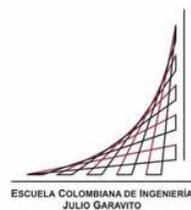


Maestría en Ingeniería Civil

Comportamiento de anclajes postinstalados en concreto de alta resistencia, sometidos a carga de tensión y corte

Humberto Morales Monroy

Bogotá, D.C., 2 de febrero de 2018



Comportamiento de anclajes postinstalados en concreto de alta resistencia, sometidos a carga de tensión y corte.

Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Estructuras

Pedro Nel Quiroga Saavedra, Ph.D.

Director

Donald F. Meinheit, Ph.D.

Asesor

Bogotá, D.C., 2 de febrero de 2018



La tesis de maestría titulada “Comportamiento de anclajes postinstalados en concreto de alta resistencia, sometidos a carga de tensión y corte”, presentada por Humberto Morales Monroy, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras.

Director de la tesis

Pedro N. Quiroga

Jurado

Jorge Rendón

Jurado

Miguel Olier

Bogotá, D.C., 2 de febrero de 2018

DEDICATORIA

A mis padres por su apoyo incondicional en todas las etapas de mi formación como persona y profesional.

A mis familiares por todos los consejos que me brindaron.

Finalmente, al amor de mi vida, por ayudarme, aconsejarme y brindarme su cariño diario.

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, y al ingeniero Pedro Nel Quiroga y demás funcionarios sin los cuales no hubiese sido posible el desarrollo de este proyecto de grado.

A Argos, y a la ingeniera Paola Jiménez por proveer el concreto utilizado en la construcción de las losas.

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

RESUMEN

En los últimos 40 años, el desarrollo mundial en infraestructura ha mostrado un auge en la construcción de edificaciones de grandes alturas. Hoy día, empresas como Argos son capaces de producir concretos con resistencias a la compresión de hasta 83 MPa, un ejemplo de esta tendencia es el rascacielos 'Burj Khalifa', edificación que requirió la colocación de concretos con resistencias máximas de 80 MPa.

La mejora de las características de los concretos, especialmente las relativas a su resistencia, ejerce una influencia decisiva en la elevación de los valores límites de resistencia del concreto contemplados en los distintos códigos internacionales. Estos límites son establecidos por falta de información y ensayos que permitan realizar las tareas de diseño de manera conservadora.

Esto mismo ocurre en el tema de investigación planteado, situación que se explica en el apéndice D del reglamento colombiano NSR-10 y el reglamento americano ACI-318-14, en el cual se establece un límite superior de 55 MPa en el diseño de los anclajes postinstalados a menos que se realicen los ensayos correspondientes.

Debido a esto, se planteó un programa experimental en el cuál se analizaría el comportamiento de anclajes postinstalados en concretos de alta resistencia, para esto, se construyeron 13 losas macizas de concreto, sobre las cuales se anclaron 114 barras roscadas, donde 78 de estos anclajes fueron ensayados a cargas de tensión, mientras que el resto se ensayaron a cortante.

Los resultados obtenidos de estos ensayos fueron comparados con las ecuaciones que determinan la resistencia teórica de los anclajes, así como la modalidad de falla esperada de los mismos ante diferentes configuraciones geométricas y de materiales. Se pudo observar que para los ensayos confinados a tensión la falla predominante se presenta en el acero, al igual que para los ensayos a cortante.

Para los ensayos no confinados se concluyó que para profundidades menores a 2.5 veces el diámetro para barras de 3/8" la falla predominante es por adherencia, mientras que para profundidades mayores a 2.5 veces el diámetro y menores a 7.5 veces el diámetro, la falla predominante es por arrancamiento del concreto, presentándose para barras de 5/8" hasta profundidades de 5 veces su diámetro. Y finalmente para profundidades mayores a las descritas predomina la falla del acero.

ABSTRACT

In the last 40 years, the world development in infrastructure has shown a boom in the construction of buildings of great heights. Today, companies such as Argos are able to produce concrete with compressive strengths of up to 83 MPa, an example of this trend is the 'Burj Khalifa' skyscraper, a building that required the placement of concrete with maximum strengths of 80 MPa.

The improvement of concrete characteristics, especially those related to their strength, exerts a decisive influence on the elevation of the concrete resistance limit values contemplated in the different international codes. These limits are established due to lack of information and tests that allow the design tasks to be carried out conservatively.

The same occurs in the research topic, a situation that is explained in appendix D of the colombian code NSR-10 and the american ACI-318-14, which establishes an upper limit of 55 MPa in the design of the post-installed anchors unless the corresponding tests are carried out.

Due to this, an experimental program was proposed in which the behavior of post-installed anchors in high-strength concrete was analyzed, for this, 13 solid concrete slabs were built, on which 114 threaded rods were anchored, where 78 of these anchors were tested at tensile loads, while the rest were shear tested.

The results obtained from these tests were compared with the equations that determine the theoretical strength of the anchors, as well as the modality of expected failure of the same with different geometric configurations and materials. It could be observed that for confined tests, the predominant failure occurs in steel, as well as for shear tests.

For the unconfined tests it was concluded that for depths less than 2.5 times the diameter for 3/8" rods the predominant fault is for bond failure, while for depths greater than 2.5 times the diameter and less than 7.5 times the diameter, the fault predominant is by concrete breakout, appearing for bars 5/8" to depths of 5 times its diameter. And finally, for depths greater than those described, steel failure predominates.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Árbol del problema	3
2. OBJETIVOS	4
2.1. Objetivos generales.....	4
2.2. Objetivos específicos.....	4
3. MARCO TEÓRICO	5
3.1. Definiciones	5
3.2. Requisitos generales para la resistencia de los anclajes	7
4. ESTADO DEL ARTE	10
4.1. Anclajes postinstalados en concreto de alta resistencia (Ruda Arias & Páez Moreno, 2017)	10
4.2. Anclajes postinstalados sometidos a tensión y corte (Epackachi, Esmaili, Mirghaderi, & Behbahani, 2015).....	11
4.3. Anclajes con barras de GFRP sometidos a tensión (Islam, Afefy, Sennah, & Azimi, 2015)	11
4.4. Comportamiento de anclajes postinstalados de grandes diámetros en concreto (Wang, Wu, Ouyang, & Zhai, 2016).....	12
4.5. Anclajes postinstalados en concreto de alto desempeño (Cattaneo & Muciaccia, 2016)	12
4.6. Comportamiento de anclajes postinstalados en concreto de baja resistencia (Yilmaz, Özen, & Yardim, 2013).....	13
5. FASE EXPERIMENTAL	14
5.1. MATERIALES	14
5.1.1. Concreto de alta resistencia	14
5.1.2. Barras roscadas	14
5.1.3. Adhesivo epóxico	14
5.2. LOSAS DE CONCRETO	15
5.3. MATRIZ DE ENSAYOS	17
5.4. INSTALACIÓN DE ANCLAJES	18
5.5. MONTAJE PARA LOS ENSAYOS	20
5.5.1. Ensayos no confinados a tensión.	20
5.5.2. Ensayos confinados a tensión.....	23
5.5.3. Ensayos a cortante.....	25
6. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA TEÓRICA DE LOS ANCLAJES	27
6.1. Resistencia del acero de un anclaje en tracción	27
6.2. Resistencia al arrancamiento del concreto de un anclaje en tracción .	28

6.3. Resistencia a la adherencia en tracción de anclajes adheridos.....	29
6.4. Modalidad teórica de falla de anclajes a tracción.....	31
6.5. Resistencia del acero del anclaje sometido a cortante.....	32
7. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS	34
7.1. Ensayos confinados a tensión	34
7.2. Ensayos a cortante.....	37
7.3. Ensayos no confinados a tensión.....	40
8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	45
8.1. Coeficiente de reducción de resistencia	45
8.2. Ensayos confinados a tensión	45
8.3. Ensayos no confinados a tensión.....	46
8.4. Ensayos a cortante.....	47
9. CONCLUSIONES	49
10. RECOMENDACIONES.....	50
11. BIBLIOGRAFÍA	51
12. ANEXOS.....	52
12.1. Concreto de alta resistencia.....	52
12.2. Barras roscadas AISI 1020.....	54
12.3. Barras roscadas ASTM A-193 B7	54
12.5. Resultados de ensayos a cortante.....	57
12.6. Resultados de ensayos no confinadas a tensión	58

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resistencia requerida para los anclajes.....	7
Tabla 2. Separación crítica de anclajes para considerar efectos de grupo.....	9
Tabla 3. Especificaciones de las losas para ensayos de tensión.	15
Tabla 4. Especificaciones de las losas para ensayos de cortante.	16
Tabla 5. Diámetros, profundidades y sollicitaciones para las barras AISI 1020.	17
Tabla 6. Diámetros, profundidades y sollicitaciones para barras ASTM A-193 B7.	18
Tabla 7. Resistencia teórica a tensión del acero AISI 1020.....	27
Tabla 8. Resistencia teórica a tensión del acero ASTM A-193 B7.....	28
Tabla 9. Datos constantes para el cálculo de la resistencia teórica al arrancamiento.	28
Tabla 10. Resistencia teórica al arrancamiento del concreto de un anclaje a tracción.	29
Tabla 11. Datos constantes para el cálculo de la resistencia teórica a la adherencia.	30
Tabla 12. Resistencia teórica a la adherencia.	30
Tabla 13. Resistencia a cortante del acero AISI 1020.	32
Tabla 14. Carga promedio de falla para barras $\phi 3/8$ " AISI 1020.....	34
Tabla 15. Carga promedio de falla para barras $\phi 1/2$ " AISI 1020.....	35
Tabla 16. Carga promedio de falla para barras $\phi 5/8$ " AISI 1020.....	35
Tabla 17. Carga promedio de falla para barras $\phi 3/8$ ".	37
Tabla 18. Carga promedio de falla para barras $\phi 1/2$ ".	38
Tabla 19. Carga promedio y modalidad de falla para barras $\phi 3/8$ ".	40
Tabla 20. Carga promedio y modalidad de falla para barras $\phi 1/2$ ".	41
Tabla 21. Carga promedio y modalidad de falla para barras $\phi 5/8$ ".	41
Tabla 22. Coeficientes de reducción para ensayos confinados a tensión.....	45
Tabla 23. Comparación de carga y modalidad de falla real y teórica.....	46
Tabla 24. Comparación de carga y modalidad de falla real y teórica.....	47
Tabla 25. Comparación de carga y modalidad de falla real y teórica.....	47
Tabla 26. Coeficientes de reducción y factores de seguridad para ensayos a cortante.	47
Tabla 27. Resultados de los ensayos de cilindros de concreto.	52
Tabla 28. Resultados de barras roscadas AISI 1020.....	54
Tabla 29. Resultados de barras roscadas ASTM A-193 B7.....	54
Tabla 30. Ensayos confinados a tensión de barras AISI 1020 $\phi 3/8$ ".....	55
Tabla 31. Ensayos confinados a tensión de barras AISI 1020 $\phi 1/2$ ".....	55
Tabla 32. Ensayos confinados a tensión de barras AISI 1020 $\phi 5/8$ ".....	56
Tabla 33. Ensayos a cortante de barras AISI 1020 $\phi 3/8$ ".....	57
Tabla 34. Ensayos a cortante de barras AISI 1020 $\phi 1/2$ ".....	57
Tabla 35. Ensayos no confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 $\phi 3/8$ ".....	58
Tabla 36. Ensayos no confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 $\phi 1/2$ ".....	58
Tabla 37. Ensayos no confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 $\phi 5/8$ ".....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Árbol del problema.....	3
Figura 2. Tipos de anclajes.....	6
Figura 3. Modos de falla para anclajes sometidos a tensión.	8
Figura 4. Modos de falla para anclajes sometidos a cortante.	8
Figura 5. Formaleta de las losas para ensayos de tensión.....	15
Figura 6. Losas fundidas para ensayos de tensión.....	16
Figura 7. Formaleta de las losas para ensayos de cortante.	16
Figura 8. Losas fundidas para ensayos de cortante.	17
Figura 9. Perforación de los primeros anclajes.	18
Figura 10. Perforación de las losas con taladro rotopercutor.....	19
Figura 11. Soplador para la limpieza de la perforación con aire a presión.	19
Figura 12. Inyección del producto epóxico en la perforación.	20
Figura 13. Ejemplo de montaje para ensayos no confinados a tensión.	21
Figura 14. Montaje final para ensayos no confinados a tensión.	22
Figura 15. Ejemplo de montaje para ensayos confinados a tensión.....	23
Figura 16. Montaje final para ensayos confinados a tensión.	24
Figura 17. Consola de medición, bomba hidráulico y montaje para ensayos no confinados a tensión.	25
Figura 18. Ejemplo de montaje para ensayos de cortante.....	25
Figura 19. Montaje final para ensayos a cortante.	26
Figura 20. Resistencia teórica a tensión del acero AISI 1020.....	27
Figura 21. Resistencia teórica a tensión del acero ASTM A-193 B7.....	28
Figura 22. Resistencia teórica al arrancamiento.	29
Figura 23. Resistencia teórica a la adherencia.	30
Figura 24. Modalidad teórica de falla para barras $\phi 3/8$ " ASTM A-193 B7.....	31
Figura 25. Modalidad teórica de falla para barras $\phi 1/2$ " ASTM A-193 B7.....	31
Figura 26. Modalidad teórica de falla para barras $\phi 5/8$ " ASTM A-193 B7.....	32
Figura 27. Resistencia teórica a cortante del acero AISI 1020.	33
Figura 28. Cargas de falla para barras $\phi 3/8$ " AISI 1020.....	34
Figura 29. Cargas de falla para barras $\phi 1/2$ " AISI 1020.....	35
Figura 30. Cargas de falla para barras $\phi 5/8$ " AISI 1020.....	36
Figura 31. Anclaje $\phi 3/8$ " después de ensayo confinado a tensión. Falla del acero.	36
Figura 32. Anclaje $\phi 1/2$ " después de ensayo confinado a tensión. Falla del acero.	37
Figura 33. Cargas de falla para barras $\phi 3/8$ ".	38
Figura 34. Cargas de falla para barras $\phi 1/2$ ".	38
Figura 35. Anclaje $\phi 1/2$ " después de ensayo a corte. Falla del acero.....	39
Figura 36. Superficie de la losa ensayada. Corte total del anclaje.....	39
Figura 37. Cargas de falla para barras $\phi 3/8$ ".	40
Figura 38. Cargas de falla para barras $\phi 1/2$ ".	41

Figura 39. Cargas de falla para barras $\phi 5/8"$	42
Figura 40. Falla por adherencia de anclaje $\phi 3/8"$ a profundidad de embebido igual a 2.5 veces el diámetro.	42
Figura 41. Falla por arrancamiento del concreto sin extracción de anclaje $\phi 1/2"$ a profundidad de embebido 2.5 veces el diámetro.	43
Figura 42. Falla por arrancamiento del concreto con extracción de anclaje $\phi 1/2"$ a profundidad de embebido de 5 veces el diámetro.	43
Figura 43. Falla por arrancamiento del concreto con extracción de anclaje $\phi 5/8"$ a profundidad de embebido de 5 veces el diámetro.	44
Figura 44. Cargas de ensayos, resistencia teórica y reducida de ensayos confinados a tensión.	46
Figura 45. Cargas de ensayos, resistencia teórica y reducida para ensayos a cortante.	48
Figura 46. Cilindro de concreto en máquina de ensayo.	52
Figura 47. Cilindro de concreto ensayado a compresión a los 14 días.	53
Figura 48. Cilindro de concreto ensayado a compresión a los 28 días.	53

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.
$A_{se,N}$	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.A.R.	Concreto de alta resistencia.
$C_{a,máx}$	Máxima distancia medida desde el centro del fuste de un anclaje al borde del concreto.
$C_{a,min}$	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 sobre dimensionado.
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	Coficiente para la resistencia básica al arrancamiento del concreto en tracción.
k_{cp}	Coficiente 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.
s_s	Desviación estándar de la muestra.
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.
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

En los últimos 40 años, la resistencia a la compresión de concretos producidos comercialmente se ha triplicado en el mercado norteamericano, de 35 a 95 MPa (Caldarone, 2009). En el mercado colombiano, empresas como Argos son capaces de producir concretos con resistencias a la compresión de hasta 83 MPa (ficha técnica de Argos, octubre 2014, versión 4).

En la actualidad, el desarrollo mundial en infraestructura apunta a la construcción de edificaciones de grandes alturas, las cuales requerirán la utilización de C.A.R. (especialmente en los elementos resistentes de los primeros niveles y en la cimentación). Un ejemplo de esta tendencia es el rascacielos 'Burj Khalifa', edificación que requirió la colocación de concretos con resistencias máximas de 80 MPa (Baker, Korista, & Novak, 2008).

Este incremento en la resistencia de los concretos es consecuencia directa de la aparición de aditivos como los superfluidificantes y del humo de sílice (González-Isabel, 1993). La mejora de las características de los concretos, especialmente las relativas a su resistencia, ejerce una influencia decisiva en la elevación de los valores límites de resistencia del concreto contemplados en los distintos códigos internacionales (González-Isabel, 1993). Estos límites son establecidos por falta de información y ensayos que permitan realizar las tareas de diseño de manera conservadora.

Esto mismo ocurre en el tema de investigación planteado (anclajes en concreto de alta resistencia), situación que se explica en el apéndice D del reglamento colombiano NSR-10 y el reglamento americano ACI-318-14:

Un número limitado de ensayos de anclajes preinstalados y postinstalados en concreto de alta resistencia indica que los procedimientos de diseño contenidos en este apéndice no son conservadores, . . . Hasta no contar con más ensayos, se ha fijado un límite superior a f'_c de 70 MPa para el diseño de anclajes preinstalados. . . Por eso, el f'_c queda limitado a 55 MPa en el diseño de los anclajes postinstalados, a menos que se realicen los ensayos correspondientes.

Finalmente, en la mayoría de los trabajos de construcción es necesario sujetar elementos (estructurales o no) en otros elementos resistentes (columnas, muros, vigas), por ejemplo: fijar una maquinaria vibratoria sobre un cimiento en concreto, esta unión se realiza a través de los elementos denominados 'anclajes'.

Todo lo mencionado llevó a formular la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo es el comportamiento estructural de los anclajes en concreto de alta resistencia?

1.2. Justificación

Desde el punto de vista académico, el tema de investigación beneficiará a los estudiantes de la Escuela Colombiana de Ingeniería que tomen el curso intersemestral de 'Anclajes al concreto y reforzamiento externo con FRP' ya que se podrá reforzar la temática en lo concerniente a C.A.R. De igual manera, incentivará la ejecución de investigaciones cuyo tema central sea 'concreto de alta resistencia'.

A nivel técnico se ampliaría la investigación sobre el comportamiento estructural de los C.A.R. para otros tipos de elementos, materiales y solicitaciones, dando la posibilidad de actualizar los códigos de diseño internacionales.

1.3. Árbol del problema

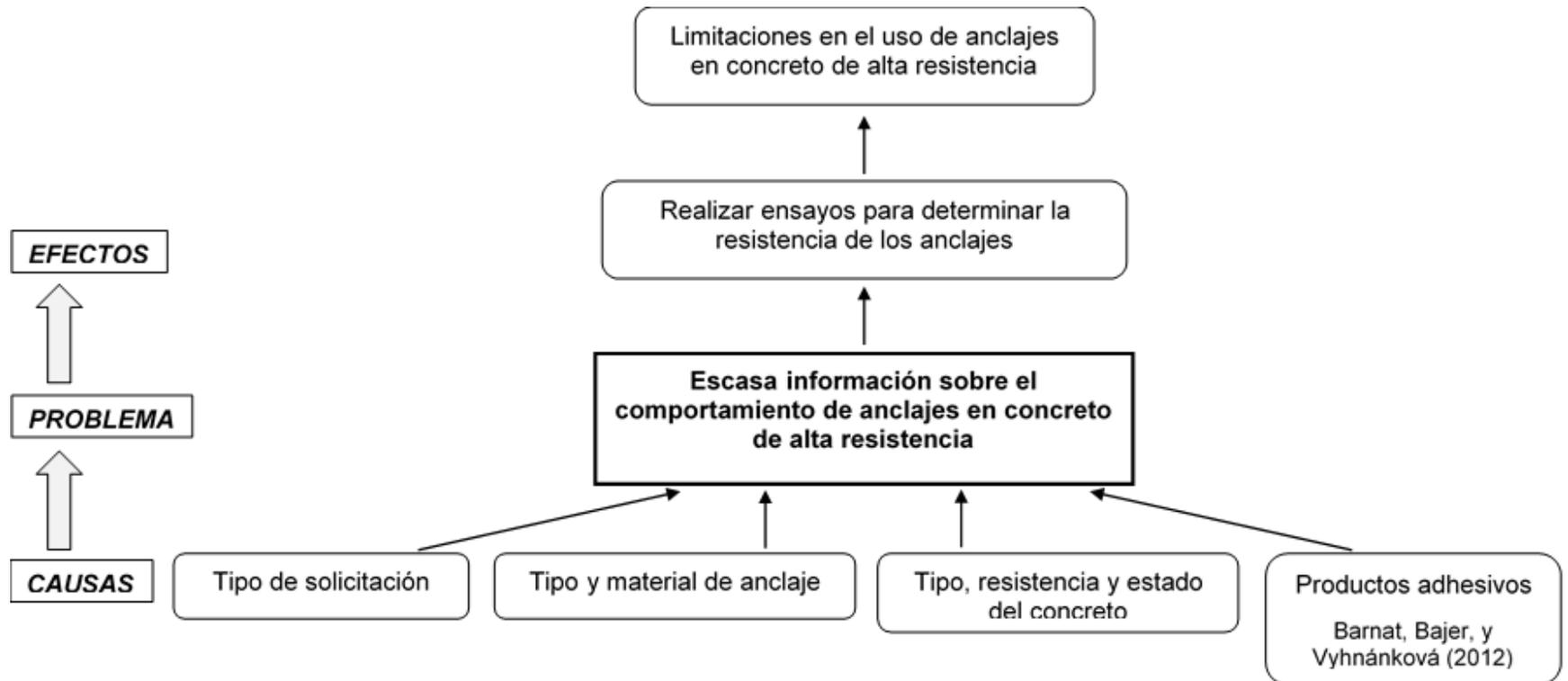


Figura 1. Árbol del problema.
Fuente: Autor.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos generales

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

2.2. Objetivos específicos

- ✓ Elaborar un estado del arte en relación con el comportamiento de anclajes postinstalados en concreto de alta resistencia.
- ✓ Evaluar, a través de ensayos de laboratorio, el comportamiento estructural de anclajes postinstalados en concreto de alta resistencia, sometidos a cargas de tensión y corte.
- ✓ Comparar los resultados obtenidos de los ensayos con las fórmulas existentes en el reglamento colombiano NSR-10, título C, apéndice D, así como en el reglamento americano ACI 318-14 en su título 17.

3. MARCO TEÓRICO

En la presente sección, se exponen los diversos conceptos que conforman el punto de inicio para la comprensión de toda la terminología que se utilizará en las secciones siguientes, tomando en cuenta que el entendimiento de estos conceptos es un paso necesario para poder comprender de mejor forma, el desarrollo del tema que se pretende estudiar. El contenido de las siguientes secciones fue tomado directamente del reglamento colombiano NSR-10 y del reglamento americano ACI 318-14.

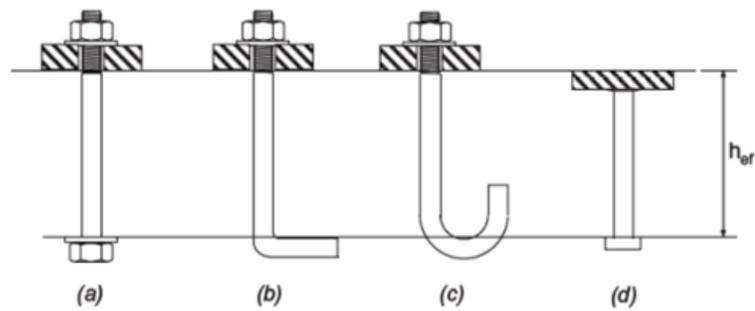
3.1. Definiciones

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.

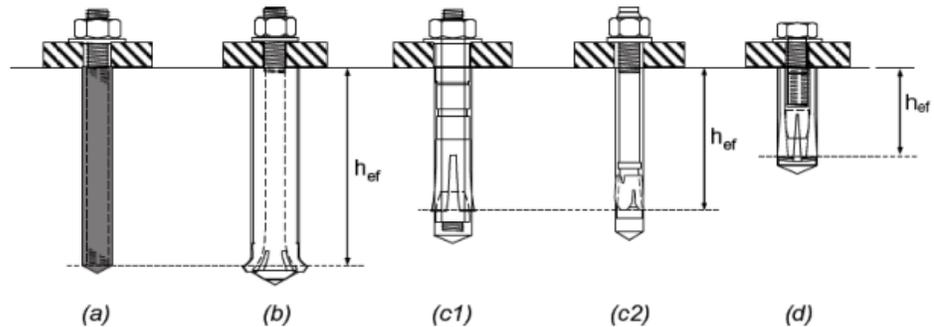
Anclaje (Anchor) — Un dispositivo de acero ya sea preinstalado antes de colocar el concreto o postinstalado en un elemento de concreto endurecido y usado para transmitir fuerzas aplicadas, incluidos los tornillos con cabeza, los tornillos con extremo con forma de gancho (J o L), pernos con cabeza, anclajes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



A. Anclajes preinstalados: (a) Tornillo con cabeza hexagonal y arandela, (b) Tornillo en L, (c) Tornillo en J, (d) Perno con cabeza soldada



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

Figura 2. Tipos de anclajes.

Fuente: Reglamento ACI 318-14.

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.

3.2. 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.
Fuente: Reglamento ACI 318-14.*

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.	$\phi V_{cp} \geq N_{ua}$		$\phi V_{cpg} \geq V_{ua,g}$

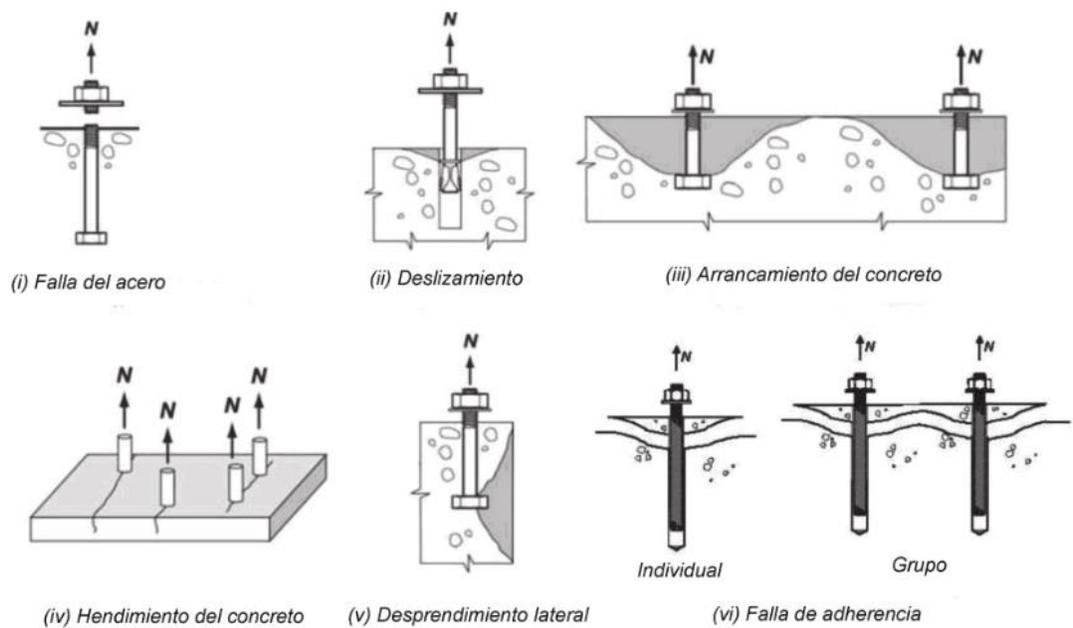


Figura 3. Modos de falla para anclajes sometidos a tensión.
Fuente: Reglamento ACI 318-14.

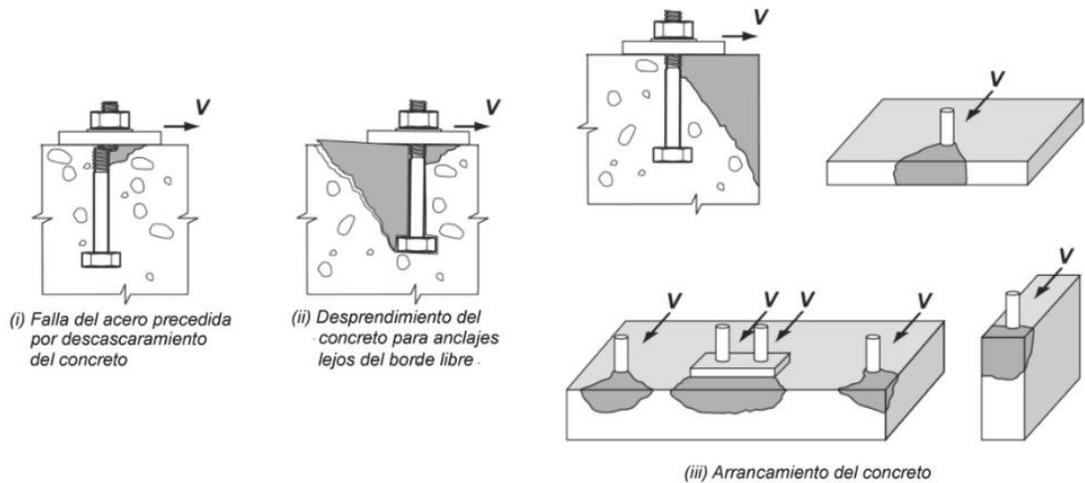


Figura 4. Modos de falla para anclajes sometidos a cortante.
Fuente: Reglamento ACI 318-14.

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.
Fuente: Reglamento ACI 318-14.*

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 de alta resistencia el cual es el enfoque principal de esta investigación, a continuación se presentan algunas de estas.

4.1. Anclajes postinstalados en concreto de alta resistencia (Ruda Arias & Páez Moreno, 2017)

Colombia con su notable auge en las construcciones, ha impulsado investigaciones en las que se han evaluado el comportamiento de los anclajes postinstalados. Recientemente se llevó a cabo una investigación en la que se pretende evaluar los sistemas de anclaje postinstalados, con varillas de 3/8 y 5/8 con longitudes de 3, 9 y 12 veces el diámetro de las mismas, mediante ensayos a tracción de 60 probetas de concreto de resistencias iguales a 5000 y 6000 psi.

Se buscó que el sistema de anclaje postinstalado garantizara la condición con la cual la barra de refuerzo del sistema de anclaje sea 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 5000 psi, la barra desarrolla un promedio de 48% de la carga máxima de fluencia del acero para una longitud de 6 veces el diámetro de la misma, un 73% para una longitud de 9 veces el diámetro y 92% para una longitud igual a 12 veces el diámetro de la barra. Por su parte para el concreto de 6000 psi, los resultados obtenidos correspondieron a 62%, 89% y 111% para longitud de 6, 9 y 12 veces el diámetro; respectivamente.

Determinándose que para un concreto de 5000 psi, la longitud de anclaje de 12 veces el diámetro de la varilla cumple de forma “aceptable” con la resistencia máxima de fluencia del acero de refuerzo y para un concreto de 6000 psi, la longitud de anclaje de 12 veces el diámetro de la varilla, cumple ampliamente con la resistencia máxima de fluencia del acero de refuerzo.

En términos generales, los autores concluyen que al analizar la longitud de anclaje con el diámetro de la varilla, pudo verse que a menor diámetro de la barra, el sistema de anclaje postinstalado desarrolla mayor resistencia a tracción, también identificaron que la longitud efectiva de anclaje para dos diámetros de varilla corrugada, en dos concretos de resistencia alta mediante ensayos a tracción directa, es once veces el diámetro de la varilla; además aun cuando la falla en las probetas del sistema de anclaje sea por el concreto o por el acero, con una profundidad de anclaje de once veces el diámetro del acero de refuerzo, alcanzará la resistencia máxima de fluencia, y finalmente se identificó que con una longitud de anclaje de 6 veces el diámetro de la varilla, la resistencia efectiva a tracción desarrolla entre un 50 % y un 60 % de la carga máxima de fluencia del acero de refuerzo, con una longitud de anclaje de 9 veces la resistencia efectiva a tracción desarrolla alrededor del 80 % y con una longitud de anclaje de 12 veces el diámetro de la varilla, la resistencia efectiva a tracción garantiza el 100 % de la carga máxima de fluencia del acero de refuerzo.

4.2. Anclajes postinstalados sometidos a tensión y corte (Epackachi, Esmaili, Mirghaderi, & Behbahani, 2015)

En esta investigación 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).

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

4.3. Anclajes con barras de GFRP sometidos a tensión (Islam, Afefy, Sennah, & Azimi, 2015)

Los autores 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, eliminar el problema de durabilidad debido a la corrosión. El estudio cubre 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).

Los resultados obtenidos demuestran que la carga de falla promedio 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 considerable.

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.

4.4. Comportamiento de anclajes postinstalados de grandes diámetros en concreto (Wang, Wu, Ouyang, & Zhai, 2016)

En la mayoría de los estudios realizados hasta la fecha no se ha visto un enfoque con respecto a cómo es el comportamiento de anclajes postinstalados de grandes diámetros. Los autores plantearon un programa experimental en el cual ensayaron 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).

Los autores concluyeron que la capacidad a tensión de los anclajes es sensible a los cambios respecto a el diámetro de la barra, el adhesivo utilizado, y la profundidad de embebido. Anclajes de grandes diámetros y profundidades de embebido incrementan el área de adhesivo 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”.

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

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 fibra. El concreto utilizado en los ensayos alcanzó una resistencia a la compresión promedio de 104 MPa (14800 psi).

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.

4.6. Comportamiento de anclajes postinstalados en concreto de baja resistencia (Yilmaz, Özen, & Yardim, 2013)

En las actividades de reforzamiento de estructuras es común encontrar que la estructura a reforzar está realizada en concreto de baja resistencia. Los autores estudiaron el comportamiento a tensión de anclajes postinstalados en esta condición utilizando concretos 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.

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 obtuvieron como resultado una falla frágil 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.

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 de alta resistencia. El procedimiento se describe brevemente a continuación:

- ✓ Se fundieron trece (13) losas de concreto de alta resistencia y se tomaron nueve (9) cilindros para determinar su resistencia a la compresión.
- ✓ Se procede a instalar las barras de acero roscadas en las losas, utilizando barras de 3/8", 1/2" y 5/8" embebidas a diferentes profundidades.
- ✓ Se ensayan las barras a tensión y cortante por separado, determinando carga máxima y modalidad de falla para ambos casos.

5.1. MATERIALES

Las propiedades mecánicas de los materiales usados en la presente investigación se encuentran debidamente detallados en los anexos, a continuación, se describen brevemente las propiedades mecánicas de los materiales utilizados.

5.1.1. Concreto de alta resistencia

Para determinar la resistencia a compresión del concreto se tomaron nueve (9) cilindros de 100mm de diámetro y 200mm de altura, de los cuales tres (3) se ensayaron a los 28 días, obteniendo una resistencia promedio de 72.9 MPa ó 10570 psi.

5.1.2. Barras roscadas

Se ensayaron dos tipos de barras roscadas, las primeras de especificación AISI 1020 presentaron un esfuerzo de fluencia cercano a 290 MPa o 42 ksi y un esfuerzo último cercano a 340 MPa o 50 ksi; y las segundas de especificación ASTM A-193 B7 presentaron 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 9.30 MPa ó 1350 psi (ICC-ESR-3608).

5.2. LOSAS DE CONCRETO

Se construyeron trece (13) losas de concreto de alta resistencia de 0.60m x 0.90m con espesor variable, nueve (9) de estas se fundieron sobre terreno para ensayar las barras a tensión; y las cuatro (4) restantes se fundieron de manera independiente para ensayar las barras a cortante.

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 3. Especificaciones de las losas para ensayos de tensión.

Fuente. Autor.

	Largo (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	Cantidad
$\phi 3/8''$ - 5d $\phi 3/8''$ - 10d $\phi 1/2''$ - 5d $\phi 1/2''$ - 10d $\phi 5/8''$ - 5d	0.90	0.60	0.20	5
$\phi 3/8''$ - 20d $\phi 5/8''$ - 10d	0.90	0.60	0.25	2
$\phi 1/2''$ - 20d	0.90	0.60	0.35	1
$\phi 5/8''$ - 20d	0.90	0.60	0.40	1



Figura 5. Formaleta de las losas para ensayos de tensión.

Fuente: Autor.



*Figura 6. Losas fundidas para ensayos de tensión.
Fuente: Autor.*

*Tabla 4. Especificaciones de las losas para ensayos de cortante.
Fuente: Autor.*

	Largo (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	Cantidad
$\phi 3/8'' - 5d$	0.90	0.60	0.20	4
$\phi 3/8'' - 10d$				
$\phi 1/2'' - 5d$				
$\phi 1/2'' - 10d$				



*Figura 7. Formaleta de las losas para ensayos de cortante.
Fuente: Autor.*



Figura 8. Losas fundidas para ensayos de cortante.

Fuente: Autor.

5.3. MATRIZ DE ENSAYOS

Como se mencionó anteriormente se ensayarán dos tipos de barras, las primeras a solicitaciones de tensión y cortante, y las segundas únicamente a tensión. A continuación se detallan los diámetros y profundidades a las cuales se ensayarán las barras.

Tabla 5. Diámetros, profundidades y solicitaciones para las barras AISI 1020.

Fuente: Autor.

Material	Diámetro	Profundidad	Solicitación
AISI 1020	$\phi 3/8''$	5d _b , 10d _b y 20d _b	Tensión
		5d _b y 10d _b	Cortante
	$\phi 1/2''$	5d _b , 10d _b y 20d _b	Tensión
		5d _b y 10d _b	Cortante
	$\phi 5/8''$	5d _b , 10d _b y 20d _b	Tensión

Tabla 6. Diámetros, profundidades y solicitaciones para barras ASTM A-193 B7.

Fuente: Autor.

Material	Diámetro	Profundidad	Solicitación
ASTM A-193 B7	$\phi 3/8''$	2.5d _b , 5d _b , 7.5d _b y 10d _b	Tensión
	$\phi 1/2''$	2.5d _b , 5d _b , 7.5d _b y 10d _b	Tensión

5.4. 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 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 9. Perforación de los primeros anclajes.

Fuente: Autor.



*Figura 10. Perforación de las losas con taladro rotopercutor.
Fuente: Autor.*

c) Se limpia la perforación de acuerdo a 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 11. Soplador para la limpieza de la perforación con aire a presión.
Fuente: Autor.*

d) Se introduce la boquilla hasta el fondo de la perforación inyectando el adhesivo hasta llenar 3/4 de la misma.



*Figura 12. Inyección del producto epóxico en la perforación.
Fuente: Autor.*

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

5.5. MONTAJE PARA LOS ENSAYOS

5.5.1. 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.

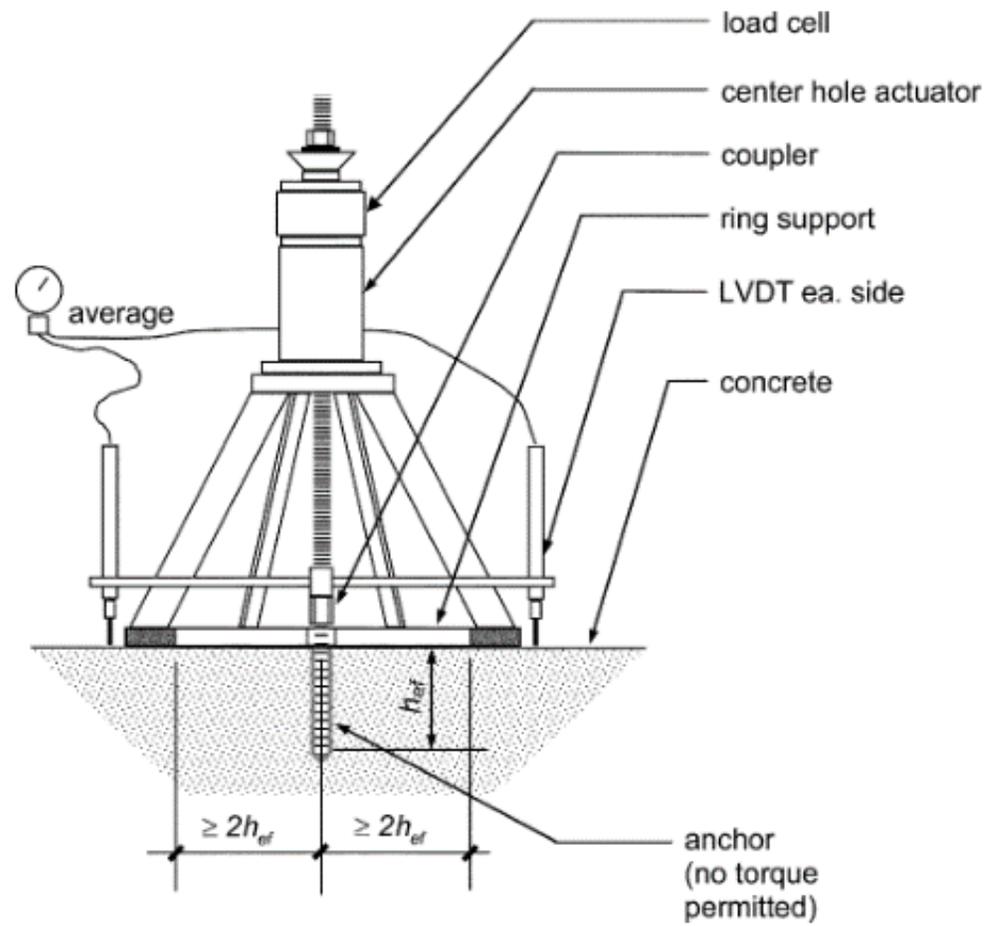
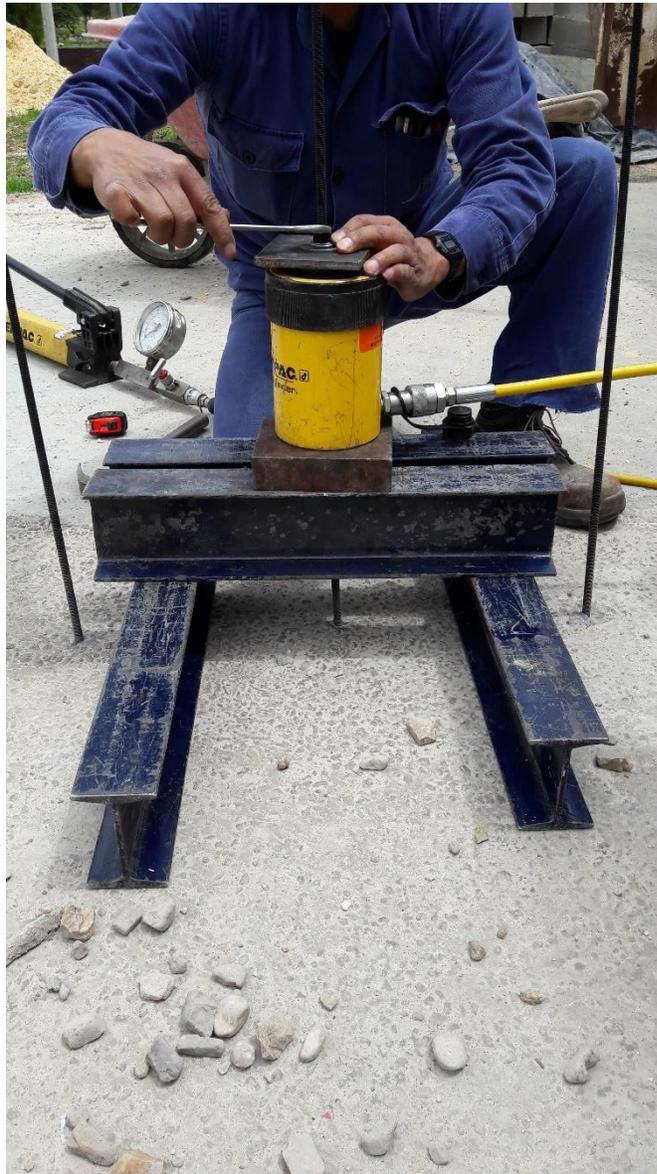


Figura 13. Ejemplo de montaje para ensayos no confinados a tensión.
Fuente: ACI 355.4-11.



*Figura 14. 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.



*Figura 16. 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 17. Consola de medición, bomba hidráulico y montaje para ensayos no confinados a tensión.
Fuente: Autor.

5.5.3. 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.

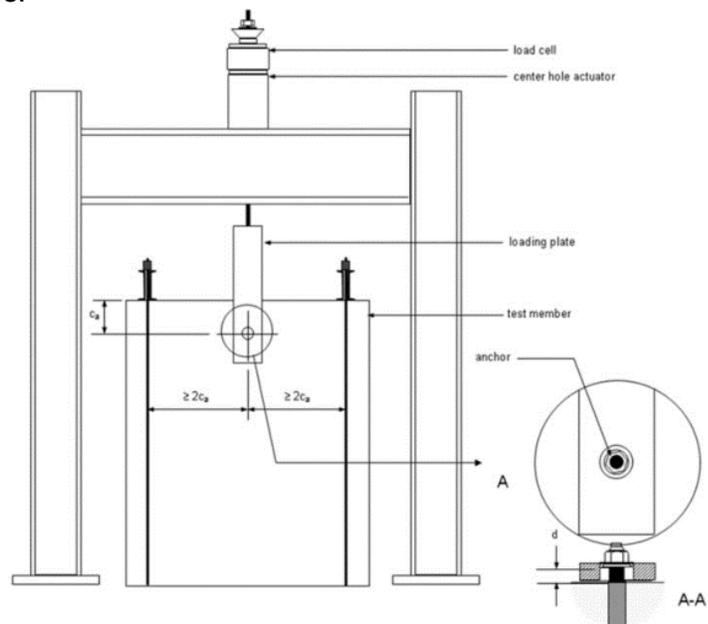


Figura 18. Ejemplo de montaje para ensayos de cortante.
Fuente: ASTM E488-15.



Figura 19. Montaje final para ensayos a cortante.

Fuente: Autor

Este montaje resulta ser el más sencillo pues únicamente está compuesto por la máquina universal, un ángulo metálico de alas iguales, una tuerca y los anclajes a ensayar.

6. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA TEÓRICA DE LOS ANCLAJES

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 318-14.

6.1. Resistencia del acero de un anclaje en tracción

La resistencia a tracción de un anclaje se puede determinar de acuerdo a la ecuación planteada en el reglamento colombiano NSR-10 en la sección C-D.5.1 y en el reglamento americano ACI 318-14 en la sección 17.4.1, así:

$$N_{sa} = A_{se,N} f_{uta}$$

Tabla 7. Resistencia teórica a tensión del acero AISI 1020.

Fuente: Autor.

Barra	$A_{se,N}$ (mm ²)	f_{ya} (MPa)	f_{uta} (MPa)	N_{sa} (kN)
ϕ3/8"	50	290	340	16.9
ϕ1/2"	92	290	340	31.1
ϕ5/8"	146	290	340	49.8

Resistencia teórica a tensión

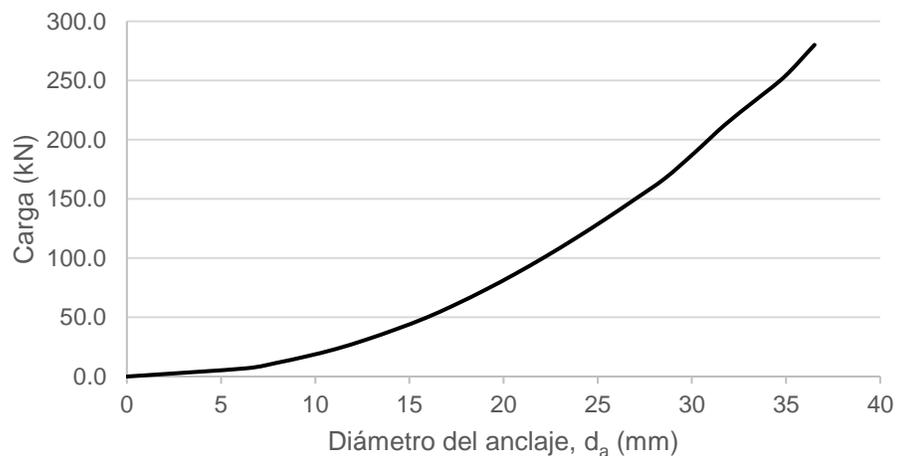


Figura 20. Resistencia teórica a tensión del acero AISI 1020.

Fuente: Autor.

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

Fuente: Autor.

Barra	$A_{se,N}$ (mm ²)	f_{ya} (MPa)	f_{uta} (MPa)	N_{sa} (kN)
ϕ3/8"	50	720	860	42.7
ϕ1/2"	92	720	860	78.7
ϕ5/8"	146	720	860	125.9

Resistencia teórica a tensión

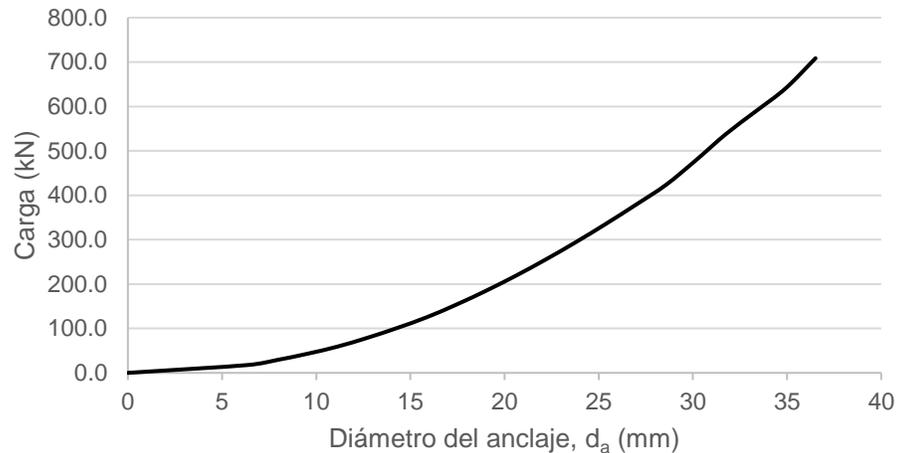


Figura 21. Resistencia teórica a tensión del acero ASTM A-193 B7.

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 a la ecuación planteada en el reglamento colombiano NSR-10 en la sección C-D.5.2 y en el reglamento americano ACI 318-14 en la sección 17.4.2, así:

$$N_{cb} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \Psi_{ed,N} \Psi_{c,N} \Psi_{cp,N} N_b$$

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)	72.90

Tabla 10. Resistencia teórica al arrancamiento del concreto de un anclaje a tracción.

Fuente: Autor.

h_{ef} (mm)	N_b (kN)	N_{cb} (kN)
50	21	30
100	60	84
150	110	154
200	169	237
250	236	331
300	311	435
350	391	548



Figura 22. Resistencia teórica al arrancamiento.

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 a la ecuación planteada en el reglamento americano ACI 318-14 en la sección 17.4.5, así:

$$N_a = \frac{A_{Na}}{A_{Na0}} \Psi_{ed,Na} \Psi_{cp,Na} N_{ba}$$

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

Fuente: Autor.

A_{Na} / A_{Na0}	1.0
$\Psi_{ec,Na}$	1.0
$\Psi_{ed,Na}$	1.0
$\Psi_{cp,Na}$	1.0
τ_{uncr}	9.30

Tabla 12. Resistencia teórica a la adherencia.

Fuente: Autor.

Barra	d_a (mm)	h_{ef} (mm)	N_{ba} (kN)	N_a (kN)
$\phi 3/8"$	9.5	50	14	14
		100	28	28
		150	42	42
		190	53	53
$\phi 1/2"$	12.7	70	26	26
		130	48	48
		200	74	74
		260	96	96
$\phi 5/8"$	15.9	80	37	37
		160	74	74
		240	111	111
		320	149	149

Resistencia teórica a la adherencia

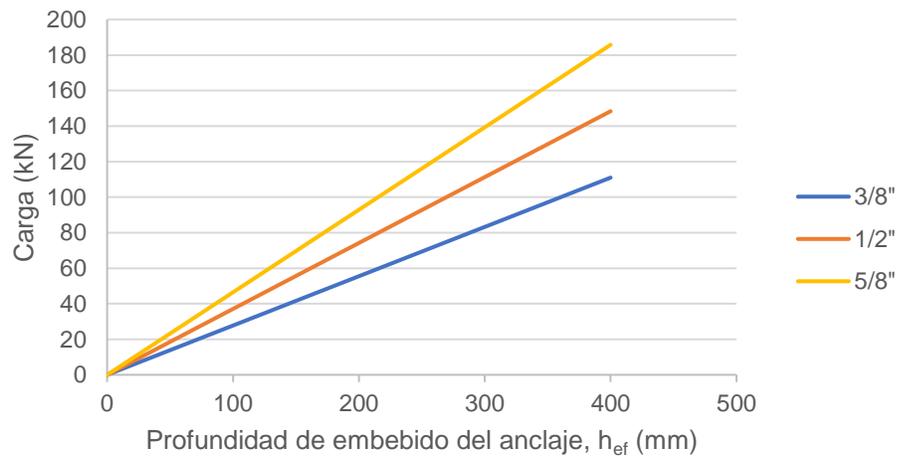


Figura 23. Resistencia teórica a la adherencia.

Fuente: Autor.

6.4. Modalidad teórica de falla de anclajes a tracción

Según los resultados obtenidos de resistencia teórica 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.

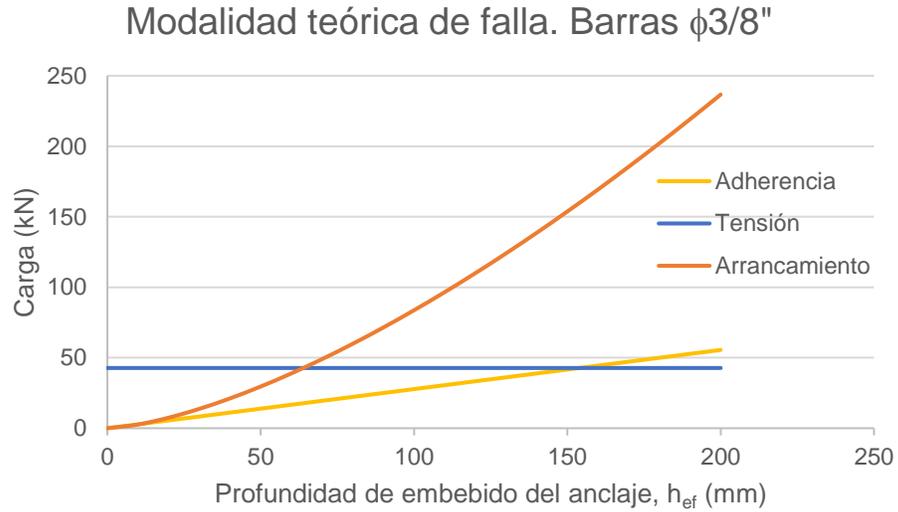


Figura 24. Modalidad teórica de falla para barras $\phi 3/8''$ ASTM A-193 B7.
Fuente: Autor.

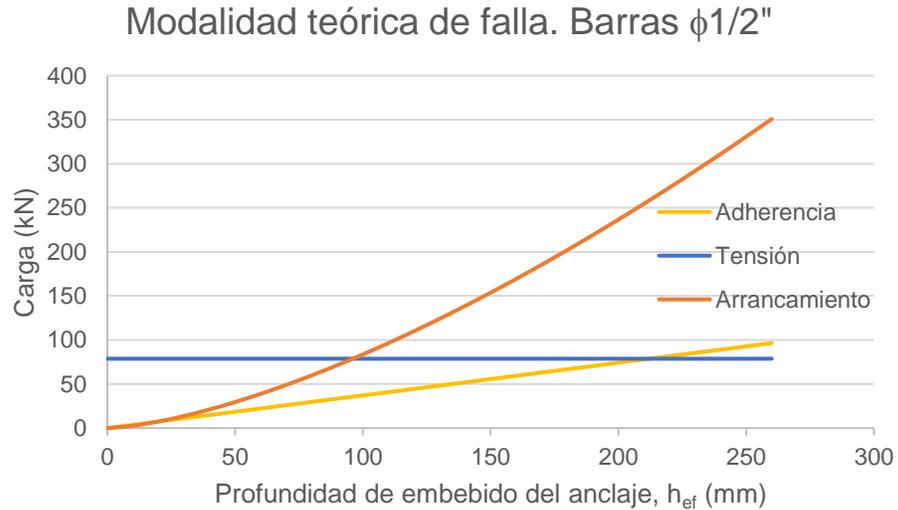
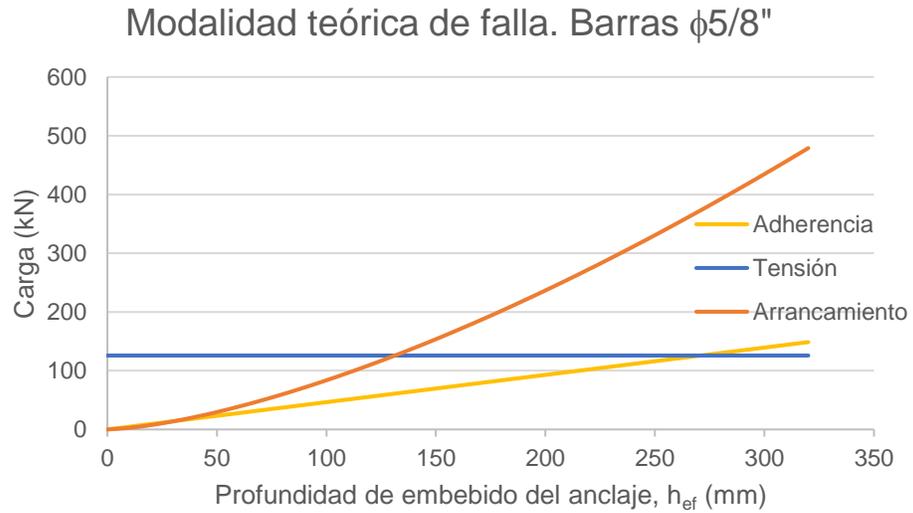


Figura 25. Modalidad teórica de falla para barras $\phi 1/2''$ ASTM A-193 B7.
Fuente: Autor.



*Figura 26. Modalidad teórica de falla para barras $\phi 5/8''$ ASTM A-193 B7.
Fuente: Autor.*

De lo anterior se observa que las modalidades predominantes son las falla por adherencia a profundidades inferiores a 22 veces el diámetro del anclaje, seguido por la falla a tensión a profundidades mayores.

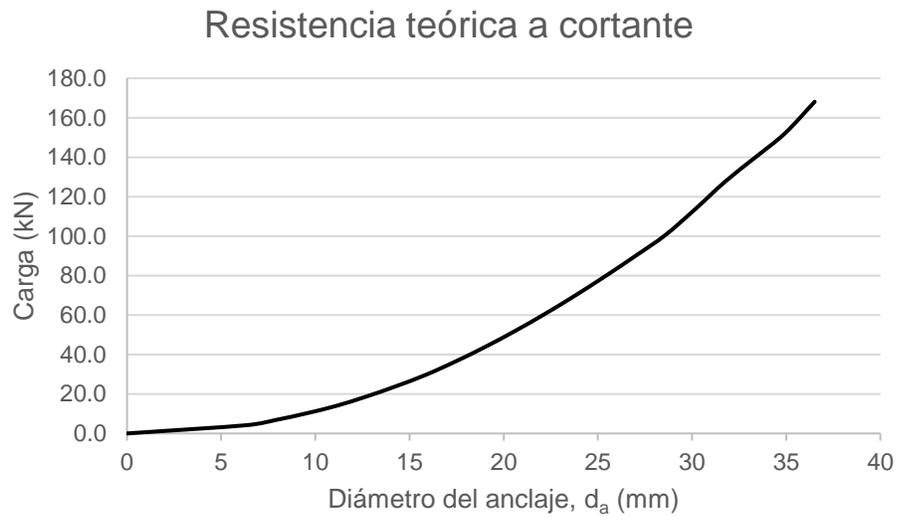
6.5. Resistencia del acero del anclaje sometido a cortante

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 318-14 en la sección 17.5.1, así:

$$V_{sa} = 0.6A_{se,V}f_{uta}$$

*Tabla 13. Resistencia a cortante del acero AISI 1020.
Fuente: Autor.*

Barra	$A_{se,V}$ (mm ²)	f_{ya} (MPa)	f_{uta} (MPa)	V_{sa} (kN)
$\phi 3/8''$	50	290	340	10.1
$\phi 1/2''$	92	290	340	18.7



*Figura 27. Resistencia teórica a cortante del acero AISI 1020.
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 114 anclajes distribuidos de la siguiente manera: 54 a tensión confinada y 36 a tensión no confinada, y 24 a cortante.

7.1. Ensayos confinados a tensión

Se realizaron 6 ensayos para cada diámetro y profundidad de embebido para un total de 54 ensayos, en los cuales, el comportamiento de falla fue el esperado, presentándose únicamente la falla del acero en todos los anclajes.

Tabla 14. Carga promedio de falla para barras $\phi 3/8''$ AISI 1020.

Fuente: Autor.

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga prom. (kN)	Modalidad de falla	Desviación estándar	Coefficiente de variación
$\phi 3/8''$	5 d_b	47.7	15.1	Acero	0.658	4.4%
$\phi 3/8''$	10 d_b	95.3	15.2	Acero	0.541	3.6%
$\phi 3/8''$	20 d_b	190.6	15.5	Acero	0.353	2.3%

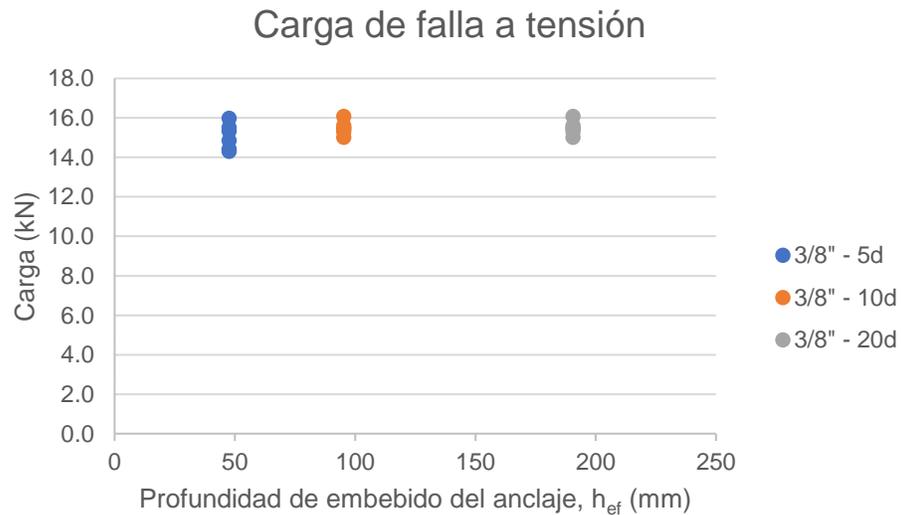
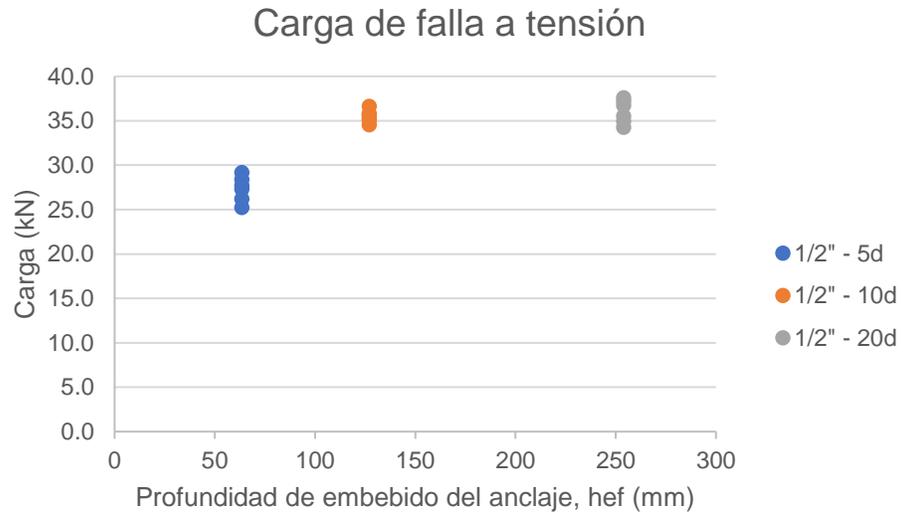


Figura 28. Cargas de falla para barras $\phi 3/8''$ AISI 1020.

Fuente: Autor.

*Tabla 15. Carga promedio de falla para barras $\phi 1/2''$ AISI 1020.
Fuente: Autor.*

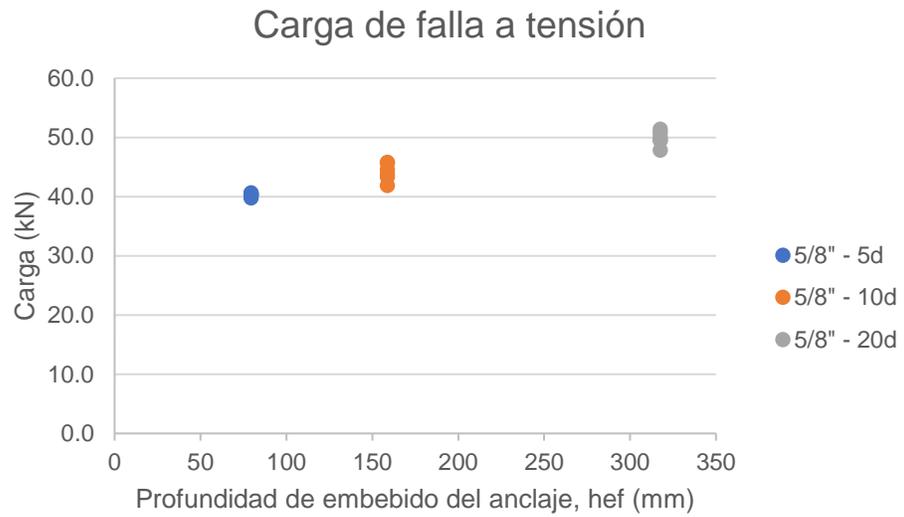
Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga prom. (kN)	Modalidad de falla	Desviación estándar	Coefficiente de variación
$\phi 1/2''$	5 d _b	63.5	27.3	Acero	1.448	5.3%
$\phi 1/2''$	10 d _b	127.0	35.5	Acero	0.708	2.0%
$\phi 1/2''$	20 d _b	254.0	36.0	Acero	1.343	3.7%



*Figura 29. Cargas de falla para barras $\phi 1/2''$ AISI 1020.
Fuente: Autor.*

*Tabla 16. Carga promedio de falla para barras $\phi 5/8''$ AISI 1020.
Fuente: Autor.*

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga prom. (kN)	Modalidad de falla	Desviación estándar	Coefficiente de variación
$\phi 5/8''$	5 d _b	79.4	40.3	Acero	0.305	0.8%
$\phi 5/8''$	10 d _b	158.8	44.2	Acero	1.501	3.4%
$\phi 5/8''$	20 d _b	317.6	49.8	Acero	1.234	2.5%



*Figura 30. Cargas de falla para barras $\phi 5/8$ " AISI 1020.
Fuente: Autor.*



*Figura 31. Anclaje $\phi 3/8$ " después de ensayo confinado a tensión. Falla del acero.
Fuente: Autor.*



Figura 32. Anclaje $\phi 1/2''$ después de ensayo confinado a tensión. Falla del acero.

Fuente: Autor.

7.2. Ensayos a cortante

Se realizaron 6 ensayos para cada diámetro y profundidad de embebido para un total de 24 ensayos, en los cuales, el comportamiento de falla fue el esperado, presentándose únicamente la falla del acero en todos los anclajes.

Tabla 17. Carga promedio de falla para barras $\phi 3/8''$.

Fuente: Autor.

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga prom. (kN)	Modalidad de falla	Desviación estándar	Coficiente de variación
$\phi 3/8''$	5 d_b	47.7	14.1	Acero	0.651	4.6%
$\phi 3/8''$	10 d_b	95.3	15.1	Acero	0.526	3.5%

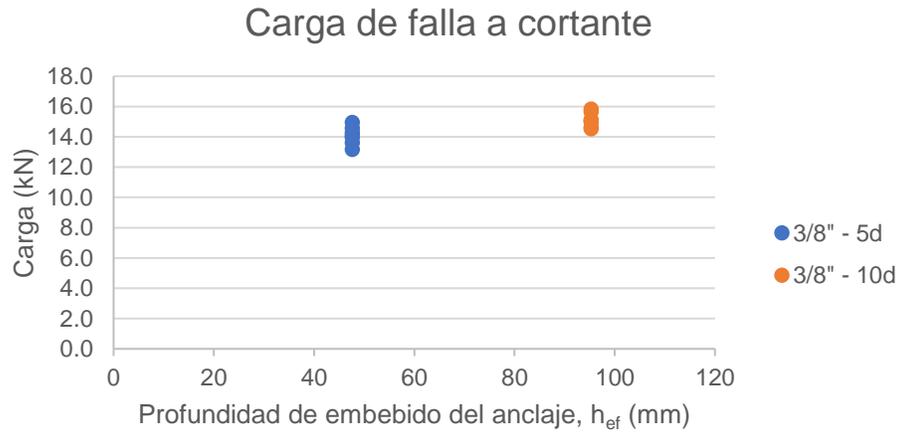


Figura 33. Cargas de falla para barras $\phi 3/8$ ".
Fuente: Autor.

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

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga prom. (kN)	Modalidad de falla	Desviación estándar	Coefficiente de variación
$\phi 1/2$ "	5 d_b	63.5	25.8	Acero	1.083	4.2%
$\phi 1/2$ "	10 d_b	127.0	26.4	Acero	0.576	2.2%

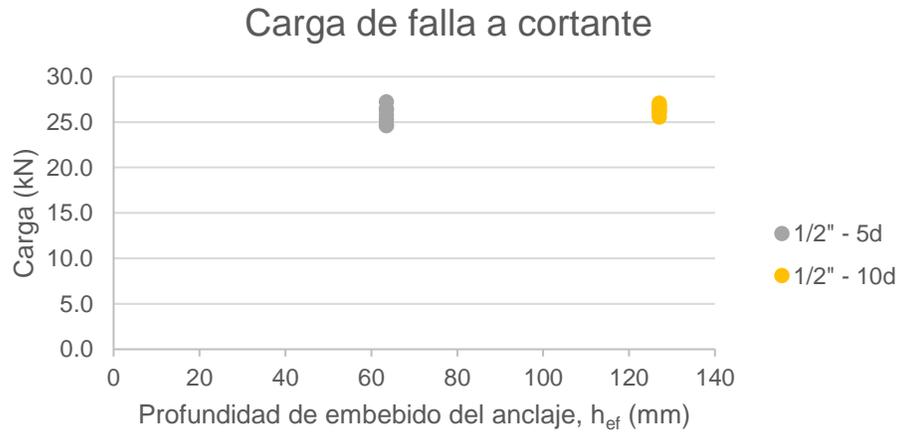


Figura 34. Cargas de falla para barras $\phi 1/2$ ".
Fuente: Autor.



*Figura 35. Anclaje $\phi 1/2$ " después de ensayo a corte. Falla del acero.
Fuente: Autor.*



*Figura 36. Superficie de la losa ensayada. Corte total del anclaje.
Fuente: Autor.*

7.3. Ensayos no confinados a tensión

Se realizaron 3 ensayos para cada diámetro y profundidad de embebido para un total de 24 ensayos, en los cuales, el comportamiento de falla fue el esperado, presentándose únicamente la falla del acero en todos los anclajes.

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

Tabla 19. Carga promedio y modalidad de falla para barras $\phi 3/8''$.

Fuente: Autor.

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga prom. (kN)	Modalidad de falla	Desviación estándar	Coefficiente de variación
$\phi 3/8''$	2.5 d _b	23.8	8.8	Adherencia	0.374	4.3%
$\phi 3/8''$	5 d _b	47.6	39.0	Arrancamiento	1.131	2.9%
$\phi 3/8''$	7.5 d _b	71.4	47.2	Acero	1.284	2.7%
$\phi 3/8''$	10 d _b	95.3	47.6	Acero	1.232	2.6%

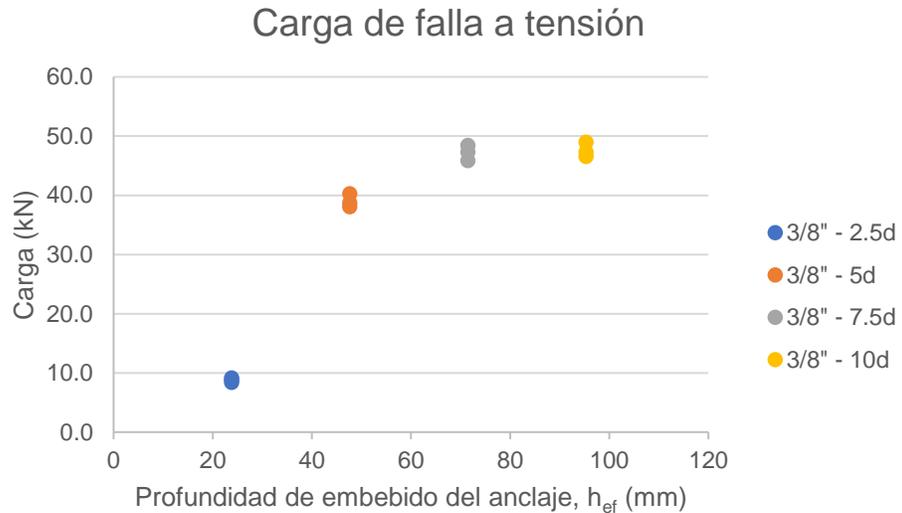


Figura 37. Cargas de falla para barras $\phi 3/8''$.

Fuente: Autor.

Tabla 20. Carga promedio y modalidad de falla para barras $\phi 1/2''$.
Fuente: Autor.

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga prom. (kN)	Modalidad de falla	Desviación estándar	Coefficiente de variación
$\phi 1/2''$	2.5 d _b	31.8	17.4	Arrancamiento	0.771	4.4%
$\phi 1/2''$	5 d _b	63.5	42.4	Arrancamiento	0.550	1.3%
$\phi 1/2''$	7.5 d _b	95.3	72.5	Arrancamiento	1.436	2.0%
$\phi 1/2''$	10 d _b	127.0	88.9	Acero	1.738	2.0%

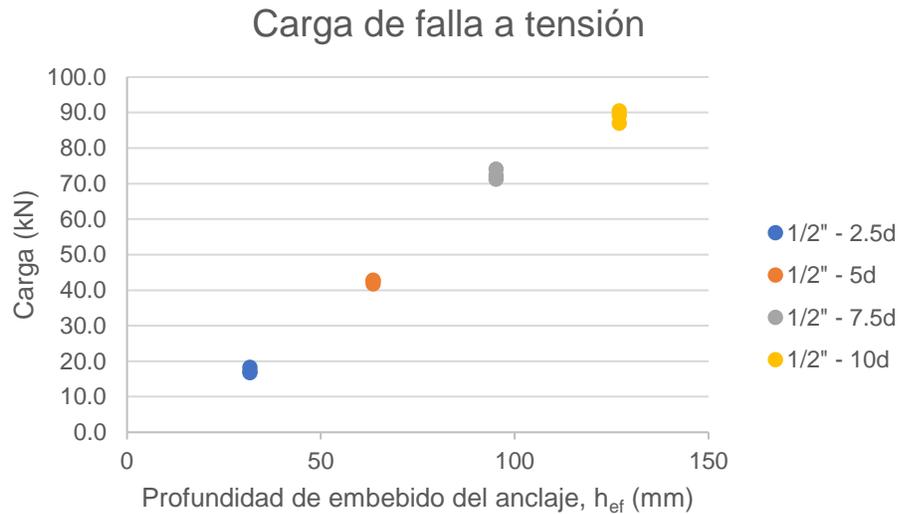
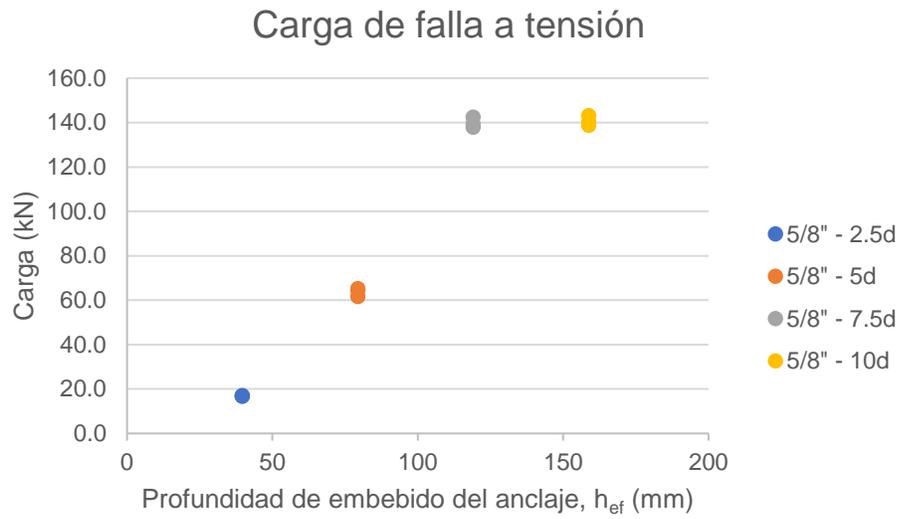


Figura 38. Cargas de falla para barras $\phi 1/2''$.
Fuente: Autor.

Tabla 21. Carga promedio y modalidad de falla para barras $\phi 5/8''$.
Fuente: Autor.

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga prom. (kN)	Modalidad de falla	Desviación estándar	Coefficiente de variación
$\phi 5/8''$	2.5 d _b	39.7	16.9	Arrancamiento	0.180	1.1%
$\phi 5/8''$	5 d _b	79.4	63.8	Arrancamiento	1.907	3.0%
$\phi 5/8''$	7.5 d _b	119.1	139.9	Acero	2.292	1.6%
$\phi 5/8''$	10 d _b	158.8	140.7	Acero	2.265	1.6%



*Figura 39. Cargas de falla para barras $\phi 5/8$ ".
Fuente: Autor.*



*Figura 40. Falla por adherencia de anclaje $\phi 3/8$ " a profundidad de embebido igual a 2.5 veces el diámetro.
Fuente: Autor.*



*Figura 41. Falla por arrancamiento del concreto sin extracción de anclaje $\phi 1/2''$ a profundidad de embebido 2.5 veces el diámetro.
Fuente: Autor.*



*Figura 42. Falla por arrancamiento del concreto con extracción de anclaje $\phi 1/2''$ a profundidad de embebido de 5 veces el diámetro.
Fuente: Autor.*



*Figura 43. Falla por arrancamiento del concreto con extracción de anclaje $\phi 5/8$ " a profundidad de embebido de 5 veces el diámetro.
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. Coeficiente de reducción de resistencia

Para el propósito de esta investigación, el coeficiente de reducción de resistencia se calcula como el valor de la carga teórica de falla dividida por el valor de la carga promedio de falla obtenida de los ensayos, como se muestra a continuación:

$$\text{Coef. de reducción} = \frac{\text{Carga promedio de falla}}{\text{Carga teórica de falla}}$$

8.2. Ensayos confinados a tensión

Para los ensayos confinados a tensión con barras AISI 1020 se obtienen los siguientes resultados.

*Tabla 22. Coeficientes de reducción para ensayos confinados a tensión.
Fuente: Autor.*

Barra	Profundidad (mm)	Carga prom. (kN)	Carga teórica (kN)	Coef. de reducción
φ3/8"	47.7	15.1	17.0	0.89
φ3/8"	95.3	15.2	17.0	0.90
φ3/8"	190.6	15.5	17.0	0.91
φ1/2"	63.5	27.3	31.3	0.87
φ1/2"	127.0	35.5	31.3	1.13
φ1/2"	254.0	36.0	31.3	1.15
φ5/8"	79.4	40.3	49.6	0.81
φ5/8"	158.8	44.2	49.6	0.89
φ5/8"	317.6	49.8	49.6	1.00

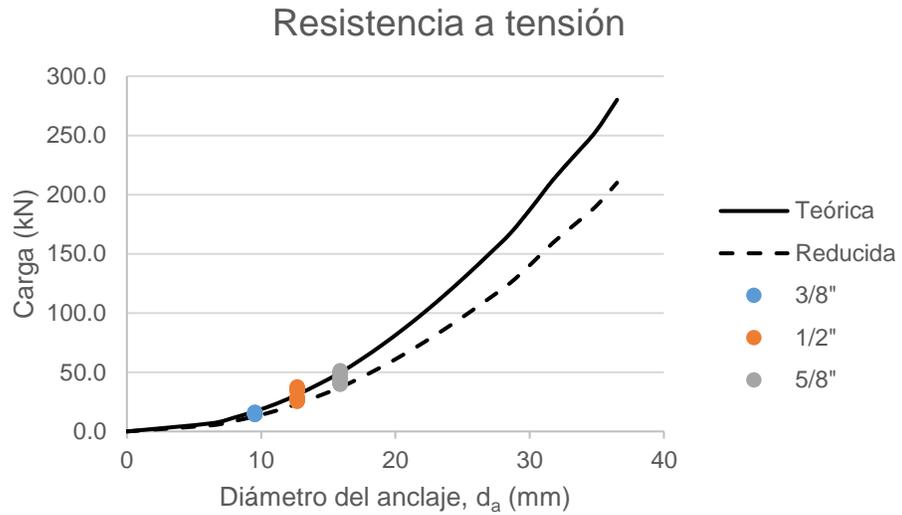


Figura 44. Cargas de ensayos, resistencia teórica y reducida de ensayos confinados a tensión.
Fuente: Autor.

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 discrepan de la modalidad de falla teórica, por esto no se realiza el cálculo del coeficiente de reducción.

Tabla 23. Comparación de carga y modalidad de falla real y teórica.
Fuente: Autor.

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga prom. (kN)	Modalidad de falla	Carga teórica (kN)	Modalidad de falla teórica
$\phi 3/8"$	2.5 d_b	23.8	8.8	Adherencia	6.6	Adherencia
$\phi 3/8"$	5 d_b	47.7	39.0	Arrancamiento	13.2	Adherencia
$\phi 3/8"$	7.5 d_b	71.5	47.2	Acero	19.8	Adherencia
$\phi 3/8"$	10 d_b	95.3	47.6	Acero	26.4	Adherencia

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

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga prom. (kN)	Modalidad de falla	Carga teórica (kN)	Modalidad de falla teórica
φ1/2"	2.5 d _b	31.8	17.4	Arrancamiento	11.8	Adherencia
φ1/2"	5 d _b	63.5	42.4	Arrancamiento	23.6	Adherencia
φ1/2"	7.5 d _b	95.3	72.5	Arrancamiento	35.3	Adherencia
φ1/2"	10 d _b	127.0	88.9	Acero	47.1	Adherencia

*Tabla 25. Comparación de carga y modalidad de falla real y teórica.
Fuente: Autor.*

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga prom. (kN)	Modalidad de falla	Carga teórica (kN)	Modalidad de falla teórica
φ5/8"	2.5 d _b	39.7	16.9	Arrancamiento	18.5	Adherencia
φ5/8"	5 d _b	79.4	63.8	Arrancamiento	36.9	Adherencia
φ5/8"	7.5 d _b	119.1	139.9	Acero	55.4	Adherencia
φ5/8"	10 d _b	158.8	140.7	Acero	73.9	Adherencia

8.4. Ensayos a cortante

Para los ensayos a cortante con barras AISI 1020 se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 26. Coeficientes de reducción y factores de seguridad para ensayos a cortante.

Fuente: Autor.

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga prom. (kN)	Carga teórica (kN)	Coef. de reducción
φ3/8"	5 d _b	47.7	14.1	10.1	1.39
φ3/8"	10 d _b	95.3	15.1	10.1	1.49
φ1/2"	5 d _b	63.5	25.8	18.7	1.38
φ1/2"	10 d _b	127.0	26.4	18.7	1.41

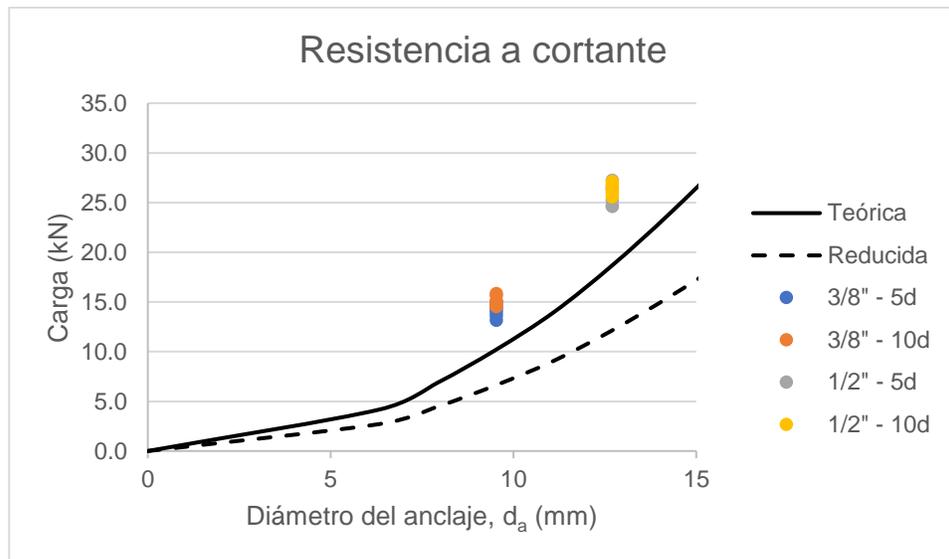


Figura 45. Cargas de ensayos, resistencia teórica y reducida para ensayos a cortante.

Fuente: Autor.

9. CONCLUSIONES

Con base en los resultados experimentales se puede concluir que:

- ✓ Las ecuaciones del reglamento americano ACI 318-14 para anclajes postinstalados predicen la falla por adherencia de los anclajes hasta profundidades de aproximadamente 16 veces el diámetro del anclaje.
- ✓ A medida que incrementa la profundidad de embebido aumenta proporcionalmente la carga de falla del anclaje, y así mismo cambia la modalidad de falla.
- ✓ Los resultados obtenidos a través de los ensayos a tensión muestran que para la barra de 3/8" y profundidades de embebido menores o iguales a $2.5 d_b$ la falla predominante es por adherencia del anclaje.
- ✓ Para profundidades mayores a 2.5 veces el diámetro y menores a 7.5 veces el diámetro, la falla predominante es por arrancamiento del concreto, presentándose para barras de 5/8" hasta profundidades de 5 veces su diámetro. Finalmente para profundidades mayores a las descritas predomina la falla del acero.
- ✓ Por último se evidenció en el desarrollo de esta investigación que para ensayos no confinados, los materiales, los diámetros y profundidades de embebido utilizadas, las ecuaciones de los reglamentos predicen modalidades de falla que discrepan con las detectadas mediante ensayos.

10. RECOMENDACIONES

Para próximas investigaciones que permitan dar continuidad al presente documento se recomienda:

- ✓ Realizar ensayos de barras roscadas como las usadas en esta investigación en concretos de mayor resistencia o concretos livianos.
- ✓ Ensayar los anclajes ante cargas sostenidas o cíclicas, o ensayar los anclajes ante solicitaciones combinadas de tensión y cortante.
- ✓ Ensayar anclajes utilizando barras corrugadas o barras de GFRP, entre otras, a profundidades mayores o similares a las estudiadas en este documento.

11. BIBLIOGRAFÍA

- ACI Comitee 318. (2015). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-14) and Commentary*. Michigan: American Concrete Institute.
- ACI Comitee 355. (2011). *Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete (ACI 355.4-11) and Commentary*. Michigan: American Concrete Institute.
- ACI Comitee 363. (2010). *Report on High Strength Concrete (ACI 363R-10)*. Michigan: American Concrete Institute.
- AIS Comité 100. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá D.C.: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- ASTM E488. (2015). *Standard test methods for Strength of Anchors in Concrete Elements*. ASTM International.
- Baker, W. F., Korista, D. S., & Novak, L. C. (2008, March). Engineering the world's tallest – Burj Dubai. *Proceedings of CTBUH 8th world congress "Tall & green: typology for a sustainable urban future"*, 1–10.
- Caldarone, M. A. (2009). High-strength concrete. A practical guide. *New York: Taylor & Francis*.
- Cattaneo, S., & Muciaccia, G. (2016). Adhesive anchors in high performance concrete. *Materials and Structures*, 2689-2700.
- Epacakchi, 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.
- González, F. J. (2014). *Influencia de las condiciones de ejecución en la resistencia de anclajes en hormigón convencional y autocompactante (tesis doctoral)*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España.
- González-Isabel, G. (1993). *Hormigón de alta resistencia*. Madrid: INTEMAC.
- ICC-ESR-3608. (n.d.). *Table 19 – Example of allowable stress design (ASD) tension values for illustrative purposes*.
- Islam, S., Afefy, H. M., Sennah, K., & Azimi, H. (2015). Bond characteristics of straight and headed-end, ribbed-surface, GFRP bars embedden in high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 83, 283–298.
- Ruda Arias, Y. M., & Páez Moreno, D. F. (2017). Anclajes postinstalados en concretos de alta resistencia. *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.

12. ANEXOS

12.1. Concreto de alta resistencia

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 para obtener la resistencia a compresión de los mismos.

Tabla 27. Resultados de los ensayos de cilindros de concreto.

Fuente: Autor.

Días	P (N)	f'c (MPa)	f'c _{PROM} (MPa)
14	486400	61.9	58.9
	439400	55.9	
	462900	58.9	
28	520700	66.3	72.9
	596300	75.9	
	600200	76.4	
56	623700	79.4	80.5
	643300	81.9	
	630600	80.3	



Figura 46. Cilindro de concreto en máquina de ensayo.

Fuente: Autor.



*Figura 47. Cilindro de concreto ensayado a compresión a los 14 días.
Fuente: Autor.*



*Figura 48. Cilindro de concreto ensayado a compresión a los 28 días.
Fuente: Autor.*

12.2. Barras roscadas AISI 1020

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 28. Resultados de barras roscadas AISI 1020.

Fuente: Autor.

Barra	Py (N)	fy (MPa)	f ^y _{PROM} (MPa)	Pu (N)	fu (MPa)	f ^u _{PROM} (MPa)
φ3/8"	21400	301.1	290.0	24400	341.2	340.0
φ1/2"	38000	298.8		46600	366.5	
φ5/8"	53500	270.1		62200	312.2	

12.3. 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.

Barra	Py (N)	fy (MPa)	f ^y _{PROM} (MPa)	Pu (N)	fu (MPa)	f ^u _{PROM} (MPa)
φ3/8"	51400	723.9	720.0	60700	854.9	860.0
φ1/2"	91300	718.9		111500	878.0	
φ5/8"	142700	717.1		168600	847.2	

12.4. 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 AISI 1020 $\phi 3/8"$.

Fuente: Autor.

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga (kN)
$\phi 3/8"$	5 d _b	47.7	14.9
			14.3
			15.5
			15.3
			14.4
			16.0
	10 d _b	95.3	14.9
			14.4
			15.4
			15.3
			15.6
			15.8
	20 d _b	190.6	15.6
			15.4
			15.3
			15.0
			15.5
			16.1

Tabla 31. Ensayos confinados a tensión de barras AISI 1020 $\phi 1/2"$.

Fuente: Autor.

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga (kN)
$\phi 1/2"$	5 d _b	63.5	25.2
			27.7
			27.3
			29.2
			26.2
			28.4
	10 d _b	127.0	35.8
			36.6
			35.0
			35.4
			35.7
			34.5

			35.5
			37.6
	20 d _b	254.0	34.2
			37.2
			36.7
			34.9

Tabla 32 Ensayos confinados a tensión de barras AISI 1020 ϕ 5/8".

Fuente: Autor.

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga (kN)
ϕ 5/8"	5 d _b	79.4	40.5
			39.8
			40.1
			40.4
			40.7
			40.2
	10 d _b	158.8	45.7
			45.8
			43.3
			41.9
			43.8
			44.6
	20 d _b	317.6	50.1
			49.5
			49.5
			50.8
			47.8
			51.4

12.5. Resultados de ensayos a cortante

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

Tabla 33. Ensayos a cortante de barras AISI 1020 $\phi 3/8"$.

Fuente: Autor

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga (kN)
$\phi 3/8"$	5 d _b	47.7	14.6
			13.6
			14.3
			13.2
			14.0
			14.9
	10 d _b	95.3	15.0
			15.1
			15.6
			14.5
			14.6
			15.8

Tabla 34. Ensayos a cortante de barras AISI 1020 $\phi 1/2"$.

Fuente: Autor.

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga (kN)
$\phi 1/2"$	5 d _b	63.5	24.6
			24.6
			27.2
			25.3
			26.5
			26.4
	10 d _b	127.0	25.6
			26.2
			26.8
			26.0
			26.7
			27.1

12.6. 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 35. Ensayos no confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 $\phi 3/8$ ".

Fuente: Autor.

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga (kN)
$\phi 3/8$ "	2.5 d _b	23.8	9.1
			8.8
			8.4
	5 d _b	47.7	40.2
			38.1
			38.7
	7.5 d _b	71.5	48.4
			45.9
			47.3
	10 d _b	95.3	49.0
			47.3
			46.5

Tabla 36 Ensayos no confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 $\phi 1/2$ ".

Fuente: Autor.

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga (kN)
$\phi 1/2$ "	2.5 d _b	31.8	17.1
			18.2
			16.8
	5 d _b	63.5	42.8
			41.8
			42.5
	7.5 d _b	95.3	74.1
			71.3
			72.3
	10 d _b	127.0	87.0
			90.5
			89.2

*Tabla 37 Ensayos no confinados a tensión de barras ASTM A-193 B7 $\phi 5/8"$.
Fuente: Autor.*

Barra	Profundidad	Profundidad (mm)	Carga (kN)
$\phi 5/8"$	2.5 d _b	39.7	16.8
			16.8
			17.1
	5 d _b	79.4	61.6
			64.5
			65.2
	7.5 d _b	119.1	142.4
			137.9
			139.3
	10 d _b	158.8	143.2
			138.7
			140.3