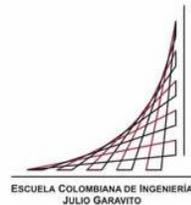


Maestría en Ingeniería Civil

**Evaluación del comportamiento de diferentes tipos de anclajes
con cabeza para barras corrugadas sometidas a tensión
embebidas en estructuras de concreto.**

Camilo Andrés Escobar Caicedo

Bogotá, D.C., 14 de septiembre de 2021

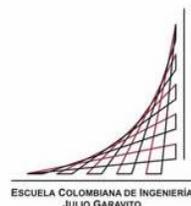


**Evaluación del comportamiento de diferentes tipos de anclajes
con cabeza para barras corrugadas sometidas a tensión
embebidas en estructuras de concreto.**

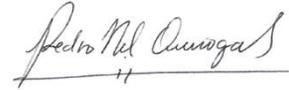
**Proyecto de grado para optar al título de magíster en Ingeniería
Civil, con énfasis en ingeniería estructural**

Pedro Nel Quiroga Saavedra
Director

Bogotá, D.C., 14 de septiembre de 2021



El proyecto de grado de maestría titulado “Evaluación del comportamiento de diferentes tipos de anclajes con cabeza para barras corrugadas sometidas a tensión embebidas en estructuras de concreto”. Presentada por Camilo Andrés Escobar Caicedo, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en ingeniería estructural.



Pedro Nel Quiroga Saavedra

Director de la tesis

Fabian Augusto Lamus Báez

Jurado

Jorge Ignacio Segura Franco

Jurado

Bogotá, D.C., día de mes de año (fecha de aceptación del trabajo por parte del jurado)

Dedicatoria

Dedico mi proyecto de grado de maestría a mis padres Armando Escobar y Liliana Caicedo, pues sin ellos no lo hubiera logrado. Gracias por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de los logros que he alcanzado se los debo a ustedes.

Gracias padre y madre.

Agradecimientos

Agradezco a mi director de tesis Pedro Nel Quiroga Saavedra, M.Sc, Ph. D, por el interés en el desarrollo de mi proyecto y la compañía en el desarrollo de este, así mismo por los conocimientos transmitidos tanto en el pregrado como en el posgrado cursado.

Grato agradecimiento a la compañía Ramalza S.A.S, en su colaboración para el roscado y suministro de las cabezas circulares, así mismo a Cemex Colombia S. A por el suministro del concreto, y a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito junto con los operarios del laboratorio de estructuras; con su apoyo logre el desarrollo de mi proyecto final.

Resumen

En la ingeniería estructural nos encontramos con una gran problemática en zonas como los nudos viga-columna extremos, donde las barras de refuerzo de las vigas se anclan mediante ganchos, los cuales pueden generar una gran congestión de refuerzo. Esto puede no solo dificultar la colocación del refuerzo sino impedir una adecuada colocación y consolidación del concreto con la consecuente pérdida de capacidad del nudo. El uso de barras con cabeza logra ofrecer menor congestión del refuerzo debido a su disminución en el área y hacen posible el uso de barras de refuerzo más grandes. Esto permite una mejor consolidación del concreto debido a que se tiene un mayor espacio entre barras para el vertido y la vibración proporcionaran una mejora en la calidad de este.

Al evaluar la teoría descrita sobre el uso de estos anclajes en la normativa vigente (American Concrete Institute ACI 318S-19, y Norma Colombiana de Construcción Sismo-Resistente NSR 10) se establecen los límites de profundidad de anclaje y las dimensiones necesarias para el adecuado funcionamiento de estas barras, pero no se tienen análisis experimentales realizados en Colombia en donde su uso y diseño sea validado para las características de los concretos realizados en nuestro país.

Es por esto que se evaluó el comportamiento de barras con cabeza en concreto sometidas a tensión embebidas a diferentes profundidades. Se plantearon dos geometrías (circular y cuadrada) de la cabeza (aditamento que se encuentra unido al extremo de la barra) y se midieron las resistencias a tensión para varilla de 3/4" y de 7/8" para un concreto de 35 MPa (5000 psi).

Se utilizaron las profundidades calculadas de acuerdo con el ACI 318S-19, y así mismo dos profundidades inferiores para cada tipo de barra y se determinó un intervalo de la profundidad adecuada para su uso en la construcción, lo cual se encuentra contemplado en un total de 32 ensayos a tracción mediante un gato hidráulico; 4 ensayos dinámicos en donde se realizó una comparación entre el uso de estos anclajes y las barras con gancho utilizadas convencionalmente.

Abstract

In structural engineering we had found problems in areas such as external beam-column nodes, where the reinforcing bars of the beams are anchored by hooks, which can generate a large reinforcement congestion. This can not only make it difficult to place the reinforcement but also prevents adequate concrete placement and consolidation with the consequent loss of node capacity. The use of headed bars manages to offer less congestion of the reinforcement due to its reduction in area and makes it possible to use larger reinforcement bars. This allows a better consolidation of concrete due to the fact that there is a greater space between bars for pouring and the vibration will provide an improvement in the quality of this.

Evaluating the theory described on the use of these anchors in the current regulations (American Concrete Institute ACI 318S-19, and Norma Colombiana de Construcción Sismo-Resistente NSR 10), the anchor depth limits are established for the adequate operation of these bars, but there are no experimental analyzes carried out in Colombia where their use and design could be validated for the characteristics of the concretes made in our country.

This is why the behavior of concrete-headed bars subjected to embedded tension at different depths was evaluated. Two geometries (circular and square) of the head (an attachment that is attached to the end of the bar) were proposed and the tensile strengths for 3/4 "and 7/8" rebar for a concrete of 35 MPa were measured. (5000 psi).

The depths calculated in accordance with ACI 318S-19, as well as two lower depths for each type of bar, and a suitable depth interval was determined for use in construction, which is contemplated in a total of 32 tensile tests using a hydraulic jack; 4 dynamic tests in which a comparison was made between the use of these anchors and the conventionally used hook bars.

Índice general

Contenido

Dedicatoria	4
Agradecimientos	5
Resumen	6
Abstract	7
Nomenclatura	17
Introducción	18
Capítulo I	20
OBJETIVOS DEL PROYECTO	20
1.1. Objetivo general:	20
Capítulo II	21
MARCO TEORICO.....	21
2.1. Definiciones:	21
2.1.1. Anclaje:.....	21
2.1.2. Barra con gancho:	21
2.1.3. Barra con cabeza:	21
2.1.4. Profundidad efectiva de embebido:.....	21
2.1.5. Área platina (cabeza):.....	21
2.1.6. Tipos de falla a tracción:	21
2.1.7. Longitud de anclaje de barras con cabeza:.....	23
2.1.8. Ensayo a tracción:	24
2.1.9. Ensayo de extracción:	25
2.1.10. Ensayo de carga cíclica:	26
2.2. Estado del arte:	27
2.3. Artículos relevantes para estudio:	33
2.3.1. Won Jong Chin, Young Hwan Park, Jeong-Rae Cho, Jin-Young Lee, Young-Soo Yoon. (2020). "Flexural behavior of a precast concrete deck connected with headed GFRP rebars and UHPC".	33
2.1.1. Minh-Tung Tran, Quoc-Bao Bui, Bastian Sentosa, Nhat-Tien Nguyen, Trung-Hieu Duong and Olivier Plé. (2018). "Sustainable RC Beam-Column Connections with Headed Bars: A Formula for Shear Strength Evaluation".	34

2.1.2.	Abdul Hossein Paknejadi, Kiachehr Behfarnia. (2020). “Performance of reinforced self-consolidating concrete beam-columnjoints with headed bars subjected to pseudo-static cyclic loading.	36
2.1.3.	Haitham H.Saeed, AymanA. Abdulhamed. (2021). “Bond behavior of dual headed bars in concrete structures”.....	37
2.1.4.	Shubham Singhala, Ajay Chourasiaa, Jalaj Parashara. (2021) “Anchorage behaviour of headed bars as connection system for precast reinforced concrete structural components”	39
Capítulo III	.....	40
CARACTERIZACION DE MATERIALES.....		40
3.1.	Concreto estructural.....	40
3.2.	Barras corrugadas.....	42
3.3.	Elementos de concreto.....	45
3.4.	Conexión viga-columna:.....	50
3.5.	Cabeza barras:.....	52
Capítulo IV	.....	55
RESULTADOS EXPERIMENTALES.....		55
4.1.	Ensayo de tensión:.....	55
4.2.	Ensayo de extracción:.....	61
4.3.	Ensayo de carga cíclica (conexión viga columna):	69
Capítulo V	.....	76
ANALISIS DE RESULTADOS		76
5.1.	Ensayo de extracción barra #6:.....	76
5.1.1.	Momento resistente barra #6:.....	79
5.2.	Ensayo de extracción barra #7:.....	82
5.2.1.	Momento resistente barra #7:.....	85
5.3.	Relación Fes/Fy vs profundidad de embebido:.....	87
5.4.	Ensayos adicionales:.....	89
5.5.	Ensayo de extracción barra #6 ADICIONAL:.....	93
5.6.	Ensayo de extracción barra #7 ADICIONAL:.....	96
5.7.	Ensayo de conexión viga-columna:.....	100
Capítulo VI	.....	121
ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS.....		121

6.1.	Análisis de costos cabeza roscada vs cabeza soldada:	121
6.2.	Análisis de costos longitud de anclaje ACI 318S-19:	123
Capítulo VII	.....	124
CONCLUSIONES	.....	124
Capítulo VIII	.....	125
RECOMENDACIONES	.....	125
Capítulo IX	.....	126
BIBLIOGRAFIA	.....	126
Capítulo X	.....	128
ANEXOS	.....	128
10.1.	Análisis de costos:	128
6.3.	Barra #7 longitud de anclaje ACI 318S-19:.....	128
6.4.	Barra #6 longitud de anclaje ACI 318S-19:.....	129
6.5.	Análisis de costos longitud de anclaje ACI 318S-19:	131
6.6.	Análisis de costos con reducción en barras:.....	132
10.2.	Cotización concreto Cemex Colombia S.A:	134
10.3.	Cotización acero Ferrelugue S.A.S:.....	135
10.4.	Medición deformímetro en elementos con falla a flexión:.....	136
10.5.	Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #1).....	139
10.6.	Curvatura (Barra con cabeza ensayo #1)	140
10.7.	Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #2):.....	140
10.8.	Curvatura (Barra con cabeza ensayo #2)	141
10.9.	Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #3):.....	142
10.10.	Curvatura (Barra con cabeza ensayo #3)	143
10.11.	Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #4):.....	144

Índice de tablas

Tabla 1 NSR-10. Titulo C.7.2.3. Diámetros mínimos de doblado	19
Tabla 2 Factor de modificación para barras con cabeza. ACI 318S-19	23
Tabla 3 ASTM A970, (2004). Dimensiones barra con cabeza.....	27
Tabla 4 Resistencia concreto suministrado por Cemex. Elaboración propia	40
Tabla 5 Esfuerzos barras corrugadas. Elaboración propia	43
Tabla 6 Diametro y longitud barra. Elaboración propia.....	43
Tabla 7 Esfuerzo de fluencia y ruptura barras. Elaboración propia	45
Tabla 8 Especímenes con longitud de anclaje según normativa. Elaboración propia.....	46
Tabla 9 Especímenes con longitud de anclaje variable. Elaboración propia	47
Tabla 10 ASTM A970, (2004). Dimensiones barra con cabeza.....	52
Tabla 11 Dimensiones barra con cabeza utilizadas. Elaboración propia	52
Tabla 12 Carga de fluencia barras corrugadas. Elaboración propia	56
Tabla 13 Elongación mínima %. NTC 2289	58
Tabla 14 Elongación barra #7. Elaboración propia.....	58
Tabla 15 Ensayo de extracción. Barra # 6 profundidad 18 cm. Fuente propia	61
Tabla 16 Cono de falla. Elaboración propia	67
Tabla 17 Datos entrada protocolo de carga. Elaboración propia.....	70
Tabla 18 Datos de entrada diagrama Momento-Curvatura. Elaboración propia	72
Tabla 19 Momento y curvatura instante antes de fisuración. Elaboración propia	73
Tabla 20 Momento y curvatura instante después de fisuración. Elaboración propia	73
Tabla 21 Momento y curvatura instante a 45% de f'_c . Elaboración propia	73
Tabla 22 Momento y curvatura instante de fluencia en el acero. Elaboración propia	74
Tabla 23 Momento y curvatura instante de concreto confinado, rectángulo de Whitney. Elaboración propia.....	74
Tabla 24 Momento y curvatura instante de momento máximo con Hognestad. Elaboración propia	74
Tabla 25 Reducción longitud de anclaje. Elaboración propia	76
Tabla 26 Carga de falla barra #6. Elaboración propia	76
Tabla 27 Relación F_{es}/F_y barra #6 profundidad 10 cm. Elaboración propia	77
Tabla 28 Relación F_{es}/F_y barra #6 profundidad 15 cm. Elaboración propia	77
Tabla 29 Relación F_{es}/F_y barra #6 profundidad 18 cm. Elaboración propia	78
Tabla 30 Carga de falla barra #7. Elaboración propia	82
Tabla 31 Relación F_{es}/F_y barra #7 profundidad 15 cm. Elaboración propia	82
Tabla 32 Relación F_{es}/F_y barra #7 profundidad 18 cm. Elaboración propia	83
Tabla 33 Relación F_{es}/F_y barra #7 profundidad 22.4 cm. Elaboración propia	84
Tabla 34 Diseño de mezcla. Elaboración propia	89
Tabla 35 Resistencia concreto ensayos adicionales. Elaboración propia.....	90
Tabla 36 Carga - relación F_{es}/F_y barra #6 ensayo adicional. Elaboración propia	94
Tabla 37 Deformación barra en fluencia, ensayo adicional. Elaboración propia.....	94
Tabla 38 Deformación total en barra, ensayo adicional. Elaboración propia	95
Tabla 39 Carga - relación F_{es}/F_y barra #7 ensayos adicionales. Elaboración propia.....	96

Tabla 40 Carga máxima ensayo #1. Elaboración propia	102
Tabla 41 Carga máxima ensayo #2. Elaboración propia	107
Tabla 42 Carga máxima ensayo #3. Elaboración propia	111
Tabla 43 Carga máxima ensayo #4. Elaboración propia	115
Tabla 44 Cargas conexión viga columna, Elaboración propia	116
Tabla 45 Cargas conexión viga columna, Elaboración propia	118
Tabla 46 Comparación momento máximo viga-columna vs teórico. Elaboración propia	120
Tabla 51 Comparación costos cabeza roscada vs soldada. Elaboración propia	122
Tabla 49 Comparación precio barra #7 sección no variable. Elaboración propia	123
Tabla 47 Comparación precio barra #7. Elaboración propia.....	129
Tabla 48 Comparación precio barra #6. Elaboración propia.....	130
Tabla 49 Comparación precio barra #7 sección no variable. Elaboración propia	131
Tabla 50 Comparación costos reducción número de barras. Elaboración propia	133

Índice de figuras

Ilustración 1 Wallace, John (2016) Congestión de refuerzo en conexión viga columna....	18
Ilustración 2 Dextra group, (2018) Comparación de refuerzo en conexión viga columna.	18
Ilustración 3 Falla del acero de anclaje. Elaboración propia.....	22
Ilustración 4 Falla por arrancamiento del concreto y desprendimiento lateral. Elaboración propia	22
Ilustración 5 Esquema ensayo a tracción. Elaboración propia	24
Ilustración 6 Montaje experimental. Ensayo a tracción. Fuente propia.....	24
Ilustración 7 Esquema ensayo de extracción. Elaboración propia.....	25
Ilustración 8 Montaje. Ensayo de extracción. Fuente propia	25
Ilustración 9 Esquema ensayo de carga cíclica. Elaboración propia	26
Ilustración 10 Montaje. Ensayo de carga cíclica. Elaboración propia	26
Ilustración 11 Transferencia de fuerzas en barras con cabeza. Tomado de: Shao, (2016).	27
Ilustración 12 Park et al., (2003). Ilustración de geometrías de barras con cabeza.	28
Ilustración 13 Ghimire et al., (2019). Ensayo de extracción.....	29
Ilustración 14 ACI 349-97. Falla tipo cono.	29
Ilustración 15 Falla tipo pirámide CCD Method.	29
Ilustración 16 Park et al., (2003). Comportamiento de falla de una barra de acero.	30
Ilustración 17 Najafgholipour et al., (2017). Diagramas de esfuerzos mediante elementos finitos.	30
Ilustración 18 Najafgholipour et al., (2017). Condiciones de contorno.....	31
Ilustración 19 Najafgholipour et al., (2017). Análisis de falla mediante variación de ubicación de la carga.....	31
Ilustración 20 Kabir & Islam, (2014). Condiciones de contorno	32
Ilustración 21 Barras con cabeza UHPC. Won Jong Chin, et al (2020)	33
Ilustración 22 Diagrama de falla y modo de falla. Won Jong Chin, et al (2020)	34
Ilustración 23 Modelo viga columna en Abaqus. Minh-Tung.et al (2018).....	35
Ilustración 24 Comparación entre ecuación ACI y ecuación planteada. Ming-Tung, et al (2018)	35
Ilustración 25 Barras de doble cabeza.Haitham H Hsaed. (2021)	37
Ilustración 26 Comparación de la capacidad del anclaje mediante el uso de una cabeza y cabeza doble. Haitham H Hsaed (2021)	38
Ilustración 27 Cabeza lisa. Shubham (2021).....	39
Ilustración 28 Cabeza acanalado interno y externo. Shubham (2021)	39
Ilustración 29 Toma de cilindros. Fuente propia.....	40
Ilustración 30 Resultados ensayo a compresión cilindros de concreto. Fuente propia	41
Ilustración 31 Falla a compresión cilindro de concreto. Dia # 32 después de fundida. Fuente propia	41
Ilustración 32 Falla a compresión cilindro de concreto. Dia # 36 después de fundida. Fuente propia	42
Ilustración 33 Caracterización barra corrugada. Fuente propia	42

Ilustración 34 Medición diámetro varilla #6. Fuente propia.....	43
Ilustración 35 Carga aplicada varilla #6. Fuente propia.....	44
Ilustración 36 Medición diámetro después de ruptura de la barra. Fuente propia.....	44
Ilustración 37 Fundida de especímenes para ensayo de extracción. Fuente propia.....	47
Ilustración 38 Espécimen con refuerzo y barra con cabeza. Fuente propia.....	48
Ilustración 39 Formaleta. Fuente propia.....	48
Ilustración 40 Montaje ensayos de extracción, Fuente propia	49
Ilustración 41 Montaje ensayo conexión viga-columna. Fuente propia.....	50
Ilustración 42 Formaleta conexión viga columna. Fuente propia.....	51
Ilustración 43 Proceso de fundido espécimen y conexión viga-columna. Fuente propia ..	51
Ilustración 44 Verificación medida cabeza barra #6 geometría cuadrada. Fuente propia.	53
Ilustración 45 Verificación medida cabeza barra #6 geometría circular. Fuente propia	53
Ilustración 46 Maquinaria de roscado. Ramalza s.a.s	54
Ilustración 47 Montaje: barras roscadas en parte superior. Fuente propia	54
Ilustración 48 Ensayo de tensión directa barra #6. Fuente propia.....	55
Ilustración 49 Ensayo de tensión directa barra #7. Fuente propia.....	56
Ilustración 50 Falla a tensión en barra mediante ensayo de tensión directa. Fuente propia	57
Ilustración 51 Falla a tensión en barra mediante ensayo de tensión directa. Fuente propia	57
Ilustración 52 Demarcación sobre barras cada 5cm. Fuente propia.....	58
Ilustración 53 Medición variación espesor en falla a tensión en barra. Fuente propia	59
Ilustración 54 Falla a tensión cercana a la conexión. Fuente propia	59
Ilustración 55 Falla a tensión cercana a la conexión. Fuente propia	60
Ilustración 56 Ensayo de extracción con deformímetro Barra # 6 profundidad 15 cm. Fuente propia	61
Ilustración 57 Cono de falla Muestra #5. Barra # 6 profundidad 13 cm. Fuente propia.....	62
Ilustración 58 Cono de falla en barras. Fuente propia	62
Ilustración 59 Cono de falla Muestra #5. Barra # 6 profundidad 15 cm. Fuente propia.....	63
Ilustración 60 Cono de falla Muestra #5. Barra # 7 profundidad 15 cm. Fuente propia.....	63
Ilustración 61 Cono de falla Muestra #5. Barra # 6 profundidad 18 cm. Fuente propia.....	64
Ilustración 62 Falla inferior recubrimiento. Barra # 6 profundidad 18 cm. Fuente propia ..	64
Ilustración 63 Falla inferior recubrimiento. Barra # 7 profundidad 22.4 cm. Fuente propia	65
Ilustración 64 Falla inferior recubrimiento. Barra # 7 profundidad 22.4 cm. Fuente propia	65
Ilustración 65 Espécimen barra #6 con deformímetro. Fuente propia	66
Ilustración 66 Falla a flexión en espécimen barra #6. Fuente propia.....	66
Ilustración 67 Medición cono de falla. Fuente propia.....	68
Ilustración 68 Medición ángulo de falla. Fuente propia.....	68
Ilustración 69 Transductores LVDTs conexión viga columna. Elaboración propia.....	71
Ilustración 70 Transductores LVDTs conexión viga columna. Fuente propia	71
Ilustración 71 Cuadrícula conexión viga columna. Fuente propia.....	75
Ilustración 72 Montaje espécimen profundidad según ACI. Fuente propia.....	79

Ilustración 73 Falla flexión barra #6 (a). Fuente propia	81
Ilustración 74 Falla flexión barra #6 (b). Fuente propia	81
Ilustración 75 Falla flexión barra #7 (a). Fuente propia	86
Ilustración 76 Falla flexión barra #7 (b). Fuente propia	86
Ilustración 77 Espécimen de concreto, ensayos adicionales. Fuente propia	89
Ilustración 78 Cilindros ensayos adicionales. Fuente propia	90
Ilustración 79 Falla a compresión cilindro pruebas adicionales. Fuente propia	91
Ilustración 80 Grafica falla a compresión cilindro pruebas adicionales. Fuente propia	91
Ilustración 81 Especímenes adicionales (a). Fuente propia	92
Ilustración 82 Especímenes adicionales (b). Fuente propia	92
Ilustración 83 Espécimen adicional barra #6. Fuente propia	93
Ilustración 84 Evidencia falla por fluencia en barra #6. Fuente propia.....	94
Ilustración 85 Falla barra #6 ensayo adicional. Fuente propia.....	95
Ilustración 86 Falla barra #6 ensayo inicial. Fuente propia.....	95
Ilustración 87 Espécimen adicional barra #7. Fuente propia	96
Ilustración 88 Fisuras espécimen adicional barra #7. Fuente propia	97
Ilustración 89 Fisuras espécimen adicional barra #7. Fuente propia	97
Ilustración 90 Falla barra #7 ensayo adicional. Fuente propia.....	99
Ilustración 91 Falla barra #7 ensayo inicial. Fuente propia.....	99
Ilustración 92 Conexión Viga-Columna #1. Fuente propia	100
Ilustración 93 Conexión Viga-Columna #2. Fuente propia	105
Ilustración 94 Conexión Viga-Columna #3. Fuente propia	109
Ilustración 95 Conexión Viga-Columna #4. Fuente propia	113

Índice de anexos

Anexos 1 Análisis de costos	128
Anexos 2 Cotización concreto Cemex Colombia S.A.....	134
Anexos 3 Cotización acero Ferrelugue S.A.S	135
Anexos 4 Medición flexión con deformímetro. Barra #6 geometría circular. Elaboración propia	136
Anexos 5 Medición flexión con deformímetro. Barra #7 geometría cuadrada. Elaboración propia	137
Anexos 6 Medición flexión con deformímetro. Barra #7 geometría circular. Elaboración propia	138
Anexos 7 Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #1). Elaboración propia...	140
Anexos 8 Curvatura (Barra con cabeza ensayo #1). Elaboración propia.....	140
Anexos 9 Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #2). Elaboración propia...	141
Anexos 10 Curvatura (Barra con cabeza ensayo #2). Elaboración propia.....	142
Anexos 11 Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #3). Elaboración propia.	143
Anexos 12 Curvatura (Barra con cabeza ensayo #3). Elaboración propia.....	144
Anexos 13 Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #4). Elaboración propia.	145

Nomenclatura

A_{brg} = Área neta de apoyo de la cabeza

A_b = Área neta de la barra

A_s = Área total de refuerzo

b = Ancho de la cada en compresion del elemento

d = Distancia desde la fibra en compresion hasta el centroide del refuerzo longitudinal

d_b = Diametro nominal de la barra

f'_c = Resistencia especificada a la compresion del concreto, MPa

f_y = Resistencia especificada a la fluencia del refuerzo, MPa

ℓ_{dt} = Longitud de desarrollo

ρ = Cuantia

Ψ_e = Factor de modificacion con recubrimiento epoxico

Ψ_p = Factor de modificacion por refuerzo de estribos paralelos

Ψ_o = Factor de modificacion por ubicacion del anclaje

Ψ_c = Factor de modificacion por resistencia del concreto

Introducción

Congestión de refuerzo en conexiones viga columna:

En zonas como los nudos viga-columna externos, las barras de refuerzo de las vigas se anclan mediante ganchos, los cuales pueden generar una gran congestión. (Ilustración #1). Esto puede no solo dificultar la colocación del refuerzo sino impedir una adecuada colocación y consolidación del concreto con la consecuente pérdida de capacidad del nudo. Las barras con cabeza logran ofrecer menor congestión del refuerzo debido a su disminución en el área y hacen posible el uso de barras de refuerzo más grandes. Esto permite una mejor consolidación del concreto debido a que se tiene un mayor espacio entre barras para el vertido y la vibración proporcionarían una mejora en la calidad de este.



Ilustración 1 Wallace, John (2016) Congestión de refuerzo en conexión viga columna.

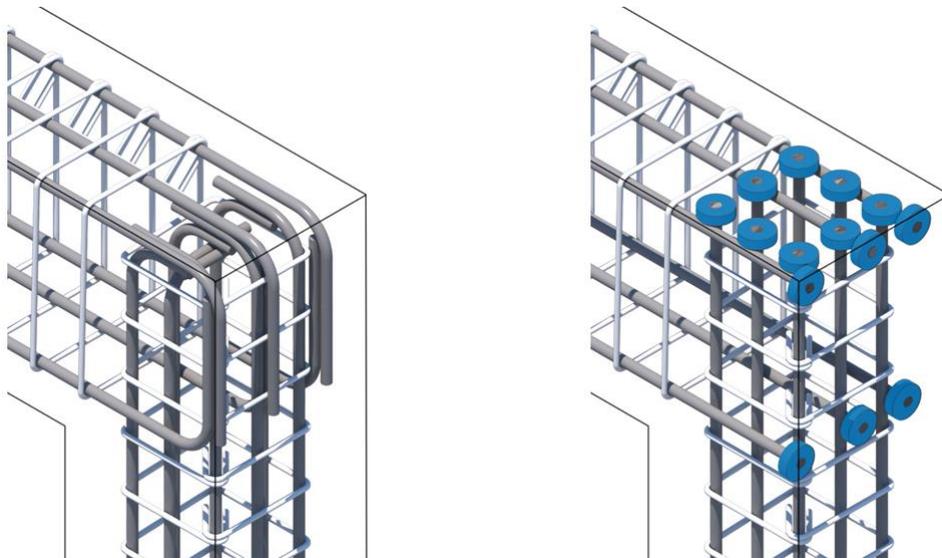


Ilustración 2 Dextra group, (2018) Comparación de refuerzo en conexión viga columna.

Los anclajes con gancho requieren longitudes de anclaje relativamente grandes (Comparadas con los anclajes con cabeza):

La longitud mínima de anclaje estipulada en la NSR 10 es una limitante para las conexiones viga columna, debido a su gran longitud, lo cual requiere del uso de anclajes con gancho para lograr disminuir el contacto con el concreto para adquirir una alta resistencia al arrancamiento.

En la NSR 10 Titulo C.12.5.2 se define la longitud de desarrollo para barras con gancho:

$$\ell_{dh} = \left(\frac{0.24 f_y \Psi_e}{\sqrt{f'_c}} \right) d_b \text{ (Sistema internacional)}$$

En la NSR 10 Titulo C.12.5.2 se define la longitud de desarrollo para barras con cabeza:

$$\ell_{dh} = \left(\frac{0.19 f_y \Psi_e}{\sqrt{f'_c}} \right) d_b \text{ (Sistema internacional)}$$

Donde:

ℓ_{dt} = Longitud de desarrollo

Ψ_e = Factor de modificacion de ℓ_{dt} en base al revestimiento del refuerzo

f_y = Resistencia especificada a la fluencia del refuerzo, MPa

f'_c = Resistencia especificada a la compresion del concreto, MPa

Se observa que existe una reducción del 26% en la longitud de anclaje al hacer uso de barras con cabeza lo cual permite facilidad en el dimensionamiento de las columnas perimetrales, disminución de costos y facilidad constructiva permitiendo un aumento de diámetro de barra lo cual conlleva a una reducción del número de estas dentro de la viga.

Dificultad al realizar un gancho en barras de gran diámetro:

La figuración de barras puede presentar dificultad para cumplir con los diámetros mínimos de doblado consignados en la NSR 10 Titulo C.7.2.3, lo cual puede presentar micro fisuras que debilitan la barra. Lo cual en el uso de barras con cabeza no se verá afectado teniendo así un mejor cumplimiento de estándares en construcción.

TABLA C.7.2 — DIÁMETROS MÍNIMOS DE DOBLADO

Diámetro de las barras	Diámetro mínimo de doblado
No. 3 (3/8") ó 10M (10 mm) a	6d _b
No. 8 (1") ó 25M (25 mm)	
No. 9 (1-1/8") ó 30M (30 mm), No. 10 (1-1/4") ó 32M (32 mm) y	8d _b
No. 11 (1-3/8") ó 36M (36 mm)	
No. 14 (1-3/4") ó 45M (45 mm) y	10d _b
No. 18 (2-1/4") ó 55M (55 mm)	

Tabla 1 NSR-10. Titulo C.7.2.3. Diámetros mínimos de doblado

Capítulo I

OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.1. Objetivo general:

Evaluar el comportamiento de anclajes con cabeza de diferentes geometrías para barras de refuerzo de concreto sometidas a cargas de tensión estáticas y cíclicas.

1.1.1. *Objetivos específicos.*

-Evaluar experimentalmente el comportamiento y determinar las resistencias a tensión de anclajes con cabeza de geometría cuadrada y circular para varilla de 3 / 4" y 7 / 8" para un concreto de 35 MPa.

-Evaluar el comportamiento de anclajes con cabeza mediante ocho ensayos a tensión directa, para verificar que se presente falla dúctil en la barra.

-Determinar la longitud en la cual se genera la falla del concreto en anclajes de diferentes geometrías en resistencia a tracción realizando 32 ensayos mediante un gato hidráulico.

-Comparar experimentalmente el comportamiento ante carga cíclica de barras con anclaje en una conexión viga columna, mediante dos ensayos para barras con cabeza y dos ensayos para barras con gancho.

Capítulo II

MARCO TEORICO

2.1. Definiciones:

2.1.1. Anclaje:

Elemento encargado de transmitir las cargas, generando una adherencia entre dos elementos conectados mediante este.

2.1.2. Barra con gancho:

Las barras con gancho logran el anclaje mediante una combinación de unión a lo largo de la parte recta del gancho y el apoyo directo de la parte curva de este. Un gancho tiene un radio de curvatura estándar con curvas de 90° y de 180°. Las dimensiones de dichos ganchos se encuentran descritas en NSR 10 Título C.12.5.

2.1.3. Barra con cabeza:

Una barra con un sistema de anclaje mecánico consiste en un aditamento unido al extremo de la barra que para este caso en estudio será una cabeza la cual será utilizada para obtener mejores resultados en la longitud de embebido que se requiere y lograr disminuir la congestión de refuerzo. Estas cabezas logran confinar el concreto alrededor de ellas, evitando así una concentración de refuerzo en un área local. Las dimensiones del área y espesor de la cabeza se encuentran establecidas en ASTM A970/M970-16.

2.1.4. Profundidad efectiva de embebido:

Dimensión mediante la cual la barra con cabeza logra transferir las fuerzas a través del concreto en el cual se encuentra embebido.

2.1.5. Área platina (cabeza):

Los tamaños de cabeza están de acuerdo con ASTM A970- 98,10 permitiendo la transferencia de toda la fuerza de la barra hacia el concreto debajo de la cabeza sin aplastar el concreto ni doblar la cabeza.

2.1.6. Tipos de falla a tracción:

2.1.6.1. *Falla de acero de anclaje.*

La resistencia del acero de anclaje controla la falla cuando la profundidad de embebido es suficiente para que no se presente la falla en el concreto. Esta falla se presenta por rotura del acero y depende de la ductilidad del mismo.

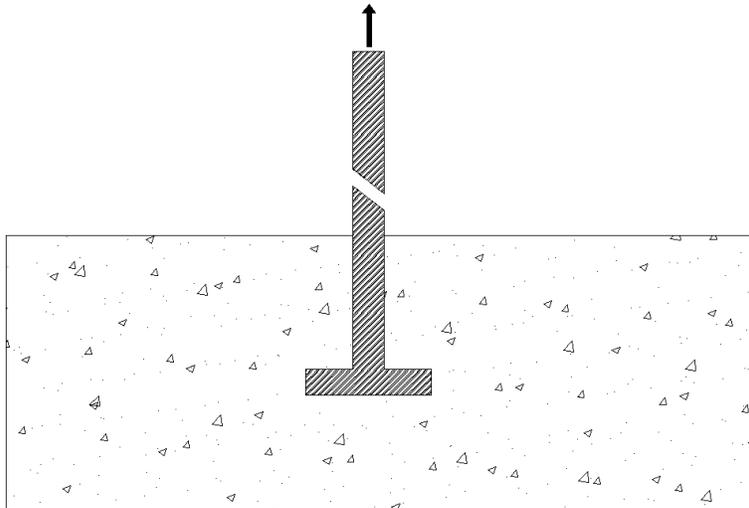


Ilustración 3 Falla del acero de anclaje. Elaboración propia

2.1.6.2. Falla por arrancamiento del concreto.

Este tipo de falla es presentado cuando el anclaje no tiene la suficiente profundidad de embebido para poder desarrollar una adecuada resistencia a la extracción del concreto. Se obtiene una falla en el concreto con un ángulo de falla aproximado de 35° . Dicha resistencia puede aumentar teniendo un refuerzo de confinamiento.

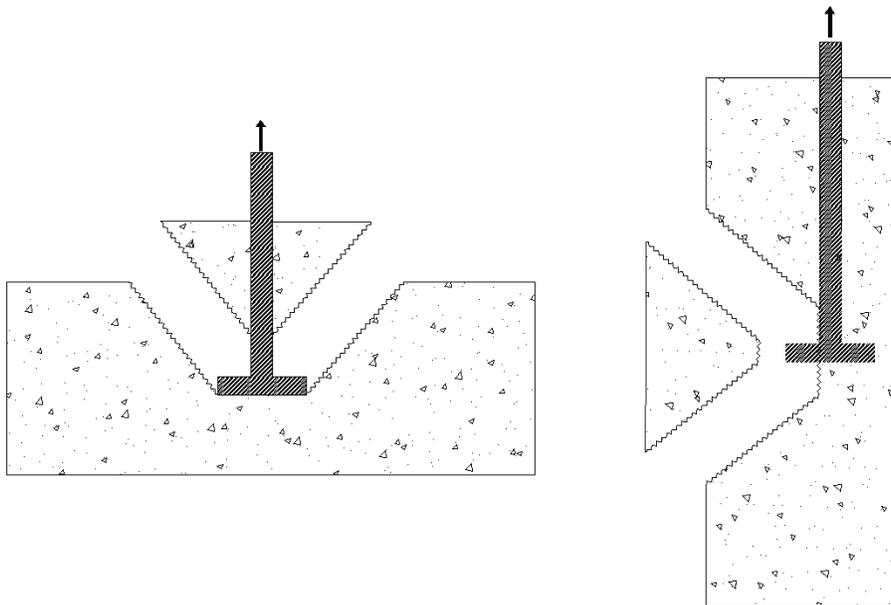


Ilustración 4 Falla por arrancamiento del concreto y desprendimiento lateral. Elaboración propia

2.1.7. Longitud de anclaje de barras con cabeza:

El uso de barras con cabeza está limitado según condiciones establecidas en la ACI 318S-19 en donde se establece que:

- El tamaño de la barra no debe ser mayor que No 36
- El área neta de apoyo de la cabeza A_{brg} debe ser al menos $4A_b$.
- El concreto debe ser de peso normal
- El recubrimiento libre para la barra no debe ser menor que $2d_b$
- El espaciamiento centro a centro entre las barras debe ser al menos $3d_b$

Donde:

A_{brg} = Área neta de apoyo de la cabeza

A_b = Área neta de la barra

d_b = Diametro nominal de la barra

En el capítulo 25.4.4.2 de ACI 318S-19 se plantea la longitud de desarrollo a tracción de barras con cabeza. Este parámetro se define mediante la siguiente expresión matemática:

$$\ell_{at} = \left(\frac{f_y \Psi_e \Psi_p \Psi_o \Psi_c}{31\sqrt{f'_c}} \right) d_b^{1.5} \quad (\text{Sistema internacional})$$

Ecuación 1 Longitud de desarrollo a tracción. ACI 318S-19

Donde:

Factor de modificación	Condición	Valor del factor
Epóxico Ψ_e	Refuerzo con recubrimiento epoxico o zinc y barras con recubrimiento dual del zinc y epoxico.	1.2
	Refuerzo sin recubrimiento o refuerzo recubierto con zinc (galvanizado).	1.0
Refuerzo de estribos paralelos Ψ_p	Para barras No. 36 y menores con $A_{tt} \geq 0.3 A_{hs}$ o $s \geq 6 d_b$	1.0
	Otros	1.6
Ubicación Ψ_o	Para barras con cabeza -Que terminan dentro del núcleo de la columna con recubrimiento lateral normal al plano de la barra con cabeza ≥ 60 mm, o con recubrimiento lateral $\geq 6 d_b$	1.0
	Otros	1.25
Resistencia del concreto Ψ_c	Para $f'_c < 42$ Mpa	$\frac{f'_c}{105} + 0.6$
	Para $f'_c \geq 42$ Mpa	1.0

Tabla 2 Factor de modificación para barras con cabeza. ACI 318S-19

2.1.8. Ensayo a tracción:

A continuación, se presenta de manera ilustrativa la configuración para realizar el ensayo de tracción en donde el elemento a utilizar es la maquina universal para poder garantizar una adherencia entre la barra y la cabeza:

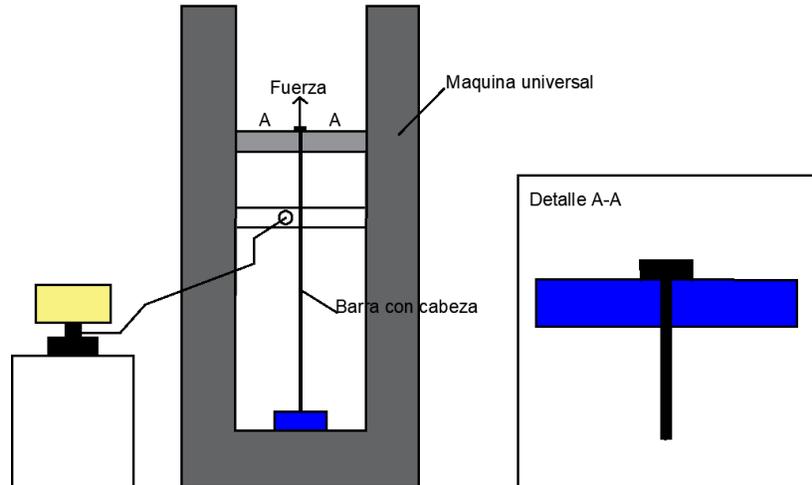


Ilustración 5 Esquema ensayo a tracción. Elaboración propia



Ilustración 6 Montaje experimental. Ensayo a tracción. Fuente propia

2.1.9. Ensayo de extracción:

A continuación, se presenta de manera ilustrativa la configuración para realizar el ensayo de extracción en donde el elemento a utilizar es un gato hidráulico.

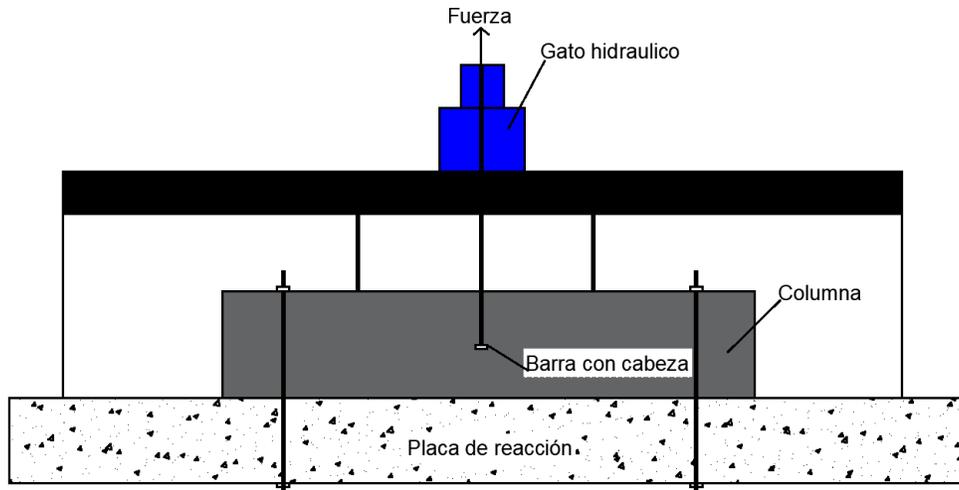


Ilustración 7 Esquema ensayo de extracción. Elaboración propia



Ilustración 8 Montaje. Ensayo de extracción. Fuente propia

2.1.10. Ensayo de carga cíclica:

A continuación, se presenta de manera ilustrativa la configuración para realizar el ensayo de carga cíclica en donde el elemento a utilizar es un actuador.

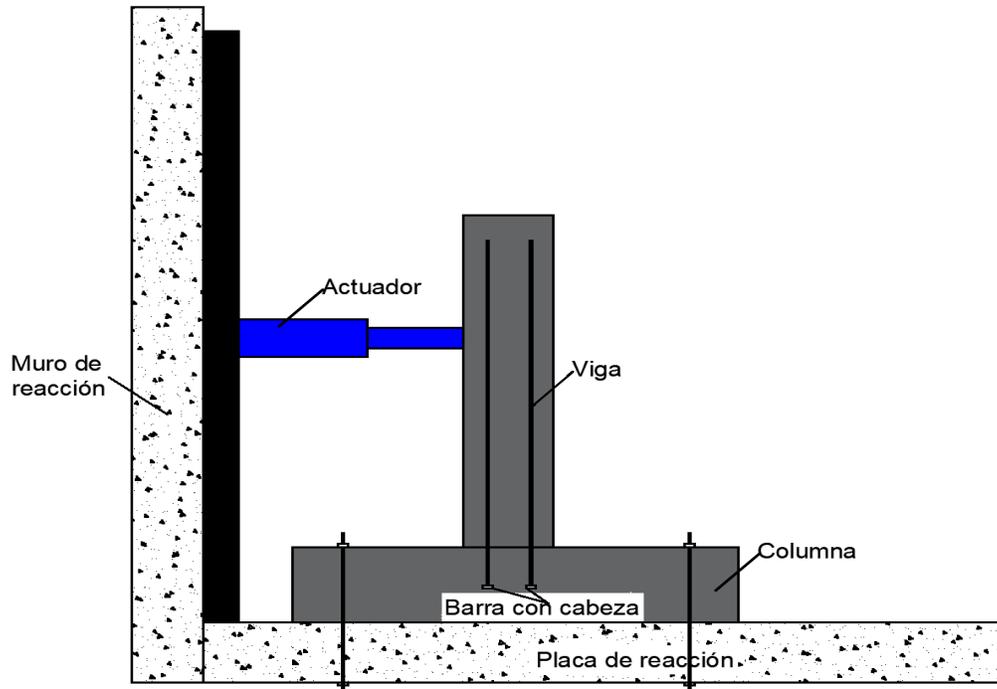


Ilustración 9 Esquema ensayo de carga cíclica. Elaboración propia



Ilustración 10 Montaje. Ensayo de carga cíclica. Elaboración propia

2.2. Estado del arte:

Es importante resaltar la normativa actual respecto a la longitud de embebido que se requiere en función de los diámetros de las barras que se utilizan en construcción basándose en los parámetros mínimos estipulados en la ASTM A970M, también es tema de discusión el comportamiento de los anclajes de las barras con gancho y como el uso de anclajes con cabeza produce un mejor rendimiento y eficiencia en la construcción debido a que se evita la congestión del refuerzo.

La adherencia se refiere a la interacción entre el acero de refuerzo y el concreto que permite la transferencia de la tensión del concreto al acero. Por otro lado, es el mecanismo que permite el anclaje de barras de refuerzo e influye en muchas otras características como el control de grietas y la rigidez de la estructura.

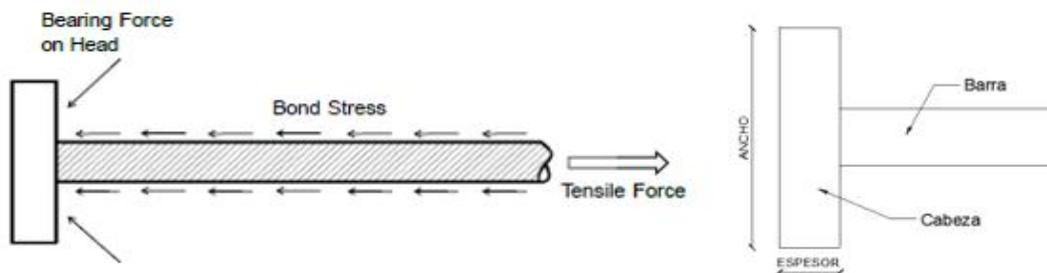


Ilustración 11 Transferencia de fuerzas en barras con cabeza. Tomado de: Shao, (2016).

Las dimensiones de ancho, espesor y área mínima de la cabeza dados en la ASTM A970-98 para que haya una completa transferencia de los esfuerzos cuando este se encuentra embebido en el concreto, se muestran en la tabla 3.

Dimensiones barras con cabeza

Barra #	Espesor (mm)	Área mínima mm ²
3	10	285
4	11	507
5	12	792
6	14	1136
7	16	1548
8	16	2027
9	18	2565
10	20	3167
11	22	3832
14	32	6207
18	40	10261

Tabla 3 ASTM A970, (2004). Dimensiones barra con cabeza.

El área de la sección transversal de la cabeza es el área proyectada medida perpendicularmente al eje de la barra. Park, et al., (2003), describe que el mercado coreano de barras con cabeza ha aumentado y es por esto por lo que se encontró la necesidad de realizar un estudio respecto a este uso y se plantearon 58 ensayos de tensión para determinar los modos de falla y las variables al tener una variación en la geometría de la cabeza. Las barras utilizadas fueron de 16 mm, 19 mm, 22 mm en formas circulares (C), cuadradas (S), rectangulares (R) y elipses (E). El concreto tiene dos resistencias a la compresión de 28 MPa y 36 MPa.

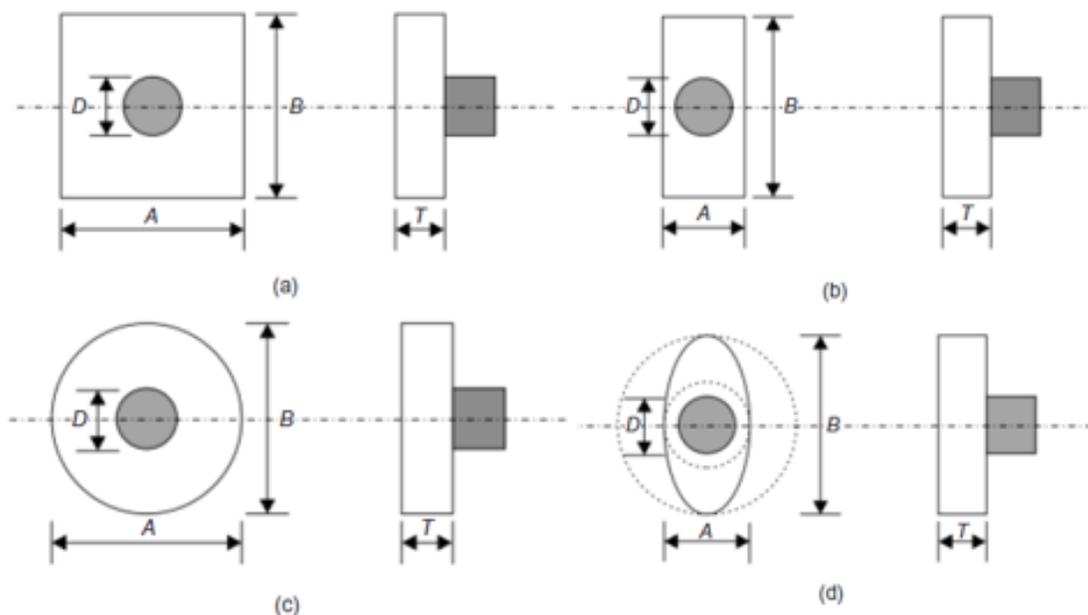


Ilustración 12 Park et al., (2003). Ilustración de geometrías de barras con cabeza.

Las barras de cabeza no tienen una curva como con los ganchos, por lo que facilitan construcción y dan como resultado una menor congestión de acero que las barras con ganchos, especialmente en las regiones como las uniones de la columna de vigas, pero así mismo deben cumplir con la longitud de anclaje requerida.

Al poder obtener la longitud de anclaje requerida para las barras con cabeza se procede a realizar el montaje para realizar la falla a tensión de estos elementos, el montaje propuesto en Ghimire et al., (2019) logra determinar los esfuerzos máximos a tensión que debe resistir la barra con cabeza al encontrarse embebida en el concreto.

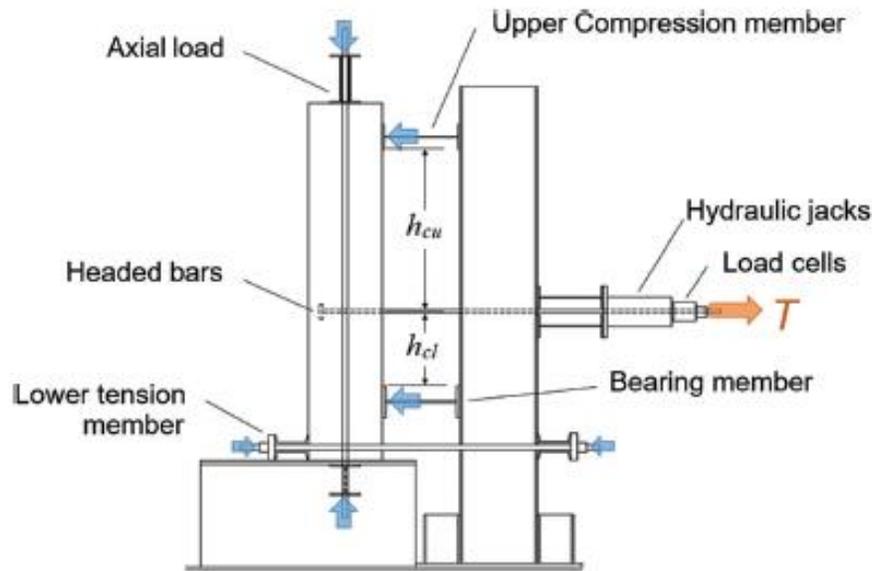


Ilustración 13 Ghimire et al., (2019). Ensayo de extracción.

El montaje permite visualizar el tipo de falla en el concreto, la cual teóricamente puede ser falla tipo cono especificada en el ACI 349-97 y falla tipo pirámide en el método de diseño por capacidad del concreto (DCC) (Concrete Capacity Design (CCD) Method). ACI 318S-19.

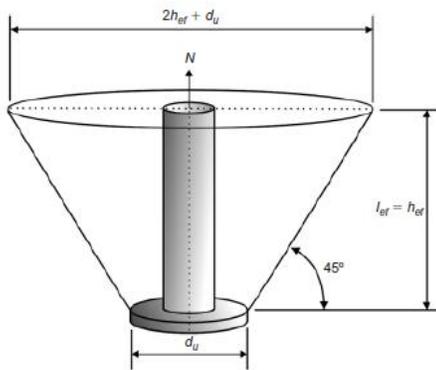


Ilustración 14 ACI 349-97. Falla tipo cono.

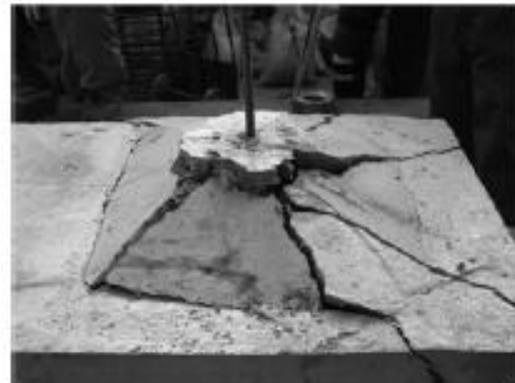


Ilustración 15 Falla tipo pirámide CCD Method.

Así mismo se debe garantizar que suceda una falla dúctil en el acero, evitando la fractura en la soldadura que conecta la cabeza con la barra (ilustración 16 (c)). Esta falla deseada se puede evidenciar en (a) para la profundidad que se encuentra en la normativa; ante una profundidad inferior se obtendrá cono de falla (b).

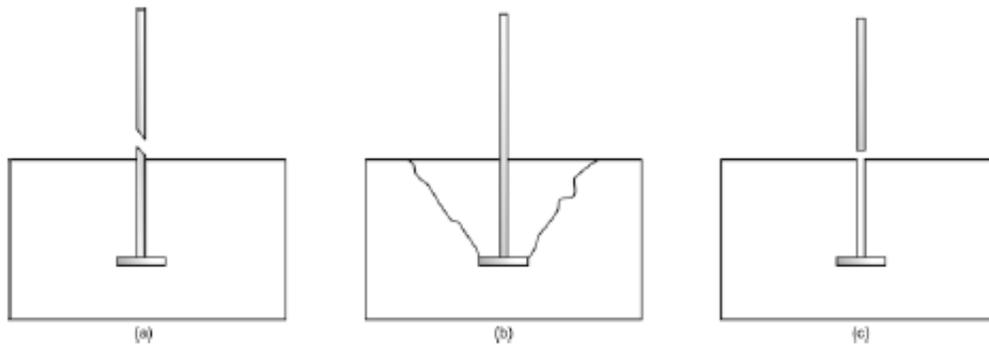


Ilustración 16 Park et al., (2003). Comportamiento de falla de una barra de acero.

Una vez obtenida la longitud de embebido se deben tener en cuenta las fuerzas actuantes sobre la columna y sobre la viga para poder determinar el impacto de estas fuerzas en los esfuerzos a los cuales las barras se encuentran sometidas. Un acercamiento al análisis de dichos esfuerzos se observa en el informe presentado en Malasia por Najafgholipour et al., (2017) en donde se realiza el análisis de conexión viga columna por medio de elementos finitos para poder observar los esfuerzos a los cuales se encuentra sometida dichos elementos.

El modelo se encuentra desarrollado en el software ABAQUS, en donde las características del concreto y del acero se plantea teniendo en cuenta las variables de dichos elementos, los esfuerzos a tensión y a compresión, el módulo de Young, la relación de Poisson. La condición de contacto utilizada es de amarre para crear interacción de enlace entre el elemento de viga y el elemento de columna, "Embedded-region" fue utilizado para simular el contacto entre las barras y el concreto. La fuerza aplicada se realizó a una distancia de 900 mm de la columna. Las condiciones de contorno se establecieron tomando la parte superior e inferior de la columna restringido a los seis grados de libertad. Para el tamaño de la malla, se consideraron 20 mm para elementos generales en concreto, la viga y columna se determinaron como un tipo de elemento sólido (C3D8R) y las barras de refuerzo y estribos se utilizó elemento de celosía (T3D2).

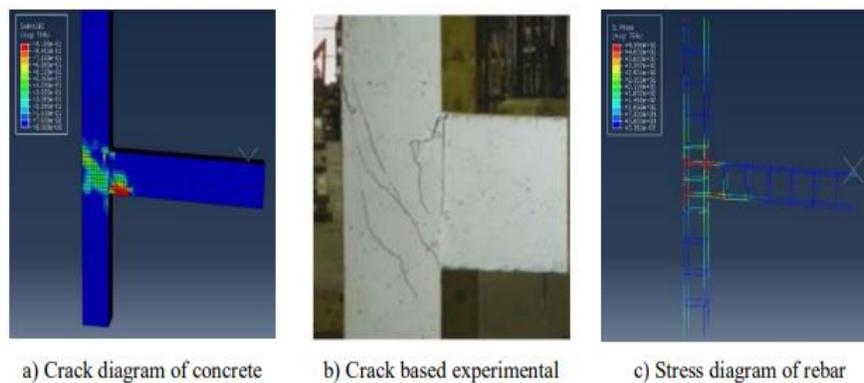


Ilustración 17 Najafgholipour et al., (2017). Diagramas de esfuerzos mediante elementos finitos.

De la misma manera Najafgholipour et al., (2017) realiza un análisis por medio de elementos finitos en donde se plantean nuevas dimensiones de mallado, un tamaño de 40 mm para los elementos de concreto y el refuerzo de las barras corrugadas. Las condiciones de contorno se presentan en la siguiente ilustración:

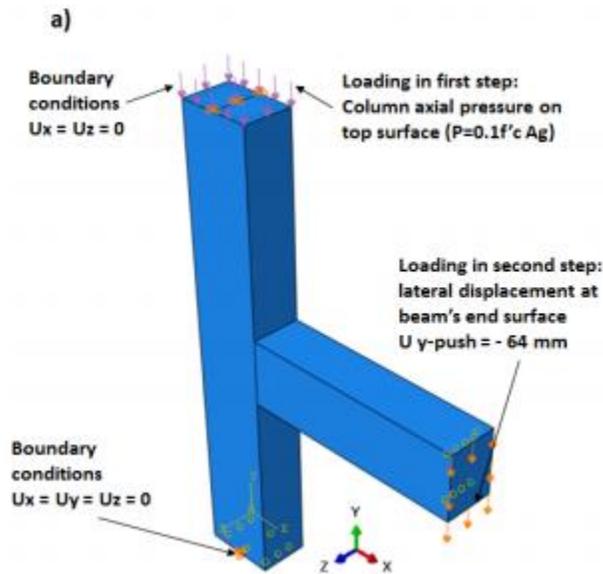


Ilustración 18 Najafgholipour et al., (2017). Condiciones de contorno.

Se realiza una variación de la ubicación de la carga para poder simular una carga cíclica con el fin de obtener una respuesta a un sismo que estaría sufriendo la estructura en estudio.

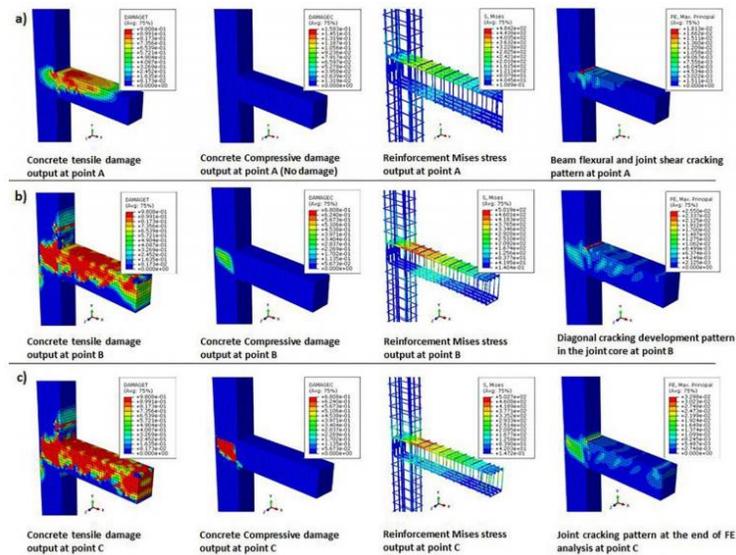


Ilustración 19 Najafgholipour et al., (2017). Análisis de falla mediante variación de ubicación de la carga.

Por otra parte Kabir & Islam, (2014) realizo un estudio respecto al desprendimiento del concreto de una barra corrugada embebida en concreto el cual simulo en ANSYS 11.0 para poder determinar los esfuerzos a los cuales se encuentra sometida dicha barra. En el modelado se plantea que el concreto tiene las características de un SOLID65 (Nomenclatura material librería ANSYS) el cual presenta un elemento compuesto por ocho nodos que es capaz de simular fisuras cuando es sometido a tensión y aplastamiento ante una carga de compresión. Por otra parte, la barra corrugada es simulada como un LINK8 el cual es utilizado para barras de refuerzo en este software. Una vez el modelo fue corrido y analizado se obtuvieron resultados en donde se muestra que el esfuerzo en el concreto es superior en la cercanía al borde de desprendimiento de la barra y en el contacto con esta. El esfuerzo máximo se presenta en la barra ya que falla al superar la resistencia a la tensión de la barra.

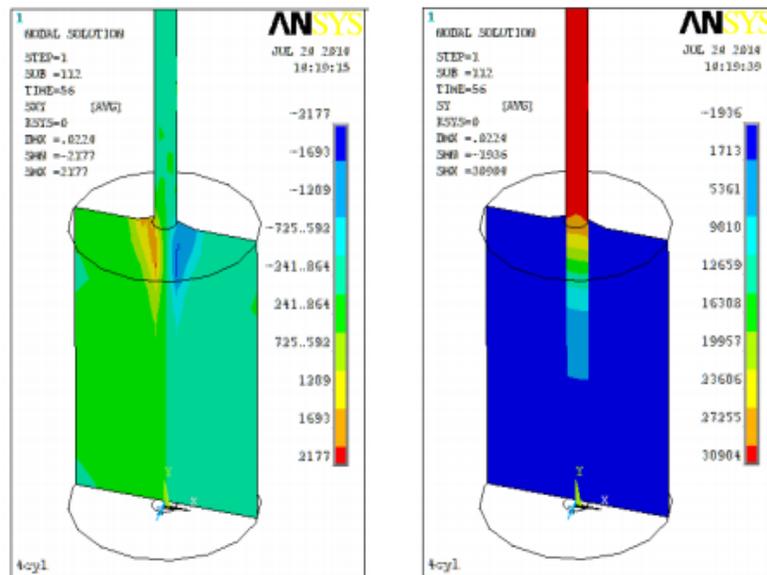


Ilustración 20 Kabir & Islam, (2014). Condiciones de contorno

2.3. Artículos relevantes para estudio:

Durante el desarrollo de este trabajo de grado se encontraron artículos presentados recientemente, los cuales tienen como finalidad la recomendación de ser estudiados para complementar su uso en Colombia.

2.3.1. Won Jong Chin, Young Hwan Park, Jeong-Rae Cho, Jin-Young Lee, Young-Soo Yoon. (2020). “Flexural behavior of a precast concrete deck connected with headed GFRP rebars and UHPC”.

Muestra:

Se evaluó el comportamiento de barras GFRP mediante 44 especímenes utilizando un concreto de 27 y 35 MPa, mortero de alta resistencia de 83 Mpa, y concreto de ultra alta resistencia de 165 MPa.

Información destacada:

Durante el estudio realizado se propuso una conexión de cabeza para GFRP en la cual se forma la cabeza mediante el corte del final de la barra en el sentido longitudinal y se ubica un molde de concreto ultra resistente UHPC “Ultra-high-performance concrete”. Esta cabeza debe garantizar una capacidad del 60% de la capacidad máxima a tensión de la barra GFRP.

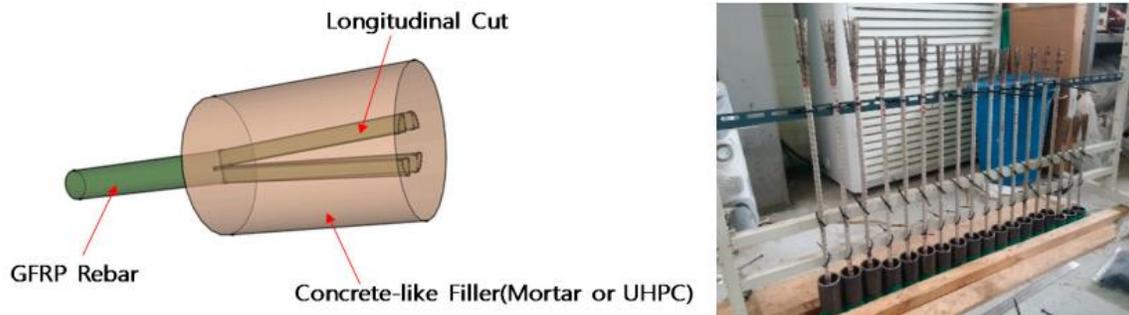


Ilustración 21 Barras con cabeza UHPC. Won Jong Chin, et al (2020)

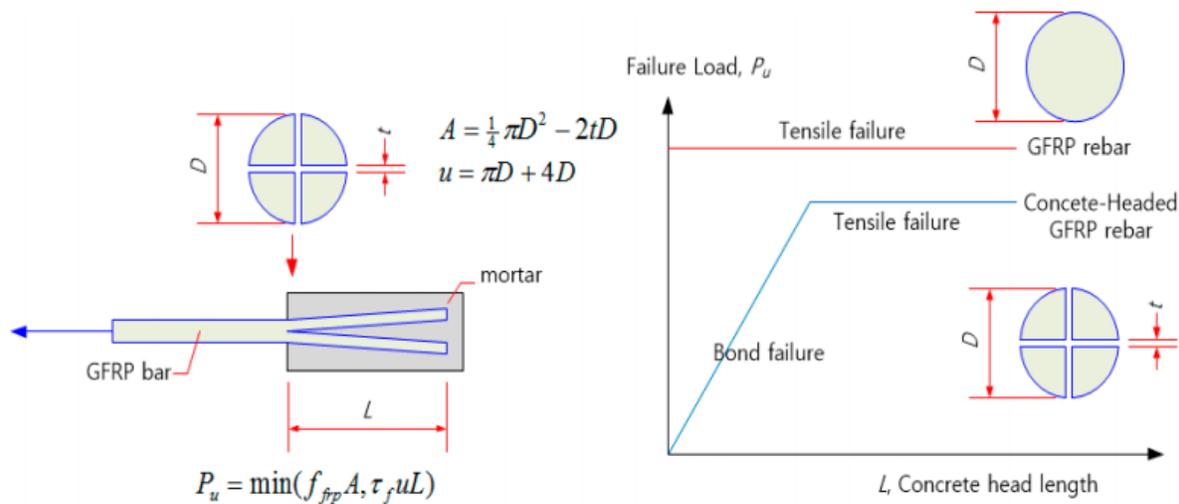


Ilustración 22 Diagrama de falla y modo de falla. Won Jong Chin, et al (2020)

Resultados y conclusiones:

Se realizaron ensayos de tensión directa sobre las barras GFRP obteniendo una carga de fluencia de 1066 MPa para barra de 16 mm y 1030 MPa para barra de 19 mm. Se pudo observar que la falla a extracción para los dos diámetros tuvo una carga similar en donde el promedio del esfuerzo máximo de unión fue de 10.84 MPa con un desplazamiento entre los elementos de 1.66 mm.

Los resultados de la prueba de extracción confirmaron la tendencia de las barras de refuerzo con diámetros más grandes a tener una menor resistencia a la rotura. En particular, es importante notar que la muestra hecha con UHPC exhibió una carga de falla significativamente mayor en comparación con las otras muestras. En consecuencia, se puede esperar un rendimiento estructural mejorado cuando se utiliza UHPC como material de relleno en la conexión entre losas de cubierta prefabricadas.

2.1.1. Minh-Tung Tran, Quoc-Bao Bui, Bastian Sentosa, Nhat-Tien Nguyen, Trung-Hieu Duong and Olivier Plé. (2018). “Sustainable RC Beam-Column Connections with Headed Bars: A Formula for Shear Strength Evaluation”.

Se realizaron un total de 30 conexiones viga columna reforzadas mediante barras con cabeza. Se aplicó una carga lateral cíclica cuasi estática en donde los modos de falla final recolectadas fueron ya sea cortante de junta (J) o cortante de junta con deformación del refuerzo de la viga (BJ). El concreto utilizado fue de 28 MPa.

Información destacada:

Muestras que fallaron en términos de columna débil-viga fuerte y viga débil-junta fuerte fueron excluidos de los datos recopilados porque, en estos casos, la capacidad de flexión de la columna o la viga fue relativamente bajo. Se realizó un modelo de elementos finitos con el fin de comparar los resultados obtenidos.

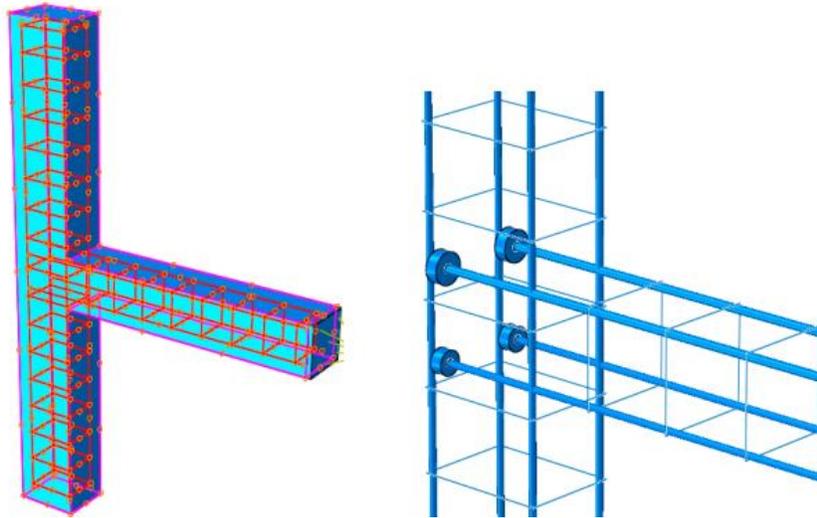


Ilustración 23 Modelo viga columna en Abaqus. Minh-Tung, et al (2018)

Carga Máxima	Fórmula Propuesta	FEM	Diferencia (%)
T1 (Carga vertical)	20.60 kN	17.52 kN	+17.6%
T2 (Carga horizontal)	69.78 kN	74.56 kN	-6.4%

Ilustración 24 Comparación entre ecuación ACI y ecuación planteada. Ming-Tung, et al (2018)

Las ecuaciones para determinar el cortante en una conexión viga columna están determinadas por el ACI el cual depende principalmente de la resistencia del concreto:

$$V_{aci} = v * b_j * h_c = k * \phi * f'_c{}^{0.7} * b_j * h_c$$

Ecuación 2 Cortante en conexión viga columna ACI. Ming-Tung, et al (2018)

El presente estudio determinó que los efectos del cortante calculados mediante la ACI consideran únicamente la resistencia a la compresión del concreto (f'_c) mientras que los efectos del índice de los detalles de las barras de la viga (λ_b) y el refuerzo de cortante de junta normalizado (X_j) no han sido considerados. Por consiguiente, se planteó la siguiente ecuación:

$$V = b_j * h_c * \sqrt{f'_c} * (0.02 * \lambda_b * 0.06 X_j + 0.55)$$

Ecuación 3 Cortante en conexión viga columna formulada. Ming-Tung, et al (2018)

Donde:

$$X_j = \frac{A_s * F_y}{b * h * \sqrt{f'c}}$$

Ecuación 4 Refuerzo de cortante de junta normalizado. Ming-Tung, et al (2018)

$$\lambda_b = \frac{l_p * C_c}{d_b * C_s}$$

Ecuación 5 Índice de los detalles de las barras de la viga. Ming-Tung, et al (2018)

C_c = espesor de las barras de refuerzo longitudinales de la viga.

C_s = espaciamiento entre las barras longitudinales.

Resultados y conclusiones:

Entre 30 especímenes estudiados, 17 especímenes tuvieron fallas en el modo J, mientras que otros 13 especímenes tuvieron falla en el modo BJ. Se demostró que, además de la resistencia a la compresión del concreto, el índice de los detalles de las barras de la viga y el refuerzo de corte normalizado de la junta también tuvieron un papel vital en la resistencia al corte de la junta. La fórmula planteada en el desarrollo de este trabajo concuerda con los ensayos de laboratorio.

2.1.2. Abdul Hossein Paknejadi, Kiachehr Behfarnia. (2020). “Performance of reinforced self-consolidating concrete beam-column joints with headed bars subjected to pseudo-static cyclic loading.

Resultados y conclusiones:

El presente estudio investigó la aplicabilidad del diseño de juntas viga-columna exteriores entre pisos con barras con cabeza y concreto autocompactante, utilizando un área de cabeza relativa menor que la recomendada en la sección 25.4.4.2 de ACI318-14.

El uso de concreto autocompactante en lugar del normal en las juntas con barras con cabeza mejoró la eficiencia de la junta y la capacidad portante. Según la medida del ancho de fisura realizada al final de los ciclos de carga, las fisuras en el concreto autocompactante fueron un 16% menos anchas que las que aparecieron en el concreto normal.

Independientemente del tipo de concreto, las uniones diseñadas con el área de cabeza relativa $\frac{A_{brg}}{A_b}$ de 3 (en lugar de 4) cumplieron con los criterios de aceptación de ACI 374-2005 y ACI 318-14 en términos del comportamiento sísmico.

2.1.3. Haitham H.Saeed, AymanA. Abdulhamed. (2021). “Bond behavior of dual headed bars in concrete structures”.

Comprender el comportamiento de las armaduras provistas de doble cabeza aplicando carga tanto en compresión como en tracción.

El estudio tiene como objetivo evaluar los parámetros que afectan el desarrollo de armaduras de doble cabeza sometidas a fuerzas de tracción y compresión.

Establecer un criterio para el desarrollo de barras de doble reborde cargadas en compresión.

Muestra:

Se probaron un total de 35 muestras en carga de extracción y compresión. Las principales variables fueron el número de cabezas (barras de una o dos cabezas), resistencia a la compresión del concreto, tamaño de la cabeza, longitud de anclaje y refuerzo de confinamiento. De las 35 muestras probadas, 4 contenían cabezas simples y las restantes contenían barras de doble cabeza, se utilizaron dos tamaños de barra (#5 y #6). Ocho muestras probadas en extracción, y centrándose en el comportamiento de las barras de cabeza bajo carga de compresión, las 27 muestras restantes se probaron bajo carga de compresión monótona hasta la falla.

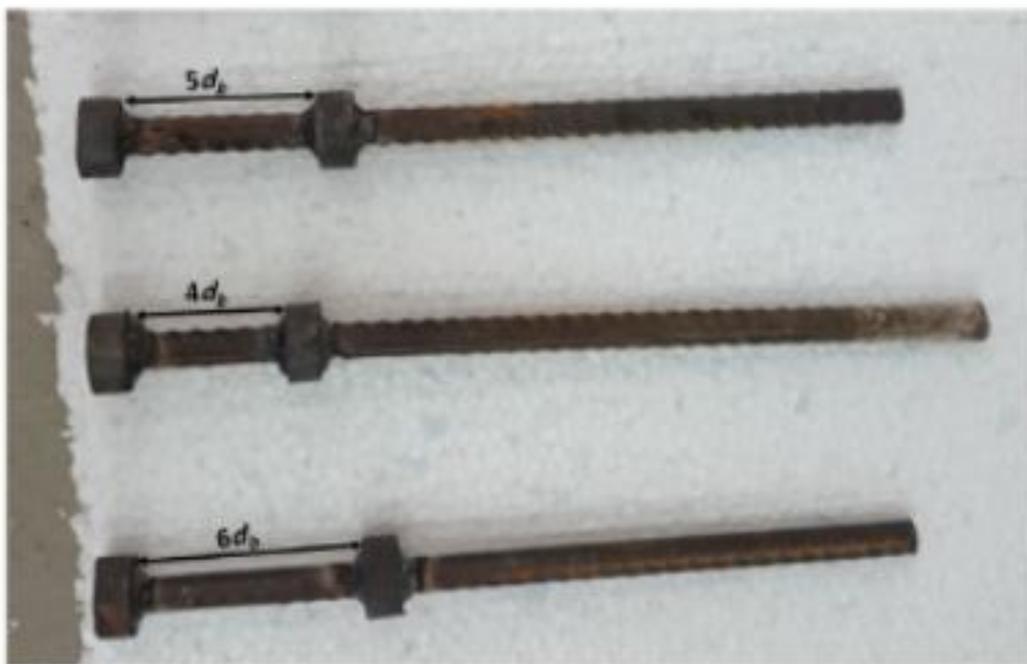


Ilustración 25 Barras de doble cabeza. Haitham H Hsaeed. (2021)

Información destacada:

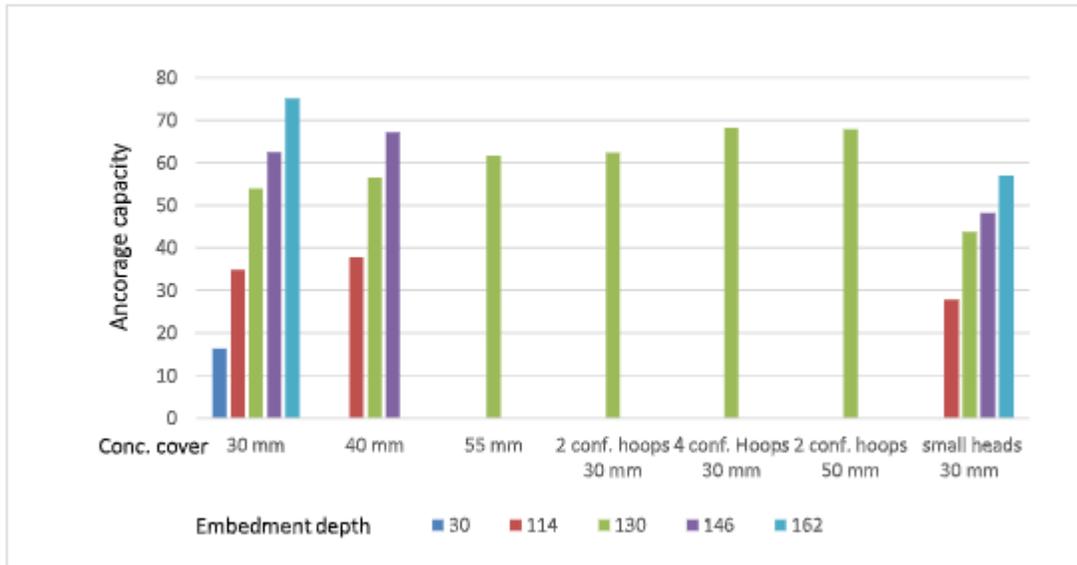


Ilustración 26 Comparación de la capacidad del anclaje mediante el uso de una cabeza y cabeza doble. Haitham H Hsaed (2021)

Se pueden usar cabezas dobles para reducir la longitud de desarrollo requerida del refuerzo en compresión.

Resultados y conclusiones:

La capacidad de anclaje de las barras de doble cabeza en compresión aumenta a medida que aumenta el espacio entre las cabezas.

El aumento del recubrimiento lateral mejoró la capacidad de anclaje de las barras de doble cabeza en la carga de compresión.

La capacidad de anclaje de las barras de doble cabeza en tensión y compresión aumenta con el aumento de la resistencia a la compresión del hormigón de una manera similar a su efecto en las barras de un solo cabezal cargadas en tensión.

**2.1.4. Shubham Singhala, Ajay Chourasiaa, Jalaj Parashara. (2021)
“Anchorage behaviour of headed bars as connection system for
precast reinforced concrete structural components”.**

Realizar una comparación entre el uso de cabezas lisas y cabezas con acanalado interno y externo.



Ilustración 27 Cabeza lisa. Shubham (2021)



Ilustración 28 Cabeza acanalado interno y externo. Shubham (2021)

Las barras demostraron una capacidad de unión notablemente alta (63% para cabezas lisa 91% para acanalado externo y 95% para acanalado interno)

Capítulo III

CARACTERIZACION DE MATERIALES

3.1. Concreto estructural

El concreto utilizado para la elaboración de los ensayos fue concreto estructural premezclado Cemex 35 MPa a 28 días grava común 1" con asentamiento de 5".

Para determinar la resistencia a la compresión del concreto en estudio se realizó la toma de diez (10) cilindros de 100mm de diámetro y 200mm con un área nominal de 78.54 mm², los cuales fueron fallados los días correspondientes a los ensayos de extracción obteniendo las siguientes resistencias:

CILINDROS	FUERZA (kgf)	FUERZA (kN)	ESFUERZO (Mpa)
1	39400	386	50,17
2	35800	351	45,58
3	34359	337	43,75
4	39980	392	50,90
5	38200	375	48,64
6	32400	318	41,25
7	34400	337	43,80
8	35900	352	45,71
9	37300	366	47,49
10	39100	383	49,78
Promedio			46,71

Tabla 4 Resistencia concreto suministrado por Cemex. Elaboración propia



Ilustración 29 Toma de cilindros. Fuente propia

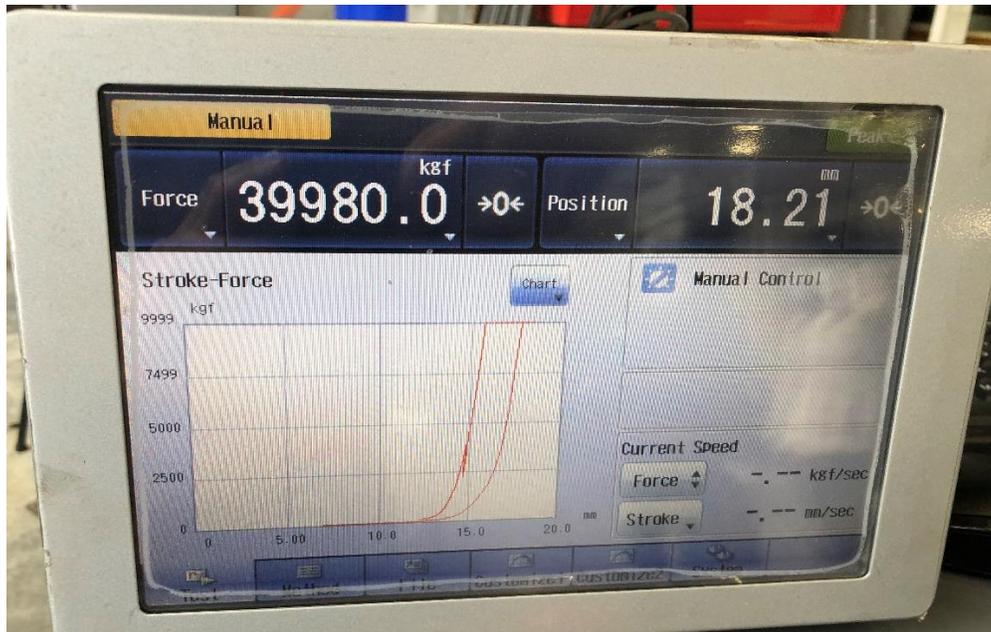


Ilustración 30 Resultados ensayo a compresión cilindros de concreto. Fuente propia



Ilustración 31 Falla a compresión cilindro de concreto. Día # 32 después de fundida. Fuente propia



Ilustración 32 Falla a compresión cilindro de concreto. Día # 36 después de fundida. Fuente propia

3.2. Barras corrugadas

Las barras corrugadas utilizadas para los ensayos realizados fueron barras nacionales de Grupo Siderúrgico Reyna con una resistencia de 420 Mpa.



Ilustración 33 Caracterización barra corrugada. Fuente propia

Las cuales presentaron esfuerzos de:

# varilla	Carga Fluencia (kgf)	Carga Fluencia (kN)	Esfuerzo fluencia (Mpa)	Carga ruptura (kgf)	Carga Fluencia (kN)	Esfuerzo falla (Mpa)
6	13250	129,93	448,76	17762	174,17	601,58
	13132	128,77	448,76	17780	174,35	601,58
	13450	131,89	450,83	18669	183,07	625,79
Promedio	13277	130,20	449	18070	177,20	610
7	19810	194,26	445,53	25160	246,72	615,38
	19750	193,67	412,05	25850	253,49	523,34
	19794	194,10	410,81	25324	248,33	537,69
Promedio	19785	194,01	423	25445	249,51	531

Tabla 5 Esfuerzos barras corrugadas. Elaboración propia

La determinación de estos valores se obtuvo mediante el ensayo de tracción realizado en la máquina universal de seis (6) muestras para verificar la adecuada unión entre la barra y la cabeza, confirmando que dicha adherencia cumple con los esfuerzos de tracción.

Los ensayos realizados se realizaron de la siguiente manera. (El procedimiento presentado corresponde para varilla corrugada #6, el cual es repetido para las demás barras utilizadas).

Diámetro nominal (in)	0.75
Diámetro nominal (mm)	19.05
Longitud barra (mm)	595

Tabla 6 Diametro y longitud barra. Elaboración propia



Ilustración 34 Medición diámetro varilla #6. Fuente propia



Ilustración 35 Carga aplicada varilla #6. Fuente propia



Ilustración 36 Medición diámetro después de ruptura de la barra. Fuente propia

Se procedió a calcular el esfuerzo de fluencia y de ruptura:

# varilla	Carga Fluencia (kgf)	Carga Fluencia (kN)	Esfuerzo fluencia (Mpa)
#6	13277	130	449
#7	19785	194	423

Tabla 7 Esfuerzo de fluencia y ruptura barras. Elaboración propia

3.3. Elementos de concreto

Se construyeron treinta y dos (32) especímenes de concreto convencional de 35 MPa; los cuales fueron utilizados para ensayar las barras a extracción y evaluar su comportamiento ante profundidad de embebida variable.

Se presenta en las tablas 8 y 9 las dimensiones y la geometría utilizada para ensayar las barras en el ensayo de extracción. El área mínima presentada es estipulada por la ASTM A970 en el anexo 1.

“A1.1.1.4 The net bearing area of a bar with an obstruction meeting the requirements of this annex is the gross area of the head minus the maximum area of the obstruction and shall not be less than four times the nominal cross-sectional area of the bar.”

En español, el área de apoyo neta de una barra con cabeza que cumpla con los requisitos de este anexo es el área bruta de la cabeza menos el área máxima de la cabeza y no debe ser menor de cuatro veces el área nominal de la sección transversal de la barra.

La longitud de embebido se calculó mediante la ecuación 1, la cual determina la distancia a la cual se debe encontrar la cabeza de la barra para garantizar una óptima distribución de esfuerzos en el concreto. Los cálculos de las profundidades de anclaje fueron realizados para un concreto de 35 MPa, el cual posteriormente fue verificado para una resistencia mayor. Los cálculos para la resistencia final se indicarán más adelante.

Barra # 6

$$\Psi_c = \frac{35 \text{ MPa}}{105} + 0.6 = 0.933$$

Ecuación 6 Factor de modificacion por resistencia del concreto.

$$\Psi_e = 1.0 \text{ (Refuerzo sin recubrimiento epoxico o zinc)}$$

$$\Psi_p = 1.0 \text{ (Separacion refuerzo de estribos paralelos con separacion mayor a 6db)}$$

$$\Psi_o = 1.0 \text{ (Para barras con cabeza que terminan dentro del nucleo)}$$

$$\ell_{dt} = \left(\frac{f_y \Psi_e \Psi_p \Psi_o \Psi_c}{31\sqrt{f'_c}} \right) d_b^{1.5} \text{ (Sistema internacional)}$$

Ecuación 7 Longitud de desarrollo a tracción. ACI 318S-19

$$\ell_{dt} = \left(\frac{420 \text{ Mpa} * 1 * 1 * 1 * 0.933}{31\sqrt{35 \text{ Mpa}}} \right) (19.1 \text{ mm})^{1.5} = 178 \text{ mm}$$

Barra # 7

$$\ell_{dt} = \left(\frac{420 \text{ Mpa} * 1 * 1 * 1 * 0.933}{31\sqrt{35 \text{ Mpa}}} \right) (22.2 \text{ mm})^{1.5} = 224 \text{ mm}$$

El refuerzo utilizado para los especímenes se determinó teniendo en cuenta la cuantía mínima para columnas, obteniendo así:

$$\rho_{min} = 0.01 = \frac{A_s}{b * d}$$

Ecuación 8 Cuantía mínima en columnas. NSR 10

$$A_s = 0.01 * 250 * 210 = 525 \text{ mm}^2$$

Refuerzo longitudinal: 4 barras # 5.

Refuerzo transversal: estribos #4 @ 10.

Se realizaron ocho (8) especímenes en los cuales se ubicó la barra a la longitud de anclaje según la normativa, estos especímenes fueron construidos de 0.25 m x 0.25 m x 1.2m. En las tablas 8 y 9 se presentan las dimensiones de la cabeza utilizada junto con el número de ensayos realizado.

Barra #	Geometría	Base (mm)	Ancho (mm)	# ensayos	L _{dt} (mm)
6	Cuadrada	35	35	2	180
6	Circular	40		2	180
7	Cuadrada	40	40	2	224
7	Circular	45		2	224

Tabla 8 Especímenes con longitud de anclaje según normativa. Elaboración propia



Ilustración 37 Fundida de especímenes para ensayo de extracción. Fuente propia

Adicionalmente se realizaron veinte y cuatro (24) especímenes variando la longitud de anclaje a una longitud inferior a la estipulada en la normativa; construidas de 0.25 m x 0.25 m x 1.0m.

Barra #	Geometría	Base (mm)	Ancho (mm)	# Ensayos	L_{dt} (mm)
6	Cuadrada	35	35	3	100
6	Circular		40	3	100
6	Cuadrada	35	35	3	150
6	Circular		40	3	150
7	Cuadrada	40	40	3	150
7	Circular		45	3	150
7	Cuadrada	40	40	3	180
7	Circular		45	3	180

Tabla 9 Especímenes con longitud de anclaje variable. Elaboración propia



Ilustración 38 Espécimen con refuerzo y barra con cabeza. Fuente propia



Ilustración 39 Formaleta. Fuente propia

3.3.1. Montaje de ensayos:

En los ensayos se consideraron dos (2) escenarios de falla; falla por tracción en la barra de acero y falla por arrancamiento del concreto. Suponiendo que la falla del concreto sucede a 35° se planteó que los especímenes cuya longitud de anclaje fuera igual a la longitud estipulada en la normativa fueran de mayor tamaño en relación a las profundidades inferiores; es por esto como ya fue mencionado los especímenes tienen una longitud de 1.2 m.

El montaje consta de unas vigas metálicas ubicadas en los extremos del espécimen de concreto para lograr aislar los apoyos de la superficie de falla y no interferir en la resistencia de los elementos; se ubica un gato hidráulico de embolo hueco en el centro del espécimen el cual genera un desplazamiento sobre la barra provocando la extracción de esta.



Ilustración 40 Montaje ensayos de extracción, Fuente propia

3.4. Conexión viga-columna:

Por último, se ensayaron cuatro (4) conexiones viga columna, cuyas dimensiones son 0.25 m x 0.25 m x 1.0m para el espécimen y 0.25 m x 0.25 m x 1.0m para la columna. Estas conexiones se componen por cuatro (4) barras de refuerzo interno #6 y confinamiento mediante estribos de 1/2 “.

El montaje consta de una conexión viga columna atada en los extremos mediante el uso de dos (2) vigas metálicas las cuales se encuentran sujetadas en la losa de concreto con el fin de simular un empotramiento. La carga aplicada se realiza mediante el uso de un actuador mecánico el cual aplica un desplazamiento cíclico de carga y descarga simulando una carga dinámica sobre el espécimen. El contacto entre el actuador y la columna se realizó mediante una varilla para así obtener un apoyo con rotula.



Ilustración 41 Montaje ensayo conexión viga-columna. Fuente propia



Ilustración 42 Formaleta conexión viga columna. Fuente propia



Ilustración 43 Proceso de fundido espécimen y conexión viga-columna. Fuente propia

3.5. Cabeza barras:

Las dimensiones de ancho, espesor y área mínima de la cabeza son determinados en la ASTM A970-98 que permite una completa transferencia de los esfuerzos cuando este se encuentra embebido en el concreto, en la siguiente tabla se muestran los valores de las dimensiones de las barras nominales.

Dimensiones barras con cabeza

Barra #	Espesor (mm)	Área mínima mm ²
3	10	285
4	11	507
5	12	792
6	14	1136
7	16	1548
8	16	2027
9	18	2565
10	20	3167
11	22	3832
14	32	6207
18	40	10261

Tabla 10 ASTM A970, (2004). Dimensiones barra con cabeza.

Las barras con cabeza utilizadas tienen la siguiente geometría, la cual cumple con la norma ASTM A970.

Barra #	Geometría	Base (mm)	Ancho (mm)	Espesor platina (mm)	Área cabeza (mm ²)	Área mínima (mm ²)
6	Cuadrada	35	35	15	1225	1136
	Circular	40		15	1257	1136
7	Cuadrada	40	40	18	1600	1548
	Circular	45		18	1590	1548

Tabla 11 Dimensiones barra con cabeza utilizadas. Elaboración propia

Las cabezas cuadradas se realizaron en taller en el cual se realizó el corte de estas platinas según el espesor para cada una de las barras en estudio y con las dimensiones de la tabla 11. La unión entre la barra con la cabeza cuadrada se realizó mediante el siguiente procedimiento:

1. Se perforo la platina con una dimensión ligeramente superior al diámetro de la barra con la finalidad de poder atravesar la barra en la platina.
2. Se realizó la unión de los elementos con soldadura en la parte inferior de la platina y en la parte superior mediante soldadura MIG WEST ARCO MAG 0.035-0.9 mm.



Ilustración 44 Verificación medida cabeza barra #6 geometría cuadrada. Fuente propia

Las cabezas circulares fueron suministradas por Ramalza S.A.S, las cuales son previamente roscadas, y así mismo las varillas deben ser roscadas para poder realizar el acople de estas. **Nota: el espesor de la platina estipulada en la tabla 11 es inferior al utilizado en las cabezas circulares, estas tienen un mayor espesor para garantizar la unión en la rosca.**



Ilustración 45 Verificación medida cabeza barra #6 geometría circular. Fuente propia



Ilustración 46 Maquinaria de roscado. Ramalza s.a.s

Las barras también fueron roscadas en la parte superior para poder instalar el gato hidráulico de émbolo hueco y posteriormente poder instalar una platina en la parte superior para ejercer la presión.



Ilustración 47 Montaje: barras roscadas en parte superior. Fuente propia

Capítulo IV

RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Ensayo de tensión:

Se realizaron ensayos de tensión directa a las barras con cabeza, para estudiar el comportamiento de la unión entre la barra corrugada y la cabeza.



Ilustración 48 Ensayo de tensión directa barra #6. Fuente propia

Se observa en la ilustración 48, el montaje en el cual la cabeza se encuentra apoyada sobre una superficie la cual fue utilizada para simular el apoyo de la misma sobre el concreto. Los resultados obtenidos fueron mencionados anteriormente en la tabla 7 donde se obtuvieron los valores siguientes:

# varilla	Carga Fluencia (kgf)	Carga Fluencia (kN)	Esfuerzo fluencia (Mpa)	Carga ruptura (kgf)	Carga Fluencia (kN)	Esfuerzo falla (Mpa)
#6	13277	130	449	18070	177	610
#7	19785	194	423	25445	250	531

Tabla 12 Carga de fluencia barras corrugadas. Elaboración propia

Los valores de fluencia son de gran importancia para los ensayos de extracción en donde se plantea una relación entre la carga máxima de los elementos entre la carga de fluencia de la barra de acero.

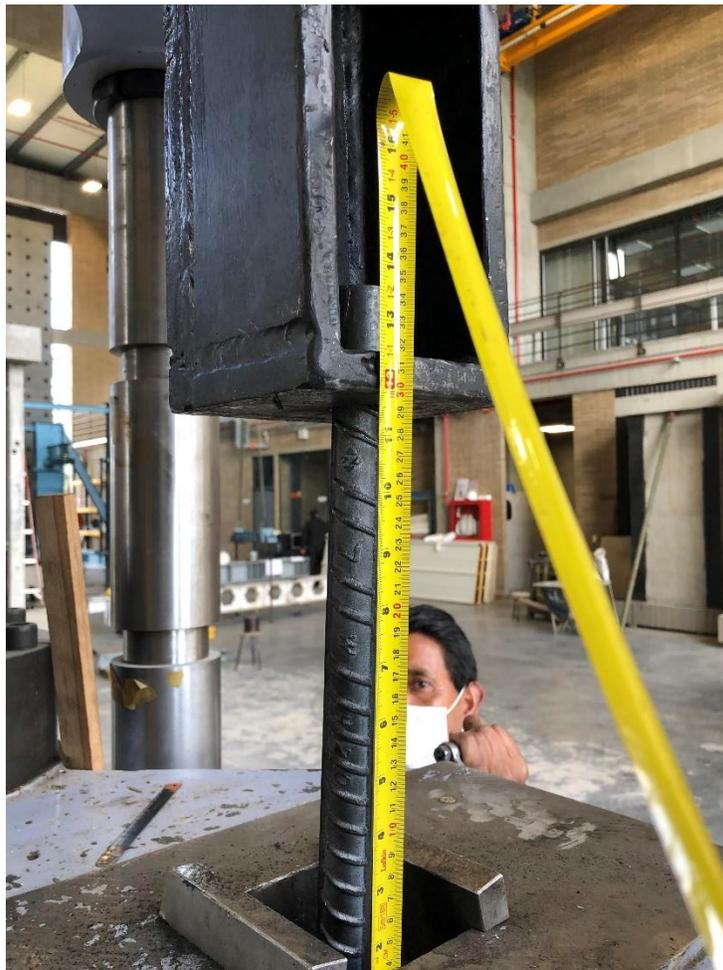


Ilustración 49 Ensayo de tensión directa barra #7. Fuente propia

Las fallas presentadas en el ensayo de tensión directa fueron las deseadas, la falla fue presentada en la barra, lo cual indica que la conexión entre la barra y la cabeza cumple con los requisitos de resistencia.



Ilustración 50 Falla a tensión en barra mediante ensayo de tensión directa. Fuente propia



Ilustración 51 Falla a tensión en barra mediante ensayo de tensión directa. Fuente propia

Se realizó una demarcación sobre las barras cada 5 centímetros y así poder realizar una medición de la elongación presentada para realizar una comparación con la deformación obtenida en el ensayo de extracción.



Ilustración 52 Demarcación sobre barras cada 5cm. Fuente propia

El artículo 12.3.4 de la norma NTC 2289 determina que, si la propiedad de alargamiento de alguna de las probetas es menor que la especificada y cualquier parte de la fractura está fuera de la mitad de la parte media de la longitud entre marcas indicada por las líneas trazadas en la probeta antes del ensayo, el ensayo debe considerarse como no válido.

Numero de designación de barras	Elongación mínima %
2-3-4-5-6	14
7-8-9-10-11	12

Tabla 13 Elongación mínima %. NTC 2289

La toma de las medidas se planteó al tomar tres (3) rangos de medición, 10 cm, 15 cm, 40 cm. Se presenta los cálculos para barra #7.

Longitud inicial (mm)	Longitud final (mm)	Elongación (mm)	%
10	12.5	2.5	25
15	18.3	3.3	22
40	49.2	9.2	23
Promedio			23

Tabla 14 Elongación barra #7. Elaboración propia



Ilustración 53 Medición variación espesor en falla a tensión en barra. Fuente propia

Se presentó una falla cercana a la conexión entre la barra y la cabeza para una barra #7, pero se determinó que la falla sucedió en la barra y no en la conexión.



Ilustración 54 Falla a tensión cercana a la conexión. Fuente propia



Ilustración 55 Falla a tensión cercana a la conexión. Fuente propia

4.2. Ensayo de extracción:

Se realizaron 32 ensayos de extracción con diferentes profundidades y geometrías de la cabeza.



Tabla 15 Ensayo de extracción. Barra # 6 profundidad 18 cm. Fuente propia

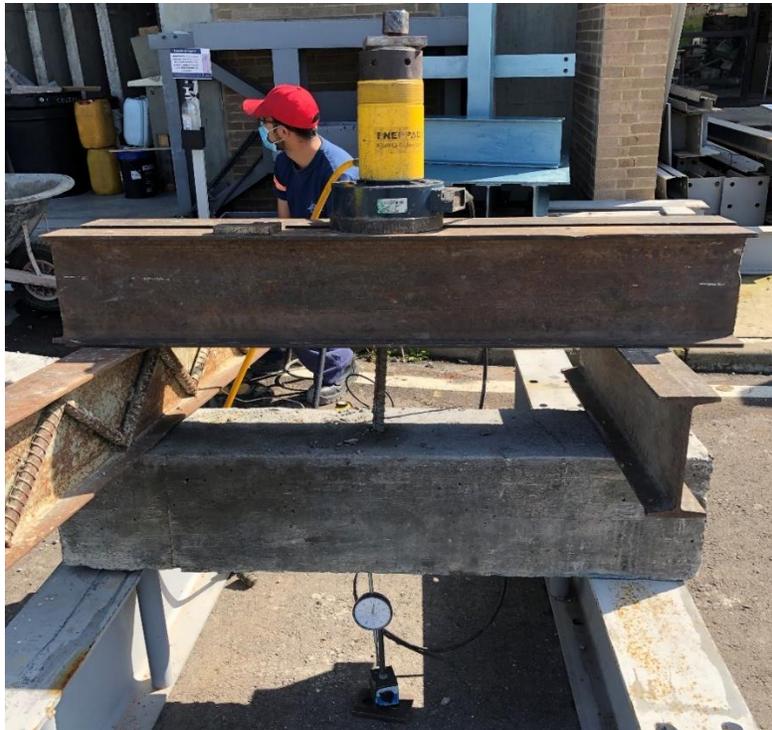


Ilustración 56 Ensayo de extracción con deformímetro Barra # 6 profundidad 15 cm. Fuente propia

4.2.1. Fallas presentadas:

1 falla: Arrancamiento del concreto: El fenómeno presentado en el 75% (24 ensayos) de los especímenes fue de arrancamiento del concreto en el cual se presenta el cono de falla. Este cono se encuentra ilustrado en la figura 57.



Ilustración 57 Cono de falla Muestra #5. Barra # 6 profundidad 13 cm. Fuente propia



Ilustración 58 Cono de falla en barras. Fuente propia

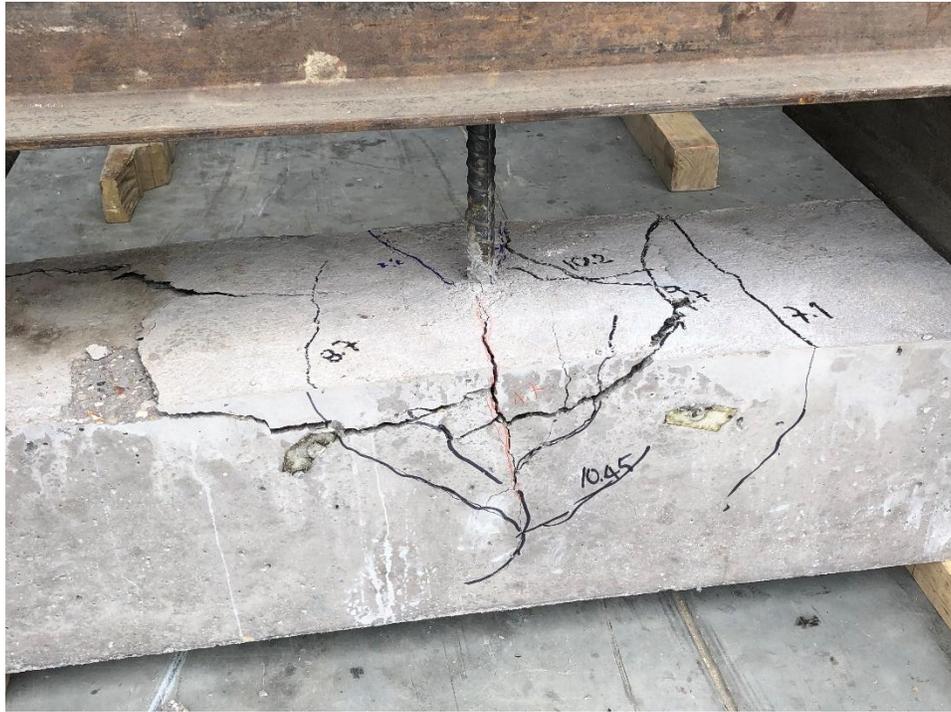


Ilustración 59 Cono de falla Muestra #5. Barra # 6 profundidad 15 cm. Fuente propia

Como se observa en la ilustración 59, los especímenes fueron marcados con las cargas presentadas a medida que aparecían las fisuras.



Ilustración 60 Cono de falla Muestra #5. Barra # 7 profundidad 15 cm. Fuente propia

Adicionalmente se logró evidenciar una falla en donde la fisura más lejana se presenta considerablemente lejana al cono, presentando una falla debajo de los apoyos del montaje.



Ilustración 61 Cono de falla Muestra #5. Barra # 6 profundidad 18 cm. Fuente propia

2 falla: Falla inferior en recubrimiento: Se presenta la falla en la zona inferior del recubrimiento para los especímenes cuyas profundidades de anclaje cumple con la normativa vigente. Se produce una falla de compresión en la parte inferior explotando el concreto de recubrimiento.



Ilustración 62 Falla inferior recubrimiento. Barra # 6 profundidad 18 cm. Fuente propia



Ilustración 63 Falla inferior recubrimiento. Barra # 7 profundidad 22.4 cm. Fuente propia

Se observa en la ilustración 63 un desprendimiento total del recubrimiento inferior en el cual permite ver la cabeza de la barra.



Ilustración 64 Falla inferior recubrimiento. Barra # 7 profundidad 22.4 cm. Fuente propia

3 falla: Falla por flexión en el espécimen: Así mismo para los especímenes cuya profundidad de embebido cumplen con la normativa vigente se presentó una falla por flexión, para la cual se obtuvieron mediciones de la deformación obtenida. Esta falla por flexión no permite a los especímenes de barras #7 llegar a fluencia. Por consiguiente, se realizaron 3 ensayos adicionales con un refuerzo longitudinal superior el cual se ilustra más adelante.



Ilustración 65 Espécimen barra #6 con deformímetro. Fuente propia



Ilustración 66 Falla a flexión en espécimen barra #6. Fuente propia

4.2.2. Cono de falla:

El cono de falla fue medido para cada uno de los especímenes obtenidos, el ángulo de inclinación junto con la longitud total de este se encuentra en la tabla 16.

ENSAYO	VARILLA #	PROFUNDIDAD (mm)	GEOMETRIA	ANGULO	DISTANCIA FALLA (cm)
1	7	18	CIRCULAR	45	23
2	6	13	CUADRADA	32	22
3	6	10	CUADRADA	33	18
4	7	18	CUADRADA	48	15
5	6	13	CIRCULAR	30	12
6	7	22.4	CUADRADA	46	27
7	6	18	CUADRADA	38	35
8	6	18	CUADRADA	32	37
9	7	15	CUADRADA	38	21
10	6	18	CIRCULAR	40	19
11	7	22.4	CUADRADA	46	21
12	6	10	CIRCULAR	31	34
13	6	13	CIRCULAR	40	38
14	7	15	CIRCULAR	28	28
15	7	18	CUADRADA	23	40
16	6	10	CUADRADA	21	54
17	7	15	CIRCULAR	45	27
18	6	10	CIRCULAR	38	31
19	7	18	CIRCULAR	37	23
20	7	15	CUADRADA	41	31
21	6	10	CIRCULAR	22	34
22	7	18	CIRCULAR	45	36
23	6	13	CIRCULAR	37	34
24	6	18	CIRCULAR	38	37
25	7	22.4	CIRCULAR	41	85
26	7	22.4	CIRCULAR	41	85
27	6	13	CUADRADA	38	37
28	7	15	CUADRADA	31	32
29	7	18	CUADRADA	45	47
30	7	15	CUADRADA	41	38
31	6	10	CUADRADA	28	36
32	6	13	CUADRADA	32	43

Tabla 16 Cono de falla. Elaboración propia



Ilustración 67 Medición cono de falla. Fuente propia

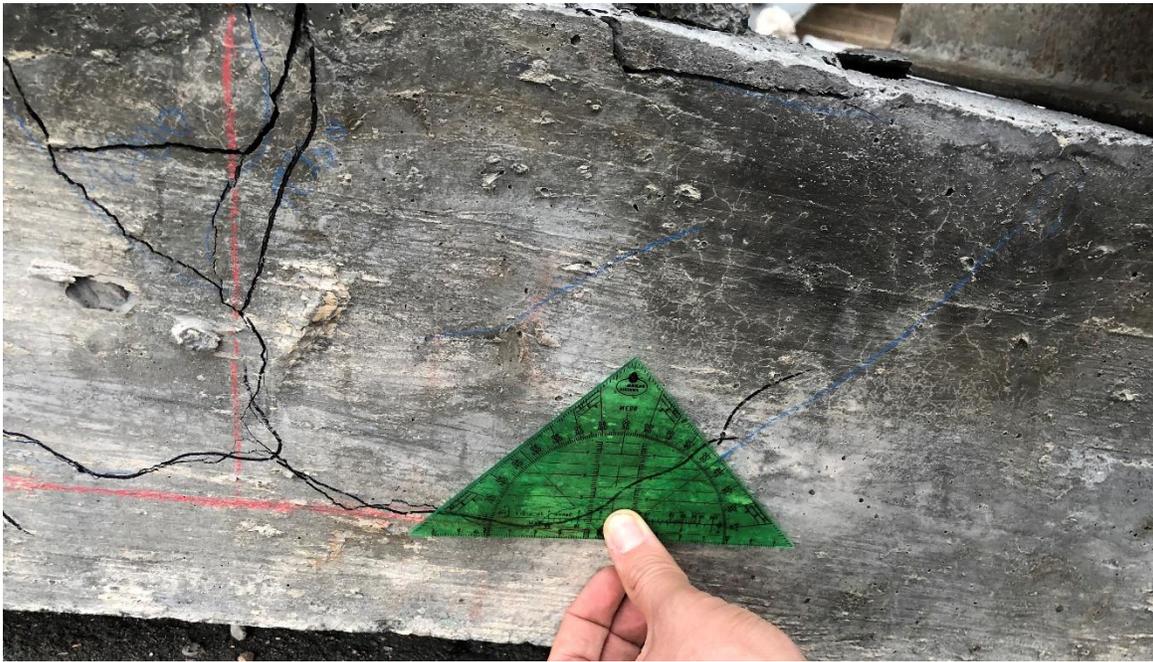


Ilustración 68 Medición ángulo de falla. Fuente propia

En la medición del ángulo de falla se trazó inicialmente una línea paralela al espécimen a la profundidad del anclaje y posteriormente una perpendicular a esta para la medición del ángulo de la fisura más lejana como se indica en la ilustración 68.

4.3. Ensayo de carga cíclica (conexión viga columna):

Se ensayaron cuatro (4) conexiones viga columna con la finalidad de comparar el comportamiento ante una carga cíclica de barras con gancho y barras con cabeza. Se tomaron vigas de 25cm x 25cm las cuales únicamente pueden tener refuerzo con barras #6, ya que la longitud de anclaje para barras con gancho no se logra desarrollar para barras de mayor diámetro.

La longitud de desarrollo para barras con gancho estipulado en la ACI es obtenida mediante:

$$\ell_{dt} = \left(\frac{f_y \Psi_e \Psi_p \Psi_o \Psi_c}{23\sqrt{f'_c}} \right) d_b^{1.5} \text{ (Sistema internacional)}$$

La longitud de desarrollo para barras con cabeza estipulado en la ACI es obtenida mediante:

$$\ell_{dt} = \left(\frac{f_y \Psi_e \Psi_p \Psi_o \Psi_c}{31\sqrt{f'_c}} \right) d_b^{1.5} \text{ (Sistema internacional)}$$

Barra #6

$$\text{Gancho} = \ell_{dt} = \left(\frac{420 \text{ Mpa} * 1 * 1 * 1 * 0.933}{23\sqrt{35 \text{ Mpa}}} \right) (19.1 \text{ mm})^{1.5} = 240 \text{ mm}$$

$$\text{Cabeza} = \ell_{dt} = \left(\frac{420 \text{ Mpa} * 1 * 1 * 1 * 0.933}{31\sqrt{35 \text{ Mpa}}} \right) (19.1 \text{ mm})^{1.5} = 178 \text{ mm}$$

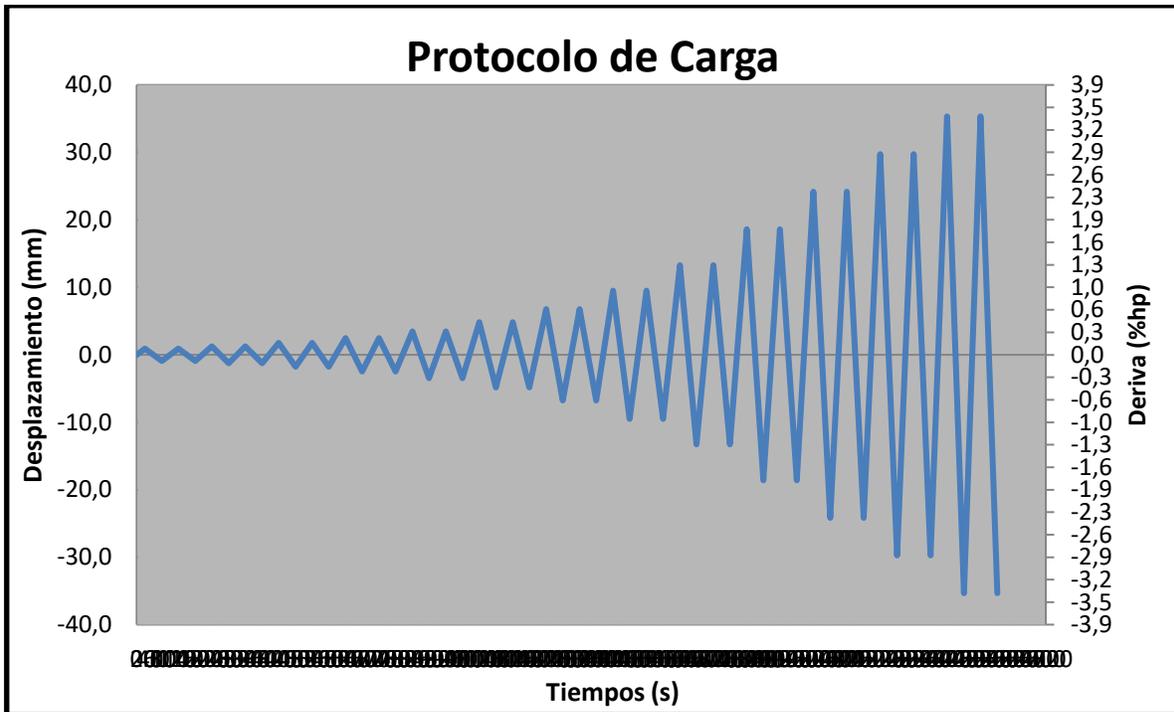
Barra #7

$$\text{Gancho} = \ell_{dt} = \left(\frac{420 \text{ Mpa} * 1 * 1 * 1 * 0.933}{23\sqrt{35 \text{ Mpa}}} \right) (22.2 \text{ mm})^{1.5} = 301 \text{ mm}$$

$$\text{Cabeza} = \ell_{dt} = \left(\frac{420 \text{ Mpa} * 1 * 1 * 1 * 0.933}{31\sqrt{35 \text{ Mpa}}} \right) (22.2 \text{ mm})^{1.5} = 224 \text{ mm}$$

Los especímenes se sometieron a un desplazamiento cíclico, el cual se aplica en el extremo del voladizo partiendo de un protocolo de carga realizado. Este protocolo se realiza partiendo de las recomendaciones y exigencias del FEMA 461.

En la gráfica 1 se presenta el protocolo de carga para desplazamiento en función del tiempo de acuerdo con la tasa de aplicación de 0.2 Hz.



Grafica 1 Protocolo de carga. Elaboración propia

Altura de piso =	1000	mm
Frecuencia (f)=	0.01	Hz
Periodo (T) =	100.00	s
DS1 =	2.00	mm
Δm =	18.00	mm

Tabla 17 Datos entrada protocolo de carga. Elaboración propia

Se instalaron transductores LVDTs los cuales realizan mediciones de los desplazamientos en la conexión, se ubicaron en cuatro (4) partes:

1. LVDTs MG 5040 ubicado a 80 centímetros de la columna (el espécimen se encuentra rotado, siendo el elemento horizontal la columna y el vertical la viga) para tomar los desplazamientos horizontales que se producen por la acción de la carga aplicada por el actuador.
2. LVDTs MG 2349 ubicado a 5 centímetros medidos desde la columna para tomar desplazamientos horizontales en la base, y así poder tomar desplazamientos relativos con respecto a los medidos por el primer transductor (deriva).
3. LVDTs MG 2350 ubicado verticalmente sobre una platina ubicada a 5 centímetros de la viga, con el fin de tomar el giro producido.
4. LVDTs MG 5039 ubicado en el extremo de la columna, y así poder medir si existía desplazamiento de la conexión sobre el suelo.

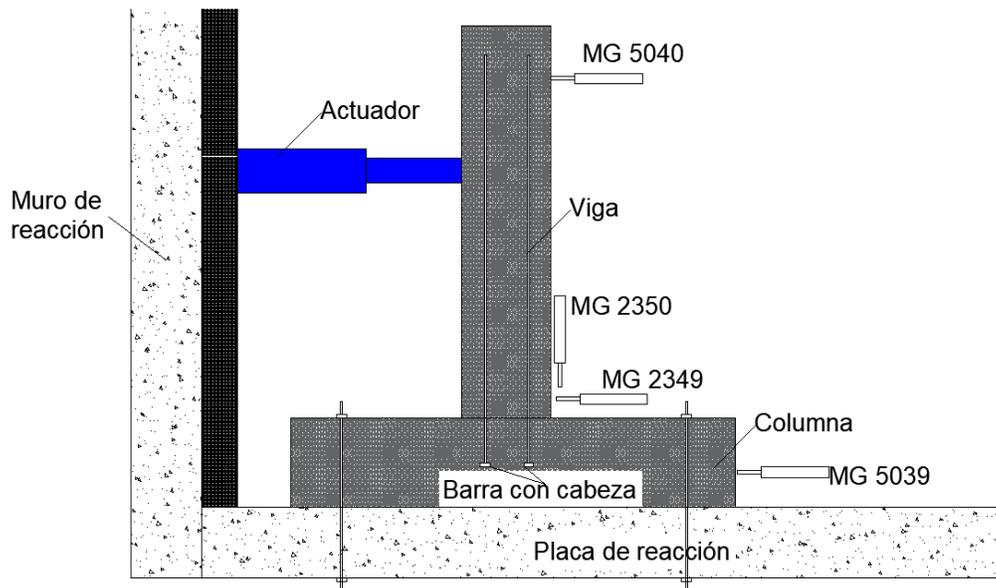


Ilustración 69 Transductores LVDTs conexión viga columna. Elaboración propia



Ilustración 70 Transductores LVDTs conexión viga columna. Fuente propia

4.3.1. Momento resistente conexión viga-columna:

Las vigas se encuentran reforzadas con barras longitudinales #6 obteniendo así:

$$0.85 * f'_c * a * b = f_y * A_s$$

$$0.85 * 47.6 \text{ Mpa} * a * 250 \text{ mm} = 449 \text{ Mpa} * 284 \text{ mm}^2 * 2 \rightarrow a = 25.21 \text{ mm}$$

$$e = d - \frac{a}{2} = 210 \text{ mm} - \frac{25.21 \text{ mm}}{2} = 197.4 \text{ mm}$$

$$\text{Momento resistente} = T * e = 449 \text{ Mpa} * 284 \text{ mm}^2 * 2 * 197.4 \text{ mm}$$

$$M = 50.34 \times 10^6 \text{ N} * \text{mm} \rightarrow M = 50340 \text{ N} * \text{m}$$

$$\text{Carga aplicada a 1 metro} = \frac{M}{L} = \frac{50340 \text{ N} * \text{m}}{1 \text{ m}} = 50340 \text{ Ton} = 50340 \text{ N} = 50.34 \text{ Kn}$$

Deflexion: (se asume un 40% en la inercia debido a la fisuración presentada).

$$\rho = \frac{F * L^3}{3 * E * I} = \frac{50340 \text{ N} * 1000^3}{3 * 4700 * \sqrt{47.6 \text{ Mpa}} * \frac{250 * 250^3}{12} * 40\%} = 3.97 \text{ mm}$$

4.3.2. Diagrama de momento-curvatura.:

ANALISIS DE MOMENTO-CURVATURA		
Dimensiones de la viga		
Altura	250	mm
Base	250	mm
Propiedades del concreto		
f' _c	47.6	Mpa
E _c	32426.59	Mpa
f _t	4.278	Mpa
β	0.750	
Propiedades del Acero		
f _y	449	Mpa
E _s	200000	Mpa
CD de barras	2	
#Barras	2	
Área barra	284	mm ²
A _s	568	mm ²
d	190	mm

Tabla 18 Datos de entrada diagrama Momento-Curvatura. Elaboración propia

1. Instante antes de fisuración:

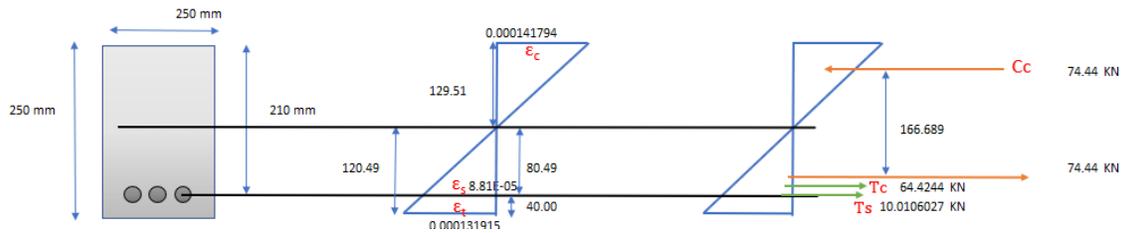


Diagrama 1 Instante antes de fisuración. Elaboración propia

M	12.41	kN*m
φ	1.09E-03	Rad/m

Tabla 19 Momento y curvatura instante antes de fisuración. Elaboración propia

2. Instante después de la fisuración:

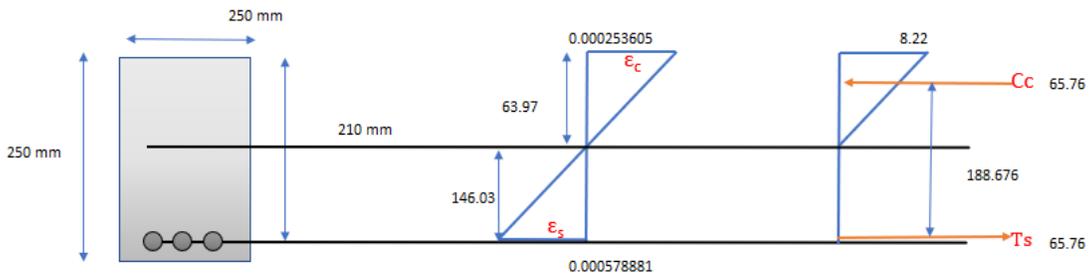


Diagrama 2 Instante después de fisuración. Elaboración propia

M	12.42	kN*m
φ	3.96 E-03	Rad/m

Tabla 20 Momento y curvatura instante después de fisuración. Elaboración propia

3. Instante a 45% de f'_c :

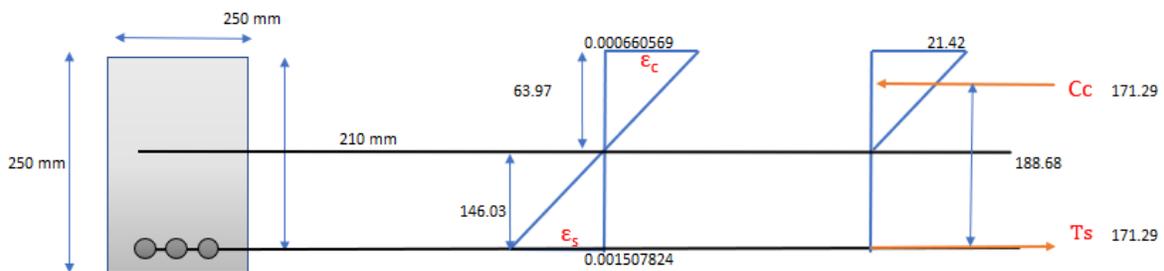


Diagrama 3 Instante a 45% de f'_c . Elaboración propia

M	32.32	kN*m
φ	1.03 E-02	Rad/m

Tabla 21 Momento y curvatura instante a 45% de f'_c . Elaboración propia

4. Instante de fluencia en el acero:

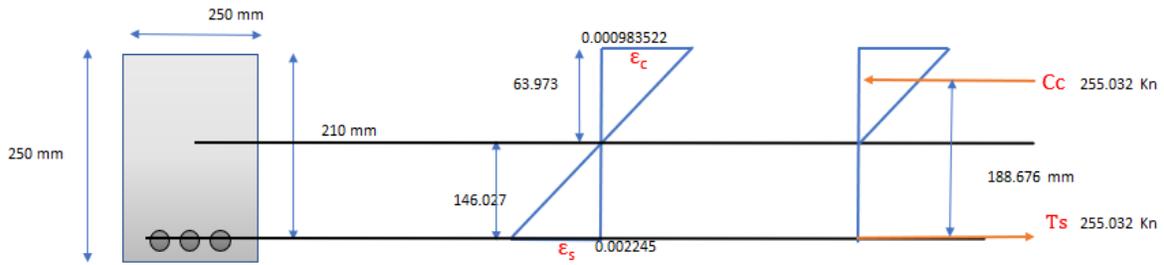


Diagrama 4 Instante de fluencia en el acero. Elaboración propia

M	48.12	kN*m
φ	1.54 E-02	Rad/m

Tabla 22 Momento y curvatura instante de fluencia en el acero. Elaboración propia

5. Concreto confinado, rectángulo de Whitney:

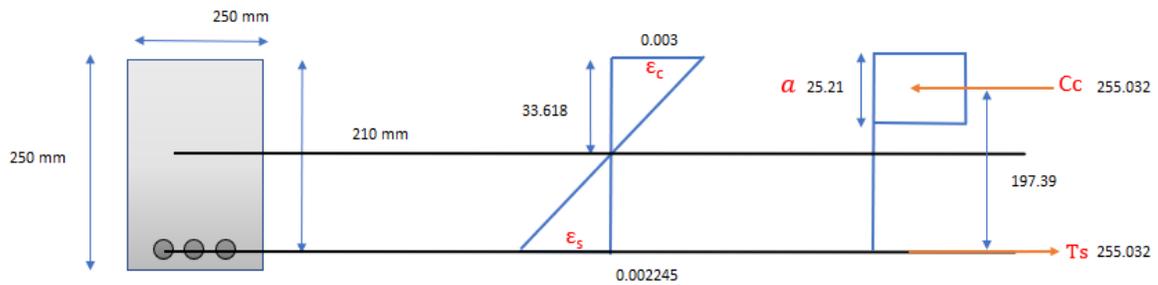


Diagrama 5 Instante de concreto confinado, rectángulo de Whitney. Elaboración propia

M	50.34	kN*m
φ	8.92 E-02	Rad/m

Tabla 23 Momento y curvatura instante de concreto confinado, rectángulo de Whitney. Elaboración propia

6. Momento máximo con Hognestad y endurecimiento del acero

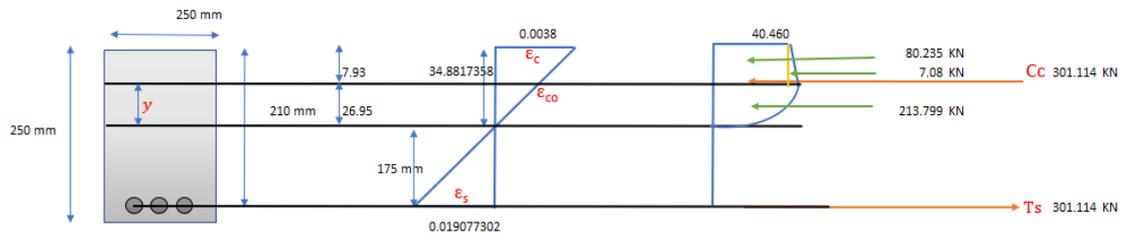
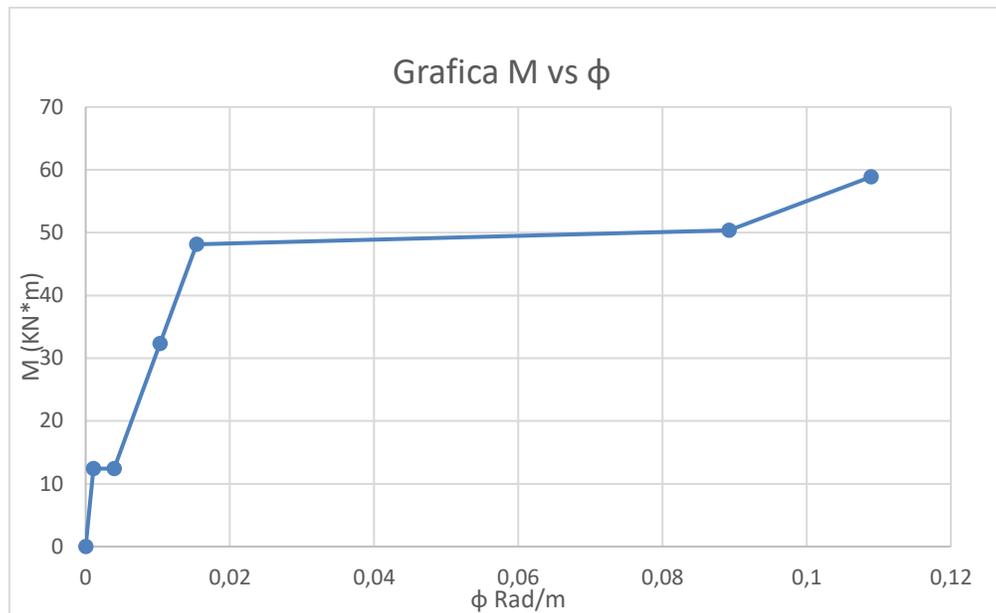


Diagrama 6 Instante de momento máximo con Hognestad Elaboración propia

M	58.88	kN*m
φ	1.09 E-01	Rad/m

Tabla 24 Momento y curvatura instante de momento máximo con Hognestad. Elaboración propia



Grafica 2 Momento vs φ Conexión Viga-Columna. Elaboración propia

Se estableció una cuadrícula con una separación de 4 cm, con el fin de poder observar las fisuras y su longitud en el espécimen.

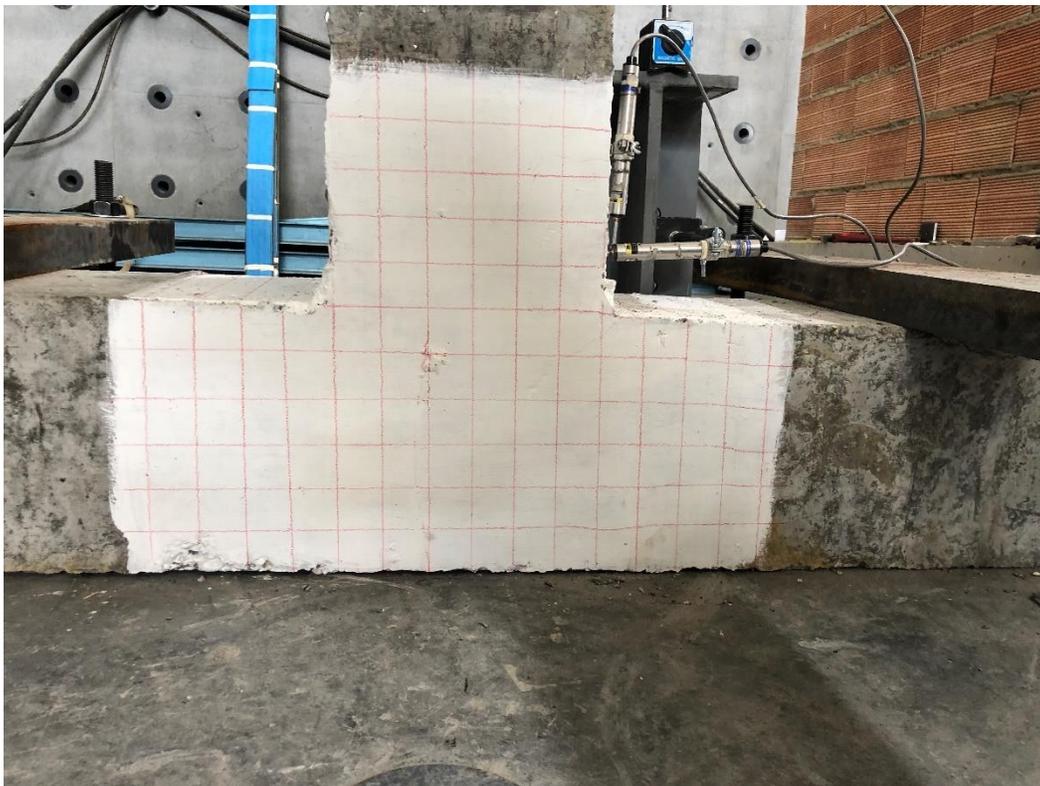


Ilustración 71 Cuadrícula conexión viga columna. Fuente propia

Capítulo V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se debe aclarar que al tener un aumento en la resistencia del concreto suministrado por Cemex con una resistencia promedio de $f'_c = 47.6 \text{ MPa}$. La longitud de anclaje teórica según la ACI tiene una variación respecto a la longitud utilizada en los ensayos en donde se tenía prevista una resistencia de $f'_c = 35 \text{ MPa}$.

Barra #	Diametro varilla (mm)	Ldt $f'_c = 35 \text{ MPa}$ (mm)	Ldt $f'_c = 47.6 \text{ MPa}$ (mm)
6	19.1	178	169
7	22.2	224	211

Tabla 25 Reducción longitud de anclaje. Elaboración propia

Se debe tener presente la aclaración de estas longitudes ya que al tener una mayor resistencia no es necesario llevar la longitud de anclaje a las profundidades utilizadas en el desarrollo de este trabajo.

5.1. Ensayo de extracción barra #6:

Los ensayos de extracción tuvieron mediciones de la primera fisura presentada en el concreto y de la carga máxima que se presentó en la celda de carga. Los resultados para la barra #6 se presentan en la siguiente tabla:

ENSAYO	PROFUNDIDAD (mm)	GEOMETRIA	CARGA 1 FISURA (kN)	CARGA DE FALLA CELDA (kN)
3	10	CUADRADA	68,64	101,19
12	10	CIRCULAR	51,97	65,18
16	10	CUADRADA	67,66	92,59
18	10	CIRCULAR	63,74	84,34
21	10	CIRCULAR	64,72	73,85
31	10	CUADRADA	62,76	76,34
2	13	CUADRADA	79,08	94,41
5	13	CIRCULAR	65,70	96,77
13	13	CIRCULAR	84,33	120,36
23	13	CIRCULAR	91,20	105,07
27	13	CUADRADA	69,62	112,09
32	13	CUADRADA	75,51	99,90
7	18	CUADRADA	70,60	134,06
8	18	CUADRADA	85,31	130,43
10	18	CIRCULAR	68,64	144,54
24	18	CIRCULAR	88,25	139,91

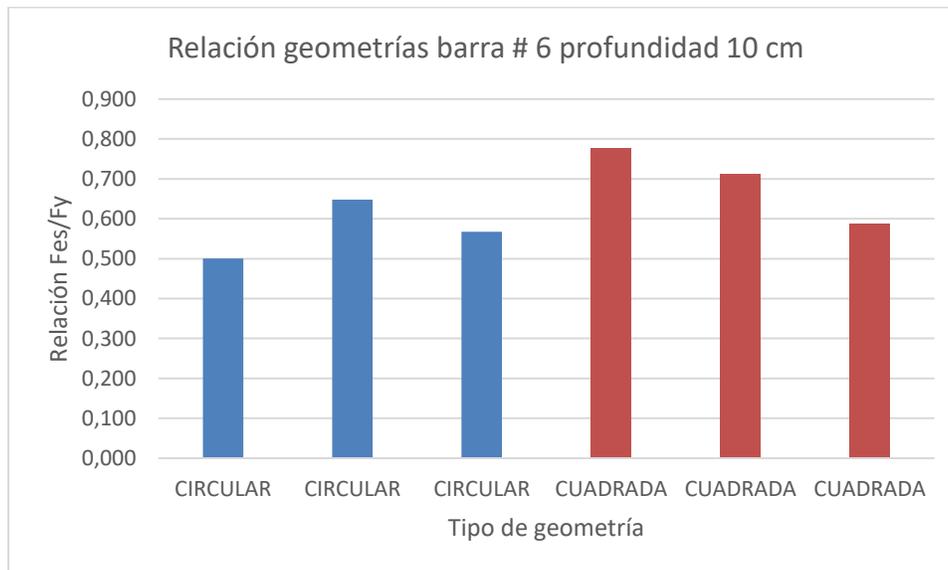
Tabla 26 Carga de falla barra #6. Elaboración propia

Los valores se compararon con la carga de fluencia para la barra en estudio (#6) obtenida en el ensayo de tensión con un valor promedio de 130.19 kN

Profundidad 10 cm barra #6:

ENSAYO	VARILLA #	PROFUNDIDAD (mm)	Geometría	Carga (kN)	Relación Fes/Fy
12	6	10	CIRCULAR	65,18	0,501
18	6	10	CIRCULAR	84,34	0,648
21	6	10	CIRCULAR	73,85	0,567
3	6	10	CUADRADA	101,19	0,777
16	6	10	CUADRADA	92,59	0,711
31	6	10	CUADRADA	76,34	0,586

Tabla 27 Relación Fes/Fy barra #6 profundidad 10 cm. Elaboración propia

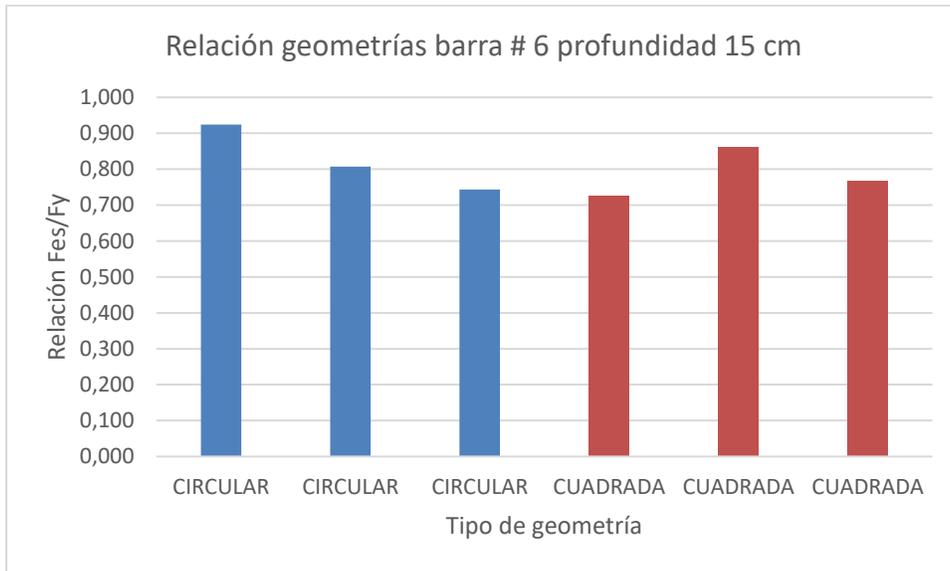


Grafica 3 Relación geometrías barra #6 profundidad 10 cm. Elaboración propia

Profundidad 15 cm barra #6:

ENSAYO	VARILLA #	PROFUNDIDAD (mm)	Geometría	Carga (kN)	Relación Fes/Fy
13	6	15	CIRCULAR	120,36	0,924
23	6	15	CIRCULAR	105,07	0,807
5	6	15	CIRCULAR	96,77	0,743
2	6	15	CUADRADA	94,41	0,725
27	6	15	CUADRADA	112,09	0,861
32	6	15	CUADRADA	99,90	0,767

Tabla 28 Relación Fes/Fy barra #6 profundidad 15 cm. Elaboración propia

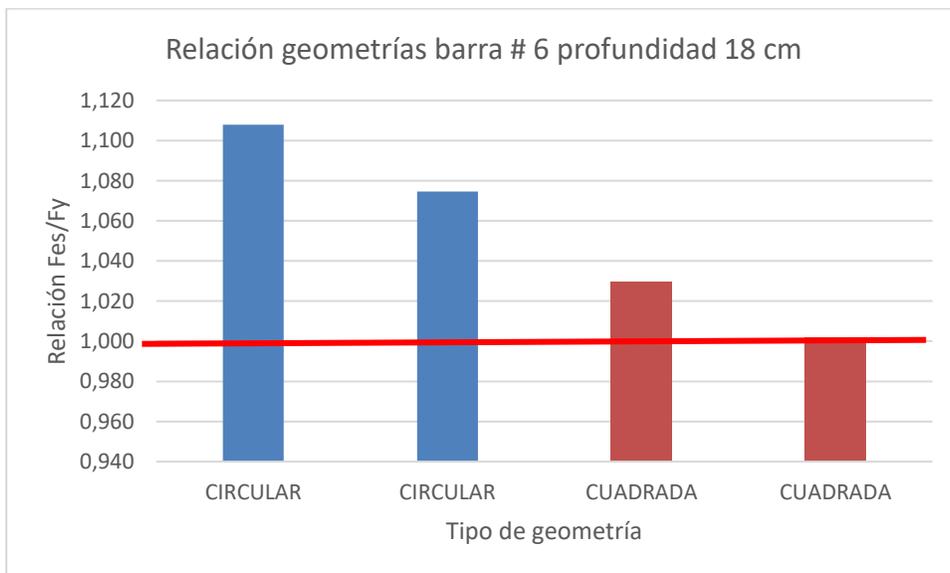


Grafica 4 Relación geometrías barra #6 profundidad 15 cm. Elaboración propia

Profundidad 18 cm barra #6:

ENSAYO	VARILLA #	PROFUNDIDAD (mm)	Geometría	Carga (kN)	Relación Fes/Fy
10	6	18	CIRCULAR	144,25	1,108
24	6	18	CIRCULAR	139,91	1,075
7	6	18	CUADRADA	134,06	1,030
8	6	18	CUADRADA	130,43	1,002

Tabla 29 Relación Fes/Fy barra #6 profundidad 18 cm. Elaboración propia



Grafica 5 Relación geometrías barra #6 profundidad 18 cm. Elaboración propia

Se observa en la gráfica 3 para la barra #6 a una profundidad de 10 cm que la geometría cuadrada tiene una mayor resistencia a la extracción respecto a la circular. Lo cual a medida que se aumenta la profundidad de anclaje se obtiene un cambio en el cual la resistencia para los anclajes circulares es superior a los cuadrados.

Al tener el anclaje en una profundidad de 15 cm se logró observar que la resistencia para las geometrías tiende a ser muy similar, pero la geometría circular tiene un mejor comportamiento. Adicionalmente se evidencio que las barras están en un 70% del esfuerzo de fluencia, lo cual aún indica que esta profundidad de anclaje no es la ideal para el uso en la construcción.

De acuerdo con el ACI 318S-19, la profundidad de anclaje para barras con cabeza #6 es de 18 cm. En la gráfica 5 se evidencia que la carga resistente para esta profundidad es superior al esfuerzo de fluencia. La relación entre la fuerza resistente vs la fuerza de fluencia es superior a 1 en todos los ensayos cuya profundidad fue de 18 cm. Lo cual permite que las ecuaciones de la ACI predican correctamente la carga de falla. **Nota: aunque se logró llegar al esfuerzo de fluencia en las barras utilizadas, se presentó falla por flexión en el espécimen, por lo cual no se pudo presentar ruptura en la barra. Se presentan el resultado en un ensayo adicional más adelante.**

5.1.1. Momento resistente barra #6:

La carga aplicada fue una carga puntual en el centro de la luz. Para las columnas cuya profundidad de anclaje es la estipulada en la ACI, se realizaron de 1.20m para tener una longitud libre de 1.00 m entre apoyos.

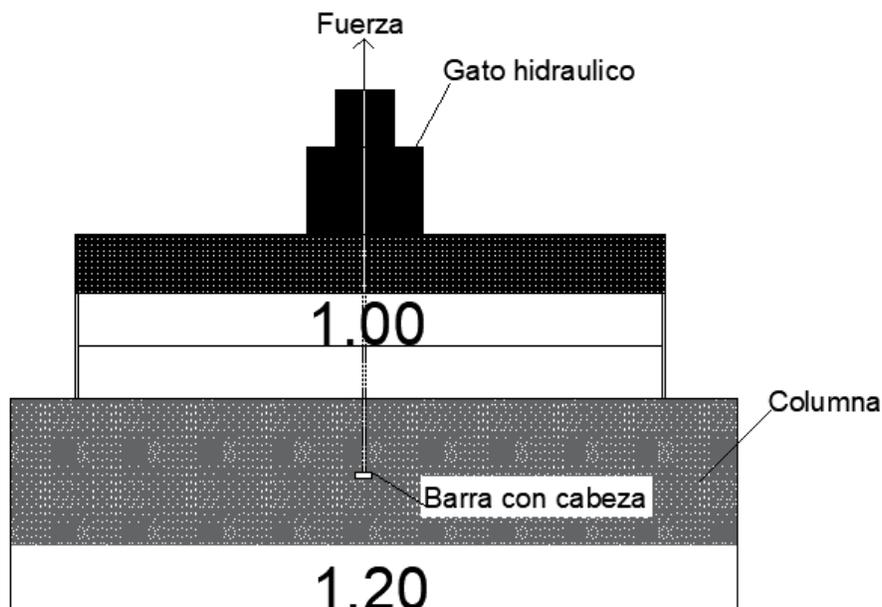


Ilustración 72 Montaje espécimen profundidad según ACI. Fuente propia

El refuerzo utilizado se asumió como si fuera una columna, por consiguiente, la cuantía utilizada fue:

$$\rho_{min} = 0.01 = \frac{A_s}{b * d}$$

$$A_s = 0.01 * 250 * 210 = 525 \text{ mm}^2$$

Se utilizaron 4 varillas #5 ubicadas 1 en cada esquina, para un refuerzo a flexión de 2 #5 con un área de:

$$A_s = 199 \text{ mm}^2 * 2 = 398 \text{ mm}^2$$

Para la carga de fluencia de una barra #6 de: 130.19 kN. El momento de una viga simplemente apoyada es igual:

$$M_n = \frac{PL}{4} = \frac{130.19 \text{ kN} * 1\text{m}}{4} = 32548 \text{ N} * \text{m} = 32.55 \text{ kN} * \text{m}$$

$$M_n = \rho * F_y * \left(1 - 0.59 * \frac{\rho * F_y}{F'_c}\right) * b * d^2$$

$$32.55 \text{ kN} * \text{m} = \rho * 449 * \left(1 - 0.59 * \frac{\rho * 449}{47.6}\right) * 0.25 * 0.21^2$$

$$A_s = \rho * b * d = 0.00773 * 210 * 250 = 406 \text{ mm}^2$$

$$398 \text{ mm}^2 < 406 \text{ mm}^2 \quad \text{NO OK}$$

Nota: la resistencia del concreto fue la obtenida experimentalmente de 47.6 MPa.

Debido a que no se consideró una falla por flexión en el pre dimensionamiento de los especímenes se evidenció una falla por flexión. Por consiguiente, se realizó un ensayo adicional para la barra #6 con un refuerzo de:

$$2\#5 + 2\#6 \rightarrow A_s = 966 \text{ mm}^2$$



Ilustración 73 Falla flexión barra #6 (a). Fuente propia



Ilustración 74 Falla flexión barra #6 (b). Fuente propia

Se presentó una falla por flexión en el espécimen, lo cual no permitió que se presentara una falla dúctil en la barra de acero con cabeza, ya que no se logró aumentar la carga en el gato hidráulico. Aunque se encontró que la barra entró en fluencia, la falla presentada fue por flexión.

5.2. Ensayo de extracción barra #7:

Los ensayos de extracción tuvieron mediciones de la primera fisura presentada en el concreto y de la carga máxima que se presentó en la celda de carga. Los resultados para la barra #7 se presentan en la siguiente tabla:

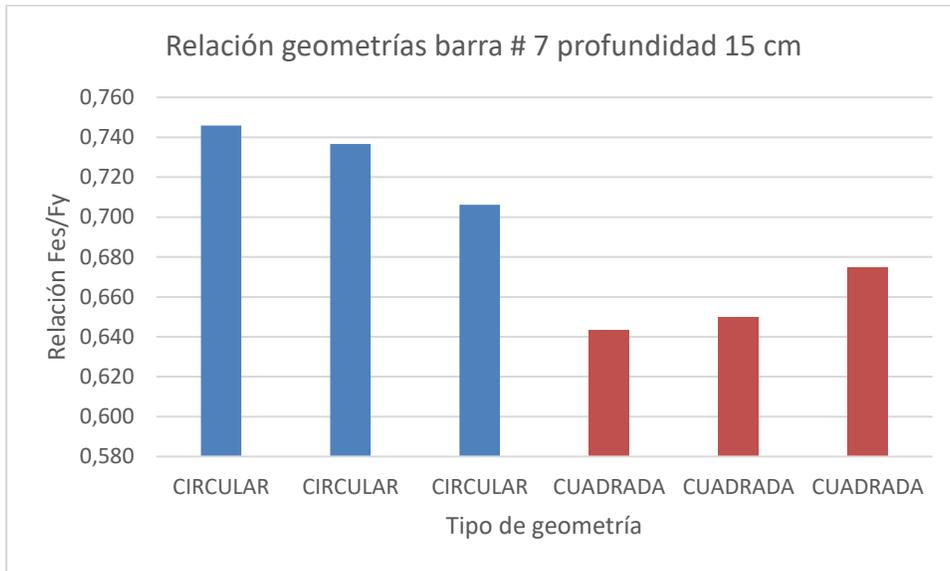
ENSAYO	PROFUNDIDAD (mm)	GEOMETRIA	CARGA 1 FISURA (kN)	CARGA DE FALLA CELDA (kN)
9	15	CUADRADA	87,27	124,87
14	15	CIRCULAR	95,12	144,70
17	15	CIRCULAR	91,20	142,90
20	15	CUADRADA	93,16	126,07
28	15	CUADRADA	80,41	130,89
30	15	CUADRADA	82,37	137,02
1	18	CIRCULAR	78,74	124,57
4	18	CUADRADA	87,27	121,36
15	18	CUADRADA	83,35	132,40
19	18	CIRCULAR	102,96	149,77
22	18	CIRCULAR	98,06	149,30
29	18	CUADRADA	67,66	147,25
6	22,4	CUADRADA	75,51	131,63
11	22,4	CUADRADA	76,49	140,32
25	22,4	CIRCULAR	68,64	148,25
26	22,4	CIRCULAR	74,53	150,28

Tabla 30 Carga de falla barra #7. Elaboración propia

Los valores se compararon con la carga de fluencia para la barra en estudio (#7) obtenida en el ensayo de tensión con un valor promedio de 194 kN.

ENSAYO	VARILLA #	PROFUNDIDAD (mm)	Geometría	Carga (kN)	Relación Fes/Fy
14	7	15	CIRCULAR	144,70	0,746
17	7	15	CIRCULAR	142,90	0,737
30	7	15	CIRCULAR	137,02	0,706
9	7	15	CUADRADA	124,87	0,644
20	7	15	CUADRADA	126,07	0,650
28	7	15	CUADRADA	130,89	0,675

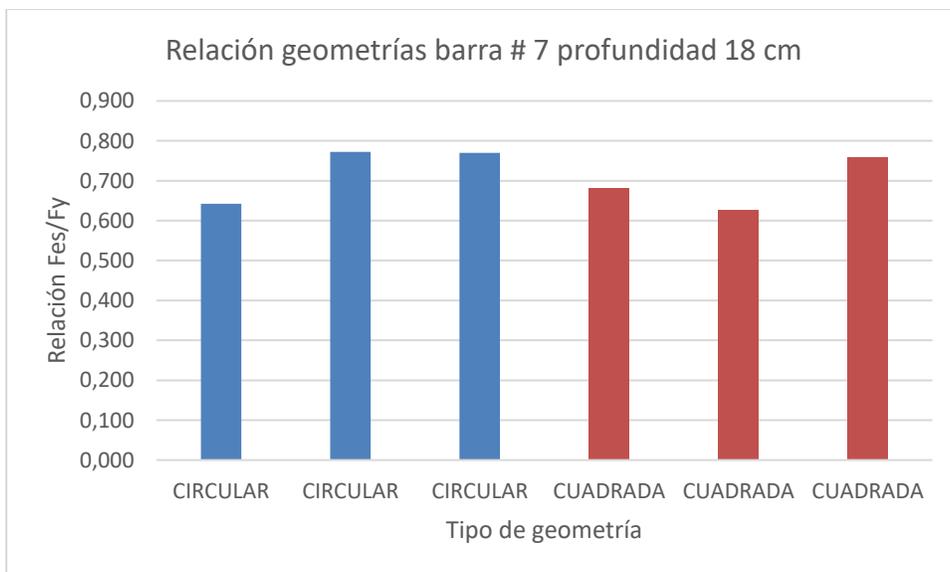
Tabla 31 Relación Fes/Fy barra #7 profundidad 15 cm. Elaboración propia



Grafica 6 Relación geometrías barra #7 profundidad 15 cm. Elaboración propia

ENSAYO	VARILLA #	PROFUNDIDAD (mm)	Geometría	Carga (kN)	Relación Fes/Fy
1	7	18	CIRCULAR	124,57	0,642
19	7	18	CIRCULAR	149,77	0,772
22	7	18	CIRCULAR	149,30	0,770
15	7	18	CUADRADA	132,40	0,682
4	7	18	CUADRADA	121,36	0,626
29	7	18	CUADRADA	147,25	0,759

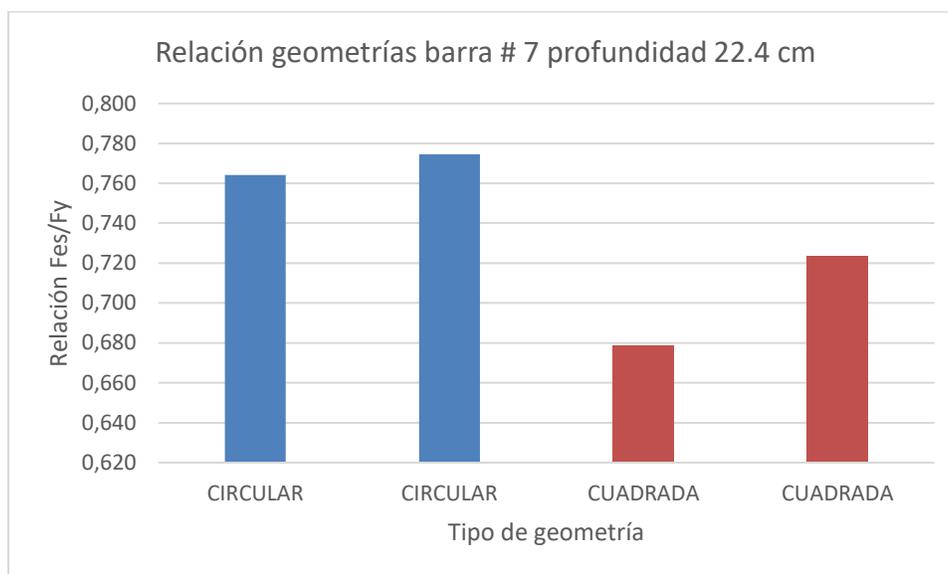
Tabla 32 Relación Fes/Fy barra #7 profundidad 18 cm. Elaboración propia



Grafica 7 Relación geometrías barra #7 profundidad 18 cm. Elaboración propia

ENSAYO	VARILLA #	PROFUNDIDAD (mm)	Geometría	Carga (kN)	Relación Fes/Fy
25	7	22,4	CIRCULAR	148,25	0,764
26	7	22,4	CIRCULAR	150,28	0,775
6	7	22,4	CUADRADA	131,63	0,678
11	7	22,4	CUADRADA	140,32	0,723

Tabla 33 Relación Fes/Fy barra #7 profundidad 22.4 cm. Elaboración propia



Gráfica 8 Relación geometrías barra #7 profundidad 22.4 cm. Elaboración propia

Se observa en la gráfica 6 para la barra #7 a una profundidad de 15 cm la geometría que mayor fuerza resiste es la circular. Comparando con los resultados obtenidos para la barra #6, se puede determinar que los esfuerzos admitidos por los especímenes se comportan mejor con geometría circular cuando la profundidad del anclaje es superior a los 15 centímetros aproximadamente.

La ACI indica que la profundidad de anclaje para barras con cabeza #7 es de 22.4 cm. En la gráfica 8 se evidencia que la carga resistente para esta profundidad no alcanza a llegar a fluencia, esto debido a que se presenta una falla por flexión lo cual no permite aumento de la carga. **Nota: Se presentó falla por flexión en el espécimen, por lo cual no se pudo presentar ruptura en la barra ni tampoco llevar la barra a fluencia. Se presentan el resultado en dos ensayos adicionales más adelante.**

5.2.1. Momento resistente barra #7:

La carga aplicada fue una carga puntual en el centro de la luz. Para las columnas cuya profundidad de anclaje es la estipulada en la ACI, se realizaron de 1.20m para tener una longitud libre de 1.00 m entre apoyos.

El refuerzo utilizado se asumió como si fuera una columna, por consiguiente, la cuantía utilizada fue:

$$\rho = 0.01 = \frac{A_s}{b * d}$$

$$A_s = 0.01 * 250 * 210 = 525 \text{ mm}^2$$

Se utilizaron 4 varillas #5 ubicadas 1 en cada esquina, para un refuerzo a flexión de 2 #5 con un área de:

$$A_s = 199 \text{ mm}^2 * 2 = 398 \text{ mm}^2$$

Para la carga de fluencia de una barra #7 de: 194 kN. El momento de una viga simplemente apoyada es igual:

$$M_n = \frac{PL}{4} = \frac{194 \text{ kN} * 1\text{m}}{4} = 48500 \text{ N} * \text{m} = 48.5 \text{ kN} * \text{m}$$

$$M_n = \rho * F_y * \left(1 - 0.59 * \frac{\rho * F_y}{F'_c}\right) * b * d^2$$

$$48.5 \text{ kN} * \text{m} = \rho * 449 * \left(1 - 0.59 * \frac{\rho * 449}{47.6}\right) * 0.25 * 0.21^2$$

$$A_s = \rho * b * d = 0.01188 * 210 * 250 = 623.6 \text{ mm}^2$$

$$398 \text{ mm}^2 < 623.6 \text{ mm}^2 \quad \text{NO OK}$$

Nota: la resistencia del concreto fue la obtenida experimentalmente de 47.6 MPa.

Debido a que no se consideró una falla por flexión en el pre dimensionamiento de los especímenes se evidenció una falla por flexión. Por consiguiente, se realizó un ensayo adicional para la barra #7 con un refuerzo de:

$$2\#5 + 2\#6 \rightarrow A_s = 966 \text{ mm}^2$$



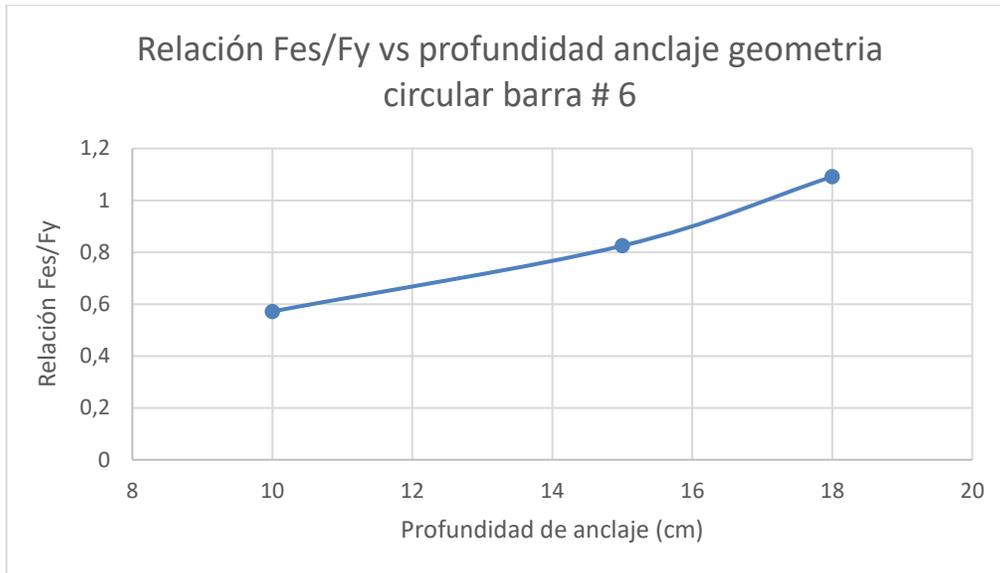
Ilustración 75 Falla flexión barra #7 (a). Fuente propia



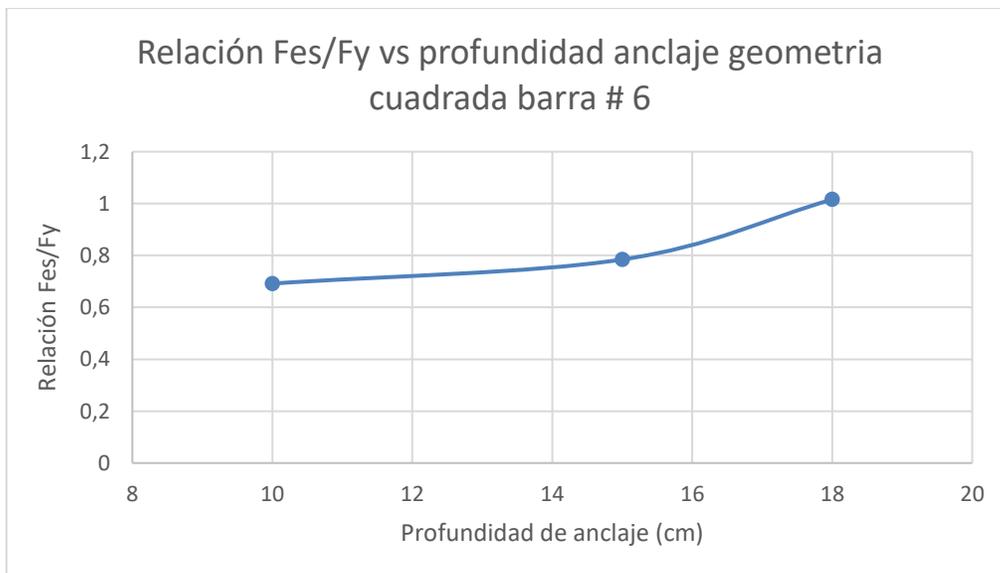
Ilustración 76 Falla flexión barra #7 (b). Fuente propia

5.3. Relación F_{es}/F_y vs profundidad de embebido:

Las barras en estudio tuvieron una variación en su profundidad de embebido lo cual presenta un aumento en su resistencia a la extracción a medida que su profundidad aumenta.

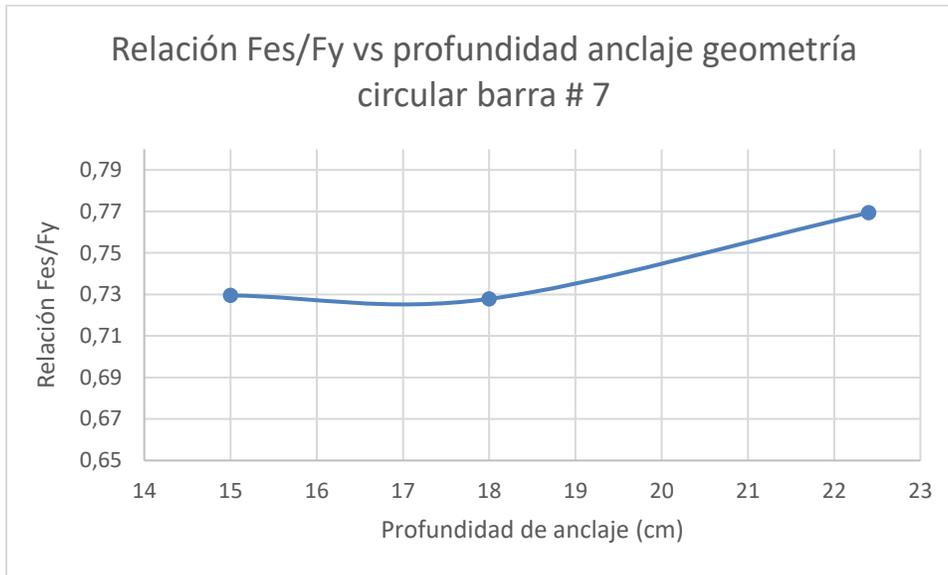


Grafica 9 Relación F_{es}/F_y vs profundidad de anclaje geometría circular Barra #6. Elaboración propia



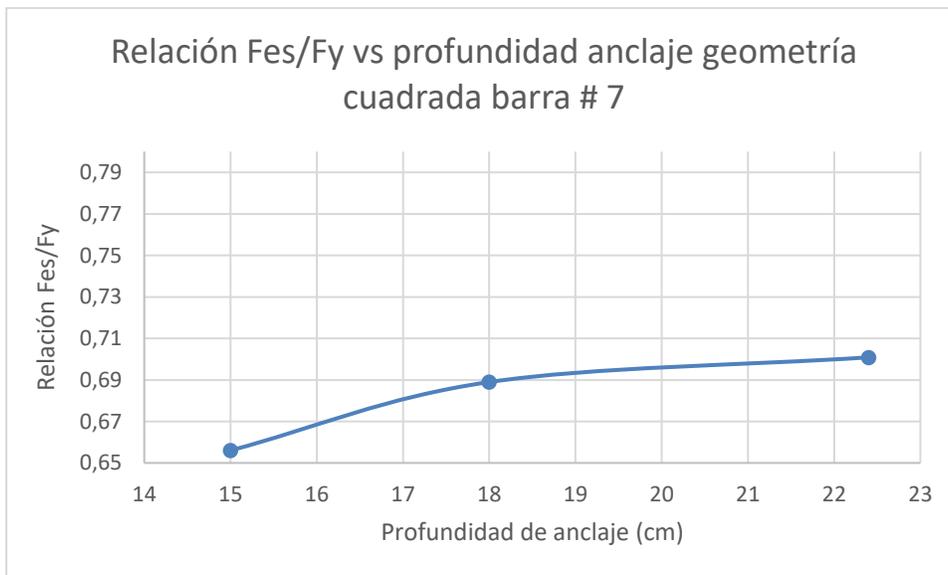
Grafica 10 Relación F_{es}/F_y vs profundidad de anclaje geometría cuadrada Barra #6. Elaboración propia

Se evidencia un aumento de resistencia a la extracción a medida que la profundidad de anclaje aumenta, esto debido a que el concreto tiene una mayor área de falla lo cual implica una mayor resistencia a la extracción.



Grafica 11 Relación Fes/Fy vs profundidad de anclaje geometría circular Barra #7. Elaboración propia

La grafica #9 ilustra un comportamiento en el cual para la profundidad de 15 cm y 18 cm la resistencia a la extracción es muy similar. El aumento se presenta al tener la profundidad de anclaje estipulada en la ACI.



Grafica 12 Relación Fes/Fy vs profundidad de anclaje geometría cuadrada Barra #7. Elaboración propia

Las barras de geometría cuadrada tienen un valor de resistencia mayor a medida que la profundidad es mayor. Al realizar una comparación respecto al comportamiento de la geometría circular, las cabezas circulares tienen una mayor resistencia y su profundidad no es el diferencial.

5.4. Ensayos adicionales:

Como se mencionó anteriormente debido a que no se consideró una falla por flexión en el pre dimensionamiento de los especímenes se evidencio una falla por flexión. Por consiguiente, se realizaron tres ensayos adicionales con un refuerzo de:

$$2\#5 + 2\#6 \rightarrow A_s = 966 \text{ mm}^2$$



Ilustración 77 Especimen de concreto, ensayos adicionales. Fuente propia

Los ensayos adicionales se realizaron con un diseño de mezcla calculado con las siguientes cantidades para 1 m³:

Cemento (Kg)	530
Agua	180
Arena (Kg)	880
Grava (Kg)	753
Aditivo Plastificante (Lts)	1.18
Aditivo Superplastificante (Lts)	4.12

Tabla 34 Diseño de mezcla. Elaboración propia



Ilustración 78 Cilindros ensayos adicionales. Fuente propia

Se obtuvo una resistencia del concreto a 28 días de:

VIGAS ADICIONALES			
CILINDROS	FUERZA (kgf)	FUERZA (kN)	ESFUERZO (Mpa)
1	27920	273,78	35,55
2	26310	258,00	33,50
3	25370	248,78	32,30
4	28980	284,18	36,90
5	28310	277,61	36,05
6	27930	273,88	35,56
Promedio			34,98

Tabla 35 Resistencia concreto ensayos adicionales. Elaboración propia



Ilustración 79 Falla a compresión cilindro pruebas adicionales. Fuente propia

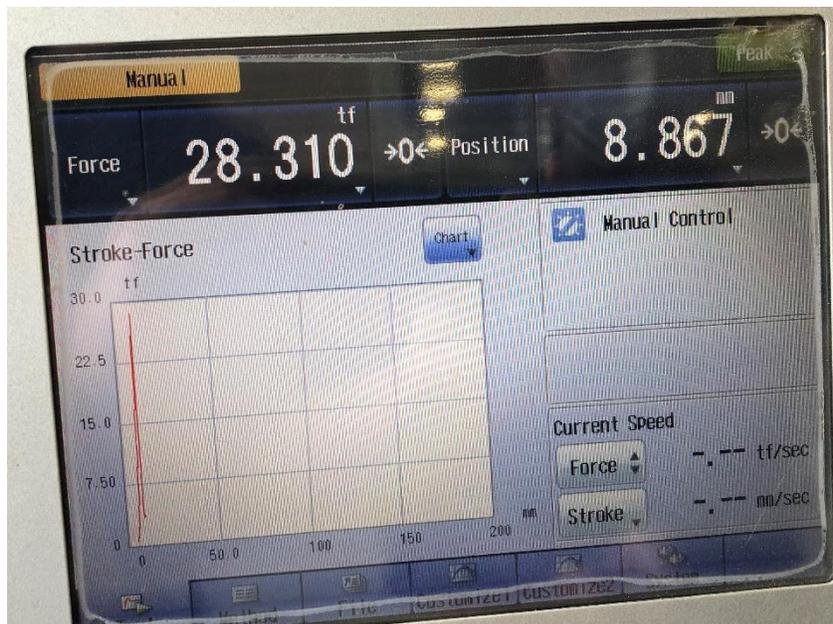


Ilustración 80 Grafica falla a compresión cilindro pruebas adicionales. Fuente propia



Ilustración 81 Especímenes adicionales (a). Fuente propia



Ilustración 82 Especímenes adicionales (b). Fuente propia

5.5. Ensayo de extracción barra #6 ADICIONAL:

Se realizó un ensayo adicional para la barra #6 con geometría circular. Para poder evaluar su comportamiento en donde la falla por flexión no se presenta.

Como fue mencionado anteriormente al calcular el momento resistente de los especímenes en la página 78, el refuerzo utilizado fue:

$$2\#5 + 2\#6 \rightarrow A_s = 966 \text{ mm}^2$$

El montaje para el ensayo adicional se planteó de igual manera en la cual se fallaron los treinta y dos (32) ensayos anteriores, mediante el uso de un gato hidráulico de embolo hueco, en donde se aplica una carga para lograr la extracción de la barra de anclaje.



Ilustración 83 Especimen adicional barra #6. Fuente propia

Los especímenes presentaron pequeñas fisuras las cuales se encuentran marcadas como se observa en la ilustración 83, lo cual comparando con los especímenes fallados anteriormente en donde el refuerzo a flexión era inferior al requerido, se obtiene una mayor resistencia del elemento, provocando así una falla predominante de fluencia en la barra.

ENSAYO	VARILLA #	PROFUNDIDAD (mm)	Geometría	Carga (kN)	Relación Fes/Fy
35	6	18	CIRCULAR	155	1,19

Tabla 36 Carga - relación Fes/Fy barra #6 ensayo adicional. Elaboración propia

La carga máxima obtenida en los ensayos anteriores fue 14.710 kgf (tabla 12), aunque dicha carga supero la carga de fluencia, el espécimen no permitió un aumento de carga debido a su falla por flexión: en el ensayo adicional se logró evidenciar que esta falla no se presentó por consiguiente se obtuvo un aumento de carga de 15.840 kgf, logrando así una relación de 1.20 respecto al esfuerzo de fluencia de la barra, confirmando que la barra #6 logra tener un comportamiento adecuado para una profundidad de 18 cm, en donde la falla en el sistema será por ruptura de la barra y no en el concreto. **Nota: la carga de ruptura para la barra #6 no se logró obtener debido al riesgo que presentaba llevar la barra a su ruptura, lo cual pudiese presentar un accidente en el laboratorio ya que el gato hidráulico tenía una presión considerable que podría lanzar la barra en cualquier dirección.**

Se realizaron dos marcas sobre la barra con una separación de 20 cm para determinar la deformación que se obtiene al entrar en fluencia.

Dimensión inicial (mm)	200
Dimensión final (mm)	206
Deformación (mm)	6

Tabla 37 Deformación barra en fluencia, ensayo adicional. Elaboración propia

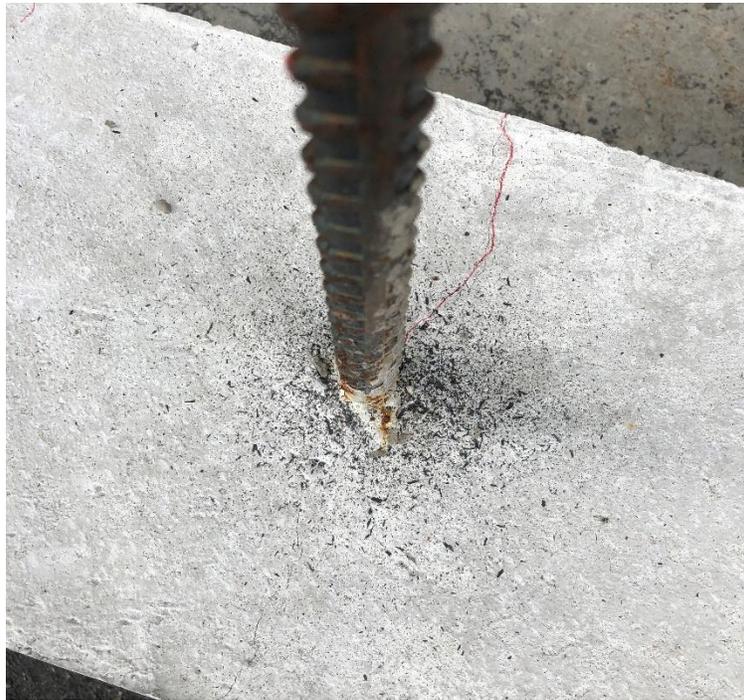


Ilustración 84 Evidencia falla por fluencia en barra #6. Fuente propia

Adicionalmente se realizó la medición de la barra desde la cara superior del concreto hasta el extremo máximo de la barra obteniendo:

Dimensión inicial (cm)	78.8
Dimensión final (cm)	80.1
Deformación (cm)	1.3

Tabla 38 Deformación total en barra, ensayo adicional. Elaboración propia

La deformación total de 1.3 cm se obtuvo mediante la deformación de la barra al entrar en fluencia, junto con la extracción que se obtiene de la barra en el concreto.



Ilustración 85 Falla barra #6 ensayo adicional. Fuente propia



Ilustración 86 Falla barra #6 ensayo inicial. Fuente propia

Se logra evidenciar una gran diferencia entre una falla únicamente por fluencia de la barra contra una falla predominada por flexión. El refuerzo calculado para flexión logra detener la fisuración en el elemento, por consiguiente, no se encuentra falla estructural.

5.6. Ensayo de extracción barra #7 ADICIONAL:

Se realizaron dos ensayos adicionales para la barra #7 con geometría circular y cuadrada. Para poder evaluar su comportamiento en donde la falla por flexión no se presenta.

$$2\#5 + 2\#6 \rightarrow A_s = 966 \text{ mm}^2$$



Ilustración 87 Espécimen adicional barra #7. Fuente propia

Los especímenes realizados anteriormente no lograron resistir la carga necesaria para que la barra de refuerzo lograr entrar en el rango de fluencia, es por esto que para la barra #7 se realizaron dos (2) ensayos adicionales. La carga máxima obtenida anteriormente fue de 150.28 kN con una relación F_{es}/F_y de 0.775, lo cual no es aceptado por la normativa vigente. Esto se presentó debido a la falla por flexión presentada en el elemento; los ensayos adicionales presentaron una falla por fluencia en la barra teniendo fisuras poco relevantes sobre el espécimen.

ENSAYO	VARILLA #	PROFUNDIDAD (mm)	Geometría	Carga (kN)	Relación F_{es}/F_y
33	7	22,4	CIRCULAR	200	1,033
34	7	22,4	CUADRADA	196	1,012

Tabla 39 Carga - relación F_{es}/F_y barra #7 ensayos adicionales. Elaboración propia

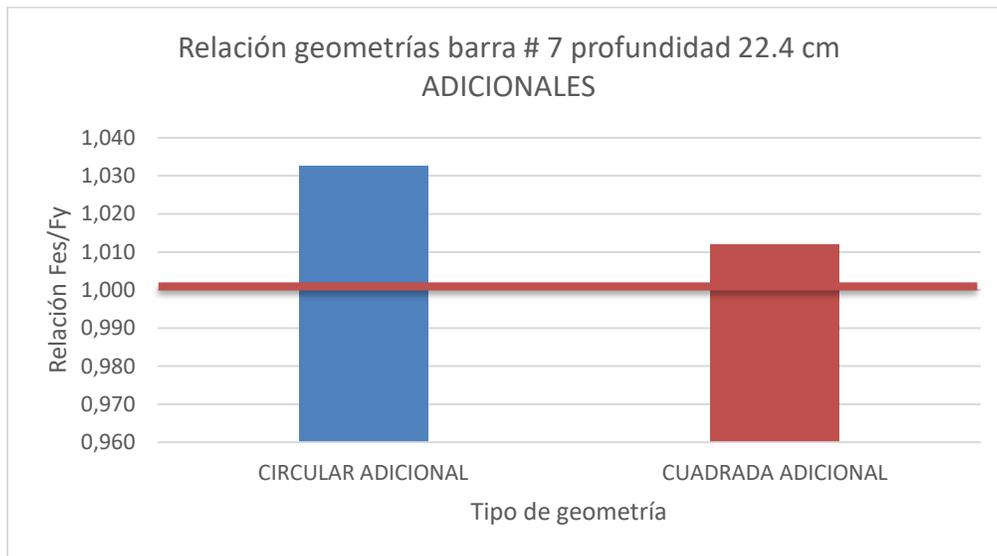


Ilustración 88 Fisuras espécimen adicional barra #7. Fuente propia

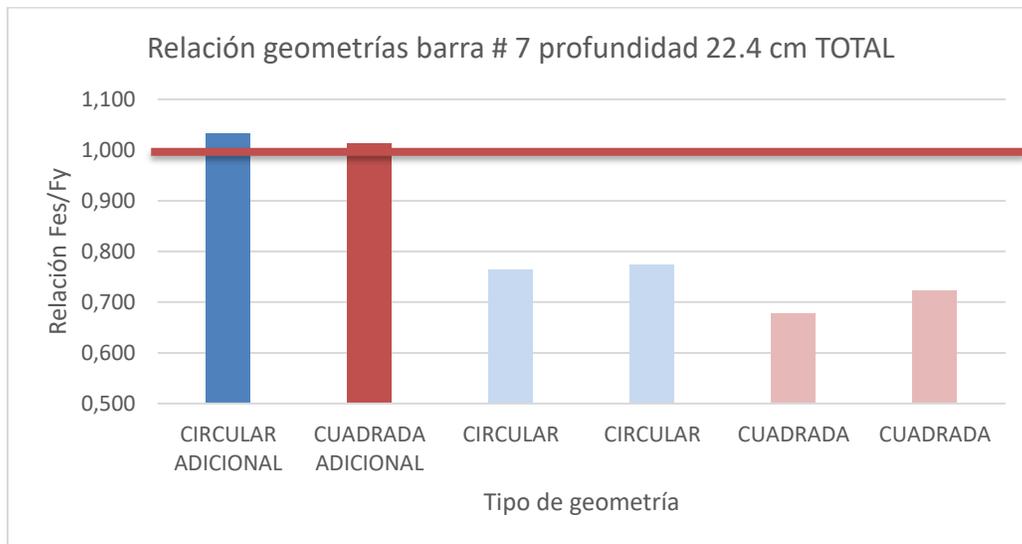


Ilustración 89 Fisuras espécimen adicional barra #7. Fuente propia

Al ensayar el espécimen para una barra con cabeza de geometría circular se obtuvo la última fisura visible para una carga de 17.300 kgf (Ilustración 88), carga cercana a la carga de fluencia promedio de 19.785 kgf, la cual posteriormente fue alcanzada con una carga máxima de 20.430 kgf, obteniendo así una relación de 1.033, presentando una falla de fluencia deseada en el mecanismo para una longitud de anclaje de 22.4 cm indicada en la normativa vigente. **Nota: la carga de ruptura para la barra #7 no se logró obtener debido al riesgo que presentaba llevar la barra a su ruptura, lo cual pudiese presentar un accidente en el laboratorio ya que el gato hidráulico tenía una presión considerable que podría lanzar la barra en cualquier dirección.**



Grafica 13 Relación geometrías barra #7 profundidad 22.4 cm - Ensayo adicional. Elaboración propia



Grafica 14 Relación entre ensayos para barra #7 profundidad 22.4 cm. Elaboración propia

Se logra observar en la gráfica 14 el incremento en la relación del esfuerzo máximo respecto al esfuerzo de fluencia, debido al aumento en resistencia de los especímenes al tener un mayor refuerzo a flexión.



Ilustración 90 Falla barra #7 ensayo adicional. Fuente propia



Ilustración 91 Falla barra #7 ensayo inicial. Fuente propia

Se logra evidenciar una gran diferencia entre una falla únicamente por fluencia de la barra contra una falla predominada por flexión. El refuerzo calculado para flexión logra detener la fisuración en el elemento, por consiguiente, no se encuentra falla estructural.

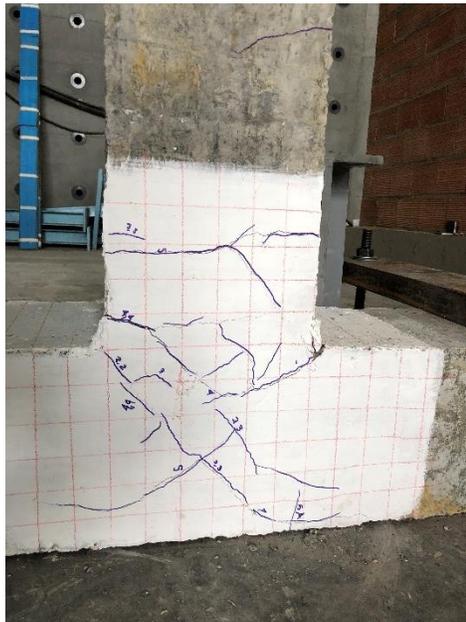
5.7. Ensayo de conexión viga-columna:

5.7.1. Primer ensayo:

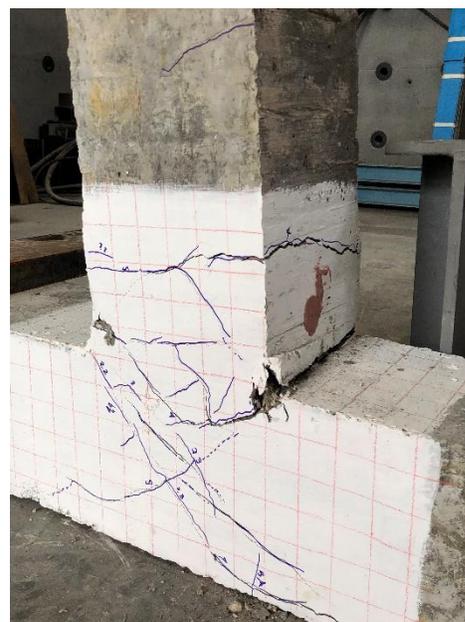
Se fallo la primera conexión viga columna en donde se tenía anclajes con cabeza.



Ilustración 92 Conexión Viga-Columna #1. Fuente propia



(A) Viga-Columna #1



(B) Viga-Columna #1



(C) Viga-Columna #1



(D) Viga-Columna #1



(E) Viga-Columna #1



(F) Viga-Columna #1

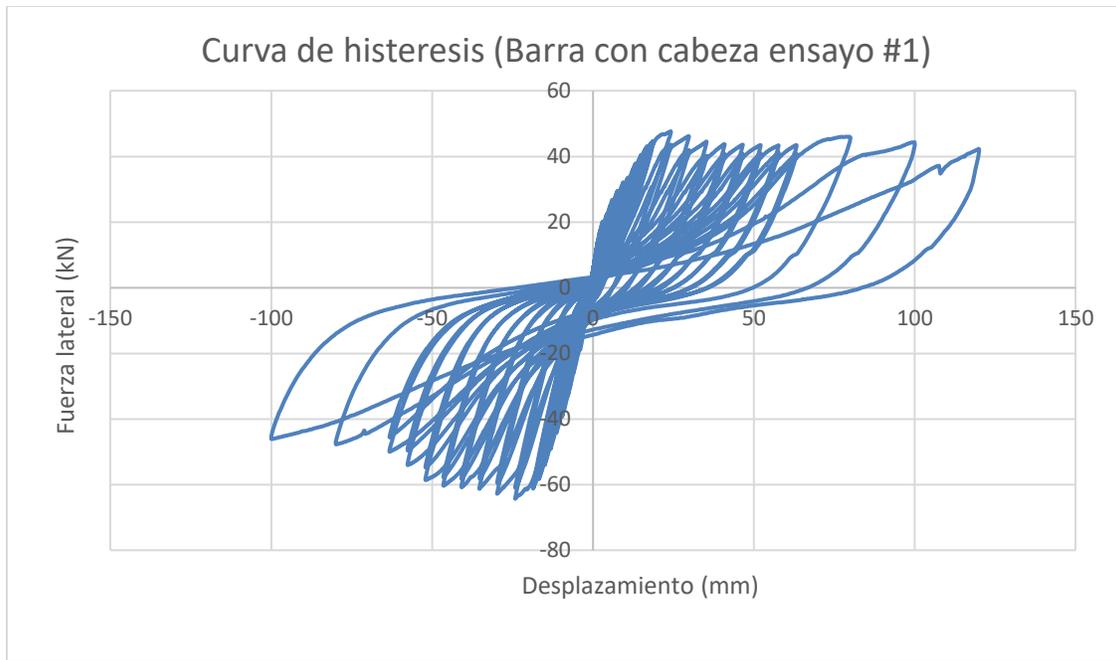


(G) Viga-Columna #1



(H) Viga-Columna #1

Las primeras fisuras se presentaron en el centro de la unión entre la columna y la viga. A medida que se incrementaban los ciclos de carga así mismo se observaba un aumento de fisuras provocando una degradación de la rigidez, esta degradación se produce por el desgaste y una disminución en la adherencia del refuerzo longitudinal. Una vez se entra en el rango inelástico, las fisuras por anclaje se logran observar siguiendo un recorrido de 45° generando una “X” y posteriormente desprendiendo el recubrimiento (ilustración G Viga-Columna #1).



Grafica 15 Curva de histéresis (Barra con cabeza ensayo #1). Elaboración propia

Se obtuvo una carga máxima teniendo una diferencia numérica en los valores de los dos sentidos del desplazamiento.

Carga máxima (+) (kN)	Carga máxima (-) (kN)
47.68	-64.27

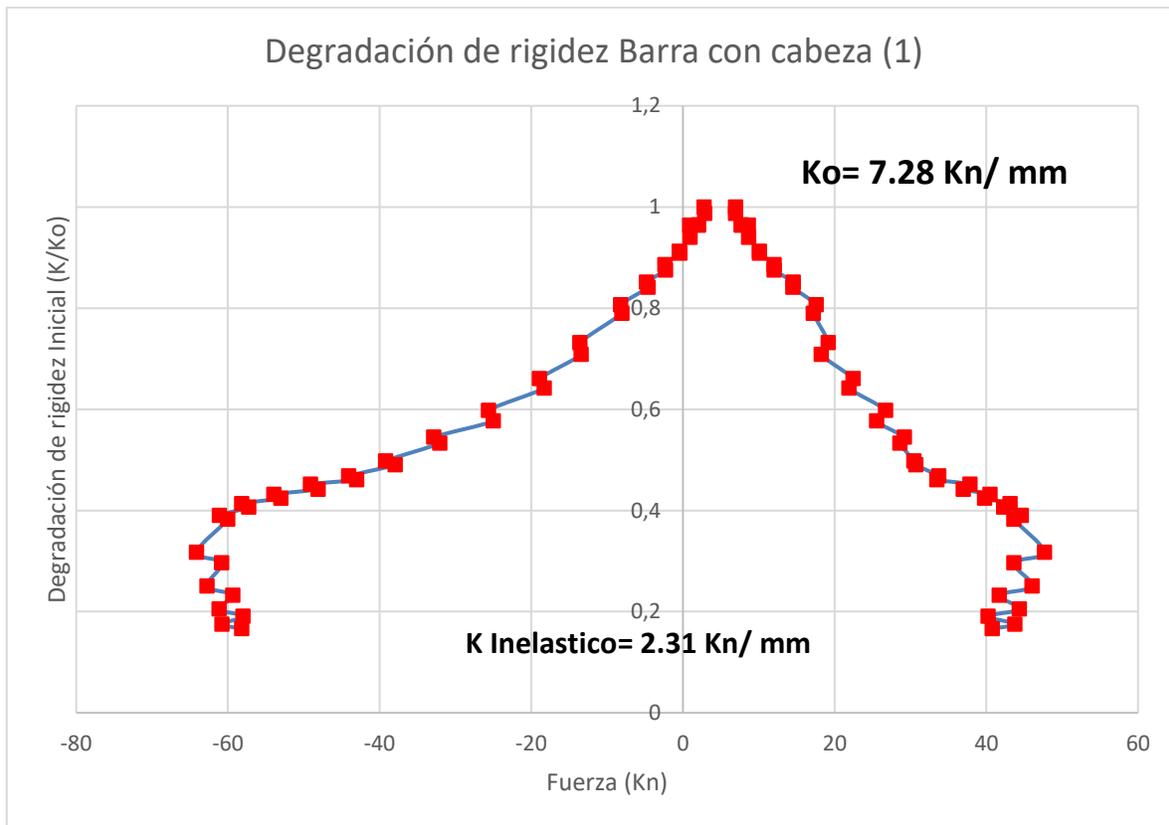
Tabla 40 Carga máxima ensayo #1. Elaboración propia

Se procedió a calcular la degradación de rigidez, teniendo en cuenta los desplazamientos y la carga máxima para cada ciclo de carga.

Partiendo de la ley de Hooke obtenemos:

$$F = k * x \rightarrow k = \frac{F}{x}$$

Ecuación 9 Ley de Hooke



Grafica 16 Degradación de rigidez ensayo #1 (Barra con cabeza). Elaboración propia

La degradación de rigidez logra mostrar una disminución parabólica en donde se llega a su valor elástico obteniendo una rigidez de 2.31 kN/mm. Se continuo con la aplicación de la carga entrando en un rango inelástico en donde se observa un aumento de desplazamiento sin tener un aumento de carga.

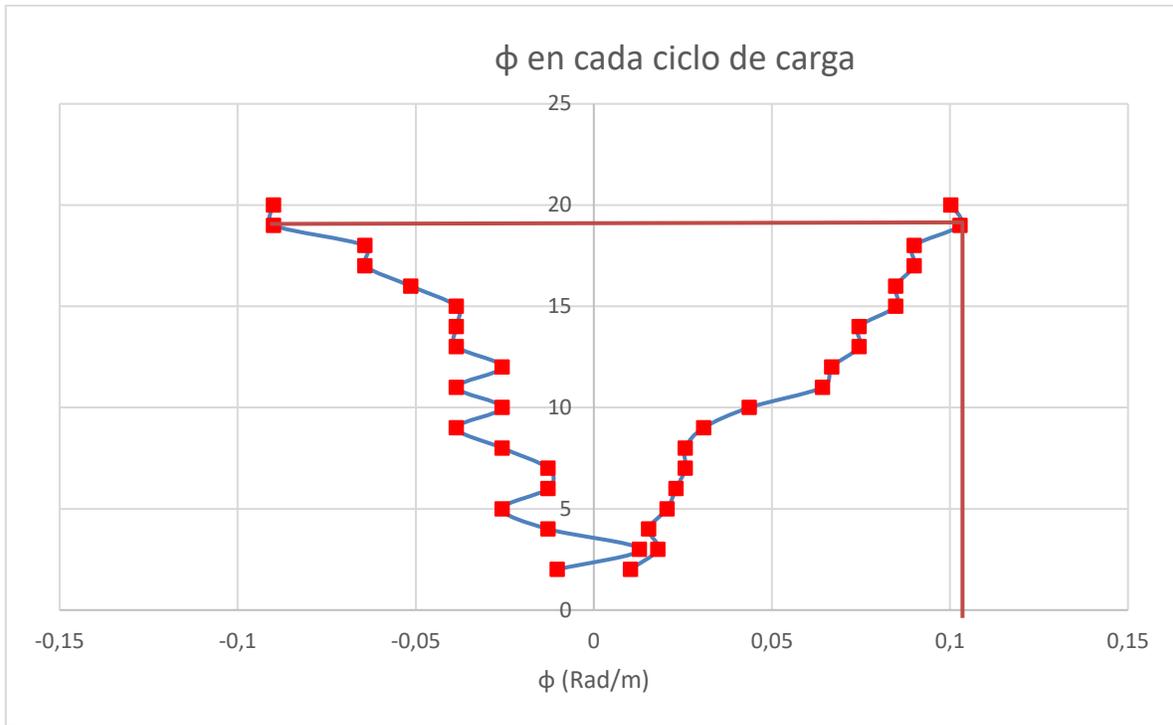
El desplazamiento máximo obtenido en el rango elástico fue de 24.2 mm.

Como fue mencionado anteriormente se procedió a calcular el giro por medio de un transductor LVDTs en el cual se obtuvieron valores de la deformación que este registraba.

Debido a la cercanía del transductor a la columna se consideró que $\tan(\theta) = 1$, por consiguiente, la deformación obtenida es el ángulo de giro, el cual posteriormente se calculó en radianes.

$$rad = \frac{\theta * \pi}{180}$$

Ecuación 10 Conversion grados a radianes.



Grafica 17 ϕ en cada ciclo de carga ensayo #2. Elaboración propia

Se observa en la gráfica 17 el valor del giro en cada ciclo tiene una tendencia la cual tiene variaciones a partir de una curvatura de 0.1028 Rad/m, lo cual infiere que este punto es el de la zona elástica.

La curvatura teórica máxima calculada para el espécimen es de 0.1089 Rad/m (página 73), valor cercano al obtenido experimentalmente.

5.7.2. Segundo ensayo:

Así mismo el segundo ensayo realizado está compuesto por barras con cabeza.



Ilustración 93 Conexión Viga-Columna #2. Fuente propia



(A) Viga-Columna #2



(B) Viga-Columna #2



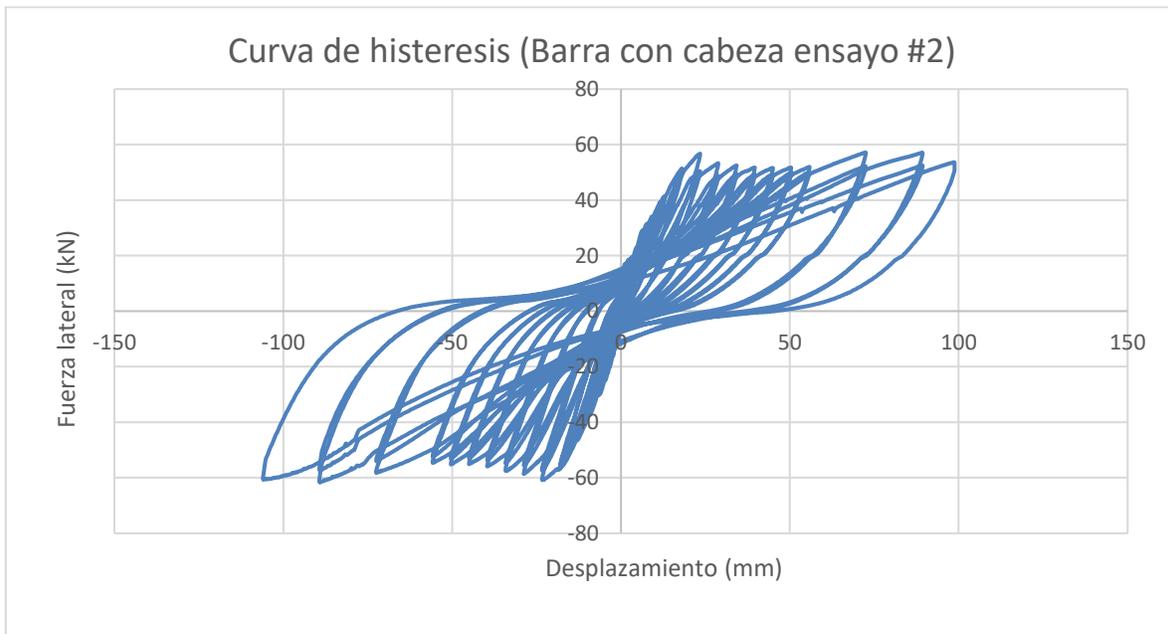
(C) Viga-Columna #2



(D) Viga-Columna #2

De igual manera las primeras fisuras se presentaron en el centro de la unión entre la columna y la viga. A medida que se incrementaban los ciclos de carga así mismo se observaba un aumento de fisuras provocando una degradación de la rigidez, esta degradación se produce por el desgaste y una disminución en la adherencia del refuerzo longitudinal.

Las fisuras presentadas de igual manera como "X" se obtienen al tener una falla por anclaje provocando así mismo un cono de falla más pronunciado comparado con el ensayo #1 (Ilustración (D) Viga-Columna #2).



Grafica 18 Curva de histéresis ensayo #2 (Barra con cabeza). Elaboración propia

Se logro observar que la resistencia para el segundo ensayo fue muy similar respecto al primer ensayo en donde también se tenía barras con cabeza. Se obtuvo una carga máxima con una menor diferencia en los dos sentidos respecto al ensayo anterior.

Carga máxima (+) (kN)	Carga máxima (-) (kN)
56.98	-61.41

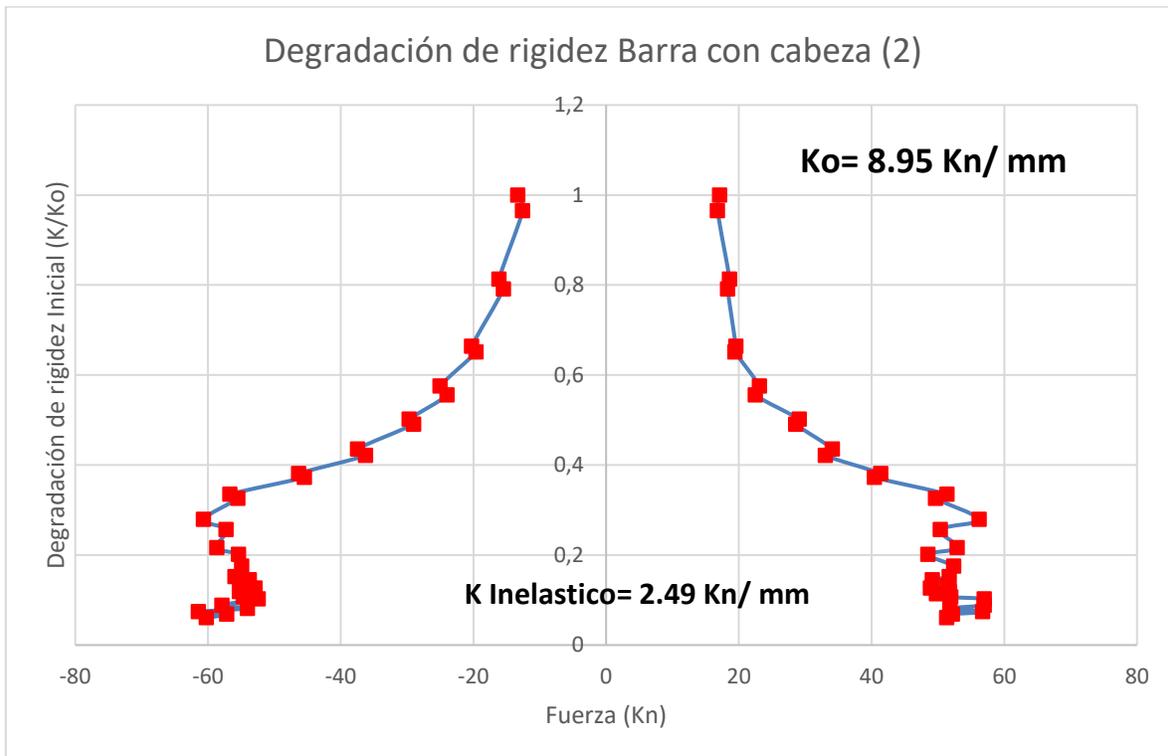
Tabla 41 Carga máxima ensayo #2. Elaboración propia

Se procedió a calcular la degradación de rigidez, teniendo en cuenta los desplazamientos y la carga máxima para cada ciclo de carga.

Partiendo de la ley de Hooke obtenemos:

$$F = k * x \rightarrow k = \frac{F}{x}$$

Ecuación 11 Ley de Hooke



Grafica 19 Degradación de rigidez ensayo #2 (Barra con cabeza). Elaboración propia

La degradación de rigidez logra mostrar una disminución parabólica en donde se llega a su valor máximo elástico obteniendo una rigidez de 2.49 kN/mm. Se continuo con la aplicación de la carga entrando en un rango inelástico en donde se observa un aumento de desplazamiento sin tener un aumento de carga a excepción de la carga máxima presentada en este rango inelástico.

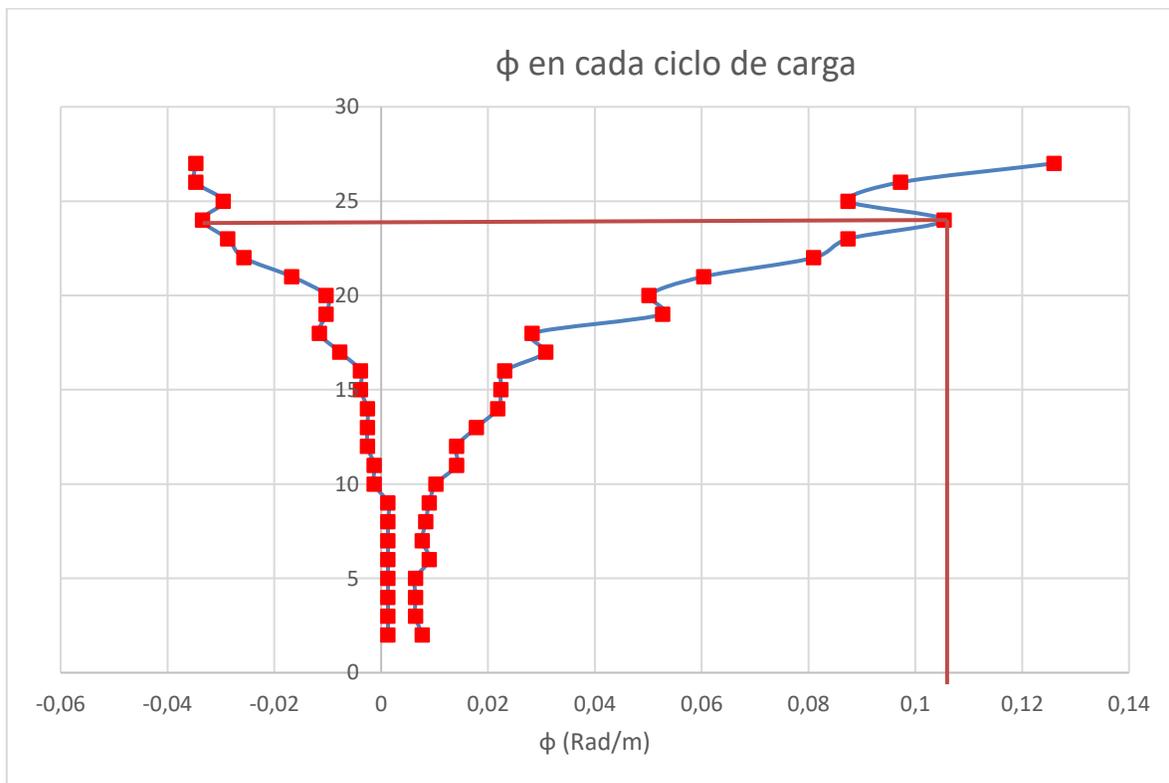
El desplazamiento máximo obtenido en el rango elástico fue de 23.4 mm.

Como fue mencionado anteriormente se procedió a calcular el giro por medio de un transductor LVDTs en el cual se obtuvieron valores de la deformación que este registraba.

Debido a la cercanía del transductor a la columna se consideró que $\tan(\theta)=1$, por consiguiente, la deformación obtenida es el ángulo de giro, el cual posteriormente se calculó en radianes.

$$rad = \frac{\theta * \pi}{180}$$

Ecuación 12 Conversion grados a radianes.



Gráfica 20 φ en cada ciclo de carga ensayo #2. Elaboración propia

Se observa en la gráfica 20 el valor del giro en cada ciclo tiene una tendencia la cual tiene variaciones a partir de una curvatura de 0.1053 Rad/m, lo cual infiere que este punto es el de la zona elástica.

La curvatura experimental máxima calculada para el espécimen es de 0.1089 Rad/m (página 73), valor cercano al obtenido experimentalmente.

5.7.3. Tercer ensayo:

Así mismo el segundo ensayo realizado está compuesto por barras con cabeza.

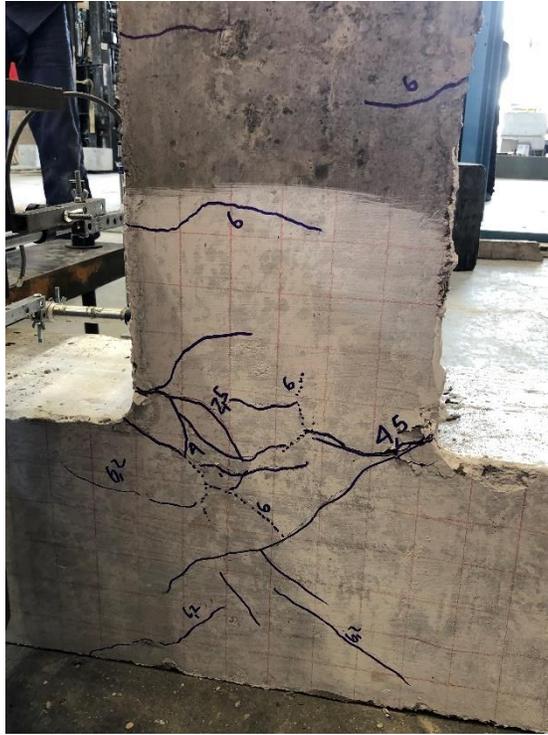


Ilustración 94 Conexión Viga-Columna #3. Fuente propia



(A) Viga-Columna #3



(B) Viga-Columna #3

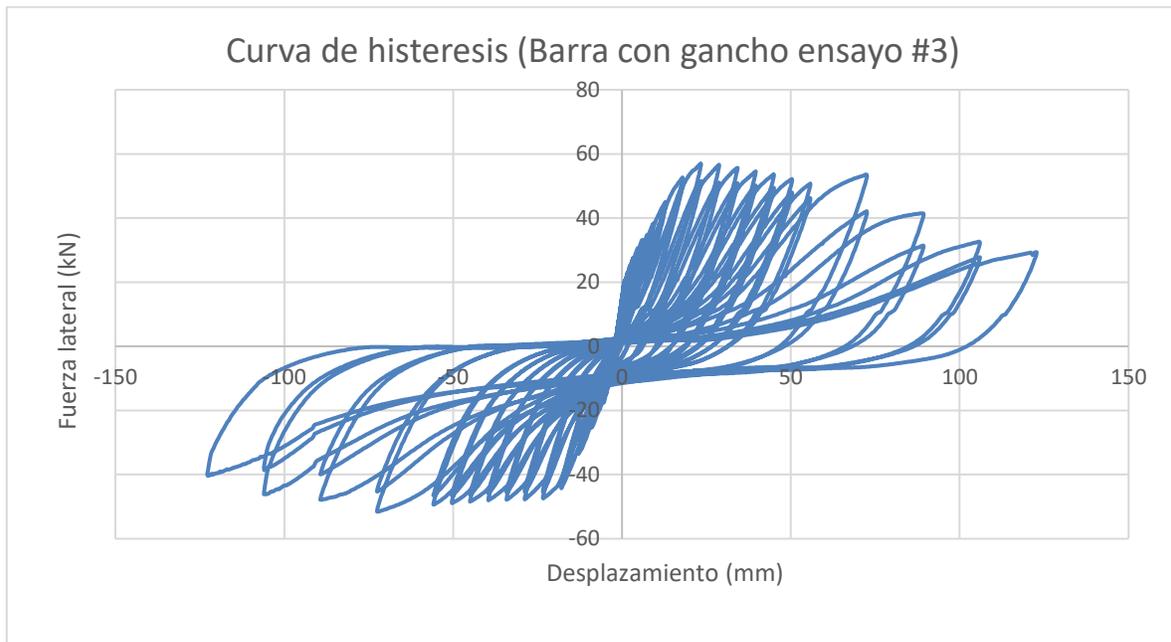


(C) Viga-Columna #3



(D) Viga-Columna #3

De igual manera las primeras fisuras se presentaron en el centro de la unión entre la columna y la viga. A medida que se incrementaban los ciclos de carga así mismo se observaba un aumento de fisuras provocando una degradación de la rigidez, esta degradación se produce por el desgaste y una disminución en la adherencia del refuerzo longitudinal.



Grafica 21 Curva de histéresis ensayo #3 (Barra con gancho). Elaboración propia

Se logra observar que la resistencia para el tercer ensayo fue muy similar respecto a los ensayos anteriores donde se tenía barras con cabeza.

Carga máxima (+) (kN)	Carga máxima (-) (kN)
56.69	-47.31

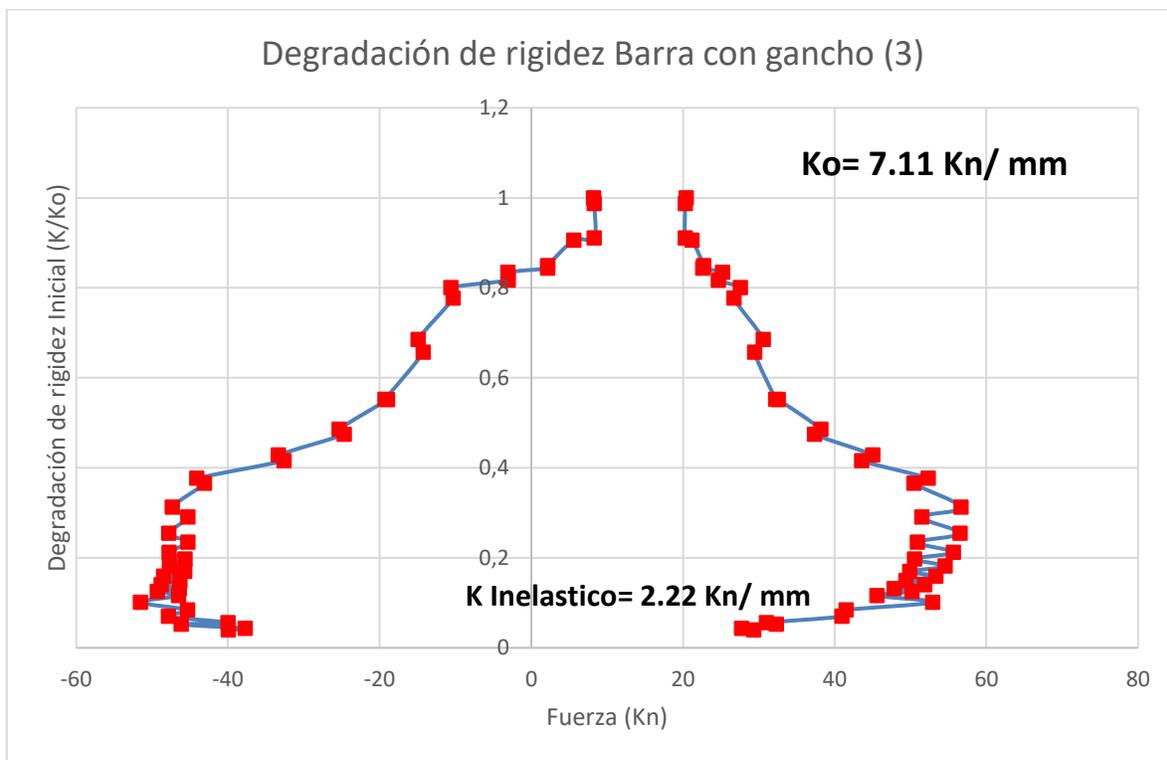
Tabla 42 Carga máxima ensayo #3. Elaboración propia

Se procedió a calcular la degradación de rigidez, teniendo en cuenta los desplazamientos y la carga máxima para cada ciclo de carga.

Partiendo de la ley de Hooke obtenemos:

$$F = k * x \rightarrow k = \frac{F}{x}$$

Ecuación 13 Ley de Hooke



Grafica 22 Degradación de rigidez ensayo #3 (Barra con gancho). Elaboración propia

La degradación de rigidez logra mostrar una disminución parabólica en donde se llega a su valor máximo elástico obteniendo una rigidez de 2.22 kN/mm. Se continuo con la aplicación de la carga entrando en un rango inelástico en donde se observa un aumento de desplazamiento sin tener un aumento de carga a excepción de la carga máxima presentada en este rango inelástico.

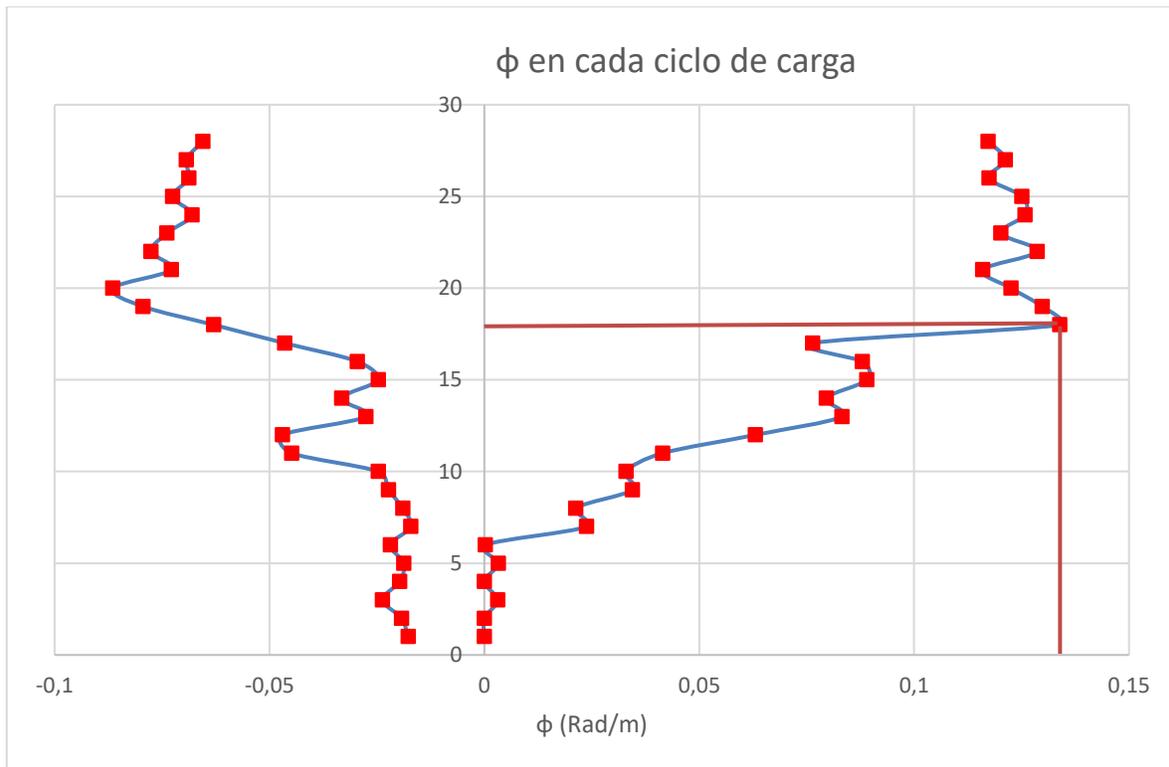
El desplazamiento máximo obtenido en el rango elástico fue de 23.4 mm.

Como fue mencionado anteriormente se procedió a calcular el giro por medio de un transductor LVDTs en el cual se obtuvieron valores de la deformación que este registraba.

Debido a la cercanía del transductor a la columna se consideró que $\tan(\theta)=1$, por consiguiente, la deformación obtenida es el ángulo de giro, el cual posteriormente se calculó en radianes.

$$rad = \frac{\theta * \pi}{180}$$

Ecuación 14 Conversion grados a radianes.



Gráfica 23 φ en cada ciclo de carga ensayo #2. Elaboración propia

Se observa en la gráfica 23 el valor del giro en cada ciclo tiene una tendencia la cual tiene variaciones a partir de una curvatura de 0.1339 Rad/m, lo cual infiere que este punto es el de la zona elástica.

5.7.4. Cuarto ensayo:

Así mismo el segundo ensayo realizado está compuesto por barras con cabeza.

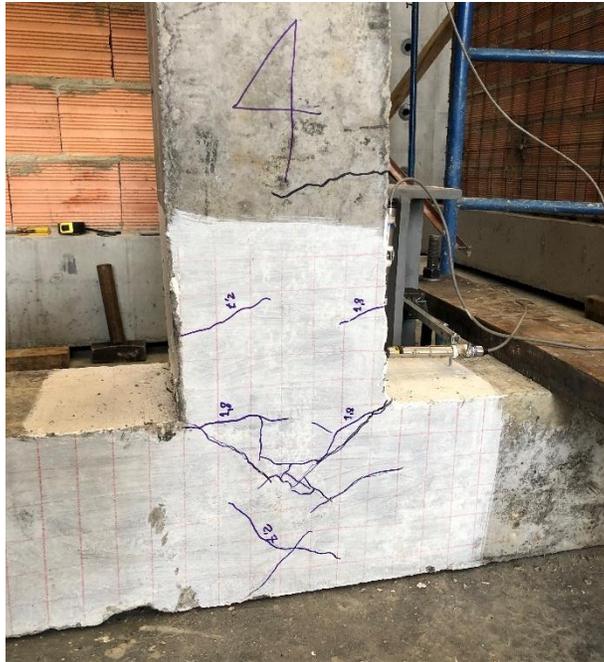
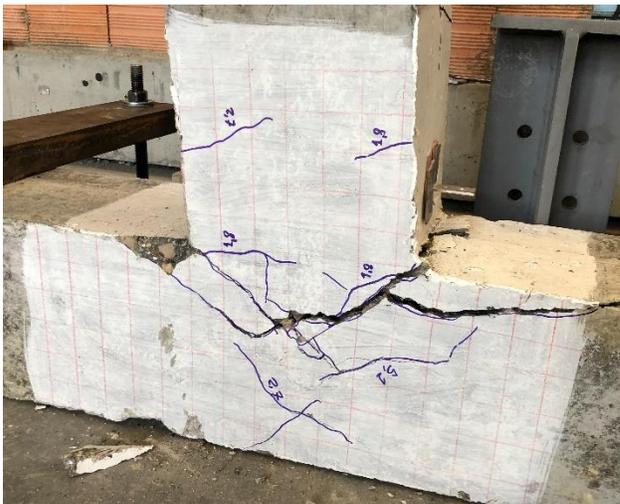


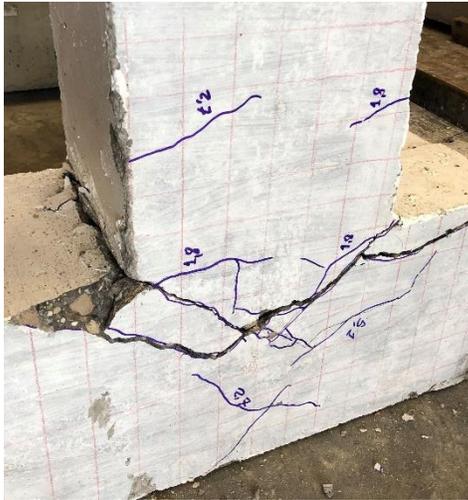
Ilustración 95 Conexión Viga-Columna #4. Fuente propia



(A) Viga-Columna #4



(B) Viga-Columna #4

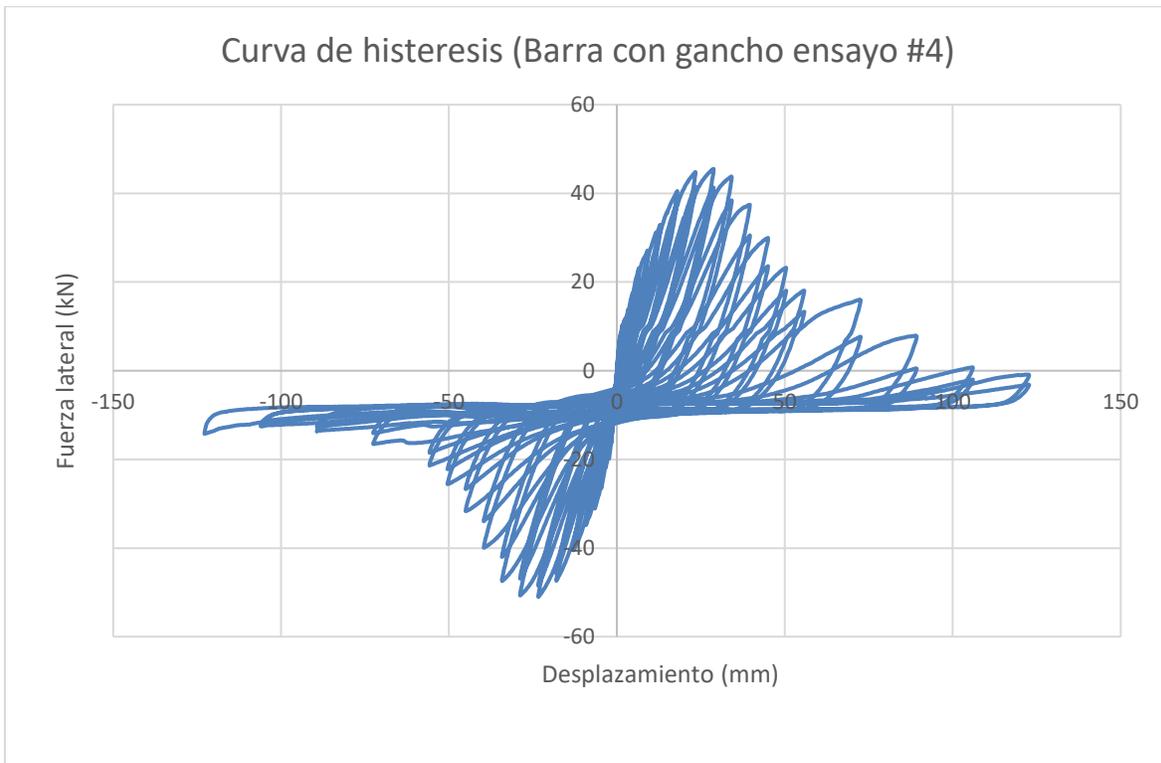


(C) Viga-Columna #4



(D) Viga-Columna #4

De igual manera las primeras fisuras se presentaron en el centro de la unión entre la columna y la viga. A medida que se incrementaban los ciclos de carga así mismo se observaba un aumento de fisuras provocando una degradación de la rigidez, esta degradación se produce por el desgaste y una disminución en la adherencia del refuerzo longitudinal.



Grafica 24 Curva de histéresis ensayo #4 (Barra con gancho). Elaboración propia

Se logro observar que la resistencia para el tercer ensayo fue muy similar respecto a los ensayos anteriores donde se tenía barras con cabeza.

Carga máxima (+) (kN)	Carga máxima (-) (kN)
45.14	-50.88

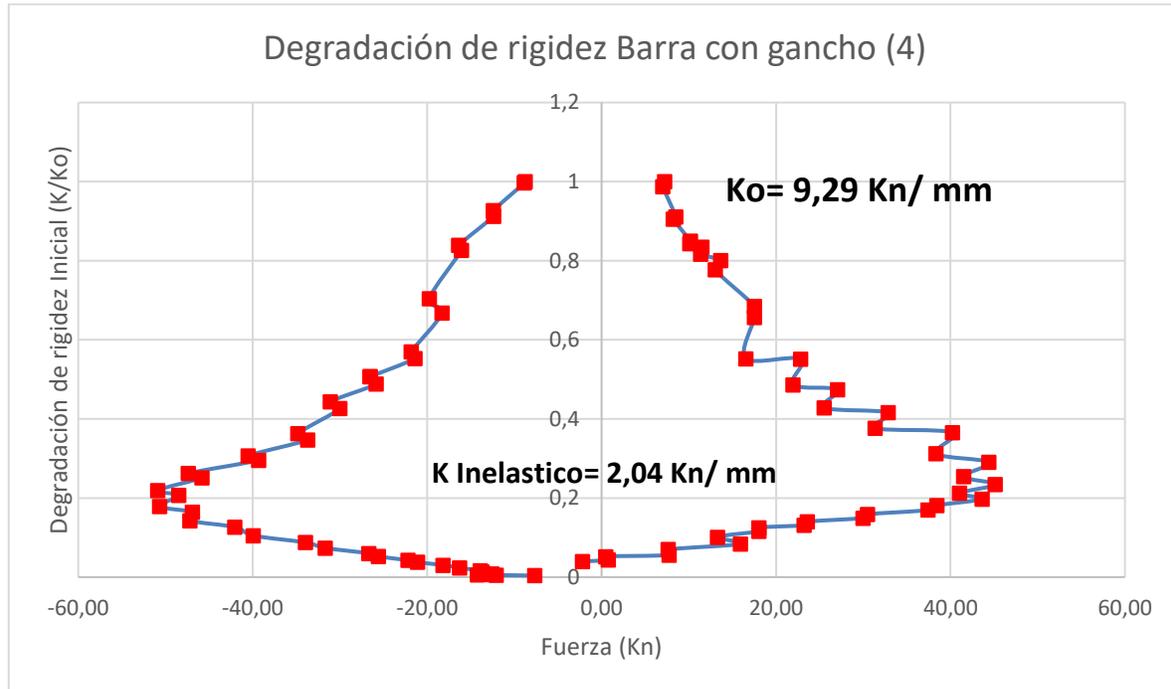
Tabla 43 Carga máxima ensayo #4. Elaboración propia

Se procedió a calcular la degradación de rigidez, teniendo en cuenta los desplazamientos y la carga máxima para cada ciclo de carga.

Partiendo de la ley de Hooke obtenemos:

$$F = k * x \rightarrow k = \frac{F}{x}$$

Ecuación 15 Ley de Hooke



Grafica 25 Degradación de rigidez ensayo #3 (Barra con gancho). Elaboración propia

La degradación de rigidez logra mostrar una disminución parabólica en donde se llega a su valor máximo elástico obteniendo una rigidez de 2.04 kN/mm. Se continuo con la aplicación de la carga entrando en un rango inelástico en donde se observa un aumento de desplazamiento sin tener un aumento de carga a excepción de la carga máxima presentada en este rango inelástico.

El desplazamiento máximo obtenido en el rango elástico fue de 23.39 mm.

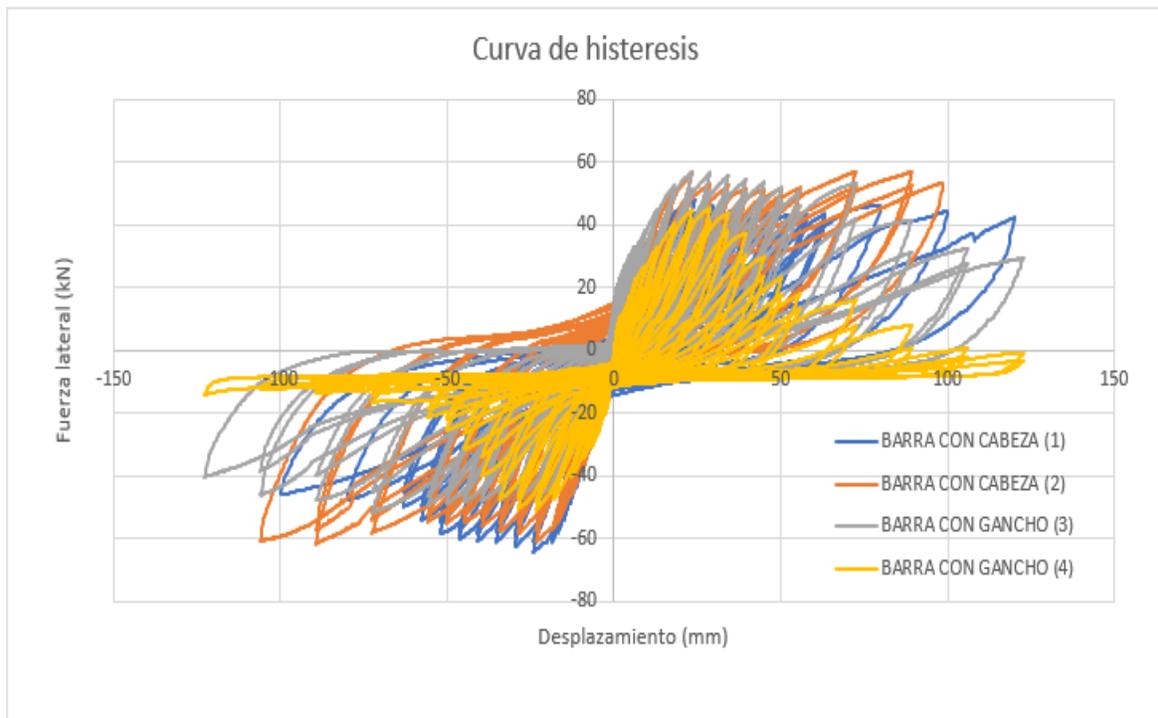
Se logra observar al comparar las conexiones viga columna realizadas que el comportamiento de estos especímenes es el deseado respecto al momento máximo calculado teóricamente.

Momento máximo teórico: 58.8 kN*m (Página 74) X Longitud: 1 m = 58.8 kN.

	CARGA MAXIMA (+) kN	CARGA MINIMA (-) kN
CABEZA (1)	47,68	-64,27
CABEZA (2)	56,98	-61,41
GANCHO (1)	56,69	-47,31
GANCHO (2)	45,14	-50,88

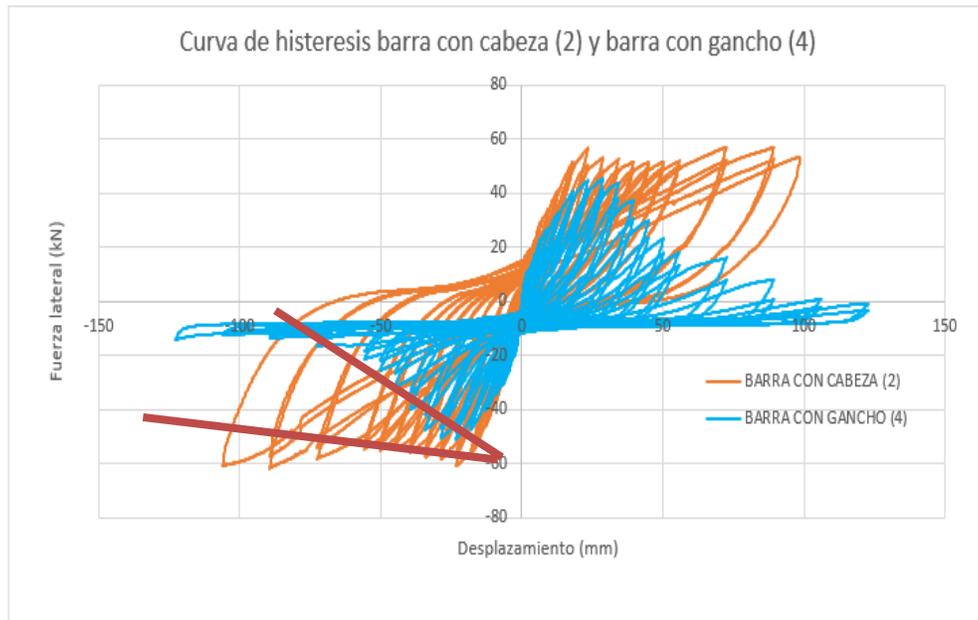
Tabla 44 Cargas conexión viga columna, Elaboración propia

La carga máxima aplicada en los especímenes es superior en aquellos en los cuales el refuerzo era cabeza. Se evidencia en la relación entre las curvas de histéresis un aumento en los desplazamientos máximos aplicados para los especímenes con gancho, este aumento en desplazamiento se logra para cargas inferiores respecto a barras con cabeza.



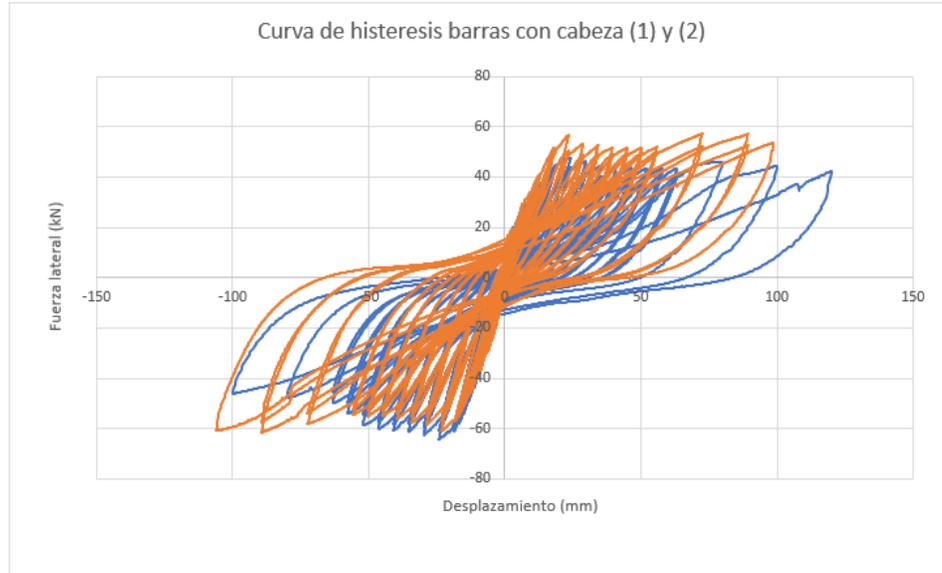
Gráfica 26 Curva de histéresis comparativa. Elaboración propia

La carga soportada por el espécimen de barras con gancho tiende a disminuir gradualmente, a diferencia de las barras con cabeza en donde la carga se mantiene constante. Se observa en la gráfica 27 una pendiente de decrecimiento superior para barras con gancho respecto a barras con cabeza.



Gráfica 27 Curva de histéresis comparativo entre barra con cabeza y barra con gancho. Elaboración propia

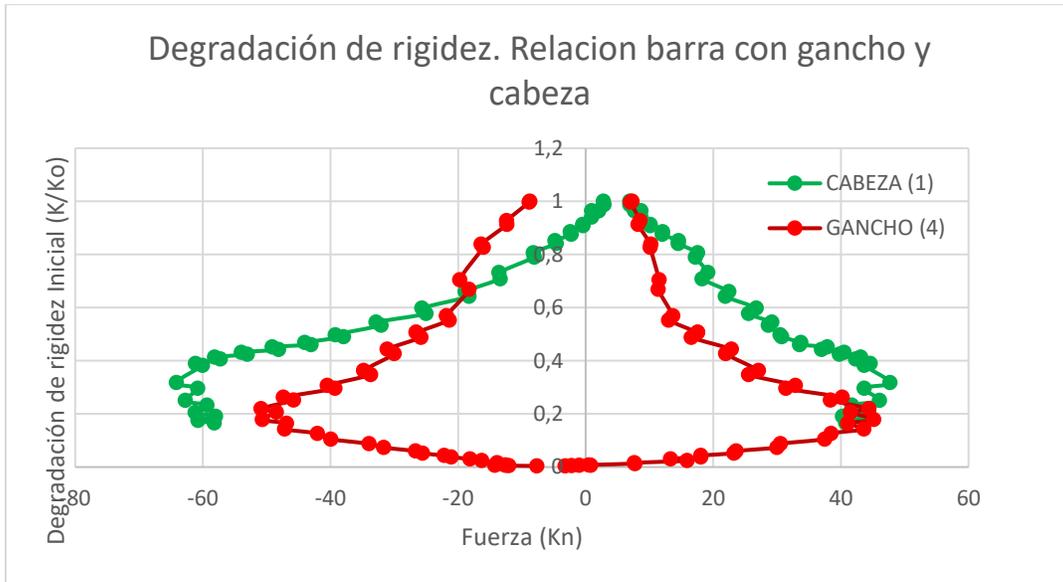
El comportamiento para los especímenes con cabeza es similar y uniforme para los dos ensayos realizados.



Gráfica 28 Curva de histéresis comparativo entre barras con cabeza. Elaboración propia

Se encontró una diferencia en el comportamiento de la degradación de rigidez entre las barras con gancho y con cabeza en la gráfica 29. Las barras con gancho tienden a presentar

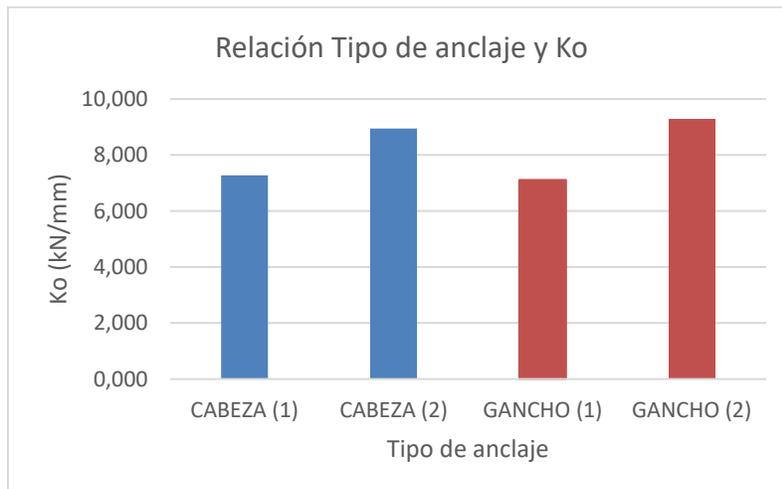
una mayor degradación ante una disminución en la carga aplicada, teniendo así mayores deformaciones.



Grafica 29 Degradación de rigidez. Relación barra con gancho y cabeza. Elaboración propia

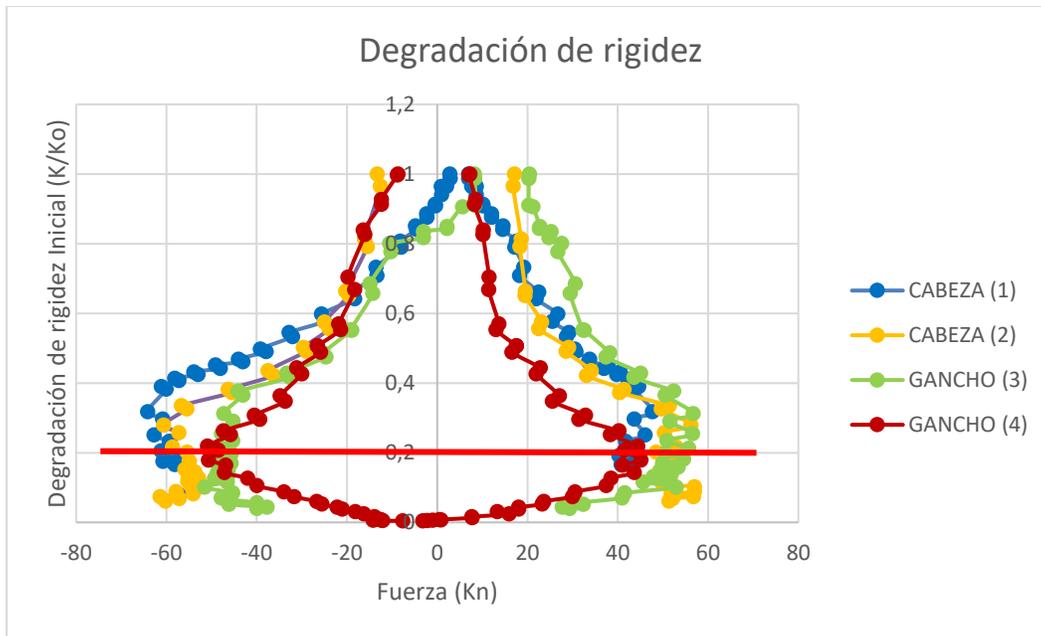
	Ko (kN/mm)	K inelástico (kN/mm)
Cabeza (1)	7,28	2,31
Cabeza (2)	8,95	2,49
Gancho (1)	7,11	2,22
Gancho (2)	9,28	1,66
Promedio	8,15	2,17

Tabla 45 Cargas conexión viga columna, Elaboración propia



Grafica 30 Comparación rigidez inicial conexión viga columna. Elaboración propia

Se observa que el comportamiento de la degradación de rigidez tiene un comportamiento similar para los cuatro especímenes en el rango elástico, el cual tiene un cambio a “k” inelástico con un valor promedio de 2.17 kN/mm, donde el comportamiento para barras con gancho tiene una mayor degradación para una menor carga. Esto se puede obtener debido a que los ganchos tienden a desblobarse deteriorando el concreto en el nodo. Para poder confirmar este comportamiento se recomiendan realizar ensayos adicionales para observar una tendencia.



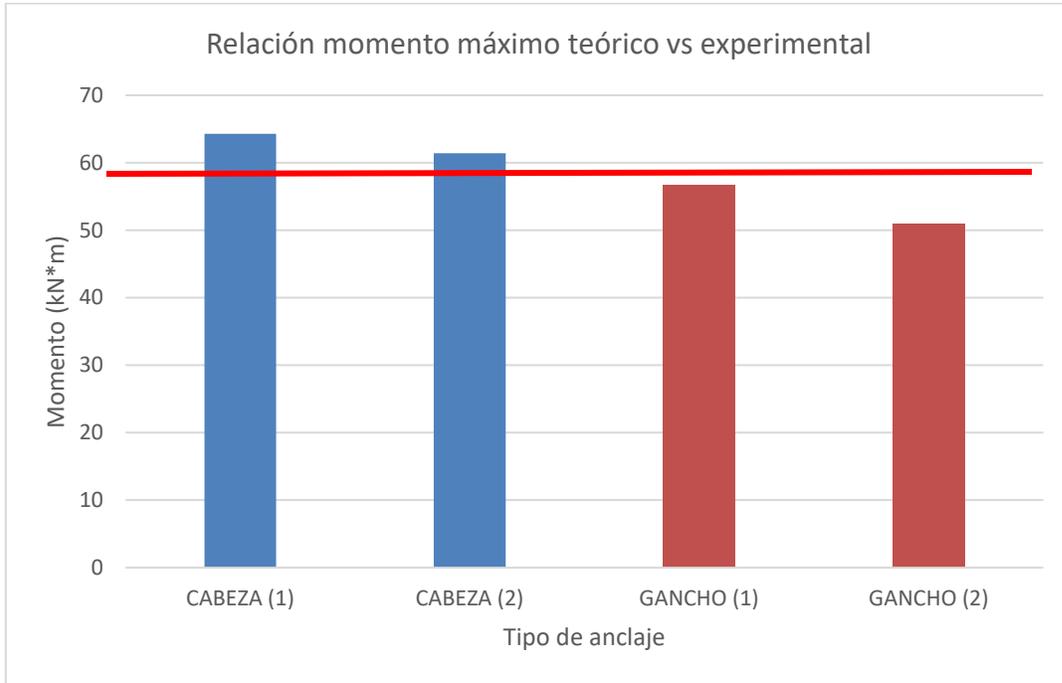
Grafica 31 Degradación de rigidez. Relación especímenes. Elaboración propia

Basándonos en los resultados obtenidos para las cuatro conexiones viga columna, se logra determinar que su resistencia es acorde a la teórica de diseño, por consiguiente, reemplazando las barras con gancho por cabezas logra desarrollar un buen comportamiento del nodo, permitiendo una menor congestión de refuerzo y así una mejor consolidación del nodo. Se recomienda un mayor número de ensayos, y así poder determinar si el uso de barras con gancho disminuye la degradación de rigidez en los especímenes.

Momento máximo teórico: 58.8 kN*m (Página 74).

	CARGA MAXIMA (+) kN	CARGA MINIMA (-) kN	MOMENTO MAXIMO kN
CABEZA (1)	47,68	-64,27	64,27
CABEZA (2)	56,98	-61,41	61,41
GANCHO (1)	56,69	-47,31	56,69
GANCHO (2)	45,14	-50,88	50,88

Tabla 46 Comparación momento máximo viga-columna vs teórico. Elaboración propia



Grafica 32 Comparación momento máximo viga-columna vs teórico. Elaboración propia

Se logra observar al comparar las conexiones viga columna realizadas que el comportamiento de estos especímenes es el deseado respecto al momento máximo calculado teóricamente. Teniendo un mejor comportamiento para aquellos cuyo anclaje es con cabeza.

Capítulo VI

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS.

Se realizó un análisis de precios unitarios para determinar las ventajas del uso de barras con cabeza en la construcción de edificaciones. Un gran aporte al sector de la construcción es lograr obtener una disminución de costos, sin tener variación en la resistencia del espécimen, es por esto que se planteó analizar las diferencias económicas entre el uso de barras con gancho o barras con cabeza.

En una columna perimetral se debe plantear una distribución de refuerzo la cual cumpla con la longitud de anclaje requerida, teniendo así limitantes para el diámetro de la varilla a utilizar, u optar por un aumento de la sección. En el desarrollo de este proyecto de grado se planteó el estudio para varillas #7, las cuales mediante el uso de barras con cabeza logran desarrollar su longitud de anclaje, de otra forma no sería posible desarrollar la longitud con gancho en una sección de 25 x 25.

Nota: los costos se encuentran en cotizaciones adjuntas en anexos.

6.1. Análisis de costos cabeza roscada vs cabeza soldada:

Se realizó un análisis de costos comparativo entre el uso de cabezas roscada, cabeza soldada y gancho.

$$\ell_{dt} \text{ con cabeza} = \left(\frac{420 \text{ Mpa} * 1 * 1 * 1 * 0.933}{31\sqrt{35} \text{ Mpa}} \right) (22.2 \text{ mm})^{1.5} = 224 \text{ mm}$$

$$\ell_{dt} \text{ con gancho} = \left(\frac{420 \text{ Mpa} * 1 * 1 * 1 * 0.933}{23\sqrt{35} \text{ Mpa}} \right) (22.2 \text{ mm})^{1.5} = 302 \text{ mm}$$

El valor de la cabeza roscada fue suministrado por Ramalza s.a.s, teniendo un valor para cabeza #7 de \$9.000 pesos y para cabeza #6 de \$8.000. Estos costos incluyen mano de obra y el roscado de la varilla.

El valor para la cabeza soldada se calculó teniendo en cuenta el valor comercial de una platina de 16 mm (espesor necesario para barra #7).

Valor cabeza: (Área cabeza) x (Densidad acero) x (Costo acero) x (Espesor platina)

$$\text{Valor cabeza \#7: } \frac{0.045 \text{ m}^2 * \pi}{4} * 7800 \text{ kg/m}^3 * \$4.000 * 0.016 \text{ m} = \$794 \text{ x 2 (desperdicio)}$$

Valor mano de obra: Se discrimina teniendo en cuenta que la platina deberá ser perforada para poder atravesar la barra y posteriormente soldada en la parte inferior y superior de esta.

Cabeza roscada			
	Cantidad	Precio unitario	Valor
Cabeza barra roscada #7	1,00	\$ 9.000	\$ 9.000
Roscado	1,00	\$ -	\$ -
Mano de obra	1,00	\$ -	\$ -
TOTAL			\$ 9.000

Cabeza soldada			
	Cantidad	Precio unitario	Valor
Cabeza barra soldada #7 (45 mm)	1,00	\$ 1500	\$ 1500
Corte y Soldadura	1,00	\$ 600	\$ 600
Mano de obra	1,00	\$ 900	\$ 900
TOTAL			\$ 3.000

Gancho			
	Cantidad	Precio unitario	Valor
Gancho barra #7 (178 mm)	0.178	\$ 12,217	\$ 2175
Mano de obra	0.178	\$ 900	\$ 160
TOTAL			\$ 2.335

Tabla 47 Comparación costos cabeza roscada vs soldada. Elaboración propia

El costo de las barras soldadas es significativamente inferior respecto a las barras roscadas. Se debe tener en cuenta que esta soldadura deberá cumplir con estándares de calidad. El uso de barras soldadas puede tener complicaciones en su implementación, debido a que el área requerida por las cabezas es pequeña, lo cual implica una precisión en la mesa de corte tanto para el área necesaria como para el corte interno por el cual la barra deberá atravesar la platina; posteriormente el proceso de soldadura deberá ser empleado por personal capacitado. Se deberán realizar ensayos de tensión indicados en este trabajo para garantizar la unión entre la barra y la cabeza.

6.2. Análisis de costos longitud de anclaje ACI 318S-19:

Analizando la estructura para una sección en donde la longitud de anclaje entre las barras con cabeza y las barra con gancho no sea una limitante, se obtiene un aumento en el valor al hacer uso de barras con cabeza:

Sección 25x25			
Material	Cantidad	Precio unitario	Valor
Concreto 35 MPa (m ³)	0.06	\$ 423,433	\$ 26,465
Cabeza barra #7	2	\$ 9,000	\$ 18,000
Roscado	2	\$ -	\$ -
Longitud 2 barras #7 (m)	2.45	\$ 12,217	\$ 29,905
TOTAL			\$ 74,369

Sección 25x25			
Material	Cantidad	Precio unitario	Valor
Concreto 35 MPa (m ³)	0.06	\$ 423,433	\$ 26,465
Figurado (kg) Varilla 1 m	9.00	\$ 600	\$ 5,402
Longitud 2 barras #7 (m)	2.96	\$ 12,217	\$ 36,157
TOTAL			\$ 68,023

Tabla 48 Comparación precio barra #7 sección no variable. Elaboración propia

Se observa un incremento del 9% utilizando barras con cabeza para el análisis realizado sobre una conexión viga-columna, lo cual puede ser un costo adicional en el que se puede incurrir teniendo en cuenta los nudos extremos en donde se encuentra una gran congestión de refuerzo de la columna junto con la viga, esto impide una adecuada colocación y consolidación del concreto con la consecuente pérdida de capacidad del nudo. Las barras con cabeza logran ofrecer menor congestión del refuerzo debido a su disminución en el área y hacen posible el uso de barras de refuerzo más grandes. Esto permite una mejor consolidación del concreto debido a que se tiene un mayor espacio entre barras para el vertido y la vibración proporcionarían una mejora en la calidad de este.

Capítulo VII

CONCLUSIONES.

Con base en los resultados experimentales se puede concluir lo siguiente:

- El uso de barras con cabeza permite una reducción hasta del 21% en la longitud de anclaje respecto al uso de barras con gancho de acuerdo con el ACI 318S-19, lo cual podría permitir una reducción en las dimensiones de columnas, siempre y cuando estas cumplan con las solicitaciones.
- La normativa vigente en Estados Unidos (ACI 318S-19) da lugar a una longitud de anclaje menor a la permitida en Colombia actualmente (NSR 10). En el desarrollo de este trabajo se logró demostrar que la longitud de anclaje estipulada en la ACI cumple con los requisitos estructurales también estipulados en la NSR 10, teniendo un margen de seguridad que permite su uso en la construcción; siendo un valor inferior a la longitud permitida en Colombia, se recomienda evaluar esta reducción teniendo como marco de referencia este documento. Esto se logró mediante el análisis de treinta y cinco (35) ensayos de extracción ya descritos en donde se utilizaron materiales de la región junto con la mano de obra que se encuentran en nuestro país, permitiendo su aceptación en la construcción, logrando dar tranquilidad a los diseñadores para su uso.
- El uso de barras de mayor diámetro permite cumplir con el área mínima de refuerzo con menor número de barras lo cual permite reducir la posible congestión en nudos extremos, obteniendo una mejor distribución del concreto y así una mejor consolidación del nudo. El uso de barras #7 en una sección de 25x25 no es permitido al utilizar gancho por consiguiente se plantea el uso de barras de menor diámetro teniendo así un mayor número de barras, pero al hacer uso de barras con cabeza si es aceptable la barra #7 permitiendo así su uso y por consiguiente se requiere un menor número de barras para cumplir el refuerzo.
- En los ensayos se encontró que el uso de longitudes de anclaje inferiores a las calculadas con el ACI 318S-19 da lugar a una falla en el concreto que no permite que las barras desarrollen el esfuerzo de fluencia.
- Se evidenció que la mejor geometría para las cabezas es la circular, teniendo un mejor comportamiento y un aumento considerable en la carga que resiste el anclaje, respecto a las cabezas cuadradas.
- Basándonos en los resultados obtenidos para las cuatro conexiones viga columna, se logra determinar que su resistencia es acorde a la teórica de diseño, por consiguiente, reemplazando las barras con gancho por cabezas logra desarrollar un buen comportamiento del nodo, permitiendo una menor congestión de refuerzo y así una mejor consolidación del nodo. Se recomienda un mayor número de ensayos, y así poder determinar si el uso de barras con gancho disminuye la degradación de rigidez en los especímenes.

- Durante el análisis de costos se logró determinar que el uso de barras con cabeza permite una reducción cuando se obtienen barras de gran diámetro siempre y cuando se logre una reducción en la sección de la columna debido a la disminución en la longitud de anclaje (siempre y cuando la dimensión de la columna cumpla con las solicitaciones). Comparando el costo para secciones en donde no existe una reducción en la sección se evidencia un aumento de precio al utilizar barras con cabeza del 9% el cual se puede compensar realizando una disminución en el tiempo de mano de obra al tener barras a las cuales se debe realizar el figurado. Adicionalmente se puede garantizar una mejor consolidación del nudo.

Capítulo VIII

RECOMENDACIONES.

Para próximas investigaciones se recomienda:

- Realizar ensayos a flexión teniendo dos (2) o más barras en tensión, logrando así obtener un mejor acercamiento a la realidad para una conexión viga columna en donde las cargas aplicadas provocan flexión sobre los elementos. Adicionalmente analizar un pórtico en el cual la unión de la viga y las columnas sea mediante el uso de barras con cabeza (no gancho) en el cual la carga en estudio será aplicada sobre la viga simulando condiciones más cercanas a la realidad.
- Realizar un estudio del comportamiento de barras con cabeza circular mediante una unión soldada y no roscada. En el estudio realizado en este documento la geometría circular tuvo el mejor comportamiento, su unión era roscada, lo cual puede permitir analizar en una unión soldada si su comportamiento es similar logrando así realizar un análisis de costos para la determinación de la mejor unión a realizar.
- Estudiar el comportamiento de barras con doble cabeza como fue mencionado en Haitham H.Saeed, Ayman A. Abdulhamed. (2021). “Bond behavior of dual headed bars in concrete structures” verificando su comportamiento en estructuras ante carga dinámica.
- Evaluar el comportamiento de barras circulares acanaladas estudiadas por Shubham Singhala, Ajay Chourasia, Jalaj Parashara. (2021) “Anchorage behaviour of headed bars as connection system for precast reinforced concrete structural components”
- Se recomienda un mayor número de ensayos viga columna, y así poder determinar si el uso de barras con gancho disminuye la degradación de rigidez en los especímenes.

Capítulo IX

BIBLIOGRAFIA.

- ASTM. (2004). Standard Specification for Headed Bars for Concrete Reinforcement 1. *Changes, i*, 1–7. <https://doi.org/10.1520/A0970>
- NSR-10. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente.
- Wallace, John. (2016). Use of headed reinforcement in beam column joints. . NJ. National Science Foundation Headed Reinforcement Corporation ERICO Incorporation.
- Ghimire, K. P., Shao, Y., Darwin, D., & O'Reilly, M. (2019). Conventional and high-strength headed bars—Part 2: Data analysis. *ACI Structural Journal*, 116(3), 265–272. <https://doi.org/10.14359/51714480>
- Kabir, M. R., & Islam, M. (2014). Bond stress behavior between concrete and steel rebar: Critical investigation of pull-out test via Finite Element Modeling. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 5(1), 80–90. <https://doi.org/10.6088/ijcser.2014050008>
- Najafgholipour, M. A., Dehghan, S. M., Dooshabi, A., & Niroomandi, A. (2017). Finite element analysis of reinforced concrete beam-column connections with governing joint shear failure mode. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14(7), 1200–1225. <https://doi.org/10.1590/1679-78253682>
- Park, H. K., Yoon, Y. S., & Kim, Y. H. (2003). The effect of head plate details on the pull-out behaviour of headed bars. *Magazine of Concrete Research*, 55(6), 485–496. <https://doi.org/10.1680/macr.2003.55.6.485>
- Shao, Y. (2016). Anchorage of Headed Reinforcing Bars in Exterior Beam-Column Joints. *PhD Dissertation*, 1–274.
- ASTM A944-99, “Standard Test Method for Comparing Bond Strength of Steel Reinforcing Bars to Concrete Using Beam-End Specimens,” American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, September 1999.
- ASTM A970/A970M-97, “Standard Specification for Welded Headed Bars for Concrete Reinforcement,” American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, September 1997.
- Abrams, D.A., “Tests of Bond Between Concrete and Steel,” Engineering Experiment Station, University of Illinois Bulletin No. 71, Urbana, Illinois, December 1913.
- Bashandy, T.R., “Application of Headed Bars in Concrete Members,” PhD Dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, December 1996.
- Berner, D.E. and Hoff, G.C., “Headed Reinforcement in Disturbed Strain Regions of Concrete Members,” *Concrete International*, Vol. 16, No. 1, Detroit, Michigan, January 1994.
- DeVries, R.A., “Anchorage of Headed Reinforcement in Concrete,” PhD Dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, December 1996.
- Goto, Yukimasa, “Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars,” *Journal of the*

- American Concrete Institute, Proceedings Vol. 68, No. 4, pg. 244-251, Detroit, Michigan, April 1971.
- ACI Committee 408, 2003, "Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension," (ACI 408R-3), American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan
- Dyken, T., and Kepp, B., 1988, "Properties of T-Headed Reinforcing Bars in High Strength Concrete," Nordic Concrete Research, No. 7-04, Dec.
- Hong, S.-G., Chun, S.-C., Lee, S.-H., and Oh, B., 2007, "Strut-and-Tie Model for Development of Headed Bars in Exterior Beam-Column Joint," ACI Structural Journal, Vol. 104, No. 5, Sep.-Oct.
- McMackin, P. J., Slutter, R. G., and Fisher, J. W., 1973, "Headed Steel Anchor under Combined Loading," AISC Engineering Journal, Vol. 10, No. 2, Apr.-Jun., pp. 43-52
- Won Jong Chin, Young Hwan Park, Jeong-Rae Cho, Jin-Young Lee, Young-Soo Yoon. (2020). "Flexural behavior of a precast concrete deck connected with headed GFRP rebars and UHPC". [https:// doi:10.3390/ma13030604](https://doi.org/10.3390/ma13030604)
- Minh-Tung Tran, Quoc-Bao Bui, Bastian Sentosa, Nhat-Tien Nguyen, Trung-Hieu Duong and Olivier Plé. (2018). "Sustainable RC Beam-Column Connections with Headed Bars: A Formula for Shear Strength Evaluation". [https:// doi:10.3390/su10020401](https://doi.org/10.3390/su10020401)
- Abdul Hossein Paknejadi, Kiachehr Behfarnia. (2020). "Performance of reinforced self-consolidating concrete beam-column joints with headed bars subjected to pseudo-static cyclic loading". [https:// doi.org/10.1016/j.asej.2019.12.008](https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.12.008)
- Haitham H.Saeed, Ayman A. Abdulhamed. (2021). "Bond behavior of dual headed bars in concrete structures". [https:// doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00553](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00553)
- Shubham Singhala, Ajay Chourasiaa, Jalaj Parashara. (2021) "Anchorage behaviour of headed bars as connection system for precast reinforced concrete structural components". [https:// doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.043](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.043)

Capítulo X

ANEXOS.

10.1. Análisis de costos:

Anexos 1 Análisis de costos

10.1.1. Barra #7 longitud de anclaje ACI 318S-19:

$$\ell_{dt} \text{ con cabeza} = \left(\frac{420 \text{ Mpa} * 1 * 1 * 1 * 0.933}{31\sqrt{35 \text{ Mpa}}} \right) (22.2 \text{ mm})^{1.5} = 224 \text{ mm}$$

$$\ell_{dt} \text{ con gancho} = \left(\frac{420 \text{ Mpa} * 1 * 1 * 1 * 0.933}{23\sqrt{35 \text{ Mpa}}} \right) (22.2 \text{ mm})^{1.5} = 302 \text{ mm}$$

Se observa que el uso de barras con gancho no permite utilizar secciones menores a 35x35.

Por consiguiente, se plantea:

Concreto:

Valor m³ de concreto 35 MPa Cemex= \$423.433 IVA incluido.

Sección 0.25 x 0.25 x 1.00 = \$26.465

Sección 0.35 x 0.35 x 1.00 = \$51.871

Acero:

El refuerzo a utilizar es calculado para una columna con cuantía mínima

$$\rho_{min} = 0.01 = \frac{A_s}{b * d}$$

As= 0.01 * 250 * 210 = 525 mm²

As varilla #7 = 387 mm²

Se requiere utilizar dos (2) varillas #7.

Valor doblez (kg) = \$600

Valor cabeza barra #7 = \$9.000

Valor barra #7 por 6 metros= \$73.304

Se asume una longitud de barra de un metro más la longitud de anclaje correspondiente.

Barra #7

Longitud barra con cabeza= 1000 mm + 224 mm (anclaje) = 1224 mm.

Longitud barra con gancho= 1000 mm + 302 mm (anclaje) + 178 mm (gancho) = 1480 mm.

Sección 25x25			
Material	Cantidad	Precio unitario	Valor
Concreto 35 MPa (m ³)	0.06	\$ 423,433	\$ 26,465
Cabeza barra #7	2	\$ 9,000	\$ 18,000
Roscado	2	\$ -	\$ -
Longitud 2 barras #7 (m)	2.45	\$ 12,217	\$ 29,905
TOTAL			\$ 74,369

Sección 35x35			
Material	Cantidad	Precio unitario	Valor
Concreto 35 MPa (m ³)	0.12	\$ 423,433	\$ 51,871
Figurado (kg) Varilla 1 m	9.00	\$ 600	\$ 5,402
Longitud 2 barras #7 (m)	2.96	\$ 12,217	\$ 36,157
TOTAL			\$ 93,429

Tabla 49 Comparación precio barra #7. Elaboración propia

Nota: Longitud de gancho barra #7 = 178 mm. El valor de la “cabeza” de la barra incluye el valor de roscado, por consiguiente, su valor se indica como nulo en las tablas.

Se observa una reducción del 26% en el valor de la conexión viga columna para una conexión que consta de dos (2) barras #7 al utilizar barras con cabeza respecto a barras con gancho, la longitud de anclaje con cabeza logra una disminución en la sección, lo cual indica una disminución en el valor del concreto.

10.1.2. Barra #6 longitud de anclaje ACI 318S-19:

$$\ell_{at} \text{ con cabeza} = \left(\frac{420 \text{ Mpa} * 1 * 1 * 1 * 0.933}{31\sqrt{35 \text{ Mpa}}} \right) (19.1 \text{ mm})^{1.5} = 178 \text{ mm}$$

$$\ell_{at} \text{ con gancho} = \left(\frac{420 \text{ Mpa} * 1 * 1 * 1 * 0.933}{23\sqrt{35 \text{ Mpa}}} \right) (19.1 \text{ mm})^{1.5} = 240 \text{ mm}$$

Se observa que el uso de barras con gancho no permite utilizar secciones menores a 28x28.

Concreto:

Valor m³ de concreto 35 MPa Cemex= \$423.433 IVA incluido.

Sección 0.25 x 0.25 x 1.00 = \$26.465

Sección 0.28 x 0.28 x 1.00 = \$33.197

Acero:

As= 0.01 * 250 * 210 = 525 mm²

As varilla #6 = 284 mm²

Se requiere utilizar dos (2) varillas #6.

Valor dobléz (kg) = \$600

Valor cabeza barra #6 = \$8.000

Valor barra #6 por 6 metros= \$53.907

Barra #6

Longitud barra con cabeza= 1000 mm + 178 mm (anclaje) = 1178 mm.

Longitud barra con gancho= 1000 mm + 240 mm (anclaje) + 153 mm (gancho) = 1393 mm.

Sección 25x25			
Material	Cantidad	Precio unitario	Valor
Concreto 35 MPa (m ³)	0.06	\$ 423,433	\$ 26,465
Cabeza barra #6	2	\$ 8,000	\$ 16,000
Roscado	2	\$ -	\$ -
Longitud 2 barras #6 (m)	2.36	\$ 8,985	\$ 21,161
TOTAL			\$ 63,626

Sección 28x28			
Material	Cantidad	Precio unitario	Valor
Concreto 35 MPa (m ³)	0.08	\$ 423,433	\$ 33,197
Figurado (kg) Varilla 1 m	8.47	\$ 600	\$ 5,083
Longitud 2 barras #7 (m)	2.78	\$ 8,985	\$ 25,021
TOTAL			\$ 63,301

Tabla 50 Comparación precio barra #6. Elaboración propia

Nota: Longitud de gancho barra #6 = 153 mm. El valor de la “cabeza” de la barra incluye el valor de roscado, por consiguiente, su valor se indica como nulo en las tablas.

Se observo en el análisis presentado anteriormente que el uso de las barras #7 tiene una disminución considerable en el precio al utilizar barras con cabeza respecto a las barras con gancho. Por otra parte, las barras #6 tienen un costo superior del 1%, lo cual puede no ser muy representativo para el costo del proyecto, teniendo en cuenta que el tiempo del figurado es superior a la instalación de barras con cabeza.

10.1.3. Análisis de costos longitud de anclaje ACI 318S-19:

Analizando la estructura para una sección en donde la longitud de anclaje entre las barras con cabeza y las barra con gancho no sea una limitante, se obtiene un aumento en el valor al hacer uso de barras con cabeza:

Sección 25x25			
Material	Cantidad	Precio unitario	Valor
Concreto 35 MPa (m ³)	0.06	\$ 423,433	\$ 26,465
Cabeza barra #7	2	\$ 9,000	\$ 18,000
Roscado	2	\$ -	\$ -
Longitud 2 barras #7 (m)	2.45	\$ 12,217	\$ 29,905
TOTAL			\$ 74,369

Sección 25x25			
Material	Cantidad	Precio unitario	Valor
Concreto 35 MPa (m ³)	0.06	\$ 423,433	\$ 26,465
Figurado (kg) Varilla 1 m	9.00	\$ 600	\$ 5,402
Longitud 2 barras #7 (m)	2.96	\$ 12,217	\$ 36,157
TOTAL			\$ 68,023

Tabla 51 Comparación precio barra #7 sección no variable. Elaboración propia

Se observa un incremento del 9% utilizando barras con cabeza para el análisis realizado sobre una conexión viga-columna, lo cual puede ser un costo adicional en el que se puede incurrir teniendo en cuenta los nudos extremos en donde se encuentra una gran congestión de refuerzo de la columna junto con la viga, esto impide una adecuada colocación y consolidación del concreto con la consecuente pérdida de capacidad del nudo. Las barras con cabeza logran ofrecer menor congestión del refuerzo debido a su disminución en el área y hacen posible el uso de barras de refuerzo más grandes. Esto permite una mejor consolidación del concreto debido a que se tiene un mayor espacio entre barras para el vertido y la vibración proporcionaran una mejora en la calidad de este.

10.1.4. Análisis de costos con reducción en barras:

Se realizó un análisis de costos al tener una sección de viga de 25x25 en donde se reemplaza el uso de barras #5 con gancho, por barras #7 con cabeza, para una resistencia de 35 Mpa (obtenida en el desarrollo del trabajo).

Realizando un análisis hipotético en donde se requiera un área de refuerzo de $A_s = 1100 \text{ mm}^2$.

As varilla #5 = 199 mm^2 requiere 6 varillas = 1194 mm^2

As varilla #7 = 387 mm^2 requiere 3 varillas = 1161 mm^2

Barra #5

$$Gancho = \ell_{dt} = \left(\frac{420 \text{ Mpa} * 1 * 1 * 1 * 1}{23\sqrt{35 \text{ Mpa}}} \right) (12.7 \text{ mm})^{1.5} = 182 \text{ mm}$$

Barra #7

$$Cabeza = \ell_{dt} = \left(\frac{420 \text{ Mpa} * 1 * 1 * 1 * 1}{31\sqrt{35 \text{ Mpa}}} \right) (22.225 \text{ mm})^{1.5} = 224 \text{ mm}$$

Las barras pueden ser utilizadas según su longitud de anclaje en una columna de 25x25.

Se asume una longitud de barra de un metro más la longitud de anclaje correspondiente.

Barra #5

Longitud barra con gancho = $1000 \text{ mm} + 182 \text{ mm}$ (anclaje) + 127 mm (gancho) = 1309 mm .

Barra #7

Longitud barra con cabeza = $1000 \text{ mm} + 224 \text{ mm}$ (anclaje) = 1224 mm .

Sección 25x25			
Material	Cantidad	Precio unitario	Valor
Concreto 35 MPa (m^3)	0.06	\$ 423,433	\$ 26,465
Cabeza barra #7	3	\$ 9,000	\$ 27,000
Roscado	3	\$ -	\$ -
Longitud 3 barras #7 (m)	3.67	\$ 12,217	\$ 44,857
TOTAL			\$ 98,322

Sección 25x25			
Material	Cantidad	Precio unitario	Valor
Concreto 35 MPa (m ³)	0.06	\$ 423,433	\$ 26,465
Figurado (kg) Varilla 1 m	12.19	\$ 600	\$ 7,315
Barra #5 Longitud gancho (m)	1.09	\$ 12,217	\$ 21,746
Longitud 6 barras #7 (m)	7.85	\$ 6,642	\$ 52,175
TOTAL			\$ 107,700

Tabla 52 Comparación costos reducción número de barras. Elaboración propia

Se observa una reducción de costos del 10% al hacer uso de barras con cabeza. Se obtiene una mayor separación entre barras al tener una reducción de tres (3) barras logrando el objetivo de tener una mejor consolidación del concreto. Adicionalmente se obtiene una reducción en el tiempo de mano de obra, el cual no se puede analizar como un costo directo en la construcción para una sola conexión viga-columna, se puede analizar a gran escala en donde la instalación de barras con cabeza al tener una menor cantidad de barras permite un mayor rendimiento.

10.2. Cotización concreto Cemex Colombia S.A:

Se adjunta cotización del concreto utilizado en el desarrollo de este proyecto soportando así el análisis de precios unitarios realizado con estos valores.



CEMEX COLOMBIA S.A.
NIT. 880.002.623-1

Fecha:	April 15, 2021	PROFORMA No.	9000053715 - 4430181123
NIT:	8.600.348.113 -		
Cliente:	50118833	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO	
Obra:	66955890	ATS REFC 1407289 CAMILO ESCOBAR	Comercial Responsable: Lady Stephanie Fori
Dirección Facturación:	KM 5 VRD VIA ZIPA VRD RIO GRANDE FCA PUERTA DEL SOL CAJICA		
Persona Solicitante:	CAMILO ANDRÉS ESCOBAR CAICEDO		
Cargo:			
Teléfono:	3185894954	Email:	camiloandres.escobar@cemex.com

Código Producto	Descripción	Unidad	Cantidad	VriUnitario	VriTotal
20018280	ANTICIPO 1-350-5-28-13	M3	3,5	\$ 351.826	\$ 1.231.391
60003171	ANTICIPO Carga Incompleta Colocación	EA	3,5	\$ 40.494	\$ 141.729
60006933	ANTICIPO CARGO DE SOSTENIBILIDAD	EA	3,5	\$ 4.000	\$ 14.000

Observaciones:
Proforma Valida por un mes a partir de la fecha generada*

Importe en letras:	Subtotal	\$	1.231.120
SON: UN MILLON SEISCIENTOS CINCUENTA MIL SEISCIENTOS SETENTA Y TRES PESOS	IVA	19%	\$ 263.553
	Neto a pagar	\$	1.860.873

Banco de Bogotá 9088881	Helm Bank 12395265	Davivienda 470-169985731	BBVA 297 95045 3	Bancolombia 17201504213	Convenio Bancolombia 51245
----------------------------	-----------------------	-----------------------------	---------------------	----------------------------	-------------------------------

No practicar retención, este documento es una proforma, solo tiene efectos informativos para la generación de anticipos y los precios estipulados, no condiciona las facturas que se generen ni sus variaciones. Enviar soporte de consignación al correo Ingresos.colombia@cemex.com. Durante y posterior a la venta de materiales o prestación de servicios se podrán generar cargos adicionales que en esta factura proforma no están incluidos.

Anexos 2 Cotización concreto Cemex Colombia S.A

10.3. Cotización acero Ferrelugue S.A.S:

Se adjunta cotización del acero utilizado en el desarrollo de este proyecto soportando así el análisis de precios unitarios realizado con estos valores.

FERRELUGUE S.A.S
 NIT : 800,046,125 - 2
 CL 166 # 17 - 29
 BOGOTA D.C.-BOGOTA - COLOMBIA
 6051188
 f.electronica@ferrelugue.com

Responsables de iva - No Somos Grandes Contribuyentes Dian, - Somos
 Grandes Contribuyetes SHD Segun Res. DDI-032117 Del 25-10-2019- Somos
 autorretenedores Res.# 007236 del 23-06-2011, Retenedores de iva a
 Régimen Simple, Actividad CIIU 4663 6,9/1000



Cliente	ESCOBAR CAICEDO CAMILO	Teléfono	3185894954
NIT	1,061,790,670 - /Id. Extranjero :	Vendedor	MARTINEZ LOPEZ
Dirección	CALLE 55 6 16	Centro Costo	3
Ciudad	BOGOTA D.C.-BOGOTA - COLOMBIA	Numero	
Correo	camiloandres-escobar@hotmail.com		
Order Reference Prefijo			

FACTURA ELECTRÓNICA DE VENTA
FE03 5895

Fecha y Hora de Factura
 Generación 2021-02-10 11:39:56
 Expedición 2021-02-10 11:40:40
 Vencimiento 2021-02-10

Item	Código	Descripción	Cant	V. Unit	%Dsc	Valor Total
1	0020001002800	VARILLA CORRUGADA 3/4 x 6 mts	2	45,300.00	0	90,600.00
2	0020001003100	VARILLA CORRUGADA 7/8 x 6 mts	2	61,600.00	0	123,200.00
3	1510003000100	CORTES	20	700.00	0	14,000.00
4	0070001001100	BULTO CEMENTO GRIS CEMEX SUPER RESISTENTE	1	22,268.00	0	22,268.00

Total Bruto	250,068.00
IVA 19%	47,512.92
Total a Pagar	\$ 297.580,92

CONDICION DE PAGO

Credito Tarjeta Db-Cr Tarjeta Crédito 297.580,92 Cuota 1 Vence el 2021-02-10

VALOR EN LETRAS

Doscientos Noventa Y Siete Mil Quinientos Ochenta Pesos M/Cte Con 92/100

Electronicamente por Siglo SAS

Anexos 3 Cotización acero Ferrelugue S.A.S

10.4. Medición deformímetro en elementos con falla a flexión:

Se realizó la medición de la deformación obtenida por la falla a flexión de los especímenes mediante el uso de un deformímetro. Los datos obtenidos se muestran a continuación.

Barra #6 geometría circular profundidad 18 cm		
Carga (kgf)	Lectura deformímetro	Deformación (mm)
0	49.43	0
3	49.43	0
4	49.43	0
5	49.43	0
6	49.43	0
7	49.88	0.45
8	49.78	0.35
9	49.73	0.3
10	48.42	-1.01
11	48.09	-1.34
11.3	47.02	-2.41
11.5	46.36	-3.07
11.7	46.69	-2.74
11.9	45.25	-4.18
12	45.05	-4.38
12.2	44.69	-4.74
12.4	44.26	-5.17
12.5	44.07	-5.36
12.6	43.91	-5.52
12.9	43.89	-5.54
13	43.84	-5.59
13.1	43.8	-5.63
13.3	43.72	-5.71
13.4	43.62	-5.81
13.5	43.61	-5.82
13.7	43.57	-5.86
13.8	43.55	-5.88

Anexos 4 Medición flexión con deformímetro. Barra #6 geometría circular. Elaboración propia

Barra #7 geometría cuadrada profundidad 22.4 cm		
Carga (kgf)	Lectura deformímetro	Deformación (mm)
0	42.63	0
7	42.63	0
7.5	42.5	0.13
8	42.41	0.22
8.5	42.35	0.28
9	42.26	0.37
9.5	42.15	0.48
10	41.99	0.64
10.5	41.64	0.99
11	41.45	1.18
11.5	41.16	1.47
12	40.05	2.58
12.5	39.69	2.94
13	38.41	4.22
13.1	37.3	5.33
13.3	37.02	5.61
13.5	36.64	5.99
13	36.43	6.2
13.8	36.03	6.6
14	35.5	7.13
14.2	35.2	7.43
14.4	34.51	8.12
14.6	33.3	9.33
14.8	32.46	10.17

Anexos 5 Medición flexión con deformímetro. Barra #7 geometría cuadrada. Elaboración propia

Barra #7 geometría circular profundidad 22.4 cm		
Carga (kgf)	Lectura deformímetro	Deformación (mm)
0	42.14	0
7	41.5	0.64
7.5	41.42	0.72
8	41.33	0.81
8.5	41.22	0.92
9	41.05	1.09
9.5	40.69	1.45
10	40.58	1.56
10.5	39.85	2.29
11	39.39	2.75
11.5	38.5	3.64
12	37.64	4.5
12.5	36.82	5.32
13	36.2	5.94
13.2	35.79	6.35
13.4	35.11	7.03
13.5	34.05	8.09
13.7	34.49	7.65
13.9	34.08	8.06
14.1	33.71	8.43
14.4	33.3	8.84
14.6	32.9	9.24
14.8	32.4	9.74
15	31.8	10.34
15.2	31.23	10.91

Anexos 6 Medición flexión con deformímetro. Barra #7 geometría circular. Elaboración propia

10.5. Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #1)

Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #1)				
	K	K/Ko	Carga (+) (kN)	Carga (-) (kN)
CURVA 1	7,28	1,00	6,94	2,80
CURVA 2	7,19	0,99	6,93	2,86
CURVA 3	7,03	0,96	7,69	2,02
CURVA 4	7,02	0,96	7,69	2,04
CURVA 5	7,02	0,96	8,65	0,92
CURVA 6	6,85	0,94	8,67	0,94
CURVA 7	6,65	0,91	10,10	-0,47
CURVA 8	6,62	0,91	10,10	-0,41
CURVA 9	6,45	0,89	12,05	-2,39
CURVA 10	6,38	0,88	12,03	-2,27
CURVA 11	6,20	0,85	14,55	-4,81
CURVA 12	6,13	0,84	14,50	-4,62
CURVA 13	5,88	0,81	17,56	-8,21
CURVA 14	5,75	0,79	17,20	-8,03
CURVA 15	5,33	0,73	19,15	-13,57
CURVA 16	5,16	0,71	18,25	-13,40
CURVA 17	4,81	0,66	22,44	-18,90
CURVA 18	4,67	0,64	21,89	-18,30
CURVA 19	4,35	0,60	26,71	-25,65
CURVA 20	4,20	0,58	25,53	-25,00
CURVA 21	3,97	0,55	29,18	-32,85
CURVA 22	3,88	0,53	28,62	-32,04
CURVA 23	3,62	0,50	30,46	-39,22
CURVA 24	3,57	0,49	30,70	-37,93
CURVA 25	3,41	0,47	33,74	-44,05
CURVA 26	3,35	0,46	33,50	-43,03
CURVA 27	3,29	0,45	37,85	-49,09
CURVA 28	3,22	0,44	36,95	-48,10
CURVA 29	3,15	0,43	40,51	-53,94
CURVA 30	3,09	0,42	39,77	-53,01
CURVA 31	3,01	0,41	43,12	-58,17
CURVA 32	2,96	0,41	42,30	-57,26
CURVA 33	2,84	0,39	44,60	-61,12
CURVA 34	2,79	0,38	43,65	-60,04
CURVA 35	2,31	0,32	47,69	-64,14
CURVA 36	2,16	0,30	43,65	-60,81

CURVA 37	1,82	0,25	46,05	-62,74
CURVA 38	1,69	0,23	41,71	-59,33
CURVA 39	1,49	0,21	44,36	-61,17
CURVA 40	1,39	0,19	40,26	-57,99
CURVA 41	1,28	0,18	43,75	-60,76
CURVA 42	1,21	0,17	40,78	-58,19

Anexos 7 Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #1). Elaboración propia.

10.6. Curvatura (Barra con cabeza ensayo #1)

ϕ en cada ciclo de carga ensayo #1		
	ϕ max (Rad/m)	ϕ min (Rad/m)
CURVA 1	0,010279989	-0,01028348
CURVA 2	0,017990854	0,012845623
CURVA 3	0,015421729	-0,012863077
CURVA 4	0,020559979	-0,0257087
CURVA 5	0,023132594	-0,012863077
CURVA 6	0,025701719	-0,012863077
CURVA 7	0,025701719	-0,0257087
CURVA 8	0,030843459	-0,038571776
CURVA 9	0,043696063	-0,0257087
CURVA 10	0,064259532	-0,038571776
CURVA 11	0,066828657	-0,0257087
CURVA 12	0,074539522	-0,038571776
CURVA 13	0,074539522	-0,038571776
CURVA 14	0,084823002	-0,038571776
CURVA 15	0,084823002	-0,0514174
CURVA 16	0,089964742	-0,064263023
CURVA 17	0,089964742	-0,064263023
CURVA 18	0,102817346	-0,089971723
CURVA 19	0,100244731	-0,089971723

Anexos 8 Curvatura (Barra con cabeza ensayo #1). Elaboración propia.

10.7. Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #2):

Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #2)				
	K	K/Ko	Carga (+) (kN)	Carga (-) (kN)
CURVA 1	8,95	1,00	17,12	-13,31
CURVA 2	8,64	0,97	16,80	-12,58
CURVA 3	7,28	0,81	18,60	-16,13
CURVA 4	7,08	0,79	18,33	-15,47
CURVA 5	5,94	0,66	19,54	-20,25
CURVA 6	5,83	0,65	19,44	-19,58

CURVA 7	5,15	0,58	23,11	-25,01
CURVA 8	4,97	0,56	22,49	-23,94
CURVA 9	4,49	0,50	29,12	-29,67
CURVA 10	4,39	0,49	28,56	-29,02
CURVA 11	3,90	0,44	34,12	-37,46
CURVA 12	3,77	0,42	33,02	-36,23
CURVA 13	3,41	0,38	41,41	-46,34
CURVA 14	3,33	0,37	40,41	-45,45
CURVA 15	3,00	0,34	51,38	-56,69
CURVA 16	2,92	0,33	49,63	-55,49
CURVA 17	2,50	0,28	56,22	-60,65
CURVA 18	2,30	0,26	50,37	-57,24
CURVA 19	1,94	0,22	52,93	-58,66
CURVA 20	1,80	0,20	48,48	-55,41
CURVA 21	1,57	0,18	52,37	-54,93
CURVA 22	1,36	0,15	51,70	-55,93
CURVA 23	1,30	0,15	49,16	-53,74
CURVA 24	1,18	0,13	51,46	-55,14
CURVA 25	1,13	0,13	48,90	-52,88
CURVA 26	1,06	0,12	51,74	-55,26
CURVA 27	1,02	0,11	49,81	-53,12
CURVA 28	0,96	0,11	51,94	-54,69
CURVA 29	0,91	0,10	56,98	-52,39
CURVA 30	0,79	0,09	56,98	-57,87
CURVA 31	0,73	0,08	51,82	-54,06
CURVA 32	0,66	0,07	56,75	-61,41
CURVA 33	0,61	0,07	52,19	-57,19
CURVA 34	0,54	0,06	51,31	-60,23

Anexos 9 Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #2). Elaboración propia.

10.8. Curvatura (Barra con cabeza ensayo #2)

ϕ en cada ciclo de carga ensayo #2		
	ϕ max (Rad/m)	ϕ min (Rad/m)
CURVA 1	0,00771261	0,00128631
CURVA 2	0,006426302	0,00128631
CURVA 3	0,006426302	0,00128631
CURVA 4	0,006426302	0,00128631
CURVA 5	0,008997172	0,00128631
CURVA 6	0,00771261	0,00128631
CURVA 7	0,008347534	0,00128631
CURVA 8	0,008997172	0,00128631

CURVA 9	0,010281735	-0,00128456
CURVA 10	0,014138912	-0,00128456
CURVA 11	0,014138912	-0,00256912
CURVA 12	0,01782463	-0,00256912
CURVA 13	0,021849777	-0,00256912
CURVA 14	0,022457943	-0,00385543
CURVA 15	0,023134339	-0,00385543
CURVA 16	0,030845204	-0,00771086
CURVA 17	0,028274334	-0,0115663
CURVA 18	0,052694981	-0,01028173
CURVA 19	0,050124111	-0,01028173
CURVA 20	0,060405845	-0,01670804
CURVA 21	0,080969315	-0,02570346
CURVA 22	0,087395617	-0,0287154
CURVA 23	0,105388216	-0,03341433
CURVA 24	0,087395617	-0,0295589
CURVA 25	0,09724854	-0,03470064
CURVA 26	0,125951685	-0,03470064

Anexos 10 Curvatura (Barra con cabeza ensayo #2). Elaboración propia.

10.9. Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #3):

Degradación de rigidez (Barra con gancho ensayo #3)				
	K	K/Ko	Carga (+) (kN)	Carga (-) (kN)
CURVA 1	7,12	1,00	20,42	8,23
CURVA 2	7,02	0,99	20,30	8,29
CURVA 3	6,48	0,91	20,30	8,29
CURVA 4	6,44	0,91	21,21	5,61
CURVA 5	6,04	0,85	22,75	2,18
CURVA 6	6,00	0,84	22,63	2,19
CURVA 7	5,93	0,83	25,22	-3,08
CURVA 8	5,81	0,82	24,70	-3,04
CURVA 9	5,70	0,80	27,56	-10,57
CURVA 10	5,53	0,78	26,72	-10,28
CURVA 11	4,87	0,68	30,61	-14,92
CURVA 12	4,67	0,66	29,46	-14,26
CURVA 13	3,93	0,55	32,25	-19,26
CURVA 14	3,93	0,55	32,56	-18,94
CURVA 15	3,46	0,49	38,18	-25,31
CURVA 16	3,37	0,47	37,34	-24,65
CURVA 17	3,05	0,43	45,04	-33,34
CURVA 18	2,96	0,42	43,59	-32,60
CURVA 19	2,68	0,38	52,36	-44,09

CURVA 20	2,60	0,37	50,46	-43,08
CURVA 21	2,22	0,31	56,69	-47,32
CURVA 22	2,07	0,29	51,52	-45,28
CURVA 23	1,81	0,25	56,53	-47,79
CURVA 24	1,67	0,23	50,93	-45,29
CURVA 25	1,51	0,21	55,67	-47,75
CURVA 26	1,41	0,20	50,53	-45,63
CURVA 27	1,29	0,18	54,58	-47,69
CURVA 28	1,21	0,17	49,92	-45,68
CURVA 29	1,13	0,16	53,34	-48,45
CURVA 30	1,06	0,15	49,42	-46,32
CURVA 31	1,00	0,14	51,89	-48,79
CURVA 32	0,93	0,13	47,86	-46,41
CURVA 33	0,89	0,13	50,19	-49,31
CURVA 34	0,82	0,12	45,58	-46,49
CURVA 35	0,72	0,10	52,93	-51,53
CURVA 36	0,60	0,08	41,50	-45,30
CURVA 37	0,50	0,07	40,96	-47,83
CURVA 38	0,40	0,06	31,02	-39,97
CURVA 39	0,37	0,05	32,33	-46,16
CURVA 40	0,31	0,04	27,73	-37,72
CURVA 41	0,28	0,04	29,32	-39,95

Anexos 11 Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #3). Elaboración propia.

10.10. Curvatura (Barra con cabeza ensayo #3)

ϕ en cada ciclo de carga ensayo #3		
	ϕ max (Rad/m)	ϕ min (Rad/m)
CURVA 1	0	-0,01773255
CURVA 2	0	-0,01925971
CURVA 3	0	-0,02368412
CURVA 4	0	-0,01972222
CURVA 5	0,003269583	-0,01874775
CURVA 6	0,000267617	-0,02183116
CURVA 7	0,023817927	-0,01710423
CURVA 8	0,021269746	-0,01896591
CURVA 9	0,034499342	-0,02228204
CURVA 10	0,032998358	-0,02469641
CURVA 11	0,041469023	-0,04478224
CURVA 12	0,063087835	-0,04697845
CURVA 13	0,083194028	-0,0275762
CURVA 14	0,079587014	-0,03320489
CURVA 15	0,089035063	-0,02469641

CURVA 16	0,087964594	-0,02955424
CURVA 17	0,076410515	-0,04642576
CURVA 18	0,133936567	-0,0629773
CURVA 19	0,129794319	-0,07941248
CURVA 20	0,12255702	-0,08646652
CURVA 21	0,115936404	-0,07279477
CURVA 22	0,128642401	-0,07753625
CURVA 23	0,120183372	-0,07388561
CURVA 24	0,125826604	-0,06803875
CURVA 25	0,125116836	-0,07256206
CURVA 26	0,117437388	-0,06872234

Anexos 12 Curvatura (Barra con cabeza ensayo #3). Elaboración propia.

10.11. Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #4):

Degradación de rigidez (Barra con gancho ensayo #4)				
	K	K/Ko	Carga (+) (kN)	Carga (-) (kN)
CURVA 1	9,29	1,00	7,25	-8,74
CURVA 2	9,25	1,00	7,04	-8,85
CURVA 3	8,61	0,93	8,53	-12,39
CURVA 4	8,47	0,91	8,21	-12,36
CURVA 5	7,79	0,84	10,20	-16,36
CURVA 6	7,68	0,83	10,13	-16,05
CURVA 7	6,54	0,70	11,49	-19,75
CURVA 8	6,20	0,67	11,37	-18,28
CURVA 9	5,29	0,57	13,65	-21,82
CURVA 10	5,13	0,55	13,03	-21,38
CURVA 11	4,71	0,51	17,54	-26,55
CURVA 12	4,71	0,51	17,54	-26,55
CURVA 13	4,53	0,49	16,55	-25,84
CURVA 14	4,12	0,44	22,84	-31,11
CURVA 15	3,96	0,43	21,95	-29,99
CURVA 16	3,37	0,36	27,08	-34,82
CURVA 17	3,22	0,35	25,53	-33,68
CURVA 18	2,85	0,31	32,88	-40,50
CURVA 19	2,75	0,30	31,39	-39,31
CURVA 20	2,43	0,26	40,23	-47,39
CURVA 21	2,34	0,25	38,35	-45,79
CURVA 22	2,04	0,22	44,39	-50,88
CURVA 23	1,92	0,21	41,50	-48,47
CURVA 24	1,66	0,18	45,14	-50,67
CURVA 25	1,53	0,16	41,06	-46,90

CURVA 26	1,33	0,14	43,62	-47,19
CURVA 27	1,18	0,13	38,46	-42,03
CURVA 28	0,98	0,11	37,45	-39,94
CURVA 29	0,81	0,09	30,51	-33,95
CURVA 30	0,68	0,07	29,99	-31,67
CURVA 31	0,56	0,06	23,58	-26,68
CURVA 32	0,48	0,05	23,24	-25,58
CURVA 33	0,40	0,04	18,03	-22,19
CURVA 34	0,35	0,04	18,04	-21,07
CURVA 35	0,28	0,03	13,29	-18,15
CURVA 36	0,22	0,02	15,91	-16,28
CURVA 37	0,15	0,02	7,63	-13,91
CURVA 38	0,12	0,01	7,74	-13,69
CURVA 39	0,07	0,01	0,47	-12,58
CURVA 40	0,06	0,01	0,78	-12,52
CURVA 41	0,05	0,01	-2,19	-12,06
CURVA 42	0,05	0,01	-1,02	-14,22
CURVA 43	0,04	0,00	-3,20	-7,64

Anexos 13 Degradación de rigidez (Barra con cabeza ensayo #4). Elaboración propia.