

**Comparación del Comportamiento de Empalmes Mecánicos con Empalmes
Tradicionales**

Cristian David Mora Bermúdez y Diego Alejandro Ortega Leal

Facultad De Ingeniería Civil,
Universidad Santo Tomás

Director
Gabriel Santiago Silva Vega

2021

Notas del Autor

Cristian Mora, Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomas, Diego
Ortega Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomas – Bogotá

Trabajo de Grado para obtener el título de Ingeniero Civil.

Nota de aceptación

Director de Trabajo de Grado
Ing. Gabriel Santiago Silva Vega

Jurado 1
Ferney Oswaldo Peña Rey

Jurado 2
Rafael Alejandro Perez Marta

Bogotá D.C., abril de 2021

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	9
2. OBJETIVOS.....	10
2.1. OBJETIVO GENERAL	10
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
3. JUSTIFICACIÓN.....	10
4. MARCO REFERENCIAL	11
4.1. MARCO TEÓRICO.....	11
4.1.1. Empalmes por traslapo en barras corrugadas:	12
4.1.2. Longitud de Desarrollo y Traslapo en barras corrugadas.....	12
4.1.3. Empalmes mecánicos en varillas corrugadas.....	16
4.1.4. Ensayo de tracción	21
4.1.5. Grafica Esfuerzo vs Deformación.....	23
4.1.6. Ensayo de Carga y Descarga.....	25
4.1.7. Corrosión en el acero.	26
4.1.8. Electrolisis	27
4.2. MARCO CONCEPTUAL	28
4.3. MARCO HISTÓRICO (ESTADO DEL ARTE)	30
4.4. MARCO LEGAL O NORMATIVIDAD APLICABLE	31
5. METODOLOGÍA.....	31
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	34
6.1. ENSAYOS DE TRACCIÓN	34
6.1.1. Conectores roscados.....	36
Barras de acero corrugado #4 (1/2") empalmadas por conector roscado.....	37
Barras de acero corrugado #5 (5/8") empalmadas por conector roscado.....	40
Barras de acero corrugado #6 (3/4") empalmadas por conector roscado.....	41
Barras de acero corrugado #4 (1/2") y #5 (5/8") empalmadas por conector de transición roscado	43
Barras de acero corrugado #5 (5/8") y #6 (3/4") empalmadas por conector de transición roscado	45
6.1.2. Conectores de tornillo.....	48
Barras de acero corrugado #4 (1/2") empalmadas por conector de tornillo.....	48

Barras de acero corrugado #5 (5/8") empalmadas por conector de tornillo.....	50
Barras de acero corrugado #6 (3/4") empalmadas por conector de tornillo.....	52
6.2. EMPALMES POR TRASLAPO	56
6.3. ENSAYOS DE CARGA Y DESCARGA.....	58
6.3.1. Barras de acero corrugado #4 (1/2") empalmadas por conector roscado, ensayo tipo 1.....	58
6.3.2. Barras de acero corrugado #5 (5/8") empalmadas por conector roscado, ensayo tipo 2.....	61
6.3.3. Barras de acero corrugado #6 (3/4") empalmadas por conector roscado, ensayo tipo 2.....	63
6.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS.....	66
6.4.1. Costos de empalmes por traslapo.....	66
6.4.2. Costos de empalmes mecánicos.....	66
6.5. ENSAYOS DE CORROSIÓN INDUCIDA.....	73
6.6.1. Ensayo a tracción de barras de acero corrugado #5 (5/8") empalmadas por conector roscado sometidos a corrosión inducida.....	77
CONCLUSIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	82
ANEXOS	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Fórmulas para el cálculo de longitud de desarrollo</i>	15
Tabla 2 <i>Composición Química Acero SAE 1045</i>	21
Tabla 3 <i>Propiedades Mecánicas Acero SAE 1045</i>	21
Tabla 4 <i>Requisitos de Tracción</i>	34
Tabla 5 <i>Resultados Después de la Falla</i>	55
Tabla 6 <i>Resultados Después de la Falla</i>	55
Tabla 7 <i>Diámetros y Longitudes de Desarrollo Para Varillas Comerciales</i>	57
Tabla 8 <i>Costo unitario de empalmes por traslapo</i>	66
Tabla 9 <i>Costos Unitarios De Empalmes Mecánicos En Pesos Colombianos 2020</i>	67
Tabla 10 <i>Tabla Comparativa de Costos Directos de Tipos de Empalmes</i>	68
Tabla 11 <i>Grafica de costo vs tipo de empalme según diámetro de barra</i>	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 <i>Empalmes por Traslapo</i>	12
Figura 2 <i>Conector Roscado Tipo 2</i>	18
Figura 3 <i>Conector Roscado Tipo 2</i>	18
Figura 4 <i>Conector de Tornillo tipo 2</i>	18
Figura 5 <i>Conector Extruido Tipo 2</i>	19
Figura 6 <i>Otros Empalmes Mecánicos</i>	19
Figura 7 <i>Conector Atornillado Zap Screwlok</i>	20
Figura 8 <i>Conector Roscado Cónico Taper Threaded Grip- Twist</i>	20
Figura 9 <i>Maquina Universal</i>	22
Figura 10 <i>Procesador de Datos</i>	22
Figura 11 <i>Indicador de Lectura</i>	23
Figura 12 <i>Grafica de Esfuerzo – Deformación</i>	24
Figura 13 <i>Empalmes mecánicos para ensayos de tracción</i>	35
Figura 14 <i>Maquina Roscadora de Barras</i> Figura 15 <i>Maquina Roscadora de Barras</i>	37
Figura 16 <i>Grafica Esfuerzo vs deformación en empalme roscado #4.</i>	38
Figura 17 <i>Ruptura de barra de acero corrugado #4 (1/2") con conector roscado</i>	39
Figura 18 <i>Ruptura de barra de acero corrugado #4 (1/2") con conector roscado</i>	39
Figura 19 <i>Grafica Esfuerzo vs deformación en empalme roscado #5</i>	40
Figura 20 <i>Ruptura de barra de acero corrugado #5 (5/8") con conector roscado. Ac</i>	41
Figura 21 <i>Ruptura transversal de barra de acero corrugado #5 (5/8") con conector roscado</i>	41
Figura 22 <i>Grafica Esfuerzo vs deformación en empalme roscado #6</i>	42
Figura 23 <i>Ruptura de barra de acero corrugado #6 (3/4") con conector roscado</i>	42
Figura 24 <i>Ruptura transversal de barra de acero corrugado #6 (3/4") con conector roscado</i>	43
Figura 25 <i>Grafica Esfuerzo vs deformación en empalme roscado de transición de #4 a #5</i>	44
Figura 26 <i>Ruptura de barras de acero corrugado #4 (1/2") y #5 (5/8") empalmadas por conector de tornillo</i>	44
Figura 27 <i>Ruptura transversal de barras de acero corrugado #4 (1/2") y #5 (5/8") empalmadas por conector de tornillo</i>	45
Figura 28 <i>Grafica Esfuerzo vs deformación en empalme roscado de transición de #5 a #6</i>	46
Figura 29 <i>Ruptura de barras de acero corrugado #5 (5/8") y #6 (3/4") empalmadas por conector de transición roscado</i>	46
Figura 30 <i>Ruptura transversal de barras de acero corrugado #5 (5/8") y #6 (3/4") empalmadas por conector de transición roscado</i>	47
Figura 31 <i>Vista en corte de conector de tornillo</i>	48
Figura 32 <i>Ruptura de barras de acero corrugado #4 (1/2) empalmadas por conector de tornillo</i> <i>Ruptura de barras de acero corrugado #4 (1/2) empalmadas por conector de tornillo</i>	49
Figura 33 <i>Ruptura de barra de acero corrugado #4 (1/2") empalmada por conector de tornillo</i>	50
Figura 34 <i>Ruptura transversal de barra de acero corrugado #4 (1/2") empalmada por conector de tornillo</i>	50
Figura 35 <i>Grafica Esfuerzo vs deformación en empalme de tornillo #5</i>	51
Figura 36 <i>Ruptura de barras de acero corrugado #5 (5/8") empalmadas por conector de tornillo</i>	51
Figura 37 <i>Ruptura transversal de barras de acero corrugado #5 (5/8") empalmadas por conector de tornillo</i>	52
Figura 38 <i>Grafica Esfuerzo vs deformación en empalme roscado #6</i>	53

Figura 39 <i>Ruptura de barras de acero corrugado #6 (3/4") empalmadas por conector de tornillo</i>	53
Figura 40 <i>Ruptura de barras de acero corrugado #6 (3/4") empalmadas por conector de tornillo</i>	54
Figura 41 <i>Esfuerzo vs Deformación en carga y descarga de conector roscado #4</i>	59
Figura 42 <i>Ruptura de barras #4 (1/2") empalmadas por conector roscado en ensayo de carga y descarga</i>	60
Figura 43 <i>Ruptura de barras #4 (1/2") empalmadas por conector roscado en ensayo de carga y descarga tipo 1</i>	60
Figura 44 <i>Ruptura de barras #5 (5/8") empalmadas por conector roscado en ensayo de carga y descarga tipo 2</i>	61
Figura 45 <i>Ruptura de barras #5 (5/8") empalmadas por conector roscado en ensayo de carga y descarga tipo 2</i>	61
Figura 46 <i>Esfuerzo vs Deformación en carga y descarga de conector roscado #5</i>	62
Figura 47 <i>Ruptura de barras #6 (3/4") empalmadas por conector roscado en ensayo de carga y descarga tipo 2</i>	63
Figura 48 <i>Ruptura de barras #6 (3/4") empalmadas por conector roscado en ensayo de carga y descarga tipo 2</i>	63
Figura 49 <i>Esfuerzo vs Deformación en carga y descarga de conector roscado #6</i>	64
Figura 50 <i>Conectores de tornillo como solución a la continuidad de elemento estructural</i>	72
Figura 51 <i>Prensado de Conectores extruidos</i>	71
Figura 52 <i>Maquina para Conectores extruidos</i>	72
Figura 53 <i>Comparación de congestión de barras en nudos según tipo de traslapo</i>	73
Figura 54 <i>Elementos para ensayo de corrosión inducida</i>	74
Figura 55 <i>Montaje para corrosión inducida</i>	75
Figura 56 <i>60 minutos de corriente directa a barras de acero</i>	75
Figura 57 <i>Empalme de Barras de Acero #5 con conector mecánico roscado corroída</i>	76
Figura 58 <i>Falla empalme de barras #5 con corrosión inducida</i>	77
Figura 59 <i>Grafica Esfuerzo vs Deformación Barra #5 corroída</i>	78

INTRODUCCIÓN

Para lograr satisfacer las necesidades y exigencia de los retos actuales de la ingeniería en Colombia es necesario desarrollar y fortalecer nuevos métodos constructivos que cumplan con unos estándares de calidad y niveles de eficiencia. Debido al crecimiento económico del país también crece el desarrollo de las ciudades y por ende se realizan proyectos civiles de mayor envergadura que requieren técnicas e insumos de mejor calidad.

En el mercado se pueden encontrar diferentes tipos de conectores mecánicos para varillas los cuales aportan distintas soluciones a problemas constructivos dentro de la obra. El principal problema en Colombia es la falta de conocimiento técnico en estos conectores alternativos, por lo que se debe impulsar el aspecto científico de este tema. En consecuencia, es primordial obtener información que permita conocer de manera más profunda los beneficios que conlleva la utilización de insumos como lo son los empalmes mecánicos roscados, roscados de transición, atornillados, respecto a los empalmes por traslapo.

Se realiza una investigación comparativa entre el método de empalme tradicional y el mecánico, con el objetivo de conocer las ventajas y desventajas que se presentan en cada método de conexión; se realizó laboratorios de tracción, de carga cíclica y se sometió a corrosión inducida, para analizar y comparar la resistencia, durabilidad (corrosión inducida), histéresis (ciclos de carga y descarga) y costo.

La normatividad de esta investigación correspondiente a resistencia de los esfuerzos, características mecánicas, su aplicación, tipos de empalmes y metodología se basa en la norma sismo resistente de 2010 (NSR-10), ACI 318, ACI 133. En Colombia los fabricantes de conectores mecánicos se basan en lo establecido en las normas NSR-10, ACI-318, ACI-439 y el Código Colombiano de Diseño de Puentes.

Es necesario tener claro en la viabilidad de un proyecto, las incidencias económicas de los materiales a utilizar y así sustentar las inversiones que deben realizarse mediante análisis de precios unitarios de las actividades que se van a ejecutar, para este caso se comparó la incidencia total de los empalmes mecánicos respecto al costo de empalmes tradicionales de acero de refuerzo para una edificación.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En la Norma Sismo Resistente del 2010 NSR-10, se dan los requisitos de índole general sobre los empalmes por traslapo y mecánicos, como los criterios de resistencia mínima a la fluencia que se deben cumplir en un empalme mecánico y aunque todos estos aspectos están dirigidos a todos los profesionales de la ingeniería y la arquitectura que trabajan en diseño estructural y construcción, este tipo de conectores no son muy usados, puesto que no son tan comunes en el mercado colombiano y carecen de una divulgación técnica, se ha visto que últimamente se están implementando en mayor medida, sobre todo en proyectos de edificaciones de mediana y gran envergadura, por esto es necesario conocer las ventajas y desventajas que tienen estos tipos de empalmes respecto a los empalmes por traslapo.

Los empalmes tradicionales por traslapo presentan diferentes inconvenientes constructivos, como el no cumplimiento de las longitudes mínimas de traslapo, la localización de traslapos en zonas de confinamiento o nudos, dificulta de traslapo en juntas con poco espacio y longitud de traslapo insuficiente, ya que se genera un congestionamiento que restringe la distribución adecuada del concreto, obstruyendo la vibración en zonas de traslapo, que ocasiona una reducción en la resistencia de la estructura, entonces, como el empalme por traslapo depende de la resistencia del concreto para transmitir los esfuerzos, se producen una serie de errores que no permiten garantizar el cumplimiento del diseño estructural y esto baja la resistencia de la estructura, por lo que a futuro ocasiona fallas que deterioran la misma y crean problemas legales, sociales y económicos.

Existen muchos tipos de errores que se presentan en la formación de la armadura de una estructura y en algunas ocasiones es necesario realizar correcciones en esta, pero una vez está terminada toda la armadura, es muy tedioso y complejo corregirla. Entonces cuando un empalme por traslapo es impracticable, debido a la falta de espacio en sectores de la armadura, es decir, una armadura congestionada de varillas o cuando existen errores en la ubicación del traslapo o la longitud del mismo, es conveniente implementar otros métodos como empalmes mecánicos.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Comparar la resistencia a tracción, histéresis, costo y durabilidad de empalmes mecánicos con empalmes por traslapo.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensayos de tracción a varillas de acero corrugadas con empalmes mecánicos para determinar su resistencia a tracción simple y tracción por ciclos de carga (histéresis)
- Realizar un comparativo de costos entre empalmes mecánicos y empalmes por traslapo en varillas corrugadas.
- Estimar la durabilidad de los empalmes debido a corrosión inducida en el acero.

3. JUSTIFICACIÓN

El proceso de empalmar barras de acero es uno de los procedimientos más realizados en el armado de las estructuras de concreto reforzado, por ello se debe contar con información clara que sirva de referencia a las personas directamente involucradas en este proceso. Este estudio pretende obtener parámetros básicos de comparación de costos, calidad, durabilidad, resistencia que permitan una supervisión técnica adecuada en los procesos de construcción e instalación de empalmes mecánicos roscados y prensados en edificaciones, en aras de garantizar la estabilidad de la estructura como se ha calculado desde su diseño, además de

realizar un comparativo con el uso tradicional de empalmes por traslapo, que permitan al profesional de la ingeniería tener indicios de lo más conveniente desde el punto de vista económico y técnico en el desarrollo de la construcción de una estructura.

De acuerdo a esto se adquirirá información técnica que sirva de referencia para tomar la decisión de cual empalme es el más adecuado según el tipo proyecto que se vaya a ejecutar, para ello se estudiarán las propiedades de empalmes mecánicos verificando la adecuada transferencia de esfuerzos entre barras y la resistencia de acuerdo con el Título C.12 de la Norma Sismo Resistente colombiana , llegando así a un comparativo entre empalmes por traslapo y empalmes mecánicos en donde se muestren las ventajas y desventajas que tengan un método sobre el otro, considerando reducir costos en material y tiempo en procesos constructivos del ensamblaje de las estructuras de concreto reforzado, pero garantizando la calidad de las mismas. De esta manera los empalmes mecánicos serán reconocidos cada vez más en Colombia y serán parte de los insumos base en la construcción de una edificación.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. MARCO TEÓRICO

Materiales como el acero del cual están compuestos las varillas y conectores mecánicos, presentan propiedades elásticas que permiten que se deformen. Las propiedades elásticas de los materiales tienen enorme importancia en el campo de la ingeniería, ya que la armadura de acero de un edificio que resiste los sismos debe flexionarse lo necesario para absorber y disipar la energía. Comprender en este caso el comportamiento mecánico y elástico del acero es esencial para el diseño seguro de todos los tipos de estructuras, como edificios, puentes, máquinas, entre otros.

Varios materiales logran alcanzar un estado en el cual su deformación crece rápidamente sin que exista un incremento correspondiente en el esfuerzo. Este punto es conocido con el nombre de punto de cedencia o punto de fluencia. Se determina la resistencia de cedencia o

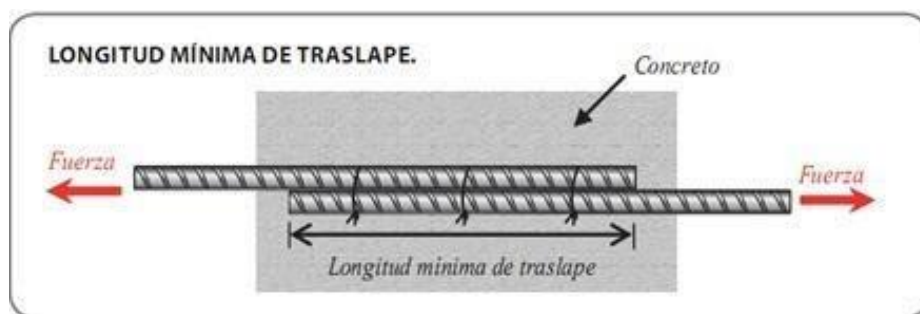
fluencia f_y mediante el método de corrimiento paralelo. (Departamento de Ciencias Basicas - USTA, 2013)

4.1.1. Empalmes por traslapo en barras corrugadas:

En barras corrugadas los empalmes por traslapo transfieren los esfuerzos que se generan por medio de esfuerzos de adherencia entre el concreto y las barras de acero, estos son sometidos a una fuerza de tensión y se puede categorizar en tipo A y B, dentro los cuales la longitud del empalme por traslapo es un factor que multiplica la longitud de desarrollo calculada de acuerdo con C.12.2.2 ó C.12.2.3 de la NSR-10, como se muestra en el capítulo 4.1.5. (NSR-10, 2010)

Figura 1

Empalmes por Traslapo



Nota. Fuente: CDV Perú Ingeniería Antisísmica.

Dentro de los requisitos de las conexiones por traslapo en tracción se encuentran medidas como no dejar varios traslapos en un mismo sector, ubicar los empalmes lejos de las zonas de máximo esfuerzo de tracción, de acuerdo a que normalmente esto se realiza en obra por la necesidad de largos y no siempre con la autorización del ingeniero calculista quién debe aprobar la localización de los empalmes de acuerdo a sus diseños.

4.1.2. Longitud de Desarrollo y Traslapo en barras corrugadas

En la unión entre barras de acero en armaduras, hay que asegurarse que no se vaya a presentar un deslizamiento, también se debe maximizar su trabajo para el desarrollo de un

esfuerzo máximo, el cual corresponde al esfuerzo de fluencia del acero. Para cumplir con estos requerimientos, se deben empalmar las barras cumpliendo con una longitud de desarrollo, la cual se define como la longitud de anclaje que requiere una barra de acero para desarrollar por medio de la adherencia el esfuerzo necesario para que no se produzcan agrietamientos en el concreto que recubre la barra o que se resbale dentro de este. Y que exista una distancia mínima entre barras para transferir su fuerza máxima de tracción hacia el concreto. Según el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente del 2010, se puede calcular la longitud de desarrollo de dos formas, la primera según la formula del capítulo C.12.2.3, que se muestra a continuación:

$$l_d = \left[\frac{f_y \Psi_t \Psi_e \Psi_s}{1.1 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \right)} \right] d_b \quad \text{Donde, } \left(\frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \right) < 2.5$$

d_b = Diámetro nominal de una barra en mm.

f_y = Resistencia especificada a la fluencia del refuerzo en MPa.

Ψ_t = Factor tradicional de ubicación del refuerzo, que refleja los efectos adversos de la posición de las barras de la parte superior de la sección con respecto a la altura de concreto fresco colocado debajo de ellas.

- $\Psi_t = 1.3$, cuando para el refuerzo horizontal se colocan más 300 mm de concreto fresco debajo de la longitud de desarrollo o un empalme.
- $\Psi_t = 1.0$, otras situaciones.

Ψ_e = Factor de revestimiento, que refleja los efectos del revestimiento epóxico.

- $\Psi_e = 1.5$, para barras con recubrimiento epóxico con menos de $3d_b$ de recubrimiento, o separación libre menor de $6d_b$.

- $\Psi_e = 1.2$, para todas las otras barras con recubrimiento epóxico.
- $\Psi_e = 1.0$, para refuerzo sin recubrimiento y refuerzo recubierto con cinc (galvanizado).

Ψ_s = Factor que depende del tamaño del refuerzo, que refleja el comportamiento más favorable del refuerzo de menor diámetro.

- $\Psi_s = 0.8$, para barras No. 6 (3/4") o menores.
- $\Psi_s = 1.0$, para barras No. 7 (7/8") y mayores.

λ = Factor de modificación que tiene en cuenta las propiedades mecánicas reducidas del concreto de peso liviano, relativa a los concretos de peso normal de igual resistencia a la compresión.

- $\lambda = 0.75$, donde se use concreto liviano.
- $\lambda = 1.0$, donde se use concreto de peso normal.

f'_c = Resistencia especificada a la compresión del concreto en MPa

c_b = Factor que representa el menor valor entre el recubrimiento lateral, el recubrimiento de la barra, en ambos casos medido hasta el centro de la barra y la mitad del espaciamiento medido entre los centros de las barras.

K_{tr} = Índice de refuerzo transversal.

$$K_{tr} = \frac{40 A_{tr}}{sn}$$

Donde,

A_{tr} = Área total de todo el refuerzo transversal dentro de un espaciamiento s que cruza el plano potencial de hendimiento a través del refuerzo que está siendo desarrollado en mm².

s = Espaciamiento medido centro a centro de barras de refuerzo transversal en mm.

n = Número de barras que se empalman o desarrollan dentro del plano de hendimiento.

$K_{tr} = 0$ Como una simplificación de diseño aún si hay refuerzo transversal presente.

La segunda forma de calcular la longitud de desarrollo se muestra en el capítulo C.12.2.2 (NSR-10, 2010). y se presenta a continuación:

Tabla 1

Fórmulas para el cálculo de longitud de desarrollo

Espaciamiento y recubrimiento	Barras Corrugadas No. 6 (3/4") o menores	Barras Corrugadas No. 7 (7/8") y mayores
Espaciamiento libre entre barras que están siendo empalmadas o desarrolladas no menor que d_b, recubrimiento libre no menor que d_b, y estribos a lo largo de l_d no menos que el mínimo del Título C del Reglamento NSR-10 o espaciamento libre entre barras que están siendo desarrolladas o empalmadas no menor a $2d_b$ y recubrimiento libre no menor a d_b.	$l_d = \left[\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{2.1 \lambda \sqrt{f'_c}} \right] d_b$	$l_d = \left[\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{1.7 \lambda \sqrt{f'_c}} \right] d_b$
Otros casos	$l_d = \left[\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{1.4 \lambda \sqrt{f'_c}} \right] d_b$	$l_d = \left[\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{1.1 \lambda \sqrt{f'_c}} \right] d_b$

Nota. Fuente: NSR10

Para el cálculo de la longitud de desarrollo de cada una de las barras para este proyecto, se utilizará la siguiente ecuación:

$$l_d = \left[\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{2.1 \lambda \sqrt{f'_c}} \right] d_b$$

La longitud mínima de un empalme por traslapo sometido a tracción debe ser la requerida para empalmes por traslapo Clases A o B, donde:

- Clase A: 1.0 ℓ_d
- Clase B: 1.3 ℓ_d .

Sin embargo, la longitud mínima de un empalme por traslapo en tracción no debe ser menor que 300 mm.

Los empalmes por traslapo de barras corrugadas sometidas a tracción deben ser empalmes por traslapo Clase B. Se realizan excepciones y se admiten empalmes por traslapo de Clase A cuando:

El área de refuerzo proporcionada es al menos el doble que la requerido por análisis a todo lo largo del empalme por traslapo y la mitad, o menos, del refuerzo total está empalmado dentro de la longitud de empalme por traslapo requerido. (C.12.15.2 - NSR 10, 2010).

Cuando se empalman por traslapo barras de diferente diámetro en tracción, la longitud del empalme por traslapo debe ser el mayor valor entre el ℓ_d de la barra de mayor tamaño y el valor de la longitud del empalme en tracción de la barra de diámetro menor. (C.12.15.3 - NSR 10, 2010).

4.1.3. Empalmes mecánicos en varillas corrugadas

Son acoples o conectores mecánicos de acero que unen las varillas de acero de una armadura, estos deben cumplir con una serie de requisitos y existen de diversas formas y

tamaños. El esfuerzo máximo del refuerzo usado para el diseño dentro del Título C de la norma NSR-10 es la resistencia especificada a la fluencia. Para que se pueda generar una adecuada fluencia entre barras con un acople mecánico se debe asegurar la suficiente resistencia en los empalmes y de esta manera evitar una posible falla. Para esto se debe tomar como factor mínimo de seguridad un incremento del 25% sobre la resistencia a la fluencia.

De acuerdo a la carga o sollicitación que le llegara al empalme mecánico, estos se pueden clasificar en dos categorías, los empalmes tipo 1 que son empleados en el caso en donde no se esperan esfuerzos a tracción elevados debido a fuerzas sísmicas o deformaciones inelásticas. La otra categoría que encontramos de empalmes mecánicos son los tipo 2 los cuales son demuestran a través de ensayos certificados, que son capaces de soportar esfuerzos a tracción requeridos por carga sísmica. Por lo tanto, los empalmes mecánicos que son considerados como sismos resistentes son los tipo 2 y estos deben cumplir el factor de seguridad de un desarrollo de al menos de $1,25f_y$ de la barra y amplificar la tenacidad a tracción necesaria de varillas conectadas.

Algunos de los conectores mecánicos que existen en el mercado mundial son roscados, roscados en forma cónica, prensados o a presión, atornillados con uno o varios tornillos, soldados, entre otros. Sin embargo, en el mercado colombiano solo podemos encontrar algunos tipos de empalmes, dentro de ellos están:

- Empalme roscado Tipo 2: Mediante un sistema de roscado une dos barras del mismo diámetro.

Figura 2

Conector Roscado Tipo 2



Nota. Fuente: Ramalza

- Empalme roscado de transición Tipo 2: Mediante un sistema de roscado une dos barras de diferente diámetro.

Figura 3

Conector Roscado Tipo 2



Nota. Fuente: Ramalza

- Empalme de Tornillo tipo 2: Tiene un sistema que, mediante varios tornillos a presión, une dos barras del mismo diámetro.

Figura 4

Conector de Tornillo tipo 2



Nota. Fuente: Ramalza

- Conector Extruido Tipo 2: Un acople prensado que une dos barras del mismo diámetro.

Figura 5

Conector Extruido Tipo 2



Nota. Fuente: Ramalza

Cada uno de estos acoples son de la empresa Ramalza Fmax que deben ser certificados. En Estados Unidos y otros países europeos tienen un mercado mucho más amplio y diverso como se puede observar en la ilustración 6, los cuales son empalmes de la marca nVent LENTON de la empresa Erico, industria española. También se encuentran acoples de la marca BarSplice como se observa en la ilustración 7 y 8, conectores de una empresa especializada estadounidense.

Figura 6

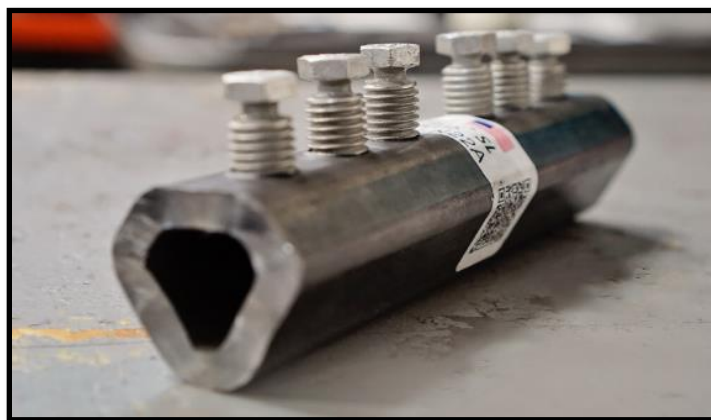
Otros Empalmes Mecánicos



Nota. Fuente: nVent LENTON

Figura 7

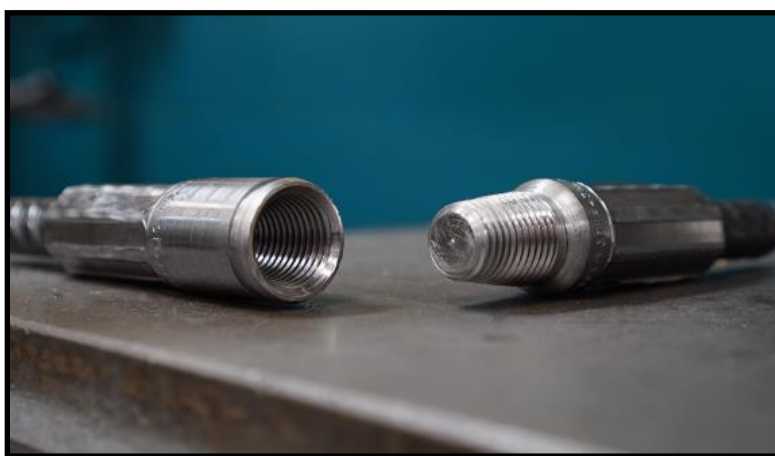
Conector Atornillado Zap Screwlok



Nota. Fuente: BarSplice

Figura 8

Conector Roscado Cónico Taper Threaded Grip- Twist



Nota. Fuente: BarSplice

Entonces, los acoples mecánicos transmiten los esfuerzos entre las varillas empalmadas por contacto entre el conector mecánico. La adherencia, conocida como la resistencia al deslizamiento de las barras de acero en el concreto, se da por la adhesión de naturaleza química entre los dos materiales, la fricción entre la barra de acero y el concreto, una adherencia mecánica de origen microscópico y el apoyo directo de las corrugaciones de las barras de acero

sobre el concreto que la rodea. (Vargas Fernández, Análisis de la resistencia a tensión y costos de empalmes mecánicos usados en, 2015)

Estos empalmes son fabricados con acero SAE 1045, con ventajas de buena tenacidad, buena maquinabilidad y excelente forjabilidad. En consecuencia, a su contenido de carbono no cuenta con la mejor soldabilidad. Este acero es especial para la fabricación de piezas que exigen dureza y tenacidad.

Tabla 2

Composición Química Acero SAE 1045

%C: Carbono	%Mn: Manganeso	%P: Fosforo	%S: Azufre
0,43 - 0,50	0,60 - 0,90	Max: 0,04	Max: 0,05

Nota. Fuente: Aceros ray

Tabla 3

Propiedades Mecánicas Acero SAE 1045

Esfuerzo Fluencia	Esfuerzo Tracción	Dureza	Elongación
[Kg/mm²]	[Kg/mm²]	[HB]	[%]
40	57	163	15

Nota. Fuente: Aceros ray

4.1.4. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción consiste en someter a una probeta de dicho material a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta.

En este estudio se utilizan muestras con barras corrugadas unidas por conectores roscados o prensados de diferentes diámetros y posteriormente se colocan las probetas en la máquina universal de ensayo que consta de dos mordazas, una fija y otra móvil. Mientras se va aplicando

carga, que es medida en el indicador de lectura, se genera una deformación junto con el esfuerzo aplicado, que se va graficando en un computador hasta la falla.

Figura 9

Maquina Universal



Nota. Fuente Propia

Figura 10

Procesador de Datos



Nota. Fuente Propia

Figura 11*Indicador de Lectura**Nota. Fuente Propia*

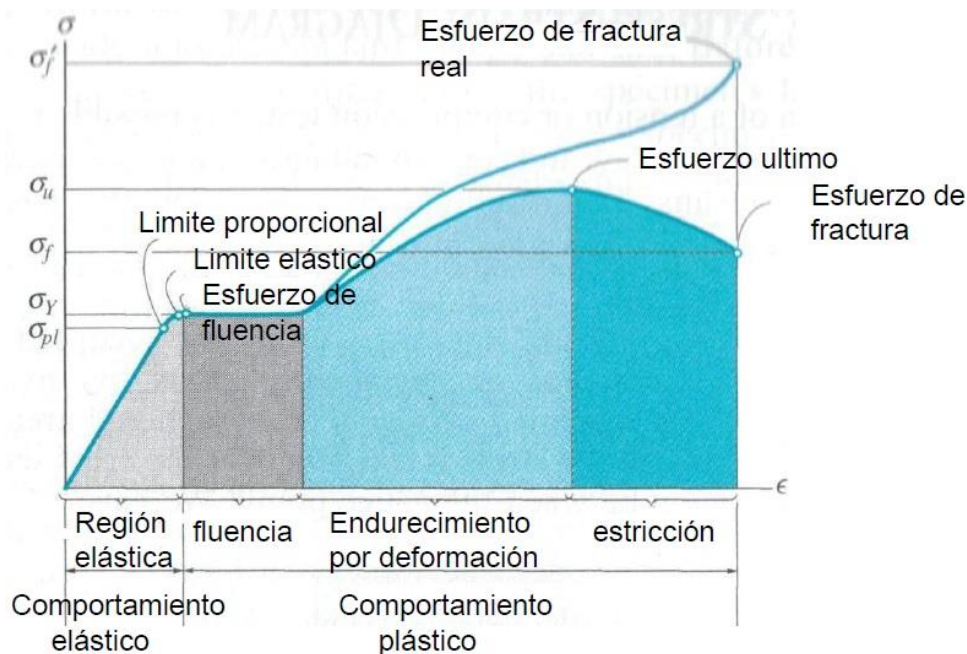
Este laboratorio permite determinar el comportamiento de los materiales bajo cargas de tensión, obteniendo una gráfica de esfuerzo-deformación en donde se podrá calcular el módulo de elasticidad (módulo de Young) y otra serie de características y valores importantes en el análisis del material. Entonces con esta información se señala que tan elástico o plástico será el comportamiento de un material bajo la acción de una fuerza axial actuando sobre él.

4.1.5. Grafica Esfuerzo vs Deformación

La curva de Esfuerzo - Deformación, expresa la deformación unitaria del elemento a medida que se le aplica un esfuerzo a tensión, también es llamada curva de fluencia y es un procedimiento muy útil para determinar los datos de resistencia, ductilidad entre otros para propósito de diseño en ingeniería.

Figura 12

Grafica de Esfuerzo - Deformación



Nota. Fuente: Universidad Tecnológica De Pereira

En la figura 12 se pueden observar las partes en las que se divide la gráfica junto con los valores importantes que se pueden determinar a través de esta, como lo son:

- **Deformación Unitaria (ϵ):** Es el valor resultante de la deformación (ΔL) dividido entre la longitud inicial (L_0) de la muestra.
- **Esfuerzo De Fluencia (f_y):** Indicación del esfuerzo máximo que se puede desarrollar en un material sin causar una deformación plástica. Es el esfuerzo en el que un material exhibe una deformación permanente especificada y es una aproximación práctica de límite elástico.
- **Esfuerzo ultimo (f_u):** Es el esfuerzo máximo que se le puede aplicar al material, cuando se llega a este esfuerzo se inicia la estricción y posterior fractura del elemento.
- **Módulo de Young o Módulo de elasticidad (E):** Es representado por el valor de la pendiente de la línea recta de la gráfica en la región elástica. Este dato representa una

medida de rigidez del material, siendo más rígido el material entre más mayor sea el valor del módulo.

- **Módulo de Resiliencia (E_r):** Es el valor del área bajo la curva en la región elástica que significa la energía por unidad de volumen que el material absorbe cuando se deforma elásticamente.
- **Relación Poisson (μ):** Es la relación entre deformación unitaria longitudinal y deformación unitaria lateral.

4.1.6. Ensayo de Carga y Descarga

Para los ensayos de carga y descarga no existe una norma clara que describa el desarrollo y parámetros de la misma, sin embargo, en su historia se creó una metodología elaborada en la Universidad de Kansas, Estados Unidos, con el fin de analizar el comportamiento de los sistemas de conectores mecánicos comerciales frente a cargas sísmicas simuladas.

Las pruebas abordaron los sistemas de empalme mecánico ante la acción de cargas cíclicas severas, como la carga lateral de terremoto, en el que las demandas inelásticas son significativas y se realizan sobre los miembros y las conexiones. En estos dos casos, la capacidad de mantener la disposición de carga hasta bien entrado el régimen inelástico es el problema y no puede ser satisfecha por criterios de solo resistencia (McCabe, 2000).

La metodología habla de someter a tensión un conjunto de probetas al ensayo de carga cíclica, donde eran cargadas desde tensión cero hasta el 4% de deformación unitaria en el primer ciclo de carga. Al alcanzar el porcentaje de deformación definido el conjunto era descargado a tensión cero con una carga de compresión de 44,5 kN o 87,5 MPa. Este ciclo se repetía un total de 16 veces. Después eran tensionadas hasta la rotura (McCabe, 2000)

Se encontraron aspectos negativos en la metodología mencionada anteriormente, como valores de esfuerzo muy bajos, variables e inexactos a la hora de aplicarlos en tiempo real en la

maquina universal, por lo que se planteó un nuevo procedimiento para realizar el ensayo de carga y descarga, en donde en vez de cargar al 4% de deformación unitaria, se planteó trabajar con el esfuerzo y estrictamente dentro de la zona elástica, es decir, sin sobrepasar el esfuerzo de fluencia del acero, en donde la maquina universal aplicaba fuerzas en sentido contrario hasta llegar al esfuerzo ubicado exactamente un 10% por debajo del esfuerzo de fluencia obtenido en ensayos de tracción. Esta metodología pensada de acuerdo a que una estructura en concreto reforzado se diseña para trabajar dentro de la zona elástica. Tomando como guía los ensayos de carga y descarga de la Universidad de Kansas, se realizaron también 16 ciclos y hasta 32 ciclos para analizar el comportamiento de los conectores mecánicos y las barras de acero corrugado.

4.1.7. Corrosión en el acero.

Para el inicio de un proceso de corrosión debe haber antes un fenomeno de oxidacion inicial. Es decir ceder electrones el elemendo que se oxida al elemento oxidante.

Corrosion es como se denomina a la agresion de un metal, a consecuencia de una reaccion quimica del metal con el ambiente o electroquimica como es la electrolisis, Estos procesos son oxidacion-reduccion, que causan una capa de oxido en los metales, lo cual si escala a la generacion de poros podria llegar al destruccion de todo el material.

El óxido en elementos estructurales, las superficies irregulares o las escamas en barras corrugadas no deberán ser causa de rechazo, siempre y cuando los valores correspondientes a la masa, las dimensiones, el área de la sección transversal y las propiedades de tracción y doblado de una muestra limpiada manualmente mediante un cepillo con cerdas de acero, no sean inferiores a los exigidos por esta norma NTC 2289 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2007)

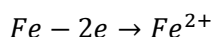
4.1.8. Electrolisis

La electrolisis se define como:

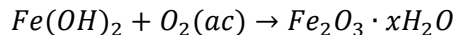
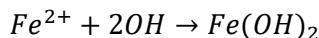
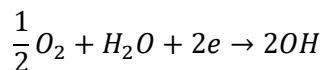
Electrólisis o Electrolisis proceso que separa los elementos de un compuesto por medio de la electricidad. Ciertas sustancias, (ácidos, hidróxidos, sales y algunos óxidos metálicos disueltos o fundidos) son conductores de electricidad al mismo tiempo que se descomponen al paso de la corriente eléctrica, a estas sustancias se les llama electrolitos. A tal fenómeno se le denomina electrólisis y constituye fundamentalmente un proceso de oxidación reducción que se desarrolla "no espontáneamente" es decir, un conjunto de transformaciones que implican un aumento de energía libre del sistema, y por ende, requiere para su realización el concurso de una fuerza externa de energía. Al igual que en las pilas electroquímicas, una reacción de electrólisis puede ser considerada como el conjunto de dos medias reacciones, una oxidación anódica y una reducción catódica. Cuando conectamos los electrodos con una fuente de energía (generador de corriente directa), el electrodo que se une al borne positivo del generador es el ánodo de la electrólisis y el electrodo que se une al borne negativo del generador es el cátodo. (Ecured, 2020)

Esta reacción de oxidación se representa de la siguiente forma:

- ÁNODO (OXIDACIÓN)



- CÁTODO (REDUCCIÓN)



4.2. MARCO CONCEPTUAL

Los conectores mecánicos, ya sean roscados, prensados o atornillados y las varillas están compuestos de acero, material usado para el refuerzo de una edificación, el cual está expuesto a fuerzas de tracción y debe resistir cada una de estas solicitaciones que recibe y que el concreto no es capaz de tolerar. Para esto, el acero presenta varias propiedades mecánicas que se explican a continuación junto con otros conceptos importantes que es necesario definir y aclarar para la total comprensión de este estudio.

- **Alargamiento.** Es la cantidad de estricción o alargamiento que sufre un cuerpo por su unidad de longitud cuando es sometido a tracción.
- **1.6.2.12 Rotura.** Es el punto donde sufre la fractura el acero luego de ser sometido a la tracción.
- **Corrosión:** Se puede definir como el deterioro de un material por efecto de un ataque electroquímico de su entorno.
- **Ductilidad:** Es la capacidad que tiene el acero de deformarse cuando es sometido a una fuerza.
- **Durabilidad:** Resistencia de un material de permanecer inalterable al paso del tiempo.
- **Elasticidad.** Es la propiedad que tiene el acero o cualquier material, cuando es sometido a cargas, presentando su capacidad de deformarse elásticamente y recuperar su forma inicial en la disminución de cargas o descarga.
- **Empalme:** Acoplar o unir algo.
- **Fatiga:** La fatiga es un fenómeno que se presenta por la acumulación de daño debido a la aplicación de cargas cíclicas que ocasiona más del 90% de fallos en servicio de componentes mecánicos.
- **Fluencia:** Es la deformación del acero o de cualquier material cuando es sometido a cargas, sin poder recuperar su estado inicial.

- **Histéresis:** Tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado, como por ejemplo fuerzas de carga y descarga.
- **Plasticidad:** Es la capacidad mecánica que tiene el acero de deformarse de manera irreversible por encima de su límite elástico cuando es sometido a cargas.
- **Resiliencia:** Es la capacidad que tiene el material de conservar la energía dentro de la zona elástica.
- **Resistencia:** La resistencia es la capacidad de carga por unidad de área por medio del cual se evalúan los materiales.
- **Rigidez:** Es la capacidad y resistencia que tiene el acero cuando está sometido a cargas sin presentar mayores deformaciones.
- **Rotura:** Acción de romper o romperse.
- **Tenacidad.** Es la capacidad que tiene el material de conservar la energía dentro de la zona plástica.
- **Tracción O Tensión:** Esfuerzo al que está sometido un elemento por la aplicación de dos cargas de sentidos contrarios que tienden a estirarlo.
- **Traslapo:** Parte de una cosa cubierta por otra
- **Electrolisis:** Proceso químico que afecta a un objeto inmerso en una solución conductible que genera descomposición por acción de una corriente eléctrica.
- **Conductividad:** Es una medida de la eficiencia para conducir la electricidad, siendo su unidad principal el Amperio.
- **Voltaje:** Medida de potencial eléctrico.
- **Amperios:** Es la unidad de intensidad de corriente eléctrica, que se a movido de un punto al otro durante un espacio de tiempo.

4.3. MARCO HISTÓRICO (ESTADO DEL ARTE)

Aproximadamente desde hace 40 años, se han venido implementando empalmes roscados en los proyectos de ingeniería civil más importantes de países asiáticos como Japón, China, en América en los Estados Unidos y Canadá. Debido a esto en Colombia también ha venido implementando con mayor constancia el uso de estos conectores, ocasionando mayor investigación y generando documentos que sirven como referencia tanto para los calculistas estructurales, como para los constructores. Es posible encontrar conectores mecánicos de distintos tipos. gracias a que existen distintas empresas de estos accesorios que se dedican a su fabricación.

Fierro Lafuente en 2001 realizó un estudio con empalmes soldados mediante pruebas de tensión. Él verificó la resistencia de empalmes soldados a tope indirecto con angular y con doble barra de acuerdo con el ACI-318 (1999). (Fierro Lafuente, 2001)

Existen estudios sobre empalmes mecánicos con conectores de la marca ERICO y BarSplice, marcas estadounidenses con gran experiencia y certificados. El trabajo de grado de Keith Coogler (Coogler, 2007) estudia el comportamiento de un tipo de conector mecánico de la marca Lenton y BarSplice, del tipo “offset” en los cuales las líneas de centro de las barras no coinciden. En este se realizaron pruebas tensión y compresión, con el fin de determinar su resistencia y comportamiento.

BarSplice Products Inc. es una empresa que produce conectores mecánicos y ha realizado estudios acerca del comportamiento a tracción de estos empalmes que se fabrican en esta empresa ubicada en Webster St, Dayton, Estados Unidos.

Roberto Vargas (Vargas Fernández, Análisis de la resistencia a tensión y costos de empalmes mecánicos usados en, 2015) en el 2015 realiza un proyecto que se describe como

Análisis de la resistencia a tensión y costos de empalmes mecánicos usados en barras de acero de refuerzo con conectores prensados y atornillados tipo 2.

Pero se encuentra un vacío en el estado de arte, al no encontrar estudios que traten sobre la durabilidad que pueden tener estos empalmes respecto a los tradicionales, ni el comportamiento que estos pueden tener frente a cargas cíclicas, es decir, a los ciclos de histéresis con los que se puede analizar el comportamiento de los conectores mecánicos. Además, no se tiene una referencia de comparación actualizada de beneficios de costo y resistencia entre conectores mecánicos y empalmes por traslapo, por ello se pretende realizar un estudio con todos estos aspectos.

4.4. MARCO LEGAL O NORMATIVIDAD APLICABLE

- ✓ NSR-10 Normas Colombianas de Diseño y Construcción sismo resistente.
- ✓ NTC 2289 BARRAS CORRUGADAS Y LISAS DE ACERO DE BAJA ALEACIÓN, PARA REFUERZO DE CONCRETO.
- ✓ NTC 3353 Siderurgia. Definiciones y métodos para los ensayos mecánicos de productos de acero.
- ✓ ASTM E8 Métodos de prueba estándar para tensión en materiales mecánicos.
- ✓ ASTM A706M Especificación Normalizada para Barras de Acero de Baja Aleación Lisas y Corrugadas para Refuerzo de Concreto.

5. METODOLOGÍA

Se estudio la resistencia de empalmes en barras corrugadas con conectores mecánicos, utilizando barras de acero corrugado de diferentes diámetros y de las más comunes en construcción, exactamente barras #4 ($\frac{1}{2}$ "), #5 ($\frac{5}{8}$ ") y #6 ($\frac{3}{4}$ "), todas empalmadas por algunas muestras representativas de conectores mecánicos roscados, roscados de transición y de tornillo, con los cuales se realizaron ensayos a tracción en la maquina universal para cada una de las probetas que tras su falla generaron datos de carga contra alargamiento, información que

fue procesada para elaborar una gráfica de esfuerzo contra deformación y posteriormente se calculó la resistencia o esfuerzo de fluencia, el esfuerzo de fractura, el esfuerzo último, modulo elástico, deformación unitaria y el punto de ruptura de las varillas con los conectores, analizando de esta manera el comportamiento de cada uno de los empalmes y comprobando si cumplía con los requisitos de norma NSR-10, es decir, $1,25f_y$ (esfuerzo de fluencia) de la barra.

Además, se observó la ubicación de la falla en los elementos del ensayo, la cual se debía presentar en cualquier parte de longitud de las varillas ensayadas, es decir, por fuera del empalme, verificando que no fallara el conector roscado, roscado de transición o de tornillo.

Posteriormente se realizaron los ensayos con ciclos de carga y descarga, en donde se observó el comportamiento y la histéresis del sistema de empalmes mecánicos. Se adoptaron límites de trabajo con los esfuerzos que se presentaban durante los ensayos, trabajando dentro de la zona elástica del acero. Las probetas de empalmes fueron instaladas en las mordazas de la maquina universal con condiciones iniciales de deformación y carga cero, posteriormente se aplicaron fuerzas en sentido contrario hasta llegar al esfuerzo ubicado exactamente un 10% por debajo del esfuerzo de fluencia obtenido en ensayos de tracción. Se realizaron ensayos de carga y descarga con 16 ciclos y hasta 32 ciclos de acuerdo a la metodología planteada, en donde se pudo observar el estado y comportamiento de acuerdo a los datos obtenidos de los conectores mecánicos y las barras de acero corrugado empalmados.

Se realizaron gráficas en donde se observan los ciclos de carga y descarga y se puede analizar las histéresis de los materiales de los elementos en estudio, realizando así una comparación del comportamiento mediante gráficas y resultados de estos laboratorios.

Siguiendo con el desarrollo de los objetivos del proyecto, se construyó un comparativo económico entre empalmes mecánicos roscados, roscados de transición, extruidos y de tornillo versus empalmes por traslapo de varillas corrugadas, se realizaron cotizaciones en el mercado

colombiano y con ello se elaboraron análisis de precios unitarios para las actividades de empalmes por traslapo y mecánicos mencionados anteriormente, para las barras #4 ($\frac{1}{2}$ "), #5 ($\frac{5}{8}$ "), #6 ($\frac{3}{4}$ "), #7 ($\frac{7}{8}$ ") y #8 (1"), en donde se tuvieron en cuenta los materiales adicionales que se deben emplear, como alambre para amarre, costos de insumos adicionales y mano de obra. Con estos precios se elaboró una gráfica dinámica comparativa entre valores unitarios según el tipo de empalme y el diámetro de las barras que une.

Finalmente se analizó la durabilidad de conectores mecánicos y empalmes por traslapo, en donde se evaluó el comportamiento de estas probetas al ser sometidas a corrosión inducida por corriente eléctrica en agua con cloruro de sodio, proceso denominado electrolisis, se sometieron a corrosión inducida probetas con las siguientes características, dos barras de acero corrugado de diámetro #5 empalmadas por un conector mecánico de tipo roscado #5.

Se forzó la corrosión del material del empalme, sumergiendo una de las probetas junto con una barra de acero en una solución de agua y cloruro de sodio para darle conductividad eléctrica a la misma, esta solución es compuesta con 1g de cloruro de sodio por cada 100 ml de agua, lo que permitió una resistencia muy baja a la corriente. Posteriormente se conectaron a una fuente de energía, de la siguiente manera, la probeta la cual represento el ánodo se conectó al polo positivo de la fuente y la barra de acero que represento el cátodo se conectó al polo negativo. En este modelo al suministrar una corriente eléctrica continua por los electrodos genera que se presente una reacción química instantáneamente. En el ánodo conectado al polo positivo provoco una reacción de oxidación de la probeta, cediendo el hierro electrones y aumentando su grado de oxidación, en el cátodo se lleva a cabo un proceso de reducción del oxígeno molecular a iones de hidroxilo, posteriormente estos iones reaccionando con el hierro del acero, dan lugar a la formación de hidróxido de hierro.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1. ENSAYOS DE TRACCIÓN

Para contextualizar se muestran en la tabla 4 los requisitos mínimos de tracción que recomienda la Norma Técnica Colombiana 2289 (NTC 2289) para barras corrugadas de acero.

Tabla 4

Requisitos de Tracción

	Mpa	Kgf/mm2
Resistencia a la Tracción Mínima	550	56
Resistencia a la Fluencia Mínima	420	42
Resistencia a la Fluencia Máxima	540	55

Nota. Fuente: NTC 2289

Se sometieron a tracción los siguientes 8 empalmes mecánicos:

- ✓ Barras de acero corrugado #4 (½") empalmadas por conector roscado.
- ✓ Barras de acero corrugado #5 (5/8") empalmadas por conector roscado.
- ✓ Barras de acero corrugado #6 (¾") empalmadas por conector roscado.
- ✓ Barras de acero corrugado #4 (½") y #5 (5/8") empalmadas por un conector roscado de transición.
- ✓ Barras de acero corrugado #5 (5/8") y #6 (¾") empalmadas por un conector roscado de transición.
- ✓ Barras de acero corrugado #4 (½") empalmadas por conector de tornillo.
- ✓ Barras de acero corrugado #5 (5/8") empalmadas por conector de tornillo.
- ✓ Barras de acero corrugado #6 (¾") empalmadas por conector de tornillo.

Adicionalmente se realizaron los ensayos a tracción de las siguientes 3 barras:

- ✓ Barra de acero corrugado #4 (½").
- ✓ Barra de acero corrugado #5 (5/8").
- ✓ Barra de acero corrugado #6 (¾").

Figura 13*Empalmes mecánicos para ensayos de tracción*

Nota. Fuente propia

Se realizaron los ensayos a tracción para cada uno de los empalmes mecánicos mencionados, estos conectores están fabricados en acero 1045 y las barras corrugadas en acero 1040 de grado 60 con norma de fabricación ASTM A706.

Se sometieron estas probetas a tracción hasta el punto de ruptura y se obtuvo así datos de carga en toneladas versus alargamiento en milímetros, valores que se discretizaron. También se les aplicó correcciones por deslizamiento en mordazas y se graficaron para observar el comportamiento de los materiales.

Conociendo los datos de entrada: longitud inicial en milímetros, espesor de la barra en milímetros, área de la barra en milímetros cuadrados y datos de salida: longitud final en milímetros, delta de deformación longitudinal en milímetros, cargas máximas en kilogramos fuerza y los desplazamientos máximos corregidos de cada uno de los ensayos, se realizó el cálculo de las propiedades mecánicas más relevantes de forma experimental.

Para generar la gráfica que relaciona el esfuerzo contra la deformación unitaria, primero se dividió los valores de carga entre el área de la barra para hallar los esfuerzos y se convirtió a

la unidad de megapascuales. Para hallar la deformación unitaria se dividió los valores de alargamiento entre la longitud inicial de la barra, siendo estos valores en mm/mm.

Con los datos recolectados se organizó una base de datos con las cargas, el alargamiento, el diámetro de la barra, el área de la barra, el esfuerzo, la deformación unitaria, la longitud entre mordazas y el esfuerzo de fluencia obtenido de la gráfica esfuerzo versus deformación unitaria.

Para cada uno de los ensayos se calculó el esfuerzo de fluencia (f_y) en megapascuales, la deformación unitaria en el punto de fluencia en mm/mm, el módulo elástico en megapascuales, el esfuerzo ultimo (f_u) en megapascuales y el esfuerzo de fractura (f_f) en megapascuales.

6.1.1. Conectores roscados

Un empalme roscado consiste en unir dos barras de acero corrugadas mediante un conector mecánico del respectivo diámetro, el cual está compuesto por un tubo hueco de acero 1045, el cual esta roscado en su parte interna y listo para acoplar dos barras de refuerzo con extremos roscados (Huaco & Jirsa, 2019). Este tipo de empalme no es adecuado si la barras ya se encuentran incrustadas en concreto, ya que roscarlas sería imposible. Este empalme tiene como función transmitir los esfuerzos entre las barras de acero, en las partes en donde no es posible colocar una barra continua o no se encuentra una barra de la dimensión del elemento.

Las barras son expuestas previamente a la maquina especializada en roscado (ver figura 14 y 15) y un técnico operario de esta, necesidades que ofrecen los mismos proveedores de los conectores, pero que puestas en obra tienen un costo adicional de transporte. Esta máquina roscadora funciona para todos los diámetros de barras del mercado y funciona dirigiendo la barra mediante unas mordazas que aseguran la barra, mientras un sistema de roscado impulsado por motor hace su trabajo. El rendimiento de la maquina con el operario son de 300 roscas por día y

para su correcto funcionamiento se debe tener energía de 220 V trifásica y no estar a más de 4 metros de la máquina.

Figura 14

Maquina Roscadora de Barras



Figura 15

Maquina Roscadora de Barras



Nota. Fuente propia

Nota. Fuente propia

Se prepararon cada uno de los empalmes mecánicos roscados para ser puestos a prueba en la maquina universal de los laboratorios de la Universidad Santo Tomas.

Barras de acero corrugado #4 (1/2") empalmadas por conector roscado

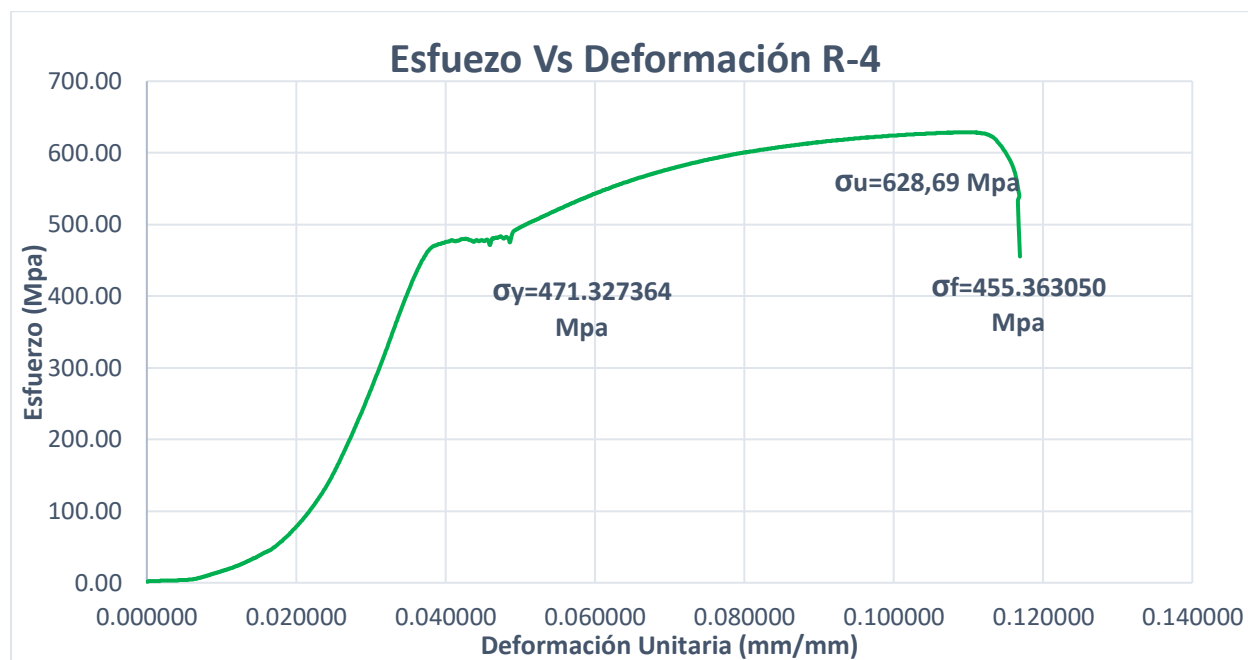
El empalme se sometió a tracción hasta llegar al punto de falla como se observa en la figura 17. Los datos iniciales y finales de este ensayo fueron:

Área= 129mm²; Lo= 400 mm; Lf= 438.3 mm; Delta= 38.3 mm; Carga Máxima= 8270 Kg

Y la gráfica resultante se muestra a continuación:

Figura 16

Grafica Esfuerzo vs deformación en empalme roscado #4.



Nota. Fuente propia

En esta gráfica de esfuerzo versus deformación unitaria se observa un esfuerzo máximo o ultimo de 628,69 Mpa, un esfuerzo de fractura de 455,36Mpa, un esfuerzo de fluencia de 471,32 Mpa el cual da un margen de seguridad del 5% de acuerdo a la fluencia teórica de 420Mpa. Se calculo la deformación unitaria en el punto de fluencia siendo de 0.039 mm/mm o 3,9%, casi en el 4% donde se tiene previsto encontrar dicho esfuerzo. El módulo elástico de los elementos del acople fue 27.324,15 Mpa. El conector roscado no fallo ni presento fisuras o deformación, sin embargo, la ruptura de la barra se presentó en una de las zonas de roscado dentro del acople.

Figura 17

Ruptura de barra de acero corrugado #4 (1/2") con conector roscado.



Nota. Fuente propia

En la figura 17 se observa elongación de la barra en la zona de la rosca con una falla en diagonal que alcanza a entrar en el conector. Es algo importante para destacar en el comportamiento de estos elementos, puesto que el hecho de someter las barras a un roscado deformando el material, hace que su sección disminuya unos milímetros en esta zona, induciendo su falla por la rosca como se observa en la figura 18.

Figura 18

Ruptura transversal de barra de acero corrugado #4 (1/2") con conector roscado



Nota. Fuente propia

Barras de acero corrugado #5 (5/8") empalmadas por conector roscado

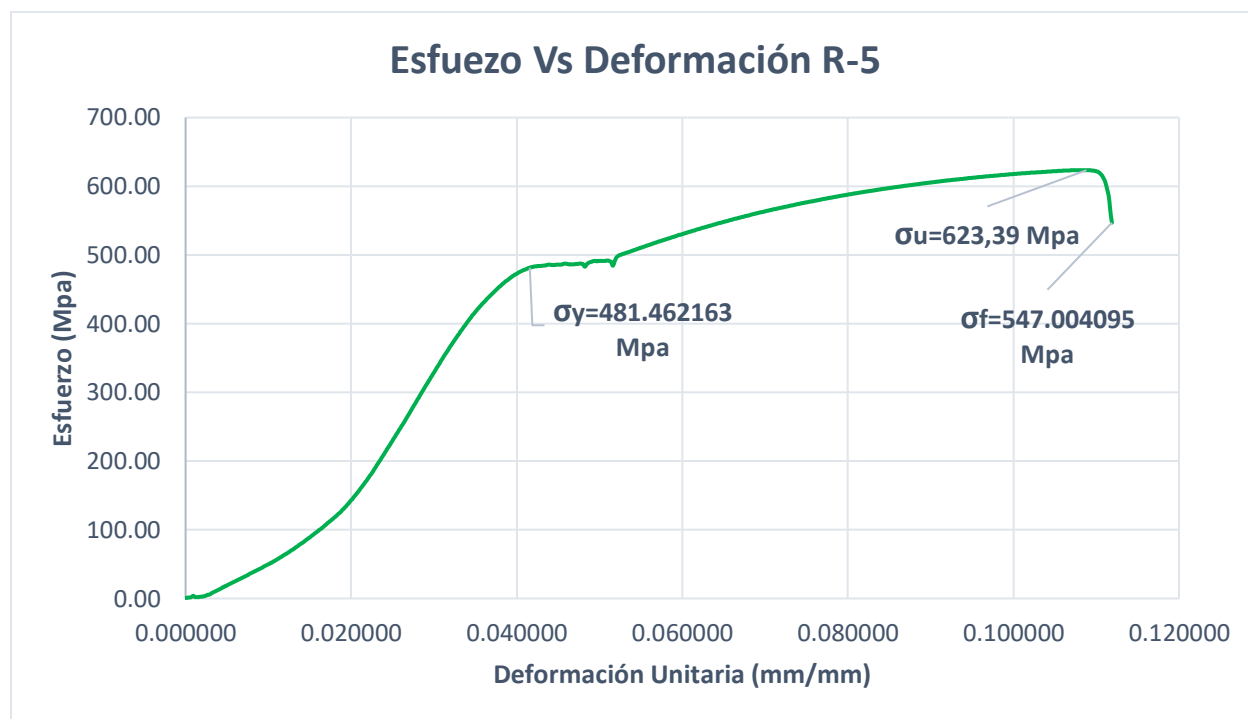
El empalme se sometió a tracción hasta llegar al punto de fractura como se observa en la figura 20. Los datos iniciales y finales de este ensayo fueron:

Área= 199mm²; Lo= 400 mm; Lf= 442.78 mm; Delta= 42.78 mm; Carga Máxima= 12650 Kgf

Según la gráfica de esfuerzo versus deformación unitaria se pudo obtener un esfuerzo máximo o ultimo de 623,39 Mpa, un esfuerzo de fractura de 547 Mpa, un esfuerzo de fluencia que fue 481,46 Mpa y la deformación unitaria en el punto de fluencia de 0.042 mm/mm. También se calculó el módulo elástico siendo igual a 21.914,30 Mpa.

Figura 19

Grafica Esfuerzo vs deformación en empalme roscado #5.



Nota. Fuente propia

El conector roscado no fallo ni presentó fisuras o deformación, sin embargo, la ruptura de la barra se presentó en una de las zonas de roscado dentro del acople.

Figura 20

Ruptura transversal de barra de acero corrugado #5 (5/8") con conector roscado.



Nota. Fuente propia

Al someter la barra a un roscado, esta disminuye su sección o diámetro en esta zona, por lo que induce su falla por la rosca como se observó en el ensayo.

Figura 21

Ruptura transversal de barra de acero corrugado #5 (5/8") con conector roscado



Nota. Fuente propia

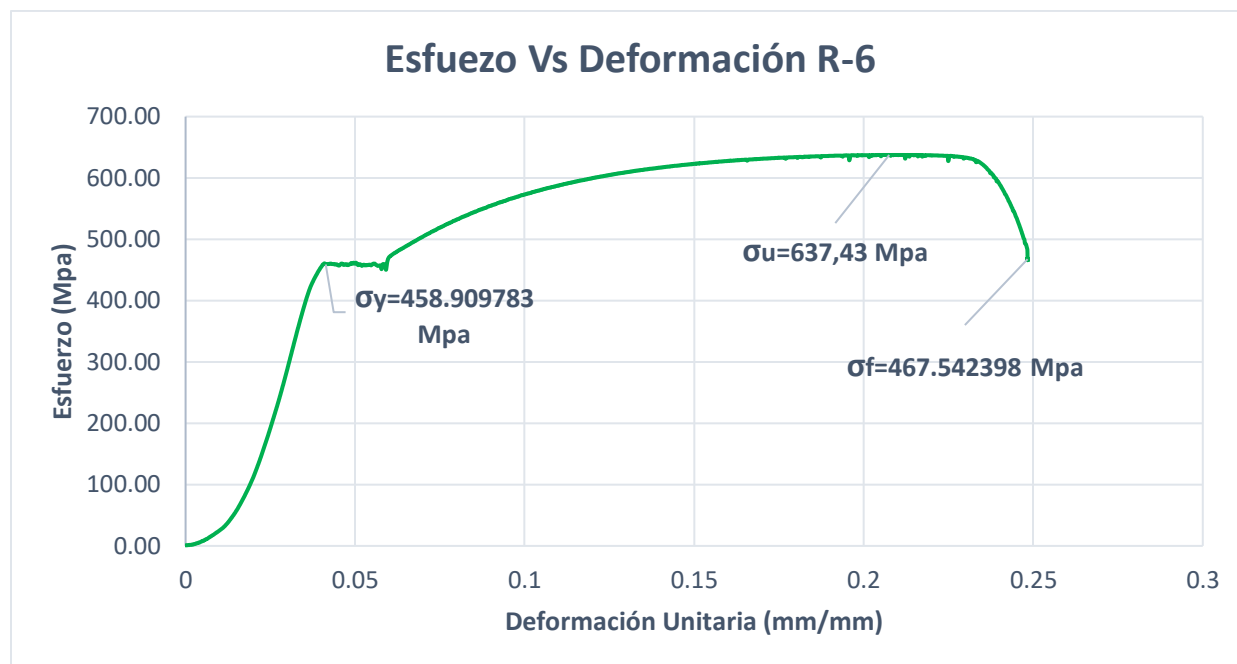
Barras de acero corrugado #6 (3/4") empalmadas por conector roscado

Los datos iniciales y finales de este ensayo fueron:

Área= 284mm²; Lo= 400 mm; Lf= 465.2 mm; Delta= 65.2 mm Carga Máxima= 18460 Kgf

Figura 22

Grafica Esfuerzo vs deformación en empalme roscado #6.



Nota. Fuente propia

De acuerdo a la gráfica de esfuerzo versus deformación unitaria se observa un esfuerzo máximo o último de 637,43 Mpa, un esfuerzo de fractura de 468,92 Mpa, un esfuerzo de fluencia que fue 458,91 Mpa el cual da un margen de seguridad del 5%. La deformación unitaria en el punto de fluencia fue de 0.0406 mm/mm o 4,6%. El módulo elástico de los elementos del acople fue 21.112,71 Mpa.

Figura 23

Ruptura de barra de acero corrugado #6 (3/4") con conector roscado.



Nota. Fuente propia

En la figura 23 se observa el punto de ruptura del empalme luego de ser sometido a tracción, el cual se presentó en la barra inferior, lejos del conector. Es el tipo de falla que se espera y se confirma la resistencia esperada del empalme con su conector.

Figura 24

Ruptura transversal de barra de acero corrugado #6 (3/4") con conector roscado.



Nota. Fuente propia

En la figura 23 se observa el adelgazamiento de la barra en su punto de ruptura, una falla horizontal y común.

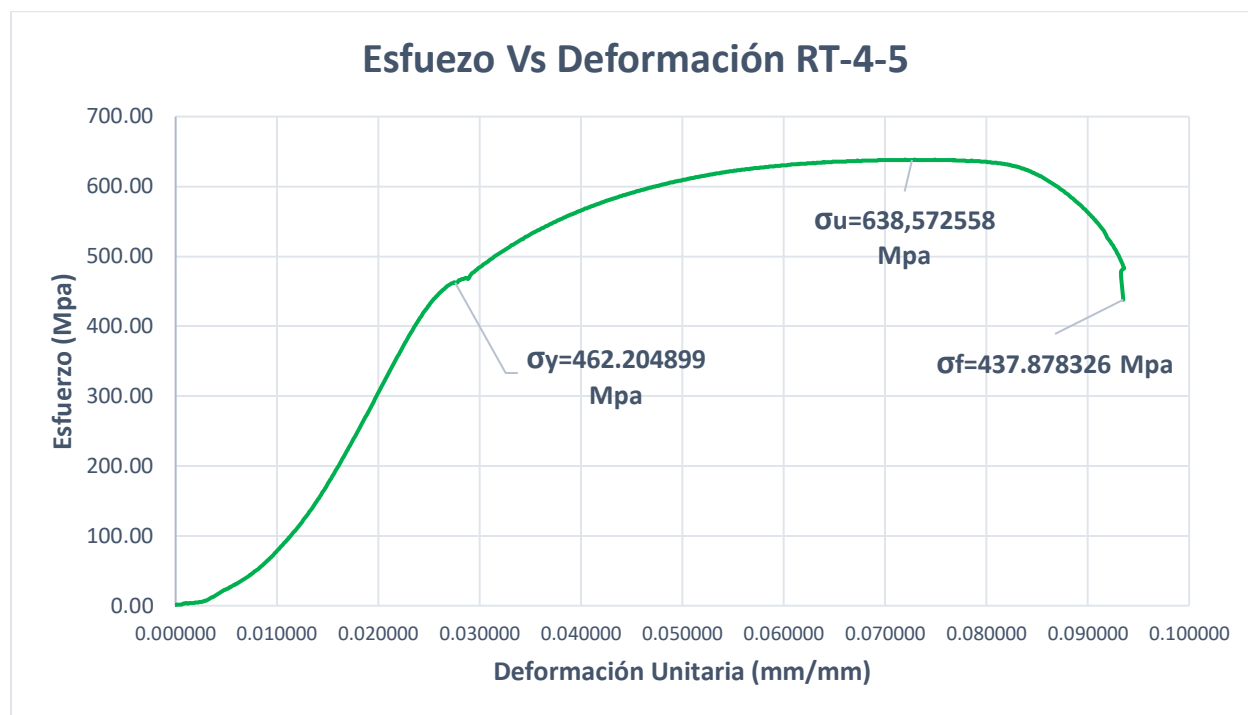
Barras de acero corrugado #4 (1/2") y #5 (5/8") empalmadas por conector de transición roscado

Los datos iniciales y finales de este experimento fueron:

Áreas= 129 mm² y 199 mm²; Lo= 400 mm; Lf= 427.16 mm; Delta= 27,16mm; Carga Máxima= 8400 Kg

Figura 25

Grafica Esfuerzo vs deformación en empalme roscado de transición de #4 a #5



Nota. Fuente propia

Según la gráfica de esfuerzo versus deformación unitaria se pudo obtener un esfuerzo máximo o ultimo de 638,57 Mpa, un esfuerzo de fractura de 437,487Mpa, un esfuerzo de fluencia que fue 462,20 Mpa y la deformación unitaria en el punto de fluencia de 0.027 mm/mm. También se calculó el módulo elástico siendo igual a 27353,64 Mpa.

Figura 26

Ruptura de barras de acero corrugado #4 (1/2") y #5 (5/8") empalmadas por conector roscado



Nota. Fuente propia

Figura 27

Ruptura transversal de barras de acero corrugado #4 (1/2") y #5 (5/8") empalmadas por conector roscado



Nota. Fuente propia

Se produjo la rotura en la barra de menor diámetro la #4 de forma diagonal a la sección, en este ensayo no se vio afectada la rosca ubicada en la unión con el conector mecánico.

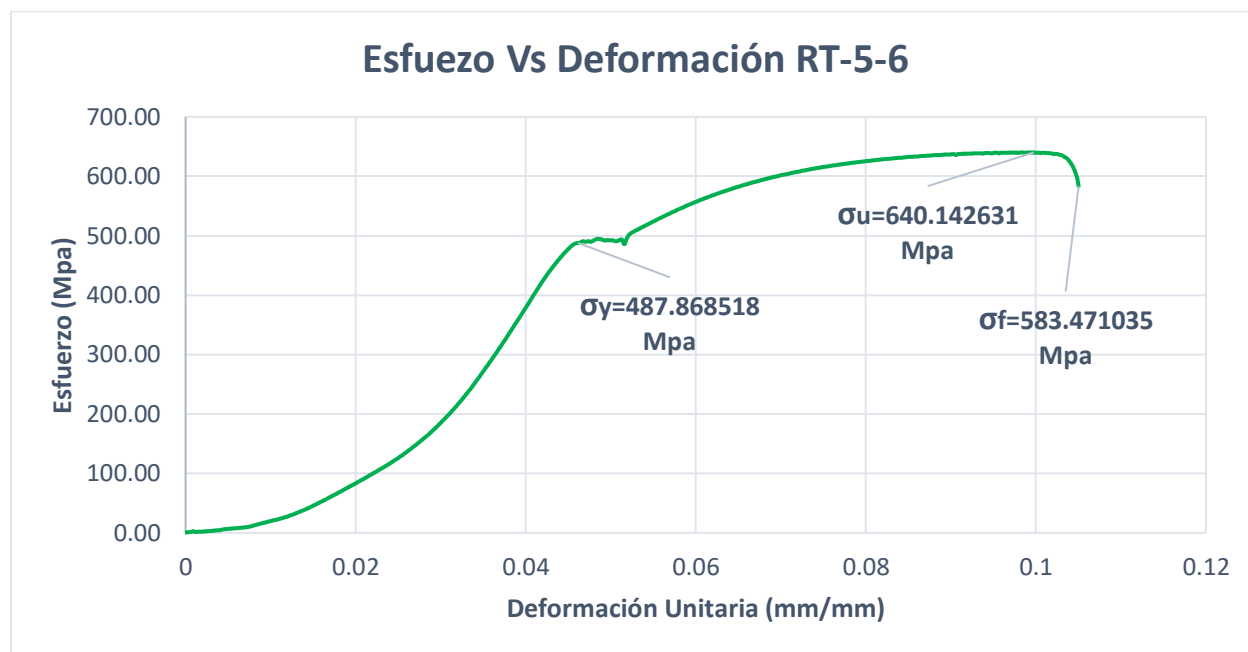
Barras de acero corrugado #5 (5/8") y #6 (3/4") empalmadas por conector de transición roscado

Los datos iniciales y finales de este experimento fueron:

Áreas= 199 mm² y 284 mm²; Lo= 400 mm; Lf= 435.6.0 mm; Delta= 35.6 mm; Carga Máxima= 12990 Kgf

Figura 28

Grafica Esfuerzo vs deformación en empalme roscado de transición de #5 a #6



Nota. Fuente propia

Según la gráfica de esfuerzo versus deformación unitaria se pudo obtener un esfuerzo máximo o ultimo de 640,14 Mpa, un esfuerzo de fractura de 583,47Mpa, un esfuerzo de fluencia que fue 487,87 Mpa y la deformación unitaria en el punto de fluencia de 0.046 mm/mm. También se calculó el módulo elástico siendo igual a 21.934.14 Mpa.

Figura 29

Ruptura de barras de acero corrugado #5 (5/8") y #6 (3/4") empalmadas por conector de transición roscado



Nota. Fuente propia

Figura 30

Ruptura transversal de barras de acero corrugado #5 (5/8") y #6 (3/4") empalmadas por conector de transición roscado



Nota. Fuente propia

En un análisis comparativo con los empalmes tradicionales por traslapo, Durante estos ensayos los conectores mecánicos transfirieron los esfuerzos de manera correcta de una barra a otra sin tener necesidad de la adherencia que daría el concreto, a diferencia de la necesidad que tendrían esta adherencia en los traslapos tradicionales. Con estos conectores también se descartan cálculos de longitudes de desarrollo para los empalmes.

Los empalmes mecánicos ofrecen una integridad estructural mayor. Las conexiones mecánicas ofrecen resistencia y solidez en caso de eventos sísmicos, naturales o de otro tipo. (Melissa González & Cuevas Florián , 2018)

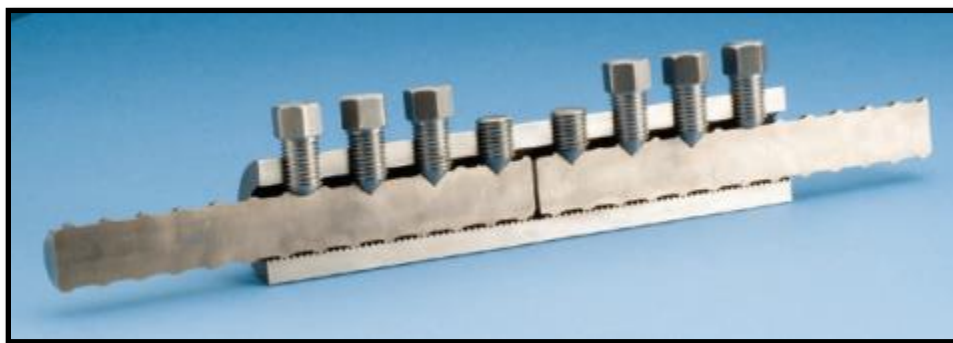
Estos empalmes tipo 2 cuentan con la capacidad de poder ser ubicados en cualquier parte de la estructura, ya sean en nodos, zonas confinadas o no confinadas. Estos suprimen problemas de aglomeración de barras, y hace posible realizar los trabajos de manera mas competente.

6.1.2. Conectores de tornillo

Compuesto por un cilindro hueco de acero 1045 con tornillos incrustados que ejercen fuerza, causando deformaciones en la barra dentro de la cuña del acoplador. Al mismo tiempo, los tornillos se incrustan en la superficie de la varilla y luego se ajustan hasta que las cabezas de los pernos se quiebren una vez alcanzada el apriete adecuado de instalación, lo que permite la inspección y verificación visual.

Figura 31

Vista en corte de conector de tornillo



Nota. Fuente: nVent LENTON

Son los conectores ideales para conexiones in situ, permiten una instalación muy sencilla en obra, puesto que no es necesario preparar, ni incrementar los extremos de las barras. Pueden instalarse con una llave de tuercas estándar o con una llave de impacto, dependiendo del tamaño del conector.

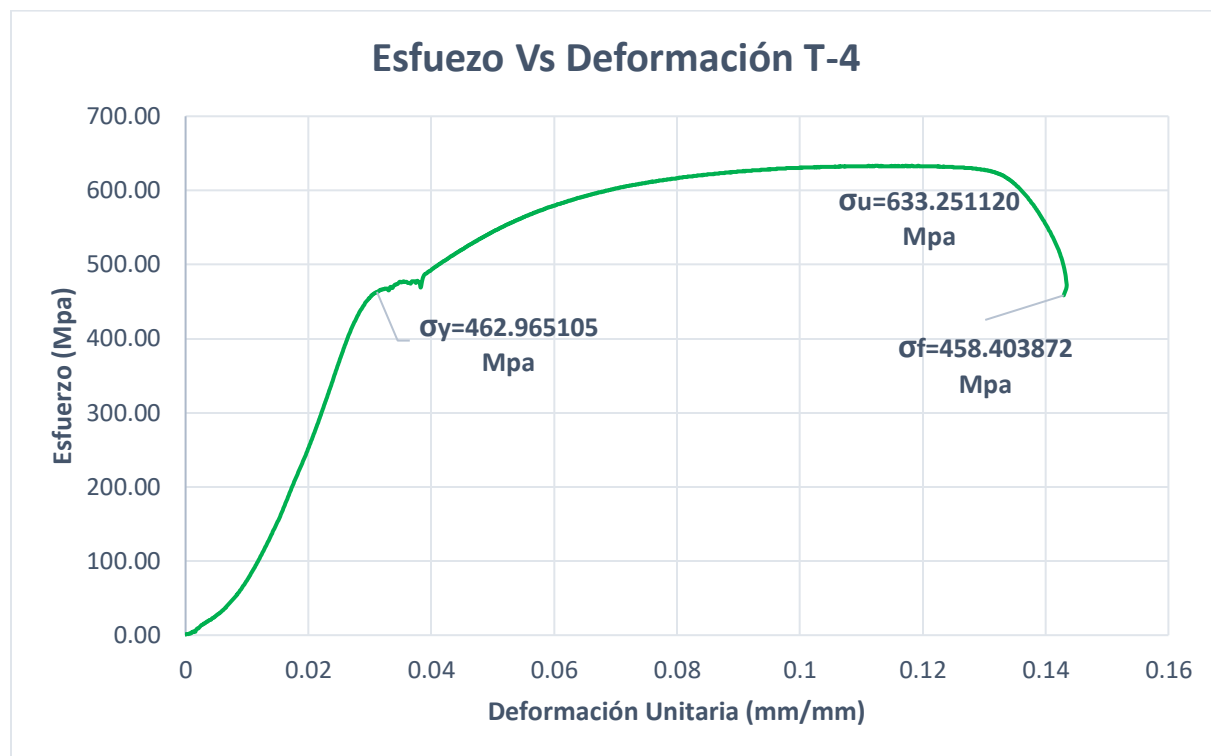
Barras de acero corrugado #4 (1/2") empalmadas por conector de tornillo

Los datos iniciales y finales de este ensayo fueron:

Área= 199 mm²; Lo= 400 mm; Lf= 442.9 mm; Delta= 42.9 mm; Carga Máxima= 8330 Kg

Figura 32

Ruptura de barras de acero corrugado #4 (1/2) empalmadas por conector de tornillo



Nota. Fuente propia

Según la gráfica de esfuerzo versus deformación unitaria se pudo obtener un esfuerzo máximo o ultimo de 633,25 MPa, un esfuerzo de fractura de 458,4 Mpa, un esfuerzo de fluencia que fue 462,96 MPa y la deformación unitaria en el punto de fluencia de 0.0311 mm/mm. También se calculó el módulo elástico siendo igual a 24051,6 MPa.

En comparación con la barra del mismo diámetro acopladas con un conector roscado, cuya ruptura fue en la unión mecánica, la rotura de este empalme fue a 5 cm del acople, lo que garantiza la continuidad de los esfuerzos a los que es sometida una estructura.

Figura 33

Ruptura de barra de acero corrugado #4 (1/2") empalmada por conector de tornillo



Nota. Fuente propia

El tipo de falla se presenta en este empalme, es el esperado, una fractura horizontal y común en los ensayos de tracción de estos materiales.

Figura 34

Ruptura transversal de barra de acero corrugado #4 (1/2") empalmada por conector de tornillo



Nota. Fuente propia

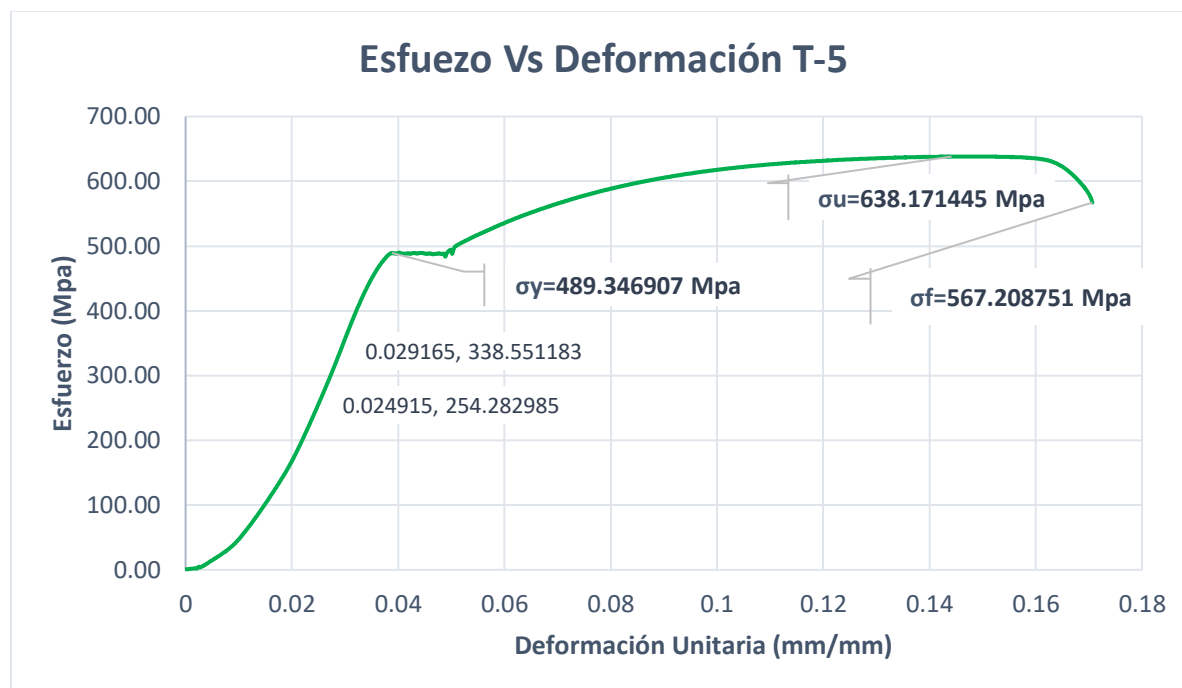
Barras de acero corrugado #5 (5/8") empalmadas por conector de tornillo

Los datos iniciales y finales de este ensayo fueron:

Área= 199mm²; Lo= 400 mm; Lf= 452.58 mm; Delta= 52.58 mm; Carga Máxima= 12950 Kgf

Figura 35

Grafica Esfuerzo vs deformación en empalme de tornillo #5.



Nota. Fuente propia

Según la gráfica de esfuerzo versus deformación unitaria se pudo obtener un esfuerzo máximo o ultimo de 638,17 Mpa, un esfuerzo de fractura de 567,21 Mpa, un esfuerzo de fluencia que fue 489,35 Mpa y la deformación unitaria en el punto de fluencia de 0.04 mm/mm. También se calculó el módulo elástico siendo igual a 19827,81 MPa.

Figura 36

Ruptura de barras de acero corrugado #5 (5/8") empalmadas por conector de tornillo



Nota. Fuente propia

La ruptura de este empalme se localiza a 6 cm del conector y se presenta en diagonal, el mismo sentido en el que se encuentran los hilos de la barra corrugada. Una falla común y que garantiza la transferencia de esfuerzos en el punto de empalme entre barras de este diámetro.

Figura 37

Ruptura transversal de barras de acero corrugado #5 (5/8") empalmadas por conector de tornillo



Nota. Fuente propia

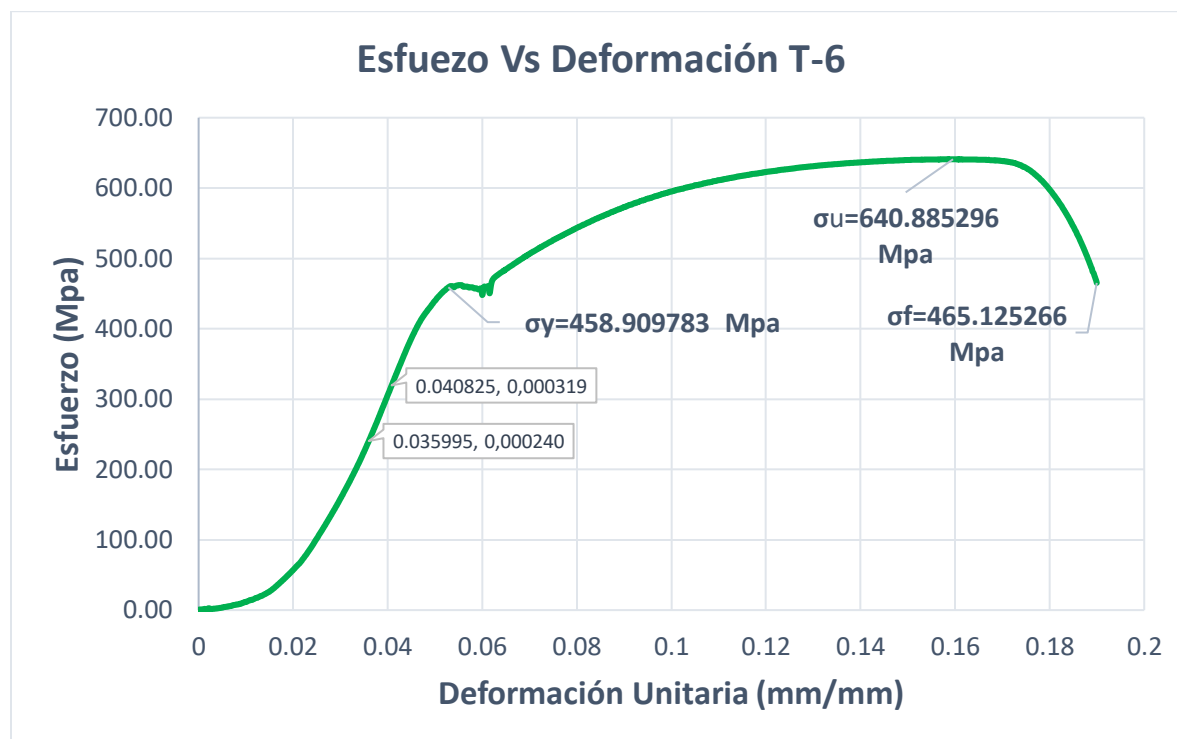
Barras de acero corrugado #6 (3/4") empalmadas por conector de tornillo

Los datos iniciales y finales de este experimento fueron:

Área= 284 mm²; Lo= 400 mm; Lf= 455.09 mm; Delta= 55.09 mm; Carga Máxima= 18560 Kgf

Figura 38

Grafica Esfuerzo vs deformación en empalme roscado #6.



Según la gráfica de esfuerzo versus deformación unitaria se pudo obtener un esfuerzo máximo o ultimo de 640,88 Mpa, un esfuerzo de fractura de 465,12 Mpa, un esfuerzo de fluencia que fue 458,91 Mpa y la deformación unitaria en el punto de fluencia de 0.054 mm/mm. También se calculó el módulo elástico siendo igual a 16388.4 Mpa.

Figura 39

Ruptura de barras de acero corrugado #6 (3/4") empalmadas por conector de tornillo



Nota. Fuente propia

La ruptura de este empalme se localiza a 3 cm del conector y se presenta semi horizontalmente, una fractura común y que garantiza la continuidad de transferencia de esfuerzos durante todo el refuerzo de una estructura con estos acoples.

Figura 40

Ruptura de barras de acero corrugado #6 (3/4") empalmadas por conector de tornillo



En los ensayos de empalmes de tornillo realizados se observó que actúa como una pieza continua de barra de refuerzo y es ideal para aplicaciones en nuevas construcciones, reparación o rehabilitación, debido a la fácil instalación y a no necesitar grandes longitudes de barra para realizar el acople. Su método de agarre permite el desarrollo de una resistencia completa de la barra de refuerzo y una mejor integridad estructural general en aplicaciones relacionadas con tensión, compresión, inversión de los esfuerzos y dinámicas. (nVent Lenton, 2018)

Este innovador conector mecánico para barra de refuerzo está diseñado para ser utilizado en empalmes de columnas, aplicaciones de puentes, apilamiento, empalmes para clavijas fundidas en hormigón, coladas para dispositivos de cierre, vigas, construcción de chimeneas y otras aplicaciones de empalme complicadas

Recopilando los datos obtenidos de los ensayos realizados con los diferentes tipos de conectores se realizan dos tablas donde se evalúan esfuerzos y módulo de elasticidad.

Tabla 5

Resultados Después de la Falla

ENSAYO	UNIDAD	MODULO DE ELASTICIDAD	ESFUERZO DE FLUENCIA (EXPERIMENTAL) σ_y	ESFUERZO DE FLUENCIA (TEÓRICO)	MARGEN DE SEGURIDAD
Barra corrugada #4	MPa	19.228,82	452,32	420	8%
Barra corrugada #5	MPa	20.763,56	485,37	420	16%
Barra corrugada #6	MPa	19.671,69	441,47	420	5%
Roscado #4	MPa	27.324,15	440,16	420	5%
Roscado #5	MPa	21.914,30	460,76	420	10%
Roscado #6	MPa	21.112,71	458,91	420	9%
Tornillo #4	MPa	24.051,60	462,96	420	10%
Tornillo #5	MPa	19.827,81	489,35	420	17%
Tornillo #6	MPa	16.388,40	458,91	420	9%
Roscado #4-#5	MPa	27.353,64	462,20	420	10%
Roscado #5-#6	MPa	21.934,14	487,87	420	16%

Nota. Fuente: Propia

Tabla 6

Resultados Después de la Falla

ENSAYO	UNIDAD	ESFUERZO DE FLUENCIA (EXPERIMENTAL) σ_y	ESFUERZO MÁXIMO σ_u	σ_u/σ_y	$\sigma_y 1,25$	NORMA
Roscado #4	MPa	440,1589	628,69	1,43	660,23	CUMPLE
Roscado #5	MPa	460,7647	623,39	1,35	691,14	CUMPLE
Roscado #6	MPa	458,9097	637,43	1,39	688,36	CUMPLE
Tornillo #4	MPa	462,9651	633,25	1,37	694,44	CUMPLE
Tornillo #5	MPa	489,3469	638,17	1,30	734,02	CUMPLE
Tornillo #6	MPa	458,9097	640,88	1,40	688,36	CUMPLE
Roscado 4#-5#	MPa	462,2048	638,57	1,38	693,31	CUMPLE
Roscado 5#-6#	MPa	487,8685	640,14	1,312	731,80	CUMPLE

Nota. Fuente: Propia

De acuerdo a los esfuerzos máximos presentados en los ensayos a tracción, se calcula cuanta relación existe por encima del esfuerzo de fluencia que resistió el empalme. Los empalmes mecánicos de tornillo, roscados y roscados de transición utilizados cumplen satisfactoriamente el requisito de desarrollar por lo menos el 1,25 veces del esfuerzo de fluencia, llegando a resistir hasta $1,43f_y$ y en comparación con los empalmes por traslapo, resultan más convenientes ya que brindan una mejor transferencia de cargas, ofrecen mayor integridad estructural, resistencia y solidez en caso de eventos sísmicos o de otro tipo, disminuir la congestión de las barras de refuerzo, permitir conseguir la fracción ideal entre el acero/concreto, no requerir cálculos adicionales como si ocurre con los traslapos, fácil y rápida instalación, reducir trabajo y aumentar la seguridad en obra. Por último, algo de relevancia es la consideración de los empalmes mecánicos de tal manera que se permite su uso en componentes de amarre en tensión, como lo pueden ser los tensores de arcos, algo que no se lograría con un empalme por traslapo.

Sin embargo los empalmes con conectores roscados #4 y #5 se deslizaron y fallaron en su mayoría por la rosca, encontrando que el hecho de roscar la varilla y disminuir la sección en ese punto, hace que el empalme sea más vulnerable a fallar en este sector, sin embargo, estos empalmes y las demás probetas ensayadas cumplieron los requisitos de tracción estipulados por la NTC-2289, tabla A.2, en la cual se establece que la resistencia mínima a la fluencia es de 420 MPa, y la resistencia mínima a la tracción es de 550 MPa. Así mismo se comprobó que los conectores mecánicos cumplen con lo establecido en la NSR-10, así como los requisitos del Código de Diseño de Puentes, la ACI-439 y la ACI-318, demostrando de esta manera que es seguro su aplicación en la construcción.

6.2. EMPALMES POR TRASLAPO

Los empalmes de traslapo dependen en gran medida de la calidad del concreto y/o confinamiento mediante refuerzo transversal, puesto que este empalme trabaja por

deslizamiento, mientras que el empalme mecánico proporciona continuidad de la trayectoria de carga en el refuerzo, independientemente de la condición del concreto.

Para el cálculo de la longitud de empalme de cada una de las barras, se calcula la longitud de desarrollo específica de este proyecto, en donde se tomarán valores estándar trabajando con la tabla 2, entonces de acuerdo a que se utilizaran solo barras menores a la No. 7, se presentan los siguientes datos para el cálculo.

$$f_y = 420 \text{ MPa.}$$

$$\Psi_e = 1.0, \text{ para refuerzo sin recubrimiento y refuerzo recubierto con cinc (galvanizado).}$$

$$\Psi_t = 1.0, \text{ para barras localizadas en la parte inferior de la sección.}$$

$$f'_c = 24 \text{ MPa o } 3500 \text{ PSI.}$$

$$\lambda = 1.0, \text{ para estructuras con concreto de peso normal}$$

$$l_d = \left[\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{2.1 \lambda \sqrt{f'_c}} \right] d_b \quad l_d = \left[\frac{(420)(1)(1)}{2.1(1) \sqrt{24}} \right] d_b \quad l_d = 40.82 d_b$$

De acuerdo a esto, se calcula la longitud de desarrollo y posteriormente la longitud de traslapo para empalmes clase A y clase B para cada uno de los diámetros comerciales, como se puede observar en la tabla 7.

Tabla 7

Diámetros y Longitudes de Desarrollo Para Varillas Comerciales

Designación de la Barra	$\emptyset$ (in)	$\emptyset$ (mm)	Área (mm²)	Longitud de desarrollo l_d (cm)	Longitud traslapo Clase A (cm)	Longitud traslapo Clase B (cm)
No. 3	3/8"	9.5	71	38.8	39.0	50
No. 4	1/2"	12.7	129	51.8	52.0	67
No. 5	5/8"	15.9	199	64.9	65.0	84
No. 6	3/4"	19.1	284	78.0	78.0	101

No. 7	7/8"	22.2	387	90.6	91.0	118
No. 8	1"	25.4	510	103.7	104.0	135

Nota. Fuente propia

6.3. ENSAYOS DE CARGA Y DESCARGA

De acuerdo a la metodología planteada se sometieron a carga y descarga los siguientes empalmes mecánicos:

- ✓ Barras de acero corrugado #4 (1/2") empalmadas por conector roscado.
- ✓ Barras de acero corrugado #5 (5/8") empalmadas por conector roscado.
- ✓ Barras de acero corrugado #6 (3/4") empalmadas por conector roscado.

Fueron sometidos a dos tipos de pruebas:

- ✓ Tipo 1: Carga y descarga por 16 repeticiones.
- ✓ Tipo 2: Carga y descarga por 32 repeticiones.

6.3.1. Barras de acero corrugado #4 (1/2") empalmadas por conector roscado, ensayo tipo 1.

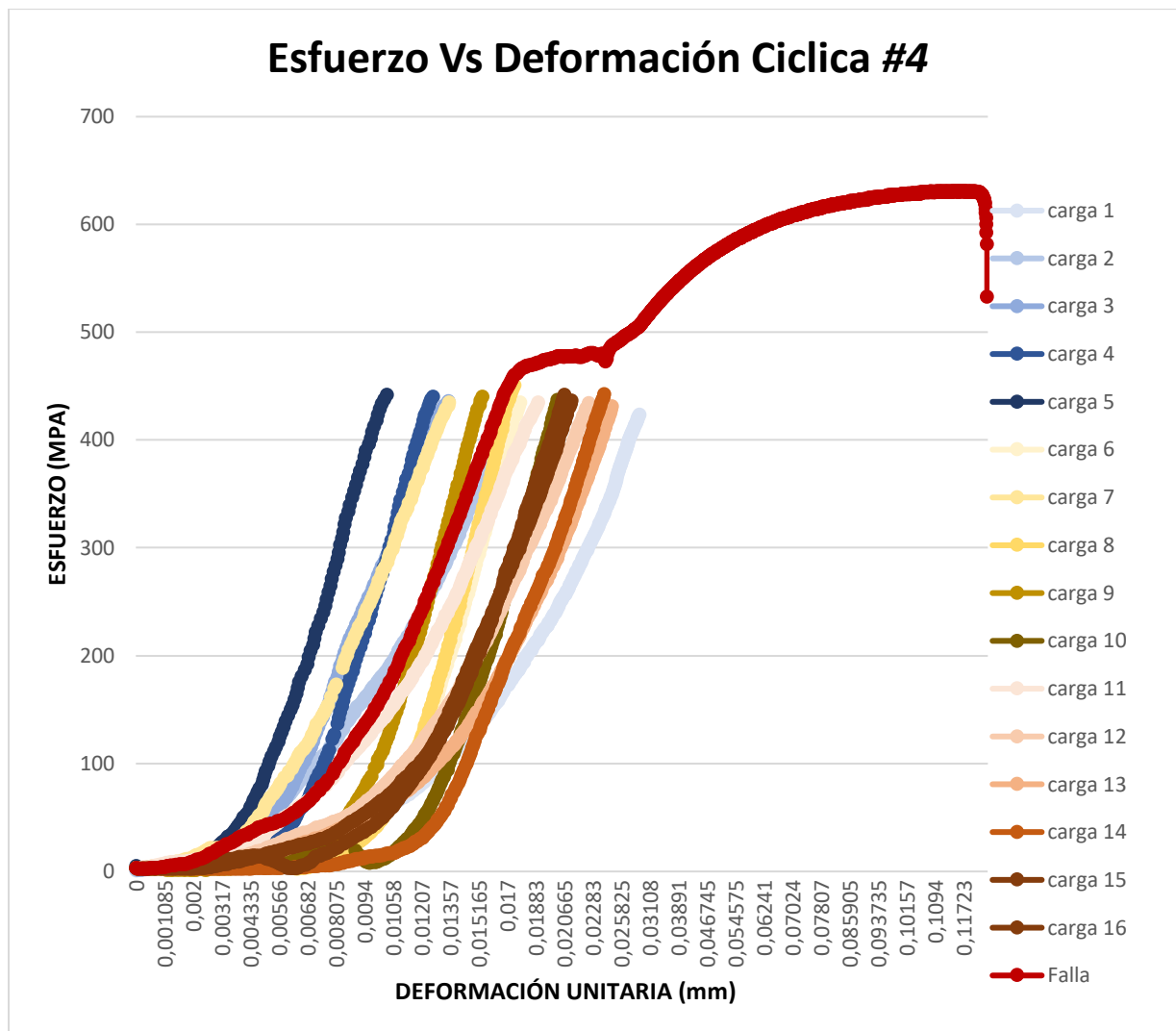
Mediante este ensayo se pretendía observar el comportamiento de los empalmes con conectores mecánicos al ser sometidos a repetidas cargas por debajo del esfuerzo de fluencia, manteniendo un comportamiento elástico del material, zona donde normalmente trabajan las estructuras sismorresistentes, para luego fallarlas a tracción y compararlas.

Los datos iniciales y finales de este experimento fueron:

Área= 129mm²; Lo= 400 mm; Lf= 452,2 mm; Delta= 52 mm; Carga Máxima= 8300 Kg

Figura 41

Esfuerzo vs Deformación en carga y descarga de conector roscado #4



Nota. Fuente propia

Analizando los resultados de forma comparativa con los del ensayo de tracción en el mismo tipo de empalme mecánico se observa una diferencia de 8.3 mm, siendo mayor la deformación longitudinal en la probeta sometida a cargas cíclicas.

Según la gráfica de esfuerzo versus deformación unitaria se pudo obtener un esfuerzo máximo o ultimo de 630,97 Mpa, un esfuerzo de fractura de 532, 904Mpa, un esfuerzo de fluencia que

fue 471,32 Mpa y la deformación unitaria en el punto de fluencia de 0.039 mm/mm. También se calculó el módulo elástico siendo igual a 27324.15 MPa.

Figura 42

Ruptura de barras #4 (1/2") empalmadas por conector roscado en ensayo de carga y descarga



Nota. Fuente propia

Figura 43

Ruptura de barras #4 (1/2") empalmadas por conector roscado en ensayo de carga y descarga tipo 1



Nota. Fuente propia

Se pudo interpretar que los empalmes mecánicos en una barra #4 (1/2") se comportan de manera aceptable al ser sometidas a una carga repetitiva en 16 veces, luego cargada hasta su rotura en la parte donde se genera la rosca para el anclaje al empalme mecánico, esta rotura se

genera de forma diagonal dejando en evidencia que el roscado induce su falla teniendo en cuenta los ensayos realizados con este mismo tipo de probeta.

6.3.2. Barras de acero corrugado #5 (5/8") empalmadas por conector roscado, ensayo tipo 2.

Figura 44

Ruptura de barras #5 (5/8") empalmadas por conector roscado en ensayo de carga y descarga tipo 2.



Nota. Fuente propia

Figura 45

Ruptura de barras #5 (5/8") empalmadas por conector roscado en ensayo de carga y descarga tipo 2.



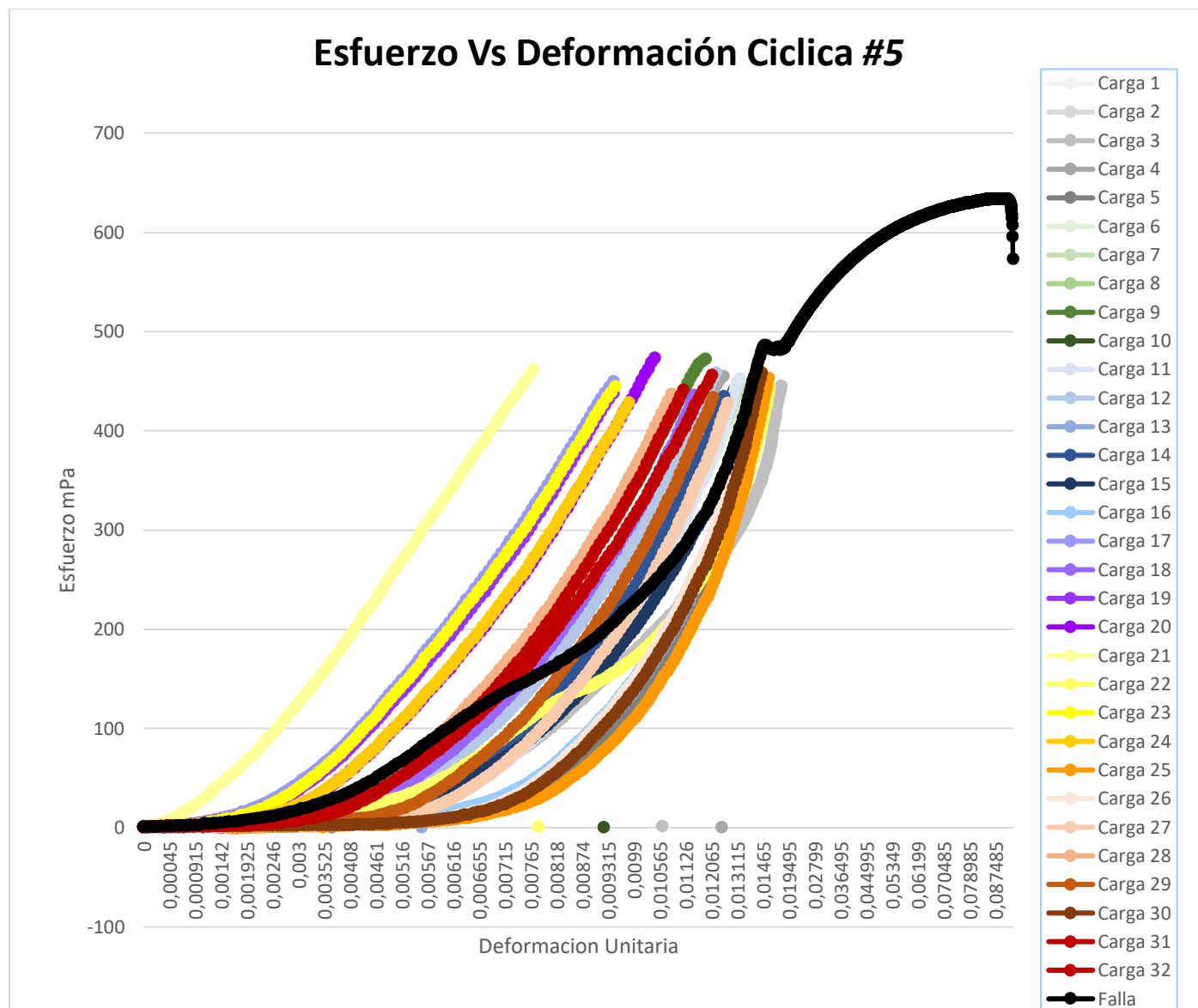
Nota. Fuente propia

Analizando el comportamiento de esta probeta es notable que su comportamiento es similar a la probeta de diámetro #4, su rotura se genera en la unión barra-conector, Siendo nuevamente la parte donde se rosca la barra de acero la parte más vulnerable de esta probeta.

Área= 198mm²; Lo=400mm; Lf=437,81mm; Delta=37,816mm; Carga Máxima=12800Kgf

Figura 46

Esfuerzo vs Deformación en carga y descarga de conector roscado #5



Nota. Fuente propia

Según la gráfica de esfuerzo versus deformación unitaria se pudo obtener un esfuerzo máximo o ultimo de 633,96mPa, un esfuerzo de fractura de 573,04mPa, un esfuerzo de fluencia que fue 485,87mPa y la deformación unitaria en el punto de fluencia de 0,0149mm/mm. También se calculó el módulo elástico siendo igual a 57453mPa.

6.3.3. Barras de acero corrugado #6 (3/4") empalmadas por conector roscado, ensayo tipo 2.

Figura 47

Ruptura de barras #6 (3/4") empalmadas por conector roscado en ensayo de carga y descarga tipo 2.



Nota. Fuente propia

Figura 48

Ruptura de barras #6 (3/4\") empalmadas por conector roscado en ensayo de carga y descarga tipo 2.



Nota. Fuente propia

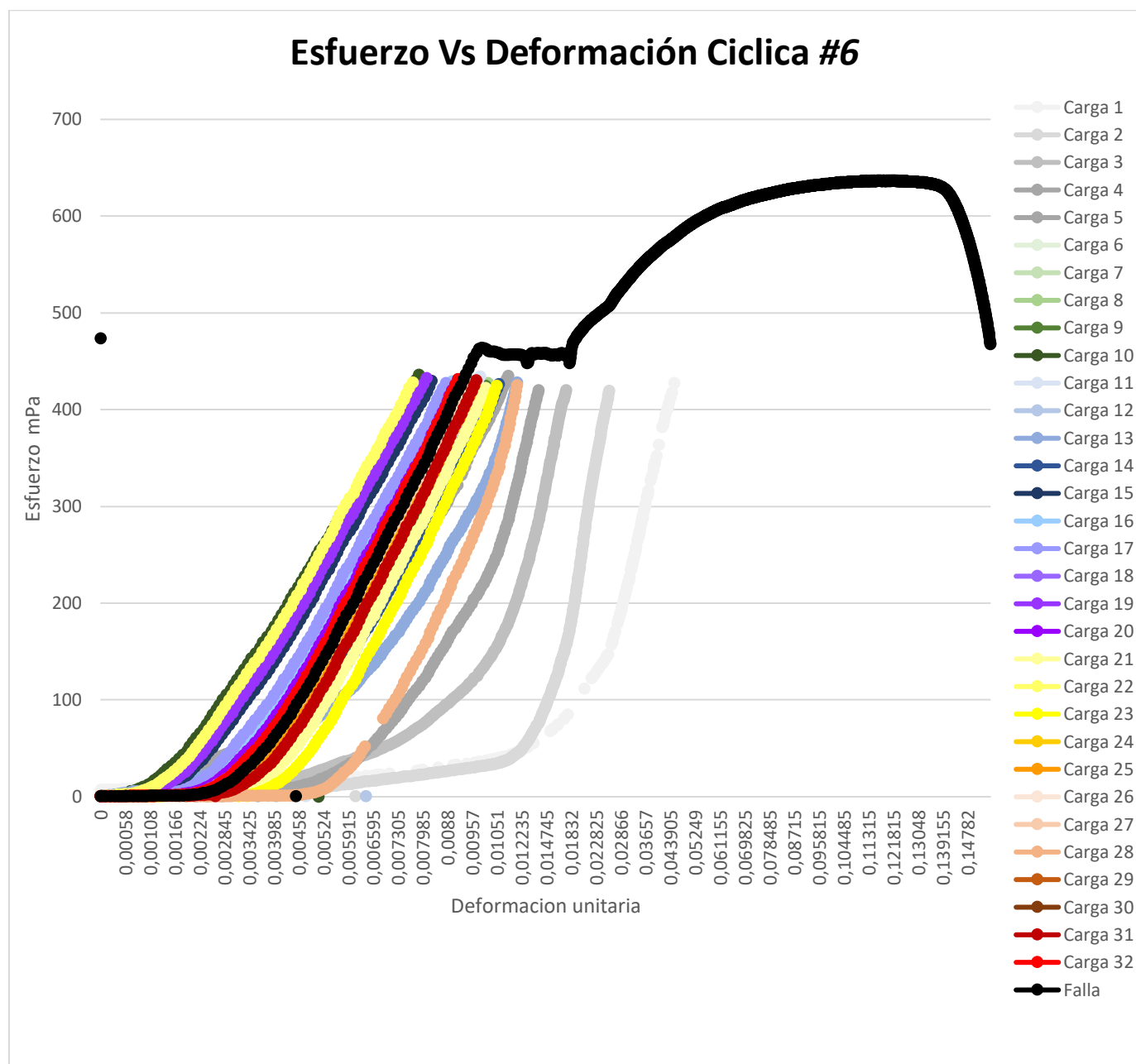
Se puede interpretar que los empalmes mecánicos en una barra #6 (3/4" in) se comporta de manera aceptable al ser sometida al segundo tipo de prueba carga cíclica, después de las 32

cargas y luego su falla, esta presenta su rotura a 15 cm de la unión mecánica siendo esta la única barra que no falla en la rosca generada para la unión.

Área= 287mm²; Lo=400mm; Lf=462,87mm; Delta=62,872mm; Carga Máxima=18620Kgf

Figura 49

Esfuerzo vs Deformación en carga y descarga de conector roscado #6



Nota. Fuente propia

Según la gráfica de esfuerzo versus deformación unitaria se pudo obtener un esfuerzo máximo o ultimo de 636,23mPa, un esfuerzo de fractura de 467,09mPa, un esfuerzo de fluencia que fue 458,55mPa y la deformación unitaria en el punto de fluencia de 0,0097mm/mm. También se calculó el módulo elástico siendo igual a 71072,56mPa.

Análisis Comparativo

Los tres ensayos dejan análisis similares para los dos tipos de prueba cíclica, se pudo ver que los laboratorios muestran evidentemente que el empalme es capaz de desarrollar una gran deformación no lineal en las barras y la falla está por encima de los valores aceptados. Las probetas no fueron sometidas a compresión para evitar una falla por pandeo, teniendo en cuenta que estos ensayos se realizaron sin recubrimiento de concreto.

El aumento del módulo de elasticidad en los tres tipos de probeta muestra que al ser sometidos a los dos métodos de prueba cíclica redujo significativamente la ductilidad del material, así mismo se evidencio un aumento en la rigidez del material tomando en cuenta que la falla en las barras #4 (1/2 in) y #5 (5/8in) se generó en la rosca que une el conector mecánico con la barra de acero corrugado, esto se debe a un envejecimiento por cargas repetitivas.

En la gráfica se observó que este sistema de roscado tendía a generar un deslizamiento significativo teniendo en cuenta también el deslizamiento generado en las mordazas de la maquina universal utilizada en este laboratorio. El proceso de enroscado demostró ser clave para el rendimiento de estos empalmes mecánicos.

En general para los dos tipos de prueba demuestran que el sometimiento a cargas cíclicas no reduce la ductilidad de falla y que se puede esperar una resistencia de este conector dentro de la zona no lineal, los empalmes mecánicos son capaces de empalmar de manera segura las barras de acero de refuerzo entre sí y que estas producen una rotura en la barra como modo de falla lo que nos indica que este empalme es más fuerte que la barra entre sí, si depender del confinamiento del concreto para mantener su empalme.

6.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS

6.4.1. Costos de empalmes por traslapo

La elaboración de un empalme por traslapo, al igual que el mecánico, varía dependiendo del diámetro de la barra, por lo que se realizaron análisis de precios unitarios para cada empalme (ver anexo 1), con el fin de obtener el valor unitario de las actividades de empalmes por traslapo. Dentro de los APU realizados, se tuvo en cuenta cantidades que se usan de cada material necesario en un empalme y con precios de acuerdo a cotizaciones para la ciudad de Bogotá. Dentro de estos materiales están las barras de acero corrugado, alambre galvanizado calibre 17 para amarres, herramienta menor y mano de obra, la cual se calculó aproximadamente en un 30% sobre el costo total de la actividad. En la tabla 8 se muestran los costos unitarios de los empalmes por traslapo.

Tabla 8

Costo unitario de empalmes por traslapo

Designación de la Barra	Ø (in)	Ø (mm)	Longitud traslapo Clase B (m)	Costo Directo Empalme Traslapo
No. 4	1/2"	12.7	67	\$ 4,505.00
No. 5	5/8"	15.9	84	\$ 7,087.00
No. 6	3/4"	19.1	101	\$10,621.00
No. 7	7/8"	22.2	118	\$15,811.00
No. 8	1"	25.4	135	\$22,764.00

Nota. Fuente: Propia

6.4.2. Costos de empalmes mecánicos

Para elaborar un análisis comparativo económico se solicitaron cotizaciones a empresas fabricantes y comercializadoras de conectores mecánicos como Ramalza SAS, empresa que proporciona los siguientes precios unitarios de empalmes mecánicos que ofrecen en su catálogo:

Tabla 9*Costos Unitarios De Empalmes Mecánicos En Pesos Colombianos 2021*

TIPO	Designación y diámetro del empalme					
	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 10
Empalme Roscado	\$10.234,00	\$ 10.234,00	\$ 12.376,00	\$ 15.589,00	\$18.564,00	\$28.012,60
Empalme Extruido	--	\$ 51.051,00	\$ 64.141,00	\$ 89.012,00	\$11.265,00	\$128.282,00
Empalme de Tornillo	\$83.181,00	\$103.530,00	\$117.810,00	\$137.802,00	\$165.410,00	\$188.020,00
TIPO	No. 4 - No. 5	No. 5 -No. 6	No. 6 - No. 7	No. 7- No. 8	No. 8 - No.10	
Empalme Roscado de transición	\$10.234,00	\$ 12.376,00	\$ 15.589,00	\$ 18.564,00	\$ 28.012,60	

Nota. Fuente: Ramalza S.A.S.

Estos precios están dados para la ciudad de Bogotá e incluyen el IVA. Para el caso de los acoples roscados, en donde es necesario una maquina roscadora de varillas con un operario especializado para manejarla, la empresa los provee dentro del precio estipulado en la tabla 2. Sin embargo, es necesario pagar por aparte el costo de transporte de la maquina roscada, con un flete de \$220.000 ida y vuelta. Además, se deben tener unos requisitos o consideraciones adicionales para la compra, roscado y uso de estos empalmes, los cuales son:

- Energía 220 V trifásica debe estar a no más de 4 metros de la máquina. La producción diaria promedio por maquina es de 300 roscas/día.
- La obra debe suministrar soportes metálicos o de madera (burros) para ubicar las barras a roscar; el número mínimo es dos por máquina y si la barra supera los 6 metros, se necesitan por lo menos cuatro. La altura de los soportes debe estar al nivel de la máquina;

el ancho mínimo es de 80 cm, pero esta medida puede ser mayor dependiendo del tipo de varilla a roscar y las condiciones de trabajo.

- La obra suministrara uno o dos ayudantes de manera permanente durante la actividad del roscado.
- Se necesita un espacio mínimo de 4 m² para la ubicación de la máquina y movimiento del operario alrededor de ella; este lugar debe estar cubierto. Adicionalmente, debe haber espacio suficiente para la ubicación de los soportes y las barras, de acuerdo a su longitud.
- El sitio para ubicar la máquina debe estar nivelado para proporcionarle estabilidad.
- Las barras que se encuentren ya fundidas en la estructura no podrán ser roscadas para la instalación de este tipo conector, las barras tienen que estar sueltas.

Conociendo estas especificaciones técnicas se realizaron análisis de precios unitarios de empalmes con conectores roscados, roscados de transición, tornillo y extruido con diámetros entre No.4 y No.8 (ver anexo 1), cuyos valores se muestran a continuación.

Tabla 10

Tabla Comparativa de Costos Directos de Tipos de Empalmes

Designación de la Barra	Ø (in)	Ø (mm)	Longitud traslapo Clase B (m)	Costo Directo Empalme Traslapo	Costo Directo Empalme Roscado	Costo Directo Empalme Roscado de Transición	Costo Directo Empalme Extruido	Costo Directo Empalme de tornillo
No. 4	1/2"	12.7	0.62	\$ 4,505.00	\$ 11,910.00	\$11,910.00	\$ -	\$84,857.00
No. 5	5/8"	15.9	0.78	\$ 7,087.00	\$11,910.00	\$14,052.00	\$52,727.00	\$105,206.00
No. 6	3/4"	19.1	0.94	\$10,621.00	\$14,052.49	\$17,189.00	\$65,741.00	\$119,486.00
No. 7	7/8"	22.2	1.09	\$15,811.00	\$17,265.00	\$20,164.00	\$90,688.00	\$139,478.00
No. 8	1"	25.4	1.25	\$22,764.00	\$20,240.00	\$29,689.00	\$112,941.49	\$167,086.00

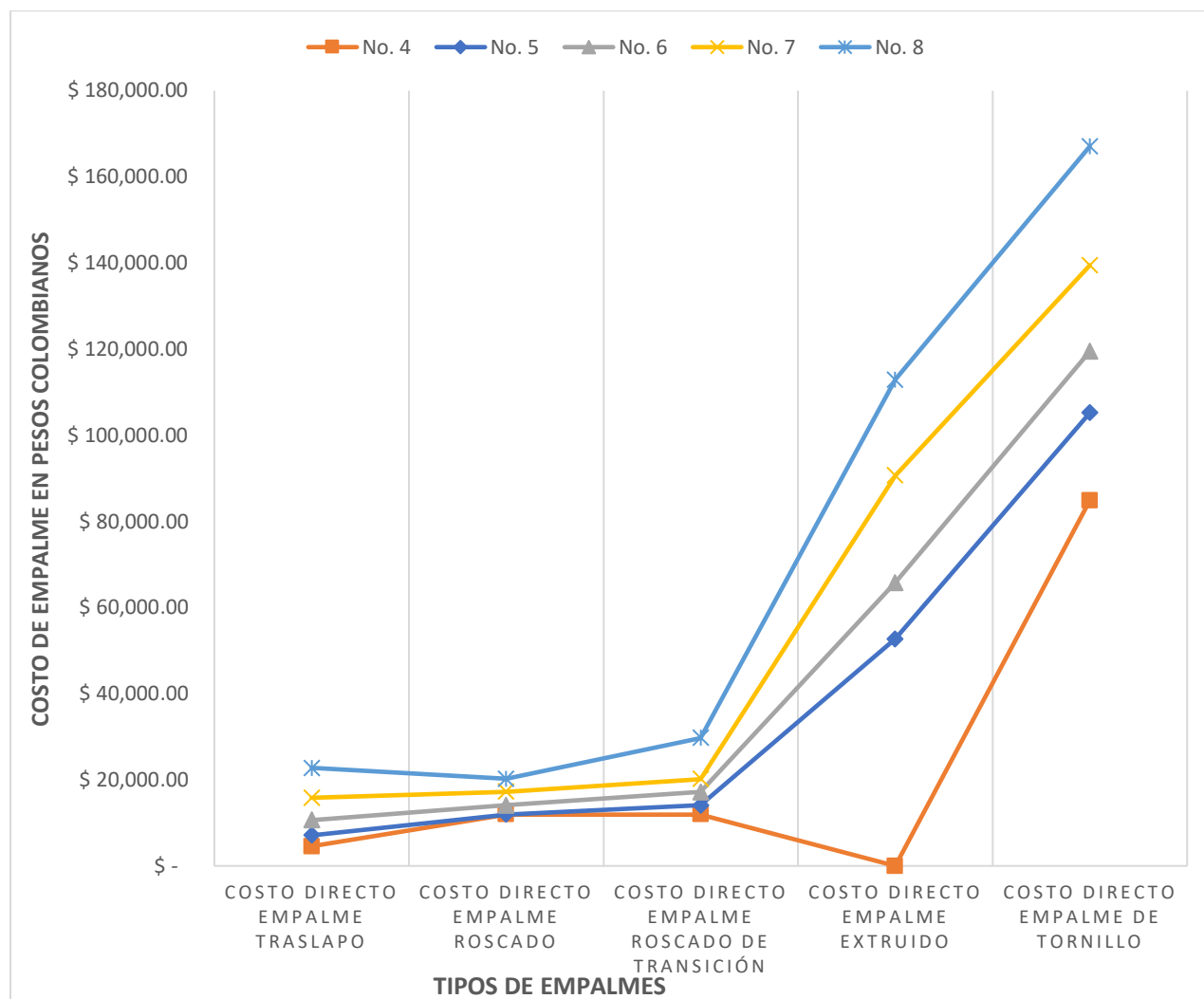
Nota. Fuente: Fuente Propia

En la tabla 10 se relaciona los valores unitarios de conectores mecánicos con los conectores por traslapo, en donde se observa una gran diferencia de precios entre los empalmes de tornillo y extruidos, respecto a los de traslapo y roscado. Esto debido al tipo de aplicaciones que se le puede dar a cada conector, puesto que los empalmes por traslapo no se pueden dejar cerca a nudos y necesitan una longitud mínima para empalmar y transmitir esfuerzos, mientras que los conectores roscados tipo 2 se pueden ubicar en zonas de confinamiento y nudos, pero solo se pueden roscar las varillas previamente a montar la armadura y fundir el concreto. En cambio, los conectores de tornillo y extruidos se pueden instalar en barras ya incrustadas en concreto y con una longitud muy pequeña, garantizando también la continuidad del elemento, resistiendo a tracción y flexión, sin importar la ubicación del conector en la estructura. Por lo tanto, sus costos están directamente relacionados a su calidad, tipo de uso, facilidad de instalación y solución estructural que permitan cumplir con la normatividad vigente colombiana.

Para analizar mejor la comparativa, se muestra a continuación una gráfica dinámica que relacione la información de la tabla 10.

Tabla 11

Grafica de costo vs tipo de empalme según diámetro de barra.



Nota. Fuente: Propia

De acuerdo a esta comparativa numérica y gráfica, se puede observar que el empalme por traslazo es el más económico y el empalme de tornillo es el más costoso de todos, sin embargo, es relevante mencionar la diferencia entre empalmes roscados y por traslazo, estos son los más usados en obra y se comportan así: entre más grande es el diámetro de la barra a empalmar, los costos entre empalme roscado y por traslazo se parecen más, hasta llegar a ser más barato el empalme roscado para la barra #8 que el empalme por traslazo, esto debido al aumento en peso y longitud de traslazo en barras de mayor diámetro.

Según experiencias de empresas constructoras que han utilizado acoples mecánicos, recomiendan el uso de conectores roscados en diámetros mayores a una pulgada, debido a que el costo llega a ser menor y las características de resistencia al deslizamiento o tracción son mejores que en traslapo, por lo que hace rentable diseñar estructuras con conectores roscados a partir de barras #8 en adelante.

Es importante conocer en donde se puede utilizar cada tipo de conector, puesto que los conectores de tornillo se utilizan en la mayoría de los casos para corregir errores constructivos en estructuras en donde no es posible utilizar roscado, ni existe la longitud mínima de barra para hacer un traslapo, las dos por armadura ya fundida en concreto.

Es de notar el alto costo de empalmes extruidos y de tornillo respecto a empalmes por traslapo y roscados, por lo que no se recomienda diseñar estructuras usando estos acoples, por el factor económico, pero en cuanto a resistencia y durabilidad si es de mencionar el alto grado de calidad que presentan respecto a sus contrincantes por los factores ya mencionados en los resultados de ensayos de tracción. Estos conectores son usados en su mayoría en problemas constructivos como se observa en la figura 50, donde los llamados pelos o barras que salen de una viga son muy cortos para realizar el traslapo de acuerdo a la norma, entonces la única solución para continuar una viga o cualquier elemento estructural, son los conectores de tornillo que se instalan manualmente y con una llave para apretar los tornillos hasta que se descabezan o también los conectores extruidos que se coloca utilizando una maquina prensadora, los dos tipos de acoples garantizan la resistencia a la tracción de $1.25f_y$ y su falla se presenta en la barra y no en el conector.

Figura 50

Conectores de tornillo como solución a la continuidad de elemento estructural.



Nota. Fuente: Ingeniería y construcción Colombia

Figura 51

Prensado de Conectores extruidos.



Nota. Fuente: Mexpresa

Figura 52

Máquina para Conectores extruidos

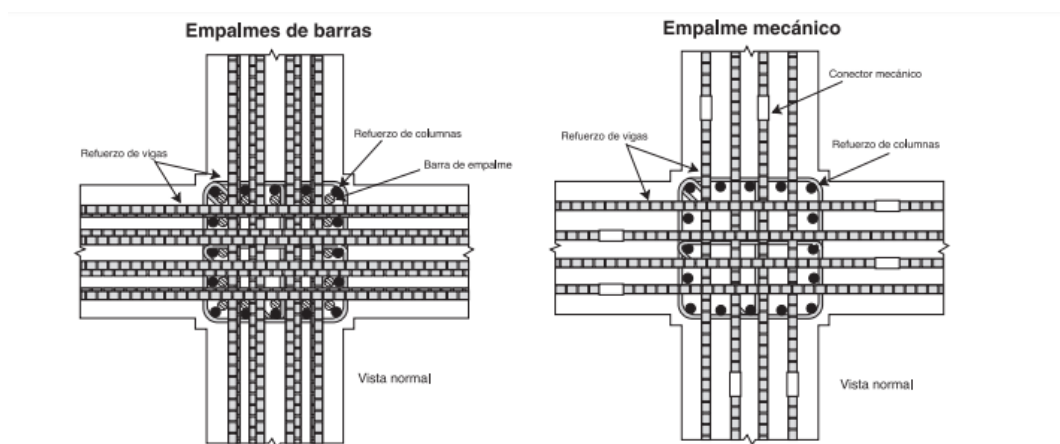


Nota. Fuente: Ramalza

Por las razones descritas anteriormente, es que existen situaciones dentro de las cuales el uso de acoples mecánicos es más empleado que el uso de los empalmes por traslapo. Entonces, los acoples mecánicos son una opción muy llamativa para disponer de continuidad y anclaje a las barras de acero de refuerzo, además una ventaja importante que tienen estos conectores son aplacar o mitigar el congestionamiento y así poder disminuir la cantidad de acero en las zonas de empalme como se puede observar en la figura 53.

Figura 53

Comparación de congestión de barras en nudos según tipo de traslapo



Nota. Fuente: Ingeniería y construcción Colombia

6.5. ENSAYOS DE CORROSIÓN INDUCIDA

Ensayo que busco corroer mediante electrolisis un empalme mecánico roscado, para lo cual se utilizaron; barras corrugadas #5 o de 5/8" empalmadas por un conector roscado #5, dos cables pasan corriente para baterías de carro, una batería que suministra una corriente directa de 12V, un recipiente de 50 litros de capacidad y agua con sal para generar una conductividad.

Figura 54

Elementos para ensayo de corrosión inducida.



Nota. Fuente propia

Inicialmente se calculó la cantidad de agua y sal necesaria para el ensayo, debido a que las probetas eran largas y era necesario que los conectores quedaran sumergidos, se necesitó de 30 litros de agua y siguiendo una relación de 1 gramo de sal por cada 100 ml de agua, se le aplicó 300 gramos de cloruro de sodio (Sal común) para garantizar una conductividad superior a 0.8 amperios. Los cables para corriente se utilizaron para conectar los empalmes mecánicos a la batería, siendo el electrodo positivo el empalme de barras de acero corrugado #5 con el conector roscado tipo 2, buscando que este sea el que tenga una reacción de oxidación. En la figura 54 se muestra el montaje en donde se buscaba acelerar el proceso de corrosión que pueda llegar a tener unas barras empalmadas en una estructura, debido a presencia de oxígeno, corrientes eléctricas o elementos que generen esta oxidación. De esta manera de análisis su comportamiento y durabilidad.

Figura 55

Montaje para corrosión inducida.



Nota. Fuente propia

Se suministro corriente directa durante 60 minutos, buscando una relación de tiempo durante la vida útil en la que una estructura puede llegar a ser corroída por diferentes agentes externos que pueden afectar una estructura.

Figura 56

60 minutos de corriente directa a barras de acero.



Nota. Fuente propia

Luego de generar electrolisis durante 60 minutos sobre el empalme mecánico, se observó una coloración amarilla y espumosa en el agua, elementos desprendidos del acero y que garantizaban corrosión de los materiales a causa de una reacción electroquímica acelerada. No se presentó una disminución de la sección de las barras o conector, pero si se identificaron varias manchas amarillas de óxido en las barras de acero y unas muy pequeñas sobre el conector, este es el óxido ferroso generado en el proceso de oxidación como se puede observar en la figura 55.

Figura 57

Empalme de Barras de Acero #5 con conector mecánico roscado corroída.



Nota. Fuente: Propia

Existen situaciones en las que se presentan oxidación, corrosión o electrolisis en estructuras y esto a largo plazo generan gran afectación en la estabilidad y sismo resistencia de la infraestructura, por lo que fue fundamental analizar la durabilidad de empalmes mecánicos y el comportamiento frente a estos procesos.

Cuando se encuentran estructuras en contacto con cloros o sodio, estos elementos causan deterioro a lo largo del tiempo, hasta afectar estructuralmente la estabilidad, principalmente en estructuras cercanas al mar, como muelles o edificios. También construcciones que pueden llegar a sufrir impactos de rayos, corrientes eléctricas o simplemente armaduras con poco recubrimiento que permiten la entrada de oxígeno a la estructura de acero y se oxidan durante los años.

Las consecuencias patológicas de la corrosión son la pérdida de adherencia al concreto que recubre el acero de refuerzo, generación de fisuras en el concreto, delaminación del concreto debido a las presiones generadas por la formación de óxido y en casos extremos de corrosión se puede perder sección en el acero de refuerzo lo cual compromete su resistencia a esfuerzos generados por la tracción.

De acuerdo a estas consecuencias y para tener un análisis comparativo de estos conectores mecánicos, se realizó un ensayo de tracción a el empalme mecánico que fue sometido a corrosión inducida por electrolisis, se observó su capacidad para conservar las propiedades mecánicas luego de ser atacados por la corrosión.

6.6.1 Ensayo a tracción de barras de acero corrugado #5 (5/8") empalmadas por conector roscado sometidos a corrosión inducida.

La probeta comprendía dos barras de acero corrugado #5 de 40 cm de largo, las cuales fueron esforzadas a tracción hasta su falla como se observa en la figura 58.

Figura 58

Falla empalme de barras #5 con corrosión inducida

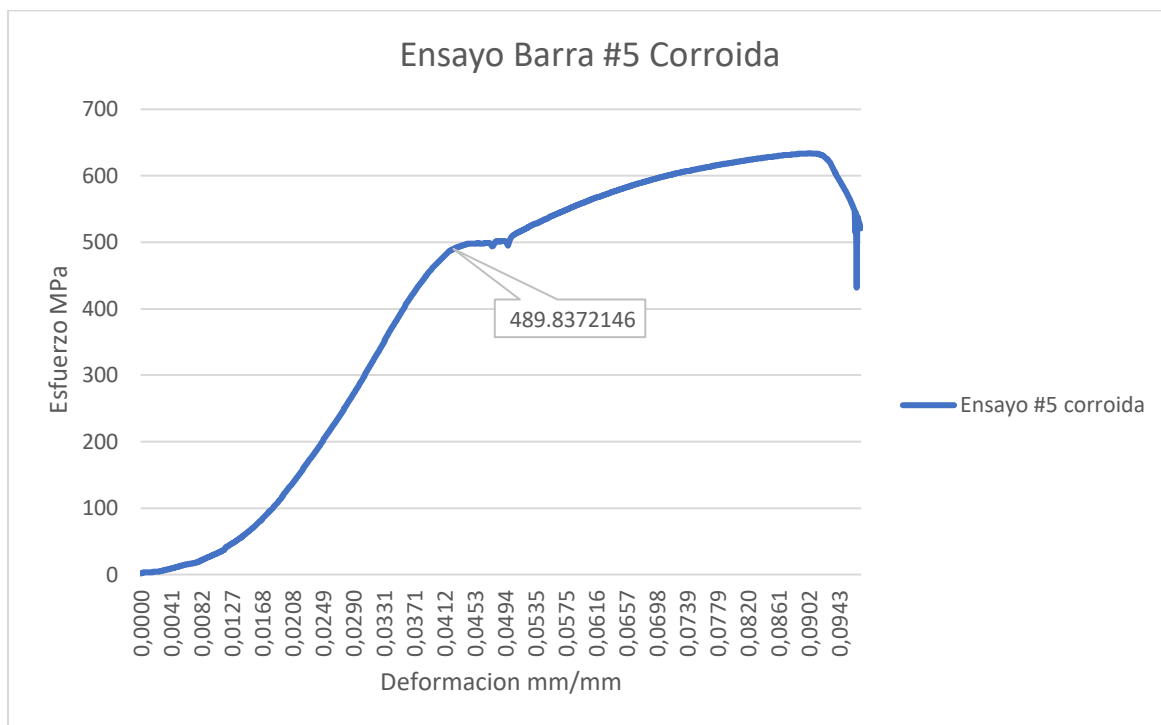


Nota. Fuente: Propia

En la figura 57 se observa que la rotura nuevamente se genera en la unión del conector mecánico con la barra de acero corrugado, ya siento esta una falla común para este tipo de conectores. Se observa como la corrosión afecta la superficie de la barra y del conector, pero no compromete la sección de estas, garantizando un comportamiento aceptable según la norma NTC 2289.

Figura 59

Grafica Esfuerzo vs Deformación Barra #5 corroída.



Nota. Fuente: Propia

Según la gráfica de esfuerzo versus deformación unitaria se pudo obtener un esfuerzo máximo o ultimo de 633,96Mpa, un esfuerzo de fractura de 431,39Mpa, un esfuerzo de fluencia que fue 489,837Mpa y la deformación unitaria en el punto de fluencia de 0,0424 mm/mm. También se calculó el módulo elástico siendo igual a 19060Mpa.

Analizando los datos y comparando con el ensayo realizado a la conexión sin alteración por electrolisis, presenta una disminución en la rigidez, la relación σ_u/σ_y que debe ser mayor a

1,25 da por encima de este valor, pero menor a la probeta sin corrosión, o sea presenta un margen de seguridad menor. La máxima tensión es menor, sin embargo, esta probeta sigue estando dentro de los márgenes de seguridad.

Al no depender de la adherencia al concreto para mantener su capacidad de empalme como en los tradicionales por traslapo, esta corrosión no influye en el desarrollo seguro de la unión, aunque esta aparición de óxido ferroso cause la pérdida de cohesión al concreto de recubrimiento.

CONCLUSIONES

➤ Al realizar una comparativa entre empalmes se identificó que los empalmes de traslapo dependen en gran medida de la calidad del concreto y/o confinamiento mediante refuerzo transversal, mientras que el empalme mecánico proporciona continuidad de la trayectoria de carga en el refuerzo, independientemente de la condición del concreto.

➤ Los ensayos de tracción a empalmes mecánicos tipo 2 roscados, roscados de transición y de tornillo dieron como resultado el cumplimiento de la norma siendo capaces de desarrollar y transmitir la totalidad de los esfuerzos de las barras empalmadas, requisito que correspondía a resistir mínimo 1.25 veces el esfuerzo de fluencia de las barras. Asimismo, se determinaron que los conectores de tornillo, proporcionan la unión más resistente a la tracción y al deslizamiento entre dos barras de refuerzo haciéndolas funcionar como si fuesen una barra de acero continua sin perjudicar su resistencia, mientras que los empalmes roscados en barras #4 y #5 sufrieron rotura y deslizamientos dentro de la rosca del conector, pero aun así cumplieron con lo exigido en la NSR-10.

➤ Al analizar los resultados generales de los dos tipos de ensayo por carga cíclica de 16 y 32 ciclos se encontró que el sistema roscado generó deslizamiento en la conexión barra-empalme, mientras que otros generaron deformación propia de la barra lejos del conector. Se observó un aumento en la ductilidad del material, debido a un envejecimiento por fatiga. Sin embargo, se concluye que la acción de cargas cíclicas no disminuye la resistencia de la conexión, manteniendo su esfuerzo de fluencia dentro de los rangos de seguridad y su esfuerzo máximo siendo mayor que el 125% el esfuerzo nominal (420Mpa), además se espera que este conector conserve sus capacidades mecánicas fuera del régimen lineal mostrando una buena respuesta a la histéresis. Este conector mecánico es viable en cuanto a la resistencia sobre las conexiones por traslapo ya que los ensayos demuestran que el empalme es más resistente que la propia barra.

➤ Al realizar el comparativo de costos entre empalmes, se encontró que los empalmes por traslapo y los roscados son los más económicos, mientras los empalmes de tornillo y los extruidos son los más costosos de todos, debido a que estos últimos resultan útiles en zonas dentro de las cuales ya está construida la estructura y se requiera una extensión de algún elemento o para corregir errores constructivos donde las barras no tienen la longitud mínima para un traslapo. También es notable mencionar la relación entre empalmes roscados y por traslapo, estos son los más usados en obra y el comparativo económico mostro que entre más grande es el diámetro de la barra a empalmar, los costos entre empalme roscado y por traslapo se asemejan más, hasta llegar a ser más barato el empalme roscado para la barra #8 que el empalme por traslapo, esto debido al aumento en peso y longitud de traslapo en barras de mayor diámetro.

➤ Luego de inducir la corrosión por medio de electrolisis a los empalmes mecánicos, no se evidencio un daño relevante en estos conectores que pudiera afectar su resistencia y durabilidad del acople y llegan a tener un mejor comportamiento que las conexiones por traslapo, al no depender su efectividad de la adherencia al concreto que se podría perder al presentarse un proceso de corrosión, se recomienda este tipo de conectores para construcciones cerca del mar como muelles, puertos, playas y cualquier edificación que pueda ser afectada por la electrolisis.

BIBLIOGRAFÍA

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2007). NORMA TÉCNICA NTC 2289. Bogotá.
- Coogler, K. (2007). *Investigation of the Behavior of Offset Mechanical Splices*. Engineering.
- Departamento de Ciencias Basicas -USTA. (2013). *Práctica # 9. Física De Materiales*. Bogotá: Universidad Santo Tomas.
- Ecured. (15 de 12 de 2020). www.Ecured.cu. Obtenido de <https://www.ecured.cu/Electr%C3%B3lisis?cv=1>
- Fierro Lafuente, R. (2001). *Resistencia a tension de empalmes con barras de refuerzo fabricadas bajo la norma ASTM A 615 y ASTM A 706*. Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII).
- Huaco, G., & Jirsa, J. (2019). *Mechanical Splices for Seismic Retrofitting of Concrete Structures*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Mccabe, S. L. (2000). *The performance of mechanical splices*. University of Kansas, USA., Civil and Environmental Engineering.
- Melissa González, M., & Cuevas Florián , P. (2018). *ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE EMPALMES POR TRASLAPE Y EMPALMES MECÁNICOS UTILIZADOS EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO*. Santo Domingo, República Dominicana: Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.
- NSR-10. (2010). *REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10*. BOGOTA D.C.
- nVent Lenton. (2018). *Sistemas De Empalmes Mecánicos Para Barras De Armaduras*. Obtenido de <https://www.erico.com/catalog/literature/RSB-WWSP.pdf>
- ortega, d. a. (s.f.). *chile*. Obtenido de ing .
- Ramalza S.A.S. (2019). Lista de precios general de conectores mecánicos.
- Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (2017). *ENSAYO DE FATIGA*. Bogotá: Laboratorios y Talleres Mecánica.
- Vargas Fernández, R. (2015). *Análisis de la resistencia a tensión y costos de empalmes mecánicos usados en*. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio: Universidad de Costa Rica.
- Vargas Fernández, R. (2015). *Análisis de la resistencia a tensión y costos de empalmes mecánicos usados en barras de acero de refuerzo (con conectores prensados y atornillados tipo 2)*. Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Costa Rica.

ANEXOS

1. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE EMPALMES POR TRASLAPO Y EMPALMES MECÁNICOS
2. BASE DE DATOS DE ENSAYOS A TRACCIÓN EN EMPALMES MECÁNICOS DE BARRAS #4,5 Y 6.
3. BASE DE DATOS DE ENSAYOS DE CARGA Y DESCARGA