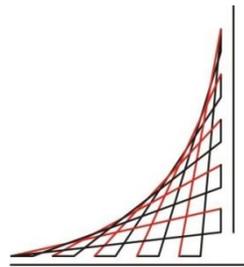


**EVALUACIÓN DEL IMPACTO ECONÓMICO DEL GRADO DE
ACERO DE REFUERZO Y DEL TIPO DE EMPALME EN EL
DISEÑO DE EDIFICIOS CON SISTEMA ESTRUCTURAL
COMBINADO CON CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA
MODERADA Y ESPECIAL**



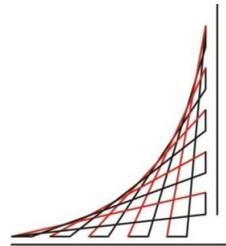
**ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO**

ANDRÉS CANTOR VICARÍA

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, COLOMBIA**

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**



**ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO**

ANDRÉS CANTOR VICARÍA

**Grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil, con
Énfasis en Estructuras**

Directora:

ING. NANCY TORRES CASTELLANOS

Línea de investigación: Comportamiento estructural

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, COLOMBIA**

2020

Agradecimientos

Es satisfactorio para mí finalizar este proyecto de grado, en esta sección aprovecho para agradecer a las personas y entidades que me apoyaron en este proceso.

A la ingeniera Nancy Torres, principal colaboradora durante este proceso, quien, con su apoyo, conocimiento y colaboración a lo largo de esta investigación, permitió el desarrollo de este proyecto de grado de maestría.

A la empresa Diseño de Soluciones, por proveer la licencia del software DC CAD, con el cual se realizó el diseño estructural y el cálculo de las cantidades de acero y conectores requeridos según cada caso de estudio, adicionalmente de la asesoría y atención prestada, sin este, no se hubiese logrado el objetivo en el tiempo estipulado.

A los profesores de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por haberme compartido sus valiosos conocimientos a lo largo de mi proceso académico, con sus enseñanzas hicieron que pudiera crecer día a día personal y profesionalmente, gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, dedicación y apoyo incondicional.

A mis padres, Orlando y Cecilia, por ser los principales promotores de mis sueños, por confiar y creer en mí, por los consejos, valores y principios que me han inculcado, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado cumplir una meta más y convertirme en lo que soy, son los mejores padres.

Resumen

Recientemente a nivel mundial se han realizado diferentes investigaciones que dan viabilidad al acero de alta resistencia (acero grado 80 y grado 100), como refuerzo interno del concreto y alternativa al acero tradicional (acero grado 60), tanto así que en la actualización del documento ACI 318-19 se incluyó el acero grado 80 para el diseño de estructuras de concreto reforzado con grado de disipación de energía moderado y especial. De igual manera, en reemplazo de los empalmes por traslapo del acero de refuerzo, en los últimos años por facilidades constructivas también se ha implementado el uso de empalmes mecánicos que permiten vincular dos tramos de barras de acero, transmitiendo eficientemente los esfuerzos de un tramo a otro.

Dado el auge que ha tenido el acero de alta resistencia, del cual ya se encuentran consignadas sus propiedades en las ecuaciones de diseño estructural; que ya se está empleando en construcciones en diferentes países a nivel mundial y del cual se espera que pronto se inicie su producción y uso en el territorio colombiano, se realizó el presente proyecto que buscaba evaluar la influencia del grado de acero de refuerzo y del tipo de empalme seleccionado en el diseño estructural de edificios en Colombia con sistema estructural combinado de muros y pórticos de concreto reforzado, por lo cual se realizó un estudio de la factibilidad económica que implica implementar en su diseño, el acero de alta resistencia grado 80 y a su vez evaluar qué tipo de empalme satisface mejor las necesidades de cada caso de estudio propuesto, verificando el impacto en las cantidades de refuerzo requerido al variar la capacidad de disipación de energía entre moderado (DMO) y especial (DES).

Esta evaluación se realizó mediante la modelación matemática de las estructuras en el software ETABS, en el cual se realizaron los diferentes modelos estructurales modificando las siguientes cinco variables de estudio: la resistencia a la fluencia del acero de refuerzo (grado 60 y grado 80), el tipo de empalme para el acero de refuerzo (empalme por traslapo

y empalmes mecánicos), la capacidad de disipación de energía (DMO y DES), las luces de diseño (6 y 9 metros) y el número de pisos (5, 10, 15 y 20 pisos). A partir del programa comercial DC CAD se realizó el diseño estructural y se obtuvieron las cantidades de acero y conectores mecánicos de los elementos primarios (vigas, columnas y muros) según cada caso de estudio. Para una mejor interpretación de los resultados se realizaron gráficas comparativas relacionadas con las cuantías de acero de refuerzo y la cantidad de conectores mecánicos, con los costos respectivos los cuales se encuentran en los anexos.

Finalmente, al analizar los resultados obtenidos en las modelaciones estructurales, se encontró que el beneficio económico del uso del acero grado 80 en el diseño estructural se ve reflejado únicamente en las vigas. Con respecto a los conectores mecánicos, los resultados muestran que estos son una alternativa viable exclusivamente en las columnas. En relación con la capacidad de disipación de energía, los sobrecostos estimados fueron relativamente bajos al diseñar con capacidad de energía especial respecto a capacidad moderada, por lo cual resulta favorable diseñar con DES al obtener un mejor comportamiento estructural, brindando mayor confinamiento y detallado estructural cumpliendo los requisitos estipulados en los códigos de diseño estructural.

Contenido

	Pág.
Lista de figuras.....	XII
Lista de tablas	XVIII
Introducción	1
1. Marco teórico.....	5
1.1 Empalmes mecánicos.....	8
1.1.1 Conector extruido.....	8
1.1.2 Conector de tornillo	9
1.1.3 Conector roscado en barra.....	10
1.2 Definición sistema estructural	10
1.3 Requisitos normativos según el grado de disipación de energía y grado de acero escogidos	10
1.3.1 Comparación de los requerimientos para alcanzar el grado de disipación de energía escogido.....	11
1.3.2 Comparación de los requerimientos asociados a la resistencia a la fluencia del acero	17
2. Estado del arte.....	21
2.1 Caracterización acero grado 80	23
3. Objetivos.....	25
3.1 Objetivo general:.....	25
3.2 Objetivos específicos:.....	25
4. Metodología	26
4.1 Alcance del proyecto	27
4.2 Definición del sistema de entrepiso.....	29
4.3 Avalúo de cargas	30
4.3.1 Edificación tipo A.....	30
4.3.2 Edificación tipo B.....	30
4.4 Definición de escenarios de análisis estructural.....	31
4.4.1 Edificación tipo A – 5 pisos	32
4.4.2 Edificación tipo A – 10 pisos.....	33
4.4.3 Edificación tipo A – 15 pisos.....	34
4.4.4 Edificación tipo A – 20 pisos.....	35

4.4.5	Edificación tipo B – 5 pisos	36
4.4.6	Edificación tipo B – 10 pisos	37
4.4.7	Edificación tipo B – 15 pisos	38
4.4.8	Edificación tipo B – 20 pisos	39
4.5	Diseño estructural	40
5.	Resultados	41
6.	Análisis de datos	55
6.1	Estimación de los costos a partir de la cantidad de acero y conectores mecánicos requeridos según el caso de estudio.....	57
6.2	Análisis del efecto del tipo de empalme utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados	67
6.2.1	Análisis del efecto del tipo de empalme utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en las edificaciones tipo A	61
6.2.2	Análisis del efecto del tipo de empalme utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en las edificaciones tipo B	67
6.3	Análisis del efecto del grado de disipación de energía utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos.	68
6.4	Análisis del efecto del grado del acero de refuerzo utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados.	81
6.4.1	Análisis del efecto del grado del acero de refuerzo utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en edificaciones tipo A con empalmes por traslapo.....	78
6.4.2	Análisis del efecto del grado del acero de refuerzo utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en edificaciones tipo A con empalmes mecánicos.	84
6.4.3	Análisis del efecto del grado del acero de refuerzo utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en edificaciones tipo B con empalmes por traslapo.....	90
6.4.4	Análisis del efecto del grado del acero de refuerzo utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en edificaciones tipo B con empalmes mecánicos.	96
6.5	Verificación de resultados	102
7.	Conclusiones y recomendaciones	109
7.1	Conclusiones.....	109
7.2	Recomendaciones.....	110
	Bibliografía	112
	Anexo 1: Análisis de datos.....	115
A.1.1	Estimación de los costos a partir de la cantidad de acero y conectores mecánicos requeridos según el caso de estudio.....	115
A.1.2	Análisis del efecto del tipo de empalme utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados	117
A.1.3	Análisis del efecto del grado de disipación de energía utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos	119

A.1.4 Análisis del efecto del grado del acero de refuerzo utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados..... 120

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Conector extruido.....	9
Figura 1-2: Conector de tornillo.....	9
Figura 1-3: Conector roscado.....	10
Figura 2-1: Recomendaciones propiedades del acero grado 80	24
Figura 4-1: Identificación elementos estructurales edificación tipo A - 5 pisos	32
Figura 4-2: Identificación elementos estructurales edificación tipo A - 10 pisos	33
Figura 4-3: Identificación elementos estructurales edificación tipo A - 15 pisos	34
Figura 4-4: Identificación elementos estructurales edificación tipo A - 20 pisos	35
Figura 4-5: Identificación elementos estructurales edificación tipo B - 5 pisos	36
Figura 4-6: Identificación elementos estructurales edificación tipo B - 10 pisos	37
Figura 4-7: Identificación elementos estructurales edificación tipo B - 15 pisos	38
Figura 4-8: Identificación elementos estructurales edificación tipo B - 20 pisos	39
Figura 5-1: Cantidad de acero requerido en vigas, edificaciones tipo A con empalme por traslapo.....	42
Figura 5-2: Cantidad de acero requerido en columnas, edificaciones tipo A con empalme por traslapo.....	42
Figura 5-3: Cantidad de acero requerido en muros, edificaciones tipo A con empalme por traslapo.....	43
Figura 5-4: Cantidad total de acero requerido, edificaciones tipo A con empalme.....	43
Figura 5-5: Cantidad de acero requerido en vigas, edificaciones tipo A con empalme por conectores mecánicos	45
Figura 5-6: Cantidad de acero requerido en columnas, edificaciones tipo A con empalme por conectores mecánicos	45
Figura 5-7: Cantidad de acero requerido en muros, edificaciones tipo A con empalme por conectores mecánicos	46
Figura 5-8: Cantidad total de acero requerido, edificaciones tipo A con empalme por conectores mecánicos	46
Figura 5-9: Cantidad de acero requerido en vigas, edificaciones tipo B con empalme por traslapo.....	48
Figura 5-10: Cantidad de acero requerido en columnas, edificaciones tipo B con empalme por traslapo.....	48
Figura 5-11: Cantidad de acero requerido en muros, edificaciones tipo B con empalme por traslapo.....	49

Figura 5-12: Cantidad total de acero requerido, edificaciones tipo B con empalme por traslapo	49
Figura 5-13: Cantidad de acero requerido en vigas, edificaciones tipo B con empalme por conectores mecánicos.....	51
Figura 5-14: Cantidad de acero requerido en columnas, edificaciones tipo B con empalme por conectores mecánicos.....	51
Figura 5-15: Cantidad de acero requerido en muros, edificaciones tipo B con empalme por conectores mecánicos.....	52
Figura 5-16: Cantidad total de acero requerido, edificaciones tipo B con empalme por conectores mecánicos.....	52
Figura 6-1: Costo en millones de pesos en vigas, edificaciones tipo A con empalme por traslapo	58
Figura 6-2: Costo en millones de pesos en columnas, edificaciones tipo A con empalme por traslapo	59
Figura 6-3: Costo en millones de pesos en muros, edificaciones tipo A con empalme por traslapo	59
Figura 6-4: Costo total en millones de pesos, edificaciones tipo A con empalme por traslapo	60
Figura 6-5: Costo en millones de pesos en vigas, edificaciones tipo A con empalme por conectores mecánicos.....	61
Figura 6-6: Costo en millones de pesos en columnas, edificaciones tipo A con empalme por conectores mecánicos.....	61
Figura 6-7: Costo en millones de pesos en muros, edificaciones tipo A con empalme por conectores mecánicos.....	62
Figura 6-8: Costo total en millones de pesos, edificaciones tipo A con empalme por conectores mecánicos.....	62
Figura 6-9: Costo en millones de pesos en vigas, edificaciones tipo B con empalme por traslapo	63
Figura 6-10: Costo en millones de pesos en columnas, edificaciones tipo B con empalme por traslapo	63
Figura 6-11: Costo en millones de pesos en muros, edificaciones tipo B con empalme por traslapo	64
Figura 6-12: Costo total en millones de pesos, edificaciones tipo B con empalme por traslapo	64
Figura 6-13: Costo en millones de pesos en vigas, edificaciones tipo B con empalme por conectores mecánicos.....	65
Figura 6-14: Costo en millones de pesos en columnas, edificaciones tipo B con empalme por conectores mecánicos.....	66
Figura 6-15: Costo en millones de pesos en muros, edificaciones tipo B con empalme por conectores mecánicos.....	66
Figura 6-16: Costo total en millones de pesos, edificaciones tipo B con empalme por conectores mecánicos.....	67
Figura 6-17: Variación en las cantidades de acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo A, 5 pisos	68

Figura 6-18: Variación del costo estimado del acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo A, 5 pisos.....	69
Figura 6-19: Variación en las cantidades de acero requerido con empalmes /mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo A, 10 pisos.....	69
Figura 6-20: Variación del costo estimado del acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo A, 10 pisos.....	70
Figura 6-21: Variación en las cantidades de acero requerido con empalmes por conectores mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo A, 15 pisos	70
Figura 6-22: Variación del costo estimado del acero requerido, con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo A, 15 pisos.....	71
Figura 6-23: Variación en las cantidades de acero requerido con empalmes por conectores mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo A, 20 pisos	71
Figura 6-24: Variación del costo estimado del acero requerido, con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo A, 20 pisos.....	72
Figura 6-25: Variación en las cantidades de acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo B, 5 pisos.....	74
Figura 6-26: Variación del costo estimado del acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo B, 5 pisos.....	75
Figura 6-27: Variación en las cantidades de acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo B, 10 pisos.....	75
Figura 6-28: Variación del costo estimado del acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo B, 10 pisos.....	76
Figura 6-29: Variación en las cantidades de acero requerido con empalmes por conectores mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo B, 15 pisos	76
Figura 6-30: Variación del costo estimado del acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo B, 15 pisos.....	77
Figura 6-31: Variación en las cantidades de acero requerido con empalmes por conectores mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo B, 20 pisos	77
Figura 6-32: Variación del costo estimado del acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo B, 20 pisos.....	78
Figura 6-33: Variación del costo total estimado en las estructuras “DES” con respecto a las estructuras “DMO”, edificaciones tipo A con empalmes por traslapo	81
Figura 6-34: Variación del costo total estimado en las estructuras “DES” con respecto a las estructuras “DMO”, edificaciones tipo A con empalmes mecánicos.....	81
Figura 6-35: Variación del costo total estimado en las estructuras “DES” con respecto a las estructuras “DMO”, edificaciones tipo B con empalmes por traslapo	82
Figura 6-36: Variación del costo total estimado en las estructuras “DES” con respecto a las estructuras “DMO”, edificaciones tipo B con empalmes mecánicos.....	82

Figura 6-37: Variación en las cantidades de acero requerido en vigas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes por traslapo	85
Figura 6-38: Variación del costo estimado del acero requerido en vigas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes por traslapo	85
Figura 6-39: Variación en las cantidades de acero requerido en columnas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes por traslapo	86
Figura 6-40: Variación del costo estimado del acero requerido en columnas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes por traslapo	86
Figura 6-41: Variación en las cantidades de acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes por traslapo	87
Figura 6-42: Variación del costo estimado del acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes por traslapo	87
Figura 6-43: Variación en las cantidades de acero total requerido en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes por traslapo	88
Figura 6-44: Variación del costo total estimado del acero requerido en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes por traslapo	88
Figura 6-45: Variación en las cantidades de acero requerido en vigas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes mecánicos	91
Figura 6-46: Variación del costo estimado del acero requerido en vigas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes mecánicos	91
Figura 6-47: Variación en las cantidades de acero requerido en columnas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes mecánicos	92
Figura 6-48: Variación del costo estimado del acero requerido en columnas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes mecánicos	92
Figura 6-49: Variación en las cantidades de acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes mecánicos	93
Figura 6-50: Variación del costo estimado del acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes mecánicos	93
Figura 6-51: Variación en las cantidades de acero requerido en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes mecánicos	94
Figura 6-52: Variación del costo estimado del acero requerido en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes mecánicos .	94

Figura 6-53: Variación en las cantidades de acero requerido en vigas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes por traslapo.....	97
Figura 6-54: Variación del costo estimado del acero requerido en vigas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes por traslapo.....	97
Figura 6-55: Variación en las cantidades de acero requerido en columnas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes por traslapo.....	98
Figura 6-56: Variación del costo estimado del acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes por traslapo.....	98
Figura 6-57: Variación en las cantidades de acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes por traslapo.....	99
Figura 6-58: Variación del costo estimado del acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes por traslapo.....	99
Figura 6-59: Variación en las cantidades de acero requerido en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes por traslapo.....	100
Figura 6-60: Variación del costo estimado del acero requerido en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes por traslapo.....	100
Figura 6-61: Variación en las cantidades de acero requerido en vigas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes mecánicos.....	103
Figura 6-62: Variación del costo estimado del acero requerido en vigas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes mecánicos.....	103
Figura 6-63: Variación en las cantidades de acero requerido en columnas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes mecánicos.....	104
Figura 6-64: Variación del costo estimado del acero requerido en columnas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes mecánicos.....	104
Figura 6-65: Variación en las cantidades de acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes mecánicos.....	105
Figura 6-66: Variación del costo estimado del acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes mecánicos.....	105
Figura 6-67: Variación en las cantidades de acero requerido en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes mecánicos.....	106

Figura 6-68: Variación del costo estimado del acero requerido en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes mecánicos 106

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Comparación de los requerimientos asociados a DMO y DES, según el Reglamento NSR-10.....	11
Tabla 1-2: Comparación de los requerimientos asociados a la resistencia a la fluencia del acero, según el Reglamento NSR-10 y ACI 318-19	17
Tabla 4-1: Delimitación de las variables	27
Tabla 4-2: Delimitación resistencia del concreto f'_c para muros y columnas.....	28
Tabla 4-3: Delimitación resistencia del concreto f'_c para el sistema de entrepiso.....	28
Tabla 4-4: Tabla resumen modelos matemáticos.....	29
Tabla 4-5: Dimensionamiento y propiedades sísmicas edificación tipo A - 5 pisos.....	32
Tabla 4-6: Dimensionamiento y propiedades sísmicas edificación tipo A - 10 pisos.....	33
Tabla 4-7: Dimensionamiento y propiedades sísmicas edificación tipo A - 15 pisos.....	34
Tabla 4-8: Dimensionamiento y propiedades sísmicas edificación tipo A - 20 pisos.....	35
Tabla 4-9: Dimensionamiento y propiedades sísmicas edificación tipo B - 5 pisos.....	36
Tabla 4-10: Dimensionamiento y propiedades sísmicas edificación tipo B - 10 pisos.....	37
Tabla 4-11: Dimensionamiento y propiedades sísmicas edificación tipo B - 15 pisos.....	38
Tabla 4-12: Dimensionamiento y propiedades sísmicas edificación tipo B - 20 pisos.....	39
Tabla 5-1: Cantidades de acero requerido en los elementos primarios de las edificaciones tipo A con empalmes por traslapo.....	44
Tabla 5-2: Cantidades de acero y conectores mecánicos requeridos en los elementos primarios de las edificaciones tipo A con empalmes por conectores mecánicos	47
Tabla 5-3: Cantidades de acero requerido en los elementos primarios de las edificaciones tipo B con empalmes por traslapo.....	50
Tabla 5-4: Cantidades de acero y conectores mecánicos requeridos en los elementos primarios de las edificaciones tipo B con empalmes por conectores mecánicos	53
Tabla 6-1: Costo conectores mecánicos según diámetro de barra.....	58
Tabla A-1: Costos estimados edificación tipo A con empalmes por traslapo	115
Tabla A-2: Costos estimados edificación tipo A con empalmes mecánicos.....	115
Tabla A-3: Costos estimados edificación tipo B con empalmes por traslapo	116
Tabla A-4: Costos estimados edificación tipo B con empalmes mecánicos.....	117
Tabla A-5: Análisis de resultados de la variación porcentual entre empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo edificación tipo A.....	118
Tabla A-6: Análisis de resultados de la variación porcentual entre empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo edificación tipo B.....	118

Tabla A-7: Análisis de resultados de la variación porcentual entre capacidad disipación de energía moderada con respecto a especial edificación tipo A con empalmes por traslapo y mecánicos	119
Tabla A-8: Análisis de resultados de la variación porcentual entre capacidad disipación de energía moderada con respecto a especial edificación tipo B con empalmes por traslapo y mecánicos	120
Tabla A-9: Análisis de resultados de la variación porcentual entre acero grado 80 con respecto a acero grado 60 edificación tipo A con empalmes por traslapo.....	120
Tabla A-10: Análisis de resultados de la variación porcentual entre acero grado 80 con respecto a acero grado 60 edificación tipo A con empalmes mecánicos	121
Tabla A-11: Análisis de resultados de la variación porcentual entre acero grado 80 con respecto a acero grado 60 edificación tipo B con empalmes por traslapo.....	121
Tabla A-12: Análisis de resultados de la variación porcentual entre acero grado 80 con respecto a acero grado 60 edificación tipo B con empalmes mecánicos	122

Introducción

La ingeniera estructural tiene como objeto diseñar estructuras que la sociedad necesita para su desarrollo, estas deben diseñarse y construirse cumpliendo con ciertos requisitos de seguridad, estética, sostenibilidad y economía. Aunque la seguridad constituye el primer criterio de diseño, los costos de los materiales a utilizar, las técnicas y las prácticas empleadas en la construcción determinan en gran medida la viabilidad del proyecto.

En Colombia, los antecedentes de la industria siderúrgica datan del siglo XX con el descubrimiento de los yacimientos de mineral de hierro en 1923 en la región de Pacho, ubicada en el departamento de Cundinamarca, lo que dio paso a la apertura de la primera siderúrgica, Ferrería de Pacho. Hacia 1948 el gobierno nacional ordenó estudios para conocer el alcance real de los yacimientos minerales del país, los resultados positivos llevaron a la expedición del decreto 3123 de 1947, a través del cual nace en Boyacá la Empresa Siderúrgica Paz del Río S.A, la cual hacia 1952 inició la construcción del alto horno, lo que permitió dinamizar la economía nacional. En el 2007, dentro del proceso de internacionalización, el grupo brasileño Votorantim Siderúrgica, adquirió el 82% de las acciones. Hacia 1981 nace Acerías Sogamoso, actualmente Siderúrgica Nacional SIDENAL S.A., la empresa tiene una capacidad de producción anual de 250.000 toneladas de acero sismorresistente y recientemente realizó una inversión de 15 millones de dólares en la optimización y modernización de sus instalaciones en Sogamoso, para potenciar la producción de barras de acero corrugadas [1].

En 2001 se consolida Diaco S.A. conformado por Siderúrgica de Boyacá, Siderúrgica del Caribe, entre otros, la cual, en 2005 con el ingreso de la multinacional Gerdau a Colombia, hoy se conoce como Gerdau Diaco, cuenta con una de sus principales plantas de producción en Tuta, Boyacá, con una capacidad de producción de 500.000 toneladas de acero anual. En el 2010 Ternium adquirió el 54% del Grupo Colombiano Ferrasa, la transacción terminó en 2015 cuando completó la adquisición del porcentaje restante, actualmente tienen cuatro plantas productivas en Colombia y está en construcción una

quinta planta en Palmar de Valera, con un estimado de producción anual de 250.000 toneladas de acero [2]. En Colombia se tiene un gran potencial de producción de acero sismorresistente el cual, al adecuar sus instalaciones, podrían satisfacer la producción de acero de refuerzo grado 80, actualmente se han realizado algunas pruebas con el fin de establecer la factibilidad de producir acero grado 80 y el costo del kilogramo de venta al público.

Desde los últimos 50 años, en la construcción en Colombia y en varios países a nivel mundial se ha utilizado como acero de refuerzo, el acero grado 60, ya que las normas de diseño como la ACI 318 establecen su utilización en todos los sistemas estructurales; además, este material se encuentra disponible con una amplia oferta en el sector de la construcción, el cual desde el año 2007 ha tenido un incremento del 61% del PIB, generando un crecimiento del 45% en el consumo de aceros largos [3], un claro indicio de la importancia del sector siderúrgico y de la construcción en el mercado colombiano. Sin embargo, a nivel mundial, en años más recientes ha existido la tendencia de usar aceros de alta resistencia como refuerzo interno de las estructuras de concreto, lo cual, en este momento es tema de diversas investigaciones que estudian el comportamiento de estructuras reforzadas con estos aceros ante diferentes sollicitaciones.

El presente trabajo de grado consistió en evaluar la influencia en la factibilidad económica del grado de acero de refuerzo, del tipo de empalme y de la capacidad de disipación de energía escogidos en el diseño estructural de edificios de concreto reforzado con sistema estructural combinado, ya que es un sistema esencial en las construcciones de mediana altura en Colombia. Para este fin, se realizó un análisis comparativo entre un grupo de modelos estructurales en los que se consideraron ciertas variables de diseño. Con los resultados obtenidos se exponen los primeros lineamientos teóricos en términos económicos del uso del acero de refuerzo grado 80 como una alternativa frente al tradicional acero de grado 60 en el diseño estructural, y adicionalmente, se brinda la influencia en el costo del uso de empalmes mecánicos en algunos de los elementos estructurales primarios, brindando información que sirva de referencia a los profesionales directamente involucrados en el proceso de diseño y construcción, para que así puedan tomar la decisión de cuál grado de acero de refuerzo y tipo empalme es el más conveniente según el proyecto que se vaya a ejecutar.

El proyecto de grado se divide en siete capítulos, en cada uno de ellos se dan los lineamientos necesarios para dar cumplimiento a los objetivos planteados. En el primero, se encuentra el marco teórico, en el cual se presentan los conceptos teóricos que se utilizaron para el desarrollo del trabajo de grado. El segundo capítulo trata el estado del arte, en el cual se exponen los antecedentes y la revisión de documentos recientes en los cuales se consignan las investigaciones relevantes con el tema en estudio. En el tercer capítulo se plantean los objetivos, los cuales se propusieron con un enfoque que abordara todas las variables de estudio propuestas. En el cuarto capítulo se describe la metodología adoptada para obtener resultados representativos de cada fase descrita, aquí se definió el alcance del proyecto, se definieron los escenarios para el análisis estructural, se precisó el sistema de entepiso, se realizaron los avalúos de cargas para cada tipo de edificación, se muestran los datos con que se analizaron los modelos y se realizó la definición de la modelación estructural. En el quinto capítulo, se exponen los resultados obtenidos. En el sexto capítulo se analizan los datos evaluando la influencia de cada variable en la tendencia de las cantidades de acero requerido, finalmente, en el último capítulo, se expresan las conclusiones y recomendaciones del estudio realizado.

1. Marco teórico

El acero de refuerzo representa cerca del 10% del peso de los materiales de las construcciones y de este dependen gran parte de la estabilidad y la sismo resistencia de la estructura. El acero de refuerzo en las estructuras de concreto tiene la función de absorber esfuerzos de tracción, de compresión, de cortante y torsión que el concreto no está en capacidad de resistir por sí mismo, además, este limita el desarrollo de fisuras y mejora tanto su resistencia como su capacidad de deformación [4]. La resistencia nominal a la fluencia del acero de refuerzo define la calidad del material y corresponde a la resistencia a los esfuerzos de tracción y compresión, los cuales en el límite de proporcionalidad son generalmente semejantes [5].

El acero es una aleación de hierro, carbono y varios elementos químicos de los que depende su resistencia, ductilidad y soldabilidad, que son los principales factores para garantizar la sismo resistencia. Una adecuada formulación hace de este un material de gran utilidad para fines estructurales. En el acero se analizan ciertas propiedades físicas básicas como la resistencia a la tracción, resistencia a la fluencia, el alargamiento y el doblado, de los cuales en las normas están estipulados sus límites. Las barras de acero vienen en un amplio número de diámetros desde la No. 2 hasta la No.18, de las cuales comercialmente suele conseguirse hasta la No. 10; las barras presentan resaltes o corrugaciones que aumentan su adherencia con el concreto impidiendo que estas se deslicen [6].

Como se mencionó anteriormente, en general, en los diseños estructurales se utilizan barras con esfuerzos de fluencia de 60 ksi (grado 60), no obstante, las barras con esfuerzos de fluencia mayores como 80 ksi (grado 80) o 100 ksi (grado 100) se han venido implementando recientemente como refuerzo interno de elementos estructurales. Sin

embargo, utilizar aceros de alta resistencia para el diseño de estructuras de concreto reforzado tiene ciertas ventajas y desventajas; algunas ventajas son:

- Disminución en la cantidad de barras de acero de refuerzo, lo cual implica descongestionar uniones de vigas – columnas.
- Disminución de la cuantía mínima en vigas según la ecuación 9.6.1.2 (b) del ACI 318-19, en la cual existe una relación inversamente proporcional entre la cuantía mínima y el grado del acero de refuerzo.
- Obtener estructuras menos pesadas, ya que se podrían utilizar vigas de menores dimensiones en ciertos casos, lo cual conlleva a un beneficio en el diseño y construcción de las cimentaciones.

Todo lo anterior se relaciona a la disminución del costo de la construcción de estas estructuras.

Por otra parte, como desventajas se tiene:

- Incremento de la longitud de desarrollo (C.21-9) y a su vez la longitud de los traslapes (C.12.15)
- Aumento en la longitud de anclaje (C.12.5)
- En estos aceros, a mayor resistencia se puede incurrir en menor ductilidad, ya que, en su producción, se incrementa el contenido de carbono en la composición química, lo cual debe ser tomado en cuenta por reglamentos de diseño sismorresistente al estudiar su comportamiento en elementos estructurales con alta demanda sísmica [7].

Por otro lado, con el continuo auge de la construcción de edificaciones en las principales ciudades de Colombia y las últimas actualizaciones normativas, los requisitos de diseño estructural son cada vez más exigentes, requiriendo una adecuada capacidad sismo resistente, funcionalidad y economía. Por lo cual, es importante tener en cuenta nuevas técnicas para optimizar los diferentes procesos constructivos que se utilizan considerando la importancia que tienen los insumos dentro de los mismos procesos en el tema económico. Generalmente, las estructuras de concreto están conformadas por elementos como vigas, columnas y muros estructurales; para reforzar la totalidad de la longitud de los

elementos estructurales, la utilización de empalmes en el proceso de armado es indispensable para lograr alcanzar las longitudes requeridas de las barras según los diseños estructurales.

El empalme por traslapo es actualmente la técnica de empalme más utilizado en los procesos constructivos en Colombia, sin embargo, este tipo de empalme, en algunos casos si no se toman las medidas apropiadas, puede provocar una serie de deficiencias tales como:

- La congestión de barras de acero que suele generar hormigueros en la masa de concreto.
- Dificultad al posicionar adecuadamente el acero de refuerzo en el proceso de armado.
- La inadecuada compactación y vibrado del concreto.
- En estructuras con grandes solicitaciones, la cuantía en elementos estructurales puede estar cercana al límite, esta relación debe ser menor al 2.5% según C.21.3.4.3, por lo que, en las zonas de traslapos, al duplicarse el refuerzo, se estaría superando la cuantía máxima. Adicionalmente, la distancia libre mínima entre barras paralelas de una capa no debe ser menor de 25 mm (C.7.6.1), esta limitación de distancia libre entre barras también se debe aplicar a la distancia libre entre un empalme por traslapo (C.7.6.4), pero por razones constructivas, estos traslapos se hacen uniendo las barras lateralmente y no se deja el espaciamiento mínimo establecido por el reglamento NSR-10.

Los empalmes mecánicos han surgido como una alternativa para solucionar los problemas mencionados anteriormente, en especial en las construcciones civiles las cuales se han ido desarrollando en el entorno moderno, generando obras de gran envergadura. Sin embargo, para estructuras de pocos niveles de altura también podrían presentar un beneficio económico al utilizarse en reemplazo de los empalmes por traslapo y así reducir la cantidad de acero requerido. Para esto es necesario contar con información que permita evaluar los beneficios que conlleva la implementación de empalmes mecánicos y así poder ser reconocidos sus beneficios en Colombia y ser parte de los insumos base en la construcción de una edificación sin importar el número de pisos.

A nivel internacional se han construido varias obras en las cuales se han utilizado empalmes mecánicos; algunas de estas son la Torre de Control del Aeropuerto Schiphol – Ámsterdam, las Petronas Towers – Malaysia, el Messeturm – Frankfurt, el KPN – Netherlands, el Nationale Nederlanden – Rotterdam, el Trianon – Frankfurt, la Platform NAM – Rotterdam, el Arco de La Défense – Paris, entre otros [8], las cuales son un indicio del apogeo de los empalmes mecánicos a nivel mundial al haber sido utilizados en proyectos estructurales de gran magnitud como los mencionados anteriormente, brindando información del potencial uso de estos en grandes obras.

1.1 Empalmes mecánicos

Los empalmes mecánicos, además de las ventajas mencionadas anteriormente, tienen otras bondades, estos permiten reducir costos de mano de obra, desperdicio de acero, tiempo en actividades de inspección y control de calidad. Con este tipo de empalme se logran beneficios si se cuenta en obra con longitudes de barras muy cortas la cuales por longitud de traslapo no cumplirían la norma. Además, al exigir las barras de acero empalmadas con conectores mecánicos, en las barras se debe producir la falla por rotura, para que permitan el desarrollo del esfuerzo máximo a tracción de las barras mientras los conectores permanecen intactos.

Con el uso de los empalmes mecánicos se garantiza que haya continuidad en la transmisión en los esfuerzos de tensión entre barras; mientras que, con los empalmes por traslapo, los esfuerzos se transmiten de una barra, al concreto circundante y luego a la barra siguiente, por lo que se deja de depender del concreto como generador de la continuidad en el acero asegurando la transmisión completa de esfuerzos entre las barras.

A continuación, se presentan los empalmes mecánicos de mayor uso a nivel mundial y en Colombia [9]:

1.1.1 Conector extruido

Este tipo de conector mecánico consiste en una camisa de acero que se desliza sobre los extremos de las barras que se requieran conectar, se prensa a las barras con un equipo hidráulico, las barras no necesitan alistamiento de los extremos para la conexión, no

requiere personal especializado para su aplicación y elimina dispositivos de torsión para conectar las barras.

Figura 1-1: Conector extruido



Imagen tomada de: <https://www.ramalza.com/conector-extruido-tipo-2>

1.1.2 Conector de tornillo

Consiste en una camisa de acero con unas muescas dentadas de agarre que se fija a los extremos de las barras de acero por medio de tornillos de apriete, al conseguir la presión necesaria sobre las barras estos se rompen por la cabeza, quedando el cuerpo del tornillo encajado en los resaltes de las barras e impidiendo el desplazamiento de la barra dentro del conector. No requiere preparación previa, equipo especial ni personal especializado para su aplicación.

Figura 1-2: Conector de tornillo



Imagen tomada de: <https://www.ramalza.com/empalme-de-tornillo-tipo-2>

1.1.3 Conector roscado en barra

El principio de este conector mecánico se basa en un recalado de los extremos de las barras de refuerzo el cual se realiza mediante una máquina al aplicar presión y formar el roscado, sobre la zona de diámetro recalcadas se roscan las barras las cuales se acoplan al manguito formando el empalme.

Figura 1-3: Conector roscado



Imagen tomada de: <https://www.ramalza.com/empalme-roscado-tipo-2>

1.2 Definición sistema estructural

En la sección A.3.2.1 del reglamento NSR-10 se definen cuatro tipos generales de sistemas estructurales de resistencia sísmica: muros de carga, sistema combinado, sistema de pórtico, y sistema dual.

Más precisamente en la sección A.3.2.1.2 (b) se define el sistema combinado como un pórtico resistente a momentos, esencialmente completo, combinado con muros estructurales que soportan las cargas verticales y horizontales.

1.3 Requisitos normativos según el grado de disipación de energía y grado de acero escogidos

En relación con el grado de disipación de energía, se presentan a continuación los requisitos mínimos exigidos en el Reglamento NSR-10 y en el reglamento ACI 318-19 mediante dos tablas comparativas. En la primera se comparan los requisitos para alcanzar cada grado de disipación de energía (DMO y DES), en la segunda se hace la comparación

de los requerimientos asociados a la resistencia a la fluencia, considerando el grado del acero (grado 60 y grado 80). En cada tabla se identifica la incidencia que tiene cada requisito en las cantidades de acero requerido.

1.3.1 Comparación de los requerimientos para alcanzar el grado de disipación de energía escogido

En la Tabla 1-1 se presentan los requisitos necesarios para lograr teóricamente estructuras con capacidad de disipación de energía moderada y especial y se analiza la incidencia de estos requisitos en la cuantía de refuerzo. Se tomó como base la Tabla 3.1 (p 11-17) de Martínez Barraza [15].

Tabla 1-1: Comparación de los requerimientos asociados a DMO y DES, según el Reglamento NSR-10

Ítem	Capacidad moderada de disipación de energía (DMO)	Capacidad especial de disipación de energía (DES)	Incidencia en las cantidades de acero requeridas
Coeficiente de capacidad de disipación de energía básico (Ro)	Según la tabla A.3-2 Ro=5.0	Según la tabla A.3-2 Ro=7.0	El aumento del coeficiente genera una reducción en la fuerza sísmica de diseño "E" del 40%, lo que se puede traducir en una posible reducción de las cantidades de acero en DES
Deriva de piso	B.2.4.2.1: Las derivas se verifican para las fuerzas sísmicas F_s sin haber dividido por R		Las derivas no dependen de la capacidad de disipación de energía escogida, no hay incidencia de este punto

Ítem	Capacidad moderada de disipación de energía (DMO)	Capacidad especial de disipación de energía (DES)	Incidencia en las cantidades de acero requeridas
Resistencia mínima del concreto a la compresión f'_c	C.21.1.4.2: La resistencia especificada a la compresión del concreto, f'_c , no debe ser menor que 21 MPa para capacidad moderada y especial de energía		No hay incidencia de este punto
Características del acero de refuerzo	C.21.1.5.2: Todo el refuerzo corrugado que resista fuerzas axiales y de flexión inducidas por sismo en elementos de pórticos, muros estructurales y vigas de acople, debe cumplir con las disposiciones de ASTM A706M para capacidad moderada y especial de disipación de energía		No hay incidencia de este punto
Cortante mínimo en el diseño de vigas	<p>C.21.3.3.1 El ϕV_n no debe ser menor que el menor de:</p> <p>(a) La suma del cortante debido a flexión en curvatura inversa asociado con el desarrollo de M_n de la viga en cada extremo restringido de la luz libre y el cortante calculado para cargas gravitacionales mayoradas</p> <p>(b) El cortante máximo obtenido de las combinaciones de carga de diseño que incluyan 2 veces E</p>	C.21.5.4.1: el V_e será la suma del cortante debido a flexión en curvatura inversa asociado con el desarrollo de los momentos probables ($1,25F_y$) de la viga en cada extremo restringido de la luz libre y el cortante calculado para cargas gravitacionales	Al trabajar con $1,25F_y$ para hallar los momentos resistentes de las vigas se aumenta la demanda de cortante; no obstante, se debe recordar que por la reducción en la fuerza sísmica los momentos iniciales de diseño pueden ser menores en un sistema DES. Se debe evaluar
Cortante mínimo en el diseño de columnas	<p>C.21.3.3.2: El ϕV_n no debe ser menor que el menor de:</p> <p>(a) La suma del cortante debido a flexión en curvatura inversa asociada con el desarrollo de M_n de</p>	C.21.6.5.1: las fuerzas cortantes se determinan de la aplicación de los momentos probables ($1,25F_y$) en cada extremo del elemento, correspondientes al rango de carga	Al trabajar con $1,25F_y$ para hallar los momentos resistentes de las vigas se aumenta la demanda de cortante; no obstante, se debe recordar que por

Ítem	Capacidad moderada de disipación de energía (DMO)	Capacidad especial de disipación de energía (DES)	Incidencia en las cantidades de acero requeridas
	<p>la columna en cada extremo restringido de la longitud libre</p> <p>(b) El cortante máximo obtenido de las combinaciones de carga de diseño que incluyan E, con E incrementado por medio de Ω_0</p>	<p>axiales mayoradas, P_u, que actúan en él</p>	<p>la reducción en la fuerza sísmica los momentos iniciales de diseño pueden ser menores en un sistema DES. Se debe evaluar</p>
Aspectos dimensionales en vigas	<p>a) C.21.3.4.1: El ancho mínimo es de 200 mm</p> <p>b) La altura de la viga debe controlar las deformaciones verticales</p> <p>c) C.21.3.4.2: la excentricidad con respecto a la columna no será mayor que el 25% del ancho de la viga</p>	<p>a) C.21.5.1.3: el ancho mínimo es de 0.3h o 250 mm</p> <p>b) C.21.5.1.2: la altura de la viga debe ser mayor que $L_n/4$ y controlar deformaciones verticales</p> <p>c) C.21.5.1.4: el ancho de la viga no debe exceder el ancho de la columna en cada lado, por una distancia igual al ancho de la columna o a 0.75 lo profundo de la columna</p>	<p>Dado que el dimensionamiento se realizó para controlar derivas y resistencia, se manejan las mismas secciones en DMO y DES. No hay incidencia en este punto</p>
Aspectos dimensionales en columnas	<p>C.21.3.5.1: El ancho mínimo es de 250 mm; las columnas en forma de T, C o I pueden tener una dimensión mínima de 200 mm, pero con un área mínima de 0,0625m²</p>	<p>C.21.6.1.1: El ancho mínimo es de 300 mm, las columnas en forma de T, C o I pueden tener una dimensión mínima de 250 mm, pero con un área mínima de 0,09 m²</p>	<p>Dado que el dimensionamiento se realizó para controlar derivas y resistencia, se manejan las mismas secciones en DMO y DES. No hay incidencia en este punto</p>

Ítem	Capacidad moderada de disipación de energía (DMO)	Capacidad especial de disipación de energía (DES)	Incidencia en las cantidades de acero requeridas
		Además, se deben cumplir las relaciones de aspecto descritas en C.21.6.1	
Resistencia a momento mínima en vigas	C.21.3.4.4: La resistencia a M(+) en la cara del nodo no debe ser menor que 1/3 de la resistencia a M(-) en esa misma cara y la resistencia a M(+) y M(-) a lo largo de la viga no debe ser menor que 1/5 de la resistencia máxima en los nodos	C.21.5.2.2: La resistencia a M(+) en la cara del nodo no debe ser menor que 1/2 de la resistencia a M(-) o M(+) en esa misma cara y la resistencia a M(+) y M(-) a lo largo de la viga no debe ser menor que 1/4 de la resistencia máxima en los nodos	Este requisito puede aumentar las cantidades de acero en DES
Empalmes del acero longitudinal en vigas	C.21.3.4.5: No se permiten empalmes dentro de los nodos	C.21.5.2.3: No se permiten empalmes dentro de los nodos, ni en una distancia de 2h desde la cara del nodo. Sólo se permiten empalmes por traslapo de refuerzo de flexión proporcionando estribos en la longitud de empalme espaciados máximo a d/a o 100 mm	Este requisito aumenta las cantidades de acero en DES
Detallado del acero transversal en vigas	C.21.3.4.6: En ambos extremos del elemento, deben disponerse estribos al menos No. 3 por longitudes de 2h desde la cara del apoyo, separados cada $d/4$, $8d_{bl}$, $24d_{bt}$, o 300mm (El menor de	C.21.5.3.1: En ambos extremos del elemento deben disponerse estribos al menos No. 3 por longitudes de 2h desde la cara del apoyo, separados	De requerirse una separación menor que $d/4$, podría aumentarse las cantidades de acero en DES. Se debe evaluar

Ítem	Capacidad moderada de disipación de energía (DMO)	Capacidad especial de disipación de energía (DES)	Incidencia en las cantidades de acero requeridas
	estos). En el resto de la viga los estribos se separan máximo $d/2$	cada $d/4$, $6d_{bl}$, o 150mm (El menor de estos). En el resto de la viga los estribos se separan máximo $d/2$	
Empalmes del acero longitudinal en columnas	C.21.3.5.3: Los empalmes por traslapo solo se permiten en la parte central de la longitud del elemento y deben diseñarse como empalmes en tracción	C.21.6.3.3: Los empalmes por traslapo solo se permiten en la parte central de longitud del elemento, deben diseñarse como empalmes por traslapo de tracción y deben estar confinados como lo establecen C.21.6.4.2 y C.21.6.4.3	Este requisito aumenta las cantidades de acero en DES
Detallado del acero transversal en columnas	C.21.3.5.6: En ambos extremos y en distancias de "Lo" desde la cara del apoyo deben disponerse estribos al menos No. 3 cada $1/3b$, $8d_{bl}$, $16d_{bt}$ o 150mm (el menor de estos). En el resto de la columna los estribos se separan $2S_o$. "Lo" se define como el mayor entre $1/6L_n$, H y 500mm	C.21.6.4.1: En ambos extremos y en distancias de "Lo" desde la cara del apoyo deben disponerse estribos al menos No. 3 cada $1/4b$, $6d_{bl}$, 100mm, "So" definido en C.21-5 (el menor de estos) En el resto de la columna los estribos se separan entre el menor de: $6d_{bl}$, 150mm. "Lo" se define como el mayor entre $1/6L_n$, H y 450mm	Este requisito aumenta las cantidades de acero en DES

Ítem	Capacidad moderada de disipación de energía (DMO)	Capacidad especial de disipación de energía (DES)	Incidencia en las cantidades de acero requeridas
Resistencia mínima a flexión de las columnas "Columna fuerte - Viga débil"	C.21.3.6: La resistencia a flexión de las columnas debe satisfacer $\Sigma M_{nc} \geq 1.2 \Sigma M_{nb}$	C.21.6.2.2: La resistencia a flexión de las columnas debe satisfacer $\Sigma M_{nc} \geq 1.2 \Sigma M_{nb}$	No hay incidencia en este punto.
Nudos	C.21.3.5.12: El refuerzo transversal del nodo debe cumplir con C.11.10 C.11.10.1: cuando la carga por gravedad, viento, sismo u otras fuerzas laterales produzcan transmisión de momentos en la conexión, el cortante que se derive de la transmisión de momento debe tomarse en consideración en el diseño del refuerzo trasversal de la columna. C.11.10.2: Las conexiones de un sistema primario deben tener el refuerzo mínimo: $A_{v,min} = 0.062 \sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{f_{yt}}$	C.21.7: El refuerzo transversal del nodo debe cumplir con C.21.7.3 y se debe diseñar con lo especificado C.21.7.4 C.21.7.2.3: Donde el refuerzo longitudinal de una viga atraviesa un nodo, la dimensión de la columna paralela a la barra no debe ser menor que $20d_b$.	No hay incidencia en este punto para la investigación en curso
Muros estructurales	C.21.4.4: Los muros estructurales intermedios DMO y sus vigas de acople deben cumplir todos los requisitos de C.21.9 DES vaciados en sitio		Dado que las excepciones y modificaciones que se indican en la norma no afectan a la investigación en

Ítem	Capacidad moderada de disipación de energía (DMO)	Capacidad especial de disipación de energía (DES)	Incidencia en las cantidades de acero requeridas
			curso, las cantidades de refuerzo no se ven afectadas.

1.3.2 Comparación de los requerimientos asociados a la resistencia a la fluencia del acero

En la Tabla 1-2, se presenta el comparativo de los requerimientos asociados a la resistencia a la fluencia del acero grado 60 y grado 80 y la incidencia en las cuantías de acero.

Tabla 1-2: Comparación de los requerimientos asociados a la resistencia a la fluencia del acero, según el Reglamento NSR-10 y ACI 318-19

Ítem	Acero Grado 60	Acero Grado 80	Incidencia en las cantidades de acero requeridas
Cuantía mínima en vigas	Según la ecuación 9.6.1.2 (b), $\rho = 0.0033$ depende del f_y del acero de refuerzo	Según la ecuación 9.6.1.2 (b), $\rho = 0.0025$	La disminución de la cuantía mínima correspondiente al acero grado 80 del 32%, puede traducirse en una posible reducción de las cantidades de obra
Cuantía máxima en vigas	ACI 318-19 18.6.3.1, en cualquier sección de la viga el refuerzo superior e inferior no debe tener una cuantía, ρ , superior a 0.025 o 0.020 para DMO y DES correspondientemente		Este requisito limita la cantidad de acero requerida utilizando acero de refuerzo grado 80 en DES
Cuantías longitudinales en columnas	C.21.3.5.2: El área de refuerzo longitudinal A_{st} , no debe ser menor que $0.01A_g$ ni mayor que $0.04A_g$		Se debe evaluar dado que, al tener la misma cuantía mínima, pero con un acero de mayor resistencia, se tendrá mayor resistencia a flexión y,

Ítem	Acero Grado 60	Acero Grado 80	Incidencia en las cantidades de acero requeridas
			por tanto, mayor demanda de cortante en DES, lo que podría generar mayores cantidades de refuerzo por corte si la columna está controlada por ese criterio.
Cuantía mínima para refuerzo vertical de muros	C.14.3.2: La cuantía mínima para refuerzo vertical p_l , es: (a) 0.0012 para barras corrugadas no mayores que No. 5 con f_y no menor que 420 MPa. (b) 0.0015 para otras barras corrugadas		No hay incidencia de este punto
Cuantía mínima para refuerzo horizontal de muros	C.14.3.3 — La cuantía mínima para refuerzo horizontal, p_t , es: (a) 0.0020 para barras corrugadas no mayores que No. 5 con f_y no menor que 420 MPa (b) 0.0025 para otras barras corrugadas		No hay incidencia de este punto
Cuantía mínima para refuerzo horizontal para cortante	C.11.9.9.2 — La cuantía de refuerzo horizontal para cortante, p_t , no debe ser menor que 0.0025.		No hay incidencia de este punto
Cuantía mínima para refuerzo vertical para cortante	C.11.9.9.4: La cuantía de refuerzo vertical para cortante, p_l , no debe ser menor que la mayor de: $p_l = 0.0025 + 0.5 \left(2.5 - \frac{h_w}{l_w} \right) (p_t - 0.0025)$ Y 0.0025		No hay incidencia de este punto
Longitud de desarrollo a tracción	Según C.12.2.2, para barras corrugadas, L_d debe ser:		Al ser directamente proporcional al f_y , este requisito aumenta las cantidades de obra para el acero grado 80
	Barras No. 6 o menores: $\left(\frac{f_y \psi_t \psi_e}{2.1 \lambda \sqrt{f'_c}} \right) d_b$	Barras No. 7 y mayores: $\left(\frac{f_y \psi_t \psi_e}{1.7 \lambda \sqrt{f'_c}} \right) d_b$	

Ítem	Acero Grado 60	Acero Grado 80	Incidencia en las cantidades de acero requeridas
Longitud de desarrollo a compresión	Según C.12.3.2, para las barras corrugadas, L_{dc} debe tomarse como el mayor entre: $\left(\frac{0.24f_y}{\lambda\sqrt{f'_c}}\right)d_b$ y $(0.043f_y)d_b$		Al ser directamente proporcional al f_y , este requisito aumenta las cantidades de obra para el acero grado 80
Longitud de desarrollo de ganchos estándar en tracción	Según C.12.5.2, para las barras corrugadas, L_{dh} debe ser: $\left(\frac{0.24\psi_e f_y}{\lambda\sqrt{f'_c}}\right)d_b$ Con ψ_e igual a 0.75 para concreto con agregados livianos. Para otros casos, ψ_e y λ deben tomarse igual a 1.0		Al ser directamente proporcional al f_y , este requisito aumenta las cantidades de obra para el acero grado 80
Longitud de traslapo	Según C.12.15.1, la longitud mínima del empalme por traslapo en tracción debe ser la requerida para empalmes por traslapo Clases A o B, pero no menor que 300 mm, donde: Empalme por traslapo Clase A: $1.0L_d$ Empalme por traslapo Clase B: $1.3L_d$		Al ser un factor de la longitud de desarrollo, este requisito aumenta las cantidades de obra para el acero grado 80
Detallado del acero transversal en columnas DMO	ACI 318-19 18.4.3.3: En ambos extremos y en distancias de "Lo" desde la cara del apoyo deben disponerse estribos cada $8d_b$ o 200mm (el menor de estos) "Lo" se define como el mayor entre $1/6Ln$, H y 450 mm	ACI 318-19 18.4.3.3: En ambos extremos y en distancias de "Lo" desde la cara del apoyo deben disponerse estribos cada $6d_b$ o 150mm (el menor de estos) "Lo" se define como el mayor entre $1/6Ln$, H y 450 mm	Este requisito aumenta las cantidades de material utilizando acero de refuerzo grado 80 en

Ítem	Acero Grado 60	Acero Grado 80	Incidencia en las cantidades de acero requeridas
Detallado del acero transversal en vigas DES	ACI 318-19 18.6.4.4: En ambos extremos del elemento, deben disponerse estribos por longitudes de $2h$ desde la cara del apoyo, separados cada $d/4$, $8d_b$, o 150 mm (El menor de estos). En el resto de la viga los estribos se separan máximo $d/2$	C.21.5.3.1: En ambos extremos del elemento deben disponerse estribos al menos No. 3 por longitudes de $2h$ desde la cara del apoyo, separados cada $d/4$, $6d_b$, o 150mm (El menor de estos). En el resto de la viga los estribos se separan máximo $d/2$	Este requisito aumenta las cantidades de material utilizando acero de refuerzo grado 80.
Detallado del acero transversal en columnas DES	ACI 318-19 18.7.5.3: El espaciamiento de los estribos no debe exceder: $1/4B$, $6d_b$ o 100 mm (el menor de estos)	ACI 318-19 18.7.5.3: El espaciamiento de los estribos no debe exceder: $1/4B$, $5d_b$ o 100 mm (el menor de estos)	Este requisito aumenta las cantidades de material utilizando acero de refuerzo grado 80
Nudos	ACI 318-19 18.8.2.3: Donde el refuerzo longitudinal de una viga atraviesa un nudo, la dimensión de la columna paralela a la barra no debe ser menor que $20d_b$	ACI 318-19 18.7.5.3: Donde el refuerzo longitudinal de una viga atraviesa un nudo, la dimensión de la columna paralela a la barra no debe ser menor que $26d_b$	El requisito dimensional referente a columnas aumenta las cantidades de material en estructuras de pocos niveles y con cargas bajas

De acuerdo con las tablas presentadas, en cada caso se identifica claramente un requisito que podría disminuir las cantidades de acero de manera importante, mientras que los demás requisitos tienden a aumentarlas. Para el caso del grado de disipación de energía, el requisito es el aumento del coeficiente de capacidad de disipación de energía, mientras que, para el caso del grado del acero, se trata de la disminución de la cuantía mínima en vigas.

2.Estado del arte

Inicialmente, se realizó la revisión del documento ACI 318-19, "Building Code Requirements for Structural Concrete" [18] en el cual, en su última actualización se incluyó el acero grado 80 como refuerzo interno para estructuras de concreto reforzado con capacidad de energía moderada y especial y se incluyó el uso de empalmes mecánicos tipo 1 y tipo 2 para acero grado 80. Los requisitos que se modifican con el uso del acero de refuerzo grado 80 se expusieron en el capítulo anterior.

Posteriormente, se realizó una búsqueda de documentos de investigación con el fin de estructurar el estado del arte, se definieron una serie de las palabras claves, en general, relacionadas con la caracterización y uso del acero de refuerzo grado 80 y los empalmes mecánicos en estructuras de concreto reforzado. Se encontraron una serie de documentos, los cuales, dieron un punto de partida para el planteamiento del proyecto.

Se conocen al menos tres estudios recientes donde evalúan la incidencia del grado del acero de refuerzo sobre la cantidad de acero requerido; en el primero, A. Kalam Azad de la Universidad de Ingeniería y Tecnología de Bangladesh [10] realizó una investigación de los costos en el diseño de un edificio con sistema estructural combinado de 20 pisos de altura con acero grado 60 y acero grado 75, se encontró que el refuerzo por pie cuadrado era de 2.35 kg y 2.13 kg para el grado 60 y el grado 75 respectivamente, reduciendo las cantidades de acero requerido en aproximadamente un 9.5%. En el segundo documento se encontraron resultados similares, donde C. Nieto Miño y H. Pérez Báez, de la Universidad Católica del Ecuador [11] estudiaron la factibilidad del uso de barras de acero de refuerzo grado 80 en la construcción de edificios mediante sistemas estructurales duales, se realizó el diseño de dos grupos de edificios, uno diseñado con acero grado 60 y el otro con acero grado 80 donde se varió el número de pisos, dando como resultado una

reducción de acero requerido entre el 23 y 35% según el número de pisos, donde las cantidades eran proporcionales al número de pisos. Finalmente, L. Zegarra Ciquero, de la Universidad Católica del Perú [12] realizó un estudio de un edificio aporticado de ocho niveles, el cual se diseñó utilizando acero de refuerzo grado 60 y grado 75, encontrando que es factible el uso de acero de refuerzo grado 75, al reducirse las cantidades de acero requeridas, resaltando la importancia de tener menos cantidad de barras de refuerzo traducida en una menor congestión en el armado.

Adicionalmente, se conocen al menos dos documentos en los cuales se verificaron las ventajas y beneficios de los empalmes mecánicos; D. Alvis Fonseca y J.A. Guerra Bejarano, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas [13] realizaron una investigación teórico-práctica en la cual inicialmente se tomaron probetas de empalmes mecánicos para barras No. 5 y se ensayaron a tracción, obteniendo resultados satisfactorios en cuanto a la resistencia de los conectores, los cuales deben resistir 1.25 veces el f_y de las barras de acero, por otro lado, se tomaron dos casos de estudios representativos de la actualidad como lo son el Edificio T7 T8 - y el Hotel Grand Hyatt, localizados en Bogotá, en los cuales realizaron el cálculo de acero requerido si se utilizaban empalmes mecánicos, como resultado se obtuvo una reducción de los costos de obra en el uso de conectores roscados en barras No. 7 y No. 8. En el segundo documento, R. Singh, S. K. Himanshu y N. Bhalla, del departamento de Ingeniería Civil de la Graphic Era University [14] realizaron una investigación que planteaba los empalmes mecánicos como una alternativa a los empalmes por traslapes, se tomó un caso de estudio en catorce columnas, encontrando que efectivamente el uso de los empalmes mecánicos reducía los costos, concluyendo que son una mejor opción que los empalmes por traslapes en temas económicos y de procesos constructivos.

Por otro lado, se conoce al menos un documento en el cual se evaluó la influencia del grado de disipación de energía escogido en el diseño en zonas de amenaza sísmica intermedia para estructuras basadas en pórticos de concreto; D. J. Martínez Barraza, de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito [15] realizó una investigación en la cual hicieron modelos estructurales modificando cinco variables de estudio, con los cuales se obtuvieron las cantidades de concreto y acero de los elementos primarios para cada caso estudiado, al analizar los resultados obtenidos en las modelaciones, se logró detectar que las dimensiones obtenidas en las estructuras DMO pueden ser utilizadas en estructuras

DES, y consecuentemente se presentó poca o nula variación en las cantidades de concreto. En el caso del acero, hubo un aumento en las cantidades de las estructuras con DES con respecto a DMO de entre 6 y 15%. Este aumento relativamente pequeño en las cantidades de acero puede representar un aumento importante en la seguridad de la edificación al diseñar con ductilidad especial.

2.1 Caracterización acero grado 80

En relación con las propiedades mecánicas del acero de alta resistencia, NEHRP Consultants Joint Venture [16] realizó una investigación sobre el comportamiento sísmico resistente y los costos asociados de estructuras de concreto reforzadas con acero de alta resistencia; los autores realizaron una serie de ensayos de laboratorio, donde se concluyó que el uso de acero de refuerzo de alta resistencia puede resultar en reducciones de costos y mejoras en el proceso constructivo. Adicionalmente, obtuvieron como resultado que los miembros de concreto reforzado con acero de alta resistencia, son capaces de alcanzar valores comparables de resistencia y capacidad de deformación a las logradas por los miembros con refuerzo convencional, siempre y cuando los elementos tengan detallado de refuerzo que proporcione confinamiento al concreto. En sus conclusiones, destacaron el buen comportamiento inelástico referente a la ductilidad de las estructuras reforzadas con acero de alta resistencia, disipando las inquietudes respecto a la ductilidad.

M. Kowalsky, R. Seracino y D. Overby, de la Universidad Estatal de Carolina del Norte: "Department of Civil, Construction, and Environmental Engineering" [17] realizó un análisis estadístico basado en 788 ensayos de tensión de barras de acero de refuerzo grado 80, variando los diámetros desde No. 4 hasta la No. 18. Los resultados generados a partir de los ensayos fueron usados para desarrollar recomendaciones respecto a las propiedades del acero de refuerzo grado 80 como lo son: el límite elástico, deformación unitaria, resistencia a la tracción, deformación máxima por tracción, entre otros, resumidos en la siguiente figura:

Figura 2-1: Recomendaciones propiedades del acero grado 80

Parameter	Notation	Value	Units
Modulus of elasticity	E_s	29000	ksi
Specified minimum yield strength	f_y	80	ksi
Expected yield strength	$f_{ye} (mean)$	85	ksi
Nominal yield strain	ϵ_y	0.0028	
Expected yield strain	$\epsilon_{ye} (mean)$	0.0033	
Specified minimum tensile strength	f_u	100	ksi
Expected tensile strength	$f_{ue} (mean)$	112	ksi
95 th percentile tensile strength	$f_{ue} (95\%)$	119	ksi
Ultimate tensile strain	$\epsilon_{su} (mean)$	0.0954	
5 th percentile ultimate tensile strain	$\epsilon_{su} (5\%)$	0.0845	
Onset of strain hardening	$\epsilon_{sh} (mean)$	0.0074	

Donde de las propiedades más importantes resaltamos el módulo de elasticidad que es el mismo para ambos aceros, la resistencia a la fluencia que es de 420 MPa para el acero grado 60 y de 550 MPa para el acero grado 80, asimismo la resistencia a la tracción que es de 550 MPa para el acero grado 60 y de 690 MPa para el acero grado 80 y una deformación unitaria de 0.0021 para el acero grado 60 y de 0.0028 para el acero grado 80.

Por lo tanto, basados en el estado del arte consultado y en la viabilidad técnica y económica que representa el uso de acero grado 80 y el uso de empalmes mecánicos, se decidió para el contexto colombiano estudiar la influencia en la factibilidad económica del grado de acero de refuerzo, del tipo de empalme y de la capacidad de disipación de energía escogidos en el diseño estructural de edificios de mediana altura de concreto reforzado con sistema estructural combinado. En el desarrollo del presente trabajo de grado se utilizaron las propiedades recomendadas por [17] sobre la caracterización del acero grado 80.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general:

- Evaluar el impacto económico del grado del acero de refuerzo y del tipo de empalme escogido en el diseño estructural de edificios con sistema estructural combinado con capacidad de disipación de energía moderada y especial.

3.2 Objetivos específicos:

- Identificar los efectos de la variación del número de pisos en las cantidades de acero requerido y los costos estimados.
- Evaluar las variaciones de las cantidades de acero y los costos estimados a partir de la modificación de la luz de diseño.
- Determinar en qué elementos estructurales es factible económicamente el uso de empalmes mecánicos.
- Evaluar la incidencia de la capacidad de disipación de energía en las variaciones en las cantidades de acero y costos estimados.
- Identificar en qué casos de estudio según las variables escogidas es viable el uso de acero grado 80.

4. Metodología

En este capítulo se describe la metodología adoptada para lograr el cumplimiento de los objetivos planteados, para esto se definieron las siguientes secciones:

- Sección 4.1 se definió el alcance del proyecto.
- Sección 4.2 se definió el sistema de entrepiso, identificando la edificación “tipo A”, como las edificaciones con luces de 6 metros y la edificación “tipo B”, como las edificaciones con luces de 9 metros.
- Sección 4.3 se realizó el avalúo de cargas para cada tipo de edificación definidas en la sección 4.2.
- Sección 4.4 se definieron los escenarios de análisis estructural, donde se realizó el dimensionamiento de los elementos estructurales y se muestran los datos relevantes utilizados en las modelaciones de cada grupo de estructuras analizadas.
- Sección 4.5 se realizaron las modelaciones y diseños estructurales mediante el método de la fuerza horizontal equivalente con las correspondientes consideraciones.
- Sección 4.6 se realizó el análisis de los resultados obtenidos, dejando consignadas las respectivas conclusiones y recomendaciones.

A continuación, se desarrolla cada sección establecida:

4.1 Alcance del proyecto

Con el fin de abarcar los objetivos planteados, se definió el alcance del proyecto de la siguiente manera:

Se plantearon modelos estructurales de edificios con sistema estructural combinado de muros y pórticos de concreto reforzado; los muros con un espesor de 20 cm reforzados con dos parrillas de acero de refuerzo, con una altura de entrepiso de 3 metros, la configuración en planta de las edificaciones se determinó cuadrada, sin ningún tipo de irregularidad en planta y en altura y con suficiente redundancia, con base fija de tal manera que no se consideró la interacción suelo – estructura; cabe resaltar que no se realizó el diseño de la cimentación, únicamente se diseñó la superestructura. Las cargas vivas se definieron para uso residencial, por lo que el grupo de uso fue “I”.

Las variables consideradas para el desarrollo de esta investigación fueron las consignadas en la Tabla 4-1:

Tabla 4-1: Delimitación de las variables

Ítem	Delimitación de las variables
Calidad de acero	Grado 60 y Grado 80
Número de pisos	5, 10, 15 y 20
Luces de diseño (m)	6 y 9
Tipo de empalme	Traslapo y empalme mecánico
Capacidad de disipación de energía	DMO - DES

Se determinaron los parámetros sísmicos F_a y F_v correspondientes a un perfil de suelo tipo C con $A_a = 0.15$ y $A_v = 0.20$. Asimismo, para el refuerzo longitudinal se manejaron barras entre No. 4 y No. 8 según se requería, y para el refuerzo transversal se manejaron barras No. 3 para todos los casos, cabe resaltar que el cálculo de las cantidades de acero requerido se realiza tanto para el acero transversal como para el acero longitudinal. Los materiales utilizados en la modelación fueron concreto de peso normal con resistencia a la compresión según se indica en las siguientes Tablas 4-2 y 4-3:

Tabla 4-2: Delimitación resistencia del concreto $f'c$ para muros y columnas

Muros estructurales y columnas	
# Pisos	Resistencia concreto por niveles
5	21 MPa: 1 – 5
10	28 MPa: 1 – 5 21 MPa: 6 – 10
15	28 MPa: 1 – 8 21 MPa: 9 – 15
20	35 MPa: 1 – 7 28 MPa: 8 - 14 24.5 MPa: 15 – 20

Tabla 4-3: Delimitación resistencia del concreto $f'c$ para el sistema de entrepiso

Sistema de entrepiso	
# Pisos	Resistencia concreto
5	21 MPa
10	21 MPa
15	21 MPa
20	24.5 MPa

Para cada caso de estudio se realizó un análisis estático lineal mediante el método de la fuerza horizontal equivalente descrito en el capítulo A.4. El diseño estructural se realizó cumpliendo con los requerimientos dispuestos en el reglamento NSR-10 y en el ACI 318-19, modificando las variables indicadas en la tabla 4-1; dado que el tipo de empalme no afecta la modelación estructural, en total se realizaron 32 modelos matemáticos, los cuales pasaron a ser 64 modelos al revisar las cantidades de acero requerido a partir del software DCCAD teniendo en cuenta el tipo de empalme. Como se mencionó anteriormente, con los modelos matemáticos planteados se estudió el efecto que tiene el grado del acero de refuerzo, el tipo de empalme y la capacidad de disipación de energía escogido en el diseño estructural sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados. Los modelos matemáticos se resumen en la Tabla 4-4:

Tabla 4-4. Tabla resumen modelos matemáticos

Caso	Número de Pisos	Luz de diseño (m)	Calidad del acero	Capacidad de disipación de energía
1	5	6	Grado 60	DMO
2	5	6	Grado 60	DES
3	5	6	Grado 80	DMO
4	5	6	Grado 80	DES
5	5	9	Grado 60	DMO
6	5	9	Grado 60	DES
7	5	9	Grado 80	DMO
8	5	9	Grado 80	DES
9	10	6	Grado 60	DMO
10	10	6	Grado 60	DES
11	10	6	Grado 80	DMO
12	10	6	Grado 80	DES
13	10	9	Grado 60	DMO
14	10	9	Grado 60	DES
15	10	9	Grado 80	DMO
16	10	9	Grado 80	DES
17	15	6	Grado 60	DMO
18	15	6	Grado 60	DES
19	15	6	Grado 80	DMO
20	15	6	Grado 80	DES
21	15	9	Grado 60	DMO
22	15	9	Grado 60	DES
23	15	9	Grado 80	DMO
24	15	9	Grado 80	DES
25	20	6	Grado 60	DMO
26	20	6	Grado 60	DES
27	20	6	Grado 80	DMO
28	20	6	Grado 80	DES
29	20	9	Grado 60	DMO
30	20	9	Grado 60	DES
31	20	9	Grado 80	DMO
32	20	9	Grado 80	DES

4.2 Definición del sistema de entrepiso

El sistema de entrepiso a utilizar fue placa aligerada armada en una dirección, se escogió este sistema de entrepiso con el fin de tener en un sentido vigas de carga con altas solicitaciones con el fin de verificar la diferencia de cuantías utilizando cada grado de acero,

y en el otro sentido, tener vigas de rigidez en las cuales se tengan bajas solicitaciones y se pueda verificar la cuantía mínima, dado que como se indicó en la sección anterior, para acero grado 80 la cuantía mínima se reduce.

El espesor de la placa aligerada se definió para cada caso cumpliendo con la tabla C.9.5(a), para las estructuras con luces de 6 metros, definidas como “Edificación tipo A”, se utilizó una altura de placa de 0,45 metros; para las estructuras con luces de 9 metros, definidas como “Edificación tipo B” se utilizó una altura de placa de 0,60 metros.

4.3 Avalúo de cargas

A continuación, se presenta el avalúo de cargas típico para cada tipo estructura, donde para las cargas por fachada y particiones y por afinado de piso y cubierta, al no realizar un análisis más detallado de las cargas, se toman los valores mínimos de carga muerta de elementos no estructurales, indicados en la tabla B.3.4.3-1 del título B, con ocupación residencial.

Datos básicos del sistema de placa aligerada:

- Espesor loseta superior: 5 cm
- Espesor viguetas: 10 cm
- Separación viguetas de centro a centro: 80 cm

4.3.1 Edificación tipo A

▪ Peso loseta (0,05 m x 24 kN/m ³):	1,20 kN/m ²
▪ Peso viguetas (0,10 m x 0,40 m x 24 kN/m ³)/0,80 m:	1,25 kN/m ²
▪ Afinado de piso y cubierta	1,60 kN/m ²
▪ Fachada y particiones	3,00 kN/m ²
Carga sobreimpuesta:	5,80 kN/m ²
Total carga muerta:	7,00 kN/m ²
Carga viva:	1,80 kN/m ²

4.3.2 Edificación tipo B

▪ Peso loseta (0,05 m x 24 kN/m ³):	1.20 kN/m ²
▪ Peso viguetas (0,10 m x 0,55 m x 24 kN/m ³)/0,80 m:	1.65 kN/m ²
▪ Afinado de piso y cubierta	1.60 kN/m ²
▪ Fachada y particiones	3.00 kN/m ²
Carga sobreimpuesta:	6.25 kN/m ²
Total carga muerta:	7.45 kN/m ²
Carga viva:	1.80 kN/m ²

4.4 Definición de escenarios de análisis estructural

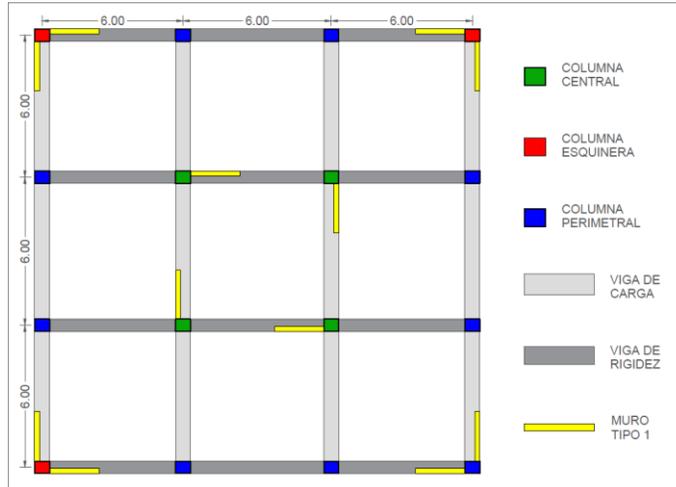
En esta etapa se llevó a cabo el dimensionamiento de los elementos estructurales para cada caso de estudio mediante el software ETABS. Se definieron las secciones de los elementos estructurales por medio del cumplimiento de los requisitos de resistencia en cada elemento y la limitación de las derivas de la estructura, las cuales no debían superar las indicadas en la tabla A.6.4-1 del reglamento NSR-10, las derivas se limitaron con la variación de la longitud de los muros estructurales según cada tipo de edificación y cada piso estudiado, cabe resaltar que en algunos casos las estructuras no se llevaron al límite de su deriva. Se realizó este procedimiento para cada luz de diseño y nivel de piso en estudio.

A continuación, se identifica en planta cada tipo de edificación según el número de pisos, se muestra el dimensionamiento de los elementos estructurales y las propiedades sísmicas de cada una, incluyendo el periodo natural, valor del espectro de aceleraciones (S_a), el exponente relacionado con el periodo fundamental (k), el cortante sísmico en la base (V_s), el peso de la edificación, las secciones de los elementos estructurales y las derivas de piso, datos que serán base para el diseño estructural. Adicionalmente, para la correcta interpretación de los datos plasmados en las tablas, se generó para cada tipo de edificación su correspondiente esquema con la identificación de los elementos referenciados.

4.4.1 Edificación tipo A – 5 pisos

En la figura 4-1 se identifican los elementos estructurales para la edificación tipo A con 5 pisos de altura.

Figura 4-1: Identificación elementos estructurales edificación tipo A - 5 pisos



A continuación, se muestra la tabla 4-5 en la que se indican el dimensionamiento de los elementos estructurales que se utilizó para modelar la edificación y las propiedades sísmicas del resultado del análisis para la edificación tipo A con 5 pisos de altura.

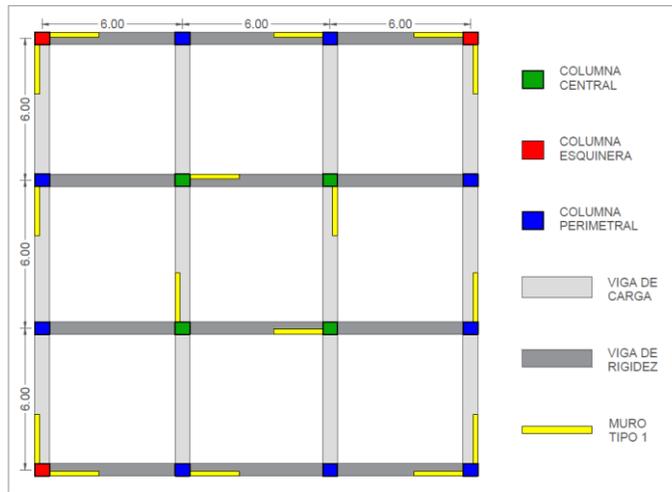
Tabla 4-5: Dimensionamiento y propiedades sísmicas edificación tipo A - 5 pisos

Tn (s)	Sa FHE	k	Vs (kN)	w (kN)	Secciones de vigas	Secciones de columnas	Secciones de muros	Derivas de piso (%)
0,65	0,45	1,075	6920	15378	Rigidez: 0,25mx0,45m Carga: 0,30mx0,45m	Centrales: 0,40mx0,40m Esquineras: 0,40mx0,40m Perimetrales: 0,40mx0,45m	Tipo 1: 0,20mx1,50m	Piso 1: 0,28% Piso 2: 0,63% Piso 3: 0,76% Piso 4: 0,77% Piso 5: 0,71%

4.4.2 Edificación tipo A – 10 pisos

En la figura 4-2 se identifican los elementos estructurales para la edificación tipo A con 10 pisos de altura.

Figura 4-2: Identificación elementos estructurales edificación tipo A - 10 pisos



A continuación, se muestra la tabla 4-6 en la que se indican el dimensionamiento de los elementos estructurales que se utilizó para modelar la edificación y las propiedades sísmicas del resultado del análisis para la edificación tipo A con 10 pisos de altura.

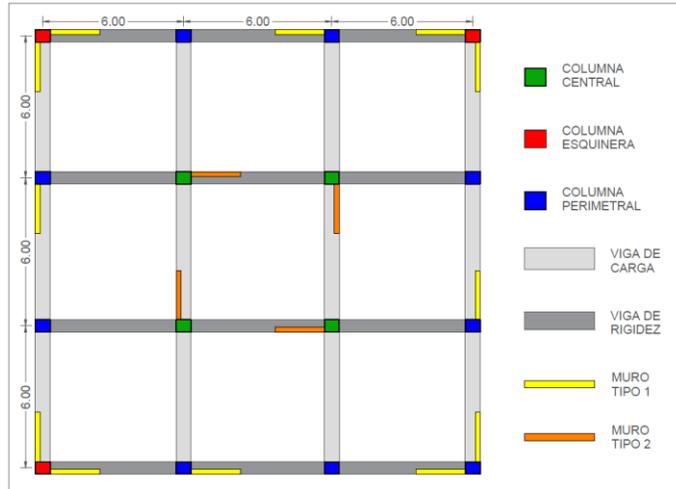
Tabla 4-6: Dimensionamiento y propiedades sísmicas edificación tipo A - 10 pisos

Tn (s)	Sa FHE	k	Vs (kN)	w (kN)	Secciones de vigas	Secciones de columnas	Secciones de muros	Derivas de piso (%)
0,90	0,43	1,20	14328	34285	Rigidez: 0,25mx0,45m Carga: 0,30mx0,45m	Centrales: 0,50mx0,50m Esquineras: 0,50mx0,50m Perimetrales: 0,50mx0,55m	Tipo 1: 0,20mx2,50m	Piso 1: 0,19% Piso 2: 0,45% Piso 3: 0,62% Piso 4: 0,73% Piso 5: 0,79% Piso 6: 0,80% Piso 7: 0,78% Piso 8: 0,74% Piso 9: 0,68% Piso 10: 0,63%

4.4.3 Edificación tipo A – 15 pisos

En la figura 4-3 se identifican los elementos estructurales para la edificación tipo A con 15 pisos de altura.

Figura 4-3: Identificación elementos estructurales edificación tipo A - 15 pisos



A continuación, se muestra la tabla 4-7 en la que se indican el dimensionamiento de los elementos estructurales que se utilizó para modelar la edificación y las propiedades sísmicas del resultado del análisis para la edificación tipo A con 15 pisos de altura.

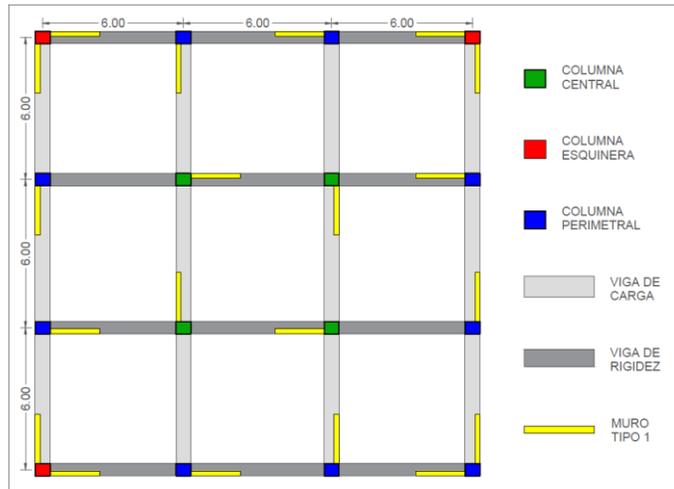
Tabla 4-7: Dimensionamiento y propiedades sísmicas edificación tipo A - 15 pisos

Tn (s)	Sa FHE	k	Vs (kN)	w (kN)	Secciones de vigas	Secciones de columnas	Secciones de muros	Derivas de piso (%)
1.42	0,27	1,46	14681	54249	Rigidez: 0,25mx0,45m Carga: 0,30mx0,45m	Centrales: 0,60mx0,60m Esquineras: 0,55mx0,60m Perimetrales: 0,60mx0,65m	Tipo 1: 0,20mx2,75m Tipo 2: 0,20mx2,50m	Piso 1: 0,17% Piso 2: 0,41% Piso 3: 0,59% Piso 4: 0,72% Piso 5: 0,80% Piso 6: 0,86% Piso 7: 0,88% Piso 8: 0,89% Piso 9: 0,87% Piso 10: 0,84% Piso 11: 0,79% Piso 12: 0,73% Piso 13: 0,67% Piso 14: 0,61% Piso 15: 0,57%

4.4.4 Edificación tipo A – 20 pisos

En la figura 4-4 se identifican los elementos estructurales para la edificación tipo A con 20 pisos de altura.

Figura 4-4: Identificación elementos estructurales edificación tipo A - 20 pisos



A continuación, se muestra la tabla 4-8 en la que se indican el dimensionamiento de los elementos estructurales que se utilizó para modelar la edificación y las propiedades sísmicas del resultado del análisis para la edificación tipo A con 20 pisos de altura.

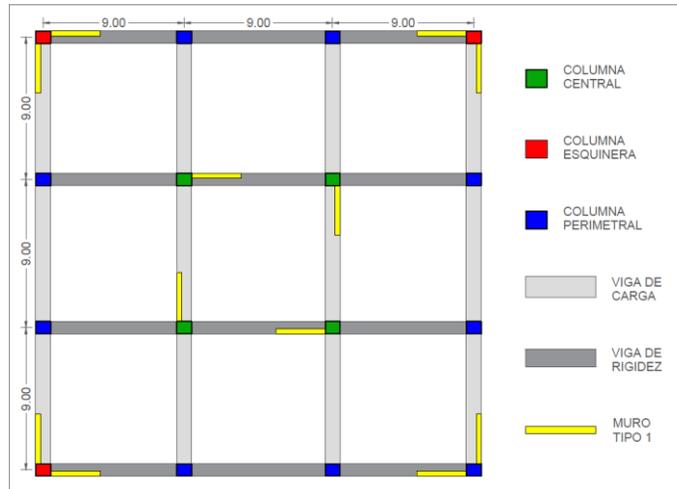
Tabla 4-8: Dimensionamiento y propiedades sísmicas edificación tipo A - 20 pisos

Tn (s)	Sa FHE	k	Vs (kN)	w (kN)	Secciones de vigas	Secciones de columnas	Secciones de muros	Derivas de piso (%)
1.74	0,22	1,62	17707	80141	Rigidez: 0,25mx0,45m Carga: 0,30mx0,45m	Centrales: 0,65mx0,65m Esquineras: 0,65mx0,65m Perimetrales: 0,65mx0,70m	Tipo 1: 0,20mx2,75m	Piso 1: 0,14% Piso 2: 0,34% Piso 3: 0,49% Piso 4: 0,61% Piso 5: 0,70% Piso 6: 0,77% Piso 7: 0,81% Piso 8: 0,84% Piso 9: 0,86% Piso 10: 0,86% Piso 11: 0,85% Piso 12: 0,82% Piso 13: 0,79% Piso 14: 0,75% Piso 15: 0,71% Piso 16: 0,66% Piso 17: 0,61% Piso 18: 0,56% Piso 19: 0,52% Piso 20: 0,49%

4.4.5 Edificación tipo B – 5 pisos

En la siguiente figura 4-5 se identifican los elementos estructurales para la edificación tipo B con 5 pisos de altura.

Figura 4-5: Identificación elementos estructurales edificación tipo B - 5 pisos



A continuación, se muestra la tabla 4-9 en la que se indican el dimensionamiento de los elementos estructurales que se utilizó para modelar la edificación y las propiedades sísmicas del resultado del análisis para la edificación tipo B con 5 pisos de altura.

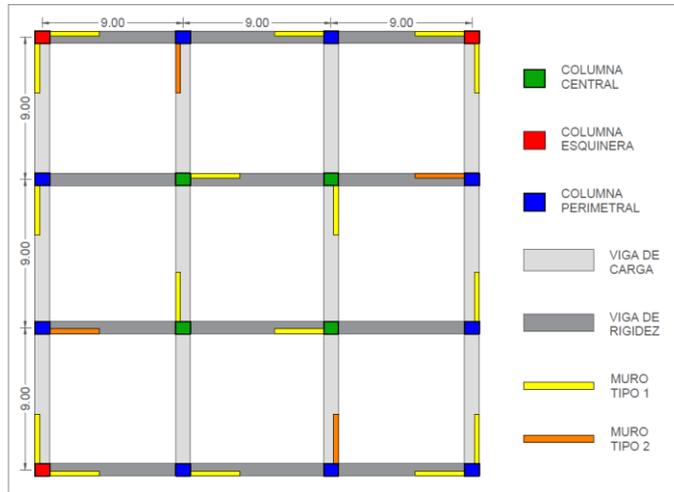
Tabla 4-9: Dimensionamiento y propiedades sísmicas edificación tipo B - 5 pisos

Tn (s)	Sa FHE	k	Vs (kN)	w (kN)	Secciones de vigas	Secciones de columnas	Secciones de muros	Derivas de piso (%)
0,68	0,45	1,09	16100	35778	Rigidez: 0,30mx0,60m Carga: 0,50mx0,60m	Centrales 0,40mx0,40m Esquineras 0,40mx0,40m Perimetrales 0,40mx0,45m	Tipo 1: 0,20mx2,00m	Piso 1: 0,32% Piso 2: 0,69% Piso 3: 0,88% Piso 4: 0,87% Piso 5: 0,81%

4.4.6 Edificación tipo B – 10 pisos

En la figura 4-6 se identifican los elementos estructurales para la edificación tipo B con 10 pisos de altura.

Figura 4-6: Identificación elementos estructurales edificación tipo B - 10 pisos



A continuación, se muestra la tabla 4-10 en la que se indican el dimensionamiento de los elementos estructurales que se utilizó para modelar la edificación y las propiedades sísmicas del resultado del análisis para la edificación tipo B con 10 pisos de altura.

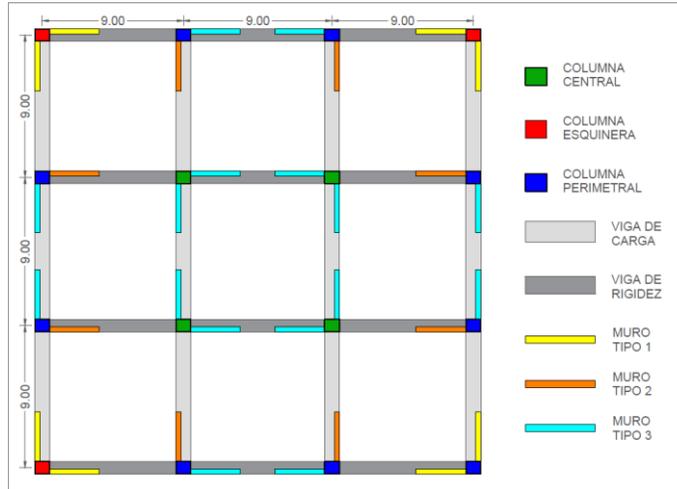
Tabla 4-10: Dimensionamiento y propiedades sísmicas edificación tipo B - 10 pisos

Tn (s)	Sa FHE	k	Vs (kN)	w (kN)	Secciones de vigas	Secciones de columnas	Secciones de muros	Derivas de piso (%)
1,10	0,35	1,30	26153	74986	Rigidez: 0,30mx0,60m Carga: 0,45mx0,60m	Centrales: 0,65mx0,70m Esquineras: 0,55mx0,55m Perimetrales: 0,55mx0,65m	Tipo 1: 0,20mx2,75m Tipo 2: 0,20mx2,25m	Piso 1: 0,21% Piso 2: 0,51% Piso 3: 0,71% Piso 4: 0,83% Piso 5: 0,90% Piso 6: 0,93% Piso 7: 0,91% Piso 8: 0,86% Piso 9: 0,80% Piso 10: 0,75%

4.4.7 Edificación tipo B – 15 pisos

En la figura 4-7 se identifican los elementos estructurales para la edificación tipo B con 15 pisos de altura.

Figura 4-7: Identificación elementos estructurales edificación tipo B - 15 pisos



A continuación, se muestra la tabla 4-11 en la que se indican el dimensionamiento de los elementos estructurales que se utilizó para modelar la edificación y las propiedades sísmicas del resultado del análisis para la edificación tipo B con 15 pisos de altura.

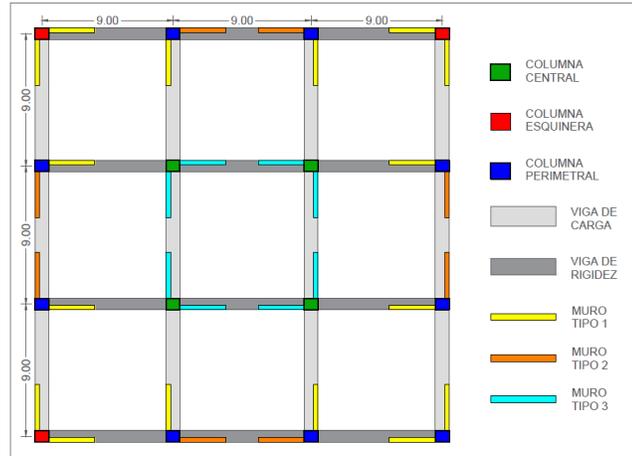
Tabla 4-11: Dimensionamiento y propiedades sísmicas edificación tipo B - 15 pisos

Tn (s)	Sa FHE	k	Vs (kN)	w (kN)	Secciones de vigas	Secciones de columnas	Secciones de muros	Derivas de piso (%)
1,42	0,27	1,46	31846	117599	Rigidez: 0,30mx0,60m Carga: 0,45mx0,60m	Centrales: 0,55mx0,55m Esquineras: 0,50mx0,50m Perimetrales: 0,50mx0,50m	Tipo 1: 0,20mx3,00m Tipo 2: 0,20mx2,50m Tipo 3: 0,20mx2,25m	Piso 1: 0,20% Piso 2: 0,47% Piso 3: 0,66% Piso 4: 0,80% Piso 5: 0,89% Piso 6: 0,94% Piso 7: 0,96% Piso 8: 0,96% Piso 9: 0,94% Piso 10: 0,90% Piso 11: 0,84% Piso 12: 0,77% Piso 13: 0,70% Piso 14: 0,63% Piso 15: 0,58%

4.4.8 Edificación tipo B – 20 pisos

En la figura 4-8 se identifican los elementos estructurales para la edificación tipo B con 20 pisos de altura.

Figura 4-8: Identificación elementos estructurales edificación tipo B - 20 pisos



A continuación, se muestra la tabla 4-12 en la que se indican el dimensionamiento de los elementos estructurales que se utilizó para modelar la edificación y las propiedades sísmicas del resultado del análisis para la edificación tipo B con 20 pisos de altura.

Tabla 4-12: Dimensionamiento y propiedades sísmicas edificación tipo B - 20 pisos

Tn (s)	Sa FHE	k	Vs (kN)	w (kN)	Secciones de vigas	Secciones de columnas	Secciones de muros	Derivas de piso (%)
1,81	0,21	1,66	34035	160335	Rigidez: 0,30mx0,60m Carga: 0,45mx0,60m	Centrales: 0,55mx0,55m Esquinas: 0,50mx0,50m Perimetrales: 0,50mx0,50m	Tipo 1: 0,20mx3,00m Tipo 2: 0,20mx2,50m Tipo 3: 0,20mx2,50m	Piso 1: 0,16% Piso 2: 0,37% Piso 3: 0,53% Piso 4: 0,65% Piso 5: 0,74% Piso 6: 0,80% Piso 7: 0,84% Piso 8: 0,87% Piso 9: 0,88% Piso 10: 0,88% Piso 11: 0,86% Piso 12: 0,83% Piso 13: 0,80% Piso 14: 0,76% Piso 15: 0,71% Piso 16: 0,66% Piso 17: 0,60% Piso 18: 0,55% Piso 19: 0,50% Piso 20: 0,46%

4.5 Diseño estructural

Se realizó un análisis estático lineal siguiendo los requisitos establecidos en el Reglamento NSR-10 para capacidad de disipación de energía moderada (DMO) y especial (DES), mediante el método de la fuerza horizontal equivalente definida en A.4 del NSR-10. Las modelaciones estructurales se realizaron mediante el software ETABS, del cual se obtuvo la geometría y las fuerzas resultantes en cada elemento estructural; estos resultados se ingresaron al software DC CAD en el cual se procedió al diseño estructural. Inicialmente se trabajó con las edificaciones tipo A, las cuales ya con el dimensionamiento definido, se procedió a analizar las diferentes combinaciones entre la calidad del acero de refuerzo y la capacidad de disipación de energía (Gr 60 – DMO, Gr 60 – DES, Gr 80 – DMO y Gr 80 – DES). En la configuración de las variables en el DC CAD se modificó el tipo de empalme para obtener las cantidades de acero requerido en los elementos primarios (empalme por traslapo y por empalmes mecánicos), este procedimiento se realizó para cada número de piso estudiados, asimismo para las edificaciones tipo B.

5. Resultados

En este capítulo se presentan mediante gráficas y tablas los resultados obtenidos de los modelos analizados, de los cuales se obtuvieron las cantidades de acero de los elementos principales (vigas, columnas y muros); la variación de las cantidades con respecto al número de pisos al grado de acero de refuerzo, el tipo de empalme y del grado de disipación de energía escogido.

Los subcapítulos están divididos según el tipo de edificación, tal como se definieron en los capítulos anteriores, y el tipo de empalme utilizado, las cuales son las siguientes:

- 5.1 Edificación tipo A con empalmes por traslapo.
- 5.2 Edificación tipo A con empalmes por conectores mecánicos.
- 5.3 Edificación tipo B con empalmes por traslapo.
- 5.4 Edificación tipo B con empalmes por conectores mecánicos.
- 5.5 Verificación de resultados

Para cada subcapítulo se presentan 4 figuras con los resultados obtenidos, para mayor comprensión se explica cómo está dividida la información de manera que el lector pueda identificar fácilmente los datos deseados.

- Primera figura: muestra la cantidad de acero requerido en vigas.
- Segunda figura: muestra la cantidad de acero requerido en columnas.
- Tercera figura: muestra la cantidad de acero requerido en muros.
- Cuarta figura: muestra la cantidad total de acero requerido en la estructura.

5.1 Resultados de los modelos con edificación tipo A y empalmes por traslapo

En las siguientes Figuras 5-1, 5-2, 5-3 y 5-4 se muestran los resultados de las cantidades de acero requerido obtenidos en los modelos con edificación tipo A y empalmes por traslapo. Cada número de piso se subdivide en cuatro series, estas se encuentran relacionadas con el grado de acero y el grado de disipación de energía escogidos.

Figura 5-1: Cantidad de acero requerido en vigas, edificaciones tipo A con empalme por traslapo

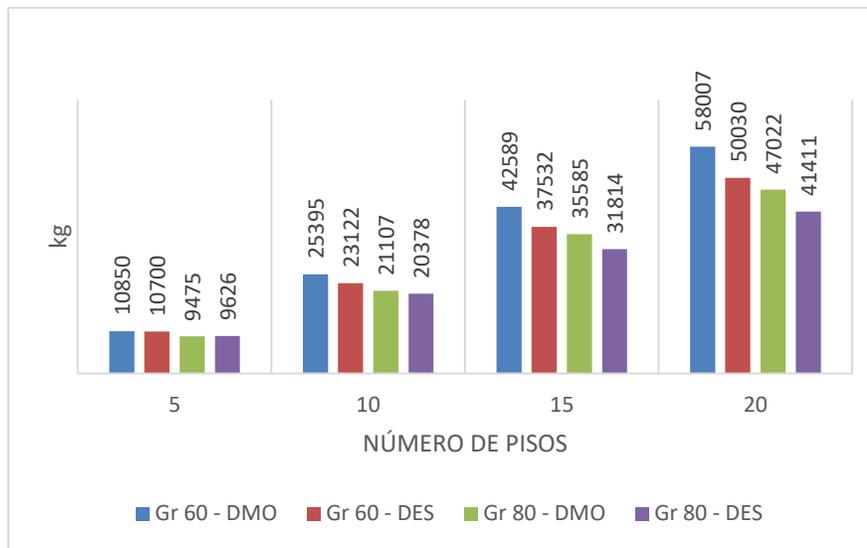


Figura 5-2: Cantidad de acero requerido en columnas, edificaciones tipo A con empalme por traslapo

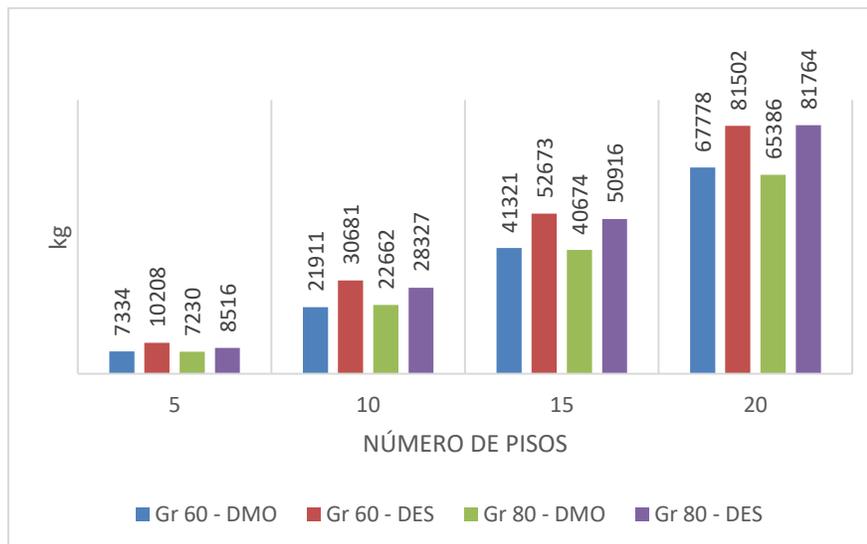


Figura 5-3: Cantidad de acero requerido en muros, edificaciones tipo A con empalme por traslapo

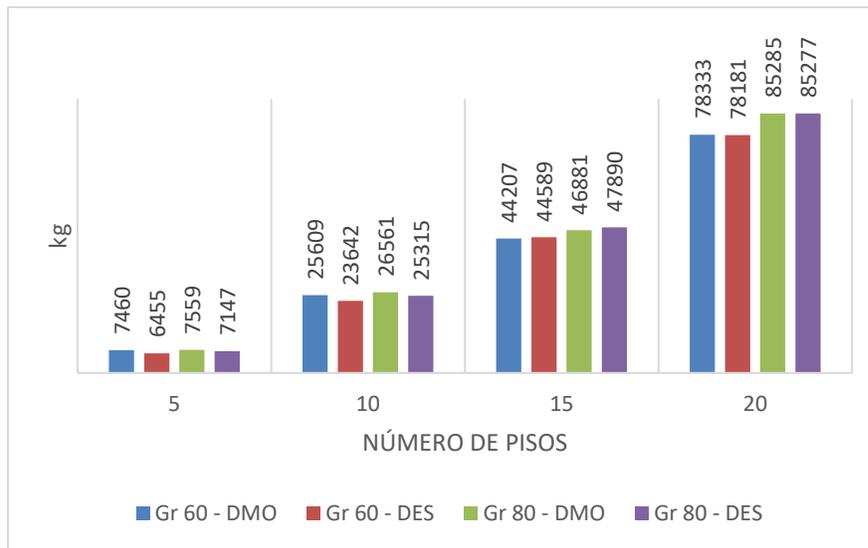
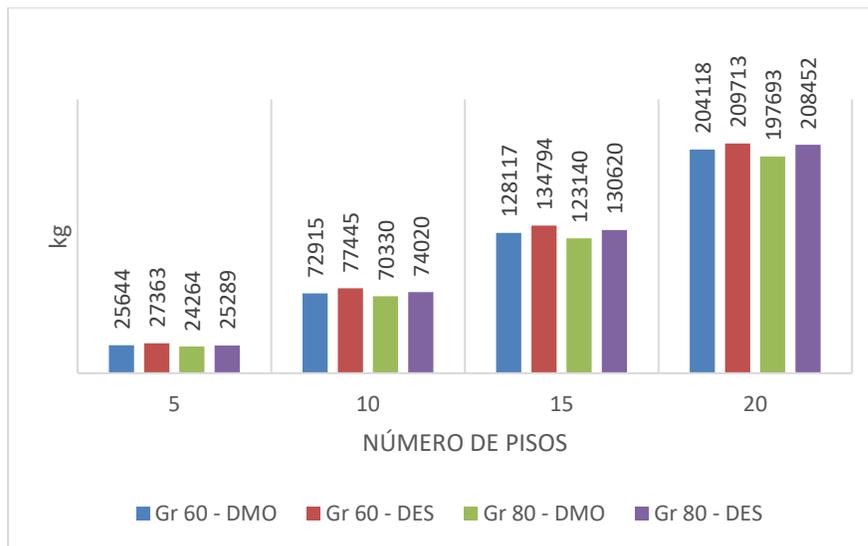


Figura 5-4: Cantidad total de acero requerido, edificaciones tipo A con empalme



Como complemento y para una mayor comprensión, se presenta la Tabla 5-1 con la misma información de cantidades de acero requerido en los elementos primarios (vigas, columnas y muros) de las edificaciones tipo A con empalmes por traslapo, a cada número de piso le corresponden cuatro casos de estudio, los cuales están relacionados con el grado del acero de refuerzo y el grado de disipación de energía escogidos.

Tabla 5-1: Cantidades de acero requerido en los elementos primarios de las edificaciones tipo A con empalmes por traslapo

No. de Pisos	CASO	kg de acero en			
		Vigas	Columnas	Muros	Total
5	Gr 60 - DMO	10850	7334	7460	25644
	Gr 60 - DES	10700	10208	6455	27363
	Gr 80 - DMO	9475	7230	7559	24264
	Gr 80 - DES	9626	8516	7147	25289
10	Gr 60 - DMO	25395	21911	25609	72915
	Gr 60 - DES	23122	30681	23642	77445
	Gr 80 - DMO	21107	22662	26561	70330
	Gr 80 - DES	20378	28327	25315	74020
15	Gr 60 - DMO	42589	41321	44207	128117
	Gr 60 - DES	37532	52673	44589	134794
	Gr 80 - DMO	35585	40674	46881	123140
	Gr 80 - DES	31814	50916	47890	130620
20	Gr 60 - DMO	58007	67778	78333	204118
	Gr 60 - DES	50030	81502	78181	209713
	Gr 80 - DMO	47022	65386	85285	197693
	Gr 80 - DES	41411	81764	85277	208452

5.2 Resultados de los modelos con edificación tipo A y empalmes por conectores mecánicos

En las siguientes Figuras 5-5, 5-6, 5-7 y 5-8 se muestran los resultados de las cantidades de acero requerido obtenidos en los modelos con edificación tipo A y empalmes por conectores mecánicos. Cada número de piso se subdivide en cuatro series, estas se encuentran relacionadas con el grado de acero y el grado de disipación de energía escogidos.

Figura 5-5: Cantidad de acero requerido en vigas, edificaciones tipo A con empalme por conectores mecánicos

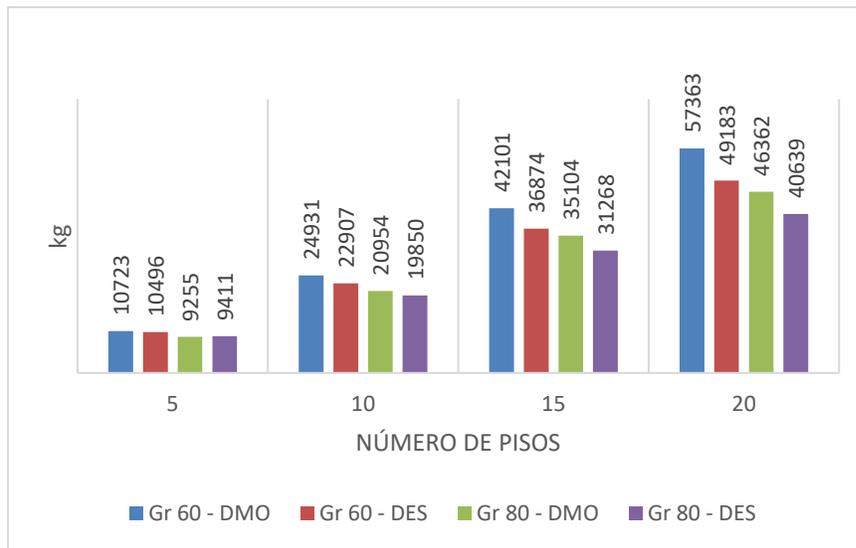


Figura 5-6: Cantidad de acero requerido en columnas, edificaciones tipo A con empalme por conectores mecánicos

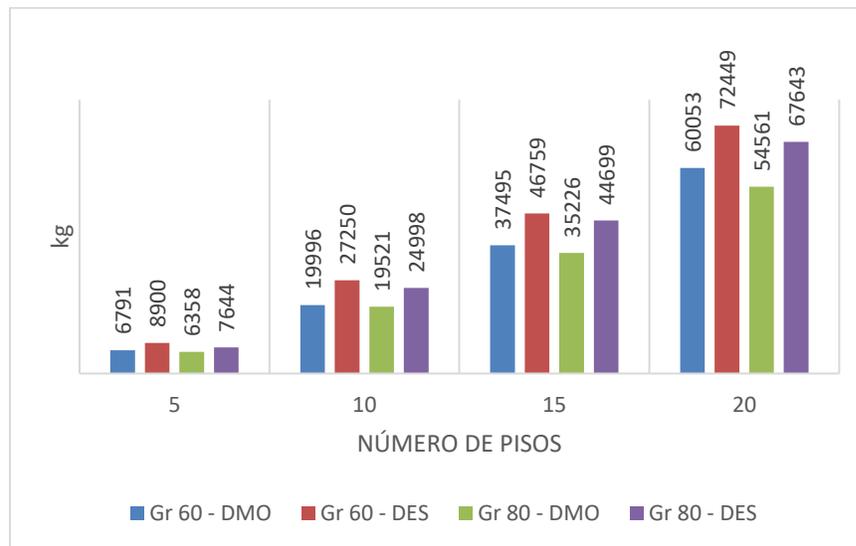


Figura 5-7: Cantidad de acero requerido en muros, edificaciones tipo A con empalme por conectores mecánicos

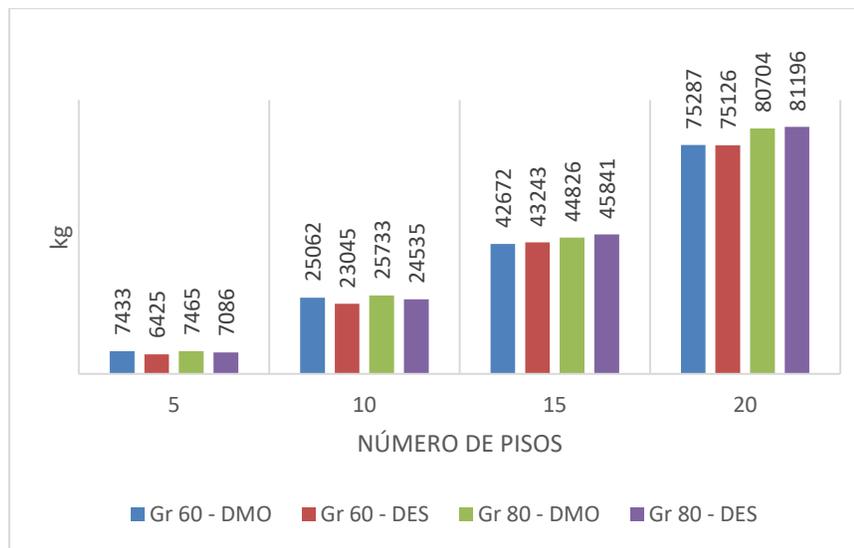
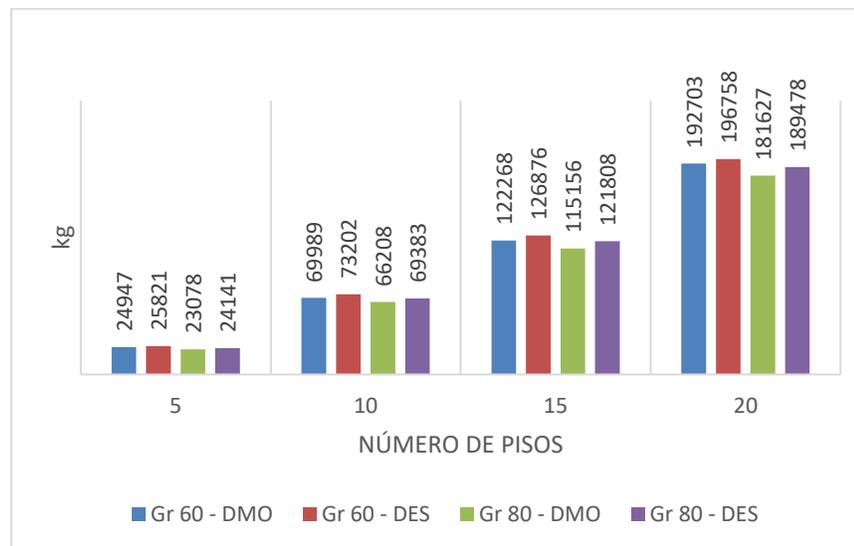


Figura 5-8: Cantidad total de acero requerido, edificaciones tipo A con empalme por conectores mecánicos



Como complemento y para una mayor comprensión, se presenta la tabla 5-2 con la misma información de cantidades de acero y conectores mecánicos requeridos en los elementos primarios (vigas, columnas y muros) de las edificaciones tipo A con empalmes mecánicos, a cada número de piso le corresponden cuatro casos de estudio, los cuales están relacionados con el grado del acero de refuerzo y el grado de disipación de energía escogidos.

Tabla 5-2: Cantidades de acero y conectores mecánicos requeridos en los elementos primarios de las edificaciones tipo A con empalmes por conectores mecánicos

No. de Pisos	CASO	kg de acero en				Cantidad conectores mecánicos en			
		Vigas	Columnas	Muros	Total	Vigas	Columnas	Muros	Total
5	Gr 60 - DMO	10723	6791	7433	24947	199	128	32	359
	Gr 60 - DES	10496	8900	6425	25821	215	128	44	387
	Gr 80 - DMO	9255	6358	7465	23078	223	128	80	431
	Gr 80 - DES	9411	7644	7086	24141	236	128	130	494
10	Gr 60 - DMO	24931	19996	25062	69989	216	384	556	1156
	Gr 60 - DES	22907	27250	23045	73202	275	480	566	1321
	Gr 80 - DMO	20954	19521	25733	66208	291	432	628	1351
	Gr 80 - DES	19850	24998	24535	69383	257	448	560	1265
15	Gr 60 - DMO	42101	37495	42672	122268	320	928	1298	2546
	Gr 60 - DES	36874	46759	43243	126876	392	944	1154	2490
	Gr 80 - DMO	35104	35226	44826	115156	354	944	1430	2728
	Gr 80 - DES	31268	44699	45841	121808	347	944	1358	2649
20	Gr 60 - DMO	57363	60053	75287	192703	365	1284	2646	4295
	Gr 60 - DES	49183	72449	75126	196758	416	1136	2564	4116
	Gr 80 - DMO	46362	54561	80704	181627	399	1128	3060	4587
	Gr 80 - DES	40639	67643	81196	189478	388	1136	2846	4370

5.3 Resultados de los modelos con edificación tipo B y empalmes por traslapo

En las figuras 5-9, 5-10, 5-11 y 5-12 se muestran los resultados de las cantidades de acero requerido obtenidos en los modelos con edificación tipo B y empalmes por traslapo. Cada número de piso se subdivide en cuatro series, estas se encuentran relacionadas con el grado de acero y el grado de disipación de energía escogidos.

Figura 5-9: Cantidad de acero requerido en vigas, edificaciones tipo B con empalme por traslapo

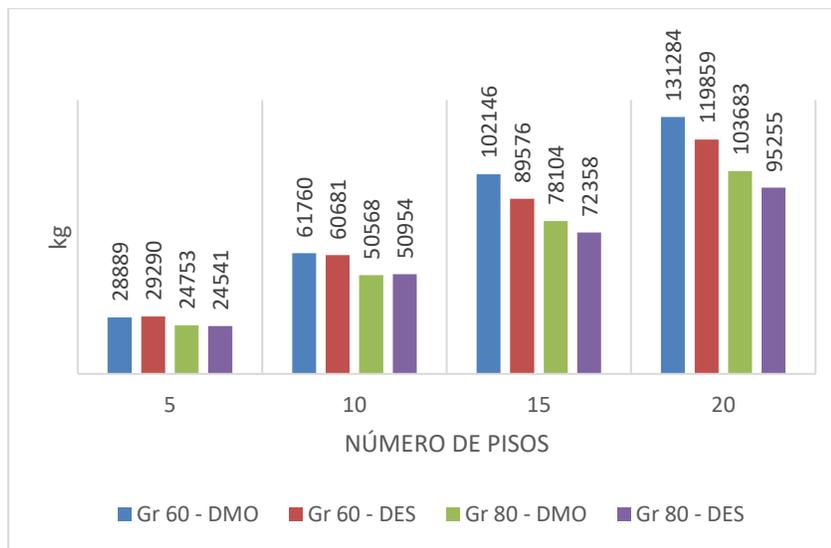


Figura 5-10: Cantidad de acero requerido en columnas, edificaciones tipo B con empalme por traslapo

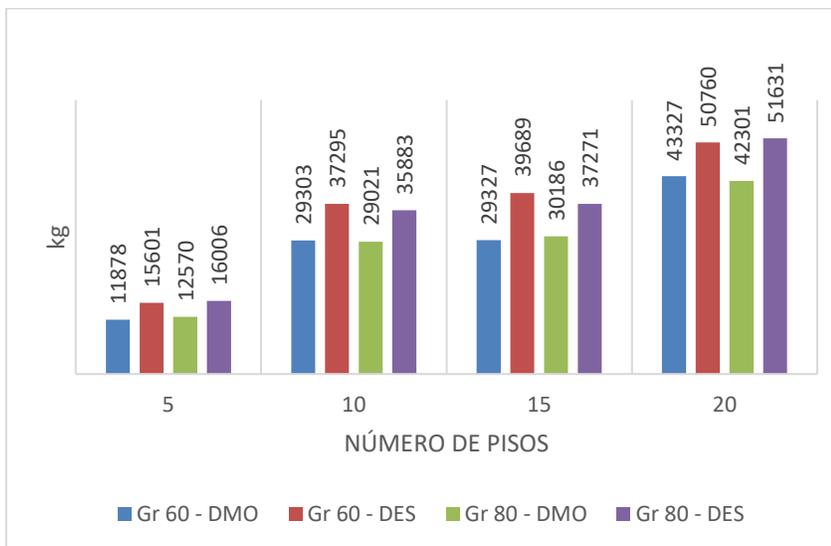


Figura 5-11: Cantidad de acero requerido en muros, edificaciones tipo B con empalme por traslapo

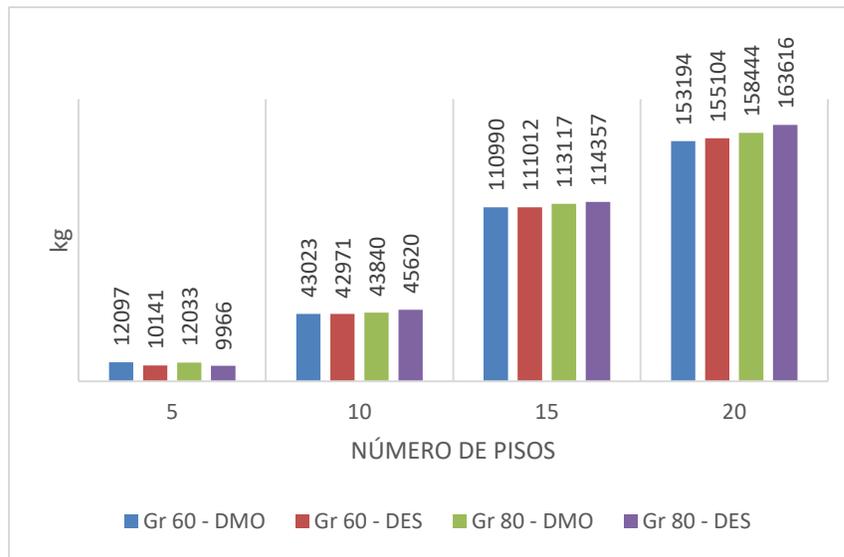
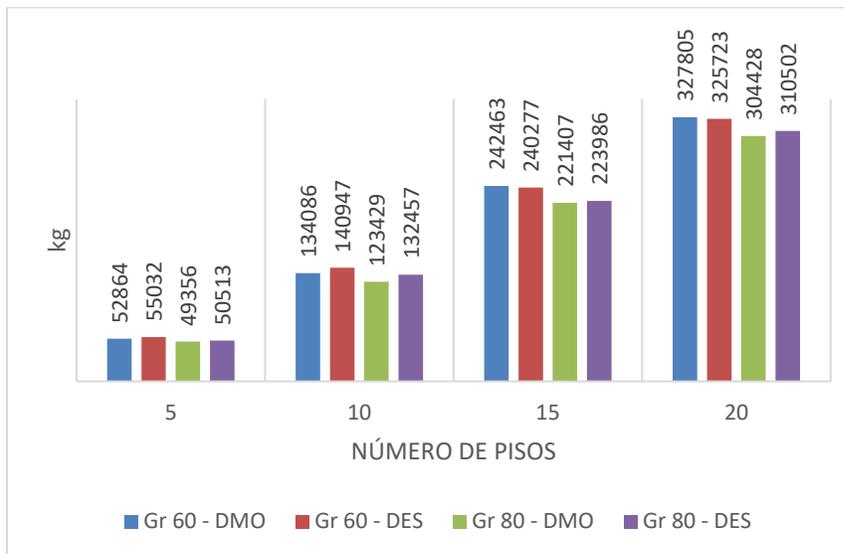


Figura 5-12: Cantidad total de acero requerido, edificaciones tipo B con empalme por traslapo



Como complemento y para una mayor comprensión se presenta la tabla 5-3 con la misma información de cantidades de acero requerido en los elementos primarios (vigas, columnas y muros) de las edificaciones tipo B con empalme por traslapo, a cada número de piso le corresponden cuatro casos de estudio, los cuales están relacionados con el grado del acero de refuerzo y el grado de disipación de energía escogidos.

Tabla 5-3: Cantidades de acero requerido en los elementos primarios de las edificaciones tipo B con empalmes por traslapo

No. de Pisos	CASO	kg de acero en			
		Vigas	Columnas	Muros	Total
5	Gr 60 - DMO	28889	11878	12097	52864
	Gr 60 - DES	29290	15601	10141	55032
	Gr 80 - DMO	24753	12570	12033	49356
	Gr 80 - DES	24541	16006	9966	50513
10	Gr 60 - DMO	61760	29303	43023	134086
	Gr 60 - DES	60681	37295	42971	140947
	Gr 80 - DMO	50568	29021	43840	123429
	Gr 80 - DES	50954	35883	45620	132457
15	Gr 60 - DMO	102146	29327	110990	242463
	Gr 60 - DES	89576	39689	111012	240277
	Gr 80 - DMO	78104	30186	113117	221407
	Gr 80 - DES	72358	37271	114357	223986
20	Gr 60 - DMO	131284	43327	153194	327805
	Gr 60 - DES	119859	50760	155104	325723
	Gr 80 - DMO	103683	42301	158444	304428
	Gr 80 - DES	95255	51631	163616	310502

5.4 Resultados de los modelos con edificación tipo B y empalmes por conectores mecánicos

En las figuras 5-13, 5-14, 5-15 y 5-16 se muestran los resultados de las cantidades de acero requerido obtenidos en los modelos con edificación tipo B y empalmes por conectores mecánicos. Cada número de piso se subdivide en cuatro series, estas se encuentran relacionadas con el grado de acero y el grado de disipación de energía escogidos.

Figura 5-13: Cantidad de acero requerido en vigas, edificaciones tipo B con empalme por conectores mecánicos

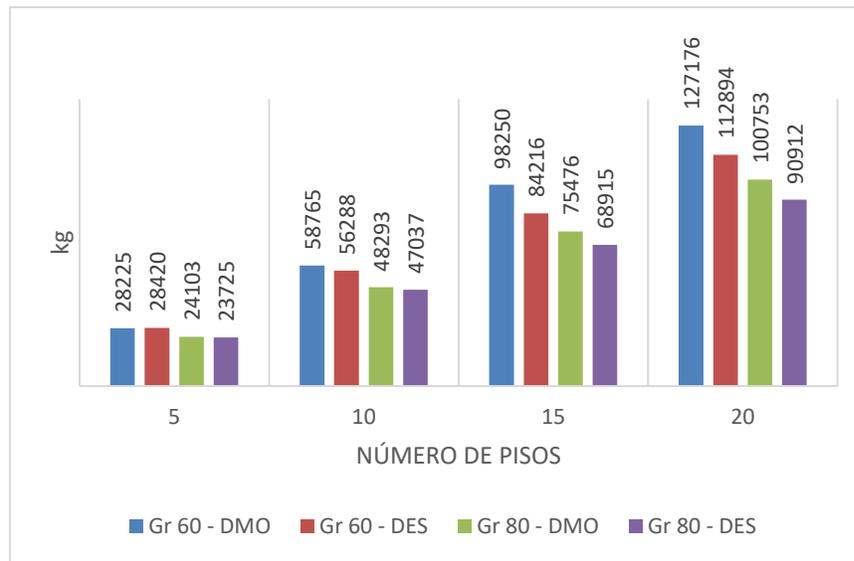


Figura 5-14: Cantidad de acero requerido en columnas, edificaciones tipo B con empalme por conectores mecánicos

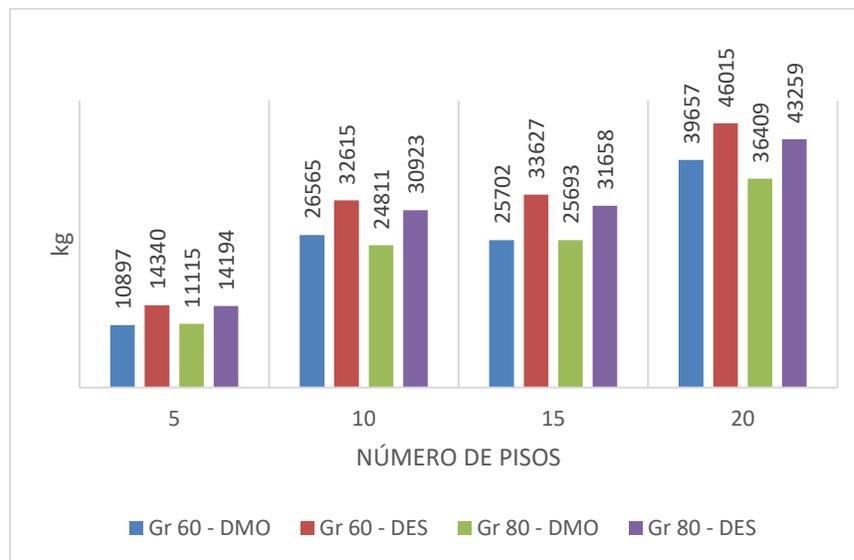


Figura 5-15: Cantidad de acero requerido en muros, edificaciones tipo B con empalme por conectores mecánicos

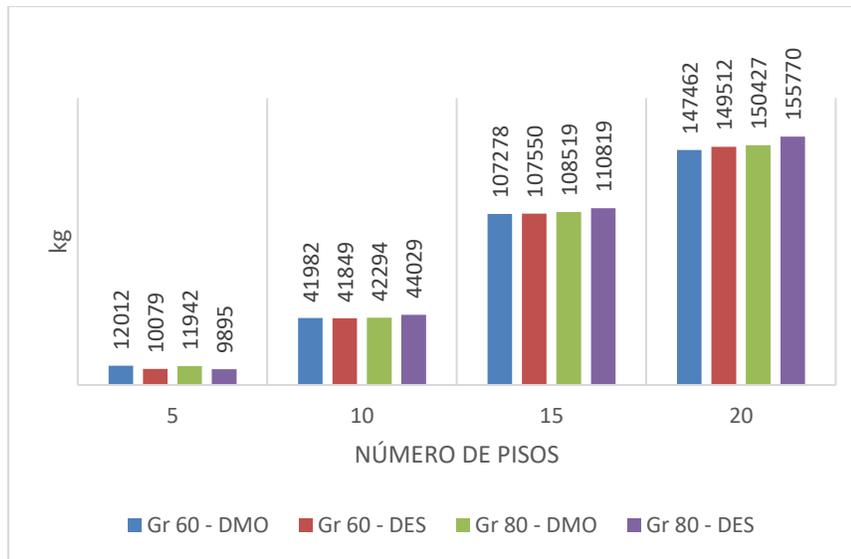
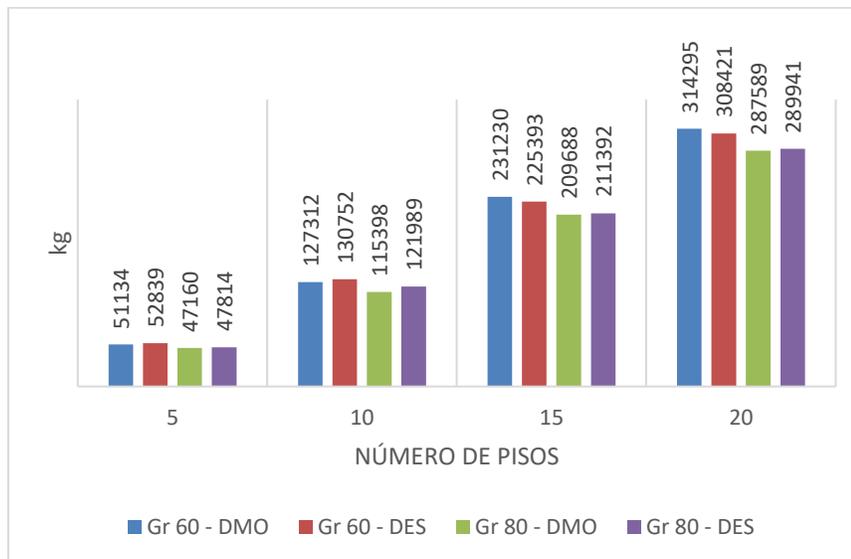


Figura 5-16: Cantidad total de acero requerido, edificaciones tipo B con empalme por conectores mecánicos



Como complemento y para una mayor comprensión, se presenta una tabla con la misma información de cantidades de acero y conectores mecánicos requeridos en los elementos primarios (vigas, columnas y muros) en las edificaciones tipo B con conectores mecánico, a cada número de piso le corresponden cuatro casos de estudio, los cuales están

relacionados con el grado del acero de refuerzo y el grado de disipación de energía escogidos.

Tabla 5-4: Cantidades de acero y conectores mecánicos requeridos en los elementos primarios de las edificaciones tipo B con empalmes por conectores mecánicos

No. de Pisos	CASO	kg de acero en				Cantidad conectores mecánicos en			
		Vigas	Columnas	Muros	Total	Vigas	Columnas	Muros	Total
5	Gr 60 - DMO	28225	10897	12012	51134	547	176	66	789
	Gr 60 - DES	28420	14340	10079	52839	639	192	68	899
	Gr 80 - DMO	24103	11115	11942	47160	465	192	80	737
	Gr 80 - DES	23725	14194	9895	47814	543	192	72	807
10	Gr 60 - DMO	58765	26565	41982	127312	1090	532	948	2570
	Gr 60 - DES	56288	32615	41849	130752	1025	616	922	2563
	Gr 80 - DMO	48293	24811	42294	115398	827	616	1118	2561
	Gr 80 - DES	47037	30923	44029	121989	925	616	1112	2653
15	Gr 60 - DMO	98250	25702	107278	231230	1601	664	3144	5409
	Gr 60 - DES	84216	33627	107550	225393	1304	672	2900	4876
	Gr 80 - DMO	75476	25693	108519	209688	1133	672	3192	4997
	Gr 80 - DES	68915	31658	110819	211392	990	672	3136	4798
20	Gr 60 - DMO	127176	39657	147462	314295	2108	1032	5008	8148
	Gr 60 - DES	112894	46015	149512	308421	1990	888	5008	7886
	Gr 80 - DMO	100753	36409	150427	287589	1420	888	5484	7792
	Gr 80 - DES	90912	43259	155770	289941	1516	888	5400	7804

6. Análisis de datos

En este capítulo se presentan las tendencias económicas encontradas al modificar las variables estudiadas; para mejor entendimiento esta sección se divide en cuatro subsecciones.

En la primera subsección a partir de la cantidad de acero y conectores mecánicos requeridos para cada caso de estudio, se hizo la estimación de los costos de cada elemento estructural (vigas, columnas y muros) y el total en toda la estructura, esta estimación se hizo por medio de información de precios obtenida en el mercado colombiano y pilotos acerca de la producción del acero grado 80; a partir de la estimación de los costos se pudo evaluar la factibilidad económica de la modificación de las variables estudiadas el cual se presenta en las siguientes subsecciones.

En la segunda subsección se muestran las variaciones de las cantidades de acero requerido y de los costos en los elementos estructurales debido al cambio del tipo de empalme para cada tipo de edificación, a partir de esto se pudo conocer el efecto que tiene la escogencia del empalme mecánicos ante el empalme por traslapo que es el más usado en los procesos constructivos en Colombia, esta subsección se dividió en las edificaciones tipo A y tipo B.

En la tercera subsección se muestran las variaciones en la cantidad de acero requerido y los costos en los elementos estructurales debido a la modificación del grado de disipación de energía en las edificaciones tipo A y B, a partir de esto se conoció el efecto que tiene la escogencia de un grado de disipación de energía más alto que el exigido normalmente en zonas de amenaza sísmica intermedia.

En la cuarta subsección se muestran las variaciones en las cantidades de acero requerido y de los costos en los elementos estructurales debido a la modificación del grado del acero de refuerzo utilizado en el diseño de las edificaciones tipo A y B. A partir de esto se conoció el efecto que tiene el grado del acero de refuerzo grado 80 ante el refuerzo tradicional grado 60, igualmente, esta subsección se dividió en las estructuras estudiadas con empalmes por traslapo y por conectores mecánicos.

Finalmente, en la quinta subsección se realiza la verificación de los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado junto a los resultados obtenidos en los documentos estudiados en el estado del arte.

Las subsecciones son:

- 6.1 Estimación de los costos a partir de la cantidad de acero y conectores mecánicos requeridos según el caso de estudio.
- 6.2 Análisis del efecto del tipo de empalme utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados.
 - 6.2.1 Análisis del efecto del tipo de empalme utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en las edificaciones tipo A.
 - 6.2.2 Análisis del efecto del tipo de empalme utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en las edificaciones tipo B.
- 6.3 Análisis del efecto del grado de disipación de energía utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados.
- 6.4 Análisis del efecto del grado del acero de refuerzo utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados.
 - 6.4.1 Análisis del efecto del grado del acero de refuerzo utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en edificaciones tipo A con empalmes por traslapo.

- 6.4.2 Análisis del efecto del grado del acero de refuerzo utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en edificaciones tipo A con empalmes mecánicos.
 - 6.4.3 Análisis del efecto del grado del acero de refuerzo utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en edificaciones tipo B con empalmes por traslazo.
 - 6.4.4 Análisis del efecto del grado del acero de refuerzo utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en edificaciones tipo B con empalmes mecánicos.
-
- 6.5 Verificación de resultados

Adicionalmente, como complemento en el anexo 2 se presentan tablas con la misma información de análisis respecto al acero y conectores mecánicos requeridos en los elementos primarios (vigas, columnas y muros) para cada subcapítulo del análisis de datos con su respectivo caso de estudio.

6.1 Estimación de los costos a partir de la cantidad de acero y conectores mecánicos requeridos según el caso de estudio.

La estimación de los costos de cada elemento estructural estudiado como las vigas, columnas y muros se realizó a partir de información obtenida en el mercado colombiano en cuanto al acero grado 60 y los conectores mecánicos. El kg de acero de grado 60 se comercializa a la fecha en \$ 2.300 m/cte, mientras que los conectores mecánicos se comercializan por unidad como se indica en la tabla 6-1, los costos de estos conectores hacen referencia a los conectores roscados, ya que son los de uso más común en Colombia, para estos no influye el grado de acero al cual se tenga que producir para cumplir con la NSR-10 según se consultó con Ramalza, empresa pionera en la producción de conectores mecánicos tipo 2 en Colombia. En cuanto al acero grado 80, se han realizado una serie de pilotos acerca de la producción y costo de venta por kg, el cual se tiene estimado en \$2.700 m/cte, con estos datos se realizó la estimación de los costos según el caso de estudio.

Tabla 6-1: Costo conectores mecánicos según diámetro de barra

Costos conectores mecánicos según diámetro de barra				
Diámetro de barra	#4	#5	#6	#7
Costo por unidad	8.600	8.600	10.400	13.100

6.1.1 Estimación de los costos de edificaciones tipo A con empalmes por traslapo

En las figuras 6-1, 6-2, 6-3 y 6-4 se muestran los resultados de los costos estimados en millones de pesos según las cantidades de acero requerido obtenidos en los modelos con edificación tipo A y empalmes por traslapo. Cada número de piso se subdivide en cuatro series, estas se encuentran relacionadas con el grado de acero y el grado de disipación de energía escogidos.

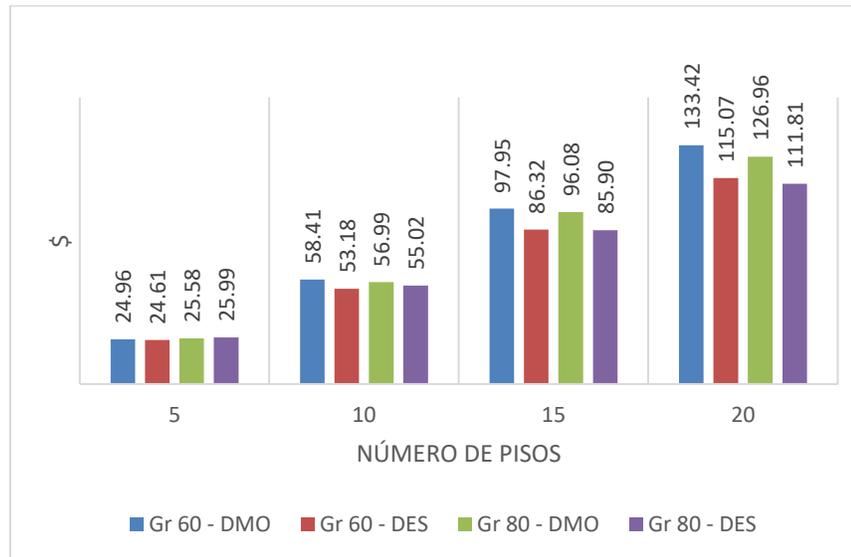
Figura 6-1: Costo en millones de pesos en vigas, edificaciones tipo A con empalme por traslapo

Figura 6-2: Costo en millones de pesos en columnas, edificaciones tipo A con empalme por traslapo

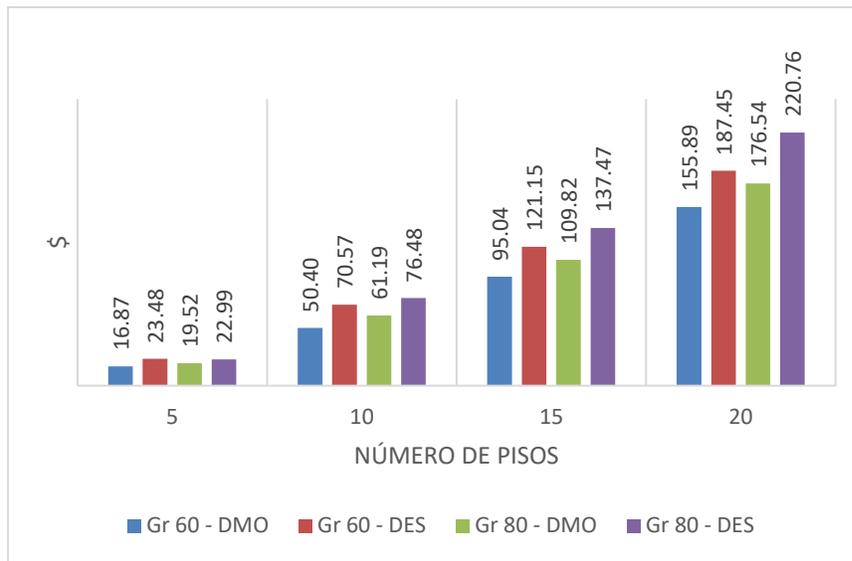


Figura 6-3: Costo en millones de pesos en muros, edificaciones tipo A con empalme por traslapo

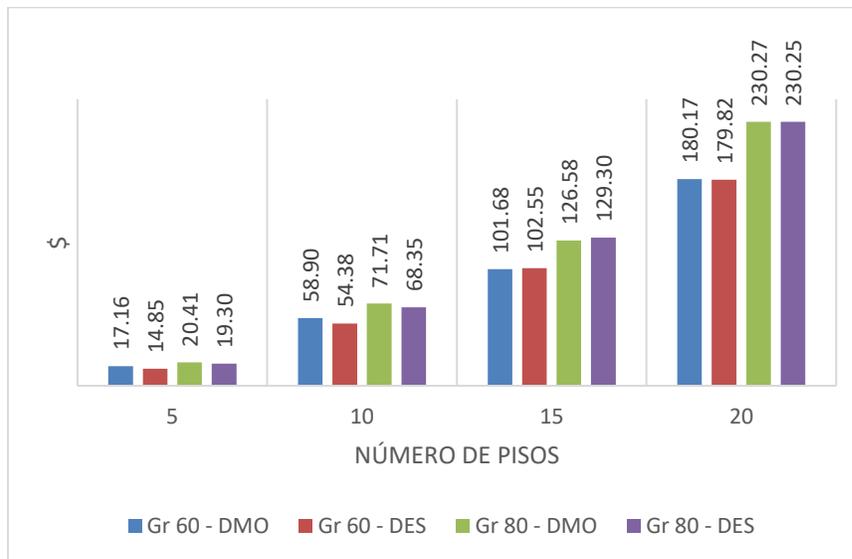
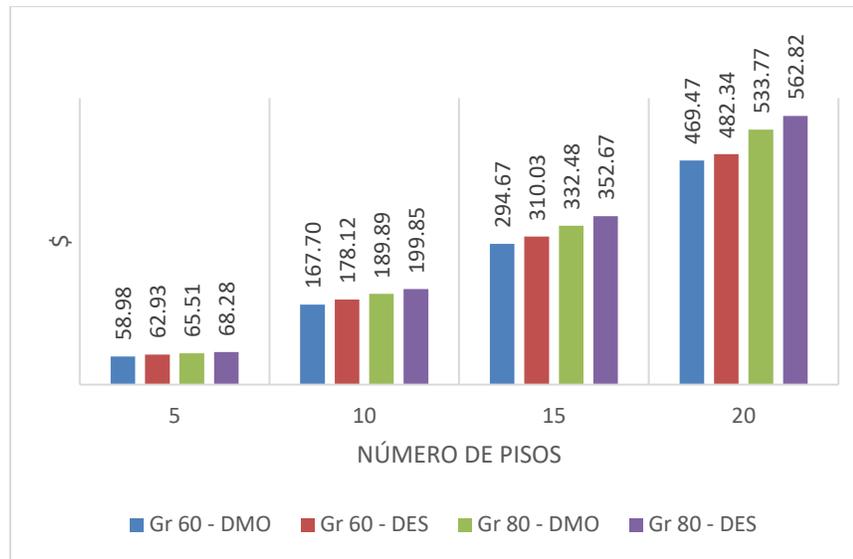


Figura 6-4: Costo total en millones de pesos, edificaciones tipo A con empalme por traslapo



6.1.2 Estimación de los costos edificaciones tipo A con empalmes por conectores mecánicos

En las figuras 6-5, 6-6, 6-7 y 6-8 se muestran los resultados de los costos estimados en millones de pesos según la suma de las cantidades de acero y conectores mecánicos requeridos obtenidos en los modelos con edificación tipo A y empalmes por conectores mecánicos. Cada número de piso se subdivide en cuatro series, estas relacionadas con el grado de acero y el grado de disipación de energía escogidos.

Figura 6-5: Costo en millones de pesos en vigas, edificaciones tipo A con empalme por conectores mecánicos

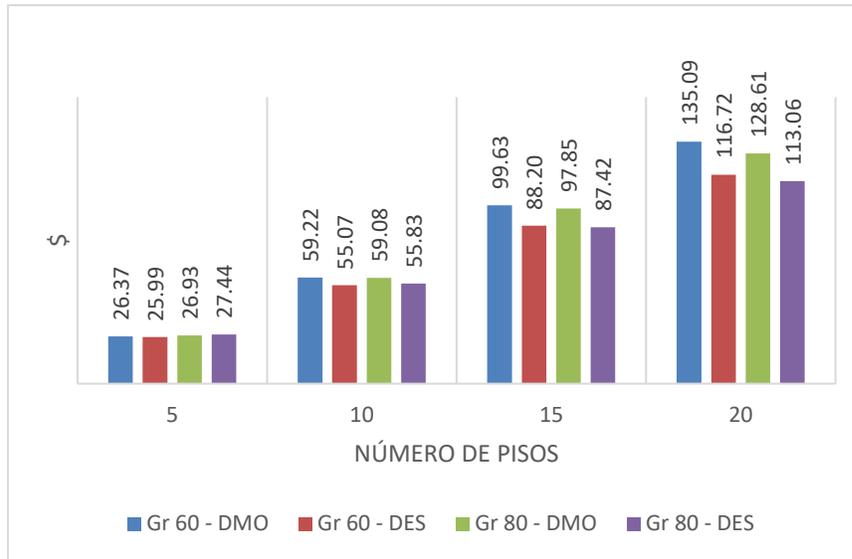


Figura 6-6: Costo en millones de pesos en columnas, edificaciones tipo A con empalme por conectores mecánicos

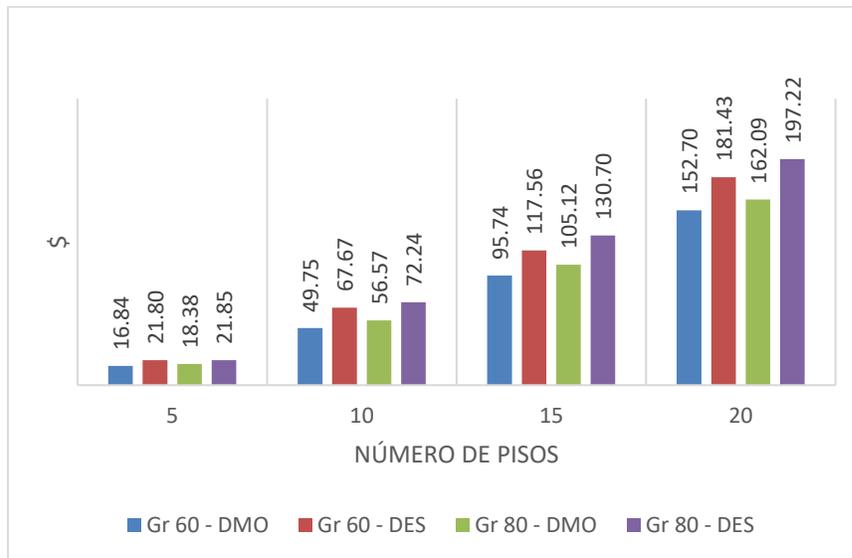


Figura 6-7: Costo en millones de pesos en muros, edificaciones tipo A con empalme por conectores mecánicos

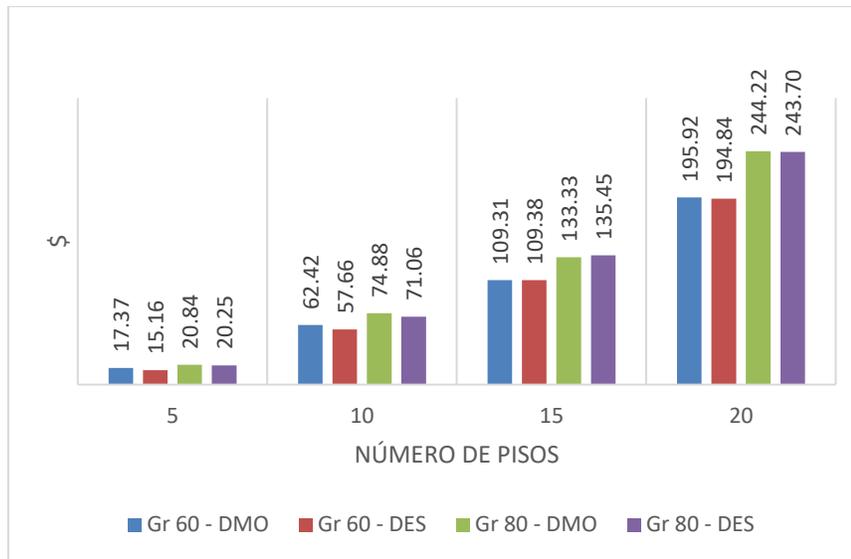
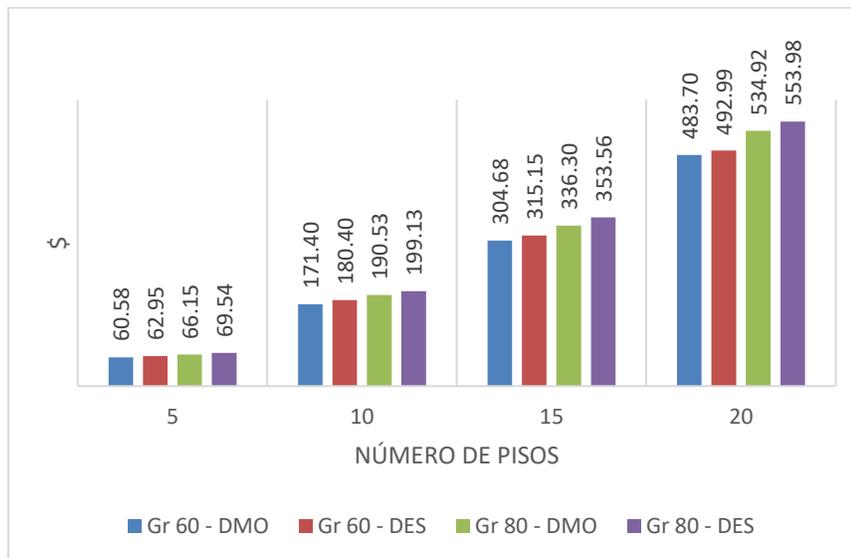


Figura 6-8: Costo total en millones de pesos, edificaciones tipo A con empalme por conectores mecánicos



6.1.3 Estimación de los costos edificaciones tipo B con empalmes por traslapo

En las figuras 6-9, 6-10, 6-11 y 6-12 se muestran los resultados de los costos estimados en millones de pesos según las cantidades de acero requerido obtenidos en los modelos

con edificación tipo B y empalmes por traslapo. Cada número de piso se subdivide en cuatro series, estas relacionadas con el grado de acero y el grado de disipación de energía escogidos.

Figura 6-9: Costo en millones de pesos en vigas, edificaciones tipo B con empalme por traslapo

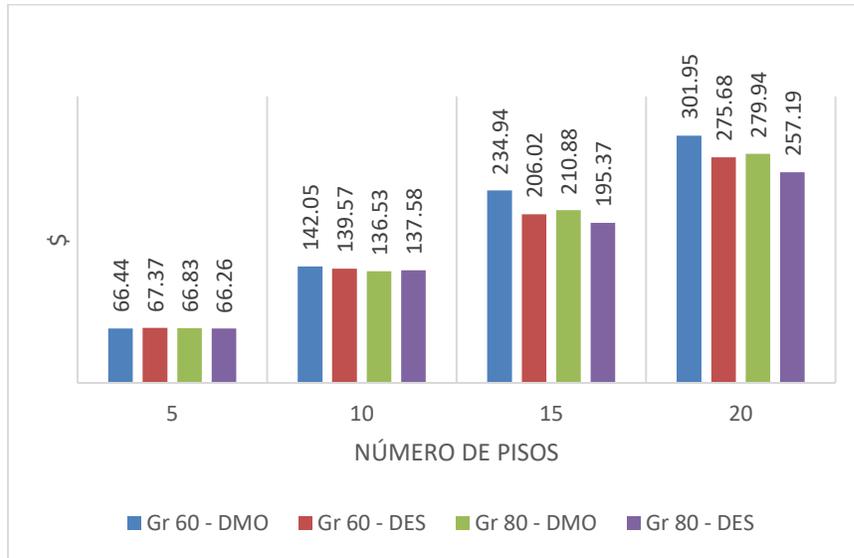


Figura 6-10: Costo en millones de pesos en columnas, edificaciones tipo B con empalme por traslapo

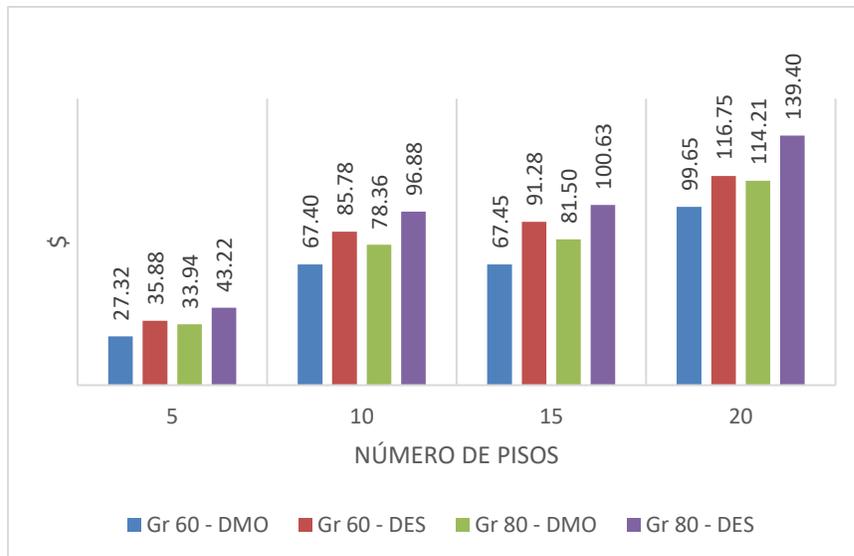


Figura 6-11: Costo en millones de pesos en muros, edificaciones tipo B con empalme por traslapo

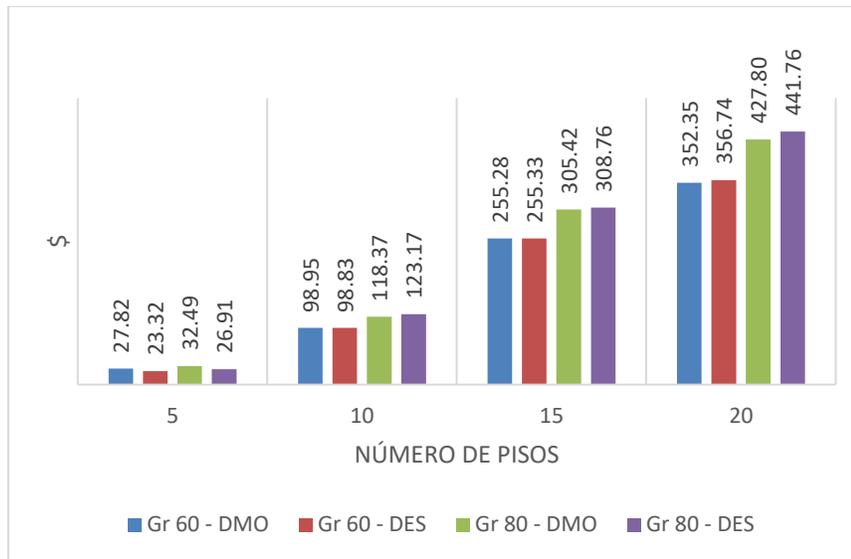
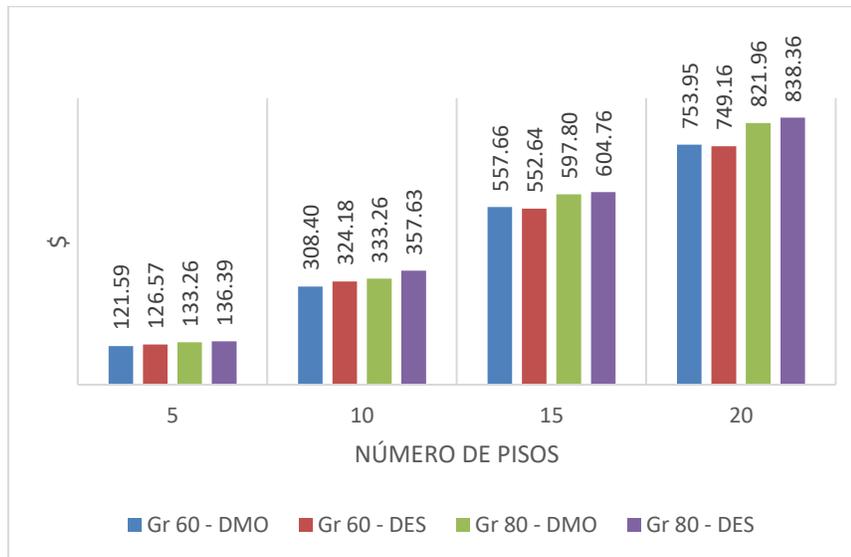


Figura 6-12: Costo total en millones de pesos, edificaciones tipo B con empalme por traslapo



6.1.4 Estimación de los costos edificaciones tipo B con empalmes por conectores mecánicos

En las figuras 6-13, 6-14, 6-15 y 6-16 se muestran los resultados de los costos estimados en millones de pesos según la suma de las cantidades de acero y conectores mecánicos requeridos obtenidos en los modelos con edificación tipo B y empalmes por conectores mecánicos. Cada número de piso se subdivide en cuatro series, estas relacionadas con el grado de acero y el grado de disipación de energía escogidos.

Figura 6-13: Costo en millones de pesos en vigas, edificaciones tipo B con empalme por conectores mecánicos

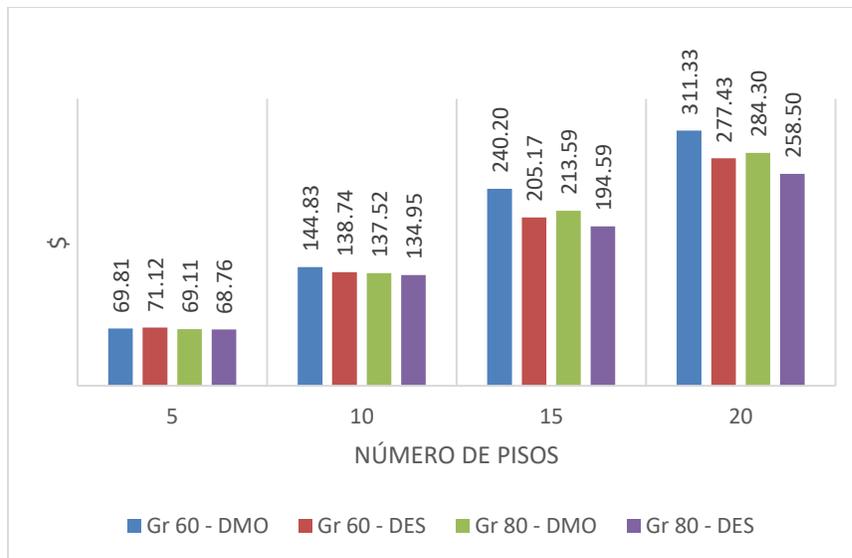


Figura 6-14: Costo en millones de pesos en columnas, edificaciones tipo B con empalme por conectores mecánicos

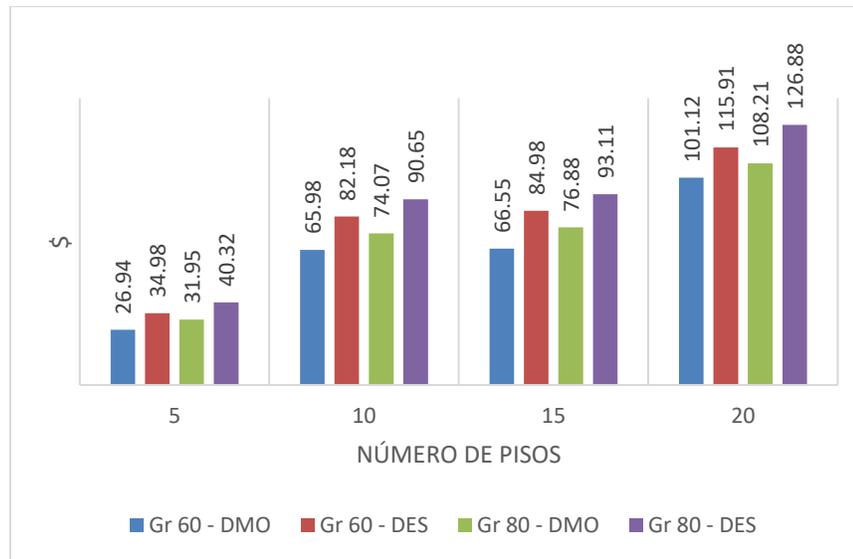


Figura 6-15: Costo en millones de pesos en muros, edificaciones tipo B con empalme por conectores mecánicos

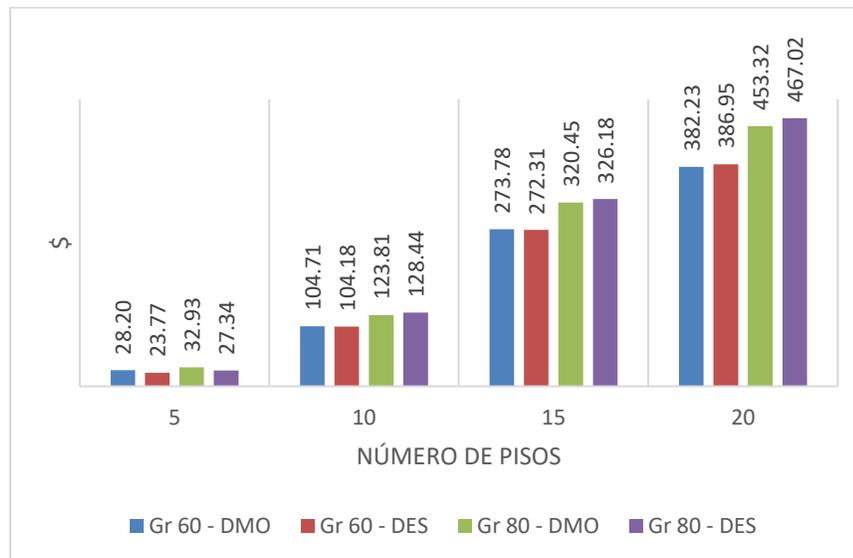
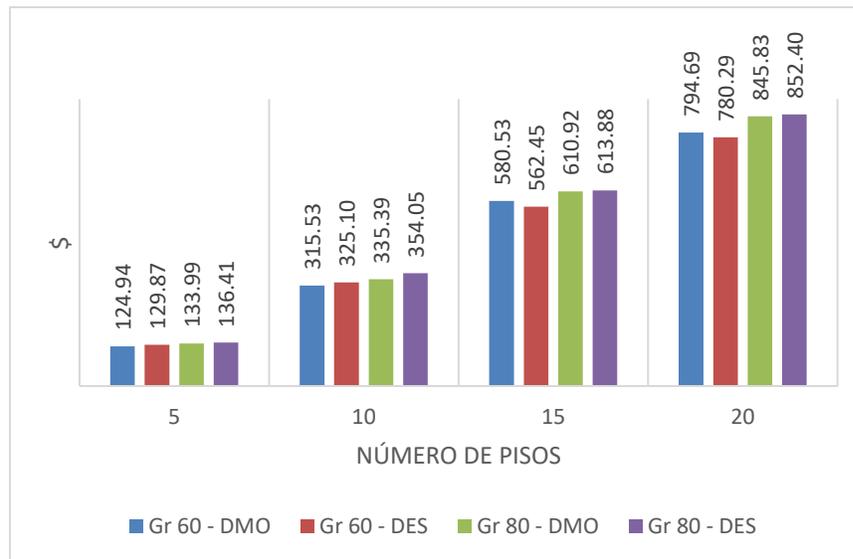


Figura 6-16: Costo total en millones de pesos, edificaciones tipo B con empalme por conectores mecánicos



A partir de los costos estimados anteriormente se realizó el análisis entre los diferentes modelos estudiados, con el fin de determinar la factibilidad económica de usar acero grado 80 como acero interno del concreto reforzado, teniendo en cuenta las demás variables como el grado de disipación de energía y el tipo de empalme escogido en el diseño estructural.

6.2 Análisis del efecto del tipo de empalme utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados

En la presente sección se analiza el efecto del cambio del empalme por traslapo a empalmes mecánicos para cada tipo de edificación A y B, analizando las variaciones de las cantidades de acero requerido y de los costos estimados en los elementos estructurales como consecuencia de la variación del tipo de empalme escogido. A continuación, se muestra el análisis realizado para cada tipo de edificación definida anteriormente.

6.2.1 Análisis del efecto del tipo de empalme utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en las edificaciones tipo A

Inicialmente se estudia el efecto del tipo de empalme utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados, analizando la variación de estas con respecto al caso estudiado, es decir, respecto al grado de acero y el grado de disipación de energía, manteniendo el número de pisos constante.

En las figuras 6-17, 6-18, 6-19, 6-20, 6-21, 6-22, 6-23 y 6-24 se muestra la variación de las cantidades de acero requerido y de los costos estimados en los elementos primarios de las edificaciones tipo A, al variar el tipo de empalme escogido en cada caso de estudio, manteniendo constante el número de pisos, cada serie está dividida según el caso de estudio definidas anteriormente. Cabe resaltar que una variación porcentual positiva en las variaciones de las cantidades de acero requerido indica una disminución en las cantidades de acero requerido al utilizar empalmes mecánicos, asimismo, una variación porcentual positiva en las variaciones de los costos estimados, indica una disminución de los costos estimados al utilizar empalmes mecánicos.

Figura 6-17: Variación en las cantidades de acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo A, 5 pisos

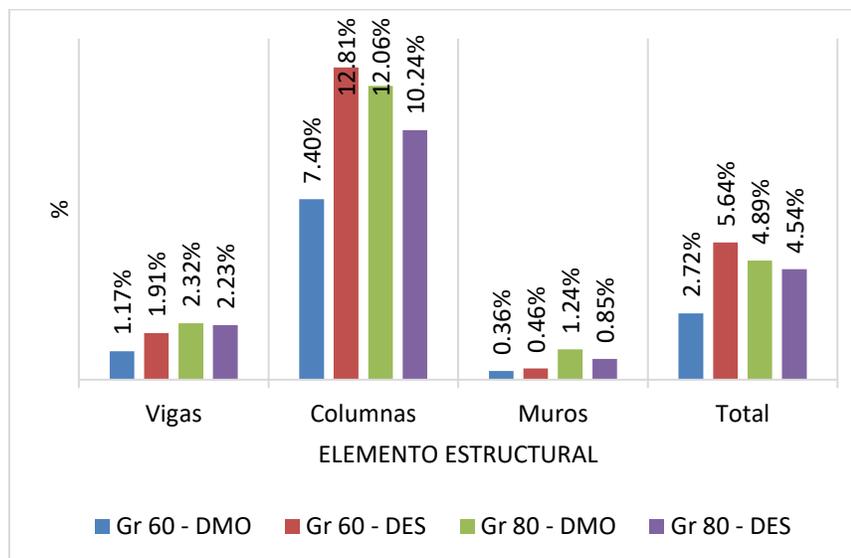


Figura 6-18: Variación del costo estimado del acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo A, 5 pisos

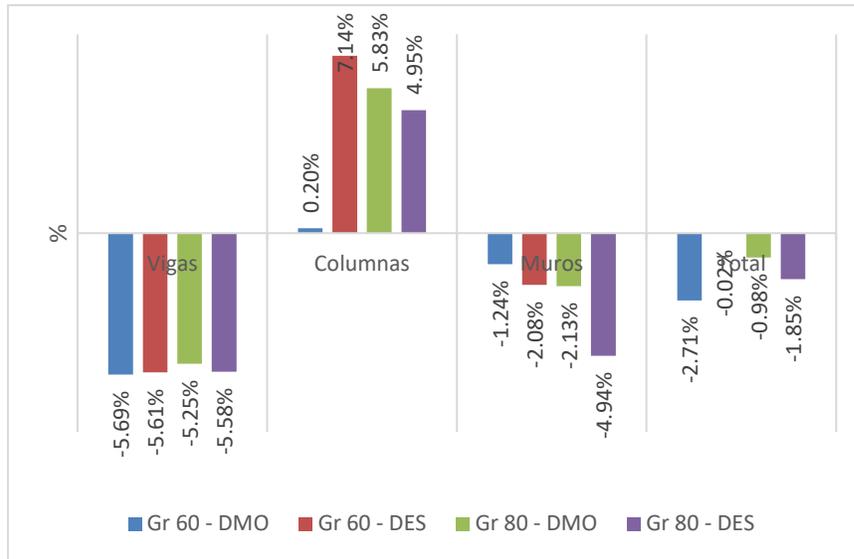


Figura 6-19: Variación en las cantidades de acero requerido con empalmes /mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo A, 10 pisos

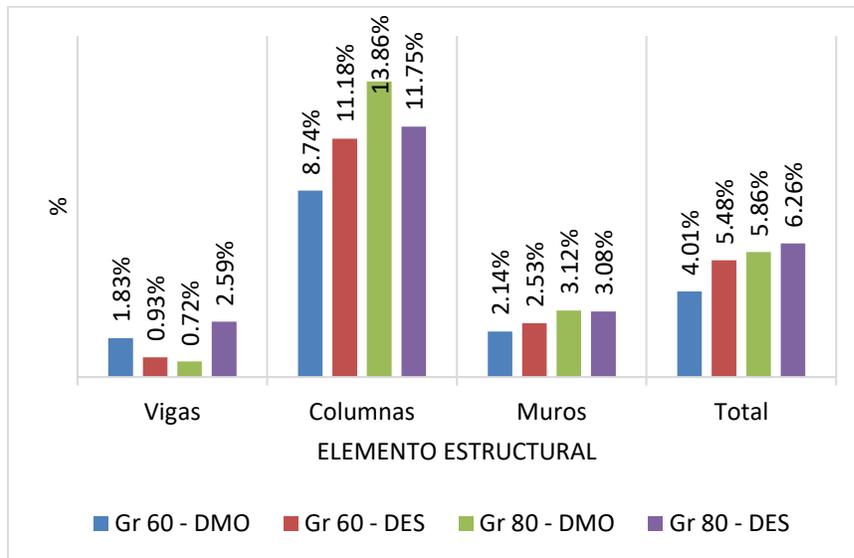


Figura 6-20: Variación del costo estimado del acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo A, 10 pisos

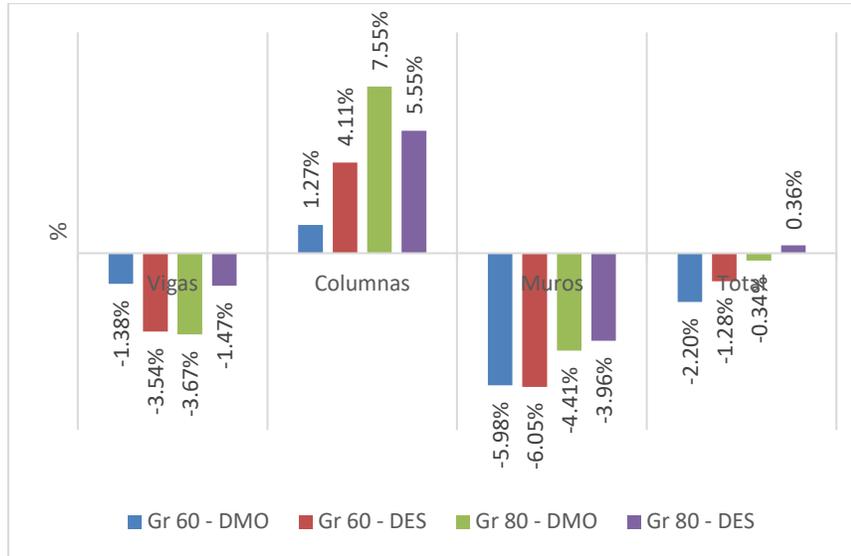


Figura 6-21: Variación en las cantidades de acero requerido con empalmes por conectores mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo A, 15 pisos

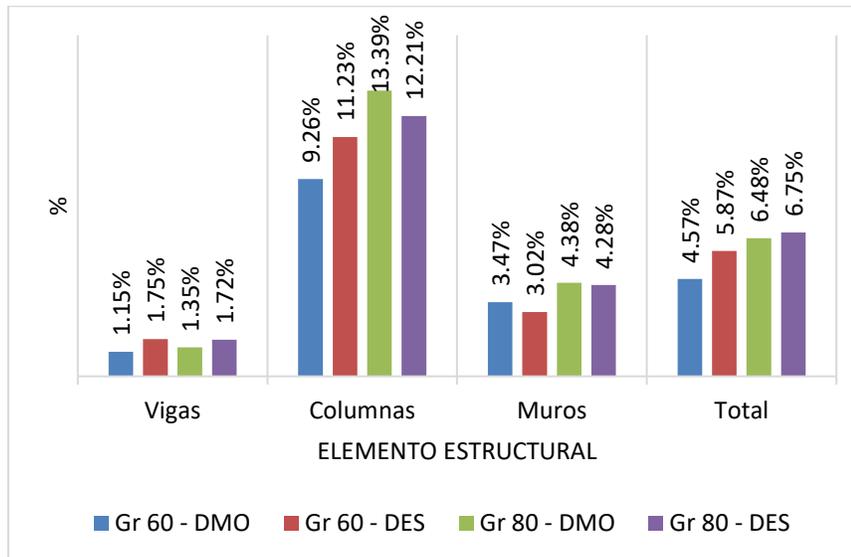


Figura 6-22: Variación del costo estimado del acero requerido, con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo A, 15 pisos

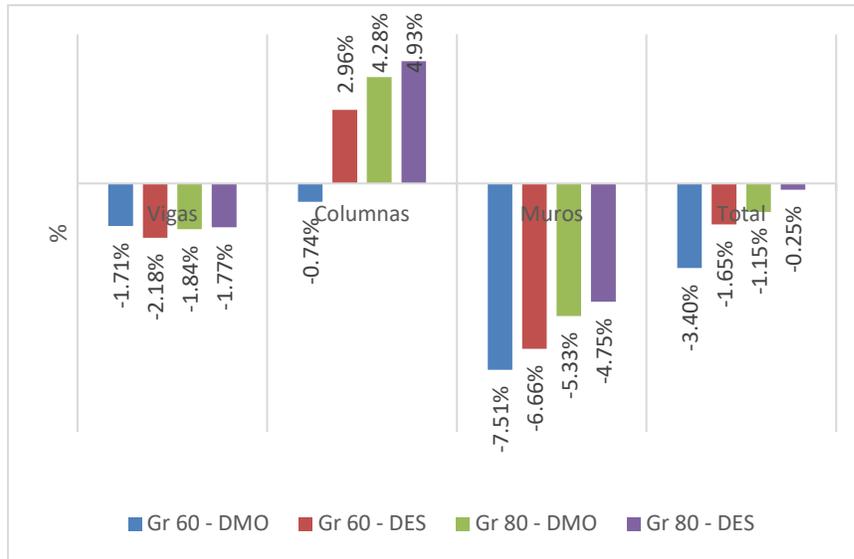


Figura 6-23: Variación en las cantidades de acero requerido con empalmes por conectores mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo A, 20 pisos

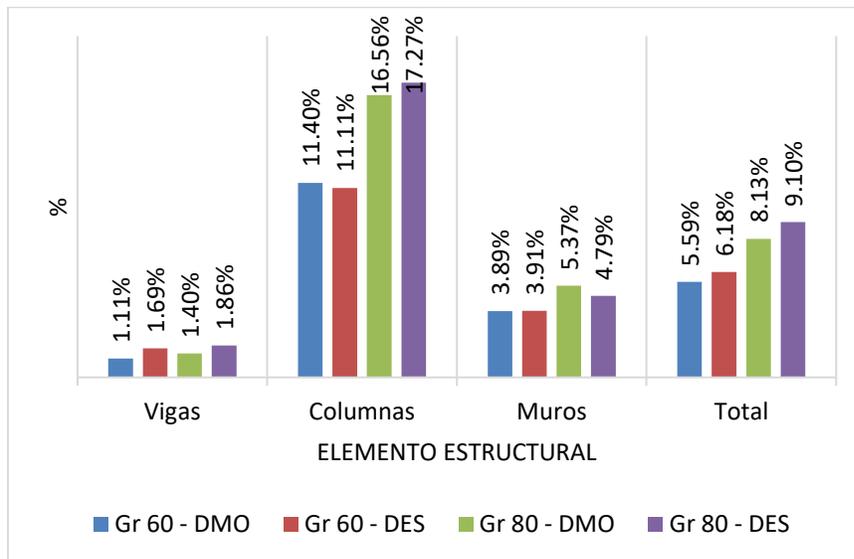
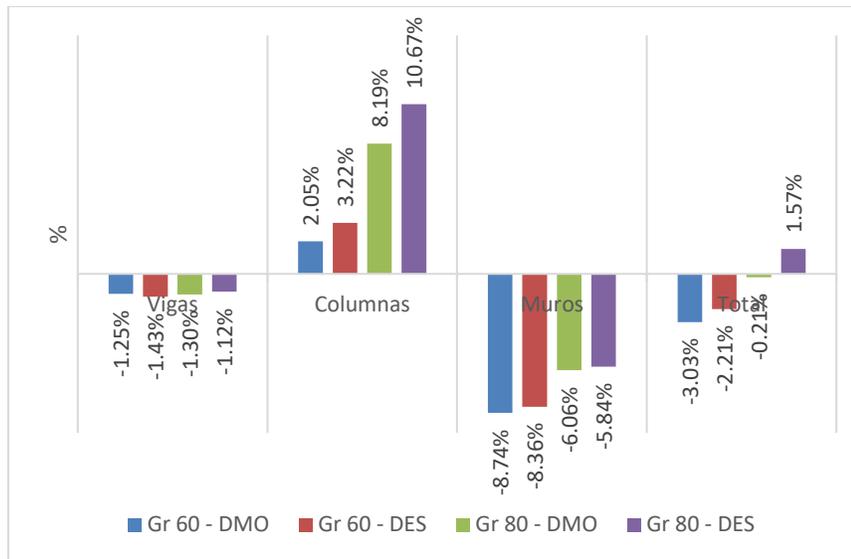


Figura 6-24: Variación del costo estimado del acero requerido, con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo A, 20 pisos



En general, las gráficas donde se expone el efecto sobre las cantidades de acero requerido muestran que existe una variación positiva al usar conectores mecánicos como empalme en los elementos estructurales para cada piso estudiado, asimismo, para el caso de los costos estimados se evidencia una tendencia en la cual el beneficio económico se ve reflejado únicamente en las columnas; sin embargo, resulta una variación negativa al totalizar los costos respecto a los elementos estructurales.

Del comportamiento de la variación de las cantidades de acero requerido, se evidencia una baja variación respecto a las vigas y a los muros estructurales, en las vigas se debe a que al disponerse acero de refuerzo para soportar las solicitaciones en una zona requerida, en la zona siguiente no serán las mismas solicitaciones, es decir, no se necesitaría el refuerzo continuo en todo el elemento estructural, esto hace que con una barra de 12 metros o menos de longitud se puedan satisfacer las solicitaciones presentes sin tener que utilizar empalmes. Caso similar pasa en los muros estructurales, en los que en los pisos inferiores se tienen mayores solicitaciones, y el refuerzo no será continuo a lo largo de este. Caso contrario a las columnas, debido a que, en estas, al requerirse la misma cantidad de refuerzo longitudinal a lo largo de las mismas al requerir cuantía mínima, resulta necesario empalmar las barras, es ahí donde se evidencia el beneficio de utilizar conectores mecánicos.

En el caso del costo estimado, se muestra una variación negativa en las vigas, muros y el totalizado de los tres elementos estructurales primarios, a pesar de que las variaciones en las cantidades de acero requerido eran positivas, el sobrecosto de utilizar empalmes mecánicos no compensa la poca variación en las cantidades de acero requerido en estos casos, haciendo que no sea favorable utilizar empalmes mecánicos en estos elementos. Caso contrario a las columnas, en donde en todos los casos la variación al utilizar conectores mecánicos resulta positiva, tanto en las cantidades de acero requerido como en los costos estimados, haciendo propicio el uso de estos sobre los empalmes por traslapo.

Cabe resaltar que en la mayoría de los casos las variaciones en las cantidades de acero requerido eran mayores para el acero grado 80, y que, en el análisis de las variaciones de los costos estimados, a pesar de los sobrecostos y el diferente número de conectores requerido en cada caso esta tendencia se ve igualmente reflejada, adicionalmente los casos con mayores variaciones se ven reflejados en las estructuras analizadas con DES.

A partir de la comparación entre las gráficas de la variación del acero requerido, se puede observar una tendencia en la variación en la mayoría de los casos, la cual a mayor número de pisos mayor es la variación de las cantidades de acero requerido en los elementos como columnas y muros, sin embargo, para el caso de las vigas, los resultados no muestran una tendencia definida, ya que varían para cada caso de estudio.

Se hace una comparación en las gráficas de la variación del costo estimado del acero requerido junto a los conectores mecánicos enfocada en las columnas, en la cual se pueda evidenciar qué caso es el más favorable para el uso de conectores mecánicos en estas; el caso Grado 60 – DMO resulta ser el menos favorable al tener una variación promedio de todos los número de pisos de 0.69%, seguido por el caso Grado 60 – DES con un promedio de 4.36%, seguido por el caso Grado 80 – DMO con un promedio de 6.46% y finalmente como caso más favorable, el caso Grado 80 - DES con un promedio de 6.52% de variación a favor del uso de conectores mecánicos en las columnas. Adicionalmente, se pudo determinar que no hay una relación directa entre la variación del acero requerido y la variación del costo estimado, ya que, en este último, al incluirse el costo de los conectores mecánicos utilizados, y estos al variar significativamente en cada caso, no permiten una

relación directa y tendencia evidente en el costo estimado en ningún elemento estructural ni en el totalizado.

6.2.2 Análisis del efecto del tipo de empalme utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en las edificaciones tipo B

Inicialmente se estudia el efecto del tipo de empalme utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados, analizando la variación de estas con respecto al caso estudiado, es decir respecto al grado de acero y el grado de disipación de energía, manteniendo el número de pisos constante.

En las figuras 6-25, 6-26, 6-27, 6-28, 6-29, 6-30, 6-31 y 6-32 se muestra la variación de la cantidad de acero requerido y la variación en los costos estimados en los elementos primarios (vigas, columnas y muros) de las edificaciones tipo B, al variar el tipo de empalme escogido en cada caso de estudio, manteniendo constante el número de pisos, cada serie está dividida según el caso de estudio definidas anteriormente. Cabe resaltar que una variación porcentual positiva en las variaciones de las cantidades de acero requerido indica una disminución en las cantidades de acero requerido al utilizar empalmes mecánicos, por otro lado, una variación porcentual positiva en las variaciones de los costos estimados, indica una disminución de los costos estimados al utilizar empalmes mecánicos.

Figura 6-25: Variación en las cantidades de acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo B, 5 pisos

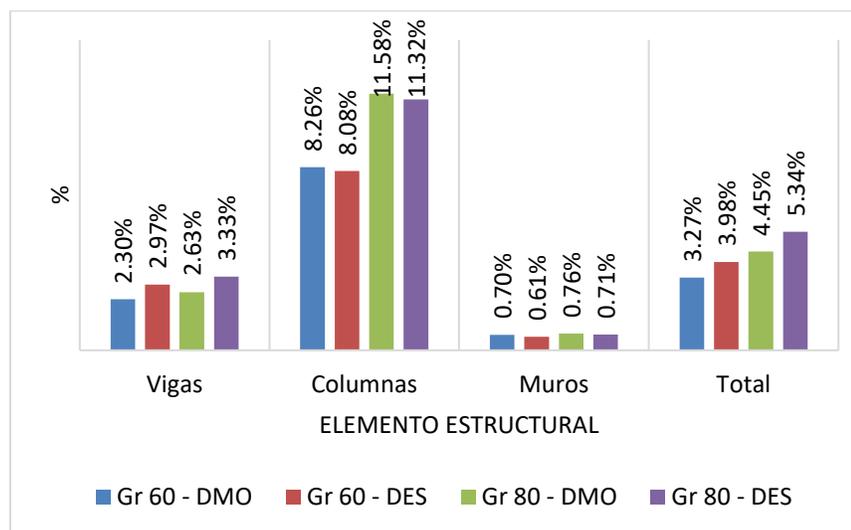


Figura 6-26: Variación del costo estimado del acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo B, 5 pisos

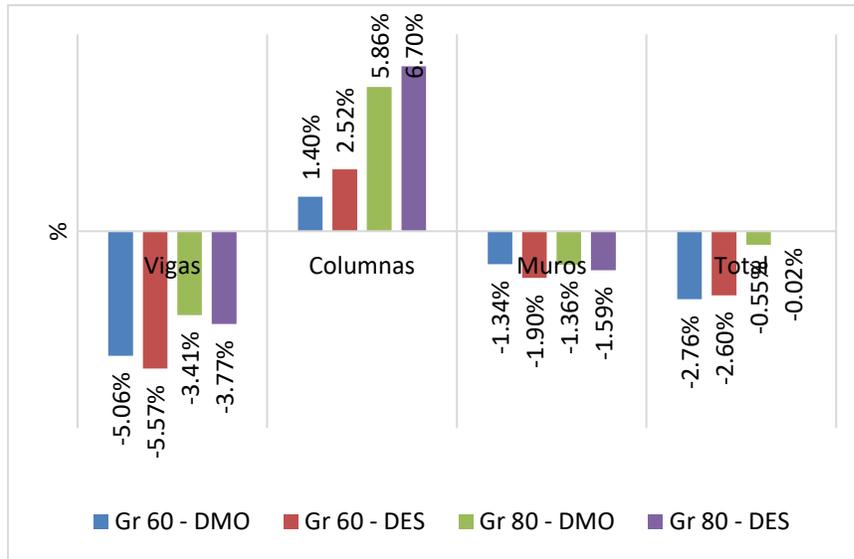


Figura 6-27: Variación en las cantidades de acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo B, 10 pisos

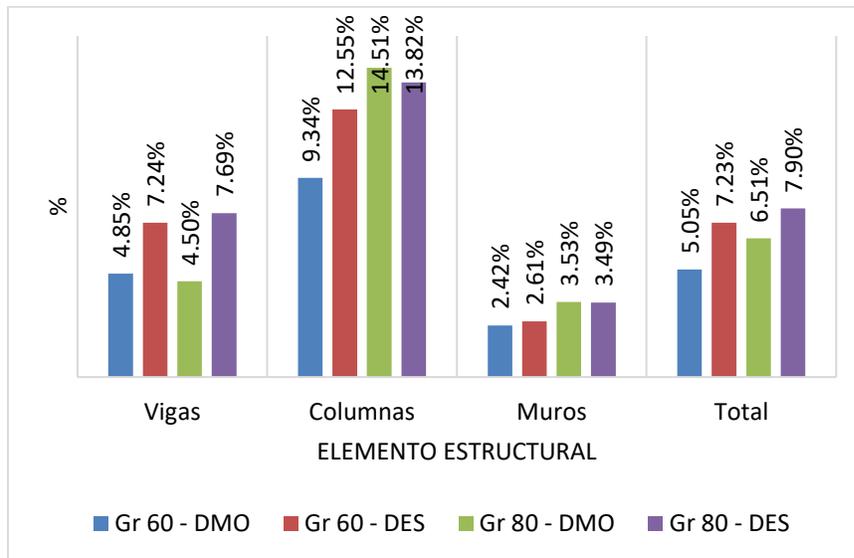


Figura 6-28: Variación del costo estimado del acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo B, 10 pisos

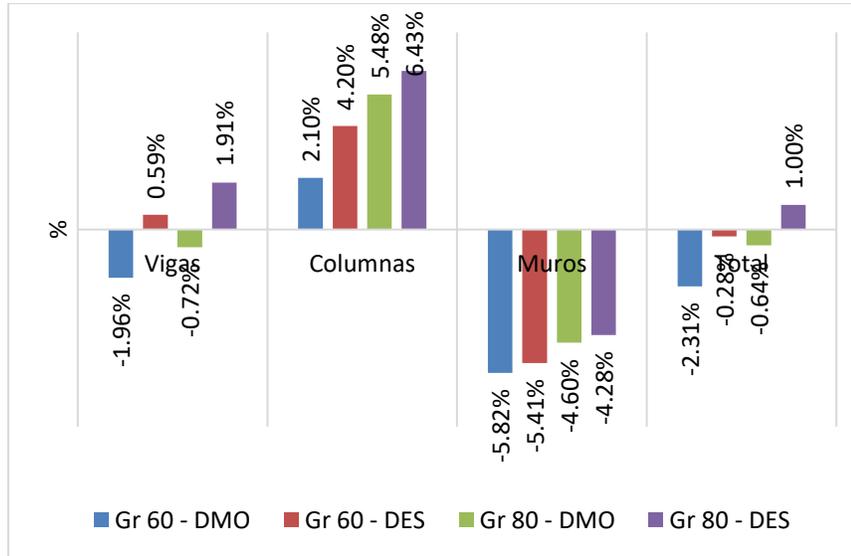


Figura 6-29: Variación en las cantidades de acero requerido con empalmes por conectores mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo B, 15 pisos

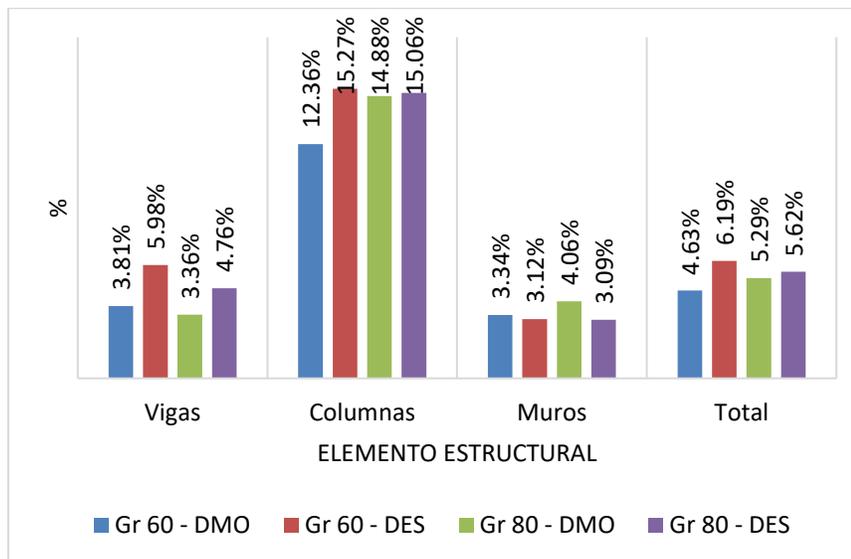


Figura 6-30: Variación del costo estimado del acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo B, 15 pisos

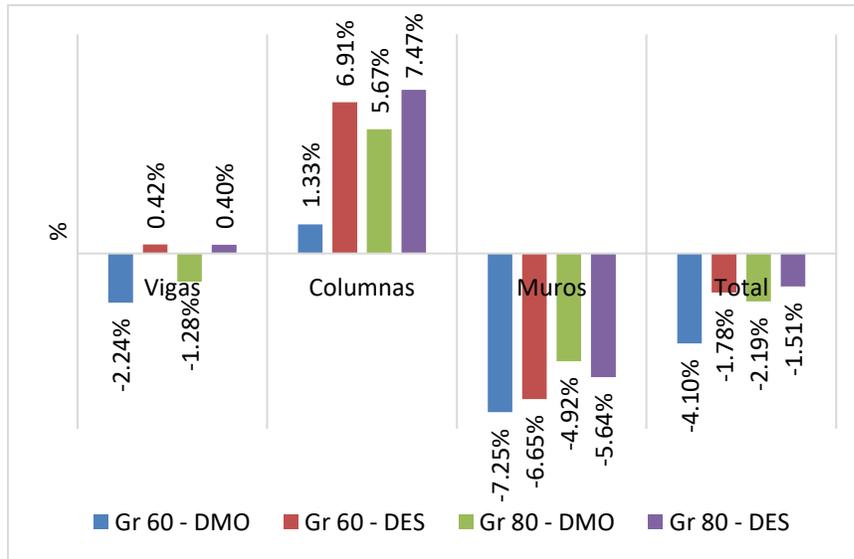


Figura 6-31: Variación en las cantidades de acero requerido con empalmes por conectores mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo B, 20 pisos

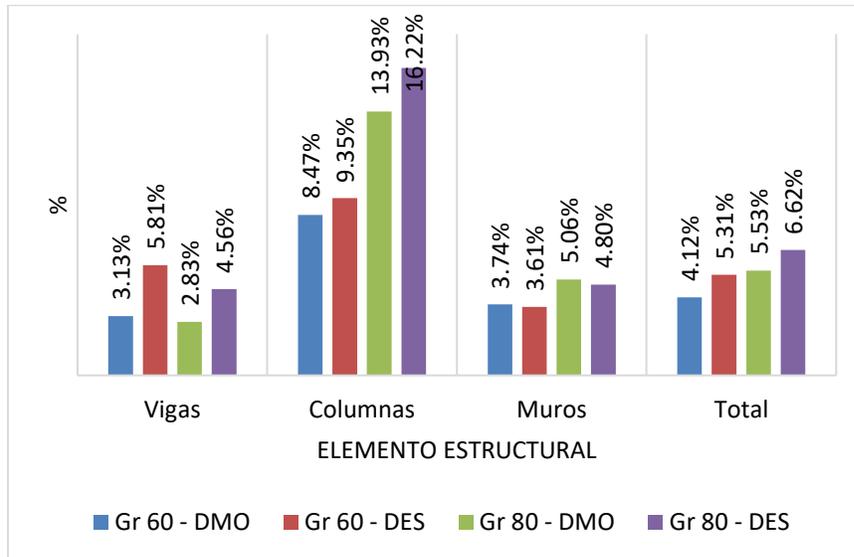
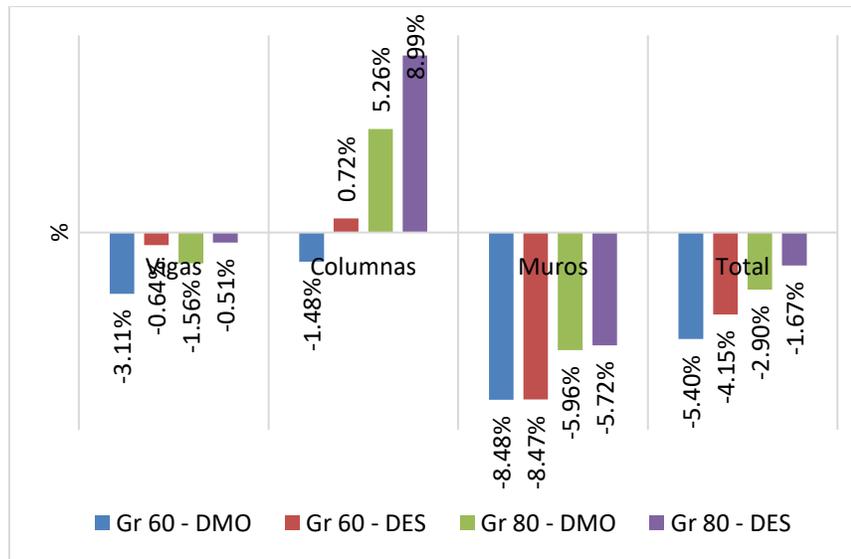


Figura 6-32: Variación del costo estimado del acero requerido con empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, edificación tipo B, 20 pisos



Similar al caso de las edificaciones tipo A, las gráficas donde se expone el efecto sobre las cantidades de acero muestran que existe una variación positiva al usar empalmes mecánicos en los elementos estructurales para cada piso estudiado, es decir, se reducen las cantidades de acero requerido al utilizar conectores mecánicos. Igualmente, para el caso de los costos estimados se evidencia una tendencia similar, asimismo, la variación resulta negativa al totalizar los costos respecto a los elementos estructurales.

Respecto al comportamiento de la variación de las cantidades de acero requerido, en las vigas y en los muros se evidencia una variación un poco mayor respecto a las edificaciones tipo A, en las vigas al tener luces de diseño mayores y asimismo esfuerzos y solicitaciones de mayor magnitud, cierto refuerzo puede requerirse a lo largo de toda la viga, por lo que el uso de empalmes se hace necesario y así el efecto del uso de los conectores mecánicos se ve reflejado, sin embargo, estas variaciones siguen siendo muy bajas comparado con los sobrecostos. Caso contrario a las columnas, igual que en el caso de las edificaciones tipo A, al requerirse el mismo refuerzo a lo largo de las mismas, resulta necesario empalmar todas las barras, es ahí donde se evidencia el beneficio de utilizar conectores mecánicos.

En el caso del costo estimado, se muestra una variación similar a las analizadas en la edificación tipo A, las cuales a pesar de que las variaciones en las cantidades de acero requerido eran positivas, el sobre costo de utilizar empalmes mecánicos no compensa la poca variación en las cantidades de acero requerido en vigas y en muros, haciendo que no sea favorable utilizar empalmes mecánicos en estos elementos. Sin embargo, para los casos de estudio Gr 60-DES y Gr 80-DES sí representa un beneficio utilizar conectores mecánicos en vez de traslapes en las vigas, estos con valores entre 0.40% y 1.91% en las estructuras de 10 y 15 pisos, los cuales, relacionados con los beneficios en el proceso constructivo, puede conllevar a una alternativa adecuada.

En cuanto a las columnas, en todos los casos estudiados la variación al utilizar conectores mecánicos resulta positiva tanto en las cantidades de acero requerido como en los costos estimados, haciendo propicio el uso de estos sobre los empalmes por traslapo.

En el caso de las edificaciones tipo B, estructuras con luces de diseño de nueve metros, al comparar las gráficas de la variación de las cantidades de acero requerido para cada caso se observa que hay una cierta tendencia en la mayoría de los casos de estudio según el tipo de elemento estructural, sin embargo, no hay una tendencia definida según el número de pisos, se observa que para las vigas la mayor variación se encuentra en las estructuras de 10 pisos de altura, con un promedio entre todos los casos de 6.4% para las vigas y la menor en las estructuras de 5 pisos (2.8%), en el caso de las columnas la mayor variación se encuentra en las estructuras de 15 pisos (16.8%) mientras que la menor en las estructuras de 5 pisos (10.9%), esta variación podría verse representada a partir de las longitudes de las barras utilizadas, ya que podrían requerirse mayor número de empalmes, lo que hace más eficiente el uso de conectores mecánicos; en cuanto a los muros la tendencia es definida, entre mayor sea el número de pisos, mayor será la variación de las cantidades de acero requerido al utilizarse conectores mecánicos en vez de traslapes, finalmente la sumatoria muestra una tendencia diferente a las anteriores, en esta la mayor variación está en las estructuras de 10 pisos (7.1%) mientras que la menor en las estructuras de 5 pisos de altura (4.4%).

Se realiza una comparación en las gráficas de la variación del costo estimado del acero requerido sumado con el valor de los conectores mecánicos requeridos con énfasis en las columnas, en la cual se pueda evidenciar que caso es el más favorable para el uso de

conectores mecánicos en estas, al igual que en el caso de las edificaciones tipo A, el caso Grado 60–DMO resulta ser el menos favorable al tener una variación promedio de todos los número de pisos de 0.84%, seguido por el caso Grado 60–DES con un promedio de 3.59%, seguido por el caso Grado 80–DMO con un promedio de 5.57% y finalmente como caso más favorable, el caso Grado 80–DES con un promedio de 7.40% de variación a favor del uso de conectores mecánicos en las columnas. Igualmente, que el caso de edificaciones tipo A, se pudo determinar que no hay una relación directa entre la variación del acero requerido y la variación del costo estimado, ya que, en este último, al incluirse el costo de los conectores mecánicos utilizados, y estos al variar significativamente en cada caso, no permiten una relación directa y tendencia evidente en el costo estimado en ningún elemento estructural ni en el totalizado.

6.3 Análisis del efecto del grado de disipación de energía utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados.

En la presente subsección se analiza el efecto del cambio del grado de disipación de energía de moderado a especial para cada tipo de edificación A y B, se aclara que para el caso de empalmes por traslapo las variaciones entre el acero requerido y el costo estimado son las mismas, mientras que para el caso de empalmes por conectores las variaciones en el costo total dependen de la cantidad de conectores mecánicos requeridos, por lo que es diferente entre las cantidades de acero requerido y el costo total estimado, sin embargo, como el fin de este proyecto de grado es estudiar la factibilidad económica, se presentarán las variaciones según el costo total para cada tipo de edificación con los correspondientes casos de estudio, los cuales son los siguientes:

- 5 Gr 60: 5 pisos de altura con acero de refuerzo grado 60
- 5 Gr 680: 5 pisos de altura con acero de refuerzo grado 80
- 10 Gr 60: 5 pisos de altura con acero de refuerzo grado 60
- 10 Gr 60: 5 pisos de altura con acero de refuerzo grado 80
- 15 Gr 60: 5 pisos de altura con acero de refuerzo grado 60
- 15 Gr 60: 5 pisos de altura con acero de refuerzo grado 80
- 20 Gr 60: 5 pisos de altura con acero de refuerzo grado 60
- 20 Gr 60: 5 pisos de altura con acero de refuerzo grado 80

En las figuras 6-33, 6-34, 6-35, 6-36 se muestran las variaciones al diseñar con capacidad de disipación de energía moderada con respecto a especial, en las cuales se incluyen las variaciones de las cantidades de acero requerido y de los costos estimados en los elementos primarios (vigas, columnas y muros) para cada caso de estudio definidos anteriormente. Cabe resaltar que una variación porcentual positiva en las variaciones de los costos estimados, indica una disminución de los costos estimados al diseñar con DES.

Figura 6-33: Variación del costo total estimado en las estructuras “DES” con respecto a las estructuras “DMO”, edificaciones tipo A con empalmes por traslapo

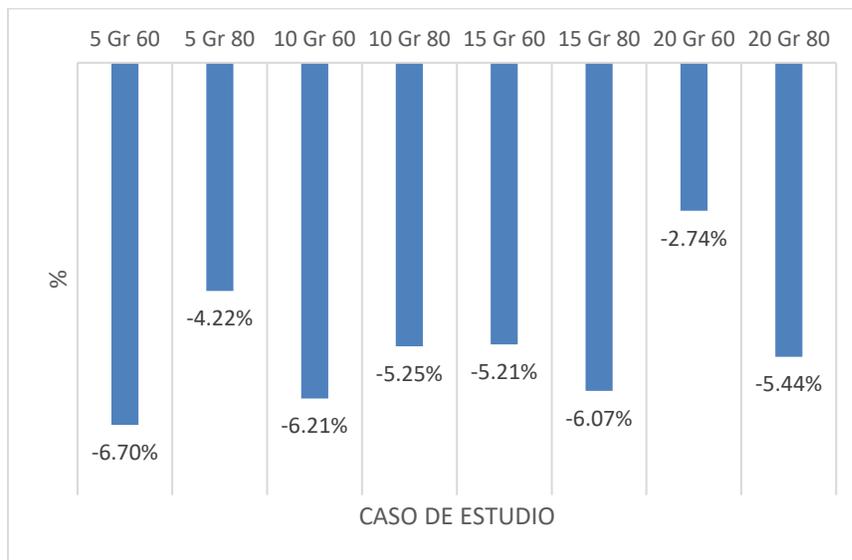


Figura 6-34: Variación del costo total estimado en las estructuras “DES” con respecto a las estructuras “DMO”, edificaciones tipo A con empalmes mecánicos

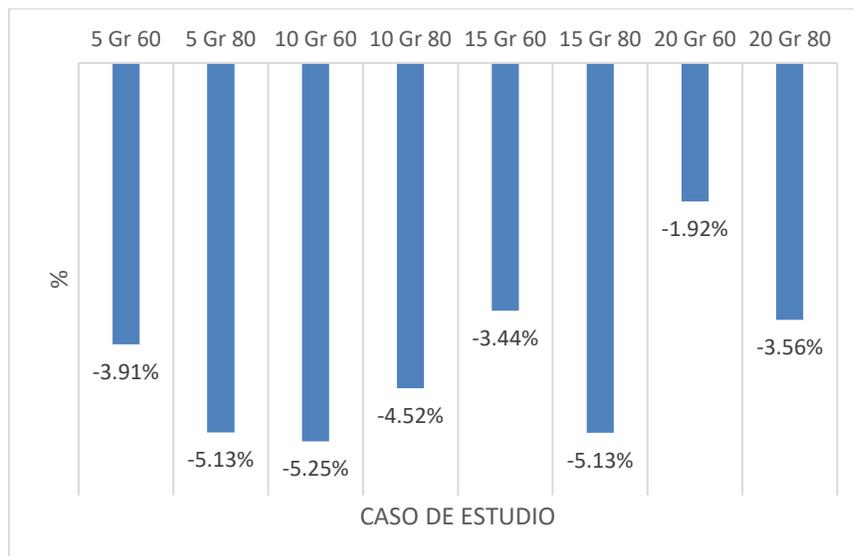


Figura 6-35: Variación del costo total estimado en las estructuras “DES” con respecto a las estructuras “DMO”, edificaciones tipo B con empalmes por traslapo

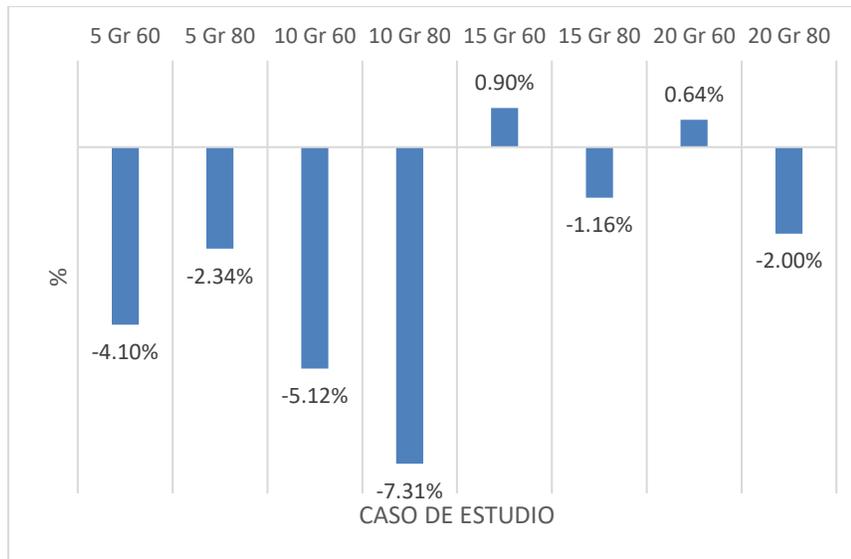
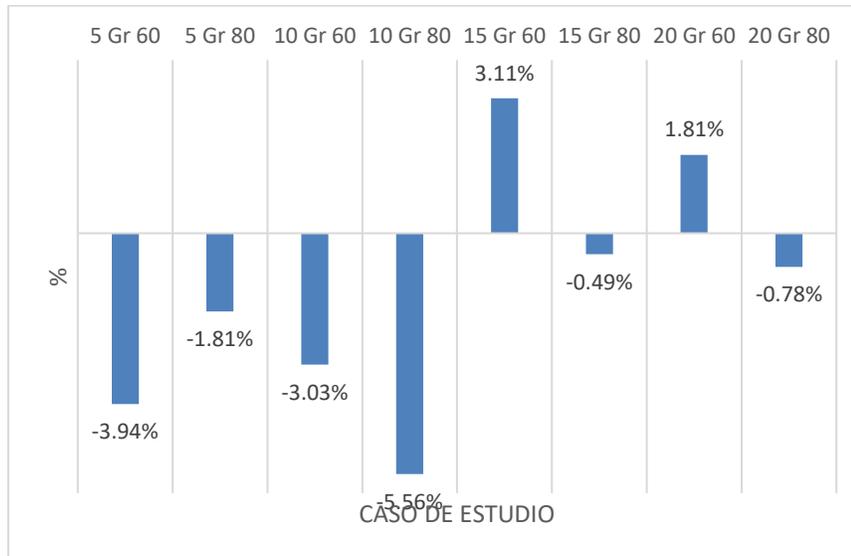


Figura 6-36: Variación del costo total estimado en las estructuras “DES” con respecto a las estructuras “DMO”, edificaciones tipo B con empalmes mecánicos



Al comparar las gráficas se evidencia que en la mayoría de los casos hay un aumento en el costo total estimado al cambiar el grado de disipación de energía de moderado a especial, además, la tendencia es particularmente uniforme para todos los tipos de edificaciones.

Para las edificaciones tipo A, las variaciones se encuentran entre -1.92 y -6.70%, sin embargo, se evidencia que el aumento en la variación es menor en las estructuras analizadas con empalmes por conectores mecánicos con una diferencia porcentual promedio entre ambos casos del 1.03%. Adicionalmente, se evidencia que, para las estructuras de 5 y 10 pisos, utilizar grado 80 resulta una variación menor que al utilizar acero grado 60, lo contrario pasa con las estructuras de 15 y 20 pisos, donde al utilizar acero grado 80 la variación entre DMO y DES resulta mayor.

Para las edificaciones tipo B, las variaciones se pueden dividir entre las estructuras de 5 y 10 pisos con variaciones entre -1.81% y -5.56% y las estructuras de 15 y 20 pisos con variaciones entre -1.16% y 3.11%, en general en las edificaciones tipo B al igual que el tipo A, las variaciones son menores para las estructuras analizadas con empalmes por conectores mecánicos. Para este tipo de edificaciones al tener mayores solicitaciones se puede ver un mayor efecto de la reducción del coeficiente de capacidad de disipación de energía básico (R_0), tanto que en algunos casos se tiene una ventaja al diseñar con DES. Las tendencias generales se deben a que al diseñar con DES se requiere un detallado más riguroso en todos los elementos estructurales, haciendo que el refuerzo transversal aumente por el correspondiente confinamiento que se debe proveer.

Al analizar las variaciones en cada elemento estructural se refleja que el totalizado en ambos tipos de estructura y sus respectivos casos, está afectado negativamente por las columnas, las cuales al requerir generalmente cuantía mínima por refuerzo longitudinal el acero de refuerzo suele ser el mismo, sin embargo, el refuerzo transversal aumenta significativamente, haciendo que haya una variación de hasta -40.03%; caso contrario de las vigas y muros, en la cual la variación está afectada positivamente y en donde las solicitaciones se reducen significativamente al aumentarse el coeficiente de capacidad de disipación de energía, de tal modo que en vigas y muros las variaciones son positivas al diseñar con DES. Cabe resaltar que para las vigas entre mayor número de pisos mayor es la variación, lo contrario a los muros en donde a mayor número de pisos menor es la variación.

Sin embargo, al tener que diseñar toda la estructura como DMO o DES resulta un valor negativo de la variación al diseñar con DES, no obstante, al ser una variación no muy significativa, se podría llegar a analizar y diseñar la estructura con grado de disipación de

energía especial, logrando una estructura que se supone será más segura por cumplir con los requisitos de DES, con un aumento relativamente pequeño en las cantidades de acero y el costo total estimado, lo cual puede ser ventajoso en especial para el acero grado 80 en la cual se requiere mayor ductilidad.

6.4 Análisis del efecto del grado del acero de refuerzo utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados.

En la presente subsección se analiza el efecto del cambio del grado del acero de refuerzo para cada tipo de edificación A y B, analizando las variaciones de las cantidades de acero requerido y de los costos en los elementos estructurales como consecuencia de la variación del grado del acero. A continuación, se realiza el análisis para cada tipo de edificación con los correspondientes casos de estudio, los cuales son los siguientes:

- 5 DMO: 5 pisos de altura con grado de disipación de energía moderado
- 5 DES: 5 pisos de altura con grado de disipación de energía especial
- 10 DMO: 10 pisos de altura con grado de disipación de energía moderado
- 10 DES: 10 pisos de altura con grado de disipación de energía especial
- 15 DMO: 15 pisos de altura con grado de disipación de energía moderado
- 15 DES: 15 pisos de altura con grado de disipación de energía especial
- 20 DMO: 20 pisos de altura con grado de disipación de energía moderado
- 20 DES: 20 pisos de altura con grado de disipación de energía especial

6.4.1 Análisis del efecto del grado del acero de refuerzo utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en edificaciones tipo A con empalmes por traslapo.

En las figuras 6-37, 6-38, 6-39 y 6-40, 6-41, 6-42, 6-43, 6-44 se muestran las variaciones de las cantidades de acero requerido y en los costos estimados en los elementos primarios de las edificaciones tipo A con empalme por traslapo, al variar el grado del acero de refuerzo escogido en cada caso de estudio, cada serie está dividida según el caso de estudio definidos anteriormente. Cabe resaltar que una variación porcentual positiva en las variaciones de las cantidades de acero requerido indica una disminución en las cantidades

de acero requerido al diseñar con acero grado 80, por otro lado, una variación porcentual positiva en las variaciones de los costos estimados, indica una disminución de los costos estimados al diseñar con acero grado 80.

Figura 6-37: Variación en las cantidades de acero requerido en vigas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes por traslapo

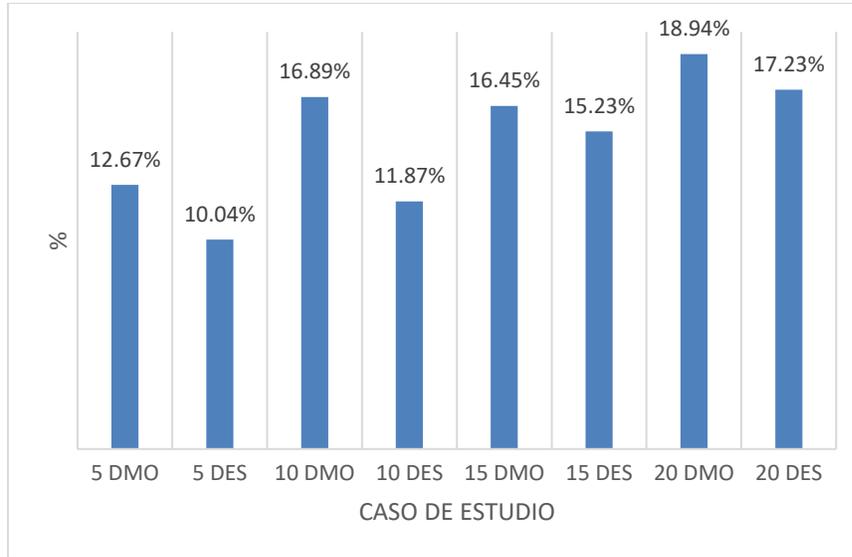


Figura 6-38: Variación del costo estimado del acero requerido en vigas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes por traslapo

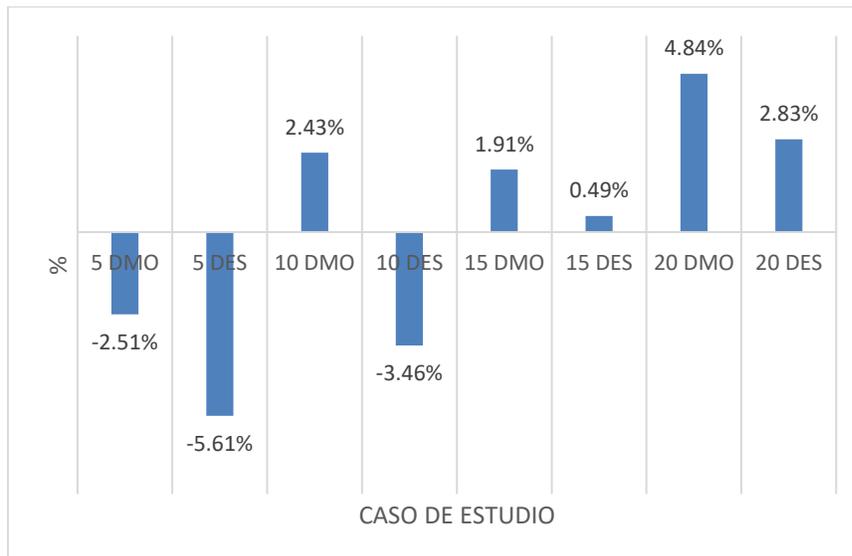


Figura 6-39: Variación en las cantidades de acero requerido en columnas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes por traslapo

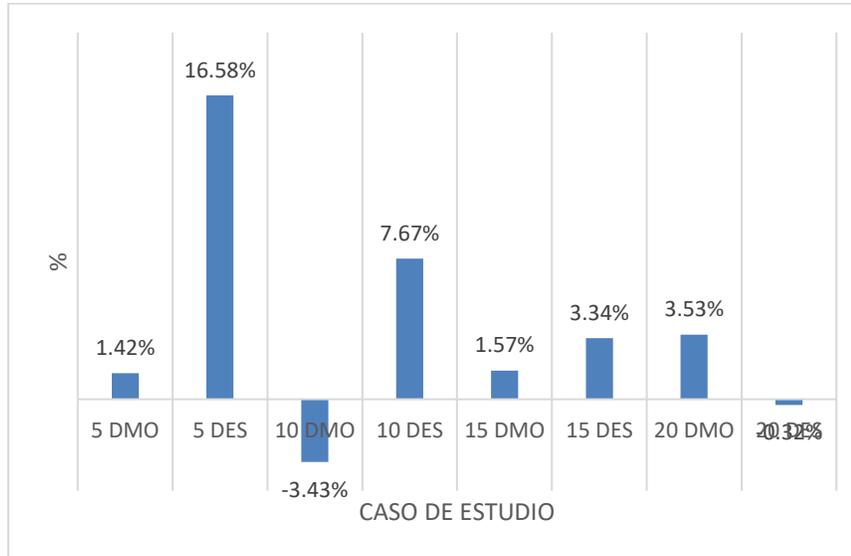


Figura 6-40: Variación del costo estimado del acero requerido en columnas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes por traslapo

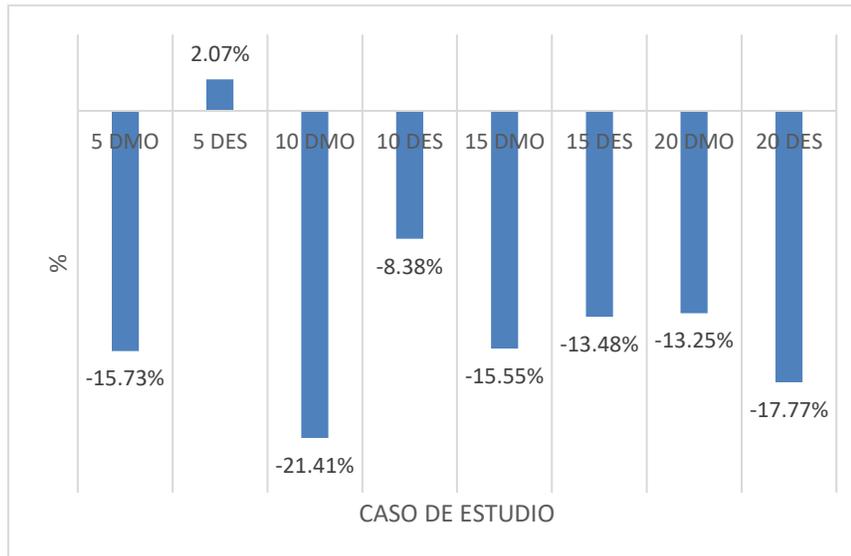


Figura 6-41: Variación en las cantidades de acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes por traslapo

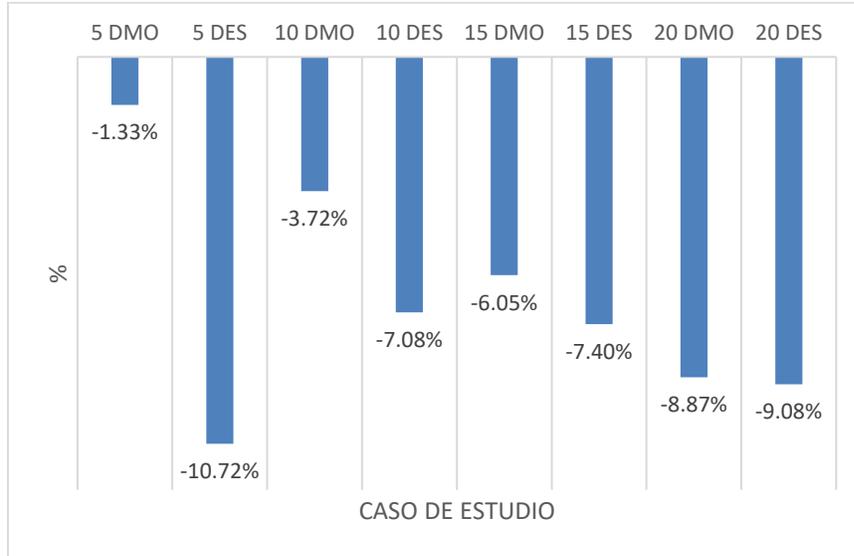


Figura 6-42: Variación del costo estimado del acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes por traslapo

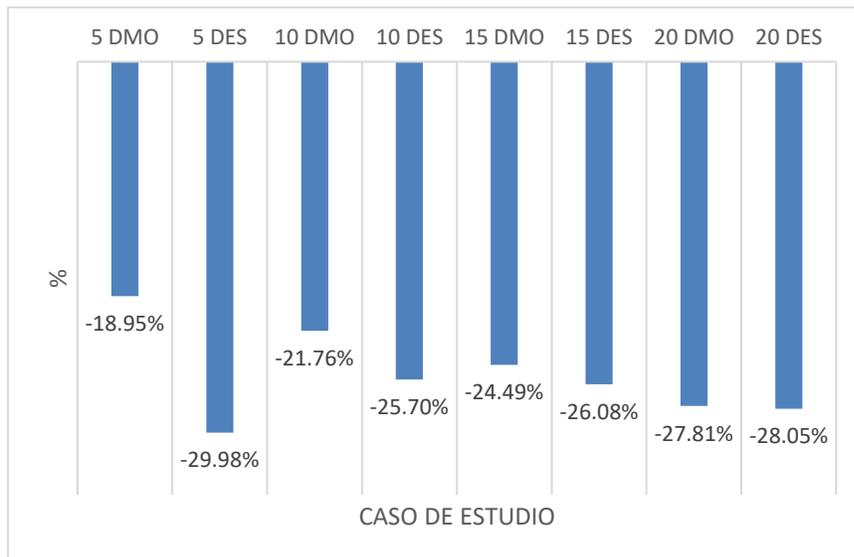


Figura 6-43: Variación en las cantidades de acero total requerido en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes por traslapo

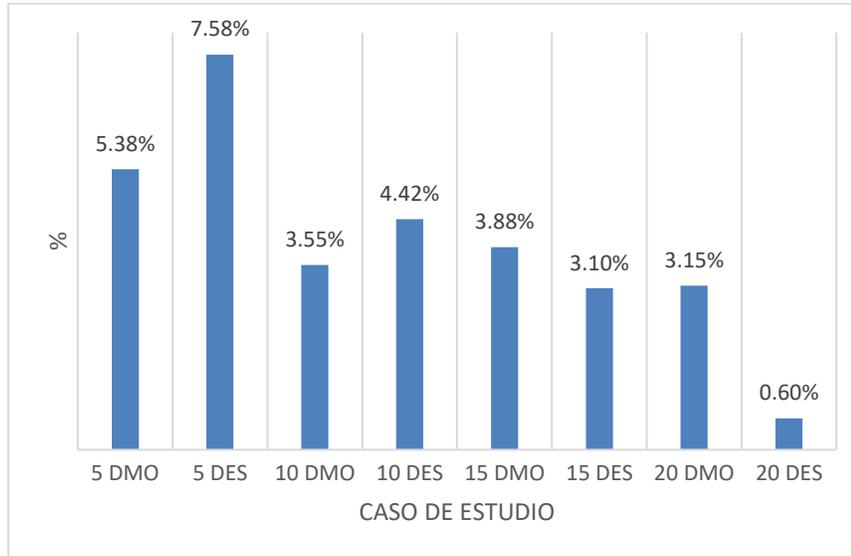
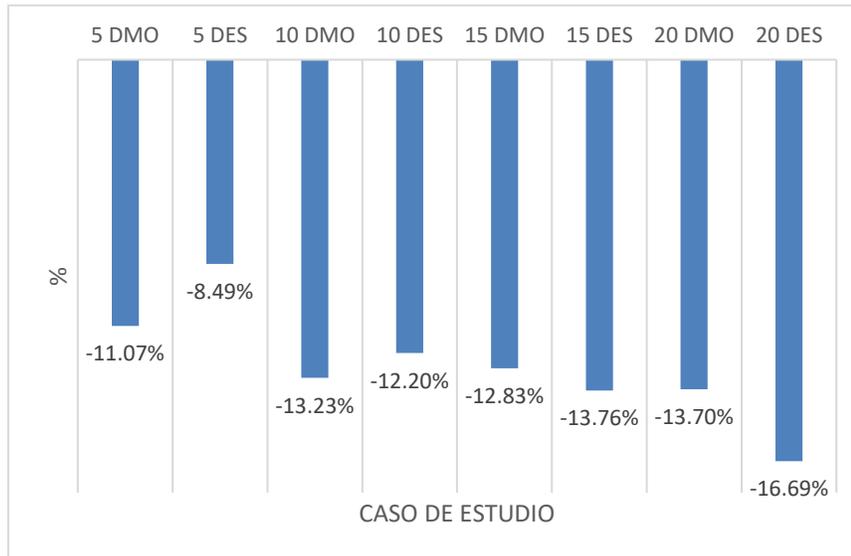


Figura 6-44: Variación del costo total estimado del acero requerido en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes por traslapo



En general, en las gráficas donde se presenta el efecto de la modificación del grado de acero de refuerzo sobre las cantidades de acero requerido, se evidencia que existe una variación positiva al cambiar a grado 80 para las vigas y columnas, mientras que para los muros existe una variación negativa, en las gráficas de la variación de los costos estimados se ve reflejada una variación similar, dado que la variación del costo es directamente proporcional a la variación en las cantidades de acero requerido, es decir, tiene que haber aproximadamente un 17.80% de variación positiva en las cantidades de acero requerido para que se vea reflejado el beneficio de utilizar grado 60 en vez de grado 80, esto debido a la diferencia entre el costo entre ambos aceros de refuerzo.

Para las vigas en todos los casos de estudio existe una variación positiva en las cantidades de acero requerido al utilizar grado 80, esta variación está entre 10.04% y 18.94%, a mayor número de pisos mayor es la variación según el caso, adicionalmente se puede destacar que las variaciones para todos los pisos son mayores en los casos que se analiza con DMO, con una variación promedio de todos los pisos entre el grado de disipación de energía del 3.0%. Respecto a la variación del costo estimado, como se mencionó anteriormente, la variación del costo es directamente proporcional a la variación en las cantidades de acero requerido, es por eso por lo que, en la mayoría de los casos que no se empleen empalmes mecánicos, es por eso que, en la mayoría de los casos, especialmente para las estructuras de 15 y 20 pisos se ve reflejado el efecto positivo al tener variaciones en las cantidades de acero requerido mayor a 17.80%.

En el caso de las columnas no existe una tendencia definida; las variaciones, aunque son positivas en su mayoría, estas resultan de valores muy bajos, exceptuando dos casos específicos los cuales son de 16.58% (5 DES) y 7.67% (10 DES) de variación positiva, mientras los demás están en un promedio de 2.5%, por otro lado, existen dos casos los cuales tienen variaciones negativas. En todos los casos las variaciones en el costo estimado resultan ser negativas, por lo que no hay un beneficio al utilizar acero de refuerzo grado 80 en vez de grado 60. Respecto a los muros estructurales en todos los casos las variaciones en la cantidad de acero requerido son negativas, con valores entre -1.33% y -10.72%, asimismo las variaciones en el costo estimado son negativas, cabe resaltar que entre mayor número de pisos mayor es la variación negativa, exceptuando el caso 5 DES donde esta es mayor que todas las demás, igualmente, las variaciones son mayores cuando se analiza las estructuras con grado de disipación de energía especial.

Finalmente, para la variación del acero requerido en toda la estructura, estas variaciones son de valor positivo para todos los casos, sin embargo al tener valores entre 0.60% y 7.58% no compensa la variación del costo entre ambos aceros de refuerzo, por lo que la variación en el costo para todos los casos resulta ser negativa con valores entre -8.49% y -16.69%, estas variaciones para las estructuras de 5 y 10 pisos son menores cuando se analiza las estructuras DES ante DMO, mientras que para las estructuras de 15 y 20 pisos las variaciones son menores al diseñar con DMO en vez de DES.

6.4.2 Análisis del efecto del grado del acero de refuerzo utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en edificaciones tipo A con empalmes por conectores mecánicos.

En las figuras 6-45, 6-46, 6-47, 6-48, 6-49, 6-50, 6-51 y 6-52 se muestra la variación de la cantidad de acero requerido y las variaciones en los costos estimados en los elementos primarios de las edificaciones tipo A con empalme por conectores mecánicos, al variar el grado del acero de refuerzo escogido en cada caso de estudio, cada serie está dividida según el caso de estudio definidos anteriormente. Cabe resaltar que una variación porcentual positiva en las variaciones de las cantidades de acero requerido indica una disminución en las cantidades de acero requerido al diseñar con acero grado 80, por otro lado, una variación porcentual positiva en las variaciones de los costos estimados, indica una disminución de los costos estimados al diseñar con acero grado 80.

Figura 6-45: Variación en las cantidades de acero requerido en vigas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes mecánicos

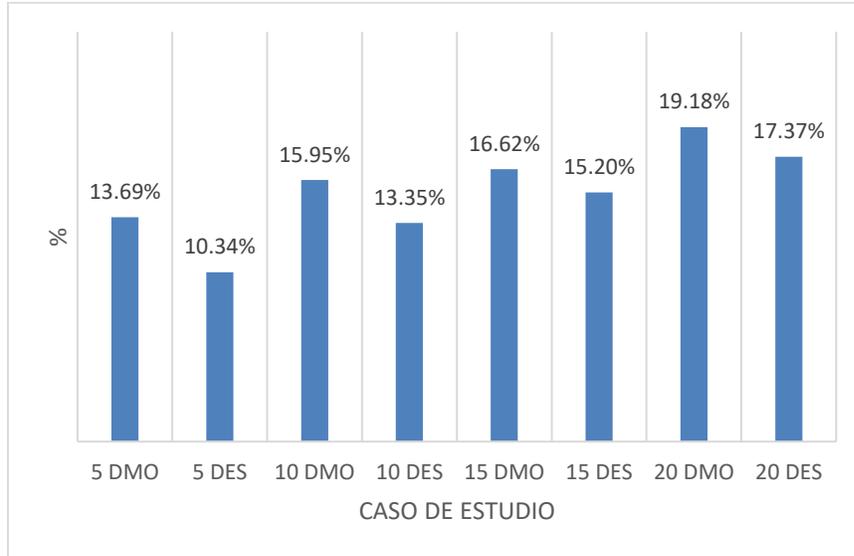


Figura 6-46: Variación del costo estimado del acero requerido en vigas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes mecánicos

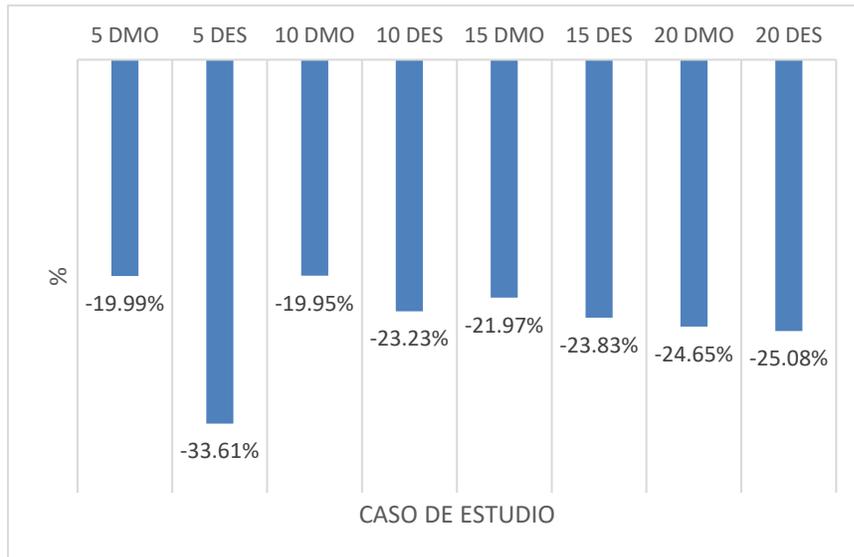


Figura 6-47: Variación en las cantidades de acero requerido en columnas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes mecánicos

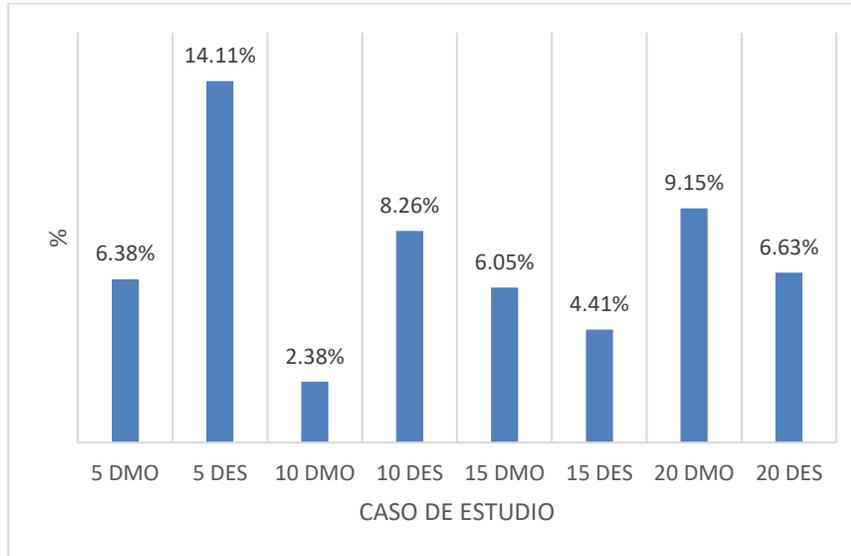


Figura 6-48: Variación del costo estimado del acero requerido en columnas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes mecánicos

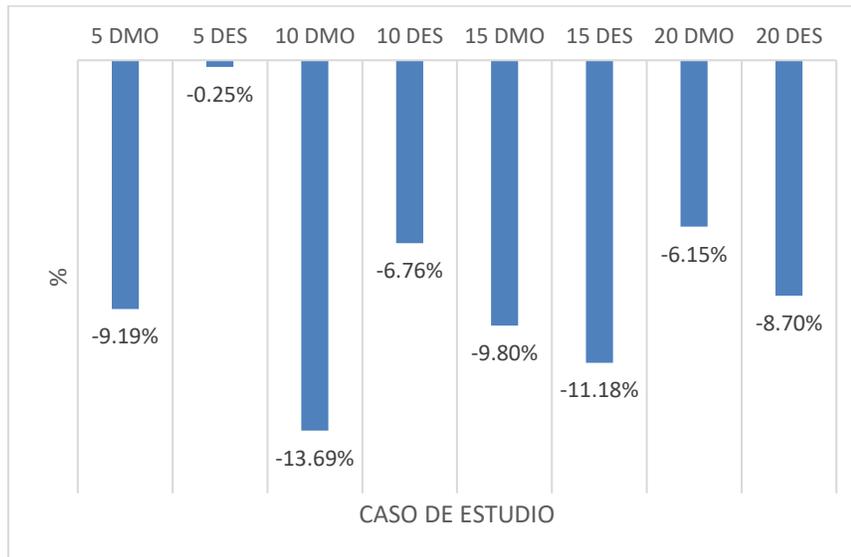


Figura 6-49: Variación en las cantidades de acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes mecánicos

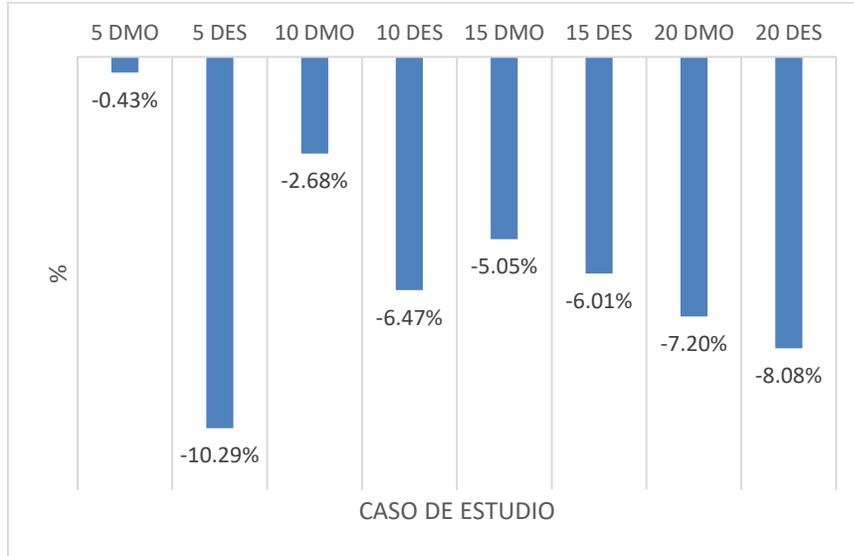


Figura 6-50: Variación del costo estimado del acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes mecánicos

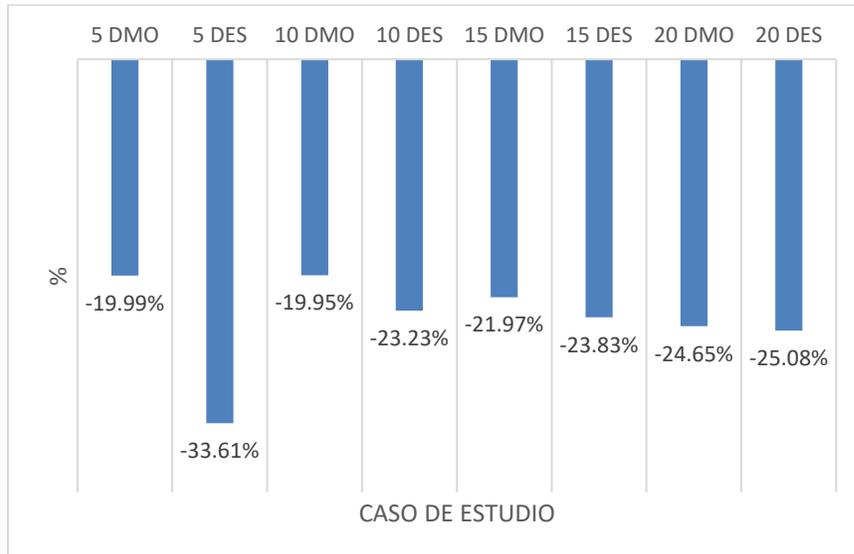


Figura 6-51: Variación en las cantidades de acero requerido en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes mecánicos

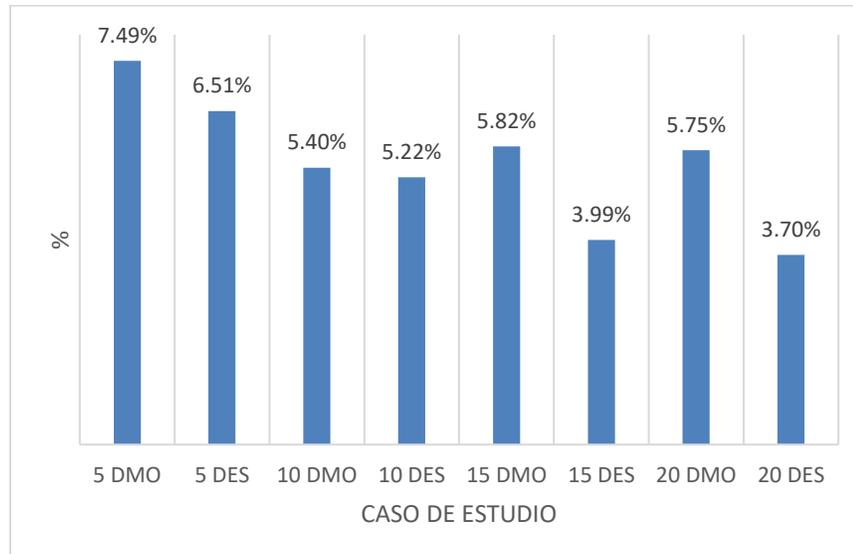
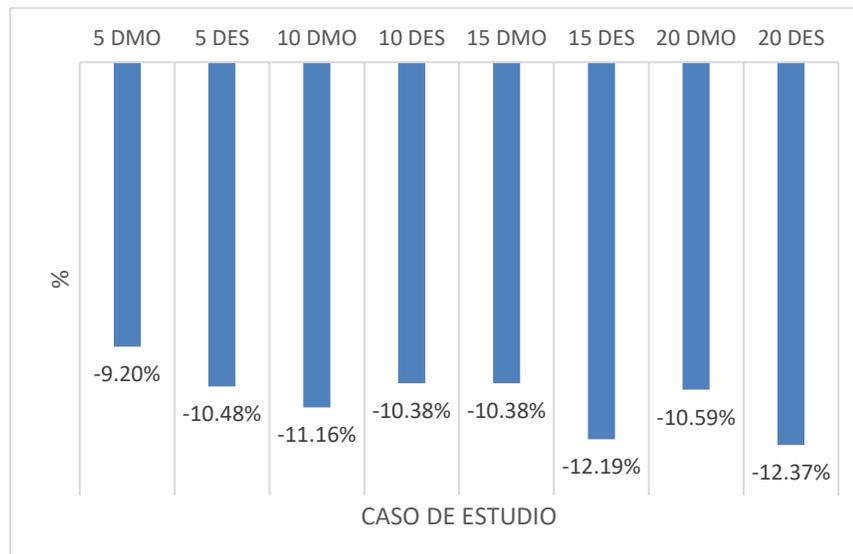


Figura 6-52: Variación del costo estimado del acero requerido en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo A con empalmes mecánicos



Al igual que el caso anterior, en las gráficas donde se presenta el efecto del grado de acero de refuerzo sobre las cantidades de acero requerido evidencia que una existe variación positiva al cambiar de grado 60 a grado 80 para las vigas y columnas, mientras que para los muros existe una variación negativa, en las gráficas de la variación de los costos estimados se ve reflejado que en la mayoría de los casos no representa un beneficio utilizar acero grado 80 en vez de grado 60.

Para las vigas en todos los casos de estudio existe una variación positiva en las cantidades de acero requerido, esta variación está entre 10.34% y 19.18%, presenta características similares a los casos con empalmes por traslapes dado que a mayor número de pisos mayor es la variación según el caso, y asimismo las variaciones para todos los pisos son mayores en los casos que se analiza con DMO, con una variación promedio de todos los pisos entre el grado de disipación de energía del 3.01%. Respecto a la variación del costo estimado, como se mencionó anteriormente, la variación del costo es directamente proporcional a la variación en las cantidades de acero requerido, para las estructuras entre 5 y 10 pisos resulta una variación negativa mientras que para las estructuras de 15 y 20 pisos resulta positiva, mostrando el beneficio de utilizar grado 80 en estructuras con altas solicitaciones

En el caso de las columnas tampoco existe una tendencia definida, las variaciones, aunque son todas positivas, resultan de valores muy bajos, exceptuando tres casos específicos los cuales son de 14.11% (5 DES), 8.26% (10 DES) y 9.15% (20 DMO) de variación positiva, mientras los demás están en un promedio de 5.18%. Al revisar las variaciones en el costo estimado resultan ser negativas en todos los casos, por lo que no hay un beneficio al utilizar acero de refuerzo grado 80 en vez de grado 60 en columnas.

Respecto a los muros estructurales en todos los casos las variaciones en la cantidad de acero requerido son negativas, con valores entre -0.43% y -10.29%, asimismo las variaciones en el costo estimado son negativas, cabe resaltar que entre mayor número de pisos mayor es la variación negativa, exceptuando el caso 5 DES donde esta es mayor que todas las demás, igualmente, las variaciones son mayores cuando se analiza las estructuras con grado de disipación de energía especial.

Finalmente, para la variación del acero requerido en toda la estructura, estas variaciones son de valor positivo para todos los casos, sin embargo al tener valores entre 3.70% y 7.49% no compensa la variación del costo entre ambos aceros de refuerzo, por lo que la variación en el costo para todos los casos resulta ser negativa con valores entre -9.20% y -12.37%, estas variaciones para las estructuras de 10 pisos son menores cuando se analiza las estructuras DES ante DMO, mientras que para las estructuras de 5, 15 y 20 pisos las variaciones son menores al diseñar con DMO en vez de DES.

Cabe resaltar, que al comparar los resultados de las estructuras con empalme por traslapo con las que se analizaron con empalme por conectores mecánicos, las variaciones en los costos estimados resultan mayores al utilizar conectores mecánicos, esto debido al beneficio que contraen los mismos en el ahorro en el acero requerido en todos los elementos estructurales al utilizar acero grado 80 en vez de acero grado 60.

6.4.3 Análisis del efecto del grado del acero de refuerzo utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en edificaciones tipo B con empalmes por traslapo.

En las figuras 6-53, 6-54, 6-55, 6-56, 6-57, 6-58, 6-59 y 6-60 se muestra la variación de la cantidad de acero requerido y la variación en los costos estimados en los elementos primarios de las edificaciones tipo B con empalme por traslapo, al variar el grado del acero de refuerzo escogido en cada caso de estudio, cada serie está dividida según el caso de estudio definidos anteriormente. Cabe resaltar que una variación porcentual positiva en las variaciones de las cantidades de acero requerido indica una disminución en las cantidades de acero requerido al diseñar con acero grado 80, por otro lado, una variación porcentual positiva en las variaciones de los costos estimados, indica una disminución de los costos estimados al diseñar con acero grado 80.

Figura 6-53: Variación en las cantidades de acero requerido en vigas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes por traslapo

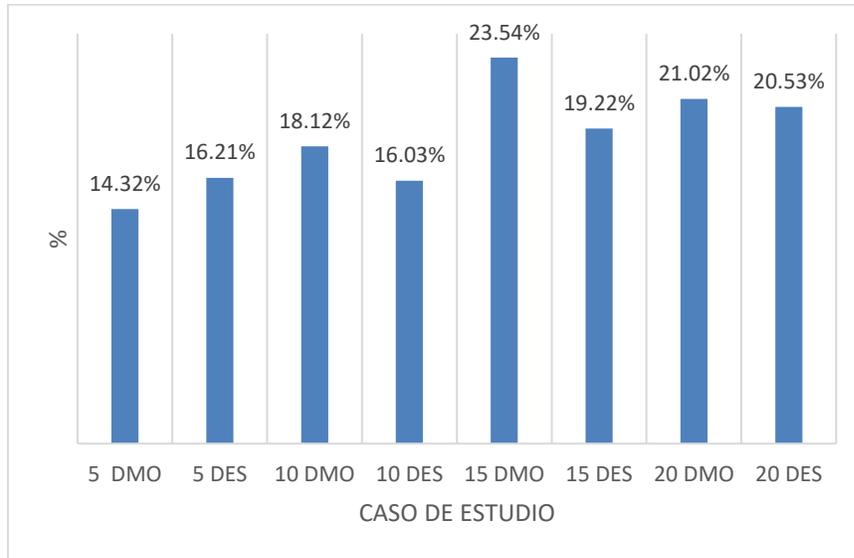


Figura 6-54: Variación del costo estimado del acero requerido en vigas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes por traslapo

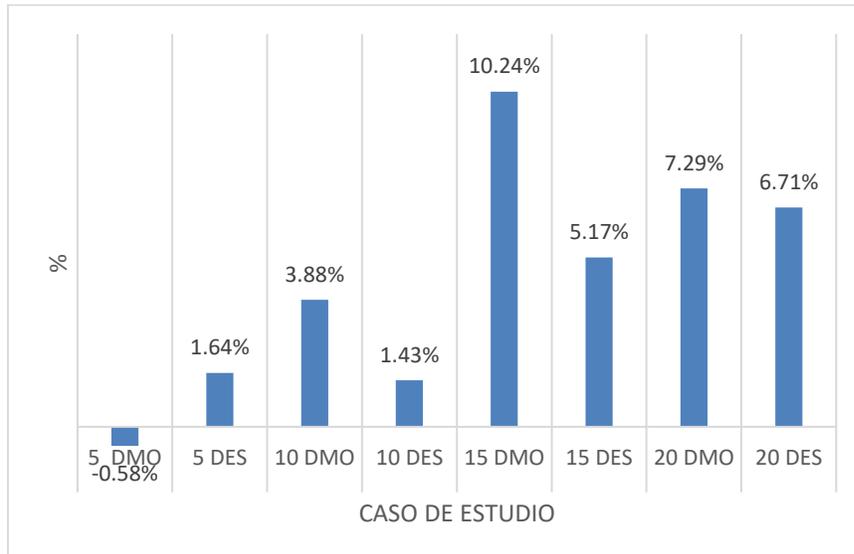


Figura 6-55: Variación en las cantidades de acero requerido en columnas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes por traslazo

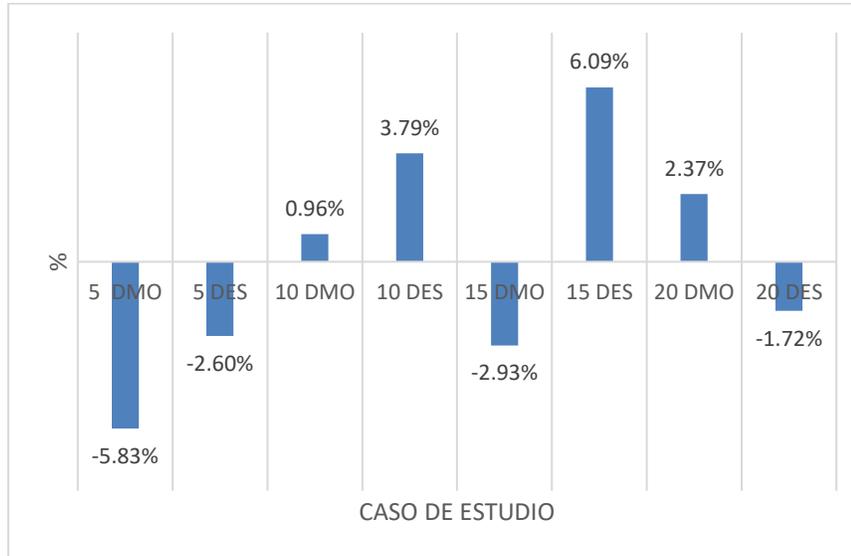


Figura 6-56: Variación del costo estimado del acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes por traslazo

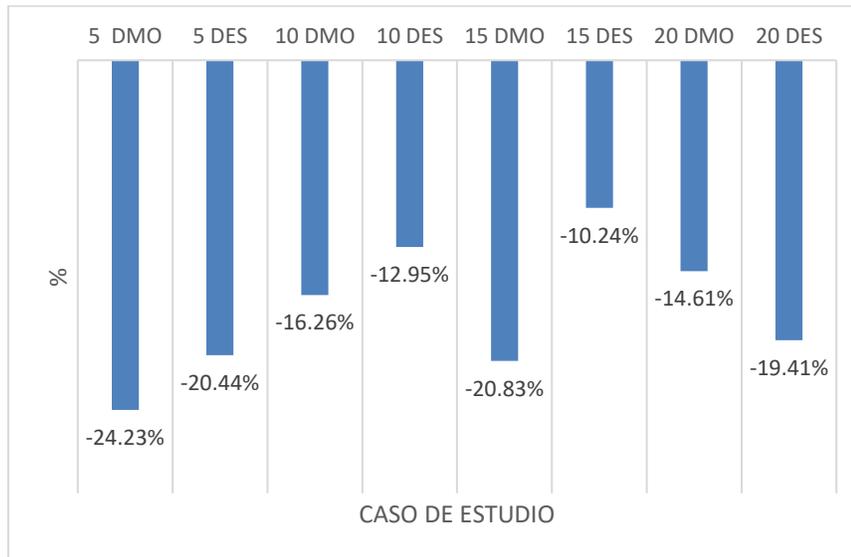


Figura 6-57: Variación en las cantidades de acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes por traslapo

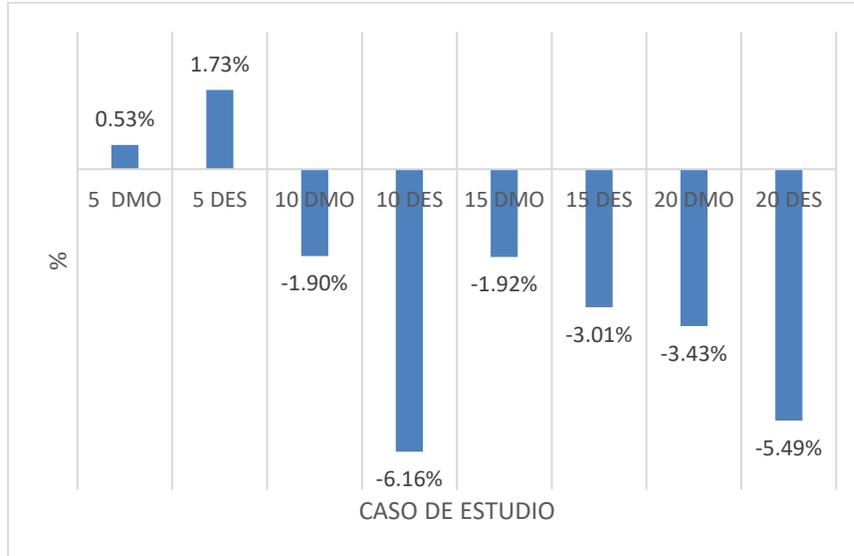


Figura 6-58: Variación del costo estimado del acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes por traslapo

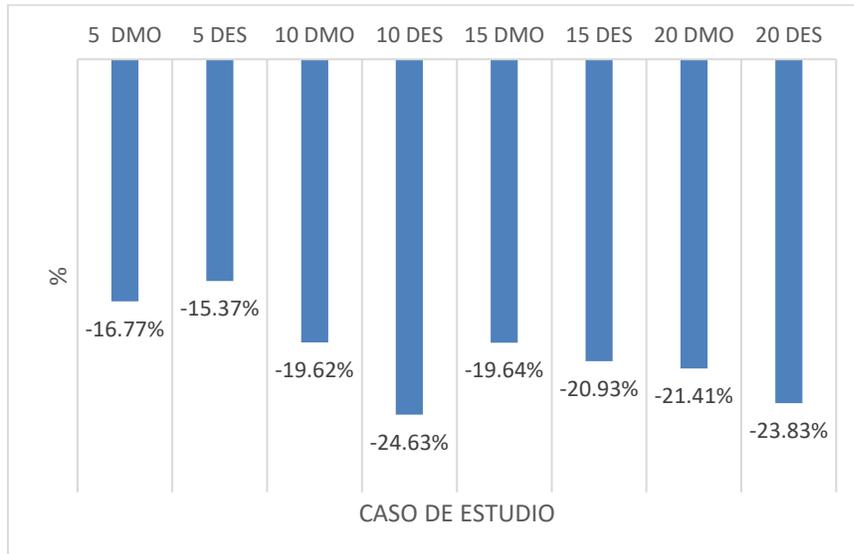


Figura 6-59: Variación en las cantidades de acero requerido en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes por traslapo

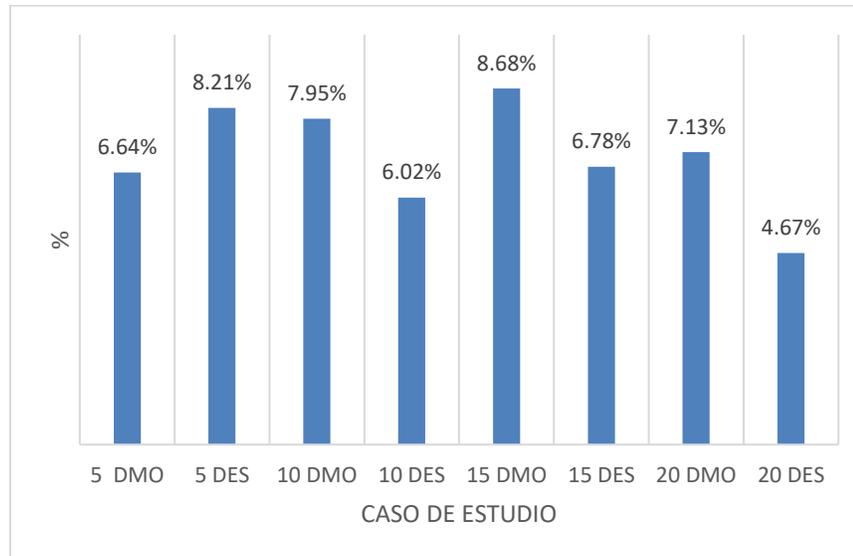
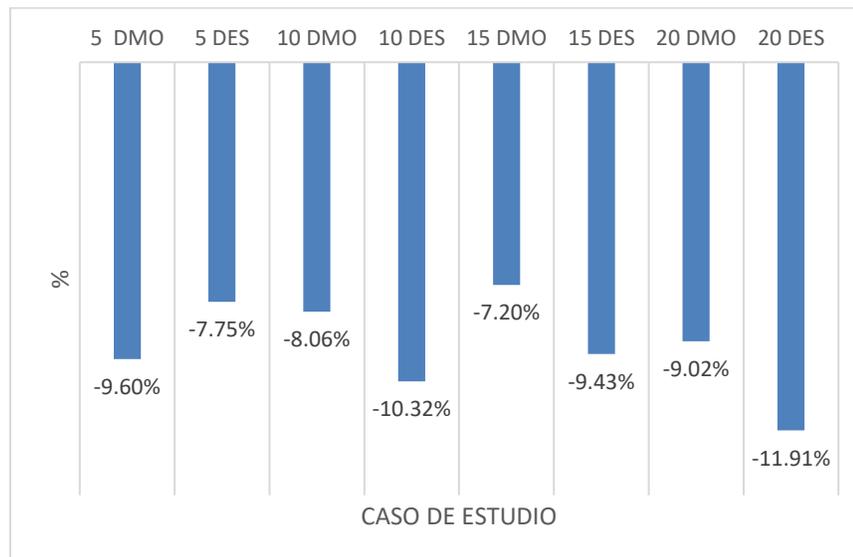


Figura 6-60: Variación del costo estimado del acero requerido en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes por traslapo



En general en las gráficas donde se presenta el efecto de la modificación del grado de acero de refuerzo sobre las cantidades de acero requerido, se evidencia que existe una variación positiva al cambiar a grado 80 para las vigas y en algunos casos para las columnas y los muros, en las gráficas de la variación de los costos estimados se evidencia que en las columnas y los muros la variación en la cantidad de acero requerido no compensa el incremento del costo estimado del acero grado 80, mientras que para las vigas en todos los casos menos uno, las variaciones en los costos resulta positiva, reflejando el beneficio de utilizar grado 80 en vez de grado 60.

Para las vigas en todos los casos de estudio existe una variación positiva en las cantidades de acero requerido al utilizar grado 80, esta variación la cual es mayor que en el caso de las edificaciones tipo A, está entre 14.32% y 23.54%, a mayor número de pisos mayor es la variación según el caso; igualmente se puede destacar que las variaciones para todos los pisos son mayores en los casos que se analiza con DMO menos el caso de 5 pisos, con una variación promedio de todos los pisos entre el grado de disipación de energía del 2.0%. Respecto a la variación del costo estimado, como se mencionó anteriormente, la variación del costo es directamente proporcional a la variación en las cantidades de acero requerido, por lo que en todos de los casos exceptuando el caso 5 DMO, en el cual se ve reflejado el efecto positivo al tener variaciones en las cantidades de acero requerido mayor a 17.80%.

En el caso de las columnas no existe una tendencia definida, la mitad de los casos las variaciones son negativas con valores entre -1.72% y -5.83% y la otra mitad son positivas con valores entre 0.96% y 6.09%, sin embargo, estas resultan de valores muy bajos, por lo que para todos los casos las variaciones en el costo estimado resultan ser negativas, es por esto que no hay un beneficio al utilizar acero de refuerzo grado 80 en vez de grado 60. Respecto a los muros estructurales en todos los casos menos las estructuras con 5 pisos, las variaciones en la cantidad de acero requerido son negativas, con valores entre -1.90% y -6.16%, los casos con valores positivos están entre 0.53% y 1.73%, dando como reflejo que las variaciones en el costo estimado son negativas, cabe resaltar que entre mayor número de pisos mayor es la variación negativa, exceptuando el caso 10 DES donde esta es mayor que todas las demás, igualmente, las variaciones son mayores cuando se analiza las estructuras con grado de disipación de energía especial.

Finalmente, para la variación del acero requerido en toda la estructura, estas variaciones son de valor positivo para todos los casos, sin embargo al tener valores entre 4.67% y 8.68% no compensa la variación del costo entre ambos aceros de refuerzo, por lo que la variación en el costo para todos los casos resulta ser negativa con valores entre -7.20% y -10.32%, estas variaciones para las estructuras de 5 pisos son menores cuando se analiza las estructuras DES ante DMO, mientras que para las estructuras de 10, 15 y 20 pisos las variaciones son menores al diseñar con DMO en vez de DES.

6.4.4 Análisis del efecto del grado del acero de refuerzo utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados en edificaciones tipo B con empalmes por conectores mecánicos.

En las figuras 6-61, 6-62, 6-63, 6-64, 6-65, 6-66, 6-67 y 6-68 se muestra la variación de la cantidad de acero requerido y las variaciones en los costos estimados en los elementos primarios de las edificaciones tipo B con empalme por conectores mecánicos, al variar el grado del acero de refuerzo escogido en cada caso de estudio, cada serie está dividida según el caso de estudio definidos anteriormente. Cabe resaltar que una variación porcentual positiva en las variaciones de las cantidades de acero requerido indica una disminución en las cantidades de acero requerido al diseñar con acero grado 80, por otro lado, una variación porcentual positiva en las variaciones de los costos estimados, indica una disminución de los costos estimados al diseñar con acero grado 80.

Figura 6-61: Variación en las cantidades de acero requerido en vigas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes mecánicos

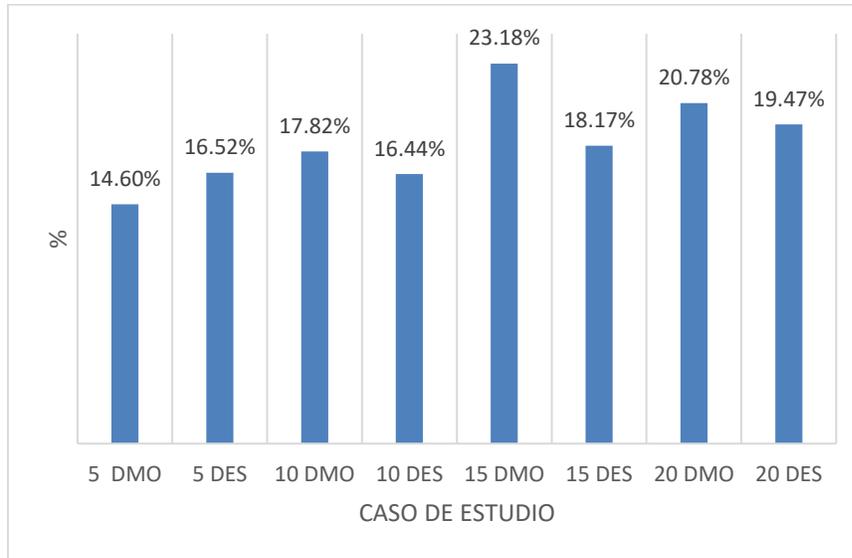


Figura 6-62: Variación del costo estimado del acero requerido en vigas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes mecánicos

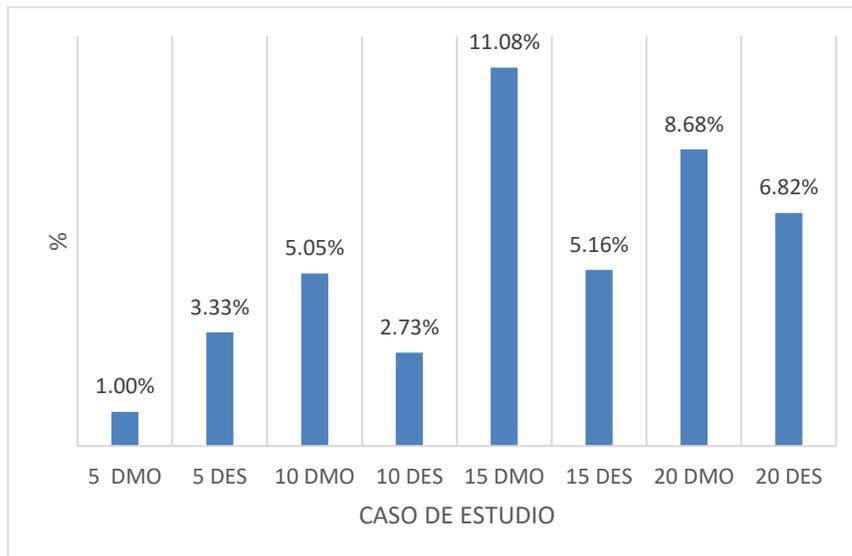


Figura 6-63: Variación en las cantidades de acero requerido en columnas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes mecánicos

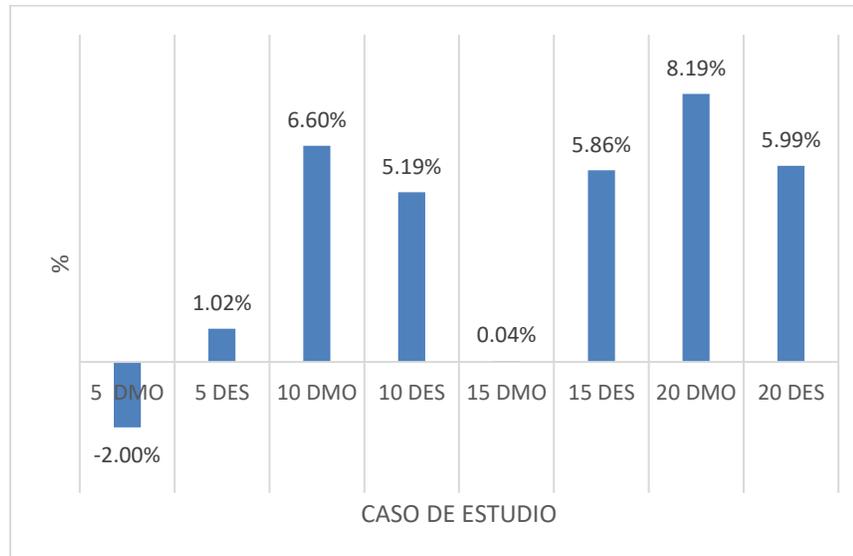


Figura 6-64: Variación del costo estimado del acero requerido en columnas en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes mecánicos

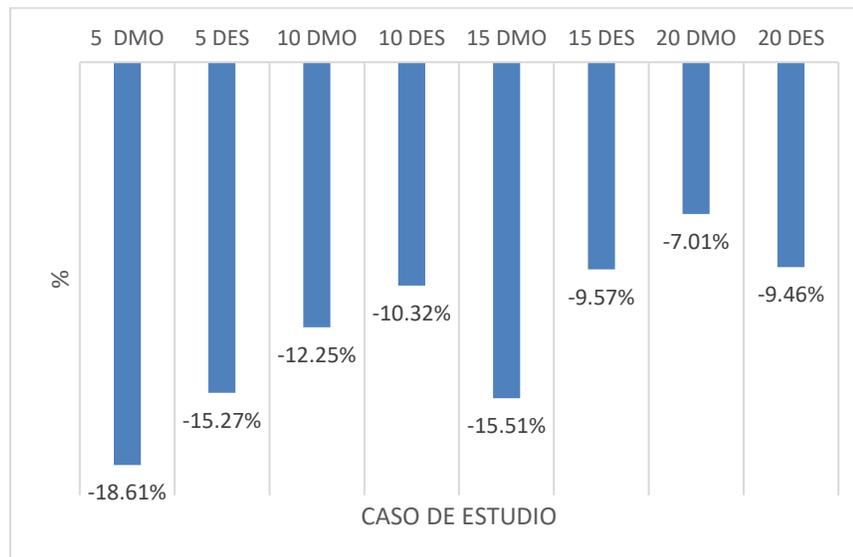


Figura 6-65: Variación en las cantidades de acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes mecánicos

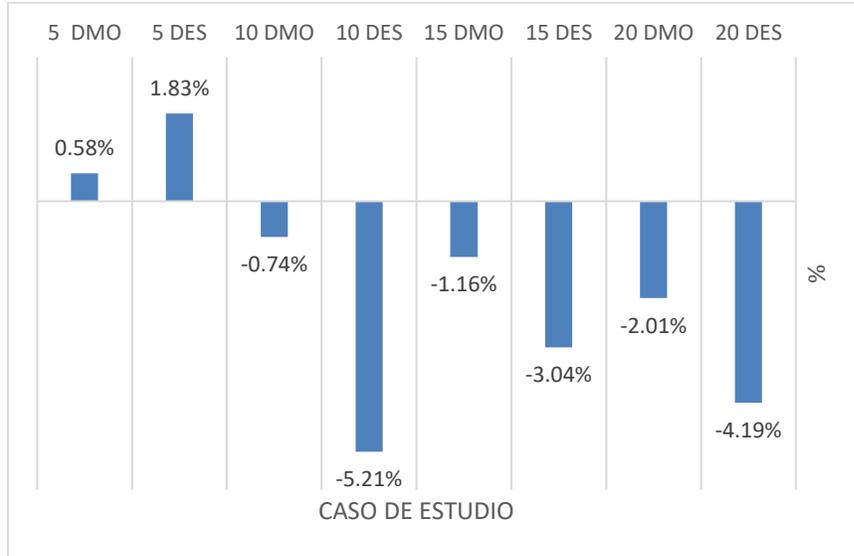


Figura 6-66: Variación del costo estimado del acero requerido en muros en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes mecánicos

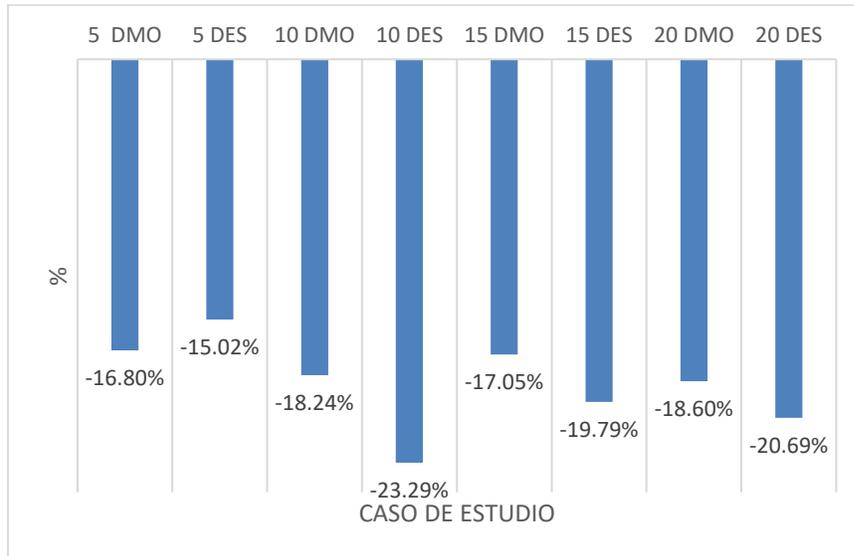


Figura 6-67: Variación en las cantidades de acero requerido en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes mecánicos

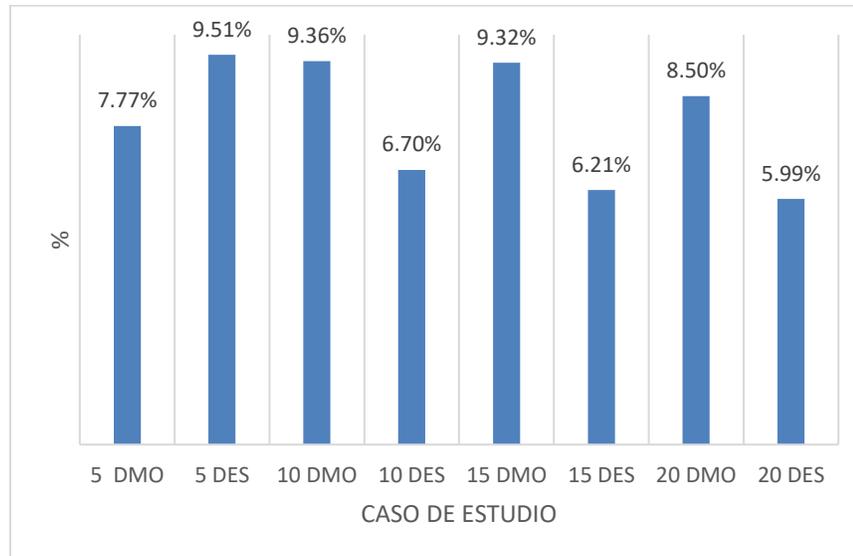
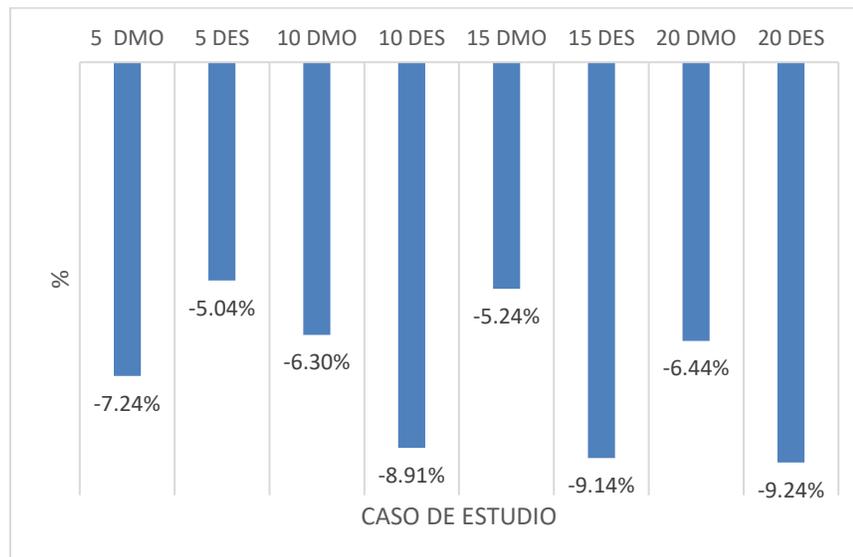


Figura 6-68: Variación del costo estimado del acero requerido en las estructuras con grado 80 con respecto al acero grado 60, edificación tipo B con empalmes mecánicos



Al igual que el caso anterior, en las gráficas donde se presenta el efecto del grado de acero de refuerzo sobre las cantidades de acero requerido evidencia que una existe variación positiva al cambiar de grado 60 a grado 80 para las vigas y columnas, mientras que para los muros prevalece una variación negativa en términos generales, en las gráficas de la variación de los costos estimados se ve reflejado que en las vigas existe un beneficio al utilizar acero grado 80 en vez de grado 60, mientras que en las columnas, los muros y la variación total no representa el mismo beneficio.

Para las vigas en todos los casos de estudio existe una variación positiva en las cantidades de acero requerido, esta variación está entre 14.60% y 23.18%, presenta características similares a los casos con empalmes por traslapes dado que a mayor número de pisos mayor es la variación según el caso, y asimismo las variaciones para todos los pisos son mayores en los casos que se analiza con DMO menos para las estructuras de 5 pisos. Respecto a la variación del costo estimado, para todos los casos estudiado las variaciones resultan positivas, evidenciando el beneficio de utilizar grado 80 en estructuras con altas solicitudes.

En el caso de las columnas tampoco existe una tendencia definida, las variaciones, aunque son todas positivas, estas resultan de valores muy bajos, con valores entre 1.02% y 8.19%. Al revisar las variaciones en el costo estimado resultan ser negativas en todos los casos, por lo que no hay un beneficio al utilizar acero de refuerzo grado 80 en vez de grado 60 en columnas.

Respecto a los muros estructurales en la mayoría de los casos las variaciones en la cantidad de acero requerido son negativas, con valores entre -0.74% y -5.21%, menos los casos de 5 pisos de altura, asimismo las variaciones en el costo estimado son negativas para todos los casos, cabe resaltar que entre mayor número de pisos mayor es la variación negativa, exceptuando el caso 10 DES donde esta es mayor que todas las demás, igualmente, las variaciones son mayores cuando se analiza las estructuras con grado de disipación de energía especial menos el caso de 5 pisos de altura.

Finalmente, para la variación del acero requerido en toda la estructura, estas variaciones son de valor positivo para todos los casos, sin embargo al tener valores entre 6.21% y 9.51% no compensa la variación del costo entre ambos aceros de refuerzo, por lo que la

variación en el costo para todos los casos resulta ser negativa con valores entre -5.04% y -9.14%, estas variaciones para las estructuras de 5 pisos son menores cuando se analiza las estructuras DES ante DMO, mientras que para las estructuras de 10, 15 y 20 pisos las variaciones son menores al diseñar con DMO en vez de DES.

Cabe resaltar, que al igual que el caso de las edificaciones tipo A, al comparar los resultados de las estructuras con empalme por traslapo con las que se analizaron con empalme por conectores mecánicos, las variaciones en los costos estimados resultan mayores al utilizar conectores mecánicos, esto debido al beneficio que contraen los mismos en el ahorro en el acero requerido en todos los elementos estructurales al utilizar acero grado 80 en vez de acero grado 60.

6.5 Verificación de resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos en cuanto a la incidencia del grado de acero de refuerzo requerido, las reducciones en las cantidades de acero muestran cierta similitud con las obtenidas por [10] y [11] ya que se obtuvieron reducciones de hasta 9.51% en el total de la estructura y de hasta 23.18% en las vigas, en ambos casos con la misma tendencia respecto al aumento en el número de pisos.

Respecto a los beneficios en los empalmes mecánicos, los resultados obtenidos por [13] se ven reflejados al no tener gran variación en las cantidades de acero requerido en los elementos como vigas y muros. Asimismo, los resultados de [14] son similares a los obtenidos ya que se tienen reducciones de hasta 17.27% en las cantidades de acero requerido al utilizar empalmes mecánicos en las columnas.

Finalmente, se verificó la influencia del grado de disipación de energía, D. J. Martínez Barraza [15] en su investigación concluye que se tuvo un incremento en las cantidades de acero requerido al analizar con DES con respecto a DMO con valores entre 6 y 15%, resultados similares a los obtenidos puesto que se obtuvieron incrementos en las cantidades de acero requerido con valores entre 1.16% y 7.95%.

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones para cada variable estudiada a partir del análisis realizado:

Tal como se esperaba hay una reducción en las cantidades de acero requerido al utilizar empalmes mecánicos en vez de empalmes por traslapo para todos los casos estudiados, sin embargo, a nivel del costo estimado, el beneficio económico se ve reflejado únicamente en las columnas; se puede establecer que a mayor número de pisos mayores reducciones en los costos estimados, estas últimas de valores promedio entre 0.62% y 7.40%. Los resultados encontrados son similares para los casos de las edificaciones tipo A y tipo B, en los cuales se refleja el beneficio en utilizar empalmes mecánicos en las columnas para todos los casos estudiados.

En relación con el cambio de la capacidad de disipación de energía de moderada a especial, se observó que hay un aumento en las cantidades de acero requerido y el costo estimado para la mayoría de los casos DES con respecto a DMO, con valores entre 1.92% y 6.70% para las edificaciones tipo A y valores entre 0.49% y 7.31% para las edificaciones tipo B. En términos generales, los incrementos son menores en estructuras con altas solicitaciones y estos al ser relativamente pequeños, pueden representar un beneficio en el comportamiento estructural, especialmente en cuanto a la ductilidad para los casos en que se diseñe con acero grado 80, sin afectar en gran magnitud los costos totales.

Respecto al efecto de la modificación del grado del acero de refuerzo, para las columnas y muros no representa un beneficio utilizar acero grado 80, caso contrario para las vigas las cuales tienen variaciones promedio en las cantidades de acero requerido de 15.21%

para las edificaciones tipo A y 18.62% para las edificaciones tipo B. Asimismo en los costos estimados se encontraron reducciones al utilizar acero grado 80 de 0.22% para las edificaciones tipo A y 5.48% para las edificaciones tipo B, estas variaciones con cierta tendencia la cual entre mayor número de pisos y solicitaciones de mayor magnitud presenta mayores reducciones en los costos.

En términos generales, los resultados encontrados abren la posibilidad sobre el beneficio de utilizar acero grado 80 y empalmes mecánicos, y de diseñar con una capacidad de disipación de energía mayor a la exigida según la zona sísmica, esto con el fin de implementar este grado de acero de refuerzo en el diseño estructural, modificar los procesos constructivos haciéndolos más eficientes y mejorar el comportamiento estructural de la edificación debido al aumento en la capacidad de disipación de energía y el confinamiento y detallado estructural, sin tener un gran impacto en costos del proyecto.

7.2 Recomendaciones

Se propone como investigación futura estudiar el comportamiento estructural de edificaciones con sistema estructural combinado de pórticos y muros de concreto reforzado, en los cuales las vigas se diseñen con acero grado 80 mientras que las columnas y los muros se diseñen con acero grado 60, verificando la compatibilidad entre los dos aceros estructurales y respecto a columna fuerte – viga débil, realizando una investigación práctico – teórica.

Asimismo, se recomienda extender la investigación al diseñar estructuras con secciones reducidas de columnas con el fin de que estas no requieran cuantía mínima por refuerzo, teniendo en cuenta el cumplimiento de las derivas según el Título A de reglamento NSR-10, con el fin de verificar el beneficio que podría representar utilizar acero grado 80 en columnas con altas solicitaciones.

Adicionalmente, se propone ampliar la investigación al realizar un análisis y diseño estructural con diferentes parámetros sísmicos a los estudiados en el presente trabajo de grado, con el fin de tener un espectro de resultados más amplio al estudiar las diferentes variables propuestas y poder identificar las diferentes tendencias resultado del análisis realizado.

Finalmente, se recomienda ampliar la investigación en estructuras con mayor número de pisos y con luces mayores a las estudiadas, las cuales puedan tener mayores solicitaciones y se vea reflejado el beneficio económico al usar acero grado 80, igualmente verificar la tendencia de que el costo en los casos de edificaciones diseñadas con DES, tendían a igualar los costos en los casos DMO según se incrementaban los pisos, y así tener un mayor beneficio en el comportamiento estructural sin verse afectado el factor económico.

Se debe tener en cuenta que el cálculo de los costos para los casos de acero grado 80 se realizó con un valor de kg estimado según se indagó con ciertas siderúrgicas, el valor oficial del kg puede llegar a ser menor que el empleado en el presente proyecto de grado, dando mayores variaciones en los costos y así potenciar los beneficios económicos. Asimismo, los resultados en el presente proyecto muestran ciertas tendencias según las variables estudiadas para unas plantas tipo, es por esto por lo que se recomienda que para cada caso específico se debe realizar el correspondiente análisis con el fin de verificar los beneficios en dicho caso de estudio.

Bibliografía

[1] Revista Semana. Boyacá y su larga historia con la producción del acero en Colombia [en línea]. Colombia: [junio de 2018]. [Fecha de consulta 22 agosto 2020]. Disponibilidad en: <https://www.semana.com/contenidos-editoriales/boyaca-todo-nace-aqui/articulo/boyaca-y-su-larga-historia-con-la-produccion-del-acero-en-colombia/578321>

[2] El Heraldo. Ternium triplicará su producción para el 2020 [en línea]. Colombia: [diciembre de 2019]. [Fecha de consulta 22 agosto 2020]. Disponibilidad en: <https://www.elheraldo.co/economia/ternium-triplicara-su-produccion-para-el-2020-688149>

[3] ANDI. El acero colombiano: Columna vertebral para el progreso del país [en línea]. Colombia: [octubre de 2018]. [Fecha de consulta 03 octubre 2019]. Disponibilidad en: <http://www.andi.com.co/Uploads/LIBRO%20ACERO%20FINAL%20-%20BAJA.pdf>

[4] EPM. Norma de construcción acero de refuerzo [en línea]. Colombia: [marzo de 2019]. [Fecha de consulta 19 agosto 2020]. Disponibilidad en: https://www.epm.com.co/site/Portals/3/documentos/Aguas/NC_MN_OC07_07_Acero_de_refuerzo.pdf?ver=2019-03-19-113444-017

[5] Jorge Ignacio Segura Franco. "Estructuras de concreto I" no. d, pp. 3 – 8, 2011. Editorial Universidad Nacional de Colombia. Séptima Edición.

[6] ANDI. Lo que debemos saber del acero de refuerzo en edificaciones de mediana altura [en línea]. Colombia: [junio de 2017]. [Fecha de consulta 20 agosto 2020]. Disponibilidad en: http://www.andi.com.co/Uploads/5%20-%20Revista%20Noticreto_636536133044871808.pdf

[7] V. GIONCU. Framed structures, ductility and seismic response. Journal of Constructional Steel Research. 2000, 55. Romania.

[8] NVENT. Sistemas de empalmes mecánicos para barras de armaduras [en línea]. Chile [2018]. [Fecha de consulta 06 octubre 2019]. Disponibilidad en: <https://www.erico.com/catalog/literature/RSB-WWSP.pdf>

[9] RAMALZA. Empalmes mecánicos [en línea]. Colombia [2016]. [Fecha de consulta 15 agosto 2020]. Disponibilidad en: <https://www.ramalza.com/empalmes-mecanicos/>

[10] A. Kalam Azad. "Cost study of a high rise r.c building with different grades of steel", Department Of Civil Engineering Bangladesh University Of Engineering And Technology (BUET), 2016.

[11] C. Nieto Miño y H. Pérez Báez. "Uso de varillas de alta resistencia (grado 80) en la construcción de edificios mediante sistemas estructurales duales", Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2015. Trabajo de grado de pregrado.

[12] Luis Zegarra Ciquero. "El refuerzo de estructuras de concreto armado con aceros de grado 75 en el Perú", Pontificia Universidad Católica del Perú, 2016.

[13] D. Alvis Fonseca y J.A. Guerra Bejarano. "Análisis técnico, económico y constructivo del uso de empalmes mecánicos en edificaciones", Universidad Distrital Francisco José De Caldas, 2017.

[14] R. Singh, S. K. Himanshu y N. Bhalla. "Reinforcement couplers as an alternative to lap splices: a case study. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)" Graphic Era University. 2013, Vol. 2 Issue 2. India.

[15] Domingo José Martínez Barraza. "Evaluación de la influencia del grado de disipación de energía escogido en el diseño de pórticos de concreto reforzado en zonas de amenaza sísmica baja e intermedia", Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2019.

- [16] NEHRP. "Use of high-strength reinforcement in earthquake-resistant concrete structures", Applied Technology Council and the Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering, 2014. Reporte NIST 14-917-30.
- [17] M. Kowalsky, R. Seracino y D. Overby. "A706 grade 80 reinforcement for seismic applications", North Carolina State University, Department of Civil Construction and and Environmental Engineering. Reporte No. CA15-2563
- [18] American Concrete Institute., "Building code requirements for structural Concrete (ACI 318-19)", (285–298), 2019.
- [19] Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica., "NSR-10 Título A Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente", (1-86), 2010.
- [20] Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica., "NSR-10 Título B Cargas", (1–82), 2010.
- [21] Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica., "NSR-10 Título C Concreto Estructural", (1–590), 2010.

Anexo 1: Análisis de datos

A.1.1 Estimación de los costos a partir de la cantidad de acero y conectores mecánicos requeridos según el caso de estudio

Tabla A-1: Costos estimados edificación tipo A con empalmes por traslapo

No. de Pisos	CASO	Costo estimado kg de acero en millones de pesos en			
		Vigas	Columnas	Muros	Total
5	Gr 60 - DMO	24.96	16.87	17.16	58.98
	Gr 60 - DES	24.61	23.48	14.85	62.93
	Gr 80 - DMO	25.58	19.52	20.41	65.51
	Gr 80 - DES	25.99	22.99	19.30	68.28
10	Gr 60 - DMO	58.41	50.40	58.90	167.70
	Gr 60 - DES	53.18	70.57	54.38	178.12
	Gr 80 - DMO	56.99	61.19	71.71	189.89
	Gr 80 - DES	55.02	76.48	68.35	199.85
15	Gr 60 - DMO	97.95	95.04	101.68	294.67
	Gr 60 - DES	86.32	121.15	102.55	310.03
	Gr 80 - DMO	96.08	109.82	126.58	332.48
	Gr 80 - DES	85.90	137.47	129.30	352.67
20	Gr 60 - DMO	133.42	155.89	180.17	469.47
	Gr 60 - DES	115.07	187.45	179.82	482.34
	Gr 80 - DMO	126.96	176.54	230.27	533.77
	Gr 80 - DES	111.81	220.76	230.25	562.82

Tabla A-2: Costos estimados edificación tipo A con empalmes mecánicos

No. de Pisos	CASO	costo estimado kg de acero en millones en				costo estimado conectores mecánicos en millones en				Costo total en millones
		Vigas	Columnas	Muros	Total	Vigas	Columnas	Muros	Total	
5	Gr 60 - DMO	24.66	15.62	17.10	57.38	1.71	1.22	0.28	3.20	60.58
	Gr 60 - DES	24.14	20.47	14.78	59.39	1.85	1.33	0.38	3.56	62.95
	Gr 80 - DMO	24.99	17.17	20.16	62.31	1.94	1.22	0.69	3.84	66.15

	Gr 80 - DES	25.41	20.64	19.13	65.18	2.03	1.22	1.12	4.36	69.54
10	Gr 60 - DMO	57.34	45.99	57.64	160.97	1.88	3.76	4.78	10.42	171.40
	Gr 60 - DES	52.69	62.68	53.00	168.36	2.38	4.99	4.66	12.03	180.40
	Gr 80 - DMO	56.58	52.71	69.48	178.76	2.51	3.86	5.40	11.77	190.53
	Gr 80 - DES	53.60	67.49	66.24	187.33	2.24	4.75	4.82	11.80	199.13
15	Gr 60 - DMO	96.83	86.24	98.15	281.22	2.80	9.50	11.16	23.46	304.68
	Gr 60 - DES	84.81	107.55	99.46	291.81	3.39	10.01	9.92	23.33	315.15
	Gr 80 - DMO	94.78	95.11	121.03	310.92	3.07	10.01	12.30	25.38	336.30
	Gr 80 - DES	84.42	120.69	123.77	328.88	2.99	10.01	11.68	24.68	353.56
20	Gr 60 - DMO	131.93	138.12	173.16	443.22	3.15	14.57	22.76	40.48	483.70
	Gr 60 - DES	113.12	166.63	172.79	452.54	3.60	14.80	22.05	40.44	492.99
	Gr 80 - DMO	125.18	147.31	217.90	490.39	3.43	14.78	26.32	44.52	534.92
	Gr 80 - DES	109.73	182.64	219.23	511.59	3.34	14.58	24.48	42.39	553.98

Tabla A-3: Costos estimados edificación tipo B con empalmes por traslapo

No. de Pisos	CASO	costo estimado kg de acero en millones de pesos en			
		Vigas	Columnas	Muros	Total
5	Gr 60 - DMO	66.44	27.32	27.82	121.59
	Gr 60 - DES	67.37	35.88	23.32	126.57
	Gr 80 - DMO	66.83	33.94	32.49	133.26
	Gr 80 - DES	66.26	43.22	26.91	136.39
10	Gr 60 - DMO	142.05	67.40	98.95	308.40
	Gr 60 - DES	139.57	85.78	98.83	324.18
	Gr 80 - DMO	136.53	78.36	118.37	333.26
	Gr 80 - DES	137.58	96.88	123.17	357.63
15	Gr 60 - DMO	234.94	67.45	255.28	557.66
	Gr 60 - DES	206.02	91.28	255.33	552.64
	Gr 80 - DMO	210.88	81.50	305.42	597.80
	Gr 80 - DES	195.37	100.63	308.76	604.76
20	Gr 60 - DMO	301.95	99.65	352.35	753.95
	Gr 60 - DES	275.68	116.75	356.74	749.16
	Gr 80 - DMO	279.94	114.21	427.80	821.96
	Gr 80 - DES	257.19	139.40	441.76	838.36

Tabla A-4: Costos estimados edificación tipo B con empalmes mecánicos

No. de Pisos	CASO	costo estimado kg de acero en millones en				costo estimado conectores mecánicos en millones en				Costo total en millones
		Vigas	Columnas	Muros	Total	Vigas	Columnas	Muros	Total	
5	Gr 60 - DMO	64.92	25.06	27.63	117.61	4.89	1.87	0.57	7.33	124.94
	Gr 60 - DES	65.37	32.98	23.18	121.53	5.76	2.00	0.58	8.34	129.87
	Gr 80 - DMO	65.08	30.01	32.24	127.33	4.03	1.94	0.69	6.66	133.99
	Gr 80 - DES	64.06	38.32	26.72	129.10	4.70	2.00	0.62	7.31	136.41
10	Gr 60 - DMO	135.16	61.10	96.56	292.82	9.67	4.88	8.15	22.71	315.53
	Gr 60 - DES	129.46	75.01	96.25	300.73	9.28	7.16	7.93	24.37	325.10
	Gr 80 - DMO	130.39	66.99	114.19	311.57	7.12	7.08	9.61	23.82	335.39
	Gr 80 - DES	127.00	83.49	118.88	329.37	7.96	7.16	9.56	24.68	354.05
15	Gr 60 - DMO	225.98	59.11	246.74	531.83	14.22	7.44	27.04	48.70	580.53
	Gr 60 - DES	193.70	77.34	247.37	518.40	11.47	7.64	24.94	44.05	562.45
	Gr 80 - DMO	203.79	69.37	293.00	566.16	9.80	7.51	27.45	44.76	610.92
	Gr 80 - DES	186.07	85.48	299.21	570.76	8.52	7.64	26.97	43.12	613.88
20	Gr 60 - DMO	292.50	91.21	339.16	722.88	18.83	9.91	43.07	71.81	794.69
	Gr 60 - DES	259.66	105.83	343.88	709.37	17.77	10.08	43.07	70.92	780.29
	Gr 80 - DMO	272.03	98.30	406.15	776.49	12.27	9.90	47.16	69.34	845.83
	Gr 80 - DES	245.46	116.80	420.58	782.84	13.04	10.08	46.44	69.56	852.40

A.1.2 Análisis del efecto del tipo de empalme utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados

Como complemento, se presentan tablas A-1 y A-2 con el análisis de resultados realizado respecto a las variaciones para empalmes por conectores mecánicos con respecto a empalmes por traslapo, en la cual se incluye las variaciones de las cantidades de acero requerido y de los costos estimados en los elementos primarios (vigas, columnas y muros) según el número de piso de estudio, los cuales están relacionados con el grado del acero de refuerzo y el grado de disipación de energía escogidos para las edificaciones tipo A y B.

Tabla A-5: Análisis de resultados de la variación porcentual entre empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo edificación tipo A

No. de Pisos	CASO	variación porcentual kg de acero requerido				Variación porcentual costos estimados			
		Vigas	Columnas	Muros	Total	Vigas	Columnas	Muros	Total
5	Gr 60 - DMO	1.17	7.40	0.36	2.72	-5.69	0.20	-1.24	-2.71
	Gr 60 - DES	1.91	12.81	0.46	5.64	-5.61	7.14	-2.08	-0.02
	Gr 80 - DMO	2.32	12.06	1.24	4.89	-5.25	5.83	-2.13	-0.98
	Gr 80 - DES	2.23	10.24	0.85	4.54	-5.58	4.95	-4.94	-1.85
10	Gr 60 - DMO	1.83	8.74	2.14	4.01	-1.38	1.27	-5.98	-2.20
	Gr 60 - DES	0.93	11.18	2.53	5.48	-3.54	4.11	-6.05	-1.28
	Gr 80 - DMO	0.72	13.86	3.12	5.86	-3.67	7.55	-4.41	-0.34
	Gr 80 - DES	2.59	11.75	3.08	6.26	-1.47	5.55	-3.96	0.36
15	Gr 60 - DMO	1.15	9.26	3.47	4.57	-1.71	-0.74	-7.51	-3.40
	Gr 60 - DES	1.75	11.23	3.02	5.87	-2.18	2.96	-6.66	-1.65
	Gr 80 - DMO	1.35	13.39	4.38	6.48	-1.84	4.28	-5.33	-1.15
	Gr 80 - DES	1.72	12.21	4.28	6.75	-1.77	4.93	-4.75	-0.25
20	Gr 60 - DMO	1.11	11.40	3.89	5.59	-1.25	2.05	-8.74	-3.03
	Gr 60 - DES	1.69	11.11	3.91	6.18	-1.43	3.22	-8.36	-2.21
	Gr 80 - DMO	1.40	16.56	5.37	8.13	-1.30	8.19	-6.06	-0.21
	Gr 80 - DES	1.86	17.27	4.79	9.10	-1.12	10.67	-5.84	1.57

Tabla A-6: Análisis de resultados de la variación porcentual entre empalmes mecánicos con respecto a empalmes por traslapo edificación tipo B

No. de Pisos	CASO	variación porcentual kg de acero requerido				Variación porcentual costos estimados			
		Vigas	Columnas	Muros	Total	Vigas	Columnas	Muros	Total
5	Gr 60 - DMO	2.30	8.26	0.70	3.27	-5.06	1.40	-1.34	-2.76
	Gr 60 - DES	2.97	8.08	0.61	3.98	-5.57	2.52	-1.90	-2.60
	Gr 80 - DMO	2.63	11.58	0.76	4.45	-3.41	5.86	-1.36	-0.55
	Gr 80 - DES	3.33	11.32	0.71	5.34	-3.77	6.70	-1.59	-0.02
10	Gr 60 - DMO	4.85	9.34	2.42	5.05	-1.96	2.10	-5.82	-2.31
	Gr 60 - DES	7.24	12.55	2.61	7.23	0.59	4.20	-5.41	-0.28
	Gr 80 - DMO	4.50	14.51	3.53	6.51	-0.72	5.48	-4.60	-0.64
	Gr 80 - DES	7.69	13.82	3.49	7.90	1.91	6.43	-4.28	1.00
15	Gr 60 - DMO	3.81	12.36	3.34	4.63	-2.24	1.33	-7.25	-4.10
	Gr 60 - DES	5.98	15.27	3.12	6.19	0.42	6.91	-6.65	-1.78
	Gr 80 - DMO	3.36	14.88	4.06	5.29	-1.28	5.67	-4.92	-2.19
	Gr 80 - DES	4.76	15.06	3.09	5.62	0.40	7.47	-5.64	-1.51
20	Gr 60 - DMO	3.13	8.47	3.74	4.12	-3.11	-1.48	-8.48	-5.40

	Gr 60 - DES	5.81	9.35	3.61	5.31	-0.64	0.72	-8.47	-4.15
	Gr 80 - DMO	2.83	13.93	5.06	5.53	-1.56	5.26	-5.96	-2.90
	Gr 80 - DES	4.56	16.22	4.80	6.62	-0.51	8.99	-5.72	-1.67

A.1.3 Análisis del efecto del grado de disipación de energía utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos

Como complemento, se presentan las tablas A-3 y A-4 con el análisis de resultados realizado en relación a las variaciones al diseñar con capacidad de disipación de energía moderada con respecto a especial, en las cuales se incluyen las variaciones de las cantidades de acero requerido y de los costos estimados en los elementos primarios (vigas, columnas y muros), se indican las variaciones para las edificaciones analizadas con empalmes por traslapo y con empalmes mecánicos para cada caso según el número de piso de estudio y el grado del acero de refuerzo para las edificaciones tipo A y B.

Tabla A-7: Análisis de resultados de la variación porcentual entre capacidad disipación de energía moderada con respecto a especial edificación tipo A con empalmes por traslapo y mecánicos

CASO	Variación porcentual costos estimados con empalmes por traslapo				Variación porcentual costos estimados con empalmes mecánicos			
	Vigas	Columnas	Muros	Total	Vigas	Columnas	Muros	Total
5 Gr 60	1.38	-39.19	13.47	-6.70	1.46	-29.50	12.75	-3.91
5 Gr 80	-1.59	-17.79	5.45	-4.22	-1.91	-18.89	2.85	-5.13
10 Gr 60	8.95	-40.03	7.68	-6.21	7.01	-36.00	7.62	-5.25
10 Gr 80	3.45	-25.00	4.69	-5.25	5.50	-27.71	5.10	-4.52
15 Gr 60	11.87	-27.47	-0.86	-5.21	11.47	-22.79	-0.07	-3.44
15 Gr 80	10.60	-25.18	-2.15	-6.07	10.66	-24.33	-1.59	-5.13
20 Gr 60	13.75	-20.25	0.19	-2.74	13.60	-18.82	0.55	-1.92
20 Gr 80	11.93	-25.05	0.01	-5.44	12.09	-21.67	0.21	-3.56

Tabla A-8: Análisis de resultados de la variación porcentual entre capacidad disipación de energía moderada con respecto a especial edificación tipo B con empalmes por traslapo y mecánicos

CASO	Variación porcentual costos estimados con empalmes por traslapo				Variación porcentual costos estimados con empalmes mecánicos			
	Vigas	Columnas	Muros	Total	Vigas	Columnas	Muros	Total
5 Gr 60	-1.39	-31.34	16.17	-4.10	-1.88	-29.86	15.71	-3.94
5 Gr 80	0.86	-27.33	17.18	-2.34	0.51	-26.20	16.99	-1.81
10 Gr 60	1.75	-27.27	0.12	-5.12	4.21	-24.54	0.51	-3.03
10 Gr 80	-0.76	-23.64	-4.06	-7.31	1.86	-22.40	-3.74	-5.56
15 Gr 60	12.31	-35.33	-0.02	0.90	14.58	-27.69	0.54	3.11
15 Gr 80	7.36	-23.47	-1.10	-1.16	8.90	-21.12	-1.79	-0.49
20 Gr 60	8.70	-17.16	-1.25	0.64	10.89	-14.62	-1.23	1.81
20 Gr 80	8.13	-22.06	-3.26	-2.00	9.08	-17.25	-3.02	-0.78

A.1.4 Análisis del efecto del grado del acero de refuerzo utilizado sobre las cantidades de acero requerido y los costos estimados

Como complemento, se presentan las tablas A-5, A-6, A-7 y A-8 con el análisis de resultados, realizado en relación a las variaciones al diseñar con acero grado 80 con respecto a acero grado 60, en las cuales se incluyen las variaciones de las cantidades de acero requerido y de los costos estimados en los elementos primarios (vigas, columnas y muros), para cada caso según el número de pisos de estudio, el tipo de edificación y el tipo de empalme empleado.

Tabla A-9: Análisis de resultados de la variación porcentual entre acero grado 80 con respecto a acero grado 60 edificación tipo A con empalmes por traslapo

CASO	variación porcentual kg de acero requerido				Variación porcentual costos estimados			
	Vigas	Columnas	Muros	Total	Vigas	Columnas	Muros	Total
5 DMO	12.67	1.42	-1.33	5.38	-2.51	-15.73	-18.95	-11.07
5 DES	10.04	16.58	-10.72	7.58	-5.61	2.07	-29.98	-8.49
10 DMO	16.89	-3.43	-3.72	3.55	2.43	-21.41	-21.76	-13.23
10 DES	11.87	7.67	-7.08	4.42	-3.46	-8.38	-25.70	-12.20
15 DMO	16.45	1.57	-6.05	3.88	1.91	-15.55	-24.49	-12.83

15 DES	15.23	3.34	-7.40	3.10	0.49	-13.48	-26.08	-13.76
20 DMO	18.94	3.53	-8.87	3.15	4.84	-13.25	-27.81	-13.70
20 DES	17.23	-0.32	-9.08	0.60	2.83	-17.77	-28.05	-16.69

Tabla A-10: Análisis de resultados de la variación porcentual entre acero grado 80 con respecto a acero grado 60 edificación tipo A con empalmes mecánicos

CASO	variación porcentual kg de acero requerido en				Variación porcentual costos estimados en			
	Vigas	Columnas	Muros	Total	Vigas	Columnas	Muros	Total
5 DMO	13.69	6.38	-0.43	7.49	-2.09	-9.19	-19.99	-9.20
5 DES	10.34	14.11	-10.29	6.51	-5.58	-0.25	-33.61	-10.48
10 DMO	15.95	2.38	-2.68	5.40	0.23	-13.69	-19.95	-11.16
10 DES	13.35	8.26	-6.47	5.22	-1.39	-6.76	-23.23	-10.38
15 DMO	16.62	6.05	-5.05	5.82	1.79	-9.80	-21.97	-10.38
15 DES	15.20	4.41	-6.01	3.99	0.90	-11.18	-23.83	-12.19
20 DMO	19.18	9.15	-7.20	5.75	4.80	-6.15	-24.65	-10.59
20 DES	17.37	6.63	-8.08	3.70	3.13	-8.70	-25.08	-12.37

Tabla A-11: Análisis de resultados de la variación porcentual entre acero grado 80 con respecto a acero grado 60 edificación tipo B con empalmes por traslapo

CASO	variación porcentual kg de acero requerido en				Variación porcentual costos estimados en			
	Vigas	Columnas	Muros	Total	Vigas	Columnas	Muros	Total
5 DMO	14.32	-5.83	0.53	6.64	-0.58	-24.23	-16.77	-9.60
5 DES	16.21	-2.60	1.73	8.21	1.64	-20.44	-15.37	-7.75
10 DMO	18.12	0.96	-1.90	7.95	3.88	-16.26	-19.62	-8.06
10 DES	16.03	3.79	-6.16	6.02	1.43	-12.95	-24.63	-10.32
15 DMO	23.54	-2.93	-1.92	8.68	10.24	-20.83	-19.64	-7.20
15 DES	19.22	6.09	-3.01	6.78	5.17	-10.24	-20.93	-9.43
20 DMO	21.02	2.37	-3.43	7.13	7.29	-14.61	-21.41	-9.02
20 DES	20.53	-1.72	-5.49	4.67	6.71	-19.41	-23.83	-11.91

Tabla A-12: Análisis de resultados de la variación porcentual entre acero grado 80 con respecto a acero grado 60 edificación tipo B con empalmes mecánicos

CASO	variación porcentual kg de acero requerido en				Variación porcentual costos estimados en			
	Vigas	Columnas	Muros	Total	Vigas	Columnas	Muros	Total
5 DMO	14.60	-2.00	0.58	7.77	1.00	-18.61	-16.80	-7.24
5 DES	16.52	1.02	1.83	9.51	3.33	-15.27	-15.02	-5.04
10 DMO	17.82	6.60	-0.74	9.36	5.05	-12.25	-18.24	-6.30
10 DES	16.44	5.19	-5.21	6.70	2.73	-10.32	-23.29	-8.91
15 DMO	23.18	0.04	-1.16	9.32	11.08	-15.51	-17.05	-5.24
15 DES	18.17	5.86	-3.04	6.21	5.16	-9.57	-19.79	-9.14
20 DMO	20.78	8.19	-2.01	8.50	8.68	-7.01	-18.60	-6.44
20 DES	19.47	5.99	-4.19	5.99	6.82	-9.46	-20.69	-9.24