

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZU
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS



CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

***“ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS LOSAS MACIZAS
TRADICIONALES Y EL SISTEMA U-BOOT”***

Jessi Tamara Rodríguez Báez

Coronel Oviedo - Paraguay

Año 2018

**“ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS LOSAS MACIZAS TRADICIONALES Y
EL SISTEMA U-BOOT”**

Elaborado por

Jessi Tamara Rodríguez Báez

Tutor

Ing. Fredy G. Ramírez Villanueva

Co - Tutor

Ing. Osvaldo Ramón Romero

Trabajo presentado a la Facultad de Ciencias y Tecnología de la
Universidad Nacional de Caaguazú, como requisito para la
obtención del título de Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZU

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Coronel Oviedo - Paraguay

Año 2018

PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo de fin de grado para la obtención del Título de Ingeniero Civil aprobado en representación de la Facultad Ciencias y Tecnología de la Universidad Nacional de Caaguazú, por el Tribunal Examinador constituido por los siguientes profesores.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Prof. Ing

Dedicado a:

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a **Dios**, por darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de mis anhelos más deseados.

A mi **madre**, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ella he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy.

A mis **hermanos** por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral, que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Agradecimientos:

Durante los años de mi carrera universitaria y proceso de formación profesional; he tenido la oportunidad de conocer a personas que han impactado mi vida y me han ayudado a crecer como persona y como profesional.

Doy gracias a todos los profesores y académicos de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Caaguazú. Cada catedrático, que pacientemente se han dedicado en la formación de cada uno de sus alumnos y nos han dedicado su tiempo para transferir sus conocimientos y formar una nueva generación de profesionales listos para competir en un mercado internacional, diverso y cambiante.

Agradezco a mi familia, que pacientemente me han ayudado a superar cada obstáculo y me han apoyado en el camino de mi formación profesional. También me siento privilegiada de haber sido parte de un grupo de compañeros que me han acompañado en los momentos buenos y malos. Me enseñaron solidaridad, humildad, compañerismo y me han dado la fuerza de seguir adelante y llegar a la meta final con la frente en alta y lista para la vida profesional.

*“ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS LOSAS MACIZAS TRADICIONALES
Y EL SISTEMA U-BOOT”*

Jessi Tamara Rodríguez Báez

RESUMEN

El siguiente Proyecto Final de Grado tiene como objeto estudiar distintos modelos de losas, utilizando losas macizas y aligeradas con el sistema U-Boot, se comparan las tensiones y deformaciones al hacer variar, los espesores de la losa maciza y la altura de los encofrados y ancho de los nervios en el caso de la losa aligerada, utilizando un software que calcule mediante el método de los elementos finitos.

Además, analizar el comportamiento estructural de las losas macizas y aligeradas examinando las tensiones y deformaciones, comparar los distintos resultados obtenidos para cada modelo, considerando a partir de qué modelo se vuelve más factible la utilización de una losa aligerada con el sistema U-boot.

Y por último realizar conclusiones, en base a los resultados, acotando en ellas el por qué utilizar una losa aligerada, en vez de una losa maciza convencional. Para la realización del trabajo, se utilizó el Software de Calculo SAFE.

Al termino del proyecto, se han obtenido los siguientes resultados más importantes; el sistema de aligeramiento con U-boot resulta factible en todos los casos, desde el punto de vista estructural, puesto que tiene una reducción de aproximadamente 35% del peso en comparación a la losa maciza, lo que resulta ventajoso al utilizar vigas, pilares y fundaciones, porque se pueden observar una serie de reducciones en las secciones de los mismos. Por otro lado, desde el

punto de vista económico, la utilización del sistema U-Boot se vuelve ventajosa a partir de los 6m, sin embargo en el estudio de los cuatro modelos se observó que el mas optimo es el de 7m.

Jessi Tamara Rodriguez Baez

ABSTRACT

The following research Project part of my degree has as a main purpose to analyses various types of concrete slabs. It compares the traditional method of slab and compares it with the new technology of U-boot, which is a much lighter type of slab. The project also research deep into the resistance of these type of slab and performs tests using several thickness of slab for both, traditional slab and the U-boot system, the formwork, the thickness for the nerves for the U-boot method. For this, I utilized a software that allowed me to calculate using finite elements.

This project also takes a closer look on how the structure behaves under tensions and deformities. It compares all different results obtained during the testing process for each different models. The final results focuses on the samples that results don showing financial benefits on using the U-boot system.

The findings of this project can show that based on the results the different reasons for why to choose the U-boot system over the traditional slab system. For the purpose of the analysis, I used the SAFE calculation software.

The finding of this project also included the followings: the lightening system of U-Boot is more convenient overall in all cases for various different reasons. From the structural point of view the U-boot system is 35% lighter than the traditional slab system. This makes it very advantageous since the structure wouldn't also

need pillars, beams and would reduce the cost of foundations. Another important point to make is that the U-boot system becomes viable to use on slabs bigger than 6m, however out of all the models studied for this project, 7m slabs are the ones with the best financial benefits.

CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN	1
Dedicado a:	2
Agradecimientos:.....	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	5
CONTENIDO	7
LISTA DE FIGURAS	17
CAPITULO 2	17
CAPITULO 4	17
CAPITULO 5	17
CAPITULO 7	17
CAPITULO 8	23
LISTA DE TABLAS	24
CAPITULO 7	24
CAPITULO 8	24
CAPITULO 9	25
CAPITULO 1	27
INTRODUCCIÓN	27
1.1 Objetivos	29
1.1.1 Objetivo General.....	29

1.1.2 Objetivo Especifico	29
1.2. Planteamiento y Formulación del Problema	30
1.3. Solución propuesta por el proyecto de investigación.....	31
1.4. Justificación.....	32
1.5. Alcance.....	33
CAPITULO 2	34
SISTEMA DE LOSAS MACIZAS Y ALIGERADAS	34
2.1. El aligeramiento en la edificación	34
2.2. Losas aligeradas	35
2.2.1 Ventajas de losas aligeradas.....	36
2.2.2. Comportamiento estático según la dirección de los nervios	36
2.2.3. Pieza aligerante.....	38
2.2.3. Nervios	38
2.3.4. Capa de compresión	38
CAPITULO 3	39
SISTEMAS DE LOSAS ALIGERADAS CON U-BOOT	39
3.1. U-Boot	39
3.2. Finalidad	39
3.3. Principales ventajas del U-Boot.....	40
3.4. U-Boot en comparación a otros materiales aligerantes	40
3.5. Compatibilidad con el medio ambiente	41
3.6. Innovación tecnológica y Construcción	41
3.7. Necesidad de innovación tecnológica en la construcción.....	42

3.8. Condiciones que favorecen la utilización de tecnología innovadora	43
3.9. En obra.....	46
3.10. Organización y planeación	47
3.11. Aspectos a tener en cuenta.....	48
CAPÍTULO 4	50
APLICACIÓN DE SISTEMAS DE LOSAS ALIGERADAS CON U-BOOT EN OBRAS DE EDIFICACIÓN	50
4.1. Losas aligeradas con U-Boot y su aplicación en grandes obras	50
4.2. Vulcano Buono / Renzo Piano – Italia	50
4.3. Hospital Borgo Trento – Italia	52
4.4 Proyecto Treviso Maggiore - Arquitecto Mario Botta	54
CAPITULO 5	56
EUROCODIGO - CONSIDERACIONES PARA EL CALCULO DE LOSAS PLANAS.....	56
5.1. Determinar la vida útil de diseño	56
5.2 Determinar que combinación de acciones se debe aplicar	56
5.2.1. Valores de los coeficientes ψ	60
5.2.2. Valores de cálculo de las acciones en situaciones de proyecto permanentes y transitorias	61
5.2.3. Durabilidad y recubrimiento de la armadura.....	61
5.3. Estados Límite Últimos (ELU).....	62
5.3.1. Coeficientes para la obtención del valor de cálculo de la resistencia a cortante	62

5.3.2 Coeficiente de reducción de la resistencia del hormigón fisurado a efectos de la determinación del cortante de cálculo en elementos que no necesitan armadura de cortante.....	62
5.3.3. Limitación del ángulo de inclinación de las bielas de compresión	62
5.3.4. Coeficientes para la obtención de la capacidad a cortante en piezas con armadura de cortante	63
5.3.5. Limitación del ángulo de inclinación de las bielas para la comprobación del cortante entre alas y alma de secciones en T.....	64
5.3.6. Coeficiente para valorar la necesidad de armadura adicional a la de flexión en en el caso de cortante entre alas y almas de secciones en T	64
5.3.7. Coeficiente para valorar la tensión máxima a punzonamiento	64
5.3.8. Coeficientes para obtener la resistencia de cálculo a cortante debido al punzonamiento	65
5.3.9. Limitación de la armadura de punzonamiento	65
5.3.10 Coeficiente para la determinación de la distancia del perímetro más exterior de la armadura de punzonamiento respecto al perímetro crítico	66
5.3.11 Coeficiente para calcular la disminución de la resistencia de cálculo del hormigón en la aplicación de modelos de bielas y tirantes.....	66
5.4. Estados Límite de Servicio (ELS)	66
5.4.1. Coeficiente de limitación de la tensión de compresión en ambientes XD, XF y XS	66
5.4.1. Coeficiente de limitación de la tensión en el hormigón para considerar una fluencia lineal.....	67
5.4.2. Coeficientes de limitación tensional para asumir que se evitan fisuraciones o deformaciones inaceptables.....	67

5.4.3. Valores límite de la abertura de fisura	67
5.4.4. Coeficientes para la estimación de la separación entre fisuras	68
5.4.5. Coeficiente de tipología estructural para el cálculo de la relación canto/luz que permite asumir directamente el cumplimiento de los límites de flecha de los puntos 7.4.1 (4) y 7.4.1 (5).	68
5.5. Detalles constructivos de elementos y reglas particulares	69
5.5.1. Separación máxima entre armaduras de flexión en losas	69
CAPÍTULO 6	70
METODO DE ELEMENTOS FINITOS	70
6.1. Conceptos básicos del método de los elementos finitos	70
6.2. Antecedentes Históricos	72
6.3. Etapas básicas en la utilización del método de los elementos finitos.....	75
6.4. Definición del problema y su dominio	76
6.5 Discretización del dominio	76
6.6. Identificación de la(s) variable(s) de estado	78
6.7. Formulación del problema	78
6.8. Establecimiento de los sistemas de referencia.....	78
6.9. Construcción de las funciones de aproximación de los elementos	79
6.10. Determinación de las ecuaciones a nivel de cada elemento	81
6.11. Transformación de coordenadas	81
6.12. Ensamblaje de las ecuaciones de los elementos	81
6.13. Introducción de las condiciones de contorno.....	82
6.14. Solución del sistema de ecuaciones resultante	82

6.15. Interpretación de los resultados.....	83
6.16. Implementación computacional del método de los elementos finitos ...	84
6.17. Método y formulaciones de las ecuaciones de los elementos.....	85
6.18. Modelos de elementos finitos en la mecánica de los solidos	88
CAPITULO 7	90
CALCULO DE LOSAS MACIZAS Y ALIGERADAS - RESULTADOS OBTENIDOS	90
7.1. ANALISIS DE LOS RESULTADOS	90
7.1.1. Características de Materiales a ser utilizados	90
7.1.2. Cargas consideradas.....	90
7.1.3. Norma considerada	90
7.1.4. Software de Cálculo	91
7.1.5. Variaciones realizadas para el cálculo	91
Modelo N° 1: Losas macizas con vanos de 5m.....	93
Los resultados obtenidos en las losas macizas fueron los siguientes:	98
Los resultados obtenidos en las losas aligeradas fueron los siguientes:....	103
Modelo N° 2: Losas macizas con vanos de 6m.....	108
Los resultados obtenidos en las losas macizas fueron los siguientes:	110
Los resultados obtenidos en las losas aligeradas fueron los siguientes:....	115
Modelo N° 3: Losas macizas con vanos de 7m.....	120
Los resultados obtenidos en las losas macizas fueron los siguientes:	122
Los resultados obtenidos en las losas aligeradas fueron los siguientes:....	127
Modelo N° 4: Losas macizas con vanos de 8m.....	132

Los resultados obtenidos en las losas macizas fueron los siguientes:	134
Los resultados obtenidos en las losas aligeradas fueron los siguientes:.....	139
CAPITULO 8	144
ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS OBTENIDOS	144
8.1.CONSUMO DE HORMIGON.....	145
8.2.CONSUMO DE ARMADURAS	147
8.3. SE DETALLAN LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES EN CADA UNO DE LOS MODELOS.	150
Modelo N° 1: Losa con vanos de 5m.....	150
Modelo N° 2: Losa con vanos de 6m.....	155
Modelo N° 3: Losa con vanos de 7m.....	160
Modelo N° 4: Losa con vanos de 8m.....	165
CAPITULO 9	170
ANALISIS Y COMPARACION DE COSTOS	170
9.1. Se realiza un resumen de forma tabular con los costos de cada modelo:175	
Modelo N°1.....	175
Losas 175	
Costo Total en Gs.....	175
Costo de losa Gs/m2	175
Losa maciza	175
Losa aligerada.....	175
Modelo N°2.....	175
Losas 175	

Costo Total en Gs.....	175
Losa maciza	175
Losa aligerada.....	175
Modelo N°3.....	175
Losas 175	
Costo Total en Gs.....	175
Losa maciza	175
Losa aligerada.....	175
Modelo N°4.....	175
Losas 175	
Costo Total en Gs.....	175
Losa maciza	175
Losa aligerada.....	175
9.2. Influencia de los materiales en el costo total	177
9.3. Análisis de una estructura utilizando el sistema tradicional de losas macizas y el sistema de losas aligeradas con U-boot.	185
Para la primera comparación se utiliza el siguiente plano, como se muestran en las figuras 9.10 y 9.11, con una pilarización de 5,25m en (x) y 7m en (y). 185	
Conclusión del modelo con luces de 5 y 7 metros	191
Para la segunda comparación se utiliza el siguiente plano, como se muestran en las figuras 9.1 y 9.11, con una pilarización de 8m en (x) y 7m en (y).	192
Conclusión del modelo con luces de 8 y 7 metros	197

CAPITULO 10	199
CONCLUSIONES.....	199
10.1 CONCLUSIONES CON RESPECTO A LOS MODELOS ANALIZADOS.....	199
CAPITULO 11	201
RECOMENDACIONES	201
11.1. RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL DISEÑO DE LOSAS A PARTIR DE LOS MODELOS ESTUDIADOS.	201
CAPITULO 12	203
APÉNDICE A: MODELO N°1.....	203
A.A: Plano de Arquitectura	203
A.1: Detalle de losa – Armadura longitudinal Inferior.....	203
A.2: Detalle de losa – Armadura transversal Inferior	203
A.3: Detalle de losa – Armadura longitudinal Superior	203
A.4: Detalle de losa – Armadura transversal Superior.....	203
APÉNDICE B: MODELO N°2.....	204
B.B: Plano de Arquitectura	204
B.1: Detalle de losa – Armadura longitudinal Inferior.....	204
B.2: Detalle de losa – Armadura transversal Inferior	204
B.3: Detalle de losa – Armadura longitudinal Superior	204
B.4: Detalle de losa – Armadura transversal Superior.....	204
APÉNDICE C: MODELO N°3.....	205
C.C: Plano de Arquitectura.....	205
C.1: Detalle de losa – Armadura longitudinal Inferior	205

C.2: Detalle de losa – Armadura transversal Inferior	205
C.3: Detalle de losa – Armadura longitudinal Superior	205
C.4: Detalle de losa – Armadura transversal Superior.....	205
APÉNDICE D: MODELO N°4.....	206
D.D: Plano de Arquitectura.....	206
D.1: Detalle de losa – Armadura longitudinal Inferior	206
D.2: Detalle de losa – Armadura transversal Inferior	206
D.3: Detalle de losa – Armadura longitudinal Superior	206
D.4: Detalle de losa – Armadura transversal Superior.....	206
BIBLIOGRAFIA	207

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 2

Figura 2. 1 - Losa aligerada con el sistema U-BOOT37

CAPITULO 4

Figura 4. 1 – Vista aérea del Vulcano Buono Shopping Center.51

Figura 4. 2 – Etapa de Construcción del Vulcano Buono Shopping Center.52

Figura 4. 3 – Vista aérea del Hospital Borgo Trento.53

Figura 4. 4 – Etapa de Construcción del Hospital Borgo Trento.53

Figura 4. 5 – Vista frontal del Treviso Maggiore.....54

Figura 4. 6– Etapa de Construcción del Treviso Maggiore.55

CAPITULO 5

Figura 5. 1 - Vanos alternos cargados57

Figura 5. 2 - Vanos adyacentes cargados.....57

Figura 5.3 – Todos los vanos
cargados.....57

CAPITULO 7

Figura 7. 1 – Losas macizas, con ábacos intermedios y vanos de 5m.93

Figura 7. 2– Losas aligeradas con U-BOOT, con ábacos intermedios y vanos de 5m.....	94
Figura 7. 3– Líneas de soporte en ambas direcciones introducidas en el software correspondiente al Modelo N°1.....	95
Figura 7. 4 – Áreas de influencia sobre las líneas de soporte en dirección horizontal correspondientes al Modelo 1.....	96
Figura 7. 5 – Áreas de influencia sobre las líneas de soporte en dirección horizontal correspondientes al Modelo 1.....	97
Figura 7. 6 – Cortante máxima en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°1.	98
Figura 7. 7 –Perímetro critico de esfuerzo cortante en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°1.	99
Figura 7. 8 –Relación de punzonamiento para la verificación de secciones en la losa	100
Figura 7. 9 – Gráfico de momentos admisibles en el modelo N°1	101
Figura 7. 10 – Deformaciones en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°2	102
Figura 7. 11 – Cortante máxima en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°1.	103
Figura 7. 12 –Perímetro critico de esfuerzo cortante en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°1.	104

Figura 7. 13 –Relación de punzonamiento para la verificación de secciones en la losa	105
Figura 7. 14 – Gráfico de momentos admisibles, en el Modelo N°1	106
Figura 7. 15– Deformaciones en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°1	107
Figura 7. 16 – Losas macizas, con ábacos intermedios y vanos de 6m.	108
Figura 7. 17 – Losas aligeradas con U-BOOT, con ábacos intermedios y vanos de 6m.	109
Figura 7. 18 – Cortante máxima en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°2.	110
Figura 7. 19 –Perímetro critico de esfuerzo cortante en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°2.	111
Figura 7. 20 –Relación de punzonamiento para la verificación de secciones en la losa	112
Figura 7. 21 – Gráfico de momentos admisibles,	113
Figura 7. 22 – Deformaciones en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°2.	114
Figura 7. 23 – Cortante máxima en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°2.	115
Figura 7. 24–Perímetro critico de esfuerzo cortante en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°2.	116

Figura 7. 25–Relación de punzonamiento para la verificación de secciones en la losa.	117
Figura 7. 26– Gráfico de momentos admisibles,.....	118
Figura 7. 27 – Deformaciones en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°2.	119
Figura 7. 28 – Losas macizas, con ábacos intermedios y vanos de 6m.	120
Figura 7. 29 – Losas macizas, con ábacos intermedios y vanos de 6m.	121
Figura 7. 30 – Cortante máxima en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°3	122
Figura 7. 31 – Perímetro crítico de esfuerzo cortante en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°3.	123
Figura 7. 32 –Relación de punzonamiento para la verificación de secciones en la losa.	124
Figura 7. 33– Gráfico de momentos admisibles, Fuente: Elaboración propia.....	125
Figura 7. 34 – Deformaciones en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°3.	126
Figura 7. 35– Cortante máxima en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°3	127

Figura 7. 36 – Perímetro critico de esfuerzo cortante en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°3.	128
Figura 7. 37 –Relación de punzonamiento para la verificación de secciones en la losa.	129
Figura 7. 38 – Gráfico de momentos admisibles.....	130
Figura 7. 39 – Deformaciones en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°2.	131
Figura 7. 40 – Losas macizas, con ábacos intermedios y vanos de 6m.	132
Figura 7. 41– Losas macizas, con ábacos intermedios y vanos de 6m.	133
Figura 7. 42 – Cortante máxima en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°4	134
Figura 7. 43 – Perímetro critico de esfuerzo cortante en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°4.	135
Figura 7. 44 – Relación de punzonamiento para la verificación de secciones en la losa.....	136
Figura 7. 45 – Gráfico de momentos admisibles,.....	137
Figura 7. 46 – Deformaciones en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°4.	138
Figura 7. 47 – Cortante máxima en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°4.	139

Figura 7. 48 –Perímetro crítico de esfuerzo cortante en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°4.	140
Figura 7. 49 – Relación de punzonamiento para la verificación de secciones en la losa.....	141
Figura 7. 50 – Gráfico de momentos admisibles,.....	142
Figura 7. 51 – Deformaciones en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°4.	143

CAPITULO 8

Figura 8. 1 – Índice de reducción de volumen de hormigón para los diferentes modelos.	146
Figura 8. 2– Índice de reducción de acero para los diferentes modelos.	148
Figura 8. 3 - Influencia del diseño estructural en las cortantes para el estado limite último (ELU)	151
Figura 8. 4 – Influencia del diseño estructural en los momentos flectores para el estado limite último (ELU).	152
Figura 8. 5 – Influencia del diseño estructural en las flechas máximas para el estado límite de servicio (ELS)	153
Figura 8. 6 - Comparación de consumo de hormigón, acero y reducción de peso	154
Figura 8. 7 - Influencia del diseño estructural en las cortantes para el estado limite (ELU)	156
Figura 8. 8 – Influencia del diseño estructural en los momentos flectores para el estado limite último (ELU)	157
Figura 8. 9 – Influencia del diseño estructural en las flechas máximas para el estado límite de servicio (ELS)	158
Figura 8. 10 - Comparación de consumo de hormigón, acero y reducción de peso	159

LISTA DE TABLAS

CAPITULO 7

Tabla 7. 1 – Características geométricas de los modelos de losas aligeradas .91

Tabla 7. 2 – Características geométricas de los modelos de losas macizas92

Tabla 7. 3 – Características geométricas de los modelos de losas aligeradas .92

CAPITULO 8

Tabla 8. 1. – Consumo de Hormigón de los diferentes modelos.....145

Tabla 8. 2 – Consumo de Acero de los diferentes modelos.....147

Tabla 8. 3 – Características geométricas de los modelos de losas aligeradas149

Tabla 8. 4 – Resultados obtenidos en el modelo N° 1 para (ELU) y (ELS)150

Tabla 8. 5 - Resultados obtenidos del modelo N° 1 en cuanto a Hormigón, Acero y Peso Fuente: Elaboración propia154

Tabla 8. 6 – Detalles del modelo N° 2 Fuente: Elaboración Propia155

Tabla 8. 7 - Resultados obtenidos en el modelo N° 2 para (ELU) y (ELS)156

Tabla 8. 8- Resultados obtenidos del modelo N° 2 en cuanto a Hormigón, Acero y Peso Fuente: Elaboración propia.159

Tabla 8. 9– Detalles del modelo N° 3 Fuente: Elaboración Propia160

Tabla 8. 10 - Resultados obtenidos en el modelo N° 3 para (ELU) y (ELS)....	160
Tabla 8. 11 - Resultados obtenidos del modelo N° 3 en cuanto a Hormigón, Acero y Peso Fuente: Elaboración propia	164
Tabla 8. 12 – Detalles del modelo N° 4 Fuente: Elaboración Propia	165
Tabla 8. 13 - Resultados obtenidos en el modelo N° 4 para (ELU) y (ELS)....	165

CAPITULO 9

Tabla 9. 1 – Resumen de costo total para los diferentes modelos. 175	
Tabla 9. 2 – Consumo de hormigón y acero para las losas macizas con vigas.....	187
Tabla 9. 3- Presupuesto obtenidos del análisis con losas macizas y vigas. ...	187
Tabla 9. 4 – Consumo de hormigón y acero para las losas planas macizas...	188
Tabla 9. 5 - Presupuesto obtenido del análisis con losas planas macizas.....	188
Tabla 9. 6 – Consumo de hormigón y acero para las losas planas aligeradas con U-Boot.....	189
Tabla 9. 7 - Presupuesto obtenido del análisis con losas planas aligeradas. .	189
Tabla 9. 8 – Consumo de hormigón y acero para las losas macizas con vigas.....	193
Tabla 9. 9 - Presupuesto obtenido del análisis con losas planas aligeradas. .	193
Tabla 9. 10 – Consumo de hormigón y acero para las losas planas maciza. .	194
Tabla 9. 11 - Presupuesto obtenido del análisis con losas planas macizas	194

Tabla 9. 12 – Consumo de hormigón y acero para las losas planas aligeradas
con U-Boot.195

Tabla 9. 13 - Presupuesto obtenido del análisis con losas planas aligeradas.195

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

Con el aumento del conocimiento de propiedades de los materiales de construcción; la creciente demanda de sistemas constructivos especializados; la presencia cada día más fuerte de la industrialización de los procesos de fabricación de elementos estructurales y procesos constructivos, que provocan la disminución del tiempo de entrega de las obras y la reducción de personal, generando mayores utilidades. La industria de la construcción se ve obligada a ofrecer continuamente nuevos sistemas constructivos, adaptables a los requisitos económicos y estructurales de los potenciales clientes. Estos sistemas deben demostrar que son seguros para las personas a las cuales servirán y que cumplirán con eficiencia las funciones para las cuales fueron diseñados.

Una solución estructural válida y actualmente muy utilizada en Paraguay son las losas de hormigón armado aligeradas en este caso particular utilizando un encofrado de polipropileno reciclado (U-Boot) cuya principal ventaja frente al hormigón armado convencional es de reducir el consumo de materiales (hormigón y acero), y salvar mayores luces. Este sistema está siendo empleado en la construcción de edificios, de viviendas, oficinas y centros comerciales, permitiendo mayor área útil y mejor comportamiento de la estructura

Con el presente trabajo se busca conocer las pautas generales para conseguir el máximo aprovechamiento de las estructuras de losas aligeradas de manera a

conocer un patrón de comportamiento de dichas estructuras y que sea posible, para el calculista, utilizar siempre la combinación de variables más convenientes, tanto desde el punto de vista económico como constructivo, sin dejar de lado los criterios de seguridad y confort.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Realizar un análisis comparativo técnico-económico entre las losas macizas y las losa aligeradas con el sistema U-Boot.

1.1.2 Objetivo Especifico

- Realizar una comparación de los resultados de tensiones y deformaciones en los dos tipos de losas, teniendo en cuenta las dimensiones en planta, los espesores y las cargas.
- Determinar la eficiencia técnico-económica del sistema U-Boot en relación a la losa maciza.
- Realizar un comparativo económico con el fin de obtener resultados sobre las condiciones en las que el sistema U-Boot es más ventajoso que las losas macizas.

1.2. Planteamiento y Formulación del Problema

El hormigón armado tiene inconvenientes como: el excesivo peso propio y el gran costo de los encofrados y apuntalamientos. Por eso la necesidad de incorporar alternativas que mejoren estas necesidades.

En la evolución de la técnica de construcción con hormigón armado ha abierto nuevos caminos. El desarrollo dado por factores como la facilidad en el cálculo de las estructuras mediante la utilización de softwares, el aumento de calificación de los recursos humanos y los nuevos materiales, han sido factores que facilitan mejores diseños, rápida construcción y bajos costos de las estructuras de hormigón. Un caso, por ejemplo, del desarrollo de esta técnica de construcción queda reflejado en el empleo de un material versátil, ligero, aislante y amigable con el ambiente como él (U-Boot), utilizando ventajosamente como material de aligeramiento en losas de techos y entrepisos. Aplicando los reglamentos (EUROCODIGO) y códigos vigentes para el diseño de estructuras.

Tomando como base este problema de cargas, planteamos la aplicación de un nuevo método para el cálculo estructural de un tipo de losa que podría aminorar estos problemas que presentan las losas macizas.

1.3. Solución propuesta por el proyecto de investigación

Analizando la situación se observa que existe la necesidad de generar investigaciones sobre nuevos materiales de obra, capaces de facilitar el diseño y construcción de estructuras a pequeña y gran escala, con elementos de menor densidad que no comprometan las propiedades de resistencia y servicio.

Dentro de toda la gama de materiales constructivos de baja densidad muy pocos satisfacen resistencias requeridas para ser utilizados como elementos estructurales, más aún a niveles aceptables de costos y trabajabilidad.

Como solución a la problemática mencionada anteriormente el presente estudio pretende entregar información respecto del comportamiento y/o desempeño del polipropileno reciclado (U-Boot) como elemento aligerante en losas fabricadas con hormigón.

1.4. Justificación

El hormigón armado tiene un peso relativamente alto, 25 kN/m^3 , por lo que introducir elementos de aligeramiento resulta muy conveniente. Este objetivo de aligerar las losas se realiza tradicionalmente en nuestro medio introduciendo bloques de elemento aligerante para delimitar nervaduras, en una o dos direcciones de la losa. El aligeramiento mencionado a pesar que está conformada por una parte hueca es muy limitado, por cuanto son bloques de hormigón o de mortero. Por esta razón, el propósito de implementar una solución constructiva con U-Boot resulta una aplicación efectiva por sus cualidades como material a ser usado en Paraguay.

Al estudiar una nueva solución técnica-constructiva, lo importante es conocer ventajas económicas inducidas y las propiedades que se obtienen al utilizarlo.

1.5. Alcance

Los trabajos consistirán en realizar el cálculo estructural de losas de distintas luces utilizando losas macizas y aligeradas con un software de elementos finitos. Se procederá al cálculo estructural de las losas macizas y aligeradas para obtener los resultados y elaborar un análisis comparativo del comportamiento estructural y se determinará la solución más óptima teniendo las siguientes variantes:

- La separación de los nervios de los encofrados
- Tamaño de los encofrados
- Espesor de losa

Luego hacer el análisis y hallar la solución más óptima con las distintas variaciones y establecer pautas de diseño para losas aligeradas con el sistema U-Boot, esta se aplicara a una determinada estructura para poder hallar las ventajas que este sistema brinda al mundo de la construcción. Todos los sistemas se calcularan con el EUROCODIGO 2.

CAPITULO 2

SISTEMA DE LOSAS MACIZAS Y ALIGERADAS

2.1. El aligeramiento en la edificación

El objetivo principal del aligeramiento, es el de optimizar los recursos y reducir el coste económico de la construcción manteniendo las configuraciones funcionales, estéticas y de seguridad previstas.

El aligeramiento de losas permite reducir las dimensiones de los elementos que lo forman resistiendo, al mismo tiempo, las mismas acciones consideradas y reduciendo su coste económico. Pero ésta no es la única misión del aligeramiento de estructuras ya que también se consiguen una serie de ventajas tecnológicas en diversos aspectos como son:

En fase de diseño:

- El aligeramiento del peso propio de la losa produce deformaciones reducidas, consiguiendo disminuir el riesgo de lesiones en paredes y tabiquerías por causa de deformaciones de la losa.
- La reducción del peso propio permite reducir las cargas, lo que implica una reducción de armaduras de refuerzo en pilares, cimientos, que permite una optimización de secciones y de disminución de solicitaciones mecánicas.

En fase de ejecución:

- Se descartan los costos de transporte y manipulación mecánica.

Mejor comportamiento dinámico:

- Al reducir la masa de la estructura se reduce la deformación horizontal

2.2. Losas aligeradas

Las losas aligeradas comúnmente conocidas también como losas casetonadas o reticulares, son aquellas formadas por un reticulado de vigas las cuales se vinculan por medio de losas.

Losa casetonada es aquella que se realiza colocando entre los nervios estructurales casetones de madera, metálicos, poliestileno expandido o polipropileno reciclado (U-Boot) que sería nuestro caso, con el fin de reducir principalmente el peso de la estructura, y el refuerzo de acero.

Las losas aligeradas son más eficientes que las macizas, porque mediante ellas es posible obtener espesores mayores sin aumentar el volumen del concreto con respecto a una losa de mismo espesor y maciza.

Se podría decir que para cargas normales de vivienda u oficinas, las losas macizas son las más utilizadas para luces pequeñas, las aligeradas en una dirección son económicas en luces intermedias, y las aligeradas en dos direcciones resultan mejores para luces grandes.

El reticulado de vigas se obtiene con el empleo de encofrados que pueden ser cajas, bloques de isopor, esferas, etc. Estos bloques se colocan sobre el encofrado plano de fondo construido primeramente y distanciados unos de otros,

de tal forma a que con el vertido del hormigón se formen zonas macizas en los intermedios que son conocidos como los nervios y actúan como un enviguetado. Es necesario disponer la armadura necesaria en estas vigas intermedias y la losa.

2.2.1 Ventajas de losas aligeradas

La principal ventaja del sistema de losas empleando elementos aligerantes es el ahorro considerable de volumen de materiales (hormigón y acero) y por lo tanto una apreciable reducción del peso muerto de la estructura y su costo.

Otra ventaja es la posibilidad de que el número de columnas por planta disminuya, con lo cual es posible lograr mayor área o superficie útil y ajustarse mejor a la arquitectura.

2.2.2. Comportamiento estático según la dirección de los nervios

En los casetonados con nervios paralelos a sus bordes y separaciones superiores a los 80 cm. La transmisión de los momentos torsores de un nervio y otro es casi nulo, aumentando así los momentos de tramo. No sucede lo mismo si los nervios se ubicaran en dirección diagonal. Llamamos losa reticulada a la losa de hormigón armado aligerada, con nervios en dos direcciones perpendiculares. Este tipo de losa forma parte de la familia de la losa armada y en el ámbito de la edificación no suele presentar vigas acusadas, por lo que se considera dentro de las losas.

Para que una losa reticulada tenga consideración de placa debe cumplirse que la luz mínima sea mayor que cuatro veces el canto de la losa.

Este tipo de losa no dispone en general, de vigas para transmitir las cargas a los apoyos y descansan directamente sobre el soporte a través de ábacos con o sin capitel.

Los parámetros que definen las características de la losa plana son:

- La separación entre ejes de nervios
- El espesor básico de los nervios
- El canto total de la losa
- La altura de la parte aligerada

El ábaco es la zona no aligerada de la losa reticulada que transmite las acciones recibidas de los nervios al soporte.

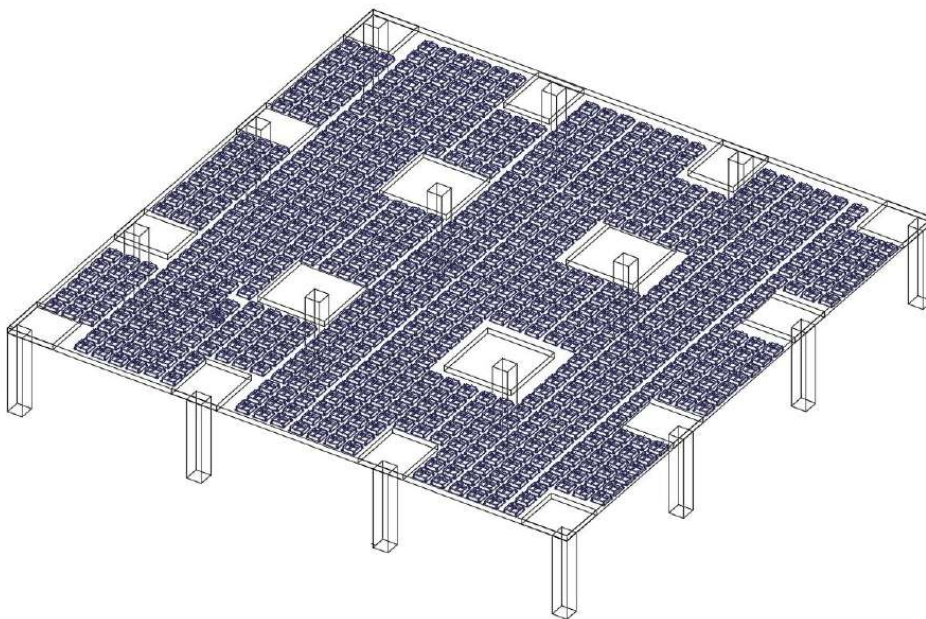


Figura 2. 1 - Losa aligerada con el sistema U-BOOT

Fuente: Elaboración propia

2.2.3. Pieza aligerante

A veces se tiende a pensar que existen una variedad importante de losas aligeradas ya que existen muchas patentes de moldes para el aligeramiento, que en sí mismas confieren aspectos y características que los diferencian, pero en realidad solo existen dos tipos de losas de hormigón armado aligeradas:

- Losas aligeradas con bloque perdido
 - Sin rotura de puente térmico
 - Con rotura de puente térmico
- Losas aligeradas con bloque recuperable

2.2.3. Nervios

Los nervios son los elementos encargados de transmitir las acciones a los soportes. La separación entre nervios puede ser variable, en función del diseño estructural y el diseño del casetón o molde, algunos fabricantes especifican la separación de nervios según las dimensiones del casetón. La instrucción EHE establece una separación máxima de 100 cm.

2.3.4. Capa de compresión

La instrucción EHE establece que las losas reticuladas deberán de disponer de una capa de compresión no inferior a 5cm y esta deberá de disponer de una armadura de reparto en malla.

CAPITULO 3

SISTEMAS DE LOSAS ALIGERADAS CON U-BOOT

3.1. U-Boot

U-Boot es un encofrado de polipropileno reciclado, estudiado para crear losas y soleras de hormigón armado aligeradas, un producto resistente y adaptable a soluciones. Sus propiedades como ser auto-extinguible y el aislamiento térmico y acústico logran que sea una buena opción para la construcción.

Gracias a la pata cónica elevadora, efectivamente, sumergiendo los encofrados U-Boot en la colada de hormigón, se obtiene un enrejado de vigas mutuamente ortogonales, cerradas inferior y superiormente por una losa plana, realizadas en secuencia y en una sola colada; todo esto con un ahorro notable de hormigón y de acero.

U-Boot permite realizar forjados de gran luz o capaces de soportar grandes cargas, sin vigas.

3.2. Finalidad

Creación de un forjado de gran luz con baja deformación, evitando las vigas fuera de espesor, pudiendo utilizar mejor los espacios para oficinas, estacionamientos, etc.

3.3. Principales ventajas del U-Boot

- Aligeramiento de la estructura
- Ahorro de hormigón
- Ausencia de estructuras rebajadas
- Estructura bidireccional

3.4. U-Boot en comparación a otros materiales aligerantes

El poliestireno, si bien se utiliza extensamente en el sector de la construcción por ser barato y elaborable, presenta muchos puntos desfavorables de los cuales últimamente se está ocupando la comunidad técnico-científica. Con referencia a los forjados aligerados, el D. M. italiano 16.02.2007, en el anexo D.5.1, establece que “En caso de aligerado en poliestireno o materiales afines, será necesario prever fugas adecuadas para los excesos de presión”. Antes incluso, la Norma UNI 9502, en el Art. 7.2.2, estableció que ***“En caso de elementos que engloben materiales que, a altas temperaturas, se conviertan en gas, es necesario predisponer fugas oportunas, en la dirección del lado expuesto al fuego, para evitar que la estanqueidad se vea comprometida por explosiones”***. El empleo de poliestireno en losas coladas en la obra, por lo tanto, implica la carga de prever purgas adecuadas en la cavidad, para contrastar la presión excesiva de los gases sublimados por el aligerado. De cualquier modo, en caso de incendio permanecería el problema de las fugas de gas tóxico (estireno) en las habitaciones. U-Boot, al ser de polipropileno, no es tóxico ni siquiera si arde y, además, el forjado no estalla por efecto de la salida de los gases en sobrepresión de las patas que hacen de válvula de seguridad. Además, pruebas efectuadas en el laboratorio CSI, han arrojado que, con un cubrehierro de 3,5 cm, la

estructura realizada con U-Boot es de clase REI 180. Otras ventajas de U-Boot con respecto al EPS están relacionadas con las dimensiones, los desplazamientos (en referencia exclusiva al desplazamiento en altura a los forjados emergentes) y a la conservación al aire libre. De hecho, el poliestireno es voluminoso, no se apila y es especialmente frágil en las zonas de contorno y en las aristas, donde se deshace, para dar origen al molesto fenómeno de las bolitas que, al cargarse estáticamente, se pegan a todo, sobre todo a las armaduras, lo que implica una gran dificultad de eliminación.

3.5. Compatibilidad con el medio ambiente

U-Boot demuestra su atención al respeto de la salud y del medio ambiente logrando ser la primera en obtener el Certificado de Compatibilidad Ambiental (CCA) para sus propios productos. La importancia de este Certificado para el U-Boot es destacable, ya que asegura: la ausencia de sustancias peligrosas en la composición, la ausencia de emisiones de sustancias tóxicas en las varias fases del ciclo de vida y de elaboración del producto, con consiguiente beneficio para la salud tanto de los usuarios intermedios (operarios de la producción pero también obreros colocadores), como de aquellos finales (personas que viven en el edificio) como en general para el medio ambiente.

3.6. Innovación tecnológica y Construcción

La innovación tecnológica en la construcción es sinónimo de la búsqueda e implementación de una nueva tecnología para mejorar la eficiencia de las funciones de cualquier sistema constructivo, proponiendo un mejor resultado. Para ello es fundamental desarrollar y utilizar sistemas que mejoren el rendimiento, o que se adecuen más a los trabajos sin un cambio tan radical. La implementación de nuevas tecnologías acordes a los tiempos actuales es

fundamental para estar en sintonía con las necesidades modernas, ya que el sector de la construcción es uno de los más reacios a la utilización de sistemas modernos de construcción. La estandarización, industrialización y automatización de los procesos, junto con una adecuada gestión interna, contribuyen también a un incremento de la productividad. Una construcción de calidad y segura es otro de los valores añadidos que surgen de la aplicación de procedimientos innovadores dentro del sector. Extender la cultura de la prevención, adecuar los equipos a los trabajadores, industrializar procesos que faciliten las tareas y prevengan accidentes es reducir las tasas de siniestralidad, y, por tanto, aumentar los beneficios. Además de los objetivos citados, también es importante aumentar la motivación de las personas por participar de la construcción. Crear sistemas inteligentes que permitan la interacción de los usuarios con las edificaciones e infraestructuras y conseguir el confort de los mismos, debe constituirse como uno de los principios claves a la hora de establecer un nuevo modelo de negocio. Por todo ello la innovación se revela como una estrategia empresarial capaz de generar importantes oportunidades de negocio y beneficios. **(Gonzalo Sánchez, 2015).**

3.7. Necesidad de innovación tecnológica en la construcción

La industria de la construcción está cada día más preocupada por elevar la productividad de los procesos de construcción. Es así que actualmente en nuestro país se están iniciando esfuerzos de investigación en ésta área. Dado que la tecnología de construcción se define como la combinación de los métodos constructivos, los materiales, equipos, el personal, los procesos constructivos y las diferentes interrelaciones que definen la manera como se realiza una determinada operación de construcción. Entonces es lógico considerar a la innovación tecnológica como uno de los medios potenciales para aumentar la

productividad en esta actividad. Además del aumento de productividad, el aumento en las exigencias de calidad y la creciente complejidad de los proyectos de construcción llevan también a considerar la innovación tecnológica como medio para enfrentar nuevos desafíos. Debido a esto, la necesidad de transformar a la construcción en una actividad más técnicamente eficiente aparece como preponderante. **(Bakens, 2000).**

3.8. Condiciones que favorecen la utilización de tecnología innovadora

Como se ha mencionado desde el principio el contexto socio económico que atraviesa el Paraguay en la actualidad presenta diversas condiciones favorables para el desarrollo, adaptación e introducción de tecnologías innovadoras en el sector de la construcción. Por el crecimiento sostenido, que se ha manifestado claramente en la construcción. Adicionalmente, se puede apreciar que la industria de la construcción en la actualidad enfrenta nuevos desafíos entre los que figuran, el incremento en la complejidad de los proyectos, mayores exigencias en la calidad, y la demanda por reducir los plazos de ejecución en los proyectos. A continuación, se analiza en más detalle las condiciones que favorecen la innovación en la construcción.

- **El mercado de la construcción:**

La existencia de un mercado estable es una condición altamente deseada para la innovación tecnológica. El hecho de contar con una estabilidad del mercado en la construcción y que esto se prevea como duradero a través de un cierto periodo de tiempo genera condiciones favorables para la incorporación de innovaciones tecnológicas.

- **Potencial de innovación tecnológica:**

Para que una innovación tecnológica se produzca, es obviamente necesario que exista dicha tecnología. En el caso de la construcción, este punto no es un problema mayor. La industria de la construcción se caracteriza por su bajo nivel tecnológico y, es más, podemos decir que la mayoría de los materiales empleados hace dos décadas son prácticamente los mismos que los utilizados en la actualidad. La baja utilización de tecnología de punta puede convertirse en una gran oportunidad. Existen una gran cantidad de fuentes de innovación tecnológica para los proyectos en edificaciones disponibles en el mercado, y que generalmente no implican cambios significativos en los procesos constructivos que se emplean en la actualidad.

- **Mano de obra en la construcción**

La mano de obra en la construcción es un problema creciente en nuestros días. Es más cara y poco o nada capacitada, además de ser cada día más escasa debido al crecimiento de la construcción en los últimos años. Sin embargo, sólo nos queda lograr aprovechar en forma óptima los recursos existentes, es decir, construir más con la misma cantidad de recursos y aumentando el rendimiento de la mano de obra haciendo más práctico los procesos constructivos. Por tanto no está demás, indicar que la innovación tecnológica es una importante fuente para incrementar la productividad con los mismos recursos.

- **El capital:**

La creciente inversión en proyectos privados y/o públicos son una fuente de desarrollo económico, que demuestra que se tiene la capacidad técnica y económica de implementar dentro de los proyectos de construcción, sistemas innovadores que eleven la eficiencia de como anteriormente se hacían las cosas.

- **Productividad en la construcción:**

La productividad representa la eficiencia con que se ejecutan las actividades que conforman el proyecto, es claro entonces que contar con sistemas innovadores refleja un incremento de los índices de productividad de la mano de obra, equipos y materiales. Son una alternativa para una mayor competitividad, disminución y cumplimiento de plazos de entrega, disminución de costos, uso eficiente de los recursos y de la mano de obra, eliminación de actividades innecesarias, reducción de plazos de ejecución y mejoramiento continuo del entorno de trabajo.

3.9. En obra

- **Velocidad de trabajo**

Contar con elementos aligerantes en obra hace posible que los trabajos se desarrollen con mayor velocidad al tener que integrar estos elementos con aquellos que necesariamente deben realizarse en obra.

- **Optimización de los tiempos de construcción**

Basada en la mecanización del trabajo y en una producción continua y constante que responda a un ritmo prefijado de elementos, es posible realizar las tareas en fases elementales. Esto hace posible un aumento de la productividad; un mayor aprovechamiento de las características de los materiales y una reducción del tiempo de construcción, que se traduce en ventajas económicas.

- **Eficiencia en controles de obra**

Las características principales de los elementos, obliga a desarrollar un conjunto de operaciones especializadas que repercuten en un mejor uso de herramientas y equipos. Esto hace que sea más fácil y eficiente el control de estos elementos en obra.

- **Precisión dimensional**

Al tratarse de elementos mecanizados producidos en planta, las dimensiones son casi exactas con pocos errores y variaciones, los cuales no son significantes una vez colocadas en obra.

3.10. Organización y planeación

- **Planeación financiera**

Es posible tener los costos iniciales utilizando losas aligeradas con U-Boot, estos costos son prácticamente fijos, por tal, el saldo de obra es más fácil el poder costear ya que está cuantificada. Además, es posible tener menor cantidad de desperdicio al usar estos encofrados, por consiguiente, menor costo de obra.

- **Control de materiales-optimización de recursos**

La cantidad de desperdicio disminuye sustancialmente, por lo que el control es más sencillo puesto que se tiene menos cantidad de materiales en la obra.

- **Mano de obra no especializada**

Prácticamente son necesarias menos personas y menos maquinaria en la obra. Las piezas ya puestas permiten que el impacto con el resto de la obra se minimice. Es sencillo el montaje de las piezas, por lo que no es necesario mano de obra calificada o especializada, solo es suficiente recibir una charla de capacitación para que logre mejorar las condiciones de trabajo.

- **Anular tiempos muertos**

Quedan reducidos los tiempos muertos, ya que, al trabajar con estos elementos, la velocidad de producción aumenta. Esto origina que los tiempos para la ejecución sean reducidos y las otras actividades deben ejecutarse al mismo ritmo, debido que prácticamente los tiempos muertos son nulos.

3.11. Aspectos a tener en cuenta

- **Planificación minuciosa**

Es indispensable que en los proyectos donde se incorporan sistemas de aligeramiento, los constructores planifiquen perfectamente las dimensiones,

peso y ubicación de instalaciones de cada elemento en función de los accesos (Graña y Montero, 2008).

- **Transporte y movimiento**

El volumen de las piezas no plantea complicaciones tanto en el transporte como en la puesta en obra, no precisa el uso de grúas para su colocación.

Todas estas ventajas pueden contribuir a abaratar los costos, pero no significa que la construcción con elementos aligerantes sea más barata que la construcción tradicional de losas. Ya que todo dependerá del control y de la gestión de los procesos productivos, algo que puede ser perfectamente factible en la construcción mediante otro tipo de sistemas constructivos

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN DE SISTEMAS DE LOSAS ALIGERADAS CON U-BOOT EN OBRAS DE EDIFICACIÓN

4.1. Losas aligeradas con U-Boot y su aplicación en grandes obras

Durante los últimos años, las losas aligeradas han tenido gran acogida en el diseño y construcción de estructuras de edificios de departamentos y del mismo modo en estructuras de uso comercial. Las losas aligeradas son utilizadas en edificios con grandes luces o entrepisos sin vigas.

En el exterior esta tecnología ya es utilizada hace muchos años, en estructuras de uso industrial, hospitales, edificios de estacionamientos, educativos, gubernamentales, etc.; debido a las grandes ventajas que este tipo de estructuras ofrece.

4.2. Vulcano Buono / Renzo Piano – Italia

Es un centro comercial diseñado por el arquitecto Renzo Piano en Nola, en la entrada de Nápoles, Italia contribuyó en la fase de diseño y construcción del centro comercial Vulcano Buono aplicando las bases, las pavimentaciones de hormigón y los revestimientos de resina internos y externos, así también para el aligeramiento de la estructura que la envuelve se utilizó el sistema U-Boot Beton.

Para la pavimentación de la galería se utilizó Basic Terrazzo, un revestimiento de resina resistente al tráfico peatonal y con un impacto estético agradable.

La continuidad del revestimiento de 22.000 m² brinda majestuosidad a las galerías comerciales, las cuales se desarrollan de manera circular, abrazando la plaza central con vidrieras muy luminosas.



Figura 4. 1 – Vista aérea del Vulcano Buono Shopping Center.

Fuente: IPM Italia. Página 12.



Figura 4. 2 – Etapa de Construcción del Vulcano Buono Shopping Center.

Fuente: Daliform- Galería Fotográfica. Página 7

4.3. Hospital Borgo Trento – Italia

Una superficie edificada de 80.000 m², 9 plantas de altura, 6 salas de operaciones, 7 estaciones de cuidados intensivos, 17 departamentos clínicos especializados, más de 1.000 habitaciones con espacio para más de 1.600 pacientes, salas de tratamiento y de reunión, cada una de las plantas fue construida con el sistema de losas aligeradas utilizando encofrados U-Boot.



Figura 4. 3 – Vista aérea del Hospital Borgo Trento.

Fuente: KNOPP Construcción. Página 1.

Figura 4. 4 – Etapa de Construcción del Hospital Borgo Trento.



Fuente: Daliform- Galería Fotográfica. Página 8

4.4 Proyecto Treviso Maggiore - Arquitecto Mario Botta

Es un edificio de dos estructuras con diez pisos sobre el nivel de entrada principal y tres abajo. Los salones, todas con vistas al centro de la ciudad sobre una base regular, son alrededor de 3,5 m de ancho, que permiten 7 metros de luz básicos de diseño estructural con una losa aligerada con el sistema U-Boot de 0,26 m. Esta solución general era muy conveniente, ya que permite una interacción sencilla con las instalaciones de los medios mecánicos del hotel. Por razones funcionales y arquitectónicas, en determinadas zonas eran necesarias de 10 a 12 metros de luz. En estos casos se pensó que sería mejor mantener la solución estructural general de una losa de espesor 0,26 m. En estas circunstancias, y para obtener el mismo nivel de serviciabilidad.



Figura 4. 5 – Vista frontal del Treviso Maggiore

Fuente: El Siglo de Torreón



Figura 4. 6 – Etapa de Construcción del Treviso Maggiore.

Fuente: Daliform- Galería Fotográfica. Página 10

CAPITULO 5

EUROCODIGO - CONSIDERACIONES PARA EL CALCULO DE LOSAS

PLANAS

5.1. Determinar la vida útil de diseño

Tabla 2.1
Vida útil de cálculo indicativa

Categoría de vida útil de cálculo	Vida útil de cálculo indicativa	Ejemplos
1	10	Estructuras temporales (1)
2	10 a 50	Partes de estructuras reemplazables, por ejemplo: vigas de rodadura, aparatos de apoyo
3	15 a 30	Estructuras agrícolas y similares
4	50	Estructuras de edificios y otras estructuras comunes
5	100	Estructuras de edificios monumentales, puentes y otras estructuras de ingeniería civil.
(1) Estructuras o partes de estructuras que puedan desmontarse con la intención de volver a usarse no deberían considerarse como estructuras temporales.		

Fuente: UNE-EN 1990 – Bases de Cálculo de Estructuras

5.2 Determinar que combinación de acciones se debe aplicar

El término combinaciones de carga se refiere a la disposición de acciones variables. (Por ejemplo, imposición y cargas de viento) para dar las fuerzas más onerosas en un miembro o estructura, estas se dan en el Eurocódigo 2. Para

estructuras de edificios Eurocódigo 2, Parte 1-1 permite cualquier de los siguientes conjuntos de disposiciones de carga que se utilizarán tanto para el estado límite Último y estado límite de Servicio.

Figura 5. 1 - Vanos alternos cargados

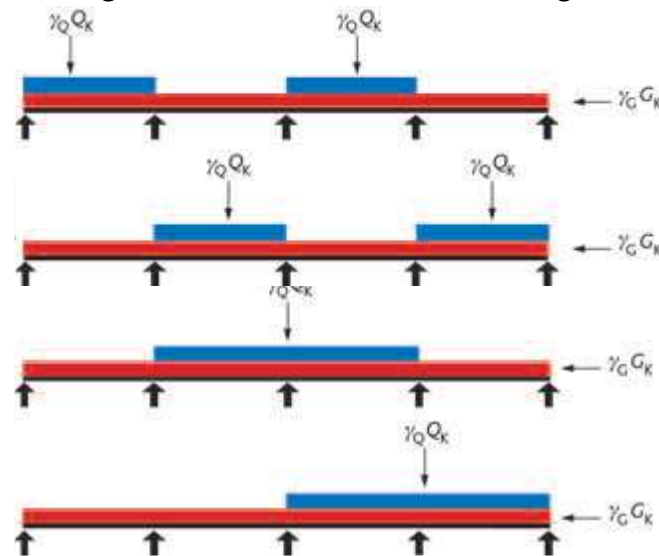


Figura 5. 2 - Vanos adyacentes cargados

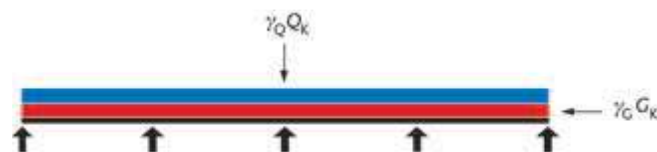


Figura 5. 3 - Todos los vanos cargados

Combinación de carga 1: Vanos alternos o adyacentes cargados

Los valores de diseño deben obtenerse de los más críticos de:

- En los vanos alternativos que transportan las cargas de diseño variable y permanente. Con otros vanos cargados solo con el diseño de carga permanente (ver Figura 1). El valor de γ_G debe ser el mismo en todo.
- Cualquiera de los dos vanos adyacentes que lleven la carga variable de diseño y Cargas permanentes con otros vanos cargados solo con el diseño. Carga permanente (ver figura 2). El valor de γ_G debería ser el igual a lo largo.

Combinaciones de carga 2: Todos o intervalos alternos cargados

Los valores de diseño deben obtenerse de los más críticos de:

- Todos los tramos que llevan las cargas de diseño variable y permanente.

(Ver Figura 3).

- Vanos alternativos que transportan las cargas de diseño variable y permanente. Con otros vanos cargados solo con el diseño de carga permanente (ver Figura 1). El valor de γ_G debe ser el mismo en todo.

En general, el conjunto de carga 2 se utilizará para vigas y losas, ya que requiere que se consideren tres arreglos de carga, mientras que el conjunto de carga 1 a menudo requerirá más de tres arreglos para ser evaluados.

Alternativamente, se hace la siguiente provisión para losas.

Combinaciones de carga 3. Arreglos simplificados para losas.

Las combinaciones de carga se pueden simplificar para losas donde solo es necesario tener en cuenta la disposición de todos los vanos cargados (ver Figura 3), siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- En una losa de una sola vía, el área de cada bahía excede los 30 m² (una bahía significa una franja en todo el ancho de una estructura delimitada en los otros lados por líneas de apoyo).
- La relación de las acciones variables (Q_k) a las acciones permanentes (G_k) No exceda de 1.25.
- La magnitud de las acciones variables excluyendo particiones no Superar los 5 kN / m².

5.2.1. Valores de los coeficientes ψ

Tabla A.1.1
Valores recomendados de los coeficientes ψ para edificios

Acción	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecargas en edificios, categoría (véase la Norma EN 1991-1-1)			
Categoría A: zonas residenciales, domésticas	0,7	0,5	0,3
Categoría B: zonas de oficinas	0,7	0,5	0,3
Categoría C: zonas de reunión	0,7	0,7	0,6
Categoría D: zonas comerciales	0,7	0,7	0,6
Categoría E: zonas de almacenamiento	1,0	0,9	0,8
Categoría F: zona de tráfico, peso del vehículo ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Categoría G: zona de tráfico, $30 \text{ kN} < \text{peso del vehículo} \leq 160 \text{ kN}$	0,7	0,5	0,3
Categoría H: cubiertas	0	0	0
Cargas de nieve en edificios (véase la Norma EN 1991-1-3)*			
Finlandia, Islandia, Noruega, Suecia	0,70	0,50	0,20
Resto de los Estados miembro del CEN, para sitios localizados a alturas $H > 1\,000$ m sobre el nivel del mar	0,70	0,50	0,20
Resto de los Estados miembro del CEN, para sitios localizados a alturas $H \leq 1\,000$ m sobre el nivel del mar	0,50	0,20	0
Cargas de viento en edificios (véase la Norma EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperatura (no la debida a incendio) en edificios (véase la Norma EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
NOTA – Los valores de ψ pueden establecerse mediante los anexos nacionales.			
* Para los países que no se citan, véanse las condiciones locales correspondientes			

Fuente: UNE-EN 1990 – Bases de Cálculo de Estructuras

5.2.2. Valores de cálculo de las acciones en situaciones de proyecto permanentes y transitorias

Tabla A.1.2(B)
Valores de cálculo de las acciones (SIR/GEO) (Conjunto B)

Situaciones de proyecto permanentes y transitorias	Acciones permanentes		Acción variable predominante	Acciones variables (*) de acompañamiento		Situaciones de proyecto permanentes y transitorias	Acciones permanentes		Acción variable (*) predominante	Acciones variables (*) de acompañamiento	
	Desfavorables	Favorables		Principal (si hubiera alguna)	Otras		Desfavorables	Favorables		Principal	Otras
Ec. 6.10	$\gamma_{G, sup} G_{k, sup}$	$\gamma_{G, inf} G_{k, inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$	Ec. 6.10a	$\gamma_{G, sup} G_{k, sup}$	$\gamma_{G, inf} G_{k, inf}$		$\gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
						Ec. 6.10b	$\xi \gamma_{G, sup} G_{k, sup}$	$\gamma_{G, inf} G_{k, inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

(*) Las acciones variables son aquellas tomadas en consideración en la tabla A.1.1

NOTA 1 – La elección entre 6.10, ó 6.10a y 6.10b se hará en el anexo nacional. En el caso de 6.10a y 6.10b, el anexo nacional puede además modificar 6.10a para incluir únicamente acciones permanentes.

NOTA 2 – Los valores γ y ξ pueden establecerse en el anexo nacional. Se recomiendan los siguientes valores para γ y ξ cuando se empleen las expresiones 6.10, ó 6.10a y 6.10b.

$\gamma_{G, sup} = 1,35$

$\gamma_{G, inf} = 1,00$

$\gamma_{Q,1} = 1,50$ cuando sea desfavorable (0 cuando sea favorable)

$\gamma_{Q,i} = 1,50$ cuando sea desfavorable (0 cuando sea favorable)

$\xi = 0,85$ (de forma que $\xi \gamma_{G, sup} = 0,85 \times 1,35 \approx 1,15$)

Véase también las Normas EN 1991, hasta EN 1999 para los valores γ a emplear para deformaciones exteriores.

NOTA 3 – Los valores característicos de todas las acciones permanentes del mismo origen se multiplican por $\gamma_{G, sup}$ si el efecto de la acción total que resulte es desfavorable, y $\gamma_{G, inf}$ si el efecto de la acción total que resulte es favorable. Por ejemplo, todas las acciones derivadas del peso propio de la estructura pueden considerarse como procedentes de un mismo origen; esto es también aplicable si afecta a diferentes materiales.

NOTA 4 – Para casos concretos de verificaciones, los valores de γ_0 y γ_1 pueden subdividirse en γ_0 y γ_1 y el coeficiente $\gamma_{0,1}$ del modelo de incertidumbre. Un valor de $\gamma_{0,1}$ en el rango de 1,05 y 1,15 puede emplearse en la mayoría de los casos comunes y puede modificarse en el anexo nacional.

Fuente: UNE-EN 1990 – Bases de Cálculo de Estructuras

5.2.3. Durabilidad y recubrimiento de la armadura

El recubrimiento nominal se puede evaluar de la siguiente manera:

$$C_{min} + \Delta C_{dev} \quad (\text{Ec 4.1) Eurocodigo 2}$$

Donde Cmin debe configurarse para satisfacer los requisitos a continuación:

- Transmisión segura de las fuerzas de enlace
- Durabilidad
- Resistencia al fuego

Y ΔC_{dev} es una asignación que debe hacerse en el diseño para desviaciones de recubrimiento mínimo. Debe tomarse como 10 mm, a menos que la fabricación (es decir, la construcción) esté sujeta a un control de calidad o sistema, en cuyo caso está permitido reducir ΔC_{dev} a 5 mm.

5.3. Estados Límite Últimos (ELU)

5.3.1. Coeficientes para la obtención del valor de cálculo de la resistencia a cortante

Se adoptan los valores recomendados para los siguientes coeficientes:

$$C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_c,$$

$$k_1 = 0,15$$

Además, se tomará $v_{min} = \frac{0,075}{\gamma_c} k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$, donde f_{ck} no será mayor de 60 MPa.

5.3.2 Coeficiente de reducción de la resistencia del hormigón fisurado a efectos de la determinación del cortante de cálculo en elementos que no necesitan armadura de cortante.

Se adopta el valor recomendado

$$v = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$$

5.3.3. Limitación del ángulo de inclinación de las bielas de compresión

Se adopta $0,5 \leq \cotg \theta \leq 2,0$.

El ángulo considerado en la limitación es de 26,6°, de manera que se garantice el correcto desarrollo de los campos de deformaciones de tracción y compresión. La adopción de un criterio simétrico permite aumentar la

inclinación de la biela hasta 63,4° respecto al eje longitudinal del elemento, lo que puede resultar beneficioso en ciertos casos particulares, como por ejemplo, en elementos sometidos a esfuerzos axiales de tracción.

5.3.4. Coeficientes para la obtención de la capacidad a cortante en piezas con armadura de cortante

Se adopta el valor recomendado:

$$v_1 = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$$

Si el valor de cálculo de la armadura de cortante es menor que 0,8.fyk, se puede tomar.

$$v_1 = 0,6 \quad , \text{ para } f_{ck} \leq 60 \text{ MPa}$$

$$v_1 = 0,9 - \frac{f_{ck}}{200} > 0,5 \quad , \text{ para } f_{ck} \geq 60 \text{ MPa}$$

Además, se adoptan los siguientes valores recomendados:

$$\begin{aligned}\alpha_{cw} &= 1,00 && \text{, para estructuras no pretensadas,} \\ \alpha_{cw} &= 1 + \sigma_{cp}/f_{cd} && \text{, para } 0 \leq \sigma_{cp} \leq 0,25f_{cd} \\ \alpha_{cw} &= 1,25 && \text{, para } 0,25f_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq 0,50f_{cd} \\ \alpha_{cw} &= 2,5 \cdot (1 + \sigma_{cp}/f_{cd}) && \text{, para } 0,50f_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq 1,00f_{cd}\end{aligned}$$

5.3.5. Limitación del ángulo de inclinación de las bielas para la comprobación del cortante entre alas y alma de secciones en T.

Se adoptan los valores recomendados:

$$1,00 \leq \cotg\theta_f \leq 2,00 \text{ para alas comprimidas}$$

$$1,00 \leq \cotg\theta_f \leq 1,25 \text{ para alas traccionadas}$$

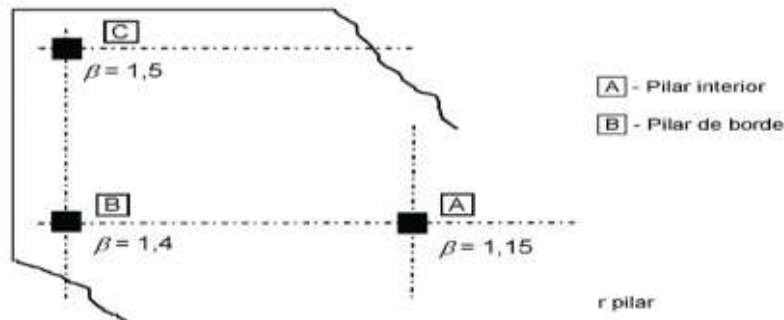
5.3.6. Coeficiente para valorar la necesidad de armadura adicional a la de flexión en en el caso de cortante entre alas y almas de secciones en T

Se adopta el valor recomendado $k=0,4$

5.3.7. Coeficiente para valorar la tensión máxima a punzonamiento

Se adoptan los valores recomendados y recogidos en la Figura AN1/(Figura 6.21N).

Figura AN/1 (Figura 6.21N) Valores de β para valorar la tensión máxima de punzonamiento



5.3.8. Coeficientes para obtener la resistencia de cálculo a cortante debido al punzonamiento

Se adoptan los valores recomendados

$$C_{rd,c} = 0,18/\gamma_{c1}$$

$$k_1 = 0,1$$

Además, se tomará $v_{min} = \frac{0,075}{\gamma_c} k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$, donde f_{ck} no será mayor de 60 MPa.

5.3.9. Limitación de la armadura de punzonamiento

Se adopta el valor recomendado $V_{rd,max} = 0,5 \cdot f_{cd}$

5.3.10 Coeficiente para la determinación de la distancia del perímetro más exterior de la armadura de punzonamiento respecto al perímetro crítico

Se adopta el valor $k=2$.

5.3.11 Coeficiente para calcular la disminución de la resistencia de cálculo del hormigón en la aplicación de modelos de bielas y tirantes

Se adoptan los siguientes valores: cuando exista suficiente armadura transversal eficazmente anclada y que controle la abertura de las fisuras:

$$v' = 1,0 - \frac{f_{ck}}{200}$$

Cuando las fisuras atravesadas por las bielas son de gran espesor o cuando las bielas atraviesan zonas de tracción directa, p.e. alas traccionadas, se tomará el siguiente valor:

$$v' = \frac{2}{3} \left(1,0 - \frac{f_{ck}}{200} \right)$$

5.4. Estados Límite de Servicio (ELS)

5.4.1. Coeficiente de limitación de la tensión de compresión en ambientes XD, XF y XS

Se adopta el valor recomendado $k_1=0,60$.

5.4.1. Coeficiente de limitación de la tensión en el hormigón para considerar una fluencia lineal.

Se adopta el valor recomendado $k_2=0,45$.

5.4.2. Coeficientes de limitación tensional para asumir que se evitan fisuraciones o deformaciones inaceptables

Se adoptan los valores recomendados $k_3=0,80$, $k_4=1,00$ y $k_5=0,75$.

5.4.3. Valores límite de la abertura de fisura

Se adoptan los valores indicados en la siguiente tabla AN/9.

Tabla AN/9 (Tabla 7.1N). Abertura máxima de la fisura

Clase de exposición	$w_{\max}$ [mm]	
	Hormigón armado (para la combinación cuasipermanente de acciones)	Hormigón pretensado (para la combinación frecuente de acciones)
X0 ⁽²⁾ , XC1 ⁽⁴⁾	0,4	0,2
XC1 ⁽⁴⁾ , XC2, XC3, XF1, XF3, XC4	0,3	0,2 ⁽¹⁾
XS1, XS2, XD1, XD2, XD3, XF2, XF4, XA1 ⁽³⁾	0,2	Descompresión
XS3, XA2 ⁽³⁾ , XA3 ⁽³⁾	0,1	

(1) Adicionalmente deberá comprobarse que las armaduras activas se encuentran en la zona comprimida de la sección, bajo la combinación cuasipermanente de acciones.

(2) Para las clases de exposición XO y XC1, la abertura de fisura no influye normalmente en la durabilidad. Los valores recogidos en la tabla para estos casos se establecen para garantizar un aspecto aceptable.

(3) La limitación relativa a las clases XA 1, XA2 y XA3 sólo será de aplicación en el caso de que el ataque químico pueda afectar a la armadura. En otros casos, se aplicará la limitación correspondiente a la clase general correspondiente.

(4) La definición de la clase XC1 recogida en el Eurocódigo se corresponde parcialmente con las clases I y IIa definidas en la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, por lo que el Autor del proyecto aplicará la limitación menos exigente de la apertura de fisura recogida en la segunda fila de la tabla, sólo cuando se trate de elementos interiores de edificios protegidos de la intemperie.

5.4.4. Coeficientes para la estimación de la separación entre fisuras

Se adoptan los valores recomendados $k_3 = 3,4$ y $k_4 = 0,425$.

5.4.5. Coeficiente de tipología estructural para el cálculo de la relación canto/luz que permite asumir directamente el cumplimiento de los límites de flecha de los puntos 7.4.1 (4) y 7.4.1 (5).

Se adoptan los valores recomendados recogidos en la tabla 7.4N Relaciones básicas luz/canto para elementos de hormigón armado sin esfuerzo axial de compresión, de UNE-EN 1992-1-1.

7.4.1 (4). La apariencia y la utilidad general de la estructura se podrían descifrar cuando el pandeo de una viga, losa o voladizo sometido a cargas cuasi permanentes supera el rango $L / 250$. El hundimiento se evalúa en relación a los soportes. Se puede usar la precarga para compensar para algunos o toda la

desviación, pero cualquier desviación ascendente incorporada en el encofrado generalmente no debe exceder el $L / 250$.

7.4.1 (5). Las desviaciones que podrían dañar las partes adyacentes de la estructura deben ser limitadas. Para la deflexión después de la construcción, $L / 500$ es normalmente un límite apropiado para cuasi permanentes cargas. Se pueden considerar otros límites, dependiendo de la sensibilidad de las partes adyacentes.

5.5. Detalles constructivos de elementos y reglas particulares

5.5.1. Separación máxima entre armaduras de flexión en losas

Se adoptan los siguientes valores

$$s_{\max, \text{losas}} < 300 \text{ mm}$$

$s_{\max, \text{losas}} < \text{tres veces el espesor bruto de la parte de la sección del elemento, alma o alas, en las que vayan situadas.}$

CAPÍTULO 6

METODO DE ELEMENTOS FINITOS

6.1. Conceptos básicos del método de los elementos finitos

Muchos problemas de importancia práctica que frecuentemente aparecen en ingeniería, resultan de una complejidad matemática tal que, aunque la deducción de las ecuaciones diferenciales que gobiernan tales problemas no resulta muy difícil, su solución por métodos exactos de análisis, aun después de introducir algunas hipótesis simplificadoras, no se logra si no para ciertos problemas de geometría, condiciones de contorno y/o sistemas de carga muy particulares. Por esto, aunque este tipo de solución es la que más información proporciona sobre el comportamiento de las variables involucradas en un problema dado, se debe recurrir a los métodos numéricos, los cuales permiten elaborar análisis y diseños con un alto grado de sofisticación y precisión.

Los métodos de los elementos finitos, de diferencias finitas, de volumen de control y de contorno, son apenas algunos, entre una gran gama de métodos numéricos que se han venido desarrollando y usando exitosamente, en la solución de muchos problemas en distintas áreas de la ciencia. Aun cuando todos estos métodos constituyen una muy poderosa herramienta matemática, no dejan de ser métodos aproximados, debiéndose tener por lo tanto un especial cuidado en su utilización, ya que la calidad de las soluciones que se obtengan depende de varios factores, entre los cuales se pueden destacar la distribución

de la desratización espacial de la región en estudio, el tipo de desratización en el tiempo en los problemas no permanentes, la aplicación apropiada de las condiciones de contorno, la correcta inclusión en el modelo de las propiedades físicas de los materiales que intervienen en el problema, etc. El correcto posicionamiento de estos aspectos requiere del sentido común y alguna experiencia del analista, independientemente del método seleccionado.

Visto globalmente, la solución numérica de un problema dado se puede esquematizar tal como se muestra en la Figura 6.1. El sistema real del problema a resolver, se transforma en un modelo matemático, mediante la inclusión de los principios físicos y de conservación que rigen el mismo, la ciencia de los materiales, hipótesis consideradas, etc., asociados al problema a resolver. Una vez logrado el modelo matemático, mediante la inclusión de los principios físicos y de conservación que rigen el mismo, la ciencia de los materiales, hipótesis consideradas, etc., asociados al problema a resolver. Una vez logrado el modelo matemático y antes de obtener la solución aproximada deseada, dicho modelo debe ser verificado, cotejando su respuesta en situaciones más restringidas, de las cuales se puede conocer la solución exacta, bien sea etapa de prueba, el modelo matemático propuesto podrá ser discretizado, a través de alguna técnica del modelo ya discreto.

Entre las técnicas numéricas ya mencionadas, una de las que más se ha destacado desde hace aproximadamente cuarenta años, por tanto su capacidad para modelar dominios irregulares, condiciones de contorno, no-linealidades (geométricas y/o mecánicas), y/o sistemas de cargas complejos (características que aparecen en la gran mayoría de los problemas de interés práctico), como por la facilidad en la selección del mecanismo de aproximación de las variables involucradas en un problema específico, es el Método de los Elementos Finitos (MEF).

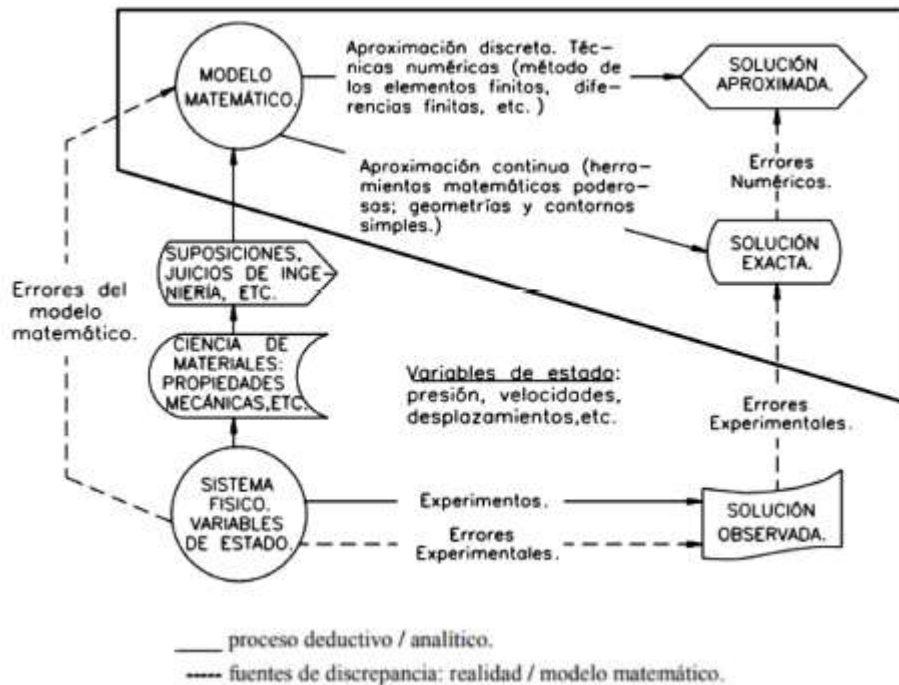


Figura 6.1- Diagrama esquemático del modelaje matemático de un problema.

Fuente: Introducción al Método del Elemento Finito (MEF) Ing. Joel Ontiveros Aguilar

6.2. Antecedentes Históricos

La idea de representar un dominio mediante un conjunto de elementos discretos, no aparece con el MEF. En efecto, los antiguos matemáticos usaban “elementos finitos” para predecir el valor de π en forma bastante aproximada. Dicha aproximación la realizaban limitando un círculo con polígonos (inscritos o circunscritos), de tal modo que los segmentos de rectas (elementos finitos), aproximasen la circunferencia del círculo.

De este modo, ellos estaban en capacidad de obtener estimaciones muy exactas del valor de π (casi cuarenta dígitos).

Arquímedes (287 a.C.) usó las mismas ideas para determinar áreas de figuras planas y volúmenes de sólidos, aunque, por supuesto, no tenía el conocimiento del procedimiento de límite. Realmente, fue solo este desconocimiento lo que impidió que Arquímedes descubriera el cálculo de la integral alrededor de dos mil años antes que lo hicieran Newton y Leibniz. Es importante entonces destacar que, mientras la mayoría de los problemas de la matemática aplicada están descritos en términos de ecuaciones diferenciales, la solución de éstas mediante el MEF, utiliza ideas que son, en mucho, más viejas que las usadas para establecerlas.

Muchos han sido los investigadores, tanto en el área de la ingeniería, como en el área de la mecánica aplicada que han participado en el estudio del MEF. En 1909, Ritz desarrolló un método muy poderoso con el cual se puede obtener soluciones aproximadas, de problemas asociados al campo de la mecánica del continuo. En este método, se asume la “forma” de las incógnitas involucradas en el problema, en términos de unas funciones de aproximación conocidas y unos parámetros a determinar. La introducción de estas funciones en el funcional que describe el problema en estudio, y

su posterior diferenciación con respecto a los referidos parámetros, produce una ecuación la cual es igualada a cero. Si existe n parámetros desconocidos, se formará un sistema de n ecuaciones simultáneas. La solución de dicho sistema permite determinar dichos parámetros y, por lo tanto, obtener la solución aproximada del problema. Este método es similar a la estimación de los parámetros de ajuste en los problemas de mínimos cuadrados. La limitación más severa del método de Ritz, está en el hecho que las funciones de aproximación, deben verificar las condiciones de contorno especificadas en el problema de estudio, lo cual restringe la aplicación del método a aquellos problemas con dominios de forma geométrica relativamente simples.

En 1943, Courant hizo una muy significativa extensión del método de Ritz introduciendo funciones seccionalmente continuas, definidas sobre áreas triangulares, lo cual, conjuntamente con el principio de mínima energía potencial, le permitió estudiar los problemas de torsión. En estos problemas, las incógnitas se seleccionaron de tal modo que fueran iguales a los valores de las funciones, en los puntos de interconexión de las áreas triangulares. Por otro lado, la limitación del método de Ritz fue eliminada ya que las condiciones de contorno satisfacen, ahora, en un número finito de puntos sobre el contorno.

El método de Ritz, tal como fue usado por Courant, es idéntico al MEF el cual fue presentado unos años después por Clough, a partir de ideas diferentes. En efecto, en 1960, Clough introdujo, por primera vez, el término elemento finito, en su trabajo “The Finite Element Method in Plane Stress Analysis”. En este trabajo se presentó el MEF como una extensión de las técnicas de análisis estructural, en la solución de problemas de la mecánica del continuo.

La razón por la cual el MEF tuvo una acogida, casi inmediata en el 1960, está asociada al gran desarrollo, casi simultáneo, del computador digital, mediante el cual se logra efectuar la gran cantidad de operaciones que el MEF demanda, en forma rápida y precisa; en 1943 Courant no contaba con esta poderosa herramienta de cálculo.

A mediados de los años 60 los investigadores, tanto en el campo de la mecánica del continuo, como del análisis estructural, supieron reconocer que la extensión del método de Ritz propuesta por Courant y el MEF son, en esencia, idénticos. Este hecho trajo como consecuencia, en los siguientes años, un progreso impresionante de este método.

Desde entonces el MEF se aplica, con éxito, en problemas tridimensionales, en problemas no lineales (geométricos y/o físicos), en problemas no permanentes,

y en problemas de muchas otras áreas distintas al análisis estructural tal como, flujo de fluidos, transferencia de calor, análisis de campos eléctricos y magnéticos, robótica, ciencias médicas, etc.

6.3. Etapas básicas en la utilización del método de los elementos finitos

Independientemente de la naturaleza física del problema, el análisis del mismo mediante el MEF sigue los siguientes pasos:

1. Definición del problema y su dominio
2. Discretización del dominio
3. Identificación de la(s) variable(s) de estado.
4. Formulación del problema
5. Establecimiento de los sistemas de transferencia
6. Construcción de las funciones de aproximación de los elementos
7. Determinación de las ecuaciones a nivel de cada elemento
8. Transformación de coordenadas
9. Ensamblaje de las ecuaciones de los elementos
10. Introducción de las condiciones de contorno
11. Solución del conjunto de ecuaciones simultáneas resultante
12. Interpretación de los resultados

6.4. Definición del problema y su dominio

El análisis de un problema dado vía el MEF, tiene implícito tres tipos de aproximación. La primera se relaciona con la definición del dominio (física y geométrica) del problema, las otras dos están asociadas a la discretización de las ecuaciones gobernantes, y a los algoritmos empleados en la solución del sistema de ecuaciones algebraicas simultáneas resultante.

Las aproximaciones usadas en la definición de las características físicas de las diferentes regiones de dominio, depende fundamentalmente del tipo de problema a resolver. Sin embargo, la definición geométrica del dominio, requiere el establecimiento de ejes coordenados globales en referencia a los cuales se describen las coordenadas de ciertos puntos (nodos), los cuales, a su vez, definen las ecuaciones de las líneas, superficies y/o volumen de los elementos. Este sistema coordenado no necesita ser rectangular y cartesiano, para algunos problemas específicos, resulta más adecuado utilizar algún tipo de sistema coordenado curvilíneo.

El dominio puede ser limitado o no (ciertos dominios se extienden hasta el infinito). Para regiones limitadas del dominio, la idealización se realiza mediante elementos finitos y para las partes de la región ilimitadas, se usan elementos infinitos o elementos de contorno. Muchas veces el dominio entero está constituido de subdominios, como el caso de problemas de interacción. Las condiciones de interfaz entre subdominios deben ser definidas, también, a priori de la discretización.

6.5 Discretización del dominio

Puesto que usualmente el problema está definido sobre un dominio continuo, las ecuaciones gobernantes de un problema, con excepción de las condiciones de

contorno, son válidas tanto en todo el dominio como en cualquier parte de él. Esto permite idealizar el dominio a través de regiones de tamaño finito (elementos), interconectados de diferente forma y tamaño, tal como se muestra en la Figura 10.2. Esta forma de discretización introduce ciertas aproximaciones. Sin embargo, colocando un número suficiente de elementos (o elementos de orden superior), se podrá reproducir el dominio aproximadamente cuanto queramos.

Aun cuando es cierto que, en general, reduciendo el tamaño de los elementos se obtienen mejores resultados, también es cierto que un refinamiento excesivo conduce a grandes sistemas de ecuaciones, lo cual puede tornarse impráctico desde el punto de vista computacional. De tal modo que, inicialmente, se debe entonces responder la siguiente pregunta: “¿Cuál es el tipo de elemento más eficiente y cuál será el tamaño adecuado? Una respuesta parcial a esta pregunta viene dada en la literatura bajo la palabra clave de modelaje. Algunas técnicas relevantes en la discretización del dominio son los procesos adaptivos o refinamientos de mallas y generación automática de mallas.

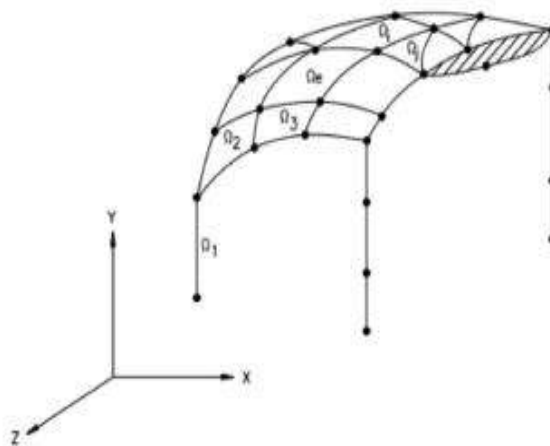


Figura 6.2 - Discretización del dominio con diferentes elementos finitos. **Fuente:** Introducción al Método del Elemento Finito (MEF) - Ing. Joel Ontiveros Aguilar.

6.6. Identificación de la(s) variable(s) de estado

Hasta el momento no se ha hecho referencia a la naturaleza física del problema ya que las etapas anteriores son comunes a cualquier tipo de problema, ya sea éste de transferencia de calor, de la mecánica de los fluidos, de la mecánica de los sólidos, etc.

A continuación, y para cada problema en particular, la descripción matemática del fenómeno físico conducirá al correspondiente problema de valor de contorno, el cual contendrá las variables de estado asociadas al mismo. Estas variables se relacionarán entre sí a través de las ecuaciones constitutivas, las cuales representan una expresión matemática de una ley física en particular.

6.7. Formulación del problema

Frecuentemente, un problema físico está formulado a través de un conjunto de ecuaciones diferenciales con sus correspondientes condiciones de contorno, o mediante una ecuación integral (un funcional) sujeto a un requerimiento estacionario (máximo o mínimo). En el primer caso se dice que el problema físico está referido a su forma diferencial y en el segundo, a su forma variacional. En ambos casos se llega al mismo resultado. En este texto se presentarán las dos formulaciones como forma de establecerlas ecuaciones de los elementos.

6.8. Establecimiento de los sistemas de referencia

Además de los ejes globales de referencia del sistema completo, existen dos importantes razones para seleccionar, adicionalmente, un sistema de referencia local para los elementos: la facilidad con la que se construyen las llamadas funciones de forma de los elementos y la facilidad con la que se integra en el interior de los mismos, con respecto al sistema local de cada elemento en

particular. Sin embargo, puesto que los elementos se ensamblan en el sistema global de referencia, este paso introduce una transformación de coordenadas.

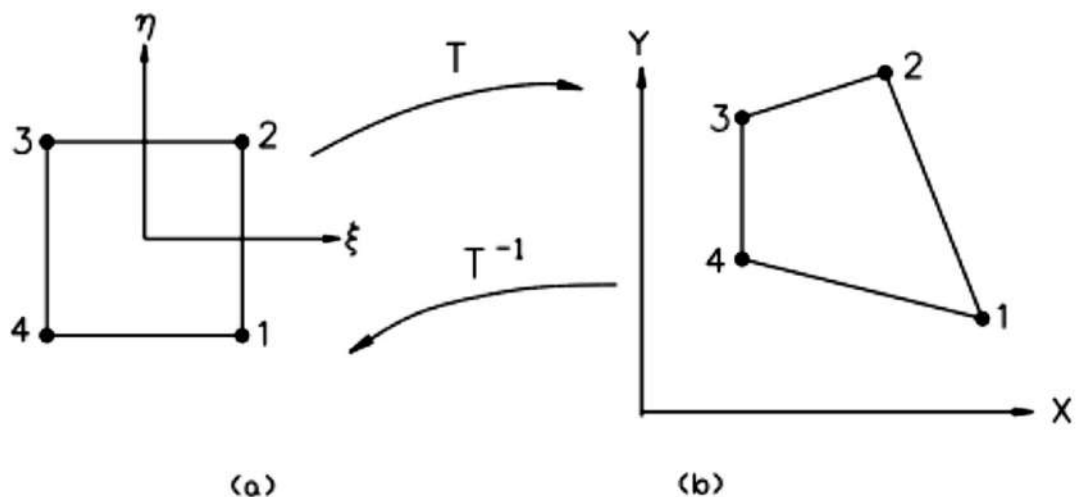


Figura 6.3 - Sistemas de referencia usados en el método de los elementos finitos. (a) Sistema local de referencia; (b) Sistema global de referencia. **Fuente:** Introducción al Método del Elemento Finito (MEF) - Ing. Joel Ontiveros Aguilar

6.9. Construcción de las funciones de aproximación de los elementos

Una vez que se han seleccionado el sistema coordenado local y la(s) variable(s) de estado, éstas pueden ser aproximadas de diferentes formas. En el MEF, la aproximación tanto del dominio del problema como de las variables involucradas en el mismo, se realiza mediante funciones algebraicas. Si el elemento es plano o de lados rectos, las coordenadas de los nodos primarios (los que están localizados en los extremos de los elementos), definirán la forma exacta del

mismo. Debido a esto, la discretización del dominio muchas veces se realiza mediante elementos de lados rectos. Sin embargo, para algunos problemas estos elementos (p.e, elementos planos utilizados en la discretización de cáscaras), pueden producir errores inaceptables y la discretización debe ser realizada con elementos de orden superior, como los que se muestran en la figura. Un argumento similar es válido para la aproximación de la(s) variable(s) de estado.

Estas pueden aproximarse mediante una función lineal o a través de funciones de orden superior. El analista debe decidir si la aproximación física (variable(s) de estado) y la aproximación geométrica (forma del elemento), tendrán el mismo orden, o si por el contrario dará preferencia a una sobre la otra en todo el dominio, o en alguna parte del mismo. Esto conduce a tres diferentes categorías de elementos. Si m y n representan dos grados de aproximación distintos para la forma de los elementos y para la(s) variable(s) de estado, respectivamente, se dice que un elemento es: (a) subparamétrico si m es menor que n ; (b) isoparamétrico si $m=n$; (c) superparamétrico si m mayor a n . La Figura 6.4 muestra ejemplos de estas tres categorías de elementos.

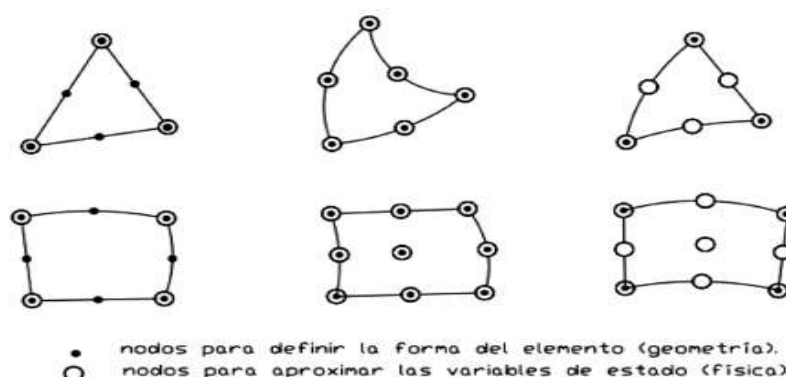


Figura 6.4 - Ejemplos de elementos finitos subparamétricos, isoparamétricos y superparamétricos. **Fuente:** Introducción al Método del Elemento Finito (MEF) – Ing. Joel Ontiveros Aguilar.

6.10. Determinación de las ecuaciones a nivel de cada elemento

A esta altura del modelaje del problema se ha completado. Usando algún modelo matemático (método de residuos pesados, trabajo virtual, métodos de energía, etc.), se debe establecer, a continuación, sobre cada elemento, las ecuaciones discretas del problema continuo. Este paso involucra la determinación de la llamada matriz de rigidez de cada elemento con respecto a su sistema local de referencia. Esta matriz relaciona, por ejemplo, en el caso de un problema de mecánica de sólidos, los desplazamientos nodales con las fuerzas nodales o, en el caso de un problema de conducción de calor, la temperatura con el flujo de calor. Este paso involucra la consideración de las ecuaciones constitutivas y, generalmente, el uso de la integración numérica.

6.11. Transformación de coordenadas

Una vez determinadas las matrices de rigidez de todos los elementos que conforman la discretización del dominio del problema, y antes de proceder el ensamblaje de todas las matrices, para así obtener el comportamiento de todo el sistema, es necesario realizar la transformación de coordenadas, que permita transformar las matrices de rigidez de los elementos, desde sus respectivos ejes coordenados locales, al sistema global de referencia.

6.12. Ensamblaje de las ecuaciones de los elementos

El ensamblaje de las matrices de las ecuaciones de los elementos, se realiza de acuerdo con la configuración topológica de los mismos, después que éstas han sido transformadas al sistema global de referencia. Dicha configuración se obtiene a través del establecimiento de una relación entre la numeración local de los nodos de los elementos, y la numeración global de los mismos. El ensamblaje

se efectúa considerando únicamente los nodos de las interfaces, los cuales son comunes a los elementos adyacentes. La matriz resultante se denomina matriz global del sistema.

6.13. Introducción de las condiciones de contorno

En este paso se introducen las condiciones de contorno de la matriz global del sistema, con lo cual esta matriz se podrá reducir o condensar a su forma final, aun cuando en algunos casos se prefiere, para no añadir nuevos algoritmos a la solución del problema, deja el sistema global en su tamaño inicial. Existen algunos algoritmos más refinados que permiten introducir las condiciones de contorno en el paso anterior, con lo cual se reduce tanto el tiempo de ejecución como la memoria requerida, pero dichos algoritmos requieren una programación muy diestra.

Los valores prescritos (conocidos) de la función (o el de sus derivadas) en los contornos, son las llamadas condiciones de contorno esenciales. Usualmente, estos valores son cero o constantes (equivalente a especificar los desplazamientos, las velocidades, la temperatura, etc., en los nodos), o como una función de la carga (en el caso de soportes elásticos que aparecen en algunos problemas de la mecánica de los sólidos).

6.14. Solución del sistema de ecuaciones resultante

Independientemente de la naturaleza del problema, el paso final en la solución de un problema mediante el MEF, lo constituye la resolución del sistema de ecuaciones simultáneas resultante. Debido a la naturaleza determinística del MEF, los procedimientos de solución de dichos sistemas se pueden clasificar en dos grupos: (a) los métodos directos, tales como los métodos de Gauss y de factorización de Cholesky, los cuales son los más utilizados para sistemas de

ecuaciones pequeños o moderados y (b) los métodos iterativos, tales como los métodos de Gauss-Seidel y el de Jacobi, los cuales, a su vez, son más apropiados para sistemas de grandes órdenes. En estos métodos, el tiempo de solución es considerablemente menor que en los métodos directos. Sin embargo, no son adecuados en problemas con múltiples sistemas de cargas, como los que frecuentemente se encuentran en la mecánica de los sólidos.

Cuando el sistema de ecuaciones es no-lineal, los procedimientos de solución más utilizados son el método de Picard, el método de Newton-Raphson y variaciones del método de Newton (Broyden, quasi-Newton, etc.)

6.15. Interpretación de los resultados

Con la resolución del sistema de ecuaciones se obtienen los valores aproximados de la(s) variable(s) en los puntos discretos (nodos) del dominio. Generalmente, estos valores son interpretados y usados en el cálculo de otras cantidades físicas, tales como los esfuerzos, deformaciones, el flujo de calor, etc., en todo el dominio, o en ciertas partes del mismo. Estos cálculos posteriores se conocen con el nombre de pos-procesamiento.

La comparación de los resultados obtenidos con la evidencia experimental u otros resultados numéricos es, tal vez, una de las tareas más importantes del MEF, ya que debe darse respuesta a las siguientes preguntas: ¿Cuan buenos son los resultados?, ¿Qué hacer con ellos? La respuesta a la primera requiere de la estimación del error y la segunda involucra la naturaleza física del problema. Las respuestas a estas preguntas permitirán decidir si el análisis ha llegado a su fin, o si por el contrario, se requiere la repetición de algunos de los pasos descritos. En algunos casos, el nuevo análisis comienza en el mismo paso 1 (i.e., redefinición del problema con nuevos parámetros físicos, nueva

discretización con diferentes tipos y formas de elementos, etc.). Sin embargo, en la práctica, para la mayoría de los problemas, se obtienen resultados confiables comparando diferentes análisis (basados en diferentes discretizaciones), del mismo problema. Los procesos adaptivos y la generación automática de mallas permiten, automáticamente, incrementar la exactitud de un problema dado, una vez estimado el error de análisis inicial.

Estos doce puntos completan los pasos necesarios para el análisis de un sistema mediante el MEF.

6.16. Implementación computacional del método de los elementos finitos

La implementación computacional de los pasos descritos en la sección anterior se realiza, en forma general, a través de tres unidades básicas: el pre-procesador, el procesador, y el pos-procesador. Las funciones principales de estas unidades son, respectivamente, (1) entrada y/o generación de los parámetros del problema, (2) ensamblaje y resolución del sistema de ecuaciones e (3) impresión y graficación de la solución. El éxito de cualquier programa computacional de elementos finitos, depende de la eficiencia de cada una de las tres unidades mencionadas. En la figura 6.5 se resume las operaciones que se realizan en dichas unidades.

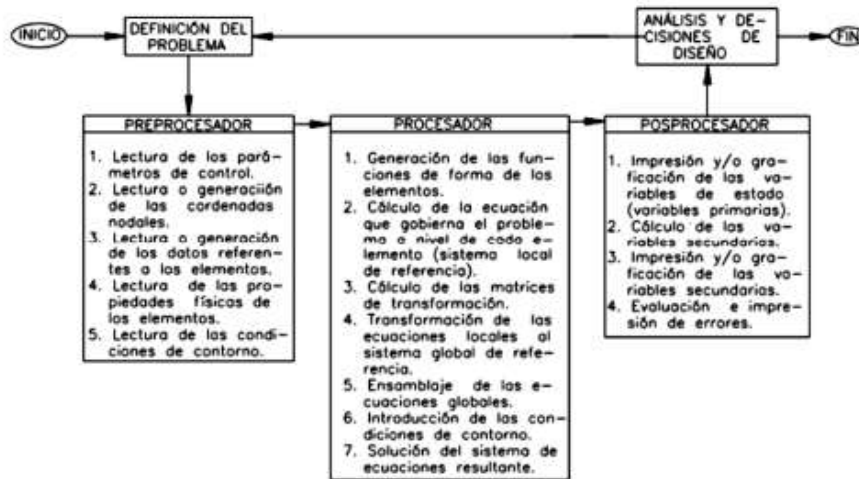


Figura 6.5 - Esquema general de la implementación computacional del método de los elementos finitos. **Fuente:** Introducción al Método del Elemento Finito (MEF) - Ing. Joel Ontiveros Aguilar.

6.17. Método y formulaciones de las ecuaciones de los elementos

Como ya se ha mencionado, el MEF consiste en el reemplazo de un conjunto de ecuaciones diferenciales, por un conjunto equivalente, pero aproximado, de ecuaciones algebraicas, donde cada una de las variables es evaluada en los puntos nodales. En la evaluación de estas ecuaciones algebraicas pueden usarse diferentes tipos de aproximaciones, y los métodos de elementos finitos se clasifican, usualmente, de acuerdo al método usado. Debe seleccionarse el método más conveniente para un problema dado.

A continuación, se analizarán tres métodos: el directo, el variacional y los residuales. Existen otros, menos comunes, pero escapan al objetivo primario de dicho texto.

El método directo

El MEF se desarrolló, al inicio de la década de los años cincuenta, a partir del método directo asociado al cálculo estructural, el cual fue ampliamente usado en la solución de diversos problemas estructurales reticulares. Las relaciones entre los desplazamientos y las fuerzas que los originan, se expresaron mediante un conjunto de ecuaciones, dando origen a lo que se dio llamar “matriz de rigidez” de cada elemento estructural, y se desarrollaron técnicas para realizar el ensamblaje de estas matrices en una matriz global, que expresara el comportamiento de toda la estructura de estudio.

Prácticamente, todos los parámetros empleados en esta aproximación pueden interpretarse mediante principios físicos. Desafortunadamente, este método es difícil de aplicar en problemas bidimensionales y tridimensionales, los cuales son, precisamente, los casos donde el MEF es más útil. Esta limitación es por lo tanto muy severa y reduce, drásticamente, su rango de aplicación.

El método variacional

El método variacional está relacionado con un ente matemático llamado funcional. El funcional asociado a un problema dado, puede obtenerse bien sea a partir de alguna expresión de energía (usualmente este es el caso en los problemas de la mecánica de los sólidos), o desde un problema de valor de contorno. Una vez obtenido el funcional asociado a un problema dado, el método variacional consiste en minimizar el valor del funcional con respecto a cada uno de los valores nodales de la(s) variable(s) del problema.

Entre las ventajas de este método se incluye la familiaridad de las técnicas de energía (en problemas de la mecánica de los sólidos), y su fácil extensión a

problemas bidimensionales y tridimensionales. Entre las desventajas, se incluye la inexistencia del funcional para cierta clase de problemas (p.e., los relacionados con el flujo de fluidos viscoelásticos), y la dificultad de determinarlo, aun cuando exista, para otros problemas. La inexistencia del funcional para algunos problemas, obliga a que se deba recurrir a otros métodos.

El método de los residuos pesados

El método de los residuos pesados es el más general de las tres técnicas. Este método está asociado al problema de valor de contorno de un problema dado, y consiste en reescribir la ecuación diferencial que gobierna el problema, de tal modo que el lado derecho del signo de igualdad sea igual a cero. De este modo, cuando se substituye la solución exacta en esta ecuación, el resultado será, lógicamente, igual a cero. Pero debido a que en general la solución exacta no se conoce, se debe emplear alguna solución aproximada. La sustitución de esta solución aproximada en la ecuación diferencial, conduce a un error residual r , distinto de cero. Este error r es entonces multiplicado por una función de peso W y el producto es integrado sobre toda la región del dominio. El resultado es el error residual R , el cual debe hacerse igual a cero. Luego, para cada valor nodal, existe una función de peso W y un residuo R , ambos desconocidos, lo cual permite formular un conjunto de ecuaciones algebraicas globales. La selección de las funciones peso W da origen a diferentes criterios de residuos pesados (Galerkin, mínimos cuadrados, colocación, subdominio). El más ampliamente usado es el método de Galerkin. A pesar que el método de los residuos pesado es una aproximación netamente matemática, y que muy pocas veces se le puede asociar algún significado físico a los parámetros involucrados en la solución de un problema dado, presenta la ventaja que puede aplicarse a cualquier problema del cual se conozca su respectivo problema de valor de contorno y que, una vez que se extiende la técnica, los detalles matemáticos son relativamente fáciles de

realizar. En particular, en el área de la mecánica de los fluidos, este método es usado en casi la totalidad de los problemas, ya que las ecuaciones de Navier-Stokes y algunas relaciones constitutivas, tales como las asociadas a los fluidos visco elásticos, no admiten funcionales.

6.18. Modelos de elementos finitos en la mecánica de los solidos

En la solución de los problemas asociados a la mecánica de sólidos se pueden emplear diferentes modelos de elementos finitos, los cuales dependen del principio variacional utilizado y del tipo de comportamiento localizado de las variables sobre cada elemento. Los tres principios variacionales más frecuentemente utilizados son: el principio de mínima energía potencial, el principio de mínima energía complementaria y el principio de Reissner. La(s) variable(s) involucrada(s) en un problema dado dictaminan el principio variacional a usarse. Cuando se utiliza el principio de mínima energía potencial, se debe asumir la forma de los desplazamientos en el interior de cada elemento. Por este motivo, este modelo recibe el nombre de modelo de elementos finitos de desplazamientos, o modelo compatible. El principio de Reissner permite el desarrollo de los llamados modelo de elementos finitos híbridos y del modelo mixto. En estos modelos se adoptan simultáneamente, los campos de desplazamientos y de esfuerzos. Para un problema en particular, un principio puede ser más apropiado que otro, pero, debido a su fácil interpretación, el modelo compatible es el más ampliamente usado, motivo por el cual constituye la base de la mayoría de los programas computacionales comerciales en el área de la ingeniería. En este texto, únicamente se abordarán los aspectos teóricos y computacionales de este modelo. Sin embargo, es importante resaltar que muchos de los conceptos que serán presentados, y en particular las técnicas computacionales utilizadas en la implementación del mismo son, en muchos

casos, directamente aplicables a los otros modelos descritos. En la tabla se resumen los modelos de elementos finitos descritos.

Tabla 6.1- Modelos de elementos finitos usados en mecánica de sólidos. Fuente: Introducción al Método del Elemento Finito (MEF) - Ing. Joel Ontiveros Aguilar.

Modelo	Principio variacional	Variable supuesta en el interior de cada elemento	Variable supuesta en los contornos inter-elementos	Incógnitas en las ecuaciones finales
compatible	mínima energía potencial	desplazamientos continuos	compatibilidad de desplazamientos	desplazamientos nodales
equilibrio	mínima energía complementaria	esfuerzos continuos en equilibrio	equilibrio de las tracciones	esfuerzos nodales
híbrido I	energía complementaria modificada	esfuerzos continuos en equilibrio	compatibilidad de desplazamientos	desplazamientos nodales
híbrido II	energía complementaria modificada	desplazamientos continuos	equilibrio de las tracciones	desplazamientos y fuerzas nodales
híbrido III	energía potencial modificada	desplazamientos continuos	desplazamientos y fuerzas	desplazamientos nodales
mixto	principio de Reissner	desplazamientos y esfuerzos continuos	diferentes combinaciones de desplazamientos y fuerzas	diferentes combinaciones de desplazamientos y fuerzas

CAPITULO 7

CALCULO DE LOSAS MACIZAS Y ALIGERADAS - RESULTADOS

OBTENIDOS

7.1. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

7.1.1. Características de Materiales a ser utilizados

Hormigón: La resistencia especificada del hormigón será de 25 MPa

Acero de Refuerzo: para las armaduras de refuerzo serán varillas de acero de AP500.

7.1.2. Cargas consideradas

Carga viva: 2 kN/m²

Carga muerta: 4 kN/m², se consideran las cargas provocadas por cerramientos de mampostería de ladrillos + piso+revestimiento.

7.1.3. Norma considerada

EUROCODIGO

7.1.4. Software de Cálculo

El software de cálculo a utilizar será el programa SAFE, que utiliza el método de los elementos finitos para el cálculo.

7.1.5. Variaciones realizadas para el cálculo

Se realizaron 8 modelos de losas, 4 losas macizas y 4 losas aligeradas con distintas variables aplicadas a cada modelo, en el cual se variaron los espesores de los encofrados, ancho de nervios y ábacos en columnas intermedias.

A continuación se presentan los modelos estudiados con los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

Características geométricas de los modelos:

En las siguientes tablas se detallan un poco de cada una de ellos:

Numero de Modelo	Dimensión de encofrados U-BOOT	Capa Inferior (cm)	Capa Superior (cm)	Espesor de la losa (cm)	Ancho de Nervios (cm)	Tipo de H ^o (Mpa)
Modelo N° 1	52x52x10	5	5	20	12	25
Modelo N° 2	52x52x13	5	5	23	12	25
Modelo N° 3	52x52x16	5	5	26	12	25
Modelo N° 4	52x52x16	7	7	30	12	25

Tabla 7. 1 – Características geométricas de los modelos de losas aligeradas

Fuente: Elaboración propia

Numero de Modelo	Espesor de la losa (cm)	Tipo de H°(Mpa)
Modelo N° 1	20	25
Modelo N° 2	23	25
Modelo N° 3	26	25
Modelo N° 4	30	25

Tabla 7. 2 – Características geométricas de los modelos de losas macizas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. 3 – Características geométricas de los modelos de losas aligeradas

Numero de Modelo	Área total de la losa (m2)	Consumo de Ho. (m3 / m2) Losa maciza	Consumo de Ho. (m3 / m2) Losa aligerada	Área de Ábacos (m2)	Área de Ábacos (m2)
Modelo N° 1	225	0.2	0.15	35	24
Modelo N° 2	324	0.2	0.16	44	30.4
Modelo N° 3	441	0.2	0.13	52	36.88
Modelo N° 4	576	0.23	0.17	57	39.9

Fuente: Elaboración propia

Modelo N° 1: Losas macizas con vanos de 5m

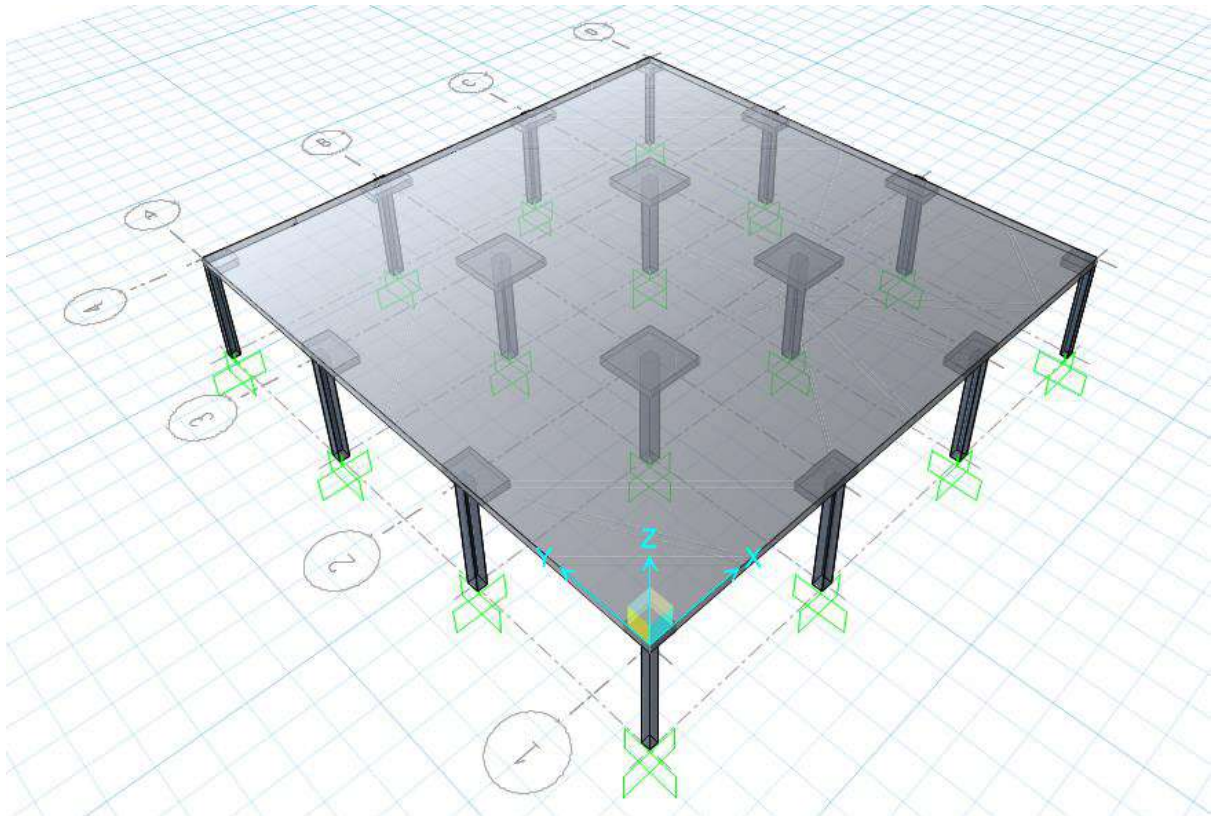


Figura 7. 1 – Losas macizas, con ábacos intermedios y vanos de 5m.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.1 se observa el diseño de una losa con ábacos perimetrales y centrales, para este diseño se utilizan losas macizas. Este modelo cuenta con nueve losas de 5x5m cada una con pilarización cada 5 metros.

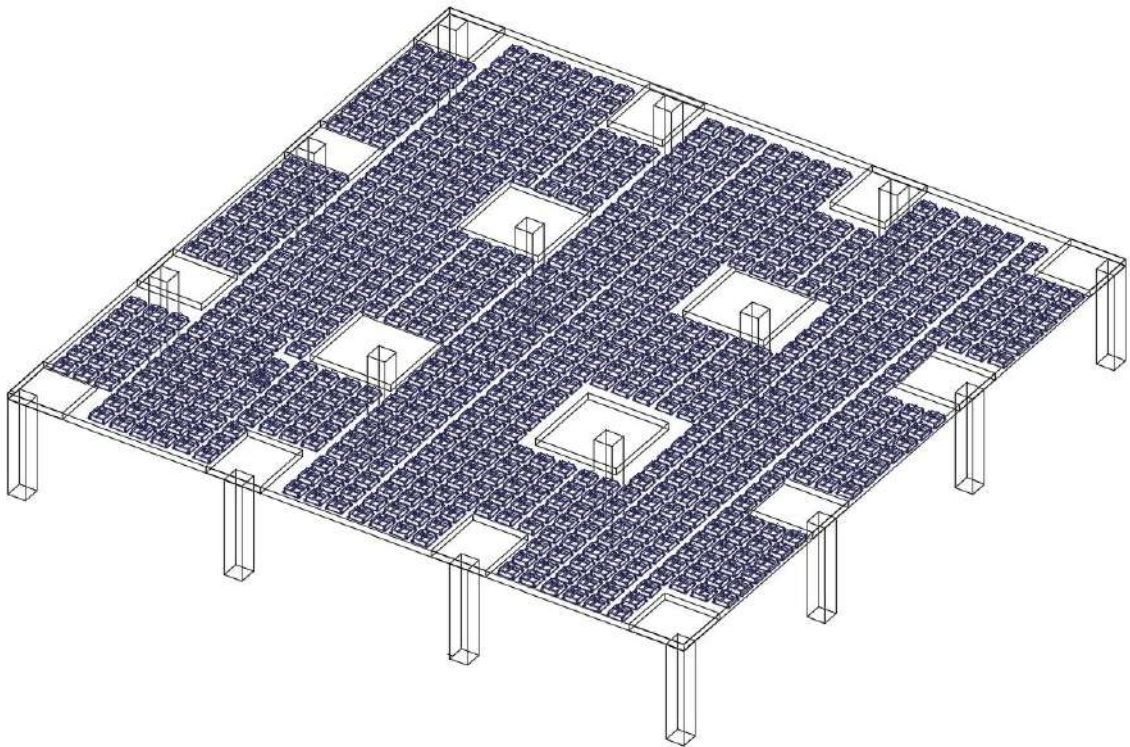


Figura 7. 2– Losas aligeradas con U-BOOT, con ábacos intermedios y vanos de 5m.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7.2 se observa el diseño de una losa con ábacos perimetrales y centrales, para este diseño se utilizan encofrados U-BOOT, de dimensiones 52x52x10 cm, nervios de 12 cm y doble capa, una inferior y otra superior de 5cm cada una. Este modelo cuenta con nueve losas de 5x5m cada una con pilarización cada 5 metros.

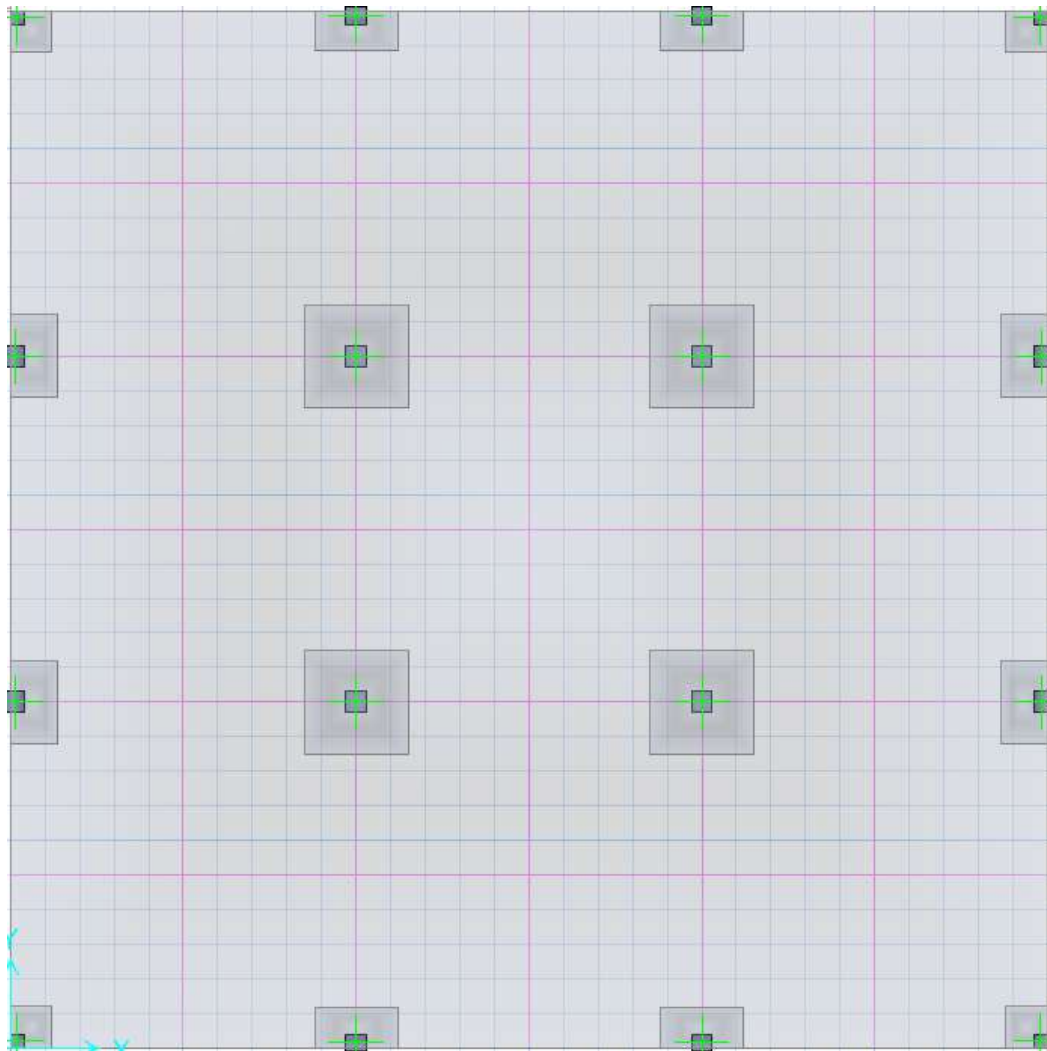


Figura 7. 3– Líneas de soporte en ambas direcciones introducidas en el software correspondiente al Modelo N°1. **Fuente:** Elaboración propia.

Para la visualización de los resultados se trazan las líneas de soportes en dirección X e Y. Se tienen 7 líneas de soporte en la dirección X, y 7 líneas de soportes en la dirección Y como se muestra en la figura. Una vez realizado el trazado de las líneas de soportes el software determina geoméricamente las áreas de influencia para cada línea de soporte (ver Figura 7.4 y 7.5) con las que posteriormente se obtienen los resultados de tensiones y deformaciones

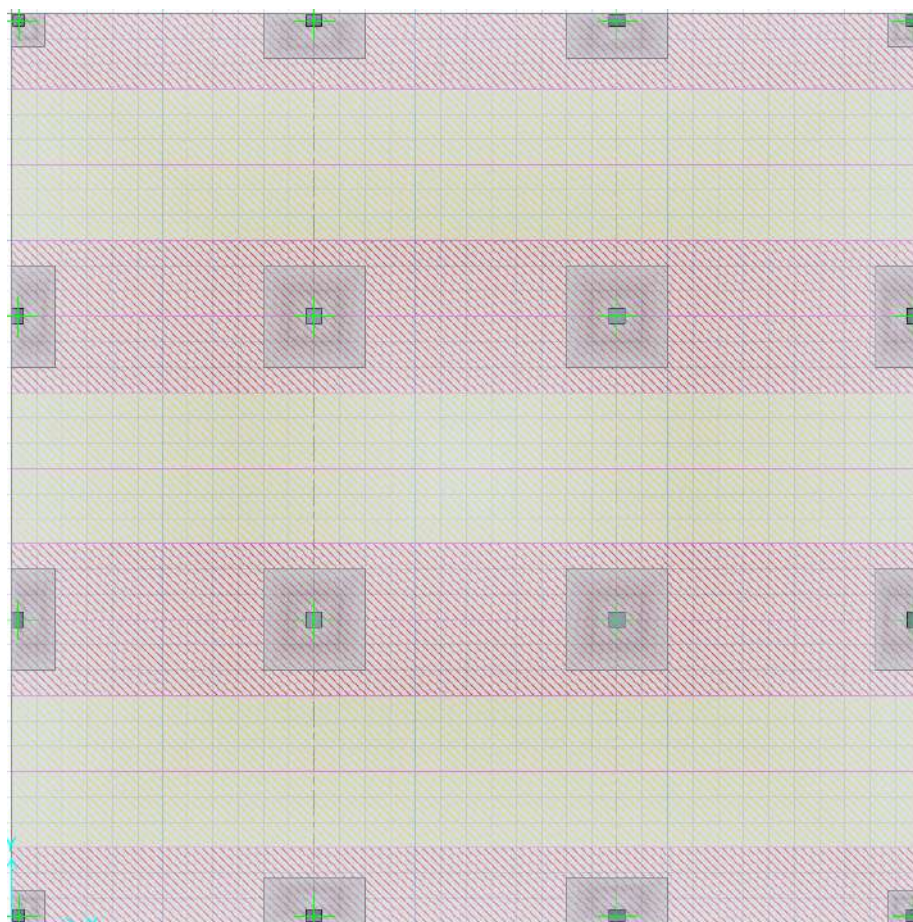


Figura 7. 4 – Áreas de influencia sobre las líneas de soporte en dirección horizontal correspondientes al Modelo 1. Fuente: Elaboración propia.

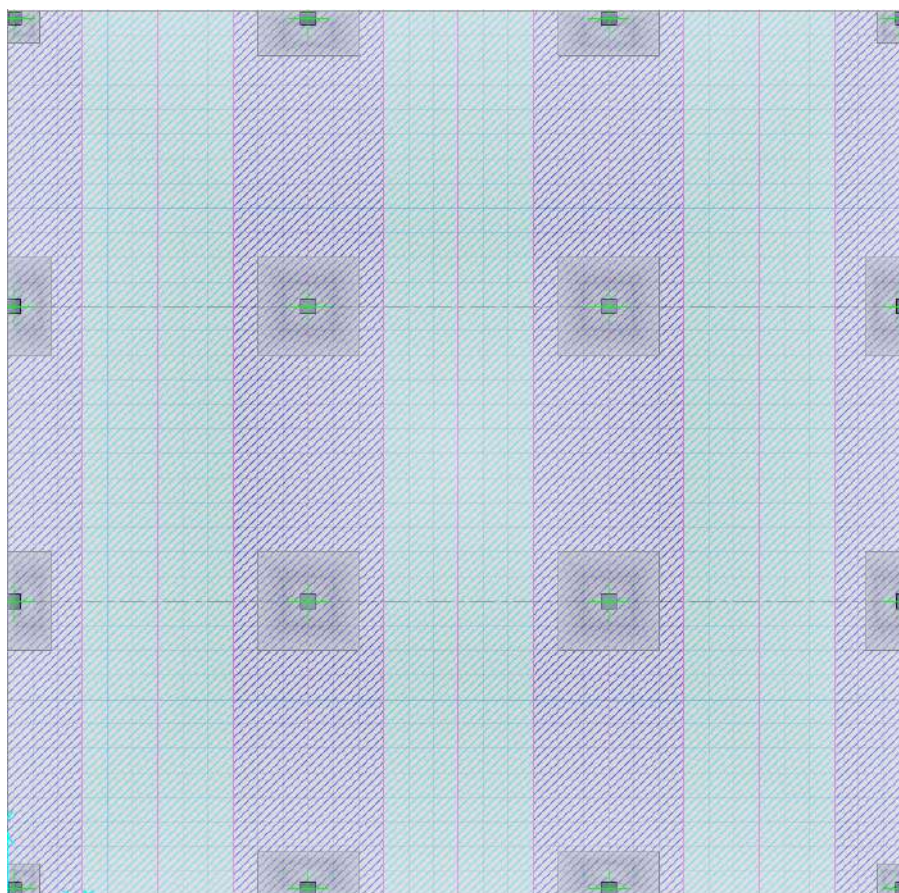


Figura 7. 5 – Áreas de influencia sobre las líneas de soporte en dirección horizontal correspondientes al Modelo 1. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en las losas macizas fueron los siguientes:

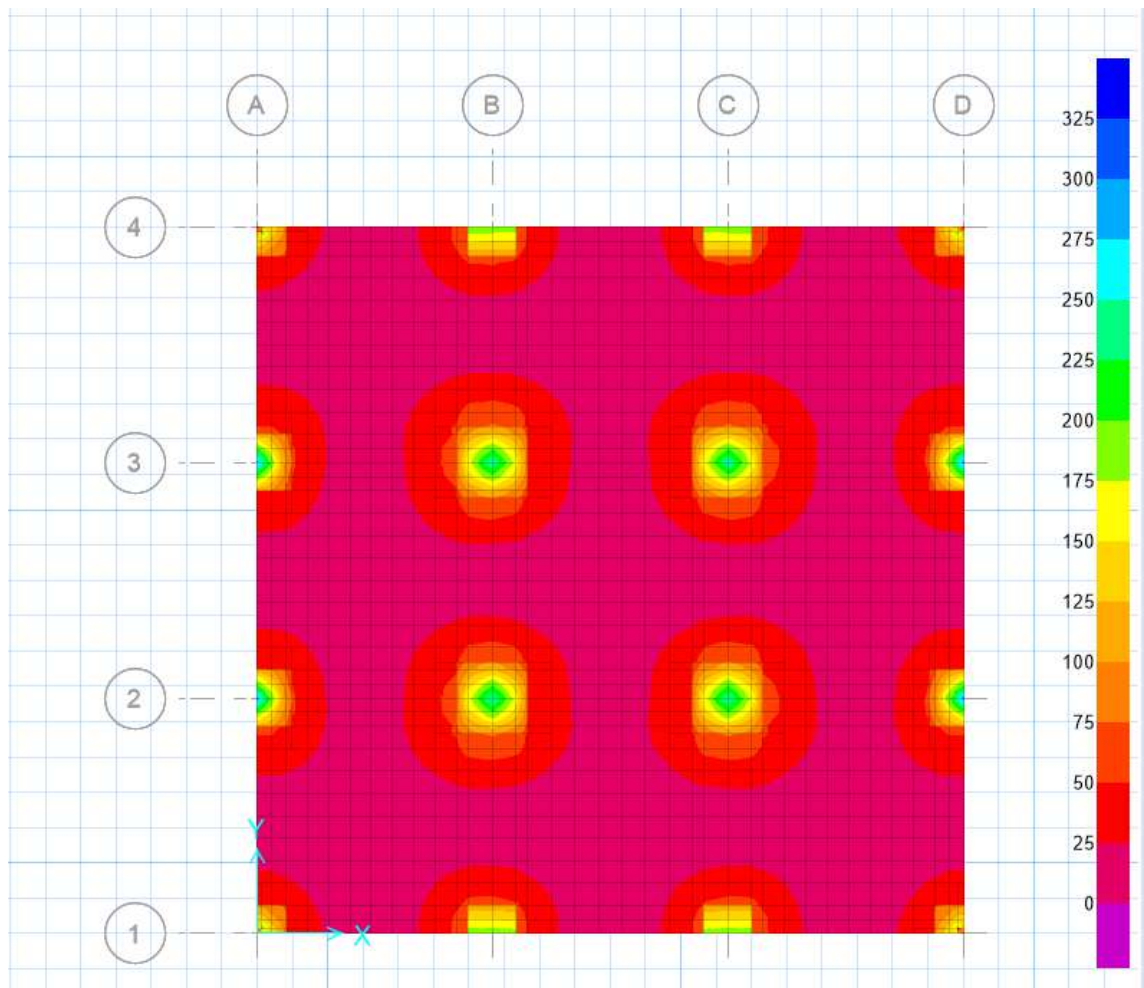


Figura 7. 6 – Cortante máxima en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°1 **Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 7.6 se observan los puntos en donde el esfuerzo cortante es mayor, que serían las zonas en donde la losa apoya directamente sobre la columna. El esfuerzo cortante máximo es de 285.02 kN/m.

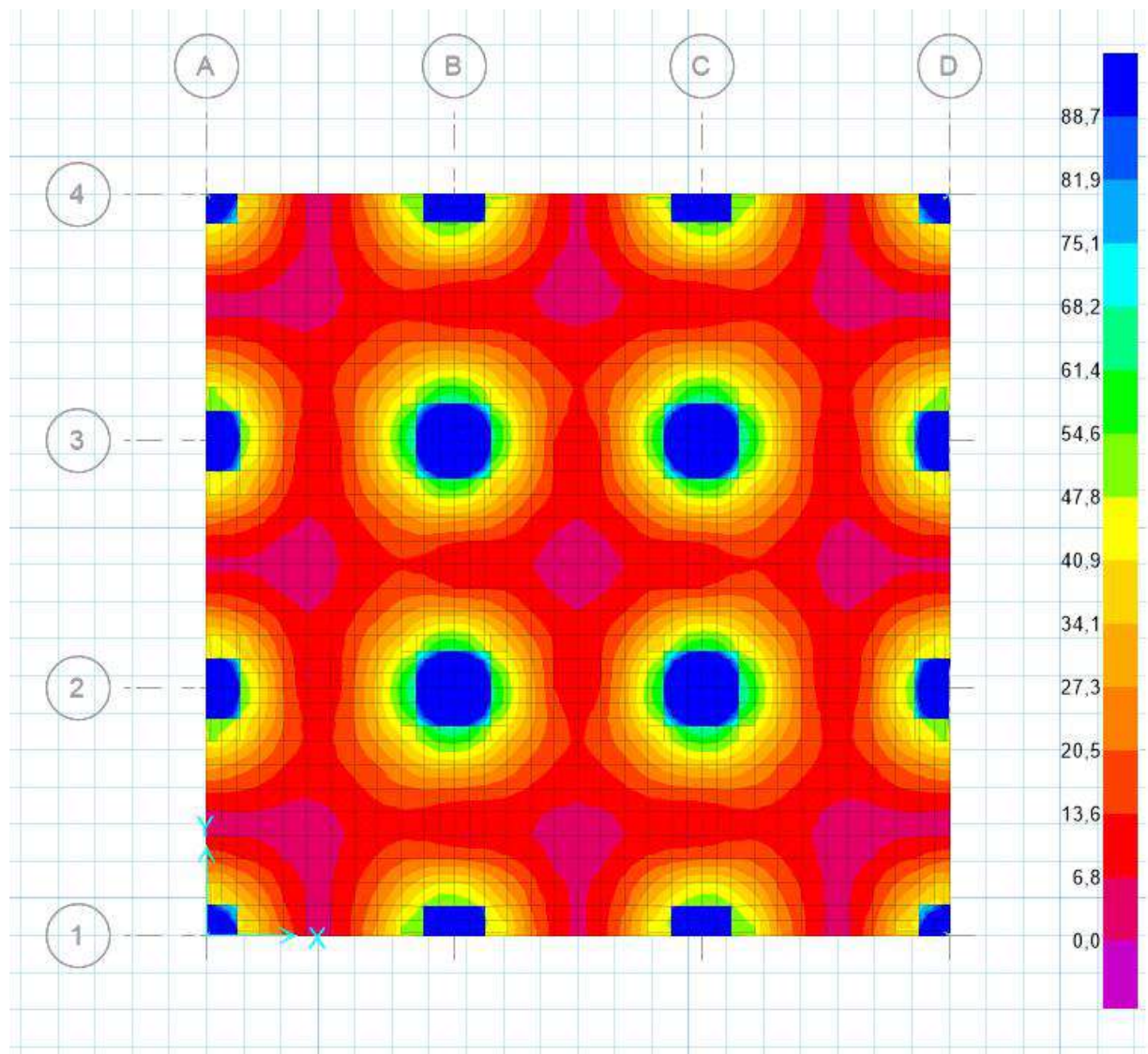
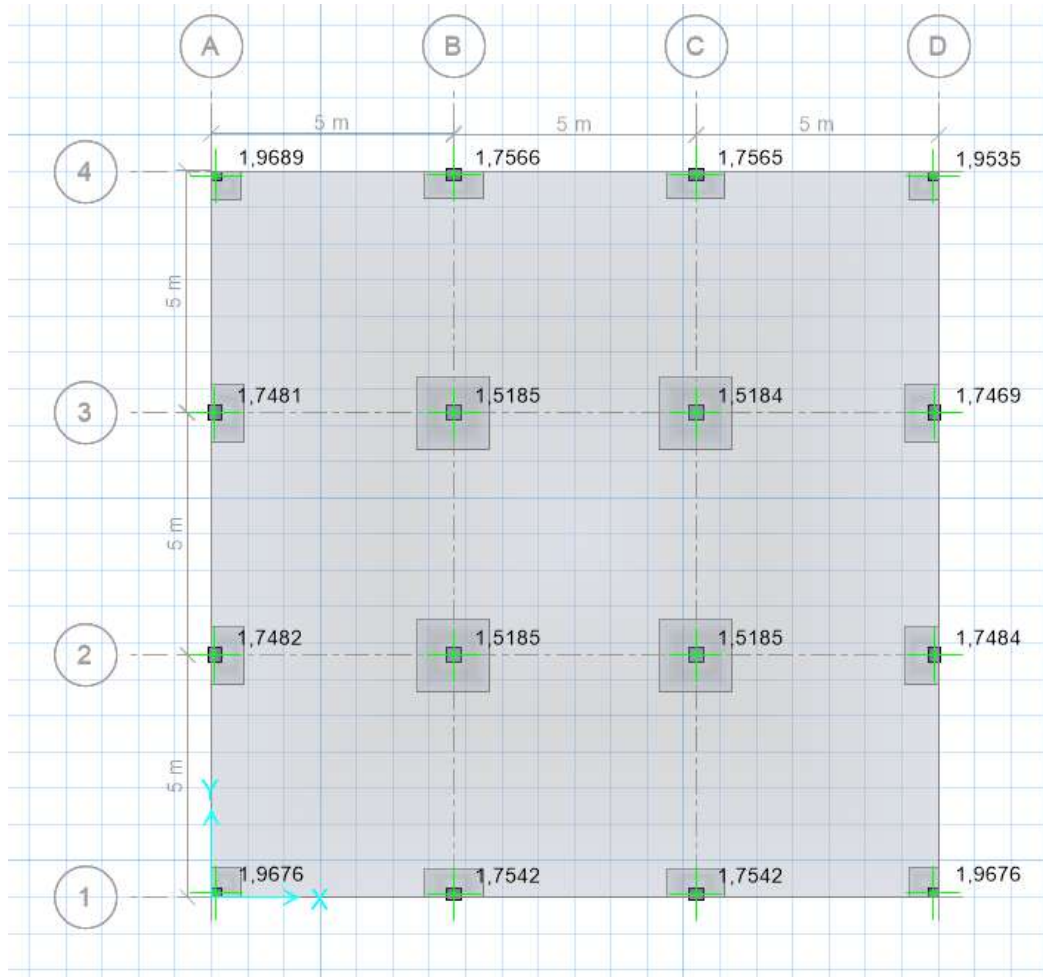


Figura 7. 7 – Perímetro crítico de esfuerzo cortante en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°1 **Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 7.6 pudimos observar que el esfuerzo cortante máximo es de 285.02 kN/m y sabiendo que el esfuerzo cortante máximo de miembros sin refuerzo es de 87,7 kN/m, en la figura 7.7 se muestra el perímetro crítico que debe ser reforzado para que esta no falle.

Figura 7. 8 – Relación de punzonamiento para la verificación de secciones en la



losa **Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 7.8 se observan los resultados del diseño de la resistencia al corte que de acuerdo a la ec. 6.4.2 del EC cumple con lo especificado $K \leq 2$.

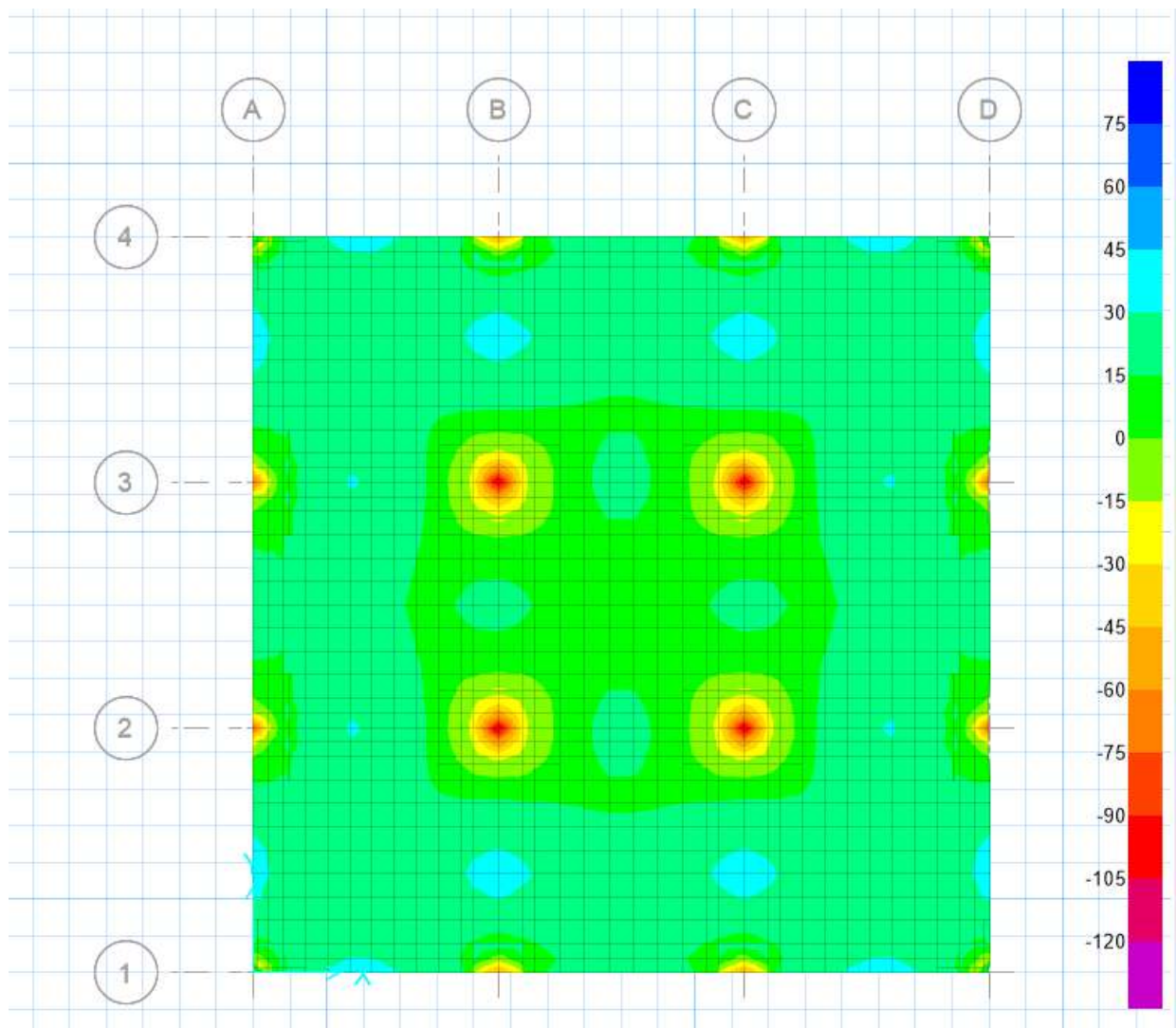


Figura 7. 9 – Gráfico de momentos admisibles en el modelo N°1

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7.9 se observan los momentos actuantes en la losa para el estado total de cargas, el momento máximo que tiene la sección de diseño es de 33,18 kN-m/m en las zonas de mayor vano, valor con el que podemos verificar que la sección cumple y el momento es menor al admisible.

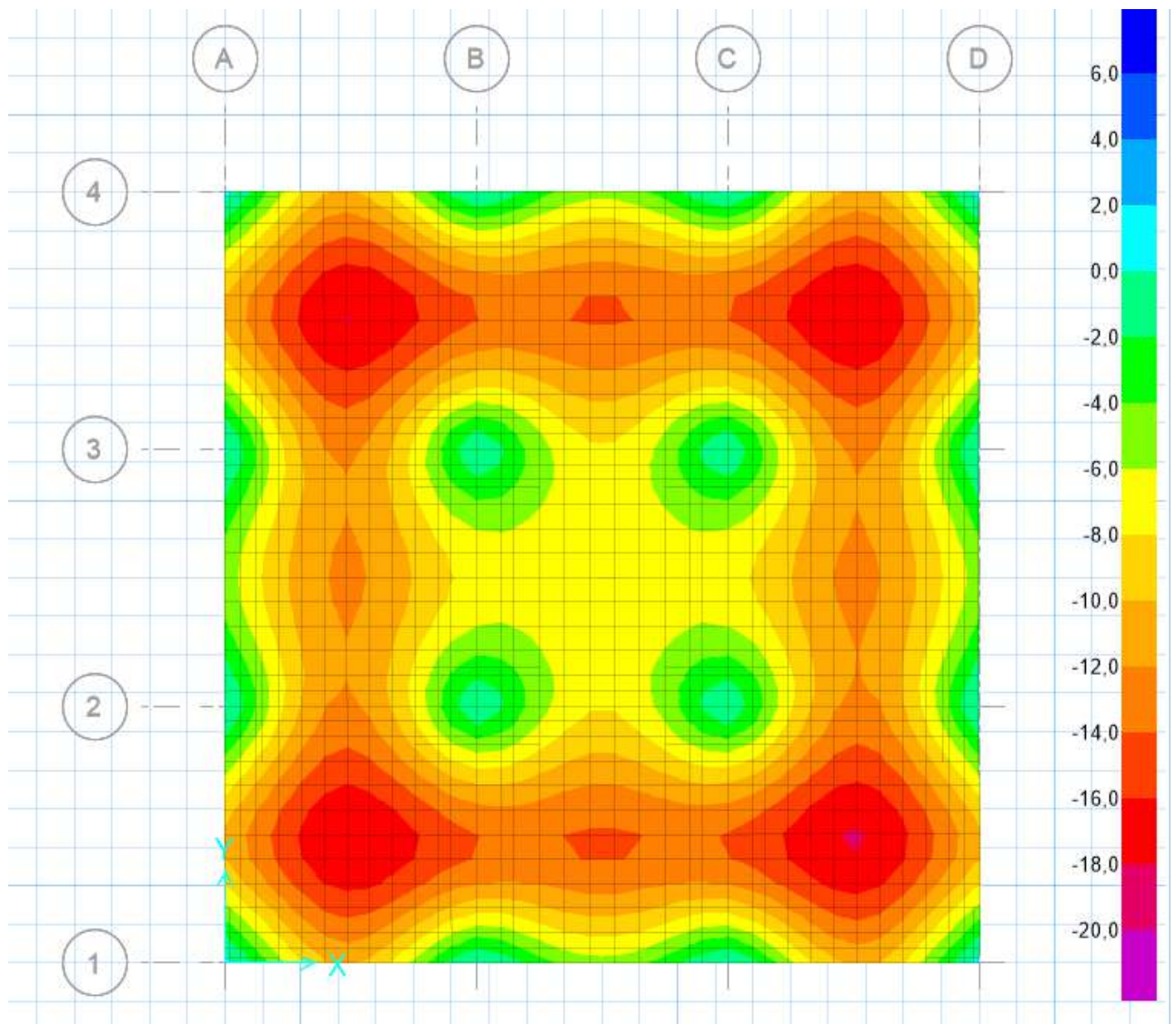


Figura 7. 10 – Deformaciones en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°1 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.10 se observan las deformaciones de las losas en el estado total de servicio del modelo. Las deformaciones máximas en el estado total de carga, incluyendo las cargas muertas y vivas arrojaron una deflexión máxima de 18mm, cumple con las deformaciones máximas permitidas por la norma, en el caso de la deflexión a largo plazo obtienen valores de $L/250$.

Los resultados obtenidos en las losas aligeradas fueron los siguientes:

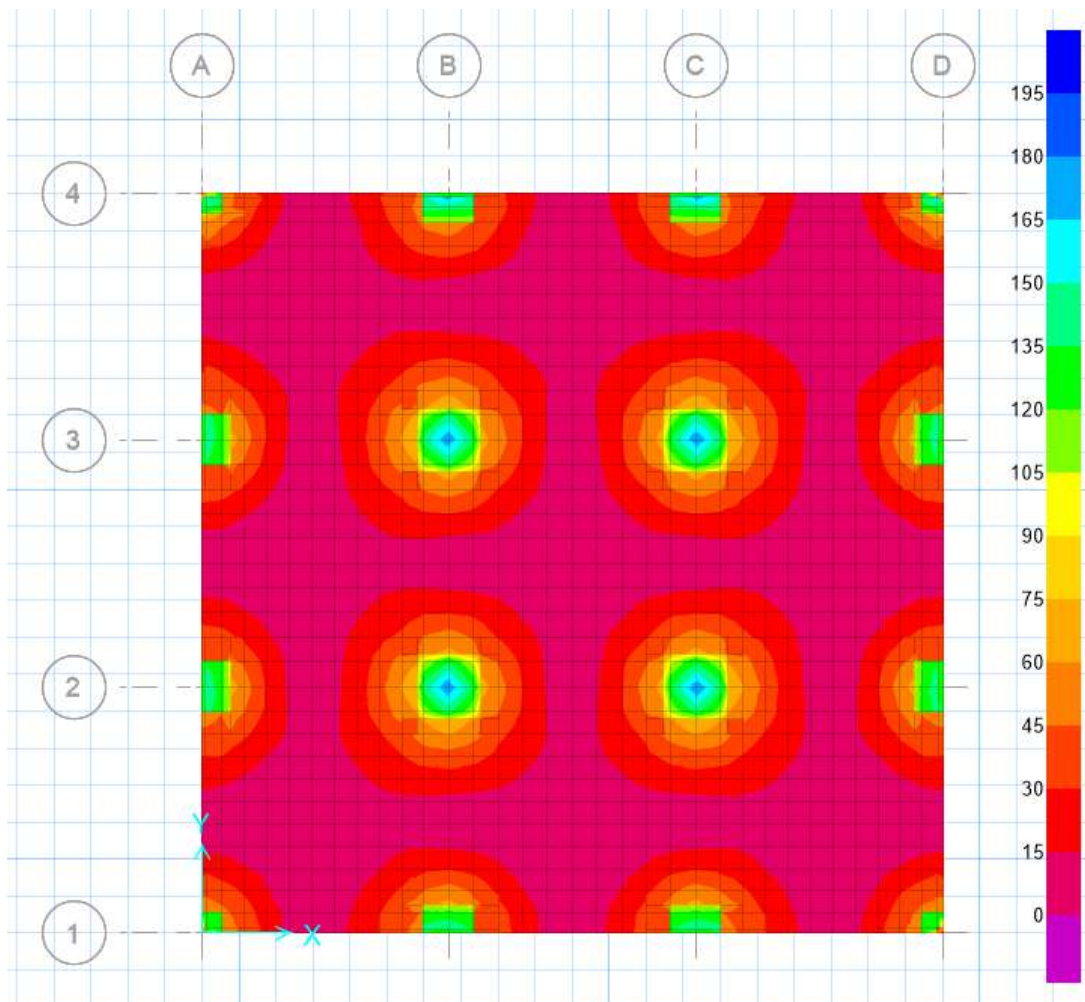


Figura 7. 11 – Cortante máxima en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°1 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.11 se observan los puntos en donde el esfuerzo cortante es mayor, que serían las zonas en donde la losa apoya directamente sobre la columna. El esfuerzo cortante máximo es de 180.04 kN/m.

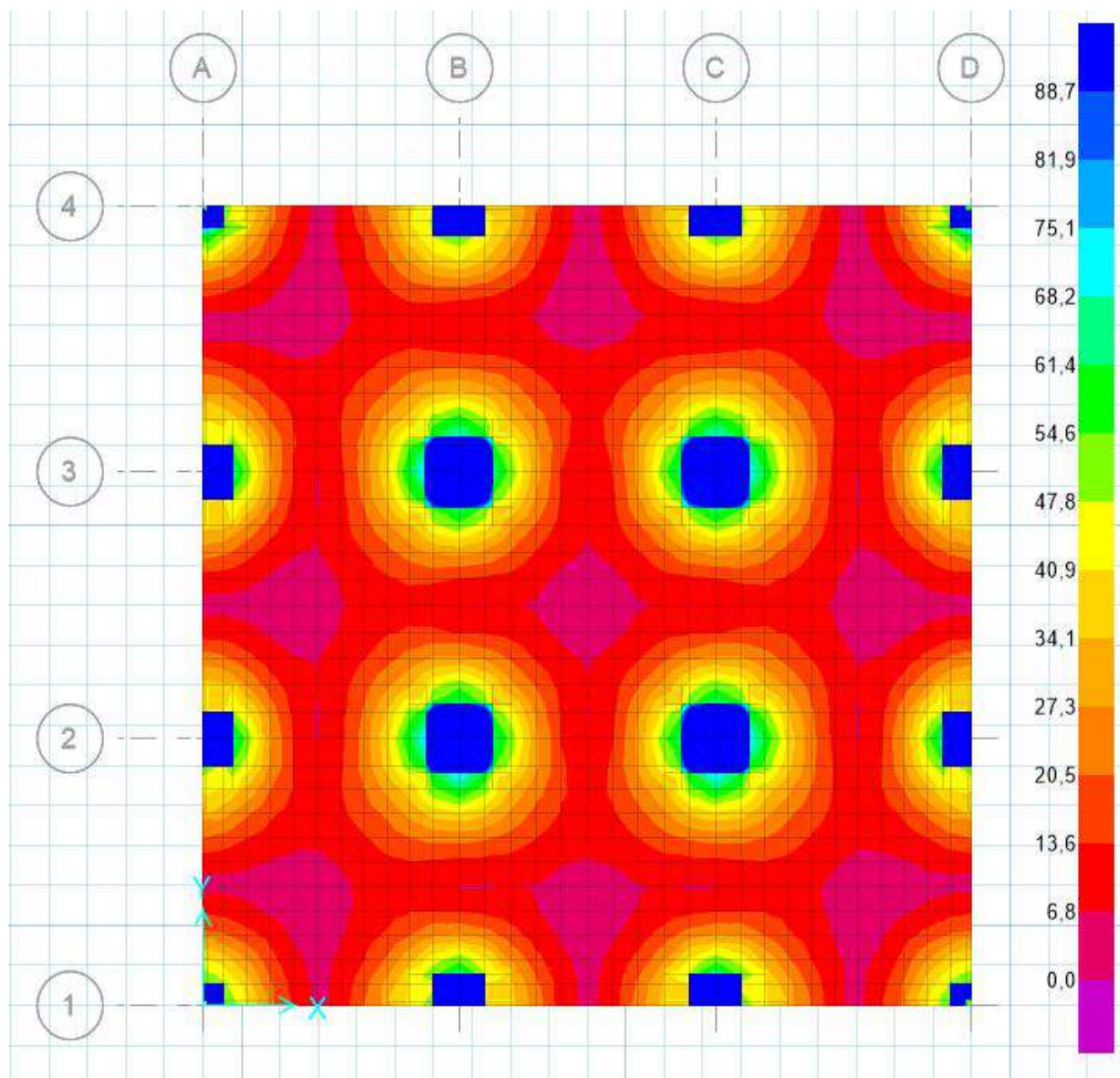


Figura 7. 12 –Perímetro crítico de esfuerzo cortante en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°1 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.11 pudimos observar que el esfuerzo cortante máximo es de 180.04 kN/m y sabiendo que el esfuerzo cortante máximo de miembros sin refuerzo es de 87,7 kN/m, en la figura 7.12 se muestra el perímetro crítico *que* debe ser reforzado para que esta no falle.

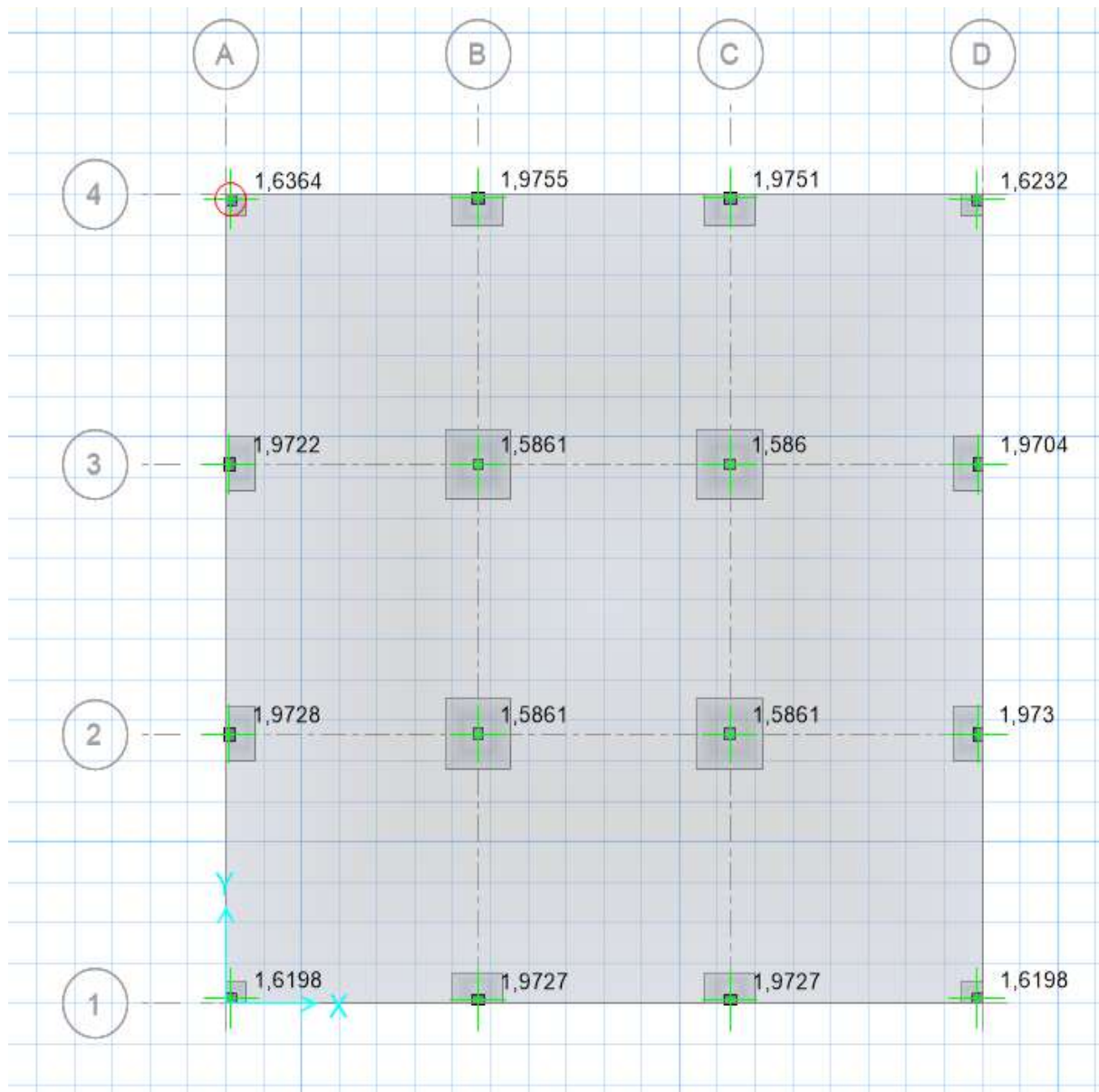


Figura 7. 13 –Relación de punzonamiento para la verificación de secciones en la losa **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.13 se observan los resultados del diseño de la resistencia al corte que de acuerdo a la ec. 6.4.2 del EC cumple con lo especificado $K \leq 2$.

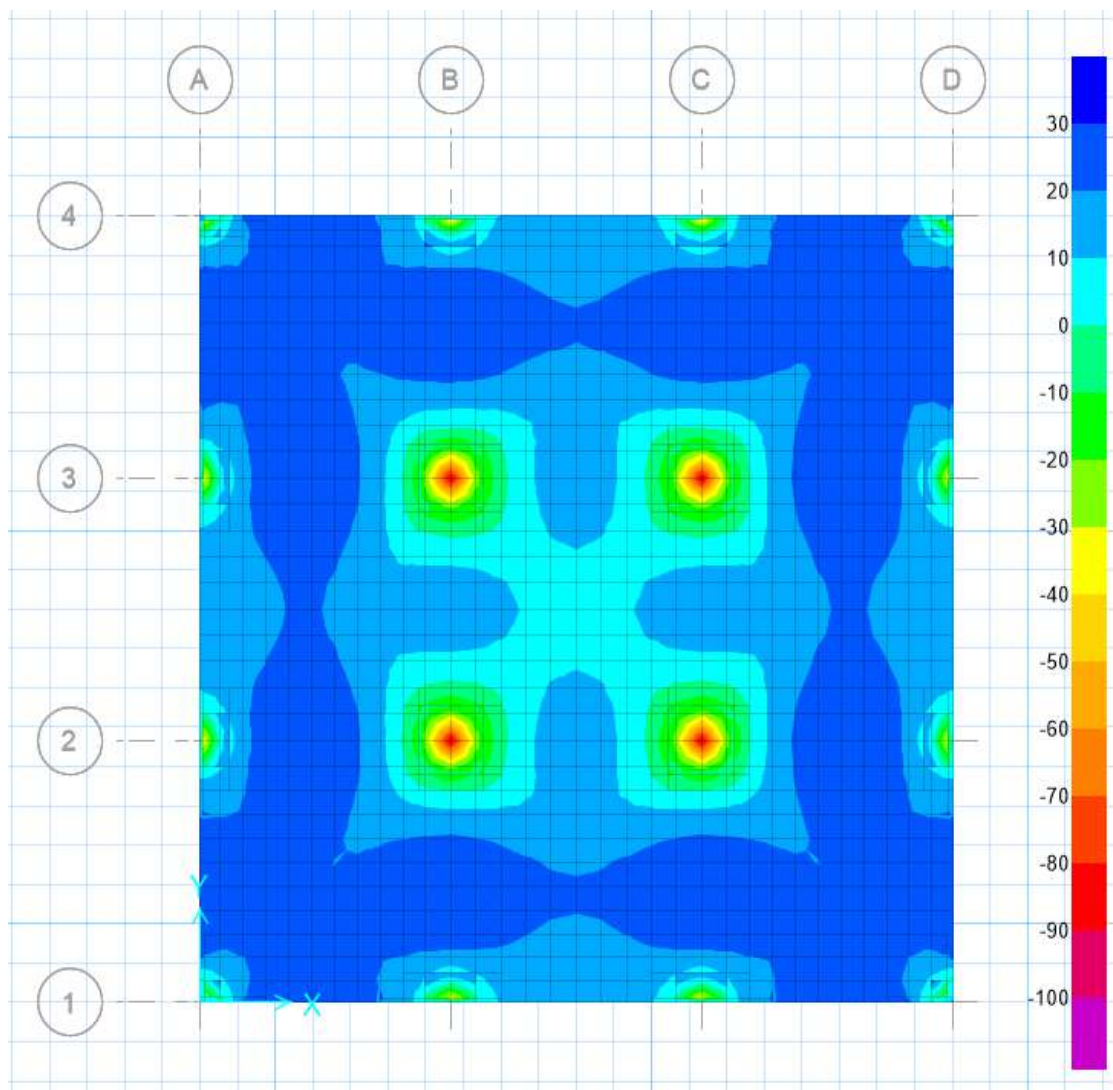


Figura 7. 14 – Gráfico de momentos admisibles, en el Modelo N°1

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7.13 se observan los momentos actuantes en la losa para el estado total de cargas, el momento máximo que tiene la sección de diseño es de 29 kN-m/m en el las zonas de mayor vano, valor con el que podemos verificar que la sección cumple y el momento es menor al admisible.

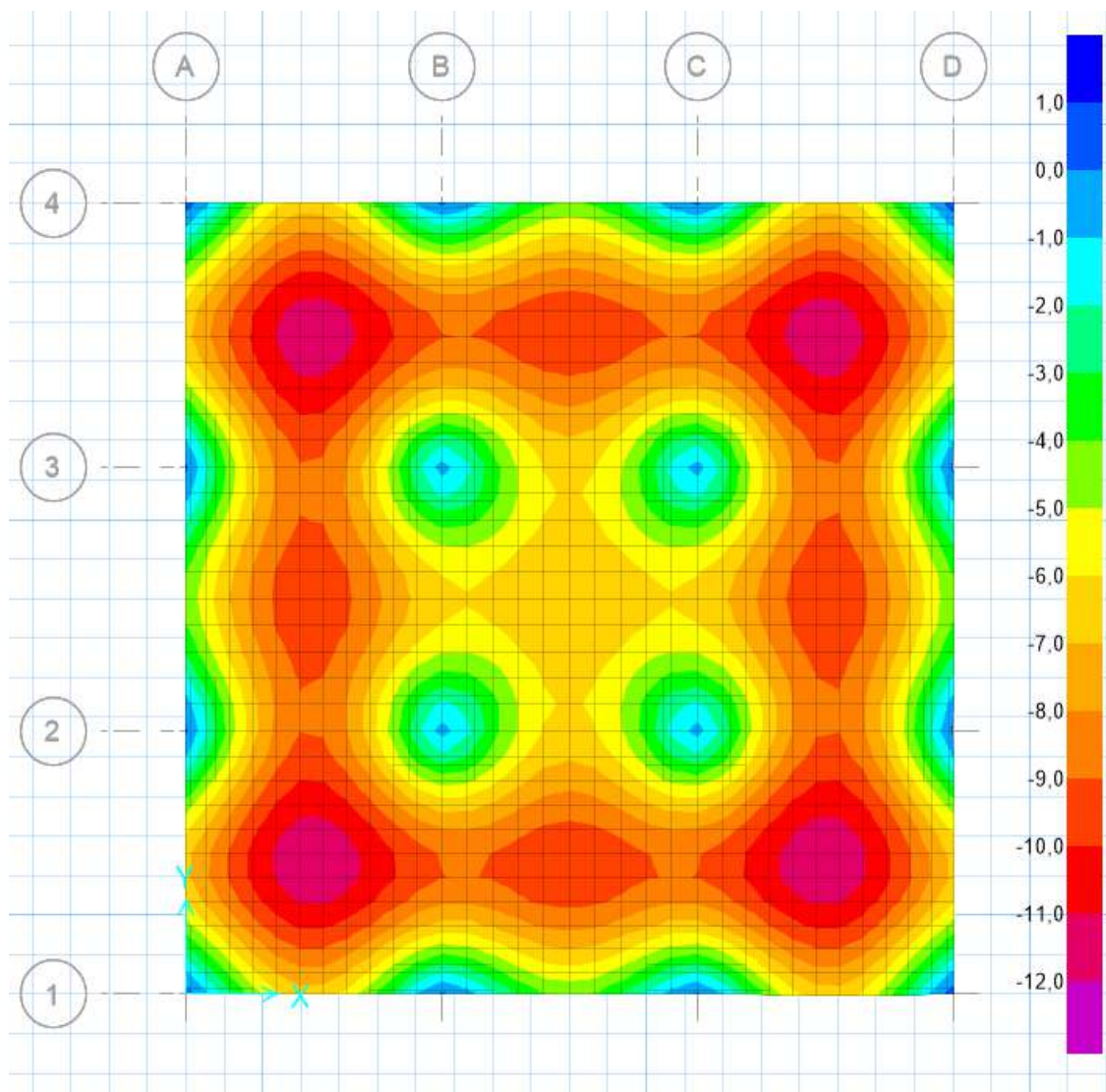


Figura 7. 15– Deformaciones en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°1 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.15 se observan las deformaciones de las losas en el estado total de servicio del modelo. Las deformaciones máximas en el estado total de carga, incluyendo las cargas muertas y vivas arrojaron una deflexión máxima de 12mm, cumple con las deformaciones máximas permitidas por la norma, en el caso de la deflexión a largo plazo obtienen valores de $L/250$.

Modelo N° 2: Losas macizas con vanos de 6m

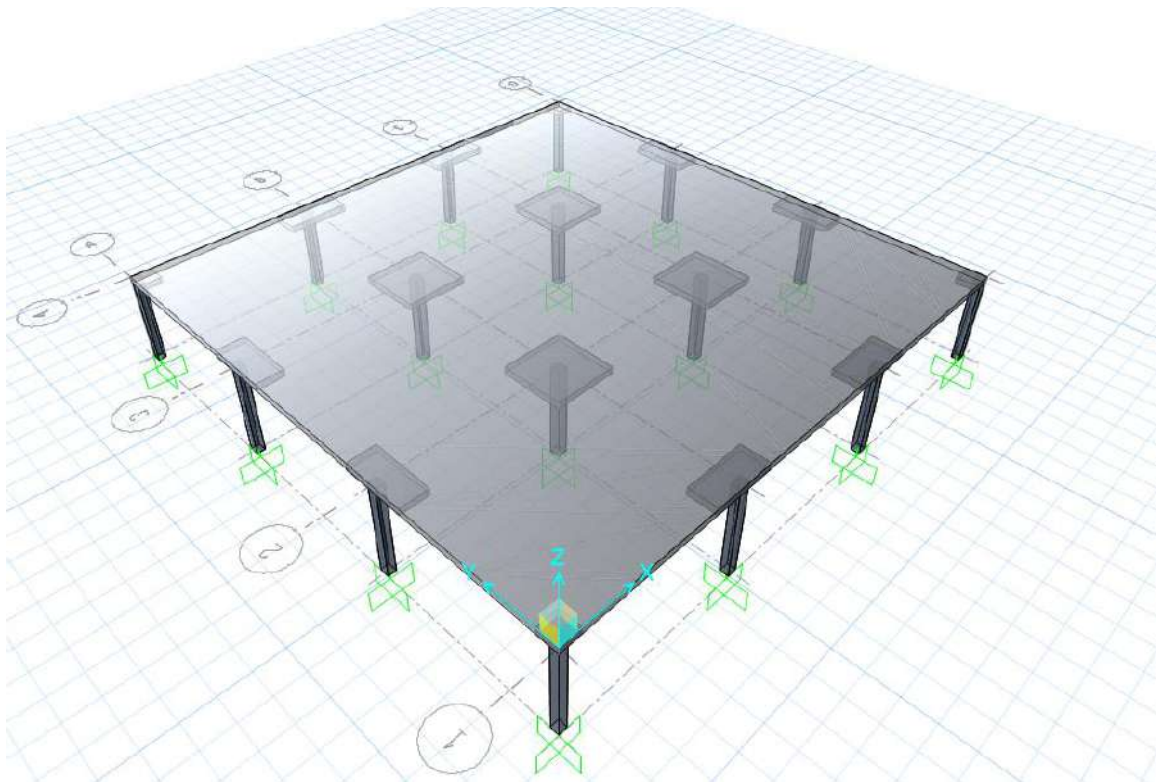


Figura 7. 16 – Losas macizas, con ábacos intermedios y vanos de 6m.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7.16 se observa el diseño de una losa con ábacos perimetrales y centrales, para este diseño se utilizan losas macizas. Este modelo cuenta con nueve losas de 6x6m cada una con pilarización cada 6 metros.

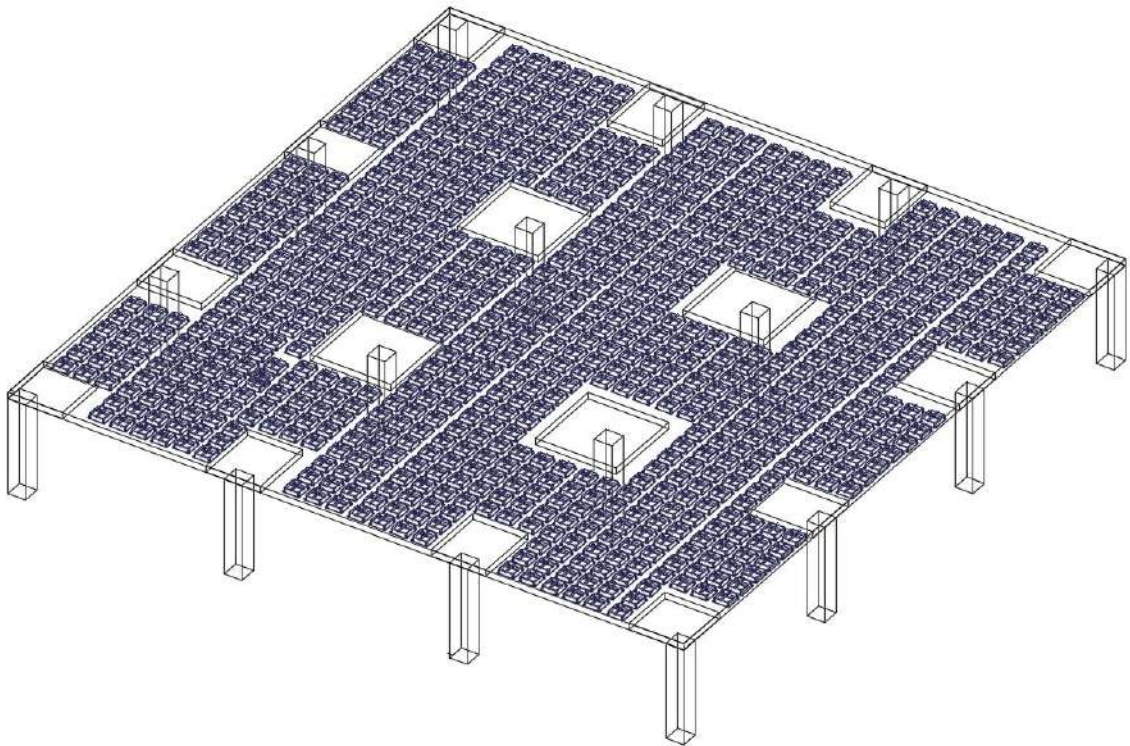


Figura 7. 17 – Losas aligeradas con U-BOOT, con ábacos intermedios y vanos de 6m. **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.17 se observa el diseño de una losa con ábacos perimetrales y centrales, para este diseño se utilizan encofrados U-BOOT, de dimensiones 52x52x13 cm, nervios de 12 cm y doble capa, una inferior y otra superior de 5cm cada una. Este modelo cuenta con nueve losas de 6x6m cada una con pilarización cada 6 metros.

Los resultados obtenidos en las losas macizas fueron los siguientes:

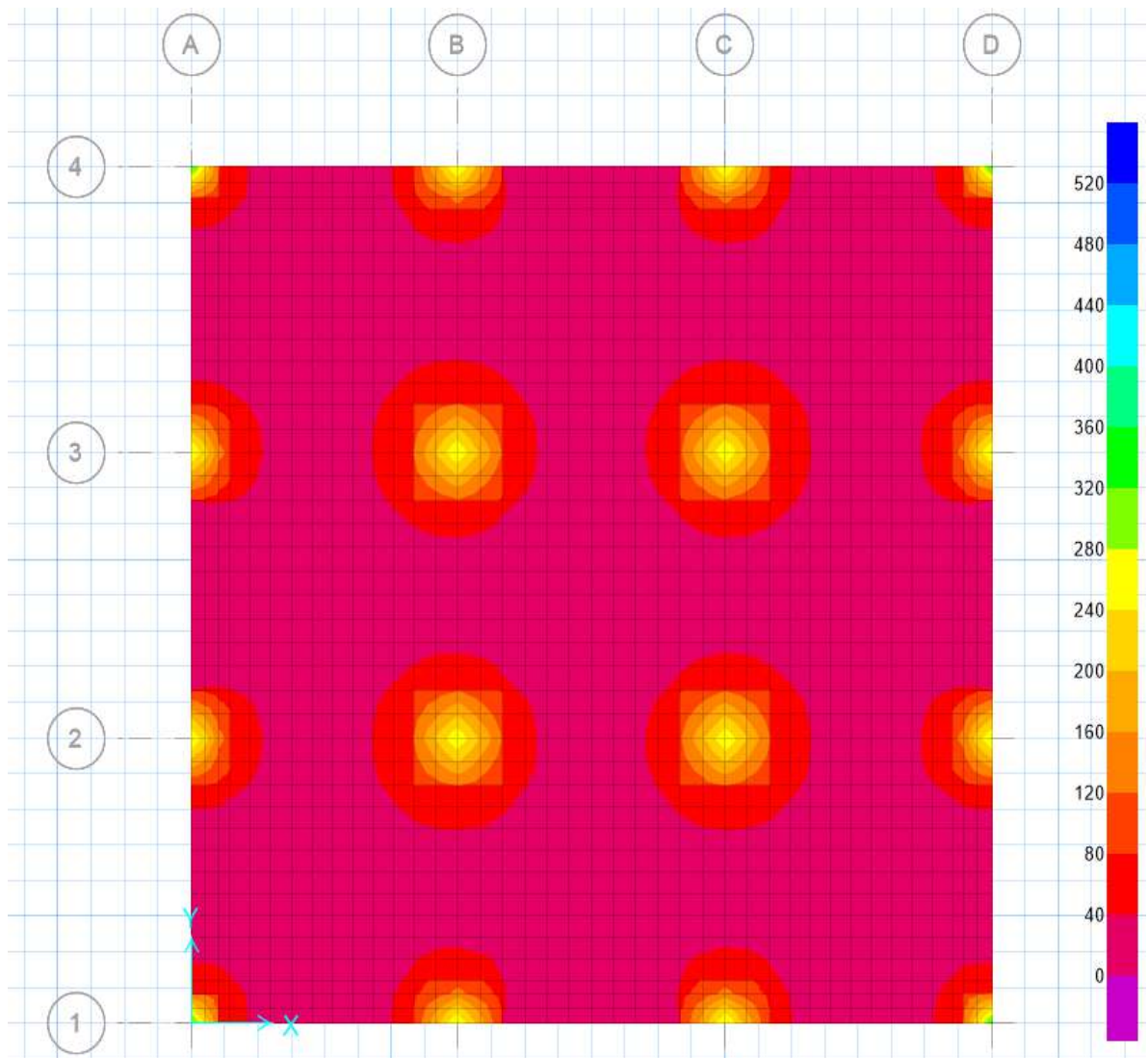


Figura 7. 18 – Cortante máxima en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°2 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 5.18 se observan los puntos en donde el esfuerzo cortante es mayor, que serían las zonas en donde la losa apoya directamente sobre la columna. El esfuerzo cortante máximo es de 331.68 kN/m.

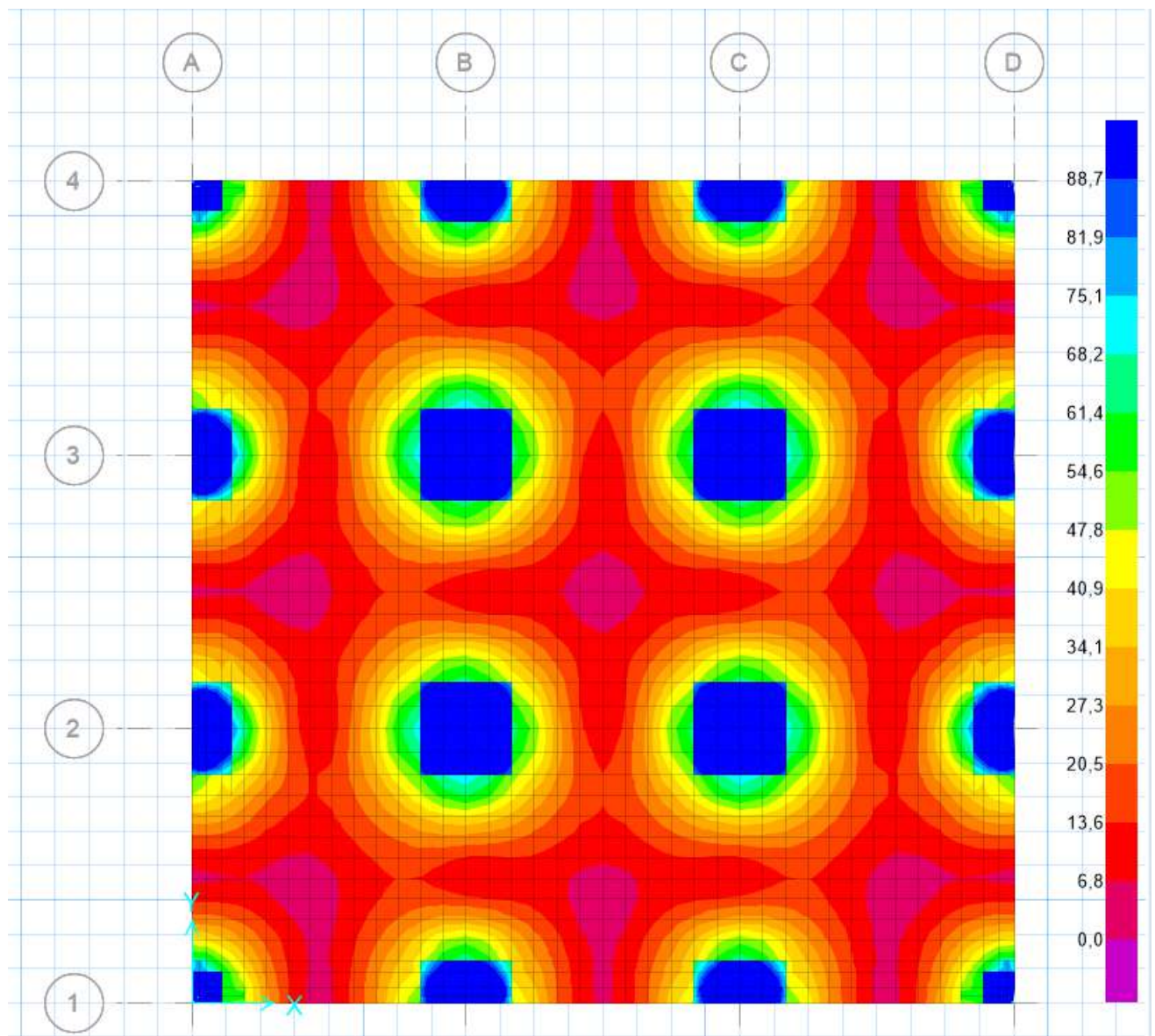


Figura 7. 19 – Perímetro crítico de esfuerzo cortante en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°2 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 5.18 pudimos observar que el esfuerzo cortante máximo es de 331.68 kN/m y sabiendo que el esfuerzo cortante máximo de miembros sin refuerzo es de 87,7 kN/m, en la figura 7.19 se muestra el perímetro crítico *que* debe ser reforzado para que esta no falle.

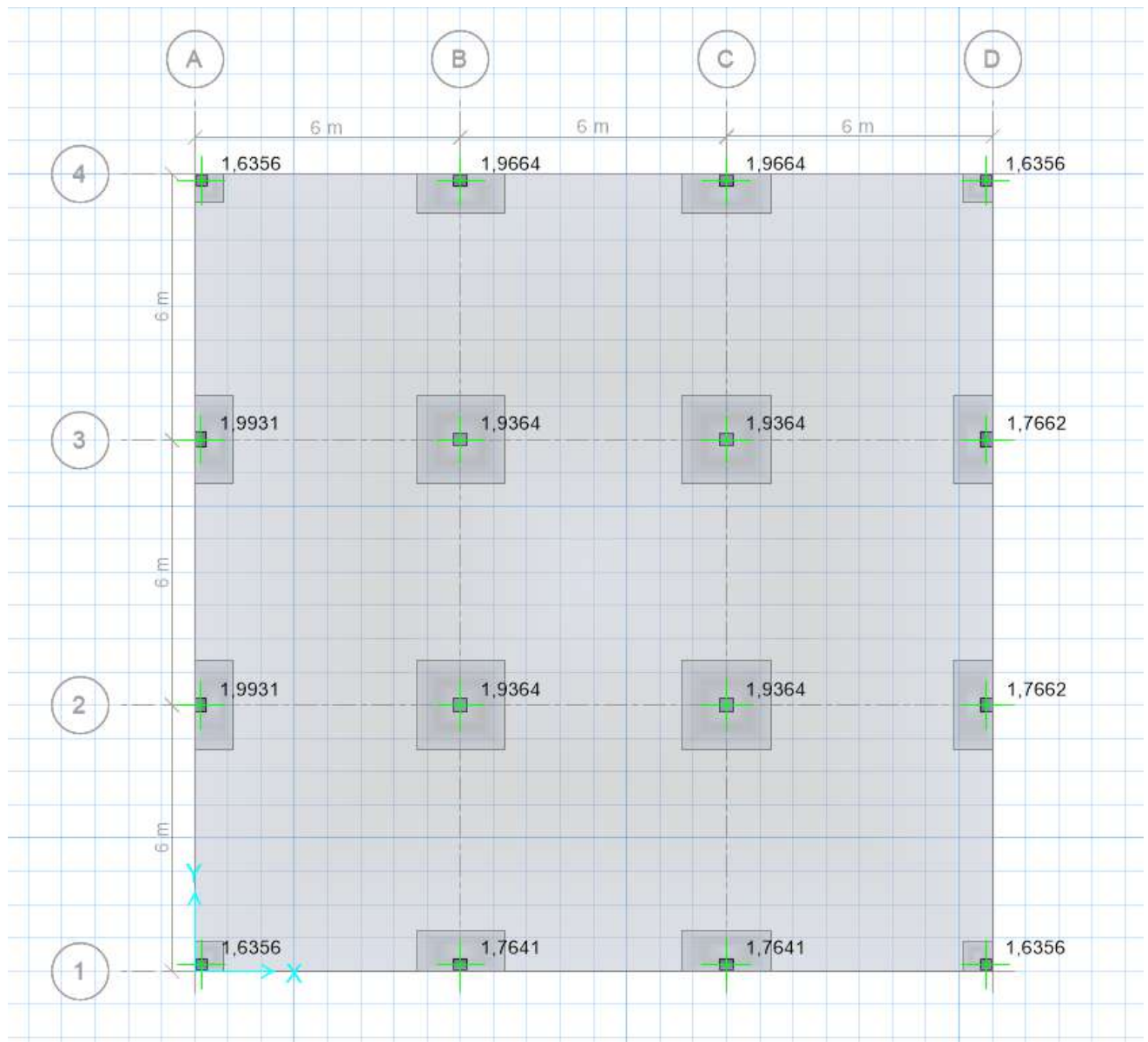
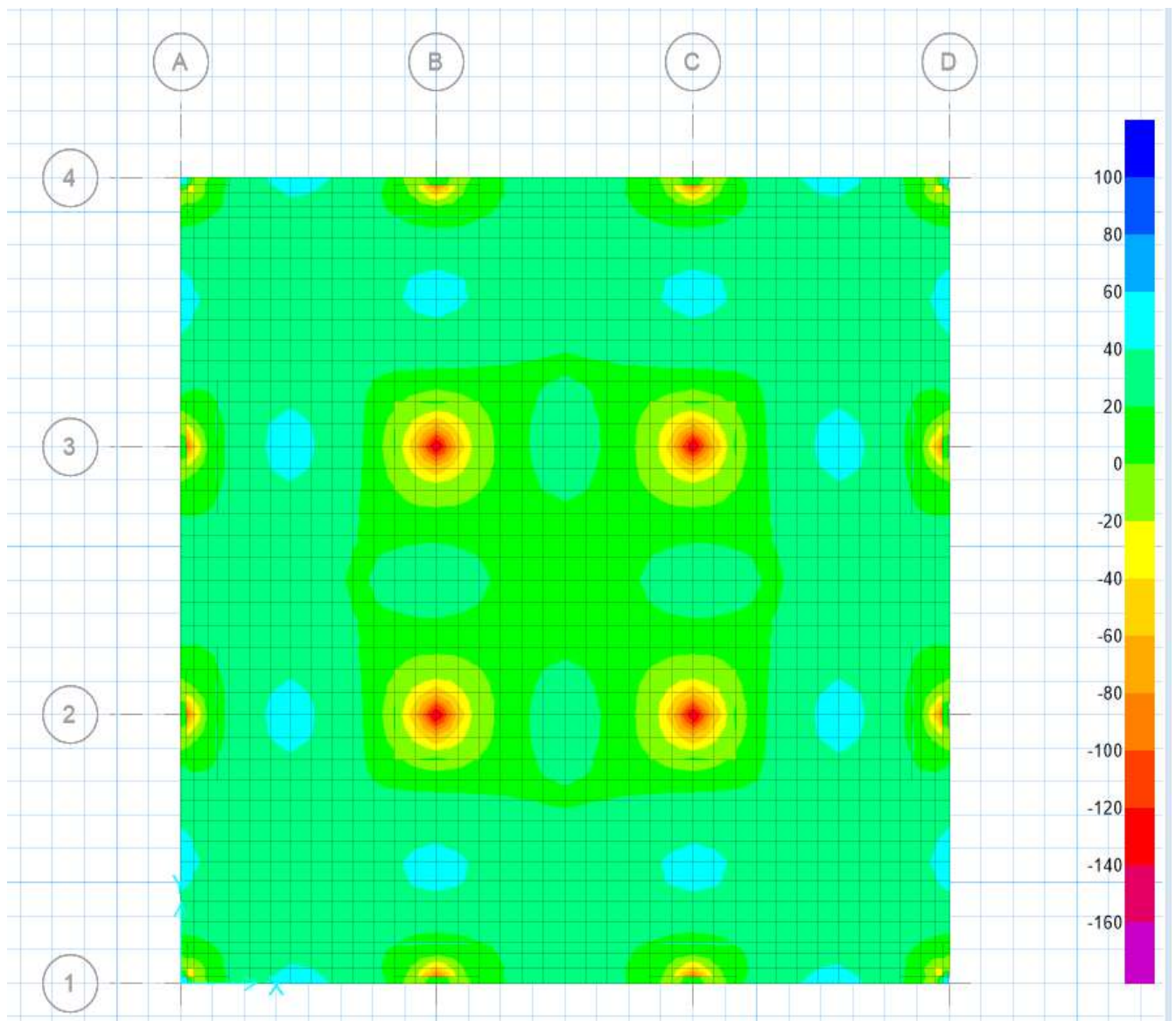


Figura 7. 20 – Relación de punzonamiento para la verificación de secciones en la losa **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.20 se observan los resultados del diseño de la resistencia al corte que de acuerdo a la ec. 6.4.2 del EC cumple con lo especificado $K \leq 2$.

Figura 7. 21 – Gráfico de momentos admisibles



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7.21 se observan los momentos actuantes en la losa para el estado total de cargas, el momento máximo que tiene la sección de diseño es de 86.31 kN-m/m en el las zonas de mayor vano, valor con el que podemos verificar que la sección cumple y el momento es menor al admisible.

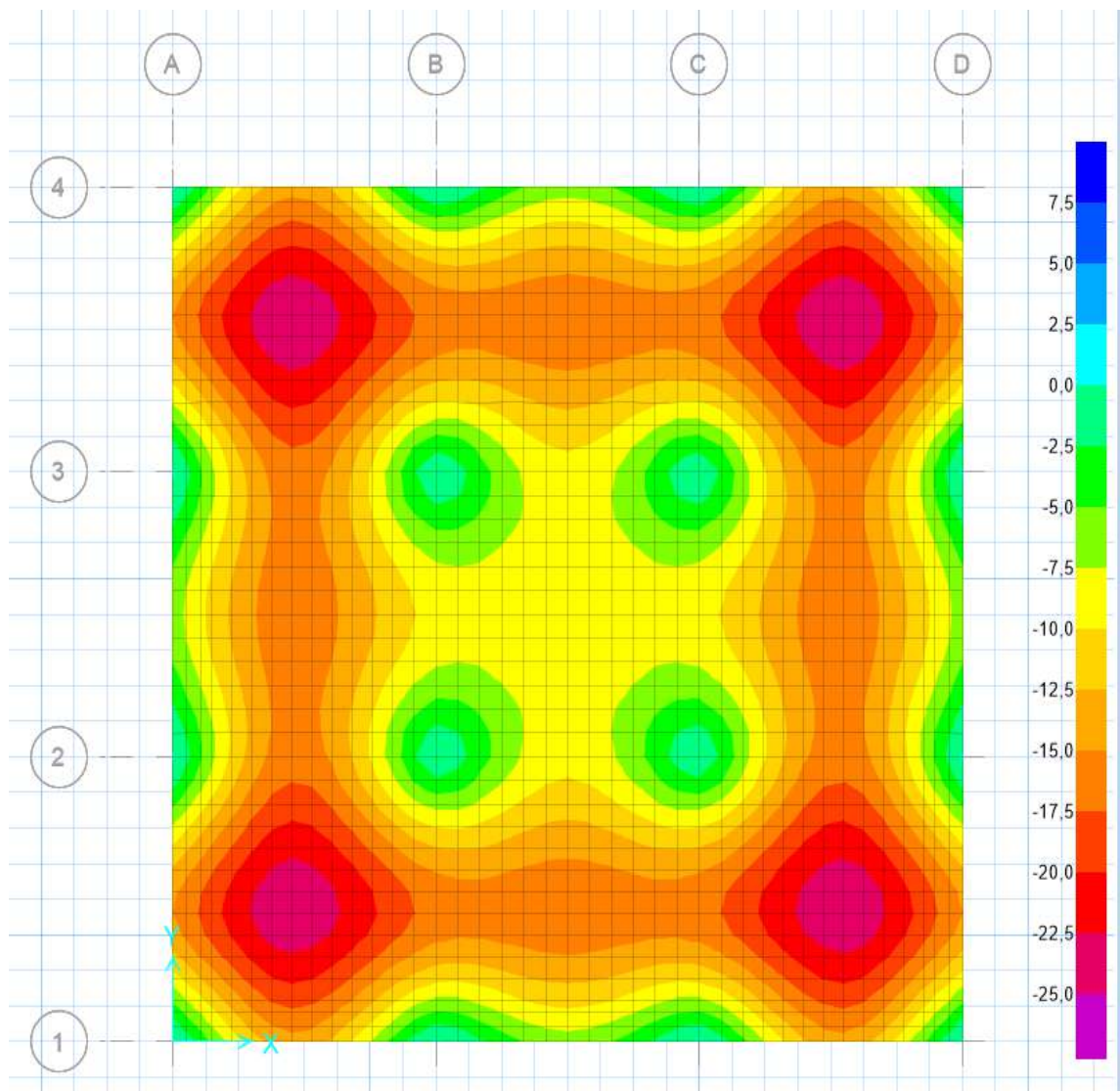


Figura 7. 22 – Deformaciones en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°2 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.22 se observan las deformaciones de las losas en el estado total de servicio del modelo. Las deformaciones máximas en el estado total de carga, incluyendo las cargas muertas y vivas arrojaron una deflexión máxima de 23mm, cumple con las deformaciones máximas permitidas por la norma, en el caso de la deflexión a largo plazo obtienen valores de $L/250$.

Los resultados obtenidos en las losas aligeradas fueron los siguientes:

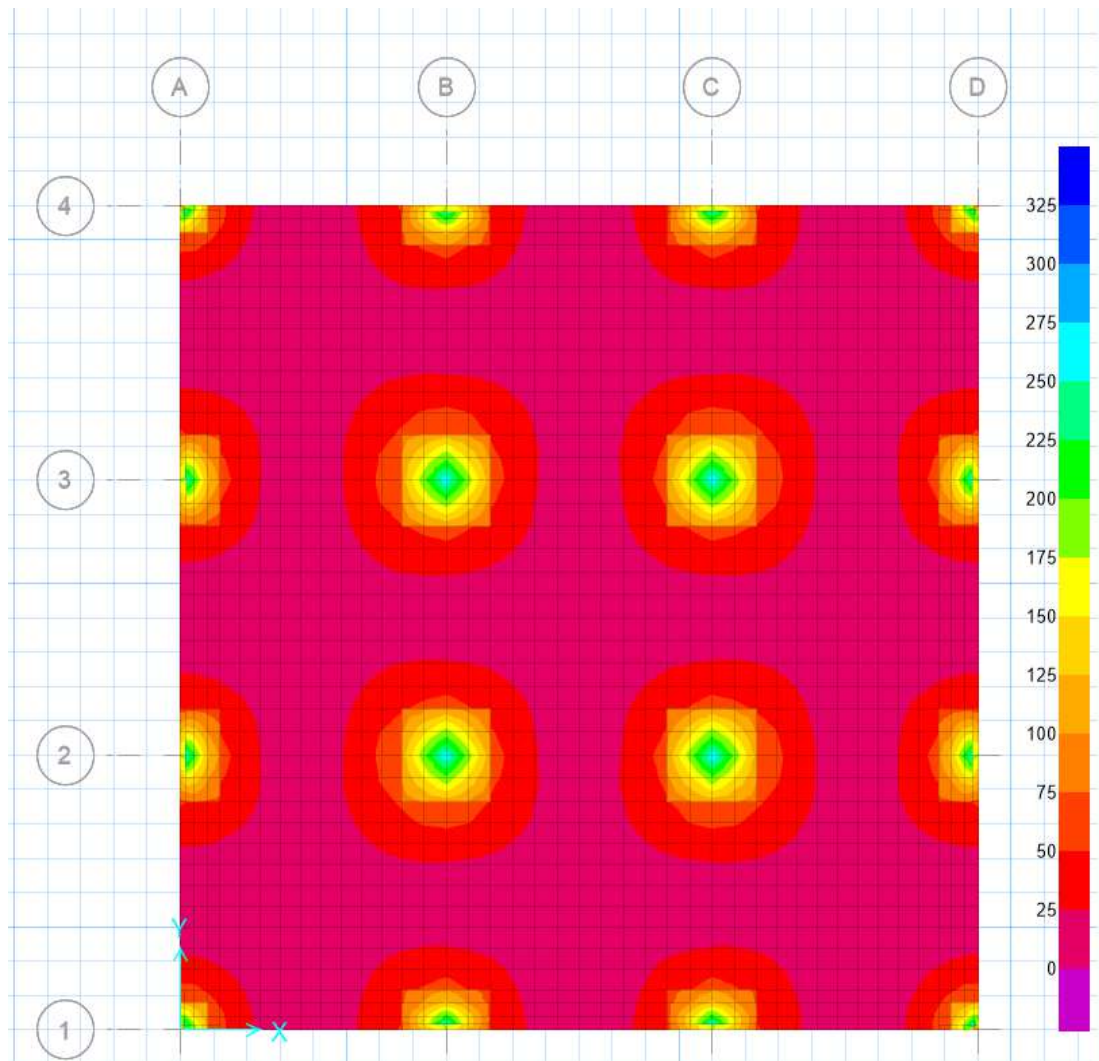


Figura 7. 23 – Cortante máxima en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°2 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.23 se observan los puntos en donde el esfuerzo cortante es mayor, que serían las zonas en donde la losa apoya directamente sobre la columna. El esfuerzo cortante máximo es de 272 kN/m.

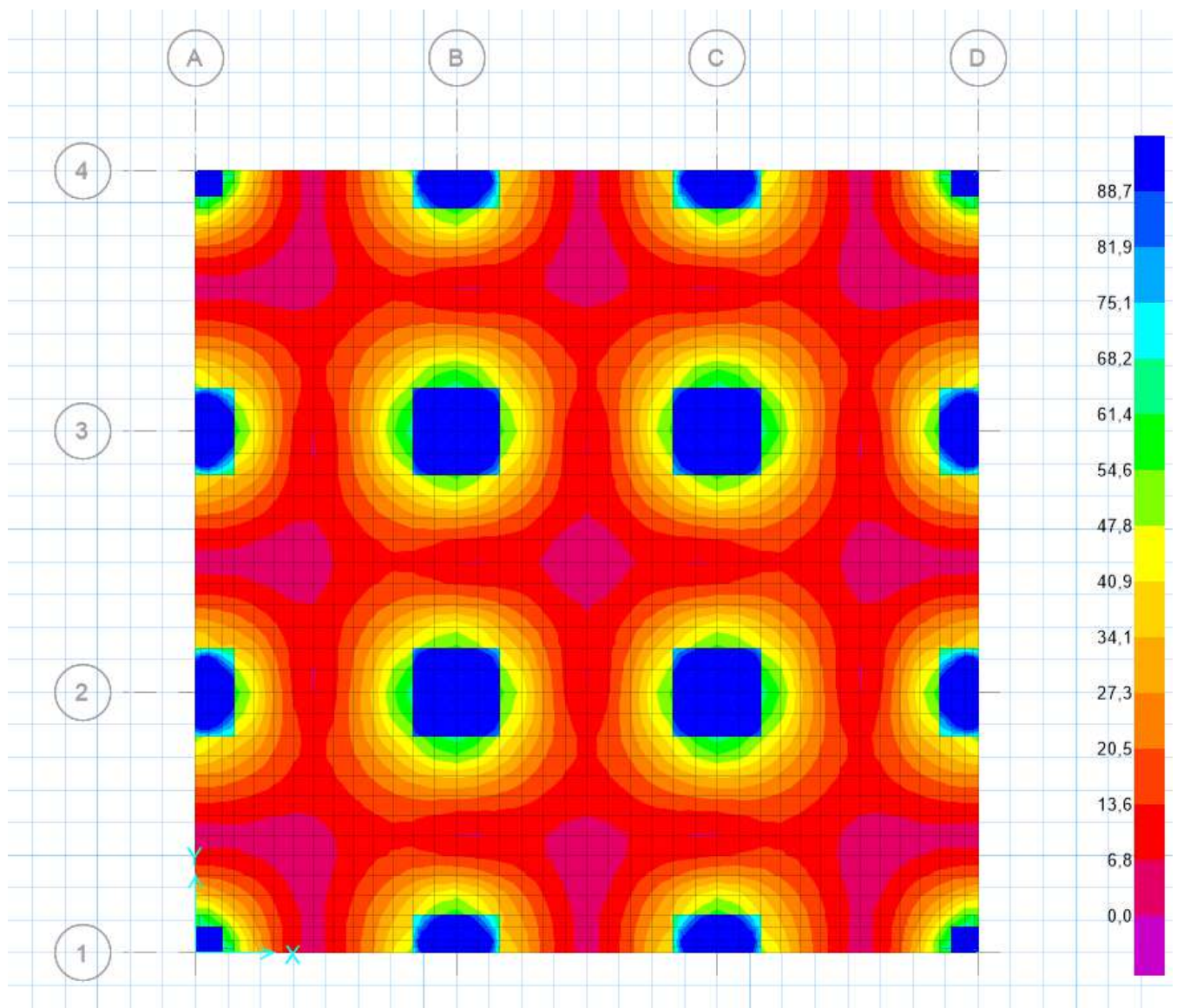


Figura 7. 24 – Perímetro crítico de esfuerzo cortante en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°2 **Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 7.23 pudimos observar que el esfuerzo cortante máximo es de 272 kN/m y sabiendo que el esfuerzo cortante máximo de miembros sin refuerzo es de 87,7 kN/m, en la figura 7.24 se muestra el perímetro crítico *que* debe ser reforzado para que esta no falle.

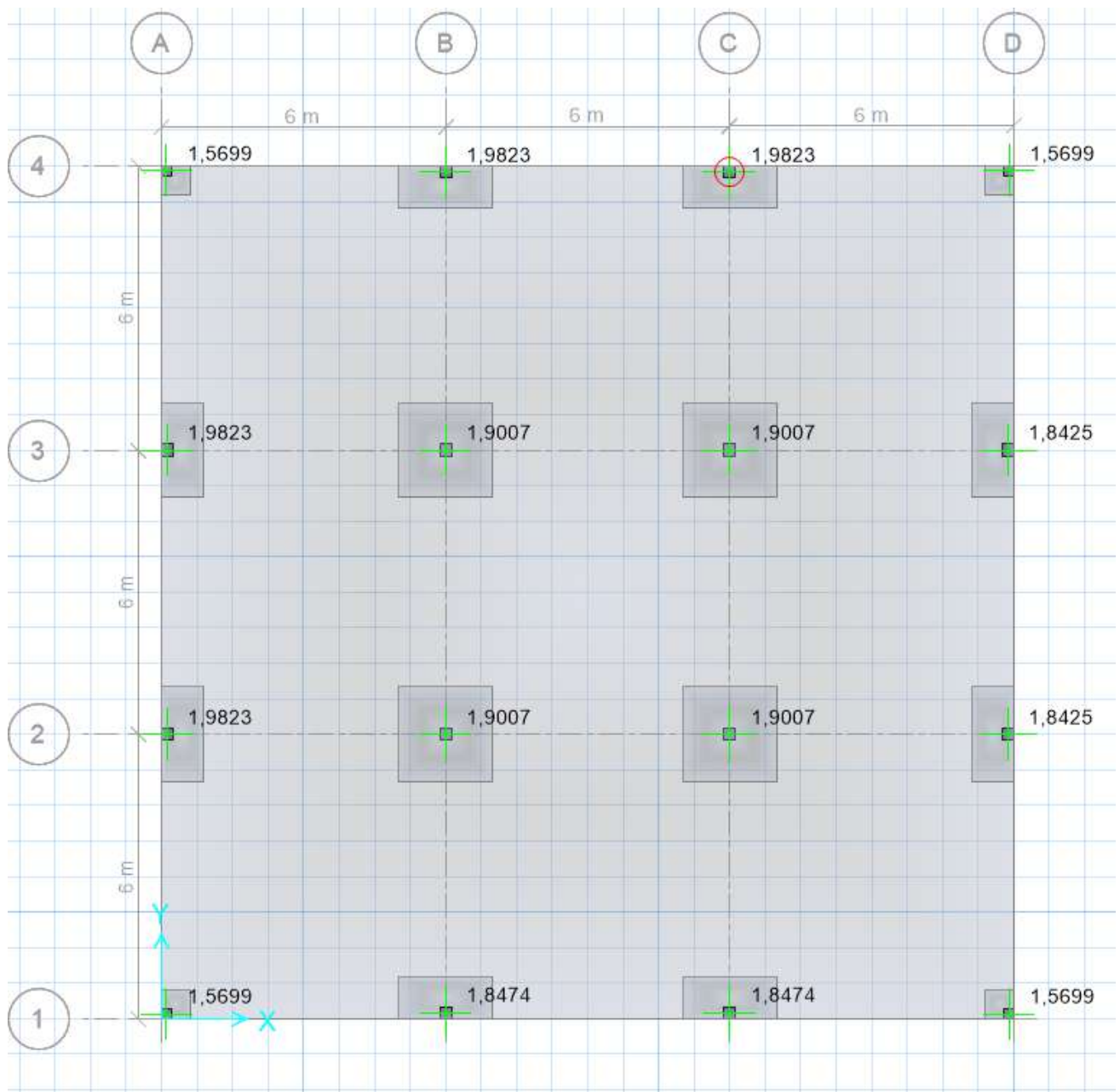


Figura 7. 25 – Relación de punzonamiento para la verificación de secciones en la losa **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.25 se observan los resultados del diseño de la resistencia al corte que de acuerdo a la ec. 6.4.2 del EC cumple con lo especificado $K \leq 2$.

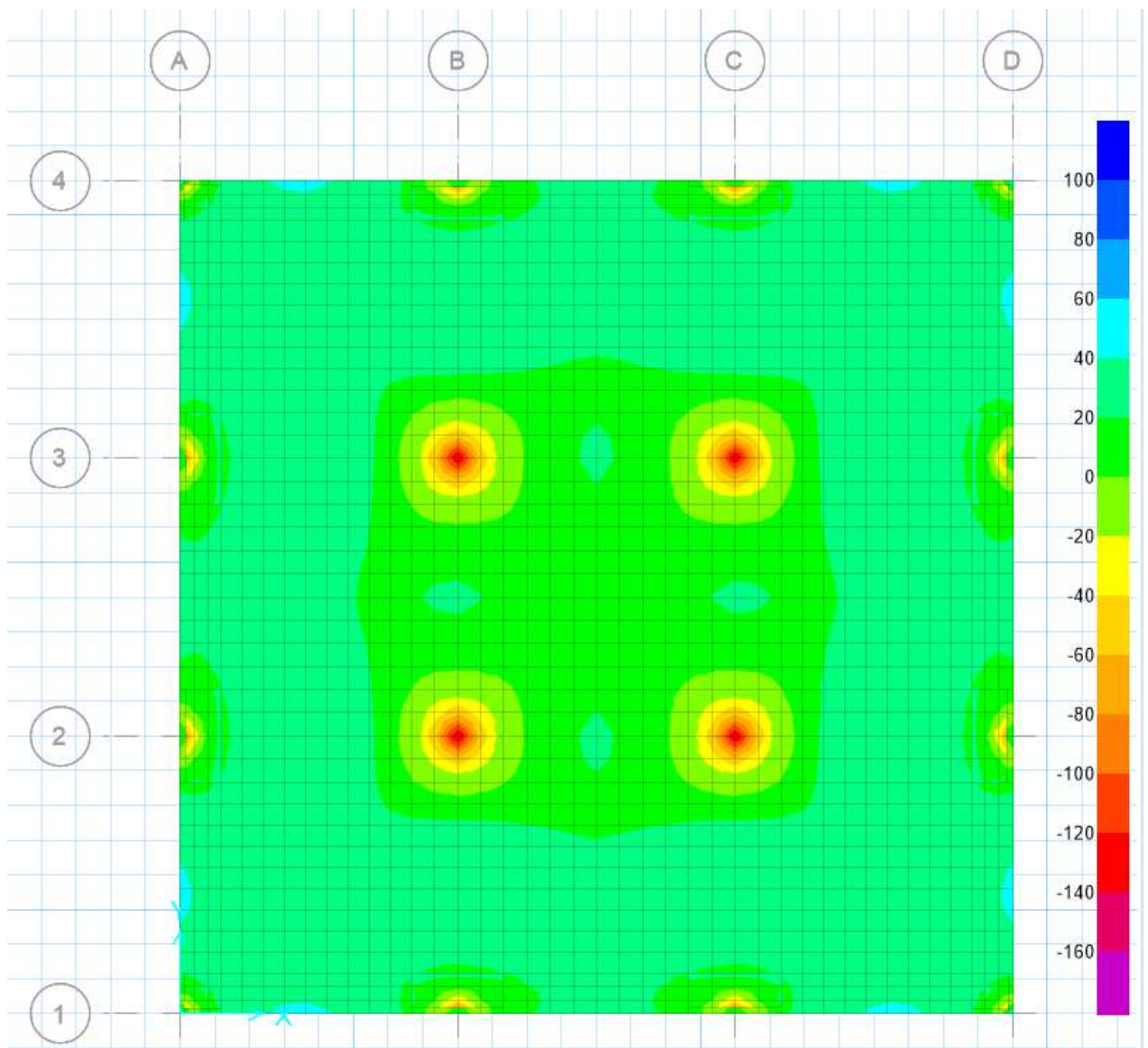


Figura 7. 26– Gráfico de momentos admisibles

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7.26 se observan los momentos actuantes en la losa para el estado total de cargas, el momento máximo que tiene la sección de diseño es de 53.2 kN-m/m en el las zonas de mayor vano, valor con el que podemos verificar que la sección cumple y el momento es menor al admisible.

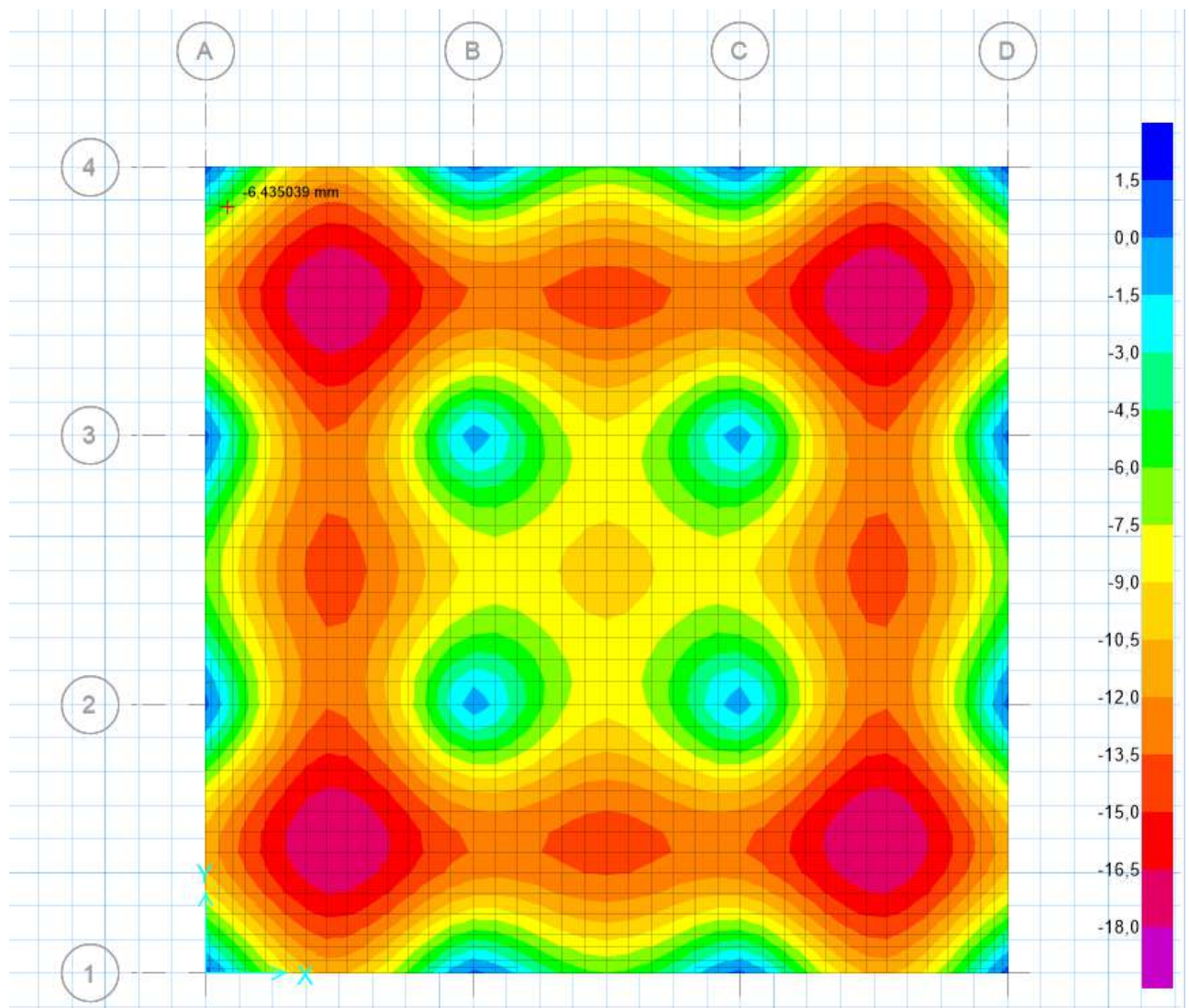


Figura 7. 27 – Deformaciones en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°2 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.27 se observan las deformaciones de las losas en el estado total de servicio del modelo. Las deformaciones máximas en el estado total de carga, incluyendo las cargas muertas y vivas arrojaron una deflexión máxima de 18mm, cumple con las deformaciones máximas permitidas por la norma, en el caso de la deflexión a largo plazo obtienen valores de $L/250$.

Modelo N° 3: Losas macizas con vanos de 7m

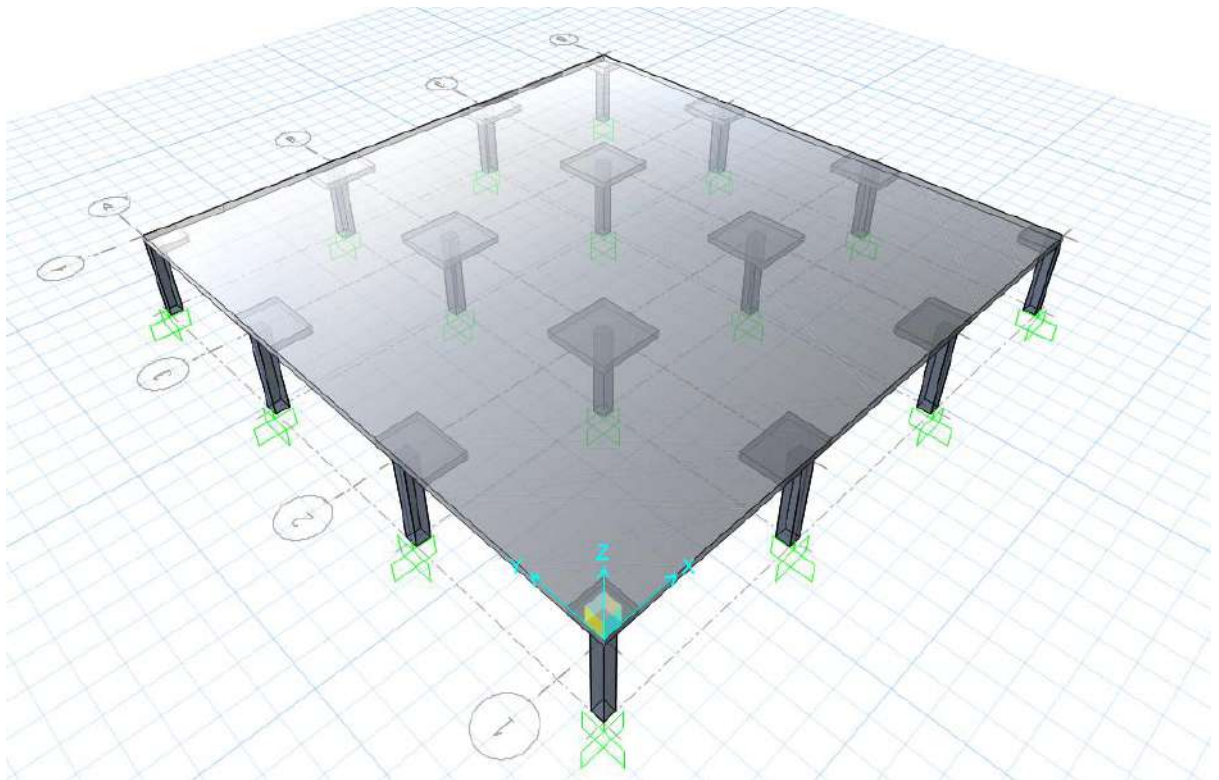


Figura 7. 28 – Losas macizas, con ábacos intermedios y vanos de 7m.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7.28 se observa el diseño de una losa con ábacos perimetrales y centrales, para este diseño se utilizan losas macizas. Este modelo cuenta con nueve losas de 6x6m cada una con pilarización cada 7 metros.

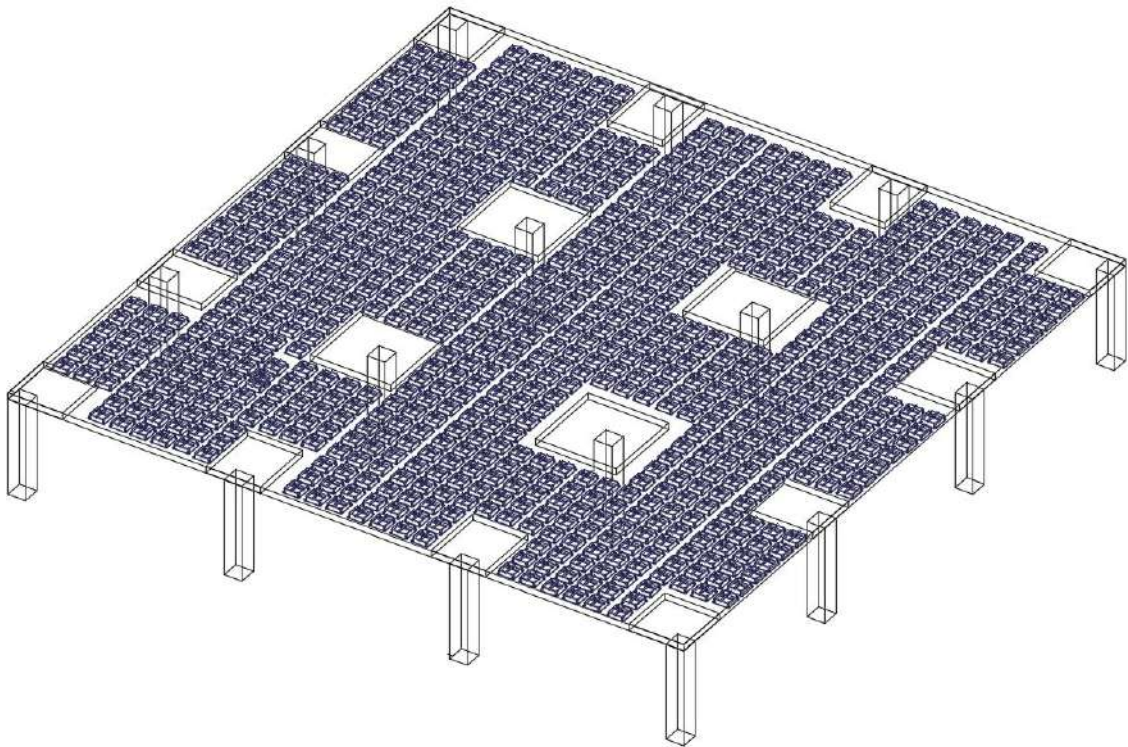


Figura 7. 29 – Losas aligeradas, con ábacos intermedios y vanos de 7m.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7.29 se observa el diseño de una losa con ábacos perimetrales y centrales, para este diseño se utilizan losas aligeradas con el sistema U-Boot, utilizando encofrados de 52x52x16cm. Este modelo cuenta con nueve losas de 7x7m cada una con pilarización cada 7 metros.

Los resultados obtenidos en las losas macizas fueron los siguientes:

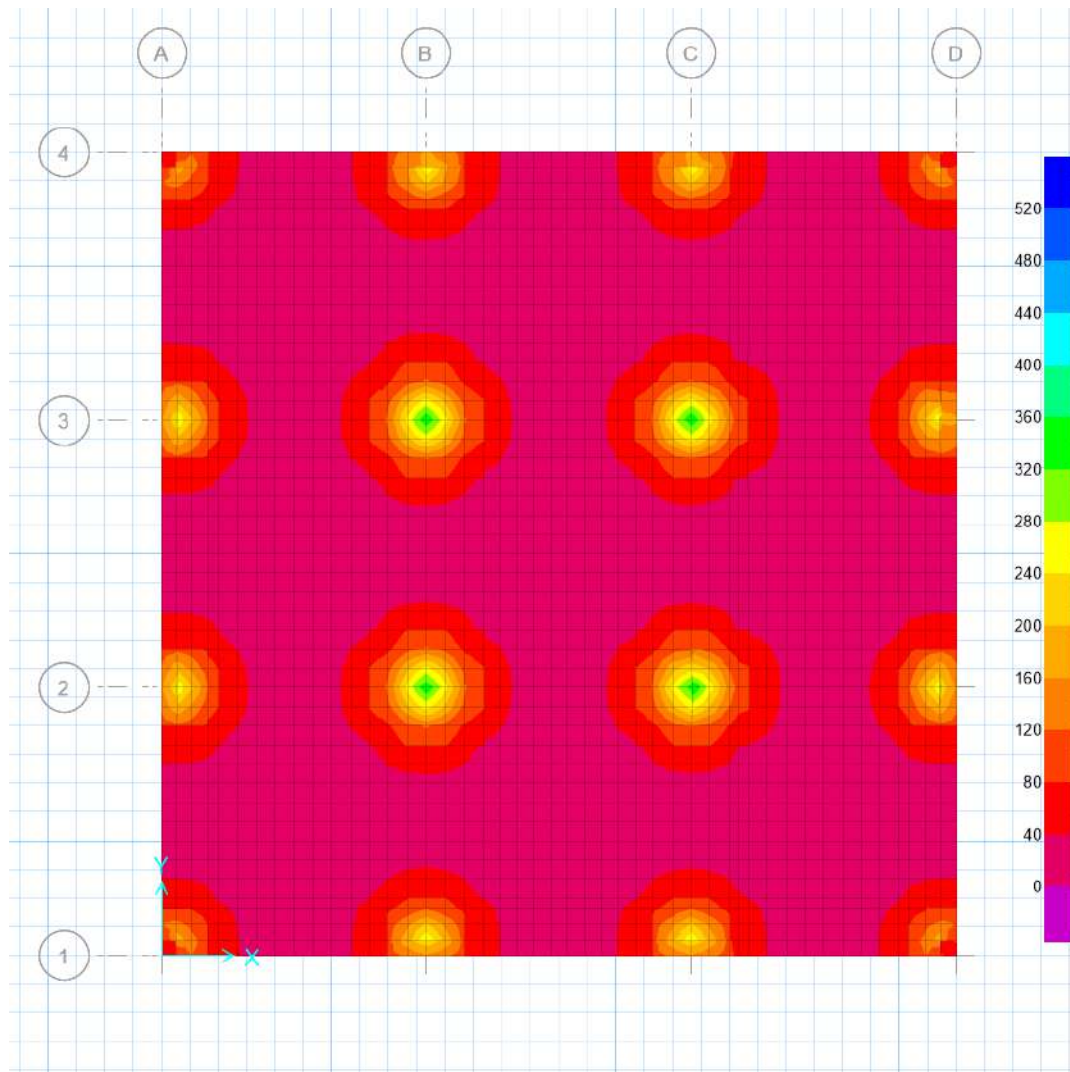


Figura 7. 30 – Cortante máxima en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°3 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.30 se observan los puntos en donde el esfuerzo cortante es mayor, que serían las zonas en donde la losa apoya directamente sobre la columna. El esfuerzo cortante máximo es de 458.2 kN/m.

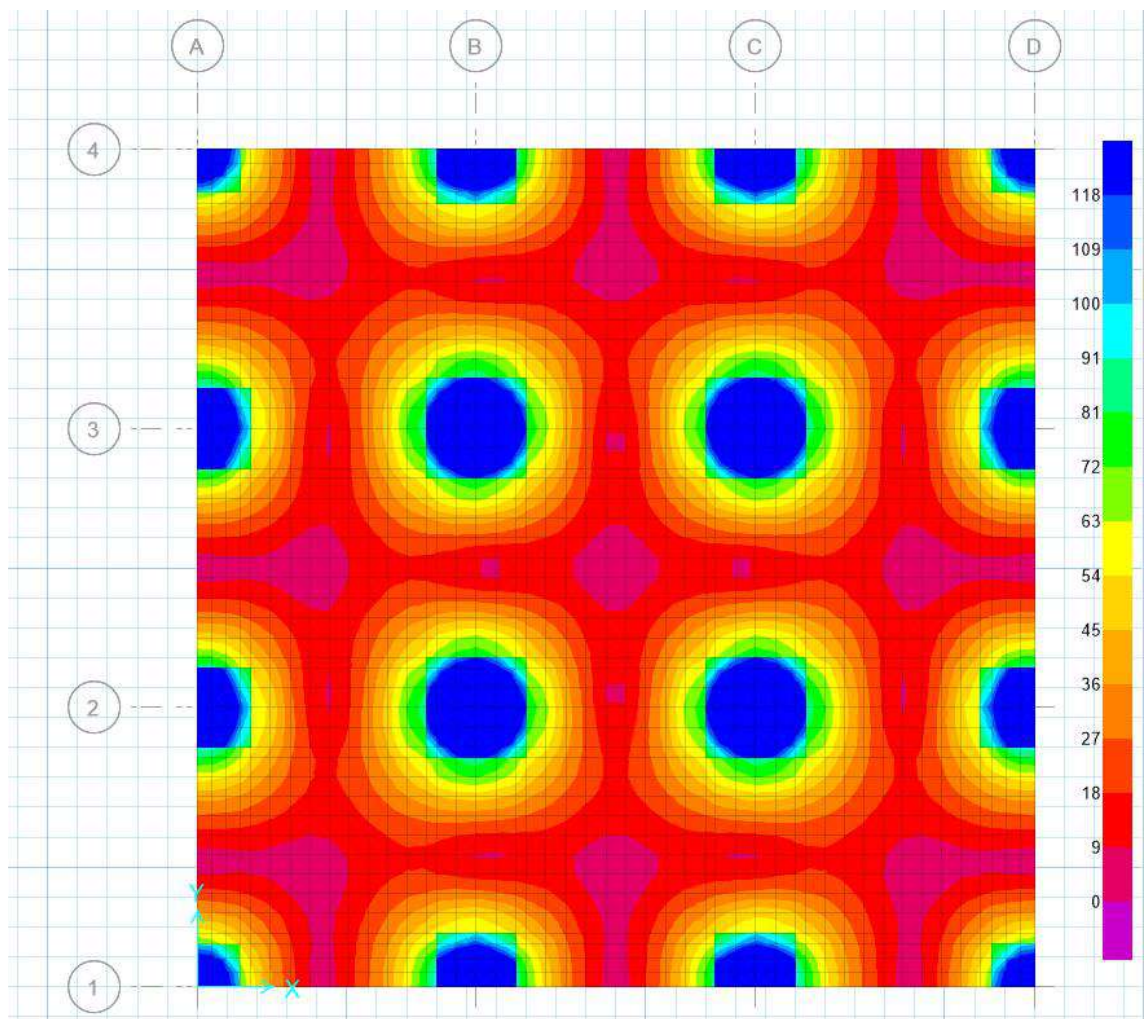


Figura 7. 31 – Perímetro crítico de esfuerzo cortante en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°3 **Fuente** Elaboración propia.

En la figura 7.30 pudimos observar que el esfuerzo cortante máximo es de 458,2 kN/m y sabiendo que el esfuerzo cortante máximo de miembros sin refuerzo es de 117,87 kN/m, en la figura 7.31 se muestra el perímetro crítico que debe ser reforzado para que esta no falle.



Figura 7. 32 – Relación de punzonamiento para la verificación de secciones en la losa **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.32 se observan los resultados del diseño de la resistencia al corte que de acuerdo a la ec. 6.4.2 del EC cumple con lo especificado $K \leq 2$.

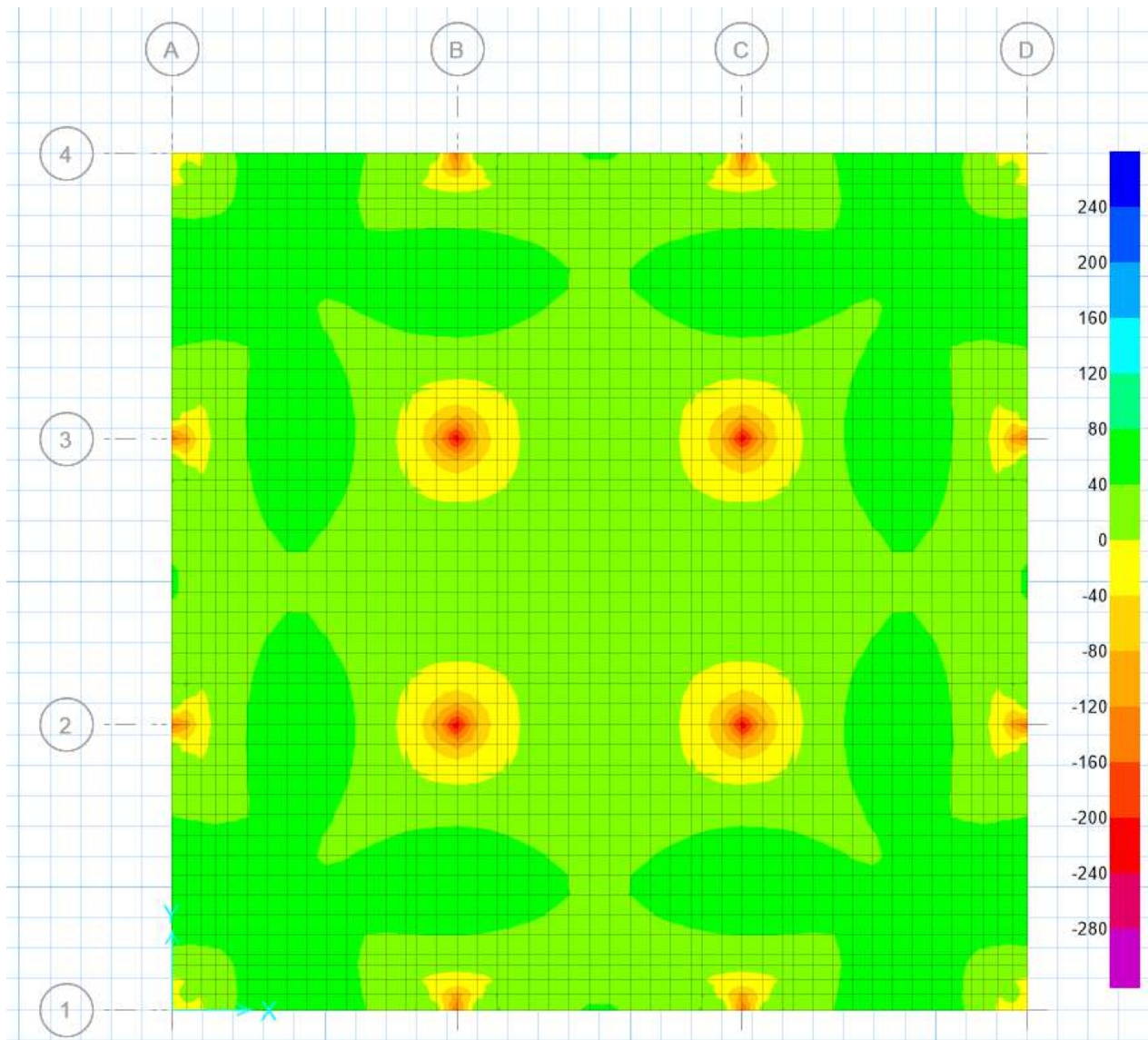


Figura 7. 33– Gráfico de momentos admisibles

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7.33 se observan los momentos actuantes en la losa para el estado total de cargas, el momento máximo que tiene la sección de diseño es de 126.7 kN-m/m en las zonas de mayor vano, valor con el que podemos verificar que la sección cumple y el momento es menor al admisible.

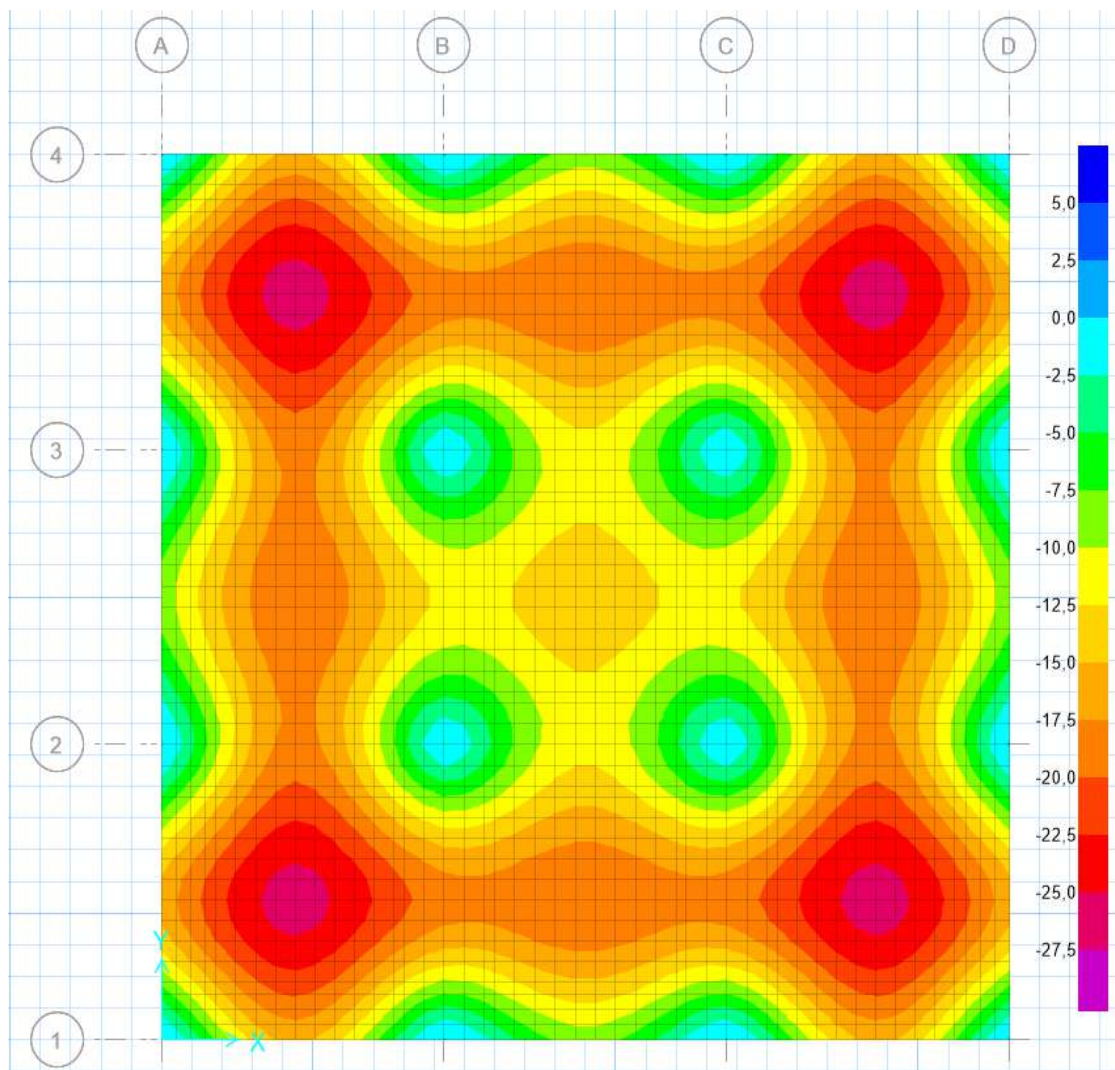


Figura 7. 34 – Deformaciones en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°3 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.34 se observan las deformaciones de las losas en el estado total de servicio del modelo. Las deformaciones máximas en el estado total de carga, incluyendo las cargas muertas y vivas arrojaron una deflexión máxima. de 26mm, cumple con las deformaciones máximas permitidas por la norma, en el caso de la deflexión a largo plazo obtienen valores de $L/250$.

Los resultados obtenidos en las losas aligeradas fueron los siguientes:

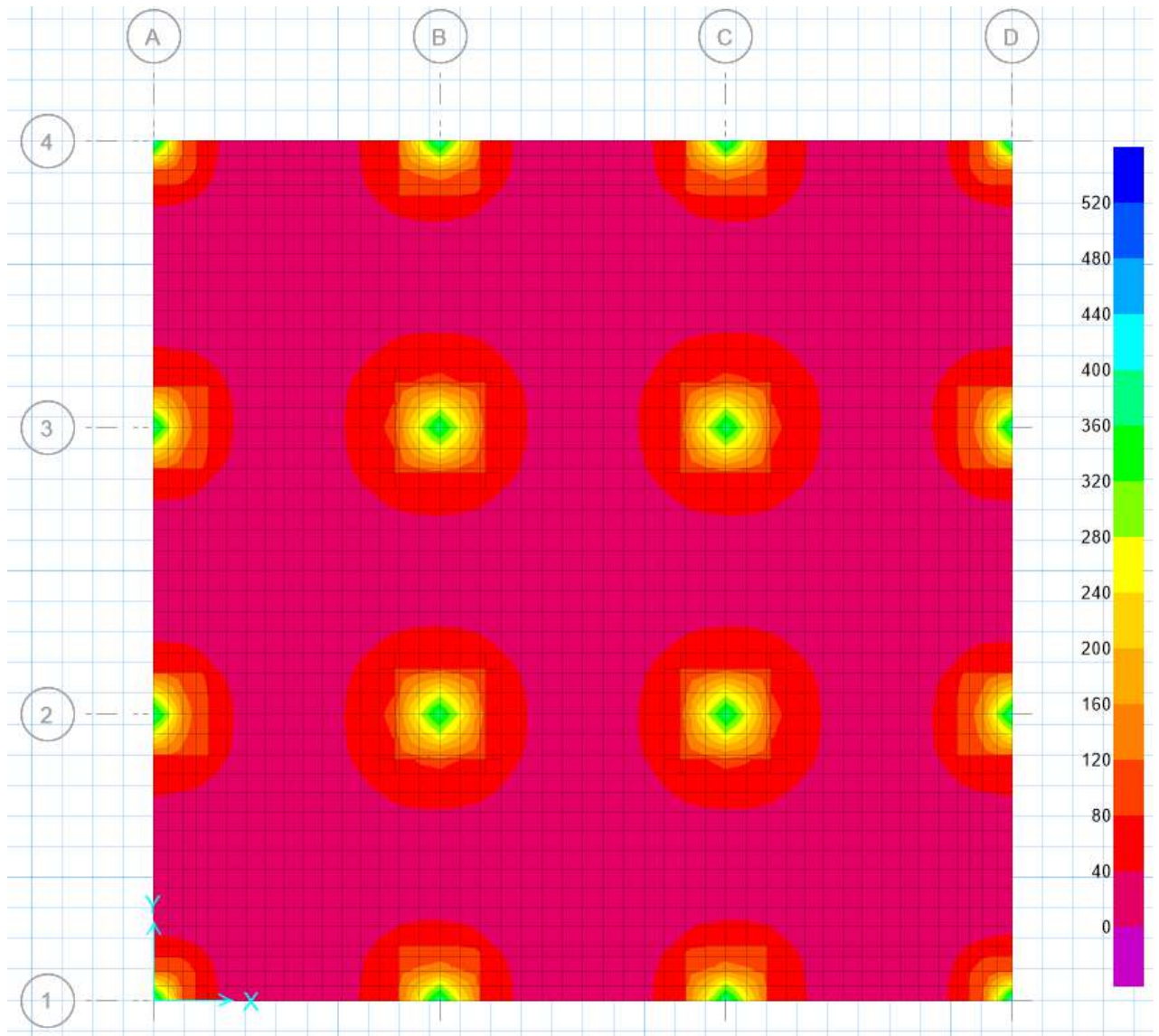


Figura 7. 35– Cortante máxima en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°3 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.35 se observan los puntos en donde el esfuerzo cortante es mayor, que serían las zonas en donde la losa apoya directamente sobre la columna. El esfuerzo cortante máximo es de 407,25 kN/m.

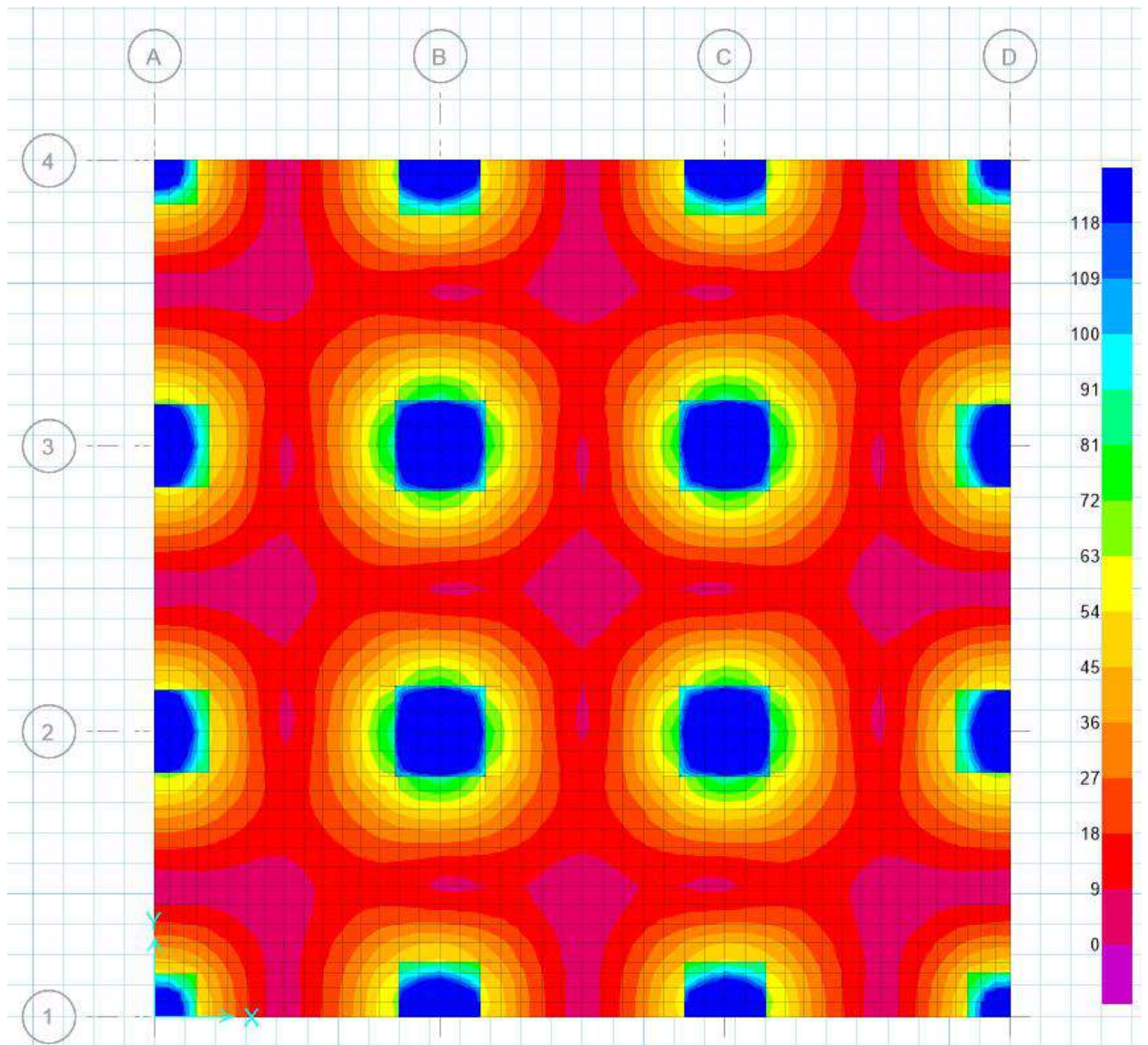


Figura 7. 36 – Perímetro crítico de esfuerzo cortante en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°3 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.35 pudimos observar que el esfuerzo cortante máximo es de 407,25 kN/m y sabiendo que el esfuerzo cortante máximo de miembros sin refuerzo es de 117,87 kN/m, en la figura 7.36 se muestra el perímetro crítico *que* debe ser reforzado para que esta no falle.

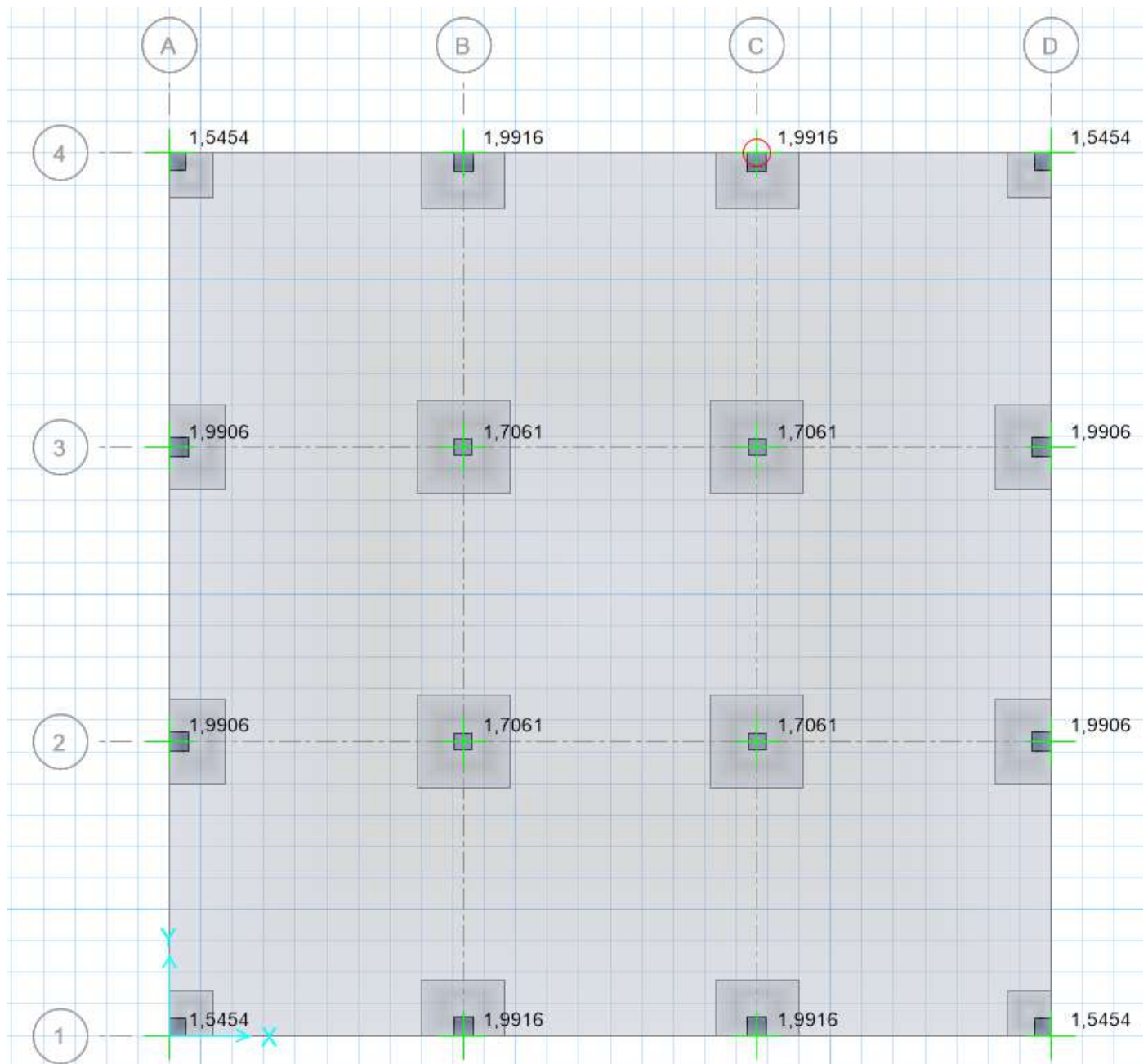


Figura 7. 37 –Relación de punzonamiento para la verificación de secciones en la losa **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 5.36 se observan los resultados del diseño de la resistencia al corte que de acuerdo a la ec. 6.4.2 del EC cumple con lo especificado $K \leq 2$.

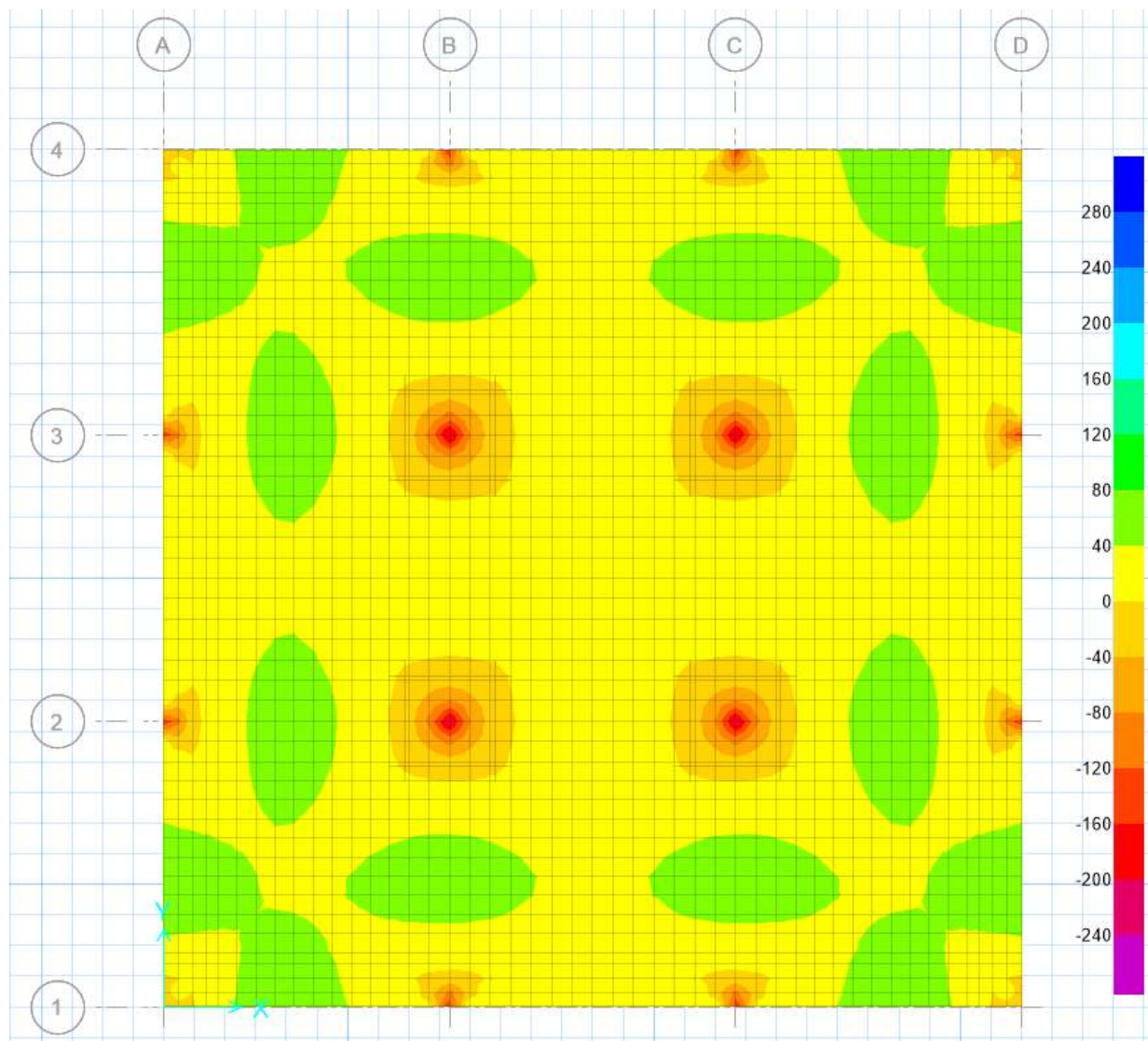


Figura 7. 38 – Gráfico de momentos admisibles.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7.38 se observan los momentos actuantes en la losa para el estado total de cargas, el momento máximo que tiene la sección de diseño es de 109.62 kN-m/m en el las zonas de mayor vano, valor con el que podemos verificar que la sección cumple y el momento es menor al admisible.

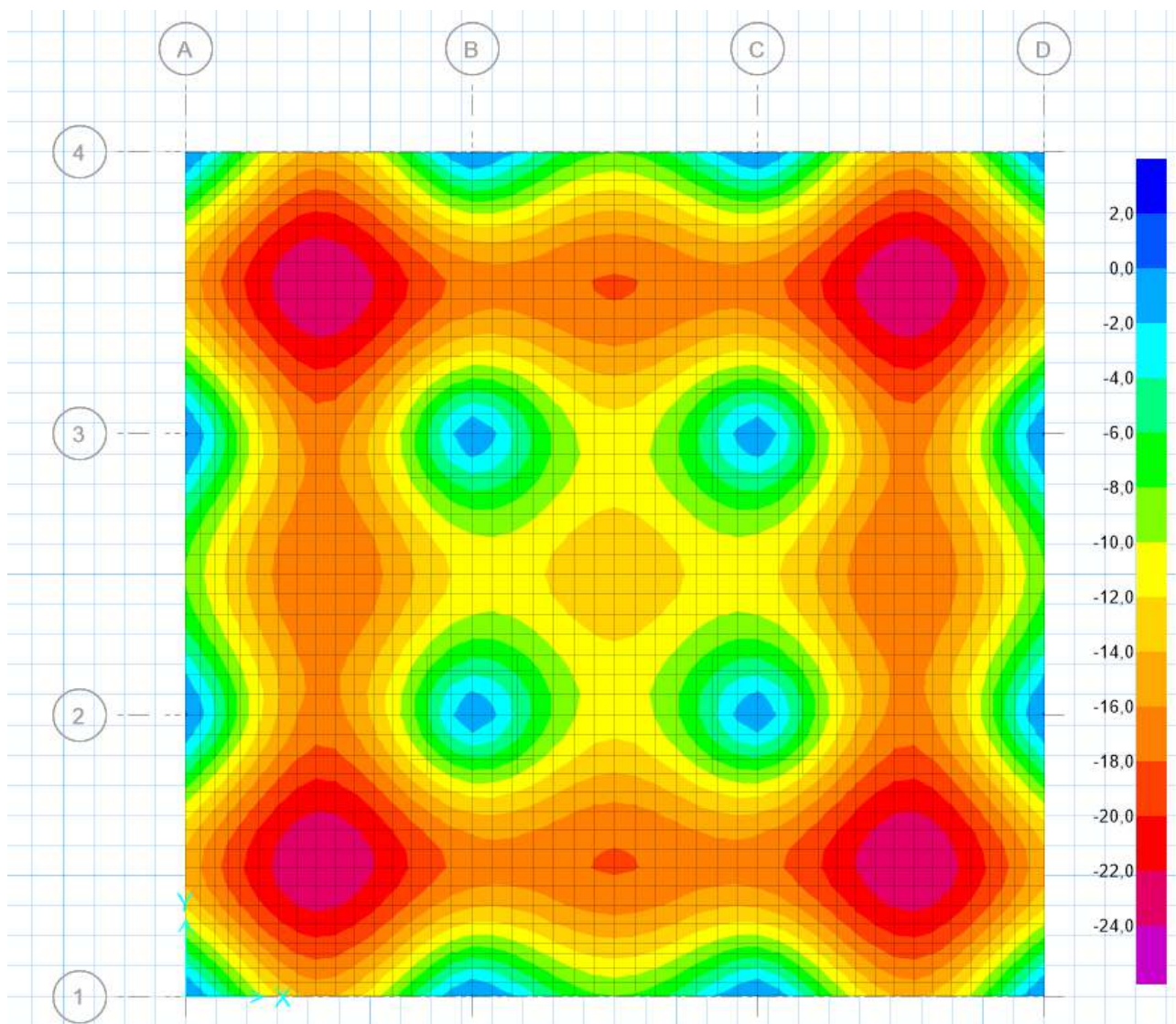


Figura 7. 39 – Deformaciones en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°3 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.39 se observan las deformaciones de las losas en el estado total de servicio del modelo. Las deformaciones máximas en el estado total de carga, incluyendo las cargas muertas y vivas arrojaron una deflexión máxima. de 22mm, cumple con las deformaciones máximas permitidas por la norma, en el caso de la deflexión a largo plazo obtienen valores de $L/250$.

Modelo N° 4: Losas macizas con vanos de 8m

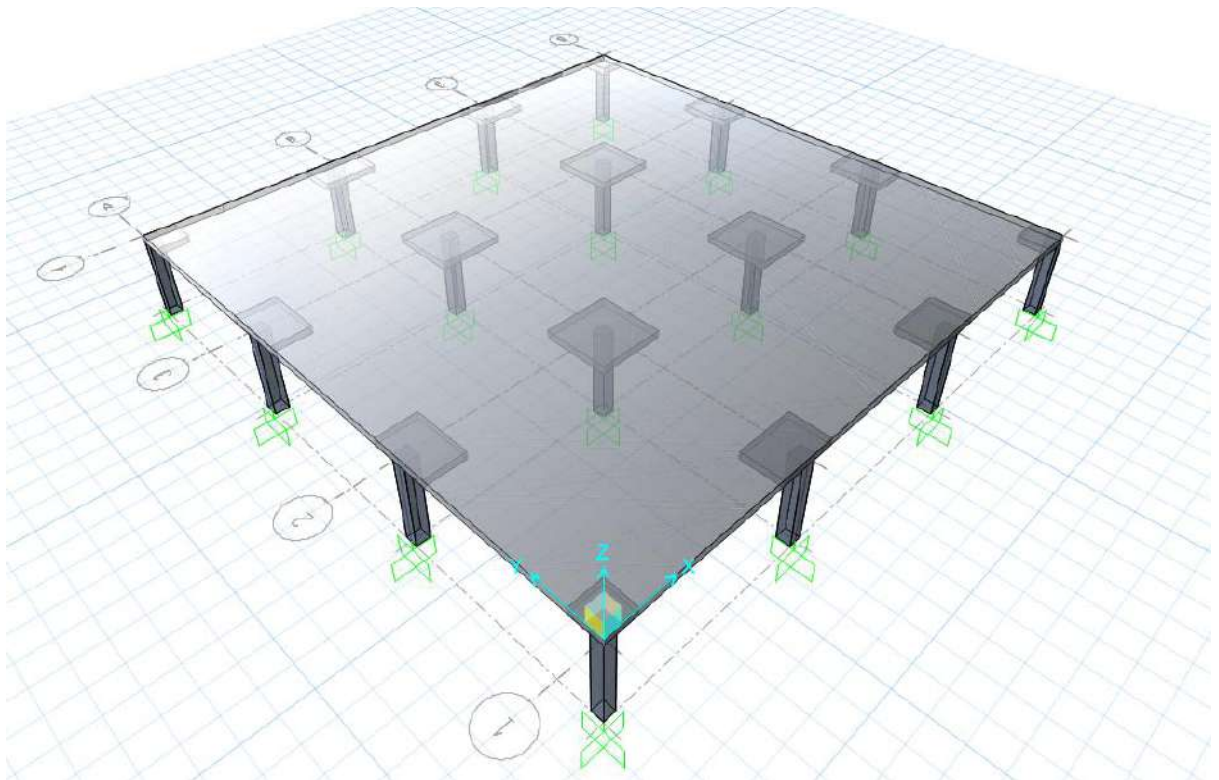


Figura 7. 40 – Losas macizas, con ábacos intermedios y vanos de 8m.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7.40 se observa el diseño de una losa con ábacos perimetrales y centrales, para este diseño se utilizan losas macizas. Este modelo cuenta con nueve losas de 8x8m cada una con pilarización cada 8 metros.

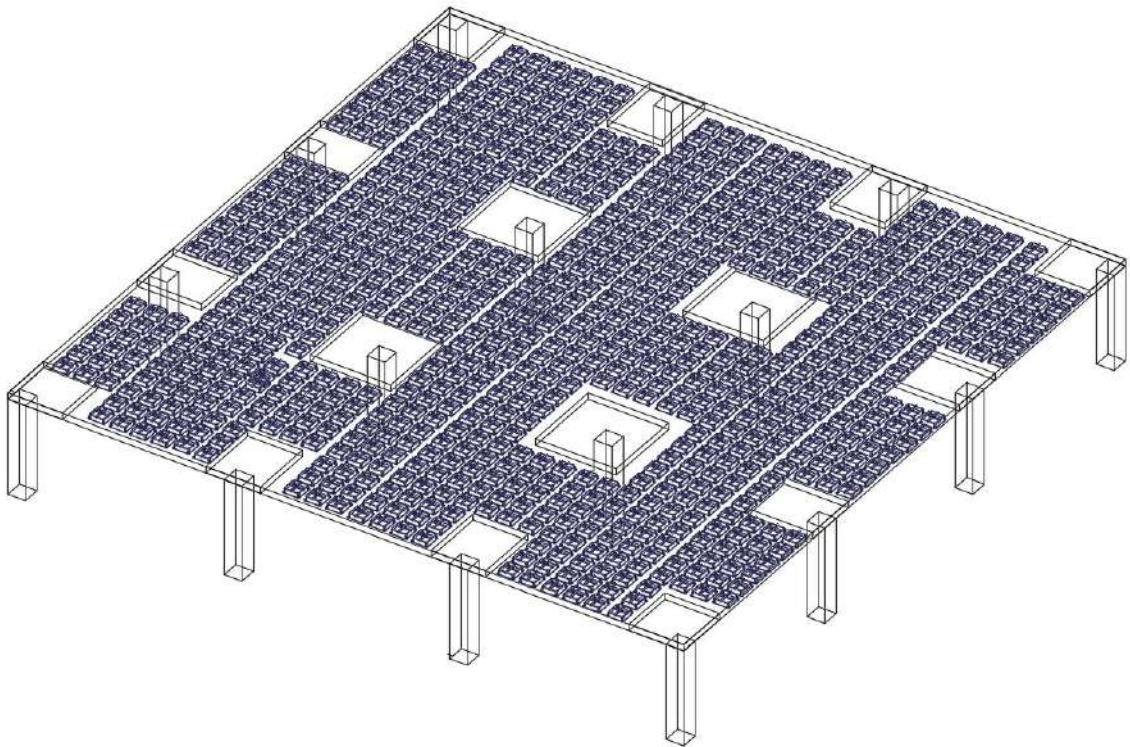


Figura 7. 41– Losas macizas, con ábacos intermedios y vanos de 8m.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7.41 se observa el diseño de una losa con ábacos perimetrales y centrales, para este diseño se utilizan losas aligeradas con encofrados de 52x52x16. Este modelo cuenta con nueve losas de 8x8m cada una con pilarización cada 8 metros.

Los resultados obtenidos en las losas macizas fueron los siguientes:

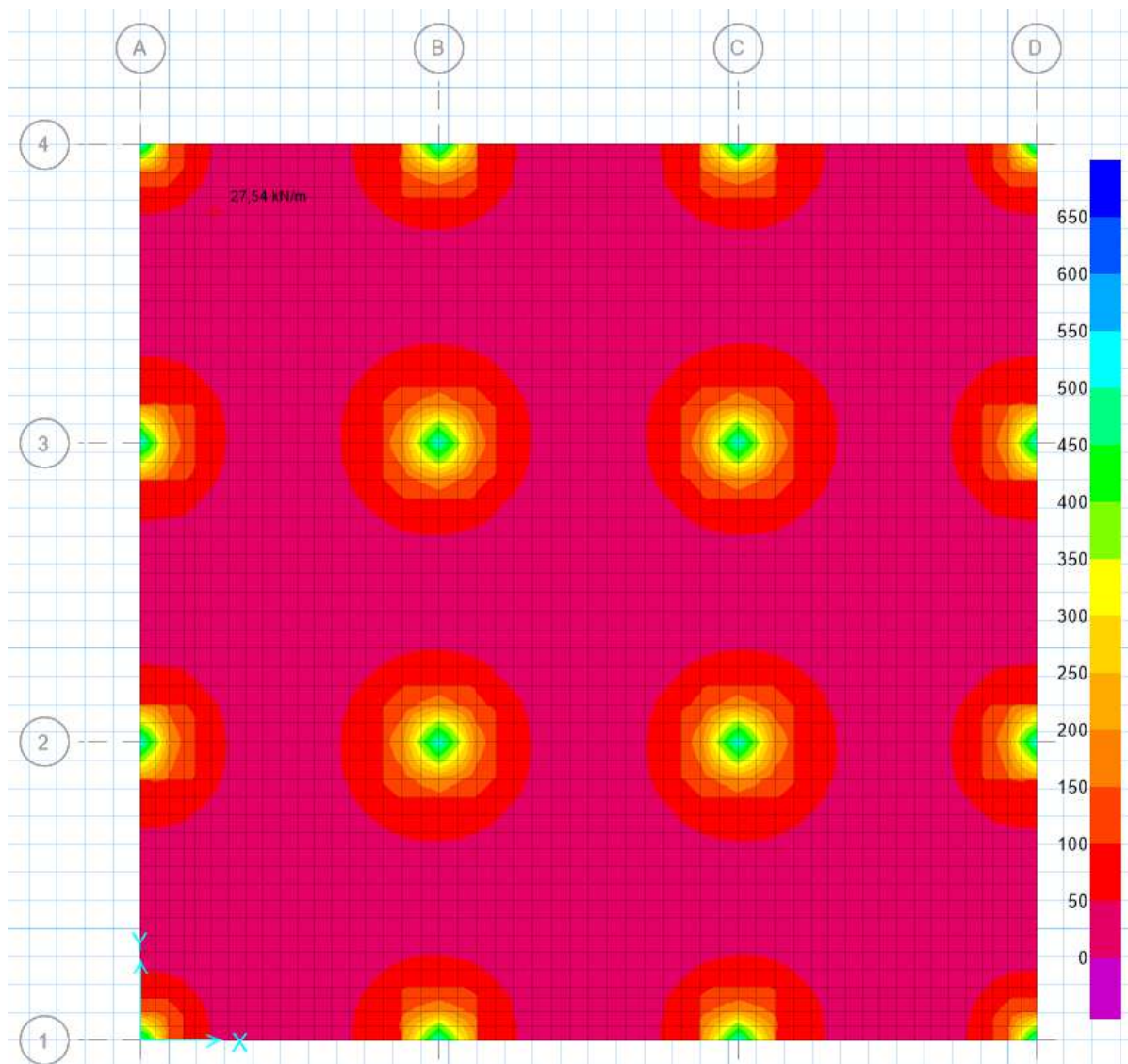


Figura 7. 42 – Cortante máxima en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°4 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.42 se observan los puntos en donde el esfuerzo cortante es mayor, que serían las zonas en donde la losa apoya directamente sobre la columna. El esfuerzo cortante máximo es de 635.39 kN/m.

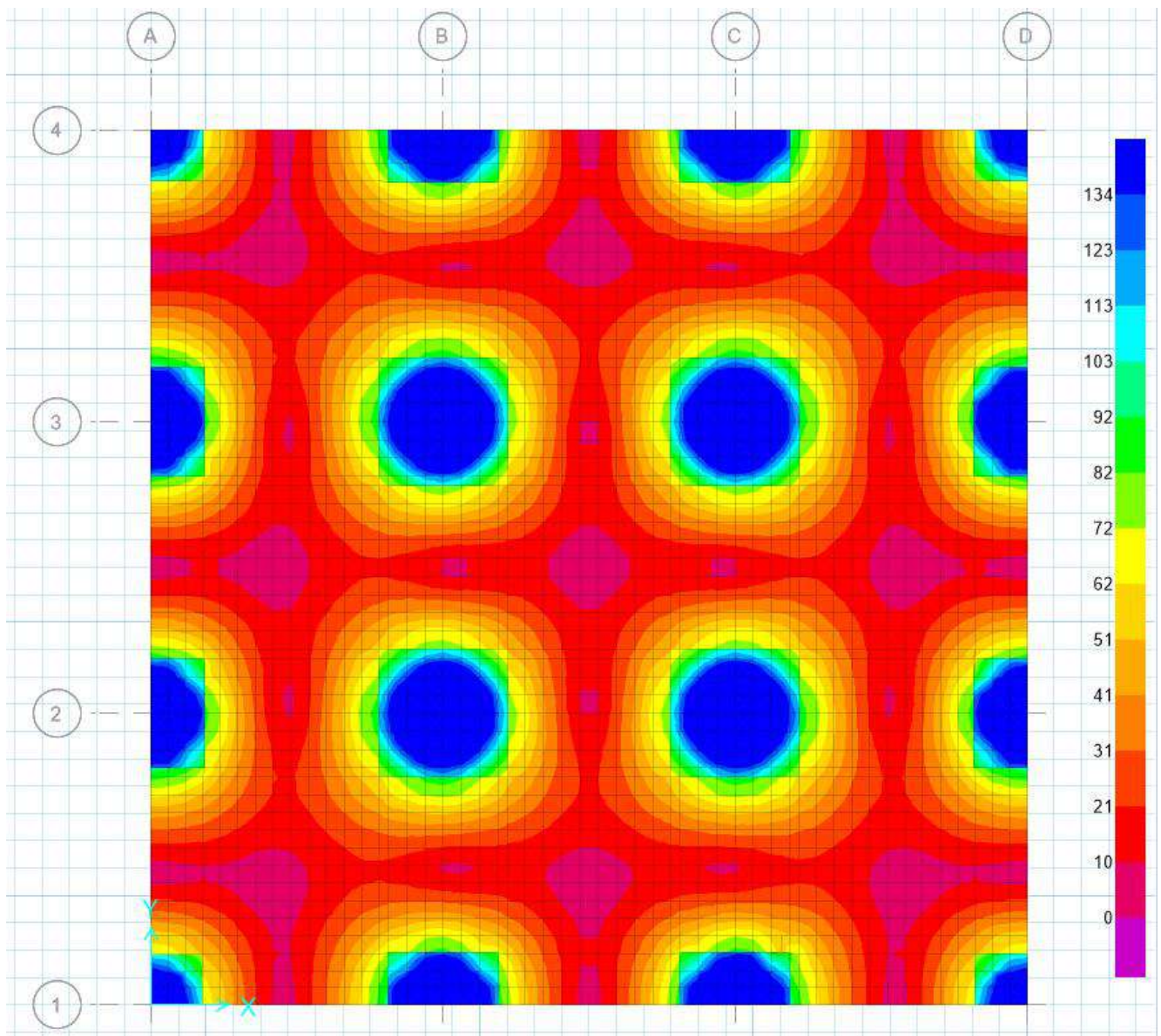


Figura 7. 43 – Perímetro crítico de esfuerzo cortante en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°4 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.42 pudimos observar que el esfuerzo cortante máximo es de 635.298 kN/m y sabiendo que el esfuerzo cortante máximo de miembros sin refuerzo es de 133.54 kN/m, en la figura 7.43 se muestra el perímetro crítico que debe ser reforzado para que esta no falle.

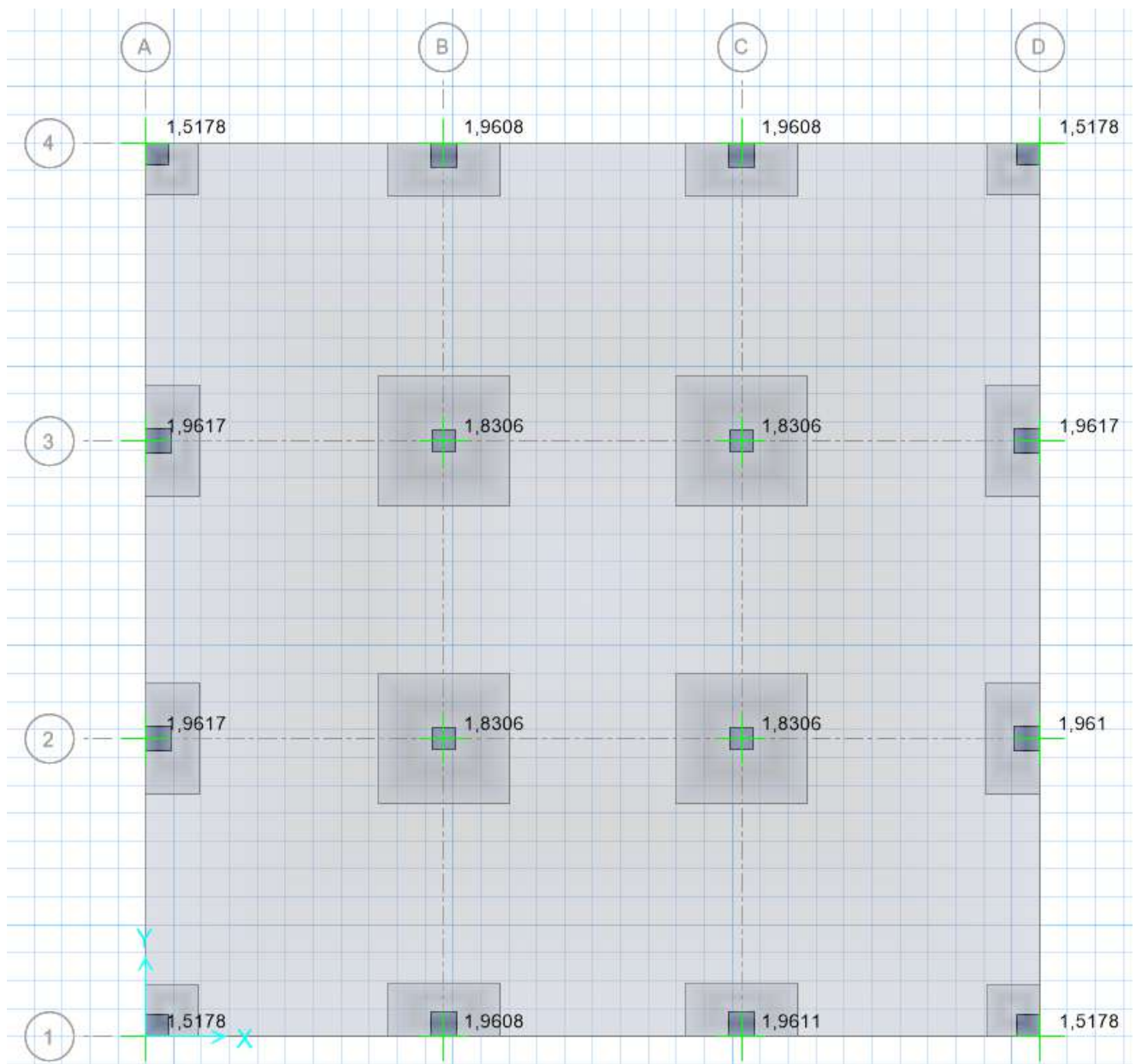


Figura 7. 44 – Relación de punzonamiento para la verificación de secciones en la losa **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.44 se observan los resultados del diseño de la resistencia al corte que de acuerdo a la ec. 6.4.2 del EC cumple con lo especificado $K \leq 2$

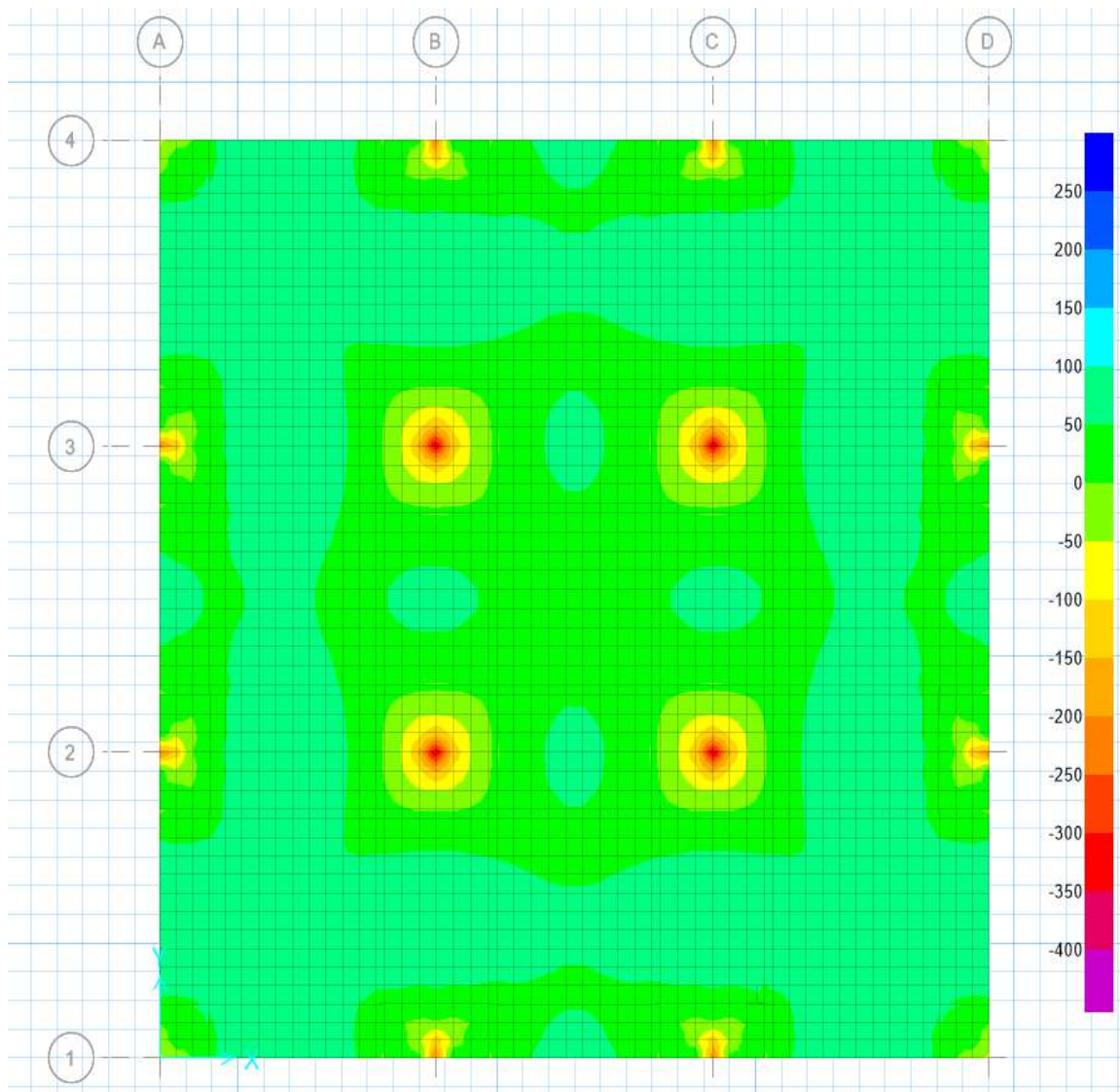


Figura 7. 45 – Gráfico de momentos admisibles,

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7.45 se observan los momentos actuantes en la losa para el estado total de cargas, el momento máximo que tiene la sección de diseño es de 177.44 kN-m/m en el las zonas de mayor vano, valor con el que podemos verificar que la sección cumple y el momento es menor al admisible.

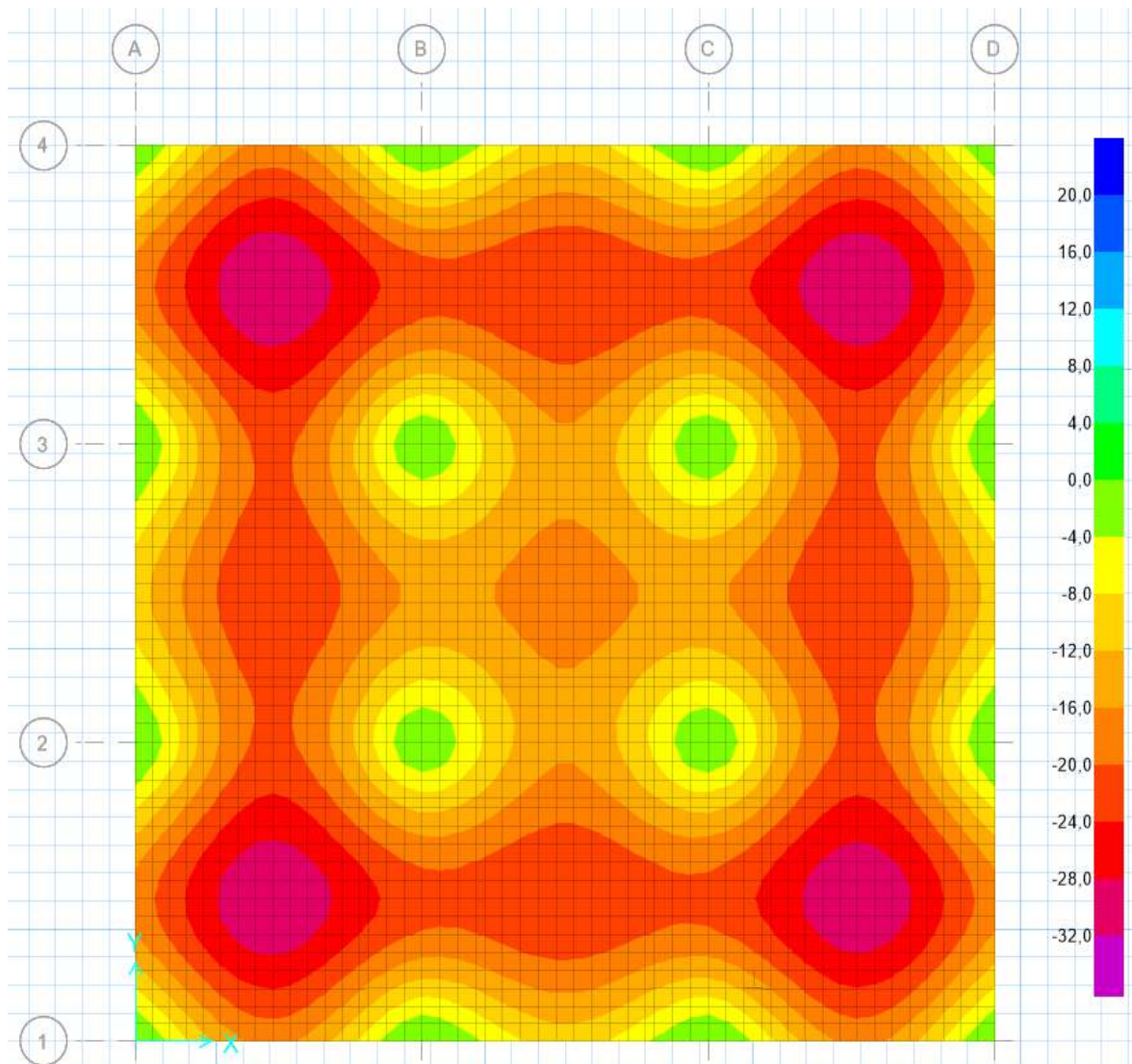


Figura 7. 46 – Deformaciones en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°4 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.46 se observan las deformaciones de las losas en el estado total de servicio del modelo. Las deformaciones máximas en el estado total de carga, incluyendo las cargas muertas y vivas arrojaron una deflexión máxima. de 32mm, cumple con las deformaciones máximas permitidas por la norma, en el caso de la deflexión a largo plazo obtienen valores de $L/250$.

Los resultados obtenidos en las losas aligeradas fueron los siguientes:

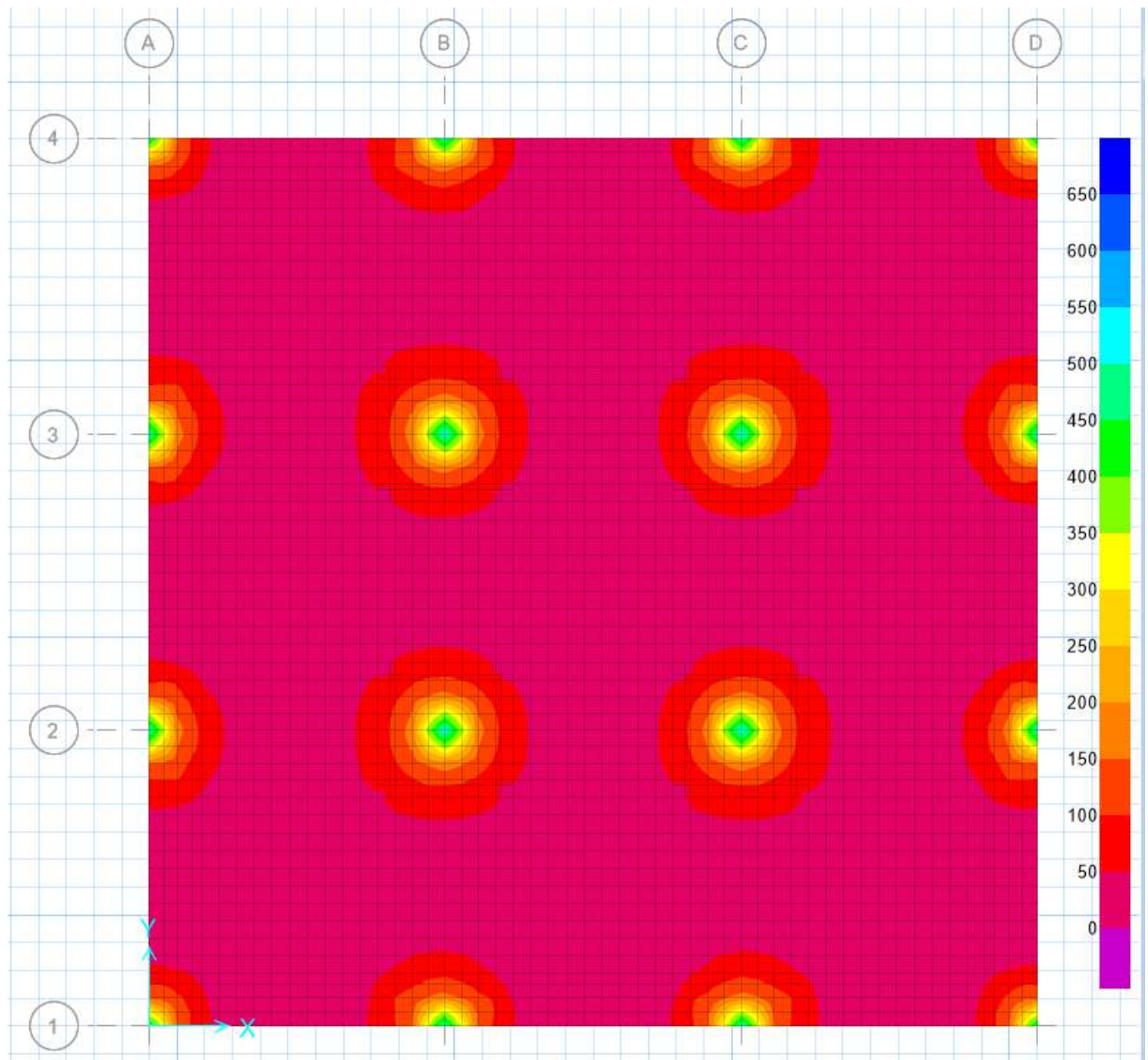


Figura 7. 47 – Cortante máxima en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°4 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.47 se observan los puntos en donde el esfuerzo cortante es mayor, que serían las zonas en donde la losa apoya directamente sobre la columna. El esfuerzo cortante máximo es de 564,2 kN/m.

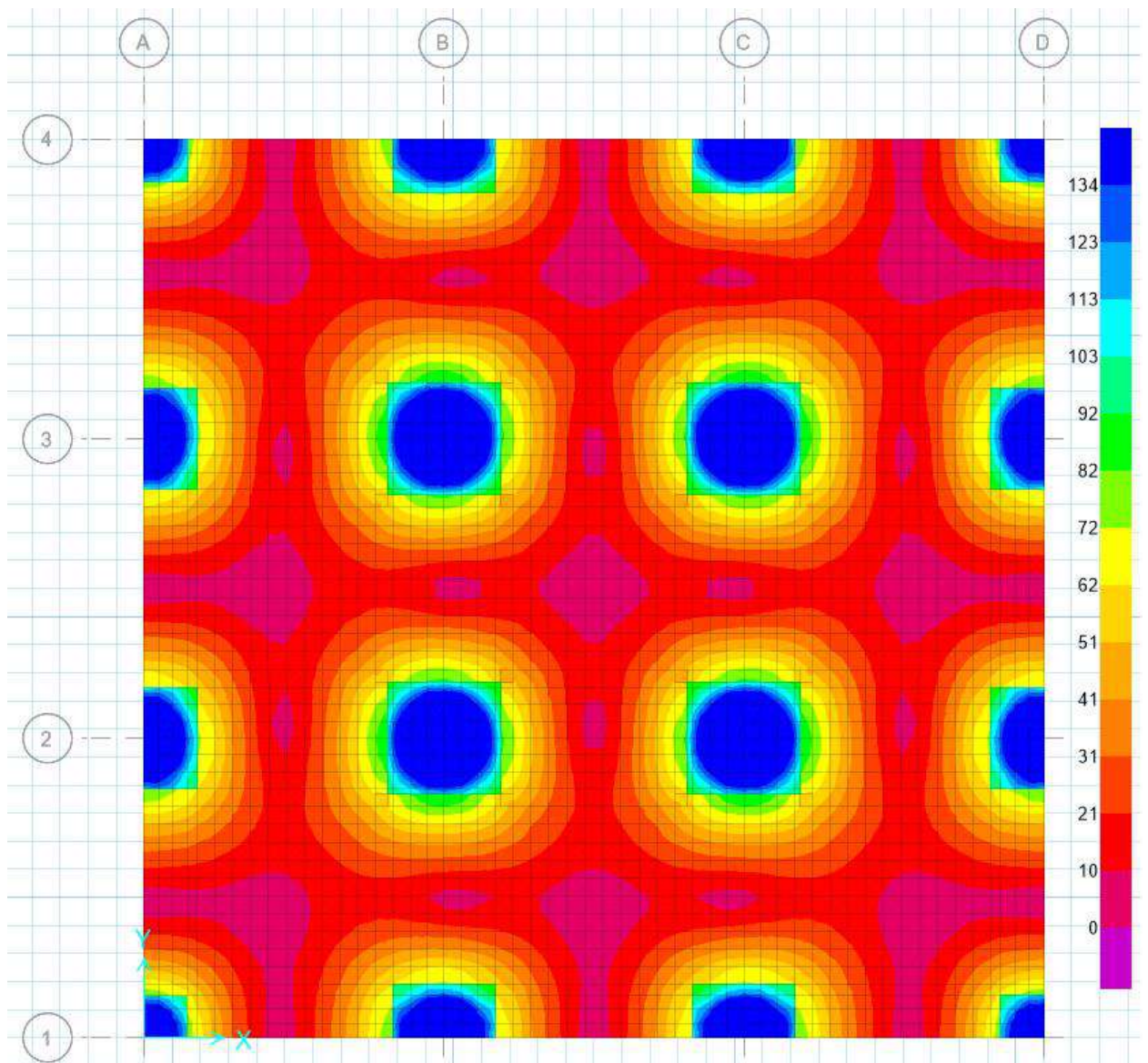


Figura 7. 48 –Perímetro crítico de esfuerzo cortante en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°4 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.47 pudimos observar que el esfuerzo cortante máximo es de 564,2 kN/m y sabiendo que el esfuerzo cortante máximo de miembros sin refuerzo es de 133.54 kN/m, en la figura 7.48 se muestra el perímetro crítico *que debe ser reforzado para que esta no falle.*

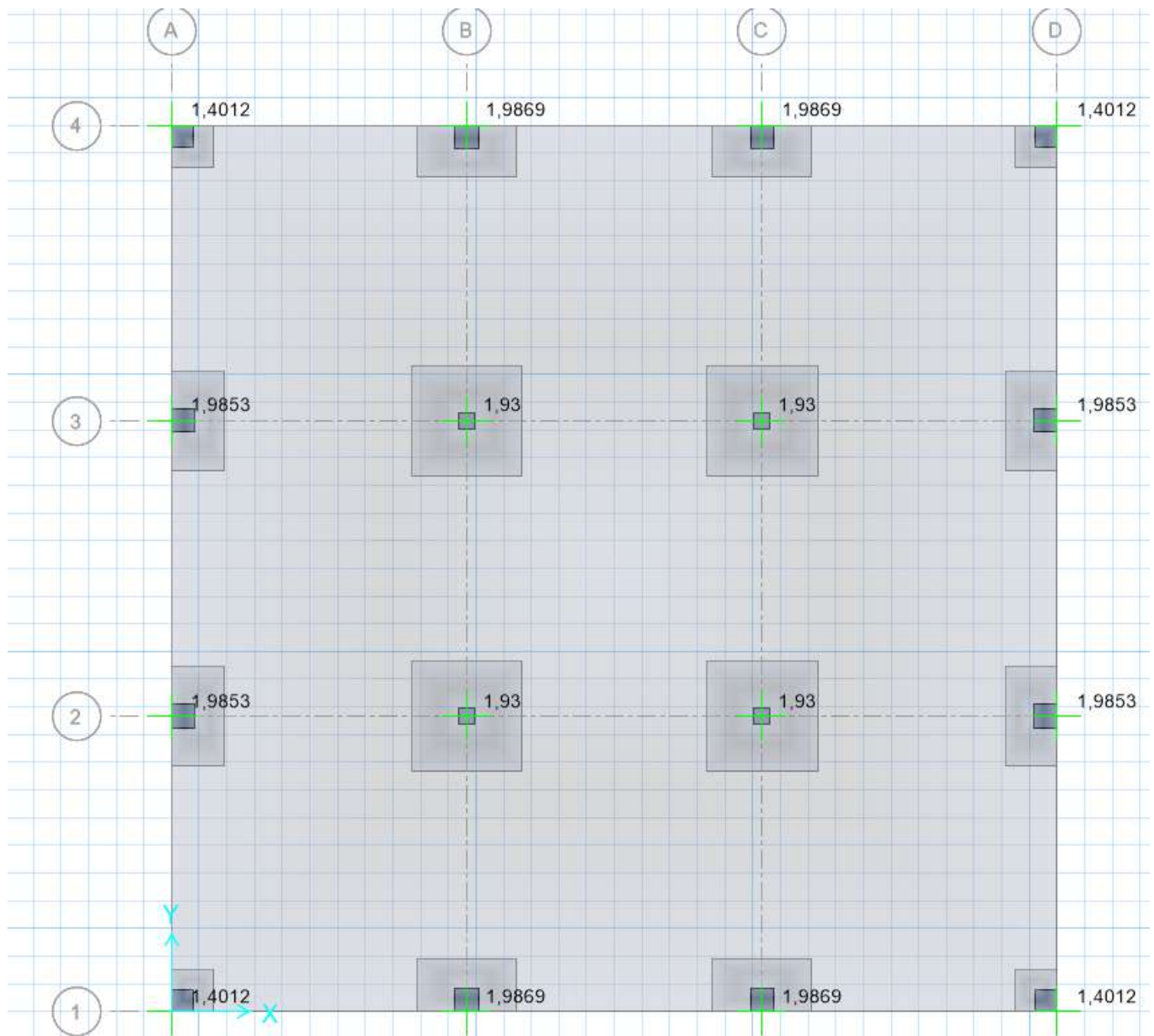


Figura 7. 49 – Relación de punzonamiento para la verificación de secciones en la losa **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.49 se observan los resultados del diseño de la resistencia al corte que de acuerdo a la ec. 6.4.2 del EC cumple con lo especificado $K \leq 2$.

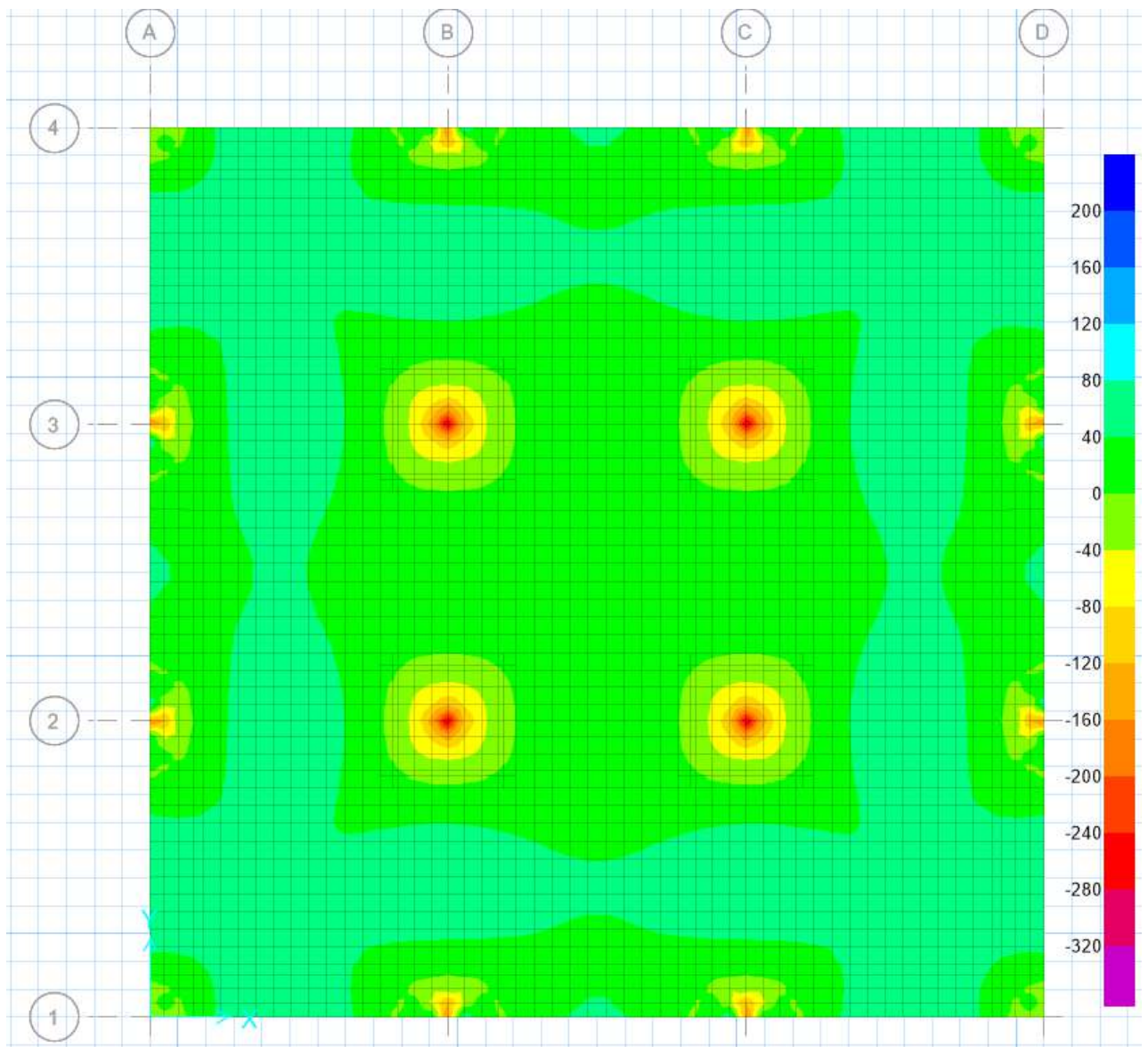


Figura 7. 50 – Gráfico de momentos admisibles,

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7.50 se observan los momentos actuantes en la losa para el estado total de cargas, el momento máximo que tiene la sección de diseño es de 157.2 kN-m/m en el las zonas de mayor vano, valor con el que podemos verificar que la sección cumple y el momento es menor al admisible.

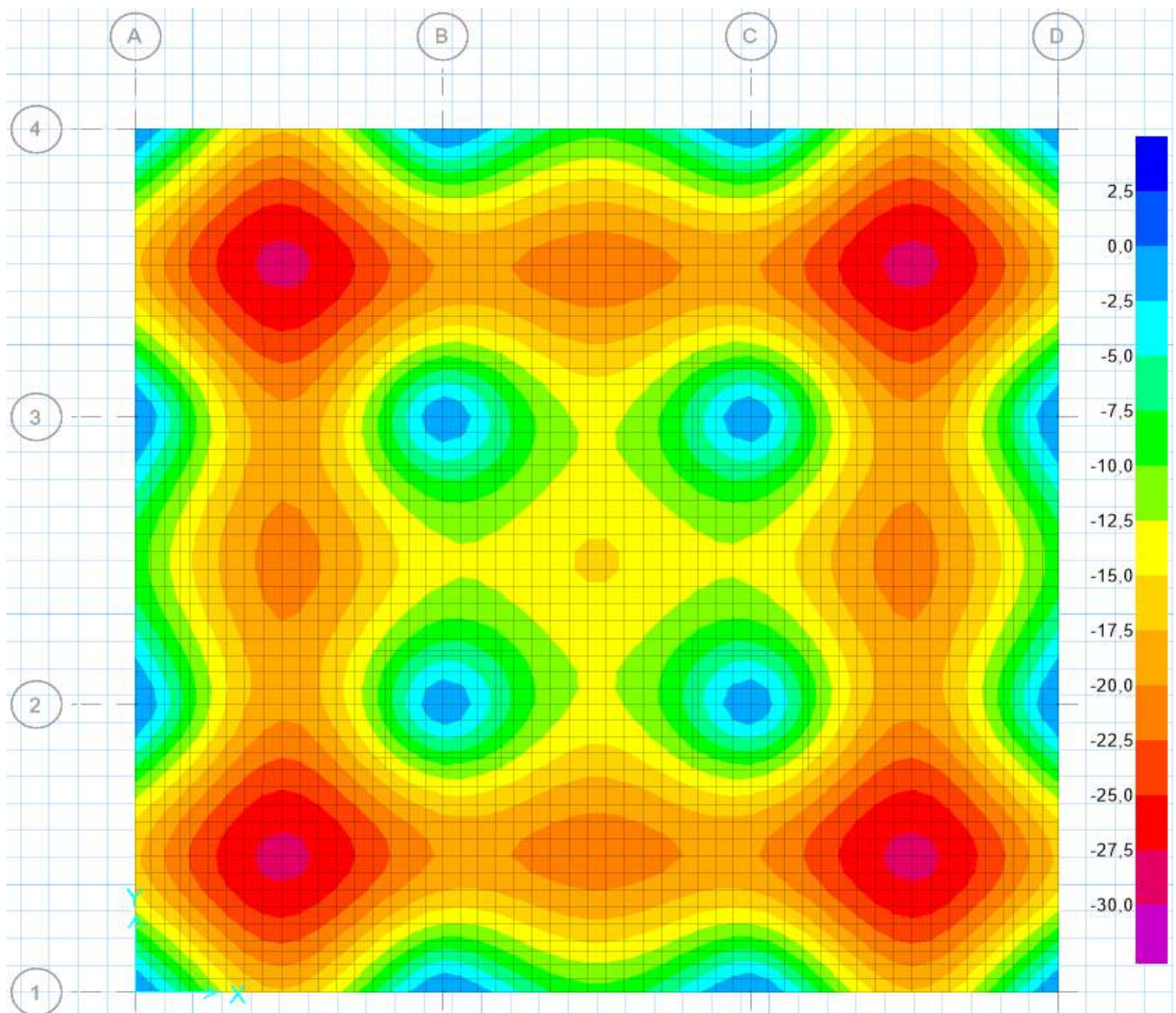


Figura 7. 51 – Deformaciones en estado total de cargas correspondientes al Modelo N°4 **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 7.51 se observan las deformaciones de las losas en el estado total de servicio del modelo. Las deformaciones máximas en el estado total de carga, incluyendo las cargas muertas y vivas arrojaron una deflexión máxima de 28mm, cumple con las deformaciones máximas permitidas por la norma, en el caso de la deflexión a largo plazo obtienen valores de $L/250$.

CAPITULO 8

ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS OBTENIDOS

Luego de haber realizado el cálculo de todos los modelos y obteniendo los resultados, se realizan las comparaciones de cada uno de ellos, se analizan en cada modelo, la influencia de los parámetros de:

- Consumo de hormigón armado
- Consumo de Armaduras
- Verificación del Estado Limite de Servicio (ELS)
- Verificación del Estado Limite Ultimo (ELU)
- Influencia del tamaño de encofrados U-Boot

8.1.CONSUMO DE HORMIGON

Un parámetro muy importante para el calculista es el consumo de hormigón de la estructura, debido a que es un material de comportamiento complejo, además de que tiene gran incidencia en el costo total y también porque representa una carga importante para la propia estructura. En esta apartado se realiza la comparación del volumen de hormigón desde el Modelo N° 1 al N° 4.

Modelos	Losa Maciza H° (m3)	Losa aligerada H° (m3)
Modelo L=5m	45	31.4
Modelo L=6m	74.52	50.49
Modelo L=7m	114.66	75.65
Modelo L=8m	172.8	123.81

Tabla 8. 1. – Consumo de Hormigón de los diferentes modelos.

Fuente: Elaboración Propia

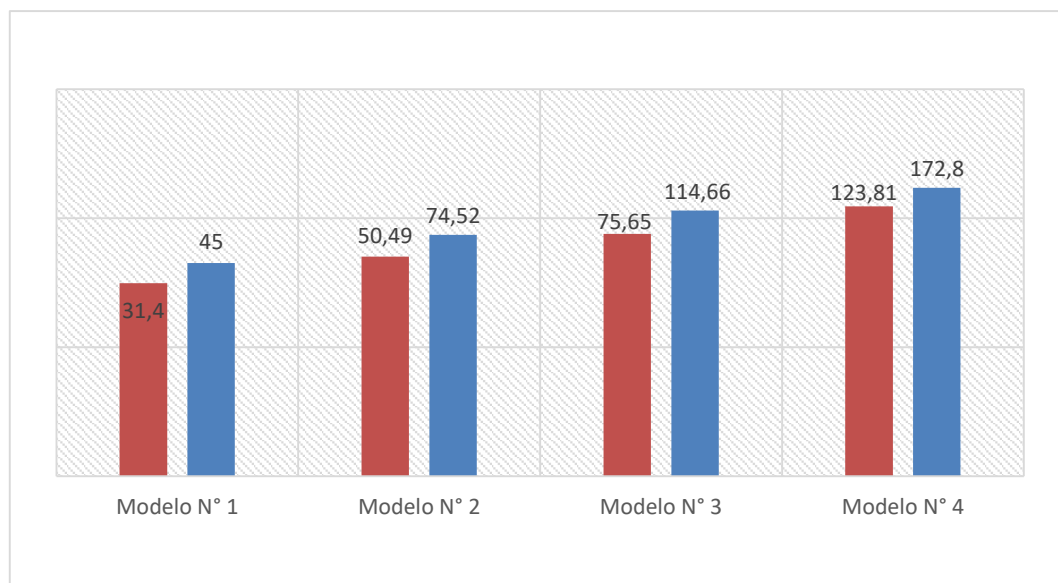


Figura 8. 1 –Consumo de hormigón para los diferentes modelos.

Fuente: Elaboración propia

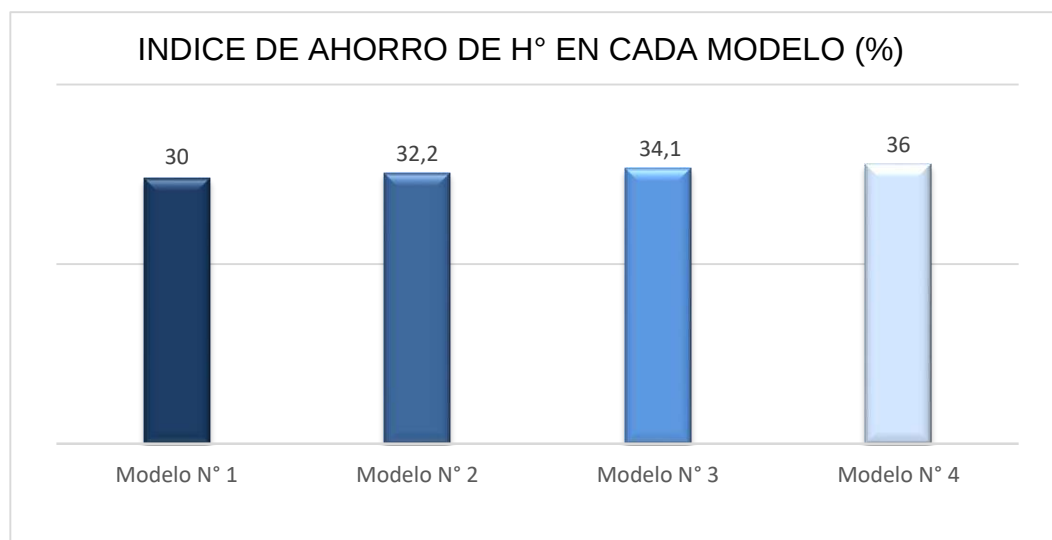


Figura 8. 2 – Índice de reducción de volumen de hormigón para los diferentes modelos.

Fuente: Elaboración propia

8.2.CONSUMO DE ARMADURAS

Además del consumo de hormigón, otro parámetro no menos importante es la de las armaduras, en esta sección se hace una comparación de los valores obtenidos de las armaduras de varillas AP500, para todas las configuraciones de las losas analizadas.

Modelos	Losa Maciza Acero (kg)	Losa aligerada Acero (kg)
Modelo N°1	3112	3023
Modelo N°2	5347	4470
Modelo N°3	8062	7100
Modelo N°4	12630	11300

Tabla 8. 2 – Consumo de Acero de los diferentes modelos.

Fuente: Elaboración Propia

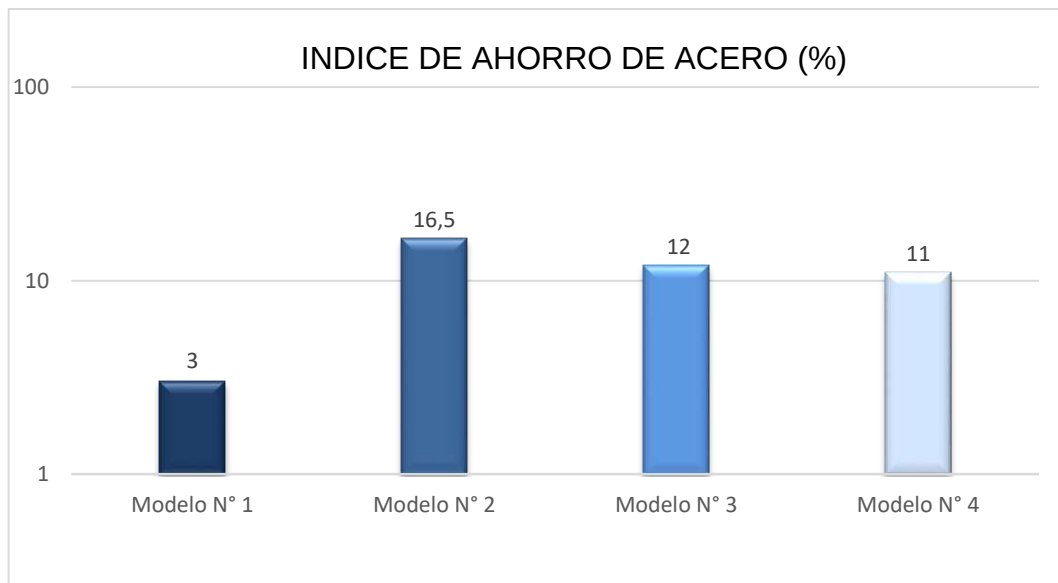


Figura 8. 2– Índice de reducción de acero para los diferentes modelos.

Fuente: Elaboración propia

Numero de Modelo	Dimensión de encofrados U-BOOT	Capa Inferior (cm)	Capa Superior (cm)	Espesor de la losa (cm)	Ancho de Nervios (cm)	Tipo de H°(Mpa)
Modelo N° 1	52x52x10	5	5	20	12	25
Modelo N° 2	52x52x13	5	5	23	12	25
Modelo N° 3	52x52x16	5	5	26	12	25
Modelo N° 4	52x52x16	7	7	30	12	25

Tabla 8. 3 – Características geométricas de los modelos de losas aligeradas

Fuente: Elaboración propia

8.3. SE DETALLAN LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES EN CADA UNO DE LOS MODELOS.

Modelo N° 1: Losa con vanos de 5m

El análisis se basa entre una losa maciza con vanos de 5 metros, comparadas a una losa aligerada con el sistema U-Boot de 52x52x10cm con doble capa de 5cm.

Losa	Área(m2)	Espesor (cm)	Volumen H°(m3)	Acero (kg)	Peso Total (ton)	Peso ton/m2
Losa Maciza	225	20	45	3112	112.5	0.5
Losa Aligerada	225	20	31.4	3023	78.5	0.348

Tabla 8. 3 –Detalles del modelo N°1

Fuente: Elaboración propia

Losa	Losa Maciza	Losa Aligerada	Índice de reducción
Cortante (kN/m)	285.02	180.04	30%
Momento Flector (kN-m/m)	33.18	29	15%
Desplazamiento(mm)	18	12	34%

Tabla 8. 4 – Resultados obtenidos en el modelo N° 1 para (ELU) y (ELS)

Fuente: Elaboración propia

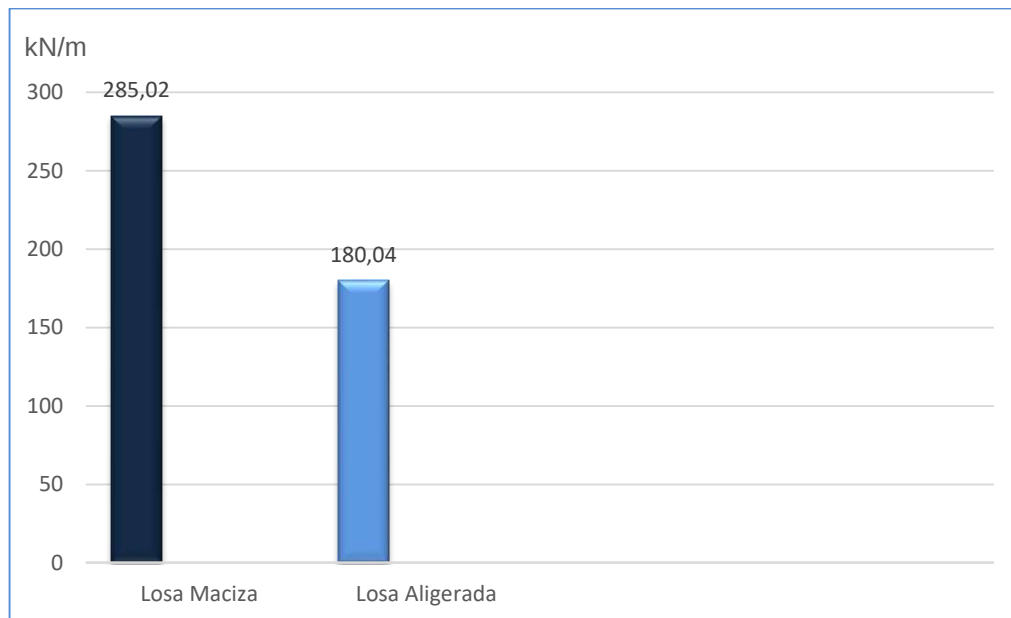


Figura 8. 3 - Influencia del diseño estructural en las cortantes para el estado limite último (ELU) **Fuente:** Elaboración Propia

En la Figura 8.3 se muestran los esfuerzos de corte de la losa maciza y losa aligerada respectivamente. Al comparar los resultados de las losas, el máximo y las tensiones de corte mínimas desarrolladas son menores con U-Boot. El porcentaje de esfuerzos cortantes reducidos con U-Boot es 30%.

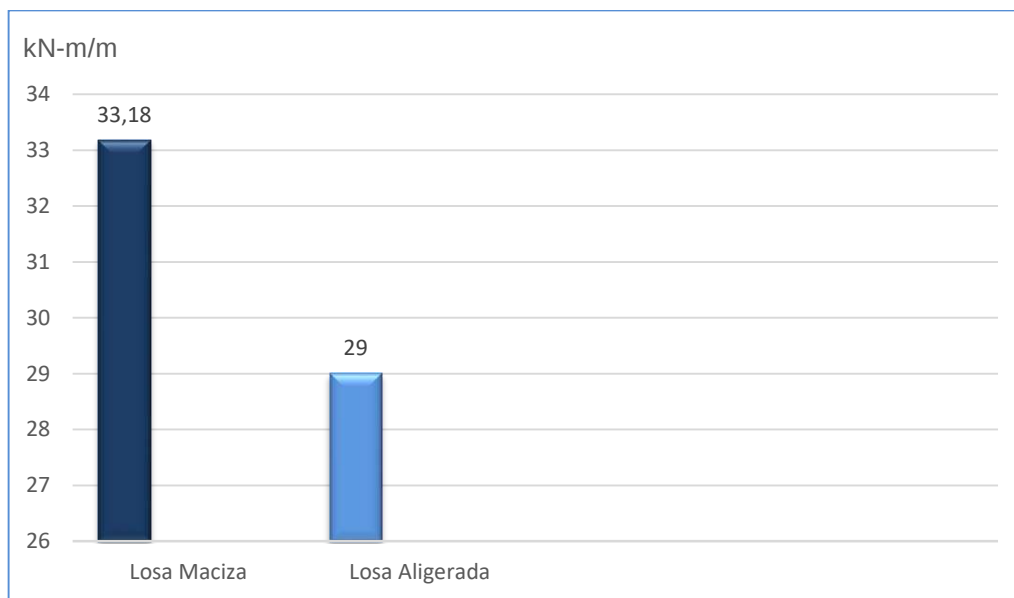


Figura 8. 4 – Influencia del diseño estructural en los momentos flectores para el estado limite último (ELU) **Fuente:** Elaboración Propia.

En la figura 8.4 podemos observar que en el caso de la losa maciza los momentos flectores son mayores en comparación a las losas aligeradas, obteniendo una reducción del 15%, en los dos modelos cumplen con los momentos flectores admisibles.

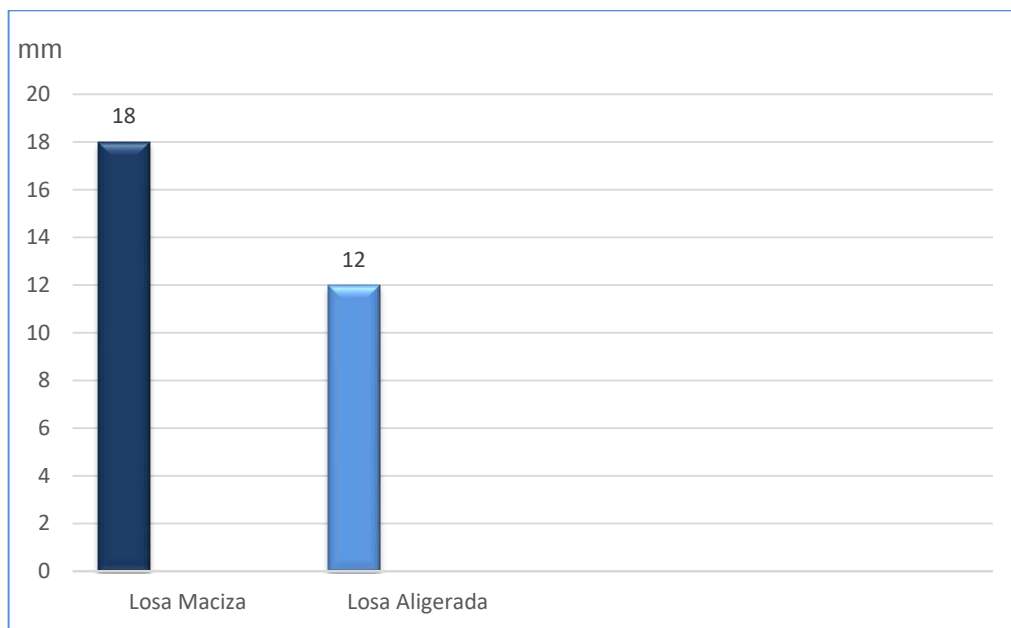


Figura 8. 5 – Influencia del diseño estructural en las flechas máximas para el estado límite de servicio (ELS) **Fuente:** Elaboración Propia

En la figura 8.5 muestran los desplazamientos de la losa maciza y con el sistema U-Boot respectivamente. Al comparar los resultados de las losas, el máximo y las desviaciones mínimas ocurridas son menos con U-Boot. El porcentaje de deflexión reducido con U-Boot es del 34%.

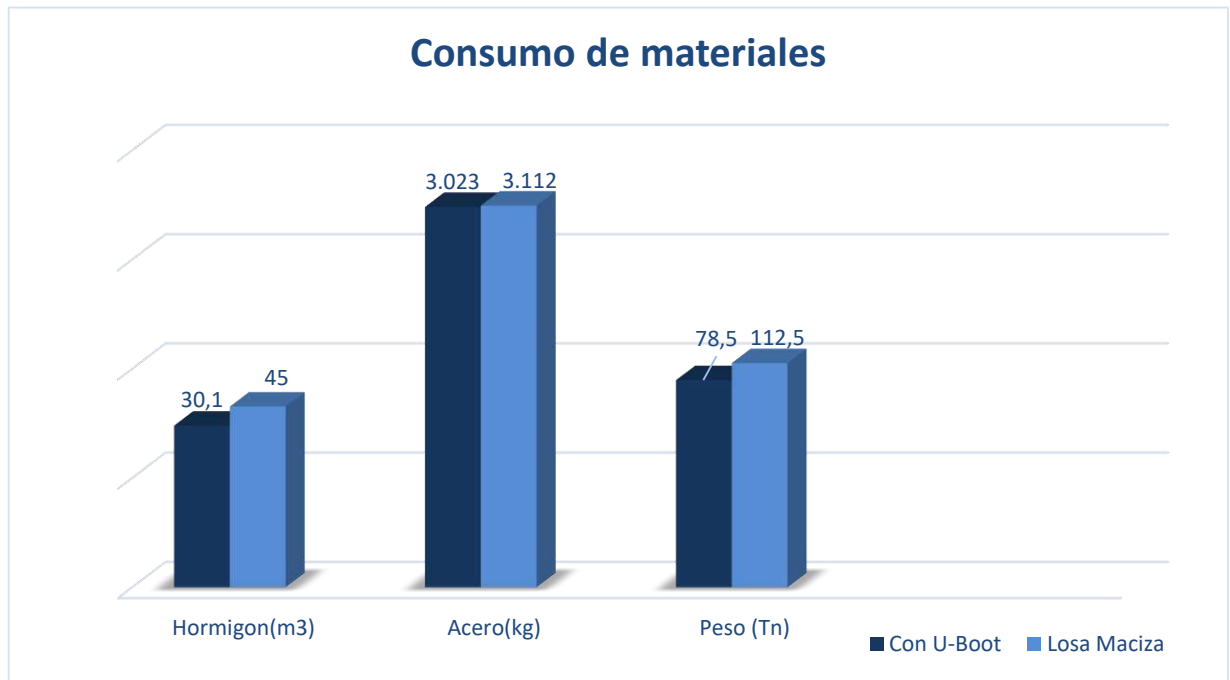


Figura 8. 6 - Comparación de consumo de hormigón, acero y reducción de peso

Utilizando el sistema de losas aligeradas con U-Boot podemos ver que hay una reducción de:

Hormigón	33,2%
Acero	3%
Peso Total	30.3%

Tabla 8. 5 - Resultados obtenidos del modelo N° 1 en cuanto a Hormigón, Acero y Peso **Fuente:** Elaboración propia

Modelo N° 2: Losa con vanos de 6m

Para el análisis del modelo N° 2, los cálculos se realizaron basados en una losa maciza con vanos de 6 metros y una losa aligerada de las mismas especificaciones técnicas. La primera prueba realizada se realizó en una losa de 20 cm de espesor, la cual cumplía con las solicitaciones de estados límites últimos. Sin embargo no cumplían con las de servicios. Basados en estos resultados, se optó por aumentar el espesor de las losas. En este caso utilizamos una losa maciza de 23cm y una losa aligerada con U-Boot de 52x52x13cm con doble capa de 5cm la cual cumplía con las exigencias del estado de limite ultimo (ELU) como también las exigencias del estado límite de servicio (ELS).

Losa	Área(m2)	Espesor (cm)	Volumen H°(m3)	Acero (kg)	Peso Total (ton)	Peso ton/m2
Losa Maciza	324	23	74,52	5.347	186,3	0,575
Losa Aligerada	324	23	50,49	4.470	126,2	0,389

Tabla 8. 6 – Detalles del modelo N° 2 **Fuente:** Elaboración Propia

Losa	Losa Maciza	Losa Aligerada	Índice de reducción
Cortante (kN/m)	331,68	272	18%
Momento Flector (kN-m/m)	86,31	53,2	38%
Desplazamiento(mm)	23	18	22%

Tabla 8. 7 - Resultados obtenidos en el modelo N° 2 para (ELU) y (ELS)

Fuente: Elaboración propia

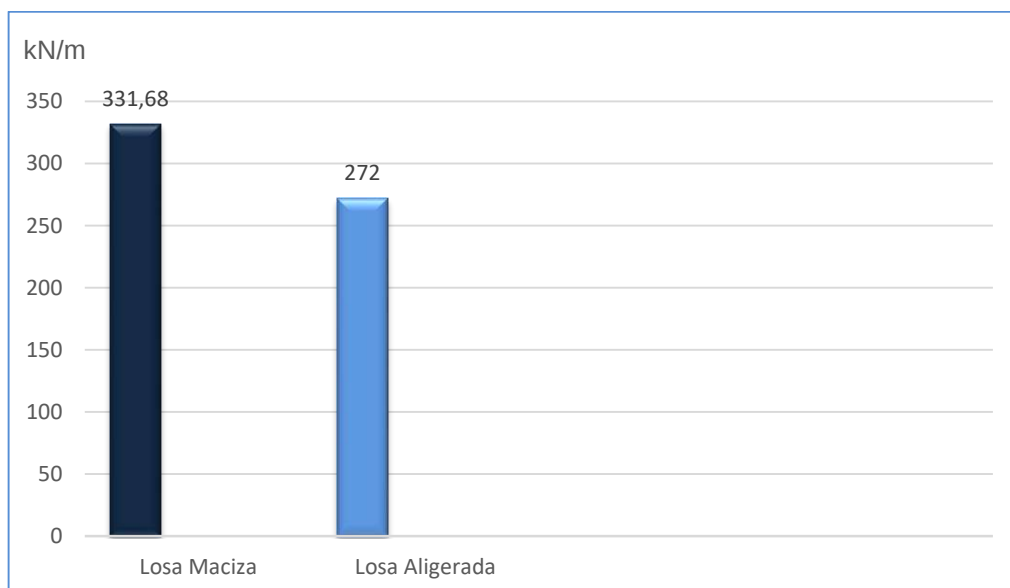


Figura 8. 7 - Influencia del diseño estructural en las cortantes para el estado limite (ELU) **Fuente:** Elaboración Propia.

En la Figura 8.7 se muestran los esfuerzos de corte de la losa maciza y losa aligerada respectivamente. Al comparar los resultados de las losas, el máximo y las tensiones de corte mínimas desarrolladas son menores con U-Boot. El porcentaje de esfuerzos cortantes reducidos con U-Boot es 18%.

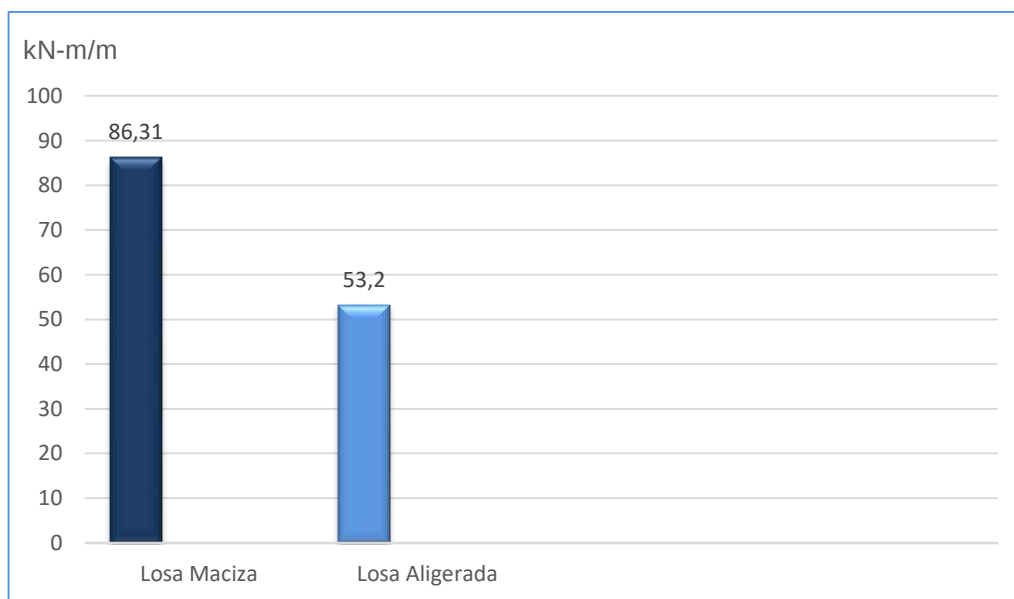


Figura 8. 8 – Influencia del diseño estructural en los momentos flectores para el estado limite último (ELU) **Fuente:** Elaboración Propia.

En la figura 8.8 podemos observar que en el caso de la losa maciza los momentos flectores son mayores en comparación a las losas aligeradas, obteniendo una reducción del 38%, en los dos modelos cumplen con los momentos flectores admisibles.

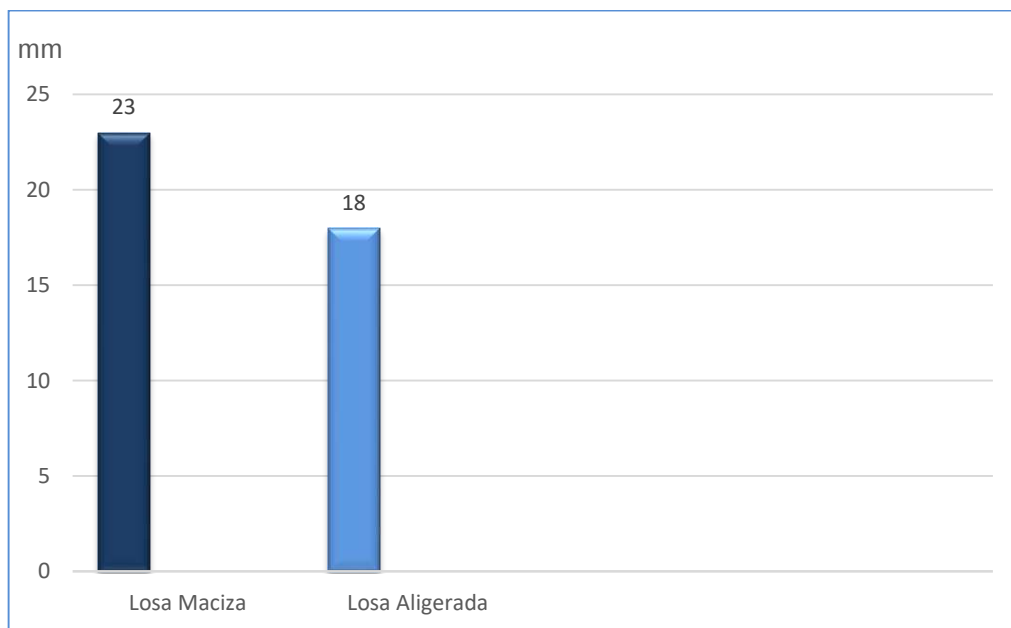


Figura 8. 9 – Influencia del diseño estructural en las flechas máximas para el estado límite de servicio (ELS) **Fuente:** Elaboración Propia

En la figura 8.9 muestran los desplazamientos de la losa maciza y con el sistema U-Boot respectivamente. Al comparar los resultados de las losas, el máximo y las desviaciones mínimas ocurridas son menos con U-Boot. El porcentaje de deflexión reducido con U-Boot es del 22%.

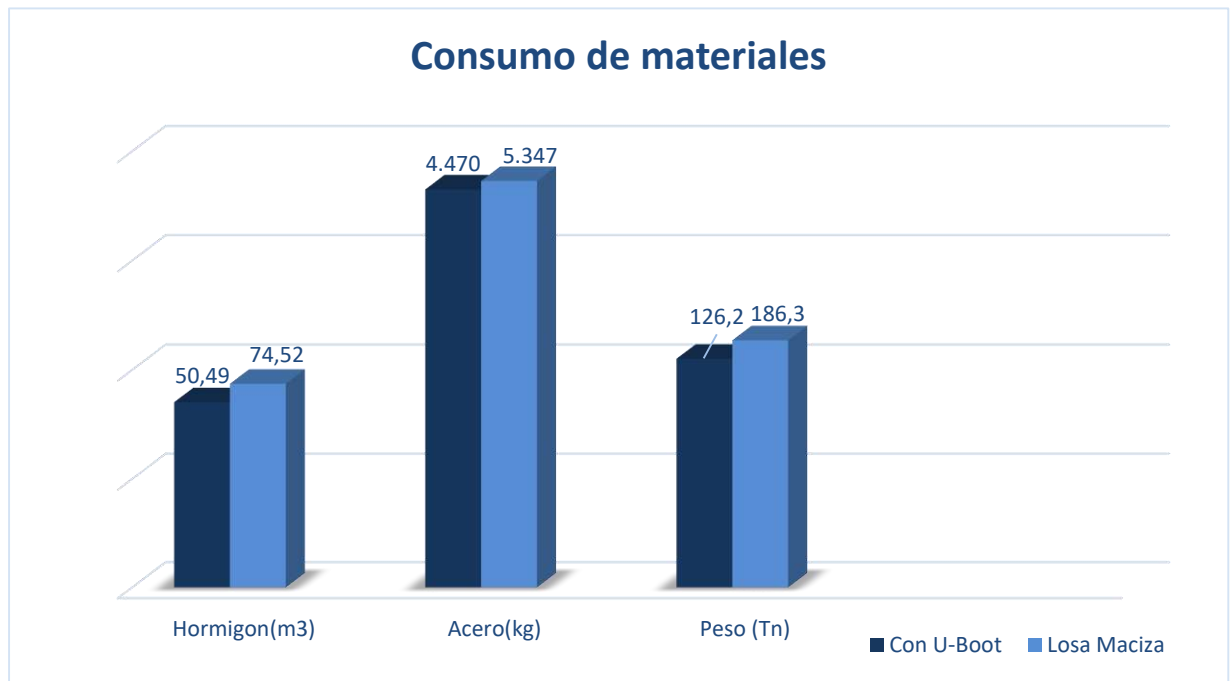


Figura 8. 10 - Comparación de consumo de hormigón, acero y reducción de peso

Hormigón	32,3%
Acero	16,5%
Peso Total	32.3%

Tabla 8. 8- Resultados obtenidos del modelo N° 2 en cuanto a Hormigón, Acero y Peso **Fuente:** Elaboración propia.

Modelo N° 3: Losa con vanos de 7m

Para el análisis del modelo N°3, utilizamos una losa de 7 metros de 23 cm de espesor, la cual cumplía con las solicitaciones de estados límites últimos. Pero sin embargo no cumplía con los estados límites de servicios. Por lo tanto se optó por utilizar una losa maciza de 26cm y una losa aligerada de 52x52x16 con doble capa de 5cm.

Losa	Área(m ²)	Espesor (cm)	Volumen H°(m ³)	Acero (kg)	Peso Total (ton)	Peso ton/m ²
Losa Maciza	441	26	114,6	8062	286,5	0,649
Losa Aligerada	441	26	75,6	7100	189	0,428

Tabla 8. 9– Detalles del modelo N° 3 **Fuente:** Elaboración Propia

Losa	Losa Maciza	Losa Aligerada	Índice de reducción
Cortante (kN/m)	458,2	407,25	11,2%
Momento Flector (kN-m/m)	126,7	109,62	13,5%
Desplazamiento(mm)	26	22	15,4%

Tabla 8. 10 - Resultados obtenidos en el modelo N° 3 para (ELU) y (ELS)

Fuente: Elaboración propia

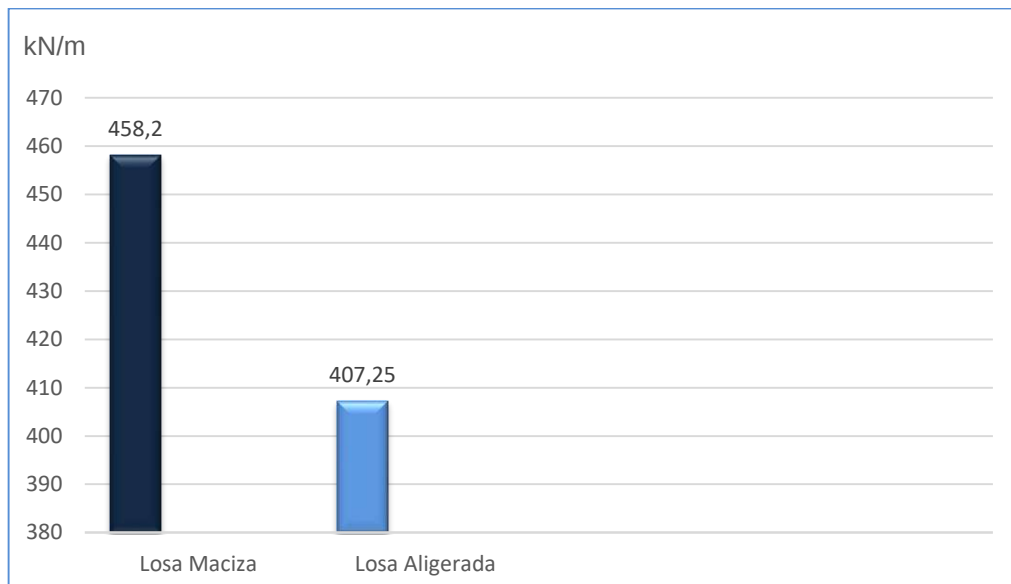


Figura 8. 11 - Influencia del diseño estructural en las cortantes para el estado limite (ELU) **Fuente:** Elaboración Propia

En la Figura 8.11 se muestran los esfuerzos de corte de la losa maciza y losa aligerada respectivamente. Al comparar los resultados de las losas, el máximo y las tensiones de corte mínimas desarrolladas son menores con U-Boot. El porcentaje de esfuerzos cortantes reducidos con U-Boot es 11,2%.

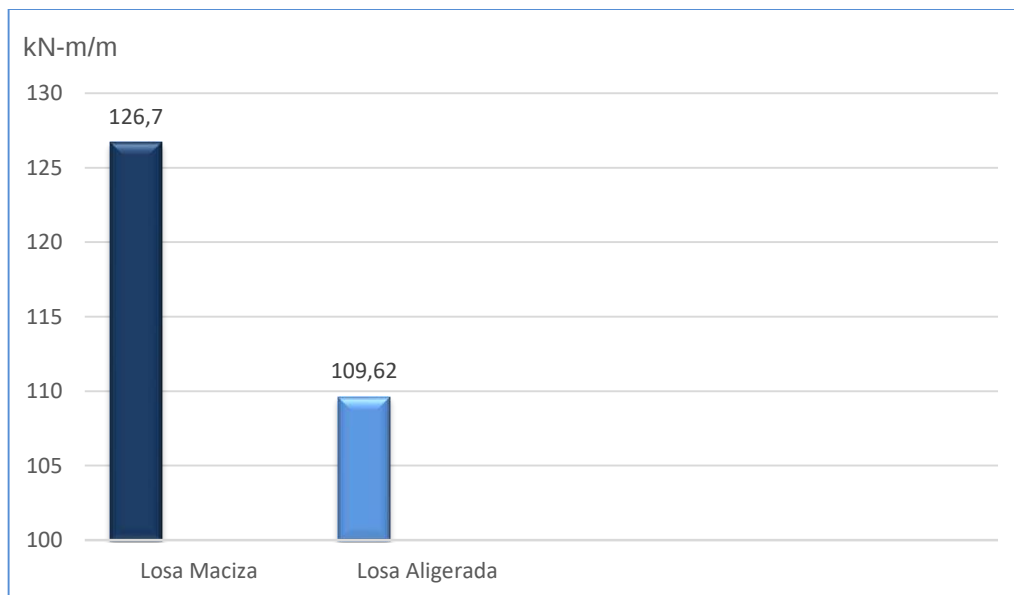


Figura 8. 12 – Influencia del diseño estructural en los momentos flectores para el estado limite último (ELU) **Fuente:** Elaboración Propia.

En la figura 8.12 podemos observar que en el caso de la losa maciza los momentos flectores son mayores en comparación a las losas aligeradas, obteniendo una reducción del 13,5%, en los dos modelos cumplen con los momentos flectores admisibles.

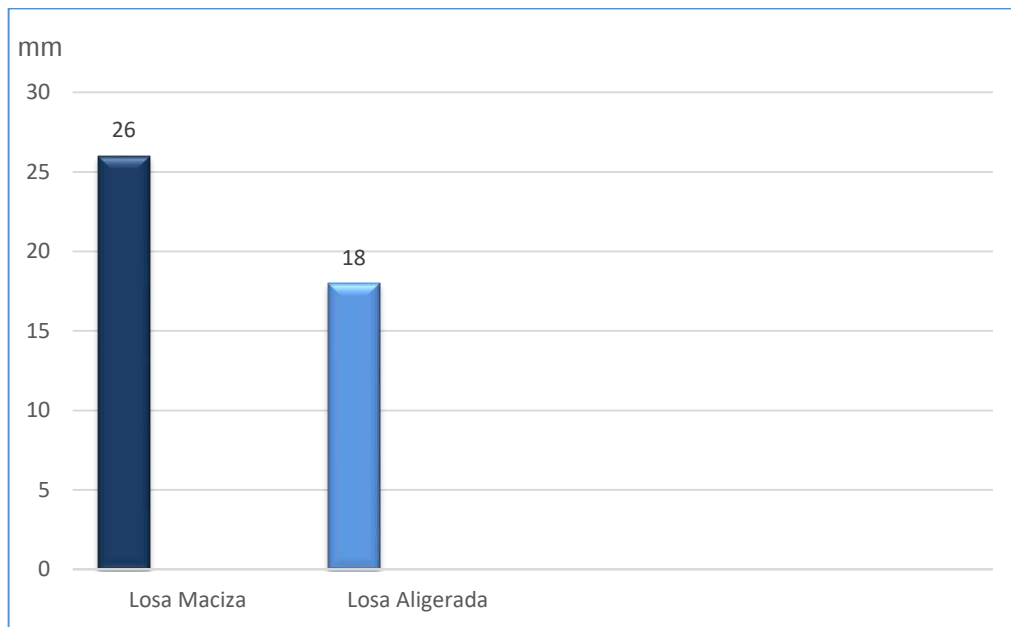


Figura 8. 13 – Influencia del diseño estructural en las flechas máximas para el estado límite de servicio (ELS) **Fuente:** Elaboración Propia

En la figura 8.13 muestran los desplazamientos de la losa maciza y con el sistema U-Boot respectivamente. Al comparar los resultados de las losas, el máximo y las desviaciones mínimas ocurridas son menos con U-Boot. El porcentaje de deflexión reducido con U-Boot es del 15,4%.

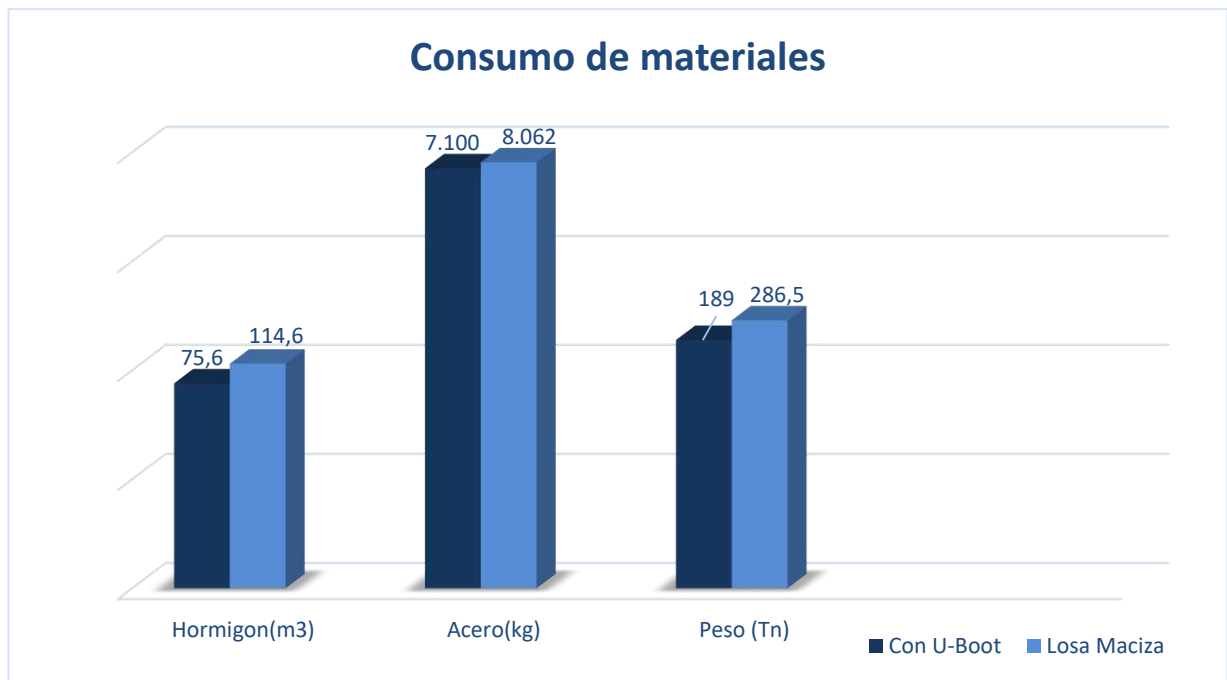


Figura 8. 14- Comparación de consumo de hormigón, acero y reducción de peso

Fuente: Elaboración Propia

Hormigón	34,1%
Acero	12%
Peso Total	34,1%

Tabla 8. 11 - Resultados obtenidos del modelo N° 3 en cuanto a Hormigón, Acero y Peso **Fuente:** Elaboración propia

Modelo N° 4: Losa con vanos de 8m

Para el análisis del modelo número 4, utilizamos una losa de 8 metros de 26 cm de espesor, la cual cumplía con las solicitaciones de estados límites últimos (ELU). Pero sin embargo no cumplía con los estados límites de servicios (ELS). Por lo tanto procedimos a utilizar una losa maciza de 30cm y una losa aligerada de 52x52x16 con doble capa de 7cm.

Losa	Área(m ²)	Espesor (cm)	Volumen H°(m ³)	Acero (kg)	Peso Total (ton)	Peso ton/m ²
Losa Maciza	576	30	172,8	12.630	432	0,75
Losa Aligerada	576	30	123,8	11.300	309,5	0,54

Tabla 8. 12 – Detalles del modelo N° 4 **Fuente:** Elaboración Propia

Losa	Losa Maciza	Losa Aligerada	Índice de reducción
Cortante (kN/m)	635,39	564,2	11,4%
Momento Flector (kN-m/m)	177,44	157,2	11,5%
Desplazamiento(mm)	32	28	12,5%

Tabla 8. 13 - Resultados obtenidos en el modelo N° 4 para (ELU) y (ELS)

Fuente: Elaboración propia

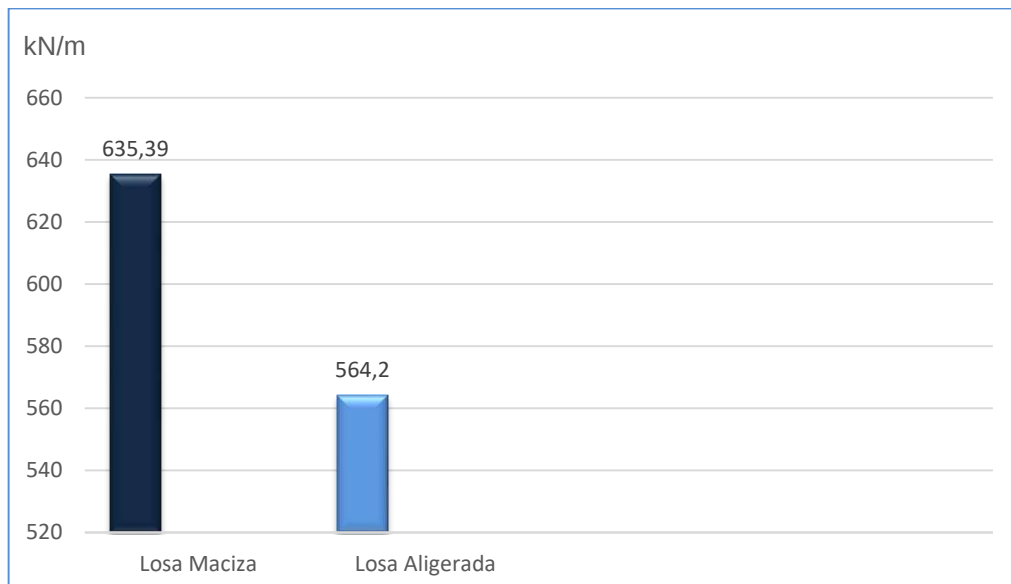


Figura 8. 15 - Influencia del diseño estructural en las cortantes para el estado limite (ELU) **Fuente:** Elaboración Propia

En la Figura 8.15 se muestran los esfuerzos de corte de la losa maciza y losa aligerada respectivamente. Al comparar los resultados de las losas, el máximo y las tensiones de corte mínimas desarrolladas son menores con U-Boot. El porcentaje de esfuerzos cortantes reducidos con U-Boot es 11,4%.

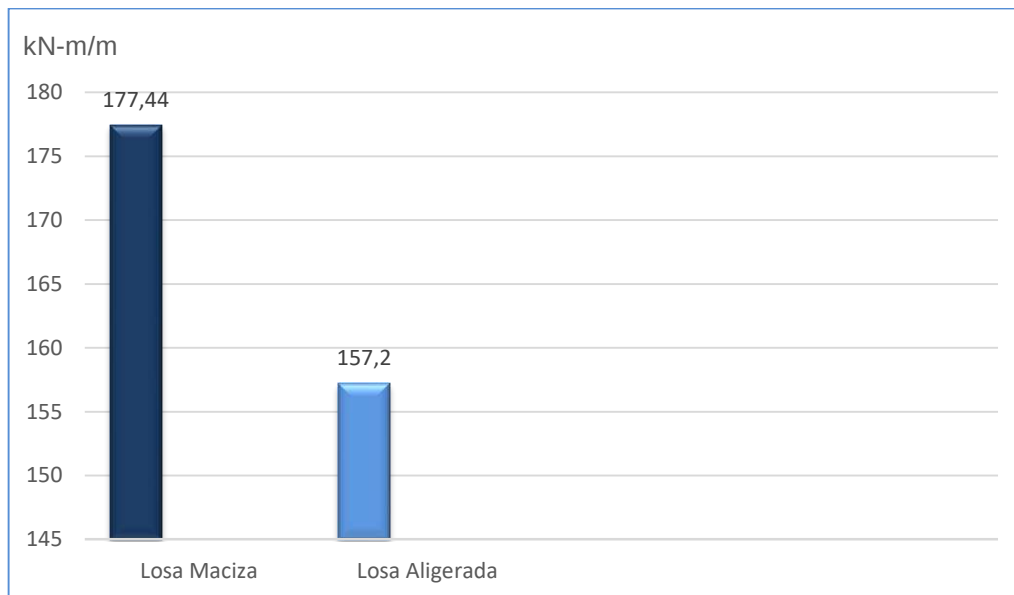


Figura 8. 16– Influencia del diseño estructural en los momentos flectores para el estado limite último (ELU) **Fuente:** Elaboración Propia.

En la figura 8.16 podemos observar que en el caso de la losa maciza los momentos flectores son mayores en comparación a las losas aligeradas, obteniendo una reducción del 11,5%, en los dos modelos cumplen con los momentos flectores admisibles.

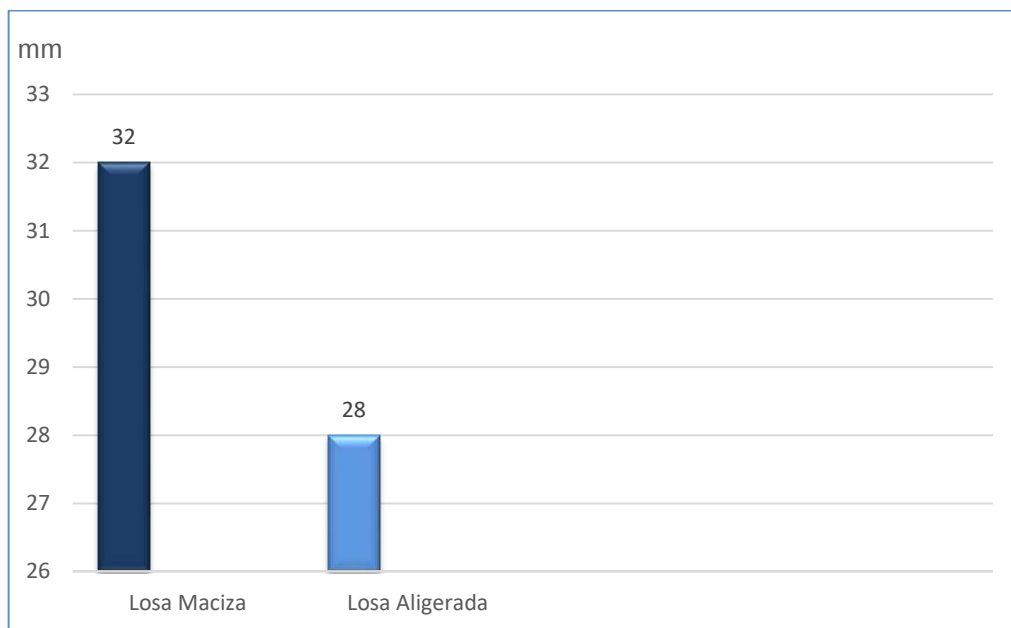
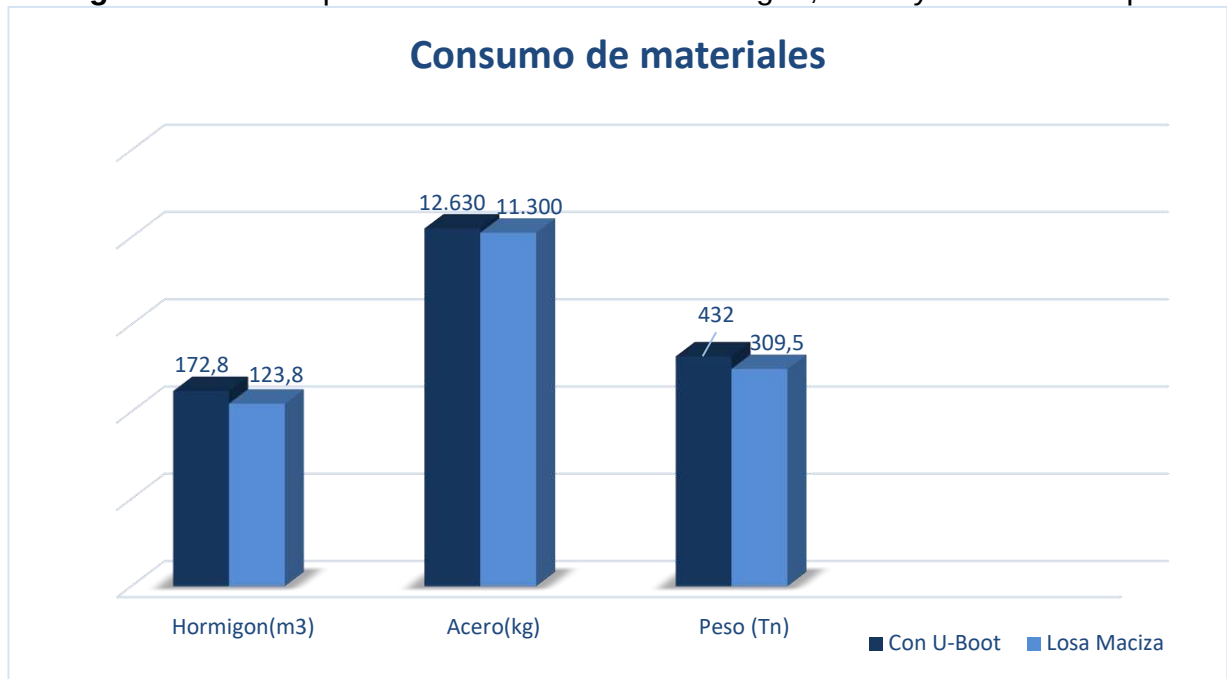


Figura 8. 17 – Influencia del diseño estructural en las flechas máximas para el estado límite de servicio (ELS) **Fuente:** Elaboración Propia

En la figura 8.17 muestran los desplazamientos de la losa maciza y con el sistema U-Boot respectivamente. Al comparar los resultados de las losas, el máximo y las desviaciones mínimas ocurridas son menos con U-Boot. El porcentaje de deflexión reducido con U-Boot es del 12,5%.

Figura 8. 18 - Comparación de consumo de hormigón, acero y reducción de peso



Fuente: Elaboración Propia

Hormigón	29%
Acero	10,6%
Peso Total	30%

Tabla 8. 14 - Resultados obtenidos del modelo N° 4 en cuanto a Hormigón, Acero y Peso **Fuente:** Elaboración propia

CAPITULO 9

ANALISIS Y COMPARACION DE COSTOS

En este capítulo se evalúa económicamente cada uno de los modelos, para ello se detalla de forma tabular el costo de cada una de las soluciones estructurales estudiadas.

MODELO L=5m – LOSA MACIZA				
Rubro	Cantidad	Unidad de Medida	Precio Unitario (Gs)	Sub Total (Gs)
Hormigón fck 250	45	m3	650.000	29.250.000
Acero	3.112	kg	5.500	16.923.500
Encofrado y MDO	45	m3	700.000	31.500.000
Total				77.673.500

MODELO L=5m – LOSA ALIGERADA				
Rubro	Cantidad	Unidad de Medida	Precio Unitario (Gs)	Sub Total (Gs)
Hormigón fck 250	31,48	m3	650.000	20.462.000
Acero	3.023	kg	5.500	16.445.000
Encofrado y MDO	31,48	m3	700.000	22.036.000
U-Boot	225	m2	100.000	22.500.000
Total				81.443.000

MODELO L=6m – LOSA MACIZA				
Rubro	Cantidad	Unidad de Medida	Precio Unitario (Gs)	Sub Total (Gs)
Hormigón fck 250	74,52	m3	650.000	48.438.000
Acero	5347	kg	5.500	29.408.500
Encofrado y MDO	74,52	m3	700.000	52.164.000
Total				130.010.500

MODELO L=6m – LOSA ALIGERADA				
Rubro	Cantidad	Unidad de Medida	Precio Unitario (Gs)	Sub Total (Gs)
Hormigón fck 250	50,4903125	m3	650.000	32.818.703
Acero	4470	kg	5.500	24.585.000
Encofrado y MDO	50,4903125	m3	700.000	35.343.219
U-Boot	324	m2	100.000	32.400.000
Total				125.146.922

MODELO L=7m – LOSA MACIZA				
Rubro	Cantidad	Unidad de Medida	Precio Unitario (Gs)	Sub Total (Gs)
Hormigón fck 250	114,66	m3	650.000	74.529.000
Acero	8062	kg	5.500	44.341.000
Encofrado y MDO	114,66	m3	700.000	80.262.000
Total				199.132.000

MODELO L=7m – LOSA ALIGERADA				
Rubro	Cantidad	Unidad de Medida	Precio Unitario (Gs)	Sub Total (Gs)
Hormigón fck 250	75,659025	m3	650.000	49.178.366
Acero	7100	kg	5.500	39.050.000
Encofrado y MDO	75,659025	m3	700.000	52.961.318
U-Boot	441	m2	100.000	44.100.000
Total				185.289.684

MODELO L=8m – LOSA MACIZA				
Rubro	Cantidad	Unidad de Medida	Precio Unitario (Gs)	Sub Total (Gs)
Hormigón fck 250	172,8	m3	650.000	112.320.000
Acero	12.630	kg	5.500	69.465.000
Encofrado y MDO	172,8	m3	700.000	120.960.000
Total				302.745.000

MODELO L=8m – LOSA ALIGERADA				
Rubro	Cantidad	Unidad de Medida	Precio Unitario (Gs)	Sub Total (Gs)
Hormigón fck 250	123,811125	m3	650.000	80.477.231
Acero	11.300	kg	5.500	62.150.000
Encofrado y MDO	123,811125	m3	700.000	86.667.788
U-Boot	576	m2	100.000	57.600.000
Total				286.895.019

9.1. Se realiza un resumen de forma tabular con los costos de cada modelo:

Modelo L=5m		
Losas	Costo Total en Gs	Costo de losa Gs/m2
Losa maciza	¢ 77.673.500	¢ 345.216
Losa aligerada	¢ 81.443.000	¢ 361.969
Modelo L=6m		
Losas	Costo Total en Gs	
Losa maciza	¢ 130.010.500	¢ 401.267
Losa aligerada	¢ 125.146.922	¢ 386.256
Modelo L=7m		
Losas	Costo Total en Gs	
Losa maciza	¢ 199.132.000	¢ 451.546
Losa aligerada	¢ 185.289.684	¢ 420.158
Modelo L=8m		
Losas	Costo Total en Gs	
Losa maciza	¢ 302.745.000	¢ 525.599
Losa aligerada	¢ 286.895.019	¢ 498.081

Tabla 9. 1 – Resumen de costo total para los diferentes modelos.

Fuente: Elaboración propia

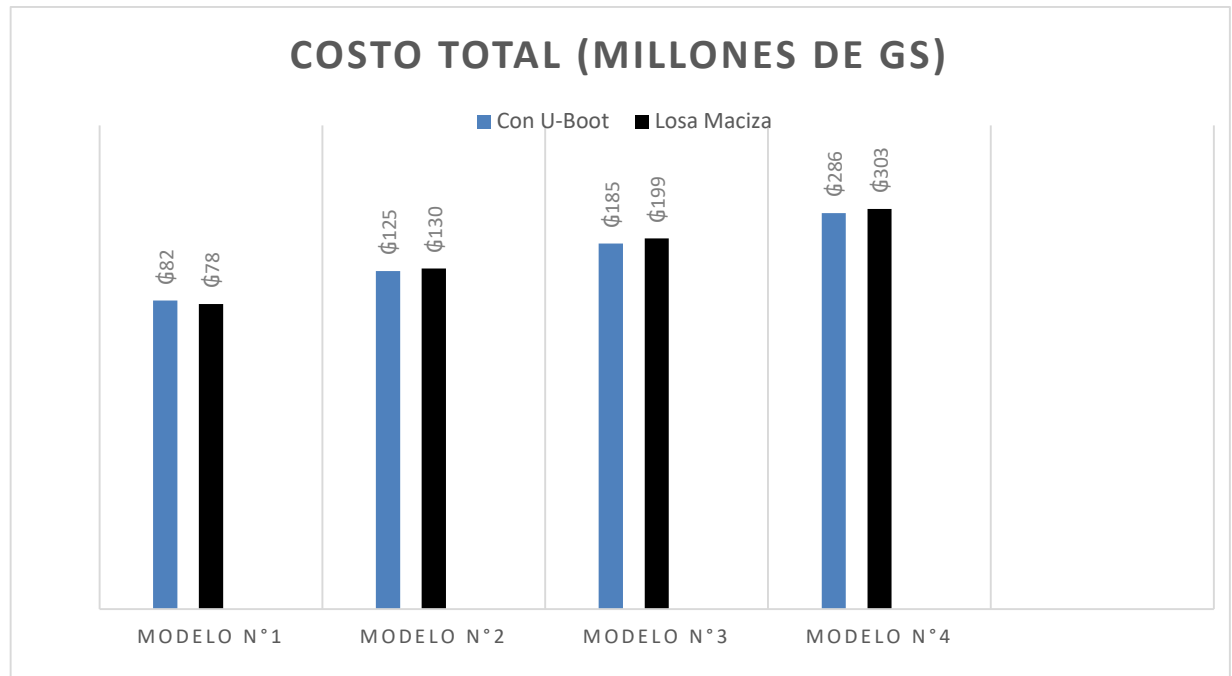


Figura 9. 1 - Costo Total de los diferentes modelos. Fuente: Elaboración propia

Después de observar los resultados del costo total correspondientes a cada modelo, se puede observar que en el modelo N°1 correspondiente a la losa de 5m, el sistema U-boot es desfavorable, puesto que es 4,85% menos económica que la losa maciza que serían Q 3.769.500.

En el modelo N°2, con una losa de 6m, el sistema de losas aligeradas con U-Boot hace un salto y se vuelve 3,74% más favorable que la losa maciza, lo que corresponde a un ahorro de Q 4.863.578.

En el modelo N°3 con una losa de 7m, a partir de la Figura 9.1 podemos observar que hay una reducción del 6,95% en donde el sistema de losas aligeradas con U-Boot es más favorable con respecto a las losas macizas tradicionales, esta diferencia corresponde a Q 13.842.316 de ahorro.

En el modelo N° 4 con una losa de 8m a partir de la figura 9.1 podemos observar que hay una reducción del 5,24% en donde el sistema de losas aligeradas con U-Boot es más favorable con respecto a la losa maciza tradicional, esta diferencia corresponde a \$ 15.849.981 de ahorro.

De todos estos valores obtenidos, a partir del punto de vista económico, se observa que el modelo N°1 es el único que no demuestra una ventaja económica en la utilización del U-Boot, a partir del modelo N°2 se encuentran ventajas, pero las más óptimas serían los modelos N°3 y N°4.

9.2. Influencia de los materiales en el costo total

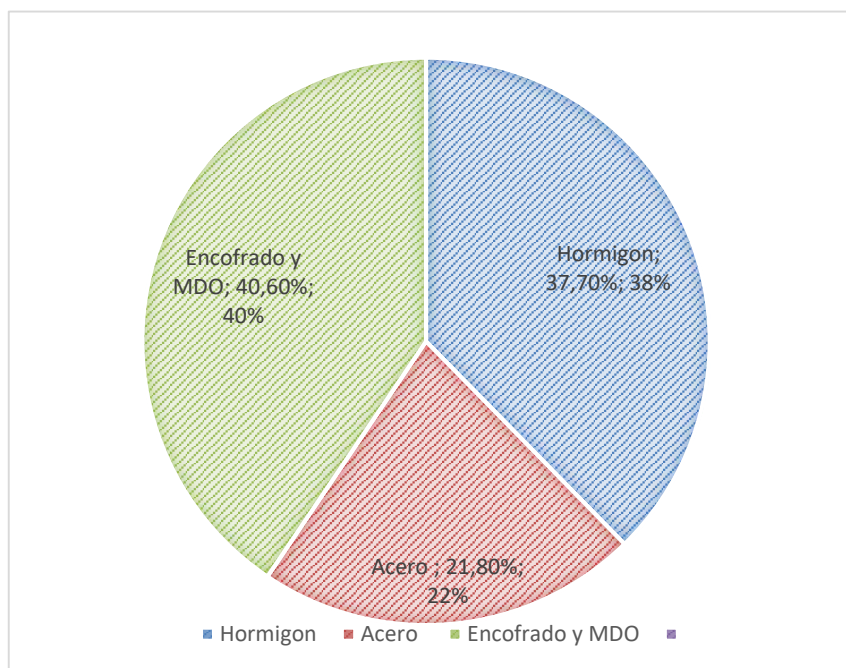


Figura 9. 2– Incidencia de cada uno de los rubros sobre el costo total del Modelo N° 1 – Losa Maciza **Fuente:** Elaboración Propia

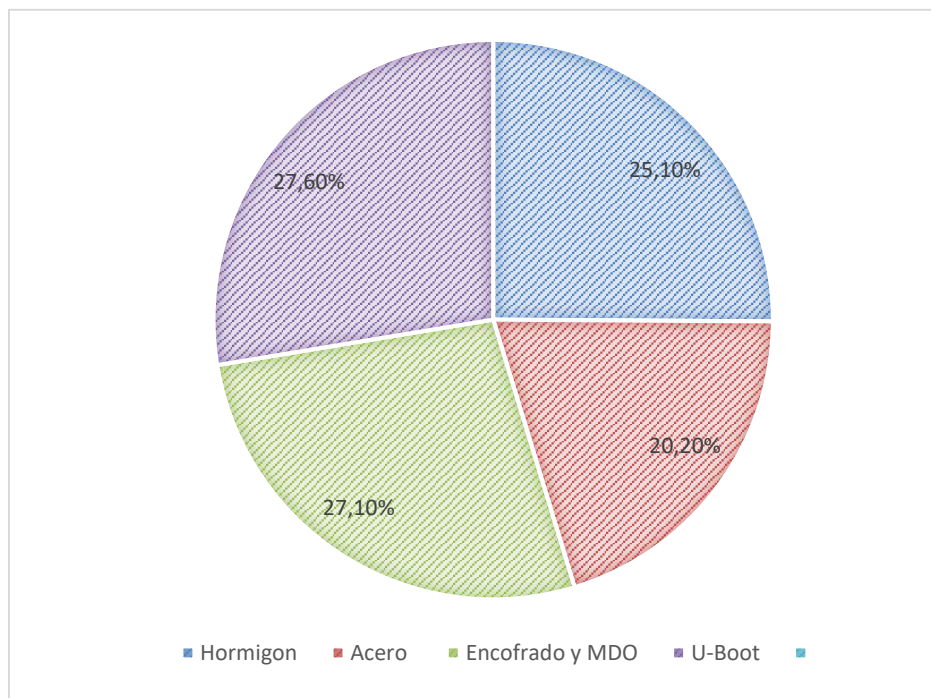


Figura 9. 3 – Incidencia de cada uno de los rubros sobre el costo total del Modelo N° 1 – Losa Aligerada **Fuente:** Elaboración Propia

En la figura 9.2 podemos observar como el hormigón tiene una incidencia del 37,7% del costo total en el caso de la losa maciza y en el caso de la losa aligerada con U-Boot como se muestra en la figura 9.3 tiene una incidencia del 25,10% lo que representa una gran reducción del costo en este rubro, lo mismo ocurre en el caso del encofrado y mano de obra el cual tiene una incidencia del 40,60% y 27,10% respectivamente como se había mencionado más arriba, lo que indica que también hay una ventaja en este rubro, en el caso del acero es muy pequeña la diferencia, se cuenta con una incidencia del 21,8% y 21,20% respectivamente, en este punto se encuentra la primera desventaja del modelo puesto que no se observa una reducción muy favorable en cuanto a las armaduras y en cuanto a lo económico se descarta el modelo al hablar del U-Boot, en donde lo que se redujo en mano de obra, hormigón y acero es recuperado, ya que el U-Boot representa el 27,60% del costo total, en donde se observa la desventaja.

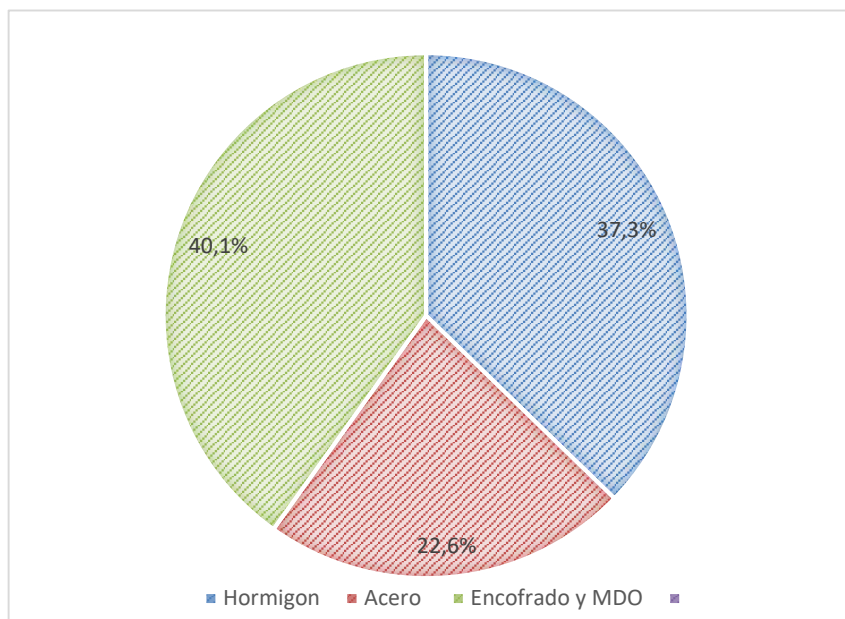


Figura 9. 4– Incidencia de cada uno de los rubros sobre el costo total del Modelo N° 2 – Losa Maciza **Fuente:** Elaboración Propia

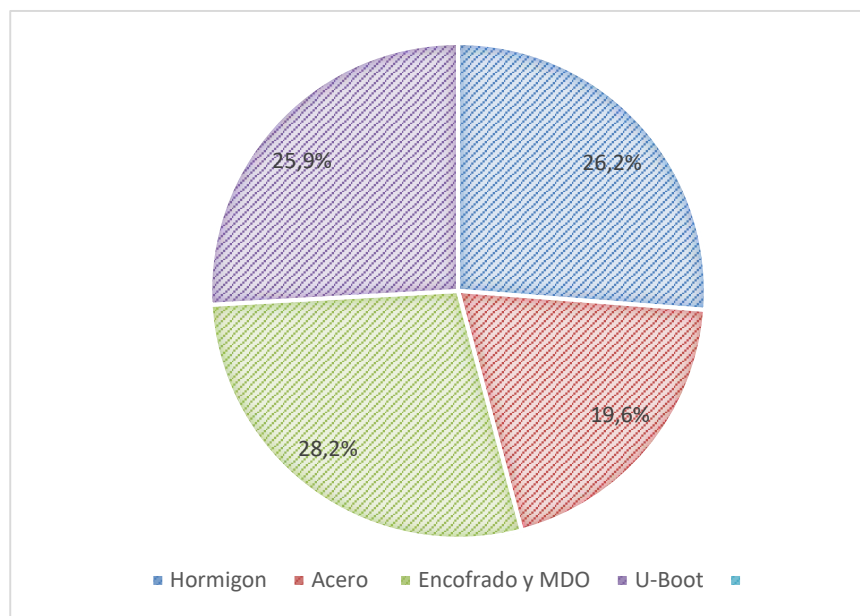


Figura 9. 5– Incidencia de cada uno de los rubros sobre el costo total del Modelo N° 2 – Losa Aligerada **Fuente:** Elaboración Propia

En el modelo N°2, de acuerdo a la figura 9.4 el índice de incidencia del hormigón sobre el costo total es de 37,7% y en el caso de la losa aligerada con U-Boot según la figura 9.5 tiene una incidencia del 26,2% en donde se observa que hay una reducción en el consumo de hormigón en este modelo, en el caso del acero se observa 22,6% y 19,6% respectivamente, lo que podría ser una reducción considerable, en el encofrado y mano de obra se tienen índices de 48.1% y 28,2 % que es una reducción bastante favorable en el caso de las losas aligeradas, a pesar de que el U-boot tenga una incidencia del 25,9% en el caso de la losa aligerada, en este modelo ya se observa una ventaja económica, que podría hacer al modelo N°2 una opción a la hora de optar por una luz de 6m.

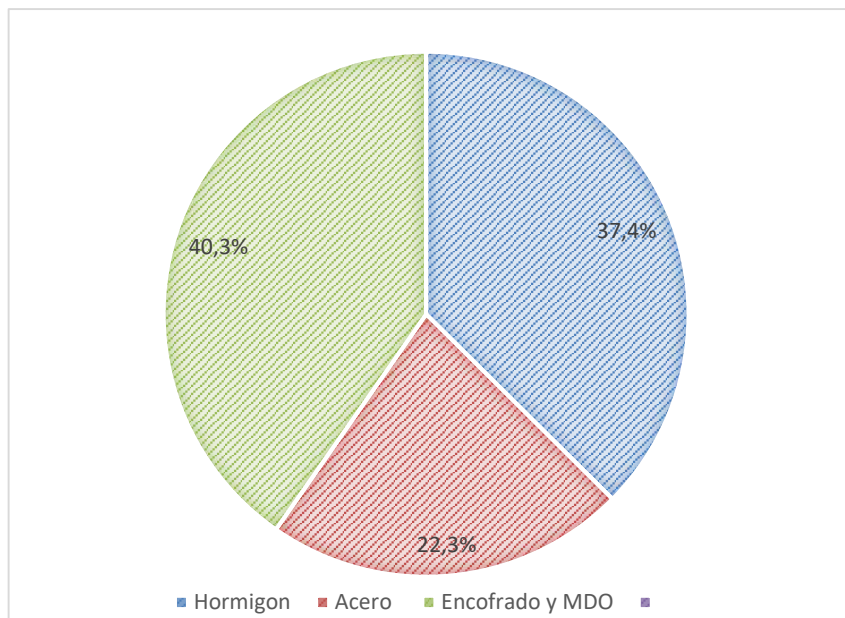


Figura 9. 6 – Incidencia de cada uno de los rubros sobre el costo total del Modelo N° 3 – Losa Maciza **Fuente:** Elaboración Propia

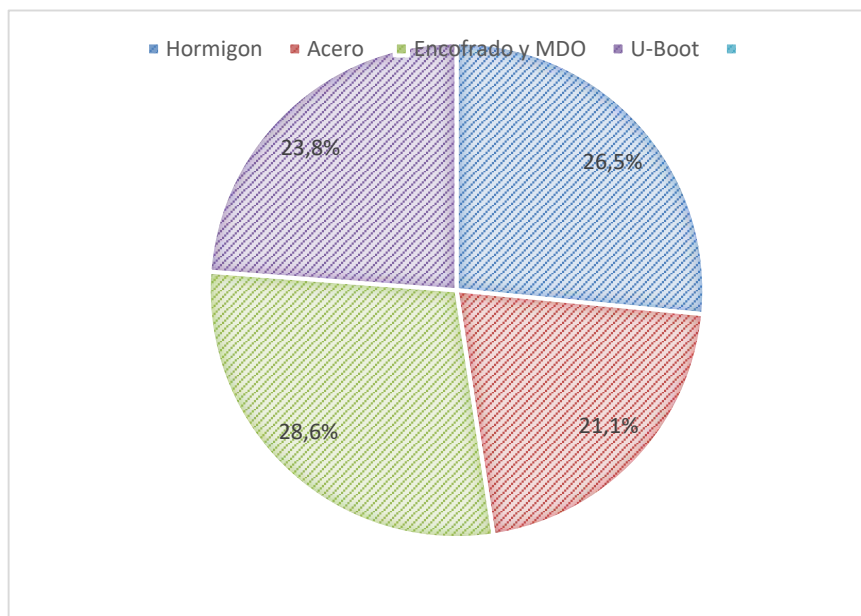


Figura 9. 7– Incidencia de cada uno de los rubros sobre el costo total del Modelo N° 3 – Losa Aligerada **Fuente:** Elaboración Propio

En el modelo N°3 como se muestra en la figura 9.6, la incidencia del hormigón sobre el costo total es de 37,4% en la losa maciza y 26,5% en el caso de la losa aligerada con U-boot, como en los dos modelos anteriores se observa lo mismo, que hay un ahorro considerable en el hormigón, en el acero se observa una incidencia 22,3% y 21,1% respectivamente, en los encofrados y mano de obra hay una reducción considerable como vimos más arriba en los modelos anteriores, en este caso las incidencias son de 40,3% y 28,6% que es bastante considerable y en la losa aligerada el U-boot tiene una incidencia del 23,8%, que en los modelos anteriores parecía un punto desfavorable, en este modelo de todas maneras es económico con una ventaja del 6,95% sobre la losa maciza.

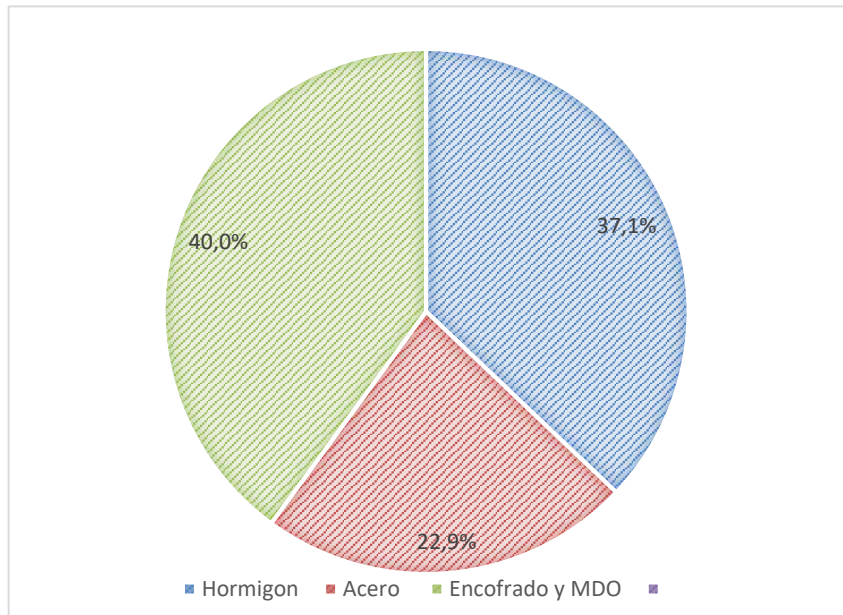


Figura 9. 8 – Incidencia de cada uno de los rubros sobre el costo total del Modelo N° 4 – Losa Maciza **Fuente:** Elaboración Propia

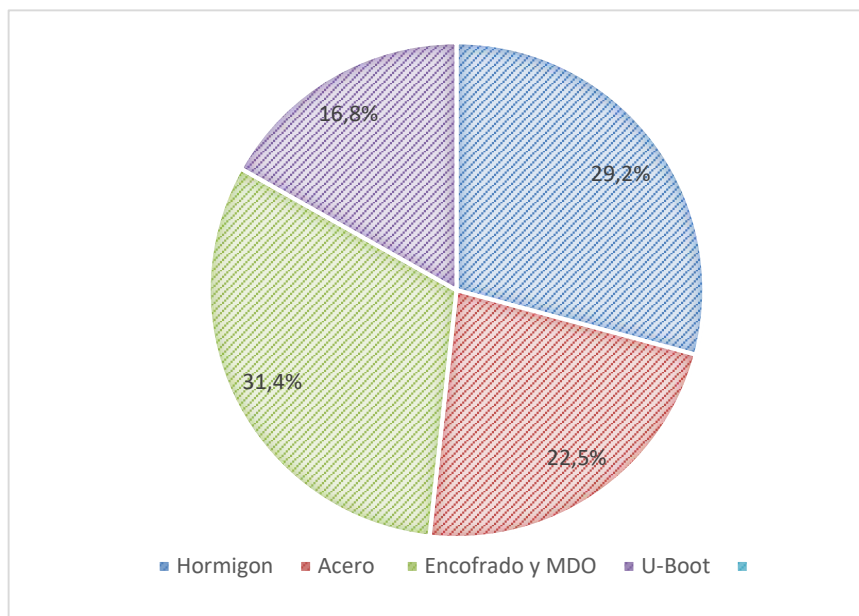


Figura 9. 9 – Incidencia de cada uno de los rubros sobre el costo total del Modelo N° 4 – Losa Aligerada **Fuente:** Elaboración Propia

En el modelo N°4 la incidencia del hormigón en la losa maciza es de 37,1% como se muestra en la figura 9.8 y en la losa aligerada es de 22,9% observando la figura 9.9 que también es una reducción bastante favorable, en el acero se encuentra una incidencia del 22,9% y 22,5% que como en casos anteriores no es demasiado pero ya es considerable cuando estamos calculando losas de grandes luces, en el caso del encofrado y mano de obra se ve un resultado muy favorable, la incidencia es de 40% y 31,4% y el U-boot tiene una incidencia del 16,8% del costo total de la losa aligerada, a pesar de ser un elemento con un costo elevado, en este modelo no incide demasiado como en el caso del modelo N°2 ya que de todas maneras económicamente halando es 5,24% más favorable que la losa maciza.

9.3. Análisis de una estructura utilizando el sistema tradicional de losas macizas y el sistema de losas aligeradas con U-boot.

Se realiza esta comparación con el fin de observar cuales serían las ventajas del U-boot con respecto a la losa maciza tradicional, si es que los hubiere.

Para la primera comparación se utiliza el siguiente plano, como se muestran en las figuras 9.10 y 9.11, con una pilarización de 5,25m en (x) y 7m en (y).

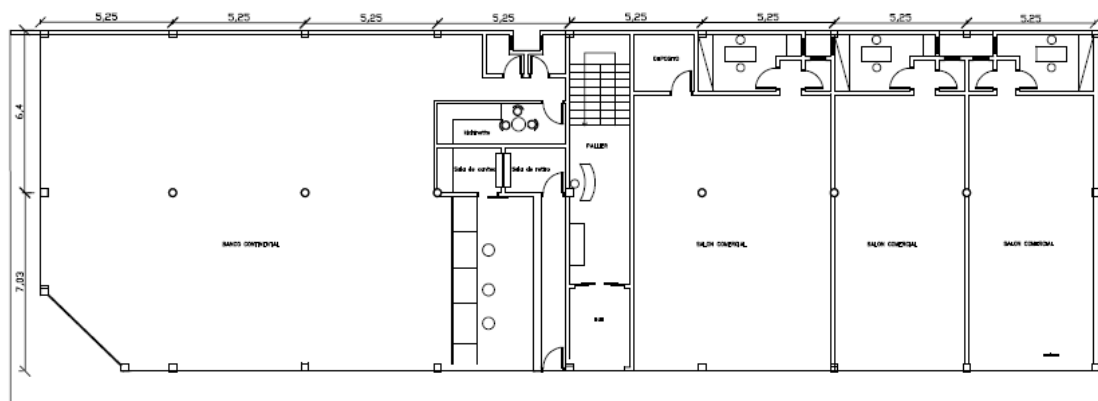
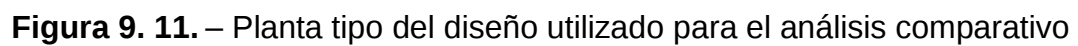


Figura 9. 10. – planta baja del diseño utilizado para el análisis comparativo

Fuente: Ing. Civil Fredy Ramírez Villanueva



Se realizaron 3 análisis los cuales fueron:

- Estos análisis fueron realizados con el fin de entender las ventajas y desventajas de estos sistemas, a continuación se detallan los resultados obtenidos:

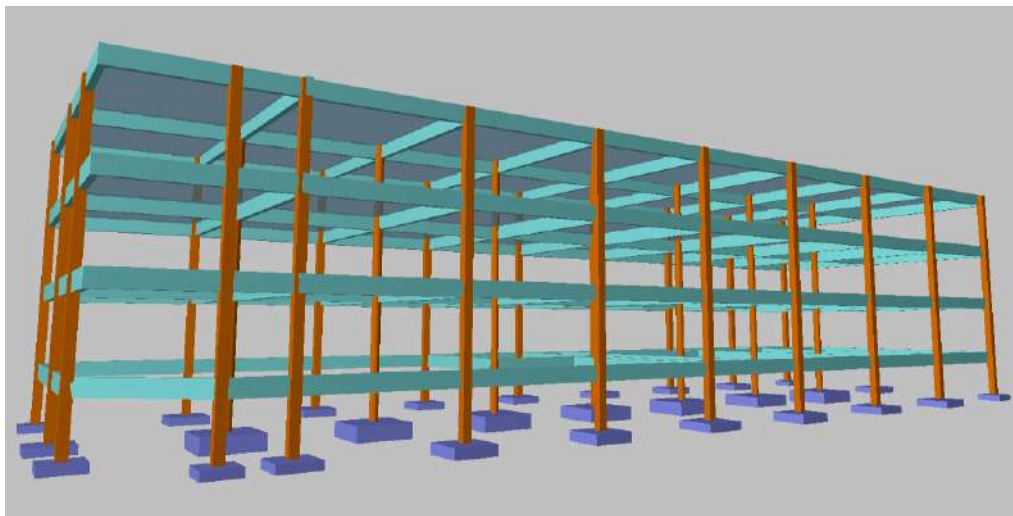


Figura 9. 12- 3D del diseño de losas macizas con vigas

Elemento Estructural	Hormigón (m3)	Peso de Varillas en (Kg)
Losa	183,43	16.211
vigas	114	8.359
Pilares	24,09	4.450
Fundaciones	40	1.900
Total	361,52	30.920

Tabla 9. 2 – Consumo de hormigón y acero para las losas macizas con vigas

Rubro	Unidad	Cantidad	costo unitario	total Gs
Hormigon fck 250	m3	361,52	650.000	234.988.000
Acero	kg	30.920	5.500	170.060.000
Encofrado y MDO	m3	361,52	700.000	253.064.000
Total				658.112.000

Tabla 9. 3- Presupuesto obtenidos del análisis con losas macizas y vigas.

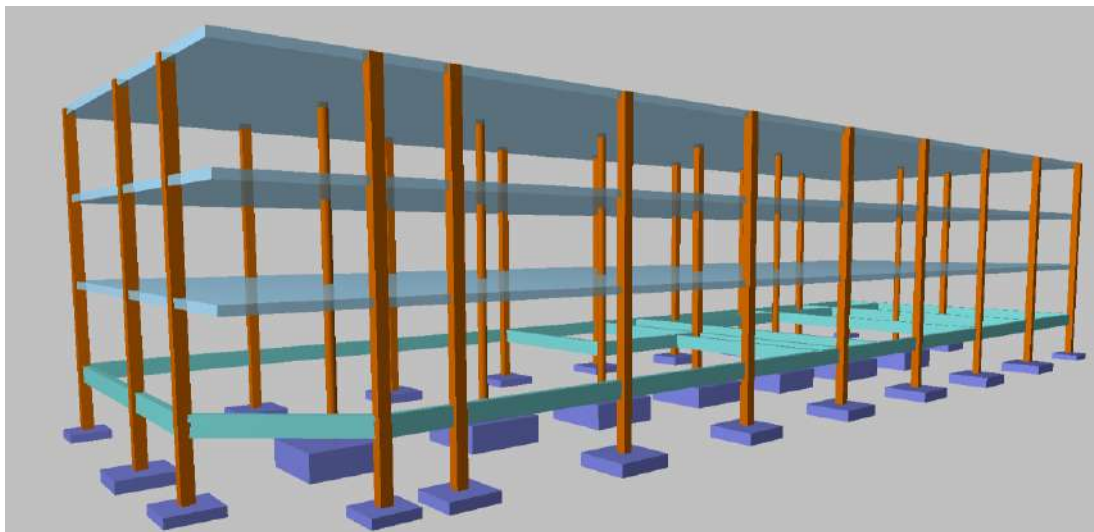


Figura 9. 13 - 3D del diseño de losas planas macizas

Elemento Estructural	Hormigón (m3)	Peso de Varillas en (Kg)
Losa	437,97	22.200
vigas	23,86	1.148
Pilares	24,04	5.626
Fundaciones	67.50	2.491
Total	554.09	31.470

Tabla 9. 4 – Consumo de hormigón y acero para las losas planas macizas

Rubro	Unidad	Cantidad	costo unitario	total Gs
Hormigon fck 250	m3	553,09	650.000	360.158.500
Acero	kg	31.470	5.500	173.084.780
Encofrado y MDO	m3	553,09	700.000	387.163.000
Total				920.406.280

Tabla 9. 5 - Presupuesto obtenido del análisis con losas planas macizas

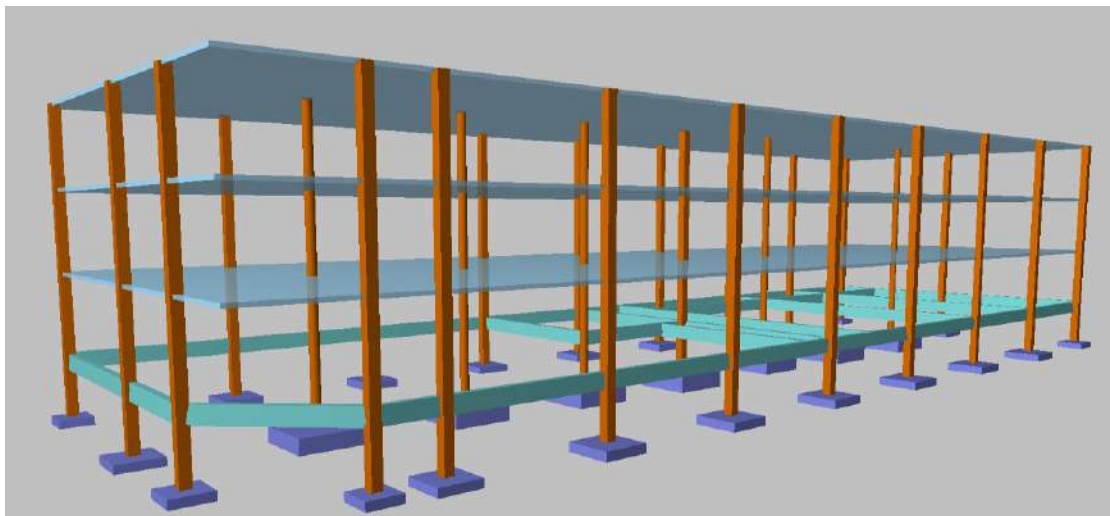


Figura 9. 14 - 3D del diseño de losas planas aligeradas con U-boot

Elemento Estructural	Hormigón (m3)	Peso de Varillas en (Kg)
Losa	235,68	21000
vigas	23,88	1150
Pilares	23,46	4652
Fundaciones	36.04	1648
Total	319,05	28.450

Tabla 9. 6 – Consumo de hormigón y acero para las losas planas aligeradas con U-Boot.

Rubro	Unidad	Cantidad	costo unitario	total Gs
Hormigon fck 250	m3	319,05	650.000	207.350.000
Acero	kg	28.450	5.500	156.473.460
Mano de Obra	m3	319,05	700.000	223.300.000
U-Boot	m2	1809	100.000	180.900.000
Total losa aligerada				768.023.460

Tabla 9. 7 - Presupuesto obtenido del análisis con losas planas aligeradas.

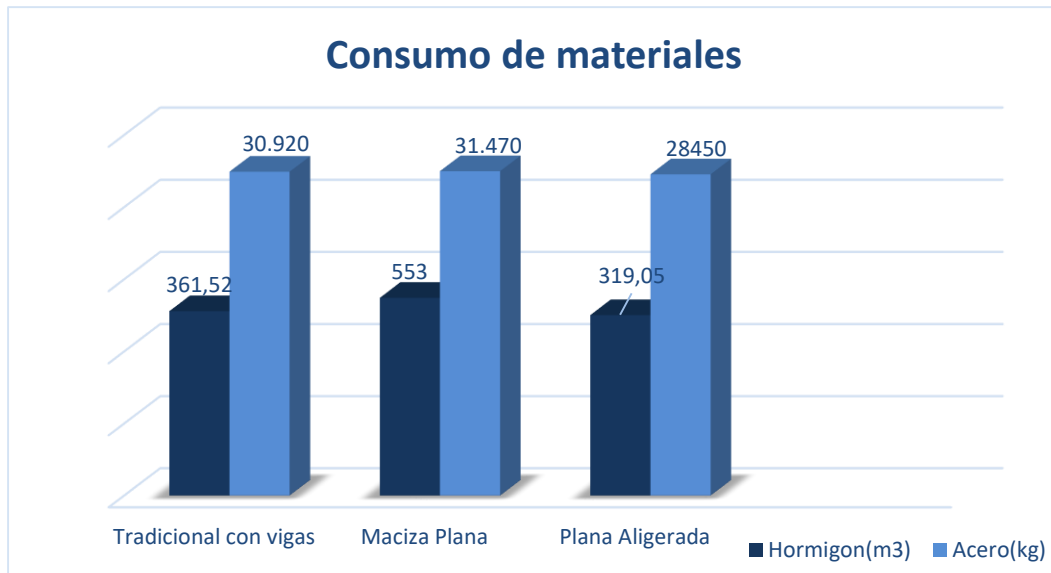


Figura 9. 15 - Comparación de consumo de hormigón y acero en los distintos análisis realizados.

Fuente: Elaboración Propia

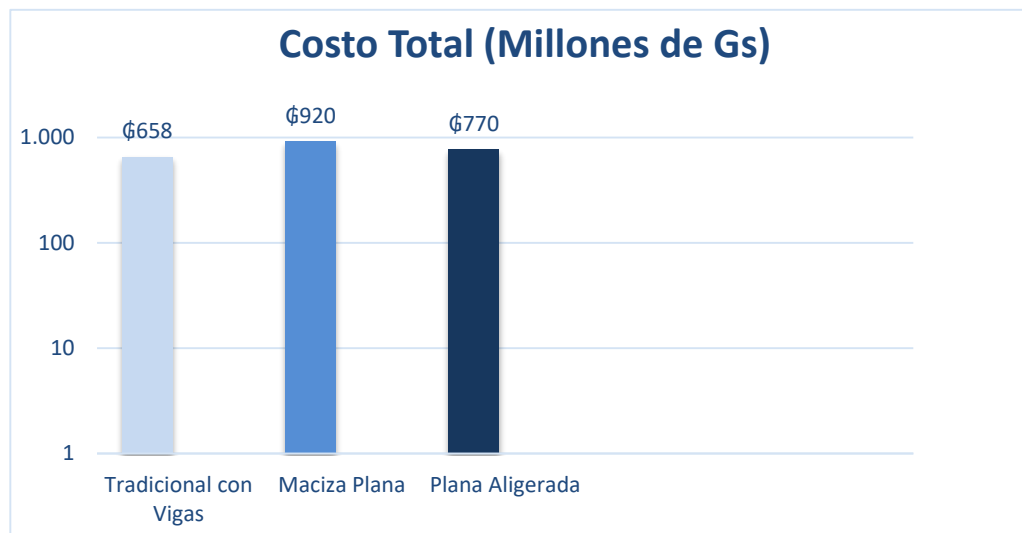


Figura 9. 16 - Costo Total de los diferentes análisis. **Fuente:** Elaboración propia

Conclusión del modelo con luces de 5 y 7 metros

Al realizar el análisis se obtuvieron diferentes resultados que se detallan a continuación:

- En el modelo de losas macizas tradicionales con vigas, se obtuvieron resultados bastante favorables en cuanto a lo económico, resulto ser 30% más económica que la losa maciza plana y 16% más económica que la losa plana aligerada con el sistema U-boot.
- Entre los tres análisis realizados, el más desfavorable resulto ser el de la losa maciza plana, por lo que se descarta para este tipo de estructuras con luces pequeñas.
- La losa aligerada con el sistema U-boot demostró un mejor comportamiento estructural entre los tres análisis, reduciendo el consumo de hormigón y acero de una forma bastante favorable con respecto a los modelos anteriores, la única desventaja es el costo de los elementos aligerantes, que corresponde un 23% del costo total de la estructura, a pesar de la disminución de hormigón y acero, esto hace que el costo de la estructura sea desfavorable en comparación al sistema tradicional.
- En el caso de ser una exigencia arquitectónica, en la que únicamente es posible utilizar un sistema de losas planas, se recomienda la utilización del sistema de losas aligeradas con U-boot, puesto que en comparación con la losa plana maciza tiene una ventaja económica del 17% lo que la hace muy rentable en el caso de losas planas.

Para la segunda comparación se utiliza el siguiente plano, como se muestran en las figuras 9.1 y 9.11, con una pilarización de 8m en (x) y 7m en (y).

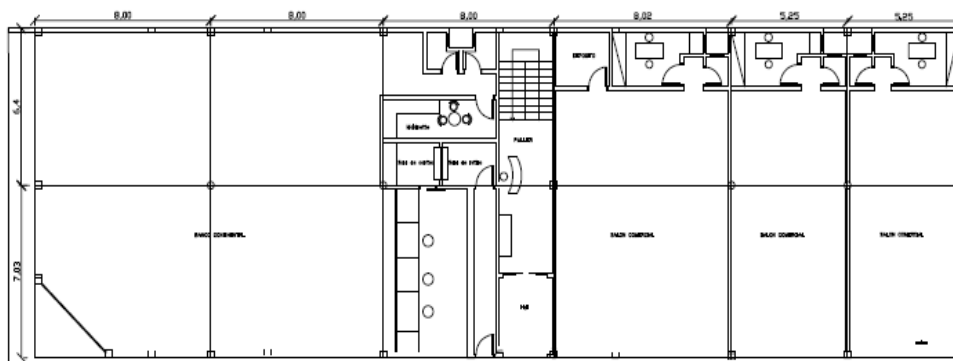


Figura 9. 17 – planta baja del diseño utilizado para el análisis comparativo

Fuente: Ing. Civil Fredy Ramírez Villanueva

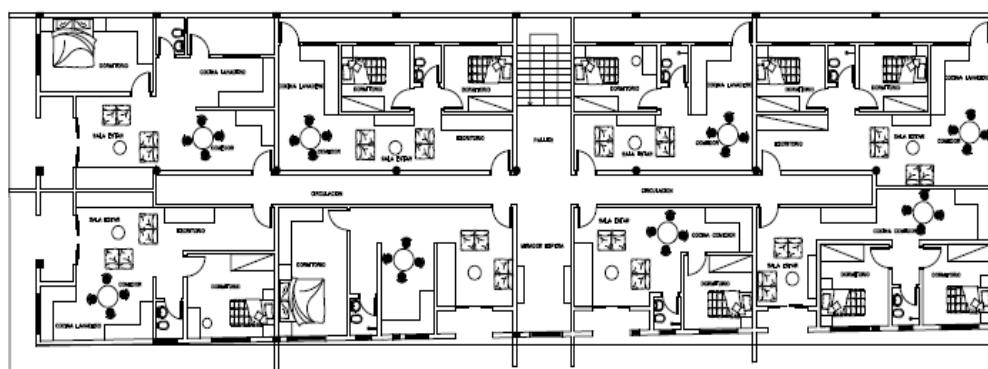


Figura 9. 18 – planta tipo del diseño utilizado para el análisis comparativo

Fuente: Ing. Civil Fredy Ramírez Villanueva

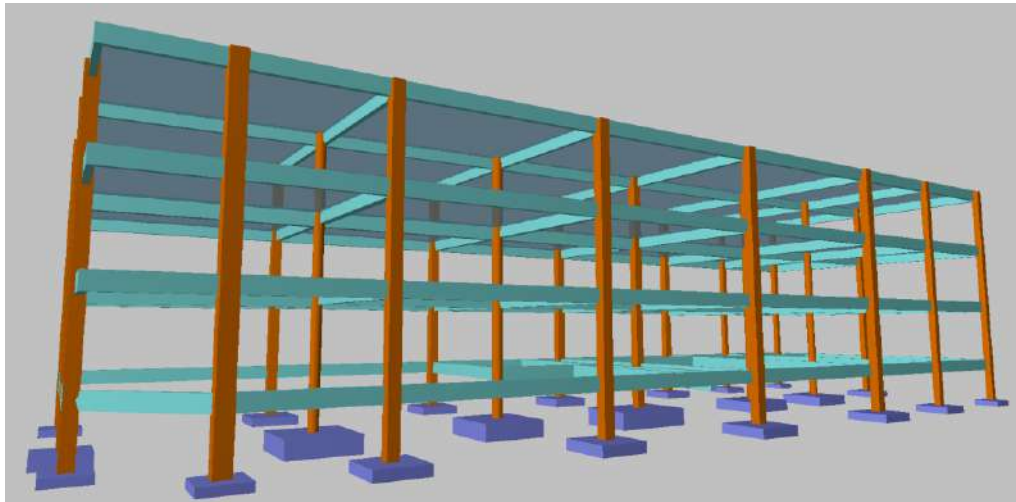


Figura 9. 19 - 3D del diseño de losas macizas con vigas

Elemento Estructural	Hormigón (m3)	Peso de Varillas en (Kg)
Losa	230	20820
vigas	126,47	9473
Pilares	31,44	4610
Fundaciones	45.31	1766
Total	433.22	36.669

Tabla 9. 8 – Consumo de hormigón y acero para las losas macizas con vigas

Rubro	Unidad	Cantidad	costo unitario	total Gs
Hormigon fck 250	m3	433,22	650.000	281.593.000
Acero	kg	36.669	5.500	201.677.190
Encofrado y MDO	m3	433,22	700.000	303.254.000
total losa aligerada				786.524.190

Tabla 9. 9 - Presupuesto obtenido del análisis con losas macizas con vigas.

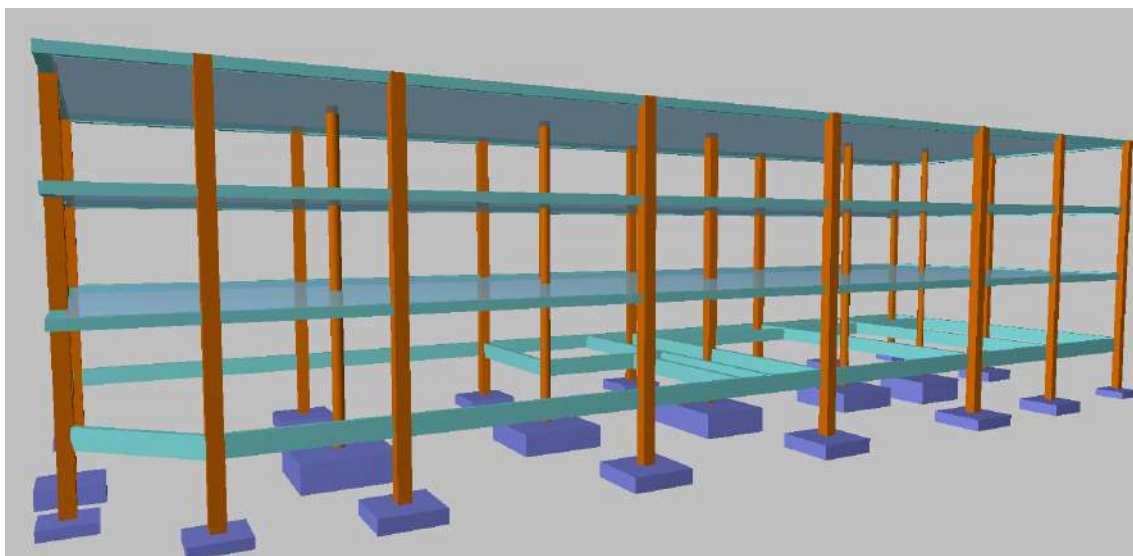


Figura 9. 20 - 3D del diseño de losas planas macizas

Elemento Estructural	Hormigón (m3)	Peso de Varillas en (Kg)
Losa	488,22	27.600
vigas	23,87	1.148
Pilares	28,76	5.107
Fundaciones	66,25	2.375
Total	607,1	36.227

Tabla 9. 10 – Consumo de hormigón y acero para las losas planas maciza.

Rubro	Unidad	Cantidad	costo unitario	total Gs
Hormigon fck 250	m3	607,8	650.000	395.070.000
Acero	kg	36.227	5.500	199.248.500
Mano de Obra	m3	607,85	700.000	425.495.000
total Losa maciza				1.019.813.500

Tabla 9. 11 - Presupuesto obtenido del análisis con losas planas macizas

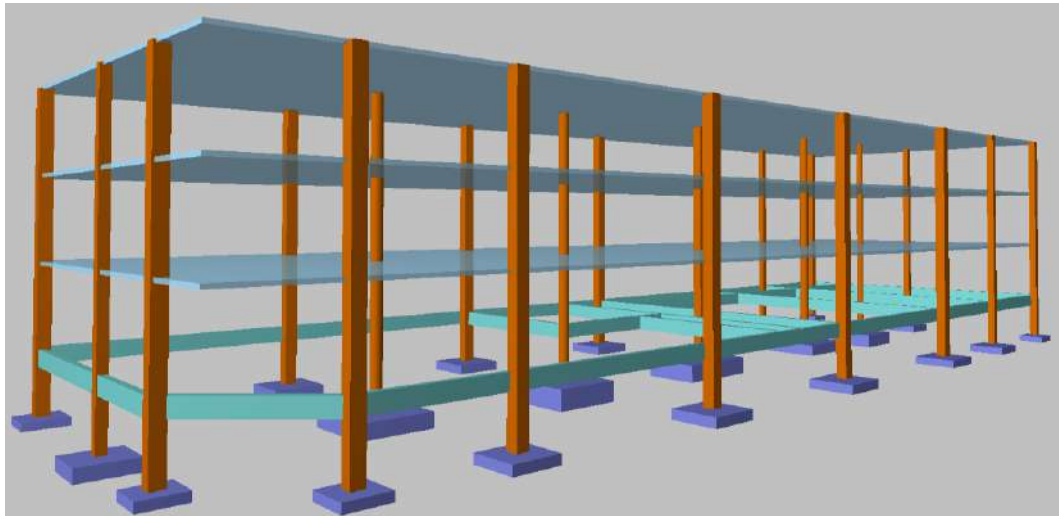


Figura 9. 21 - 3D del diseño de losas planas aligeradas con U-boot

Elemento Estructural	Hormigón (m3)	Peso de Varillas en (Kg)
Losa	252,69	24.300
vigas	23,8	1.047
Pilares	24,60	5.030
Fundaciones	37,5	1.601
Total	338,59	31.977

Tabla 9. 12 – Consumo de hormigón y acero para las losas planas aligeradas con U-Boot.

Rubro	Unidad	Cantidad	costo unitario	total Gs
Hormigon fck 250	m3	338,59	650.000	220.083.500
Acero	kg	31.977	5.500	175.873.500
Mano de Obra	m3	338,59	700.000	237.013.000
U-Boot	m2	1809	100.000	180.900.000
Total losa aligerada				813.870.000

Tabla 9. 13 - Presupuesto obtenido del análisis con losas planas aligeradas.

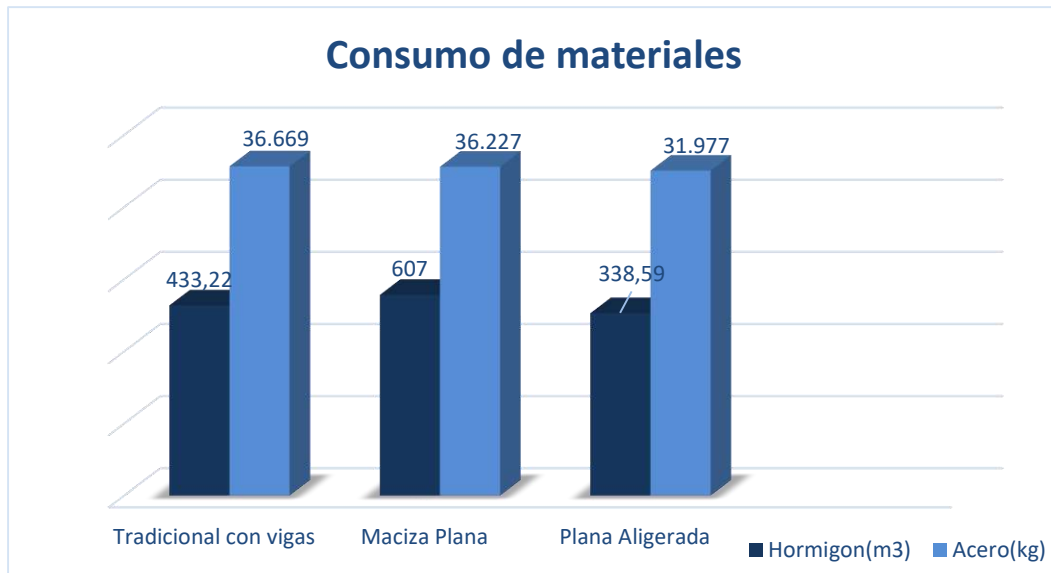


Figura 9. 22 - Comparación de consumo de hormigón y acero en los distintos análisis realizados.

Fuente: Elaboración Propia

Figura 9. 23 - Costo Total de los diferentes análisis.



Fuente: Elaboración propia

Conclusión del modelo con luces de 8 y 7 metros

Al realizar el análisis se obtuvieron diferentes resultados que se detallan a continuación:

- En el modelo de losas macizas tradicionales con vigas, se obtuvieron resultados favorables en cuanto a lo económico, resulto ser 23% más económica que la losa maciza plana y 4,4% más económica que la losa plana aligerada con el sistema U-boot.
- Al utilizar una losa maciza plana, en los resultados se pueden observar que para que cumpla con todos los requisitos estructurales, se debería utilizar una losa de gran espesor, lo que conlleva a una gran cantidad de hormigón y por ende aporta peso propio a la estructura, lo que repercute en pilares y fundaciones.
- La losa aligerada con el sistema U-boot demostró un mejor comportamiento estructural entre los tres análisis, reduciendo el consumo de hormigón y acero de una forma bastante favorable con respecto a los modelos anteriores, la única desventaja es el costo de los elementos aligerantes, que corresponde un 22.2% del costo total de la estructura, a pesar de la disminución de hormigón y acero, esto hace que el costo de la estructura sea desfavorable en comparación al sistema tradicional.
- En este caso, al ampliar las luces a 8m, se demuestra que el sistema de losas aligeradas con U-Boot resulta una buena opción a la hora de tener grandes luces, a pesar de ser 4,4% más costosa que una losa maciza

convencional con vigas, esta resulta mejor, porque en el modelo mencionado anteriormente, para lograr grandes luces, se deberían usar vigas de grandes cantos para que estas puedan cumplir con las exigencias estructurales, lo que también a la hora de construir y si se desea aprovechar los espacios resultan una molestia y lleva a grandes gastos, para la colocación de cielo raso o algún elemento que lo haga lucir más estético.

- Las losas macizas planas y las losas planas aligeradas con U-Boot tienen una diferencia del 20% económicamente hablando, lo que hace que el U-boot sea más conveniente a la hora de invertir en estructuras con losas planas y de grandes luces.

CAPITULO 10

CONCLUSIONES

10.1 CONCLUSIONES CON RESPECTO A LOS MODELOS ANALIZADOS

- Al usar el sistema U-Boot, es posible ahorrar gran cantidad de concreto y acero, también es posible reducir el peso propio de la estructura. En comparación con la losa maciza, de acuerdo a los modelos estudiados, tiene menos deflexiones y tensiones.
- El costo de la construcción de la losa también se reducirá con U-Boot.
- Como las tensiones desarrolladas son menores, la capacidad de carga de la losa puede ser aumentada.
- De acuerdo a los modelos estudiados, la ventaja en cada modelo sería la reducción del peso, desde el punto de vista estructural, puesto que gracias a esta reducción es posible reducir dimensión de pilares y elementos de fundación.
- Desde el punto de vista económico, el sistema U-boot es recomendable a partir de los 6m de luz para adelante.

- En los modelos estudiados, se observa que el modelo más óptimo es el de 7m, en donde la ventaja económica es bastante considerable.
- En todos los modelos observados, el uso del sistema U-Boot es mucho más recomendable, estructuralmente hablando, pero desde el punto vista económico, se lo utilizaría para losas a partir de 7m de luz.

CAPITULO 11

RECOMENDACIONES

11.1. RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL DISEÑO DE LOSAS A PARTIR DE LOS MODELOS ESTUDIADOS.

Una vez culminado con el estudio de los diferentes modelos, y observado los resultados del comportamiento ante las deformaciones, las tensiones y además de la influencia en las fundaciones y el costo de construcción en la estructura:

- Verificar que las deformaciones de la losa en el estado inicial y total de cargas se encuentren dentro de las admisibles.
- Realizar un análisis económico de todas las variantes posibles para una misma planta arquitectónica.
- La implementación de este sistema de losas resulta factible y económico para luces a partir de los 6 metros.

- En losas con luces de 7m resulta más óptima la utilización del sistema U-Boot, puesto que es donde se encuentran mayores ventajas económicas y cumple con todas las solicitudes.
- Para luces pequeñas resulta mucho más conveniente la utilización de losas macizas convencionales, porque a pesar de lograr una reducción en el hormigón, en la utilización del U-Boot el costo es más elevado.

CAPITULO 12

APÉNDICE A: MODELO N°1

A.A: Plano de Arquitectura

A.1: Detalle de losa – Armadura longitudinal Inferior

A.2: Detalle de losa – Armadura transversal Inferior

A.3: Detalle de losa – Armadura longitudinal Superior

A.4: Detalle de losa – Armadura transversal Superior

A.5: Detalle de losa – Armadura de Punzonamiento.

APÉNDICE B: MODELO N°2

B.B: Plano de Arquitectura

B.1: Detalle de losa – Armadura longitudinal Inferior

B.2: Detalle de losa – Armadura transversal Inferior

B.3: Detalle de losa – Armadura longitudinal Superior

B.4: Detalle de losa – Armadura transversal Superior

B.5: Detalle de losa – Armadura de Punzonamiento.

APÉNDICE C: MODELO N°3

C.C: Plano de Arquitectura

C.1: Detalle de losa – Armadura longitudinal Inferior

C.2: Detalle de losa – Armadura transversal Inferior

C.3: Detalle de losa – Armadura longitudinal Superior

C.4: Detalle de losa – Armadura transversal Superior

C.5: Detalle de losa – Armadura de Punzonamiento.

APÉNDICE D: MODELO N°4

D.D: Plano de Arquitectura

D.1: Detalle de losa – Armadura longitudinal Inferior

D.2: Detalle de losa – Armadura transversal Inferior

D.3: Detalle de losa – Armadura longitudinal Superior

D.4: Detalle de losa – Armadura transversal Superior

D.5: Detalle de losa – Armadura de Punzonamiento.

BIBLIOGRAFIA

- 1- Economic Concrete Frame Elements to Eurocode
- 2- **Ing. Ontiveros Aguilar, Joel.** Introducción al Método del Elemento Finito (MEF).
- 3- How to Design Concrete Structures using Eurocode
- 4- (mpa) The Concrete Centre
- 5- **Jiménez Montoya.** Hormigón Armado 15ta. Edición. 2011
- 6- **Eurocódigo 2:** Proyecto de estructuras de hormigón
- 7- Calculo de flechas en vigas de hormigón armado utilizando diagrama momento – curvatura. **Fredy G. Ramirez; Osvaldo R. Romero; Sergio D. Cardozo.**
- 8- Modelling and analysis of flyover deck slab with u-boot technology. **Dr. H. Sudarsana Rao.**
- 9- How to design reinforced concrete flat slabs using Finite Element Analysis.
- 10- U-Boot - www.daliform.com

