

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“RESISTENCIA A TRACCIÓN Y COSTO DE EMPALME MECÁNICO
ROSCADO DISEÑADO EN BARRAS DE ACERO CORRUGADO
GRADO 60”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

**ELABORADO POR
JULIO CESAR CAÑARI ALTAMIRANO
ID: 0009-0008-0720-1354**

**ASESOR
MSc. JOSÉ CIPRIANO MASÍAS GUILLÉN
ID: 0000-0001-9214-4746**

LIMA - PERÚ

2024

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**

CAÑARI ALTAMIRANO, Julio Cesar

julio.canari.a@uni.pe

945714667

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres Calixto y Julia, por su apoyo incondicional en todo momento de mi vida, por siempre confiar en mí, por alentarme a nunca rendirme, y por enseñarme que con esfuerzo y dedicación todo es posible.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis hermanos María y Gabriel, por su compañía a lo largo de mi vida, por su apoyo y aliento para alcanzar mis objetivos.

También, agradezco al Laboratorio de Ensayo de Materiales “Ing. Manuel Gonzales de la Coterá” y a su equipo técnico, por brindarme las facilidades para el desarrollo de los ensayos necesarios para la presente investigación.

Asimismo, expreso mi agradecimiento a mi asesor J. C. Masías Guillén, por brindarme su tiempo y apoyo que fueron esenciales para el desarrollo de la presente investigación.

ÍNDICE	
	Página
RESUMEN.....	4
ABSTRACT	5
PRÓLOGO	6
LISTA DE TABLAS.....	7
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	11
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. GENERALIDADES	13
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	14
1.2.1. Problema General.....	16
1.2.2. Problemas Específicos	16
1.3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	16
1.3.1. Objetivo General.....	16
1.3.2. Objetivos Específicos	16
1.4. HIPÓTESIS	16
1.4.1. Hipótesis General	16
1.4.2. Hipótesis Específicas.....	16
1.5. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	17
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	21
2.1. COMPORTAMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO	21
2.1.1. Esfuerzo Axial.....	21
2.1.2. Esfuerzo Cortante.....	22
2.1.3. Esfuerzo Flexionante	23
2.2. EMPALMES EN VARILLAS DE REFUERZO.....	23
2.2.1. Importancia de Empalmes	24
2.2.2. Tipos de Empalmes	24
2.2.2.1. Empalme Traslapado.....	24
2.2.2.2. Empalme Mecánico	25
2.2.2.3. Empalme Soldado	27
2.3. UNIONES ROSCADAS	28
2.3.1. Características de Elementos Roscados	28
2.3.2. Características de Filetes de Rosca.....	29
2.4. TORNO	30

2.4.1.	Clasificación de Tornos.....	30
2.4.1.1.	Torno Paralelo	30
2.4.1.2.	Tornos Especiales	31
2.4.2.	Tipos de Roscado.....	32
2.4.2.1.	Roscado Exterior	32
2.4.2.2.	Roscado Interior	33
2.5.	ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN	34
2.6.	PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO.....	35
2.6.1.	Prueba de Bondad de Ajuste	35
2.6.2.	Prueba de Hipótesis Estadística acerca de una Media	37
	CAPÍTULO III: EVALUACIÓN DE RESISTENCIA	38
3.1.	DISEÑO DE EMPALME MECÁNICO ROSCADO.....	38
3.1.1.	Consideraciones de Diseño	39
3.1.1.1.	Esfuerzos máximos para diseño	40
3.1.1.2.	Fuerza máxima de diseño.....	41
3.1.2.	Análisis de Longitud Roscada.....	42
3.1.2.1.	Falla por cortante en filetes.....	43
3.1.2.2.	Falla por flexión en filetes	44
3.1.2.3.	Falla por aplastamiento en filetes	46
3.1.3.	Análisis de Diámetro Exterior.....	47
3.1.4.	Análisis de Diámetro Roscado Menor	48
3.2.	FABRICACIÓN DE EMPALME MECÁNICO	49
3.2.1.	Limitaciones para la Fabricación.....	49
3.2.2.	Cálculo de Propuesta de Empalme.....	50
3.2.3.	Proceso de Fabricación	51
3.3.	EVALUACIÓN EXPERIMENTAL	54
3.3.1.	Especímenes.....	54
3.3.2.	Equipo de Ensayo.....	55
3.3.3.	Procedimiento de Ensayo	55
3.3.4.	Resultados de Ensayos Experimentales	57
3.3.4.1.	Resultados de Especímenes del Grupo P	57
3.3.4.2.	Resultados de Especímenes del Grupo A	58
3.3.4.3.	Resultados de Especímenes del Grupo B	60
3.3.4.4.	Resultados de Especímenes del Grupo C	62

3.3.5.	Procesamiento Estadístico de Resultados	64
3.3.5.1.	Prueba de Normalidad	64
3.3.5.2.	Análisis de Datos Dudosos	66
3.3.5.3.	Prueba de Hipótesis Estadística	68
3.3.6.	Comparación de Resultados	71
3.3.6.1.	Relación entre factores de resistencia	72
3.3.6.2.	Modificación al diámetro menor roscado	73
3.3.7.	Cálculo de Propuesta Modificado	74
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE COSTO		75
4.1.	RECURSOS PARA HABILITACIÓN DE EMPALMES	75
4.1.1.	Mano de Obra	75
4.1.2.	Materiales y Herramientas	75
4.1.3.	Costo horario de torno paralelo	76
4.1.3.1.	Costo horario de Posesión	77
4.1.3.2.	Costo horario de Operación	78
4.2.	PROCESO DE ROSCADO Y HABILITACIÓN DE EMPALMES	79
4.2.1.	Roscado de Varillas y Conectores Mecánicos	79
4.2.2.	Habilitación de Empalmes Mecánicos	81
4.2.3.	Habilitación de Empalmes Traslapados	82
4.3.	COSTO DE EMPALMES	82
4.3.1.	Análisis de Costos Unitarios de Empalmes Mecánicos	83
4.3.2.	Análisis de Costos Unitarios de Traslapados	85
4.3.3.	Diferencia entre Costo de Empalmes	87
CONCLUSIONES		90
RECOMENDACIONES		91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		92
ANEXOS		98

RESUMEN

La actividad de armado y habilitación de acero de refuerzo presenta un alto índice de desperdicio, debido a que los cortes y traslapes requieren de acero adicional embebido en el concreto y generan retazos de acero que no pueden ser utilizados. En la actualidad, la norma técnica peruana de Concreto Armado E.060 considera la posibilidad de empalmar barras de acero con conectores mecánicos como una alternativa frente al traslapado; sin embargo, la mayoría de los conectores mecánicos comerciales presentan un costo muy elevado en comparación al traslapado, por lo que comúnmente se emplea este último.

En la presente investigación se plantea diseñar y fabricar empalmes mecánicos roscados con retazos de barras de acero corrugado empleando un torno paralelo; desarrollándose y analizándose empalmes para barras de acero de diámetro nominal igual a 12.7mm (1/2"), 15.9mm (5/8") y 19.1mm (3/4"). Para determinar la resistencia, se diseñaron y fabricaron empalmes mecánicos variando el diámetro de roscado; se ensayó a tracción un total de 15 probetas y se comparó los resultados con la resistencia mínima admisible establecida en la norma E.060. Se concluyó que la resistencia a tracción no era favorable debido a que al roscar la barra de acero se redujo considerablemente su sección; por lo que se dedujo una expresión calibrada para dimensionar el diámetro de roscado que garantice una capacidad de resistencia mayor a la mínima admisible.

Para determinar el costo de empalmes, se analizó el proceso de fabricación y habilitación de empalmes considerando costos de los insumos para todo tipo de proyecto; se concluyó que el costo de los empalmes diseñados es mayor al costo del traslapado, pero menor al costo de empalmes con conectores mecánicos comerciales.

ABSTRACT

The activity of assembling and installing reinforcing steel presents a high rate of waste, because cuts and overlaps require additional steel embedded in the concrete and generate scraps of steel that cannot be used. Currently, the Peruvian technical standard for Reinforced Concrete E.060 considers the possibility of splicing steel bars with mechanical connectors as an alternative to overlapping; However, most commercial mechanical connectors have a very high cost compared to overlapping, so the latter is commonly used.

In this research, the aim is to design and manufacture threaded mechanical joints with scraps of corrugated steel bars using a parallel lathe; developing and analyzing splices for steel bars with nominal diameters equal to 12.7mm (1/2"), 15.9mm (5/8") and 19.1mm (3/4"). To determine the resistance, mechanical splices were designed and manufactured by varying the threading diameter; A total of 15 specimens were tested in traction and the results were compared with the minimum admissible resistance established in standard E.060. It was concluded that the tensile strength was not favorable because when threading the steel bar its section was considerably reduced; Therefore, a calibrated expression was deduced to size the threading diameter that guarantees a resistance capacity greater than the minimum admissible.

To determine the cost of splices, the process of manufacturing and enabling splices was analyzed considering input costs for all types of projects; It was concluded that the cost of designed splices is higher than the cost of overlapping, but lower than the cost of splices with commercial mechanical connectors.

PRÓLOGO

La presente investigación se desarrolla con el fin de analizar la factibilidad de diseñar y fabricar empalmes mecánicos roscados empleando equipos y herramientas convencionales, aprovechando materiales que serían desechados o en el mejor de los casos serían reciclados; además, con la posibilidad de fabricar dichos empalmes en cualquier zona del país en la que se cuente con un torno.

El sector construcción es un entorno competitivo, en el cual las personas involucradas buscan constantemente mejorar los existentes procesos constructivos y/o desarrollar alternativas constructivas, las cuales permitan reducir plazos y/o costos de ejecución. Para el acero corrugado, en países de gran desarrollo de infraestructura, optan por utilizar empalmes mecánicos en lugar de los empalmes traslapados, debido a los beneficios que estas alternativas presentan.

En el Perú existe una gran variedad de conectores mecánicos comerciales que son desarrollados y fabricados fuera del país, los cuales tienen un costo elevado en comparación al traslapado. A diferencia de estos conectores comerciales, los empalmes que se analizan en la presente investigación evitarían encarecer considerablemente el costo de la partida de acero corrugado, a la par de que garanticen mayor calidad de conexión en comparación con el traslapado.

MASÍAS GUILLÉN

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Diámetro y área de roscas métricas ISO	29
Tabla 2. Parámetros geométricos de roscas estándar	30
Tabla 3. Propiedades mínimas de acero de refuerzo grado 60	35
Tabla 4. Coeficientes de distribución normal para la prueba Shapiro-Wilk	36
Tabla 5. Parámetro de decisión para la prueba Shapiro-Wilk.....	36
Tabla 6. Factores de seguridad para piezas mecánicas	40
Tabla 7. Varillas de acero corrugado grado 60 comerciales en Perú	50
Tabla 8. Factor de resistencia experimental de varillas comerciales	50
Tabla 9. Dimensiones de empalmes mecánicos propuestos.....	51
Tabla 10. Características de probetas	55
Tabla 11. Resultados de ensayos de los especímenes del Grupo P	58
Tabla 12. Resultados de ensayos de los especímenes del Grupo A.....	60
Tabla 13. Resultados de ensayos de los especímenes del Grupo B	62
Tabla 14. Resultados de ensayos de los especímenes del Grupo C.....	63
Tabla 15. Prueba de normalidad para el grupo de muestra A	65
Tabla 16. Prueba de normalidad para el grupo de muestra B	65
Tabla 17. Prueba de normalidad para el grupo de muestra C	66
Tabla 18. Parámetros estadísticos de grupos de muestras.....	67
Tabla 19. Estadístico de prueba T-Student	69
Tabla 20. Resistencia teórica de empalmes diseñados.....	71
Tabla 21. Dimensiones de empalmes mecánicos modificados	74
Tabla 22. Resistencia teórica de empalmes diseñados modificados	74
Tabla 23. Costo de la mano de obra	75
Tabla 24. Costo de materiales y equipos	76
Tabla 25. Costo horario por posesión de torno	78
Tabla 26. Costo horario por operación de torno	79
Tabla 27. Duración de roscado de varilla	80
Tabla 28. Duración de roscado de conector.....	81
Tabla 29. Duración de ejecución de empalmes mecánicos roscados	81
Tabla 30. Duración de ejecución de traslapados.....	82
Tabla 31. Costo de total de proceso de roscado	83
Tabla 32. Costo unitario de empalme mecánico para varillas de 1/2"	84

Tabla 33. Costo unitario de empalme mecánico para varillas de 5/8"	84
Tabla 34. Costo unitario de empalme mecánico para varillas de 3/4"	85
Tabla 35. Costo unitario de traslape para varillas de 1/2"	86
Tabla 36. Costo unitario de traslape para varillas de 5/8"	86
Tabla 37. Costo unitario de traslape para varillas de 3/4"	87

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Diagrama de Ishikawa de problemas en empalmes de acero	15
Figura 2. Diagrama esfuerzo-deformación típico del acero	21
Figura 3. Esquema de empalme traslapado.....	25
Figura 4. Categoría de conectores mecánicos	26
Figura 5. Tipos de empalmes soldados en varillas de acero	27
Figura 6. Elementos típicos en una unión roscada.....	28
Figura 7. Elementos de un torno paralelo	31
Figura 8. Perfil de roscas métricas ISO.....	32
Figura 9. Proceso de roscado exterior	33
Figura 10. Proceso de roscado interior	33
Figura 11. Máquina para ensayo de tracción	34
Figura 12. Esquema de varilla y conector roscados	38
Figura 13. Esquema de empalme mecánico diseñado	39
Figura 14. Curva esfuerzo-deformación de acero evaluado en México	41
Figura 15. Esquema de vigas en voladizo para varillas roscadas	43
Figura 16. Esquema de vigas en voladizo para varillas parcialmente roscadas ..	43
Figura 17. Zona central en conector mecánico	47
Figura 18. Zona crítica en varilla roscada	48
Figura 19. Roscado de varilla de diámetro nominal de 12.7mm (1/2")	52
Figura 20. Perforación de varilla de diámetro nominal de 19.1mm	52
Figura 21. Conector mecánico de diámetro nominal de 19.1mm (3/4")	53
Figura 22. Pretensión de empalme mecánico	53
Figura 23. Especímenes de empalmes mecánicos	54
Figura 24. Grupo de Muestra A.....	56
Figura 25. Ensayo del espécimen A-1	56
Figura 26. Curva esfuerzo-deformación de especímenes del grupo P	57
Figura 27. Curva esfuerzo-deformación de especímenes del Grupo A	58
Figura 28. Perfil de falla del espécimen A-1.....	59
Figura 29. Curva esfuerzo-deformación de especímenes del Grupo B	60
Figura 30. Perfil de falla del espécimen B-1.....	61
Figura 31. Curva esfuerzo-deformación de especímenes del Grupo C	62
Figura 32. Perfil de falla del espécimen C-1.....	63

Figura 33. Diagrama de cajas del grupo A	67
Figura 34. Diagrama de cajas del grupo B	67
Figura 35. Diagrama de cajas del grupo C	68
Figura 36. Contraste del estadístico de prueba del grupo A	70
Figura 37. Contraste del estadístico de prueba del grupo B	70
Figura 38. Contraste del estadístico de prueba del grupo C	71
Figura 39. Relación entre factor de resistencia teórico y experimental	72
Figura 40. Relación de diámetros roscados y factor de resistencia	73
Figura 41. Diferencia de costo de empalmes para varillas de 1/2"	88
Figura 42. Diferencia de costo de empalmes para varillas de 5/8"	88
Figura 43. Diferencia de costo de empalmes para varillas de 3/4"	89

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

A_{t_var}	: Área efectiva a tracción de varilla roscada
A_{t_con}	: Área efectiva a tracción de conector
A_{c_var}	: Área efectiva a corte de filetes de varilla
A_{c_con}	: Área efectiva a corte de filetes de conector
I_{f_var}	: Inercia efectiva de filetes de varilla
I_{f_con}	: Inercia efectiva de filetes de conector
c	: Distancia de la fibra más alejada al centroide de la sección
A_a	: Área efectiva a aplastamiento de filetes
$f_{máx}$	: Capacidad de esfuerzo axial del material
$\tau_{máx}$	: Capacidad de esfuerzo cortante del material
$\sigma_{máx}$	: Capacidad de esfuerzo flexionante del material
f_y	: Esfuerzo de fluencia a tracción
f_{yo}	: Esfuerzo de fluencia a tracción especificado
f_u	: Esfuerzo de resistencia máximo a tracción
λ	: Factor de resistencia máxima y de fluencia
λ_0	: Factor de resistencia máxima y de fluencia especificado - Norma E.060
R_E	: Factor de resistencia máxima y de fluencia de empalmes experimental
R_T	: Factor de resistencia máxima y de fluencia de empalmes teórico
R_V	: Factor de resistencia máxima y de fluencia de varillas experimental
$\emptyset$	: Factor de seguridad por transferencia de esfuerzos
f_{t_d}	: Esfuerzo de tracción máximo para el diseño
τ_{c_d}	: Esfuerzo de corte máximo para el diseño
σ_{f_d}	: Esfuerzo de flexión máximo para el diseño
σ_{a_d}	: Esfuerzo de aplastamiento máximo para el diseño
$F_{t_máx}$	: Fuerza de tracción máxima aplicada sobre el empalme
$V_{c_máx}$	: Fuerza cortante máxima aplicada sobre los filetes de rosca
$M_{f_máx}$	: Momento máximo aplicado sobre los filetes de rosca
$P_{a_máx}$	: Fuerza de aplastamiento aplicada máxima sobre los filetes de rosca
$f_{t_máx}$	: Esfuerzo de tracción máximo aplicado sobre el empalme
$\tau_{c_máx}$	: Esfuerzo cortante máximo aplicado sobre los filetes de rosca
$\sigma_{f_máx}$	: Esfuerzo de flexión máximo aplicado sobre los filetes de rosca
$\sigma_{a_máx}$	: Esfuerzo de aplastamiento máximo aplicado sobre los filetes de rosca

D_i	: Diámetro de varilla empalmada
D_r	: Diámetro menor de varilla roscada
D_e	: Diámetro exterior de conector
L_r	: Longitud roscada de varilla
L_c	: Longitud de conector
N	: Cantidad de filetes
p	: Paso de rosca
k_0	: Factor de profundidad efectiva de filete de rosca
k_h	: Relación entre profundidad de filete y paso de rosca
k_v	: Relación entre longitud de filete de varilla roscada y paso de rosca
k_c	: Relación entre longitud de filete de conector roscado y paso de rosca
$Q_{25\%}$	: Cuartil del 25%
$Q_{75\%}$	: Cuartil del 75%
Lim_{inf}	: Límite inferior de datos atípicos
Lim_{sup}	: Límite superior de datos atípicos
H_0	: Hipótesis nula
H_1	: Hipótesis alternativa
a_i	: Coeficiente "i" de distribución de Shapiro-Wilk
W_k	: Probabilidad de distribución Shapiro-Wilk
$W_{(n,\alpha)}$	: Valor crítico de prueba Shapiro-Wilk
t_k	: Probabilidad de distribución T-student
$t_{(n,\alpha)}$	: Valor crítico de prueba T-student
n	: Tamaño de la muestra
α	: Nivel de significancia de la prueba estadística
$\bar{x}$	: Media (muestra)
x_0	: Valor comparado con la media (muestra)
$\hat{s}$	: Desviación estándar (muestra)
T	: Vida económica útil de equipo
V_a	: Costo de adquisición de equipo
V_r	: Costo de rescate de equipo
DEP	: Depreciación del costo
IMA	: Inversión media anual
SIA	: Relación entre costo de seguros, interés y almacenaje, y del equipo
I	: Tasa de interés activa

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

Actualmente el sector construcción se encuentra en un entorno más desafiante y competitivo debido al crecimiento de la demanda de infraestructura así como del desarrollo de tecnología e ingeniería, es por ello que es necesario desarrollar, investigar y aplicar alternativas de métodos constructivos que permitan reducir costos y sobretiempos en comparación con métodos constructivos tradicionales como los empalmes traslapados (Robles & Reyes, 2021).

Según Dabiri et al. (2022) el empalme de barras de refuerzo es una actividad frecuente en los elementos estructurales de estructuras de concreto armado y/o de albañilería. Con el fin de alcanzar barras de longitud mayor a las fabricadas es necesario unir barras de refuerzo, esto se debe a que la longitud de barras de refuerzo tiene un límite máximo que depende de la tecnología de fabricación del acero de refuerzo.

En el Perú, el método de empalme más utilizado es el empalme por traslape el cual también es denominado como “empalme tradicional”, esto debido a que es el tipo de empalme más simple, pues no requiere de personal altamente especializado y tampoco requiere de herramientas y/o equipos especiales; sin embargo, traslapar barras de refuerzo conlleva a unir las barras de refuerzo de forma indirecta, empleando el concreto como el medio por el que se transfieren esfuerzos de una varilla de acero de refuerzo a otra (González & Cueva, 2018).

Además de los empalmes tradicionales, existen métodos de empalmes más sofisticados que permiten la conexión de forma directa, los cuales se clasifican en dos grupos: empalmes soldados y empalmes mecánicos. El empalme soldado consiste en aplicar la soldadura a barras de refuerzo teniendo en cuenta las propiedades del electrodo empleado y se divide de acuerdo con las técnicas de soldadura. El empalme mecánico consiste en empalmar las barras de refuerzo mediante un dispositivo mecánico que generalmente es más resistente que las barras de refuerzo, estos dispositivos mecánicos se clasifican principalmente en: conector mecánico de tornillo, conector mecánico de presión o conector mecánico roscado; siendo el empalme roscado paralelo el tipo de conector que influencia en menor grado el comportamiento de las barras de acero de refuerzo (Bompa & Elghazouli, 2017).

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En la actualidad se emplea el empalme traslapado por su simplicidad y accesibilidad de fabricación en comparación con otros tipos de empalme, sin embargo, emplear el traslapado tiene sus desventajas frente a los empalmes mecánicos y soldados. A pesar de las ventajas de los empalmes mecánicos y soldados, por lo general se descarta la posibilidad de emplear estos dos últimos debido a que realizar empalmes más sofisticados conlleva a un incremento considerable en el costo de habilitación de empalmes. Ayasca (2016) indica que los materiales e insumos representan alrededor del 30% del costo del proyecto para el caso de viviendas y edificaciones, siendo el acero uno de los materiales con mayor incidencia en el presupuesto. El acero presenta un índice de desperdicio que varía entre 5% a 20%, esto debido a la necesidad de modificar las longitudes estándar de las barras de acero comerciales a longitudes requeridas en los proyectos mediante el recorte de barras de acero (Galarza, 2011).

Aunque los empalmes traslapados son fáciles de realizar, McCormac & Brown (2018) indican que este método de empalme no es conveniente usar en situaciones como: cuando se emplea barras de refuerzo de diámetro mayor a #14 porque la norma impide su uso, cuando se usan varillas de gran diámetro dado que la longitud

de traslape es muy larga y genera un sobre costo elevado, cuando se genera congestión de acero en la zona de empalme complicando el proceso de habilitación de acero, cuando se coloca más acero del requerido se podría propiciar la falla frágil del elemento estructural, tampoco se recomienda su aplicación en elementos estructurales con responsabilidad sísmica y en estructuras que se edifiquen en zonas altamente sísmicas.

Según Romero & Rodríguez (2018) los empalmes mecánicos y soldados son mucho más recomendables que los tradicionales, dado que cumplen con exigentes requisitos de resistencia. La calidad de estos empalmes está ligado al costo de fabricación, por lo que presentan un costo mucho mayor que el costo de empalme traslapado. Los empalmes soldados requieren mano de obra calificada e inspecciones costosas para garantizar la adecuada conexión entre barras de refuerzo, además requiere de insumos como los electrodos y herramientas especiales para realizar cada empalme. A pesar de que los electrodos tienen la posibilidad de resistir esfuerzos mayores que la barra, el acero más común

empleado en el Perú es el acero fabricado para cumplir con los requisitos establecidos en la norma ASTM A615 grado 60; los aceros fabricados con esta norma tienen un alto contenido de carbono por lo tanto es un material de baja soldabilidad, razón por la cual no se recomienda la soldadura para fabricar conexiones en acero ASTM A615 grado 60.

Por otro lado, los empalmes mecánicos requieren de dispositivos mecánicos que usualmente no son fabricados en obra y deben ser adquiridos de un proveedor o fabricante. Por su resistencia elevada y fácil habilitación son considerados más eficientes que los empalmes traslapados y se recomienda su uso para estructuras sismorresistentes y estructuras de gran magnitud (Vargas, 2015); sin embargo, en estructuras de menor envergadura se emplean barras de refuerzo de diámetro menores y el costo de dichos dispositivos es muy elevado, además, son complicados de adquirir en zonas del Perú en las que no se tiene gran demanda de dichos dispositivos.

Clasificando las causas y consecuencias de emplear empalmes se identificaron las causas de los problemas más importantes en el siguiente diagrama:

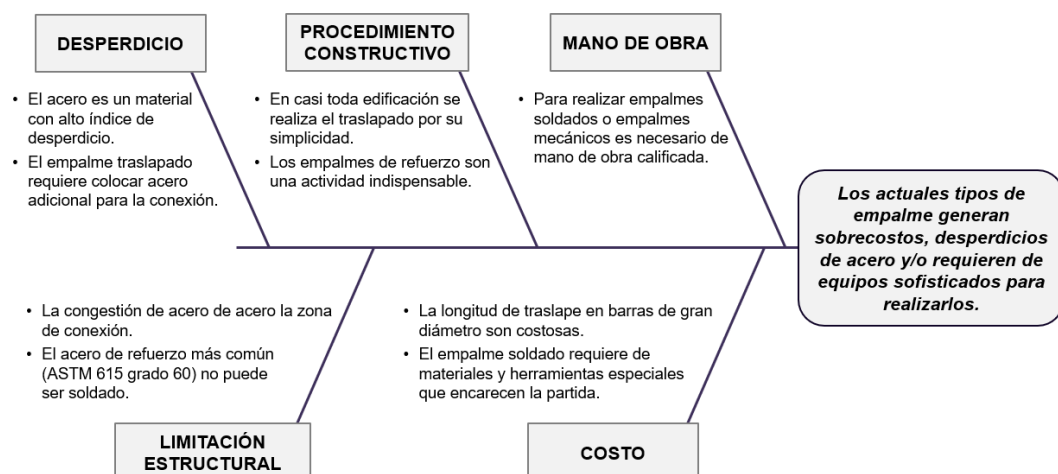


Figura 1. Diagrama de Ishikawa de problemas en empalmes de acero

Fuente: Elaboración propia.

Como alternativa de empalme se propone empalmar barras de refuerzo grado 60 con un retazo de barra de refuerzo grado 60 de mayor diámetro de modo que esta última funcione como un conector mecánico del tipo roscado; sin embargo, para poder aplicar esta alternativa de empalme necesariamente se debe evaluar sus propiedades de resistencia, dado que la norma vigente E.060 Concreto Armado establece límites mínimos de resistencia para empalmes mecánicos; además, es

necesario evaluar económicamente la propuesta en comparación con los empalmes tradicionales para determinar el beneficio o perjuicio económico.

1.2.1. Problema General

¿Cuál es la resistencia a tracción y el costo del empalme mecánico roscado diseñado en barras de acero corrugado grado 60?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuál es la resistencia a tracción del empalme mecánico roscado diseñado en barras de acero corrugado grado 60?
- ¿Cuál es el costo del empalme mecánico roscado diseñado en barras de acero corrugado grado 60?

1.3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.3.1. Objetivo General

Determinar la resistencia a tracción y el costo del empalme mecánico roscado diseñado en barras de acero corrugado grado 60.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la resistencia a tracción del empalme mecánico roscado diseñado en barras de acero corrugado grado 60.
- Determinar el costo del empalme mecánico roscado diseñado en barras de acero corrugado grado 60.

1.4. HIPÓTESIS

1.4.1. Hipótesis General

La resistencia a tracción y el costo son favorables en el empalme mecánico roscado diseñado en barras de acero corrugado grado 60.

1.4.2. Hipótesis Específicas

- La resistencia a tracción es favorable en el empalme mecánico roscado diseñado en barras de acero corrugado grado 60.
- El costo es favorable en el empalme mecánico roscado diseñado en barras de acero corrugado grado 60.

1.5. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Se tiene antecedentes nacionales sobre el análisis de conectores mecánicos, entre ellos se tiene a Sánchez (2019) quien analizó el desempeño estructural de los conectores mecánicos para columnas de concreto armado. La población del estudio comprendía a los diferentes tipos de conectores mecánicos (a presión, roscados o con tornillos) y traslapes, el autor selecciono como muestra a los conectores mecánicos de tornillo tipo 2 – Barsplice de una pulgada (1”) y media pulgada (1/2”) de diámetro, y empalmes traslapados aplicados en acero grado 60. Para el desarrollo de la investigación se empleó la metodología aplicada, de enfoque cuantitativo y el diseño del tipo cuasiexperimental, para analizar los tipos de empalme se prepararon probetas de acero y probetas de concreto con acero en su interior, las cuales contaban con los tipos de empalme evaluados, posteriormente se sometieron a ensayos de tracción (probetas de acero) y flexión (probetas de concreto) con el fin de determinar la resistencia de los empalmes frente al tipo de esfuerzo sometido. Se concluyo que, para las columnas, los conectores mecánicos mejoran el desempeño estructural en comparación a los traslapes, sin embargo, debido a su elevado costo no se recomienda su uso en edificaciones pequeñas a menos que el análisis costo-beneficio del conector mecánico indique lo contrario.

Asimismo, se tiene a Tarazona (2019) quien estudió la variación de costos entre los empalmes mecánicos y empalmes traslapados, en las pilas pilotes del proyecto “Línea 2 y ramal Av. Faucett – Av. Gambetta de la red básica del Metro de Lima y Callao”. La población del estudio comprende a los proyectos que empleen empalmes mecánicos roscados en sus elementos estructurales, teniéndose como muestra de estudio a las pilas pilotes de las cinco estaciones que conforman la etapa 1A del proyecto mencionado anteriormente, la cual presento empalmes para barras de diámetros de 3/4”, 1” y 1 3/8”. El tipo de investigación empleado fue explicativo, el procedimiento empleado presenta la siguiente secuencia: evaluación de planos, determinar los metrados (acero), evaluar el presupuesto y finalmente realizar cuadros comparativos. Según su análisis, en el caso de la barra de menor diámetro, el costo del empalme mecánico (\$ 17.30) tiene un costo mayor al doble del costo del empalme por traslape (\$ 6.11). Por otro lado, para barras de refuerzo de 1 3/8” se tiene que el empalme mecánico (\$ 20.91) tiene un costo menor a la mitad del costo del empalme por traslape (\$ 41.74). Como resultado se

determinó que para barras de refuerzo de 3/4" y 1" la longitud de empalme traslapado tiene un menor costo en comparación al conector mecánico.

También se tiene a Osco (2021) quien evaluó el comportamiento a tracción de acero de refuerzo y la influencia del conector mecánico en la resistencia a tracción. La muestra se compone de 6 especies de empalmes roscados, preparándose 3 probetas de 1" y 1 3/8" conteniendo acero empalmado en su interior. La metodología de la investigación es aplicada, del tipo es correlacional, presenta como nivel descriptivo y su diseño es experimental, dado que se realizará ensayos de laboratorio sometiendo a los especímenes esfuerzos de tracción. De acuerdo con los resultados de laboratorio, se determinó que la resistencia a tracción de las barras sin conectores es de $1.47 f_y$ y $1.45 f_y$ para diámetros de 1" y 1 3/8" respectivamente, por otro lado la resistencia a tracción de las barras con conectores fue de $1.52 f_y$ y $1.31 f_y$, los conectores evaluados cumplen con el esfuerzo mínimo ($1.25 f_y$) establecido en la norma peruana pero se observa que el conector mecánico mejora el comportamiento a tracción únicamente para la barra de diámetro de 1".

Finalmente se tiene a Curi & Magro (2020) quienes investigaron la influencia de empalmes mecánicos en la resistencia estructural de la conexión del acero corrugado grado 60. La población del estudio son las conexiones realizadas mediante empalmes mecánicos en barras de acero grado 60 en la ciudad de Lima, tomándose como muestra a los conectores mecánicos tipo 2 de la marca LINXION para barras de acero de refuerzo de 3/4" y 1" de diámetro, teniéndose en total 6 especímenes para cada diámetro considerado. El tipo de investigación es aplicada y presenta como diseño de investigación cuasi-experimental, dado que se prepararon probetas de acero con los empalmes, luego se realizó el ensayo a tracción de las probetas y finalmente se analizaron los resultados empleando estadística descriptiva. De acuerdo con los resultados de laboratorio, en promedio la resistencia a tracción de las barras de refuerzo empalmadas desarrolló 1.61 veces el esfuerzo de fluencia de las barras de acero. El estudio concluyó en que las conexiones tipo 2 LINXION superan en promedio un 9% a la relación de resistencia/fluencia mínima establecida en la norma peruana, además que el uso de conectores mecánicos influye en la relación resistencia/fluencia del acero,

por lo que se recomienda evaluar dicho parámetro si se pretende emplear otro tipo de conector mecánico.

También se tiene antecedentes internacionales sobre el análisis de conectores mecánicos, entre los cuales se tiene a Vargas (2015) quien estudio la resistencia a tensión y el beneficio económico de empalmes mecánicos para barras de acero de refuerzo grado 60. La muestra del estudio fueron en total 12 probetas de acero con empalmes de diferentes tipos de conectores mecánicos (4 probetas de cada proveedor) y 9 probetas de acero sin empalmes, el diámetro de las barras de la muestra era de 1" de diámetro salvo de 4 probetas con empalmes de 3/4" de diámetro correspondientes a mismo proveedor. El procedimiento experimental llevado a cabo por el autor comprendía de 3 fases: primero elaborar las probetas de acero y realizar los empalmes correspondientes, luego realizar ensayos de resistencia a tracción y analizar los resultados, finalmente realizar el análisis de costos teniendo de referencia a los empalmes traslapados. Se concluyo que emplear conectores mecánicos es menos costoso que emplear empalmes traslapados para barras de diámetro mayor a pulgada y media (1 1/2").

Asimismo, se tiene a Mora & Ortega (2021) quienes realizaron un estudio comparativo de resistencia a tracción, histéresis, durabilidad y costo entre empalmes mecánicos y empalmes traslapados. La muestra del estudio para el análisis de resistencia fue barras de 1/2", 5/8" y 3/4" empalmadas por uno de los conectores mecánicos (de rosca, de tornillo o de transición) elaborándose un total de 11 probetas de acero. Para el caso de los costos se evaluaron los empalmes para barras de 1/2", 5/8", 3/4", 7/8" y 1" de diámetro, para el caso de la durabilidad se consideró una probeta diámetro de 5/8" con empalme mecánico y otra con empalme traslapado. El proceso del estudio se divide en tres partes principales: primero se realizó ensayos a tracción y ensayos con ciclos de carga y descarga para analizar la resistencia máxima y la histéresis de los elementos, posteriormente se evaluó la durabilidad sometiendo la probeta a corrosión en una solución de cloruro de sodio, finalmente se evaluó los costos realizando cotizaciones del acero y empalmes en el mercado colombiano y elaborando los correspondientes análisis de costos unitarios. El estudio concluyo que los conectores mecánicos roscados evaluados fallan por deslizamiento y, por lo tanto, su capacidad de resistencia es menor al de la capacidad de la barra de refuerzo;

por tal motivo, se presume que el diseño del conector mecánico podría ser optimizado. Por otro lado, de acuerdo con el análisis de costos, se determinó que los empalmes traslapados son los más económicos.

También se tiene a González & Cueva (2018) quienes analizaron la resistencia, funcionalidad y la factibilidad económica de los empalmes mecánicos y empalmes traslapados en barras de acero grado 60 en República Dominicana. La muestra del estudio para el análisis de resistencia comprende a empalmes en barras de acero de 3/4" y 1" de diámetro; para el caso del análisis de costos se tuvo a empalmes (con conectores mecánicos y traslapados) en barras de acero de 3/8", 1/2", 3/4", 1" y 1 3/8". La investigación planteada fue del tipo descriptiva con enfoque cuantitativo, como metodología se empleó ensayos de tracción para determinar la resistencia de los empalmes, el análisis de costos se basó en los costos unitarios del mercado dominicano, y para evaluar la funcionalidad se recurrió a información de procesos constructivos y fichas técnicas de empalmes. Como resultado, se obtuvo que la resistencia de los empalmes mecánicos es mayor en un 25% a 50% que los empalmes traslapados. Analizando el costo, se determinó que los empalmes traslapados son más económicos en comparación con otros métodos de empalme. Es por ello por lo que recomiendan el uso de los conectores mecánicos únicamente edificaciones de gran magnitud, dado que garantizan la capacidad con gran confiabilidad, pero a su vez son muy costosos.

Finalmente se tiene a Vega & Navarro (2020) quienes evaluaron los beneficios que presentan los conectores mecánicos frente a los empalmes traslapados. La muestra del estudio comprendía conectores mecánicos roscados producidos por la empresa Ramalza S.A.S. #5, #6, #7, #8 y #10. En el estudio se recurrió a la base de datos de investigaciones similares, en las cuales se realizaron ensayos a tracción en probetas de acero de 3/4", 5/8" y 1" de diámetro de la marca mencionada anteriormente, y para el análisis de costos se empleó la información del expediente técnico de dos edificaciones existentes. De acuerdo el resultado de los ensayos, los conectores mecánicos evaluados superan en un 25% el esfuerzo de fluencia del acero siendo este el mínimo esfuerzo de acuerdo con los lineamientos de la norma colombiana, sin embargo, se determinó que es económicamente conveniente emplear dichos empalmes solo en varillas #8 y de mayor tamaño.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

En el presente capítulo, se presentan aquellos conceptos teóricos empleados para realizar el diseño de los conectores mecánicos roscados, la evaluación de las propiedades mecánicas del empalme mecánico y el análisis del costo del empalme mecánico diseñado.

2.1. COMPORTAMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO

Según Cantor (2020) la principal función del acero contenido en los elementos estructurales de concreto armado es absorber esfuerzos de tracción que el concreto no puede resistir por su misma naturaleza, dado que el concreto presenta un buen comportamiento únicamente para esfuerzos de compresión.

2.1.1. Esfuerzo Axial

La interacción de los esfuerzos y deformaciones generados por fuerzas aplicadas sobre el elemento es la que define la resistencia de dicho elemento, y por lo general para determinar su comportamiento se recurre a ensayos de laboratorio.

En el diagrama esfuerzo-deformación unitaria de los metales se identifican cuatro regiones que definen el comportamiento del elemento, las cuales son: región lineal, región de fluencia, región de endurecimiento y región de estricción; dicho comportamiento se ilustra en la siguiente figura:

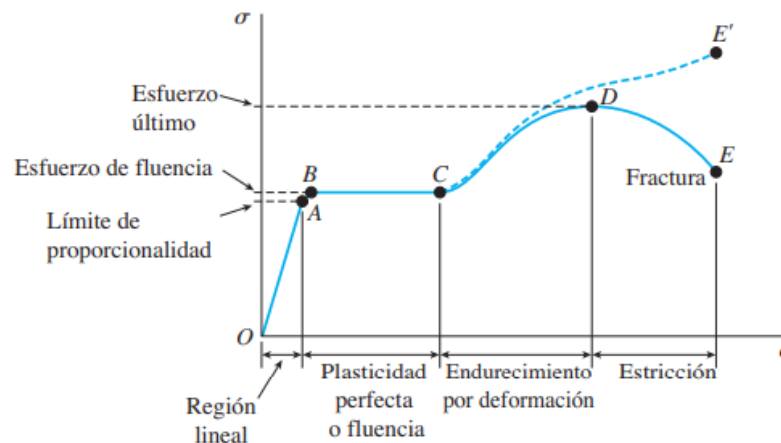


Figura 2. Diagrama esfuerzo-deformación típico del acero

Fuente: Obtenido de Gere & Goodno (2013)

De acuerdo con Cando (2016) el comportamiento de un elemento de acero sometido a tracción sigue el siguiente patrón: desde el punto O hasta el punto A

el material se comporta como un resorte al aplicar y quitar cargas; esta región cumple con la ley de Hooke, la cual relaciona las tensiones y deformaciones mediante un arreglo lineal siendo la pendiente equivalente al parámetro de Modulo de Elasticidad del material.

Al llegar al punto B el elemento aún se comporta como un material elástico, razón por la que, al descargar el elemento este logra recuperar su longitud original; sin embargo, al cargar el elemento a un esfuerzo mayor al punto B, el cual es denominado “Esfuerzo de Fluencia” (f_y), el elemento adquiere el comportamiento de un material elástico-plástico y posteriormente de plasticidad perfecta.

A partir del punto C, el elemento presenta un endurecimiento hasta alcanzar el punto D en el cual se desarrolla su resistencia máxima, dicha resistencia es denominada “Esfuerzo Último” (f_u) o esfuerzo máximo y se estima que la relación entre el esfuerzo ultimo y el esfuerzo de fluencia (R) es mayor o igual que 1.25.

A partir del punto D, a medida que el elemento se deforma va perdiendo resistencia hasta llegar al punto E en el cual se produce la fractura o rotura del elemento.

Gere & Goodno (2013) mencionan que según resultados experimentales se concluyó que la curva esfuerzo-deformación unitaria del material sometido a compresión es relativamente similar a la curva esfuerzo-deformación unitaria del material sometido a tracción, esto debido a que tiene el límite de proporcionalidad muy similar bajo ambos tipos de carga. Además, para el análisis del material considerando un comportamiento lineal, el esfuerzo axial máximo del material es igual a:

$$f_{m\acute{a}x} = f_y \quad (2.1)$$

Donde f_y es el esfuerzo de fluencia del material.

2.1.2. Esfuerzo Cortante

Existen diversas teorías de falla a corte en base a las consecuencias vistas en piezas sometidas a tracción, siendo las teorías de “Energía de la Distorsión para Materiales Dúctiles” y “Esfuerzo Cortante Máximo” modelos bastante confiables, el primero se basa en la energía de deformación de los materiales y el segundo en la relación de esfuerzos bidimensionales. Budynas & Nisbett (2020) mencionan

que la teoría de “Energía de Distorsión para Materiales Dúctiles”, es un modelo más completo dado que se basa en el concepto de energía de deformación de los materiales y, además, en su forma general permite analizar tridimensionalmente los esfuerzos sobre un elemento.

El esfuerzo efectivo calculado mediante la energía de distorsión, también llamado “Esfuerzo de Von Mises”, aplicado sobre un plano de esfuerzos (comportamiento de las barras de refuerzo en tracción) se escribe como:

$$\sigma' = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2)^{1/2} \quad (2.2)$$

En el caso de esfuerzo cortante puro en la zona de falla, para el plano de esfuerzos se tiene que $\sigma_x = 0$ y $\sigma_y = 0$. El esfuerzo cortante máximo del material es igual a:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{1}{\sqrt{3}} f_y \quad (2.3)$$

2.1.3. Esfuerzo Flexionante

Según Gere & Goodno (2013), los esfuerzos flexionantes de tracción y de compresión máximos que actúan sobre una sección transversal determinada se presentan en las fibras más alejadas del centroide o eje neutro. Considerando una distancia “c”, la cual es la distancia desde el eje neutro hasta el extremo de la sección (ya sea flexión positiva o negativa).

Los esfuerzos normales máximos correspondientes se estiman en función al momento aplicado y la inercia de la sección, donde el esfuerzo máximo a flexión se calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = f_y \quad (2.4)$$

2.2. EMPALMES EN VARILLAS DE REFUERZO

La unión entre dos barras de acero de refuerzo de igual o diferente diámetro es denominada “empalme”. Debido a que en el diseño de elementos estructurales de concreto armado y albañilería confinada se “supone” que los empalmes de acero transfieren correctamente los esfuerzos del de tracción y/o compresión a lo largo de todo el elemento; por lo tanto, es importante garantizar que los empalmes sean diseñados y fabricados cumpliendo con la norma vigente.

Según Alvis & Guerra (2019) en edificaciones de mediana envergadura se emplea más cantidad de acero de barras de refuerzo de 1/2", 5/8" y 3/4" de diámetro (aproximadamente 60% del acero total usado), es por ello que sugiere que la mayor cantidad de empalmes en una edificación de mediana envergadura se presenta en barras de refuerzo de los diámetros mencionados.

2.2.1. Importancia de Empalmes

Los empalmes de varillas de refuerzo se presentan con mucha frecuencia en obra debido a varios factores: el primer factor es la tecnología que poseen los fabricantes y proveedores para lograr fabricar y comercializar adecuadamente varillas de refuerzo con una longitud máxima; en el Perú se fabrican y comercializan varillas de longitudes de 9m y en casos especiales de 12m, es por ello que al construirse edificaciones o estructuras de dimensiones mayores a las mencionadas es inevitable recurrir a empalmar el acero de refuerzo contenido en los elementos estructurales principales.

El segundo factor es la demanda de resistencia en los elementos estructurales. Para una viga de varios tramos o una columna de varios pisos no se requiere la misma cantidad de acero a lo largo de toda su longitud. Es por ello que al optimizar la cantidad de acero colocado, se llega a considerar cambios en la cantidad e incluso posición del acero en determinados tramos del elemento, produciéndose la necesidad de empalmar varillas del mismo diámetro y en algunos casos se empalman varillas de diferentes diámetros (McCormac & Brown, 2018).

2.2.2. Tipos de Empalmes

En la actualidad existe una gran variedad de formas de empalmar varillas de refuerzo, agrupándose según el tipo de conexión se tienen los siguientes: traslapados, mecánicos y soldados. Cada uno de los tipos y sus clases correspondientes tienen sus ventajas y desventajas al aplicarlos, por lo que emplear un empalme u otro depende de las condiciones del proyecto.

2.2.2.1. Empalme Traslapado

Según González & Cuevas (2018) los empalmes traslapados son llamados también empalmes tradicionales (Ver Figura 3). Este es el tipo más simple de empalmar varillas de acero, dado que la conexión se logra mediante el solape

longitudinal de las varillas a lo largo del eje longitudinal; dicha longitud de traslape debe ser mayor a la denominada “longitud de desarrollo”.

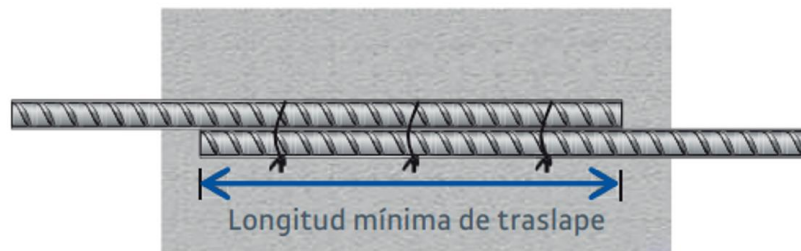


Figura 3. Esquema de empalme traslapado

Fuente: Obtenido de Aceros Arequipa (2010)

En el caso del traslapado ocurre la transferencia de esfuerzos de forma indirecta, dado que las varillas traslapadas transfieren los esfuerzos mediante la adherencia del concreto. Sin embargo, a pesar de ser una solución bastante simple, la naturaleza compleja de la transferencia de esfuerzos, así como la generación de grietas locales en el concreto que frecuentemente ocurren en los límites de las varillas son una desventaja; como la adherencia con el concreto es el medio de la transferencia de esfuerzos, la resistencia de la conexión dependerá en gran parte de la longitud de desarrollo.

Moussavi et al., (2018) señalan que en edificaciones de concreto armado, la cantidad de acero adicional incrustado en los elementos estructurales debido al traslapado del acero representa entre el 5% y hasta el 8% de la cantidad de acero efectiva empleada en la edificación. Es por ello por lo que el traslapado no es una práctica favorable para la “construcción sostenible”; pues el traslapado de acero propicia incrementar la cantidad de recursos naturales en la fabricación, y por lo tanto genera mayores emisiones de carbono al igual que aumenta el consumo de energía.

2.2.2.2. Empalme Mecánico

Los empalmes mecánicos son conexiones de varillas de acero empleando acoples o conectores mecánicos, los cuales son dispositivos que transfieren los esfuerzos de forma directa entre las varillas empalmadas.

Según Khedmatgozar & Mehrabi (2021), los conectores mecánicos adecuados son muy resistentes y debido a su calidad de conexión se requiere de materiales

y equipos especiales para su fabricación; es por este motivo que estos dispositivos mecánicos son comercializados a un costo elevado, y por lo general es más rentable que otros tipos de empalme solo cuando el diámetro de la varilla de acero es muy grande. Actualmente existen una gran variedad de modelos y categorías de conectores mecánicos como se muestra en la Figura 4; los más empleados son los del tipo roscado, de presión y de tornillo. Los conectores roscados son los más usados entre conectores mecánicos, dado que requieren únicamente del proceso de roscado de las varillas para fabricar el empalme; además, el roscado puede ser del tipo cilíndrico o del tipo cónico.

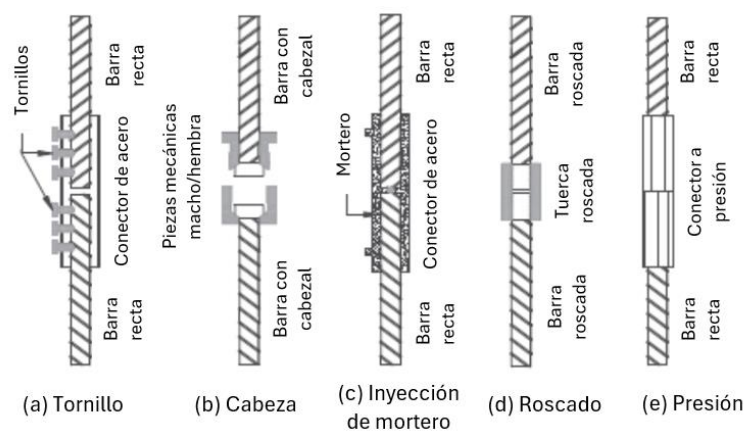


Figura 4. Categoría de conectores mecánicos

Fuente: Obtenido de Khedmatgozar & Mehrabi (2021)

Para garantizar la adecuada fluencia de las varillas de refuerzo empalmadas, el conector mecánico debe contar con la capacidad de resistir esfuerzos mayores al esfuerzo de fluencia del acero tanto en tracción como en compresión. La norma peruana al igual que normas internacionales establecen un valor mínimo de resistencia para estos dispositivos mecánicos, dicho valor se determina en función de la capacidad resistente del acero empleado. Según el American Concrete Institute (ACI, 2019), para asegurar la resistencia de la conexión y de este modo evitar una falla frágil, los empalmes mecánicos deben desarrollar al menos el 125% del esfuerzo de fluencia especificado de la varilla de refuerzo. El factor del 25% de resistencia adicional es un valor mínimo que garantiza la seguridad y es un valor máximo con relación al aspecto económico.

Por sus características de resistencia, diversos autores recomiendan el uso de los empalmes mecánicos en elementos con responsabilidad sísmica, los cuales estarán sometidos a fuerzas sísmicas y/o deformaciones inelásticas; sin embargo,

las zonas recomendadas para realizar los empalmes del tipo de conector mecánico dependen de la clasificación del empalme mecánico:

- Tipo I: el empalme mecánico desarrolla al menos $1.25 f_y$.
- Tipo II: el empalme mecánico desarrolla al menos $1.25 f_y$ y la resistencia máxima a tracción especificada de las varillas de acero empalmadas.

Los conectores del Tipo I son empleados en zonas del elemento estructural en las que se estima bajos esfuerzos de flexión y corte. Los conectores del Tipo II no tienen restricción para las zonas de empalme, dado que la conexión de varillas de acero con conectores del Tipo II simulan el comportamiento de una única varilla continua.

2.2.2.3. Empalme Soldado

Los empalmes soldados son conexiones de varillas de acero empleando la técnica de soldadura teniendo en cuenta la continuidad y alineamiento de la barra de refuerzo. El proceso de soldadura permite conectar las varillas por medio de un electrodo (material fusible), el cual al ser consumido a altas temperaturas logra deformarse y adherirse al material base, al solidificarse forman el cordón de soldadura permitiendo la transferencia directa de esfuerzos.

Existen diferentes tipos de uniones soldadas que pueden ser aplicadas, siendo siempre preferibles las uniones a tope (Ver Figura 5(a)) para evitar excentricidades entre barras, sin embargo, se puede optar por otros tipos como las uniones solapadas (Ver Figura 5(b)) siempre y cuando se garantice la resistencia de la conexión.

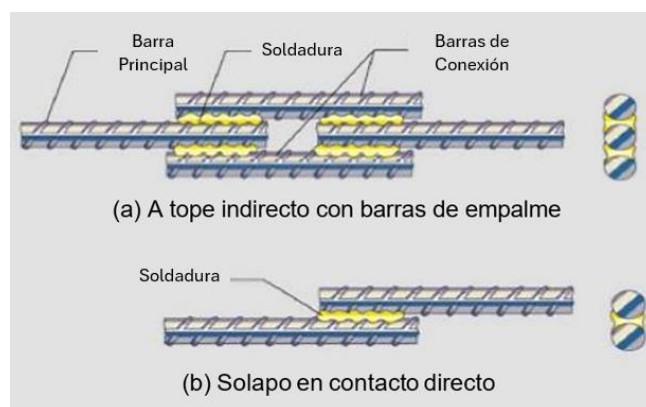


Figura 5. Tipos de empalmes soldados en varillas de acero

Fuente: Obtenido de Castillo (2016)

2.3. UNIONES ROSCADAS

Las uniones roscadas consisten en roscar exteriormente una pieza e interiormente la otra de manera que quedan unidas mediante la trabazón de las piezas con el hilo de rosca, el propósito de esta conexión es unir o sujetar dos o más piezas. Según Hernández & Feliberto (2012), las uniones roscadas se componen de dos elementos principales que se encuentran roscados, estos son la tuerca y el tornillo o perno (Ver Figura 6).

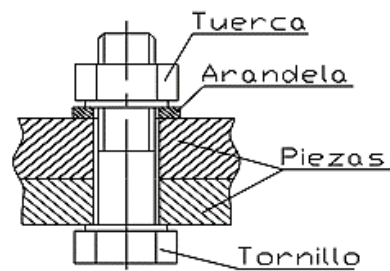


Figura 6. Elementos típicos en una unión roscada

Fuente: Obtenido de Hernández & Feliberto (2012)

Al apretar la tuerca se inducen fuerzas de compresión en el perno generando deformaciones en este último, de esta manera se produce una fuerza de sujeción, la cual es denominada como pre-tensión o precarga del perno. La fuerza de precarga se mantiene en la conexión después de que la tuerca se apretó en forma apropiada; la aplicación de la precarga sirve para garantizar la conexión de la unión roscada, sin importar si se ejerce o no la fuerza externa de tensión.

Según las consideraciones del American Institute of Steel Construction (AISC, 2016), el esfuerzo precarga debe ser aproximadamente el 70% de la resistencia especificada del elemento.

2.3.1. Características de Elementos Roscados

Los conectores mecánicos roscados tienen una gran similitud con las uniones roscadas o uniones empernadas (sometido a esfuerzos en la dirección de su eje principal) por las siguientes consideraciones: se encuentran cargados a lo largo de su eje longitudinal, generan esfuerzos de corte al transferir esfuerzos longitudinales entre los elementos conectados y la fuerza de corte depende del roscado en la zona de conexión.

Según Budynas & Nisbett (2020) las uniones roscadas por lo general emplean tornillos en conjunto con una tuerca; pero es posible aplicar los mismos conceptos de uniones roscadas empleando “birlos”, los cuales son varillas roscadas en ambos extremos. Debido al roscado, el área efectiva transversal de la varilla se reduce en función a la profundidad de rosca y el tipo de roscado; por lo tanto, para elementos roscado es inevitable la reducción de resistencia nominal.

Las características del roscado son determinadas por el diseñador en función de las condiciones de las piezas y de la estructura. Los diseños de elementos roscados se basan en roscas comerciales, las cuales se limitan por las series de roscas estandarizadas existentes, dado que las herramientas con las que se fabrican las roscas (como los tornos) presentan limitaciones. Una de las series de roscas más comunes es la “rosca métrica ISO”, la cual se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. Diámetro y área de roscas métricas ISO

Diámetro Nominal (mm)	Paso (mm)	Área de esfuerzo a tensión (mm ²)
10	1.50	58
12	1.75	84
14	2.00	115
16	2.00	157
20	2.50	245

Fuente: Elaboración propia adaptado de Budynas & Nisbett (2020)

Los elementos roscados con las características de la Tabla 1, poseen menor resistencia a esfuerzos de tracción debido a la reducción de área efectiva a tracción, el roscado reduce aproximadamente un 20% de la resistencia inicial.

2.3.2. Características de Filetes de Rosca

La zona más importante de las piezas roscadas es justamente la zona roscada, la cual se fabrica de acuerdo con las necesidades del diseñador para garantizar la conexión.

En la actualidad existen diversos tipos de roscas con características variadas, siendo las roscas ISO las más empleadas; la diferencia entre emplear un tipo de rosca y otro es principalmente la geometría de los filetes de rosca.

Tabla 2. Parámetros geométricos de roscas estándar

Tipo de Rosca	k_h	k_v	k_c
ISO	0.54	0.75	0.88
Cuadrada	0.50	0.50	0.50
Acme	0.50	0.70	0.63
Diente de S.	0.66	0.90	0.83

Fuente: Elaboración propia adaptado de Budynas & Nisbett (2020)

La Tabla 2 muestra las dimensiones paramétricas de las roscas (relación entre la dimensión del parámetro con el paso de la rosca); donde k_h representa la profundidad de rosca, k_v representa la longitud efectiva de roscado en el tornillo o rosca macho, y k_c representa la longitud efectiva de roscado en la tuerca o rosca hembra.

2.4. TORNO

El torno es un conjunto de máquinas y herramientas (Ver Figura 7) que cuenta con la capacidad de fabricar adecuadamente piezas mecánicas de forma geométrica de revolución, los cuales pueden ser del tipo cilíndrico o del tipo cónico. Este equipo opera girando la pieza a mecanizar mientras una o más herramientas de corte, las cuales son presionadas con un movimiento regulado, logrando mecanizar, roscar o desbastar, según sea requerido (Martínez, 2020).

2.4.1. Clasificación de Tornos

Existen diversos tipos de tornos que se diferencian por el tipo de producto, la capacidad de producción, las características de los elementos a mecanizar, entre otros.

2.4.1.1. Torno Paralelo

Los tornos paralelos se emplean principalmente para mecanizar piezas pequeñas y medianas, por lo que talleres mecánicos pequeños y medianos en la mayoría de las ciudades, suelen contar con este equipo. El torno paralelo tiene la facilidad de mecanizar piezas de geometría similar al de un cilindro, como lo es la rosca del tipo cilíndrica; sin embargo, presenta limitaciones para mecanizar piezas de geometría compleja, pero, es posible incorporar herramientas especiales para mecanizar dichas piezas.

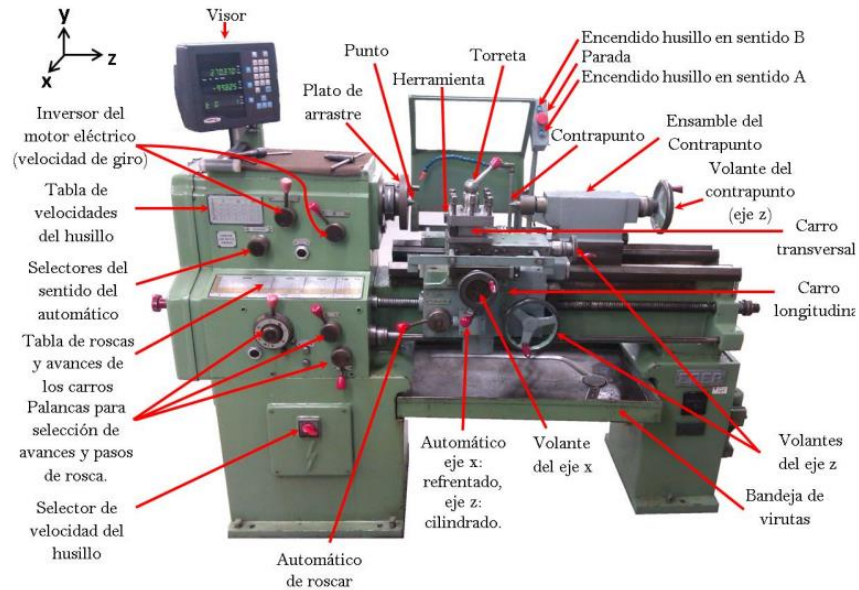


Figura 7. Elementos de un torno paralelo

Fuente: Obtenido de Pernía et al. (2018)

Este equipo es el tipo de torno más común y es de los más antiguos dado que fue el primer tipo de torno en ser fabricado y comercializado, tiene la capacidad de realizar los procesos mencionados anteriormente; pero, en comparación con otros tornos tiene un rendimiento menor debido a que actualmente se fabrican y operan equipos más sofisticados.

2.4.1.2. Tornos Especiales

Otros equipos de gran relevancia por su capacidad de producción industrial son los siguientes:

- El Torno de Control Numérico también llamado torno CNC, es un equipo moderno el cual incorpora algoritmos programados para el control y operación de este. En comparación con otros tipos de tornos, tiene mayor precisión en los procesos (roscado, desbaste u otros), y por lo tanto los productos generados por este equipo son de mayor calidad. Sin embargo, debido a la tecnología y los componentes que posee es un equipo con un costo elevado, por lo que es empleado para trabajos específicos y sofisticados.
- Torno Copiador: Este equipo tiene la característica de torneear piezas siguiendo la geometría o perfil de una plantilla; por lo tanto, se fabrica una réplica.

- Torno Revólver: Este equipo tiene la capacidad de utilizar más de una herramienta de corte para realizar mecanizados de geometría compleja en un solo proceso de avance.
- Torno Automático: Este equipo industrial incorpora el proceso de suministro de piezas a mecanizar de forma automática, tiene la capacidad de mecanizar tubos y barras de diversos materiales.
- Torno Vertical: Este equipo presenta al eje vertical como su eje de trabajo, es empleado para mecanizar piezas de gran tamaño que por sus dimensiones sería inviable la mecanización en tornos de eje horizontal.

2.4.2. Tipos de Roscado

El proceso de roscado en la mayoría de los tornos inicia con la configuración manual de las características del roscado, en el caso del torno CNC únicamente se configura las características del roscado. El roscado puede ser exterior (para tornillos) o interior (para tuercas), las características de roscas en ambos elementos son similares; sin embargo, el perfil de rosca no es el mismo para roscado exterior e interior. Para el caso del perfil de roscas métricas ISO mostrado en la Figura 8, la geometría de las roscas varía dependiendo si se considera que la base de los filetes se ubica en la zona superior del perfil (roscado interior) o en la zona inferior del perfil (roscado exterior).

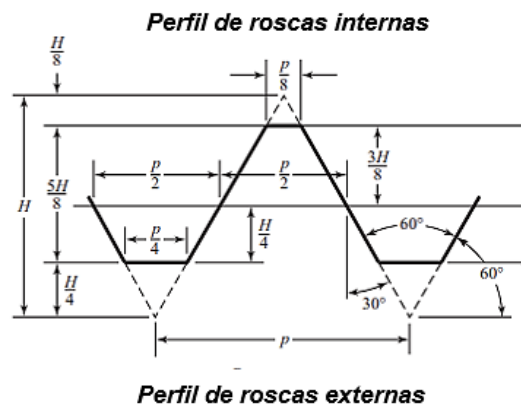


Figura 8. Perfil de roscas métricas ISO

Fuente: Elaboración propia adaptado de Budynas & Nisbett (2020)

2.4.2.1. Roscado Exterior

De acuerdo con Pernía et al. (2018), primero se configura el torno para obtener las características de rosca deseadas, luego se fija la pieza a ser roscada en las

garras del husillo de modo que gire en conjunto con el equipo. Después, se posiciona la herramienta de corte sobre la pieza a roscar, como se muestra en la Figura 9; la pieza por roscar rota sobre su eje y la herramienta de corte avanza hasta alcanzar la longitud roscada, el proceso de roscado se realiza un total de tres ciclos para garantizar el adecuado roscado exterior de la pieza.

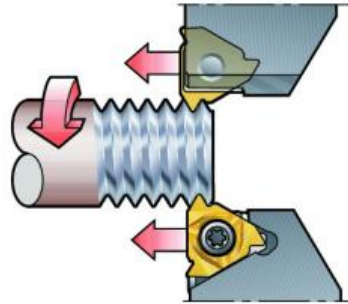


Figura 9. Proceso de roscado exterior
Fuente: Obtenido de Martínez (2020)

2.4.2.2. Roscado Interior

Primero se fija la pieza a ser roscada en las garras del husillo de modo que gire en conjunto con el equipo, luego se posiciona una broca de diámetro menor al diámetro de rosca para reducir el proceso de mecanizado interior y se realiza la perforación por la longitud requerida.

Después de realizar la perforación, primero se configura el torno para obtener las características de rosca deseadas, luego se posiciona la herramienta de corte interna sobre la pieza como se muestra en la Figura 10. La pieza por roscar rota sobre su eje y la herramienta de corte avanza hasta alcanzar la longitud roscada, el proceso de roscado se realiza un total de tres ciclos para garantizar el adecuado roscado exterior de la pieza.

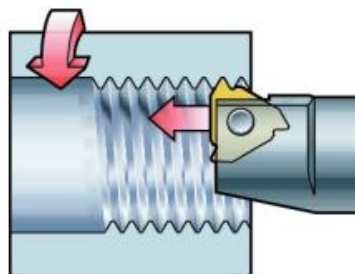


Figura 10. Proceso de roscado interior
Fuente: Obtenido de Martínez (2020)

2.5. ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

A pesar de que existen modelos que “pretenden” predecir el comportamiento de los materiales, el método más confiable para determinar el comportamiento de los materiales es realizar ensayos directos en un laboratorio. La prueba de laboratorio para determinar las propiedades mecánicas del acero de refuerzo es el “Ensayo a tracción de varillas de acero” basado en la Norma Técnica Peruana [NTP] 350.405 (Instituto Nacional de Calidad, 2019).

El ensayo pseudo-estático monotónico del acero de refuerzo a tracción requiere de una máquina de ensayo universal, la cual debe ser capaz de aplicar cargas lentamente sobre el eje longitudinal del espécimen, como se muestra en la Figura 11. La carga se incrementa a una velocidad controlada, la cual no influye considerablemente en los resultados para ensayos monotónicos; sin embargo, aplicar la carga a altas velocidades podría conducir a la fractura prematura del espécimen. Durante todo el procedimiento de ensayo se va registrando las cargas aplicadas, así como también el alargamiento generado entre los 200mm marcados del espécimen, de esta manera se logra obtener la curva de esfuerzo vs deformación del espécimen.

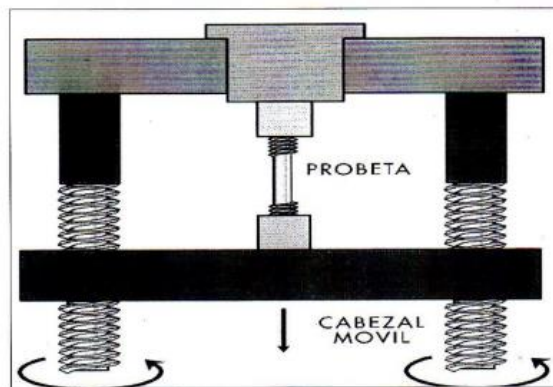


Figura 11. Máquina para ensayo de tracción

Fuente: Obtenido de Sánchez (2019)

Para que las barras de acero sean consideradas como acero de refuerzo en elementos estructurales, previamente se debe demostrar mediante pruebas experimentales, que las barras de acero cumplen con los estándares de calidad establecidos en las normas vigentes. Para el caso de acero de refuerzo grado 60, los límites de propiedades mecánicas se encuentran establecidos en la NTP 341.031, dichos límites se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3. Propiedades mínimas de acero de refuerzo grado 60

Diámetro Nominal (mm)	Límite de Fluencia (kg/cm ²)	Resistencia a Tracción (kg/cm ²)	Factor R (f_u/f_y)	Alargamiento (%)
12.7	4200	5400	1.25	14
15.9				
19.1				

Fuente: Elaboración propia adaptado de Instituto Nacional de Calidad (2018)

2.6. PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO

En los ensayos de laboratorio (resistencia a tracción) se realizan pruebas experimentales sobre una muestra con múltiples especímenes; con el fin de obtener parámetros representativos de la muestra, se procesan los resultados con herramientas estadísticas. Pedrosa et al. (2015) indica que para emplear pruebas estadísticas paramétricas acerca una media como ANOVA o T-Student, previamente se debe comprobar la normalidad de la muestra y se debe definir el nivel de significancia adecuado para el estudio.

El nivel de significancia " α " es un parámetro estadístico que se relaciona con el error máximo adoptado al momento de rechazar la hipótesis nula (H_0) cuando esta es verdadera; en las pruebas estadísticas se emplea dicho parámetro para limitar el margen de error en el resultado obtenido. Para trabajos de investigación, Romero (2016) recomienda utilizar un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ con el cual se obtienen "resultados significativos".

2.6.1. Prueba de Bondad de Ajuste

De acuerdo con Mohd & Bee (2011) la prueba de Shapiro-Wilk es la prueba de bondad de mayor potencia para todos los tipos de distribución y tamaños de muestra ($3 < n < 5000$). Emplear la prueba de bondad de Shapiro-Wilk permite validar si una muestra sigue el comportamiento de un tipo específico de distribución estadístico, el cual puede ser del tipo Normal u otro tipo de distribución estadística.

Dada una muestra aleatoria ordenada $x_1 < x_2 < \dots < x_n$, la probabilidad de distribución de la prueba de Shapiro-Wilk se calcula de la siguiente forma:

$$W_k = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.5)$$

Donde “ a_i ” son constantes definidas para la prueba Shapiro-Wilk, los cuales representan el valor teórico del tipo de distribución Normal u otro tipo de distribución estadístico; dichos factores se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4. Coeficientes de distribución normal para la prueba Shapiro-Wilk

Tamaño de muestra	i				
	1	2	3	4	5
2	-0.7071	0.7071	-	-	
3	-0.7071	0.0000	0.7071	-	-
4	-0.6872	-0.1677	0.1677	0.6872	-
5	-0.6646	-0.2413	0.0000	0.2413	0.6646

Fuente: Elaboración propia adaptado de Hanusz et al. (2016)

Para el caso de una distribución Normal, se plantean las siguientes hipótesis:

H_0 : La variable sigue una distribución Normal.

H_1 : La variable no sigue una distribución Normal.

Para un tamaño de muestra n y un nivel de confiabilidad α , se rechaza la hipótesis nula (H_0) si se cumple la siguiente expresión:

$$W_c < W_{(n,\alpha)} \quad (2.6)$$

Donde $W_{(n,\alpha)}$ es el valor crítico de la prueba estadística de Shapiro-Wilk, la cual se obtiene de la siguiente tabla:

Tabla 5. Parámetro de decisión para la prueba Shapiro-Wilk

Tamaño de muestra	Nivel de Significancia		
	0.01	0.05	0.10
5	0.687	0.752	0.806
10	0.781	0.842	0.869
20	0.868	0.905	0.920
50	0.930	0.947	0.955

Fuente: Elaboración propia adaptado de Hanusz et al. (2016)

En caso de que no se cumpla la relación (2.6), no se rechazara la hipótesis nula y por lo tanto con un nivel de significancia α , la muestra evaluada sigue la distribución Normal.

2.6.2. Prueba de Hipótesis Estadística acerca de una Media

De acuerdo con Espinoza (2018), para emplear la prueba de hipótesis sobre la media de una muestra no normal, se requiere que el tamaño de la muestra sea grande ($n \geq 30$), dado que el tamaño de la muestra influye en la precisión de los resultados y se puede aproximar a una distribución normal. Para una muestra que sigue una distribución normal de tamaño de muestra $n \geq 2$, la probabilidad de la distribución T-Student se calculan con la siguiente expresión:

$$t_k = \frac{\bar{x} - x_0}{\hat{s}/\sqrt{n}} \quad (2.7)$$

Cuya distribución es del tipo T-Student con $n - 1$ grados de libertad y los parámetros son:

$\bar{x}$: Media

x_0 : Valor de comparación con la media

$\hat{s}$: Desviación estándar

n : Tamaño de la muestra

Para el caso de una prueba unilateral de cola a la derecha, se plantean las siguientes hipótesis:

$H_0 : \bar{x} \leq x_0$, la media es menor o igual al valor de referencia

$H_1 : \bar{x} > x_0$, la media es mayor al valor de referencia

Si la probabilidad de distribución T-Student y el valor crítico cumplen con la expresión (2.8), con una confiabilidad α se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alterna (H_1).

$$t_k > t_{(1-\alpha, n-1)} \quad (2.8)$$

En caso contrario, si la probabilidad de distribución T-Student y el valor crítico no cumplen con la expresión (2.8), con una confiabilidad α se acepta la hipótesis nula (H_0) y se rechaza la hipótesis alterna (H_1).

CAPÍTULO III: EVALUACIÓN DE RESISTENCIA

En el presente capítulo se presenta el procedimiento del diseño del empalme mecánico y análisis de resistencia a tracción de barras de acero empalmadas mediante conectores mecánicos roscados, las barras evaluadas son de diámetro nominal igual a 12.7mm (1/2"), 15.9mm (5/8") y 19.1mm (3/4"). Para ello, se establecen consideraciones del diseño, así como también se desarrolla el cálculo de dimensiones del empalme. Luego, se detalla el proceso para realizar los ensayos de resistencia a tracción de empalmes mecánicos en un laboratorio que cuente con certificación de calibración. Con los resultados experimentales se procede con el análisis estadístico de resultados; se determina la normalidad de la muestra, luego se identifican datos atípicos y finalmente se emplea la prueba de T-Student para determinar el valor característico del parámetro de resistencia R de los empalmes.

3.1. DISEÑO DE EMPALME MECÁNICO ROSCADO

El empalme mecánico propuesto se basa en unir varillas de refuerzo de con conectores mecánicos fabricados en varillas de refuerzo de mayor diámetro. La fabricación de empalmes consiste en roscar exteriormente las varillas a empalmar de diámetro (D_i), hasta conseguir una sección con diámetro menor roscado de varilla (D_r) capaz de soportar la resistencia de diseño, como se muestra en la Figura 12; además, la longitud roscada de la varilla (L_r) deberá ser suficiente para garantizar la resistencia de conexión entre varilla y conector.

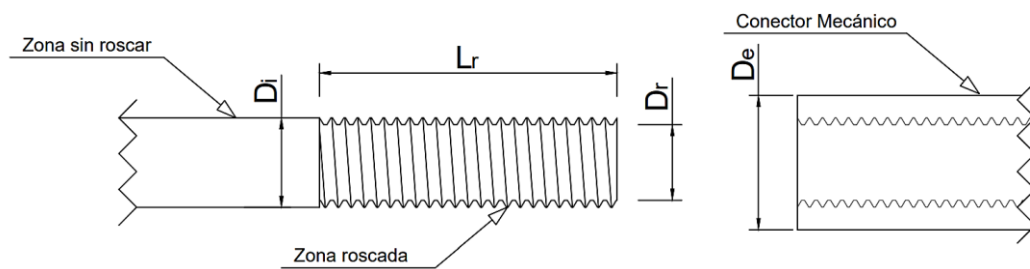


Figura 12. Esquema de varilla y conector roscados

Fuente: Elaboración propia

Luego, para fabricar el conector se realiza una perforación roscada a lo largo del eje longitudinal de la varilla de mayor diámetro (D_e), la longitud del conector (L_c) será mayor a dos veces la longitud roscada (L_r) de la varilla como se muestra

Figura 13, esto por facilidad de fabricación; después, se rosca interiormente con propiedades de rosca conjugadas a las roscas de la varilla.

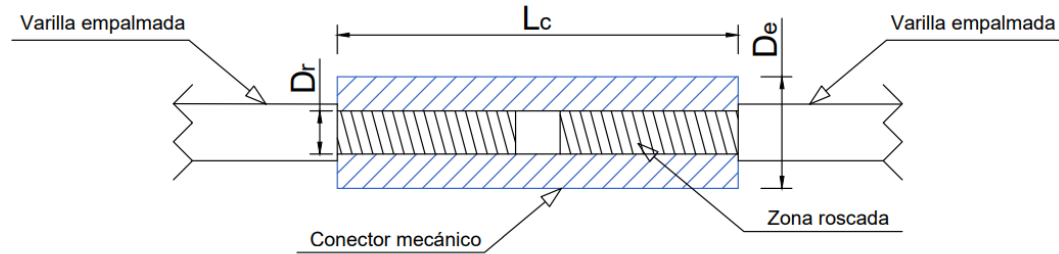


Figura 13. Esquema de empalme mecánico diseñado

Fuente: Elaboración propia

La conexión del empalme mecánico propuesto tiene características similares a la conexión de un tornillo y una tuerca; por lo tanto, para el diseño del empalme mecánico se considera conveniente analizar los parámetros y casos de falla de conexión entre tornillos y tuercas.

3.1.1. Consideraciones de Diseño

El objetivo del diseño es dimensionar el paso de rosca (p), el diámetro menor roscado de varilla (D_r), el diámetro exterior del conector (D_e), la longitud de varilla roscada (L_r) y la longitud del conector (L_c); por las características del empalme, este último parámetro se encuentra relacionado directamente con la longitud de varilla roscada.

El diseño del empalme planteado en el presente trabajo considera la falla por fluencia o rotura de la varilla en la zona roscada, antes de que falle el conector o los mismos filetes de rosca. Esto debido a que tanto la capacidad de resistencia del conector y de los filetes, pueden ser mayores al incrementar sus dimensiones; sin embargo, para la varilla en la zona roscada necesariamente se reduce la sección y consecuentemente su capacidad de resistencia. La reducción de resistencia y el diámetro menor roscado de varilla debe ser controlado, de modo que la capacidad de resistencia en la zona roscada y consecuentemente del empalme mecánico supere la resistencia mínima establecida en la norma vigente.

Es por ello por lo que, para el dimensionamiento del diámetro menor roscado, se considera analizar la sección con la resistencia real (registrada de ensayos).

3.1.1.1. Esfuerzos máximos para diseño

Según Vanegas (2018) en todo proceso de diseño existen incertidumbres. Los métodos de cálculo usualmente asumen criterios y condiciones que no se cumplen totalmente en la práctica, existiendo incertidumbre en la resistencia de los materiales y la existencia de cargas inesperadas. Estos factores condicionan al diseñador a considerar capacidades de resistencia considerablemente menores a las estimadas mediante los análisis planteados. Sin embargo, considerar resistencias menores de las que soportan las piezas mecánicas, conlleva a sobredimensionar las piezas y consecuentemente incrementar los costos. Por dicho motivo, se busca un equilibrio entre la calidad y la rentabilidad de la pieza mecánica.

Se recomiendan factores de seguridad presentado en la Tabla 6, los cuales se eligen de acuerdo con la incertidumbre del análisis, el tipo de material y el criterio de falla.

Tabla 6. Factores de seguridad para piezas mecánicas

Tipo de Carga	Metales Dúctiles		Metales Frágiles	Madera
	(f_y)	(f_u)	(f_u)	(f_u)
Carga Estática	1.5 – 2.0	3.0 – 4.0	5.0	7.0
Carga Variable	4.0	8.0	10.0	13.0

Fuente: Elaboración propia adaptado de Vanegas (2018)

Para el análisis de esfuerzos de transferencia en la conexión, se tomó en cuenta los factores de seguridad presentados en la Tabla 6 dado que consideran criterios más conservadores, previniendo la falla en la conexión por transferencia de esfuerzos. Para el conector mecánico propuesto, en función del tipo de material y carga aplicada, se considera conveniente emplear el factor de seguridad $\phi = 2.00$.

Considerando el esfuerzo máximo a corte a partir del esfuerzo de Von Mises y el factor de seguridad ϕ , la resistencia de diseño a corte por transferencia se calcula con la siguiente expresión:

$$\tau_{c_d} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{f_y}{\phi} \quad (3.1)$$

Considerando el factor de seguridad ϕ , la resistencia de diseño a flexión se calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma_{f-d} = \frac{f_y}{\phi} \quad (3.2)$$

Para el caso de la resistencia al aplastamiento, Vanegas (2018) recomienda establecer como esfuerzo límite un valor menor al esfuerzo máximo a tracción. Es por ello por lo que para fines de diseño no se considerará el factor de sobre resistencia. Por lo tanto, la resistencia de diseño a aplastamiento considerando el factor de seguridad ϕ , se calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma_{a-d} = \frac{f_y}{\phi} \quad (3.3)$$

3.1.1.2. Fuerza máxima de diseño

Ortiz (2014) señala que la capacidad de resistencia del acero de refuerzo en la zona inelástica es mayor a la resistencia de fluencia debido al endurecimiento del material. El comportamiento del acero de refuerzo tiene ligeras diferencias al ser sometido a esfuerzos de tracción o de compresión, como se muestra en la Figura 14 para un acero de refuerzo evaluado en México.

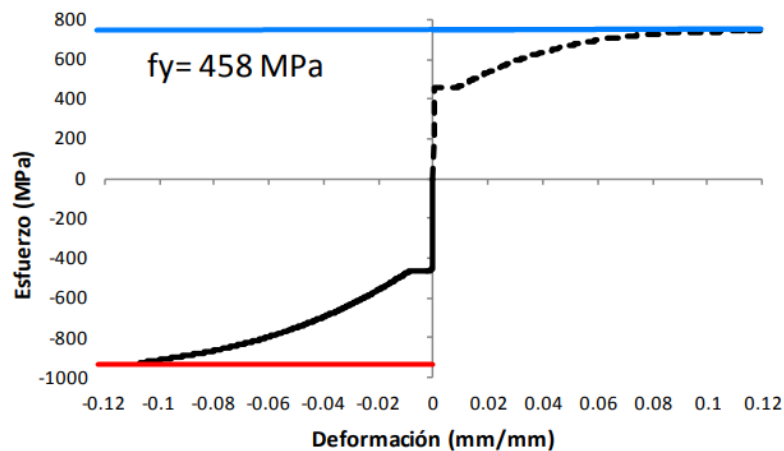


Figura 14. Curva esfuerzo-deformación de acero evaluado en México

Fuente: Obtenido de Ortiz (2014)

Es por ello por lo que la capacidad de resistencia del acero al ser sometido a esfuerzos de compresión es mayor en comparación a la capacidad de resistencia al ser sometido a esfuerzos de tracción; sin embargo, la capacidad de deformación es menor al ser sometido a fuerzas de compresión.

Restrepo & Rodriguez (2013) señalan que el método establecido por el ACI-19 para determinar la resistencia probable de elementos de concreto armado, considera emplear el factor de sobre resistencia del acero de refuerzo igual a

$\lambda_0 = 1.25$. Al igual que la norma nacional vigente E.060, considera que un empalme mecánico o empalme soldado debe desarrollar al menos $1.25f_y$ de la varilla de refuerzo, ya sea en tracción o compresión según sea requerido.

Dado que el comportamiento del acero de refuerzo sometido a fuerzas de compresión presenta mayor capacidad de resistencia en comparación a ser sometido a fuerzas de tracción, en el presente trabajo de investigación se considera suficiente evaluar el comportamiento de los empalmes sometidos a fuerzas de tracción. Además, teniendo en cuenta la demanda de resistencia establecida en la norma vigente, el empalme mecánico roscado diseñado debe presentar la capacidad de soportar esfuerzos de tracción de al menos $1.25f_y$ de la varilla de refuerzo.

$$f_{t_d} = \lambda_0 f_y \quad (3.4)$$

Para una barra corrugada de diámetro D_i , la fuerza axial máxima $F_{m\acute{a}x}$ para el diseño del empalme es igual a:

$$F_{t_m\acute{a}x} = \lambda_0 f_y \frac{\pi D_i^2}{4} \quad (3.5)$$

La cual es la fuerza a tracción mínima que debe soportar el empalme mecánico, y λ_0 es la mínima relación entre resistencia máxima y resistencia de fluencia.

3.1.2. Análisis de Longitud Roscada

En la zona de conexión se presentan dos tipos de filetes con diferentes propiedades geométricas (área e inercia) debido a que el perfil de rosca no es el mismo para las roscas interiores y roscas exteriores como se muestra en la Figura 8; aunque son similares y complementarios, no son iguales para el caso de roscas métricas ISO, las cuales son empleadas en el presente trabajo.

Debido a la transferencia de esfuerzos, estos son susceptibles a fallas por cortante, por flexión o por aplastamiento. Según Norton (2011), los filetes pueden ser representados por vigas en voladizo como se muestran en la Figura 15, sobre las cuales se aplican cargas equivalentes a los esfuerzos de transferencia. La fuerza externa aplicada es equivalente a la fuerza a tracción máxima aplicada en los extremos de las varillas en los extremos; además, por las condiciones de la rosca es aceptable suponer que las cargas se distribuyen uniformemente sobre la superficie de los filetes.

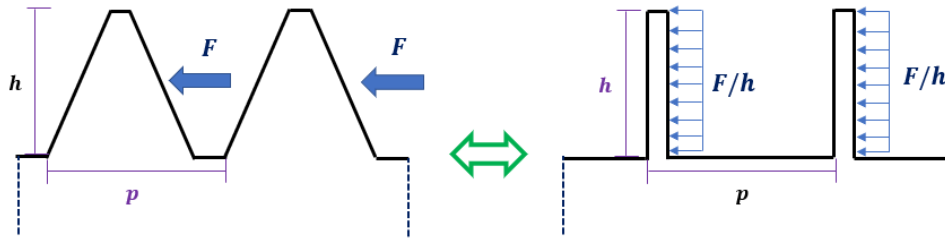


Figura 15. Esquema de vigas en voladizo para varillas roscadas

Fuente: Elaboración propia

En el caso de que la varilla se encuentre parcialmente roscada como se muestra en la Figura 16, la diferencia con el análisis que se presenta en este capítulo es el efecto de la carga y las propiedades de la sección en la zona crítica de esfuerzos, que será determinada de acuerdo con la profundidad de roscado efectivo.

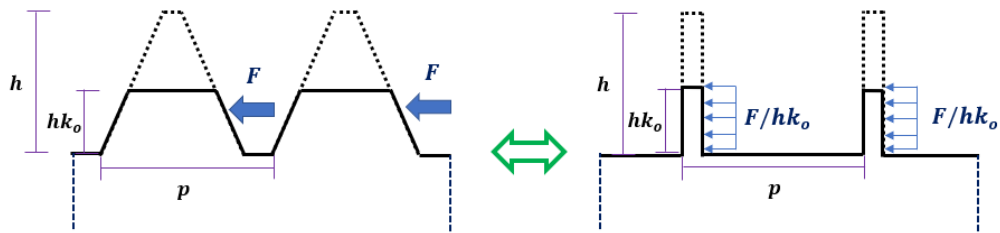


Figura 16. Esquema de vigas en voladizo para varillas parcialmente roscadas

Fuente: Elaboración propia

3.1.2.1. Falla por cortante en filetes

Teniendo en cuenta el modelo de vigas equivalentes (Ver Figura 15), el esfuerzo máximo a corte sobre las fibras de los filetes se calcula con la siguiente expresión:

$$\tau_{c_m\acute{a}x} = \frac{3}{2} \frac{V_{c_m\acute{a}x}}{A_c} \quad (3.6)$$

Donde $V_{c_m\acute{a}x}$ es la fuerza cortante máxima según el análisis y A_c es el área efectiva a corte en la sección evaluada. De acuerdo con el análisis de fuerza cortante sobre una viga en voladizo, el esfuerzo máximo a corte ocurre en la zona de empotramiento de la viga o la base de los filetes. La fuerza cortante que soportan los filetes en conjunto es igual a la fuerza total de la carga distribuida sobre la viga equivalente, esta se calcula con la siguiente expresión:

$$V_{c_m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{N} \quad (3.7)$$

Donde $F_{m\acute{a}x}$ es la fuerza máxima aplicada sobre las varillas de refuerzo y N es el número de roscas. Analizando los elementos del empalme con la misma demanda de resistencia, el área efectiva a corte de los filetes de la varilla (A_{c_var}) y el área efectiva a corte de los filetes del conector (A_{c_con}) se calculan con las siguientes expresiones:

$$A_{c_var} = \pi(k_v p)(D_r) \quad (3.8)$$

$$A_{c_con} = \pi(k_c p)(D_r + 2k_h p) \quad (3.9)$$

Donde D_r es el diámetro de rosca, p es el paso de rosca y las constantes k_v , k_c y k_h , son parámetros geométricos que se obtienen de la Tabla 2. Para fines de diseño se calcula el máximo esfuerzo actuante a corte; por lo tanto, se emplea el menor valor área calculado con las expresiones (3.8) y (3.9).

Teniendo en cuenta que la longitud roscada (L_r) es igual a la longitud total comprendida entre los pasos ($N \times p$); se reemplazan las ecuaciones (3.5), (3.7) y (3.8) en la ecuación (3.6), obteniéndose que el esfuerzo máximo a corte es:

$$\tau_{c_m\acute{a}x} = \frac{3 \lambda_0 f_y D_i^2}{8 k_v D_r L_r} \quad (3.10)$$

Donde D_i es el diámetro de la varilla y λ_0 es el factor de sobre resistencia de diseño. Teniendo en cuenta que el esfuerzo de diseño a corte no debe superar la resistencia máxima de diseño a corte, se reemplaza la ecuación (3.10) en la ecuación (3.1), obteniéndose las siguientes relaciones de diseño considerando el factor de profundidad efectiva (k_0):

$$\frac{L_r}{D_i} \geq \frac{3\sqrt{3}}{8} \frac{\lambda_0 \phi D_i}{k_v D_r} \quad (3.11a)$$

$$\frac{L_r}{D_i} \geq \frac{3\sqrt{3}}{8} \frac{\lambda_0 \phi}{[k_v - (k_v - k_c)k_0]} \frac{D_i}{(D_r + 2k_h p k_0)} \quad (3.11b)$$

3.1.2.2. Falla por flexión en filetes

Teniendo en cuenta el modelo de vigas equivalentes (Ver Figura 15), el esfuerzo máximo a flexión sobre las fibras de los filetes se calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma_{f_m\acute{a}x} = \frac{M_{f_m\acute{a}x}c}{I_b} \quad (3.12)$$

Donde $M_{f_m\acute{a}x}$ es el momento flector máximo según el análisis, I_b es la inercia efectiva a flexión en la sección evaluada y c es la distancia de la fibra más alejada al centroide de la sección. De acuerdo con el análisis de momento flector sobre una viga en voladizo, el esfuerzo máximo a flexión ocurre en la zona de empotramiento de la viga o la base de los filetes. El momento máximo que soportan los filetes en conjunto es igual a al momento generado por la carga distribuida sobre la viga equivalente, esta se calcula con la siguiente expresión:

$$M_{f_m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x} \times (k_h p / 2)}{N} \quad (3.13)$$

Analizando los elementos del empalme con la misma demanda de resistencia, la inercia de los filetes de la varilla (I_v) y la inercia de los filetes del conector (I_c) se calculan con las siguientes expresiones:

$$I_{f_var} = \frac{1}{12} (\pi D_r) (k_v p)^3 \quad (3.14)$$

$$I_{f_con} = \frac{1}{12} [\pi (D_r + 2k_h p)] (k_c p)^3 \quad (3.15)$$

Para fines de diseño se calcula el máximo esfuerzo actuante a flexión y por lo tanto se emplea el menor valor de inercia calculado con las expresiones (3.14) y (3.15).

Teniendo en cuenta que la longitud roscada (L_r) es igual a la longitud total comprendida entre los pasos ($N \times p$); se reemplazan las ecuaciones (3.5), (3.13) y (3.15) en la ecuación (3.12), obteniéndose que el esfuerzo máximo a flexión es:

$$\sigma_{f_m\acute{a}x} = \frac{3 \lambda_0 f_y D_i^2 k_h}{4 D_r k_v^2 L_r} \quad (3.16)$$

Teniendo en cuenta que el esfuerzo de diseño a flexión no debe superar la resistencia máxima de diseño a flexión; se reemplaza la ecuación (3.16) en la ecuación (3.2), obteniéndose las siguientes relaciones de diseño considerando el factor de profundidad efectiva (k_0):

$$\frac{L_r}{D_i} \geq \frac{3 \lambda_0 \phi k_h k_0 D_i}{4 k_v^2 D_r} \quad (3.17a)$$

$$\frac{L_r}{D_i} \geq \frac{3 \lambda_0 \phi k_h (2 - k_0)}{4 k_c^2} \frac{D_i}{(D_r + 2k_h p)} \quad (3.17b)$$

3.1.2.3. Falla por aplastamiento en filetes

De acuerdo con el modelo planteado por las vigas equivalentes (Ver Figura 15), el esfuerzo máximo por aplastamiento sobre la superficie de los filetes se calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma_{a_m\acute{a}x} = \frac{P_{a_m\acute{a}x}}{A_a} \quad (3.18)$$

Donde $P_{a_m\acute{a}x}$ es la fuerza de compresión máxima sobre las fibras según el análisis y A_a es el área efectiva frente a esfuerzos de compresión. Dado que se “supone” que la carga se distribuye uniformemente sobre la superficie de los filetes, la fuerza de compresión se calcula con la siguiente expresión:

$$P_{a_m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{N} \quad (3.19)$$

El área sometida a esfuerzos de compresión o aplastamiento son iguales para la varilla y el conector, el área efectiva a compresión (A_a) se calcula con la siguiente expresión:

$$A_a = \pi(D_r + k_h p)k_h p \quad (3.20)$$

Teniendo en cuenta que la longitud roscada (L_r) es igual a la longitud total comprendida entre los pasos ($N \times p$); se reemplazan las ecuaciones (3.5), (3.19), (3.7) y (3.20) en la ecuación (3.18), obteniéndose que el esfuerzo máximo a compresión es:

$$\sigma_{a_m\acute{a}x} = \frac{1}{4} \frac{\lambda_0 f_y D_i^2}{(D_r + k_h p)k_h L_r} \quad (3.21)$$

Teniendo en cuenta que el esfuerzo máximo a aplastamiento no debe superar la resistencia máxima de diseño a aplastamiento; se reemplaza la ecuación (3.21) en la ecuación (3.2), obteniéndose la siguiente relación de diseño considerando el factor de profundidad efectiva (k_0):

$$\frac{L_r}{D_i} \geq \frac{1}{4} \frac{\lambda_0 \phi}{k_h k_0} \frac{D_i}{(D_r + k_h p k_0)} \quad (3.22)$$

3.1.3. Análisis de Diámetro Exterior

Los elementos del empalme mecánico transmiten los esfuerzos de tracción por medio de los filetes de rosca; sin embargo, en la zona central del conector que se indica en la Figura 17, la sección del conector mecánico se encuentra trabajando a tracción pura sin apoyo con las varillas de refuerzo. Por lo tanto, se considera que el conector debe soportar la fuerza a tracción máxima aplicada en los extremos de las varillas de refuerzo.

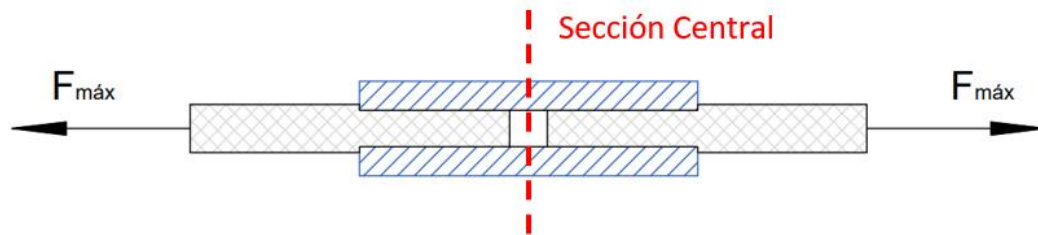


Figura 17. Zona central en conector mecánico

Fuente: Elaboración propia

Debido a la perforación roscada, el área efectiva a tracción del conector (A_{t_con}) se reduce considerablemente. El área efectiva a tracción del conector es igual a la resistencia de la sección sin considerar la zona roscada, dicho parámetro se calcula con la siguiente expresión:

$$A_{t_con} = \frac{\pi}{4} [D_e^2 - (D_r + 2k_h p)^2] \quad (3.23)$$

Donde D_e es el diámetro exterior del conector y D_r es el diámetro de rosca. La resistencia a tracción de los pernos o elementos roscados según el AISC (2016) considera reducir la resistencia para el diseño de conexiones; sin embargo, debido a que se espera que el empalme falle por esfuerzos a tracción, no se considera la reducción de resistencia a tracción y dicho esfuerzo máximo a tracción se calcula con la siguiente expresión:

$$f_{t_máx} = R_0 f_y \quad (3.24)$$

Donde R_0 es el factor de sobre resistencia real del acero de refuerzo (registrado mediante ensayos). Considerando la fuerza máxima aplicada sobre el conector y su área efectiva a tracción, el esfuerzo máximo a tracción sobre el conector mecánico se calcula con la siguiente expresión:

$$f_{t_con} = \frac{\lambda_0 f_y D_i^2}{D_e^2 - (D_r + 2k_h p)^2} \quad (3.25)$$

Teniendo en cuenta que la fuerza máxima a tracción no debe superar la resistencia máxima de diseño a tracción, se reemplaza la ecuación (3.24) en la ecuación (3.25), obteniéndose la siguiente relación de diseño:

$$\frac{D_e}{D_i} \geq \sqrt{\frac{\lambda_0}{R_v} + \left(\frac{D_r + 2k_h p}{D_i}\right)^2} \quad (3.26)$$

3.1.4. Análisis de Diámetro Roscado Menor

La varilla roscada transmite los esfuerzos de tracción por medio de la rosca; sin embargo, en la zona crítica de la varilla roscada indicada en la Figura 18, la sección de la varilla roscada se encuentra trabajando a tracción sin apoyo del conector mecánico. Por lo tanto, la varilla roscada debe soportar la fuerza a tracción máxima aplicada en los extremos de las varillas de refuerzo.

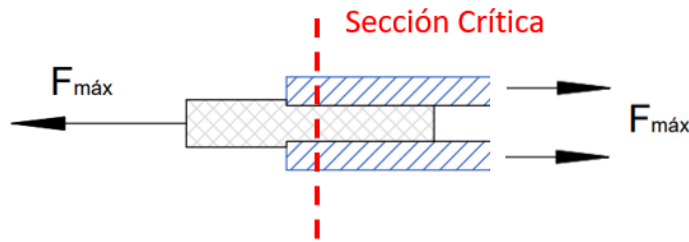


Figura 18. Zona crítica en varilla roscada

Fuente: Elaboración propia

Debido al rebaje por roscado de varilla, el área efectiva a tracción de la varilla (A_{t_var}) se reduce considerablemente. Según Hernández & Feliberto (2012), el área efectiva a tracción es igual a la resistencia del núcleo del elemento roscado y un aporte menor de los filetes de rosca, dicho parámetro se calcula con la siguiente expresión:

$$A_{t_var} = \frac{\pi}{4} \left(D_r + \frac{1}{2} k_h p \right)^2 \quad (3.27)$$

Donde D_r es el diámetro roscado menor, p es el paso de la rosca y k_h es el parámetro de profundidad de la rosca. Teniendo en cuenta el área efectiva a tracción calculada con la expresión (3.27), y la fuerza máxima calculada con la expresión (3.5), el esfuerzo máximo a tracción de la varilla es igual a:

$$f_{t_var} = \frac{\lambda_0 f_y D_i^2}{\left(D_r + \frac{1}{2} k_h p\right)^2} \quad (3.28)$$

Teniendo en cuenta que el esfuerzo máximo a tracción no debe superar la resistencia máxima a tracción, se reemplaza la ecuación (3.24) en la ecuación (3.28), obteniéndose la siguiente relación de diseño considerando el factor de profundidad efectiva (k_0):

$$\frac{D_r}{D_i} \geq \left(\frac{\lambda_0}{R_v}\right)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} \frac{k_h p k_0}{D_i} \quad (3.29)$$

3.2. FABRICACIÓN DE EMPALME MECÁNICO

El acero de refuerzo empleado para fabricar los empalmes (tanto las varillas a empalmar y los conectores) es el “Fierro corrugado grado 60 (binorma)” producido por el grupo Aceros Arequipa. Dicho material cumple con los requisitos mínimos según los estándares del ASTM A615 y ASTM A706 grado 60.

Con las expresiones para el diseño de los empalmes definidas, se procede a realizar el dimensionamiento y posteriormente la fabricación de dichos elementos. Sin embargo, debido a las condiciones de los materiales y los equipos para fabricarlos (torno paralelo), se tienen ciertas limitaciones que se deben tener en cuenta al proponer las dimensiones del empalme.

3.2.1. Limitaciones para la Fabricación

La primera limitación es la capacidad del torno paralelo para fabricar piezas roscadas, dado que los parámetros de el paso de rosca (p) y los factores de los filetes (k_h , k_v y k_c) se encuentran limitados por las series estandarizadas que el equipo tiene configurado desde su fabricación. Entre las series estándar, una serie de roscas comúnmente utilizada es la serie de roscas métricas ISO que se muestra en la Tabla 1. No obstante, el equipo tiene la posibilidad de modificar las dimensiones de la rosca a partir de las roscas estandarizadas; sin embargo, para piezas de dimensiones pequeñas, realizar modificaciones manuales no garantiza la precisión y calidad esperada del producto.

La segunda limitación es debido a que los conectores mecánicos son fabricados con varillas de refuerzo comerciales; por lo tanto, el diámetro exterior del conector (D_e) está limitado por la oferta de varillas en el mercado peruano. Según el grupo

Aceros Arequipa (2020) los fierros corrugados grado 60 comerciales en Perú de diámetro mayor a 9.5mm, son un total de 6 varillas de diámetros nominales múltiplos de un octavo de pulgada, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7. Varillas de acero corrugado grado 60 comerciales en Perú

Diámetro nominal		Área	Costo
(in)	(mm)	(mm ²)	(\$/ por m)
3/8	9.5	71	2.12
1/2	12.7	129	3.84
5/8	15.9	199	5.93
3/4	19.1	284	8.46
1	25.4	510	15.20
1 3/8	34.9	1006	29.97

Fuente: Elaboración propia adaptado de Aceros Arequipa (2020)

Según los diámetros de varilla presentados en la Tabla 7 y teniendo en cuenta los diámetros de varillas a empalmar, las varillas que podrían ser empleadas como conector son las varillas de diámetro nominal igual o mayor a 19.1 mm (3/4").

3.2.2. Cálculo de Propuesta de Empalme

Las propuestas de empalmes dependen del factor de resistencia de varillas sin empalmar (R_v), la cual se determinará en función a los resultados de trabajos anteriores. El factor R_v de varillas se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 8. Factor de resistencia experimental de varillas comerciales

Autor	País	Año	Factor R_v
Osco C, S. V.	Perú	2021	1.65
Curi S., O. Z. y Magro M, P. J.	Perú	2020	1.67
Tarazona M., K. T.	Perú	2019	1.64
Migone A., J. P.	Perú	2018	1.76
Mora B., C. D. y Ortega L., D. A.	Colombia	2021	1.64
Romero M., C. C. y Rodríguez Z., J. A.	Colombia	2018	1.65

Fuente: Elaboración propia adaptado de Osco (2021); Mora & Ortega (2021);
Curi & Magro (2020); Tarazona (2019); Migone (2018);
Romero & Rodríguez (2018)

Según los factores de resistencia presentados en la Tabla 8, el valor promedio del factor R_v en varillas comerciales en el Perú es mayor o igual a 1.64. Por lo tanto, se considera conveniente seleccionar el valor mínimo para realizar el diseño de la Propuesta N°01 de los empalmes mecánicos.

Dado que el conector mecánico conecta dos varillas de refuerzo, la longitud del conector mecánico (L_c) es mayor o igual al doble de la longitud roscada (L_r); por lo tanto, la longitud del conector mecánico se dimensiona con la siguiente expresión:

$$L_c = 2L_r + 10mm \quad (3.30)$$

Teniendo en cuenta las limitaciones de fabricación, habiéndose definido los parámetros: R_v , ϕ y λ_0 ; así como también se determinaron las ecuaciones de diseño: (3.11a), (3.11a), (3.17a), (3.17a), (3.22), (3.26), (3.29) y (3.30); se realiza el cálculo de la Propuesta N°01 de Empalmes Mecánicos.

La memoria descriptiva del cálculo y dimensionamiento de los empalmes mecánicos se adjuntan en el “Anexo 01: Memoria de Cálculo - Propuesta N°01”.

Tabla 9. Dimensiones de empalmes mecánicos propuestos

Diámetro nominal de Varilla	Diámetro nominal de Conector	Longitud de Paso (mm)	Diámetro menor Roscado (mm)	Longitud Roscada (mm)	Longitud de Conector (mm)
1/2"	3/4"	1.75	10.1	40	90
5/8"	1"	2.00	13.8	50	110
3/4"	1"	2.00	13.8	60	130

Fuente: Elaboración propia

Las dimensiones y detalles de la Propuesta N°01 de Empalmes Mecánicos se muestran en el “Anexo 03: Planos de Empalmes Mecánicos”

3.2.3. Proceso de Fabricación

El procedimiento de fabricación consiste en los siguientes pasos:

- Inicialmente se configura las características del tipo de roscado, luego se ajusta la varilla a ser roscada en las garras del torno paralelo. Se posiciona la herramienta de corte sobre el elemento y se procede con el “avance de

corte” hasta llegar a la longitud de rosca deseada. Se repite el proceso en sentido contrario hasta llegar a la posición inicial, dicho proceso se considera como un ciclo y se realiza un total de 3 ciclos. Se obtiene un producto como se muestra en la siguiente figura:

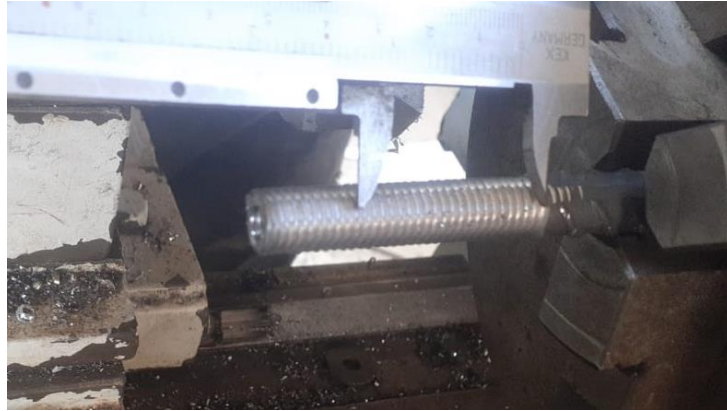


Figura 19. Roscado de varilla de diámetro nominal de 12.7mm (1/2")

Fuente: Elaboración propia

- Para el conector mecánico se extrae una pieza de acero corrugado de longitud igual a la del conector, dicha pieza se ajusta en las garras del torno paralelo. Luego, apoyándose del torno se posiciona una broca de taladro de diámetro menor al diámetro de rosca, para eliminar con mayor rapidez el área de acero innecesaria que se ubica en el eje longitudinal del conector. Posteriormente, se realiza la perforación del conector mecánico empleando el torno como mecanismo de avance, como se muestra en la siguiente figura:



Figura 20. Perforación de varilla de diámetro nominal de 19.1mm

Fuente: Elaboración propia

- Luego, se configura las características de rosca conjugada con las roscas de la varilla; se posiciona la herramienta de corte en la zona interior de la abertura del conector y se procede con el “avance de corte” hasta llegar a la longitud de conector deseada. Luego se repite el proceso en sentido contrario hasta llegar a la posición inicial, repitiendo el proceso un total de 3 ciclos. Se obtiene un producto como se muestra en la siguiente figura:



Figura 21. Conector mecánico de diámetro nominal de 19.1mm (3/4")

Fuente: Elaboración propia

- Finalmente para pre tensionar a la conexión mediante el “Método de giro de la tuerca” se realiza una fracción de giro, el cual depende de la relación entre la longitud de la conexión y su diámetro según lo lineamientos del Research Council of Structural Connections (2020). Dado que la relación entre longitud de conector y diámetro de varilla es menor a 8, se realiza un total de medio giro de tuerca, como se muestra en la siguiente figura:



Figura 22. Pretensión de empalme mecánico

Fuente: Elaboración propia

3.3. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

Mediante ensayos de laboratorio se determina la resistencia real de los empalmes diseñados y de varillas sin empalmar, estas últimas se evalúan con el fin de determinar la relación entre resistencia máxima y de fluencia de varillas especificado (R_v), la cual se empleará para calibrar las expresiones de diseño del diámetro exterior del conector (D_e), diámetro menor roscado (D_r) y longitud roscada (L_r).

3.3.1. Especímenes

Las normas nacionales no establecen una cantidad mínima de ensayos de resistencia a tracción para barras de refuerzo o conectores mecánicos. No obstante, para emplear un nuevo sistema de empalmes mecánicos el International Code Council (2010) recomienda demostrar experimentalmente que cumple con los requisitos establecidos en las normas vigentes, realizando un mínimo de cinco ensayos de tracción y compresión por cada barra de refuerzo de diferente diámetro. Dicha evaluación se realiza siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ASTM A370 (2014).

De acuerdo con los antecedentes y las recomendaciones de norma nacionales e internacionales sobre conectores mecánicos, para el presente trabajo de investigación se considera evaluar un total de cinco especímenes por cada empalme propuesto en la Tabla 9.



Figura 23. Especímenes de empalmes mecánicos

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 23 se muestran cinco especímenes de cada empalme diseñado (barras de acero corrugado grado 60 con empalmes mecánicos), los cuales fueron fabricados en acero producido por el grupo “Aceros Arequipa” con denominación “Fierro Corrugado-Binorma”. Las barras evaluadas cumplen con los requisitos establecidos para acero de refuerzo según las normas ASTM A615 y ASTM A706.

Los especímenes se agrupan en cuatro grupos de muestras: Especímenes de 1/2" (Grupo A), Especímenes de 5/8" (Grupo B), Especímenes de 3/4" (Grupo C) y Especímenes patrón (Grupo P); el denominado “Grupo P” está conformado por barras de 1/2", 5/8" y 3/4", sin empalmar. Las dimensiones de las probetas ensayadas se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 10. Características de probetas

Muestra	Diámetro nominal de probeta	Longitud de Probeta (mm)	Diámetro de Conector (mm)	Longitud de Conector (mm)
P	Variable	600	-	-
A	1/2"	610	19.1	90
B	3/4"	610	25.4	110
C	5/8"	610	25.4	130

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Equipo de Ensayo

Los especímenes son ensayados en el Laboratorio de Ensayo de Materiales - Ing. Manuel Gonzales de la Cotera, empleándose la Máquina de Ensayos Universal “ZWICK-ROELL”. El equipo tiene la capacidad de aplicar fuerzas externas sobre el espécimen y registrar la información de las fuerzas aplicadas; así como también, registrar los desplazamientos asociados.

El certificado de calibración del equipo se muestra en el “Anexo 04: Certificado de Calibración de Equipo”.

3.3.3. Procedimiento de Ensayo

Inicialmente se identifican los especímenes del grupo correspondiente como se muestra en la Figura 24, y se registran las dimensiones de cada uno de los especímenes antes de someterse al ensayo de resistencia a tracción.



Figura 24. Grupo de Muestra A

Fuente: Elaboración propia

Se coloca el espécimen en los extremos de las mordazas de la maquina universal, luego se ajusta la posición de la barra garantizando que no se presentaran deslizamientos entre las mordazas y la probeta como se muestra en la Figura 25; posteriormente se configura el programa para cargar la probeta a una velocidad establecida hasta llegar a la rotura del espécimen.



Figura 25. Ensayo del espécimen A-1

Fuente: Elaboración propia

Durante el ensayo se registra la carga aplicada sobre la probeta, así como también los desplazamientos asociados a la carga aplicada. Posterior a la falla o rotura del espécimen, se registran las dimensiones finales para determinar la deformación.

Con la resistencia máxima registrada se procede a calcular el parámetro experimental R_E , y se replica el proceso de ensayo de laboratorio con los siguientes especímenes.

3.3.4. Resultados de Ensayos Experimentales

Siguiendo el procedimiento del ensayo de resistencia a tracción se registra la fuerza aplicada y desplazamientos asociados hasta alcanzar la falla de la probeta; con la información obtenida de los ensayos en laboratorio, se gráfica la curva equivalente esfuerzo-deformación para cada espécimen. Finalmente se estima el factor R_E , considerando que para el acero grado 60 el esfuerzo de fluencia especificado (f_{yo}) es igual a 4200 kgf/cm².

El resultado individual de cada ensayo se presenta en el “Anexo 05: Resultados de Ensayos”.

3.3.4.1. Resultados de Especímenes del Grupo P

La curva esfuerzo-deformación de los especímenes del Grupo P (especímenes sin empalme de diámetros variables) se presentan en la siguiente gráfica:

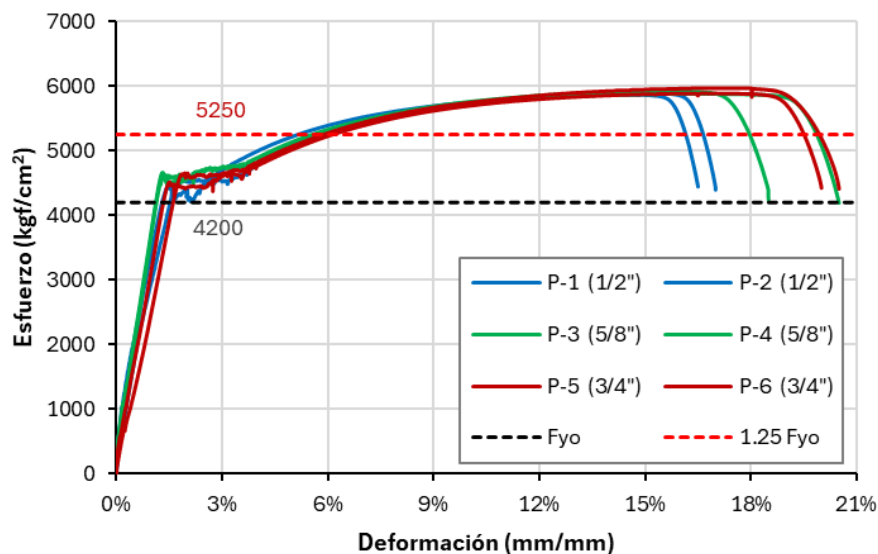


Figura 26. Curva esfuerzo-deformación de especímenes del grupo P

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los especímenes del Grupo P (denominados especímenes patrón) representan el comportamiento real de las varillas corrugadas sin empalmar. En los resultados de los seis especímenes mostrados en la Figura 26, se observa un comportamiento similar en la mayor parte del desarrollo de la curva, el esfuerzo máximo a tracción está comprendido entre 5865 kgf/cm² y 5969 kgf/cm²; la capacidad de la capacidad de deformación se encuentra comprendida entre 0.165 mm/mm y 0.205 mm/mm.

Tabla 11. Resultados de ensayos de los especímenes del Grupo P

Especímen	Carga máx. (kg)	Esfuerzo máx. (MPa)	R_E (f_u/f_{yo})	Deformación máx. (mm/mm)
P-1	7566	5865	1.397	0.165
P-2	7595	5888	1.402	0.170
P-3	11784	5922	1.410	0.185
P-4	11701	5880	1.400	0.205
P-5	16723	5888	1.402	0.200
P-6	16951	5969	1.421	0.205

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 11, los especímenes patrón presentan una relación entre esfuerzo máximo a tracción de empalme y esfuerzo de fluencia especificado de la barra de refuerzo grado 60 en promedio igual a 1.41. La falla típica observada en los especímenes patrón es la rotura de la varilla en la zona central del espécimen.

3.3.4.2. Resultados de Especímenes del Grupo A

La curva esfuerzo-deformación de los especímenes del Grupo A (especímenes de diámetro nominal igual a 12.7mm – 1/2") se presentan en la siguiente gráfica:

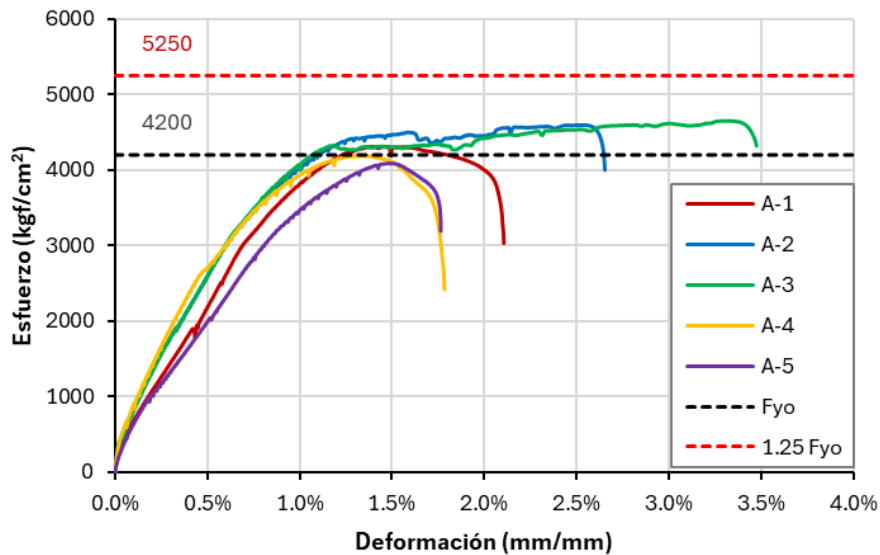


Figura 27. Curva esfuerzo-deformación de especímenes del Grupo A

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Figura 27, el comportamiento (curva esfuerzo-deformación) de los especímenes del Grupo A, es diferente al comportamiento típico de las barras corrugadas. En los cinco especímenes se observa un comportamiento relativamente similar (entre especímenes) antes de alcanzar su resistencia máxima, el esfuerzo máximo a tracción está comprendido entre 4090 kgf/cm² y 4649 kgf/cm². Luego de alcanzar su máxima resistencia, la capacidad de deformación varía considerablemente en cada uno de los especímenes, siendo la deformación máxima igual a 0.035 mm/mm mientras que la mínima igual a 0.018 mm/mm.

Luego de alcanzar el esfuerzo máximo, la resistencia del empalme tiende a mantenerse constante a medida que se va deformando, lo cual es característico de su comportamiento en estado de fluencia; sin embargo, debido a que la varilla roscada tiene menor área efectiva a tracción, se “supone” que esta se encuentra trabajando en su estado inelástico. Cuando el acero corrugado se encuentra trabajando con esfuerzos de magnitud similar al de su resistencia máxima, ligeras variaciones de esfuerzos producen variaciones de gran magnitud en la deformación como se muestra en la Figura 26; por lo tanto, las imperfecciones en el roscado de la varilla modifican considerablemente la capacidad de deformación sin modificar en gran magnitud la capacidad de resistencia.



Figura 28. Perfil de falla del espécimen A-1

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la Figura 28, el tipo de falla típico observado en el Grupo A es la rotura de una de las varillas en la zona roscada (específicamente en la zona de inicio de roscado). Asimismo, se observa que los filetes no sufrieron deformaciones apreciables inclusive en la zona donde se presenta la falla.

Tabla 12. Resultados de ensayos de los especímenes del Grupo A

Especímen	Carga máx. (kgf)	Esfuerzo máx. (kgf/cm ²)	R_E (f_u/f_{yo})	Deformación máx. (mm/mm)
A-1	5560	4310	1.026	0.021
A-2	5929	4596	1.094	0.027
A-3	5997	4649	1.107	0.035
A-4	5404	4189	0.997	0.018
A-5	5276	4090	0.974	0.018

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 12, los especímenes del Grupo A presentan un factor R_E en promedio igual a 1.04, y la deformación máxima asociada a la falla en promedio es igual a 0.024 mm/mm.

3.3.4.3. Resultados de Especímenes del Grupo B

La curva esfuerzo-deformación de los especímenes del Grupo B (especímenes de diámetro nominal igual a 15.9mm – 5/8”) se presentan en la siguiente gráfica:

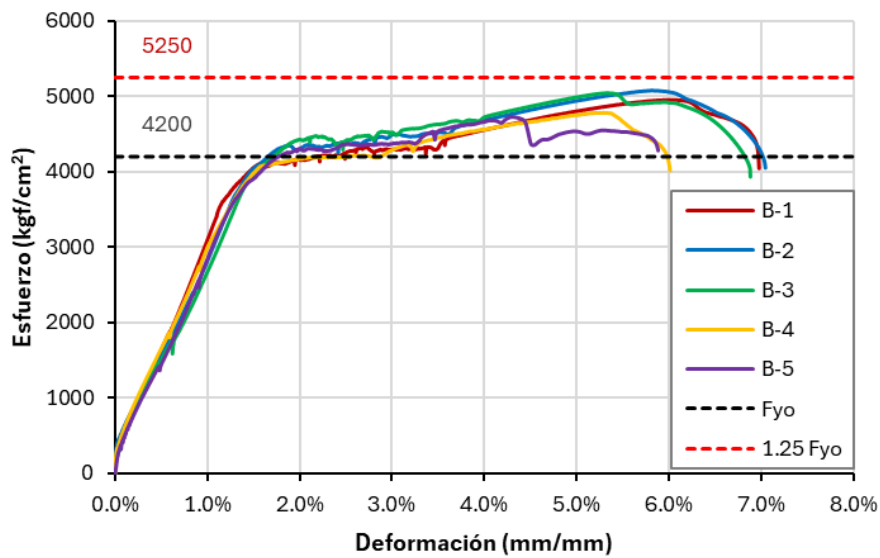


Figura 29. Curva esfuerzo-deformación de especímenes del Grupo B

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Figura 29, el comportamiento (curva esfuerzo-deformación) de los especímenes del Grupo B, siguen el comportamiento típico de las barras corrugadas que se muestran en la Figura 26, hasta llegar al final del estado de

fluencia. En los cinco especímenes se observa un comportamiento similar antes y después de alcanzar su resistencia máxima, el esfuerzo máximo a tracción está comprendido entre 4727 kgf/cm² y 5075 kgf/cm², los cuales son mayores al esfuerzo de fluencia especificado del acero corrugado ($f_{yo} = 4200$ kgf/cm²). Posterior a la máxima resistencia, la capacidad de deformación varía ligeramente en cada uno de los especímenes, siendo la deformación máxima igual a 0.070 mm/mm mientras que la mínima igual a 0.059 mm/mm.

Luego de alcanzar el esfuerzo máximo, la resistencia del empalme tiende a caer, lo cual es característico de su comportamiento en estado inelástico (endurecimiento o estricción); dado que la varilla roscada presenta ligeramente menor área efectiva a tracción, tanto la varilla sin roscar como la varilla roscada se encuentran trabajando en el estado inelástico (endurecimiento o estricción). Dado que la varilla roscada y la varilla sin roscar no tienen gran diferencia en su comportamiento al ser sometidas a fuerzas de tracción, las imperfecciones en el roscado de la varilla modifican ligeramente el comportamiento del empalme; sin embargo, estas variaciones no modificarían considerablemente la capacidad de resistencia.



Figura 30. Perfil de falla del espécimen B-1

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la Figura 30, el tipo de falla típico del Grupo B es la rotura de una de las varillas en la zona roscada de la varilla (específicamente en la zona de inicio de roscado). Además, a pesar de que el roscado para los especímenes del Grupo B fue del tipo “roscado parcial”, se observa que los filetes no fallaron inclusive en la zona donde se presenta la falla.

Tabla 13. Resultados de ensayos de los especímenes del Grupo B

Especímen	Carga máx. (kgf)	Esfuerzo máx. (kgf/cm ²)	R_E (f_u/f_{yo})	Deformación máx. (mm/mm)
B-1	9854	4952	1.179	0.070
B-2	10100	5075	1.208	0.070
B-3	10034	5042	1.200	0.069
B-4	9501	4774	1.137	0.060
B-5	9407	4727	1.125	0.059

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 13, los especímenes del grupo B presentan un factor R_E en promedio igual a 1.17, y la deformación máxima asociada a la falla en promedio es igual a 0.066 mm/mm.

3.3.4.4. Resultados de Especímenes del Grupo C

La curva esfuerzo-deformación de los especímenes del Grupo C (especímenes de diámetro nominal igual a 19.1mm – 3/4") se presentan en la siguiente gráfica:

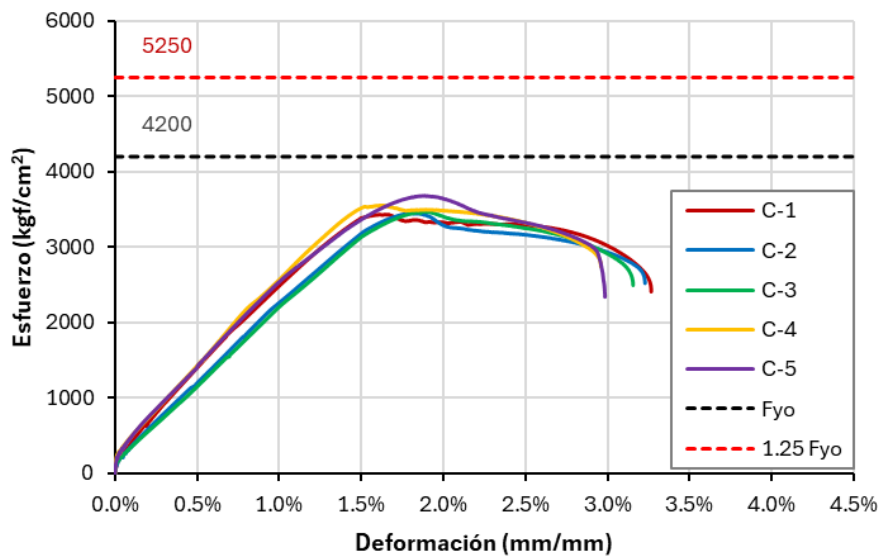


Figura 31. Curva esfuerzo-deformación de especímenes del Grupo C

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Figura 31, el comportamiento (curva esfuerzo-deformación) de los especímenes del Grupo C se asemeja al comportamiento de un material frágil, dado que no presenta un límite de fluencia. En los cinco especímenes se observa

un comportamiento similar en todo el desarrollo de la curva esfuerzo-deformación, el esfuerzo máximo a tracción está comprendido entre 3432 kgf/cm² y 3682 kgf/cm², los cuales son menores al esfuerzo de fluencia especificado del acero corrugado ($f_{yo} = 4200$ kgf/cm²); la capacidad de deformación se encuentra comprendida entre 0.030 mm/mm y 0.033 mm/mm.



Figura 32. Perfil de falla del espécimen C-1

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la Figura 32, el tipo de falla típico de los especímenes del Grupo C es la rotura de una de las varillas en la zona roscada (específicamente en la zona de inicio de roscado). Asimismo, se observa que los filetes no sufrieron deformaciones apreciables inclusive en la zona donde se presenta la falla.

Tabla 14. Resultados de ensayos de los especímenes del Grupo C

Especímen	Carga máx. (kgf)	Esfuerzo máx. (kgf/cm ²)	R_E (f_u/f_{yo})	Deformación máx. (mm/mm)
C-1	9748	3432	0.817	0.033
C-2	9787	3446	0.821	0.032
C-3	9850	3468	0.826	0.032
C-4	10091	3553	0.846	0.030
C-5	10456	3682	0.877	0.030

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 14, los especímenes del Grupo C presentan un factor R_E en promedio igual a 0.84, y la deformación máxima asociada a la falla en promedio es igual a 0.031 mm/mm.

3.3.5. Procesamiento Estadístico de Resultados

Dado que la norma E.060 considera factibles a los empalmes mecánicos que presenten un factor R mayor a 1.25, la variable de estudio es el parámetro R de los empalmes mecánicos. Además, dicha variable es del tipo cuantitativa por lo que para su estudio se emplea la metodología de estadística inferencial teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Pedrosa et al. (2015) señalan que para variables cuantitativas con un tamaño muestral inferior a 30, es recomendable emplear la prueba de bondad de ajuste de Shapiro-Wilk, dado que para muestras de tamaño reducido se ha demostrado resultados adecuados en comparación con otros tipos de pruebas.
- Salgado (2013) recomienda identificar posibles datos atípicos, debido a que la existencia de casos extraordinarios altera la representatividad de los resultados. El método de diagrama de cajas es una herramienta útil para valores numéricos, dado que este método de ajuste lineal permite identificar datos atípicos mediante gráficos analíticos.
- Flores et al. (2017) señalan que para comparar dos grupos con variables cuantitativas que siguen el tipo de distribución normal, existe una gran cantidad de pruebas tanto paramétricas como no paramétricas; sin embargo, es recomendable emplear la prueba estadística T-Student por su simplicidad y confiabilidad de resultados.

3.3.5.1. Prueba de Normalidad

Se realiza la prueba de normalidad de la variable R para cada grupo de muestra utilizando el método de Shapiro-Wilk.

Se plantean las siguientes hipótesis:

H_0 : La variable R sigue una distribución Normal.

H_1 : La variable R no sigue una distribución Normal.

Para tomar una decisión se evalúa el estadístico de prueba W_c , en caso de que el estadístico de prueba (W_c) sea mayor al parámetro W_t se aceptará la hipótesis nula (H_0) y se rechazará la hipótesis alterna (H_1). Por otro lado, en caso de que el estadístico de prueba no sea mayor al parámetro W_t se rechazará la hipótesis nula (H_0) y se aceptará la hipótesis alterna (H_1).

Teniendo en cuenta que el tamaño de cada grupo de muestras del presente estudio es de cinco, para un nivel de significancia de 0.05, de acuerdo con la Tabla 5 el parámetro W_t es igual a 0.752.

Calculando los parámetros necesarios para aplicar la prueba de Shapiro-Wilk del grupo de muestra A, se obtienen los siguientes datos:

Tabla 15. Prueba de normalidad para el grupo de muestra A

i	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$	a_i	$a_i x_i$
1	0.974	0.0043	-0.665	-0.647
2	0.997	0.0018	-0.241	-0.241
3	1.026	0.0002	0.000	0.000
4	1.094	0.0030	0.241	0.264
5	1.107	0.0045	0.665	0.736

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los valores presentados en la Tabla 15 y la ecuación (2.5), el valor del parámetro W_c para el grupo de muestra A es igual a 0.906, el cual es mayor al parámetro W_t (0.752). Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula (H_0), con una significancia del 0.05 la variable R del grupo de muestra A presenta una distribución normal.

Calculando los parámetros necesarios para aplicar la prueba de Shapiro-Wilk del grupo de muestra B, se obtienen los siguientes datos:

Tabla 16. Prueba de normalidad para el grupo de muestra B

i	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$	a_i	$a_i x_i$
1	1.125	0.0020	-0.665	-0.748
2	1.137	0.0011	-0.241	-0.274
3	1.179	0.0001	0.000	0.000
4	1.200	0.0009	0.241	0.290
5	1.208	0.0015	0.665	0.803

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los valores presentados en la Tabla 16 y la ecuación (2.5), el valor del parámetro W_c para el grupo de muestra B es igual a 0.853, el cual es mayor al

parámetro W_t (0.752). Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula (H_0), con una significancia del 0.05 la variable R del grupo de muestra B presenta una distribución normal.

Calculando los parámetros necesarios para aplicar la prueba de Shapiro-Wilk del grupo de muestra C, se obtienen los siguientes datos:

Tabla 17. Prueba de normalidad para el grupo de muestra C

i	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$	a_i	$a_i x_i$
1	0.817	0.0004	-0.665	-0.543
2	0.821	0.0003	-0.241	-0.198
3	0.826	0.0001	0.000	0.000
4	0.846	0.0001	0.241	0.204
5	0.877	0.0015	0.665	0.583

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 17 y la ecuación (2.5), el valor del parámetro W_c para el grupo de muestra C es igual a 0.853, el cual es mayor al parámetro W_t (0.752). Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula (H_0), con una significancia del 0.05 la variable R del grupo de muestra C presenta una distribución normal.

3.3.5.2. Análisis de Datos Dudosos

A continuación, se identifican los datos atípicos u “outliers” con el fin de obtener resultados representativos, para lo cual se emplea el método de Tukey que consiste en determinar los valores límites en función a los cuartiles de la muestra con las siguientes expresiones:

$$Lim_{inf} = Q_{25\%} - 1.5(Q_{75\%} - Q_{25\%}) \quad (3.31)$$

$$Lim_{sup} = Q_{75\%} + 1.5(Q_{75\%} - Q_{25\%}) \quad (3.32)$$

Se calculan los parámetros estadísticos de la variable R de los tres grupos de muestras, y luego se determinan los límites superiores e inferiores en la siguiente tabla:

Tabla 18. Parámetros estadísticos de grupos de muestras

Parámetros de la variable R	Muestra		
	A	B	C
Promedio	1.040	1.170	0.837
Desviación estándar	0.053	0.033	0.022
Mediana	1.026	1.179	0.826
Cuartil 25%	0.997	1.137	0.821
Cuartil 75%	1.094	1.200	0.846
Límite superior	1.240	1.296	0.884
Límite inferior	0.852	1.041	0.782

Fuente: Elaboración propia

Con los límites estimados en la Tabla 18, se gráfica el diagrama de cajas para cada grupo de muestra (Ver Figura 33 a Figura 35):

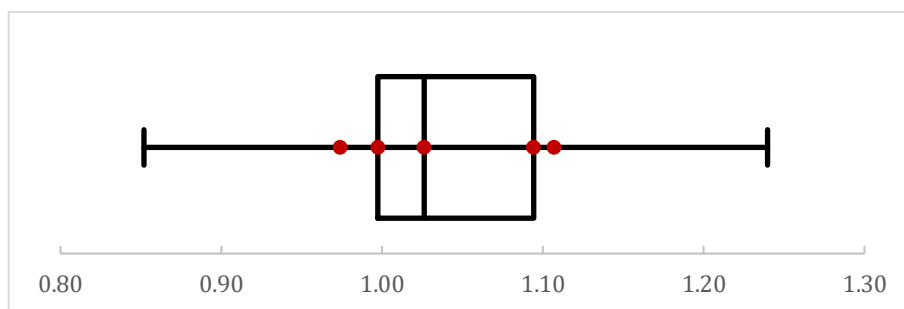


Figura 33. Diagrama de cajas del grupo A

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Figura 33, los datos experimentales R_E registrados de los ensayos del grupo de muestra A se encuentran dentro del rango admisible, por lo que se considera que no existen datos atípicos en el grupo de muestra A.

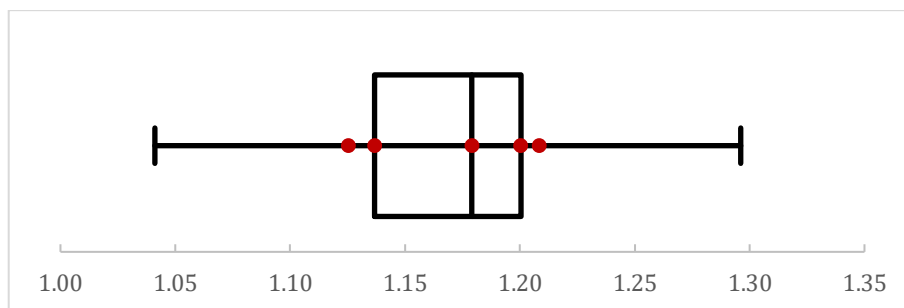


Figura 34. Diagrama de cajas del grupo B

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Figura 34, los datos experimentales de R_E registrados de los ensayos del grupo de muestra B se encuentran dentro del rango admisible, por lo que se considera que no existen datos atípicos en el grupo de muestra B.

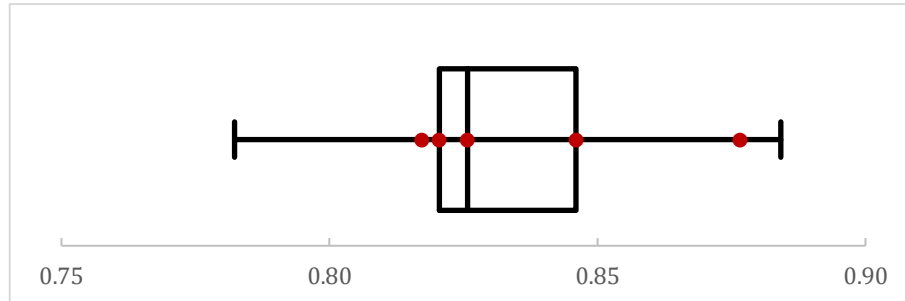


Figura 35. Diagrama de cajas del grupo C

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo la Figura 35, los datos experimentales R_E registrados de los ensayos del grupo de muestra C se encuentran dentro del rango admisible, por lo que se considera que no existen datos atípicos en el grupo de muestra C.

3.3.5.3. Prueba de Hipótesis Estadística

Con los resultados obtenidos de ensayos de laboratorio (previamente comprobado la normalidad de las muestras y depurado de posibles datos atípicos) se procede a evaluar el parámetro R con la prueba T-Student.

Dado que el Reglamento Nacional de Edificaciones establece que un empalme mecánico debe desarrollar al menos $1.25f_y$ de la varilla de refuerzo ($R > 1.25f_y$), ya sea en tracción o compresión según sea requerido (MVCS, 2010); se emplea la prueba de hipótesis de cola a la derecha con un nivel de confianza del 0.05, de modo que se compara la variable R con el parámetro $R_o = 1.25$ con el fin de determinar si los empalmes mecánicos propuestos cumplen con el límite de resistencia establecido en la norma vigente.

Se plantean las siguientes hipótesis estadísticas para cada uno de los grupos de muestra:

H_0 : Al emplear conectores mecánicos roscados diseñados en barras de refuerzo grado 60 (especímenes con las dimensiones establecidas en la Propuesta N°01), la relación entre la resistencia máxima a tracción del empalme y el esfuerzo de fluencia especificado de la barra de refuerzo no es mayor a 1.25.

H_1 : Al emplear conectores mecánicos roscados diseñados en barras de refuerzo grado 60 (especímenes con las dimensiones establecidas en la Propuesta N°01), la relación entre la resistencia máxima a tracción del empalme y el esfuerzo de fluencia especificado de la barra de refuerzo es mayor a 1.25.

Se calcula el valor crítico de la T-Student con el nivel de confianza de $\alpha = 0.05$ y una población de $n - 1 = 4$:

$$t_{(0.05,4)} = 2.132$$

Criterio de decisión: Si el estadístico de prueba (t_k) se encuentra en la región crítica, se rechazará la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa. En caso contrario, si el estadístico de prueba no se encuentra en la región crítica, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa.

Calculando el estadístico de prueba para cada uno de los grupos se tiene:

Tabla 19. Estadístico de prueba T-Student

Muestra	n	$\bar{x}$	$\hat{s}$	x_o	α	$t_{(1-\alpha, n-1)}$	t_k
A	5	1.040	0.059	1.25	0.05	2.132	-8.002
B	5	1.170	0.037	1.25	0.05	2.132	-4.789
C	5	0.837	0.025	1.25	0.05	2.132	-37.413

Fuente: Elaboración propia

Con el valor crítico obtenido en la Tabla 19, se determina la región crítica de cada uno de los grupos de muestra y se compara con el estadístico de prueba calculado para cada grupo de muestra:

Se establece la región crítica para el grupo de muestra A: $RC = \{T > 2.132\}$ (Ver Figura 36) y se comprueba que el estadístico de prueba $t_k(-8.002) \notin RC$; por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna. Se afirma que la relación entre resistencia máxima a tracción y esfuerzo de fluencia (R) de los empalmes mecánicos roscados diseñados (diámetro nominal de 12.7mm – 1/2") en promedio no es mayor a 1.25 con un nivel de significancia de 0.05.

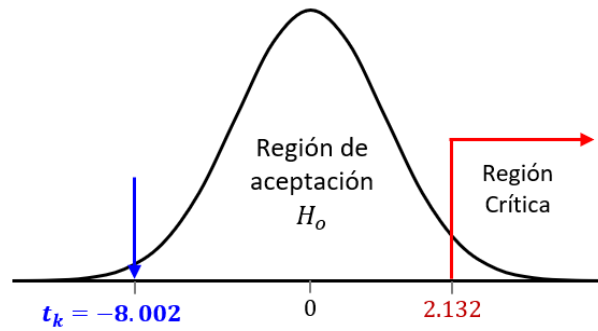


Figura 36. Contraste del estadístico de prueba del grupo A

Fuente: Elaboración propia

Se establece la región crítica para el grupo de muestra B: $RC = \{T > 2.132\}$ (Ver Figura 37), se comprueba que el estadístico de prueba $t_k(-4.789) \notin RC$; por lo tanto, no acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna. Se afirma que la relación entre resistencia máxima a tracción y esfuerzo de fluencia (R) de los empalmes mecánicos roscados diseñados (diámetro nominal de 15.9mm – 5/8”) en promedio no es mayor a 1.25 con un nivel de significancia de 0.05.

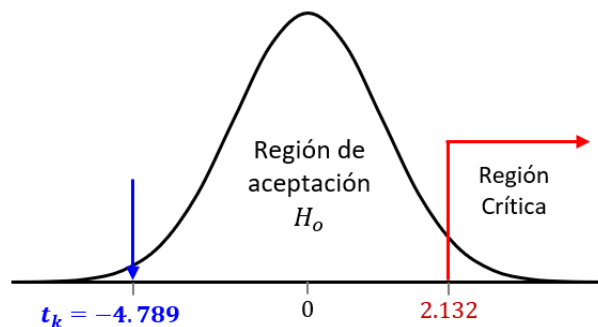


Figura 37. Contraste del estadístico de prueba del grupo B

Fuente: Elaboración propia

Se establece la región crítica para el grupo de muestra C: $RC = \{T > 2.132\}$ (Ver Figura 38), se comprueba que el estadístico de prueba $t_k(-37.413) \notin RC$; por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna. Se afirma que la relación entre resistencia máxima a tracción y esfuerzo de fluencia (R) de los empalmes mecánicos roscados diseñados (diámetro nominal de 19.1mm – 3/4”) en promedio no es mayor a 1.25 con un nivel de significancia de 0.05.

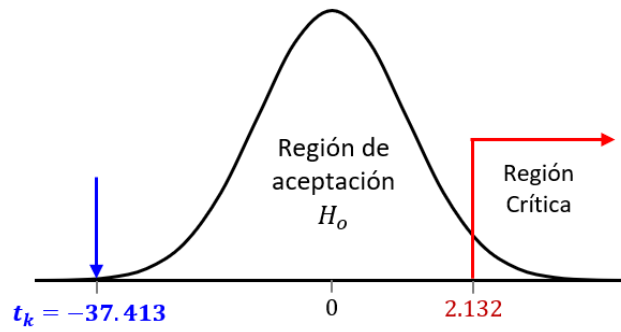


Figura 38. Contraste del estadístico de prueba del grupo C

Fuente: Elaboración propia

3.3.6. Comparación de Resultados

De acuerdo con la Tabla 8, el parámetro R_V obtenido de ensayos en anteriores trabajos de investigación (1.64), presenta una gran diferencia con los resultados del parámetro R_V obtenido experimentalmente en el presente trabajo (1.41). Se presume que la razón de la diferencia de resistencia entre las barras de acero empleadas en trabajos anteriores y el actual, es que las barras de acero corrugadas actualmente se fabrican de acuerdo con la actualización de la norma ASTM A615-2020, en la cual se ha reducido el umbral de resistencia a tracción mínima en comparación con las versiones anteriores de dicha norma.

Con las dimensiones de los empalmes, las características del roscado y factores de resistencia de varillas corrugadas; se calcula la resistencia teórica de los empalmes considerando el valor promedio del factor $R_V = 1.41$ obtenido en el presente trabajo de ensayos de varillas sin empalmar. Con dichos parámetros se estima la resistencia teórica de los elementos del empalme y de este mismo, dicha resistencia expresada en relación con el esfuerzo de fluencia especificado de las barras de refuerzo grado 60 (f_{yo}) se resume en la siguiente tabla:

Tabla 20. Resistencia teórica de empalmes diseñados

Diámetro nominal de Varilla	Factor de Resistencia Teórica (R_T)			
	Varilla roscada	Conector	Filetes	Empalme
1/2"	1.09	1.76	1.62	1.09
5/8"	1.25	2.19	1.78	1.25
3/4"	0.90	1.39	1.48	0.90

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 20, el tipo de falla de los empalmes es determinado por la varilla corrugada en la zona roscada para los tres empalmes diseñados de la Propuesta N°01, obteniéndose un factor de resistencia R_T igual a 1.09, 1.25 y 0.90, para empalmes de varillas de diámetro de 12.7mm (1/2"), 15.9mm (5/8") y 19.1mm (3/4"), respectivamente. Por otro lado, el factor de resistencia R_E en los especímenes con empalmes es en promedio igual a 1.04, 1.17 y 0.84, para varillas corrugadas de diámetro de 12.7mm (1/2"), 15.9mm (5/8") y 19.1mm (3/4"), respectivamente.

3.3.6.1. Relación entre factores de resistencia

Con los datos registrados de los ensayos, se compara el parámetro de resistencia experimental (R_E) con el parámetro de resistencia teórico (R_T), obteniéndose la siguiente gráfica:

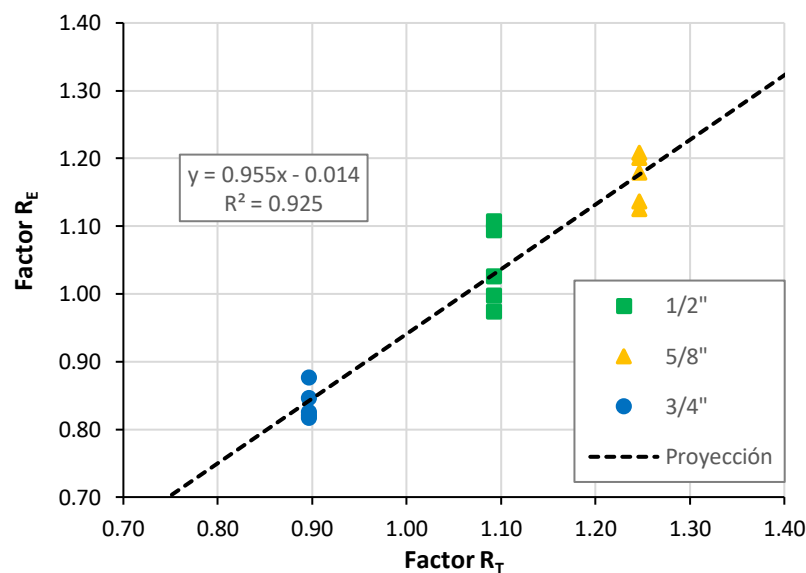


Figura 39. Relación entre factor de resistencia teórico y experimental

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Figura 39, la relación entre el factor teórico (R_T) (estimado con las expresiones de diseño presentadas y el factor experimental (R_V) de las varillas corrugadas) y el factor experimental (R_E) obtenido de ensayos de laboratorio, presentan una tendencia lineal fuerte; la relación entre ambos parámetros puede ser expresada con una recta con pendiente de valor igual a 0.955, con un desfase de valor igual a 0.014 y con un nivel de correlación de 0.925. Dado que la relación entre las expresiones teóricas y los resultados experimentales presentan una

tendencia lineal fuerte, es válido utilizar las expresiones de diseño con la corrección de la Figura 39 para predecir la resistencia real del empalme.

3.3.6.2. Modificación al diámetro menor roscado

En base a los resultados de experimentales, formula una expresión que relacione el diámetro menor roscado y el diámetro de varilla de modo que la sección en la zona roscada presente una capacidad de resistencia mayor al valor mínimo de resistencia establecido en la norma E.060.

Con los datos obtenidos de ensayos de laboratorio, se compara el parámetro experimental R_E con la relación de diámetro menor roscado y diámetro de varilla corrugada, obteniéndose la siguiente gráfica:

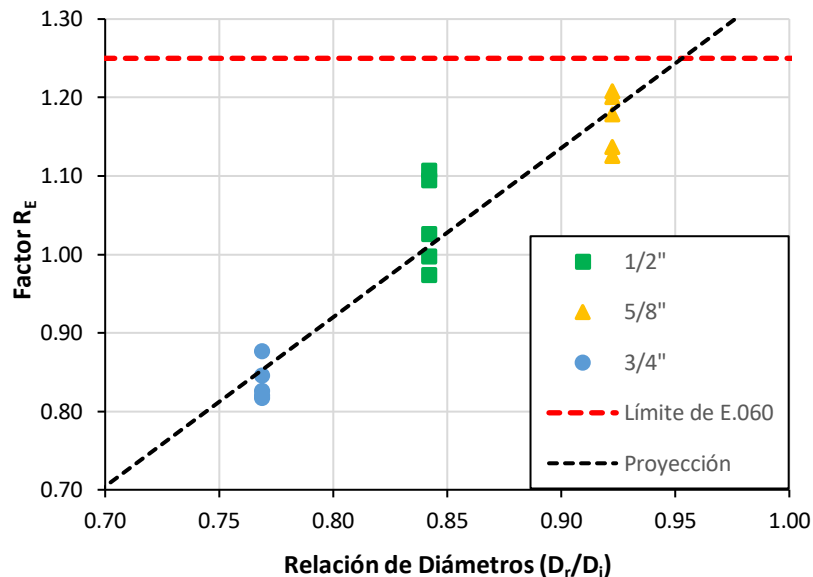


Figura 40. Relación de diámetros roscados y factor de resistencia

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Figura 40, para obtener un factor de resistencia R mayor o igual a 1.25 (límite mínimo establecido en la norma E.060), se debe cumplir con la siguiente relación entre diámetro roscado (D_r) y diámetro de varilla (D_i):

$$\frac{D_r}{D_i} \geq 95\% \quad (3.33)$$

Para el acero de refuerzo que se clasifica según ASTM A615 o ASTM A706 con factor de resistencia de varillas R_v igual a 1.41, se requiere de un diámetro menor roscado no menor del 95% del diámetro de la varilla. Por lo tanto, para garantizar

que el empalme soporte la resistencia de diseño, se requiere que la varilla se encuentre parcialmente roscada; asimismo, con el fin de disminuir la pérdida de resistencia de la varilla en la zona roscada se considera emplear la Serie Fina de Roscas Métricas ISO.

3.3.7. Cálculo de Propuesta Modificado

En función a los parámetros obtenidos experimentalmente, se plantea una modificación a los empalmes diseñados considerando el factor R_V registrado en ensayos de laboratorio. La memoria descriptiva del cálculo y dimensionamiento de los empalmes mecánicos modificados se adjuntan en el “Anexo 02: Memoria de Cálculo - Propuesta N°02”.

Tabla 21. Dimensiones de empalmes mecánicos modificados

Diámetro nominal de Varilla	Diámetro nominal de Conector	Longitud de Paso (mm)	Diámetro Menor Roscado (mm)	Longitud Roscada (mm)	Longitud de Conector (mm)
1/2"	3/4"	1.00	11.5	40	90
5/8"	1"	1.00	14.4	40	90
3/4"	1 3/8"	1.00	17.4	50	110

Fuente: Elaboración propia

La resistencia de los empalmes de la Propuesta N°02 con dimensiones presentados en la Tabla 21, se resume en la siguiente tabla:

Tabla 22. Resistencia teórica de empalmes diseñados modificados

Diámetro nominal de Varilla	Factor de Resistencia Teórica (R_T)				
	Varilla roscada	Conector	Filetes	Empalme	Empalme (corregido)
1/2"	1.32	1.76	1.58	1.32	1.25
5/8"	1.32	2.19	1.48	1.32	1.25
3/4"	1.34	3.32	1.55	1.34	1.26

Fuente: Elaboración propia

Los empalmes con dimensiones iguales o mayores a los de la Propuesta N°02, presentaran una resistencia mayor o igual a la resistencia mínima establecida en la norma E.060 como se muestra en la Tabla 22.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE COSTO

El presente capítulo presenta el desarrollo del análisis de costos de empalmes mecánicos diseñados y empalmes traslapados, para barras de acero de diámetro de 12.7mm (1/2"), 15.9mm (5/8") y 19.1mm (3/4"). Se detalla la estimación del análisis de costo unitario de los empalmes, teniendo en cuenta el costo de roscado y habilitación.

4.1. RECURSOS PARA HABILITACIÓN DE EMPALMES

Según Hoyos (2019), para el análisis de costos unitarios (también llamado Análisis de Precios Unitarios) se debe estimar el precio real de los recursos de: mano de obra, materiales y equipos o herramientas.

4.1.1. Mano de Obra

El costo de la mano de obra en el sector construcción se encuentra establecido por el Ministerio del Trabajo, Producción y Empleo; considerándose el pago por: Remuneración Básica, Bonificación unificada de construcción, Bonificación por especialidad, Compensación por tiempo de servicio, Vacaciones y Gratificaciones.

Tabla 23. Costo de la mano de obra

Descripción	Unidad	Costo unitario (S/)
Capataz	hh	32.99
Operario	hh	27.49
Oficial	hh	21.61
Peón	hh	19.56

Fuente: Elaboración propia adaptado de Costos (2023)

El costo de la mano de obra mostrado en la Tabla 23 no considera bonificaciones por trabajo en altura, por trabajos de alto riesgo u otros más específicos como bonificaciones por horas extra. Debido a las características de habilitación de acero en condiciones comunes o típicas.

4.1.2. Materiales y Herramientas

Según Colqui & Ruiz (2015), el costo unitario para el caso de los materiales, es el valor económico que presenta la unidad del material (unidad de acuerdo al metrado); por otro lado, para el caso de los equipos y/o herramientas, es el valor

económico que representa el trabajo realizado por dicho equipo en un determinado tiempo (unidad en horas maquina).

El costo de los materiales y equipos es el costo de mayor variación por factores como la situación económica del país y el sector de construcción, por lo que el precio tanto de materiales como herramientas varía con el tiempo. Además, el transporte de los materiales representa un costo específico denominado “flete”, el cual dependerá de la ubicación en la que se lleve a cabo el proyecto.

Para fabricar empalmes diseñados y traslapados, se requiere de los materiales y equipos presentados a continuación:

Tabla 24. Costo de materiales y equipos

Descripción	Unidad	Costo unitario (S/)
Acero Corrugado grado 60	kg	3.86
Alambre N°16	kg	3.16
Aceite lubricante	gal	32.97
Talado	hm	8.00
Cizalla eléctrica	hm	4.77

Fuente: Elaboración propia adaptado de Costos (2023)

Los precios mostrados en la Tabla 24 consideran el costo de equipos y materiales cotizados en la ubicación de los proveedores, por lo que estos no consideran el flete de transporte a la ubicación de un proyecto en específico.

4.1.3. Costo horario de torno paralelo

El proceso de roscado de barras de acero requiere de un torno paralelo, el cual tendrá la capacidad de realizar roscados tanto externos como internos. En el estudio de Gálvez & Benavides (2021) se muestran precios referenciales de diversos tipos de torno, los cuales se obtuvieron en base a cotizaciones realizadas en el Perú en el año 2019, el costo promedio de estos equipos es aproximadamente a S/ 50000; para fines del presente trabajo de investigación, se tomó de referencia el precio de adquisición igual al monto mencionado.

Para estimar el costo del torno por unidad de empalme fabricado, se emplea la metodología establecida por el MVCS (2010) para estimar el costo horario de un

equipo o maquinaria del sector construcción; este se divide en dos tipos: costo horario por posesión (debido a los costos del equipo sin operar) y costo horario por operación.

4.1.3.1. Costo horario de Posesión

Gálvez & Benavides (2021) señalan que la vida útil de un torno es de 10 años (20000 horas útiles) bajo condiciones normales o típicas; considerando que se realice un mantenimiento adecuado. Sin embargo, el equipo pierde valor económico a medida que realiza sus funciones, pues el deterioro del equipo no puede ser evitado por completo, pero si controlado con los mantenimientos. La depreciación representa el costo por deterioro del equipo a lo largo de los años, el cual se calcula con la siguiente expresión:

$$DEP = \frac{V_a - V_r}{T} \quad (4.1)$$

Donde V_a es el costo de adquisición, V_r es el costo de rescate y T es la Vida Económica Útil del equipo. Debido a la variación del rendimiento de la maquinaria o equipo a lo largo de su vida económicamente útil, se requiere determinar un valor representativo sobre el cual aplicar los intereses, al cual se le denomina Inversión Media Anual. Dicho parámetro se calcula con la siguiente expresión:

$$IMA = \frac{V_a(T + 1)}{2T} \quad (4.2)$$

El costo de los seguros representa aproximadamente un 3.00% y el costo de los impuestos es igual al 0.50%; en el caso del almacenamiento depende de las condiciones del trabajo, asimismo diversos autores recomiendan utilizar un valor de 1.50%. El costo de los factores de seguros, impuestos y almacenaje se calculan con la siguiente expresión:

$$SIA = \frac{IMA \times i\%}{T_{(horas)}/T_{(años)}} \quad (4.3)$$

Donde $i\%$ es la suma de las tasas anuales. El costo por la tasa de interés del capital se calcula en función al indicador económico: Tasa de Interés Activa del Mercado Nacional; según el Banco de Reserva del Perú (2023), dicho parámetro tiene un valor promedio igual a 15.40% durante el año 2023. Este costo se calcula con la siguiente expresión:

$$I = \frac{IMA \times TAMN}{T_{(horas)}/T_{(años)}} \quad (4.4)$$

Con las expresiones (4.1), (4.3) y (4.4), se estima el costo horario por posesión del torno en la siguiente tabla:

Tabla 25. Costo horario por posesión de torno

Descripción	Valor	Unidad
Valor de Adquisición	50000	S/
Valor de salvataje	12500	S/
Vida útil	10	años
Horas útiles	20000	h
Depreciación	1.88	S/ por h
IMA	27500	S/
TAMN (Interés de capital anual)	15.40	%
Interés	2.12	S/ por h
i% Seguros	3.00	%
i% Impuestos	0.50	%
i% Almacenamiento	1.50	%
Seguro, Impuesto y Almac.	0.68	S/ por h
Costo Horario por Posesión	4.68	S/ por h

Fuente: Elaboración propia

4.1.3.2. Costo horario de Operación

El costo de operación considera el consumo de combustibles y aceites, el costo de reparaciones y del mantenimiento, entre otros factores sin considerar el costo del operador u operadores.

Según Flores (2016), para garantizar la vida útil de un torno es necesario realizar mantenimientos preventivos y reparaciones mensuales; el costo de estas actividades representa aproximadamente un 10% anual del costo de adquisición. Adicionalmente se emplean lubricantes para disminuir el desgaste del equipo al realizar proceso de roscado.

La energía necesaria para operar los tornos se obtiene del servicio de distribución de energía eléctrica de la localidad. De acuerdo con la empresa ENEL (2023), la tarifa de energía eléctrica en horas punta es de 0.65 S/ por kw.h (máxima tarifa en

los distritos en Lima); dicha tarifa será empleada para estimar el costo de la energía eléctrica por operación del torno.

Tabla 26. Costo horario por operación de torno

Descripción	Valor	Unidad
Mantenimiento y Reparación	2.50	S/ por h
Potencia del equipo	5.5	HP
Valor unitario de energía	0.65	S/ por kw.h
Combustible	2.67	S/ por h
Consumo de lubricante	0.004	gal/kg
Valor unitario de lubricante	32.97	S/ por gal
Lubricación	3.66	S/ por h
Costo Horario por Operación	8.83	S/ por h

Fuente: Elaboración propia

Según la Tabla 26, el costo de operación del torno es 8.83 S/ por hora; sin embargo, en el proceso real de roscado se realizan actividades adicionales en las que no se requiere de energía, por lo que es necesario realizar una corrección al costo por operación dependiendo del tiempo de las actividades adicionales.

4.2. PROCESO DE ROSCADO Y HABILITACIÓN DE EMPALMES

La fabricación de los empalmes diseñados se divide en dos procesos: primero el proceso de roscado de los conectores mecánicos y varillas de acero, y segundo el proceso de habilitación de los empalmes en la zona de construcción. Considerando ambos procesos de forma independiente, se analiza el rendimiento de ambos procesos.

4.2.1. Roscado de Varillas y Conectores Mecánicos

Las consideraciones en el proceso de roscado son las siguientes:

- Para operar un torno paralelo se requiere de una persona capacitada en la operación y ajuste del equipo, también se requiere de una persona de apoyo para trasladar o ajustar los materiales e insumos necesarios. Por lo tanto, para los procesos de roscado se considera que la cuadrilla se compondrá por un operario y un peón.

- Los insumos necesarios son las barras de refuerzo para el conector mecánico, la energía eléctrica para la operación del torno y el lubricante para garantizar el acabado del roscado. El costo del proceso de roscado considera la modificación del costo de energía en el costo horario por operación del torno.
- Los equipos necesarios (adicionales al torno paralelo) son una cizalla eléctrica y un taladro. La cizalla es necesaria para obtener las longitudes necesarias del acero de refuerzo; el taladro es necesario para realizar la perforación en la varilla de mayor diámetro en el proceso de roscado de conector mecánico.
- Para garantizar un adecuado acabado de piezas roscadas, se recomienda realizar como mínimo 3 ciclos de roscado y realizar ajustes entre cada ciclo. La velocidad de perforación es de 0.83 mm/s y la velocidad de avance (roscado) es de 5 mm/s.

Con las consideraciones mencionadas, se determina el tiempo requerido para realizar los procesos de “roscado de varilla” y “roscado de conector”:

Tabla 27. Duración de roscado de varilla

Diámetro nominal de Varilla	1/2"	5/8"	3/4"
Longitud de roscado (mm)	40	50	60
Velocidad de avance (mm/s)	5	5	5
Duración de un ciclo (s)	16	20	24
Número de ciclos	3	3	3
Duración efectiva (s)	48	60	72
Duración de control entre ciclos (s)	60	60	60
Duración total de control (s)	120	120	120
Duración de corte y colocación (s)	120	120	120
Tiempo total (min)	4.80	5.00	5.20

Fuente: Elaboración propia

El tiempo de duración del roscado de varillas es en promedio igual a 5 minutos como se muestra en la Tabla 27; la duración de “corte y colocación”, y “control” son las actividades de mayor demanda. La duración de estos procesos variará dependiendo de las condiciones del taller o almacén.

Tabla 28. Duración de roscado de conector

Diámetro nominal de Varilla	1/2"	5/8"	3/4"
Longitud de roscado (mm)	90	110	130
Velocidad de avance (mm/s)	5	5	5
Duración de un ciclo (s)	36	44	52
Número de ciclos	3	3	3
Duración efectiva (s)	108	132	156
Duración de corte y colocación (s)	240	240	240
Duración de control entre ciclos (s)	60	60	60
Duración total de control (s)	120	120	120
Velocidad de perforación (mm/s)	0.83	0.83	0.83
Duración de perforación (s)	108	132	156
Tiempo total (min)	9.60	10.40	11.20

Fuente: Elaboración propia

El tiempo de duración del roscado de conectores es en promedio igual a 10.40 minutos como se muestra en la Tabla 28; la duración de “corte y colocación” es la actividad que mayor tiempo demanda debido a que se debe preparar el acero en el torno para el roscado y perforación de varilla.

4.2.2. Habilitación de Empalmes Mecánicos

De acuerdo con Hernández (2018), el tiempo de habilitación de conectores mecánicos roscados en promedio es igual a 2 minutos en condiciones normales para varillas de diámetro nominal de 12.7mm (1/2"); en base a dicha información, se considera un incremento de tiempo para varillas de mayor diámetro por la dificultad de trabajar con varillas corrugadas de mayores dimensiones, obteniéndose la siguiente tabla:

Tabla 29. Duración de ejecución de empalmes mecánicos roscados

Diámetro nominal de Varilla	Longitud de Empalme (m)	Tiempo de habilitación (min)	Rendimiento diario (und/día)
1/2"	0.09	2.0	240
5/8"	0.11	2.5	192
3/4"	0.13	3.0	160

Fuente: Elaboración propia adaptado de Hernández (2018)

Los plazos de ejecución de empalmes mecánicos roscados mostrados en la Tabla 29, consideran el proceso de colocación del conector sobre las varillas corrugadas, así como también del proceso de ajuste del conector empleando una herramienta como la llave.

4.2.3. Habilitación de Empalmes Traslapados

De acuerdo con López y Valle (2012), el tiempo de habilitación y armado de un empalme traslapado es una actividad con bastante variabilidad, dado que el tiempo de armado de empalmes depende de las condiciones del proyecto, condiciones climáticas, condición físicas del personal, condiciones de los elementos estructurales, entre otras. Por tal motivo, determinaron el promedio de tiempo de habilitación de empalmes traslapados para obras de edificaciones.

Tabla 30. Duración de ejecución de traslapados

Diámetro nominal de Varilla	Longitud de Empalme (m)	Tiempo de habilitación (min)	Rendimiento diario (und/día)
1/2"	0.55	4.0	120
5/8"	0.65	6.0	80
3/4"	0.80	8.0	60

Fuente: Elaboración propia adaptado de López y Valle (2012)

Los plazos de ejecución de traslapados mostrados en la Tabla 30, consideran el tiempo que toma preparar las varillas corrugadas para su superposición a lo largo de la longitud de desarrollo, así como también el tiempo que toma preparar y realizar el amarre de las varillas empleando acero N°16.

4.3. COSTO DE EMPALMES

Con los costos referenciales de los insumos, la duración y el rendimiento determinado para cada actividad, se elabora el análisis de costos unitarios para cada tipo de empalme.

Según Hoyos (2019), la cantidad de cada recurso se obtiene dividiendo la jornada diaria sobre el rendimiento de la partida y multiplicando este resultado por la cuadrilla; luego se calcula el costo parcial multiplicando la cantidad del recurso con el precio unitario de dicho recurso. Finalmente, se suman los costos parciales para obtener el costo unitario de la partida.

4.3.1. Análisis de Costos Unitarios de Empalmes Mecánicos

Para los empalmes mecánicos diseñados se considera la sub-partida “Roscado de Varillas y Conector mecánico”, la cual contempla los costos asociados al proceso de roscado de los elementos del empalme mecánico. El costo de dicha sub-partida se basa en los costos de posesión y operación del torno, los cuales se muestran en la Tabla 25 y Tabla 26; y se considera el tiempo requerido para los dos tipos de procesos mostrados en la Tabla 27 y Tabla 28. Con estas consideraciones se determina el costo de la mano de obra, materiales y equipos de la sub-partida:

Tabla 31. Costo de total de proceso de roscado

Diámetro nominal de Varilla	1/2"	5/8"	3/4"
Costo por roscado de dos varillas (S/)			
Mano de obra	6.38	6.71	7.05
Materiales	0.15	0.18	0.20
Equipos	1.12	1.18	1.24
Costo por conector mecánico (S/)			
Mano de obra	7.22	7.89	8.56
Materiales	0.17	0.20	0.23
Equipos	1.39	1.52	1.65
Costo total (S/)	16.43	17.68	18.92

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 31, el costo promedio del proceso de roscado de empalmes es de S/ 17.68; además, la fabricación del conector es más costoso que el costo del roscado de varillas corrugadas. El costo de empalmes para todos los diámetros evaluados no varía en más de un 7.50% con respecto al promedio estimado; por lo tanto, el fabricar empalmes mecánicos de mayor diámetro no incrementa considerablemente su costo como sucede en el caso del traslapado.

Según la revista Costos (2023), para la habilitación de acero corrugado usualmente se requiere de una cuadrilla compuesta por un operario y un oficial, los cuales requieren de una cizalla de mano o cizalla eléctrica. Con estas consideraciones, se realiza el análisis de costos unitarios para los empalmes mecánicos diseñados:

Tabla 32. Costo unitario de empalme mecánico para varillas de 1/2"

Partida		Habilitación de Empalme diseñado para Varillas de 1/2"				
Rendimiento	und/día	MO. 240.00	Costo Directo por und:			19.04
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/	Parcial S/
Mano de Obra						
CAPATAZ		hh	0.1000	0.0033	32.99	0.11
OPERARIO		hh	1.0000	0.0333	27.49	0.92
OFICIAL		hh	1.0000	0.0333	21.61	0.72
						1.75
Materiales						
ACERO CORRUGADO $f_y=4200$ kg/cm2 GRADO 60		kg		0.2100	3.86	0.81
						0.81
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES		%mo		3.0000	1.75	0.05
						0.05
Sub-Partida						
ROSCADO DE VARILLAS (1/2") Y CONECTOR MECÁNICO		glb		1.0000	16.43	16.43
						16.43

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 32, el costo total (considerando IGV) de habilitación de empalme mecánico diseñado para varillas de 1/2" es de S/ 22.47. Los recursos de mano de obra tienen mayor incidencia en el costo de habilitación del empalme (considerando los procesos de roscado), estos representan el 82.0% del costo total; mientras que el costo de los equipos representa un 13.7% del costo total.

Tabla 33. Costo unitario de empalme mecánico para varillas de 5/8"

Partida		Habilitación de Empalme diseñado para Varillas de 5/8"				
Rendimiento	und/día	MO. 192.00	Costo Directo por und:			21.64
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/	Parcial S/
Mano de Obra						
CAPATAZ		hh	0.1000	0.0042	32.99	0.14
OPERARIO		hh	1.0000	0.0417	27.49	1.15
OFICIAL		hh	1.0000	0.0417	21.61	0.90
						2.19
Materiales						
ACERO CORRUGADO $f_y=4200$ kg/cm2 GRADO 60		kg		0.4400	3.86	1.70
						1.70
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES		%mo		3.0000	2.19	0.07
						0.07
Sub-Partida						
ROSCADO DE VARILLAS (5/8") Y CONECTOR MECÁNICO		glb		1.0000	17.68	17.68
						17.68

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 33, el costo total (considerando IGV) de habilitación de empalme mecánico diseñado para varillas de 5/8" es de S/ 25.54. Los recursos de mano de obra tienen mayor incidencia en el costo de habilitación del empalme (considerando los procesos de roscado), estos representan el 79.0% del costo total; mientras que el costo de los equipos representa un 13.0% del costo total.

Tabla 34. Costo unitario de empalme mecánico para varillas de 3/4"

Partida		Habilitación de Empalme diseñado para Varillas de 3/4"				
Rendimiento	und/día	MO. 160.00	Costo Directo por und:			23.62
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/	Parcial S/
Mano de Obra						
CAPATAZ		hh	0.1000	0.0050	32.99	0.16
OPERARIO		hh	1.0000	0.0500	27.49	1.37
OFICIAL		hh	1.0000	0.0500	21.61	1.08
						2.61
Materiales						
ACERO CORRUGADO fy=4200 kg/cm2 GRADO 60		kg		0.5200	3.86	2.01
						2.01
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES		%mo		3.0000	2.61	0.08
						0.08
Sub-Partida						
ROSCADO DE VARILLAS (3/4") Y CONECTOR MECÁNICO		glb		1.0000	18.92	18.92
						18.92

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 34, el costo total (considerando IGV) de habilitación de empalme mecánico diseñado para varillas de 3/4" es de S/ 27.87. Los recursos de mano de obra tienen mayor incidencia en el costo de habilitación del empalme (considerando los procesos de roscado), estos representan el 78.5% del costo total; mientras que el costo de los equipos representa un 12.8% del costo total.

Según los costos unitarios determinados para empalmes mecánicos, la proporción de costo entre los recursos se mantiene casi constante en los tres empalmes; siendo el costo de la mano de obra es considerablemente mayor al costo de los equipos empleados. Por lo tanto, el costo se reducirá si se propone un proceso de roscado de elementos del empalme que requiera menor mano de obra.

4.3.2. Análisis de Costos Unitarios de Traslapados

Para el caso del traslapado se considera la misma cuadrilla para habilitación de acero, los mismos equipos y adicionalmente se considera como material al acero recocido N°16, debido a que este material es necesario para realizar los amarres

entre varillas. Con estas consideraciones, se realiza el análisis de costos unitarios para los empalmes traslapados:

Tabla 35. Costo unitario de traslape para varillas de 1/2"

Habilitación de Empalme traslapado para Varillas de 1/2"						
Partida						
Rendimiento	und/día	MO. 120.00		Costo Directo por und:		6.36
Habilitación de Empalme traslapado para Varillas de 1/2"						
Descripción del Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra						
CAPATAZ	hh	0.1000	0.0067	32.99	0.22	
OPERARIO	hh	1.0000	0.0667	27.49	1.83	
OFICIAL	hh	1.0000	0.0667	21.61	1.44	
						3.49
Materiales						
ACERO CORRUGADO $f_y=4200$ kg/cm ² GRADO 60	kg		0.6300	3.86	2.43	
ALAMBRE NEGRO RECOCIDO N°16	kg		0.0347	3.16	0.11	
						2.54
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		5.0000	3.49	0.17	
CIZALLA ELECTRICA	hm	0.5000	0.0333	4.77	0.16	
						0.33

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 35, el costo total (considerando IGV) de habilitación de traslapado para varillas de 1/2" es de S/ 7.50. Los recursos de mano de obra tienen mayor incidencia en el costo de habilitación del empalme, estos representan el 54.9% del costo total.

Tabla 36. Costo unitario de traslape para varillas de 5/8"

Habilitación de Empalme traslapado para Varillas de 5/8"						
Partida						
Rendimiento	und/día	MO. 80.00		Costo Directo por und:		10.42
Habilitación de Empalme traslapado para Varillas de 5/8"						
Descripción del Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra						
CAPATAZ	hh	0.1000	0.0100	32.99	0.33	
OPERARIO	hh	1.0000	0.1000	27.49	2.75	
OFICIAL	hh	1.0000	0.1000	21.61	2.16	
						5.24
Materiales						
ACERO CORRUGADO $f_y=4200$ kg/cm ² GRADO 60	kg		1.1600	3.86	4.48	
ALAMBRE NEGRO RECOCIDO N°16	kg		0.0638	3.16	0.20	
						4.68
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		5.0000	5.24	0.26	
CIZALLA ELECTRICA	hm	0.5000	0.0500	4.77	0.24	
						0.50

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 36, el costo total (considerando IGV) de habilitación de traslapado para varillas de 5/8" es de S/ 12.30. Los recursos de mano de obra tienen mayor incidencia en el costo de habilitación del empalme, estos representan el 50.3% del costo total; por otro lado, el costo de los materiales es considerable representando el 44.9% del costo total.

Tabla 37. Costo unitario de traslape para varillas de 3/4"

Habilitación de Empalme traslapado para Varillas de 3/4"					
Partida					
Rendimiento	und/día	MO. 60.00		Costo Directo por und:	15.97
Descripción del Recurso					
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra					
CAPATAZ	hh	0.1000	0.0133	32.99	0.44
OPERARIO	hh	1.0000	0.1333	27.49	3.67
OFICIAL	hh	1.0000	0.1333	21.61	2.88
					6.99
Materiales					
ACERO CORRUGADO $f_y=4200$ kg/cm ² GRADO 60	kg		2.0600	3.86	7.95
ALAMBRE NEGRO RECOCIDO N°16	kg		0.1133	3.16	0.36
					8.31
Equipos					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		5.0000	6.99	0.35
CIZALLA ELECTRICA	hm	0.5000	0.0667	4.77	0.32
					0.67

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 37, el costo total (considerando IGV) de habilitación de traslapado para varillas de 3/4" es de S/ 18.84. Los recursos de materiales tienen mayor incidencia en el costo de habilitación del empalme, estos representan el 52.0% del costo total; por otro lado, el costo de la mano de obra representa el 43.8% del costo total.

Según los costos unitarios determinados para el traslapado, la proporción de costo entre los recursos varía con una tendencia considerable; la incidencia de la mano de obra se reduce a medida que se incrementa el diámetro de varilla, y la incidencia de los materiales toma mayor importancia.

4.3.3. Diferencia entre Costo de Empalmes

De acuerdo con el análisis de costos, el costo de los empalmes traslapados está relacionado al costo de la mano de obra e insumos necesarios para habilitar los empalmes; por otro lado, el costo de los empalmes mecánicos depende principalmente del costo de la mano de obra y en menor grado de los equipos

necesarios para fabricarlos. Se realiza la gráfica de costos considerando el costo del conector mecánico comercial de menor costo, los cuales se presentan en el “Anexo 06: Cotización de Conectores Mecánicos Comerciales”, en las que se puede apreciar la variación de costos empleando diferentes métodos de empalme:

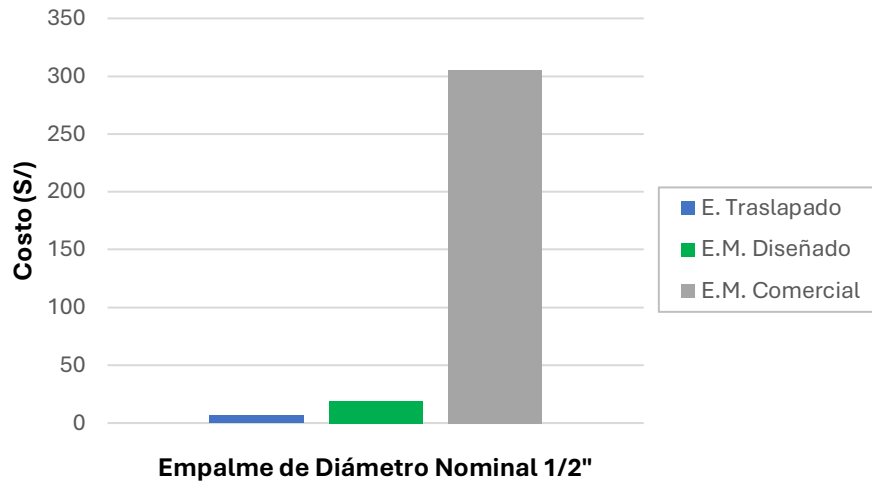


Figura 41. Diferencia de costo de empalmes para varillas de 1/2"

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Figura 41, el Empalme Mecánico Diseñado (E.M. Diseñado) para varillas de 1/2" tiene un costo igual al 299% del costo del empalme traslapado; por otro lado, el Empalme Mecánico Comercial (E.M. Comercial) tiene un costo igual al 4794% del costo del empalme traslapado.

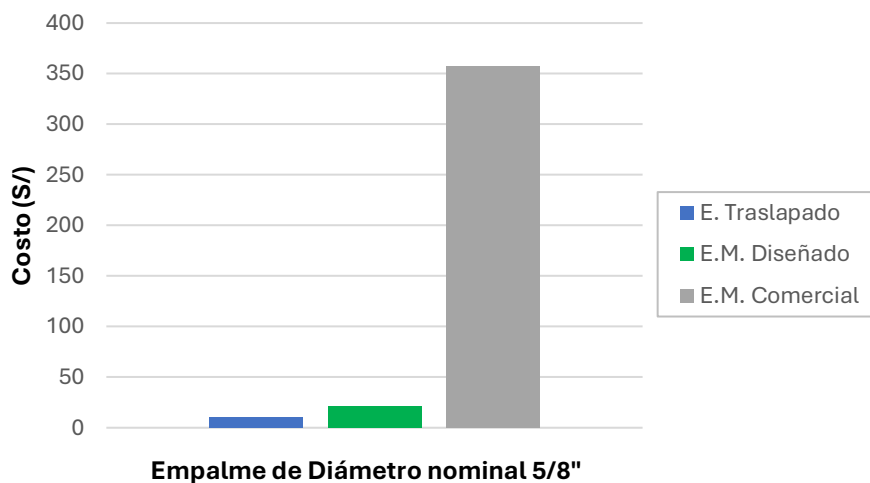


Figura 42. Diferencia de costo de empalmes para varillas de 5/8"

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Figura 42, el Empalme Mecánico Diseñado (E.M. Diseñado) para varillas de 5/8" tiene un costo igual al 208% del costo del empalme traslapado; por otro lado, el Empalme Mecánico Comercial (E.M. Comercial) tiene un costo igual al 3434% del costo del empalme traslapado.

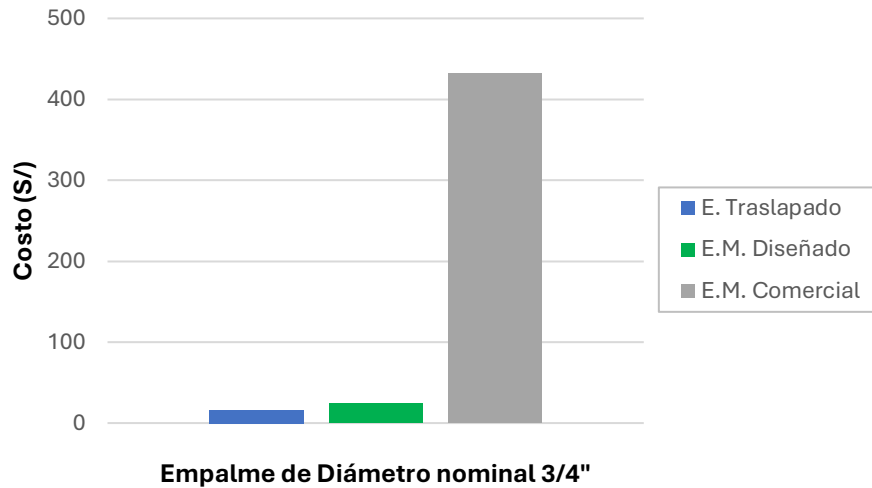


Figura 43. Diferencia de costo de empalmes para varillas de 3/4"

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Figura 43, el Empalme Mecánico Diseñado (E.M. Diseñado) para varillas de 3/4" tiene un costo igual al 148% del costo del empalme traslapado; por otro lado, el Empalme Mecánico Comercial (E.M. Comercial) tiene un costo igual al 2708% del costo del empalme traslapado.

Según las Figura 41, Figura 42 y Figura 43, el costo de los empalmes mecánicos diseñados es mayor al costo de los traslapados, por lo que dichos empalmes no son favorables económicamente en comparación a los traslapados; sin embargo, si son favorables en comparación a los empalmes mecánicos comerciales. Además, la diferencia entre costos de empalmes mecánicos diseñados y traslapados se reduce a medida que el diámetro de varilla aumenta; por otro lado, la diferencia entre los empalmes mecánicos comerciales y empalmes traslapados se incrementa.

CONCLUSIONES

- Según los resultados de ensayos a tracción, el tipo de falla presentado en las 15 probetas fue la rotura de la varilla empalmada en su zona roscada; esto debido a que se diseñó considerando la falla de la barra roscada antes que de los filetes o del conector mecánico. Además, la capacidad de resistencia registrada de los empalmes fue menor al mínimo admisible establecido en la norma peruana de Concreto Armado E.060 y fue mayor a la fluencia especificada; sin embargo, la norma E.060 permite emplear dichos empalmes solo para barras de diámetro nominal igual o menor a 15.9mm (5/8") de forma escalonada a una distancia entre ellos de al menos 600mm.
- Determinando el factor de resistencia de las varillas sin empalmar, se comprobó que el factor de resistencia de las varillas a empalmar es mayor al valor mínimo requerido para empalmes mecánicos. Con este parámetro se calculó la resistencia teórica y se comparó con la resistencia medida de los empalmes, obteniéndose una correlación fuerte del tipo lineal entre dichos parámetros. En base a dichos resultados, se propone una expresión calibrada para dimensionar el diámetro menor roscado (D_r), de modo que se garantice una capacidad de resistencia mayor al requerido para empalmes mecánicos.
- Según el análisis de costos unitarios, el insumo de mayor incidencia en los empalmes diseñados es la mano de obra necesaria para fabricar los conectores mecánicos y roscar las varillas; por otro lado, los insumos de mayor incidencia en el traslapado son tanto la mano de obra como los materiales necesarios. Por lo tanto, para empalmes diseñados es posible reducir el tiempo de fabricación empleando otros métodos de roscado o equipos de mayor rendimiento.
- Como conclusión general, se tiene que los empalmes mecánicos diseñados en la presente investigación (Propuesta N°01) no presentan una capacidad de resistencia a tracción favorable; esto debido a que el roscado realizado a las barras de acero redujo su sección efectiva a tracción hasta ser inferiores al mínimo admisible establecido en la norma E.060. Por otro lado, el costo de los empalmes diseñados es favorable en comparación con empalmes mecánicos comerciales; pero no favorable en comparación con los traslapados. Esto debido a que el costo de los empalmes mecánicos se estimó considerando el proceso de fabricación con un torno paralelo y no un equipo de producción industrial.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda reducir la profundidad de roscado en las varillas, donde el diámetro menor roscado (D_r) debe ser mayor al 95% de su diámetro original, cuya finalidad es evitar el deterioro del área de la sección crítica del empalme mecánico.
- Se sugiere evaluar experimentalmente la resistencia a tracción de los empalmes mecánicos diseñados variando la longitud de roscado. Con el objetivo de formular una expresión para determinar la longitud mínima, la cual garantice una capacidad de resistencia por transferencia entre elementos igual al mínimo establecido en la norma E.060.
- Se recomienda estudiar el rendimiento de la actividad específica de habilitación de empalmes para diversos elementos de concreto armado, ya sea empalme traslapado o empalme mecánico; esto debido a que la armadura de acero tiene características constructivas especiales que dependen del tipo de elemento de concreto armado. Además, es recomendable identificar y determinar la incidencia de los principales factores que influyen en el rendimiento de estas actividades para predecir adecuadamente el rendimiento en otros elementos o estructuras.
- Se recomienda investigar experimentalmente el comportamiento de empalmes mecánicos diseñados con roscado de sección variable (forma cónica), siguiendo el procedimiento del presente trabajo de investigación y empleando la expresión calibrada para determinar el diámetro roscado de modo que supere la resistencia mínima. Esto debido a que el roscado de sección variable evita el cambio abrupto de sección de la barra de acero roscada (situación que se presenta en el roscado del tipo cilíndrico), lo cual podría mejorar el comportamiento de la varilla en la zona roscada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aceros Arequipa. (2010). Manual Del Maestro Constructor. *Construyendo Seguro*, 1, 128. <https://www.acerosarequipa.com/manuales/pdf/manual-del-maestro-constructor.pdf>
- Aceros Arequipa. (2020). *Fierro Corrugado ASTM A615-Grado 60*. Aceros Arequipa. <https://acerosarequipa.com/pe/es/categorias/93/fierros-de-construccion>
- Alvis Fonseca, D. A., & Guerra Bejarano, J. A. (2019). *Análisis técnico, económico y constructivo del uso de empalmes mecánicos roscados en edificaciones* [Tesis de Pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional UDFJC. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/6084>
- American Concrete Institute (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI 318-19).
- American Institute of Steel Construction (2016). *Specification for Structural Steel Buildings* (AISC 360-16).
- American Society for Testing and Materials (2014). *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products* (ASTM A370).
- Ayasca Lope, K. (2016). *Desperdicios de materiales y su influencia en los costos en la construcción de los reservorios nocturnos Erusco y Larampuquio, Ayacucho – 2016* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio Institucional UNSCH. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/3711>
- Banco de Reserva del Perú. (2023). *Indicadores Economicos*. <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Estadisticas/NEDD/Hojas.htm>
- Bompa, D. V., & Elghazouli, A. Y. (2017). Ductility considerations for mechanical reinforcement couplers. *Structures*, 12, 115–119. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2017.08.007>
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2020). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (11th ed.). McGraw-Hill.
- Cando Lara, L. F. (2016). *Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón elaborado con fibras de acero reciclado* [Tesis de Pregrado, Universidad Central de Ecuador]. Repositorio Institucional UCE <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/8007>
- Cantor Vicaría, A. (2020). *Evaluación del impacto económico del grado de acero*

- de refuerzo y del tipo de empalme en el diseño de edificios con sistema estructural combinado con capacidad de disipación de energía moderada y especial [Tesis de Postgrado, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito]. Repositorio Institucional ECIJG. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1358>
- Castillo Herrera, F. (2016). *Conectores Mecánicos*. CDV Ingeniería Antisísmica. https://cicp-ec.com/documentos/ANCKLAJES_CONECTORES.pdf
- Colqui Rojas, D. D., & Ruiz Vargas, R. P. (2015). *Propuesta Metodológica De Costos Unitarios Utilizando La Metodología Last Planner System* [Tesis de Pregrado, Universidad Privada Antenor Orrego]. Repositorio Institucional UPAO. <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/2098>
- Costos. (2023). Suplemento Técnico. *Revista Costos*, 326(1), 1–59.
- Curi Salvatierra, O. Z., & Magro Morales, P. J. (2020). *Evaluación de la resistencia estructural de la conexión de aceros grado 60 con empalmes mecánicos tipo 2 (LINXION), Lima – 2020* [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/67003>
- Dabiri, H., Kheyroddin, A., & Dall'Asta, A. (2022). Splice methods used for reinforcement steel bars: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 320, 126198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126198>
- ENEL. (2023). *Conociendo las tarifas*. <https://www.enel.pe/es/empresas/entendiendo-tarifas.html>
- Espinoza, E. (2018). La hipótesis en la investigación. *Mendive*, 16(1), 122–139. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-76962018000100122&lng=es&tlng=es
- Flores Bustos, E. A. (2016). *Estudio de factibilidad técnica y económica en la implementación de máquinas herramientas de mayor capacidad en maestría "MAEF"* [Tesis de Pregrado, Universidad Andrés Bello]. Repositorio Institucional UAB. <https://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/3316>
- Flores Ruiz, E., Miranda Novales, M. G., & Villasís Kever, M. Á. (2017). The research protocol VI: How to choose the appropriate statistical test. *Inferential statistics. Revista Alergia México*, 64(3), 364–370. <https://doi.org/10.29262/ram.v64i3.304>
- Galarza Meza, M. P. (2011). *Desperdicio de materiales en obras de construcción*

- civil: métodos de medición y control* [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/888>
- Gálvez Chicchón, C. A., & Benavides Castro, L. E. (2021). *Estudio técnico financiero en el reemplazo de activos fijos tangibles para determinar el valor económico agregado en el área de maestranza de la empresa Factoría Industrial S.A.C.* [Tesis de Pregrado, Universidad Privada Antenor Orrego]. Repositorio Institucional UPAO. <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/7310>
- Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2013). *Mecánica de Materiales* (8th ed.). Cengage Learning.
- González, M. M., & Cuevas Florián, P. Y. (2018). *Estudio comparativo entre empalmes por empalmes y traslapes mecánicos utilizando elementos de hormigón armado.* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña]. Repositorio Institucional UNPHU. <https://repositorio.unphu.edu.do/handle/123456789/670>
- Hanusz, Z., Tarasinska, J., & Zielinski, W. (2016). Shapiro–Wilk test with known mean. *Revstat Statistical Journal*, 14(1), 89–100.
- Hernández Ortega, R., & Feliberto Fernández, C. (2012). *Cálculo de uniones roscadas* (1st ed.). Samuel Feijóo.
- Hernández Sánchez, D. A. (2018). *Diseño y evaluación del desempeño de un tipo de empalme soldado para barras longitudinales de 1/2 pulgada* [Tesis de Posgrado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNC. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/75913>
- Hoyos Matías, P. E. (2019). *Costo de no calidad en elementos de concreto armado en edificaciones: reparación de segregaciones, desplomes, juntas frías y fisuras* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI. <https://cybertesis.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/19527>
- Instituto Nacional de Calidad (2018). *Barras de acero al carbono, corrugadas, para refuerzo de concreto armado* (NTP 341.031).
- Instituto Nacional de Calidad (2019). *Métodos de ensayo normalizados y definiciones para ensayos mecánicos.* NTP 350.405.
- International Code Council. (2010). *Acceptance Criteria for Mechanical Connector Systems for Steel Reinforcing Bars (AC133).*
- Khedmatgozar Dolati, S. S., & Mehrabi, A. (2021). Review of Mechanical Bar

- Couplers for Splicing Precast Concrete Members. *Scientific Journal of Research & Reviews*, 3(1). <https://doi.org/10.33552/sjrr.2021.03.000551>
- López Flores, A. E., & Valle Ramos, N. E. (2012). *Estudio del empalme mecánico de varillas corrugadas mediante conectores cilíndricos huecos y diseño-construcción del sistema hidráulico móvil para el prensado* [Tesis de Pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. Repositorio Institucional UFA ESPE. <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/5597?locale-attribute=de>
- Martínez Guardiola, A. V. (2020). *Manejo de un torno paralelo virtual en un entorno inmersivo* [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Cartagena]. Repositorio Institucional UPCT. <https://repositorio.upct.es/handle/10317/9042>
- McCormac, J. C., & Brown, R. H. (2018). *Diseño de Concreto Reforzado* (10th ed.). Alfaomega.
- Migone Arosena, J. P. (2018). *Evaluación de los empalmes mecánicos y sus esfuerzos de tensión en muestras de probetas de acero, Lima – 2018* [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/37094>
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2009). Norma Técnica E.060 Concreto Armado. *El Peruano*.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2010). Norma Técnica “Elementos para la determinación del Costo horario de los equipos y maquinarias del sector Construcción.” *El Peruano*.
- Mohd Razali, N., & Bee Wah, Y. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21–33.
- Mora Bermúdez, C. D., & Ortega Leal, D. A. (2021). *Comparación del comportamiento de empalmes mecánicos con empalmes tradicionales* [Tesis de Pregrado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional USTA. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/34436>
- Moussavi Nadoushani, Z. S., Hammad, A. W. A., Xiao, J., & Akbarnezhad, A. (2018). Minimizing cutting wastes of reinforcing steel bars through optimizing lap splicing within reinforced concrete elements. *Construction and Building Materials*, 185, 600–608. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.023>
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de maquinaria cuarta edición síntesis y análisis de*

- máquinas y mecanismos* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Ortiz Sánchez, A. (2014). *Diseño Sísmico de muros de concreto reforzado. Bases para el diseño por desplazamientos* [Tesis de Posgrado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional UNAM. <https://ru.dgb.unam.mx/handle/20.500.14330/TES01000707395>
- Osco Castillon, S. V. (2021). *La Influencia de Empalmes Tipo B, en el Comportamiento a Tracción de Acero de Refuerzo, teniendo una Luz entre Barras en los Pilotes P27, P28 y Torres del Puente Nanay, Provincia de Iquitos, Región de Loreto* [Tesis de Pregrado, Universidad Peruana del Centro]. Repositorio Institucional UPECEN. <https://repositorio.upecen.edu.pe/handle/20.500.14127/259>
- Pedrosa, I., Juarros Basterretxea, J., Robles Fernández, A., Basteiro, J., & García Cueto, E. (2015). Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar? *Universitas Psychologica*, 14(1), 245–254. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-92672015000100021
- Pernía Espinoza, A., Blanco Fernández, J., Sierra Soto, J. M., & Azofra Rueda, J. C. (2018). *Prácticas de mecanizado en torno y fresadora*. Fondo Editorial Universidad de La Rioja.
- Research Council of Structural Connections. (2020). *Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts*. AISC.
- Restrepo, J. I., & Rodriguez, M. E. (2013). On the probable moment strength of reinforced concrete columns. *ACI Structural Journal*, 110(4), 681–690. <https://doi.org/10.14359/51685753>
- Robles Miñan, I. M., & Reyes Aguire, D. E. (2021). *Uso de empalmes mecánicos para contribuir en la gestión del proyecto ampliación 03 de la U.T.P - sede Villa el Salvador 2021* [Tesis de Postgrado, Universidad Tecnológica del Perú]. Repositorio Institucional UTP. <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/5371>
- Romero Mojica, C. C., & Rodríguez Zambrano, J. A. (2018). *Estudio experimental del comportamiento pseudoestático de empalmes soldados a tope con camisa de refuerzo para barras N6* [Tesis de Postgrado, Pontificia Universidad Javeriana]. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/47375>
- Romero Saldaña, M. (2016). Pruebas de bondad de ajuste a una distribución

- normal. *Enfermería Del Trabajo*, 6(3), 105–114.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5633043>
- Salgado Ugarte, I. H. (2013). *Métodos Estadísticos Exploratorios y Confirmatorios para Análisis de Datos*. Universidad Nacional Autónoma de México.
<http://www.librosoa.unam.mx/handle/123456789/296>
- Sánchez Rengifo, P. E. (2019). *Desempeño estructural de una columna de tres niveles con el empleo del empalme mecánico en C.C. Shopping La Molina 2018* [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/44343>
- Tarazona Malpartida, K. T. (2019). *Análisis comparativo de costos entre empalmes mecánicos y empalmes por traslape en las pilas-pilote de la etapa 1a del proyecto “Línea 2 y ramal av. Faucett – av. Gambetta de la red básica del metro de Lima y Callao”* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUNF_d2e607e3b5fd4687c06935a283f86061
- Vanegas Useche, L. V. (2018). *Diseño de Elementos de Máquinas*. Universidad Tecnológica de Pereira. <https://doi.org/10.22517/9789587223019>
- 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)* [Tesis de Pregrado, Universidad de Costa Rica]. Repositorio Institucional UCR. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/2671>
- Vega Vega, D., & Navarro Contreras, J. A. (2020). *Conectores mecánicos para la unión de varillas de acero en estructuras de concreto reforzado* [Tesis de Pregrado, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña]. Repositorio Institucional UFPS. <http://repositorio.ufpso.edu.co/handle/123456789/2183>

ANEXOS

ANEXO 01: MEMORIA DE CALCULO - PROPUESTA N°01

CALCULO: PROPUESTA 01 - VARILLA DE 1/2"

Datos Iniciales

Diámetro Nominal de Varilla		1/2"	
Diámetro de Varilla	$D_i =$	12.0	mm
Factor de resistencia de empalme esperado (E.060)	$\lambda_0 =$	1.25	
Factor de seguridad por transferencia (tabla 6)	$\phi =$	2.00	
Factor de resistencia de varillas (Suposición)	$R_v =$	1.64	
Factor de profundidad de rosca - Rosca Métrica ISO (tabla 1)	$K_h =$	0.54	
Factor de longitud de varilla - Rosca Métrica ISO (tabla 1)	$K_v =$	0.75	
Factor de longitud de conector - Rosca Métrica ISO (tabla 1)	$K_c =$	0.88	

1. Calculo de Diámetro Roscado

Nota: Se recomienda seleccionar la rosca metrica inmediata superior, con diámetro nominal mayor al diámetro nominal de la varilla

Rosca Métrica ISO - Propuesto		M12	
Diámetro Mayor Roscado	$D_{NR} =$	12.0	mm
Longitud de Paso de Rosca	$p =$	1.75	mm
Factor de Profundidad Roscada Efectiva	$K_0 =$	100%	
Diámetro Roscado Menor (ec 3.29)	$D_{r\ min} =$	10.0	mm
Diámetro Roscado Menor	$D_r =$	10.1	mm OK

2. Calculo de Diámetro de Conector

Diámetro de Conector - Mínimo (ec 3.26)	$D_{e\ min} =$	15.8	mm
Diámetro Nominal de Conector - Propuesto		3/4"	
Diámetro de Conector	$D_e =$	18.0	mm OK

3. Calculo de Longitud Roscada

Longitud Roscada por Corte en Varilla (ec 3.11a)	$L_{r\ 1} =$	30.9	mm
Longitud Roscada por Corte en Conector (ec 3.11b)	$L_{r\ 2} =$	22.1	mm
Longitud Roscada por Flexión en Varilla (ec 3.17a)	$L_{r\ 3} =$	25.7	mm
Longitud Roscada por Flexión en Conector (ec 3.17b)	$L_{r\ 4} =$	15.7	mm
Longitud Roscada por Aplastamiento (ec 3.22)	$L_{r\ 5} =$	15.0	mm
Longitud Roscada - Mínimo	$L_{r\ min} =$	35.0	mm
Longitud Roscada - Propuesto	$L_r =$	40.0	mm OK

4. Calculo de Resistencia del Empalme

Factor de Resistencia de Varilla Roscada	$R_{T\ 1} =$	1.27
Factor de Resistencia de Conector Roscado	$R_{T\ 2} =$	2.05
Factor de Resistencia de Transferencia entre Filetes	$R_{T\ 3} =$	1.62
Factor de Resistencia de Teórica de Empalme	$R_T =$	1.27

CALCULO: PROPUESTA 01 - VARILLA DE 5/8"

Datos Iniciales

Diámetro Nominal de Varilla		5/8"	
Diámetro de Varilla	$D_i =$	15.0	mm
Factor de resistencia de empalme esperado (E.060)	$\lambda_0 =$	1.25	
Factor de seguridad por transferencia	$\phi =$	2.00	
Factor de resistencia de varillas (Suposición)	$R_v =$	1.64	
Factor de profundidad de rosca - Rosca Métrica ISO	$K_h =$	0.54	
Factor de longitud de varilla - Rosca Métrica ISO	$K_v =$	0.75	
Factor de longitud de conector - Rosca Métrica ISO	$K_c =$	0.88	

1. Calculo de Rosca Métrica ISO

Nota: Se recomienda seleccionar la rosca metrica inmediata superior, con diámetro nominal mayor al diámetro nominal de la varilla

Rosca Métrica ISO - Propuesto		M16	
Diámetro Mayor Roscado	$D_{NR} =$	16.0	mm
Longitud de Paso de Rosca	$p =$	2.00	mm
Factor de Profundidad Roscada Efectiva	$K_0 =$	54%	
Diámetro Roscado Menor (ec 3.29)	$D_{r\ min} =$	12.8	mm
Diámetro Roscado Menor	$D_r =$	13.8	mm OK

2. Calculo de Diámetro de Conector

Diámetro de Conector - Mínimo (ec 3.26)	$D_{e\ min} =$	20.5	mm
Diámetro Nominal de Conector - Propuesto		1"	
Diámetro de Conector	$D_e =$	24.0	mm OK

3. Calculo de Longitud Roscada

Longitud Roscada por Corte en Varilla (ec 3.11a)	$L_{r_1} =$	35.2	mm
Longitud Roscada por Corte en Conector (ec 3.11b)	$L_{r_2} =$	29.7	mm
Longitud Roscada por Flexión en Varilla (ec 3.17a)	$L_{r_3} =$	15.8	mm
Longitud Roscada por Flexión en Conector (ec 3.17b)	$L_{r_4} =$	26.9	mm
Longitud Roscada por Aplastamiento (ec 3.22)	$L_{r_5} =$	33.5	mm
Longitud Roscada - Mínimo	$L_{r\ min} =$	40.0	mm
Longitud Roscada - Propuesto	$L_r =$	50.0	mm OK

4. Calculo de Resistencia del Empalme

Factor de Resistencia de Varilla Roscada	$R_{T_1} =$	1.45
Factor de Resistencia de Conector Roscado	$R_{T_2} =$	2.56
Factor de Resistencia de Transferencia entre Filetes	$R_{T_3} =$	1.78
Factor de Resistencia de Teórica de Empalme	$R_T =$	1.45

CALCULO: PROPUESTA 01 - VARILLA DE 3/4"

Datos Iniciales

Diámetro Nominal de Varilla		3/4"	
Diámetro de Varilla	$D_i =$	18.0	mm
Factor de resistencia de empalme esperado (E.060)	$\lambda_0 =$	1.25	
Factor de seguridad por transferencia	$\phi =$	2.00	
Factor de resistencia de varillas (Suposición)	$R_v =$	1.64	
Factor de profundidad de rosca - Rosca Métrica ISO	$K_h =$	0.54	
Factor de longitud de varilla - Rosca Métrica ISO	$K_v =$	0.75	
Factor de longitud de conector - Rosca Métrica ISO	$K_c =$	0.88	

1. Calculo de Rosca Métrica ISO

Nota: Se recomienda seleccionar la rosca metrica inmediata superior, con diámetro nominal mayor al diámetro nominal de la varilla

Rosca Métrica ISO - Propuesto		M16	
Diámetro Mayor Roscado	$D_{NR} =$	16.0	mm
Longitud de Paso de Rosca	$p =$	2.00	mm
Factor de Profundidad Roscada Efectiva	$K_0 =$	100%	
Diámetro Roscado Menor (ec 3.29)	$D_{r\ min} =$	15.2	mm
Diámetro Roscado Menor	$D_r =$	13.8	mm Error

2. Calculo de Diámetro de Conector

Diámetro de Conector - Mínimo (ec 3.26)	$D_{e\ min} =$	22.8	mm
Diámetro Nominal de Conector - Propuesto		1"	
Diámetro de Conector	$D_e =$	24.0	mm OK

3. Calculo de Longitud Roscada

Longitud Roscada por Corte en Varilla (ec 3.11a)	$L_{r_1} =$	50.7	mm
Longitud Roscada por Corte en Conector (ec 3.11b)	$L_{r_2} =$	37.4	mm
Longitud Roscada por Flexión en Varilla (ec 3.17a)	$L_{r_3} =$	42.3	mm
Longitud Roscada por Flexión en Conector (ec 3.17b)	$L_{r_4} =$	26.5	mm
Longitud Roscada por Aplastamiento (ec 3.22)	$L_{r_5} =$	25.1	mm
Longitud Roscada - Mínimo	$L_{r\ min} =$	55.0	mm
Longitud Roscada - Propuesto	$L_r =$	60.0	mm OK

4. Calculo de Resistencia del Empalme

Factor de Resistencia de Varilla Roscada	$R_{T_1} =$	1.05
Factor de Resistencia de Conector Roscado	$R_{T_2} =$	1.62
Factor de Resistencia de Transferencia entre Filetes	$R_{T_3} =$	1.48
Factor de Resistencia de Teórica de Empalme	$R_T =$	1.05

ANEXO 02: MEMORIA DE CALCULO - PROPUESTA N°02

CALCULO: PROPUESTA 02 - VARILLA DE 1/2"

Datos Iniciales

Diámetro Nominal de Varilla		1/2"
Diámetro de Varilla	$D_i =$	12.0 mm
Factor de resistencia de empalme esperado (E.060)	$\lambda_0 =$	1.25
Factor de seguridad por transferencia (tabla 6)	$\phi =$	2.00
Factor de resistencia de varillas (Datos Experimentales)	$R_v =$	1.41
Factor de profundidad de rosca - Rosca Métrica ISO (tabla 1)	$K_h =$	0.54
Factor de longitud de varilla - Rosca Métrica ISO (tabla 1)	$K_v =$	0.75
Factor de longitud de conector - Rosca Métrica ISO (tabla 1)	$K_c =$	0.88

1. Calculo de Diámetro Roscado

Nota: Se recomienda emplear la serie fina de Rosca Métrica ISO, seleccionando un diámetro (no estandarizado) mayor al diámetro de la varilla a empalmar.

Diámetro Mayor Roscado - Propuesto	$D_{NR} =$	12.6 mm	
Longitud de Paso de Rosca - Propuesto	$p =$	1.00 mm	
Factor de Profundidad Roscada Efectiva	$K_0 =$	45%	
Diámetro Roscado Menor (ec 3.29)	$D_{r\ min} =$	11.2 mm	
Diámetro Roscado Menor	$D_r =$	11.5 mm	OK

2. Calculo de Diámetro de Conector

Diámetro de Conector - Mínimo (ec 3.26)	$D_{e\ min} =$	17.4 mm	
Diámetro Nominal de Conector - Propuesto		3/4"	
Diámetro de Conector	$D_e =$	18.0 mm	OK

3. Calculo de Longitud Roscada

Longitud Roscada por Corte en Varilla (ec 3.11a)	$L_{r\ 1} =$	27.1 mm	
Longitud Roscada por Corte en Conector (ec 3.11b)	$L_{r\ 2} =$	24.1 mm	
Longitud Roscada por Flexión en Varilla (ec 3.17a)	$L_{r\ 3} =$	10.1 mm	
Longitud Roscada por Flexión en Conector (ec 3.17b)	$L_{r\ 4} =$	23.3 mm	
Longitud Roscada por Aplastamiento (ec 3.22)	$L_{r\ 5} =$	31.7 mm	
Longitud Roscada - Mínimo	$L_{r\ min} =$	35.0 mm	
Longitud Roscada - Propuesto	$L_r =$	40.0 mm	OK

4. Calculo de Resistencia del Empalme

Factor de Resistencia de Varilla Roscada	$R_{T\ 1} =$	1.32
Factor de Resistencia de Conector Roscado	$R_{T\ 2} =$	1.76
Factor de Resistencia de Transferencia entre Filetes	$R_{T\ 3} =$	1.58
Factor de Resistencia de Teórica de Empalme	$R_T =$	1.32
Factor de Resistencia de Teórica de Empalme - Corregido	$R_T =$	1.25

CALCULO: PROPUESTA 02 - VARILLA DE 5/8"

Datos Iniciales

Diámetro Nominal de Varilla		5/8"	
Diámetro de Varilla	$D_i =$	15.0	mm
Factor de resistencia de empalme esperado (E.060)	$\lambda_0 =$	1.25	
Factor de seguridad por transferencia	$\phi =$	2.00	
Factor de resistencia de varillas (Datos Experimentales)	$R_v =$	1.41	
Factor de profundidad de rosca - Rosca Métrica ISO	$K_h =$	0.54	
Factor de longitud de varilla - Rosca Métrica ISO	$K_v =$	0.75	
Factor de longitud de conector - Rosca Métrica ISO	$K_c =$	0.88	

1. Calculo de Rosca Métrica ISO

Nota: Se recomienda emplear la serie fina de Rosca Métrica ISO, seleccionando un diámetro (no estandarizado) mayor al diámetro de la varilla a empalmar.

Diámetro Mayor Roscado - Propuesto	$D_{NR} =$	15.5	mm	
Longitud de Paso de Rosca - Propuesto	$p =$	1.00	mm	
Factor de Profundidad Roscada Efectiva	$K_0 =$	54%		
Diámetro Roscado Menor (ec 3.29)	$D_{r\ min} =$	14.0	mm	
Diámetro Roscado Menor	$D_r =$	14.4	mm	OK

2. Calculo de Diámetro de Conector

Diámetro de Conector - Mínimo (ec 3.26)	$D_{e\ min} =$	21.8	mm	
Diámetro Nominal de Conector - Propuesto		1"		
Diámetro de Conector	$D_e =$	24.0	mm	OK

3. Calculo de Longitud Roscada

Longitud Roscada por Corte en Varilla (ec 3.11a)	$L_{r_1} =$	33.8	mm	
Longitud Roscada por Corte en Conector (ec 3.11b)	$L_{r_2} =$	29.7	mm	
Longitud Roscada por Flexión en Varilla (ec 3.17a)	$L_{r_3} =$	15.2	mm	
Longitud Roscada por Flexión en Conector (ec 3.17b)	$L_{r_4} =$	27.8	mm	
Longitud Roscada por Aplastamiento (ec 3.22)	$L_{r_5} =$	32.8	mm	
Longitud Roscada - Mínimo	$L_{r\ min} =$	35.0	mm	
Longitud Roscada - Propuesto	$L_r =$	40.0	mm	OK

4. Calculo de Resistencia del Empalme

Factor de Resistencia de Varilla Roscada	$R_{T_1} =$	1.32	
Factor de Resistencia de Conector Roscado	$R_{T_2} =$	2.19	
Factor de Resistencia de Transferencia entre Filetes	$R_{T_3} =$	1.48	
Factor de Resistencia de Teórica de Empalme	$R_T =$	1.32	
Factor de Resistencia de Teórica de Empalme - Corregido	$R_T =$	1.25	

CALCULO: PROPUESTA 02 - VARILLA DE 3/4"

Datos Iniciales

Diámetro Nominal de Varilla		3/4"	
Diámetro de Varilla	$D_i =$	18.0	mm
Factor de resistencia de empalme esperado (E.060)	$\lambda_0 =$	1.25	
Factor de seguridad por transferencia	$\phi =$	2.00	
Factor de resistencia de varillas (Datos Experimentales)	$R_v =$	1.41	
Factor de profundidad de rosca - Rosca Métrica ISO	$K_h =$	0.54	
Factor de longitud de varilla - Rosca Métrica ISO	$K_v =$	0.75	
Factor de longitud de conector - Rosca Métrica ISO	$K_c =$	0.88	

1. Calculo de Rosca Métrica ISO

Nota: Se recomienda emplear la serie fina de Rosca Métrica ISO, seleccionando un diámetro (no estandarizado) mayor al diámetro de la varilla a empalmar.

Diámetro Mayor Roscado - Propuesto	$D_{NR} =$	18.5	mm	
Longitud de Paso de Rosca - Propuesto	$p =$	1.00	mm	
Factor de Profundidad Roscada Efectiva	$K_0 =$	54%		
Diámetro Roscado Menor (ec 3.29)	$D_{r\ min} =$	16.8	mm	
Diámetro Roscado Menor	$D_r =$	17.4	mm	OK

2. Calculo de Diámetro de Conector

Diámetro de Conector - Mínimo (ec 3.26)	$D_{e\ min} =$	26.2	mm	
Diámetro Nominal de Conector - Propuesto		1 3/8"		
Diámetro de Conector	$D_e =$	33.0	mm	OK

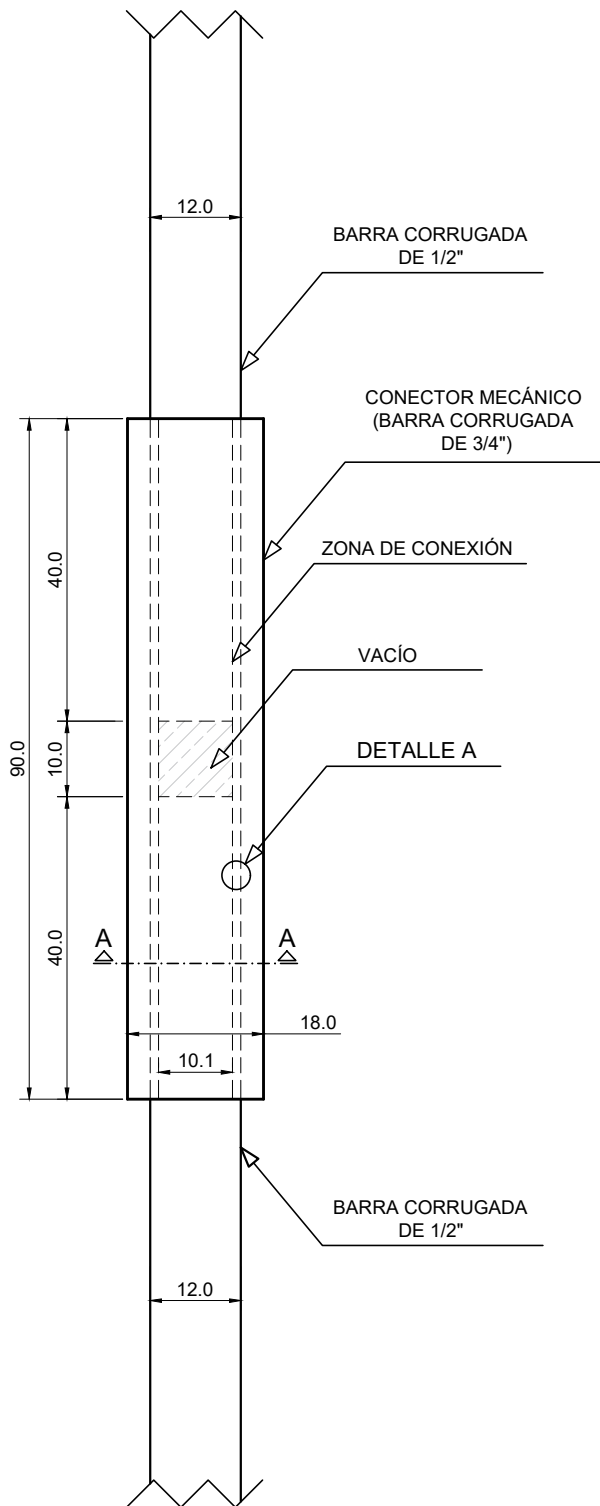
3. Calculo de Longitud Roscada

Longitud Roscada por Corte en Varilla (ec 3.11a)	$L_{r_1} =$	40.3	mm	
Longitud Roscada por Corte en Conector (ec 3.11b)	$L_{r_2} =$	35.6	mm	
Longitud Roscada por Flexión en Varilla (ec 3.17a)	$L_{r_3} =$	18.1	mm	
Longitud Roscada por Flexión en Conector (ec 3.17b)	$L_{r_4} =$	33.6	mm	
Longitud Roscada por Aplastamiento (ec 3.22)	$L_{r_5} =$	39.3	mm	
Longitud Roscada - Mínimo	$L_{r\ min} =$	45.0	mm	
Longitud Roscada - Propuesto	$L_r =$	50.0	mm	OK

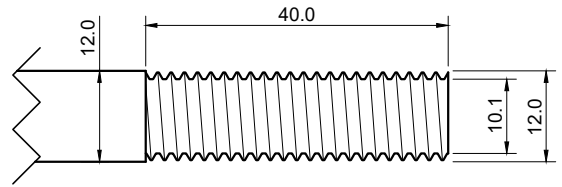
4. Calculo de Resistencia del Empalme

Factor de Resistencia de Varilla Roscada	$R_{T_1} =$	1.34	
Factor de Resistencia de Conector Roscado	$R_{T_2} =$	3.32	
Factor de Resistencia de Transferencia entre Filetes	$R_{T_3} =$	1.55	
Factor de Resistencia de Teórica de Empalme	$R_T =$	1.34	
Factor de Resistencia de Teórica de Empalme - Corregido	$R_T =$	1.26	

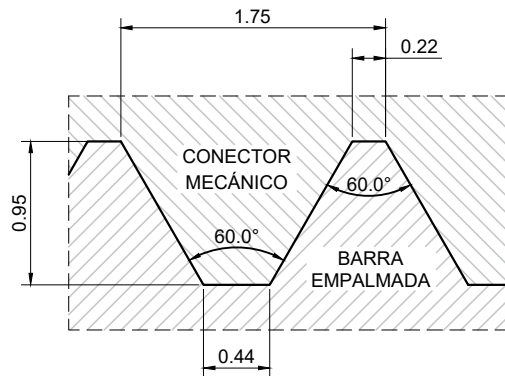
ANEXO 03: PLANOS DE EMPALMES MECANICOS DISEÑADOS



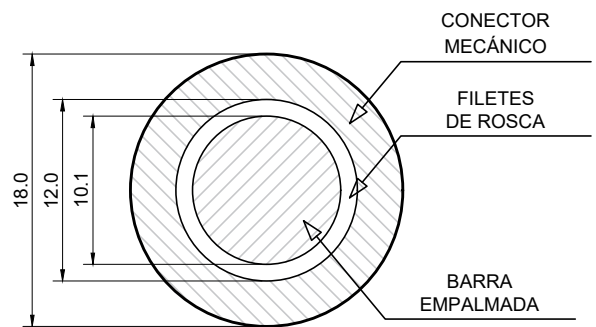
EMPALME MECÁNICO TIPO "A"
Escala: 1:1



BARRA CORRUGADA DE 1/2" ROSCADA
Escala: 1:1



DETALLE "A"
Escala: 20:1



CORTE "A - A"
Escala: 2:1

1	1	CONECTOR MECÁNICO	ASTM A605-G60	BARRA CORRUGADA - Ø3/4"
2	2	VARILLA EMPALMADA	ASTM A605-G60	BARRA CORRUGADA - Ø1/2"
N°	CANTIDAD	DESIGNACIÓN	MATERIAL	OBSERVACIÓN
	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD NACIONAL DE INGENIERÍA "RESISTENCIA A TRACCIÓN Y COSTO DE EMPALME MECÁNICO ROSCADO DISEÑADO EN BARRAS DE ACERO CORRUGADO GRADO 60"			TÍTULO: EMPALME MECÁNICO DE Ø1/2"
				DIBUJÓ: JULIO CESAR CAÑARI ALTAMIRANO
				ESCALA: INDICADA UNIDADES: mm
				FECHA: 01-2024 LÁMINA: 01



1	1	CONECTOR MECÁNICO	ASTM A605-G60	BARRA CORRUGADA - Ø1"	
2	2	VARILLA EMPALMADA	ASTM A605-G60	BARRA CORRUGADA - Ø5/8"	
N°	CANTIDAD	DESIGNACIÓN	MATERIAL	OBSERVACIÓN	
		UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD NACIONAL DE INGENIERÍA		TÍTULO: EMPALME MECÁNICO DE Ø5/8"	
				DIBUJÓ: JULIO CESAR CAÑARI ALTAMIRANO	
		"RESISTENCIA A TRACCIÓN Y COSTO DE EMPALME MECÁNICO ROSCADO DISEÑADO EN BARRAS DE ACERO CORRUGADO GRADO 60"		ESCALA: INDICADA	UNIDADES: mm
				FECHA: 01-2024	LÁMINA: 02

ANEXO 04: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE EQUIPO

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
CMC-050-2021**

Peticionario : Universidad Nacional de Ingeniería

Atención : LEM - FIC - Universidad Nacional de Ingeniería

Lugar de calibración : Laboratorio N° 1 de Ensayo de Materiales " Ing. Manuel Gonzales de la Cotera "
FIC - UNI. Ubicado en la Av. Túpac Amaru N° 210 Rimac - Lima.

Tipo de equipo : Máquina de Ensayo Universal N° 3

Capacidad del equipo : 1000 kN

División de escala : 0,01 kN

Marca : ZWICK ROELL

N° de serie del equipo : 204157

Código Interno UNI : MUNV-3

Tipo de indicador : DIGITAL

Procedencia : Alemania

Método de calibración : ASTM E-4 "Standard Practices for Force Verification of Testing machines"

Temp.(°C) y H.R.(%) inicial : 20.7 °C / 70%

Temp.(°C) y H.R.(%) final : 20.6 °C / 70%

Patrón de referencia : Patrón utilizado Morehouse, N° de serie C-8517, clase A, calibrado de acuerdo a la norma ASTM E74-18 Metodo B, certificado de calibración reporte N° C-8517L1820 con Trazabilidad NIST (United States National Institute of Standards & Technology).

Número de páginas : 2

Fecha de calibración : 2021-06-03

Este certificado de verificación sólo puede ser difundido sin modificaciones y en su totalidad.

Las modificaciones y extractos del certificado necesitan autorización de CELDA EIRL.
El presente certificado sin firmas y sellos carece de validez.

Sello

Fecha

Hecho por

Revisado por



2021-06-08


Vladimir Tello Torre
TECNICO DE LABORATORIO


Jorge Francisco Ramirez Japaja
INGENIERO CIVIL
Reg. del CIP N° 84286

Resultados de medición

Dirección de carga : Compresión

Indicación de fuerza de la máquina de ensayo		Indicación de fuerza en la celda patrón			Promedio	Error	Incertidumbre K=2
(%)	(kgf)	1° ascenso	2° ascenso	3° ascenso			
0	0	0	0	0	0	0.0	0.1
10	10000	9936	9978	9928	9947	0.5	0.1
20	20000	19976	19861	19958	19932	0.3	0.1
29	30000	29920	29870	29770	29853	0.5	0.1
39	40000	39845	39887	39706	39813	0.5	0.1
49	50000	49751	49775	49723	49750	0.5	0.1
59	60000	60011	59741	59611	59788	0.4	0.1
69	70000	69975	70002	69911	69963	0.1	0.1
78	80000	79820	79767	79779	79789	0.3	0.1
88	90000	89702	89655	89661	89673	0.4	0.1
98	100000	99695	99676	99688	99686	0.3	0.1

Incertidumbre

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la Incertidumbre Expandida de medición, que resulta de multiplicar la Incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$ y ha sido determinada de acuerdo a la "Guía para la expresión de la Incertidumbre en la medición".

Notas

El usuario está obligado a tener el equipo verificado en intervalos apropiados de tiempo de acuerdo al uso, mantenimiento y conservación que este expuesto.

El equipo se encuentra calibrado.



ANEXO 05: RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

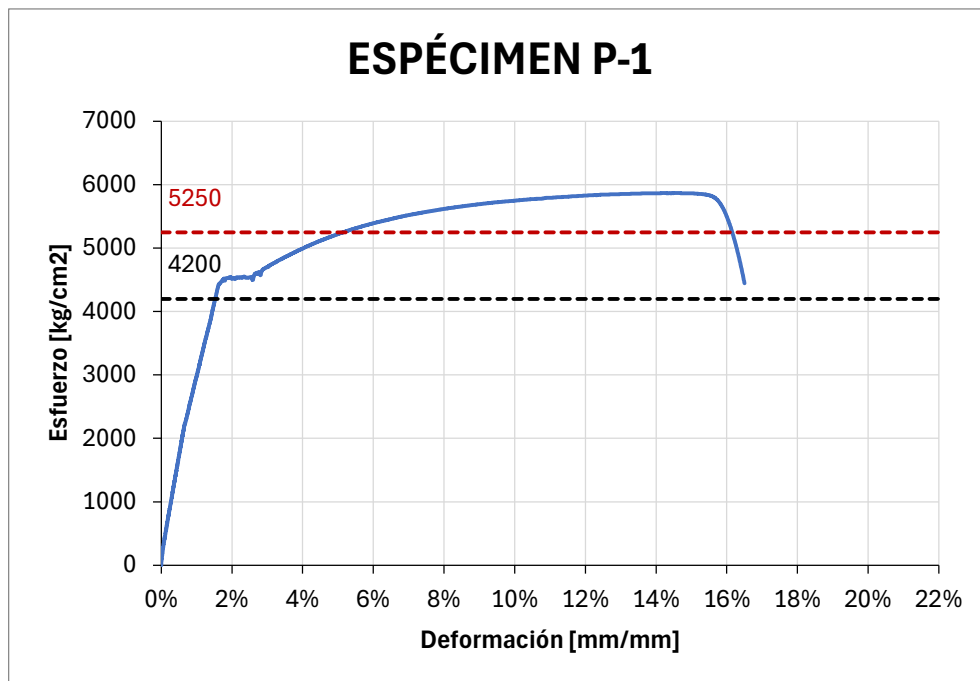
ESPÉCIMEN : P-1
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 600.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 12.7 mm
ÁREA NOMINAL : 129 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 7566 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 5865 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{y0}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{y0}) : 1.397
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.165 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la zona central

ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

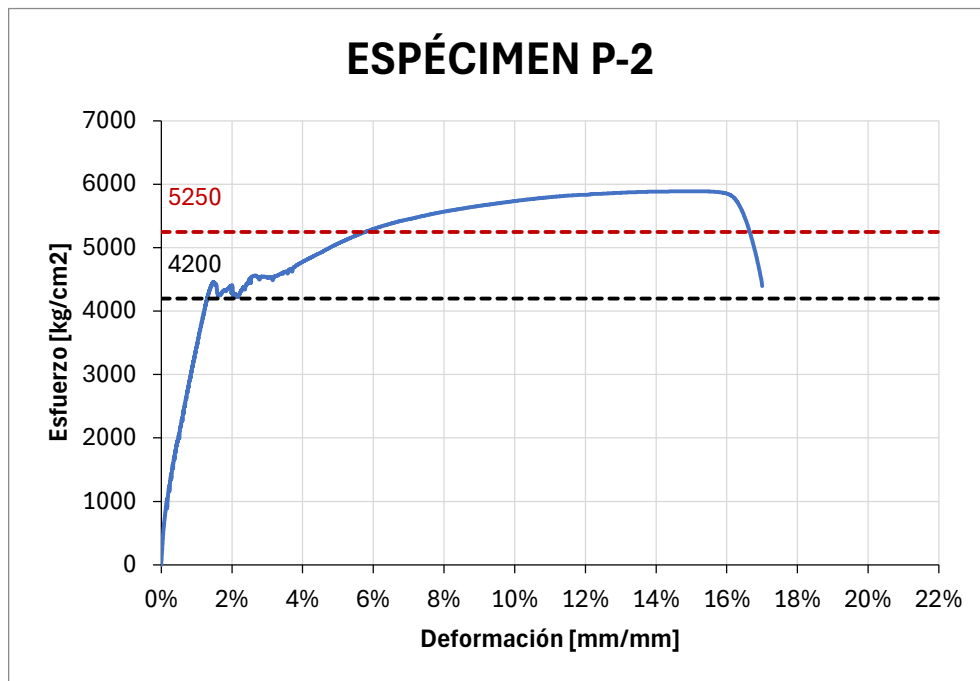
ESPÉCIMEN : P-2
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 600.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 12.7 mm
ÁREA NOMINAL : 129 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 7595 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 5888 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{yo}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{yo}) : 1.402
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.170 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la zona central

ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

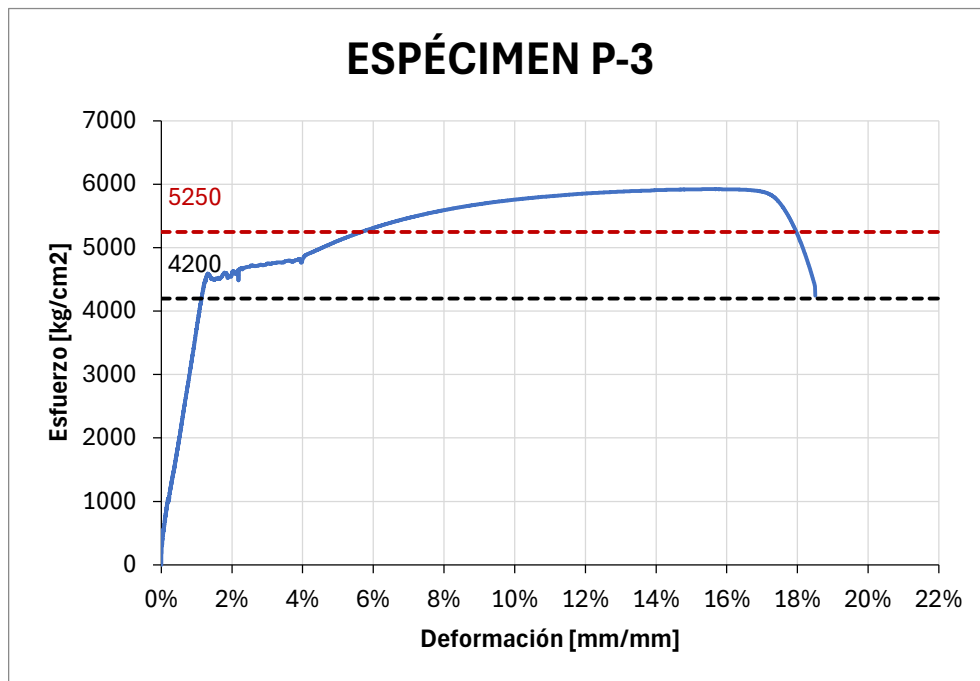
ESPÉCIMEN : P-3
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 600.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 15.9 mm
ÁREA NOMINAL : 199 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 11784 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 5922 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{y0}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{y0}) : 1.410
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.185 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la zona central

ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

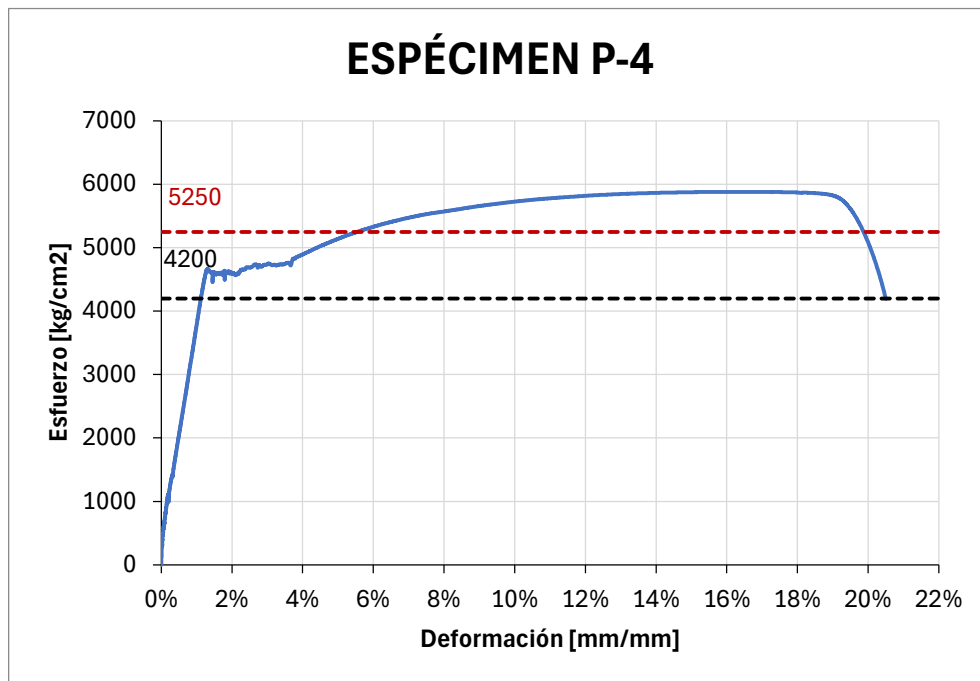
ESPÉCIMEN : P-4
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 600.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 15.9 mm
ÁREA NOMINAL : 199 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 11701 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 5880 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{y0}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{y0}) : 1.400
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.205 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la zona central

ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

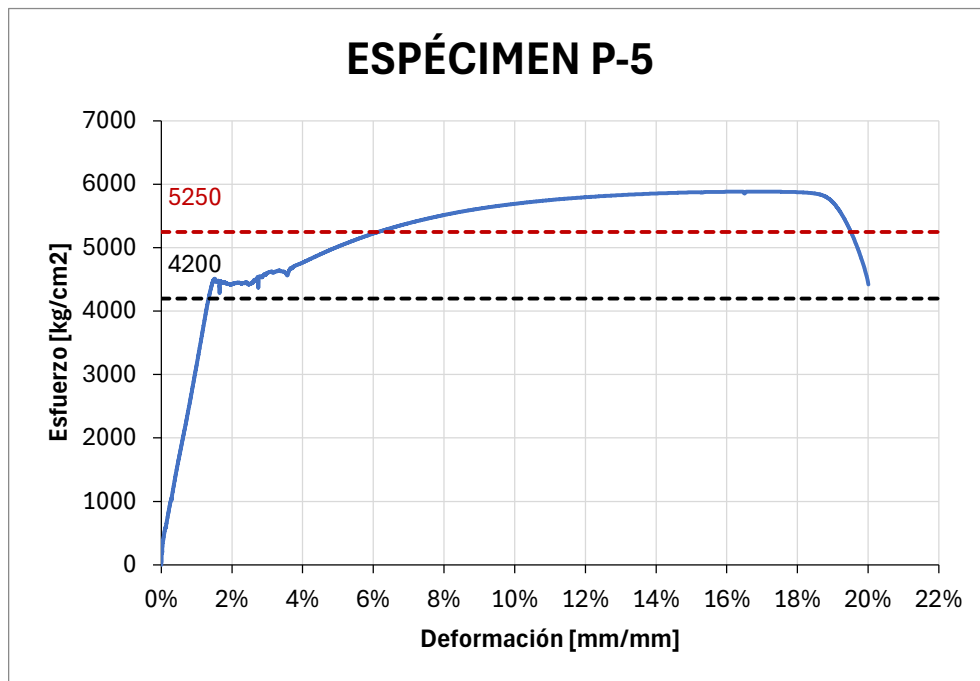
ESPÉCIMEN : P-5
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 600.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 19.1 mm
ÁREA NOMINAL : 284 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 16723 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 5888 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{y0}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{y0}) : 1.402
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.200 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la zona central

ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

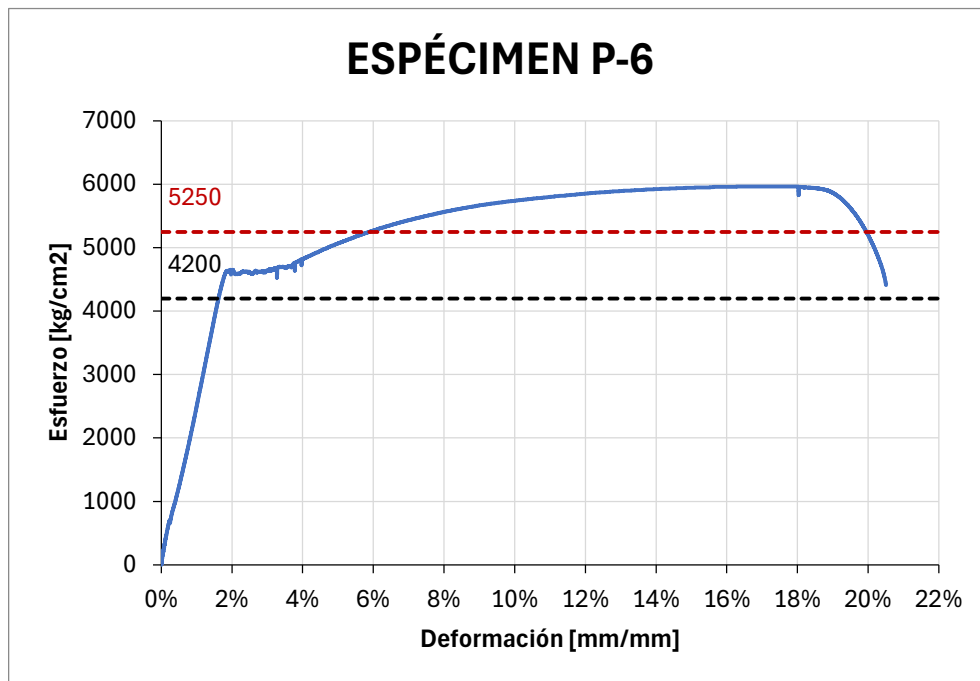
ESPÉCIMEN : P-6
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 600.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 19.1 mm
ÁREA NOMINAL : 284 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 16951 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 5969 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{yo}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{yo}) : 1.421
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.205 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la zona central

ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

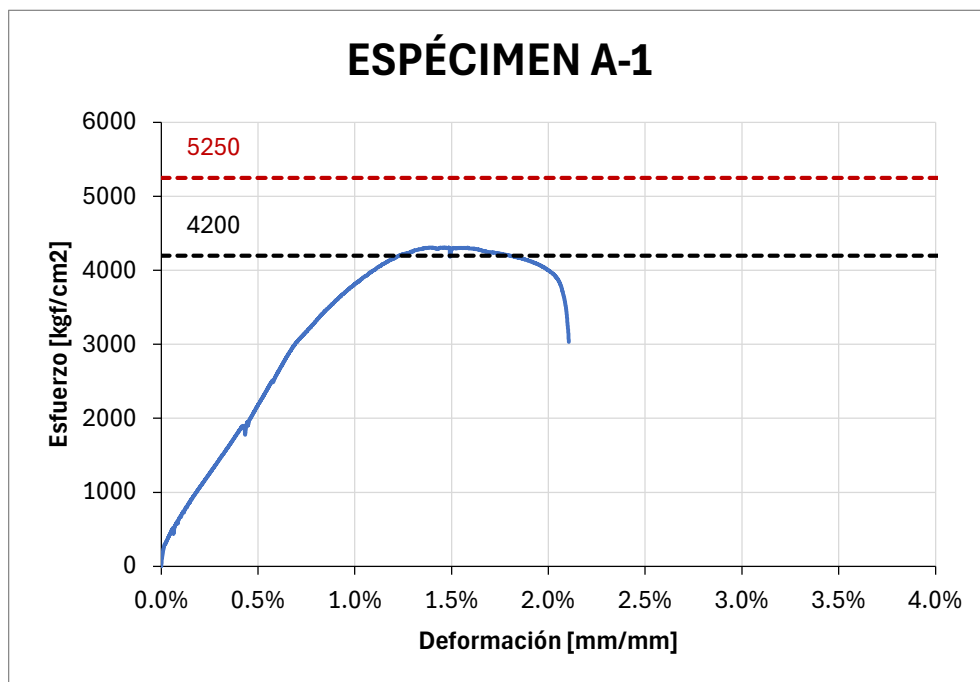
ESPÉCIMEN : A-1
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 610.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 12.7 mm
ÁREA NOMINAL : 129 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 5560 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 4310 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{yo}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{yo}) : 1.026
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.021 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la interior del conector mecánico



ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

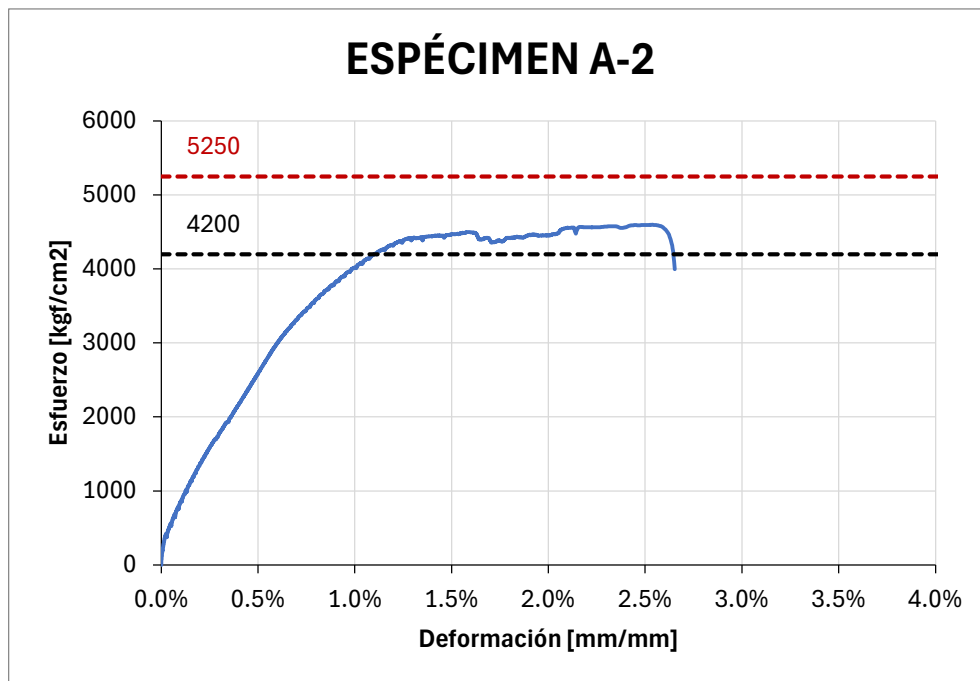
ESPÉCIMEN : A-2
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 610.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 12.7 mm
ÁREA NOMINAL : 129 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 5929 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 4596 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{yo}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{yo}) : 1.094
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.027 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la interior del conector mecánico



ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

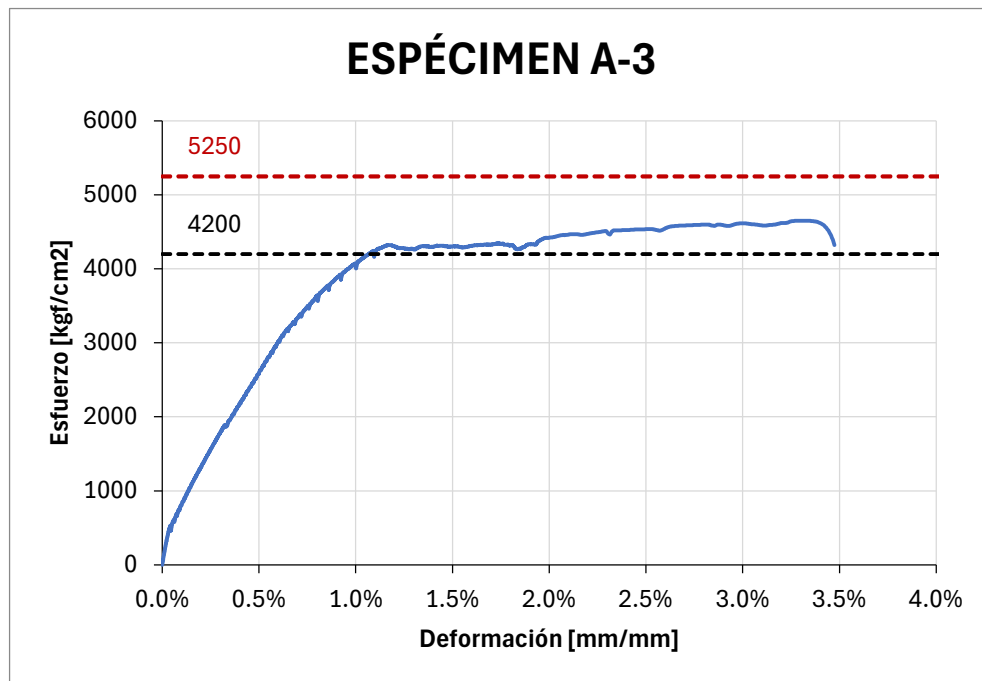
ESPÉCIMEN : A-3
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 610.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 12.7 mm
ÁREA NOMINAL : 129 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 5997 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 4649 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{y0}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{y0}) : 1.107
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.035 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la interior del conector mecánico



ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

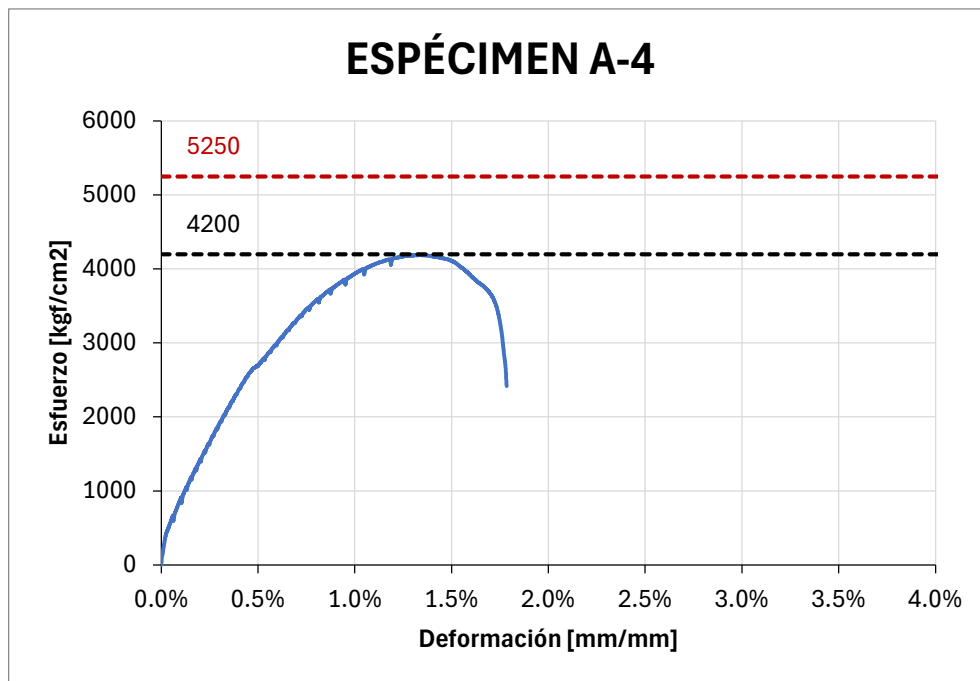
ESPÉCIMEN : A-4
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 610.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 12.7 mm
ÁREA NOMINAL : 129 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 5404 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 4189 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{yo}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{yo}) : 0.997
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.018 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la interior del conector mecánico



ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

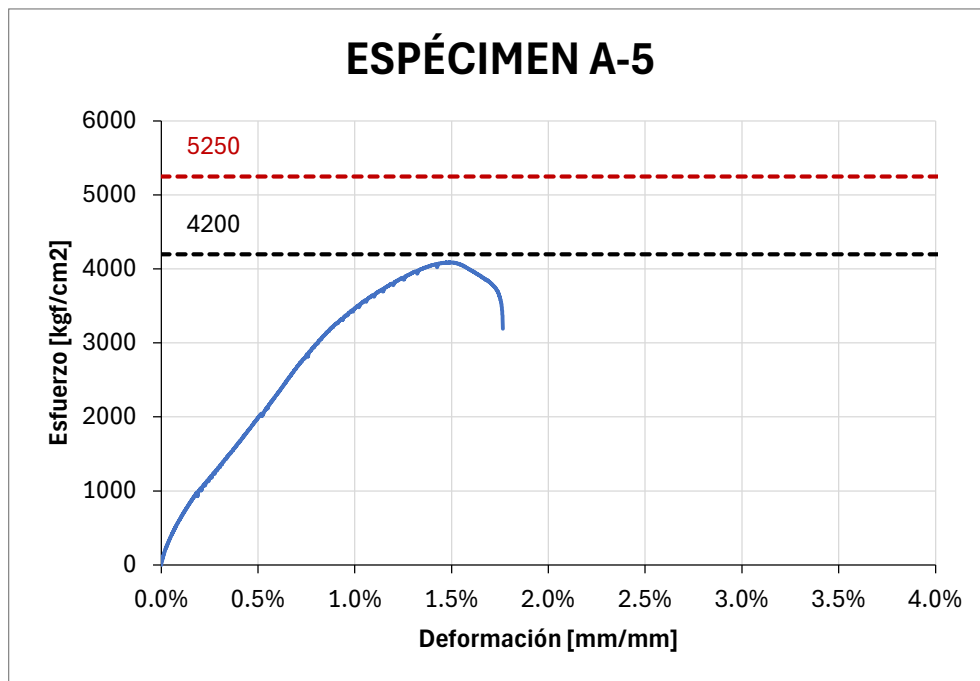
ESPÉCIMEN : A-5
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 610.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 12.7 mm
ÁREA NOMINAL : 129 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 5276 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 4090 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{y0}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{y0}) : 0.974
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.018 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la interior del conector mecánico



ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

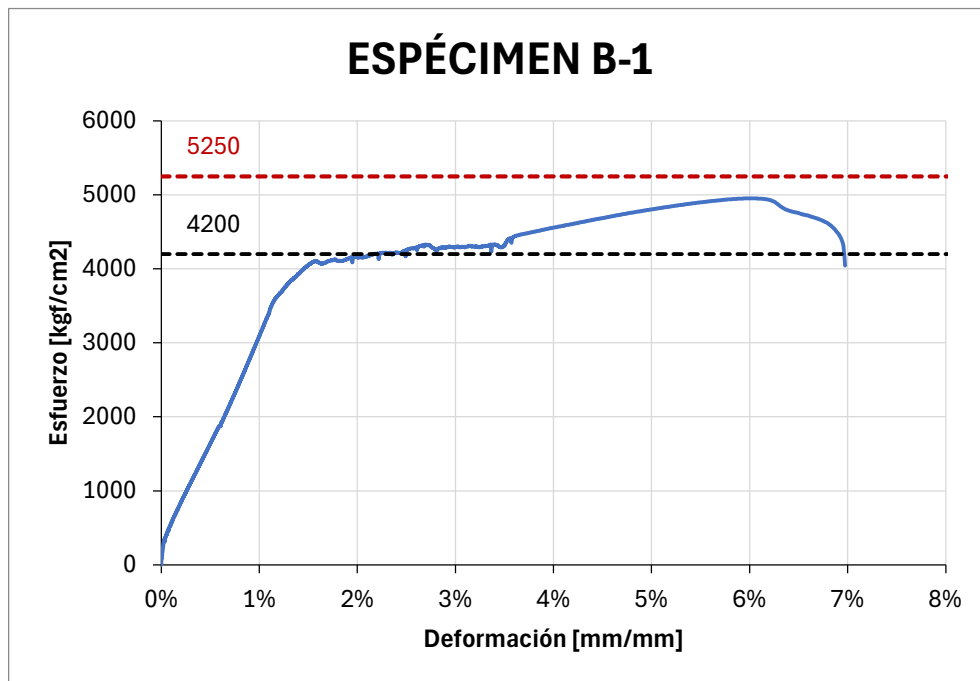
ESPÉCIMEN : B-1
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 610.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 15.9 mm
ÁREA NOMINAL : 199 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 9854 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 4952 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{yo}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{yo}) : 1.179
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.070 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la interior del conector mecánico



ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

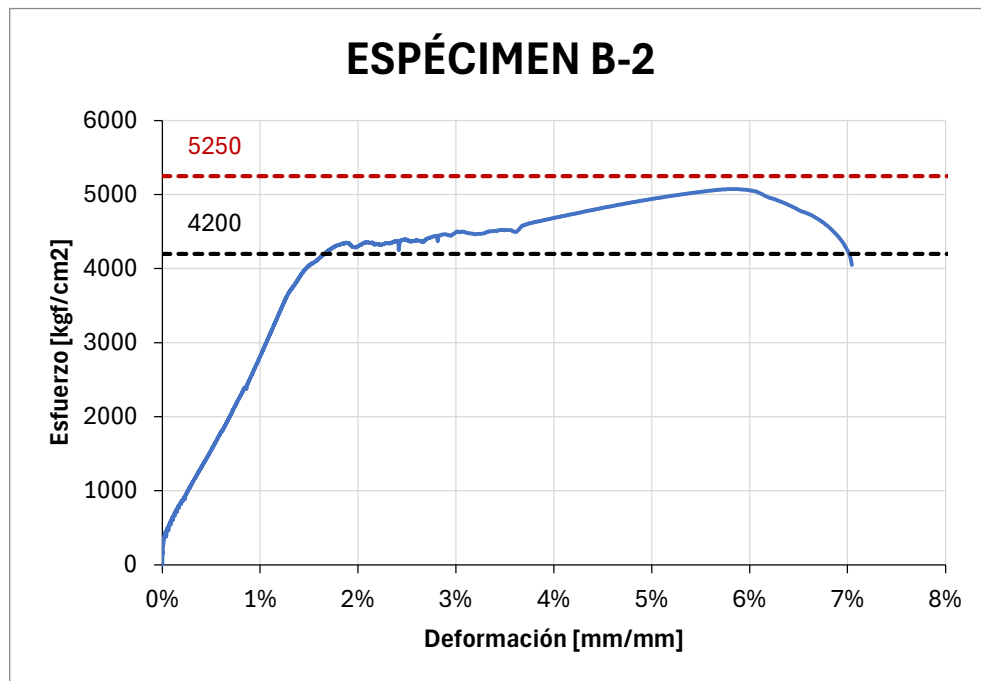
ESPÉCIMEN : B-2
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 610.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 15.9 mm
ÁREA NOMINAL : 199 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 10100 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 5075 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{yo}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{yo}) : 1.208
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.070 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la interior del conector mecánico



ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

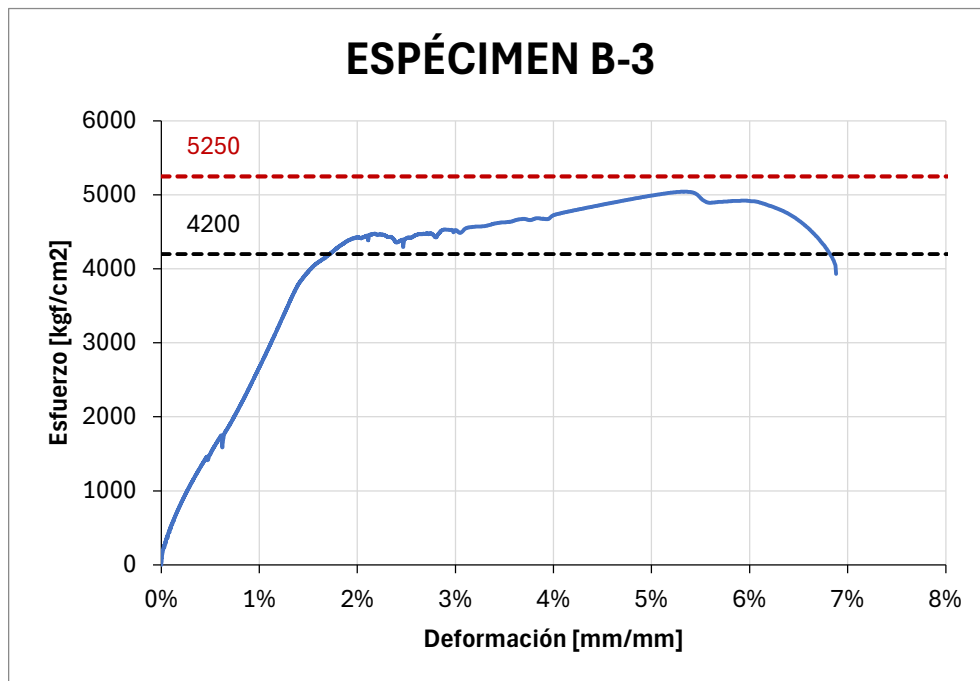
ESPÉCIMEN : B-3
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 610.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 15.9 mm
ÁREA NOMINAL : 199 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 10034 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 5042 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{yo}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{yo}) : 1.200
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.069 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la interior del conector mecánico



ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

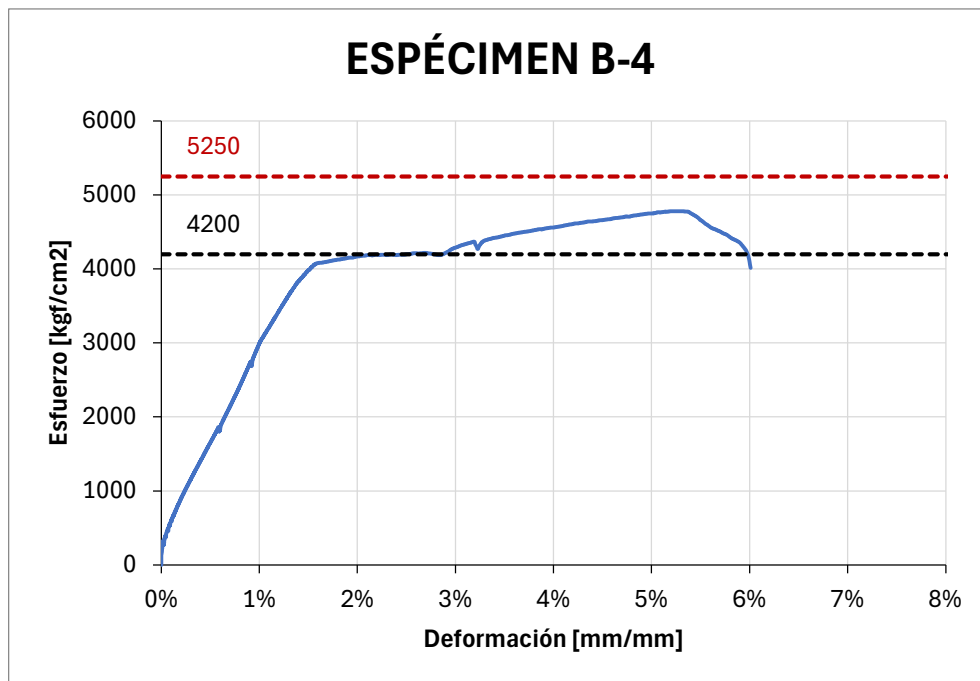
ESPÉCIMEN : B-4
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 610.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 15.9 mm
ÁREA NOMINAL : 199 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 9501 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 4774 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{yo}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{yo}) : 1.137
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.060 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la interior del conector mecánico



ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

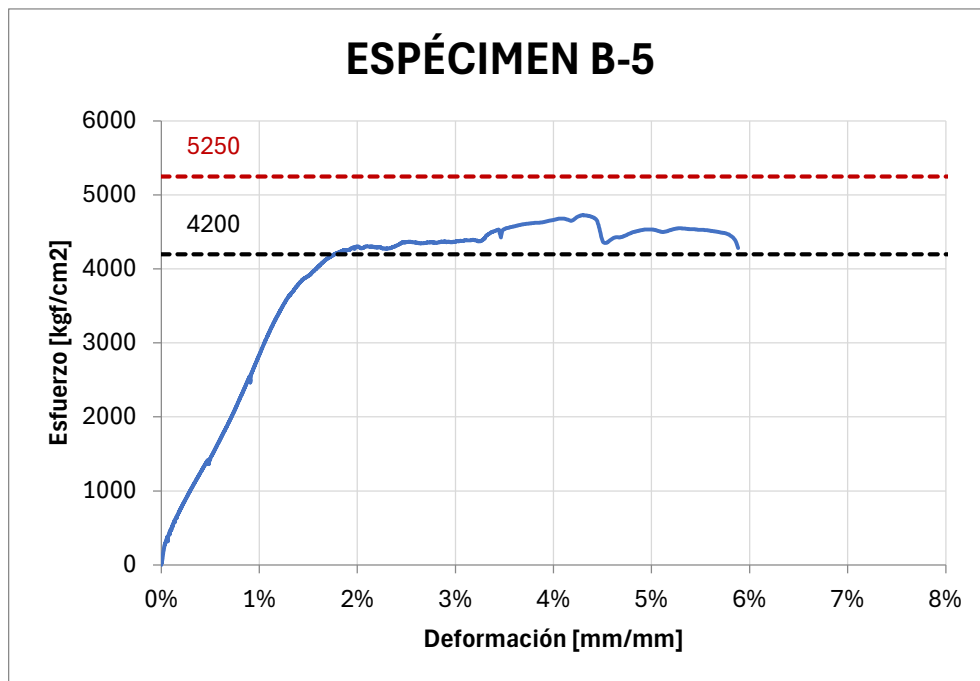
ESPÉCIMEN : B-5
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 610.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 15.9 mm
ÁREA NOMINAL : 199 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 9407 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 4727 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{yo}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{yo}) : 1.125
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.059 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la interior del conector mecánico



ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

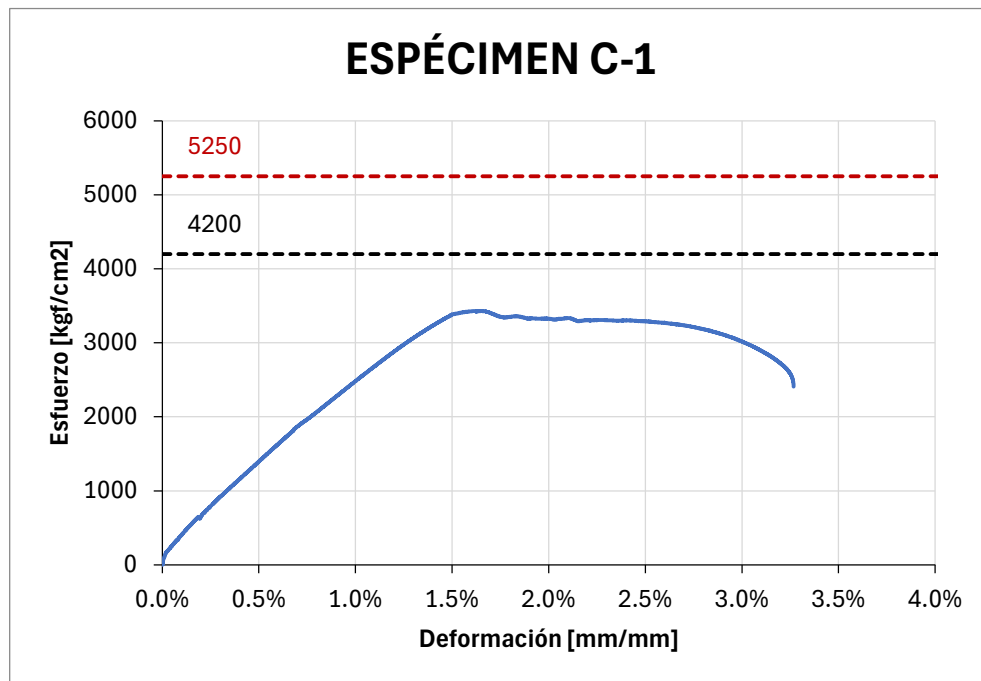
ESPÉCIMEN : C-1
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 610.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 19.1 mm
ÁREA NOMINAL : 284 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 9748 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 3432 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{y0}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{y0}) : 0.817
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.033 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la interior del conector mecánico



ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

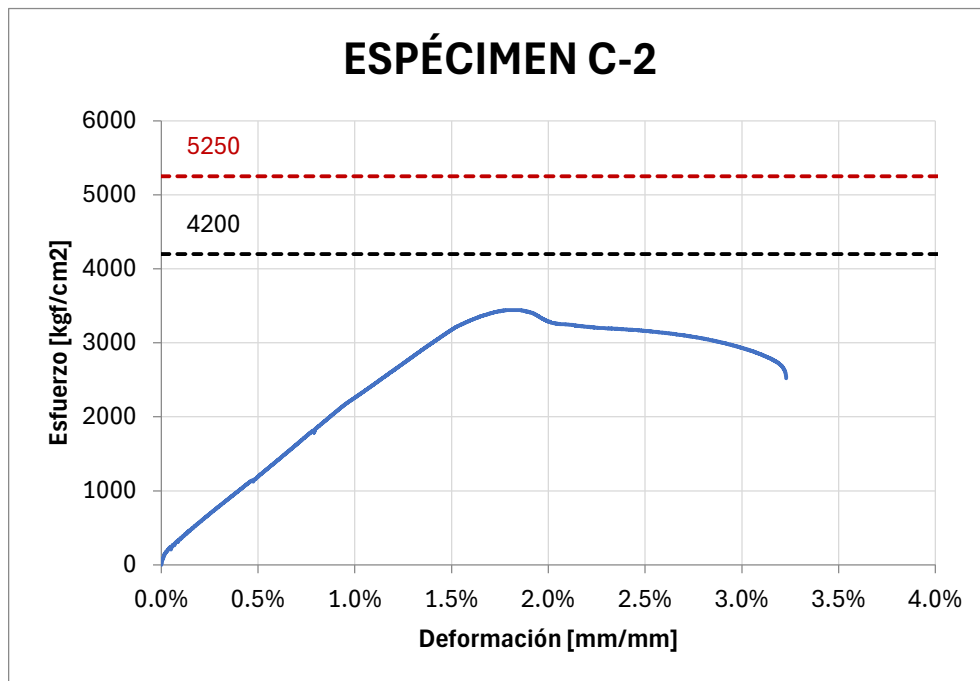
ESPÉCIMEN : C-2
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 610.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 19.1 mm
ÁREA NOMINAL : 284 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 9787 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 3446 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{y0}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{y0}) : 0.821
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.032 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la interior del conector mecánico



ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

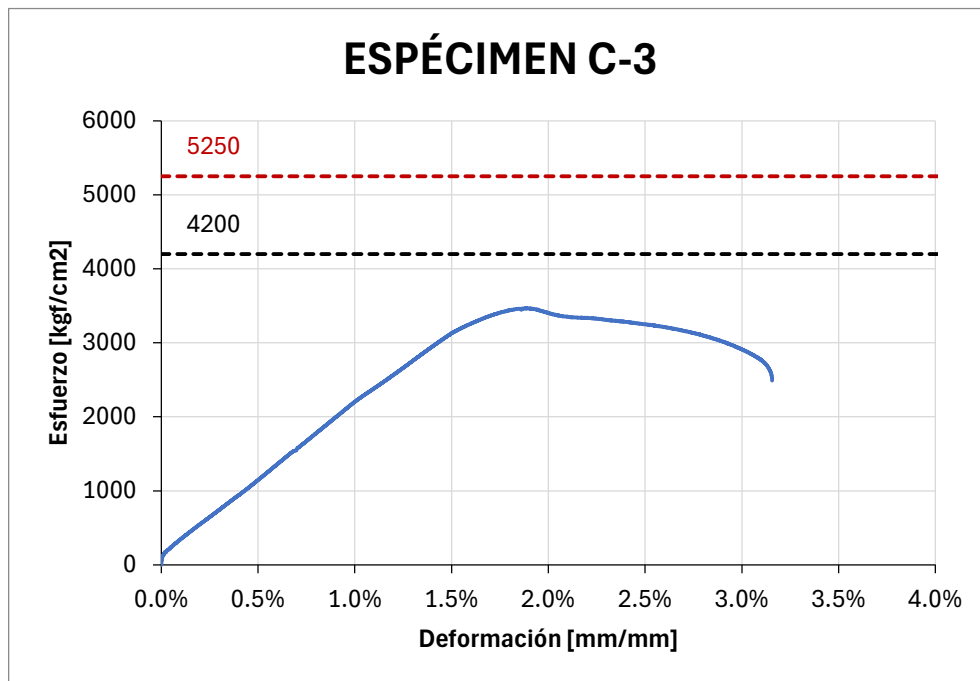
ESPÉCIMEN : C-3
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 610.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 19.1 mm
ÁREA NOMINAL : 284 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 9850 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 3468 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{y0}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{y0}) : 0.826
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.032 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la interior del conector mecánico



ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

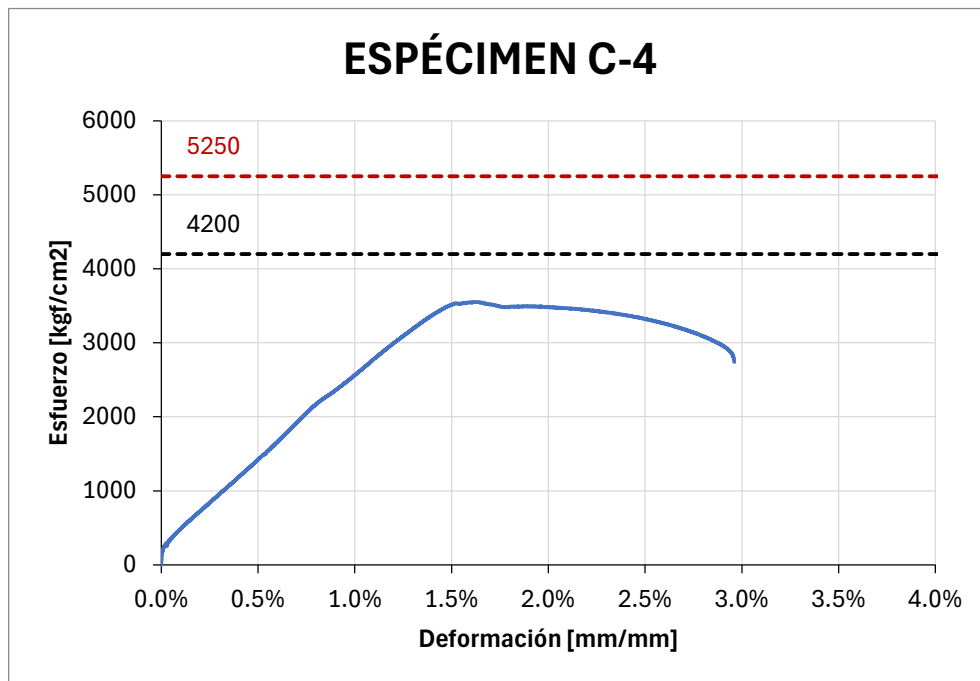
ESPÉCIMEN : C-4
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 610.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 19.1 mm
ÁREA NOMINAL : 284 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 10255 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 3611 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{yo}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{yo}) : 0.860
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.030 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la interior del conector mecánico



ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN

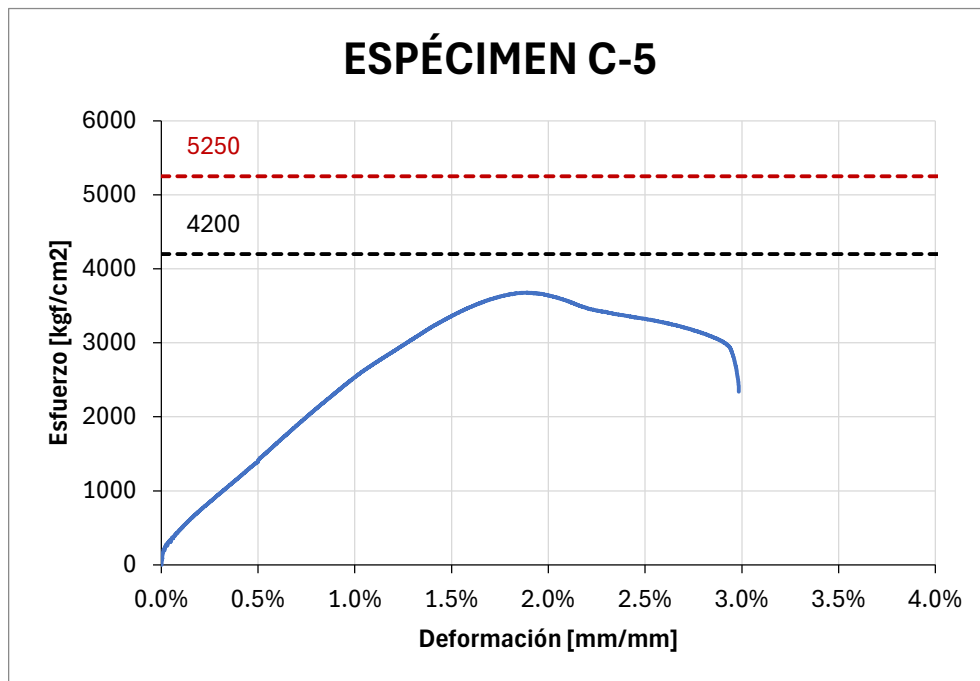
ESPÉCIMEN : C-5
EQUIPO : ZWICK-ROELL

CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DE PROBETA : 610.0 mm
DIÁMETRO NOMINAL : 19.1 mm
ÁREA NOMINAL : 284 mm²

RESULTADOS

CARGA MÁXIMA : 10456 kg
ESFUERZO MÁXIMO A TRACCIÓN (F_u) : 3682 kg/cm²
ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO (F_{y0}) : 4200 kg/cm²
FACTOR "R" (F_u/F_{y0}) : 0.877
DEFORMACIÓN MÁXIMA : 0.030 mm/mm



TIPO DE FALLA

Rotura de la varilla en la interior del conector mecánico



ANEXO 06: COTIZACIÓN DE CONECTORES MECÁNICOS COMERCIALES

Cotización N° 88012113

RAZÓN SOCIAL : CAÑARI ALTAMIRANO JULIO

FECHA : 05/07/2023

DIR. FISCAL : LOS OLIVOS -----PERU

ASESOR COMERCIAL : BEATRIZ NAVARRO

ATENCIÓN : JULIO CESAR CAÑARI ALTAMIRANO

TELÉFONO : 946 099 103

PROYECTO : VIVIENDA LOS OLIVOS

CORREO : BNAVARRO@CDVPERU.COM

TIPO DE COMPRA: COMERCIAL

PEDIDO X

ITEM	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	U.M	P.U.\$	TOTAL \$
1	10000001	CONECTOR LINXION PARA BARRAS #4 (1/2") (Con Rosca)	96.00	UND	82.54	7,923.84
2	10000001	CONECTOR LINXION PARA BARRAS #5 (5/8") (Con Rosca	136.00	UND	98.72	13,425.92
3	10000001	CONECTOR LINXION PARA BARRAS #6 (3/4) (Con Rosca)	62.00	UND	116.88	7,246.56
SUB - TOTAL:					\$	28,596.32
IGV :					\$	5,147.34
TOTAL :					\$	33,743.66

SON: TREINTA Y TRES MIL SETECIENTOS CUARENTA Y TRES Y 66 / 100 DOLARES AMERICANOS

OBSERVACIONES:

- Los precios unitarios no incluyen IGV
- Plazo de entrega:
ENTREGA EN 7 DIAS HABILES, LUEGO DE REALIZADO EL ABONO Y ENTREGA DE LAS BARRAS
- Lugar de entrega
Puesto en LIMA METROPOLITANA
- Condiciones de pago:
Contado (DEPOSITO EN CUENTA)
- Incluye el servicio de roscado
- Cliente lleva y recoge sus barras . **No incluye transporte de barras**
- Los precios corresponden a las unidades/cantidades cotizadas. Cualquier cambio será objeto de una nueva cotización.
- No incluye descarga, en la entrega de materiales.
- Los stocks solo se garantizan con OC colocada. / Pagos Contado, solo con depósito en cuenta.
- Si el tipo de compra es a pedido, no hay devolución de producto.
- Se respeta precio hasta acabar stock, pedidos adicionales vienen con precio nuevo
- Validez de la oferta: 7 días después de la fecha de emisión.
- Por coyuntura los precios de los fabricantes y de los fletes están incrementando, por tanto, los precios son válidos solo para productos en stock. Productos a pedido podrán tener cambios en sus precios
- El roscado debe ser de barras rectas, porque si es un material que viene habilitado, el proceso cambia y se encarece el costo (otro precio).
- Cantidades y características usadas para la presente cotización fueron tomadas en base a los siguientes documentos, pertenecientes al proyecto de la referencia y que fueron entregados por el solicitante por medio Comunicación vía móvil el día 09/09/2023

Transferencia en la cuenta corriente
Dólares:
BCP US\$ 194-1742673-1-66
BBVA US\$ 0011-156-0100035781-72