ausencia de fisuras en el concreto. |

- $\Psi_{c,P}$ Factor de modificación para la resistencia a la extracción por deslizamiento con base en la presencia o ausencia de fisuras en el concreto.
- $\Psi_{c,V}$ Factor de modificación para resistencia a cortante de anclajes con base en la presencia o ausencia de fisuras en el concreto y la presencia o ausencia de refuerzo suplementario.
- $\Psi_{cp,N}$ Factor de modificación para la resistencia a tracción de anclajes postinstalados utilizados en concreto no fisurado y sin refuerzo suplementario.
- $\Psi_{ec,N}$ Factor de modificación para la resistencia a tracción de anclajes con base en la excentricidad de las cargas aplicadas.
- $\Psi_{ec,V}$ Factor de modificación para la resistencia a cortante de anclajes con base en la excentricidad de las cargas aplicadas.
- $\Psi_{ed,N}$ Factor de modificación para la resistencia a tracción de anclajes con base en la proximidad a los bordes del elemento de concreto.
- $\Psi_{ed,V}$ Factor de modificación para la resistencia a cortante de anclajes con base en la proximidad a los bordes del elemento de concreto.
- Ψ_h Factor de modificación para la resistencia a cortante de anclajes colocados en elementos de concreto con $h_a < 1.5c_{a1}$

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

La industria de la construcción apunta a que cada vez las estructuras sean más livianas con el propósito de disminuir cargas a nivel de cimentación, por este motivo es que en la actualidad se han venido desarrollando concretos con la misma capacidad de resistencia que el concreto normal, pero con menor densidad y de esta manera competir con las estructuras metálicas presentes en el mercado.

En la construcción es necesario fijar o vincular elementos sean estructurales o no estructurales a otros elementos resistentes que los soportan (vigas, columnas, muros) mediante los elementos denominados “anclajes”.

Los anclajes son bastante usados en la actualidad para unir o apoyar estructuras metálicas a las de concreto. En esta unión se presenta una transferencia de esfuerzos tanto en los elementos que se unen (concreto y el elemento metálico) como en los elementos transmisores (pernos). En el concreto puede ocurrir desprendimiento y en el perno puede ocurrir falla por tracción o por corte.

Actualmente existe una amplia variedad de anclajes y sistemas de fijación, incluidas la fijación por gas y las tecnologías con adhesivos.

Así como la variedad brinda al usuario la oportunidad de elegir el mejor producto, le dificulta el proceso de selección, por este motivo debe considerarse las capacidades de carga y los demás criterios usados para determinar el tipo, el tamaño y la cantidad de anclajes o fijaciones que se

utilizaran en cada aplicación. La determinación de la cantidad de anclajes de acuerdo con las solicitudes es responsabilidad del diseñador.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizará concreto de 45 MPa de resistencia alivianado mediante el uso de aditivo incorporador de aire – espumante durante la mezcla de los materiales para generar partículas de aire internas dentro del concreto, el cual será elaborado y proporcionado por la empresa HOLCIM específicamente para esta investigación y no es un concreto que se comercialice normalmente en Colombia.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente debido a que en la industria de la construcción el uso en aumento del concreto liviano nos lleva a formularnos la pregunta de investigación ¿Cómo es el comportamiento de los anclajes postinstalados adhesivos en concretos livianos estructurales de alta resistencia?

1.2 Justificación

En la actualidad se han realizado diversos tipos de investigaciones de anclajes en concreto a nivel mundial sin embargo en concreto liviano la información aun es poca, por ende, esta investigación está encaminada a estudiar los mecanismos de falla de los anclajes postinstalados adhesivos en el concreto liviano.

Las fuerzas horizontales y las fuerzas verticales que actúan sobre las estructuras durante los movimientos sísmicos son directamente proporcionales a la masa de la estructura, de ahí que se podría incrementar el uso del concreto liviano en la industria de la construcción debido a la reducción de las fuerzas inerciales, es por esto que se presenta esta alternativa para realizar este tipo de anclajes postinstalados.

A nivel técnico se ampliará la investigación sobre el comportamiento estructural de los anclajes adhesivos en concreto liviano, contribuyendo con información para la actualización de los códigos de diseño internacionales y nacionales.

Este tema de investigación beneficiará a los estudiantes de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y al público en general interesado en la temática concerniente a los anclajes en concretos livianos. La Escuela ha impartido el curso de verano “Anclajes al concreto y reforzamiento externo con FRP” y los estudiantes que lo tomen se verán beneficiados con el estudio realizado en esta tesis, igualmente incentivará la ejecución de investigaciones cuyo tema central sea “concretos livianos”.

1.3 Árbol del problema

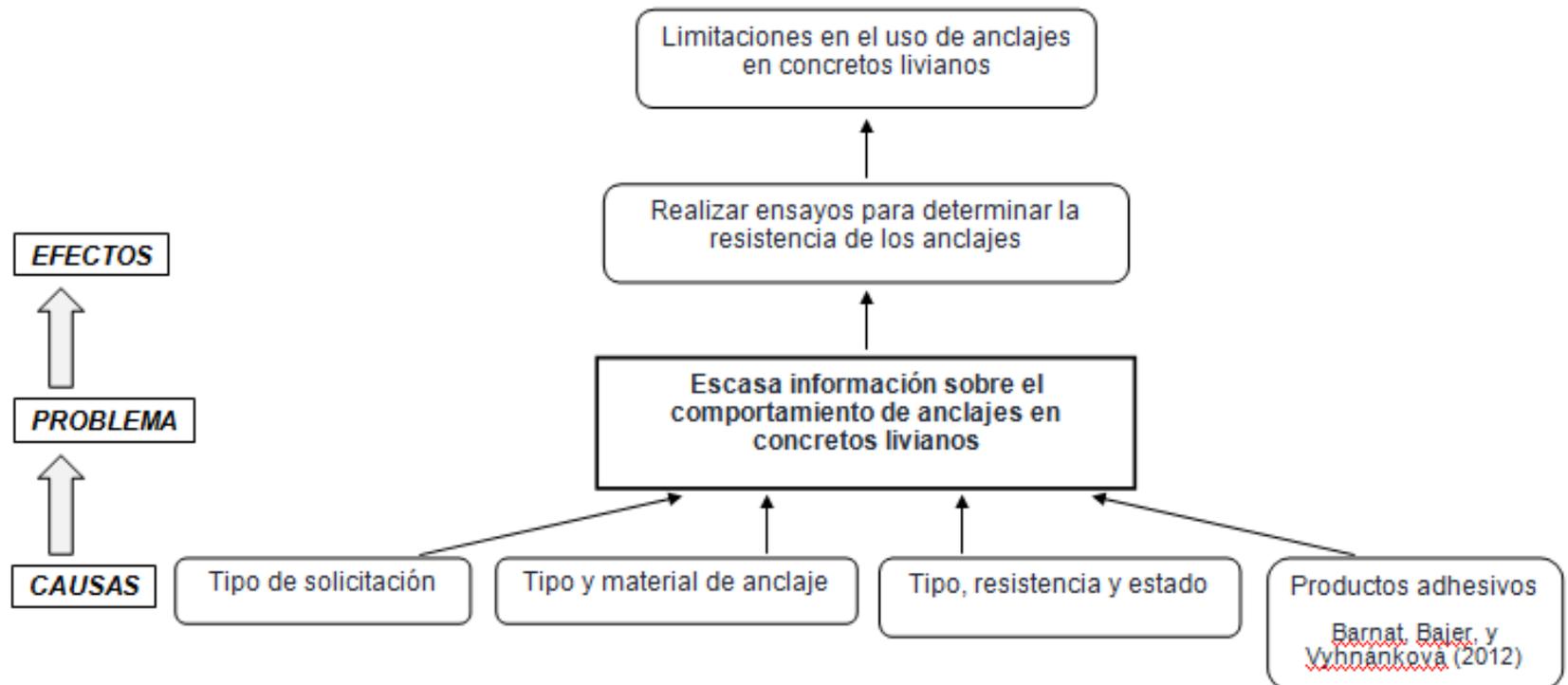


Figura 1 Árbol del problema.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general:

Evaluar el comportamiento de anclajes postinstalados adhesivos en concreto liviano estructural, sometidos a cargas de tensión y corte.

2.2 Objetivos específicos:

- Evaluar, a través de ensayos de laboratorio, el comportamiento estructural de anclajes postinstalados adhesivos en concreto liviano estructural, sometidos a cargas de tensión y cortante.
- Elaborar un estado del arte en relación con el comportamiento de anclajes postinstalados en concretos livianos.
- Comparar los resultados obtenidos mediante ensayos con los resultados al emplear la normativa americana actual ACI 318-19 y el Apéndice C-D: Anclaje al concreto de NSR-10.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Concreto liviano

El concreto liviano fue desarrollado para dar respuesta a interrogantes constructivos en casos específicos.

“Los hormigones livianos se definen en ACI 213 R (1987) como aquellos que poseen una densidad en estado seco al aire menor a 1850 kg/m^3 , y pueden dividirse en tres tipos: los hormigones aireados, que se fabrican con aditivos espumantes, los hormigones sin finos y los hormigones con áridos livianos.” (Videla, C.C.(2012). *Revista de Ingeniería de Construcción*, pp 17 – pp. 24).

“Los hormigones livianos estructurales presentan, entre otras ventajas, estructuras de menor peso propio, las que requieren de fundaciones de menor tamaño, permiten edificaciones de mayor altura y el desarrollo de tecnologías de prefabricación, disminuyen las fuerzas sísmicas, presentan un mejor comportamiento térmico que se traduce en una menor deformabilidad ante cambios de temperatura y tienen mejores propiedades de aislación térmica y acústica” (Videla, C.C.(2012). *Revista de Ingeniería de Construcción*, pp 17 – pp. 24).

3.2 Anclajes Postinstalados

“El número de ensayos disponibles para establecer la resistencia de anclajes colocados en concreto liviano es limitado. Los ensayos de anclajes preinstalados en concreto liviano indican que el factor actual de reducción λ refleja adecuadamente la influencia del concreto liviano” (Shaikh and Yi 1985; Anderson and Meinheit 2005). La información de los fabricantes de anclajes desarrollada para informes de evaluación en anclajes postinstalados y en anclajes adheridos indica que se necesita un valor de λ reducido que al ser aplicado a las fuerzas experimentales proporcionen un factor de seguridad para así obtener las respectivas resistencias de diseño proporcionadas por ACI 318-19.

“Un anclaje instalado en el concreto endurecido. Los anclajes de expansión y los anclajes con sobreperforación en su base son ejemplos de anclajes postinstalados”

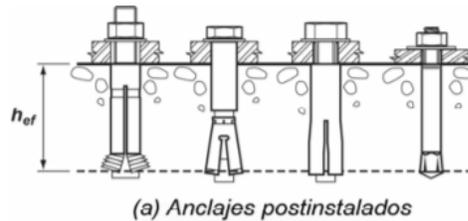


Figura 2 Anclajes postinstalados.

(Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10, 2010)

Adhesivo— Componentes químicos provenientes de polímeros orgánicos, o de una combinación de polímeros orgánicos y materiales inorgánicos, que al mezclarse inician un proceso de curado.

(American Concrete Institute, 2019)

Sika AnchorFix ®-3001: Adhesivo epóxico para anclajes de alto desempeño para uso de anclaje de barras corrugadas y pernos roscados en materiales sólidos, que permite su aplicación como adhesivo o anclaje.

(Sika, 2017)

Las Sigüientes definiciones fueron tomadas del Reglamento ACI318-19 y el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente 2010 (NSR-10).

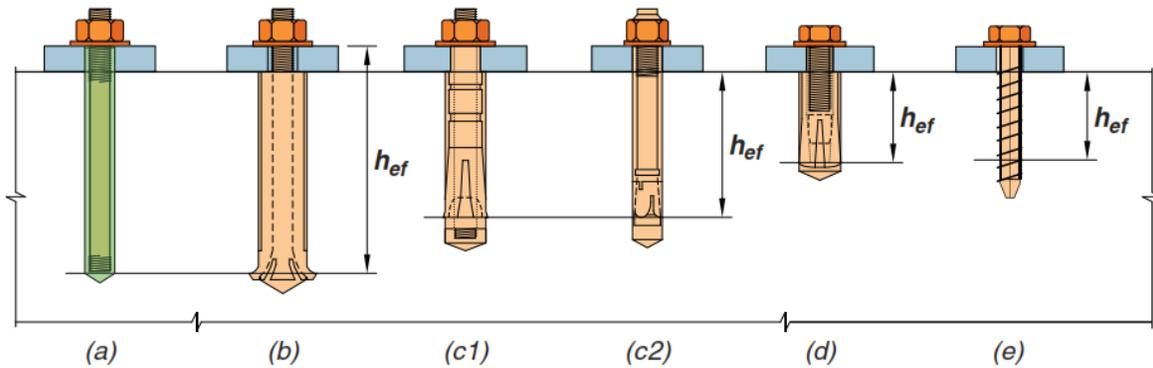
3.3 Definiciones

Adhesivo (Adhesive) — Componentes químicos provenientes de polímeros orgánicos, o de una combinación de polímeros orgánicos y materiales inorgánicos, que al mezclarse inician un proceso de curado.

Anclaje (Anchor) — Un dispositivo de acero ya sea preinstalado antes de colocar el concreto o postinstalado en un elemento de concreto endurecido y usado para transmitir fuerzas aplicadas, incluidos los tornillos con cabeza, los tornillos con extremo con forma de gancho (J o L), pernos con cabeza, anclajes de expansión, o anclajes con sobre perforación en su base.

Anclaje adherido (Adhesive anchor) — Un anclaje postinstalado que se inserta en una perforación realizada en concreto endurecido de un diámetro no mayor de 1.5 veces el diámetro del anclaje y que transfiere cargas al concreto por adherencia entre el anclaje y el adhesivo y entre el adhesivo y el concreto.

Anclaje postinstalado (Post-installed anchor) — Un anclaje instalado en el concreto endurecido. Los anclajes de expansión y los anclajes con sobreperforación en su base son ejemplos de anclajes postinstalados.



(B) Anclajes postinstalados: (a) anclaje adherido, (b) Anclaje con sobreperforación, (c) Anclajes de expansión de torque controlado ((c1) Con camisa, (c2) Tipo perno), (d) Anclaje de expansión de desplazamiento controlado tipo pasante, (e) Tornillo de anclaje.

Figura 3 Tipos de anclajes. Fuente: Reglamento ACI 318-19.

Cargas (Loads) — Fuerzas y otras acciones que resultan del peso de los materiales de construcción, los ocupantes y sus enseres, efectos ambientales, movimientos diferenciales, y cambios volumétricos restringidos. Las cargas permanentes corresponden a cargas cuyas variaciones en el tiempo son excepcionales o de magnitud pequeña. Todas las demás cargas se consideran cargas variables.

Distancia al borde (Edge distance) — La distancia desde el borde de la superficie de concreto al centro del anclaje más cercano.

Grupo de anclajes (Anchor group) — Un grupo de elementos de anclaje de aproximadamente la misma profundidad de embebido efectivo, en el cual cada elemento de anclaje está espaciado al menos $3h_{ef}$ de uno o más anclajes adyacentes al estar sometido a tracción, ó $3C_{a1}$ de uno o más anclajes adyacentes al estar sometido a cortante. Solamente aquellos anclajes susceptibles de sufrir el modo particular de falla que está bajo investigación pueden ser incluidos en el grupo.

Profundidad efectiva de embebido (Effective embedment depth) — Profundidad total a través de la cual el anclaje transfiere fuerzas hacia o desde el concreto que lo rodea. La profundidad efectiva

de embebido generalmente es la profundidad de la superficie de falla del concreto en las aplicaciones en tracción. Para tornillos con cabeza preinstalados y pernos con cabeza, la profundidad efectiva de embebido se mide desde la superficie de contacto de apoyo de la cabeza.

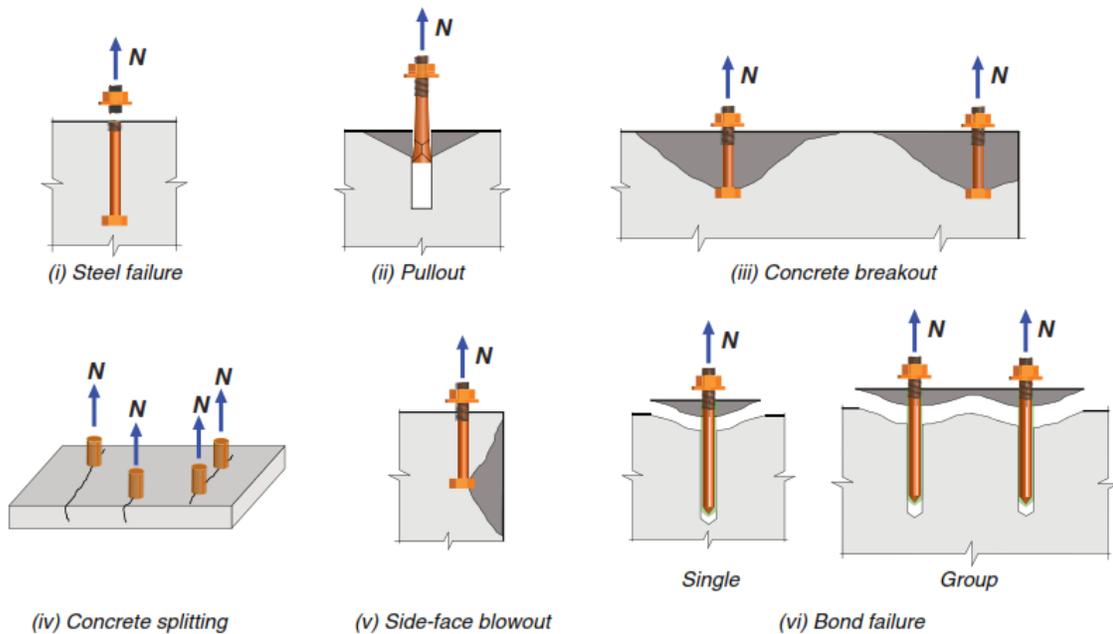
3.4 Requisitos generales para la resistencia de los anclajes

La resistencia de diseño de anclajes debe basarse en cálculos que empleen modelos de diseño que satisfagan los requisitos de los reglamentos, o bien con base en resultados de ensayos, utilizando un percentil del 5 por ciento de los resultados de ensayos representativos para las modalidades de falla, el cual se resume en la siguiente tabla.

Tabla 1 Resistencia requerida para los anclajes.

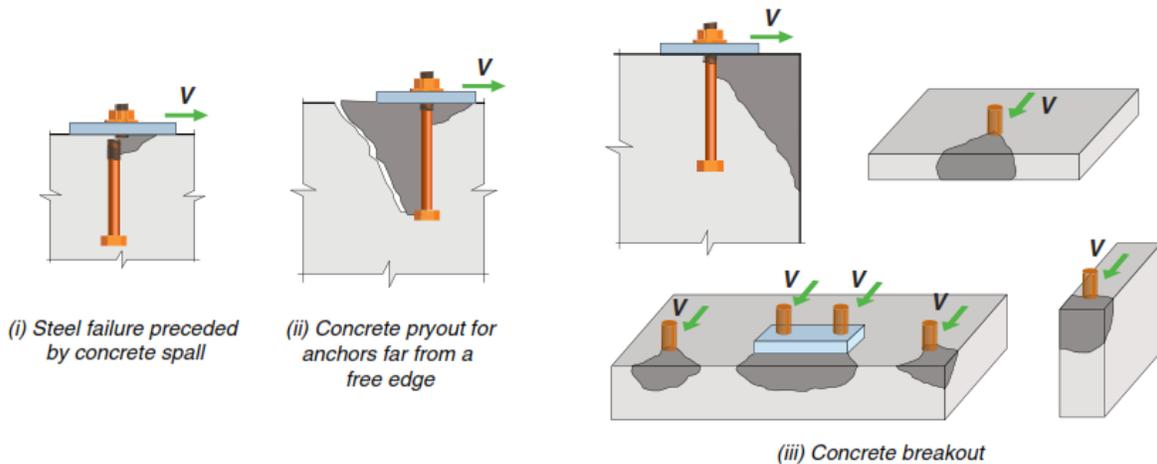
| Modo de falla | Un anclaje | Grupos de anclajes | |
|---|---------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| | | Anclaje individual en un grupo | Anclajes como grupo |
| Resistencia del acero en tracción. | $\Phi N_{sa} \geq N_{ua}$ | $\Phi N_{sa} \geq N_{ua,i}$ | |
| Resistencia al arrancamiento del concreto en tracción. | $\Phi N_{cb} \geq N_{ua}$ | | $\Phi N_{cbg} \geq N_{ua,g}$ |
| Resistencia a la extracción por deslizamiento en tracción. | $\Phi N_{pn} \geq N_{ua}$ | $\Phi N_{pn} \geq N_{ua,i}$ | |
| Resistencia al desprendimiento lateral del concreto en tracción | $\Phi N_{sb} \geq N_{ua}$ | | $\Phi N_{sbg} \geq N_{ua,g}$ |
| Resistencia de adherencia de anclaje adherido en tracción. | $\Phi N_a \geq N_{ua}$ | | $\Phi N_{ag} \geq N_{ua,g}$ |
| Resistencia del acero en cortante. | $\Phi V_{sa} \geq N_{ua}$ | $\Phi V_{sa} \geq V_{ua,i}$ | |
| Resistencia al arrancamiento del concreto por cortante. | $\Phi V_{cb} \geq N_{ua}$ | | $\Phi V_{cbg} \geq V_{ua,g}$ |
| Resistencia al desprendimiento del concreto por cabeceo del anclaje por cortante. | $\Phi V_{cp} \geq N_{ua}$ | | $\Phi V_{cpg} \geq V_{ua,g}$ |

(American Concrete Institute, 2019)



(i)Falla del Acero, (ii)Deslizamiento, (iii) Arrancamiento del concreto, (iv) Hendimiento del concreto, (v) Desprendimiento lateral, (vi) Falla de adherencia.

Figura 4 Modos de falla para anclajes sometidos a tension. (American Concrete Institute, 2019).



(i)Falla del acero precedida por descascaramiento del concreto, (ii) Desprendimiento del concreto para anclajes lejos del borde libre, (iii)Arrancamiento del concreto.

Figura 5 Modos de falla para anclajes sometidos a cortante. (American Concrete Institute, 2019).

Los efectos de grupo en los anclajes deben tenerse en cuenta siempre que dos o más anclajes tengan separaciones menores que las separaciones críticas dadas a continuación.

Tabla 2 Separación crítica de anclajes para considerar efectos de grupo. (American Concrete Institute, 2019).

| Modo de falla que se estudia | Separación crítica |
|--|---------------------------|
| Arrancamiento de concreto en tracción. | $3h_{ef}$ |
| Resistencia de adherencia en tracción. | $2c_{Na}$ |
| Arrancamiento de concreto en corte. | $3c_{a1}$ |

Las formulaciones para el cálculo de la resistencia de los anclajes según la modalidad de falla se encuentran establecidas en el reglamento colombiano y en el reglamento americano (el cual en su última versión incluye el análisis para anclajes adheridos), por lo cual el autor considera innecesario replicarlas en este documento

4. ESTADO DEL ARTE

A la fecha del presente documento se han desarrollado numerosas investigaciones acerca del comportamiento de los anclajes postinstalados sometidos a cargas de tensión, corte o la combinación de ellas, también ante cargas sostenidas, cíclicas o aplicadas rápidamente. De estas investigaciones, existen muy pocas desarrolladas sobre concretos livianos (las enumeradas 4.1, 4.12 y 4.13) y ninguna en este tipo de concreto liviano aligerado con aire el cual es el enfoque principal de esta investigación, a continuación, se presentan algunos trabajos realizados de anclajes en concretos en los últimos diez años.

INVESTIGACIONES INTERNACIONALES

ANCLAJES EN EL CONCRETO

4.1 Aplicación de anclajes en concreto bajo condiciones especiales.

Nemes, Rita, & Lubiol, Eva. "Application of anchors under special concrete conditions". 2010. Periodica Polytechnica Civil Engineering. Budapest University of Technology and economics. 55(1), pp 73-79.

OBJETIVO:

Estudiar el comportamiento de los anclajes de expansión controlada por torque y anclajes adheridos en concretos de peso normal y en concretos livianos con agregados livianos.

MUESTRA:

Se estudiaron cinco mezclas de concreto diferentes. El esfuerzo a compresión del concreto de peso normal (NWC) y uno de concreto liviano (LWAC) fueron los mismos. En esta investigación se probaron anclajes de expansión controlada por torque, así como anclajes adheridos (éster de vinilo o éster de vinilo con adhesivo cementante). Los anclajes se instalaron a temperatura ambiente en bloques de concreto, que previamente se calentaron hasta 150 ° C o 300 ° C. También se llevaron a

cabo pruebas de referencia en muestras almacenadas continuamente a temperatura ambiente. Este estudio experimental se llevó a cabo con dos concretos de diferentes esfuerzos.

Se probaron tres anclajes diferentes. Un tipo era un anclaje de expansión controlado por torque (FBN 8/50 + 63 K, Fig. 4) y dos tipos de anclajes adheridos (FIS A 8x175, Fig. 5). A los anclajes adheridos con viniléster (FIS VT 380 C) e híbrido (FIS V 360 S, vinil éster + cemento) se les agregó un agente de unión. Todos los anclajes probados tenían un diámetro de 8 mm y la profundidad de empotramiento era de 50 mm.

En este estudio experimental se probó un tipo de expansión y dos tipos de anclajes adheridos (con adhesivos de viniléster o viniléster con cemento) en cinco mezclas de concreto diferentes. Los anclajes se instalaron en bloques de concreto.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES:

Los anclajes de expansión y adheridos responden de diferentes formas en caso del compuesto especial o al aumento de temperatura. La fuerza de adherencia de un anclaje se ve influenciada no solo por la resistencia del concreto, sino también por su composición. El comportamiento de los anclajes de expansión y adheridos es diferente en el concreto de peso normal (NWC) y el concreto de agregado ligero (LWAC).

La fuerza de conexión entre el anclaje y el concreto es menor en el concreto liviano que en el concreto de peso normal. La mayor reducción se presentó en el caso de los anclajes de expansión controlados por torque (50%) pero también fue significativa en el caso de los anclajes adheridos (25-30%). Cuanto menor sea la densidad del concreto, menor será la capacidad de carga de extracción con la misma clase de resistencia del concreto. El modo de falla depende en todos los casos de la resistencia del concreto y de la temperatura máxima. Los anclajes de expansión controlados por torque o los anclajes adheridos que utilizan adhesivo de éster de vinilo mezclado con cemento tienen tendencias similares de cargas máximas en comparación con la temperatura

máxima menor a 300 ° C. El adhesivo de viniléster es más sensible al aumento de temperatura. Las cargas máximas cuando la temperatura es menor a 300 ° C disminuyeron significativamente en anclajes adheridos con adhesivo de éster vinílico.

4.2 Comportamiento a tensión de anclajes químicos postinstalados en concreto de baja resistencia.

Yilmaz, S., Özen, M., & Yardim, Y. (2013). "Tensile behavior of post-installed chemical anchors embedded to low strength concrete". *Construction and Building Materials*, 47, 861-866.

OBJETIVO:

Estudiar el comportamiento a tensión y el mecanismo de falla de los anclajes postinstalados de acuerdo con la profundidad de embebido y distancias libres al borde.

MUESTRA:

Se estudió el comportamiento a tensión de anclajes postinstalados en concretos de baja resistencia de 5.9 MPa y 10.9 MPa (860 psi y 1580 psi, respectivamente), empleando barras de 12 mm, 16 mm y 20 mm de diámetro con resistencia a tensión promedio de 480 MPa.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES:

De los ensayos concluyeron que anclajes con profundidades de embebido y distancias libres al borde de 10 veces el diámetro presentaban un mecanismo de falla frágil en la mayoría de los casos, por lo cual recomendaban evitar usar anclajes cercanos al borde del elemento o poco profundos para propósitos de reforzamiento.

Adicionalmente, para profundidades de embebido y distancias libres al borde de 15 veces el diámetro del anclaje se obtuvo como resultado una falla dúctil en los bloques de concreto, por lo tanto, recomiendan proporcionar la suficiente distancia libre de borde, haciendo la anotación de que otros autores aconsejan utilizar distancias de 30 veces el diámetro.

4.3 Optimización de anclajes adhesivos al concreto por función de deseabilidad.

Abd-El Hammed Mohamed; Allah Abd Elaty, Metwally & Farouk Ghazy, Mariam. "Optimisation of adhesive anchors in concrete by desirability function". 2015. Magazine of concrete research 67(20):1-11

OBJETIVO:

Encontrar la combinación óptima de parámetros de un proceso para múltiples características de desempeño de anclajes adhesivos en concreto y lograr la máxima resistencia a la extracción con la mínima cantidad de material adhesivo.

MUESTRA:

La longitud de empotramiento y el diámetro del orificio se consideraron factores importantes que influyen en el sistema de anclaje. Se utilizó un diseño factorial completo y la metodología de superficie de respuesta para su modelación.

En el presente estudio se usó la función de deseabilidad para determinar los parámetros óptimos para los anclajes adhesivos en concreto con el fin de optimizar simultáneamente la resistencia a la extracción y el volumen del material adhesivo. El diseño del experimento fue un diseño factorial completo para tres valores de cada uno de los dos factores controlables: el diámetro del orificio perforado y la longitud de empotramiento, y el objetivo era encontrar la combinación óptima de factores y niveles en las varillas de acero adheridas en el concreto. La optimización de respuesta única y de respuesta múltiple se realizó utilizando la función de deseabilidad.

El análisis de regresión múltiple de los resultados condujo a ecuaciones que describen adecuadamente la influencia de las variables seleccionadas de las respuestas en estudio.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La optimización de los anclajes adhesivos en el concreto mediante la función de deseabilidad dio como resultado los valores óptimos de los factores en los que se pudo cumplir la meta del proceso con características aceptables evidenciando que la aplicación de técnicas de diseño experimental es útil para la caracterización y optimización del proceso.

4.4 Comportamiento de anclajes adhesivos sometidos a cargas de tensión y cortante

Epachachi, S., Esmaili, O., Mirghaderi, S. R., & Behbahani, A. T. (2015). Behavior of adhesive bonded anchors under tension and shear loads. *Journal of Construction a Steel Research*, 114, 269–280

OBJETIVO

Investigar el comportamiento a tracción y cizallamiento de los anclajes adhesivos postinstalados.

MUESTRA

Se ensayaron 42 anclajes, en los cuales se estudió el comportamiento de los anclajes tanto individuales como en grupos de 4, 6 y 9 anclajes, con separaciones de 150 mm y 200 mm. Los anclajes tenían una profundidad de embebido uniforme de 200 mm y la modalidad de ensayo era inconfiada para los anclajes a tensión. Las barras empleadas como anclajes eran barras roscadas de diámetro 20 mm, con esfuerzo de fluencia de 640 MPa, mientras que el concreto utilizado alcanzó una resistencia a la compresión promedio de 52 MPa (7500 psi).

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Para los ensayos de tensión los anclajes individuales presentaron falla por arrancamiento de concreto y falla del acero, para los anclajes ensayados como grupo la falla predominante fue arrancamiento de concreto; para los ensayos de cortante la falla se presentó principalmente en el acero.

Los autores concluyeron que el espaciamiento o separación de los anclajes tenía un impacto significativo en los ensayos a tensión ya que a mayor separación se alcanzaba una mayor resistencia, mientras que para los de cortante el efecto era mínimo. Adicionalmente concluyeron que las ecuaciones del ACI 318-14 subestiman la resistencia a tensión y a cortante de los anclajes adhesivos, pues son aproximadamente la mitad de las resistencias experimentales.

4.5 Comportamiento de la adherencia de barras de GFRP de superficie acanalada y cabeza inclinada en concretos de alta resistencia.

Islam, Afefy, Sennah, & Azimi. “Bond Behavior of Ribbed-Surface, Headed-End, GFRP Bars Embedded in High-Strength Concrete”. 2015. CSCE Annual Conference, Regina, Saskatchewan, Canadá.

OBJETIVO:

Estudiar el comportamiento de los anclajes con barras GFRP rectas y con cabeza en concretos de alta resistencia en función de la profundidad de embebido.

MUESTRA:

Se ensayaron 180 barras de GFRP a manera de sustituir las barras de acero convencionales, aprovechándose de la gran resistencia que proporcionan este tipo de barras, además de su principal ventaja de eliminar el problema de durabilidad debido a la corrosión. El estudio cubrió 30 parámetros, entre ellos se mencionan, diámetro de barra (12 o 16 mm), profundidad de embebido (4 o 6 veces el diámetro de la barra), tipo de barra (recta o con cabeza), y separación al borde del

bloque de concreto (1.5, 2.5, 5 o 7 veces el diámetro para barras rectas y 8 o 10.5 veces el diámetro para barras con cabeza). Las barras empleadas como anclajes cuentan con esfuerzo de fluencia de 445 MPa, mientras que el concreto utilizado alcanzó una resistencia a la compresión promedio de 68 MPa (9500 psi).

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mostraron que la carga de falla promedio se incrementa proporcionalmente con la profundidad de embebido para ambos tipos de barra, sin embargo, el incremento era significativamente mayor para las barras rectas. Para las barras con cabeza no existía mucha diferencia entre la resistencia obtenida para distintas profundidades de embebido.

Por otro lado, a medida que aumenta la separación al borde del bloque de concreto, la carga de falla incrementa proporcionalmente, sin embargo, aumentar dicha separación a más de 2.5 veces el diámetro de la barra no generaba un incremento significativo.

Finalmente, los autores concluyen que utilizar anclajes con cabeza representa un incremento en la carga de falla de aproximadamente 168% y 105% para diámetros de 12 mm y 16 mm, respectivamente, para las mismas profundidades de embebido.

4.6 Comité técnico para establecer el método de evaluación de la durabilidad y diseño avanzado de anclajes post-instalados en concreto.

Kunieda, Minoru; Nakano, Katsuhiko; Hamasaki, Hitoshi; Koga, Hirohisa; Ueda, Naoshi; Takahashi, Munemori; Sugiyama, Tomoaki; & Sato, Yasuhiko. “Technical Committee on establishment of evaluation method for durability and advanced design of post-installed anchor in concrete”. 2016. Committee report: JCI-TC142A.Japan.

OBJETIVO:

Dar recomendaciones sobre el diseño y la selección de anclajes post-instalados y aplicarlos al diseño.

MUESTRA:

Se recopilaron datos y se verificaron los métodos de evaluación sobre durabilidad incluyendo los efectos por agrietamiento, fluencia y fatiga del concreto y la resistencia química. Se sistematizaron los resultados de las investigaciones sobre durabilidad así como métodos y tecnologías de diseño desarrolladas. Se estudiaron 740 publicaciones de Japón, USA y Europa de acuerdo a unas palabras clave previamente seleccionadas referentes a los tipos de anclajes, bien sean preinstalados o postinstalados. Varias de estas publicaciones hacen referencia a los anclajes postinstalados individuales o en grupo.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los estudios revelaron que los anclajes postinstalados tienen diversas aplicaciones, pero no existen reglas para la verificación de la calidad de su construcción y evaluación de su desempeño. Se pudo ver que existen dos métodos que utilizan los anclajes post-instalados: fijación y conexión, en la fijación, los anclajes conforman un equipo con pernos de longitud corta, este método se usa en situaciones donde es difícil predecir la redistribución del esfuerzo; en la conexión, los anclajes funcionan como si se conectaran con pernos de longitud larga, este método se utiliza donde es posible predecir la redistribución del esfuerzo a tensión así como la deformación de los pernos de anclaje.

Este trabajo proporciona un diagrama de flujo para seleccionar anclajes postinstalados y unas tablas para clasificarlos en categorías de acuerdo a requerimientos ambientales.

El propósito original de este comité era proponer métodos de diseño de durabilidad para anclajes post-instalados, sin embargo, encontraron que en Japón hay muy poca información sobre el tema, por lo tanto, concluyen que es necesario realizar más investigaciones.

4.7 Anclajes postinstalados en concreto de alto desempeño (Cattaneo & Muciaccia, 2016)

Cattaneo, S., & Muciaccia, G. “Adhesive anchors in high performance concrete”. *Materials and Structures*. 2016. 2689-2700

OBJETIVO

Evaluar la respuesta mecánica de anclajes adhesivos embebidos en concretos de alta resistencia.

MUESTRA

En esta investigación se ensayaron 49 anclajes (de los cuales 30 fueron a tensión no confinada y el resto a cortante), en los cuales se estudió el comportamiento de anclajes individuales con separaciones de 600 mm. Para los anclajes en tensión, las barras tenían una profundidad de embebido de 50 mm, 75 mm y 110 mm; para los anclajes a cortante, las barras tenían separaciones al borde de 40 mm y 55 mm. Las barras empleadas como anclajes eran barras roscadas de diámetro 12 mm, con esfuerzo de fluencia de 400 MPa.

Adicionalmente, las barras se ensayaron en dos tipos de concreto, concreto de alto desempeño simple y reforzado con microfibras de acero. El concreto utilizado en los ensayos alcanzó una resistencia a la compresión promedio de 104 MPa (14800 psi). Las variables estudiadas

fueron: -La resistencia del concreto, -la adición de microfibras de acero, - la dirección de la carga, - la profundidad de empotramiento y – la distancia al borde de los anclajes.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los autores concluyeron que para ensayos a tensión la profundidad de embebido que corresponde a la transición entre la falla por adherencia y la falla por arrancamiento del concreto disminuye al incrementar la resistencia del concreto. Para profundidades muy bajas (50 mm) el uso de fibras en el concreto incrementa la carga de falla, además conllevan a una falla combinada por adherencia y arrancamiento bajo cargas de tensión. La profundidad de empotramiento y la distancia al borde influyen en los resultados de la resistencia y de la ductilidad, mientras que las fibras afectan el comportamiento final de falla.

4.8 Comportamiento de anclajes postinstalados de grandes diámetros en concreto.

Wang, D., Wu, D., Ouyang, C., & Zhai, M. (2016). “Performance and design of post- installed large diameter anchors in concrete”. Construction and Building Materials. Chengdu University of Technology. 2016. Vol 114, 142-150

OBJETIVO

Estudiar el comportamiento de anclajes postinstalados de grandes diámetros en concreto.

MUESTRA

Se planteó un programa experimental para ensayar 48 anclajes con barras de diámetro 36 mm, 48 mm, 90 mm y 150 mm, para tres profundidades de embebido (8, 10 y 12 veces el diámetro).

Las barras empleadas como anclajes eran barras HPB345 con esfuerzo de fluencia de 345 MPa, y fueron ancladas utilizando “grouting” para un grupo de barras y adhesivo epóxico Hilti RF-500 para otro grupo. El concreto utilizado en estos ensayos alcanzó una resistencia a la compresión promedio de 23.5 MPa (3400 psi).

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los autores concluyeron que la capacidad a tensión de los anclajes está relacionada con el diámetro de la barra, el adhesivo utilizado, la superficie de la barra y la profundidad de embebido. Anclajes de grandes diámetros y profundidades de embebido incrementan el área de adherencia lo cual aumenta las cargas efectivas de fricción entre los materiales. Finalmente concluyen que el adhesivo epóxico genera un comportamiento más estable y mayor resistencia en comparación con el “grouting”.

4.9 Anclajes de varillas revestidas con epóxico usando adhesivos químicos.

Z. Dymond, Benjamin & Mills, Connor. Anchorage of epoxy-coated rebar using chemical adhesives. 2019. University of Minnesota. M.S. tesis.

OBJETIVO

Evaluar el efecto del recubrimiento epóxico en los anclajes post instalados con adhesivos químicos con varillas de refuerzo.

MUESTRA

Se realizaron un total de 48 pruebas, los materiales utilizados fueron concreto (4000 psi), varillas corrugadas #5 elaboradas bajo la ASTM A615 (2016), ancladas a profundidades de 5 pulgadas no

recubiertas y recubiertas con epóxico elaborado bajo la ASTM A775 (2017) y 4 tipos diferentes de adhesivo epóxico : Powers AC100+ Gold, Red Head A7+, Hilti HIT-RE 500 V3, y ATC Ultrabond 365CC. Los anclajes se realizaron en dos placas de concreto no reforzado de 1.34 m³ cada una y fueron construidas siguiendo los requerimientos de ASTM E488. Una contenía barras post instaladas recubiertas con epóxico, y la otra contenía barras no recubiertas, al realizar las ensayos de tracción se siguieron los lineamientos establecidos en ACI 355.4 (2011) y ASTM E488 (2015).

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

De los ensayos a tensión se observó que las varillas post-instaladas recubiertas con epóxico Powers AC100+ Gold presentaron una máxima fuerza a tracción de arrancamiento del 94% de la fuerza máxima de las varillas post-instaladas sin recubrimiento con el mismo adhesivo químico; en las varillas post-instaladas recubiertas con epóxico ATC Ultrabond 365CC presentaron una fuerza máxima a tracción de arrancamiento del 105% de la máxima fuerza aplicada a las varillas post-instaladas sin recubrimiento con el mismo adhesivo químico; en las varillas post-instaladas recubiertas con epóxico Red Head A7+ presentaron una máxima fuerza a tracción de arrancamiento igual a la máxima fuerza de las varillas post-instaladas sin recubrimiento con el mismo adhesivo químico; en las varillas post-instaladas recubiertas con epóxico Hilti HIT-RE 500 V3 no se pudieron comparar con las varillas post-instaladas sin recubrimiento porque la única falla presentada fue del acero. La máxima fuerza a tracción de arrancamiento de los anclajes post-instalados con barras recubiertas con epóxico fue mayor que los valores publicados por los fabricantes para todos los adhesivos químicos. La posible razón es que los fabricantes de los adhesivos químicos son conservadores al suministrar los valores del esfuerzo que resiste el epóxico (τ_{ungr} y τ_{cr}).

El desplazamiento promedio al aplicar la carga de tensión ultima en las barras con epóxico fue menor que el desplazamiento promedio con la carga de tensión ultima en las barras sin epóxico.

Una explicación posible para esto es que los compuestos de los adhesivos químicos causan una reacción química con el epóxico al fusionarse y cuando se rompe esta fusión puede ocurrir rápidamente la rotura causando que haya un pequeño desplazamiento.

INVESTIGACIONES NACIONALES

4.10 Estudio de la resistencia a tracción en anclajes estructurales postinstalados con adhesivo epóxico.

Páez Moreno, Diego Fernando & Hamon Caicedo, Jeniffer. “Estudio de la resistencia a tracción en anclajes estructurales posinstalados con adhesivo epóxico”. 2018. Universidad de Medellín. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Vol 17, No.33.

OBJETIVO

Evaluar el vínculo entre la longitud de embebido y el diámetro de perforación con la resistencia máxima a tracción y el tipo de falla, en prototipos de anclaje estructural de concretos de resistencia normal.

MUESTRA

Se llevó a cabo una investigación en la que se pretende evaluar los sistemas de anclaje postinstalados con adhesivo epóxico AnchorFix-4 de Sika, con 15 unidades de varillas de acero corrugado de 9.5 mm de diámetro grado 60 y 15 unidades de grafil de 7 mm con longitudes de 5, 10 y 15 veces el diámetro de las mismas, mediante ensayos a tracción de 30 probetas de concreto de resistencias iguales a 4000 psi.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se buscó que el sistema de anclaje postinstalado garantizara la condición con la cual la barra de refuerzo del sistema de anclaje fuera capaz de desarrollar la carga máxima de fluencia del refuerzo correspondiente a la probeta ensamblada. Se determinó que, para un concreto de resistencia igual a 4000 psi, la barra de 9.5 mm desarrolló un promedio de 130% de la carga máxima de fluencia del acero para una longitud de 15 veces el diámetro de la misma y la falla es del tipo dúctil en el acero y por lo tanto esta longitud de embebido se recomienda para este tipo de anclajes postinstalados, un 113% para una longitud de 10 veces el diámetro y la falla es rotura del concreto y 56% para una longitud igual a 5 veces el diámetro de la barra y no se recomienda su implementación.

Por otra parte, respecto al grupo de anclajes estructurales postinstalados con grafil de diámetro 7 mm, en la mayoría de estos la falla presentada fue de tipo arrancamiento. Asimismo, se evidenció que solo uno de los quince anclajes fallados logró llegar a la carga de fluencia, mientras que el comportamiento de las curvas de resistencia de este tipo de anclajes no es lo suficientemente claro para ser analizado. Se concluyó finalmente que se deben desarrollar más investigaciones respecto a este tipo de anclajes con barra de refuerzo de tipo grafil. Dados los resultados en los anclajes estructurales postinstalados con grafíles, se estableció la hipótesis de que la estructura de la corruga en este tipo de refuerzo no permite desarrollar suficiente adherencia en la interfaz refuerzo-adhesivo-concreto, razón por la cual la falla primaria de estos anclajes fue de tipo arrancamiento y su resistencia máxima no alcanza a desarrollar la fluencia de la barra. Es pertinente continuar investigando los anclajes estructurales postinstalados con adhesivo epóxico, específicamente anclajes con barra de refuerzo de tipo grafil. En términos generales, el autor concluye lo siguiente: La longitud de embebido ha sido una variable ampliamente estudiada en los anclajes estructurales postinstalados dada su incidencia en su comportamiento mecánico, y tal como se comprobó en esta

investigación, esta variable es más determinante en el desempeño del anclaje que el diámetro de perforación.

INVESTIGACIONES LOCALES

4.11 Comportamiento de anclajes post-instalados en concretos de alta resistencia sometidos a tensión y cortante.

Morales, Humberto. “Comportamiento de anclajes postinstalados en concretos de alta resistencia sometidos a tensión y cortante”. 2018. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Tesis de Maestría.

OBJETIVO

Evaluar el comportamiento de anclajes postinstalados en concreto de alta resistencia, sometidos a cargas de tensión y corte.

MUESTRA

Se utilizó concreto de alta resistencia de $f'_c=72.9$ MPa, peso específico de 2.30 T/m³ y se emplearon barras roscadas de acero AISI 1020 y acero B7 en diámetros de 3/8”, 1/2” y 5/8”. Los anclajes se realizaron a 5, 10 y 20 veces el diámetro de cada barra. Para los ensayos CONFINADOS A TENSIÓN se usó barras AISI 1020 y para los ensayos NO CONFINADOS a tensión y cortante se emplearon barras B7.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Al dividir las fuerzas resistentes experimentales sobre las suministradas con la formulación del ACI 318-14 dieron valores en su mayoría por debajo de la unidad, lo que indica que se obtuvieron resultados cercanos con la teoría y la falla predominante fue por el acero. Para los ensayos NO CONFINADOS a tensión se usó barras B7 y la falla predominante fue por adherencia, siendo que los factores indicados antes estuvieron por encima de la unidad en 10 de los 12 ensayos realizados y en cuatro de los ensayos estuvieron por encima de 2, lo que muestra que los valores experimentales estuvieron alejados de los valores obtenidos con el ACI 318-14. En los ensayos realizados a CORTANTE realizados con barras AISI 1020 los factores también estuvieron por encima de la unidad y la falla predominante se presentó por el acero.

4.12 Análisis del comportamiento de pernos de anclaje en acero de refuerzo corrugado post-instalados con adhesivo epóxico en concreto ligero sometidos a tensión y cortante.

Viasus Arteaga, Carolina. “Análisis del comportamiento de pernos de anclaje en acero de refuerzo corrugado postinstalados con adhesivo en concreto ligero sometidos a tensión y cortante”. 2019. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Tesis de Maestría.

OBJETIVO

Evaluar el comportamiento de anclajes adhesivos postinstalados en concreto ligero, sometidos a cargas de tensión y corte.

MUESTRA

Se ensayaron 39 anclajes (33 fueron a tensión y 6 a cortante), en ellos se estudió el comportamiento de anclajes individuales para diámetros de 3/8”, 1/2” y 5/8” ASTM A-706 ($F_y=420$ MPa, $F_u=550$ MPa). Se utilizó agregados livianos termo expandido tipo Corona y el concreto dio una resistencia

de 16 MPa. El epóxico utilizado fue Sika AnchorFix 3001 (Esfuerzo de adherencia en concreto no fisurado de 9.30 MPa o 1350 psi).

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Para los anclajes CONFINADOS a tensión la falla predominante se debió a la adherencia, y los anclajes INCONFINADOS presentaron fallas por arrancamiento en el concreto, mientras que los ensayados a cortante presentaron fallas por el concreto. Concluye la autora que para **ensayos confinados a tensión** a mayor profundidad de embebido del anclaje mayor será la carga de falla obtenida, así como a mayor área de la barra más resistencia y que en la totalidad de los ensayos confinados a tensión con barras ASTM A-706, el fallo ocurrió en el epóxico y para **ensayos no confinados a tensión** a mayor profundidad de embebido del anclaje mayor será la carga de falla obtenida, así como a mayor área de la barra más resistencia y que, para los **ensayos a cortante** la carga de falla promedio para barras de 1/2” es ligeramente menor que la carga promedio de falla para barras de 3/8”, en los resultados se logra evidenciar la cercanía en cuanto a resultados de la carga promedio de falla y la carga teórica calculada para barras de 3/8”, caso contrario en las barras de 1/2” en las cuales la carga teórica es superior en más del doble a la carga promedio de falla.

4.13 Anclajes con barra enroscada en placas elaboradas con concretos livianos.

Ramírez Martínez, Ronald Camilo. “Anclajes con barra enroscada en placas elaboradas con concretos livianos”. 2020. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Tesis de Maestría.

OBJETIVO

Evaluar el comportamiento de anclajes de acero enroscado en concreto liviano mediante el uso de resina epóxica, sometidos a tensión y cortante.

MUESTRA

Los ensayos de **tensión** se realizaron en una placa de sección variable cuyo espesor depende de la profundidad de anclaje de las barras enroscadas, tal cual se ilustra a continuación.

Tabla 3: Especificación del espesor de la placa aligerada en función del diámetro del perno enroscado. Fuente: Ramírez

Martínez, Ronald

| Diámetro (pul) | Diámetro (mm) | Profundidad h_{ef} , 5 diámetros (mm) | Espesor mínimo elemento concreto (mm) | Distancia mínima al borde, $1.0h_{ef}$ (mm) | Distancia entre pernos, $2h_{ef}$ (mm) |
|----------------|---------------|---|---------------------------------------|---|--|
| 3/8 | 9.5 | 48 | 77 | 48 | 95 |
| 1/2 | 12.7 | 64 | 93 | 64 | 127 |
| 5/8 | 15.9 | 79 | 109 | 79 | 159 |

Se realizaron 15 ensayos a **tensión no confinada** en varillas de diámetro de 3/8", 1/2" y 5/8". Para los ensayos a **tensión confinada** se realizaron 6 especímenes para el diámetro de 3/8" a profundidades de 48 mm y 95 mm, 6 especímenes para el diámetro de 1/2" a 64 mm y 127 mm de profundidad y 6 especímenes para el diámetro de 5/8" a 79mm y 159 mm de profundidad. Para los ensayos a **cortante** se utilizaron 4 anclajes de 3/8" a profundidades de 100 mm, 3 a 125 mm de 1/2" en dos especímenes de concreto liviano

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En los ensayos a **tensión no confinada** el modo de falla predominante fue arrancamiento del concreto para todas las varillas de diámetro de 3/8", 1/2" y 5/8". Para los ensayos a **tensión confinada** la

modalidad de falla predominante fue adherencia, aunque también hubo falla por acero y falla por borde. Para los ensayos a **cortante** la modalidad de falla fue arrancamiento del concreto.

Para los ensayos NO CONFINADOS a tensión es de resaltar, que para las menores longitudes de anclaje (5 veces el diámetro) y los diámetros de 3/8" y 1/2", se presentan variaciones por encima de 2. A mayor diámetro y mayor longitud de anclaje, se presenta menor variación entre los resultados teóricos y los experimentales.

En los ensayos de tracción CONFINADOS donde se presenta falla por acero, el coeficiente de variación (Experimental / Teórico - ACI-318-14) es muy cercano a la unidad, lo que evidencia que las barras usadas están acordes con las especificaciones técnicas y que la resistencia desarrollada en el ensayo muestra que los anclajes fueron bien elaborados.

Para los ensayos a CORTANTE se identificó que el ángulo de inclinación de la fisura originada en la práctica fue en promedio de 20°, ángulo menor al generado por la relación de Ca y 1.5Ca (formando un ángulo de 33.7°). De lo anterior, se genera una mayor área resistente al desgarramiento del concreto lo cual se ve reflejado en un mayor valor de los resultados experimentales vs los teóricos.

5. FASE EXPERIMENTAL

Con el fin de cumplir con los objetivos de esta investigación, se planteó un programa experimental para determinar las capacidades a tensión y cortante de anclajes postinstalados en concreto liviano. El procedimiento se describe brevemente a continuación:

- Se fundieron veintisiete (27) losas de concreto liviano y se tomaron nueve (9) cilindros para determinar su resistencia a la compresión.
- Se instalaron las barras de acero roscadas en las losas, utilizando barras de 3/8", 1/2" y 5/8" embebidas a diferentes profundidades.
- Se ensayaron las barras a tensión y cortante por separado, determinando carga máxima y modalidad de falla para ambos casos.

5.1 MATERIALES

5.1.1 Concreto Liviano

El concreto utilizado para la elaboración de los ensayos fue concreto liviano logrado mediante el uso de aditivo incorporador de aire - espumante para generar partículas de aire internas dentro del concreto con el objetivo de reducir la masa unitaria a la densidad deseada. El proceso se hizo agregando el aditivo durante la mezcla de los materiales constituyentes del concreto de acuerdo a la dosis definida para el diseño de mezcla, con una relación A/C de 0.29 y un porcentaje de aire de 31.5%. Este concreto fue elaborado y proporcionado por la empresa Holcim específicamente para esta investigación y no es un concreto que se comercialice normalmente.

Para determinar la resistencia a la compresión del concreto se tomaron nueve (9), las cuales determinan que se aplica una capa delgada de aceite mineral, luego se llena una capa de 100 mm de concreto y se compacta 25 veces con la varilla lisa cilíndrica de acero (de 10 mm de diámetro y 300

mm de longitud) para distribuir uniformemente el material y se golpea el cilindro con el martillo de 10 a 15 veces (martillo con cabeza de caucho de 0.6 Kg+0.2 Kg de peso), después de esta compactación se repite el proceso con otra capa de concreto de 100 mm, de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4 Resistencia promedio obtenida. Fuente:Holcim.

| Edad (días) | Resistencia (MPa) |
|-------------|-------------------|
| 1 | 18,0 |
| 3 | 31,2 |
| 7 | 34,9 |
| 28 | 45,4 |

La resistencia promedio obtenida a los 28 días fue de 45.4 MPa (6485 psi). Esta tabla fue proporcionada por Holcim y la siguiente figura representa estos datos.

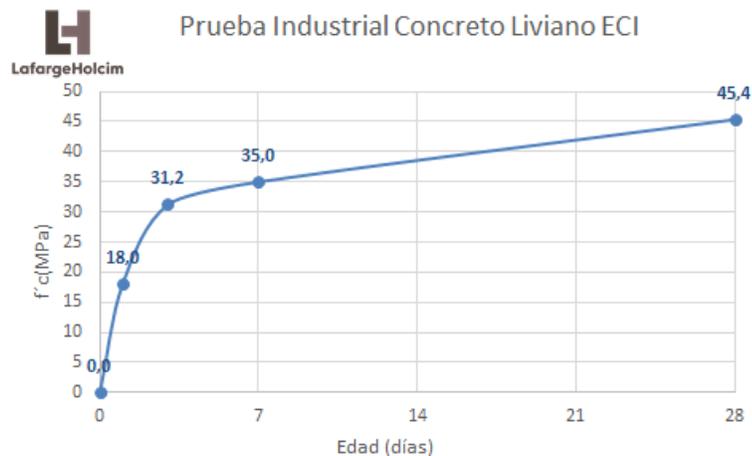


Figura 6: Esfuerzo a la compresión del concreto liviano usado en este trabajo. Fuente: HOLCIM

De acuerdo con las pruebas realizadas por la empresa Holcim el peso específico en estado fresco fue de 2006 kg/m³ y en estado endurecido 1805 kg/m³.

5.1.2. Barras roscadas

Se ensayó un tipo de barra roscada, de especificación ASTM A-193 B7 la cual presentó un esfuerzo de fluencia cercano a 720 MPa ó 105 ksi, y un esfuerzo último cercano a 860 MPa o 125 ksi.

5.1.3. Adhesivo epóxico

El adhesivo epóxico utilizado en todos los ensayos es el producto Sika Anchorfix- 3001, el cual cuenta con un esfuerzo de adherencia en concreto no fisurado de $\tau_{cr} = 9.30$ MPa ó 1350 psi (ICC-ESR-3608)

5.2 LOSAS DE CONCRETO

Se construyeron veintisiete (27) losas de concreto liviano de diversas dimensiones: para ensayar las barras a tensión y cortante cuyas dimensiones se indican en la tabla 4.

En las siguientes tablas se muestran las dimensiones y cantidad de losas realizadas para ensayar los diferentes diámetros de barras a diferentes profundidades de embebido.

Tabla 5 Especificaciones de las losas para ensayos de tensión. Fuente. Autor.

| PARA TRACCION: INCONFINADOS | | | | | |
|------------------------------------|------------------|------------------|--------------------|-----------------|-------------------|
| | Largo (m) | Ancho (m) | Espesor (m) | Cantidad | # Anclajes |
| Φ3/8"-5cm | 0.50 | 0.50 | 0.10 | 3 | 9 |
| Φ1/2"-5cm | | | | | 9 |
| Φ5/8"-5cm | | | | | 9 |
| Φ3/8"-10cm | 1.00 | 1.00 | 0.15 | 3 | 9 |
| Φ1/2"-10cm | | | | | 9 |
| Φ5/8"-10cm | | | | | 9 |
| Φ3/8"-15cm | 1.40 | 1.40 | 0.20 | 3 | 9 |
| Φ1/2"-15cm | | | | | 9 |
| Φ5/8"-15cm | | | | | 9 |
| PARA TRACCION: CONFINADOS | | | | | |
| | Largo (m) | Ancho (m) | Espesor (m) | Cantidad | # Anclajes |
| Φ3/8"-5cm | 0.40 | 0.40 | 0.10 | 3 | 9 |
| Φ1/2"-5cm | | | | | 9 |
| Φ5/8"-5cm | | | | | 9 |
| Φ3/8"-10cm | 0.80 | 0.80 | 0.15 | 3 | 9 |
| Φ1/2"-10cm | | | | | 9 |
| Φ5/8"-10cm | | | | | 9 |
| Φ3/8"-15cm | 1.20 | 1.20 | 0.20 | 3 | 9 |
| Φ1/2"-15cm | | | | | 9 |
| Φ5/8"-15cm | | | | | 9 |



Figura 7: Formaleta y vaciado del concreto liviano. Fuente: Autor



Figura 8: Losas fundidas en su formaleta. Fuente: Autor.



Figura 9: Toma de muestras en cilindros. Fuente: Autor.



Figura 10: Losas demarcadas con las perforaciones para ensayos a tensión. Fuente: Autor.

Tabla 6: Especificaciones de las losas para ensayos de cortante. Fuente: Autor.

| PARA CORTANTE | | | | | |
|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|-----------------|-------------------|
| | Largo (m) | Ancho (m) | Espesor (m) | Cantidad | # Anclajes |
| Φ3/8"-5cm | 0.30 | 0.50 | 0.15 | 3 | 5 |
| Φ1/2"-5cm | | | | | 5 |
| Φ5/8"-5cm | | | | | 5 |
| Φ3/8"-10cm | 0.60 | 1.00 | 0.20 | 3 | 5 |
| Φ1/2"-10cm | | | | | 5 |
| Φ5/8"-10cm | | | | | 5 |
| Φ3/8"-15cm | 0.50 | 1.50 | 0.25 | 3 | 3 |
| Φ1/2"-15cm | | | | | 3 |
| Φ5/8"-15cm | | | | | 3 |

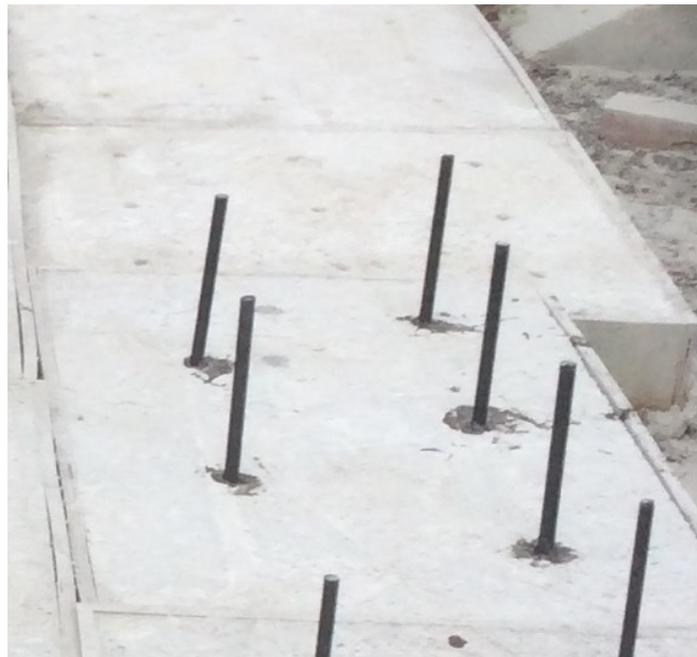


Figura 11: Losa fundida para ensayos de cortante ya armada con las varillas de anclaje. Fuente: Autor.

5.2 MATRIZ DE ENSAYOS

Como se mencionó anteriormente se ensayó un tipo de barra a solicitaciones de tensión y cortante. A continuación, se detallan los diámetros y profundidades a las cuales se ensayarán las barras.

Tabla 7: Diámetros, profundidades y solicitaciones para barras ASTM A-193 Fuente: Autor.

| Material | Diámetro | Profundidad | Solicitación |
|---------------|----------|-----------------|--------------|
| ASTM A-193 B7 | Φ3/8" | 5cm, 10cm, 15cm | Tensión |
| | Φ1/2" | 5cm, 10cm, 15cm | Tensión |
| | Φ5/8" | 5cm, 10cm, 15cm | Tensión |
| | Φ3/8" | 5cm, 10cm, 15cm | Cortante |
| | Φ1/2" | 5cm, 10cm, 15cm | Cortante |
| | Φ5/8" | 5cm, 10cm, 15cm | Cortante |

5.3 INSTALACIÓN DE ANCLAJES

A continuación, se describe el procedimiento de instalación de los anclajes:

- a) Primero se demarca en las losas la ubicación de los anclajes y se demarca tanto en la losa como en la broca la profundidad de perforación.
- b) Se procede a realizar las perforaciones con el taladro teniendo en cuenta que el diámetro de la broca debe ser 1/8 de pulgada mayor que el diámetro de la barra a ensayar.



Figura 12:Perforación de los primeros anclajes. Fuente: Autor

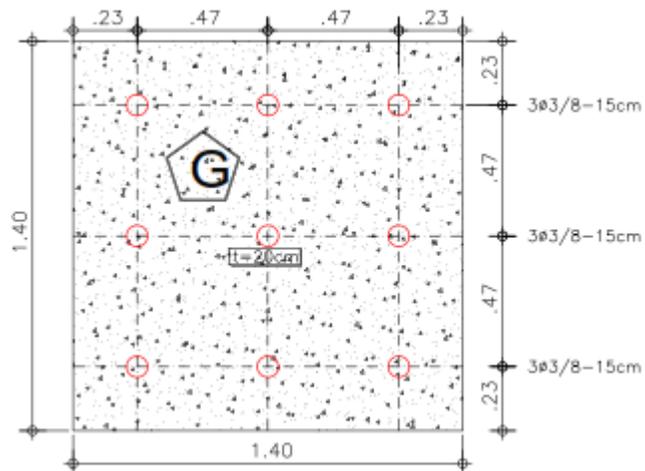


Figura 13:Distribución de perforaciones en losa de $t=20\text{cm}$ para profundidad de anclaje de 15cm en varillas de $\Phi 3/8"$. Fuente:

Autor.



Figura 14: Perforación de las losas con taladro rotopercutor. Fuente: Autor.

c) Se limpia la perforación de acuerdo con las indicaciones del producto epóxico utilizado. Esto es, limpiando con cepillo de cerdas de alambre, también conocido como churrusco, y posteriormente limpiando la perforación con aire a presión para eliminar los residuos; es recomendado que la operación de limpieza se realice tres veces.



Figura 15: Soplador para la limpieza de la perforación con aire a presión, cepillo de cerdas de alambre. Fuente: Autor.



Figura 16: Epóxico Sika Anchorfix 3001 y cepillos de cerdas de alambre y el dispositivo de aplicación del epóxico. Fuente:

Autor

d) Se introduce la boquilla hasta el fondo de la perforación inyectando el adhesivo hasta llenar $\frac{3}{4}$ de la misma.



Figura 17: Inyección del producto epóxico en la perforación. Fuente: Autor.

e) Se introduce la barra girándola lentamente hasta que toque el fondo de la perforación.

5.4 MONTAJE PARA LOS ENSAYOS

5.4.1. Ensayos no confinados a tensión.

En los ensayos no confinados se tienen en cuenta todas las posibles modalidades de fallas a tensión. A continuación, se presenta un ejemplo del montaje y el montaje final para estos ensayos.

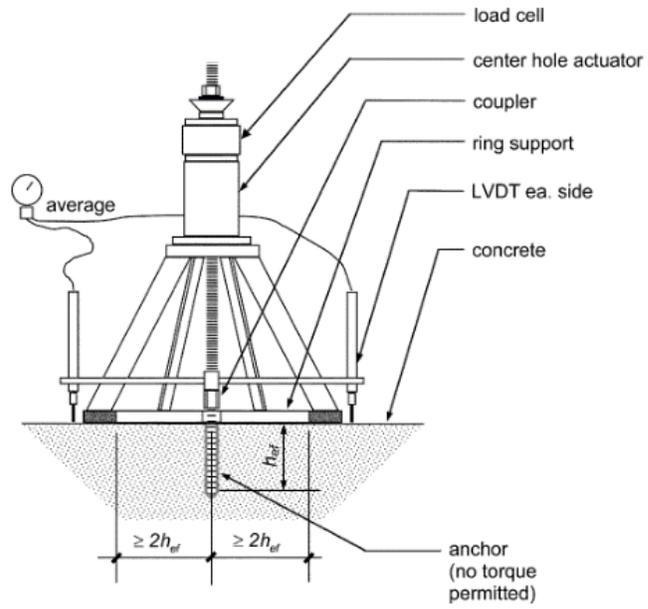


Figura 18: Ejemplo de montaje para ensayos no confinados a tensión. Fuente: ACI 355.4



Figura 19: Montaje Final para ensayos no confinados a tensión. Fuente: Autor

El montaje final está compuesto por cuatro (4) vigas metálicas, una platina metálica, una celda de carga, un cilindro de émbolo hueco, tuercas, arandelas y los anclajes a ensayar. Las vigas metálicas se separan a una distancia de 4 veces la profundidad de embebido del anclaje ($4h_{ef}$) como se muestra en el esquema de montaje.

5.4.2. Ensayos confinados a tensión.

A diferencia de los ensayos no confinados, en los ensayos confinados se descartan completamente todas las modalidades de falla excepto la falla del acero a través del uso de una platina que genera un confinamiento sobre la superficie del concreto. A continuación, se presenta un ejemplo del montaje y el montaje final para estos ensayos.

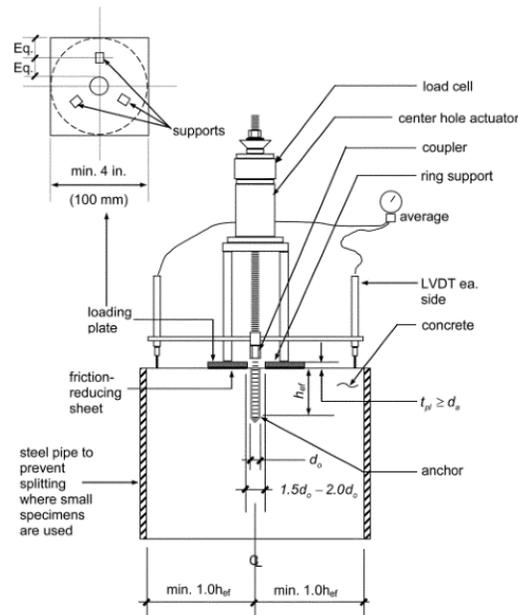


Figura 20: Ejemplo de montaje para ensayos confinados a tensión. Fuente: ACI 355.4-11.



Figura 21: Montaje final para ensayos confinados a tensión. Fuente: Autor.

El montaje final está compuesto por una platina metálica, una celda de carga, un cilindro de émbolo hueco, una platina, tuercas, arandelas y los anclajes a ensayar



Figura 22: Bomba hidráulica Fuente: Autor.



Figura 23: Consola de medición y pantalla de lectura digital Fuente: Autor.

5.4.3. Ensayos a cortante.

En estos ensayos se tienen en cuenta todas las posibles modalidades de fallas a cortante. A continuación, se presenta un ejemplo del montaje y el montaje final para estos ensayos.

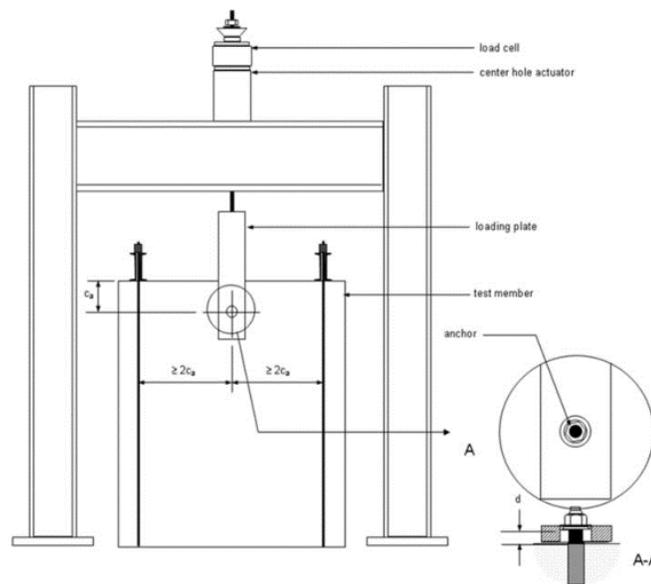


Figura 24: Ejemplo de montaje para ensayos de cortante. Fuente: ASTM E488-15.



Figura 25: Montaje final para ensayos a cortante. Fuente: Autor.

Este montaje está compuesto por la máquina universal, una platina metálica, arandela, tuerca y los anclajes a ensayar.

6. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE LOS ANCLAJES SEGUN ACI 318-19

Como se describió anteriormente, dependiendo de las solicitaciones y la modalidad de ensayo, los anclajes pueden presentar diferentes modalidades de falla. A continuación, se presenta el cálculo de la resistencia teórica de los anclajes para las modalidades de falla esperadas de los ensayos realizados, utilizando las ecuaciones propuestas en el reglamento colombiano NSR-10, así como en el reglamento americano ACI 318-19. En el Apéndice 1 de este documento se presentan ejemplos de cálculo de las resistencias de los anclajes según ACI 318-19.

6.1 Resistencia del acero de un anclaje en tracción

La resistencia a tracción de un anclaje se puede determinar de acuerdo con la ecuación planteada en el reglamento colombiano NSR-10 en la sección C-D.5.1 y en el reglamento americano ACI 318-19 en la sección 17.6.1, así:

$$N_{sa} = A_{se,N} f_{uta} \quad (17.6.1.2)$$

Donde $A_{se,N}$ es el área transversal efectiva de un anclaje en tracción, en mm², y f_{uta} no debe ser mayor que el menor de 1.9 F_{ye} ó 860 MPa.

$$A_{se,N} = \frac{\pi}{4} \left(d_a - \frac{0.9743}{n_t} \right)^2$$

n_t es el número de hilos por mm de roscado

Tabla 8: Resistencia teórica a tensión del acero ASTM A-193 B7. Fuente: Autor.

| Barra | diámetro d_a | diámetro d_a | n_t | n_t | $A_{se,N}$ | f_{uta} | N_{sa} |
|-------|-------------------|-------------------|-----------|----------|--------------------|-----------|----------|
| No. | (pul) | (mm) | Hilos/pul | Hilos/mm | (mm ²) | (MPa) | (kN) |
| 3 | 3/8 | 9.525 | 16 | 0.630 | 49.993 | 860 | 42.99 |
| 4 | 1/2 | 12.700 | 13 | 0.512 | 91.547 | 860 | 78.73 |
| 5 | 5/8 | 15.875 | 11 | 0.433 | 145.807 | 860 | 125.39 |

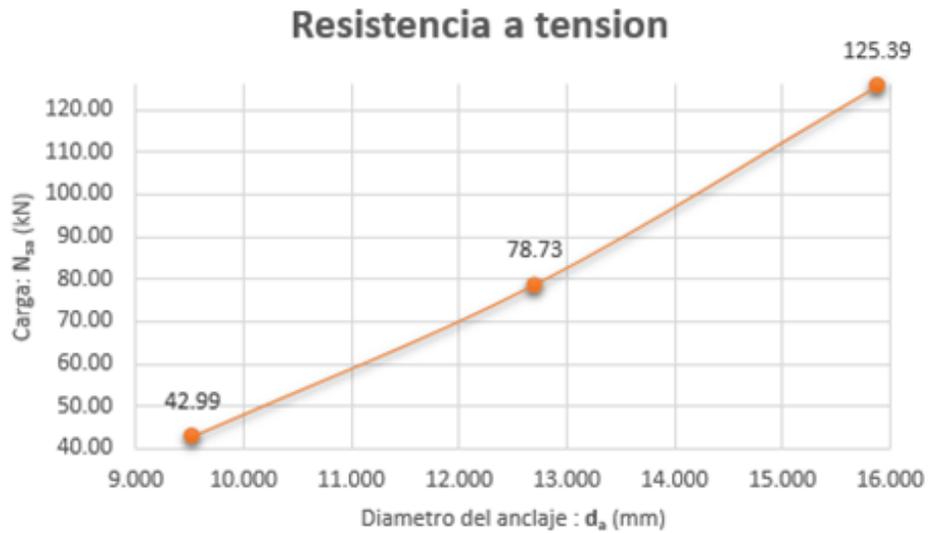


Figura 26: Resistencia a la tensión del acero ASTM A-193 B7 de acuerdo con el ACI 318-19. Fuente: Autor.

6.2 Resistencia al arrancamiento del concreto de un anclaje en tracción

La resistencia al arrancamiento del concreto de un anclaje se puede determinar de acuerdo con la ecuación planteada en el reglamento colombiano NSR-10 en la sección C-D.5.2 y en el reglamento americano ACI 318-19 en la sección 17.6.2, así:

$$N_{cb} = \frac{A_{NC}}{A_{NC0}} \Psi_{ed,N} \Psi_{c,N} \Psi_{cp,N} N_b \quad (17.6.2.1a)$$

$$N_b = k_c \lambda_a \sqrt{f'_c} h_{ef}^{1.5} \quad (17.6.2.2.1)$$

A_{NC} = área de falla proyectada en un anclaje solo, mm².

A_{NC0} = área proyectada del concreto en un anclaje solo cuando se encuentra limitada por la distancia al borde o el espaciamiento, mm².

$\Psi_{ed,N}$ = factor de modificación para arrancamiento del concreto.

$\Psi_{c,N}$ = factor de modificación para fisuración.

$\Psi_{cp,N}$ = factor de modificación para hendimiento del concreto.

k_c = coeficiente para la resistencia básica al arrancamiento del concreto en tracción.

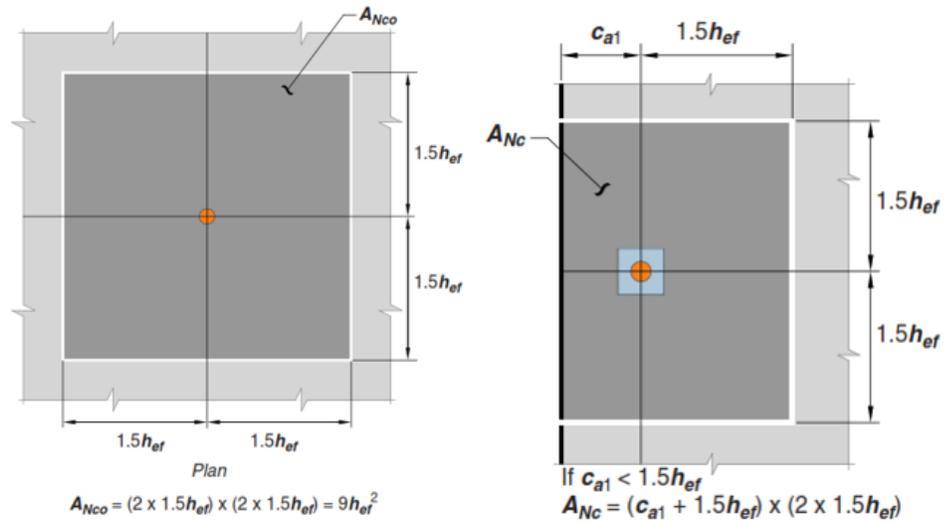


Figura 27: Definición de A_{NCO} y A_{NC} . Fuente ACI 318-19

Como $c_{a1} = 1.5h_{ef}$, entonces $A_{NC} = A_{NCO}$, así: $\frac{A_{NC}}{A_{NCO}} = 1$

Factor para arrancamiento del concreto: $\Psi_{ed,N}$

Si $C_{a,min} \geq 1.5 h_{ef}$, entonces $\Psi_{ed,N} = 1.0$ (17.6.2.4.1a)

Si $C_{a,min} < 1.5 h_{ef}$, entonces $\Psi_{ed,N} = 0.7 + 0.3 \frac{C_{a,min}}{1.5h_{ef}}$ (17.6.2.4.1b)

Factor para fisuración del concreto: $\Psi_{c,N}$

Como los anclajes son postinstalados, de acuerdo con 17.6.2.5.1 el valor de $\Psi_{c,N} = 1.4$

Factor para hendimiento del concreto: $\Psi_{cp,N}$

Si $C_{a,min} \geq C_{ac}$ entonces $\Psi_{cp,N} = 1.0$ (17.6.2.6.1a)

Si $C_{a,min} < C_{ac}$, entonces $\Psi_{cp,N} = \frac{C_{a,min}}{C_{ac}} \geq \frac{1.5h_{ef}}{C_{ac}}$ (17.6.2.6.1b)

De acuerdo con 17.6.2.2.1 $k_c=7$ para anclajes postinstalados

Tabla 9: Datos constantes para el cálculo de la resistencia teórica al arrancamiento. Fuente: Autor.

| | |
|--------------------|-----|
| A_{NC} / A_{NCO} | 1.0 |
| $\Psi_{ed,N}$ | 1.0 |
| $\Psi_{c,N}$ | 1.4 |
| $\Psi_{cp,N}$ | 1.0 |

| | |
|---------------------------------|-------|
| k_c (anclajes postinstalados) | 7 |
| f'_c (MPa) | 45.40 |
| | |

$\lambda_a = 0.8\lambda = 0.6$ de acuerdo con 17.2.4 (Tabla 17.2.4.1 del ACI 318-19)

$\lambda = 0.75$ por ser concreto liviano de acuerdo con la tabla 19.2.4.1(b) del ACI 318-19

Table 17.2.4.1—Modification factor λ_a for lightweight concrete

| Case | $\lambda_a^{(1)}$ |
|--|-------------------|
| Cast-in and undercut anchor concrete failure | 1.0 λ |
| Expansion, screw, and adhesive anchor concrete failure | 0.8 λ |
| Adhesive anchor bond failure per Eq. (17.6.5.2.1) | 0.6 λ |

⁽¹⁾ λ shall be in accordance with 19.2.4

Table 19.2.4.1(b)—Values of λ for lightweight concrete based on composition of aggregates

| Concrete | Composition of aggregates | λ |
|--------------------------------|---|-----------------------------|
| All-lightweight | Fine: ASTM C330 Coarse: ASTM C330 | 0.75 |
| Lightweight, fine blend | Fine: Combination of ASTM C330 and C33 Coarse: ASTM C330 | 0.75 to 0.85 ⁽¹⁾ |
| Sand-lightweight | Fine: ASTM C33 Coarse: ASTM C330 | 0.85 |
| Sand-lightweight, coarse blend | Fine: ASTM C33 Coarse: Combination of ASTM C330 and C33 | 0.85 to 1 ⁽²⁾ |

⁽¹⁾Linear interpolation from 0.75 to 0.85 is permitted based on the absolute volume of normalweight fine aggregate as a fraction of the total absolute volume of fine aggregate.

⁽²⁾Linear interpolation from 0.85 to 1 is permitted based on the absolute volume of normalweight coarse aggregate as a fraction of the total absolute volume of aggregate.

Tabla 10: Resistencia al arrancamiento del concreto de un anclaje a tracción según ACI 318-19. Fuente: Autor.

| h_{ef} (mm) | N_b (kN) | N_{cb} (kN) |
|------------------|---------------|------------------|
| 50 | 10.0 | 14.0 |
| 100 | 28.3 | 39.6 |
| 150 | 52.0 | 72.8 |
| 200 | 80.0 | 112.1 |
| 250 | 111.9 | 156.6 |
| 300 | 147.0 | 205.9 |
| 350 | 185.3 | 259.4 |

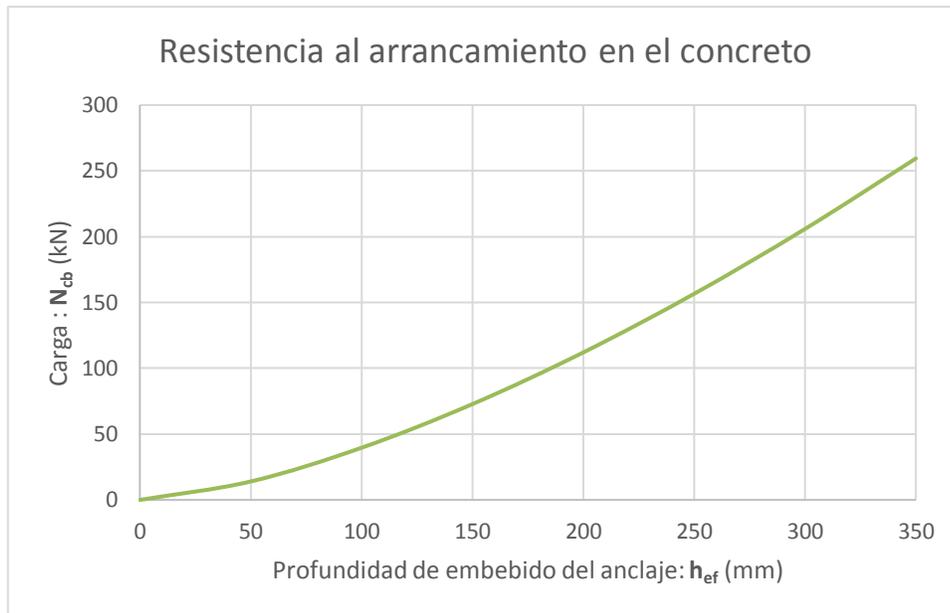


Figura 28: Resistencia al arrancamiento en el concreto según ACI 318-19. Fuente: Autor.

6.3 Resistencia a la adherencia en tracción de anclajes adheridos

La resistencia a la adherencia en tracción de un anclaje se puede determinar de acuerdo con la ecuación planteada en el reglamento americano ACI 318-19 en la sección

17.6.5, así:

$$N_a = \frac{A_{Na}}{A_{Na0}} \Psi_{ed,Na} \Psi_{cp,Na} N_{ba} \quad (17.6.5.1a)$$

$$N_{ba} = \lambda_a \tau_{cr} \pi d_a h_{ef} \quad (17.6.5.2.1)$$

A_{Na} = área de influencia proyectada de un solo anclaje, mm².

A_{Na0} = área de influencia proyectada de un solo anclaje a la adherencia a tracción si no está limitada por la distancia al borde o la separación, mm².

$\Psi_{ed,Na}$ = factor de modificación para arrancamiento del concreto.

$\Psi_{cp,Na}$ = factor de modificación de hendimiento por adherencia.

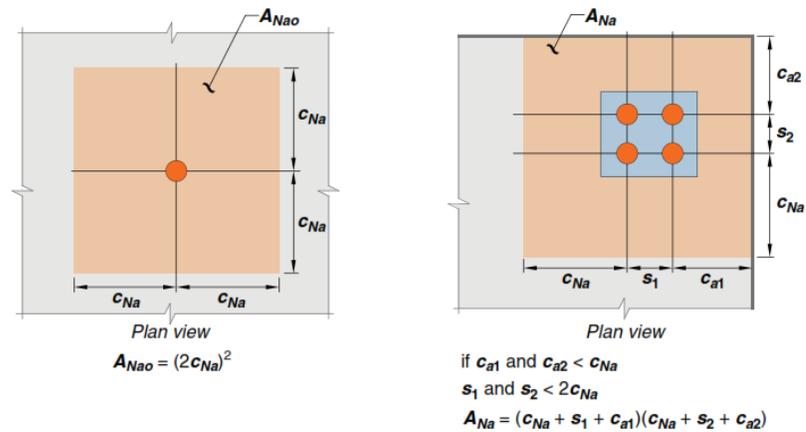


Figura 29: Definición de A_{Na} y A_{Na0} . Fuente: ACI318-19

$$A_{Na} = (2C_{Na})^2, \text{ según 17.6.5.1.1}$$

$$A_{Na0} = (2C_{Na})^2 \quad (17.6.5.1.2a)$$

$$\frac{A_{Nc}}{A_{Nc0}} = 1$$

$$C_{Na} = 10 d_a \sqrt{\frac{T_{uncr}}{7.6}} \quad (17.6.5.1.2b)$$

Factor de arrancamiento del concreto: $\Psi_{ed,Na}$

Si $C_{a,min} \geq C_{Na}$, entonces $\Psi_{ed,Na} = 1.0$ (17.6.5.4.1a)

Si $C_{a,min} < C_{Na}$, entonces $\Psi_{ed,Na} = 0.7 + 0.3 \frac{C_{a,min}}{C_{Na}}$ (17.6.5.4.1b)

Factor de hendimiento por adherencia: $\Psi_{cp,Na}$

Si $C_{a,min} \geq C_{ac}$ entonces $\Psi_{cp,Na} = 1.0$ (17.6.5.5.1a)

Si $C_{a,min} < C_{ac}$, entonces $\Psi_{cp,Na} = \frac{C_{a,min}}{C_{ac}} \geq \frac{C_{Na}}{C_{ac}}$ (17.6.5.5.1b)

Tabla 11: Datos constantes para el cálculo de la resistencia teórica a la adherencia. Fuente: Autor

| | |
|--------------------|-----|
| A_{Na} / A_{Na0} | 1.0 |
| $\Psi_{ed,Na}$ | 1.0 |
| $\Psi_{cp,Na}$ | 1.0 |
| τ_{cr} | 9.3 |

τ_{cr} : esfuerzo de adherencia

El valor del esfuerzo de adherencia para el adhesivo epóxico Sika Anchorfix-3001 empleado en todos los ensayos es de 9.30 MPa o 1350 psi. (SIKA 2017, ICC-ESR-3608). De acuerdo con 17.6.5.2.4 puede tomarse τ_{uncl} en lugar de τ_{cr} para anclajes adheridos.

Tabla 12: Resistencia a la adherencia según ACI 318-19. Fuente: Autor

| Barra | d_a (mm) | h_{ef} (mm) | N_{ba} (kN) | N_a (kN) |
|-------|------------|---------------|---------------|------------|
| 3/8 | 9.5 | 50 | 8.4 | 8.4 |
| | | 100 | 16.7 | 16.7 |
| | | 150 | 25.1 | 25.1 |
| 1/2 | 12.7 | 50 | 11.1 | 11.1 |
| | | 100 | 22.3 | 22.3 |
| | | 150 | 33.4 | 33.4 |
| 5/8 | 15.9 | 50 | 13.9 | 13.9 |
| | | 100 | 27.8 | 27.8 |
| | | 150 | 41.7 | 41.7 |

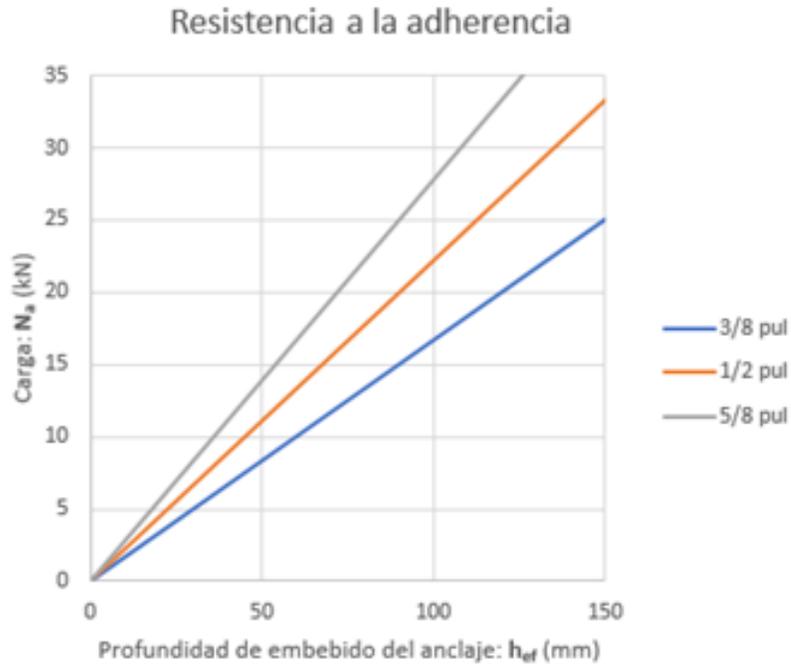


Figura 30: Resistencia a la adherencia según ACI 318-19. Fuente: Autor.

6.4 Modalidad de falla de anclajes a tracción de acuerdo con ACI 318-19

Según los resultados obtenidos de resistencia dada por el ACI 318-19 se puede determinar para diferentes profundidades de embebido la modalidad de falla que predomina para los diámetros de barra ASTM A-193 B7 empleados en la investigación.

Modalidad de falla en barras $\Phi 3/8''$

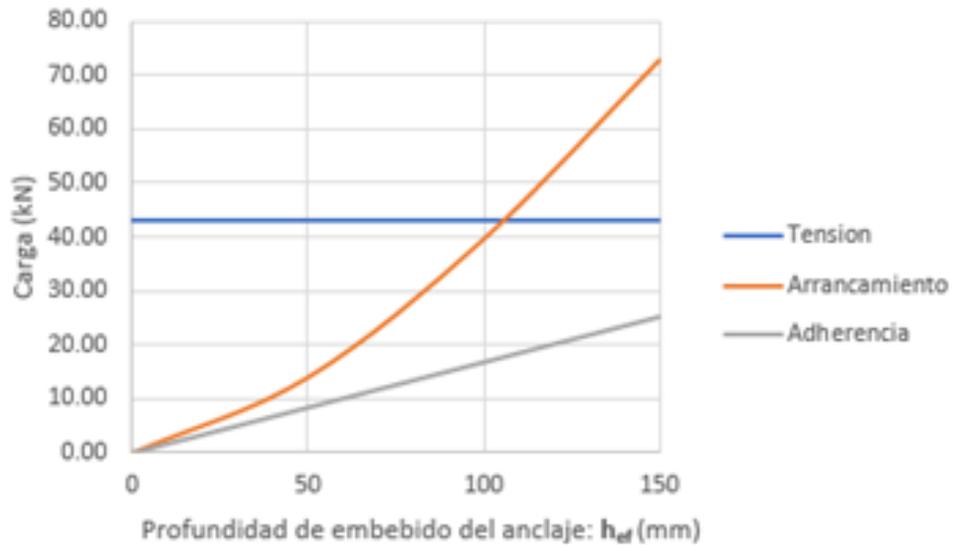


Figura 31: Modalidad de falla para barras $\Phi 3/8''$ ASTM A-193 B7 según ACI 318-19. Fuente: Autor.

Modalidad de falla en barras $\Phi 1/2''$

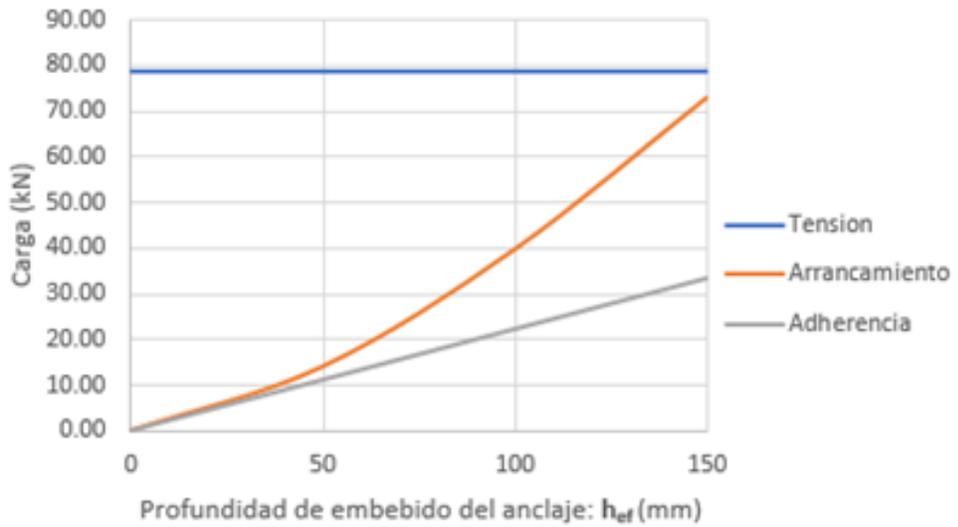


Figura 32: Modalidad de falla para barras $\Phi 1/2''$ ASTM A-193 B7 según ACI 318-19. Fuente: Autor.

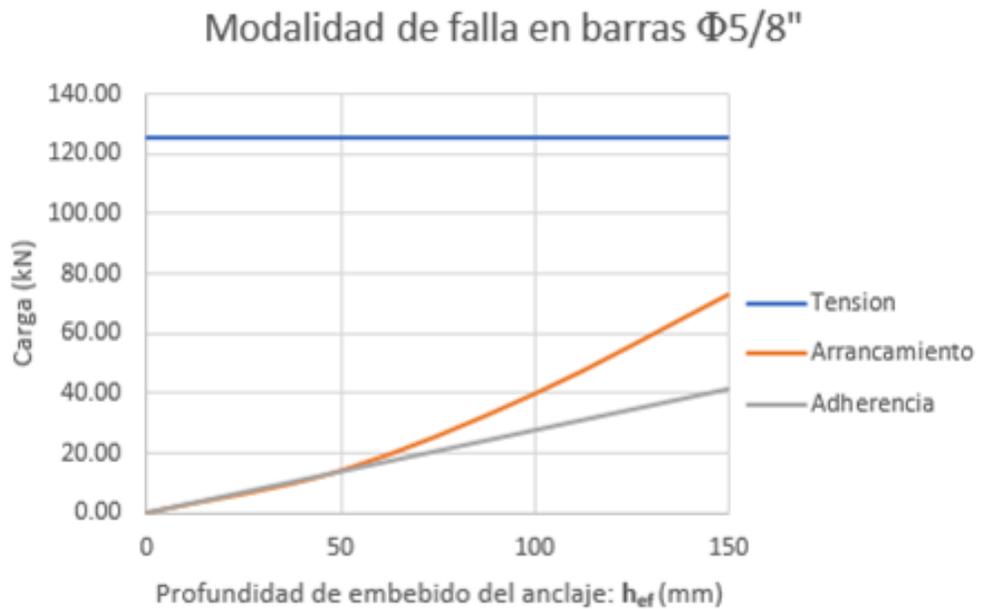


Figura 33: Modalidad de falla para barras $\Phi 5/8''$ ASTM A-193 B7 según ACI 318-19. Fuente: Autor.

De la gráfica 28 se observa que para diámetros de $\Phi 3/8''$ fallaría primero por adherencia seguida de falla por arrancamiento y luego falla por tensión en el acero para profundidades menores a 110 mm, pero a profundidades mayores a 110 mm fallaría primero por adherencia, seguida por la falla a tensión y finalmente por arrancamiento. Mientras que de las gráficas 29 y 30 para los diámetros de $\Phi 1/2''$ y $\Phi 5/8''$ falla primero por adherencia seguida de arrancamiento del concreto para cualquier profundidad del anclaje.

6.5 Resistencia del acero del anclaje sometido a cortante

La resistencia a cortante de un anclaje se puede determinar de acuerdo con la ecuación planteada en el reglamento colombiano NSR-10 en la sección C-D.6.1 y en el reglamento americano ACI 318-19 en la sección 17.7.1, así:

$$V_{sa} = 0.6A_{seV}f_{uta} \quad (17.7.1.2b)$$

$$f_{uta} = \min(1.9F_y, 860 \text{ MPa})$$

A_{seV} = área efectiva de la sección transversal del anclaje en cortante, mm^2 .

$$A_{se,V} = \frac{\pi}{4} \left(d_a - \frac{0.9743}{n_t} \right)^2$$

n_t es el número de hilos por mm de roscado

Tabla 13: Resistencia a cortante del acero ASTM A-193 B7 Fuente: Autor.

| Φ (pul) | Φ (mm) | Paso | $A_{se,v}$ (mm ²) | f_{ya} (Mpa) | f_{uta} (MPa) | V_{sa} (kN) |
|--------------|-------------|------|----------------------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| 3/8 | 9.53 | 0.63 | 49.99 | 720 | 860 | 25.8 |
| 1/2 | 12.70 | 0.51 | 91.55 | 720 | 860 | 47.2 |
| 5/8 | 15.88 | 0.43 | 145.81 | 720 | 860 | 75.2 |

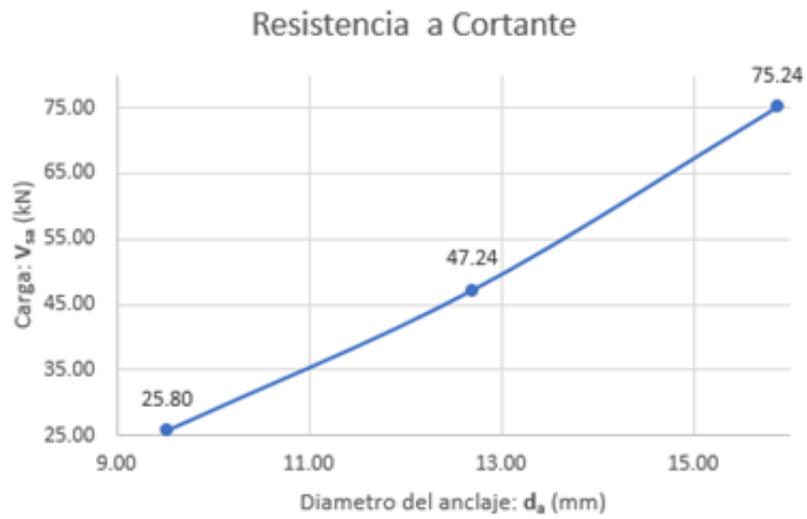


Figura 34: Resistencia a cortante del acero ASTM A-193 B7 según ACI 318-19. Fuente: Autor.

7. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Una vez calculados los valores de resistencia teórica de los anclajes se procedió a ensayar los anclajes de acuerdo a la metodología descrita anteriormente. En total se ensayaron 154 anclajes distribuidos de la siguiente manera: 60 a tensión confinada y 55 a tensión no confinada, y 39 a cortante.

7.1 Ensayos confinados a tensión

Se realizaron 60 ensayos distribuidos por cada diámetro y profundidad de embebido, en los cuales, el comportamiento de falla fue el esperado, presentándose dos tipos de falla: falla del acero en varillas de 3/8" y 1/2" a profundidades 100mm y 150mm, falla por adherencia en profundidad de 50mm., mientras que en las varillas de 5/8" todos los anclajes fallaron por adherencia.

Tabla 14: Carga promedio de falla para barras $\Phi 3/8$ ". Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad (mm) | Carga promedio (kN) | Modalidad de falla | Desviación estándar | Coefficiente de variación |
|--------------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|
| $\Phi 3/8$ " | 50 | 28.9 | Adherencia | 11.53 | 39.9% |
| $\Phi 3/8$ " | 100 | 45.8 | Acero | 0.81 | 1.8% |
| $\Phi 3/8$ " | 150 | 44.1 | Acero | 3.33 | 7.5% |

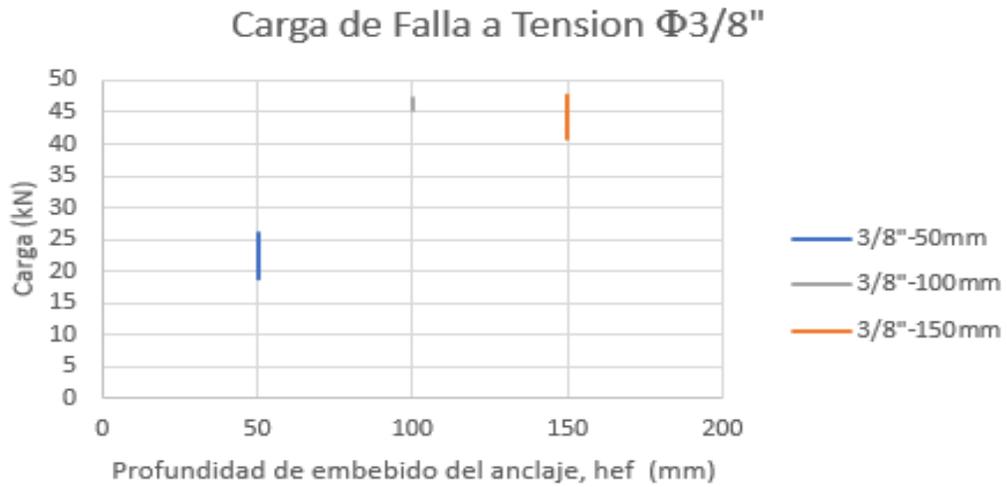


Figura 35: Cargas de falla para barras $\Phi 3/8''$. Fuente: Autor.

Tabla 15: Carga promedio de falla para barras $\Phi 1/2''$. Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad (mm) | Carga promedio (kN) | Modalidad de falla | Desviación estándar | Coefficiente de variación |
|--------------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|
| $\Phi 1/2''$ | 50 | 19.1 | Adherencia | 1.46 | 7.7% |
| $\Phi 1/2''$ | 100 | 82.5 | Acero | 6.50 | 7.9% |
| $\Phi 1/2''$ | 150 | 82.5 | Acero | 11.52 | 7.5% |

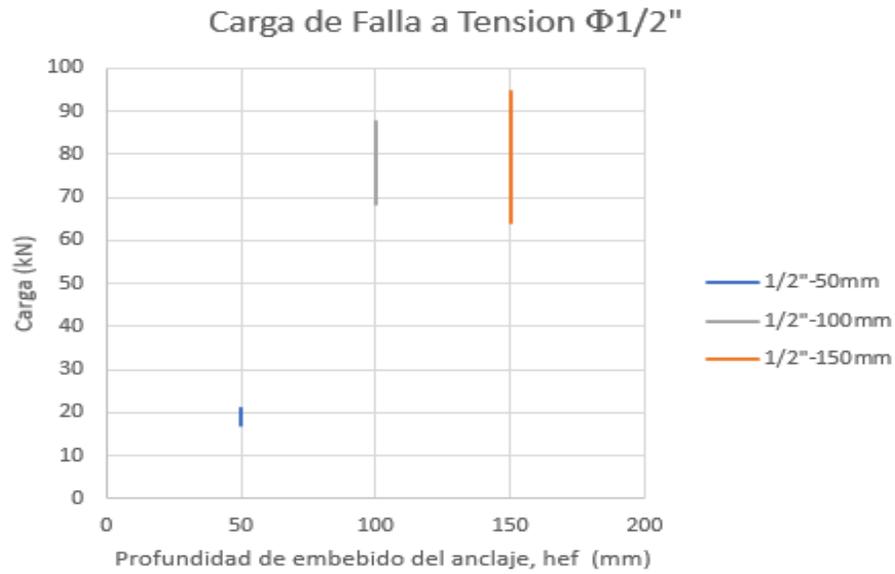


Figura 36: Cargas de falla para barras $\Phi 1/2''$. Fuente: Autor.

Tabla 16: Carga promedio de falla para barras $\Phi 5/8''$ Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad (mm) | Carga promedio (kN) | Modalidad de falla | Desviación estándar | Coefficiente de variación |
|--------------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|
| $\Phi 5/8''$ | 50 | 26.1 | Adherencia | 1.55 | 5.9% |
| $\Phi 5/8''$ | 100 | 83.9 | Adherencia | 23.97 | 28.4% |
| $\Phi 5/8''$ | 150 | 107.1 | Adherencia | 10.95 | 10.2% |

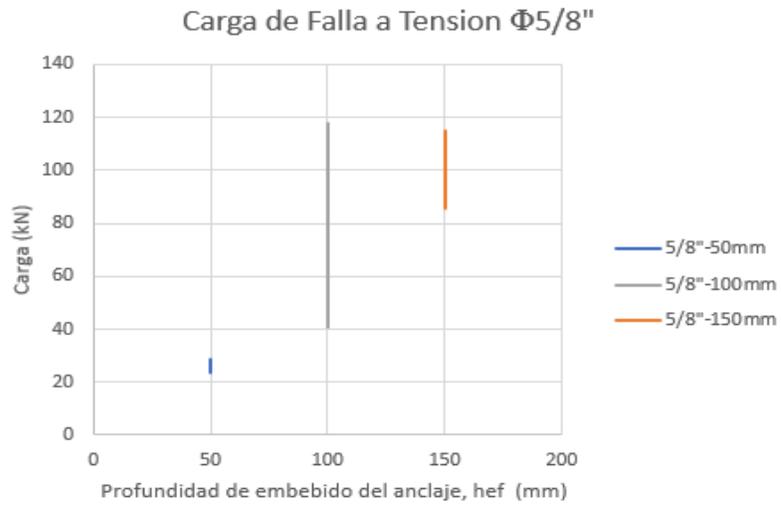


Figura 37: Cargas de falla para barras $\Phi 5/8"$. Fuente: Autor.



Figura 38: Anclaje $\Phi 3/8"$ en ensayo confinado a tensión. Falla por adherencia. Fuente: Autor.



Figura 39: Anclaje $\Phi 1/2''$ en el momento de realizar el ensayo confinado a tensión. Falla por adherencia. Fuente: Autor.



Figura 40: Falla por adherencia de anclaje $\Phi 1/2''$ a profundidad de embebido igual a 50 mm. Fuente: Autor.

7.2 Ensayos no confinados a tensión

Se realizaron ensayos para cada diámetro y profundidad de embebido para un total de 55 ensayos, en los cuales, el comportamiento de falla fue de los tres tipos por Adherencia, por arrancamiento del concreto y por falla del acero.

En estos ensayos se presentaron tres (3) modalidades de fallas: falla del acero, arrancamiento del concreto y falla de adherencia.

Tabla 17: Carga promedio y modalidad de falla para barras $\Phi 3/8"$. Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad (mm) | Carga promedio (kN) | Modalidad de falla | Desviación estándar | Coefficiente de variación |
|-------------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|
| $\Phi 3/8"$ | 50 | 31.0 | Concreto | 10.65 | 34.3% |
| $\Phi 3/8"$ | 100 | 45.2 | Acero | 2.18 | 4.8% |
| $\Phi 3/8"$ | 150 | 47.3 | Acero | 3.31 | 7.0% |

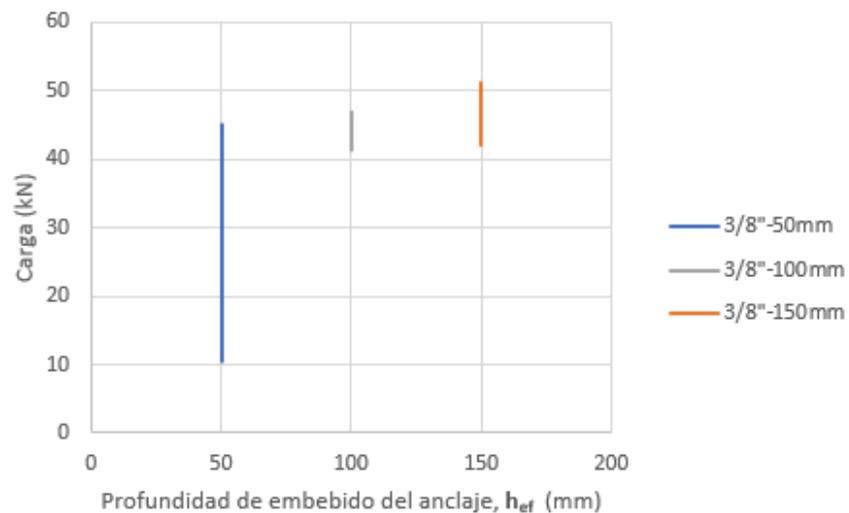


Figura 41: Cargas de falla para barras $\Phi 3/8"$. Fuente: Autor.

Tabla 18: Carga promedio y modalidad de falla para barras $\Phi 1/2"$. Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad (mm) | Carga promedio (kN) | Modalidad de falla | Desviación estándar | Coefficiente de variación |
|-------------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|
| $\Phi 1/2"$ | 50 | 29.9 | Concreto | 7.09 | 23.7% |
| $\Phi 1/2"$ | 100 | 40.1 | Concreto | 5.52 | 13.8% |
| $\Phi 1/2"$ | 150 | 86.0 | Acero y Concreto | 3.39 | 3.9% |

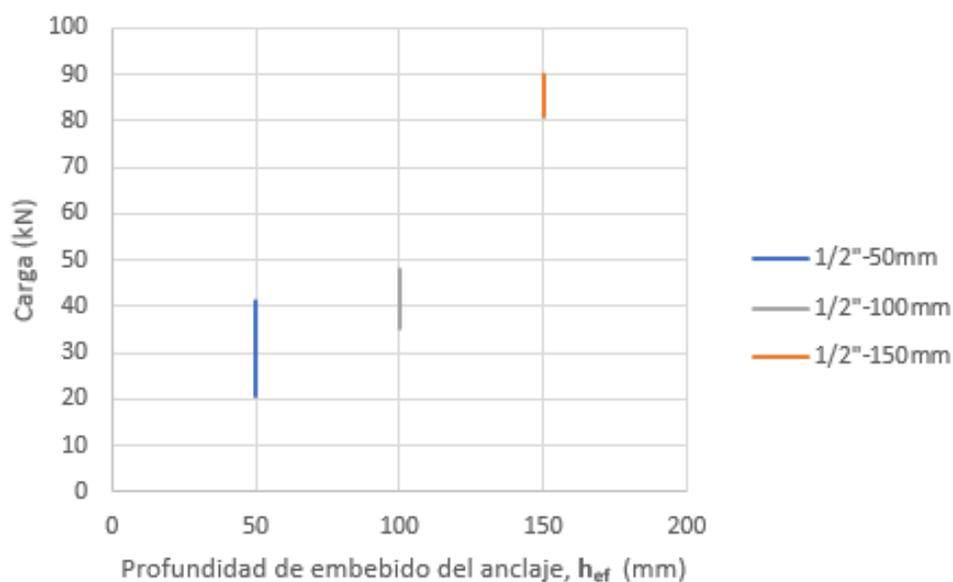


Figura 42: Cargas de falla para barras $\Phi 1/2"$. Fuente: Autor.

Tabla 19: Carga promedio y modalidad de falla para barras $\Phi 5/8"$. Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad (mm) | Carga promedio (kN) | Modalidad de falla | Desviación estándar | Coefficiente de variación |
|-------------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|
| $\Phi 5/8"$ | 50 | 21.8 | Concreto | 4.01 | 18.4% |
| $\Phi 5/8"$ | 100 | 62.5 | Concreto | 16.03 | 25.7% |
| $\Phi 5/8"$ | 150 | 90.9 | Concreto | 10.92 | 12.0% |

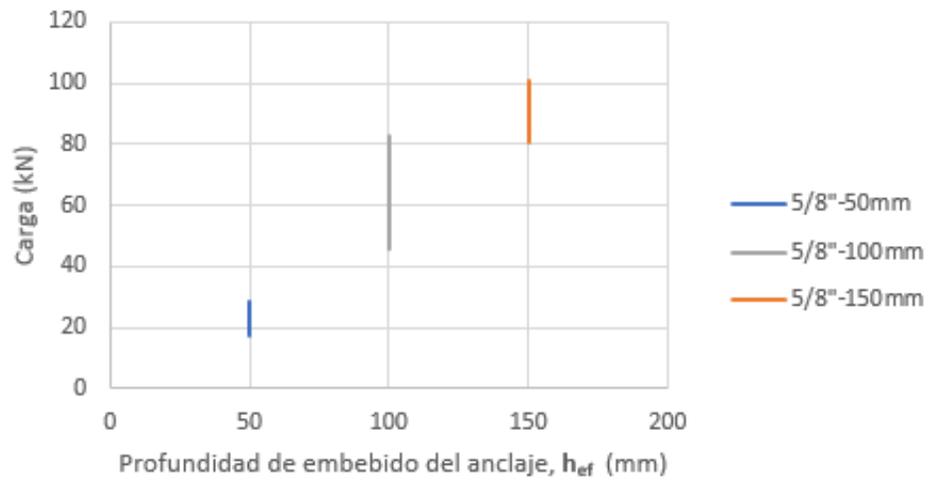


Figura 43: Cargas de falla para barras $\Phi 5/8"$. Fuente: Autor.



Figura 44: Falla por arrancamiento del concreto $\Phi 1/2"$ a profundidad de embebido 150 mm. Fuente: Autor.



Figura 45: Falla por arrancamiento del concreto con extracción de anclaje $\Phi 5/8$ " a profundidad de embebido de 100 mm.

Fuente: Autor.



Figura 46: Falla por arrancamiento del concreto con extracción de anclaje $\Phi 5/8$ " a profundidad de embebido de 150 mm.

Fuente: Autor.

7.3 Ensayos a cortante

Se realizaron 13 ensayos para cada diámetro y profundidad de embebido para un total de 39 ensayos, en los cuales, se presentaron dos tipos de fallas debidas a concreto y acero.

Tabla 20: Carga promedio de falla para barras Φ 3/8". Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad (mm) | Carga promedio (kN) | Modalidad de falla | Desviación estándar | Coefficiente de variación |
|-------------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|
| Φ 3/8" | 50 | 21.5 | Concreto | 2.19 | 10.2% |
| Φ 3/8" | 100 | 31.4 | Acero | 1.53 | 4.9% |
| Φ 3/8" | 150 | 32.8 | Acero | 0.54 | 1.6% |

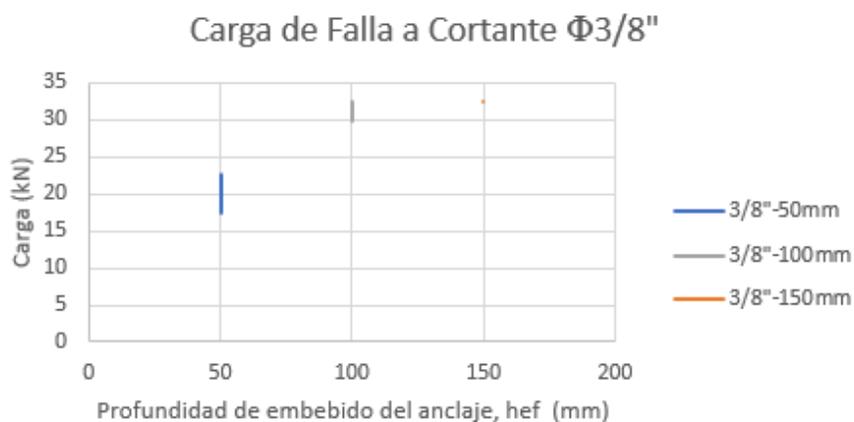


Figura 47: Cargas de falla para barras Φ 3/8". Fuente: Autor.

Tabla 21: Carga promedio de falla para barras Φ 1/2". Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad (mm) | Carga promedio (kN) | Modalidad de falla | Desviación estándar | Coefficiente de variación |
|-------------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|
| Φ 1/2" | 50 | 25.2 | Concreto | 1.98 | 7.9% |
| Φ 1/2" | 100 | 47.3 | Acero | 4.50 | 9.5% |
| Φ 1/2" | 150 | 62.6 | Acero | 18.08 | 28.9% |

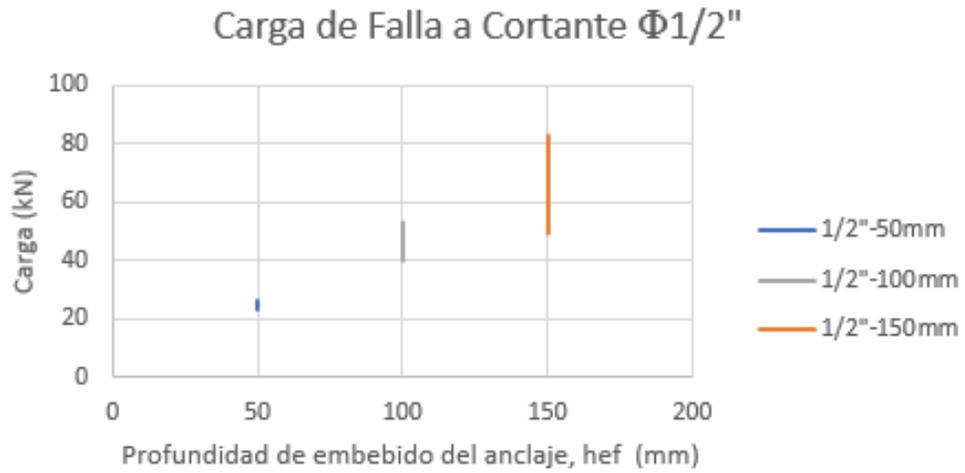


Figura 48: Cargas de falla para barras $\Phi 1/2''$. Fuente: Autor.

Tabla 22: Carga promedio de falla para barras $\Phi 5/8''$. Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad (mm) | Carga promedio (kN) | Modalidad de falla | Desviación estándar | Coficiente de variación |
|--------------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|
| $\Phi 5/8''$ | 50 | 19.9 | Concreto | 1.07 | 5.4% |
| $\Phi 5/8''$ | 100 | 56.6 | Concreto | 5.71 | 4.8% |
| $\Phi 5/8''$ | 150 | 100.2 | Acero | 4.85 | 4.8% |

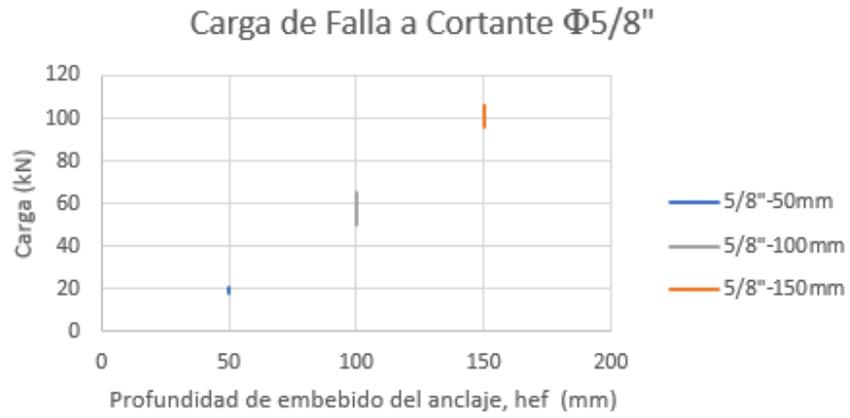


Figura 49: Cargas de falla para barras $\Phi 5/8''$. Fuente: Autor.



Figura 50: Anclaje $\Phi 1/2''$ ensayo a corte. Falla del Concreto. Fuente: Autor.



Figura 51: Anclaje $\Phi 1/2$ " ensayo a corte. Falla del acero. Fuente: Autor.



Figura 52: Ensayo de Cortante $\Phi 1/2$ ". Corte total del anclaje por falla del acero. En este ensayo se presenta Falla del concreto.

Fuente: Autor.

8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Con los valores de resistencia teórica obtenidos de las ecuaciones de los reglamentos, y los valores de resistencia real obtenidos de los ensayos ejecutados se procede a realizar una comparación de los dos, calculando el coeficiente de reducción de resistencia producto de esta comparación.

8.1 Relación Carga Experimental a Carga según ACI 318-19.

Para el propósito de esta investigación, la Relación carga experimental a carga según ACI 318-19 (RET) se calcula como el valor de la carga promedio de falla obtenida de los ensayos dividida por el valor de la carga teórica, como se muestra a continuación:

$$RET = \frac{\text{Carga experimental promedio de falla}}{\text{Carga de falla según ACI 318 - 19}}$$

8.2 Ensayos confinados a tensión

Para los ensayos confinados a tensión con barras se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 23:Relacion RET para ensayos confinados a tensión. Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad, h_{ef} | Carga prom. | Modalidad de Falla | Carga según ACI 318-19 | RET |
|-------|--------------------------|----------------|-----------------------|------------------------------|------|
| | (mm) | (kN) | | (kN) | |
| Φ3/8" | 50 | 28.91 | Adherencia | 8.35 | 3.46 |
| | 100 | 45.82 | Acero | 42.99 | 1.07 |
| | 150 | 44.10 | Acero | 42.99 | 1.03 |
| Φ1/2" | 50 | 19.07 | Adherencia | 11.13 | 1.71 |
| | 100 | 82.48 | Acero | 78.73 | 1.05 |
| | 150 | 82.51 | Acero | 78.73 | 1.05 |
| Φ5/8" | 50 | 26.13 | Adherencia | 13.91 | 1.88 |
| | 100 | 83.92 | Adherencia | 27.83 | 3.02 |
| | 150 | 107.14 | Adherencia | 41.74 | 2.57 |

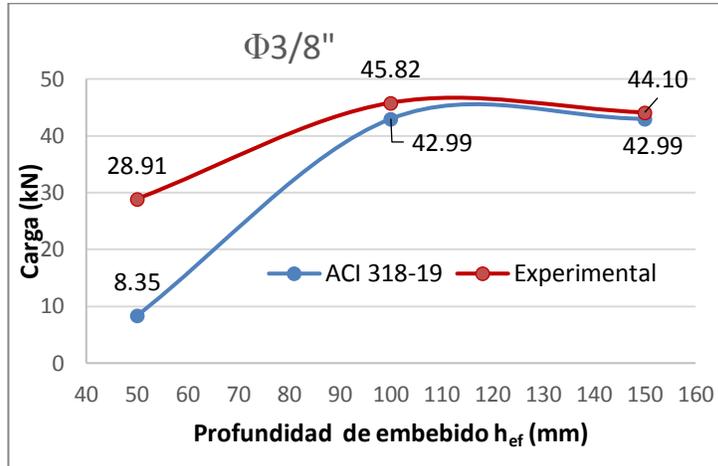


Figura 53: Resistencia según ACI 318-19 y experimental de ensayos a tensión confinados para $\Phi 3/8''$. Fuente: Autor.

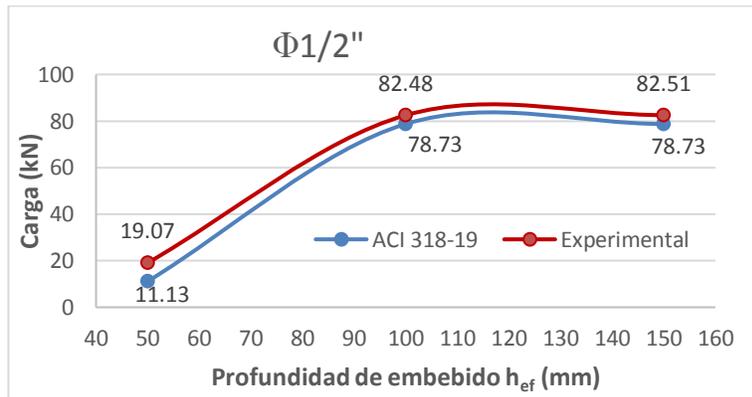


Figura 54: Resistencia según ACI 318-19 y experimental de ensayos a tensión confinados para $\Phi 1/2''$. Fuente: Autor.

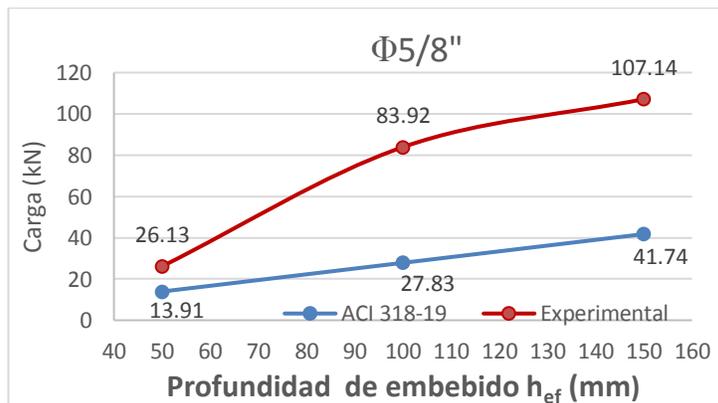


Figura 55: Resistencia según ACI 318-19 y experimental de ensayos a tensión confinados para $\Phi 5/8''$. Fuente: Autor.

8.3 Ensayos no confinados a tensión

Para los ensayos no confinados a tensión con barras ASTM A-193 B7 se aprecia que las modalidades de falla obtenidas en los ensayos van de acuerdo con la modalidad de falla, y se ha tomado el promedio de la modalidad de falla teórica para compararla con la carga promedio teórica pudiendo así calcular el coeficiente de reducción.

Tabla 24: Comparación de carga y modalidad de falla real y teórica. Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad (mm) | Carga Experimental (kN) | Modalidad de falla | Carga ACI 318-19 (kN) | RET |
|-------|------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------|------|
| Φ3/8" | 50 | 31.02 | ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO | 18.60 | 1.67 |
| | 100 | 45.17 | ACERO | 42.99 | 1.05 |
| | 150 | 47.33 | ACERO | 42.99 | 1.10 |
| Φ1/2" | 50 | 29.92 | ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO | 18.60 | 1.61 |
| | 100 | 40.08 | ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO | 39.60 | 1.01 |
| | 150 | 86.03 | ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO | 72.80 | 1.18 |
| Φ5/8" | 50 | 21.79 | ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO | 18.60 | 1.17 |
| | 100 | 62.48 | ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO | 39.60 | 1.58 |
| | 150 | 90.87 | ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO | 72.80 | 1.25 |

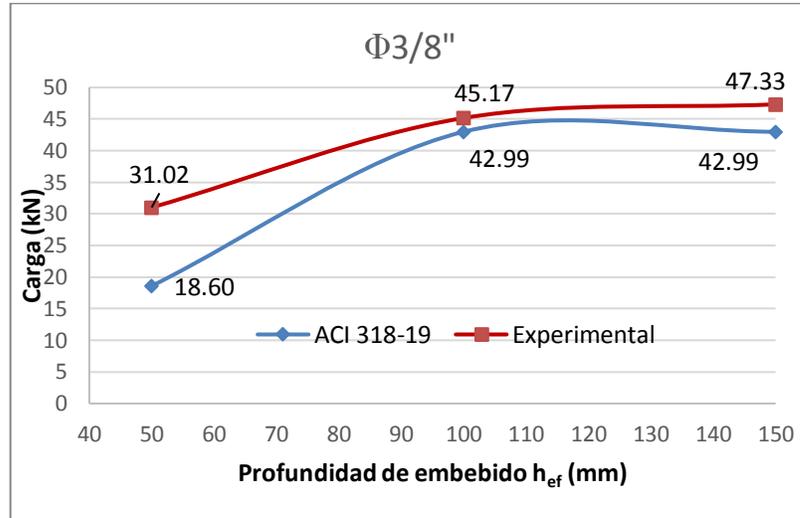


Figura 56: Resistencia ACI 318-19 y experimental de ensayos a tensión no confinados para $\Phi 3/8''$. Fuente: Autor.

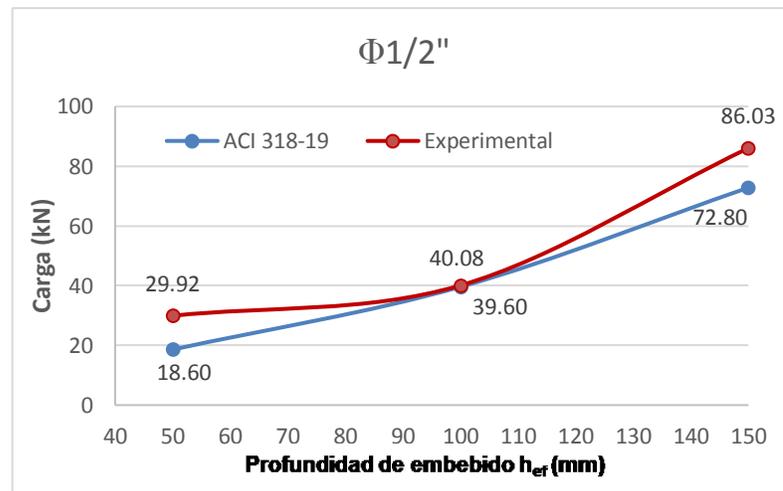


Figura 57: Resistencia ACI 318-19 y experimental de ensayos a tensión no confinados para $\Phi 1/2''$. Fuente: Autor.

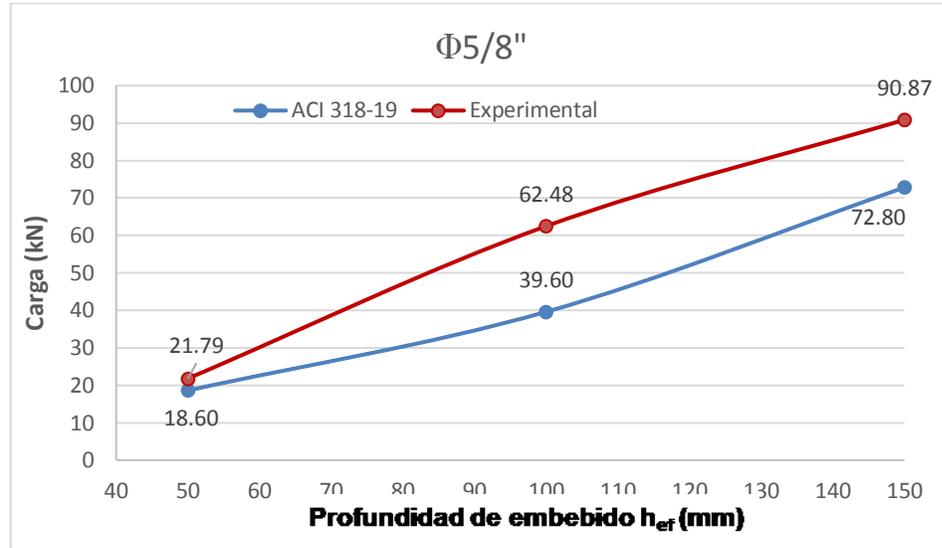


Figura 58: Resistencia ACI 318-19 y experimental de ensayos a tensión no confinados para $\Phi 5/8"$. Fuente: Autor.

8.4 Ensayos a cortante

Para los ensayos a cortante con barras ASTM A-193 B7 se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 25: Relación RET para ensayos a cortante. Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad, h_{ef} | Carga promedio | Modalidad de Falla | Carga ACI 318-19 | RET |
|-------------|-----------------------|----------------|--------------------|------------------|------|
| | (mm) | | | (kN) | |
| $\Phi 3/8"$ | 50 | 21.5 | Concreto | 18.60 | 1.15 |
| | 100 | 31.4 | Acero | 25.8 | 1.22 |
| | 150 | 32.8 | Acero | 25.8 | 1.27 |
| $\Phi 1/2"$ | 50 | 25.2 | Concreto | 18.60 | 1.35 |
| | 100 | 47.3 | Acero | 47.24 | 1.00 |
| | 150 | 62.6 | Acero | 47.24 | 1.33 |
| $\Phi 5/8"$ | 50 | 19.9 | Concreto | 18.60 | 1.07 |
| | 100 | 56.6 | Concreto | 39.60 | 1.43 |
| | 150 | 100.2 | Acero | 75.24 | 1.33 |

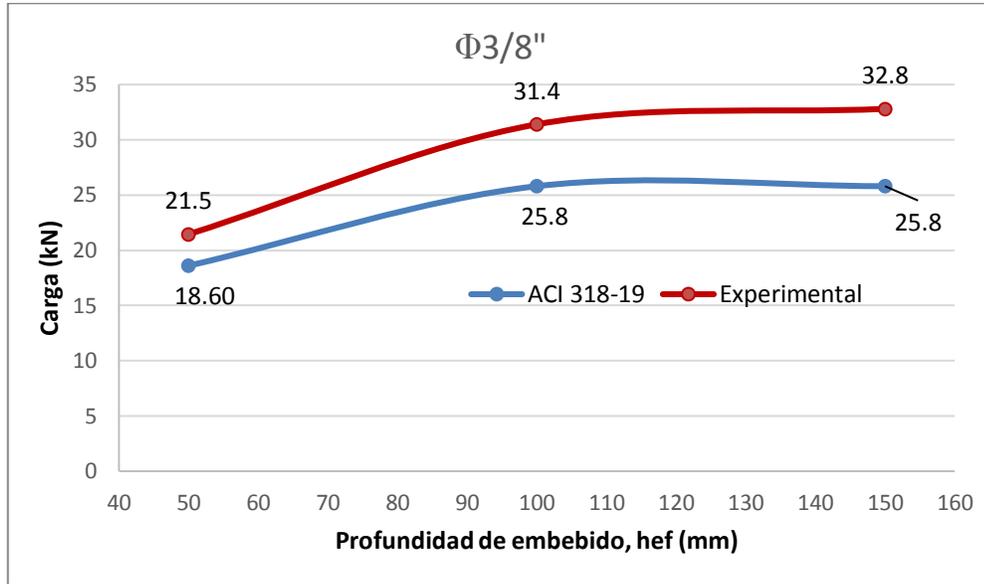


Figura 59: Resistencia ACI 318-19 y experimental de ensayos a cortante para Φ3/8". Fuente: Autor.

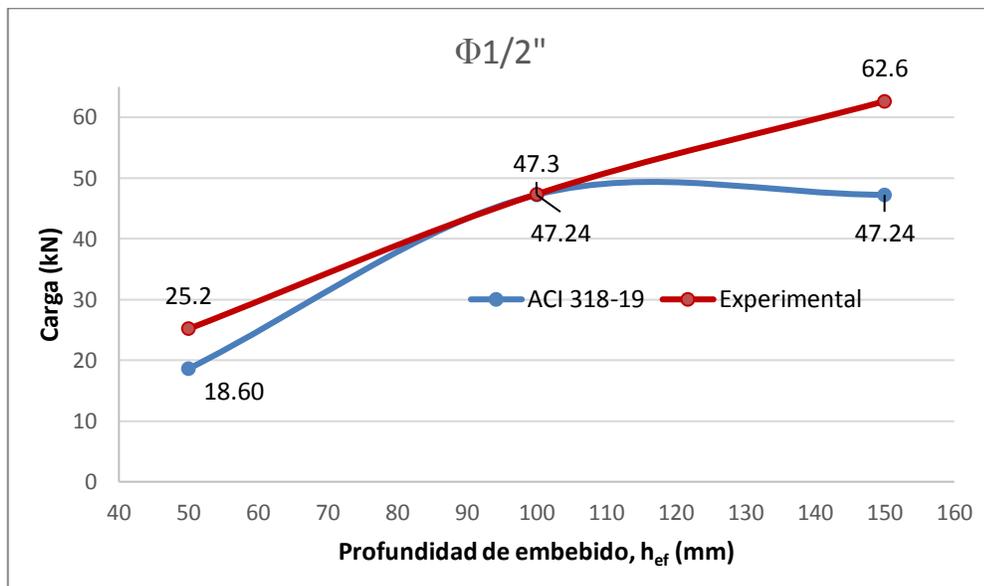


Figura 60: Resistencia ACI 318-19 y experimental de ensayos a cortante para Φ1/2". Fuente: Autor.

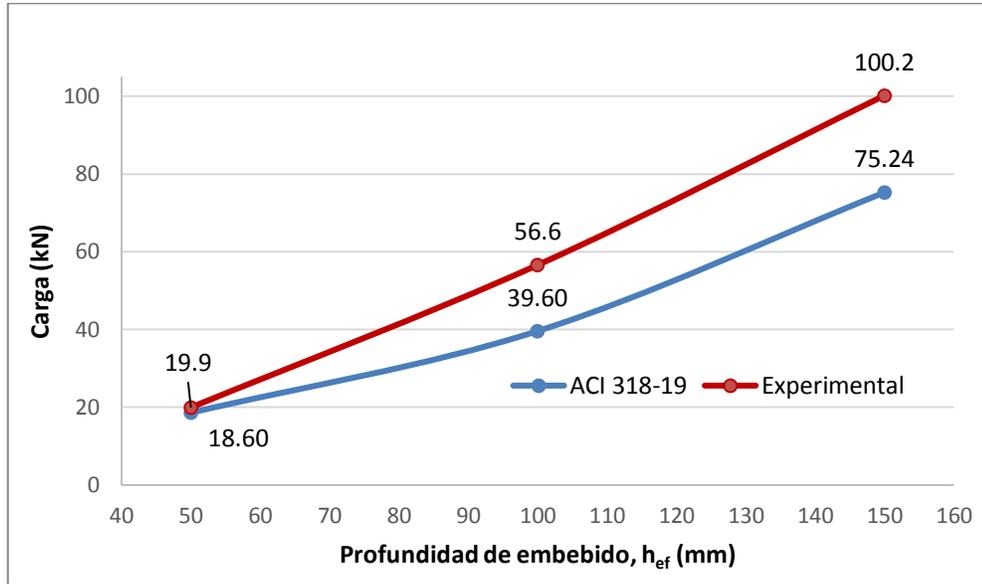


Figura 61: Resistencia ACI 318-19 y experimental de ensayos a cortante para $\Phi 5/8$ ". Fuente: Autor.

9. ANALISIS COMPARATIVO ENTRE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS SOBRE EL TEMA DE ANCLAJES EN LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA.

Para analizar el comportamiento de anclajes postinstalados de acero empernados y corrugados en concretos de alta resistencia y en concretos livianos, se procedió a extraer la información teórica y los datos experimentales de las tres investigaciones realizadas y compararlas entre sí como también con este trabajo de investigación.

Tabla 26: Cuadro comparativo de Investigaciones sobre anclajes en la ECI

| COMPARATIVO DE RESULTADOS DE LAS CUATRO TESIS SOBRE ANCLAJES REALIZADAS EN LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------------|---------------|-------------------|-------------------|------------------|----------------------|-------------------------------------|-------|---------------------------|----------------------------|---------------|--------|
| AUTOR | TIPO DE ENSAYO | TIPO DE BARRA | MATERIAL DE BARRA | DIAMETRO DE BARRA | PROFUNDIDAD (mm) | CONCRETO | | | CARGA EXPERIMENTAL (Kg-f) | CARGA EXPERIMENTAL (kN) | TIPO DE FALLA | Pex/Pt |
| | | | | | | f _c (MPa) | Peso específico (T/m ³) | RET | | | | |
| MORALES | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | AISI 1020 | 3/8 | 47.7 | 72.9 | 2.30 | 1540 | 15.10 | ACERO | 0.89 | |
| MORALES | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | AISI 1020 | 3/8 | 95.3 | 72.9 | 2.30 | 1550 | 15.20 | ACERO | 0.90 | |
| MORALES | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | AISI 1020 | 3/8 | 190.6 | 72.9 | 2.30 | 1581 | 15.50 | ACERO | 0.91 | |
| MORALES | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | AISI 1020 | 1/2 | 63.5 | 72.9 | 2.30 | 2784 | 27.30 | ACERO | 0.87 | |
| MORALES | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | AISI 1020 | 1/2 | 127 | 72.9 | 2.30 | 3620 | 35.50 | ACERO | 1.13 | |
| MORALES | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | AISI 1020 | 1/2 | 254 | 72.9 | 2.30 | 3671 | 36.00 | ACERO | 1.15 | |
| MORALES | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | AISI 1020 | 5/8 | 79.4 | 72.9 | 2.30 | 4109 | 40.30 | ACERO | 0.81 | |
| MORALES | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | AISI 1020 | 5/8 | 158.8 | 72.9 | 2.30 | 4507 | 44.20 | ACERO | 0.89 | |
| MORALES | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | AISI 1020 | 5/8 | 317.6 | 72.9 | 2.30 | 5078 | 49.80 | ADHERENCIA | 1.00 | |
| MORALES | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 3/8 | 23.8 | 72.9 | 2.30 | 897 | 8.80 | ADHERENCIA | 1.33 | |
| MORALES | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 3/8 | 47.7 | 72.9 | 2.30 | 3977 | 39.00 | ADHERENCIA | 2.95 | |
| MORALES | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 3/8 | 71.5 | 72.9 | 2.30 | 4813 | 47.20 | ADHERENCIA | 2.38 | |
| MORALES | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 3/8 | 95.3 | 72.9 | 2.30 | 4854 | 47.60 | ADHERENCIA | 1.80 | |
| MORALES | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 1/2 | 31.8 | 72.9 | 2.30 | 1774 | 17.40 | ADHERENCIA | 1.47 | |
| MORALES | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 1/2 | 63.5 | 72.9 | 2.30 | 4324 | 42.40 | ADHERENCIA | 1.80 | |
| MORALES | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 1/2 | 95.3 | 72.9 | 2.30 | 7393 | 72.50 | ADHERENCIA | 2.05 | |
| MORALES | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 1/2 | 127 | 72.9 | 2.30 | 9065 | 88.90 | ADHERENCIA | 1.89 | |
| MORALES | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 5/8 | 39.7 | 72.9 | 2.30 | 1723 | 16.90 | ADHERENCIA | 0.91 | |
| MORALES | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 5/8 | 79.4 | 72.9 | 2.30 | 6506 | 63.80 | ADHERENCIA | 1.73 | |
| MORALES | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 5/8 | 119.1 | 72.9 | 2.30 | 14266 | 139.90 | ADHERENCIA | 2.53 | |
| MORALES | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 5/8 | 158.8 | 72.9 | 2.30 | 14347 | 140.70 | ADHERENCIA | 1.90 | |
| MORALES | CORTANTE | ROSCADA | AISI 1020 | 3/8 | 47.7 | 72.9 | 2.30 | 1438 | 14.10 | ACERO | 1.39 | |
| MORALES | CORTANTE | ROSCADA | AISI 1020 | 3/8 | 95.3 | 72.9 | 2.30 | 1540 | 15.10 | ACERO | 1.49 | |
| MORALES | CORTANTE | ROSCADA | AISI 1020 | 1/2 | 63.5 | 72.9 | 2.30 | 2631 | 25.80 | ACERO | 1.38 | |
| MORALES | CORTANTE | ROSCADA | AISI 1020 | 1/2 | 127 | 72.9 | 2.30 | 2692 | 26.40 | ACERO | 1.41 | |
| VIASUS | CONFINADO A TENSION | CORRUGADA | A36 | 3/8 | 48 | 15.795 | 1.727 | 3817 | 37.43 | ADHERENCIA | 0.96 | |
| VIASUS | CONFINADO A TENSION | CORRUGADA | A36 | 3/8 | 95 | 15.795 | 1.727 | 4755 | 46.63 | ADHERENCIA | 1.19 | |
| VIASUS | CONFINADO A TENSION | CORRUGADA | A36 | 1/2 | 64 | 15.795 | 1.727 | 3405 | 33.39 | ADHERENCIA | 0.47 | |
| VIASUS | CONFINADO A TENSION | CORRUGADA | A36 | 1/2 | 127 | 15.795 | 1.727 | 7700 | 75.51 | ADHERENCIA | 1.06 | |
| VIASUS | CONFINADO A TENSION | CORRUGADA | A36 | 5/8 | 79 | 15.795 | 1.727 | 5975 | 58.59 | ADHERENCIA | 0.54 | |
| VIASUS | CONFINADO A TENSION | CORRUGADA | A36 | 5/8 | 159 | 15.795 | 1.727 | 11686 | 114.60 | ADHERENCIA | 1.05 | |
| VIASUS | NO CONFINADO A TENSION | CORRUGADA | A36 | 3/8 | 48 | 15.795 | 1.727 | 1848 | 18.12 | ARRANCAMIENTO | 2.74 | |
| VIASUS | NO CONFINADO A TENSION | CORRUGADA | A36 | 3/8 | 95 | 15.795 | 1.727 | 3724 | 36.52 | ARRANCAMIENTO | 1.99 | |
| VIASUS | NO CONFINADO A TENSION | CORRUGADA | A36 | 1/2 | 64 | 15.795 | 1.727 | 2880 | 28.24 | ARRANCAMIENTO | 1.78 | |
| VIASUS | NO CONFINADO A TENSION | CORRUGADA | A36 | 1/2 | 127 | 15.795 | 1.727 | 5792 | 56.80 | ARRANCAMIENTO | 2.00 | |
| VIASUS | NO CONFINADO A TENSION | CORRUGADA | A36 | 5/8 | 79 | 15.795 | 1.727 | 3800 | 37.27 | ARRANCAMIENTO | 4.32 | |
| VIASUS | CORTANTE | CORRUGADA | A36 | 3/8 | 100 | 15.795 | 1.727 | 1852 | 18.16 | CONCRETO | 0.78 | |
| VIASUS | CORTANTE | CORRUGADA | A36 | 1/2 | 125 | 15.795 | 1.727 | 1787 | 17.52 | CONCRETO | 0.41 | |
| RAMIREZ | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 3/8 | 48 | 21.4 | 1.895 | 3962 | 38.85 | ADHERENCIA | 11.29 | |
| RAMIREZ | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 3/8 | 95 | 21.4 | 1.895 | 5209 | 51.08 | ACERO | 1.19 | |
| RAMIREZ | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 1/2 | 64 | 21.4 | 1.895 | 4336 | 42.52 | ADHERENCIA | 7.20 | |
| RAMIREZ | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 1/2 | 127 | 21.4 | 1.895 | 6472 | 63.47 | ADHERENCIA | 3.96 | |
| RAMIREZ | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 5/8 | 79 | 21.4 | 1.895 | 4800 | 47.07 | ADHERENCIA | 11.97 | |
| RAMIREZ | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 5/8 | 159 | 21.4 | 1.895 | 13133 | 128.79 | ACERO | 1.02 | |
| RAMIREZ | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 3/8 | 48 | 21.4 | 1.895 | 2167 | 21.25 | ARRANCAMIENTO | 2.79 | |
| RAMIREZ | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 3/8 | 95 | 21.4 | 1.895 | 3925 | 38.49 | ARRANCAMIENTO | 1.80 | |
| RAMIREZ | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 1/2 | 64 | 21.4 | 1.895 | 2584 | 25.34 | ARRANCAMIENTO | 2.16 | |
| RAMIREZ | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 1/2 | 127 | 21.4 | 1.895 | 3900 | 38.25 | ARRANCAMIENTO | 1.16 | |
| RAMIREZ | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 5/8 | 79 | 21.4 | 1.895 | 3258 | 31.95 | ARRANCAMIENTO | 1.96 | |
| RAMIREZ | CORTANTE | ROSCADA | B7 | 3/8 | 100 | 21.4 | 1.895 | 1843 | 18.07 | CONCRETO | 1.94 | |
| RAMIREZ | CORTANTE | ROSCADA | B7 | 1/2 | 125 | 21.4 | 1.895 | 2146 | 21.05 | CONCRETO | 1.78 | |
| NAVARRO | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 3/8 | 50 | 45.4 | 1.820 | 2948 | 28.91 | ADHERENCIA | 3.46 | |
| NAVARRO | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 3/8 | 100 | 45.4 | 1.820 | 4672 | 45.82 | ACERO | 1.07 | |
| NAVARRO | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 3/8 | 150 | 45.4 | 1.820 | 4497 | 44.10 | ACERO | 1.03 | |
| NAVARRO | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 1/2 | 50 | 45.4 | 1.820 | 1945 | 19.07 | ADHERENCIA | 1.71 | |
| NAVARRO | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 1/2 | 100 | 45.4 | 1.820 | 8410 | 82.48 | ACERO | 1.05 | |
| NAVARRO | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 1/2 | 150 | 45.4 | 1.820 | 8414 | 82.51 | ACERO | 1.05 | |
| NAVARRO | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 5/8 | 50 | 45.4 | 1.820 | 2665 | 26.13 | ADHERENCIA | 1.88 | |
| NAVARRO | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 5/8 | 100 | 45.4 | 1.820 | 8558 | 83.92 | ADHERENCIA | 3.02 | |
| NAVARRO | CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 5/8 | 150 | 45.4 | 1.820 | 10925 | 107.14 | ADHERENCIA | 2.57 | |
| NAVARRO | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 3/8 | 50 | 45.4 | 1.820 | 3163 | 31.02 | ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO | 1.67 | |
| NAVARRO | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 3/8 | 100 | 45.4 | 1.820 | 4606 | 45.17 | ACERO | 1.05 | |
| NAVARRO | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 3/8 | 150 | 45.4 | 1.820 | 4826 | 47.33 | ACERO | 1.10 | |
| NAVARRO | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 1/2 | 50 | 45.4 | 1.820 | 3051 | 29.92 | ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO | 1.61 | |
| NAVARRO | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 1/2 | 100 | 45.4 | 1.820 | 4087 | 40.08 | ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO | 1.01 | |
| NAVARRO | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 1/2 | 150 | 45.4 | 1.820 | 8772 | 86.03 | ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO | 1.18 | |
| NAVARRO | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 5/8 | 50 | 45.4 | 1.820 | 2222 | 21.79 | ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO | 1.17 | |
| NAVARRO | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 5/8 | 100 | 45.4 | 1.820 | 6371 | 62.48 | ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO | 1.58 | |
| NAVARRO | NO CONFINADO A TENSION | ROSCADA | B7 | 5/8 | 150 | 45.4 | 1.820 | 9266 | 90.87 | ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO | 1.25 | |
| NAVARRO | CORTANTE | ROSCADA | B7 | 3/8 | 50 | 45.4 | 1.820 | 2187 | 21.5 | CONCRETO | 1.15 | |
| NAVARRO | CORTANTE | ROSCADA | B7 | 3/8 | 100 | 45.4 | 1.820 | 3202 | 31.4 | ACERO | 1.22 | |
| NAVARRO | CORTANTE | ROSCADA | B7 | 3/8 | 150 | 45.4 | 1.820 | 3345 | 32.8 | ACERO | 1.27 | |
| NAVARRO | CORTANTE | ROSCADA | B7 | 1/2 | 50 | 45.4 | 1.820 | 2566 | 25.2 | CONCRETO | 1.35 | |
| NAVARRO | CORTANTE | ROSCADA | B7 | 1/2 | 100 | 45.4 | 1.820 | 4826 | 47.3 | ACERO | 1.00 | |
| NAVARRO | CORTANTE | ROSCADA | B7 | 1/2 | 150 | 45.4 | 1.820 | 6387 | 62.6 | ACERO | 1.33 | |
| NAVARRO | CORTANTE | ROSCADA | B7 | 5/8 | 50 | 45.4 | 1.820 | 2034 | 19.9 | CONCRETO | 1.07 | |
| NAVARRO | CORTANTE | ROSCADA | B7 | 5/8 | 100 | 45.4 | 1.820 | 5771 | 56.6 | CONCRETO | 1.43 | |
| NAVARRO | CORTANTE | ROSCADA | B7 | 5/8 | 150 | 45.4 | 1.820 | 10214 | 100.2 | ACERO | 1.33 | |
| MORALES: HUMBERTO MORALES MONROY (2018) | | | | | | | | | | | | |
| VIASUS: CAROLINA VIASUS (2019) | | | | | | | | | | | | |
| MARTINEZ: RONALD CAMILO RAMIREZ MARTINEZ (2020) | | | | | | | | | | | | |
| NAVARRO: JOSE MARIA NAVARRO ORTIZ (2020) | | | | | | | | | | | | |

9.1 Comportamiento de anclajes post-instalados en concretos de alta resistencia sometidos a tensión y cortante.

Este trabajo de investigación fue realizado por el Ingeniero Humberto Morales en el año 2018. El concreto utilizado fue de $f'_c=72.9$ MPa, peso específico de 2.30 T/m³. Se utilizó barras roscadas para

acero AISI 1020 y acero B7 en diámetros de 3/8", 1/2" y 5/8". Los anclajes se realizaron a 5 d_b , 10 d_b y 20 d_b (d_b indica el diámetro de la barra). Para los ensayos CONFINADOS A TENSIÓN se usó barras AISI 1020. Los resultados se pueden apreciar en la tabla 25 del comparativo entre las 4 investigaciones. Las relaciones RET entre la carga experimental vs carga teórica ($RET = \text{Carga experimental} / \text{Carga teórica}$) estuvieron en su mayoría por debajo de la unidad, lo que indica que se obtuvieron resultados cercanos con la teoría y la falla predominante fue por el acero. Para los ensayos NO CONFINADOS a tensión se usó barras B7 y la falla predominante fue por adherencia, siendo que los factores de reducción estuvieron por encima de la unidad en 10 de los 12 ensayos realizados y en cuatro de los ensayos estuvieron por encima de 2, lo que muestra que los valores experimentales no dieron similares a los valores teóricos. En los ensayos realizados a CORTANTE realizados con barras AISI 1020 los factores de reducción también estuvieron por encima de la unidad y la falla predominante se presentó por el acero.

9.2 Análisis del comportamiento de pernos de anclaje en acero de refuerzo corrugado post-instalados con adhesivo epóxico en concreto ligero sometidos a tensión y cortante.

Este trabajo de investigación fue realizado por la Ingeniera Carolina Viasus Arteaga en el año 2019. El concreto utilizado fue de $f'_c = 15.8$ MPa, peso específico de 1.73 T/m³. Se utilizaron barras corrugadas de acero A36 en diámetros de 3/8", 1/2" y 5/8". Los anclajes se realizaron a 5 d_b y 10 d_b (d_b indica el diámetro de la barra). Para los ensayos CONFINADOS A TENSIÓN Las relaciones RET entre la carga experimental vs carga teórica ($RET = \text{Carga experimental} / \text{Carga teórica}$) estuvieron tres por debajo de la unidad y tres por encima de la unidad pero cercanos a 1, lo que indica que se obtuvieron resultados cercanos a los valores proporcionados por la teoría y la falla predominante fue por adherencia. Para los ensayos NO CONFINADOS a tensión la falla predominante para los 5 ensayos realizados fue por arrancamiento del concreto, siendo que las

relaciones RET estuvieron por encima de la unidad en todos los ensayos llegando a un valor superior a 4, lo que muestra que los valores experimentales no dieron similares a los valores teóricos. En los dos ensayos realizados a CORTANTE los factores de reducción estuvieron por debajo de la unidad, pero cercanos a 1, lo que indica que los valores experimentales dieron similares a los valores teóricos, en ellos la falla predominante se presentó por el concreto.

9.3 Anclajes con barra enroscada en placas elaboradas con concretos livianos.

Este trabajo de investigación fue realizado por el Ingeniero Ronald Camilo Ramírez Arteaga en este año 2020. El concreto utilizado fue de $f'_c=21.4$ MPa, peso específico de 1.90 T/m³. Se utilizaron barras roscadas de acero B7 en diámetros de $3/8''$, $1/2''$ y $5/8''$. Los anclajes se realizaron a $5 d_b$ y $10 d_b$ (d_b indica el diámetro de la barra). Para los ensayos CONFINADOS A TENSION Las relaciones RET entre la carga experimental vs carga teórica ($RET=Carga\ experimental/Carga\ teórica$) estuvieron todos por encima de la unidad, llegando incluso a valores por encima de 11, lo que indica que se obtuvieron resultados muy distintos a los valores proporcionados por la teoría y la falla predominante fue por adherencia, salvo en dos de los ensayos en los que la falla fue por el acero. Para los ensayos NO CONFINADOS a tensión la falla predominante fue por arrancamiento del concreto, siendo que las relaciones RET estuvieron por encima de la unidad en todos los ensayos llegando a un valor superior a 2, lo que muestra que los valores experimentales no dieron similares a los valores teóricos. En los ensayos realizados a CORTANTE las relaciones RET estuvieron por encima de la unidad, lo que indica que los valores experimentales dieron distintos a los valores teóricos, en ellos la falla predominante se presentó por el concreto.

9.4 Comportamiento de anclajes postinstalados adhesivos en concreto liviano estructural de alta resistencia, sometidos a cargas de tensión y corte.

Este trabajo de investigación es el tema de esta Tesis realizado en este año 2020. El concreto utilizado fue de $f'_c=45.4$ MPa, peso específico de 1.82 T/m³. Se utilizaron barras roscadas de acero B7 en diámetros de $3/8''$, $1/2''$ y $5/8''$. Los anclajes se realizaron a 50 mm, 100 mm y 150 mm. Para los ensayos CONFINADOS A TENSION Las relaciones RET entre la carga experimental vs carga teórica ($RET=Carga\ experimental/Carga\ teórica$) estuvieron todos por encima de la unidad cuando la falla se presentó por adherencia, pero muy cercanos a 1 cuando la falla se presentó por el acero, lo que indica que se obtuvieron resultados similares a los valores proporcionados por la teoría, la mayoría de las fallas se presentaron por Adherencia. Para los ensayos NO CONFINADOS a tensión la falla predominante fue por arrancamiento del concreto, salvo en algunos casos en los que hubo falla por el acero, las RET dieron valores desde 1.01 hasta 1.67, lo que muestra que los valores experimentales dieron similares a los valores teóricos. En los ensayos realizados a CORTANTE las relaciones RET dieron valores desde 1 hasta 1.43, lo que indica que los valores experimentales dieron similares a los valores teóricos, en ellos las fallas presentadas fueron por el acero y por el concreto.

9.5 Características observadas y análisis comparativo de las pruebas de las cuatro investigaciones realizadas sobre el tema de anclajes en la escuela colombiana de ingeniería.

ANCLAJES CONFINADOS

- En los ensayos confinados del Ing Morales todas las fallas fueron por acero porque este era de baja resistencia sin que fallaran el epóxico ni el concreto y por supuesto todas las cargas teóricas dieron valores mayores a las cargas experimentales aplicadas.
- En la investigación realizada por Viasus, donde se usó acero corrugado A36 y concreto liviano, las fallas que se presentaron en los ensayos confinados fueron por adherencia, esto es que debido a que el acero tenía un bajo esfuerzo de fluencia, este no alcanzo a fallar porque el concreto y el epóxido tenían capacidad de carga menor.
- En las investigaciones de Ramírez y Navarro, realizadas con barras roscadas B7 y concreto liviano, se aprecia que para todos los diámetros y profundidades de anclajes las cargas experimentales dieron mayores a las teóricas y en ambas investigaciones las fallas fueron por adherencia y acero.

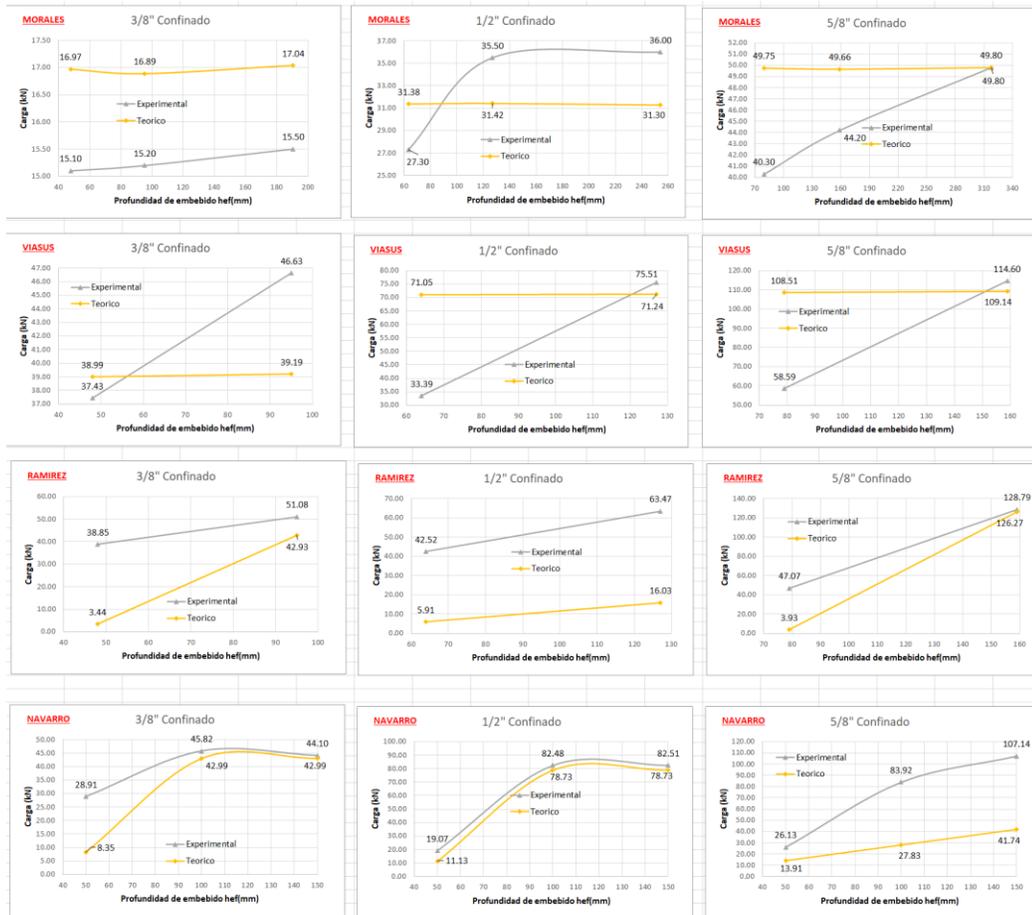


Figura 62. Comparación de Anclajes Confinados a tensión. Fuente: Propia

ANCLAJES NO CONFINADOS

- En los 4 trabajos de investigación las cargas de diseño dieron menores a las experimentales en los ensayos no confinados.
- En el trabajo de Morales todas las fallas presentadas fueron por adherencia, se utilizó barras roscadas B7 y concreto de alta resistencia.
- En el trabajo de Viasus, las fallas predominantes fueron por arrancamiento del concreto, el concreto utilizado fue liviano y barras corrugadas A36.

- En el trabajo de Ramírez la falla predominante fue por arrancamiento del concreto, se utilizó barras roscadas B7 y concreto liviano.
- En esta investigación (Navarro) se usaron barras roscadas B7 y concreto liviano estructural, la falla predominante fue por arrancamiento del concreto.



Figura 63. Comparación de Anclajes No confinados a tensión. Fuente: Propia.

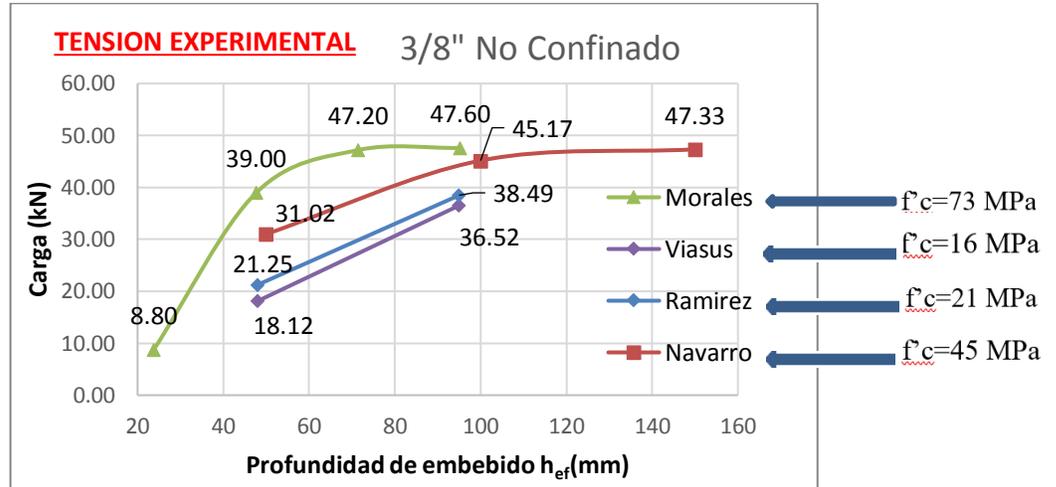


Figura 64: Carga Experimental en ensayos no confinados de 3/8". Fuente: Propia.

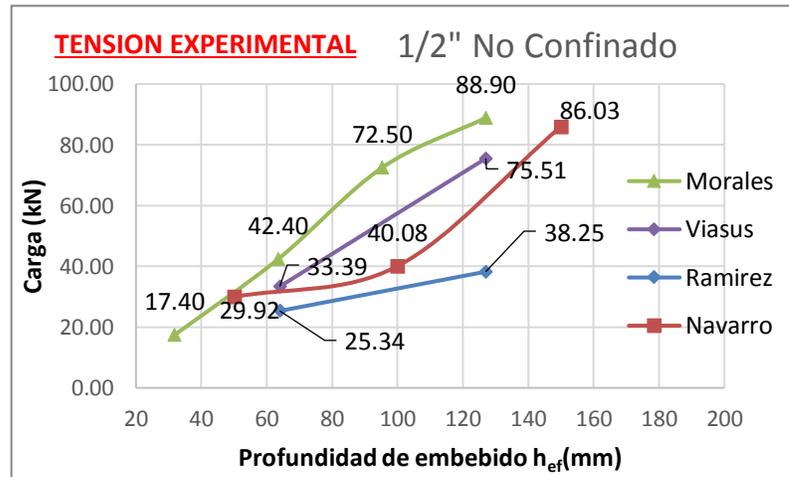


Figura 65: Carga Experimental en ensayos no confinados de 1/2". Fuente: Propia.

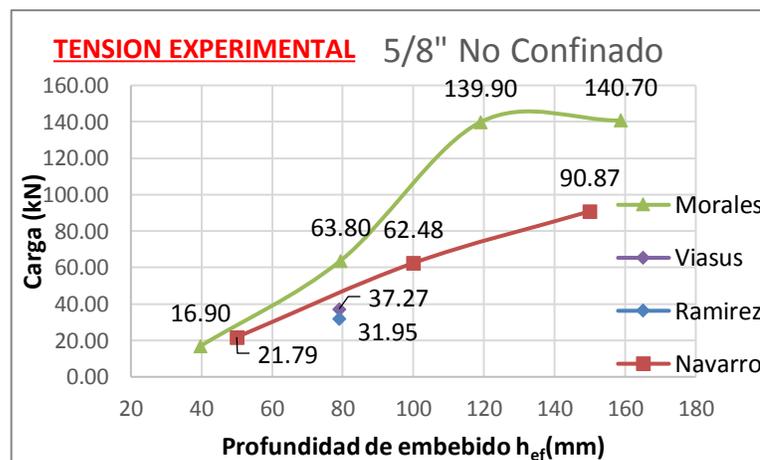


Figura 66: Carga Experimental en ensayos no confinados de 5/8". Fuente: Propia.

ANCLAJES A CORTANTE

- En el trabajo de Morales la falla predominante fue por acero, a pesar de que este eran barras B7, pero el concreto era de alta resistencia.
- En el trabajo de investigación de Viasus los ensayos fallaron por concreto, el concreto usado era liviano de esfuerzo a la compresión menor a 4 veces que el de la investigación de Morales.
- En el trabajo de investigación de Ramírez los ensayos fallaron por concreto, el concreto usado era liviano de esfuerzo a la compresión menor a 3 veces que el de la investigación de Morales.
- En este trabajo de investigación (Navarro) los ensayos fallaron por concreto y acero, el concreto usado es liviano de esfuerzo a la compresión menor a 1.5 veces que el de la investigación de Morales.



Figura 67. comparación de Anclajes a cortante. Fuente: Propia.

De las cuatro investigaciones se observó que:

- En los ensayos confinados a tensión se aprecia que a mayor resistencia a la compresión del concreto (valor superior a los 21 MPa), la falla predominante es por el acero; para valores de f'_c menores o iguales a 21 MPa la falla predominante es básicamente por adherencia.
- En los ensayos no confinados a tensión, para concretos livianos la falla predominante es por arrancamiento del concreto.
- En los ensayos no confinados a tensión, para concretos de alta resistencia la falla predominante es por adherencia.
- En los anclajes no confinados se pudo apreciar que el modo de falla depende de la resistencia del concreto.
- En los ensayos a cortante, para concretos livianos la falla predominante es por arrancamiento del concreto y en algunos casos por el acero.
- En los ensayos a cortante, para concretos de alta resistencia la falla predominante es por acero.
- En los ensayos a cortante, a medida que aumenta la resistencia del concreto (Valores de f'_c superiores a 21 MPa) la falla predominante es combinada partiendo de falla por arrancamiento del concreto en los concretos livianos hasta llegar a falla únicamente por el acero en los concretos de alta resistencia.

- En los ensayos no confinados a tensión se presenta mayor variación de los resultados experimentales respecto a los proporcionados por el ACI 318.
- A mayor diámetro y mayor longitud de anclaje se presenta menor variación de los resultados dados por el ACI 318 respecto a los resultados experimentales.
- Para los diámetros de 3/8" y 1/2" se presenta variación en los resultados con RET cercanos a 2 en los ensayos no confinados.
- En los ensayos a tensión no confinados, para varillas de 3/8" la falla predominante es por arrancamiento del concreto en anclajes de 50 mm, mientras que para profundidades superiores a los 100 mm la falla es del acero.

10. CONCLUSIONES

Con base en los resultados experimentales se puede concluir que:

- Las ecuaciones del ACI 318-19 en anclajes postinstalados adhesivos no confinados predicen correctamente la carga de falla por concreto o por acero para profundidades superiores a 100 mm usando varillas roscadas de 3/8" de 1/2" y 5/8" de acero ASTM A-193 B7 ancladas en concretos livianos de $f'_c=45$ MPa.
- En anclajes no confinados realizados en concreto liviano hasta 150 mm de profundidad la falla predominante es arrancamiento del concreto, como se aprecia en las figuras 29 y 30.
- Se evidenció en el desarrollo de esta investigación que, para ensayos no confinados, en concretos livianos, los diámetros y profundidades de embebido utilizadas, las ecuaciones de los reglamentos predicen modalidades de falla que discrepan de las detectadas mediante ensayos, pero no están tan lejos de los resultados esperados, esto se debe en parte a que las expresiones provistas en el código ACI 318-19 son conservadoras e incluyen factores de reducción.
- A mayor diámetro y mayor longitud de anclaje se presenta menor variación de los resultados proporcionados por el ACI 318-19 respecto a los resultados experimentales.
- Al comparar las cuatro investigaciones realizadas en esta universidad, observamos que las cargas experimentales de falla tienen valores cercanos, para los ensayos no confinados en

varillas de 3/8" y 1/2" ancladas en concretos de resistencia superior a los 28 MPa (Ver figuras 61 y 62).

- Midiendo el ángulo de inclinación en los anclajes no confinados que fallaron por concreto se identificó que el ángulo de inclinación de la fisura originada fue en promedio de 30°, ángulo cercano al valor de $\alpha=35^\circ$ enunciado en el ACI 318-19 generado por la relación de h_{ef} a $1.5h_{ef}$
- Se infiere que el procedimiento de medición de resistencia del concreto (cilindros de 100mm de diámetro y 200 mm de altura a los cuales se les aplicó el procedimiento estándar establecido en las normas colombianas NTC 454 y NTC 550) no debió aplicarse a este tipo de concreto, pues conllevaría a eliminar parte del aire inyectado a la mezcla y repercutiría en la resistencia y en la densidad del material, al igual que la capa de mineral puede entrar en reacción química con los aditivos y la espuma aligerante causando que se genere una capa perimetral endurecida que alteraría los resultados de la resistencia de la muestra de concreto de los cilindros.

11. RECOMENDACIONES

Para próximas investigaciones se recomienda:

- Aumentar la separación entre los anclajes adhesivos no confinados en este tipo de concreto liviano (en los ensayos realizados fue ligeramente mayor a $3h_{ef}$) porque al momento de realizar el ensayo, como se aprecia en la figura 45, el área de falla fue limitada por las vigas metálicas siendo que su separación estuvo a $4h_{ef}$ según lo recomendado por ACI 355.4.
- Aumentar la separación entre los anclajes adhesivos confinados en este tipo de concreto liviano (en los ensayos realizados fue ligeramente menor a $3h_{ef}$) porque al momento de realizar el ensayo, en los casos en que se presentaron fisuras en el concreto, estas llegaron al anclaje adyacente, imposibilitando realizar el ensayo en dicho anclaje.
- Realizar más estudios referentes a los anclajes confinados cuando presentan fallas por adherencia porque los valores de las cargas de falla obtenidas experimentalmente dieron bastante diferentes a los valores obtenidos al aplicar el ACI 318-19.
- Para la obtención de la resistencia del concreto alivianado con aire, se recomienda no aplicar el método de los cilindros, pues cuando se apisonan las capas con la barra y el martillo, se elimina parte del aire inyectado a la mezcla, por ello es aconsejable medir estos parámetros en núcleos tomados directamente a los elementos de concreto ya endurecidos.

12. BIBLIOGRAFÍA

- ACI Comité 318. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-19) and Commentary*. Michigan: American Concrete Institute.
- AIS Comité 100. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá D.C.: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Cattaneo, S., & Muciaccia, G. (2016). Adhesive anchors in high performance concrete. *Materials and Structures*, 2689-2700.
- Epachachi, S., Esmaili, O., Mirghaderi, S. R., & Behbahani, A. T. (2015). Behavior of adhesive bonded anchors under tension and shear loads. *Journal of Constructional Steel Research*, 114, 269–280.
- Ruda Arias, Y. M., & Páez Moreno, D. F. (2017). Estudio de la resistencia a tracción en anclajes estructurales postinstalados con adhesivo epóxico. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 137-156.
- Wang, D., Wu, D., Ouyang, C., & Zhai, M. (2016). Performance and design of post-installed large diameter anchors in concrete. *Construction and Building Materials*, 114, 142-150.
- Yilmaz, S., Özen, M., & Yardim, Y. (2013). Tensile behavior of post-installed chemical anchors embedded to low strength concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 861-866.
- Morales, Humberto. Comportamiento de anclajes postinstalados en concretos de alta resistencia sometidos a tensión y cortante. 2018. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Tesis de Maestría.

- Viasus Arteaga, Carolina. Análisis del comportamiento de pernos de anclaje en acero de refuerzo corrugado postinstalados con adhesivo en concreto ligero sometidos a tensión y cortante. 2019. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Tesis de Maestría.
- Ramírez Martínez, Ronald Camilo. Anclajes con barra enroscada en placas elaboradas con concretos livianos. 2020. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Tesis de Maestría.
- Z. Dymond, Benjamin & Mills, Connor. Anchorage of epoxy-coated rebar using chemical adhesives. 2019. University of Minnesota. M.S. thesis.
- Kunieda, Minoru; Nakano, Katsuhiko; Hamasaki, Hitoshi; Koga, Hirohisa; Ueda, Naoshi; Takahashi, Munemori; Sugiyama, Tomoaki; & Sato, Yasuhiko. Technical Committee on establishment of evaluation method for durability and advanced design of post-installed anchor in concrete. 2016. Committee report: JCI-TC142A.Japan.
- Abd-El Hamed Mohamed; Allah Abd Elaty, Metwally & Farouk Ghazy, Mariam. Optimisation of adhesive anchors in concrete by desirability function. 2015. Magazine of concrete research 67(20):1-11.
- Islam, Afefy, Sennah, & Azimi. Bond Behavior of Ribbed-Surface, Headed-End, GFRP Bars Embedded in High-Strength Concrete. 2015. CSCE Annual Conference, Regina, Saskatchewan, Canada.
- Nemes, Rita, & Lubiol, Eva. Application of anchors under special concrete conditions. 2010. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 55(1), pp 73-79.

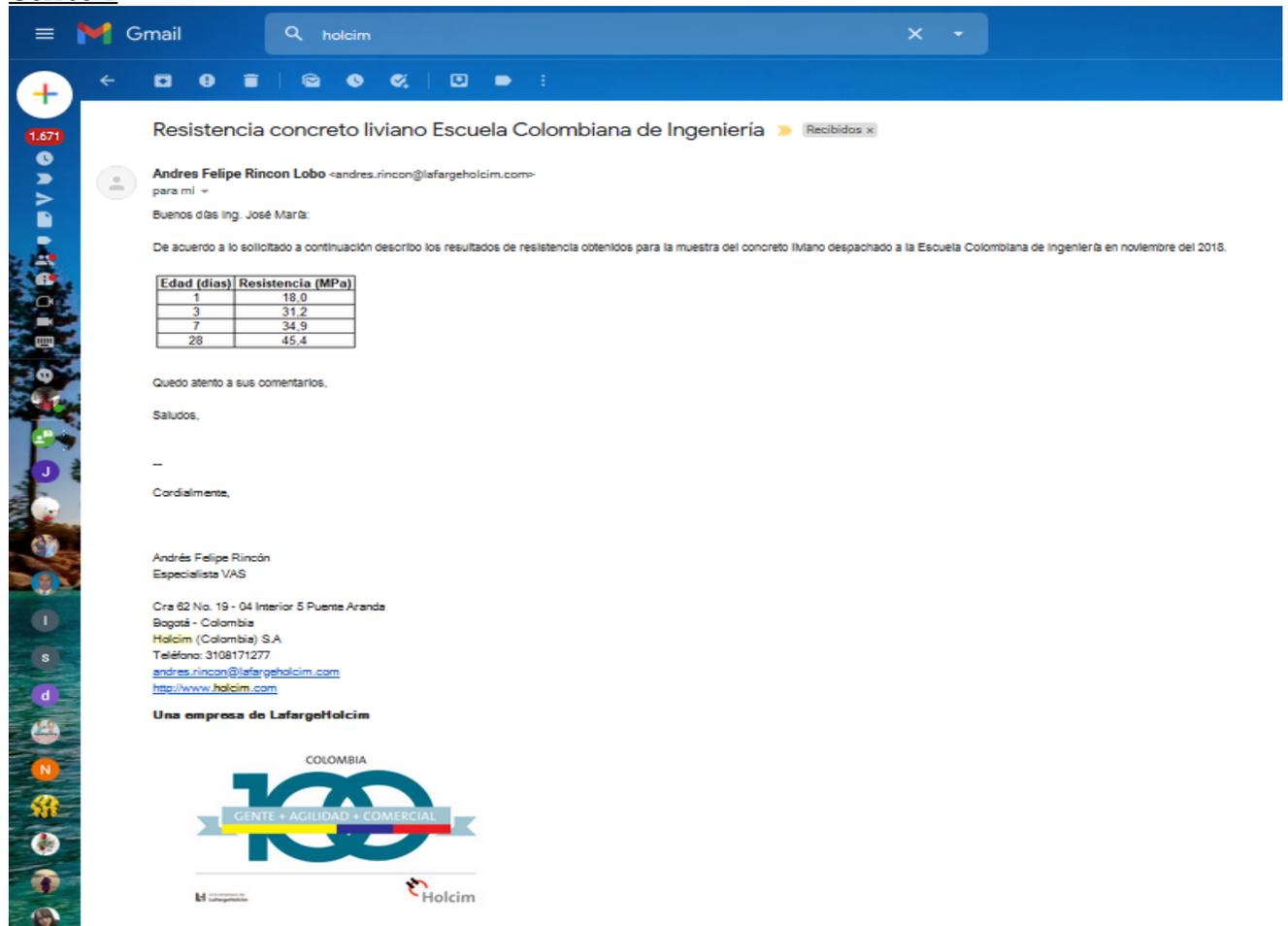
13. ANEXOS

13.1 Concreto Liviano

Se fundieron 9 cilindros de concreto de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura a los cuales se les realizó el ensayo de compresión en el laboratorio de Holcim para obtener la resistencia a compresión de los mismos.

Se anexa copia de los correos recibidos de Holcim respecto a la resistencia y a la densidad del concreto:

Correo 1



The screenshot shows an email from Andres Felipe Rincon Lobo (andres.rincon@lafargeholcim.com) to Jose Maria. The subject is 'Resistencia concreto liviano Escuela Colombiana de Ingenieria'. The email contains a table of test results for concrete at different ages.

| Edad (días) | Resistencia (MPa) |
|-------------|-------------------|
| 1 | 18,0 |
| 3 | 31,2 |
| 7 | 34,9 |
| 28 | 45,4 |

The email also includes contact information for Andres Felipe Rincon, Especialista VAS, and the Holcim logo with the slogan 'COLOMBIA GENTE + AGILIDAD + COMERCIAL'.

Correo 2



Andres Felipe Rincon Lobo <andres.rincon@lafargeholcim.com>

para mí ▾

vie., 26 Jul. 2019 11:50 ☆ ↶ ⋮

Adicional al correo anterior, confirmo que la densidad del material en estado fresco fue de 2.006 kg/m³.

Quedo atento a sus comentarios.

⋮

Correo 3



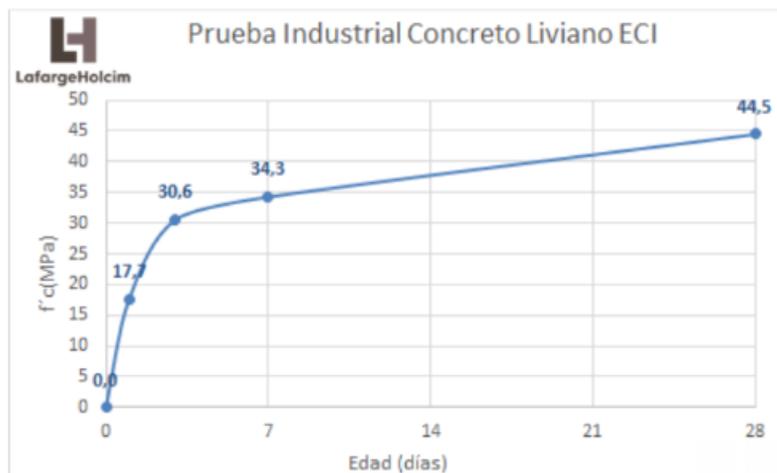
Andres Felipe Rincon Lobo

para Fredy, mí, Oscar ▾

Buenas tardes Ing. José María:

Adjuntamos la información solicitada:

1. Curva de resistencia:



2. Masa unitaria en estado fresco: 2.006 Kg/m³.

3. Diseño de mezcla en formato Holcim (adjunto).

Quedo atento a sus comentarios.

En el primer correo Holcim informa que la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días es $f'_c = 45.4$ MPa.

En el segundo correo informa: Adicional al correo anterior, confirmo que la densidad del material en estado fresco fue de 2006 kg/m³.

En el tercer correo entregan la curva de la capacidad a la compresión del concreto de acuerdo a la edad y confirman el peso específico en estado fresco.

En visita realizada a las instalaciones de Holcim el ingeniero Andrés Felipe Rincón informó que la densidad del concreto en estado seco endurecido fue de 1805 Kg/m³.



Figura 68: Mixer para fundida del concreto liviano enviada por HOLCIM. Fuente: Autor



Figura 69: Cilindro de concreto liviano antes de someterlo a la prueba de compresión. Fuente: Autor.



Figura 70: Cilindro de concreto ensayado a compresión después de los 28 días. Fuente: Autor.



Figura 71: Valor de la Carga de falla (39 Ton). Fuente: Autor.



Figura 72: Cilindro fallado del concreto liviano suministrado por Holcim. Fuente: Autor

Tabla 27: Resultado del ensayo de cilindro de concreto. Fuente: Autor.

| Días | P(Kg) | P(kN) | A(mm ²) | f _c (MPa) |
|------|-------|-------|---------------------|----------------------|
| 28 | 39000 | 382.2 | 8332 | 45.8 |

$$f'_c = \frac{39 \cdot 9.8 \cdot 1000}{\frac{\pi}{4} (103)^2} = 45.8 \text{ MPa}$$

Esta prueba se realizó en la Escuela para un cilindro de 103 mm de diámetro promedio y una altura promedio de 201mm, con el fin de corroborar el dato proporcionado por la concretera Holcim que entregó el valor de f'c=45.4 MPa.

Peso Específico:

Se tomó el promedio de las masas de tres cilindros.

Tabla 28: Densidad de las muestras tomadas. Fuente: Autor.

| Masa Cilindro | Densidad | Densidad promedio |
|---------------|---------------------|---------------------|
| (Kg) | (T/m ³) | (T/m ³) |
| 3.00 | 1.82 | 1.82 |
| 2.96 | 1.80 | |
| 3.02 | 1.83 | |

Holcim informó que la densidad del material en estado fresco fue de 2006 Kg/m³. En estado endurecido el peso específico = 1.80 T/m³. Este valor es muy cercano al obtenido en el laboratorio de la Escuela.

Se volvió a calcular el peso de un cilindro en estado seco, cuyas dimensiones son 104 mm de diámetro en promedio y 201 mm de altura. El peso dio 3.1 Kg, lo que lleva a un peso específico de:

$$\gamma = \frac{3.1 / 10^3}{\frac{\pi}{4} (0.104)^2 (0.201)} = 1.82 \text{ T/m}^3$$



Figura 73: Peso de un cilindro en estado seco (3.1 Kg). Fuente: Autor

De acuerdo con la definición de la NSR-10, C-2, el concreto es liviano si su densidad esta entre 1440 y 1840 Kg/m³, lo que equivale a estar su densidad entre 1.44 y 1.84 T/m³. Así concluimos

que el concreto utilizado es liviano según la definición establecida en la página C-28 del título C del Reglamento NSR-10.

13.2 Barras roscadas ASTM A-193 B7

Se tomaron muestras de 1.0 m de longitud y se ensayaron para determinar la carga de fluencia y de falla para cada uno de los diámetros de la barra ensayada.

Tabla 29: Resultados de barras roscadas ASTM A-193 B7. Fuente: Autor.

| Pu (Kgf) | Pu (kN) | Varilla No. | Diámetro (pul) | Diámetro (cm) | Área (cm²) | Fu (Kg/cm²) | Fu (MPa) |
|---------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--|---|---------------------------|
| 6250 | 61.29 | 3 | 0.375 | 0.95 | 0.71 | 8771.2 | 860 |
| 11112 | 109 | 4 | 0.500 | 1.27 | 1.27 | 8771.9 | 860 |
| 17350 | 170.1 | 5 | 0.625 | 1.59 | 1.98 | 8765.6 | 860 |

13.3 Resultados de ensayos confinados a tensión

Se realizaron 6 ensayos para cada diámetro y profundidad, a continuación, se listan las cargas de falla obtenidas.

Tabla 30: Ensayos confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 $\Phi 3/8"$. Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad | Carga | Carga |
|--------------|--------------------|--------------|--------------|
| | (mm) | (Kg) | (kN) |
| 3/8 | 50 | 1780 | 17.5 |
| | | 2953 | 29.0 |
| | | 1058 | 10.4 |
| | | 3521 | 34.5 |
| | | 4211 | 41.3 |
| | | 2843 | 27.9 |
| | | 4592 | 45.0 |
| | | 2624 | 25.7 |
| | 100 | 4608 | 45.2 |
| | | 4694 | 46.0 |
| | | 4624 | 45.3 |
| | | 4807 | 47.1 |
| | | 4628 | 45.4 |
| | 150 | 4164 | 40.8 |
| | | 4842 | 47.5 |
| | | 4486 | 44.0 |

Tabla 31: Ensayos confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 $\Phi 1/2"$. Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad | Carga | Carga |
|-------|-------------|-------|-------|
| | (mm) | (Kg) | (kN) |
| 1/2 | 50 | 1833 | 18.0 |
| | | 2057 | 20.2 |
| | | 1945 | 19.1 |
| | | 2149 | 21.1 |
| | | 1741 | 17.1 |
| | | 2098 | 20.6 |
| | | 1792 | 17.6 |
| | | 1945 | 19.1 |
| | 100 | 8326 | 81.7 |
| | | 8545 | 83.8 |
| | | 8914 | 87.4 |
| | | 6994 | 68.6 |
| | | 8678 | 85.1 |
| | | 8478 | 83.1 |
| | | 8937 | 87.6 |
| | 150 | 8890 | 87.2 |
| | | 6526 | 64.0 |
| | | 9620 | 94.3 |
| | | 8164 | 80.1 |
| | | 8870 | 87.0 |
| | | 8414 | 82.5 |

Tabla 32: Ensayos confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 $\Phi 5/8"$. Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad | Carga | Carga |
|-------|-------------|-------|-------|
| | (mm) | (Kg) | (kN) |
| 5/8 | 50 | 2665 | 26.1 |
| | | 2769 | 27.2 |
| | | 2561 | 25.1 |
| | | 2896 | 28.4 |
| | | 2434 | 23.9 |
| | | 2818 | 27.6 |
| | | 2512 | 24.6 |
| | | 2665 | 26.1 |
| | 100 | 10783 | 105.7 |
| | | 11900 | 116.7 |
| | | 8327 | 81.7 |
| | | 4218 | 41.4 |
| | | 6381 | 62.6 |
| | | 8372 | 82.1 |
| | | 9922 | 97.3 |
| | | 9016 | 88.4 |
| | 150 | 11287 | 110.7 |
| | | 10120 | 99.2 |
| | | 11724 | 115.0 |
| | | 11746 | 115.2 |
| | | 11400 | 111.8 |
| | | 8721 | 85.5 |
| | | 11478 | 112.6 |

13.4 Resultados de ensayos no confinados a tensión

Se realizaron 3 ensayos para cada diámetro y profundidad, a continuación, se listan las cargas de falla obtenidas.

Tabla 33: Ensayos no confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 $\Phi 3/8"$. Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad | Carga | Carga |
|-------|-------------|-------|-------|
| | (mm) | (Kg) | (kN) |
| 3/8 | 50 | 3500 | 34.3 |
| | | 2953 | 29.0 |
| | | 1058 | 10.4 |
| | | 3521 | 34.5 |
| | | 4211 | 41.3 |
| | | 2843 | 27.9 |
| | | 4592 | 45.0 |
| | | 2624 | 25.7 |
| | 100 | 4638 | 45.5 |
| | | 4774 | 46.8 |
| | | 4218 | 41.4 |
| | | 4698 | 46.1 |
| | | 4700 | 46.1 |
| | 150 | 4970 | 48.7 |
| | | 4834 | 47.4 |
| | | 4821 | 47.3 |
| | | 5213 | 51.1 |
| | | 4293 | 42.1 |

Tabla 34: Ensayos no confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 Φ 1/2". Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad | Carga | Carga |
|-------|-------------|-------|-------|
| | (mm) | (Kg) | (kN) |
| 1/2 | 50 | 2126 | 20.8 |
| | | 2478 | 24.3 |
| | | 3528 | 34.6 |
| | | 2782 | 27.3 |
| | | 4208 | 41.3 |
| | | 2376 | 23.3 |
| | | 3286 | 32.2 |
| | | 3621 | 35.5 |
| | 100 | 4876 | 47.8 |
| | | 3800 | 37.3 |
| | | 4080 | 40.0 |
| | | 3592 | 35.2 |
| | 150 | 8250 | 80.9 |
| | | 9172 | 89.9 |
| | | 8745 | 85.8 |
| | | 8974 | 88.0 |
| | | 8721 | 85.5 |

Tabla 35: Ensayos no confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 Φ 5/8". Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad | Carga | Carga |
|-------|-------------|-------|-------|
| | (mm) | (Kg) | (kN) |
| 5/8 | 50 | 2301 | 22.6 |
| | | 1810 | 17.8 |
| | | 1826 | 17.9 |
| | | 2064 | 20.2 |
| | | 2874 | 28.2 |
| | | 2456 | 24.1 |
| | 100 | 5236 | 51.3 |
| | | 4720 | 46.3 |
| | | 7800 | 76.5 |
| | | 5686 | 55.8 |
| | | 8412 | 82.5 |
| | 150 | 10282 | 100.8 |
| | | 9476 | 92.9 |
| | | 9220 | 90.4 |
| | | 9782 | 95.9 |
| | | 8220 | 80.6 |
| | | 10490 | 102.9 |
| | | 7393 | 72.5 |

13.5 Resultados de ensayos a cortante

Se realizaron 6 ensayos para cada diámetro y profundidad, a continuación, se listan las cargas de falla obtenidas.

Tabla 36: Ensayos a cortante de barras ASTM A-193 B7 $\Phi 3/8"$. Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad | Carga | Carga |
|-------|-------------|-------|-------|
| | (mm) | (Kg) | (kN) |
| 3/8 | 50 | 1789 | 17.5 |
| | | 2307 | 22.6 |
| | | 2290 | 22.5 |
| | | 2272 | 22.3 |
| | | 2279 | 22.3 |
| | 100 | 3030 | 29.7 |
| | | 3031 | 29.7 |
| | | 3316 | 32.5 |
| | | 3315 | 32.5 |
| | | 3316 | 32.5 |
| | 150 | 3316 | 32.5 |
| | | 3310 | 32.5 |
| | | 3408 | 33.4 |

Tabla 37: Ensayos a cortante de barras ASTM A-193 B7 $\Phi 1/2"$. Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad | Carga | Carga |
|-------|-------------|-------|-------|
| | (mm) | (Kg) | (kN) |
| 1/2 | 50 | 2345 | 23.0 |
| | | 2346 | 23.0 |
| | | 2710 | 26.6 |
| | | 2715 | 26.6 |
| | | 2716 | 26.6 |
| | 100 | 4924 | 48.3 |
| | | 5014 | 49.2 |
| | | 5358 | 52.5 |
| | | 4116 | 40.4 |
| | | 4720 | 46.3 |
| | 150 | 5568 | 54.6 |
| | | 5094 | 50.0 |
| | | 8498 | 83.3 |

Tabla 38: Ensayos a cortante de barras ASTM A-193 B7 Φ 5/8". Fuente: Autor.

| Barra | Profundidad | Carga | Carga |
|-------|-------------|--------|-------|
| | (mm) | (Kg) | (kN) |
| 5/8 | 50 | 1883 | 18.5 |
| | | 2141 | 21.0 |
| | | 2140 | 21.0 |
| | | 1995 | 19.6 |
| | | 2010 | 19.7 |
| | 100 | 6610 | 64.8 |
| | | 5402 | 53.0 |
| | | 5770.5 | 56.6 |
| | | 5084 | 49.9 |
| | | 5986 | 58.7 |
| | 150 | 9810 | 96.2 |
| | | 10066 | 98.7 |
| | | 10766 | 105.6 |

13.6 Distribución de Perforaciones

Inicialmente se pensó realizar 9 ensayos para cada diámetro y cada profundidad, para un total de 27 ensayos para cada diámetro correspondiente a cada profundidad, es decir en total se pensó ensayar 81 anclajes para Confinados y 81 anclajes para No confinados, mientras que para cortante se pensó ensayar para cada diámetro 5 anclajes para las profundidades de 50mm y 100mm, y 3 anclajes para la profundidad de 150mm, para un total de 39 anclajes.

La cantidad de anclajes para cortante se mantuvo, pero en cambio para los anclajes confinados se ensayaron 60 anclajes, para los anclajes no confinados se ensayaron 55 anclajes, debido a las condiciones climáticas y debido a que cuando fallaban unos anclajes, los mas próximos se estropeaban por la fisuración que alcanzaba el concreto en estos anclajes próximos, impidiendo realizar el ensayo en ellos.

A continuación, se presentan los dibujos de las losas en planta adoptadas para la realización de los ensayos:

CONFINADOS

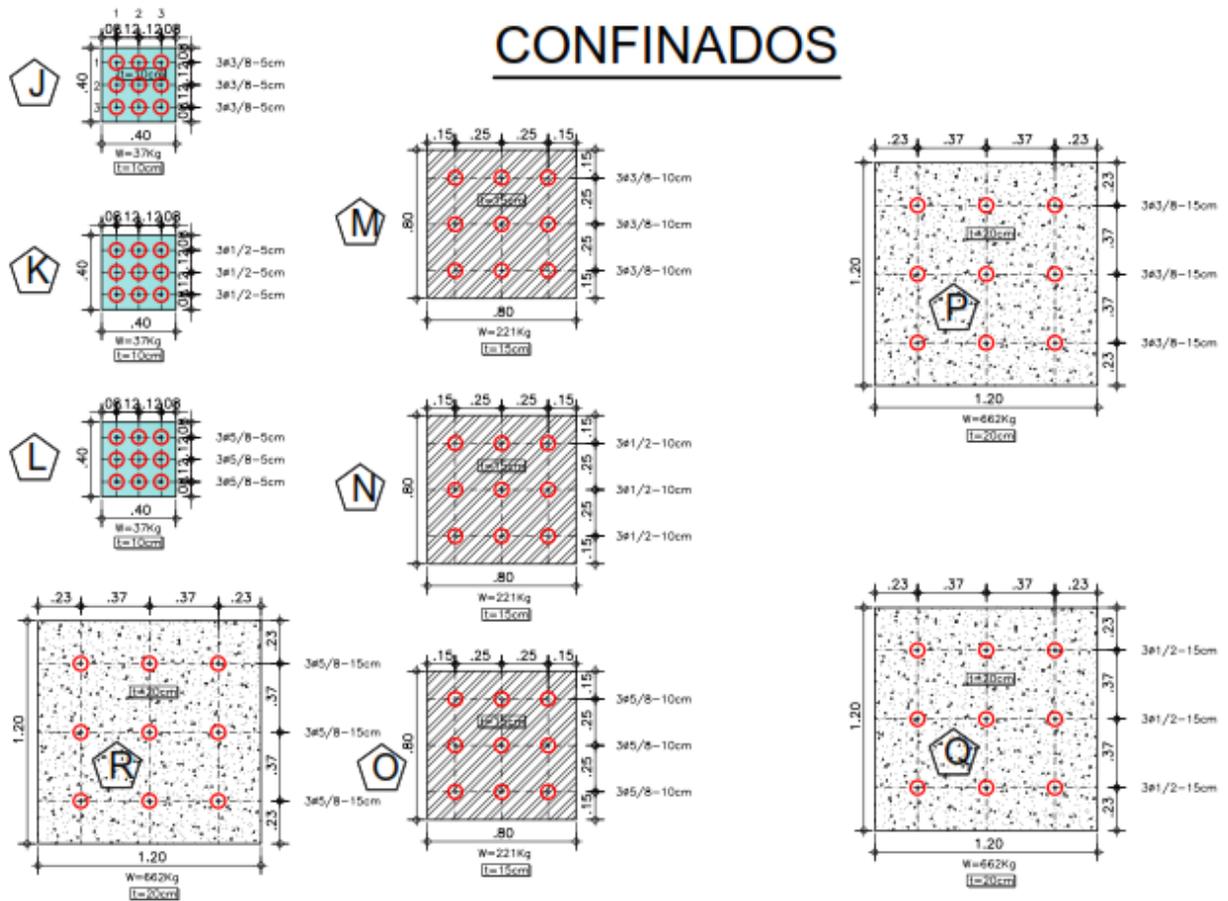


Figura 74: Distribución de perforaciones para ensayos confinados. Fuente: Autor.

NO CONFINADOS

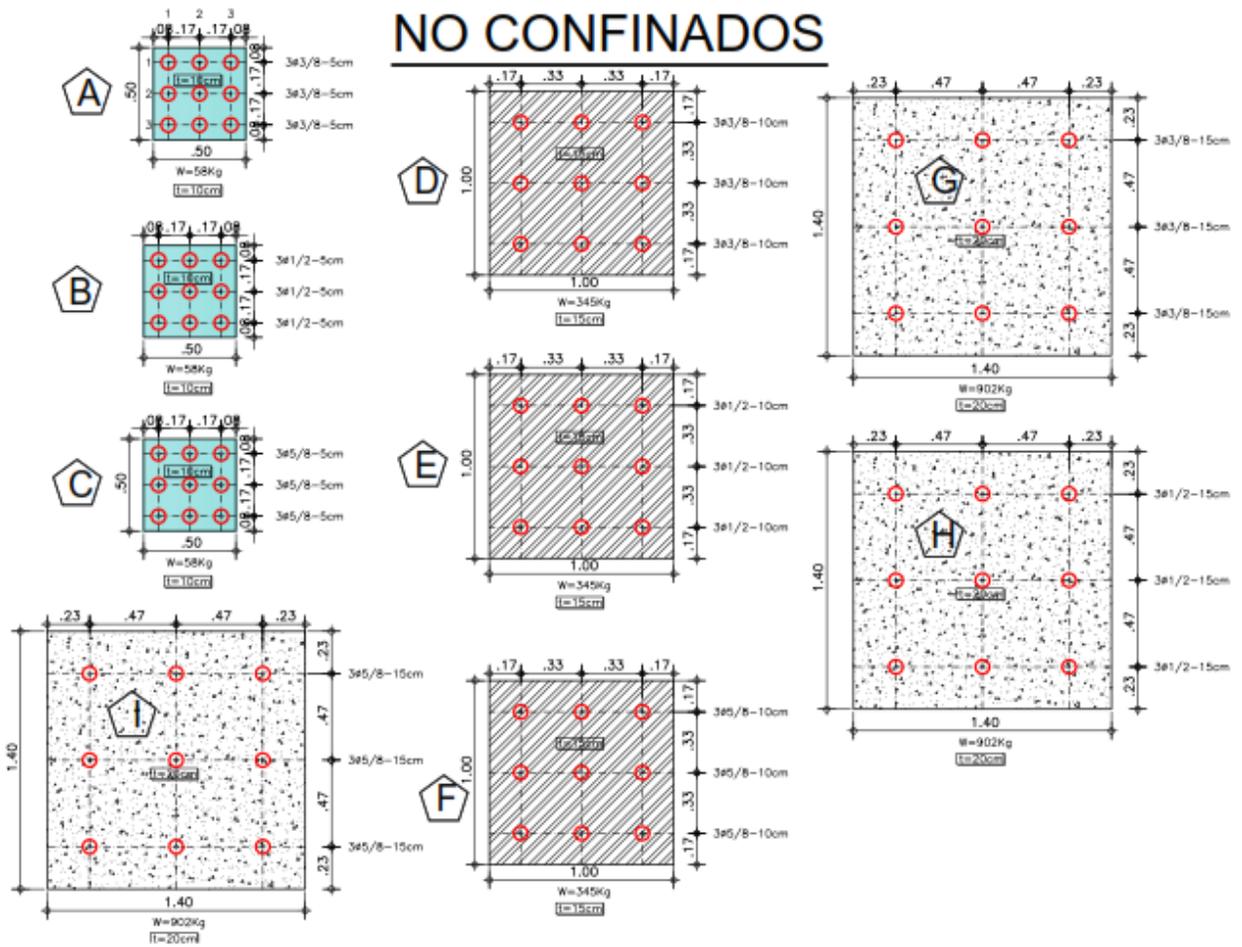


Figura 75: Distribución de perforaciones para ensayos no confinados. Fuente: Autor.

CORTANTE

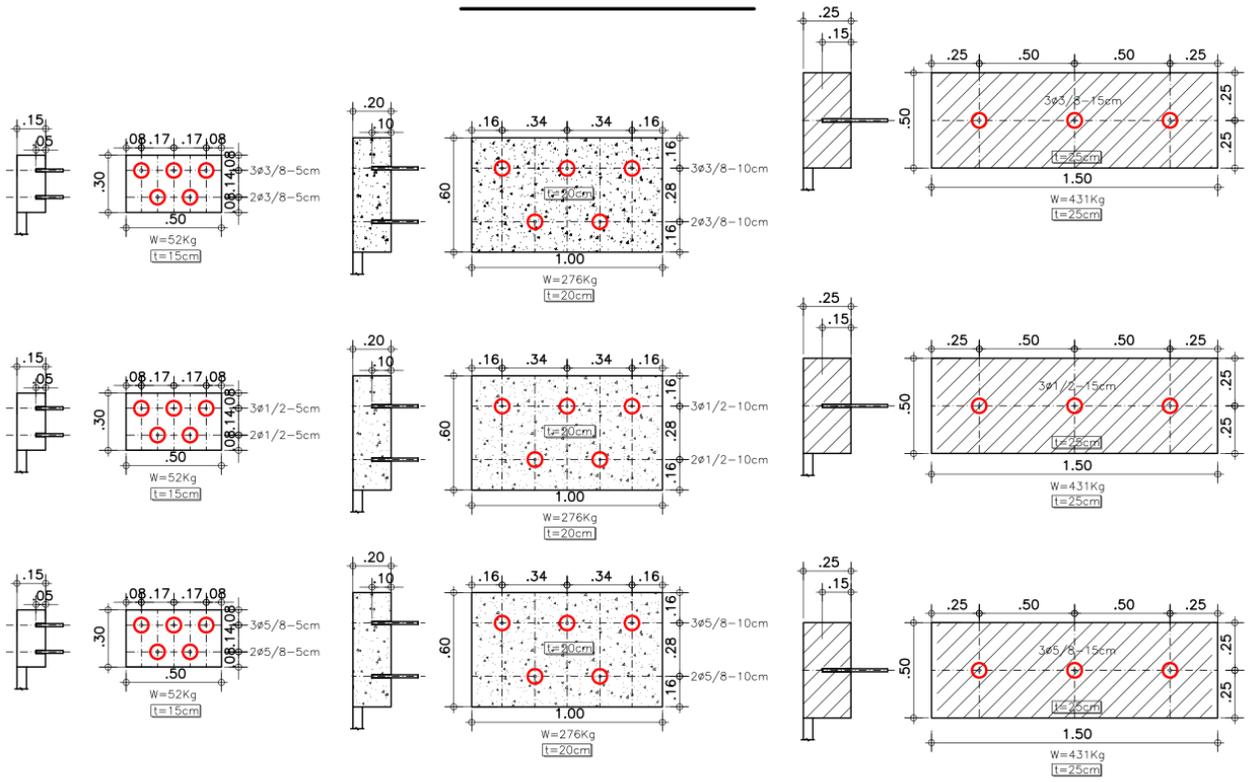


Figura 76: Distribución de perforaciones para ensayos a cortante. Fuente: Autor.

APENDICE 1

Ejemplo de cálculo de las resistencias de los anclajes según ACI 318-19

RESISTENCIA DEL ACERO DE UN ANCLAJE A TRACCION:

$$N_{sa} = A_{se,N} f_{uta} \quad (17.6.1.2)$$

$A_{se,N}$ es el área transversal efectiva de un anclaje en tracción, en mm²,

$$f_{uta} = \min(1.9 F_y, 860 \text{ MPa}).$$

$$A_{se,N} = \frac{\pi}{4} \left(d_a - \frac{0.9743}{n_t} \right)^2$$

n_t es el número de hilos por mm de roscado

Anclaje con barra de 3/8”:

$$d_a = 3/8 * 25.4 = 9.53 \text{ mm},$$

$$n_t = 16 \text{ hilos/pul} = 16 \text{ hilos}/25.4 \text{ mm} = 0.63 \text{ hilos/mm},$$

$$A_{se,N} = \frac{\pi}{4} \left(d_a - \frac{0.9743}{n_t} \right)^2 = \frac{\pi}{4} \left(9.53 - \frac{0.9743}{0.63} \right)^2 = 49.99 \text{ mm}^2$$

El acero de las barras ASTM A-193 B7 tiene $F_y = 720 \text{ MPa}$, $F_u = 860 \text{ MPa}$.

$$f_{uta} = \min(1.9 * 720, 860) = \min(1368, 860) = 860 \text{ MPa}$$

$N_{sa} = 49.99 \text{ mm}^2 * 860 \text{ N/mm}^2 = 4299 \text{ N} = 43 \text{ kN}$ Es la resistencia a la tracción de la barra de 3/8” de ASTM A-193 B7.

Anclaje con barra de 1/2”:

$$d_a = 1/2 * 25.4 = 12.70 \text{ mm},$$

$$n_t = 13 \text{ hilos/pul} = 13 \text{ hilos}/25.4 \text{ mm} = 0.512 \text{ hilos/mm},$$

$$A_{se,N} = \frac{\pi}{4} \left(d_a - \frac{0.9743}{n_t} \right)^2 = \frac{\pi}{4} \left(12.70 - \frac{0.9743}{0.512} \right)^2 = 91.55 \text{ mm}^2$$

El acero de las barras ASTM A-193 B7 tiene $F_y = 720 \text{ MPa}$, $F_u = 860 \text{ MPa}$.

$$f_{uta} = \min(1.9 * 720, 860) = \min(1368, 860) = 860 \text{ MPa}$$

$N_{sa} = 91.55 \text{ mm}^2 * 860 \text{ N/mm}^2 = 78733 \text{ N} = 78.7 \text{ kN}$ Es la resistencia a la tracción de la barra de 3/8” de ASTM A-193 B7.

Anclaje con barra de 5/8”:

$$d_a = 5/8 * 25.4 = 15.88 \text{ mm},$$

$$n_t = 11 \text{ hilos/pul} = 11 \text{ hilos}/25.4 \text{ mm} = 0.433 \text{ hilos/mm},$$

$$A_{se,N} = \frac{\pi}{4} \left(d_a - \frac{0.9743}{n_t} \right)^2 = \frac{\pi}{4} \left(15.88 - \frac{0.9743}{0.433} \right)^2 = 145.8 \text{ mm}^2$$

El acero de las barras ASTM A-193 B7 tiene $F_y = 720 \text{ MPa}$, $F_u = 860 \text{ MPa}$.

$$f_{uta} = \min(1.9 * 720, 860) = \min(1368, 860) = 860 \text{ MPa}$$

$N_{sa} = 145.8 \text{ mm}^2 * 860 \text{ N/mm}^2 = 125387 \text{ N} = \mathbf{125.4 \text{ kN}}$ Es la resistencia a la tracción de la barra de 5/8” de ASTM A-193 B7.

Los resultados de estos cálculos se pueden apreciar en la tabla 8.

RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO DE UN ANCLAJE A TRACCIÓN:

$$N_{cb} = \frac{A_{NC}}{A_{NC0}} \Psi_{ed,N} \Psi_{c,N} \Psi_{cp,N} N_b \quad (17.6.2.1a)$$

$$N_b = k_c \lambda_a \sqrt{f'_c} h_{ef}^{1.5} \quad (17.6.2.2.1)$$

$\lambda = 0.75$ por ser concreto liviano de acuerdo con la tabla 19.2.4.1(b) del ACI 318-19

$\lambda_a = 0.8\lambda = 0.8 * 0.75 = 0.6$ de acuerdo con 17.2.4 (Tabla 17.2.4.1 del ACI 318-19)

A_{NC} = área de falla proyectada en un anclaje solo, mm^2 .

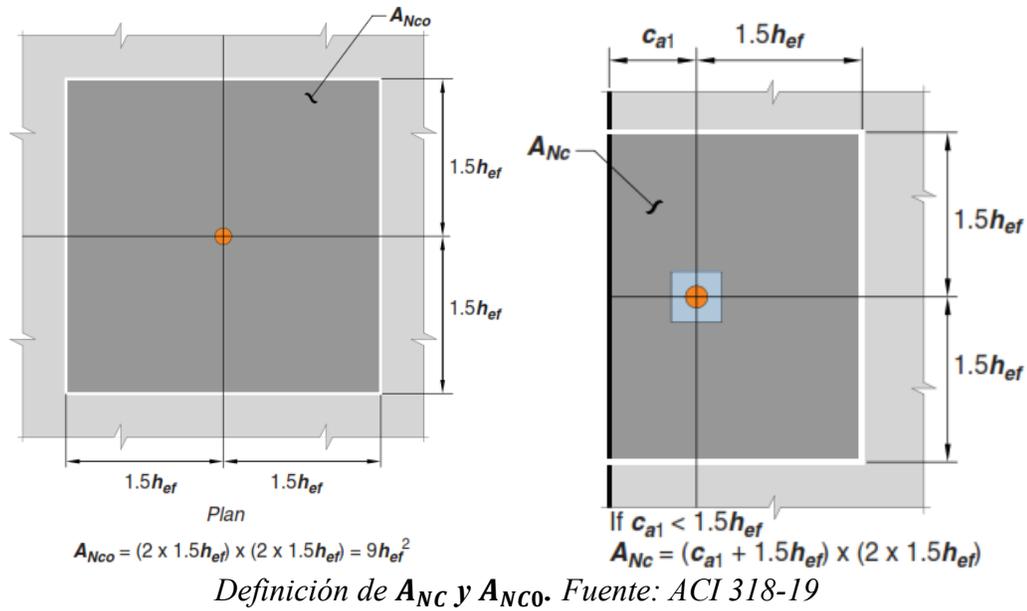
A_{NC0} = área proyectada del concreto en un anclaje solo cuando se encuentra limitada por la distancia al borde o el espaciamiento, mm^2 .

$\Psi_{ed,N}$ = factor de modificación para arrancamiento del concreto.

$\Psi_{c,N}$ = factor de modificación para fisuración.

$\Psi_{cp,N}$ = factor de modificación para hendimiento del concreto.

k_c = coeficiente para la resistencia básica al arrancamiento del concreto en tracción.



Los anclajes se encuentran separados a $3 h_{ef}$ entre ellos y a $1.5 h_{ef}$ del borde en las dos direcciones, por lo tanto $C_{a1} = 1.5 h_{ef}$ y así:

$$A_{NCO} = (3h_{ef})^2 = 9h_{ef}^2$$

$$A_{NC} = (3h_{ef})^2 = 9h_{ef}^2$$

$$\frac{A_{NC}}{A_{NCO}} = 1$$

$$C_{a,min} = 1.5 h_{ef}, C_{ac} = 1.5 h_{ef},$$

Factor para arrancamiento del concreto: $\Psi_{ed,N}$

$$\text{Si } C_{a,min} \geq 1.5 h_{ef}, \text{ entonces } \Psi_{ed,N} = 1.0 \quad (17.6.2.4.1a)$$

$$\text{Si } C_{a,min} < 1.5 h_{ef}, \text{ entonces } \Psi_{ed,N} = 0.7 + 0.3 \frac{C_{a,min}}{1.5h_{ef}} \quad (17.6.2.4.1b)$$

$$\text{Como } C_{a,min} = 1.5 h_{ef}, \text{ entonces } \Psi_{ed,N} = 1.0$$

Factor para fisuración del concreto: $\Psi_{c,N}$

Como los anclajes son postinstalados, de acuerdo con 17.6.2.5.1 el valor de $\Psi_{c,N} = 1.4$

Factor para hendimiento del concreto: $\Psi_{cp,N}$

$$\text{Si } C_{a,min} \geq C_{ac} \text{ entonces } \Psi_{cp,N} = 1.0 \quad (17.6.2.6.1a)$$

$$\text{Si } C_{a,min} < C_{ac}, \text{ entonces } \Psi_{ed,N} = \frac{C_{a,min}}{C_{ac}} \geq \frac{1.5h_{ef}}{C_{ac}} \quad (17.6.2.6.1b)$$

Como $C_{a,min} = 1.5 h_{ef} = C_{ac}$, entonces $\Psi_{cp,N} = 1.0$

De acuerdo con 17.6.2.2.1 $k_c=7$ para anclajes postinstalados

| | |
|---------------------------------|-------|
| A_{Nc} / A_{Nco} | 1.0 |
| $\Psi_{ed,N}$ | 1.0 |
| $\Psi_{c,N}$ | 1.4 |
| $\Psi_{cp,N}$ | 1.0 |
| k_c (anclajes postinstalados) | 7 |
| $f'c$ (MPa) | 45.40 |

Para la profundidad del anclaje $h_{ef}=50$ mm ,

$$N_b = k_c \lambda_a \sqrt{f'c} h_{ef}^{1.5} \quad (17.6.2.2.1)$$

$$N_b = 7 \times 0.6 \times (45.4)^{0.5} \times 50^{1.5} = 10005 \text{ N} = 10 \text{ kN}$$

$$N_{cb} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \Psi_{ed,N} \Psi_{c,N} \Psi_{cp,N} N_b \quad (17.6.2.1a)$$

$$N_{cb} = 1.0 \times 1.0 \times 1.4 \times 1.0 \times 10 = 14 \text{ kN}$$

Para la profundidad del anclaje $h_{ef}=100$ mm ,

$$N_b = k_c \lambda_a \sqrt{f'c} h_{ef}^{1.5} \quad (17.6.2.2.1)$$

$$N_b = 7 \times 0.6 \times (45.4)^{0.5} \times 100^{1.5} = 28299 \text{ N} = 28.3 \text{ kN}$$

$$N_{cb} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \Psi_{ed,N} \Psi_{c,N} \Psi_{cp,N} N_b \quad (17.6.2.1a)$$

$$N_{cb} = 1.0 \times 1.0 \times 1.4 \times 1.0 \times 28.3 = 39.6 \text{ kN}$$

Para la profundidad del anclaje $h_{ef}=150$ mm ,

$$N_b = k_c \lambda_a \sqrt{f'_c} h_{ef}^{1.5} \quad (17.6.2.2.1)$$

$$N_b = 7 \times 0.6 \times (45.4)^{0.5} \times 150^{1.5} = 51989 \text{ N} = 52.0 \text{ kN}$$

$$N_{cb} = \frac{A_{NC}}{A_{NC0}} \Psi_{ed,N} \Psi_{c,N} \Psi_{cp,N} N_b \quad (17.6.2.1a)$$

$$N_{cb} = 1.0 \times 1.0 \times 1.4 \times 1.0 \times 52.0 = \mathbf{72.8 \text{ kN}}$$

Los resultados de estos cálculos se pueden apreciar en la tabla 10

RESISTENCIA A LA ADHERENCIA DE UN ANCLAJE ADHERIDO:

$$N_a = \frac{A_{Na}}{A_{Na0}} \Psi_{ed,Na} \Psi_{cp,Na} N_{ba} \quad (17.6.5.1a)$$

$$N_{ba} = \lambda_a \tau_{cr} \pi d_a h_{ef} \quad (17.6.5.2.1)$$

$\lambda = 0.75$ por ser concreto liviano de acuerdo con la tabla 19.2.4.1(b) del ACI 318-19

$\lambda_a = 0.8 \lambda = 0.8 \times 0.75 = 0.6$ de acuerdo con 17.2.4 (Tabla 17.2.4.1 del ACI 318-19)

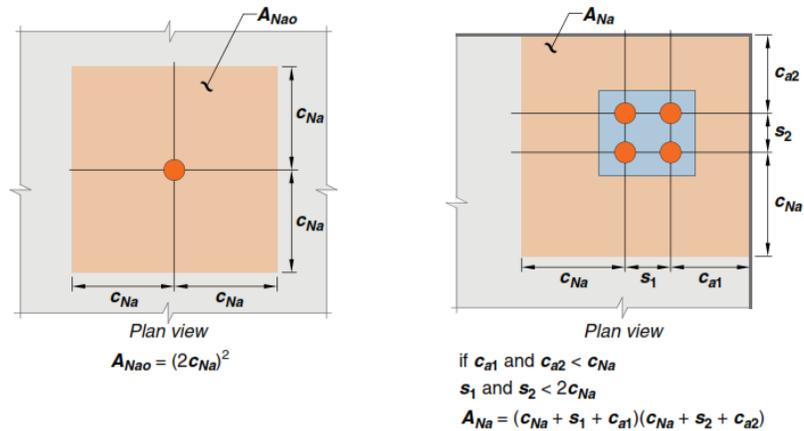
$\tau_{cr} = \tau_{uncr} = \mathbf{9.30 \text{ MPa}}$ - Sika AnchorFix 3001

A_{Na} = área de influencia proyectada de un solo anclaje, mm².

A_{Na0} = área de influencia proyectada de un solo anclaje a la adherencia a tracción si no está limitada por la distancia al borde o la separación, mm².

$\Psi_{ed,Na}$ = factor de modificación para arrancamiento del concreto.

$\Psi_{cp,Na}$ = factor de modificación de hendimiento por adherencia.



Definición de A_{Na} y A_{Na0} . Fuente: ACI 318-19

Los anclajes se encuentran separados a $3 h_{ef}$ entre ellos y a $1.5 h_{ef}$ del borde en las dos direcciones, por lo tanto:

$$A_{N_a} = (2C_{N_a})^2, \text{ según 17.6.5.1.1}$$

$$A_{N_{a0}} = (2C_{N_a})^2 \quad (17.6.5.1.2a)$$

$$\frac{A_{N_c}}{A_{N_{c0}}} = 1$$

$$C_{a,min} = 1.5 h_{ef}, \quad C_{ac} = 1.5 h_{ef}$$

$$C_{N_a} = 10 d_a \sqrt{\frac{\tau_{uncr}}{7.6}} \quad (17.6.5.1.2b)$$

$$C_{N_a} = 10 d_a \sqrt{\frac{\tau_{uncr}}{7.6}} = 10 d_a \sqrt{\frac{9.3}{7.6}} = 11.06 d_a$$

Factor de arrancamiento del concreto: Ψ_{ed,N_a}

$$\text{Si } C_{a,min} \geq C_{N_a}, \text{ entonces } \Psi_{ed,N_a} = 1.0 \quad (17.6.5.4.1a)$$

$$\text{Si } C_{a,min} < C_{N_a}, \text{ entonces } \Psi_{ed,N_a} = 0.7 + 0.3 \frac{C_{a,min}}{C_{N_a}} \quad (17.6.5.4.1b)$$

Factor de hendimiento por adherencia: Ψ_{cp,N_a}

$$\text{Si } C_{a,min} \geq C_{ac} \text{ entonces } \Psi_{cp,N_a} = 1.0 \quad (17.6.5.5.1a)$$

$$\text{Si } C_{a,min} < C_{ac}, \text{ entonces } \Psi_{cp,N_a} = \frac{C_{a,min}}{C_{ac}} \geq \frac{C_{N_a}}{C_{ac}} \quad (17.6.5.5.1b)$$

$$\text{Como } C_{a,min} = 1.5 h_{ef} = C_{ac}, \text{ entonces } \Psi_{cp,N_a} = 1.0$$

| | |
|------------------------|-----|
| $A_{N_a} / A_{N_{a0}}$ | 1.0 |
| $\Psi_{ed,Na}$ | 1.0 |
| $\Psi_{cp,Na}$ | 1.0 |
| τ_{cr} | 9.3 |

Anclaje con barra de 1/2" - $h_{ef}=100$ mm:

$$d_a = 1/2 * 25.4 = 12.70 \text{ mm,}$$

$h_{ef}=100$ mm, el valor de N_{ba} es:

$$N_{ba} = \lambda_a \tau_{cr} \pi d_a h_{ef} = 0.6 \times 9.3 \times \pi \times 12.70 \times 100 = 22263 \text{ N} = \mathbf{22.3 \text{ kN}},$$

$$\text{Se tomó } C_{a,min} = 170 \text{ mm}$$

$$C_{N_a} = 10 d_a \sqrt{\frac{T_{unscr}}{7.6}} = 10 (12.70) \sqrt{\frac{9.3}{7.6}} = 140.49 \text{ mm},$$

como $C_{a,min} > C_{N_a}$ entonces:

$$\Psi_{ed,N_a} = 1.0$$

$$N_a = 1.0 \times 1.0 \times 1.0 \times 22.3 \text{ kN} = \mathbf{22.3 \text{ kN}}$$

Anclaje con barra de 1/2" - $h_{ef} = 150 \text{ mm}$:

$h_{ef} = 150 \text{ mm}$, el valor de N_{ba} es:

$$N_{ba} = \lambda_a \tau_{cr} \pi d_a h_{ef} = 0.6 \times 9.3 \times \pi \times 12.70 \times 150 = 33395 \text{ N} = \mathbf{33.4 \text{ kN}}$$

$$C_{a,min} = 230 \text{ mm}$$

$$C_{N_a} = 10 d_a \sqrt{\frac{T_{unscr}}{7.6}} = 10 (12.70) \sqrt{\frac{9.3}{7.6}} = 140.49 \text{ mm},$$

como $C_{a,min} > C_{N_a}$ entonces:

$$\Psi_{ed,N_a} = 1.0$$

$$N_a = 1.0 \times 1.0 \times 1.0 \times 33.4 \text{ kN} = \mathbf{33.4 \text{ kN}}$$

Anclaje con barra de 5/8" - $h_{ef} = 150 \text{ mm}$:

$$d_a = 5/8 \times 25.4 = 15.875 \text{ mm},$$

$h_{ef} = 150 \text{ mm}$, el valor de N_{ba} es:

$$N_{ba} = \lambda_a \tau_{cr} \pi d_a h_{ef} = 0.6 \times 9.3 \times \pi \times 15.875 \times 150 = 41744 \text{ N} = \mathbf{41.7 \text{ kN}},$$

$$C_{a,min} = 230 \text{ mm}$$

$$C_{N_a} = 10 d_a \sqrt{\frac{T_{uncr}}{7.6}} = 10 (15.875) \sqrt{\frac{9.3}{7.6}} = 175.61 \text{ mm,}$$

como $C_{a,min} > C_{N_a}$ entonces:

$$\Psi_{ed,N_a} = 1.0$$

$$N_a = 1.0 \times 1.0 \times 1.0 \times 41.7 \text{ kN} = \mathbf{41.7 \text{ kN}}$$

Los resultados de estos cálculos se han plasmado en la tabla 12

RESISTENCIA DEL ACERO DE UN ANCLAJE SOMETIDO A CORTANTE:

$$V_{sa} = 0.6 A_{seV} f_{uta} \quad (17.7.1.2b)$$

$$f_{uta} = \min(1.9F_y, 860 \text{ MPa})$$

A_{seV} = área efectiva de la sección transversal del anclaje en cortante, mm².

$$A_{se,V} = \frac{\pi}{4} \left(d_a - \frac{0.9743}{n_t} \right)^2$$

n_t es el número de hilos por mm de roscado

Anclaje con barra de 3/8”:

$$d_a = 3/8 \times 25.4 = 9.53 \text{ mm,}$$

$$n_t = 16 \text{ hilos/pul} = 16 \text{ hilos}/25.4 \text{ mm} = 0.63 \text{ hilos/mm,}$$

$$A_{seV} = \frac{\pi}{4} \left(d_a - \frac{0.9743}{n_t} \right)^2 = \frac{\pi}{4} \left(9.53 - \frac{0.9743}{0.63} \right)^2 = 49.99 \text{ mm}^2$$

$$f_{uta} = \min(1.9 \times 720, 860) = \min(1368, 860) = 860 \text{ MPa}$$

$V_{sa} = 0.6 \times 49.99 \times 860 = 25795 \text{ N} = \mathbf{25.8 \text{ kN}}$ Es la resistencia al cortante de la barra de 3/8” de ASTM A-193 B7.

Anclaje con barra de 1/2”:

$$d_a = 1/2 \times 25.4 = 12.7 \text{ mm,}$$

$$n_t = 13 \text{ hilos/pul} = 13 \text{ hilos}/25.4 \text{ mm} = 0.512 \text{ hilos/mm,}$$

$$A_{sev} = \frac{\pi}{4} \left(d_a - \frac{0.9743}{n_t} \right)^2 = \frac{\pi}{4} \left(12.7 - \frac{0.9743}{0.512} \right)^2 = 91.55 \text{ mm}^2$$

$$f_{uta} = \min(1.9 \cdot 720, 860) = \min(1368, 860) = 860 \text{ MPa}$$

$V_{sa} = 0.6 \times 91.55 \times 860 = 47240 \text{ N} = 47.2 \text{ kN}$ Es la resistencia al cortante de la barra de 1/2" de ASTM A-193 B7.

Anclaje con barra de 5/8":

$$d_a = 5/8 \cdot 25.4 = 15.88 \text{ mm},$$

$$n_t = 11 \text{ hilos/pul} = 11 \text{ hilos}/25.4 \text{ mm} = 0.433 \text{ hilos/mm},$$

$$A_{sev} = \frac{\pi}{4} \left(d_a - \frac{0.9743}{n_t} \right)^2 = \frac{\pi}{4} \left(15.88 - \frac{0.9743}{0.433} \right)^2 = 145.81 \text{ mm}^2$$

$$f_{uta} = \min(1.9 \cdot 720, 860) = \min(1368, 860) = 860 \text{ MPa}$$

$V_{sa} = 0.6 \times 145.81 \times 860 = 75238 \text{ N} = 75.2 \text{ kN}$ Es la resistencia al cortante de la barra de 5/8" de ASTM A-193 B7.

Los resultados de estos cálculos se pueden apreciar en la tabla 13.